

Федеральное агентство Российской Федерации по атомной энергии
Федеральное государственное унитарное предприятие
Государственный Научный Центр Российской Федерации
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. А.И. Лейпунского

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

НЕЙТРОННЫХ ДАННЫХ

РОСФОНД

**(Российская библиотека файлов
оцененных нейтронных данных)**

ПОЛНЫЙ ПАКЕТ ОБОСНОВАНИЙ ОТБОРА ОЦЕНОК

**Работа выполнена по заказу Минобрнауки РФ
(гос.контракт № 02.434.11.5001 от 01.06.2005,
доп.соглашение 1 от 17 марта 2006)**

Обнинск, 2006 г.

Посвящается памяти друга и учителя профессора,
БОНДАРЕНКО Игоря Ильича –
организатора и руководителя работ по измерению,
оценке и уточнению в реакторных экспериментах
нейтронных данных для расчета быстрых
реакторов и радиационной защиты;
инициатору применения атомной энергетики в
космосе;
разработчику импульсного быстрого реактора ИБР.

В день завершения настоящей работы, 14 октября
2006 г., вдохновенному ученому Игорю Ильичу
Бондаренко исполнилось бы 80 лет.

РОСФОНД- ЭНЦИКЛОПЕДИЯ НЕЙТРОННЫХ ДАННЫХ

Предисловие

В 2005 г. Минобрнаука России заключила с ГНЦ РФ ФЭИ договор на работу: «Создание национальной библиотеки нейтронных данных». Договор был заключен на основании решения конкурсной комиссии, выбравшей предложение о проведении этой работы среди многих других по приоритетному направлению «Энергетика и энергосбережение» - лот ЭЭ.12.1/001. Все результаты работы состоят из трёх частей –

- собственно библиотеки РОСФОНД в текстовом формате ENDF/B-6;
- текстовых обоснований отбора файлов оцененных нейтронных данных в формате pdf (к которым и относится настоящее предисловие);
- перевода описания формата ENDF-6 на русский язык (также в формате pdf).

Библиотека РОСФОНД содержит оцененные нейтронные данные для всех стабильных и долгоживущих (более 1 суток) нуклидов. Таких нуклидов оказалось 676. Кроме того, в РОСФОНД включены данные для десяти более короткоживущих изотопов, обладающих высокими сечениями захвата или деления, так что при облучении в высоких потоках тепловых нейтронов заметная доля ядер этих изотопов успевает трансмутировать за свое короткое время жизни. Типичным примером является ^{135}Xe , период полураспада которого составляет только 9.1 часа, но который обладает столь высоким сечением поглощения нейтронов, что в энергетическом реакторе на тепловых нейтронах и за время своей короткой жизни успевает поглотить нейтрон и тем самым притормозить цепную реакцию.

В библиотеку включены также данные о законах рассеяния нейтронов на ядрах, связанных в молекулы или кристаллы – для 20 материалов.

В постановке работы отнюдь не предполагалось создание новых оригинальных оценок нейтронных данных для всех рассматриваемых нуклидов – подобная работа потребовала бы не одного десятилетия труда большего научного коллектива, чем тот, который был привлечен к настоящей работе. Задача состояла в том, чтобы отобрать из файлов оцененных данных, принятых в современных версиях национальных библиотек, наиболее надежные версии и обосновать этот выбор. Рассматривались, главным образом, данные следующих библиотек – американской ENDF/B-VI и ENDF/B-VII, японской JENDL-3.3, западно-европейской JEFF-3.1 (включающей активационную библиотеку EAF-2003) и отечественных библиотек БРОНД-2 (3) и ФОНД-2.2. Заметим, что все зарубежные библиотеки являются национальными только в том отношении, что их данные принимаются в качестве стандартных в соответствующем государстве (государствах). Каждая из них содержит многочисленные заимствования из других библиотек, отобранные файлы для важнейших материалов составлялись интернациональными коллективами. Национальным являлся лишь отбор файлов в библиотеку. Именно такой подход был принят и при создании российской национальной библиотеки.

Нередко в процессе отбора выяснялось, что получения достаточно надежного файла требуется корректировка тех или иных данных, сборка файла из разных оценок, а некоторых изотопов и полная переоценка данных на основе новой экспериментальной информации. Все сделанные изменения и коррекции подробно описываются и обосновываются в излагаемой ниже текстовой документации к библиотеке РОСФОНД.

Ответственность за отбор каждого файла в библиотеку РОСФОНД и обоснование этого отбора несет определенный специалист (специалисты). Фамилии ответственных указаны в заключительных разделах соответствующих текстовых обоснований, а также в

заголовочных секциях файлов оцененных данных. Общее редактирование документации по РОСФОНДу осуществлял М.Н. Николаев. Алгоритмическая проверка файлов оцененных данных путем их переработки в формы, пригодные для непосредственного использования в расчетных программах (формат БНАБ, формат ACE для MCNP) проводилась В.Н.Кошечевым. По всем вопросам, связанным с выявлением погрешностей в файлах библиотеки РОСФОНД или в их обоснованиях, с результатами использования данных РОСФОНД в инженерных расчетах просим обращаться к названным специалистам по адресу abbn@ippe.ru.

0. Структура и состав библиотеки РОСФОНД

0.1. Структура библиотеки

Библиотека РОСФОНД составлена в формате ENDF-6.

Согласно этому формату библиотека имеет следующую структуру.

Главной структурной единицей является материал: изотоп или – редко – естественная смесь изотопов. Материал идентифицируется 4-значным номером МАТ.

Данные для материала группируются в файлы, идентифицируемые номерами MF и различающиеся типом хранимых в них данных.

В каждом файле данные упорядочены в секции с номерами MT, каждая из которых, как правило, идентифицирует определенную реакцию взаимодействия нейтронов с ядром-мишенью, определенном номером МАТ. Некоторые исключения из правила будут изложены ниже.

Файл MF=1 обязательно содержит секцию MT=451 с текстовым пояснением к оцененным данным и форматным содержанием всех оцененных данных. Для делящихся ядер в этом файле присутствуют также секции:

MT=452 (среднее число нейтронов деления);

MT=455 (выход запаздывающих нейтронов и эффективные постоянные распада групп предшественников);

MT=456 (среднее число мгновенных нейтронов);

MT=458 (параметры энерговыделения при делении)

Файл MF=2 содержит единственную секцию MT-151, которая может содержать две подсекции, описывающие, соответственно, область разрешенных резонансов и область неразрешенных резонансов.

Файл MF=3 содержит таблицы энергетических зависимостей нейтронных сечений:

MT=1 – полное сечение.

MT=2 – сечение упругого рассеяния.

MT=3 – суммарное сечение неупругих взаимодействий.

MT=4 – суммарное сечение неупругого рассеяния.

MT=16 – реакция (n,2n).

MT=17 – реакция (n,3n).

MT=18 – суммарная реакция деления ядра.

MT=19 – реакция (n,f) – деление ядра сразу после захвата нейтрона.

MT=20 – реакция (n,n'f) – деление ядра после испускания нейтрона.

MT=21 – реакция (n,2nf) – деление ядра после испускания 2-х нейтронов.

MT=22 – реакция (n,3nf) – деление ядра после испускания 3-х нейтронов.

MT=23 – реакция (n,3 α).

MT=24 – реакция (n,2n α).

MT=28 – реакция (n,p).

MT=29 – реакция (n, n2 α)

MT=30 – реакция (n, 2n2 α)

MT=32 – реакция (n,d).
MT=33 – реакция (n,t)
MT=34 – реакция (n, n³He)
MT=35 – реакция (n,nd2 α)
MT=36 – реакция (n,nt2 α)
MT=37 – реакция (n,4n)
MT=38 – реакция (n,2nf) – деление после испускания 3-х нейтронов.
MT=41 – реакция (n,2np).
MT=42 – реакция (n,3np).
MT=44 – реакция (n,n2p).
MT=45 – реакция (n,npα).
MT=51, 52, ..., 90 – неупругие рассеяние с возбуждением 1-го, 2-го, ..., 40-го дискретного уровня ядра-мишени.
MT=91 – неупругое рассеяние с возбуждением непрерывного спектра уровней ядра-мишени.
MT=102 – радиационный захват
MT=103 – реакция (n,p)
MT=104 – реакция (n,d).
MT=105 – реакция (n,t).
MT=106 – реакция (n, ³He).
MT=107 – реакция (n,α).
MT=108 – реакция (n,2α)
MT=109 – реакция (n,3α)
MT=111 – реакция (n,2p)
MT=112 – реакция (n,pα)
MT=113 – реакция (n,t2α)
MT=114 – реакция (n,d2α)
MT=115 – реакция (n,pd)
MT=116 – реакция (n,pt)
MT=117 – реакция (n,d α)

Файл MF=4 содержит угловые распределения вторичных нейтронов (испускаемых в реакциях MT<100)

Файл MF=5 содержит энергетические распределения вторичных нейтронов (кроме упругого рассеяния и неупругого рассеяния с возбуждением дискретных уровней)

Файл MF=6 содержит коррелированные энерго-угловые распределения вторичных нейтронов и (необязательно) других продуктов реакции – ядер- продуктов реакции, гамма-квантов и др.

Файл MF=7 содержит информацию о законах рассеяния тепловых нейтронов на атомах, связанных в молекулы и (или) кристаллы.

Файл MF=8 а) содержит информацию о характеристиках распада радиоактивных ядер- продуктах реакций типа MT, сечения которых приведены в файлах MF=3 и MA=10 или вероятности образования которых – в файле MF=9. **В библиотеке РОСФОНД эти данные не приводятся, поскольку экспертная оценка качества этой информации не предусматривалась техническим заданием.**

б) Данные о независимых (MT-457) и кумулятивных (MT-459) выходах продуктов деления. В РОСФОНД они включены для обеспечения полноты информации об образовании радионуклидов в отработавшем ядерном топливе.

Файл MF=9 содержит данные о вероятностях образования изомерных состояний в нейтронных реакциях. Структура аналогична структуре файла MF=3, но

каждая секция делится на две (изредка – на три) подсекции с вероятностями образования соответствующих состояний.

Файл MF=10 аналогичен по структуре файлу MF=3. В РОСФОНДе используется для представления данных о сечениях образования изомеров при неупругом рассеянии (т.е. содержит только секцию MT=4).

Файл MF=12 содержит данные о числе фотонов, испускаемых в нейтронных реакциях (определенных номером секции MT) или о вероятностях радиационных переходов между уровнями ядра-продукта.

Файл MF=13 содержит сечения образования фотонов. Обычно используется для описания испускания фотонов в составных реакциях (MT=3, MT=4).

Файл MF=14 содержит информацию об угловых распределениях фотонов, испускаемых в нейтронных реакциях.

Файл MF=15 содержит непрерывные энергетические спектры фотонов (дискретные спектры описаны в файле MF-12).

Файлы MF=30,31,32,33,34,35,40 предназначены для представления данных о погрешностях нейтронных данных разного типа и корреляциях этих погрешностей. В настоящее время мнения специалистов относительно погрешностей оцененных нейтронных данных далеко не устоялись (отличия в 10 раз – не редкость). Ещё больше различия во мнениях о степени скоррелированности этих погрешностей. Поскольку техническим заданием представление ковариационных данных не предусматривалось, да и не могло быть выполнено имевшимися силами за отведенный срок, эта информация в РОСФОНД сейчас не включена.

Формат ENDF предусматривает хранение информации о ядерных данных в целом ряде отдельных подбиблиотек – данные о фото-ядерных взаимодействиях, характеристики радиационного распада радионуклидов, взаимодействие с ядрами заряженных частиц и, конечно, данные о взаимодействии нейтронов с ядрами. Форматом предполагается, что последние также разбросаны по отдельным подбиблиотекам:

Подбиблиотека 10 – данные о взаимодействии нейтронов с ядрами;

Подбиблиотека 11 – данные о выходах продуктов деления нейтронами;

Подбиблиотека 12 – законы рассеяния тепловых нейтронов.

Подбиблиотека 10, как правило разбивается на две части – данные, достаточные для расчета переноса излучения в среде, содержащей данный нуклид (т.е. включающие данные об упругом и неупругом рассеянии нейтронов, об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов, о фотонах, рождаемых в нейтронных реакциях) и так называемые активационные данные – данные о сечениях нейтронных реакций, ведущих к изменению ядра-мишени, в частности, к изменению его изомерного состояния. Вопрос о том, для каких ядер необходима полная информация, а для каких достаточно задания только сечений, не имеет определенного ответа.

В библиотеке РОСФОНД активационная под-библиотека не выделяется¹. В библиотеку, как отмечалось, включены данные для всех ядер с периодами полураспада более суток. Полнота представляемых данных, разумеется, различна. Для ядер с периодом полураспада составляющим несколько дней, не возникает потребности в знании энерго-угловых распределений рассеянных нейтронов; эта информация для таких ядер и не приводится – даются только сечения нейтронных реакций. В редких случаях, когда такая информация все же имелась в наличии (разумеется, целиком основанная на теоретических расчетах), она также включалась в файл данных. Такая ситуация имела место для продуктов деления со значительным выходом. В этом случае она может быть

¹ Выделение активационной подбиблиотеки (подобно тому, как это сделано в JEFF-3.1) представляется нецелесообразным поскольку для тех нуклидов, данные для которых представлены и в активационной библиотеке, и в более полной библиотеке данных для расчета переноса нейтронов сечения некоторых реакций оказываются различными. В РОСФОНДе подобные противоречия исключены.

востребована для оценки данных о рассеянии нейтронов на совокупности всех продуктов деления, накопившихся в топливе.

В перечень нуклидов, данные для которых содержатся в библиотеке РОСФОНД, входят все изомеры с периодом полураспада более суток. Поэтому естественно, что было выставлено требование включения в библиотеку всех данных об образовании этих изомеров в нейтронных реакциях. Сечения всех нейтронных реакций в библиотеке РОСФОНД представлены в файле MF=3. Вероятности образования долгоживущих изомеров представлены в файле MF=9. Файл MF=10 с секцией MT=4 используется только для задания сечения образования изомера из основного состояния в результате неупругого рассеяния или перехода изомера в основное состояние в результате того же процесса. Представление этой информации в формате файла MF=9 требует знания полного сечения неупругого рассеяния, которое известно не всегда.

Данные об образовании короткоживущих изомеров, даже если они присутствовали в отобранном файле, исключались, как явно избыточные для практических приложений в науке и технике. В случае, если какому-либо они всё же потребуются, этому искушенному пользователю не составит большого труда обратиться в библиотеку EAF-2003, в которой эта информация сохранена.

В РОСФОНДе отсутствуют файлы MF=8, содержащие информацию о характеристиках распада образующихся радионуклидов. Это связано с тем, в России нет общепринятой базы распадных данных, а информация, содержащаяся в различных доступных источниках разноречива и, зачастую, неполна. Составители библиотеки надеются, что со временем в России будет создана такая библиотека (в терминологии ENDF/B-6 – подбиблиотека 6). До того времени пользователям придется самим решать вопрос о выборе подходящего источника информации. Одним из них может служить библиотека распадных данных системы констант БНАБ-93, обрабатываемая программой SOURCE.

В библиотеку РОСФОНД для делящихся материалов включены и данные о выходах продуктов деления (файлы MF=8 с секциями MT=454 для независимых выходов и MT=459 для кумулятивных). Вынесение этих данных в отдельную подбиблиотеку также было сочтено нецелесообразным. Объединение в одной библиотеке данных для долгоживущих радионуклидов и данных о всех процессах их образования в нейтронных реакциях включая деление, обеспечивает предоставление пользователю всей информации необходимой для расчета нуклидного состава облучаемых материалов (кроме распадных данных).

0.2. Нумерация материалов

Как уже говорилось, каждому материалу присваивается четырехзначный идентификатор МАТ. При разработке формата приходилось учитывать ограничения поля стандартной перфокарты и каждый файл до сих пор в текстовом виде представляет собой последовательность 80-символьных строк. Последние 14 разрядов строки отводятся на запись величин МАТ (4 знака), MF (2 знака), MT (3 знака) и MS (номер записи – 5 знаков). Для записи нейтронных данных отводятся первые 66 разрядов, обычно разделенные на 6 полей по 11 разрядов.

Изложенное показывает, что отведение на идентификатор МАТ всего 4 разрядов явилось вынужденной мерой, обусловленной ограничением размера строки.

Первоначально предполагалось в двух старших разрядах числа МАТ записывать зарядовое число Z, а в двух младших разрядах – последние разряды массового числа A:

$$\text{МАТ}=\text{Z}+\text{N},$$

$$\text{N}=\text{if } A < 100 \text{ then } A \text{ else if } A < 200 \text{ then } A - 100 \text{ else } A - 200.$$

Два нуля в последних разрядах означало природную смесь изотопов.

Это правило использовалось долгие годы во всех библиотеках, в том числе и в библиотеке ФОНД. Неудобства, связанные с путаницей в обозначении ^{100}Mo и природного молибдена, ^{200}Hg и природной ртути на первых порах не смущали, поскольку файлов для отдельных изотопов практически не было, а если составлялись файлы для всех изотопов, то они для того и составлялись, чтобы заменить файл для природной смеси. Сложности возникли при составлении файлов для изомеров. С помощью каких значений МАТ можно различить $^{178}\text{Hf}^g$, $^{178}\text{Hf}^m$ и $^{178}\text{Hf}^n$? В библиотеке ENDF/B-VI эта трудность была преодолена с помощью следующего правила. На каждый элемент отведено 100 номеров МАТ от Z01 до Z99 (здесь Z – два знака зарядового числа). На каждый изотоп отводится по три номера – на основное состояние изотопа и на два его изомерных состояния. МАТ, заканчивающийся двумя нулями по прежнему означает природный изотоп. Самому легкому из рассматриваемых изотопов присваивается номер МАТ=Z25, первому изомеру самого легкого изотопа – МАТ=Z26, второму изомеру – МАТ=Z27; основному состоянию изотопа, следующего за самым легким присваивается номер МАТ=Z28, его первому изомеру – МАТ=Z29 и т.д. Сохраняется произвол в выборе того изотопа, который считать «самым легким». Примеры: 125 – водород, 6625 – диспрозий-156. и т.д. Однако нередки и отступления: уран-232 имеет МАТ-9219. В любом случае правило, сформулированное в формате, выполняется неточно: последние два разряда МАТ для основных состояний ядер не кратны трем, а на единицу меньше.

Неудобство этой системы проявляется при непосредственной работе с файлами. Так в файле данных для $^{178}\text{Hf}^n$ указан МАТ=7239 и определить по этому номеру к какому изомеру какого изотопа относится файл путем вычислений, производимых в уме, практически невозможно.

В РОСФОНДе сохранен прежний принцип присвоения идентификаторов МАТ основным состояниям. Изотопам с массовым числом 100 и 200 присваиваются МАТ=Z10 и Z20 соответственно и это, как правило, не приводит к путанице, поскольку при данном Z нет долгоживущих изотопов с A=100 и A=110 (для ^{100}Mo МАТ-4210, для ^{100}Ru МАТ-4410, для ^{200}Hg МАТ-6020). Исключение составляет палладий: ^{100}Pd имеет период полураспада 3.7 дн., а ^{101}Pd стабилен, так что номер МАТ=4610 “занят”. В этом исключительном случае материалу присвоен МАТ=4666, который не позволяет перепутать этот нуклид с другим изотопом палладия.

Что касается присвоения номеров МАТ изомерам, то общее правило таково. В числе МАТ для первого изомера на месте десятков в числе A проставляется 1, а если это может привести к путанице с другим изотопом или изомером, проставляется 3. Для второго изомера на месте десятков в числе A проставляется 2.

Примеры:

для $^{91}\text{Nb}^g$ МАТ=4191; для $^{91}\text{Nb}^g$ МАТ=4111;
 для $^{101}\text{Rh}^g$ МАТ=4502; для $^{101}\text{Rh}^g$ МАТ=4512;
 для $^{110}\text{Ag}^m$ МАТ=4730 (т.к. МАТ=4711 “занят” $^{110}\text{Ag}^g$);
 для $^{101}\text{Rh}^g$ МАТ=4502; для $^{101}\text{Rh}^g$ МАТ=4512;
 для $^{178}\text{Hf}^g$ МАТ=7278; для $^{178}\text{Hf}^n$ МАТ=7228.

Отмеченные выше сложности нумерации касаются только искушенных пользователей, работающих с отдельными файлами для различных материалов (например, с файлами MF=3, содержащими энергетические зависимости нейтронных сечений). В библиотеке РОСФОНД все оцененные данные содержатся в одной директории, поименованной RUSFOND, и совокупность оцененных данных для определенного нуклида содержится в файле, поименованном Z SYM A M, где Z-зарядовое число, SYM – химический символ элемента, A – массовое число изотопа, M – признак изомерного состояния (для основного состояния M- пробел, для первого изомера M=m, для второго изомера M=n). Если материал представляет собой естественную смесь изотопов, A

заменяется пробелами. Файлы для всех материалов в настоящей версии библиотеки имеют одно и то же расширение «.rf».

Примеры:

5B10.rf – файл данных для бора-10;

72Hf178n.rf – файл данных для второго (долгоживущего) изомера гафния.

76Os.rf – файл для природного осмия;

95Am242m.rf – файл для долгоживущего изомера америция.

0.3. Представление данных о запаздывающих нейтронах

В отличие от всех прочих библиотек (за исключением JEFF-3.1), в которых принято традиционное 6-групповое описание запаздывающих нейтронов, в РОСФОНДе (как и в JENDL-3.1) принято универсальное 8-групповое представление данных о запаздывающих нейтронах, предложенное специалистами ФЭИ и Лос-Аламосской Национальной Лаборатории США². Большое (по сравнению с традиционным 6-групповым представлением) число групп позволило приписать каждой из них вполне определенную среднюю константу распада, не зависящую от делящегося ядра. От делящегося ядра и от энергии нейтронов, вызывающих деления, зависят только выходы групп запаздывающих нейтронов. Не зависят от делящегося ядра и спектры запаздывающих нейтронов каждой группы.

Переход от 6-группового представления к 8-групповому весьма важен при расчете реакторов со сложным составом топлива. Состав же топлива неизбежно усложняется с увеличением глубины выгорания. В быстрых реакторах, с самого начала загружаемых топливом сложного нуклидного состава, в средне-стационарном состоянии требуется учитывать вклады 10 – 12 изотопов в выход запаздывающих нейтронов. При традиционном 6-групповом описании это означает рассмотрение 60 – 66 различных групп запаздывающих нейтронов, различающихся и спектрами и постоянными распада. 8-групповое представление во всех случаях позволяет ограничиться рассмотрением 8 групп запаздывающих нейтронов и от состава топлива зависит только их соотношение.

В JEFF-3.1, где впервые было введено 8-групповое представление, использована первая и довольно грубая групповая оценка спектров групп запаздывающих нейтронов³. Рассмотрение этих спектров было проведено при анализе данных для урана-235 (см. библиотека РОСФОНД. Обоснования оцененных данных. Раздел 92.3). Возникли сомнения в обоснованности спектров, принятых в JEFF-3.1 и предложена другая оценка этих спектров, основанная на комбинациях спектров традиционных 6 групп. Эти спектры и приняты для всех делящихся ядер. Что касается выхода запаздывающих нейтронов при делении и вкладов в них каждой из 8 групп, то эта информация для всех делящихся ядер, для которых она приводится, принята в соответствии с оценкой JEFF-3.1.

Разумеется, введение в инженерную практику нового представления запаздывающих нейтронов, являющихся единственным рычагом управления цепной реакцией деления, требует осторожности и проведения дополнительных сравнительных исследований.

² Spriggs, Campbel and Piksaikin, Prg Nucl Eng 41,223(2002)

³ J. M. Campbell, G.D. Spriggs, Delayed Neutron Spectral Data for Hansen-Roach Energy Group Structure, LA-UR-99-2988, Rev. 0, June 15, 1999

0.4. Выходы продуктов деления

Почти для всех делящихся ядер в библиотеке РОСФОНД приводятся независимые и кумулятивные выходы продуктов деления (файл MF=8, MT=454 (независимые выходы) и MT=459 (кумулятивные выходы)). Исключение составляют, как правило, короткоживущие актиниды и ряд изотопов, для которых оцененных данных о выходах продуктов деления в известных библиотеках не имелось (^{231}Pa , ^{236}Np , ^{236}Pu , ^{244}Pu , ^{250}Cf). Доля делений, происходящих в реакторах на этих изотопах всегда чрезвычайно мала).

В отличие от нейтронных сечений и энерго-угловых распределений продуктов нейтронных реакций, при отборе оцененных данных по выходам продуктов деления качество оценки внимательно не анализировалось и выбор оценки специально не обосновывался. В РОСФОНД были приняты либо выходы, принятые в библиотеках ENDF/B-VI и ENDF/b-VII (оценки Ингланда и Райдера (T.R.England, B.F.Rider) 1992 г.), либо в библиотеке JEFF-3.1 (оценки Миллса (R.W.Mills) 1995 г.)

Для важнейших продуктов деления различия в выходах, оцененных этими авторами, лежат в пределах погрешностей, также указанных в оценках.

В то же время, принятые оценки нельзя считать безупречными. Например, не всегда сохраняется баланс заряда: даже для урана-235 сумма выходов продуктов деления с зарядом Z не всегда совпадает с суммой выходов продуктов с зарядом $92-Z$ (см. рис.1)

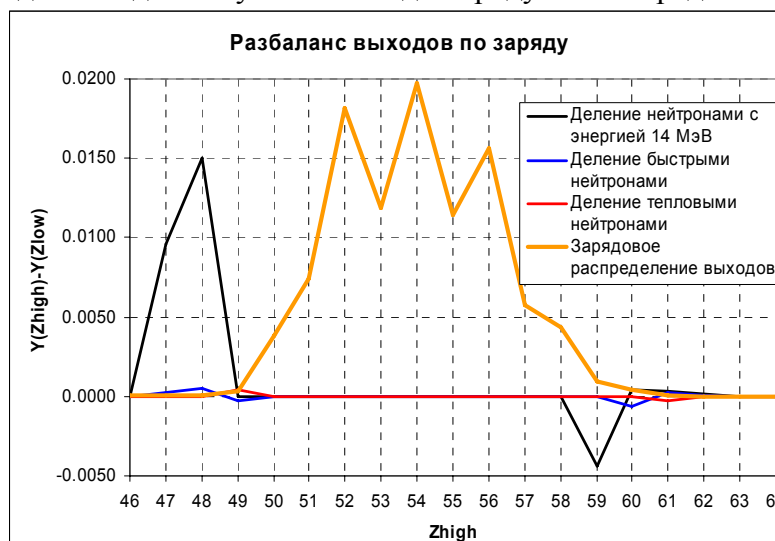


Рис.1 Разбаланс выходов продуктов деления урана-235 по заряду.

Как видно, в выходах, оцененных при делении быстрыми нейтронами, разбаланс особенно велик (он на порядок превышает выход тройного деления, составляющий около 0.2 на 100 делений). В то же время видно, что разбаланс имеет место для продуктов деления с низким выходом, при делении реакторными нейтронами пиковые значения разбаланса составляют $\pm(3 - 6) \cdot 10^{-4}$ на деление.

Очевидно, что более корректная оценка выходов продуктов деления была бы желательна.

0.5. Структура обоснований оцененных нейтронных данных для изотопов

Обоснования отбора оцененных данных в библиотеку РОСФОНД содержатся в нижеследующих разделах, пронумерованных от 1 до 100. Номер раздела соответствует зарядовому числу элемента, изотопы которого в этом разделе рассматриваются. Кроме номера каждый раздел имеет название, в качестве которого используется русское название элемента:

1. Водород

2. Гелий

.....
99. Эйнштейний

100. Фермий.

Каждый раздел содержит параграфы, по одному на каждый рассматриваемый в этом разделе изотоп. В ряде случаев добавлен дополнительный параграф, в котором рассматривается природная смесь изотопов.

Структура обоснований отбора оцененных нейтронных данных различается для нуклидов разных категорий. Основные топливные и конструкционные материалы, материалы теплоносителей и замедлителей рассматривались с максимальной детальностью. Это значит, что рассматривались не только нейтронные сечения, но также и энерго-угловые распределения вторичных нейтронов и данные об образовании фотонов в нейтронных реакциях и на основе этого рассмотрения обосновывался выбор соответствующей оценки.

Для материалов, не используемых в реакторах и радиационной защите надежность данных по энерго-угловым распределениям и испусканию фотонов не анализировалась. Как правило, эти данные для подобных ядер были получены путем расчетов по стандартным моделям и не могли быть верифицированы на основе экспериментальных данных. Нейтронные сечения для этих ядер рассматривались не для всех реакций; главное внимание уделялось сечениям радиационного захвата, а для делящихся ядер – еще и сечениям деления и ν .

Сечение захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл захвата рассматривались даже для нейтронно-избыточных радионуклидов, для которых экспериментальные данные отсутствовали.

Для большой группы радионуклидов полных наборов оцененных нейтронных данных ни в одной современной библиотеке не имеется. Наиболее полной и относительно надежной является библиотека активационных данных EAF-2003, включенная в европейскую библиотеку JEFF-3.1 в качестве активационной подбиблиотеки. Для этих радионуклидов никакого обоснования выбора оценки не проводилось – поскольку выбирать было не из чего. Текст обоснования сводится к констатации факта принятия в РОСФОНД данных из EAF-2003. Следует отметить, что при включении файлов EAF-2003 в РОСФОНД они подвергались существенной переработке. Для реакций, в результате которых ядро-продукт может образовываться как в основном, так и в изомерном состояниях, в EAF-2003 в подсекциях секции МТ файла MF=10 приводятся сечения каждой из ветвей реакции. Сечения из всех подсекций складывались друг с другом и суммарное сечение реакции МТ заносилось в файл MF=3. В случаях, когда в результате реакции МТ образуется долгоживущий изотоп (с периодом полураспада более суток, для которого в РОСФОНД включен файл оцененных нейтронных данных), на основе данных файла MF=10 формировался файл MF=9, содержащий вероятности образования ядра-продукта в основном и изомерном состояниях). Файл MF=10, как правило, удалялся из набора данных для нуклида. Исключения составляют файлы для изомеров, для которых в файле MF=10 присутствует единственная секция МТ=4, содержащая сечение перехода в основное состояние. Такая же секция присутствует в файле MF=10 для основного состояния и содержит сечение образования изомера (или изомеров).

Каждое обоснование начинается с изложения общих характеристик рассматриваемого нуклида – содержания в естественной смеси, периода полураспада и типа распада для радионуклидов и т.п. Для продуктов деления указывается выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами.

Далее каждое обоснование обязательно содержит перечень всех доступных оценок нейтронных данных, их авторов и год выполнения. Проводится сравнение оцененных данных друг с другом и с экспериментальными результатами, взятыми из EXFORa. Обоснования данных для стабильных изотопов, для продуктов деления содержат цветные

графики сравнения результатов различных оценок с имеющимися экспериментальными данными. Обоснования данных для основных реакторных материалов содержат десятки таких графиков, обоснования данных для продуктов деления, зачастую только один график сравнения данных по сечениям захвата.

Каждое обоснование завершается заключением, содержащим рекомендацию о выборе файла оцененных нейтронных данных для библиотеки РОСФОНД, перечня корректив, которые в него при этом должны быть внесены, и замечаний о степени надежности или желательных уточнениях.

Под каждым заключением указываются фамилия и инициалы автора рекомендации (иногда – не одна).

Все обоснования основываются на рассмотрении результатов опубликованных работ. Система ссылок в обоснованиях довольно сложна. Ссылки на экспериментальные работы, данные которых приведены на графиках, приведены на самих этих графиках в сокращенной форме: фамилия и две последние цифры года (например, Macklin-84). Этой информации достаточно, чтобы найти эту работу в EXFORe, где содержится и полная ссылка на журнальную публикацию или внутренний отчет лаборатории, из которого были почерпнуты введенные в EXFOR числовые данные.

Ссылки на прочие работы (не из EXFORa) даются, как правило, в подстрочных примечаниях, а в некоторых обширных обоснованиях – во включенных в них списках использованной литературы.

К сожалению, при подготовке настоящей публикации не удалось обеспечить единый стиль изложения. Разные авторы обоснований по-разному расставляли акценты при рассмотрении оцененных и экспериментальных данных, графики сравнения этих данных выполнены в разных стилях. При каждом очередном просмотре текста обнаруживались опечатки; видимо, далеко не все они устранены и из представляемой в INTERNET версии. Коллектив авторов просит у читателей извинений за эти (а, возможно, и иные) недостатки.

Разумеется, мы будем весьма благодарны читателям и пользователям наших оцененных данных за критические замечания. Эти замечания могут быть отправлены электронной почтой по адресу abbn@ippe.ru.

0.6. Термализационные данные

При формулировке задачи включение в библиотеку РОСФОНД термализационных данных не предполагалось. Однако во время выполнения работы стали доступны новые, уточненные оценки законов рассеяния тепловых нейтронов в нескольких наиболее важных замедлителях, оцененные Метьюсом и Кейнертом (Mattes & Keinert, IKE, Stuttgart) с активным участием Мак-Ферлейна (MacFarlein, Los Alamos). Новые оценки содержат более подробные температурные зависимости законов рассеяния, чем прежние, повсеместно использовавшиеся оценки законов рассеяния из ENDF/B-III. Новые оценки законов рассеяния были включены в библиотеку ENDF/B-VII. Было решено включить их и в РОСФОНД, несмотря на то, что детального анализа этих оценок и их сравнения с прежними оценками не было проведено, поскольку участники работы необходимой квалификацией не обладали, а для привлечения других специалистов не было ни времени, ни средств.

0.7. Содержание библиотеки РОСФОНД

Краткое содержание библиотеки приводится в нижеследующей таблице.

В первой части нижеследующей таблице для каждого изотопа или изомера указывается:

- порядковый номер;
- название нуклида.
- МАТ - номер материала в библиотечном файле.
- Содержание изотопа в естественной смеси или (и) период полураспада.
- Полнота информации, содержащейся в файле:
 С – приводятся сечения;
 Р – приводятся также энерго-угловые распределения вторичных нейтронов;
 Ф – приводятся и данные о фотонах, испускаемых в нейтронных реакциях.
- Наименование библиотеки, из которой был отобран фазовый файл оцененных нейтронных данных.
- Краткий комментарий, отмечающий основные изменения внесенные в файл, желательную доработку и пр.

Во второй части таблицы перечислены все файлы библиотеки РОСФОНД с информацией и законах рассеяния медленных нейтронов в сложных средах (молекулярных газах, жидкостях и твердых телах)

СОДЕРЖАНИЕ БИБЛИОТЕКИ РОСФОНД

Часть 1. Нейтронные данные для изотопов

| № | Нуклид | МАТ | Содержание (%) или $T_{1/2}$ | Полнота | Базисный файл | Комментарий |
|----------------------|------------------|------|-------------------------------|---------|---------------|--|
| 1.- Водород | | | | | | |
| 1 | 1-H- 1 | 101 | 99.985 | СРФ | ENDF/B-VII | Введены небольшие уточнения |
| 2 | 1-H- 2 | 102 | 0.015 | СРФ | ENDF/B-VII | Существенный пересмотр оценки |
| 3 | 1-H- 3 | 103 | <i>12.32 з.</i> | СР | ФОНД-2.2 | Введены небольшие уточнения |
| 2. – Гелий | | | | | | |
| 4 | 2-He- 3 | 203 | 0.000137 | СРФ | ФОНД-2.2 | Уточнен на основе новых экспериментальных данных |
| 5 | 2-He- 4 | 204 | 99.999863 | СР | JENDL-3.3 | |
| 3.- Литий | | | | | | |
| 6 | 3-Li- 6 | 306 | 7.59 | СРФ | БРОНД-3 | Новая оценка |
| 7 | 3-Li- 7 | 307 | 92.41 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 4.- Бериллий | | | | | | |
| 8 | 4-Be- 7 | 407 | <i>53.22 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 9 | 4-Be- 9 | 409 | 100 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 10 | 4-Be- 10 | 410 | <i>1.51*10⁶ з.</i> | С | EAF2003 | |
| 5.- Бор | | | | | | |
| 11 | 5-B - 10 | 510 | 19.8 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 12 | 5-B - 11 | 511 | 80.2 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 6.- Углерод | | | | | | |
| 13 | 6-C -nat | 600 | | СРФ | ENDF/B-VII | Введены небольшие уточнения |
| 14 | 6-C - 13 | 613 | 1.11 | С | EAF2003 | |
| 15 | 6-C - 14 | 614 | <i>5700 з.</i> | С | EAF2003 | |
| 7.- Натрий | | | | | | |
| 16 | 7-N - 14 | 714 | 99.634 | СРФ | ENDF/B-VII | Существенный пересмотр оценок |
| 17 | 7-N - 15 | 715 | 0.366 | СРФ | ENDF/B-VII | Существенный пересмотр оценок |
| 8.- Кислород | | | | | | |
| 18 | 8-O - 16 | 816 | 99.762 | СРФ | ENDF/B-VII | Пересмотрено сечение захвата + небольшие коррекции |
| 19 | 8-O - 17 | 817 | 0.038 | СР | ENDF/B-VII | |
| 20 | 8-O - 18 | 818 | 0.200 | СР | | Новая оценка |
| 9.- Фтор | | | | | | |
| 21 | 9-F - 19 | 919 | 100 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 10.- Неон | | | | | | |
| 22 | 10-Ne- 20 | 1020 | 90.48 | С | EAF2003 | |
| 23 | 10-Ne- 21 | 1021 | 0.27 | С | EAF2003 | |
| 24 | 10-Ne- 22 | 1022 | 9.25 | С | EAF2003 | |
| 11.- Натрий | | | | | | |
| 25 | 11-Na- 22 | 1122 | <i>2.6027 з.</i> | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 26 | 11-Na- 23 | 1123 | 100 | СРФ | ENDF/B-VI | Существенный пересмотр оценки |
| 12.- Магний | | | | | | |
| 27 | 12-Mg- 24 | 1224 | 78.99 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 28 | 12-Mg- 25 | 1225 | 10.00 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 29 | 12-Mg- 26 | 1226 | 11.01 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 13.- Алюминий | | | | | | |
| 30 | 13-Al- 26 | 1326 | <i>7.17*10⁵ з.</i> | С | EAF2003 | |
| 31 | 13-Al- 27 | 1327 | 100 | СРФ | JEFF-3.1 | |

| 14.- Кремний | | | | | | |
|---------------------|------------|------|-------------------------------|-----|------------|---|
| 32 | 14-Si- 28 | 1428 | 92.23 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 33 | 14-Si- 29 | 1429 | 4.683 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 34 | 14-Si- 30 | 1430 | 3.087 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 35 | 14-Si- 32 | 1432 | <i>132 з.</i> | С | EAF2003 | |
| 15.- Фосфор | | | | | | |
| 36 | 15-P - 31 | 1531 | 100 | СРФ | ФОНД-2.2 | Желателен пересмотр данных выше 10 МэВ с учетом новых экспериментов |
| 37 | 15-P - 32 | 1532 | <i>14.262 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 38 | 15-P - 33 | 1533 | <i>25.34 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 16.- Сера | | | | | | |
| 39 | 16-S - 32 | 1632 | 95.02 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 40 | 16-S - 33 | 1633 | 0.75 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 41 | 16-S - 34 | 1634 | 4.21 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 42 | 16-S - 35 | 1635 | <i>87.54 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 43 | 16-S - 36 | 1636 | 0.02 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 17.- Хлор | | | | | | |
| 44 | 17-Cl- 35 | 1735 | 75.77 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 45 | 17-Cl- 36 | 1736 | <i>3.01*10⁵ з.</i> | С | EAF2003 | |
| 46 | 17-Cl- 37 | 1737 | 24.23 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 18.- Аргон | | | | | | |
| 47 | 18-Ar- 36 | 1836 | 0.3365 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 48 | 18-Ar- 37 | 1837 | <i>34.95 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 49 | 18-Ar- 38 | 1838 | 0.0632 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 50 | 18-Ar- 39 | 1839 | <i>269 з.</i> | С | EAF2003 | |
| 51 | 18-Ar- 40 | 1840 | 99.6003 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 52 | 18-Ar- 42 | 1842 | <i>32.9 з.</i> | С | EAF2003 | |
| 19.- Калий | | | | | | |
| 53 | 19-K - 39 | 1939 | 93.2581 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 54 | 19-K - 40 | 1940 | 0.0117 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 55 | 19-K - 41 | 1941 | 6.7302 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 20.- Кальций | | | | | | |
| 56 | 20-Ca- 40 | 2040 | 96.94 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 57 | 20-Ca- 41 | 2041 | <i>1.02*10⁵ з.</i> | С | EAF2003 | |
| 58 | 20-Ca- 42 | 2042 | 0.647 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 59 | 20-Ca- 43 | 2043 | 0.135 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 60 | 20-Ca- 44 | 2044 | 2.09 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 61 | 20-Ca- 45 | 2045 | <i>162.61 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 62 | 20-Ca- 46 | 2046 | 0.004 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 63 | 20-Ca- 47 | 2047 | <i>4.536 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 64 | 20-Ca- 48 | 2048 | 0.187 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 21.- Скандий | | | | | | |
| 65 | 21-Sc- 44m | 2114 | <i>58.61 ч.</i> | С | EAF2003 | |
| 66 | 21-Sc- 45 | 2145 | 100 | СР | JENDL-3.3 | |
| 67 | 21-Sc- 46 | 2146 | <i>83.79 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 68 | 21-Sc- 47 | 2147 | <i>3.349 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 69 | 21-Sc- 48 | 2148 | <i>43.67 ч.</i> | С | EAF2003 | |

| 22.- Титан | | | | | | |
|----------------------|-------------------|------|-------------------------|-----|------------|--|
| 70 | 22-Ti- 44 | 2244 | 60.0 г. | С | EAF2003 | |
| 71 | 22-Ti- 46 | 2246 | 8.25 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 72 | 22-Ti- 47 | 2247 | 7.44 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 73 | 22-Ti- 48 | 2248 | 73.72 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 74 | 22-Ti- 49 | 2249 | 5.41 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 75 | 22-Ti- 50 | 2250 | 5.18 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 23.- Ванадий | | | | | | |
| 76 | 23-V - nat | 2300 | | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 77 | 23-V - 48 | 2348 | 15.9735 д. | С | EAF2003 | |
| 78 | 23-V - 49 | 2349 | 329 д. | С | EAF2003 | |
| 79 | 23-V - 50 | 2350 | 0.25 | С | EAF2003 | |
| 80 | 23-V - 51 | 2351 | 99.75 | СРФ | NEW | |
| 24.- Хлор | | | | | | |
| 81 | 24-Cr- 50 | 2450 | 4.345 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 82 | 24-Cr- 51 | 2451 | 27.7025 д. | С | EAF2003 | |
| 83 | 24-Cr- 52 | 2452 | 83.789 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 84 | 24-Cr- 53 | 2453 | 9.501 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 85 | 24-Cr- 54 | 2454 | 2.365 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 25.- Марганец | | | | | | |
| 86 | 25-Mn- 52 | 2552 | 5.591 д. | С | EAF2003 | |
| 87 | 25-Mn- 53 | 2553 | 3.74*10 ⁶ г. | С | EAF2003 | |
| 88 | 25-Mn- 54 | 2554 | 312.12 д. | С | EAF2003 | |
| 89 | 25-Mn- 55 | 2555 | 100 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 26.- Железо | | | | | | |
| 90 | 26-Fe- 54 | 2654 | 5.845 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 91 | 26-Fe- 55 | 2655 | 2.737 г. | С | EAF2003 | |
| 92 | 26-Fe- 56 | 2656 | 91.754 | СРФ | БРОНД-3 | |
| 93 | 26-Fe- 57 | 2657 | 2.119 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 94 | 26-Fe- 58 | 2658 | 0.282 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 95 | 26-Fe- 59 | 2659 | 44.495 д. | С | EAF2003 | |
| 96 | 26-Fe- 60 | 2660 | 1.5*10 ⁶ г. | С | EAF2003 | |
| 27.- Кобальт | | | | | | |
| 97 | 27-Co- 56 | 2756 | 77.233 д. | С | EAF2003 | |
| 98 | 27-Co- 57 | 2757 | 271.74 д. | С | EAF2003 | |
| 99 | 27-Co- 58 | 2758 | 70.86 д. | С | EAF2003 | |
| 100 | 27-Co- 59 | 2759 | 100 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 101 | 27-Co- 60 | 2760 | 1925.28 д. | С | EAF2003 | |
| 28.- Никель | | | | | | |
| 102 | 28-Ni- 56 | 2856 | 6.075 д. | С | EAF2003 | |
| 103 | 28-Ni- 57 | 2857 | 35.60 г. | С | EAF2003 | |
| 104 | 28-Ni- 58 | 2858 | 68.077 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 105 | 28-Ni- 59 | 2859 | 7.6*10 ⁴ г. | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 106 | 28-Ni- 60 | 2860 | 26.223 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 107 | 28-Ni- 61 | 2861 | 1.140 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 108 | 28-Ni- 62 | 2862 | 3.634 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 109 | 28-Ni- 63 | 2863 | 100.1 г. | С | EAF2003 | |
| 110 | 28-Ni- 64 | 2864 | 0.926 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 111 | 28-Ni- 66 | 2866 | 54.6 г. | С | EAF2003 | |

| 29.- Медь | | | | | | |
|----------------------|------------------|------|------------------|-----|------------|--|
| 112 | 29-Cu- 63 | 2963 | 69.17 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 113 | 29-Cu- 65 | 2965 | 30.83 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 114 | 29-Cu- 67 | 2967 | <i>61.83 ч.</i> | С | EAF2003 | |
| 30.- Цинк | | | | | | |
| 115 | 30-Zn-nat | 3000 | | СРФ | ФОНД-2.2 | Желателен пересмотр оценок для всех стабильных изотопов. |
| 116 | 30-Zn- 64 | 3064 | 48.63 | С | EAF2003 | |
| 117 | 30-Zn- 65 | 3065 | <i>243.66 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 118 | 30-Zn- 66 | 3066 | 27.90 | С | EAF2003 | |
| 119 | 30-Zn- 67 | 3067 | 4.10 | С | EAF2003 | |
| 120 | 30-Zn- 68 | 3068 | 18.75 | С | EAF2003 | |
| 121 | 30-Zn- 70 | 3070 | 0.62 | С | EAF2003 | |
| 122 | 30-Zn- 72 | 3072 | <i>46.5 ч.</i> | С | EAF2003 | |
| 31.- Галлий | | | | | | |
| 123 | 31-Ga- 67 | 3167 | <i>3.2623 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 124 | 31-Ga- 69 | 3169 | 60.108 | СР | ENDF/B-VII | |
| 125 | 31-Ga- 71 | 3171 | 39.892 | СР | ENDF/B-VII | |
| 32.- Германий | | | | | | |
| 126 | 32-Ge- 68 | 3268 | <i>270.95 д.</i> | С | EAF2003 | Ниже 1 кэВ сечение захвата понижено с 5.5 до 1 кэВ на основе эксп. данных. |
| 127 | 32-Ge- 69 | 3269 | <i>39.05 ч.</i> | С | EAF2003 | |
| 128 | 32-Ge- 70 | 3270 | 20.37 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 129 | 32-Ge- 71 | 3271 | <i>11.43 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 130 | 32-Ge- 72 | 3272 | 27.31 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 131 | 32-Ge- 73 | 3273 | 7.76 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 132 | 32-Ge- 74 | 3274 | 36.73 | СРФ | ENDF/B-VII | Граница RRR/URR снижена с 8.6 до 3кэВ |
| 133 | 32-Ge- 76 | 3276 | 7.83 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 33.- Мышьяк | | | | | | |
| 134 | 33-As- 71 | 3371 | <i>65.28 ч.</i> | С | EAF2003 | |
| 135 | 33-As- 72 | 3372 | <i>26.0 ч.</i> | С | EAF2003 | |
| 136 | 33-As- 73 | 3373 | <i>80.30 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 137 | 33-As- 74 | 3374 | <i>17.77 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 138 | 33-As- 75 | 3375 | 100 | СР | JENDL-3.3 | |
| 139 | 33-As- 76 | 3376 | <i>1.0942 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 140 | 33-As- 77 | 3377 | <i>38.83 ч.</i> | С | EAF2003 | |

| 34.- Селен | | | | | | |
|---------------------|------------------|------|-------------------------|-----|------------|--|
| 141 | 34-Se- 72 | 3472 | 8.40 д. | С | EAF2003 | |
| 142 | 34-Se- 74 | 3474 | 0.89 | СР | ENDF/B-VII | Измеренное сечение захвата при 24 кэВ на порядок выше оцененного. Возможна ошибка в представлении эксп. данных. |
| 143 | 34-Se- 75 | 3475 | 119.779 д. | С | EAF2003 | |
| 144 | 34-Se- 76 | 3476 | 9.37 | СР | ENDF/B-VII | Вне резонансной области(выше 9 кэВ) оцененное сечение захвата много ниже эксп. данных. |
| 145 | 34-Se- 77 | 3477 | 7.63 | СР | ENDF/B-VII | Вне резонансной области (выше 2.7 кэВ) сечение захвата, вероятно, существенно завышено. |
| 146 | 34-Se- 78 | 3478 | 23.77 | СР | ENDF/B-VII | Вне резонансной области (выше 100 кэВ) сечение захвата, вероятно, существенно завышено. |
| 147 | 34-Se- 79 | 3479 | 2.95*10 ⁵ з. | СР | ENDF/B-VII | |
| 148 | 34-Se- 80 | 3480 | 49.61 | СР | ENDF/B-VII | |
| 149 | 34-Se- 82 | 3482 | 8.73 | СР | ENDF/B-VII | Вне резонансной области (выше 30 кэВ) сечение захвата, вероятно, существенно завышено. |
| 35.- Бром | | | | | | |
| 150 | 35-Br-77 | 3577 | 57 д. | С | EAF2003 | |
| 151 | 35-Br- 79 | 3579 | 50.69 | СР | JENDL-3.3 | |
| 152 | 35-Br- 81 | 3580 | 49.31 | СР | ENDF/B-VII | |
| 153 | 35-Br- 82 | 3582 | 35.282 ч. | С | EAF2003 | |
| 36.- Криптон | | | | | | |
| 154 | 36-Kr- 78 | 3678 | 0.35 | СР | ENDF/B-VII | |
| 155 | 36-Kr- 79 | 3679 | 35.04 ч. | С | EAF2003 | |
| 156 | 36-Kr- 80 | 3680 | 2.28 | СР | ENDF/B-VII | Желательно разрешение противоречий в эксп. данных и переоценка сечений в области разрешенных и неразрешенных резонансов. |
| 157 | 36-Kr- 81 | 3681 | 2.29*10 ⁵ з. | С | EAF2003 | |
| 158 | 36-Kr- 82 | 3682 | 11.58 | СР | JEFF-3.1 | |
| 159 | 36-Kr- 83 | 3683 | 11.49 | СР | ENDF/B-VII | |
| 160 | 36-Kr- 84 | 3684 | 57.00 | СР | ENDF/B-VII | |
| 161 | 36-Kr- 85 | 3685 | 3916.8 д. | СР | ENDF/B-VII | |
| 162 | 36-Kr- 86 | 3696 | 17.30 | СР | JENDL-3.3 | Целесообразно заменить на оценку ENDF/B-VII после коррекции теплового сечения захвата. |
| 37.-Рубидий | | | | | | |
| 163 | 37-Rb- 83 | 3783 | 86.2 д. | С | EAF2003 | |
| 164 | 37-Rb- 84 | 3784 | 33.1 д. | С | EAF2003 | |
| 165 | 37-Rb- 85 | 3785 | 72.17 | СР | ENDF/B-VII | Желательно расширение RRR с учетом вклада пропущенных резонансов плавной подложкой или фиктивными резонансами. |
| 166 | 37-Rb- 86 | 3786 | 18.642 д. | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 167 | 37-Rb- 87 | 3787 | 27.83 | СР | ENDF/B-VII | Желательно расширение RRR с учетом вклада пропущенных резонансов плавной подложкой или фиктивными резонансами. |

| 38.- Стронций | | | | | | |
|----------------------|-------------------|------|-------------------------|-----|------------|---|
| 168 | 38-Sr- 82 | 3882 | 25.55 д. | С | ЕАF2003 | |
| 169 | 38-Sr- 83 | 3883 | 32.41 ч. | С | ЕАF2003 | |
| 170 | 38-Sr- 84 | 3884 | 0.56 | СРФ | ENDF/B-VII | Эксп. данные по захвату нейтронов с энергией около 1 кэВ сильно противоречивы. |
| 171 | 38-Sr- 85 | 3885 | 64.84 д. | С | ЕАF2003 | |
| 172 | 38-Sr- 86 | 3886 | 9.86 | СР | JENDL-3.3 | |
| 173 | 38-Sr- 87 | 3887 | 7.00 | СР | JENDL-3.3 | |
| 174 | 38-Sr- 88 | 3888 | 82.58 | СР | ENDF/B-VII | |
| 175 | 38-Sr- 89 | 3889 | 50.57 д. | СР | CENDL-3 | |
| 176 | 38-Sr- 90 | 3890 | 28.90 з. | СР | JENDL-3.3 | Сечение захвата ниже 6эВ пониженно в 1.5 раза для согласования с эксп. данными. |
| 39.- Иттрий | | | | | | |
| 177 | 39-Y -87 | 3987 | 79.8 ч. | С | ЕАF2003 | |
| 178 | 39-Y -88 | 3988 | 106.616 д. | С | ЕАF2003 | |
| 179 | 39-Y -89 | 3989 | 100 | СР | JENDL-3.3 | |
| 180 | 39-Y -90 | 3990 | 64.053 ч. | СР | JEFF-3.1 | |
| 181 | 39-Y -91 | 3991 | 58.51 д. | СР | JENDL-3.3 | |
| 40.- Цирконий | | | | | | |
| 182 | 40-Zr- 88 | 4088 | 83.4 д. | С | ЕАF2003 | |
| 183 | 40-Zr- 89 | 4089 | 78.41 ч. | С | ЕАF2003 | |
| 184 | 40-Zr- 90 | 4090 | 51.45 | СРФ | БРОНД-3 | |
| 185 | 40-Zr- 91 | 4091 | 11.22 | СРФ | БРОНД-3 | |
| 186 | 40-Zr- 92 | 4092 | 17.15 | СРФ | БРОНД-3 | |
| 187 | 40-Zr- 93 | 4093 | 1.53*10 ⁶ з. | СР | БРОНД-3 | |
| 188 | 40-Zr- 94 | 4094 | 17.38 | СРФ | БРОНД-3 | |
| 189 | 40-Zr- 95 | 4095 | 64.032 д. | СР | БРОНД-3 | |
| 190 | 40-Zr- 96 | 4096 | 2.80 | СРФ | БРОНД-3 | |
| 41.- Ниобий | | | | | | |
| 191 | 41-Nb- 91 | 4191 | 680 з. | С | ЕАF2003 | |
| 192 | 41-Nb- 91m | 4111 | 60.86 д. | С | ЕАF2003 | |
| 193 | 41-Nb- 92 | 4192 | 3.47*10 ⁷ з. | С | ЕАF2003 | |
| 194 | 41-Nb- 92m | 4112 | 10.15 д. | С | ЕАF2003 | |
| 195 | 41-Nb- 93 | 4193 | 100 | СРФ | NEW | |
| 196 | 41-Nb- 93m | 4113 | 16.13 з. | С | ЕАF2003 | |
| 197 | 41-Nb- 94 | 4194 | 2.03*10 ⁴ з. | С | JEFF-3.1 | |
| 198 | 41-Nb- 95 | 4195 | 34.991 д. | С | ЕАF2003 | |
| 199 | 41-Nb- 95m | 4115 | 3.61 д. | С | ЕАF2003 | |
| 200 | 41-Nb- 96 | 4196 | 23.35 ч. | С | ЕАF2003 | |
| 42.- Молибден | | | | | | |
| 201 | 42-Mo- 92 | 4292 | 14.84 | СРФ | БРОНД-3 | |
| 202 | 42-Mo- 93 | 4293 | 4.0*10 ³ з. | С | ЕАF2003 | |
| 203 | 42-Mo- 94 | 4294 | 9.25 | СРФ | БРОНД-3 | |
| 204 | 42-Mo- 95 | 4295 | 15.92 | СРФ | БРОНД-3 | |
| 205 | 42-Mo- 96 | 4296 | 16.68 | СРФ | БРОНД-3 | |
| 206 | 42-Mo- 97 | 4297 | 9.55 | СРФ | БРОНД-3 | |
| 207 | 42-Mo- 98 | 4298 | 24.13 | СРФ | БРОНД-3 | |
| 208 | 42-Mo- 99 | 4299 | 2.7489 д. | СР | ФОНД-2.2 | |
| 209 | 42-Mo- 100 | 4210 | 9.63 | СРФ | БРОНД-3 | |

| 43.- Технеций | | | | | | |
|----------------------|------------|------|--------------------------|-----|-------------------|---|
| 210 | 43-Tc-95m | 4315 | 61 д. | С | EAF2003 | |
| 211 | 43-Tc-96 | 4396 | 4.28 д. | С | EAF2003 | |
| 212 | 43-Tc-97 | 4397 | 4.21*10 ⁶ з. | С | EAF2003 | |
| 213 | 43-Tc-97m | 4317 | 91.4 д. | С | EAF2003 | |
| 214 | 43-Tc-98 | 4398 | 4.2*10 ⁶ з. | С | EAF2003 | |
| 215 | 43-Tc-99 | 4399 | 2.111*10 ⁵ з. | СР | NEW | |
| 44.- Рутений | | | | | | |
| 216 | 44-Ru-96 | 4496 | 5.54 | С | EAF2003 | Дополнен данными о сечении образования Tc-95-m. |
| 217 | 44-Ru-97 | 4497 | 2.791 д. | С | EAF2003 | |
| 218 | 44-Ru-98 | 4498 | 1.87 | СР | JENDL-3.3 | Дополнен данными о сечении образования Tc-97-m. |
| 219 | 44-Ru-99 | 4499 | 12.76 | СР | JENDL-3.3 | Дополнен данными о сечении образования Tc-97-m. |
| 220 | 44-Ru-100 | 4410 | 12.60 | СР | JENDL-3.3 | |
| 221 | 44-Ru-101 | 4401 | 17.06 | СР | JENDL-3.3 | |
| 222 | 44-Ru-102 | 4402 | 31.55 | СР | ENDF/B-VII | |
| 223 | 44-Ru-103 | 4403 | 39.26 д. | СР | ENDF/B-VII | |
| 224 | 44-Ru-104 | 4404 | 18.62 | СР | ENDF/B-VII | |
| 225 | 44-Ru-106 | 4406 | 373.59 д. | СР | JENDL-3.3 | |
| 45.- Родий | | | | | | |
| 226 | 45-Rh-99 | 4599 | 16.1 д. | С | EAF2003 | |
| 227 | 45-Rh-101 | 4501 | 3.3 з. | С | EAF2003 | |
| 228 | 45-Rh-101m | 4511 | 4.34 д. | С | EAF2003 | |
| 229 | 45-Rh-102 | 4502 | 207 д. | С | EAF2003 | |
| 230 | 45-Rh-102m | 4512 | 2.9 з. | С | EAF2003 | |
| 231 | 45-Rh-103 | 4503 | 100 | СРФ | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Rh-101m и Rh-102m |
| 232 | 45-Rh-105 | 4505 | 35.36 ч. | СР | JENDL-3.3 | |
| 46.- Палладий | | | | | | |
| 233 | 46-Pd-100 | 4690 | 3.63 д. | С | EAF2003 | |
| 234 | 46-Pd-102 | 4602 | 1.02 | СРФ | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Rh-101m и Rh-102m |
| 235 | 46-Pd-103 | 4603 | 16.991 д. | С | EAF2003 | |
| 236 | 46-Pd-104 | 4604 | 11.14 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 237 | 46-Pd-105 | 4605 | 22.33 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 238 | 46-Pd-106 | 4606 | 27.33 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 239 | 46-Pd-107 | 4607 | 6.5*10 ⁶ з. | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 240 | 46-Pd-108 | 4608 | 26.46 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 241 | 46-Pd-110 | 4610 | 11.72 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 47.- Серебро | | | | | | |
| 242 | 47-Ag-105 | 4705 | 41.29 д. | С | EAF2003 | |
| 243 | 47-Ag-106m | 4716 | 8.28 д. | С | EAF2003 | |
| 244 | 47-Ag-107 | 4707 | 51.839 | СРФ | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Ag-106m и Ag-108m |
| 245 | 47-Ag-108m | 4718 | 438 з. | С | EAF2003 | |
| 246 | 47-Ag-109 | 4709 | 48.161 | СРФ | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Ag-108m и Ag-110m |
| 247 | 47-Ag-110m | 4730 | 249.76 д. | СРФ | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомера Ag-108m и Ag110g |
| 248 | 47-Ag-111 | 4711 | 7.45 д. | СРФ | ENDF/B-VII | |

| 48.- Кадмий | | | | | | |
|--------------------|-------------------|------|------------------|-----|------------|---|
| 249 | 48-Cd-106 | 4806 | 1.25 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомера Ag-106m |
| 250 | 48-Cd-108 | 4808 | 0.89 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Ag-106m и Ag-108m |
| 251 | 48-Cd-109 | 4809 | <i>461.4 д.</i> | C | EAF2003 | |
| 252 | 48-Cd-110 | 4810 | 12.49 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Ag-108m и Ag-110m |
| 253 | 48-Cd-111 | 4811 | 12.80 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомера Ag-110m |
| 254 | 48-Cd-112 | 4812 | 24.13 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Ag-110m и Cd-113m |
| 255 | 48-Cd-113 | 4813 | 12.22 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомера Cd-113m |
| 256 | 48-Cd-113m | 4833 | <i>14.1 г.</i> | C | EAF2003 | |
| 257 | 48-Cd-114 | 4814 | 28.73 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомера Cd-115m |
| 258 | 48-Cd-115 | 4815 | <i>53.46 ч.</i> | C | EAF2003 | Включены данные об образовании изомера Cd-115m |
| 259 | 48-Cd-115m | 4835 | <i>44.56 д.</i> | CPФ | ENDF/B-VII | Включена 9/17 и секция 10/4 |
| 260 | 48-Cd-116 | 4816 | 7.49 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомера Cd-115m |
| 49.- Индий | | | | | | |
| 261 | 49-In-111 | 4911 | <i>2.8047 д.</i> | C | EAF2003 | |
| 262 | 49-In-113 | 4913 | 4.29 | CP | ENDF/B-VII | Граница RRR увеличена с 600 до 830 эВ. Включены данные об образовании изомеров In-114m и Ag-110m; Cd-113 и Cd-113m . |
| 263 | 49-In-114m | 4934 | <i>49.51 д.</i> | C | EAF2003 | |
| 264 | 49-In-115 | 4915 | 95.71 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Cd-113m, Cd-115m, In-114m, In-115m и In-116m. Желательна переоценка сечений двух последних реакций, использующихся в активационных измерениях |

| 50.- Олово | | | | | | |
|--------------------|-------------------|-------------|-------------------------------|-----|------------|--|
| 265 | 50-Sn-112 | 5012 | 0.97 | CP | ENDF/B-VII | |
| 266 | 50-Sn-113 | 5013 | <i>115.09 д.</i> | CPФ | ENDF/B-VII | |
| 267 | 50-Sn-114 | 5014 | 0.66 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомера In-114m |
| 268 | 50-Sn-115 | 5015 | 0.34 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров In-114m и Cd-113m. |
| 269 | 50-Sn-116 | 5016 | 14.54 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Cd-113m, Cd-115m и Sn-117m |
| 270 | 50-Sn-117 | 5017 | 7.68 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомера Cd-115m |
| 271 | 50-Sn-117m | 5037 | <i>13.76 д.</i> | C | EAF2003 | Сохранены только данные об образовании изомера Cd-115m, а также Sn-117g. |
| 272 | 50-Sn-118 | 5018 | 24.22 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Cd-115m, Sn-117m и Sn-119m |
| 273 | 50-Sn-119 | 5019 | 8.59 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомера Cd-115m |
| 274 | 50-Sn-119m | 5039 | <i>293.1 д.</i> | C | EAF2003 | Сохранены только данные об образовании изомера Cd-117m. |
| 275 | 50-Sn-120 | 5020 | 32.58 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Sn-119m и Sn-121m |
| 276 | 50-Sn-121 | 5021 | <i>27.03 ч.</i> | C | EAF2003 | Включены данные об образовании Sn-119m. |
| 277 | 50-Sn-121m | 5031 | <i>43.9 з.</i> | C | EAF2003 | Сохранены только данные об образовании изомера Sn-119m |
| 278 | 50-Sn-122 | 5022 | 4.63 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомера Sn-121m. |
| 279 | 50-Sn-123 | 5023 | <i>129.2 д.</i> | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомера Sn-121m. |
| 280 | 50-Sn-124 | 5024 | 5.79 | CP | ENDF/B-VII | |
| 281 | 50-Sn-125 | 5025 | <i>9.64 д.</i> | CPФ | ENDF/B-VII | |
| 282 | 50-Sn-126 | 5026 | <i>2.30*10⁵ з.</i> | CP | ENDF/B-VII | |
| 51.- Сурьма | | | | | | |
| 283 | 51-Sb-119 | 5119 | <i>38.19 ч.</i> | C | EAF2003 | |
| 284 | 51-Sb-120m | 5110 | <i>5.76 д.</i> | C | EAF2003 | |
| 285 | 51-Sb-121 | 5121 | 57.21 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Sb-120m, Sn-121m и Sn-119m |
| 286 | 51-Sb-122 | 5122 | <i>2.7238 д.</i> | C | EAF2003 | |
| 287 | 51-Sb-123 | 5123 | 42.79 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомера Sn-121m |
| 288 | 51-Sb-124 | 5124 | <i>60.11 д.</i> | CP | ENDF/B-VII | |
| 289 | 51-Sb-125 | 5125 | <i>2.7586 з.</i> | CP | ENDF/B-VII | |
| 290 | 51-Sb-126 | 5126 | <i>12.35 д.</i> | CP | ENDF/B-VII | |
| 291 | 51-Sb-127 | 5127 | <i>3.85 д.</i> | C | EAF2003 | |

| 52.- Теллур | | | | | | |
|--------------------|-------------------|------|-------------------------|-----|------------|---|
| 292 | 52-Te-118 | 5218 | 6.00 д. | С | EAF2003 | |
| 293 | 52-Te-119m | 5239 | 4.70 д. | С | EAF2003 | |
| 294 | 52-Te-120 | 5220 | 0.09 | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Sb-120m, Sn-117m, Te-119m и Te-121m |
| 295 | 52-Te-121 | 5221 | 19.16 д. | СР | ENDF/B-VII | |
| 296 | 52-Te-121m | 5211 | 154 д. | С | EAF2003 | |
| 297 | 52-Te-122 | 5222 | 2.55 | СР | JENDL-3.3 | Включены данные об образовании изомеров Sb-119m, Te-121m и Te-123m |
| 298 | 52-Te-123 | 5223 | 0.89 | СР | JENDL-3.3 | Включены данные об образовании изомеров Sn-119m, Te-121m и Te-123m; |
| 299 | 52-Te-123m | 5213 | 119.2 д. | С | EAF2003 | |
| 300 | 52-Te-124 | 5224 | 4.74 | СР | JENDL-3.3 | Включены данные об образовании изомеров Sn-121m, Te-123m и Te-125m |
| 301 | 52-Te-125 | 5225 | 7.07 | СР | JENDL-3.3 | Включены данные об образовании изомеров Sn-121m, Te-123m и Te-125m |
| 302 | 52-Te-125m | 5215 | 57.40 д. | С | EAF2003 | |
| 303 | 52-Te-126 | 5226 | 18.84 | СР | JENDL-3.3 | Включены данные об образовании изомеров Te-125m и Te-127m |
| 304 | 52-Te-127m | 5237 | 109 д. | СР | JENDL-3.3 | |
| 305 | 52-Te-128 | 5228 | 31.74 | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Te-127m и Te-129m |
| 306 | 52-Te-129m | ## | 33.6 д. | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Te-125m и Te-125g. |
| 307 | 52-Te-130 | 5230 | 34.08 | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Te-129m и Te-131m |
| 308 | 52-Te-131m | ## | 30 ч. | С | EAF2003 | |
| 309 | 52-Te-132 | 5232 | 3.204 д. | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомера Te-131m |
| 53.- Йод | | | | | | |
| 310 | 53-I -124 | 5324 | 4.176 д. | С | EAF2003 | Сохранены только данные об образовании изомеров Sb-120m и Te-123m |
| 311 | 53-I -125 | 5325 | 59.40 д. | С | EAF2003 | |
| 312 | 53-I -126 | 5326 | 12.93 д. | С | EAF2003 | |
| 313 | 53-I -127 | 5327 | 100 | СРФ | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомера Te-127m. |
| 314 | 53-I -129 | 5329 | 1.57*10 ⁷ г. | СР | ENDF/B-VII | |
| 315 | 53-I -131 | 5331 | 8.0207 д. | СР | ENDF/B-VII | |
| 316 | 53-I -135 | 5335 | 6.57 ч. | СР | ENDF/B-VII | |

| 54.- Ксенон | | | | | | |
|--------------------|-------------------|------|------------------------------|----|------------|---|
| 317 | 54-Xe-124 | 5424 | 0.095 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомера Te-121m |
| 318 | 54-Xe-126 | 5426 | 0.089 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Te-123 и Te-123m |
| 319 | 54-Xe-127 | 5427 | <i>36.4 д.</i> | C | EAF2003 | |
| 320 | 54-Xe-128 | 5428 | 1.910 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Xe-129 и Xe-129m, а также Te-123 и Te-123m |
| 321 | 54-Xe-129 | 5429 | 26.40 | CP | ФОНД-2.2 | Пересмотрены рез. параметры. Включены данные об образовании Xe-129m, Te-125 и Te-125m, а также Te-127 и Te-127m |
| 322 | 54-Xe-129m | 5419 | <i>8.88 д.</i> | C | EAF2003 | |
| 323 | 54-Xe-130 | 5430 | 4.071 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Xe-131 и Xe-131m, а также Te-127, Te-127m и Te-129, Te-129m |
| 324 | 54-Xe-131 | 5431 | 21.232 | CP | JENDL-3.3 | Включены данные об образовании Xe-131m, Te-129 и Te-129m, а также Te-127 и Te-127m |
| 325 | 54-Xe-131m | 5411 | <i>11.934 д.</i> | C | EAF2003 | |
| 326 | 54-Xe-132 | 5432 | 26.909 | CP | JENDL-3.3 | Включены данные об образовании Te-129, Te-129m, а также Xe-131, Xe-131m и Xe-133, Xe-133m |
| 327 | 54-Xe-133 | 5433 | <i>5.243 д.</i> | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании изомеров Te-129m, Xe-131m и Xe-133m |
| 328 | 54-Xe-133m | 5413 | <i>2.19 д.</i> | C | EAF2003 | |
| 329 | 54-Xe-134 | 5434 | 10.436 | CP | ФОНД-2.2 | Пересмотрены рез. параметры. обавлены секции 9/16и 9/107 (образование Xe-133m и Te-131m) |
| 330 | 54-Xe-135 | 5435 | <i>9.14 ч.</i> | CP | CENDL-3 | |
| 331 | 54-Xe-136 | 5436 | 8.857 | CP | ФОНД-2.2 | Пересмотрены рез. параметры. |
| 55. Цезий | | | | | | |
| 332 | 55-Cs-129 | 5529 | <i>32.06 ч.</i> | C | EAF2003 | |
| 333 | 55-Cs-131 | 5531 | <i>9.689 д.</i> | C | EAF2003 | |
| 334 | 55-Cs-132 | 5532 | <i>6.480 д.</i> | C | EAF2003 | |
| 335 | 55-Cs-133 | 5533 | 100 | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Xe-133 и Xe-133m |
| 336 | 55-Cs-134 | 5534 | <i>2.0652 з.</i> | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Xe-133 и Xe-133m |
| 337 | 55-Cs-135 | 5535 | <i>2.3*10⁶ з.</i> | CP | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Xe-133 и Xe-133m. Желательна переоценка сечения захвата быстрых нейтронов с учетом новых эксп. данных. |
| 338 | 55-Cs-136 | 5536 | <i>13.04 д.</i> | CP | ENDF/B-VII | Желательна переоценка сечения захвата быстрых нейтронов с учетом новых эксп. данных. |
| 339 | 55-Cs-137 | 5537 | <i>30.03 з.</i> | CP | ENDF/B-VII | Желательна переоценка сечения захвата быстрых нейтронов с учетом новых эксп. данных. |

| |
|-------------------|
| 56.- Барий |
|-------------------|

| | | | | | | |
|----------------------|------------|------|-----------------------|-----|------------|---|
| 340 | 56-Ba-128 | 5628 | 2.43 д. | С | EAF2003 | |
| 341 | 56-Ba-130 | 5630 | 0.106 | СР | ENDF/B-VII | |
| 342 | 56-Ba-131 | 5631 | 11.50 д. | С | EAF2003 | |
| 343 | 56-Ba-132 | 5632 | 0.101 | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Ва-133 и Ва-133m, а также Хе-129 и Хе-129m |
| 344 | 56-Ba-133 | 5633 | 3841 д. | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Ва-133 и Ва-133m, а также Хе-129 и Хе-129m |
| 345 | 56-Ba-133m | 5613 | 38.9 ч. | С | EAF2003 | |
| 346 | 56-Ba-134 | 5634 | 2.417 | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Хе-131 ,Хе-131m, Ва-133 и Ва-133m, а также Ва-135 и Ва-135m |
| 347 | 56-Ba-135 | 5635 | 6.592 | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Хе-131 ,Хе-131m, Хе-133 и Хе-133m, а также Ва-135m, Ва-133 и Ва-133m |
| 348 | 56-Ba-135m | 5615 | 28.7 ч. | С | EAF2003 | |
| 349 | 56-Ba-136 | 5636 | 7.854 | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Хе-133 и Хе-133m и Ва-135 и Ва-135m. |
| 350 | 56-Ba-137 | 5637 | 11.232 | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Хе-133 и Хе-133m, а также Ва-135 и Ва-135m. |
| 351 | 56-Ba-138 | 5638 | 71.698 | СР | ENDF/B-VII | |
| 352 | 56-Ba-140 | 5640 | 12.752 д. | СР | ENDF/B-VII | |
| 57.- Лантан | | | | | | |
| 353 | 57-La-137 | 5737 | 6.*10 ⁴ з. | С | EAF2003 | Сохранены только данные об образовании Ва-135 и Ва-135m. |
| 354 | 57-La-138 | 5738 | 0.09 | СР | JENDL-3.3 | |
| 355 | 57-La-139 | 5739 | 99.91 | СР | ENDF/B-VII | |
| 356 | 57-La-140 | 5740 | 1.6781 д. | СР | ENDF/B-VII | |
| 58.- Церий | | | | | | |
| 357 | 58-Ce-134 | 5834 | 3.16 д. | С | EAF2003 | |
| 358 | 58-Ce-136 | 5836 | 0.185 | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Се-137m и Се-137g; Ва-133 и Ва-133m. |
| 359 | 58-Ce-137m | 5817 | 34.4 ч. | С | EAF2003 | Сохранены только данные об образовании Ва-133m и Ва-135m |
| 360 | 58-Ce-138 | 5838 | 0.251 | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Се-137m и Се-137g и Ва-135, Ва-135m. |
| 361 | 58-Ce-139 | 5839 | 137.641 д. | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Се-137m и Се-137g и Ва-135g, Ва-135m. |
| 362 | 58-Ce-140 | 5840 | 88.450 | СР | ENDF/B-VII | |
| 363 | 58-Ce-141 | 5841 | 32.508 д. | СР | ENDF/B-VII | |
| 364 | 58-Ce-142 | 5842 | 11.114 | СР | ENDF/B-VII | |
| 365 | 58-Ce-143 | 5843 | 33.039 ч. | СР | ENDF/B-VII | |
| 366 | 58-Ce-144 | 5844 | 284.91 д. | СР | ENDF/B-VII | |
| 59.- Прометий | | | | | | |
| 367 | 59-Pr-141 | 5941 | 100 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 368 | 59-Pr-143 | 5943 | 13.57 д. | СР | ENDF/B-VII | |

| 60.- Неодим | | | | | | |
|----------------------|-------------------|------|-------------------------|-----|------------|--|
| 369 | 60-Nd-140 | 6040 | 3.37 д. | С | EAF2003 | Сохранены только данные об образовании Ce-137 и Ce-137m. |
| 370 | 60-Nd-142 | 6042 | 27.2 | СР | ENDF/B-VII | |
| 371 | 60-Nd-143 | 6043 | 12.2 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 372 | 60-Nd-144 | 6044 | 23.8 | СР | ENDF/B-VII | |
| 373 | 60-Nd-145 | 6045 | 8.3 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 374 | 60-Nd-146 | 6046 | 17.2 | СР | ENDF/B-VII | |
| 375 | 60-Nd-147 | 6047 | 10.98 д. | СР | ENDF/B-VII | |
| 376 | 60-Nd-148 | 6048 | 5.7 | СР | ENDF/B-VII | |
| 377 | 60-Nd-150 | 6050 | 5.6 | СР | ENDF/B-VII | |
| 61.- Прометий | | | | | | |
| 378 | 61-Pm-143 | 6143 | 265 д. | С | EAF2003 | |
| 379 | 61-Pm-144 | 6144 | 363 д. | С | EAF2003 | |
| 380 | 61-Pm-145 | 6145 | 17.7 з. | С | EAF2003 | |
| 381 | 61-Pm-146 | 6146 | 5.53 з. | С | EAF2003 | |
| 382 | 61-Pm-147 | 6147 | 2.6234 з. | СР | JENDL-3.3 | Включены данные об образовании Pm-148 и Pm-148m. |
| 383 | 61-Pm-148 | 6148 | 5.368 д. | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Pm-148m |
| 384 | 61-Pm-148m | 6118 | 41.29 д. | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Pm-148g |
| 385 | 61-Pm-149 | 6149 | 53.08 ч. | СР | JENDL-3.3 | Включены данные об образовании Pm-148 и Pm-148m. |
| 386 | 61-Pm-151 | 6151 | 28.4 ч. | СР | JEFF-3.1 | |
| 62.- Самарий | | | | | | |
| 387 | 62-Sm-144 | 6244 | 3.07 | СР | JENDL-3.3 | |
| 388 | 62-Sm-145 | 6245 | 340 д. | С | EAF2003 | |
| 389 | 62-Sm-146 | 6246 | 1.03*10 ⁸ з. | С | EAF2003 | |
| 390 | 62-Sm-147 | 6247 | 14.99 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 391 | 62-Sm-148 | 6248 | 11.24 | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Pm-148 и Pm-148m. |
| 392 | 62-Sm-149 | 6249 | 13.82 | СРФ | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Pm-148 и Pm-148m. I382 |
| 393 | 62-Sm-150 | 6250 | 7.38 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 394 | 62-Sm-151 | 6251 | 90 з. | | ENDF/B-VII | |
| 395 | 62-Sm-152 | 6252 | 26.75 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 396 | 62-Sm-153 | 6253 | 46.284 ч. | СР | ФОНД-2.2 | |
| 397 | 62-Sm-154 | 6254 | 22.75 | СР | ENDF/B-VII | |
| 63.- Европий | | | | | | |
| 398 | 63-Eu-145 | 6345 | 5.93 д. | С | EAF2003 | |
| 399 | 63-Eu-146 | 6346 | 4.61 д. | С | EAF2003 | |
| 400 | 63-Eu-147 | 6347 | 24.1 д. | С | EAF2003 | |
| 401 | 63-Eu-148 | 6348 | 54.5 д. | С | EAF2003 | |
| 402 | 63-Eu-149 | 6349 | 93.1 д. | С | EAF2003 | Сохранены данные об образовании Pm-149 и Pm-149m. |
| 403 | 63-Eu-150 | 6350 | 36.9 з. | С | EAF2003 | |
| 404 | 63-Eu-151 | 6351 | 47.81 | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Pm-148 и Pm-148m. |
| 405 | 63-Eu-152 | 6352 | 13.506 з. | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Pm-148 и Pm-148m. |
| 406 | 63-Eu-153 | 6353 | 52.19 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 407 | 63-Eu-154 | 6354 | 8.590 з. | СР | ENDF/B-VII | |
| 408 | 63-Eu-155 | 6355 | 4.753 з. | СР | ENDF/B-VII | |
| 409 | 63-Eu-156 | 6356 | 15.19 д. | СР | ENDF/B-VII | |

| 64.- Гадолиний | | | | | | |
|-----------------------|-------------------|------|-------------------------|-----|------------|--|
| 410 | 64-Gd-146 | 6446 | 48.27 д. | С | EAF2003 | |
| 411 | 64-Gd-147 | 6447 | 38.06 ч. | С | EAF2003 | |
| 412 | 64-Gd-148 | 6448 | 70.9 з. | С | EAF2003 | |
| 413 | 64-Gd-149 | 6449 | 9.28 д. | С | EAF2003 | |
| 414 | 64-Gd-150 | 6450 | 1.79*10 ⁶ з. | С | EAF2003 | |
| 415 | 64-Gd-151 | 6451 | 124 д. | С | EAF2003 | |
| 416 | 64-Gd-152 | 6452 | 0.20 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 417 | 64-Gd-153 | 6453 | 240.4 д. | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 418 | 64-Gd-154 | 6454 | 2.18 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 419 | 64-Gd-155 | 6455 | 14.8 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 420 | 64-Gd-156 | 6456 | 20.47 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 421 | 64-Gd-157 | 6457 | 15.65 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 422 | 64-Gd-158 | 6458 | 24.84 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 423 | 64-Gd-160 | 6460 | 21.86 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 65.- Тербий | | | | | | |
| 424 | 65-Tb-153 | 6553 | 2.34 д. | С | EAF2003 | |
| 425 | 65-Tb-155 | 6555 | 5.32 д. | С | EAF2003 | |
| 426 | 65-Tb-156 | 6556 | 5.35 д. | С | EAF2003 | |
| 427 | 65-Tb-156m | 6516 | 24.4 ч. | С | EAF2003 | |
| 428 | 65-Tb-157 | 6557 | 71 з. | С | EAF2003 | |
| 429 | 65-Tb-158 | 6558 | 180 з. | С | EAF2003 | |
| 430 | 65-Tb-159 | 6559 | 100 | СР | JENDL-3.3 | |
| 431 | 65-Tb-160 | 6560 | 72.3 д. | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 432 | 65-Tb-161 | 6561 | 6.906 д. | С | EAF2003 | |
| 66.- Диспрозий | | | | | | |
| 433 | 66-Dy-154 | 6654 | 3.0*10 ⁶ з. | С | EAF2003 | |
| 434 | 66-Dy-156 | 6656 | 0.06 | СРФ | ENDF/B-VII | Включены данные о сечении и энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов реакции (n,3n). Включены данные об образовании Tb-156 и Tb-156m. |
| 435 | 66-Dy-158 | 6658 | 0.10 | СРФ | ENDF/B-VII | Включены данные о сечении и энерго-угловых распределениях нейтронов реакции (n,3n) |
| 436 | 66-Dy-159 | 6659 | 144.4 д. | С | EAF2003 | |
| 437 | 66-Dy-160 | 6660 | 2.34 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 438 | 66-Dy-161 | 6661 | 18.91 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 439 | 66-Dy-162 | 6662 | 25.51 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 440 | 66-Dy-163 | 6663 | 24.90 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 441 | 66-Dy-164 | 6664 | 28.18 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 442 | 66-Dy-165 | 6665 | 2.334 ч. | С | EAF2003 | |
| 443 | 66-Dy-166 | 6666 | 81.6 ч. | С | EAF2003 | |
| 67.- Гольмий | | | | | | |
| 444 | 67-Ho-163 | 6763 | 4570 з. | С | EAF2003 | |
| 445 | 67-Ho-165 | 6765 | 100 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 446 | 67-Ho-166 | 6766 | 26.83 ч. | С | EAF2003 | |
| 447 | 67-Ho-166m | 6716 | 1.20*10 ³ з. | С | EAF2003 | |

| 68.- Эрбий | | | | | | |
|----------------------|-------------------|------|---------------|-----|------------|--|
| 448 | 68-Er-160 | 6860 | 28.58 ч. | С | EAF2003 | |
| 449 | 68-Er-162 | 6862 | 0.139 | СРФ | JENDL-3.3 | Граница области разрешенных резонансов завышена |
| 450 | 68-Er-164 | 6864 | 1.601 | СРФ | JENDL-3.3 | Граница области разрешенных резонансов завышена |
| 451 | 68-Er-166 | 6866 | 33.503 | СРФ | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Ho-166m и Ho-166g |
| 452 | 68-Er-167 | 6867 | 22.869 | СРФ | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Ho-166m и Ho-166g |
| 453 | 68-Er-168 | 6868 | 26.978 | СРФ | ENDF/B-VII | Рез. параметры взяты из ENDF/B-VII, но граница RRR снижена до 5 кэВ |
| 454 | 68-Er-169 | 6869 | 9.392 д. | С | EAF2003 | |
| 455 | 68-Er-170 | 6870 | 14.910 | СРФ | ENDF/B-VII | |
| 456 | 68-Er-172 | 6872 | 49.3 ч. | С | EAF2003 | |
| 69.- Туллий | | | | | | |
| 457 | 69-Tm-165 | 6965 | 30.06 ч. | С | EAF2003 | |
| 458 | 69-Tm-167 | 6967 | 9.25 д. | С | EAF2003 | |
| 459 | 69-Tm-168 | 6968 | 93.1 д. | С | EAF2003 | |
| 460 | 69-Tm-169 | 6969 | 100 | С | EAF2003 | |
| 461 | 69-Tm-170 | 6970 | 128.6 д. | С | EAF2003 | |
| 462 | 69-Tm-171 | 6971 | 1.92 з. | С | EAF2003 | |
| 463 | 69-Tm-172 | 6972 | 63.6 ч. | С | EAF2003 | |
| 70.- Иттербий | | | | | | |
| 464 | 70-Yb-166 | 7066 | 56.7 ч. | С | EAF2003 | |
| 465 | 70-Yb-168 | 7068 | 0.13 | С | EAF2003 | |
| 466 | 70-Yb-169 | 7069 | 32.018 д. | С | EAF2003 | |
| 467 | 70-Yb-170 | 7070 | 3.04 | С | EAF2003 | |
| 468 | 70-Yb-171 | 7071 | 14.28 | С | EAF2003 | |
| 469 | 70-Yb-172 | 7072 | 21.83 | С | EAF2003 | |
| 470 | 70-Yb-173 | 7073 | 16.13 | С | EAF2003 | |
| 471 | 70-Yb-174 | 7074 | 31.83 | С | EAF2003 | |
| 472 | 70-Yb-175 | 7075 | 4.185 д. | С | EAF2003 | |
| 473 | 70-Yb-176 | 7076 | 12.76 | С | EAF2003 | |
| 71.- Лютеций | | | | | | |
| 474 | 71-Lu-169 | 7169 | 34.06 д. | С | EAF2003 | |
| 475 | 71-Lu-170 | 7170 | 2.012 д. | С | EAF2003 | |
| 476 | 71-Lu-171 | 7171 | 8.24 д. | С | EAF2003 | |
| 477 | 71-Lu-172 | 7172 | 6.70 д. | С | EAF2003 | |
| 478 | 71-Lu-173 | 7173 | 1.37 з. | С | EAF2003 | |
| 479 | 71-Lu-174 | 7174 | 3.31 з. | С | EAF2003 | |
| 480 | 71-Lu-174m | 7114 | 142 д. | С | EAF2003 | |
| 481 | 71-Lu-175 | 7175 | 97.41 | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Lu-174m и Lu-174g. |
| 482 | 71-Lu-176 | 7176 | 2.59 | СР | ENDF/B-VII | Включены данные об образовании Lu-174m и Lu-174g, Lu-177m и Lu-177g. |
| 483 | 71-Lu-177 | 7177 | 6.6475 д. | С | EAF2003 | |
| 484 | 71-Lu-177m | 7117 | 160.44 д. | С | EAF2003 | |

| 72.- Гафний | | | | | | |
|----------------------|-------------------|------|------------------------|-----|-----------|---|
| 485 | 72-Hf-172 | 7272 | 1.87 з. | С | EAF2003 | |
| 486 | 72-Hf-174 | 7274 | 0.16 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 487 | 72-Hf-175 | 7275 | 70 д. | С | EAF2003 | |
| 488 | 72-Hf-176 | 7276 | 5.26 | СРФ | JEFF-3.1 | |
| 489 | 72-Hf-177 | 7277 | 18.60 | СРФ | JEFF-3.1 | Включены данные об образовании Lu-177m и Lu-177g, а также Hf-178n,Hf-178m,Hf-178g |
| 490 | 72-Hf-178 | 7278 | 27.28 | СРФ | JEFF-3.1 | Включены данные об образовании Hf-179n,Hf-179m,Hf-179g |
| 491 | 72-Hf-178n | 7228 | 31 з. | С | EAF2003 | |
| 492 | 72-Hf-179 | 7279 | 13.62 | СРФ | JEFF-3.1 | Включены данные об образовании Hf-178n,Hf-178m,Hf-178g |
| 493 | 72-Hf-179n | 7229 | 25.05 д. | С | EAF2003 | |
| 494 | 72-Hf-180 | 7280 | 35.08 | СРФ | JEFF-3.1 | Включены данные об образовании Hf-178n,Hf-178m,Hf-178g, а также Hf-179n,Hf-179m,Hf-179g |
| 495 | 72-Hf-181 | 7281 | 42.39 д. | С | EAF2003 | |
| 496 | 72-Hf-182 | 7282 | 8.9*10 ⁶ з. | С | EAF2003 | |
| 73.- Тантал | | | | | | |
| 497 | 73-Ta-177 | 7377 | 56.56 ч. | С | EAF2003 | |
| 498 | 73-Ta-179 | 7379 | 1.82 з. | С | EAF2003 | |
| 499 | 73-Ta-180m | 7310 | 0.012 | С | EAF2003 | Включены данные об образовании Hf-178n,Hf-178m,Hf-178g; Hf-179n,Hf-179m,Hf-179g;Lu-177m, Lu-177g; Ta-180m, Ta-180g. |
| 500 | 73-Ta-181 | 7381 | 99.988 | СРФ | JENDL-3.3 | Включены данные об образовании Ta-180m и Ta-180g |
| 501 | 73-Ta-182 | 7382 | 114.43 д. | СР | JEFF-3.1 | Включены данные об образовании Ta-180m и Ta-180g. |
| 502 | 73-Ta-183 | 7383 | 5.1 д. | С | EAF2003 | |
| 74.- Вольфрам | | | | | | |
| 503 | 74- W-178 | 7478 | 21.6 д. | С | EAF2003 | |
| 504 | 74- W-180 | 7480 | 0.12 | СРФ | ФОНД-2.2 | В области разрешенных оценка существенно пересмотрена. Включены данные об образовании Ta-180m и Ta-180g |
| 505 | 74- W-181 | 7481 | 121.2 д. | С | EAF2003 | |
| 506 | 74- W-182 | 7482 | 26.50 | СРФ | ФОНД-2.2 | Внесен ряд существенных изменений. Включены данные об образовании Hf-178n,Hf-178m,Hf-178g; Hf-179n,Hf-179m,Hf-179g; Ta-180m, Ta-180g. |
| 507 | 74- W-183 | 7483 | 14.31 | СРФ | NEW | |
| 508 | 74- W-184 | 7484 | 30.64 | СРФ | NEW | |
| 509 | 74- W-185 | 7485 | 75.1 д. | С | EAF2003 | |
| 510 | 74- W-186 | 7486 | 28.43 | СРФ | NEW | |
| 511 | 74- W-188 | 7488 | 69.78 д. | С | EAF2003 | |

| 75.- Рений | | | | | | |
|--------------------|-------------------|------|-------------------------|-----|------------|---|
| 512 | 75-Re-182 | 7582 | 64.0 ч. | С | ЕАФ2003 | |
| 513 | 75-Re-183 | 7583 | 70.0 д. | С | ЕАФ2003 | |
| 514 | 75-Re-184 | 7584 | 38.0 д. | С | ЕАФ2003 | Включены данные об образовании Та-180 ,Та-180m. |
| 515 | 75-Re-184m | 7514 | 169.0 д. | С | ЕАФ2003 | Включены данные об образовании Та-180 ,Та-180m. |
| 516 | 75-Re-185 | 7585 | 37.40 | СР | ЕНДФ/В-VII | Граница RRR и URR снижена с 2000эВ до 500 эВ. Пересмотрено сечение захвата в URR.Включены данные об образовании Re-186m и Re184m. |
| 517 | 75-Re-186 | 7586 | 3.7186 д. | С | ЕАФ2003 | Включены данные об образовании Re-184m.g. |
| 518 | 75-Re-186m | 7516 | 2.0.*10 ⁵ з. | С | ЕАФ2003 | Включены данные об образовании Re-184m.g и Re-186g |
| 519 | 75-Re-187 | 7587 | 62.60 | СР | ЕНДФ/В-VII | Граница RRR и URR снижена с 2000эВ до 600 эВ. Пересмотрено сечение захвата в URR.. |
| 520 | 75-Re-189 | 7589 | 24.3 ч. | С | ЕАФ2003 | |
| 76.- Осмий | | | | | | |
| 521 | 76-Os-nat | 7600 | | СРФ | ФОНД-2.2 | |
| 522 | 76-Os-184 | 7684 | 0.02 | С | ЕАФ2003 | |
| 523 | 76-Os-185 | 7685 | 93.6 д. | С | ЕАФ2003 | |
| 524 | 76-Os-186 | 7686 | 1.59 | С | ЕАФ2003 | |
| 525 | 76-Os-187 | 7687 | 1.60 | С | ЕАФ2003 | |
| 526 | 76-Os-188 | 7688 | 13.29 | С | ЕАФ2003 | |
| 527 | 76-Os-189 | 7689 | 16.21 | С | ЕАФ2003 | |
| 528 | 76-Os-190 | 7690 | 26.36 | С | ЕАФ2003 | |
| 529 | 76-Os-191 | 7691 | 15.4 д. | С | ЕАФ2003 | |
| 530 | 76-Os-192 | 7692 | 40.93 | С | ЕАФ2003 | |
| 531 | 76-Os-193 | 7693 | 30.11 ч. | С | ЕАФ2003 | |
| 532 | 76-Os-194 | 7694 | 6.0 з. | С | ЕАФ2003 | |
| 77.- Иридий | | | | | | |
| 533 | 77-Ir-188 | 7788 | 41.5 ч. | С | ЕАФ2003 | Включены данные лб образовании Re-184m.g и Re-186 m.g. |
| 534 | 77-Ir-189 | 7789 | 13.2 д. | С | ЕАФ2003 | Сохранена только 9/107. |
| 535 | 77-Ir-190 | 7790 | 11.78 д. | С | ЕАФ2003 | Сохранена только 9/22 |
| 536 | 77-Ir-191 | 7791 | 37.3 | СРФ | ЕНДФ/В-VII | Включены данные об образовании Ir-192m и Ir-192g |
| 537 | 77-Ir-192 | 7792 | 73.827 д. | С | ЕАФ2003 | Сохранены только 9/17, 9/102 и 10/4 |
| 538 | 77-Ir-192n | 7722 | 241 з. | С | ЕАФ2003 | Сохранены только 9/17, 9/102 и 10/4 |
| 539 | 77-Ir-193 | 7793 | 62.7 | СРФ | ЕНДФ/В-VII | Включены данные об образовании Ir-192m.g и Ir-194m. Желательно сформировать секцию MF=9, MT=4 на основе данных файлов MF=3 и MF=12. |
| 540 | 77-Ir-193m | 7713 | 10.53 д. | С | ЕАФ2003 | Включены данные об образовании Ir-192m.g и Ir-194m. |
| 541 | 77-Ir-194m | 7714 | 171 д. | С | ЕАФ2003 | |

| 78.- Платина | | | | | | |
|---------------------|-------------------|------|---------------|-----|------------|--|
| 542 | 78-Pt-nat | 7800 | | СРФ | ФОНД-2.2 | |
| 543 | 78-Pt-188 | 7888 | 10.2 д. | С | ЕАФ2003 | |
| 544 | 78-Pt-190 | 7890 | 0.014 | С | ЕАФ2003 | |
| 545 | 78-Pt-191 | 7891 | 2.862 д. | С | ЕАФ2003 | |
| 546 | 78-Pt-192 | 7892 | 0.782 | С | ЕАФ2003 | Сохранены только 9/102 и 9/103 |
| 547 | 78-Pt-193 | 7893 | 50 г. | С | ЕАФ2003 | Сохранены только 9/103, 9/104 и 10/4 |
| 548 | 78-Pt-193m | 7813 | 4.33 д. | С | ЕАФ2003 | Сохранены только 9/103, 9/103 и 10/4 |
| 549 | 78-Pt-194 | 7894 | 32.967 | С | ЕАФ2003 | Сохранены 9/103, 9/104, 9/105, 9/32, 9/28 и 9/16 |
| 550 | 78-Pt-195 | 7895 | 33.832 | С | ЕАФ2003 | Сохранены 9/104, 9/105, 9/32, 9/17, 9/28, 9/32, 9/33 и 10/4 |
| 551 | 78-Pt-195m | 7815 | 4.010 д. | С | ЕАФ2003 | Сохранены 9/104, 9/105, 9/32, 9/17, 9/28, 9/32, 9/33 и 10/4 |
| 552 | 78-Pt-196 | 7896 | 25.242 | С | ЕАФ2003 | Сохранены только 9/105 и 9/32, 9/33 и 9/16 |
| 553 | 78-Pt-198 | 7898 | 7.163 | С | ЕАФ2003 | |
| 554 | 78-Pt-202 | 7802 | 44 ч. | С | ЕАФ2003 | |
| 79.- Золото | | | | | | |
| 555 | 79-Au-194 | 7994 | 38.02 ч. | С | ЕАФ2003 | Сохранены только 9/104, 9/28 и 9/106 |
| 556 | 79-Au-195 | 7995 | 186.098 д. | С | ЕАФ2003 | Сохранены только 9/22, 9/28 и 9/103, 9/104, 9/106, 9/107, 9/111 |
| 557 | 79-Au-196 | 7996 | 6.1669 д. | С | ЕАФ2003 | Сохранены только 9/22, 9/28 и 9/103, 9/104, 9/106, 9/107 |
| 558 | 79-Au-197 | 7997 | 100 | СРФ | ENDF/B-VII | Файл дополнен данными о сечениях реакций (n,t) и (n,nd). Включены данные об образовании Pt-195m,g; Ir- 193m,g и Au-198 m,g |
| 559 | 79-Au-198 | 7998 | 2.6956 д. | С | ЕАФ2003 | Сохранена только 9/22. |
| 560 | 79-Au-198m | 7918 | 2.27 д. | С | ЕАФ2003 | Сохранена только 9/22. |
| 561 | 79-Au-199 | 7999 | 3.139 д. | С | ЕАФ2003 | Сохранена только 9/16. |
| 80.- Ртуть | | | | | | |
| 562 | 80-Hg-194 | 8094 | 444 г. | С | ЕАФ2003 | Сохранена только секция 9/102. |
| 563 | 80-Hg-195m | 8015 | 41.6 ч. | С | ЕАФ2003 | Сохранена только секция 9/22. MT4 переведена из MF3 в MF10 |
| 564 | 80-Hg-196 | 8096 | 0.15 | СРФ | JENDL-3.3 | Включены данные об образовании Pt-193m и Hg-195m. |
| 565 | 80-Hg-197 | 8097 | 64.14 ч. | С | ЕАФ2003 | Сохранены данные об образовании Pt-193m,g, Pt-195m,g и Hg-195m,g. |
| 566 | 80-Hg-198 | 8098 | 9.97 | СРФ | JENDL-3.3 | Включены данные об образовании Pt-195m,g и Au-198 m,g |
| 567 | 80-Hg-199 | 8099 | 16.87 | СРФ | JENDL-3.3 | Включены данные об образовании Au-198 m,g и Pt-195m,g |
| 568 | 80-Hg-200 | 8020 | 23.10 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 569 | 80-Hg-201 | 8001 | 13.18 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 570 | 80-Hg-202 | 8002 | 29.86 | СРФ | JENDL-3.3 | |
| 571 | 80-Hg-203 | 8003 | 46.595 д. | С | ЕАФ2003 | |
| 572 | 80-Hg-204 | 8004 | 6.87 | СРФ | JENDL-3.3 | |

| 81.- Таллий | | | | | | |
|---------------------|-------------------|------|-------------------------|-----|-----------|---|
| 573 | 81-Tl-nat | 8100 | | CP | CENDL-2.1 | Внесены небольшие коррекции в сечение захвата и в полное сечение в окрестности 50 кэВ. |
| 574 | 81-Tl-200 | 8120 | 26.1 ч. | C | EAF2003 | |
| 575 | 81-Tl-201 | 8101 | 72.912 ч. | C | EAF2003 | |
| 576 | 81-Tl-202 | 8102 | 12.23 д. | C | EAF2003 | |
| 577 | 81-Tl-203 | 8103 | 29.524 | C | EAF2003 | |
| 578 | 81-Tl-204 | 8104 | 3.78 з. | C | EAF2003 | |
| 579 | 81-Tl-205 | 8105 | 70.476 | C | EAF2003 | |
| 82.- Свинец | | | | | | |
| 580 | 82-Pb-202 | 8202 | 5.25*10 ⁴ з. | C | EAF2003 | |
| 581 | 82-Pb-203 | 8203 | 51.92 ч. | C | EAF2003 | |
| 582 | 82-Pb-204 | 8204 | 1.4 | CP | JEFF-3.1 | |
| 583 | 82-Pb-205 | 8205 | 1.73*10 ⁷ з. | C | EAF2003 | |
| 584 | 82-Pb-206 | 8206 | 24.1 | CP | JEFF-3.1 | |
| 585 | 82-Pb-207 | 8207 | 22.1 | CP | JEFF-3.1 | |
| 586 | 82-Pb-208 | 8208 | 52.4 | CP | JEFF-3.1 | |
| 587 | 82-Pb-210 | 8210 | 22.20 з. | C | EAF2003 | |
| 83.- Висмут | | | | | | |
| 588 | 83-Bi-205 | 8305 | 15.31 д. | C | EAF2003 | |
| 589 | 83-Bi-206 | 8306 | 6.243 д. | C | EAF2003 | |
| 590 | 83-Bi-207 | 8307 | 32.9 з. | C | EAF2003 | |
| 591 | 83-Bi-208 | 8308 | 3.68*10 ⁵ з. | C | EAF2003 | |
| 592 | 83-Bi-209 | 8309 | 100 | CPФ | БРОНД-3 | Включены данные об образовании Bi-210m,g |
| 593 | 83-Bi-210 | 8310 | 5.012 д. | C | EAF2003 | |
| 594 | 83-Bi-210m | 8330 | 3.04*10 ⁶ з. | C | EAF2003 | Секция MF=4 перенесена из файла MF=3 в файл MF=10. |
| 84.- Полоний | | | | | | |
| 595 | 84-Po-206 | 8406 | 8.8 д. | C | EAF2003 | |
| 596 | 84-Po-208 | 8408 | 2.898 з. | C | EAF2003 | |
| 597 | 84-Po-209 | 8409 | 102 года | C | EAF2003 | |
| 598 | 84-Po-210 | 8410 | 138.376 д. | C | EAF2003 | |
| 599 | 86-Rn-222 | 8622 | 3.8235 д. | C | EAF2003 | |
| 88.- Радий | | | | | | |
| 600 | 88-Ra-223 | 8823 | 11.43 д. | CP | JENDL-3.3 | |
| 601 | 88-Ra-224 | 8824 | 3.6319 д. | CP | JENDL-3.3 | |
| 602 | 88-Ra-225 | 8825 | 14.9 д. | CP | JENDL-3.3 | |
| 603 | 88-Ra-226 | 8826 | 1600 з. | CP | JENDL-3.3 | |
| 604 | 88-Ra-228 | 8827 | 5.75 з. | C | EAF2003 | |
| 89.- Актиний | | | | | | |
| 606 | 89-Ac-225 | 8925 | 10 д. | CP | JENDL-3.3 | Включено сечение деления и откорректировано сечение захвата при высоких энергиях на основе EAF-2003. Приведен спектр нейтронов деления. |
| 606 | 89-Ac-226 | 8926 | 29.37 ч. | CP | JENDL-3.3 | Включено сечение деления и откорректировано сечение захвата при высоких энергиях на основе EAF-2003. Приведен спектр нейтронов деления. |
| 607 | 89-Ac-227 | 8927 | 21.772 года | CP | JENDL-3.3 | Сечение захвата заменено на оценку из EAF-2003. |

| 90.- Торий | | | | | | |
|-------------------------|------------------|------|---------------------------------|-----|------------|--|
| 608 | 90-Th-227 | 9027 | <i>18.68 д.</i> | СР | JENDL-3.3 | Откорректированы сечения захвата и деления. Добавлены выходы FP. Введены 8-групповые данные о ЗН |
| 609 | 90-Th-228 | 9028 | <i>1.9116 года</i> | СР | ENDF/B-VII | Откорректированы сечения захвата и деления. Введены 8-групповые данные о ЗН |
| 610 | 90-Th-229 | 9029 | <i>7340 г.</i> | СР | ENDF/B-VII | Откорректированы сечения деления согласно эксп. Кобаяши (2001). Добавлены выходы FP. Введены 8-групповые данные о ЗН |
| 611 | 90-Th-230 | 9030 | <i>7.538*10⁴ г.</i> | СР | JENDL-3.3 | Откорректированы сечения деления выше 2 МэВ. Добавлены выходы FP. Введены 8-групповые данные о ЗН |
| 612 | 90-Th-231 | 9031 | <i>25.52 ч.а</i> | С | EAF2003 | |
| 613 | 90-Th-232 | 9032 | 100 | СРФ | БРОНД-3 | Введены 8-групповые данные о ЗН |
| 614 | 90-Th-234 | 9034 | <i>24.10 д.</i> | СР | JENDL-3.3 | Откорректированы сечения деления выше 1.5 МэВ. Введены 8-групповые данные о ЗН |
| 91.- Протактиний | | | | | | |
| 615 | 91-Pa-229 | 9129 | <i>1.50 д.</i> | С | EAF2003 | |
| 616 | 91-Pa-230 | 9130 | <i>17.4 дня</i> | С | EAF2003 | |
| 617 | 91-Pa-231 | 9131 | <i>3.2760*10⁴ г.</i> | СР | JENDL-3.3 | Откорректированы сечения деления выше 4 МэВ. Введены 8-групповые данные о ЗН |
| 618 | 91-Pa-232 | 9132 | <i>1.31 дня</i> | СР | JEFF-3.1 | Откорректированы сечения деления выше 0.5 МэВ. Добавлены выходы FP. Введены 8-групповые данные о ЗН |
| 619 | 91-Pa-233 | 9133 | <i>26.975 дня</i> | СР | JEFF-3.1 | |
| 92.- Уран | | | | | | |
| 620 | 92-U-230 | 9230 | <i>20.8 дня</i> | С | EAF2003 | |
| 621 | 92-U-231 | 9231 | <i>4.2 дня</i> | С | EAF2003 | |
| 622 | 92-U-232 | 9232 | <i>68.9 г.</i> | СР | JEFF-3.1 | Добавлены выходы FP. Введены 8-групповые данные о ЗН. Желательно уточнение сечений на основе новых эксп. данных о RI. |
| 623 | 92-U-233 | 9233 | <i>1.592*10⁵ г.</i> | СРФ | ENDF/B-VII | Введены существенные модификации на основе оценки Маслова. Добавлены выходы FP. Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 624 | 92-U-234 | 9234 | 0.0054 | СР | JEFF-3.1 | Добавлены выходы FP. Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 625 | 92-U-235 | 9235 | 0.7204 | СРФ | ENDF/B-VII | □ведена коррекция на пропуск уровней в области разрешенных резонансов. Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 626 | 92-U-236 | 9236 | <i>2.342*10⁷ г.</i> | СРФ | JEFF-3.1 | Добавлены выходы FP. Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 627 | 92-U-237 | 9237 | <i>6.75 д.</i> | СРФ | JEFF-3.1 | Добавлены выходы FP. Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 628 | 92-U-238 | 9238 | 99.2742 | СРФ | ENDF/B-VII | Введены небольшие изменения. Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |

| 93.- Нептуний | | | | | | |
|----------------------|------------------|------|-----------------------|-----|------------|---|
| 629 | 93-Np-234 | 9334 | 4.4 дня | С | EAF2003 | |
| 630 | 93-Np-235 | 9335 | 396.1 дня | СР | JEFF-3.1 | Пересмотрены сечения захвата и деления; добавлены данные MF3 MT=103, 107 и MF9 MT=102. Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 631 | 93-Np-236 | 9336 | $1.54 \cdot 10^5$ з. | СР | ENDF/B-VII | Добавлены данные MF10 MT4. Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 632 | 93-Np-237 | 9337 | $2.144 \cdot 10^6$ з. | СРФ | БРОНД-3 | Введены 8 групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 633 | 93-Np-238 | 9338 | 2.117 дня | СР | JENDL-3.3 | Добавлены данные MF9 MT=17. Введены 8 групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. Эксп. данные скудны и оценки разных авторов противоречивы. |
| 634 | 93-Np-239 | 9339 | 2.356 дня | СР | JENDL-3.3 | Откорректировано сечение деления ниже 40 кэВ |
| 94.- Плутоний | | | | | | |
| 635 | 94-Pu-236 | 9436 | 2.858 з. | СР | JEFF-3.1 | Введены 8-групповые данные о ЗН, такие, как для плутония-238. |
| 636 | 94-Pu-237 | 9437 | 45.2 дня | СР | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН, такие, как для плутония-239. |
| 637 | 94-Pu-238 | 9438 | 87.7 з. | СР | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 638 | 94-Pu-239 | 9439 | $2.411 \cdot 10^4$ з. | СРФ | JEFF-3.1 | Изменены спектры ЗН. Добавлены сечения реакций с вылетом заряженных ч.тиц. Откорректированы гамма-выходы. Добавлены выходы FP. |
| 639 | 94-Pu-240 | 9440 | 6564 з. | СРФ | БРОНД-3 | Данные ограничены 20 МэВ. Введены 8-групповые данные о ЗН. MF=6, MT=18 заменено на MF=5, MT=18 из ENDF/B-VII. В MF=8 включены MT=454 и 459, а MT=16, 17 и 102 удалены. Добавлены выходы FP. |
| 640 | 94-Pu-241 | 9441 | 14.290 з. | СРФ | NEW | Компиляция новых оценок с данными из ENDF/B-VII, JENDL-3.1, ФОНД-2.2, JEFF-3.1, EAF-3. Добавлены выходы FP. |
| 641 | 94-Pu-242 | 9442 | $3.75 \cdot 10^5$ з. | СРФ | MASLOV | Добавлены выходы FP. Введены 8-групповые данные о ЗН. Включены данные об образовании фотонов из JEFF-3.1. Добавлены выходы FP. |
| 642 | 94-Pu-243 | 9443 | 4.956 ч. | СРФ | ФОНД-2.2 | Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 643 | 94-Pu-244 | 9444 | $8.00 \cdot 10^7$ з. | СР | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН, такие, как для Pu-242. |
| 644 | 94-Pu-246 | 9446 | 10.84 д. | СР | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 645 | 94-Pu-247 | 9447 | 2.27 д. | С | EAF2003 | Приводятся данные только о сечениях деления и реакций (n,2n) и (n,3n) |

| 95.- Америций | | | | | | |
|----------------------|-------------------|------|-----------------------------|-----|------------|--|
| 646 | 95-Am-240 | 9540 | 50.8 ч. | С | EAF2003 | Откорректированы сечения деления и захвата. |
| 647 | 95-Am-241 | 9541 | 432.2 года | СРФ | БРОНД-3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 648 | 95-Am-242 | 9542 | 16.02 ч. | СР | JENDL-3.3 | Добавлена секция MF=10, MT=4 Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 649 | 95-Am-242m | 9512 | 141 года | СРФ | БРОНД-3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 650 | 95-Am-243 | 9543 | 7370 г. | СРФ | БРОНД-3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 651 | 95-Am-244 | 9544 | 10.1 ч. | СР | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 96.- Кюрий | | | | | | |
| 652 | 96-Cm-240 | 9640 | 27 д. | СР | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 653 | 96-Cm-241 | 9641 | 32.8 д. | СР | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 654 | 96-Cm-242 | 9642 | 162.8 д. | СРФ | БРОНД-3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 655 | 96-Cm-243 | 9643 | 29.1 год | СРФ | БРОНД-3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 656 | 96-Cm-244 | 9644 | 18.10 г. | СРФ | БРОНД-3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 657 | 96-Cm-245 | 9645 | 8500 г. | СР | ENDF/B-VII | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 658 | 96-Cm-246 | 9646 | 4760 г. | СР | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 659 | 96-Cm-247 | 9647 | $1.56 \cdot 10^7$ г. | СР | ENDF/B-VII | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 660 | 96-Cm-248 | 9648 | $3.48 \cdot 10^5$ г. | СР | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 661 | 96-Cm-249 | 9649 | 64.15 м.ут | СР | ENDF/B-VII | Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 662 | 96-Cm-250 | 9650 | $\approx 8.3 \cdot 10^3$ г. | СР | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 97.- Беркелий | | | | | | |
| 663 | 97-Bk-245 | 9745 | 4.94 дня | С | EAF2003 | |
| 664 | 97-Bk-246 | 9746 | 1.80 дня | С | EAF2003 | |
| 665 | 97-Bk-247 | 9747 | 1380 г. | СР | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 666 | 97-Bk-248 | 9748 | > 9 г. | С | EAF2003 | Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 667 | 97-Bk-249 | 9749 | 330 д. | СР | ENDF/B-VII | Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 668 | 97-Bk-250 | 9750 | 3.212 ч.а | СР | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. |

| 98.- Калифорний | | | | | | |
|------------------------|-------------------|------|-----------|----|------------|---|
| 669 | 98-Cf-246 | 9846 | 35.7 ч. | C | EAF2003 | |
| 670 | 98-Cf-248 | 9848 | 333.5 д. | C | EAF2003 | |
| 671 | 98-Cf-249 | 9849 | 351 г. | CP | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 672 | 98-Cf-250 | 9850 | 13.08 г. | CP | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 673 | 98-Cf-251 | 9851 | 898 г. | CP | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 674 | 98-Cf-252 | 9852 | 2.645 г. | CP | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 675 | 98-Cf-253 | 9853 | 17.81 д. | CP | ENDF/B-VII | Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 676 | 98-Cf-254 | 9854 | 60.5 д. | C | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 99.- Эйнштейний | | | | | | |
| 677 | 99-Es-251 | 9951 | 33 ч.а | C | EAF2003 | |
| 678 | 99-Es-252 | 9952 | 471.7 д. | C | EAF2003 | |
| 679 | 99-Es-253 | 9953 | 20.47 д. | CP | ФОНД-2.2 | Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 680 | 99-Es-254 | 9954 | 275.7 д. | CP | JENDL-3.3 | Существенно откорректированы сечения деления и захвата. Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 681 | 99-Es-254m | 9914 | 39.3 ч.а | C | EAF2003 | |
| 682 | 99-Es-255 | 9955 | 39.8 д. | CP | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. |
| 100.- Фермий | | | | | | |
| 683 | 100-Fm-252 | 0052 | 25.39 ч.а | C | EAF2003 | |
| 684 | 100-Fm-253 | 0053 | 3 дня | C | EAF2003 | |
| 685 | 100-Fm-255 | 0055 | 20.07 ч.а | CP | JENDL-3.3 | Введены 8-групповые данные о ЗН. Добавлены выходы FP. |
| 686 | 100-Fm-257 | 0057 | 100.5 д. | C | EAF2003 | |

Часть 2. Данные о законах рассеяния медленных нейтронов

| № | Материал | МАТ | Комментарий |
|----|--|------|--|
| 1 | H (H ₂ O) | 0001 | EVAL-JAN04 Keinert, Mattes (LANL) |
| 2 | Параводород | 0002 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |
| 3 | Ортоводород | 0003 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |
| 4 | H(ZrH) | 0007 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |
| 5 | D(D ₂ O) | 0011 | EVAL-DEC69 Koppel, Houston (GA) |
| 6 | Парадейтерий | 0012 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |
| 7 | Отродейтерий | 0013 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |
| 8 | Бериллий металлический | 0026 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |
| 9 | Be (BeO) | 0027 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |
| 10 | O (BeO) | 0028 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |
| 11 | Графит | 0031 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |
| 12 | C (CH ₄) (метан-газ) | 0033 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |
| 13 | C(CH ₄) (метан -конденсат) | 0034 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |
| 14 | H(CH ₂) (полиэтилен) | 0037 | EVAL-DEC69 Koppel, Houston, Sprevak (GA) |
| 15 | Бензин | 0040 | EVAL-DEC69 Koppel, Houston, Borgonovi (GA) |
| 16 | Алюминий | 0045 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |
| 17 | Железо | 0056 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |
| 18 | Zr (ZrH) | 0058 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |
| 19 | O(UO ₂) | 0075 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |
| 20 | U(UO ₂) | 0076 | EVAL-APR93 MacFarlane (LANL) |

1. ВОДОРОД

В библиотеке РОСФОНД представлены полные наборы данных для всех трех известных изотопа водорода – обычного водорода, ^1H , тяжелого водорода или дейтерия, ^2H или ^2D , и радиоактивного сверхтяжелого водорода – трития, ^3H или ^3T .

Тритий испытывает бета-распад в гелий-3 с периодом $T_{1/2}=12.323$ года.

1.1. Водород

1. Общие характеристики

$Z=1$

$A^1=1.00782503207\pm 0.00000000010$

$Aw^1=0.9991673313\pm 0.00000000006$

Содержание в естественной смеси: 99.985 ат%;
99.970 вес%

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q^1 , МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт [*] |
|-----|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 102 | (n, γ) | 2.224566 \pm 0.000015 | - | D |

Схема уровней: возбужденные состояния невозможны.

Радиоактивность: не радиоактивен

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 1/2^+$;

2.2. Радиус рассеяния: $R=1.276553 \cdot 10^{-12}$ см.

2.3. Область неразрешенных резонансов отсутствует.

3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)

При отборе оцененных нейтронных данных для библиотеки РОСФОНД рассматривались следующие оценки, используемые в современных библиотеках оцененных данных:

- Оценка Гопкинса и Брайта², принятая еще в библиотеку ENDF/B-IV и практически без изменений перешедшая в ENDF/B-V, включая ее последнюю версию - ENDF/B-V.2 (изменение коснулось лишь закона интерполяции между точками и добавлением данных о погрешностях, которые будут обсуждены ниже).

¹ G.Audi, A.H.Wapstra and C.Thibault, Nucl. Phys. A729, p. 337-676, December 22, 2003

² J.C. Hopkins and G.Breit, N.D. A9, 145 (1971)

- Оценка Хэйла, Доддера, Сицилиано и Вильсона³, принятая в 1989 г в библиотеку ENDF/B-VI(Rev.1), в области энергий ниже 20 МэВ основана на R-матричном анализе экспериментальных данных. Лишь в области энергий выше 20 сечения и угловые распределения рассчитывались по программе NPSCAT с использованием фазовых сдвигов, оцененных Сицилиано и Вильсоном.
- Оценка К.Шибата, выполненная для библиотеки JENDL-2, и несколько пересмотренная при энергиях ниже 100кэВ при переоценке для библиотеки JENDL-3.3⁴
- Оценка Хэйла и Янга⁵ основана на R-матричном анализе экспериментальных данных по (n-n) и по (p-p)-рассеянию при энергиях ниже 30 МэВ. Использовалась более полная экспериментальная информация, чем та, что имелась во время выполнения предыдущих оценок Гопкинсом и Брайтом и Доддером и Хэйлом. С помощью 33 параметров теоретической модели удалось описать с точностью до погрешностей 836 экспериментальных точек ($\chi^2=0.9988$). Как и ранее постулировалась зарядовая независимость ядерных сил. Авторы отмечают, что угловые распределения (n-n) и (p-p)-рассеяния совершенно различны из-за влияния кулоновского рассеяния, но с помощью одних и тех же ядерных параметров с учетом влияния кулоновского взаимодействия на (p-p)-рассеяние удается описать всю совокупность данных. Авторы не сообщают, однако, сколь сильно повлиял учет (p-p)-рассеяния на оценку сечений и угловых распределений (n-p)-рассеяния и на погрешности оцененных данных.

Оценка Хэйла и Янга была принята в качестве международного стандарта и включена в ENDF/B-VI (Rev.4). При последней ревизии этой библиотеки ENDF/B-VI (Rev.5). данные о сечениях водорода не менялись. Эта же оценка, принята и в библиотеке ФОНД-2.2.

Поскольку эта оценка представлялась наиболее надежной, именно она и была первоначально принята в библиотеку РОСФОНД.

- В декабре 2006 г., т.е. после завершения работы над РОСФОНДОм, стала доступна исходная версия (Revision 0) библиотеки ENDF/B-VII, в которую включена новая оценка сечений водорода, выполненная Хэйлом еще в конце 2005 г. в рамках работ, проводившихся международной группой по оценке сечений реакций, использующихся в качестве нейтронных стандартов. В заголовочной секции этой оценки отмечается, что новый R-матричный анализ, на котором основана эта оценка, отличается от предыдущего в нескольких аспектах. Прежде всего, данные по радиационному захвату и данные по обратной реакции – фоторасщеплению дейтрона – были включены в совокупный анализ с самого начала, а не подключены к нему в качестве дополнительной информации, как это делалось ранее. Это удалось сделать благодаря использованию нового метода учета фотонных каналов в R- матричной теории⁶, который, в частности, позволил более корректно описывать E1-переходы. Исходными данными для теоретического описания этих реакций служили, главным образом, интегральные и дифференциальные сечения, но в анализ были включены и имеющиеся поляризационные данные. Сечение

³ G.M. Hale, D.C. Dodder, E.R. Siciliano, W.B. Wilson (LANL)

⁴ Shibata K. et al.: JAERI-Research 96-041 (1996) [in Japanese].

⁵ Nuclear Data Standards for Nuclear Measurements, 1991 NEANDC/INDC Nuclear Standard File. NEANDC-311"U", 1992.

⁶ G. M. Hale and A. S. Johnson, Proc. 17th Int. IUPAP Conf. on Few-Body Problems in Physics, 5-10 June 2003, Durham NC, W. Gloeckle and W. Tornow, eds., Elsevier B.V., pp. S120-S122 (2004).

захвата тепловых нейтронов принято таким же, как и в предыдущей оценке, т.е. равным 332.0 миллибарн. Оцененное сечение захвата хорошо согласуется как с недавними измерениями астрофизической группы^{7,8} при энергиях 20 – 550 кэВ, так и с более ранними данными, полученными, главным образом, в экспериментах по фоторасщеплению дейтронов при энергиях ниже 14 МэВ. Во-вторых, в новом анализе учтено несколько дополнительных измерений полного сечения. В результате вновь оцененное полное сечение отличается от прежнего при 10 МэВ на -0.5%. В-третьих, в анализе приняты во внимание новые данные и сечения рассеяния медленных нейтронов и их угловом распределении. Учет результатов новых измерений угловых распределений нейтронов с энергией 10 МэВ⁹ и коррекции результатов более ранних измерений при 14 МэВ, привел к тому, что в области 10 – 14 МэВ переднее-задняя асимметрия согласно новой оценке оказалась промежуточной между оценками, принятыми в ENDF/B-V и ENDF/B-VI. В четвертых, оказалось, что включение в анализ результата измерения длины когерентного рассеяния тепловых нейтронов в работе¹⁰ привел к интересному эффекту: оцененное сечение рассеяния при “нулевой энергии” снизилось так, что пришло в отличное согласие с результатами ранних измерений Хоука¹¹ и расходится с более поздними и более точными измерениями Дилга¹². В заголовочной секции файла отмечается, что данные по ковариации погрешностей нейтронных данных будут включены в файл позже, но без каких-либо обоснований и комментариев приводится следующая оценка погрешностей полного сечения с шагом 2 кэВ:

| E_n | Погр. (%) |
|-------|-----------|
| 0 | 0.20 |
| 2 | 0.22 |
| 4 | 0.30 |
| 6 | 0.36 |
| 8 | 0.44 |
| 10 | 0.50 |
| 12 | 0.49 |
| 14 | 0.46 |
| 16 | 0.40 |
| 18 | 0.35 |
| 20 | 0.30 |

Появление уточненных данных о важнейшем нейтронном стандарте привело к необходимости заменить в РОСФОНДе данные для водорода на новую оценку.

Ниже будет рассмотрено, насколько перечисленные выше оценки отличаются друг от друга и насколько они согласуются с имеющимися нейтронными данными. Однако, прежде всего, сравним перечисленные выше оценки друг с другом. Сравнить будем оценки полного сечения, которое при энергии выше 10 эВ практически не отличается от сечения упругого рассеяния. Сравнение проводится на рис. 1а – 1в. Нанесенные на графики данные получены после приведения сравниваемых оцененных данных к общей энергетической сетке. Интерполяция к промежуточным

⁷ T. S. Suzuki et al., *Astrophys. Lett.* 449, L59 (1995).

⁸ Y. Nagai et al., *Phys. Rev. C* 56, 3173 (1997).

⁹ N. Boukharouba et al., *Phys. Rev. C* 65, 014004 (2002).

¹⁰ K. Schoen et al., *Phys. Rev. C* 67, 044005 (2003).

¹¹ T. L. Houk, *Phys. Rev. C* 3, 1886 (1971).

¹² W. Dilg, *Phys. Rev. C* 11, 103 (1975).

энергетическим точкам проводилась по предписанным файлами законам интерполяции. Как правило, это была линейная интерполяция в дважды логарифмическом масштабе. Исключение составляло сечение, принятое в ENDF/B-V, которое при энергиях выше 4 кэВ предписывалось интерполировать линейно в линейно-линейном масштабе. Треугольниками при нулевом значении расхождения показаны узловые точки, в которых заданы сечения в файле ENDF/B-VII. На кривых расхождений других оценок с данными ENDF/B-VII узловые точки изображены кружками.

На графиках нанесены также две оценки погрешностей полного сечения – одна представляет собой оценку Хэйла, приведенную выше, другая – оценку, выполненную в настоящей работе. Основания для этой оценки будут даны ниже по ходу изложения.

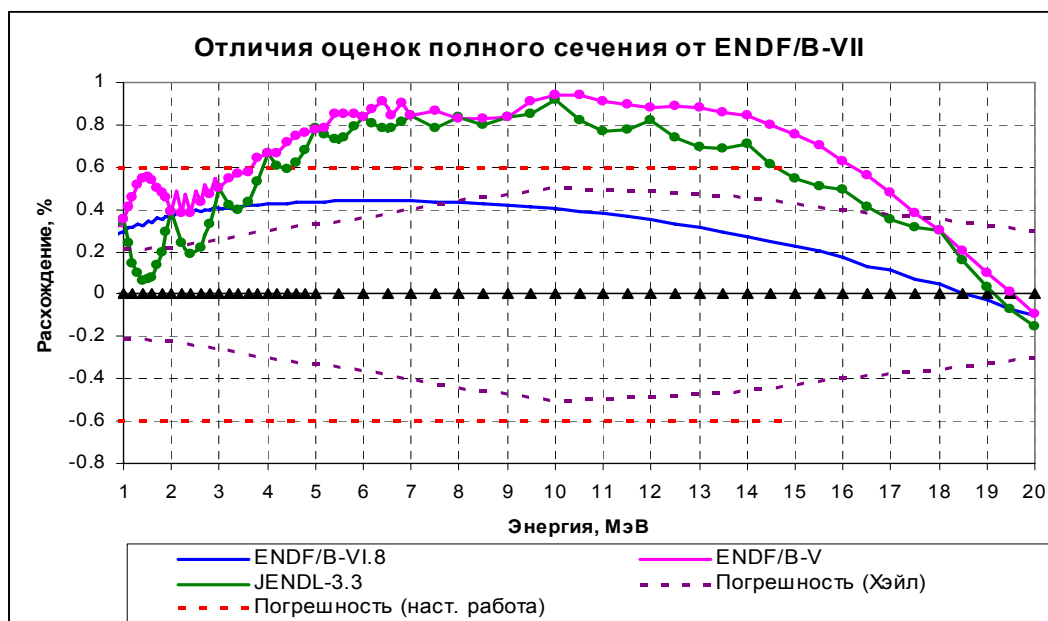


Рис.1а. Расхождения в полном сечении водорода в области мегаэлектронвольт

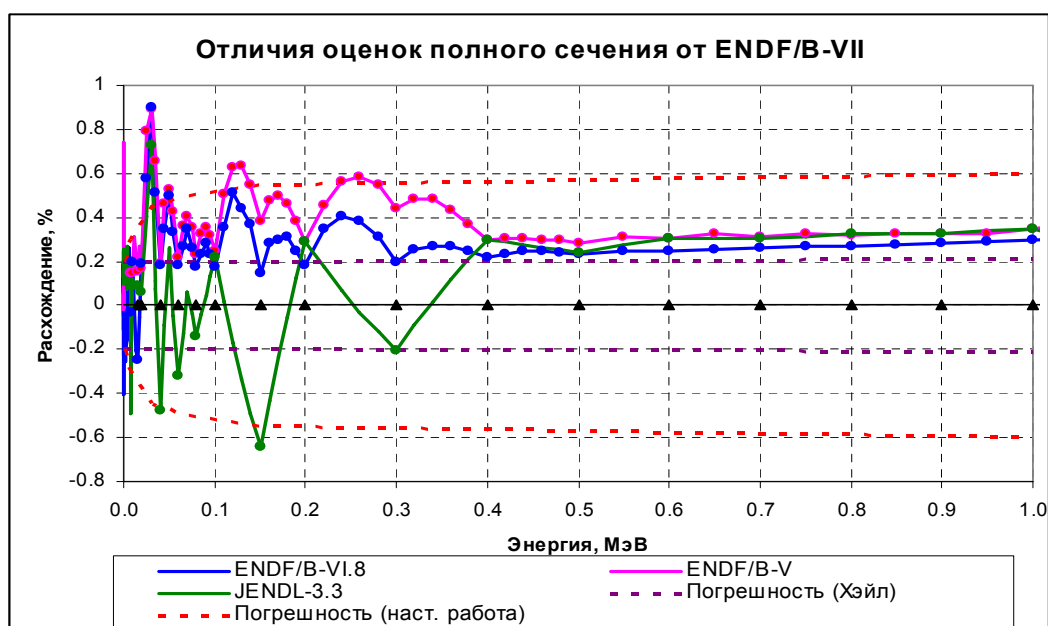


Рис.1б. Расхождения в полном сечении водорода в области сотен килоэлектронвольт

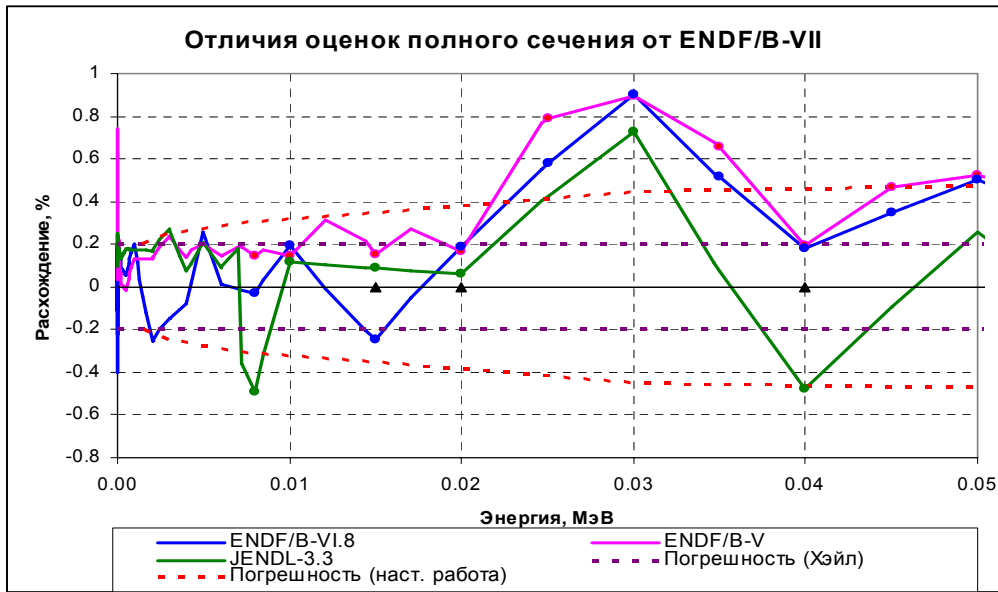


Рис.1в. Расхождения в полном сечении водорода в области десятков килоэлектронвольт

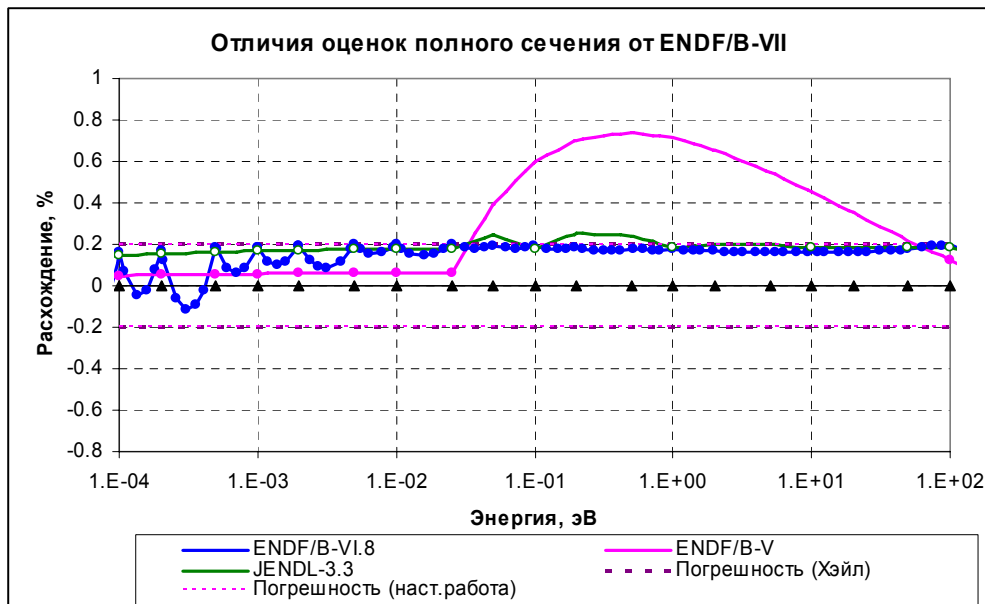


Рис.1г. Расхождения в полном сечении водорода в электронвольтовой области.

Приведенные данные показывают, что погрешности в оцененных полных сечениях, обусловленные несовершенством принятых интерполяционных схем, оказываются сравнимыми, а порой и превосходящими погрешности оцененных сечений в узлах интерполяционных сеток. Можно полагать, однако, что интерполяционная схема, принятая в ENDF/B-VII, не ведет к погрешностям, превосходящим погрешность оценки сечения в узловых точках.

3.1. Полное сечение (MT=1).

Во всех файлах оцененных данных, естественно, обеспечено равенство $\sigma_t = \sigma_c + \sigma_e$. Погрешность полного сечения оценивается как 0.2%. При 10 эВ вклад сечения захвата в полное сечение составляет 0.08%, а при 100 эВ - менее 0.03%. Поскольку никаких сомнений в форме энергетической зависимости сечений в области ниже 100 эВ не

имеется, целесообразно рассматривать лишь составляющие полного сечения – сечение рассеяния и сечение захвата.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

3.2.1. Сравнение результатов различных оценок.

Сечение рассеяния нейтронов на водороде является одним из основных стандартов при измерениях нейтронных сечений. При энергиях выше 10 эВ оно практически совпадает с полным сечением. Поэтому сравнение оцененных полных сечений, проведенное на рис. 1а-1г, является и сравнением сечений упругого рассеяния. Как видно из рис. 1а, 1б в мегаэлектронвольтовой области новая оценка сечения рассеяния понижена до 0.3 – 0.4%, что при энергиях ниже 8 МэВ превышает погрешность, приписанную результату оценки ее автором – Хэйлом (являющимся соавтором и предыдущей оценки, принятой в ENDF/B-VI). Даже в тепловой области (рис. 1г) расхождение между последними оценками составляет 0.2 %, откуда можно заключить, что эта погрешность отнюдь не завышена.

3.2.2. Сравнение с экспериментальными данными

На рис. 2а – г результаты принятой оценки РОСФОНД=ENDF/B-VII сравниваются с экспериментальными данными. Сравнение проводится для полного сечения, которое в области энергий выше 10 эВ практически неотличимо от сечения упругого рассеяния. При более низких энергиях результаты эксперимента всё более заметно превышают данные, оцененные для взаимодействия нейтронов со свободными протонами, за счет теплового движения и влияния связи водорода в молекулах образца. На рис. 2а красным пунктиром указано значение потенциального рассеяния, определенное как $4\pi R^2$, где R – радиус, указанный в разделе 2.2.

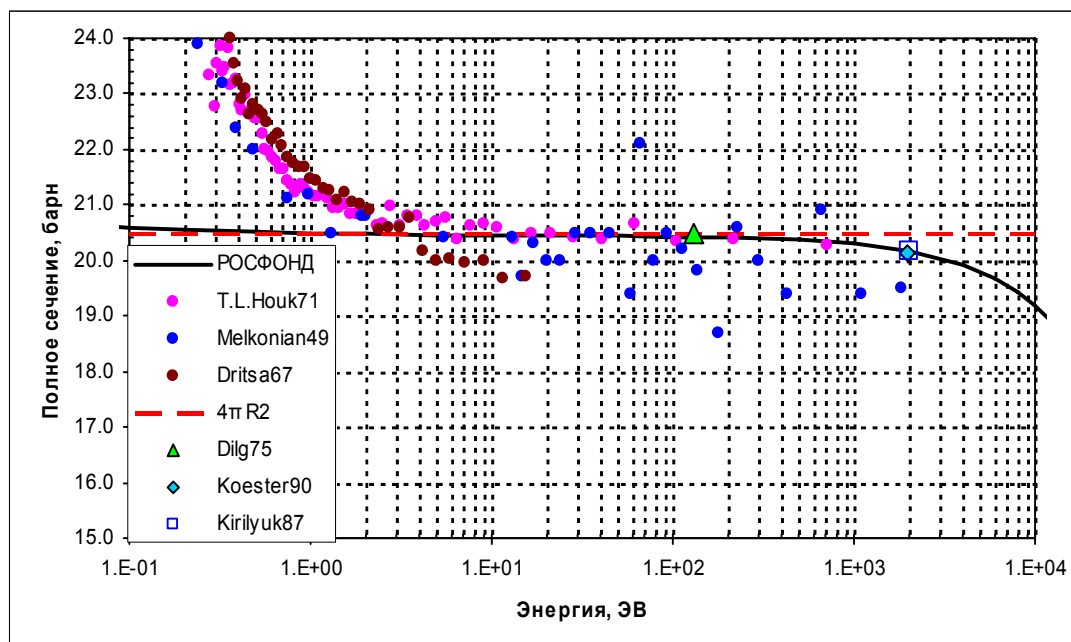


Рис.2а. Сравнение оцененных и экспериментальных данных.

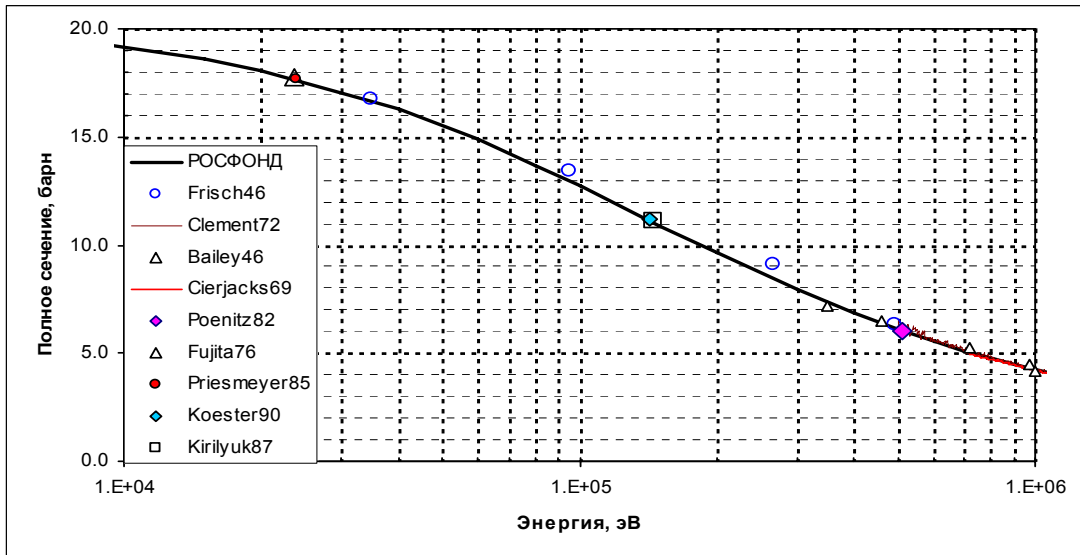


Рис.2б. Сравнение оцененных и экспериментальных данных.

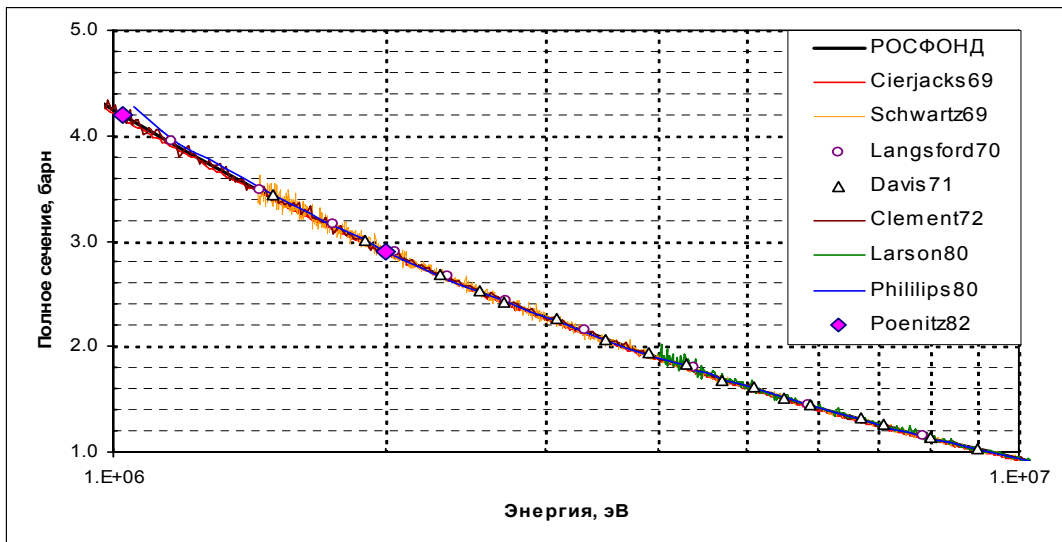


Рис.2в Сравнение оцененных и экспериментальных данных.

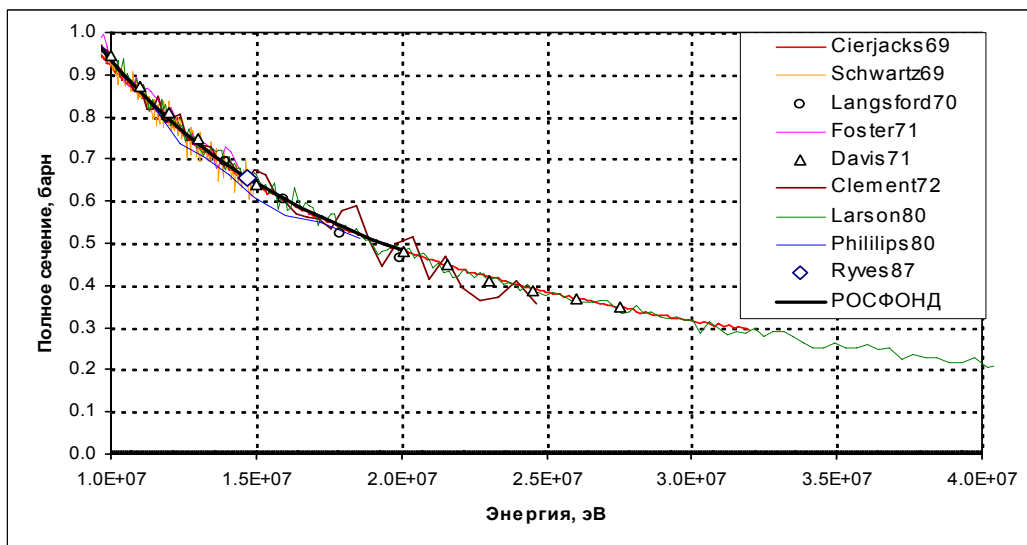


Рис.2г Сравнение оцененных и экспериментальных данных.

Как видно, из рис. 2, принятая оценка хорошо согласуется с экспериментальными данными. Напомним, однако, что экспериментальные данные, изображенные на рис. 2 представляют собой лишь часть массива экспериментальной информации, учитывавшейся при оценке сечения рассеяния нейтронов на водороде. В этот массив входили и данные для рассеяния протонов на протонах и данные о рассеянии нейтронов со значительно более высокими энергиями (как сечения, так и угловые распределения). Эта экспериментальная информация позволила уточнить параметры теоретической модели и тем самым уточнить сечения в рассматриваемой здесь энергетической области. Поэтому малая плотность экспериментальных точек в области десятков и первых сотен килоэлектронвольт, не означает, что сечения в этой области плохо известны: они достаточно надежно экстраполируются из области более низких и более высоких энергий.

3.3. Сечение радиационного захвата (MT=102)

3.3.1. Оцененные данные.

Сечение радиационного захвата при энергии 0.0253 эВ в большинстве принятых в настоящее время оценок (включая последнюю, принятую в РОСФОНД) принято одним и тем же: равным 0.3320 барн. В ENDF/B-VI (Rev.1) это сечение было заменено на 0.3326 – величину, рекомендуемую в компиляции Мухабхаба¹³ (0.3326±0.0007). Такое же значение сечения захвата было принято и в библиотеке ФОНД-2.2. В ENDF/B-VII, а, следовательно, в РОСФОНДе, сечение захвата тепловых нейтронов вновь принято равным 0.3320 барна (точнее 0.3320126 барна).

Что касается энергетического поведения сечения захвата, то во всех оценках, кроме последней оно принималось одинаковым. В последней оценке Хэйла ход сечения захвата существенно изменен под влиянием новых экспериментальных данных и более корректного учета информации о фоторасщеплении дейтона. На рис.3а, 3б показаны отклонения прежних оценок сечения захвата от новых.

Треугольниками на оси энергий показаны узловые точки, в интерполяционной схеме, принятой в последней оценке. Выше 10 кэВ в ENDF/B-VII рекомендован линейно-линейный закон интерполяции, ниже - линейный закон интерполяции в дважды логарифмическом масштабе. В этой области треугольники зачернены.

Точками на кривой показаны узловые точки в предыдущих оценках, в которых во всей области рекомендован линейный закон интерполяции в дважды логарифмическом масштабе. В тех интервалах, в которых интерполяционная сетка новой оценки разрежена, различие законов интерполяции привело к появлению заметных “фестонов” в энергетической зависимости расхождений. На краях этих интервалов узловые точки прежних оценок, совпадающие по энергии с точками на сетке ENDF/B-VII, выделены цветом.

Представляется, что загромождение интерполяционной схемы в ENDF/B-VII не вполне оправдано. Однако поскольку различие схем интерполяции значительно менее существенно, чем пересмотр оценки сечения захвата в целом, никаких уточнений в интерполяционную схему при формировании библиотеки РОСФОНД решено не вносить.

¹³ S.F.Mughabghab. Thermal Neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-factors. INDC(IND)-440 Feb. 2003.

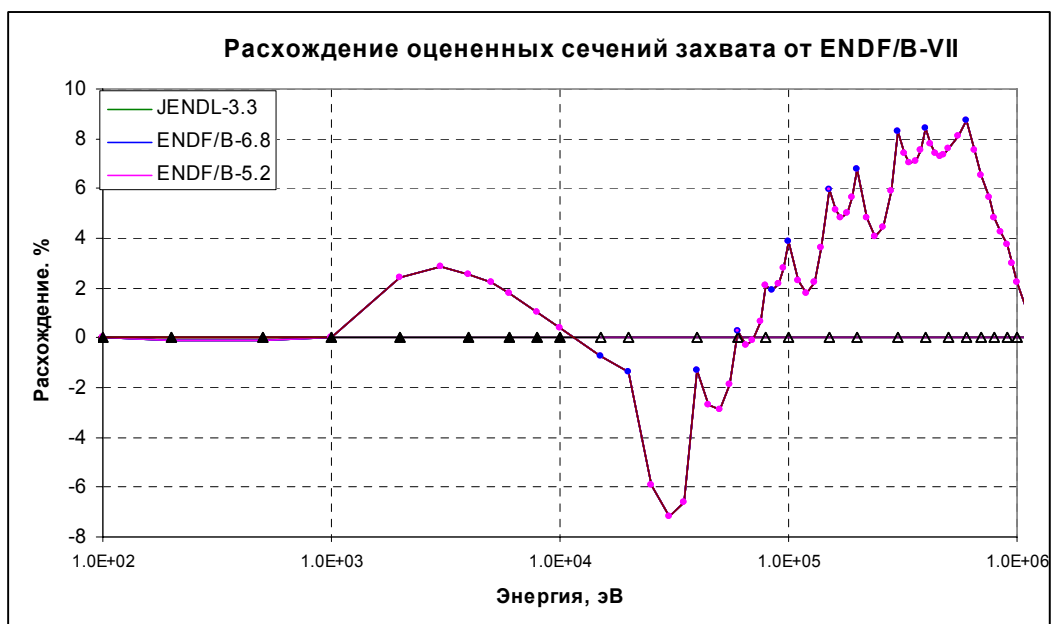


Рис. 3а. Отклонение оцененных сечений захвата от оценки Хэйла

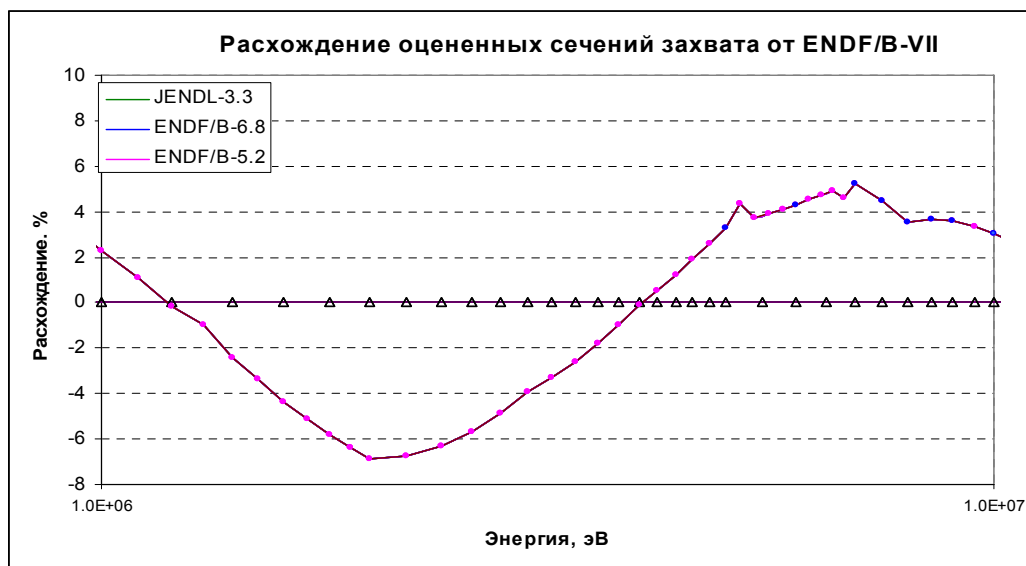


Рис. 3б. Отклонение оцененных сечений захвата от оценки Хэйла

3.3.2. Сравнение с экспериментальными данными.

Совокупность экспериментальных данных о сечении радиационного захвата была оценена Мухабхабом в цитированной выше работе; полученное им среднее значение 0.3326 ± 0.0007 барн сохранилось (включая погрешность) точно таким же, как и предыдущей его оценке¹⁴. Это вполне естественно, т.к. за 23 года, прошедших между этими оценками было опубликовано лишь 3 новых экспериментальных работы, из которых две привели к результатам совпадающим с оценкой Мухабхаба в пределах погрешностей ($\text{Albrildo86: } \sigma_c^{\text{H}} = 0.3325 \pm 0.0040$ - среднее из измеренных сечений

¹⁴ Mughabghab S.F., Divadeenam M., Holden N.E. Neutron Cross Sections, Vol.1. Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross sections. Part A, Z=1 – 60. Academic Press. N-Y, 1981.

поглощения в водороде к сечениям поглощения в природном боре, в природной сере и в марганце, давших совпадающие результаты; Kudo80: $\sigma_c^H = 0.3315 \pm 0.0011$ из отношения сечений захвата в водороде и в марганце). Третий, несколько более низкий результат (Lolich80: $\sigma_c^H = 0.329 \pm 0.002$), был получен не прямым методом – из анализа полного сечения в области от 0.001 эВ до 225 эВ и, естественно, не мог повлиять на результат усреднения 34 остальных независимых измерений и на его погрешность. Следует заметить, что оценка Акстона¹⁵, выполненная независимо от Мухабхаба, привела к тому же результату: $\sigma_c^H = 0.3325 \pm 0.0007$ барна. Все эти оценки согласуются с последней оценкой Хэйла $\sigma_c^H = 0.3320$ барна в пределах погрешности. Причина понижения сечения захвата на 0.18% в описании оценки, данном в ENDF/B-VII, явно не указана. Можно полагать, что эта причина кроется в учете результатов дополнительной информации, почерпнутой из анализа экспериментов по фоторасщеплению дейтрона.

Сечение захвата быстрых нейтронов в области энергий ниже 20 МэВ измерялось всего тремя авторами. В работе Suzuki95 было измерено сечение захвата на водороде при 20 кэВ, 40 кэВ и 64 кэВ с использованием образцов разной толщины – 1, 2, 3 и 4 мм. Результаты сравнения с оценкой, принятой в РОСФОНДе, приведены на рис. 4.

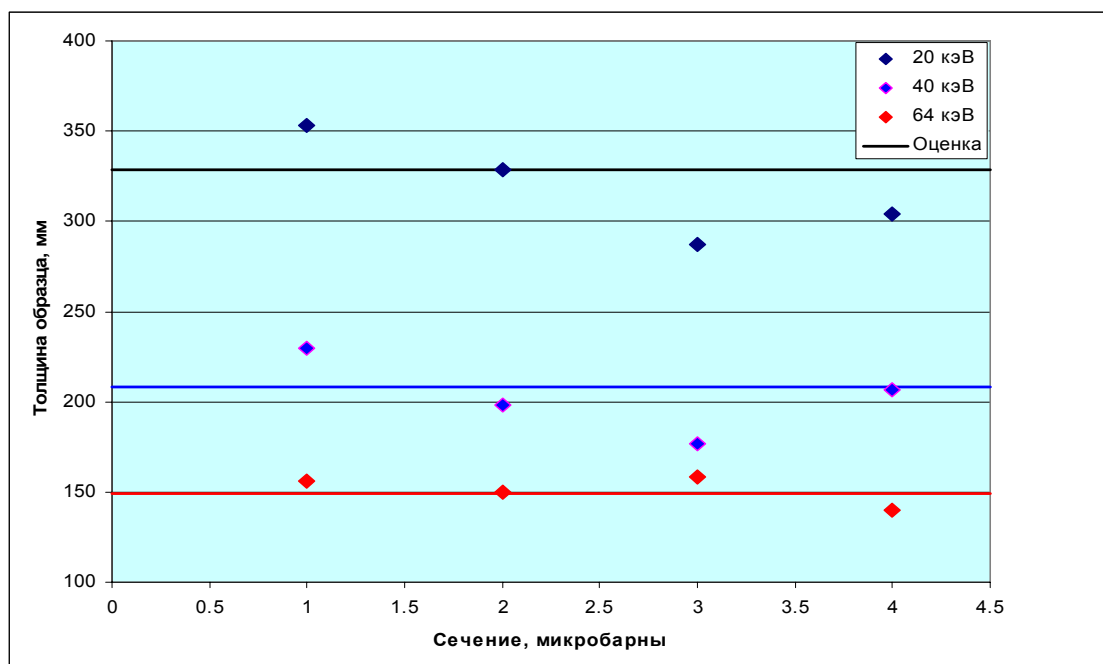


Рис. 4. Сравнение принятых сечений захвата с измеренными в работе Suzuki95

В работе Nagai97 было измерено сечение захвата в водороде нейтронов с энергией 550 кэВ (относительно сечений захвата золота и углерода). Полученное значение 35.2 ± 2.4 микробарна совпадает в пределах погрешности с результатом, следующим из принятой в РОСФОНД оценки: 34.6 микробарн.

В работе Cerineo61 было измерено сечение захвата в водороде нейтронов с энергией 14.4 МэВ (относительно сечения рассеяния на водороде же). Полученное

¹⁵ E.J.Axton, Ann. of Nucl. Energy, v.13, p.622 (1986)

значение 31.6 ± 3.1 микробарн также прекрасно согласуется с принятым оцененным значением (29.6 микробарн). $\left(\frac{\sigma(180^\circ)}{\sigma(0^\circ)} - 1\right) * 100$

Таким образом, экспериментальных данных, противоречащих принятой оценке, не имеется.

4. Анизотропия упругого рассеяния (MF=4, MT=2))

4.1. Оцененные данные.

Во всех современных оценках данные представлены в виде энергетических зависимостей коэффициентов разложения $a_n(E)$ дифференциального сечения рассеяния по полиномам Лежандра,

$$\sigma_e(\mu, E) = \frac{\sigma_e(E)}{2\pi} \sum_{n=0}^{NL} \frac{2n+1}{2} a_n P_n(\mu)$$

Из условия нормировки $a_0=1$. Величина $a_1 = \langle \mu \rangle$ - средний косинус угла рассеяния в системе центра инерции. В ENDF/B-VII, ENDF/B-VI, JEFF-3.1 NL=6. В JEFF-3.1 NL=4. В ENDF/B-V анизотропия рассеяния описывается заданием углового распределения при 11 (а выше 10 МэВ – при 12) значениях угла рассеяния в системе центра инерции.

На рис.5 показана энергетическая зависимость коэффициентов разложения в оценках ENDF/B-VI и ENDF/B-VII. Как видно, характер анизотропии в результате переоценки заметно изменился. То, как это сказалось на форме угловых распределений, показано на рис.6.

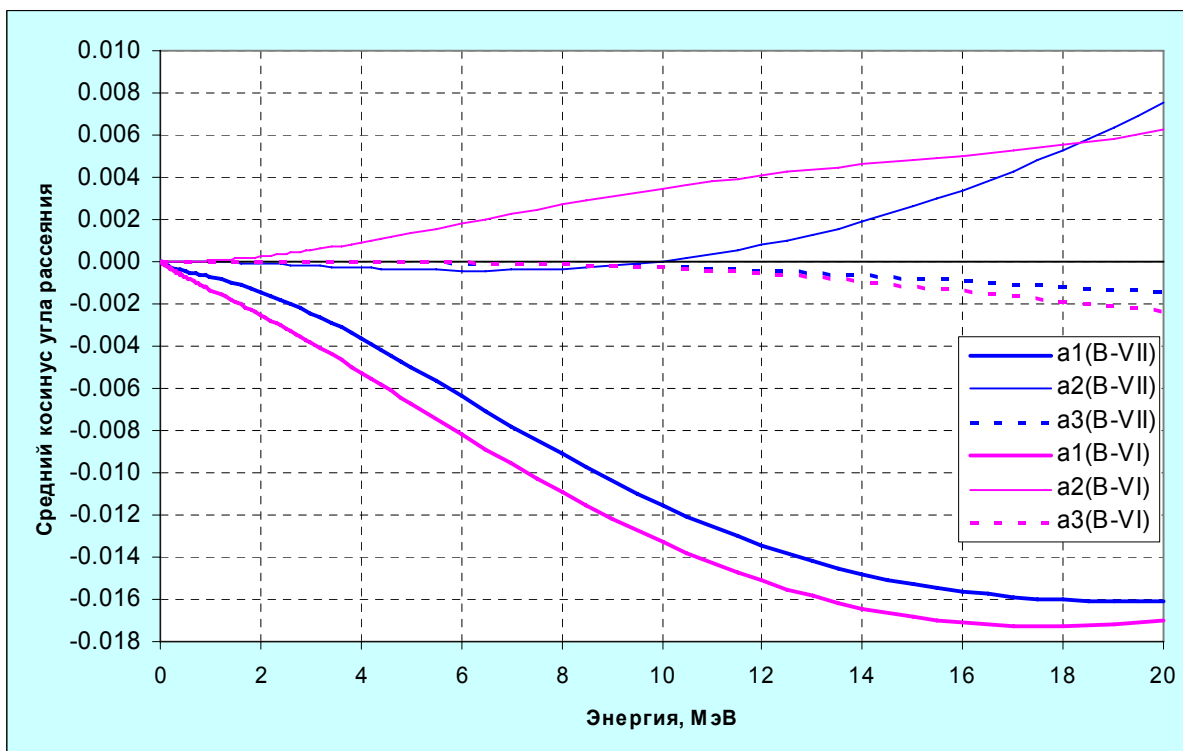


Рис.5. Энергетическая зависимость параметров анизотропии упругого рассеяния нейтронов на протонах по оценкам, принятым в ENDF/B-VI и в ENDF/B-VII.

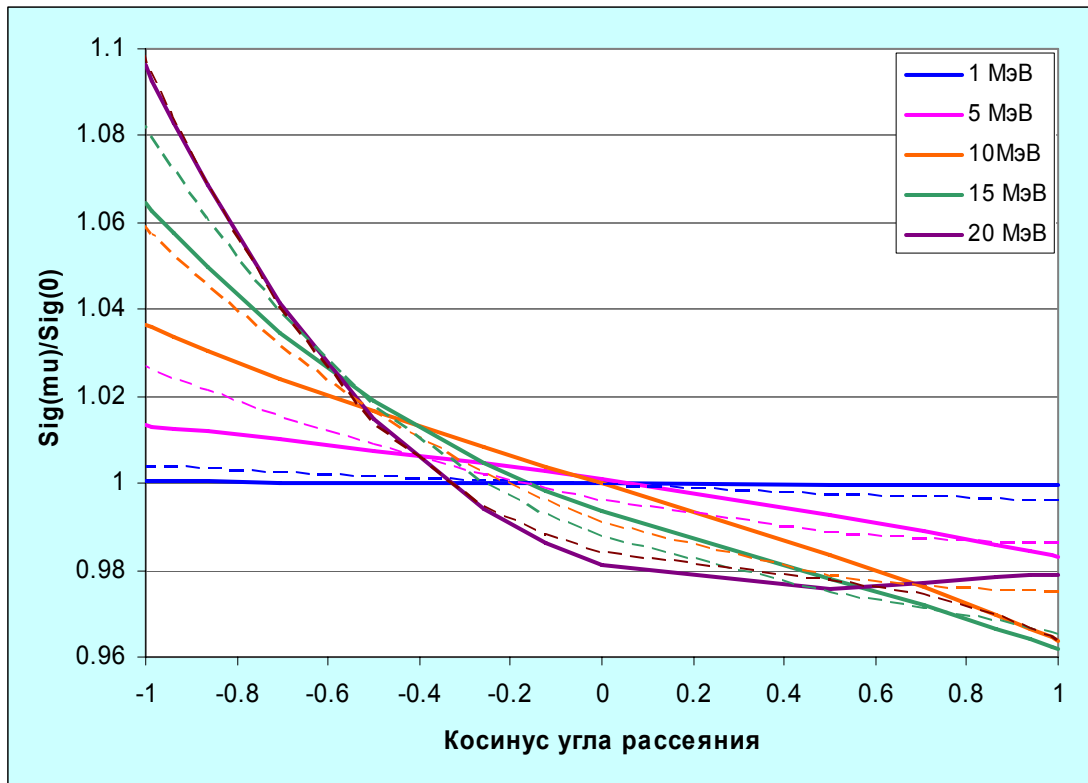


Рис.6. Угловые распределения (n,p)-рассеяния по оценкам ENDF/B-VII (жирные линии) и ENDF/B-VI (тонкие прерывистые линии)

Различие в оценке второго углового момента при переходе к новой оценке оказалось существенным, что проявилось в характере угловых распределений при 5, 10, 15 МэВ (см.рис 6). При 20 МэВ оценки формы углового распределения сближаются. При низких (2 МэВ и ниже) различие обусловлено, главным образом, различием в оценке среднего косинуса угла рассеяния. Анизотропия рассеяния при этих энергиях слаба и на перенос нейтронов этих энергий практически не сказывается.

4.2. Сравнение с экспериментальными данными.

В ранней работе Ода измерялось угловое распределение нейтронов с энергией 3.1 МэВ. На рис.7 полученные в этой работе данные сравниваются с результатами последних оценок. Погрешности результатов измерений велики и не позволяют отдать предпочтение какой-либо из оценок.

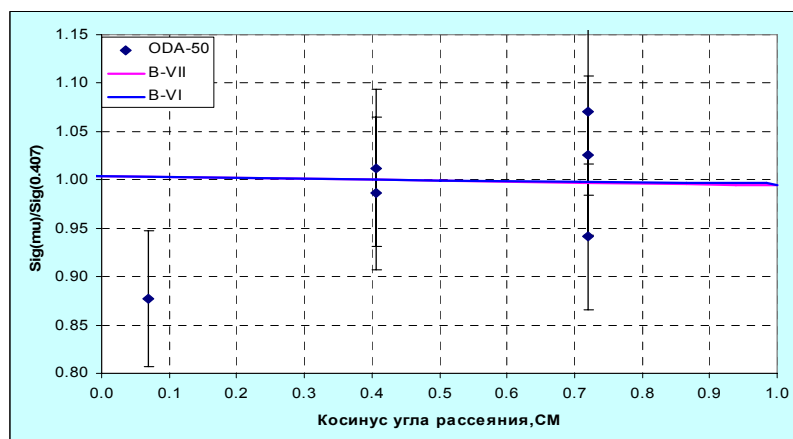


Рис.7. Угловое распределение нейтронов с энергией 3.1 МэВ

На рис. 8 приведена энергетическая зависимость отношения сечений рассеяния на угол 10° к сечению рассеяния на угол 45° (в системе центра инерции). Экспериментальные данные получены в работе Paulsen69, целью которой являлось выяснение наличия энергетических флуктуаций в сечении рассеяния. Вывод, сделанный авторами, состоит в том, что если такие флуктуации и существуют, они не связаны с флуктуациями рассеяния под малыми углами.

Жирной синей точкой показан результат усреднения данных, полученных при энергиях выше 3.2 МэВ, с погрешностью, оцененной в предположении о независимости погрешностей результатов отдельных измерений. Можно рассматривать этот результат как подтверждающий более сильную анизотропию рассеяния, следующую из новой оценки.

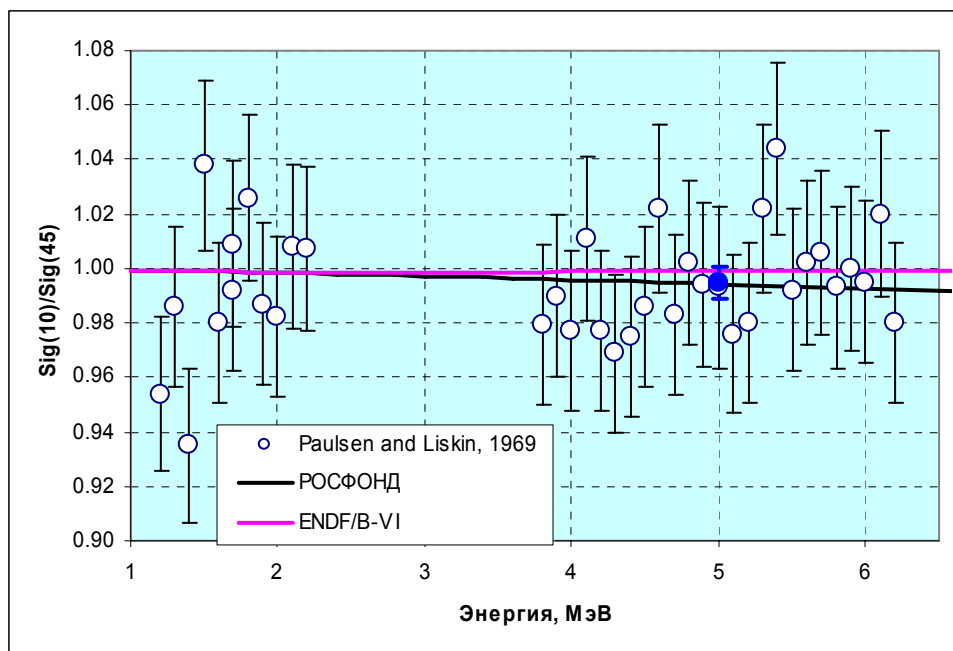


Рис.8. Сравнение экспериментальных отношений вероятностей рассеяния на угол 10° и на угол 45° с расчетными данными.

В работе Szibok69 при энергии нейтронов 2.46 МэВ было измерено отношение вероятности рассеяния под углом 0° к вероятности рассеяния под углом 15° в лабораторной системе координат (30° в системе центра инерции), которое было найдено равным 1.070 ± 0.024 . Этот результат существенно расходится с оцененной величиной измерявшегося отношения, варьирующегося в разных оценках от 0.9990 до 0.9995. Результат Szibok69 невозможно согласовать и с результатами, полученными в работе Paulsen69, которые были рассмотрены выше.

На рис. 9 оцененные угловые распределения сравниваются с недавними экспериментальными результатами Boukharouba -2002, полученными при энергии 10.4 МэВ. Оцененные данные при этой энергии в рассматриваемом диапазоне углов рассеяния неразличимы. Согласие между оценкой и экспериментом весьма удовлетворительно.

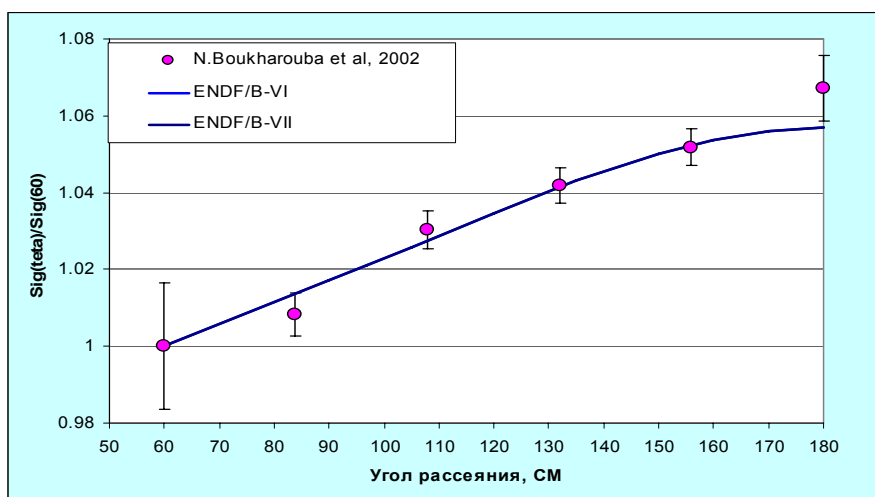


Рис.9. Угловое распределение нейтронов с энергией 10.4 МэВ.

На рис. 10 оцененное угловое распределение нейтронов с энергией 14.2 МэВ сравниваются с экспериментальными данными, полученными при этой энергии или очень близких к ней энергиях. Как видно, экспериментальные данные лучше согласуются с результатом новой оценки. Ясно, что из всей совокупности экспериментальных, имеющих при этой энергии, следует более низкое отношение вероятности рассеяния назад, чем это следует из оценки ENDF/B-VI: примерно 1.07. Согласно новой оценке это отношение равно 1.065. Заметим, что, что предварительные результаты измерения рассматриваемого отношения Ривсом и Колковским¹⁶, привели к значению 1.053 ± 0.015 , еще более низкому, чем следует из новой оценки. Данные Ривса и Колковского не вошли в базу данных EXFOR-2002 и неизвестно, учитывались ли они Хэйлом при его последней оценке. Как бы то ни было, результат этой работы согласуется с новой оценкой в пределах погрешности.

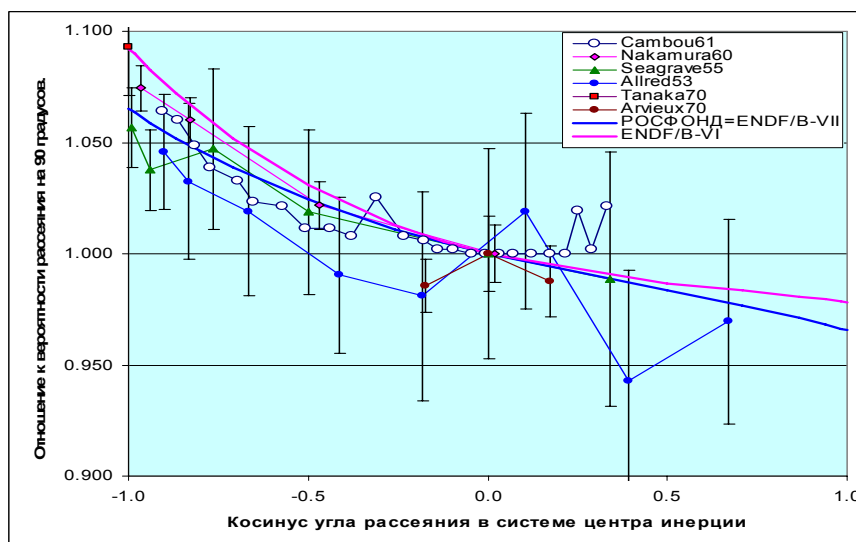


Рис. 7. Угловое распределение рассеянных нейтронов при 14.2 МэВ.

Таким образом, данные по угловым распределениям при низких энергиях не позволяют отдать предпочтение одной из оценок, тогда как результаты измерений при 14 МэВ, говорят в пользу последней оценки, принятой в РОСФОНД.

¹⁶ Ryves T.B. and Kolkowski P. "The Differential Cross Section for Neutron-Proton Scattering at 14.5 MeV". Preliminary draft, National Physical Laboratory, Middlesex, UK (March 1990)

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

Единственной реакцией, в результате которой образуются фотоны при взаимодействии нейтронов с водородом является радиационный захват. Энергия этой реакции равна $Q=2.224566$ МэВ (см. п. 1.5). Энергия фотона при захвате теплового нейтрона (E_{phot}^0) чуть ниже этой энергии за счет отдачи дейтрона, испускающего фотон. Энергия отдачи равна

$$E_D = \frac{Q^2}{M_D m_n c^2},$$

где $M_D=1.996800$ – отношение массы дейтона к массе нейтрона, $m_n c^2=939.5653$ МэВ – энергетический эквивалент массы покоя нейтрона. Расчеты дают $E_D=0.002638$ МэВ. Таким образом, на энергию фотона, испускаемого при захвате теплового нейтрона в водороде приходится $E_{\text{phot}}^0=Q-E_D=2.221928$ МэВ. При захвате нейтронов с большей энергией, энергия испускаемых фотонов меняется линейно с энергией нейтрона:

$$E_{\text{phot}}(E_n) = E_{\text{phot}}^0 + \frac{Aw}{(Aw+1)} E_n$$

Заметим, что в первых версиях библиотеки ENDF/B-VI энергия отдачи дейтона не учитывалась. В версии ENDF/B-VI.8 она учтена с точностью до 10кэВ: энергия фотона принята равной 2.2233 МэВ. В ENDF/B-VII данные об испускании фотона радиационного захвата представлены в формате файла MF=6. Для представления данных о фотоне использован закон LAW=2 (реакция двух тел с фиксированными энергетическими состояниями продуктов реакции). Это позволило учесть слабую анизотропию испускания фотонов в системе центра инерции. Анизотропия учитывается в P_2 -приближении. При низких энергиях она пренебрежимо мала (средний косинус угла рассеяния равен $-6 \cdot 10^{-8}$). С ростом энергии анизотропия увеличивается и при энергии нейтрона выше 100 кэВ становится весьма существенной (см. рис.8). Зависимость энергии фотона от энергии нейтрона при использовании закона LAW=2 явно не задаётся, а рассчитывается.

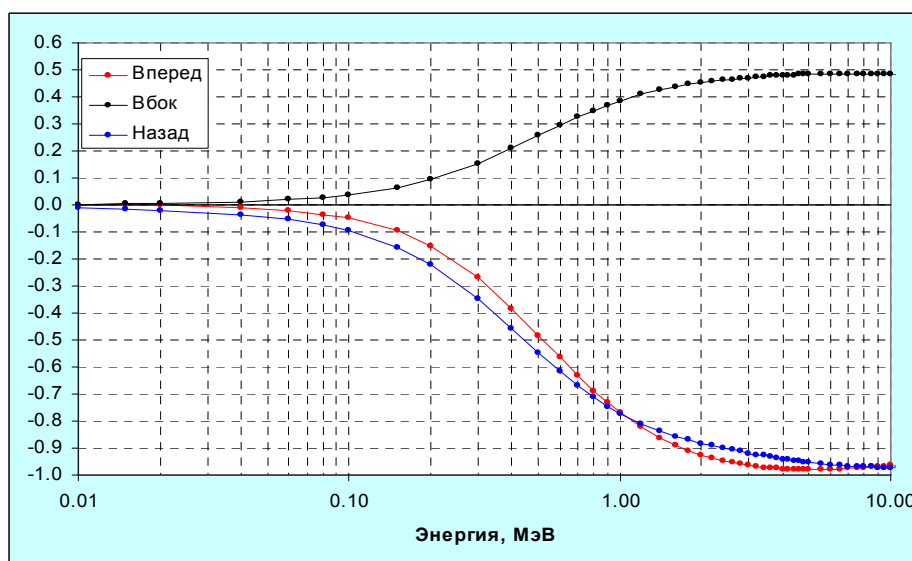


Рис.8. Анизотропия вылета фотонов радиационного захвата.

Приведены отношения плотности вероятности вылета в указанном направлении к средней плотности вероятности, равной единице.

6. Погрешности нейтронных сечений.

6.1. Погрешности сечения рассеяния.

Погрешности сечения рассеяния, оцененные на основе R-матричного анализа совокупности экспериментальных данных Хэйлом и Янгом оказались весьма низкими – одна десятая процента и ниже. В мае 1990 г. Standard Subcommittee of the US Cross Section and Evaluation Working Group пересмотрел эти оценки и принял более осторожные оценки, а именно такие, что по мнению экспертов 2/3 результатов новых измерений, если таковые будут выполнены, будут отличаться от принятой оценки менее чем на вновь принятую погрешность. Для водорода эта уточненная погрешность равна 0.2% во всей области энергии до 20 МэВ. О ковариационных свойствах этих погрешностей ничего сказано не было.

Как было отмечено выше, в текстовом описании оценки ENDF/B-VII указаны погрешности полного сечения, рекомендуемые автором оценки Хэйлом. Методика оценки этих погрешностей не сообщается.

Данные о ковариациях погрешностей n-p рассеяния приводятся в библиотеках оцененных данных ENDF/B-V, JENDL-3.3 и JEF-2. Эти данные различаются между собой весьма сильно (см. рис.9).

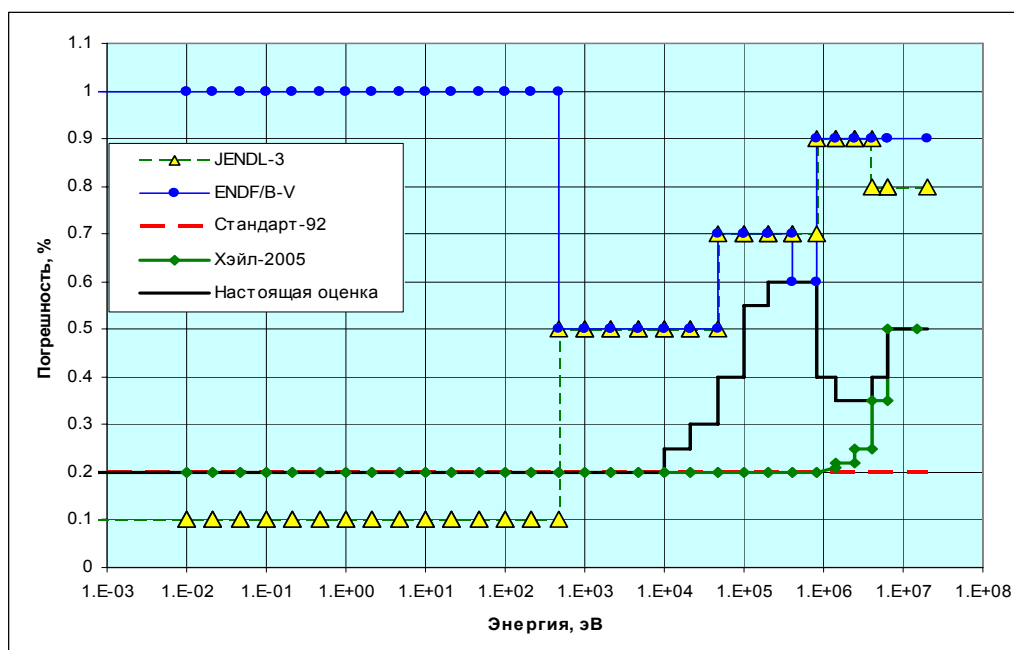


Рис.9. Сравнение оценок погрешностей сечения рассеяния.

Данные представлены после их перевода в 30-групповое представление. Символы проставлены на границах групп. Данные, обозначенные «Настоящая оценка», описываются ниже.

В области энергий ниже 500 кэВ разброс мнений экспертов чрезвычайно велик.

В таблице 1 для каждого энергетического диапазона, соответствующего одной из частей рис. 2, приводится перечень экспериментов, в которых измерялось полное сечение, указано число точек N_k по энергии, в которых проводились измерения и

усредненные по всем этим точкам отклонения Δ_k результатов эксперимента k от оцененных данных:

$$\Delta_k = \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} \Delta_{k,i} = \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} [\sigma_{\text{tot}}^{\text{exp},k}(E_i) - \sigma_{\text{tot}}^{\text{eval}}(E_i)].$$

В случаях, когда измерения выполнялись методом времени пролета в большом числе точек по энергии, результаты измерений усреднялись по интервалам, в пределах которых оцененное сечение меняется практически линейно, и результат усреднения сравнивался с оцененным сечением при средней энергии. Для этих случаев в качестве N фигурировало число интервалов усреднения.

Кроме среднего расхождения в таблице для каждого эксперимента приводятся погрешности среднего расхождения, оцененные, как правило, по средне-квадратичному разбросу расхождений:

$$\delta_k = \sqrt{\frac{1}{N_k * (N_k - 1)} \sum_{n=1}^{N_k} (\Delta_{k,i} - \Delta_k)^2}$$

Исключением являлись эксперименты, в которых сечение измерялось при одной энергии. В этих случаях в качестве погрешности использовалось значение, указанное экспериментаторами.

Далее для каждого энергетического диапазона вычислялось среднее расхождение между экспериментальными и оцененными данными

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_k \Delta_k / \delta_k^2}{\sum_k 1 / \delta_k^2}$$

и его погрешность:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_k (\Delta_k - \bar{\Delta})^2 / \delta_k^2}{\sum_k 1 / \delta_k^2}.$$

Расчеты были выполнены при сравнении с оценкой из ENDF/B-VI и с оценкой из ENDF/B-VII (принятой в РОСФОНД).

При низких энергиях среднее расхождение между экспериментальными и оцененными данными, и прежде весьма малое, ещё более сократилось. Даже с учетом погрешностей расхождения не противоречат достаточно оптимистичной оценке Хэйла (но всё же превышают предел погрешности, принятый в JENDL-3.1).

В диапазоне 0.01 – 1 МэВ среднее расхождения при использовании новой оценки существенно сократилось и также лежит в пределах оценки погрешности Хэйла. Однако разброс расхождений данных различных экспериментов почти не сократился и существенно превышает оцененную Хэйлом погрешность оцененных данных.

Использование новой оценки привело к сокращению среднего расчетно-экспериментального расхождения и в диапазоне 1 -10 МэВ. Это среднее расхождение

заметно ниже погрешности оценки Хэйлом, а разброс расхождений данных различных экспериментов близок к ожидаемому из оценки Хэйла.

В диапазоне 10 – 20 МэВ использование новой оценки привело к незначительному возрастанию среднего расхождения, но средне-квадратичный разброс расхождений данных различных экспериментов существенно сократился. Таким образом, и здесь анализ разброса расчетно-экспериментальных расхождений согласуется с оценкой погрешности оцененных данных Хэйлом.

Подводя итоги, отметим, что переход от прежней оценки к новой во всех диапазонах привел к сокращению среднего расхождения между оцененными и измеренными данными и, как правило, к сокращению средне-квадратичного отклонения расхождений.

Таблица 1. Отклонения экспериментальных данных от прежней и новой оценки

| Область энергий от 100 эВ до 10 кэВ | | | | | | | |
|--|-----------------------|------|--|--|--------------|---------------------------------|-------------|
| Эксперимент | Диапазон энергий, эВ | | Число экспериментальных точек ^α | Среднее отклонение от оцененных данных | | Погрешность среднего отклонения | |
| | от | до | | ENDF/B-VI | ENDF/B-VII | ENDF/B-VI | ENDF/B-VII |
| Melkonian49 | 100 | 1000 | много | -1.44 | -1.59 | 0.52 | 0.72 |
| T.L.Houk71 | 5 | 700 | 14 | 0.02 | 0.15 | 0.17 | 0.17 |
| Dilg75 | 132 | 132 | 1 | 0.12 | 0.00 | 0.12 | 0.1 |
| Kirilyuk87 | 2000 | 2000 | 1 | 0.29 | -0.04 | 0.10 | 0.1 |
| Koester90 | 1970 | 1970 | 1 | -0.01 | -0.12 | 0.15 | 0.15 |
| Среднее отклонение по всем экспериментальным работам | | | | 0.13 | -0.03 | 0.14 | 0.15 |
| Область энергий от 10 кэВ до 1 МэВ | | | | | | | |
| Эксперимент | Диапазон энергий, кэВ | | Число экспериментальных точек | Среднее отклонение от оцененных данных | | Погрешность среднего отклонения | |
| | от | до | | ENDF/B-VI | ENDF/B-VII | ENDF/B-VI | ENDF/B-VII |
| Frisch46 | 35 | 490 | 4 | 3.38 | 3.04 | 1.61 | 1.62 |
| Bailey46 | 350 | 1000 | 5 | 0.51 | 0.34 | 0.30 | 0.29 |
| Cierjacks69 | 700 | 1000 | много | -1.34 | -1.07 | 0.14 | 0.14 |
| Clement72 | 500 | 100 | много | 0.57 | 0.39 | 0.31 | 0.29 |
| Fujita76 | 24 | 24 | 1 | 0.04 | -0.26 | 0.13 | 0.13 |
| Poenitz82 | 500 | 1000 | 2 | -0.45 | -0.19 | 0.20 | 0.2 |
| Priesmeyer85 | 24 | 24 | 1 | -0.04 | 0.45 | 0.13 | 0.13 |
| Koester90 | 143 | 143 | 1 | 0.44 | 0.14 | 0.27 | 0.27 |
| Среднее отклонение по всем экспериментальным работам | | | | -0.31 | -0.08 | 0.70 | 0.64 |
| Область энергий от 1 МэВ до 10 МэВ | | | | | | | |
| Эксперимент | Диапазон энергий, эВ | | Число экспериментальных точек | Среднее отклонение от оцененных данных | | Погрешность среднего отклонения | |
| | от | до | | ENDF/B-VI | ENDF/B-VII | ENDF/B-VI | ENDF/B-VII |
| Bailey46 | 1 | 6 | 11 | 1.08 | 1.08 | 1.16 | 1.16 |
| Cierjacks69 | 1 | 10 | много | -1.34 | -1.01 | 0.33 | 0.26 |
| Schwartz69 | 1.4 | 10 | много | 0.43 | 0.2 | 0.31 | 0.28 |
| Langsford70 | 1 | 10 | много | 0.10 | -0.22 | 0.43 | 0.36 |
| Davis71 | 1.5 | 10 | много | 0.25 | 0.18 | 0.2 | 0.12 |
| Foster71 | 2.3 | 10 | много | 0.00 | 0.01 | 0.60 | 0.47 |
| Clement72 | 1 | 10 | много | 0.78 | 0.39 | 0.16 | 0.16 |
| Larson80 | 4 | 10 | много | 0.25 | -0.04 | 0.13 | 0.12 |
| Phillips80 | 1 | 10 | много | 0.63 | 0.51 | 1.87 | 1.28 |
| Poenitz82 | 1 | 2 | 2 | -0.3 | -0.05 | 0.2 | 0.3 |
| Среднее отклонение по всем экспериментальным работам | | | | 0.17 | 0.05 | 0.55 | 0.33 |
| Область энергий от 10 МэВ до 20 МэВ | | | | | | | |

^α Слово «много» в этой графе означает, что данные, полученные методом времени пролета в большом числе каналов, были усреднены по интервалам, в пределах которых оцененное сечение меняется практически линейно, и сравнены со значением оцененного сечения при средней энергии интервала.

| Эксперимент | Диапазон энергий, эВ | | Число экспериментальных точек | Среднее отклонение от оцененных данных | | Погрешность среднего отклонения | |
|--|----------------------|------|-------------------------------|--|--------------|---------------------------------|-------------|
| | от | до | | ENDF/B-VI | ENDF/B-VII | ENDF/B-VI | ENDF/B-VII |
| Sierjacks69 | 10 | 20 | много | -0.76 | -0.54 | 0.30 | 0.25 |
| Schwartz69 | 10 | 16 | много | -1.29 | -0.96 | 0.69 | 0.71 |
| Langsford70 | 10 | 20 | много | -1.54 | -1.54 | 0.96 | 0.94 |
| Davis71 | 10 | 20 | много | 0.51 | 0.33 | 0.50 | 0.41 |
| Clement72 | 10 | 18 | много | 1.55 | 1.32 | 0.77 | 0.81 |
| Larson80 | 10 | 20 | много | -0.26 | -0.54 | 0.69 | 0.62 |
| Phillips80 | 10 | 16 | много | 0.3 | -1.41 | 0.5 | 1.29 |
| Ryves87 | 14.7 | 14.7 | 1 | 0.54 | -0.31 | 1.38 | 1.38 |
| Среднее отклонение по всем экспериментальным работам | | | | -0.27 | -0.35 | 0.61 | 0.35 |

Исходя из принципа, что в пределах погрешности должно лежать 2/3 результатов измерений последних лет, можно принять, что погрешность сечения n-р рассеяния области энергий ниже 10 кэВ в не превышает 0.2%, что согласуется с оценкой этой погрешности Хэйлом. Эта оценка не противоречит и различиям между результатами оценок полного сечения водорода, принятыми в различных библиотеках: как видно из рис.1в, полные сечения, принятые в ENDF/B-VI.8, отличаются от новой оценки максимум на $\pm 0.25\%$; разброс различий в оценке полного сечения в JENDL-3.1 от новой оценки Хэйла больше – от $+0.25\%$ до -0.49% , но и в этом случае среднее расхождение менее 0.2%.

В диапазоне от 10 кэВ до 1 МэВ разброс результатов непосредственных измерений полного сечения значительно больше, что нашло отражение и в разбросе результатов оценок (полученных, заметим, с учетом всех других источников информации) – см. рис.1б и 1в. Правда, наиболее сильно оцененные данные разбросаны лишь в половине этого диапазона – от 100 до 400 кэВ, где расхождения достигают 0.6 и даже 0.8%. Это и естественно, поскольку полное сечение в этом поддиапазоне измерялось при отдельных дискретных энергиях. В интервале 0.4 – 1 МэВ, где имеются результаты детальных измерений полного сечения методом времени пролета (Sierjacks-69, Clement-72), различия между оценками резко сокращается и снова возрастает лишь в при более высоких энергиях (рис.1а), где число экспериментов, выполненных методом пролета, возросло в несколько раз. Исходя из результатов проведенного анализа можно полагать, что в области от 0.1 до 0.4 МэВ, погрешность оцененных данных следует увеличить до 0.6%, что близко к оценкам погрешностей, принятым в JENDL-3.3. и ENDF/B-V. Оценка погрешности Хэйлом в этом энергетическом диапазоне, основана, очевидно, на интерполяции оценок погрешностей при более низких и более высоких энергиях.

Как видно из проведенного анализа расхождений между результатами непосредственных измерений полного сечения и результатов его оценок, оценка погрешностей Хэйлом в мегаэлектронвольтовой области удовлетворительно согласуется с оценкой, учитывающей результаты только прямых измерений, и вполне может быть принятой.

До 1 кэВ погрешности следует считать строго скоррелированными. При более высоких энергиях корреляции погрешностей точек, различающихся по энергии более, чем на порядок, можно считать практически независимыми.

6.2 Погрешность сечения захвата

Погрешность сечения захвата тепловых нейтронов оценена Мухабхабом³ в 70 микробарн, что составляет 0.2%. Почти таково же различие в сечениях захвата, принятых в ENDF/B-VI и ENDF/B-VII. В используемых ныне библиотеках оцененных данных этому сечению приписывается значительно большая погрешность: 0.5 - 0.6%. Из рис. 4 видно, что это значение погрешности может быть распространено на всю область энергий ниже 10 кэВ, где сечение захвата весьма строго подчиняется закону $1/v$. При более высоких энергиях сечение захвата весьма мало. В библиотеках оцененных данных JENDL-3.3 и ENDF/B-V погрешность сечения захвата в этой области постепенно возрастает достигая при 10 МэВ 2 – 5%. Заметим, что прямые экспериментальные данные, как видно из рис. 5, имеют погрешность порядка 10%. Однако, учитывая, что оценка сечения захвата проводилась с учетом данных по фоторасщеплению дейтронов, можно надеяться, что 5%-я погрешность при 10 МэВ является реалистичной. Однако автор принятой в РОСФОНД оценки – Хэйл – к настоящему времени не опубликовал оценки погрешности сечения захвата нейтронов на водороде. В этих условиях представляется целесообразным принять более осторожную оценку, следующую из погрешностей экспериментальных данных.

7. Валидация нейтронных данных по интегральным экспериментам.

Экспериментами, наиболее чувствительными к сечению рассеяния на водороде являются критические параметры высококонцентрированных водных растворов высокообогащенного урана (порядка килограмма урана на литр раствора). Неточность знания сечения рассеяния водорода приводит¹⁷ к дополнительной погрешности в коэффициенте размножения подобных растворов 0.3% при использовании ковариационной матрицы погрешностей, основанной на описанной выше оценке и приведенной в Приложении, 0.4% при использовании ковариационной матрицы погрешностей, оцененной по данным JENDL-3.3, и 0.6% при использовании наиболее пессимистической оценки ENDF/B-V. Таким образом, предлагаемая здесь оценка погрешностей является наиболее оптимистичной (за счет снижения погрешностей в области быстрых нейтронов, ответственной за утечку нейтронов из размножающей системы). Погрешности экспериментального определения критических параметров водных растворов высокообогащенного урана, собранных в международном справочнике¹⁸ обычно близки к 0.5%, но порой достигают и 0.2%. Поскольку погрешность расчета критичности определяется не только (и не столько) погрешностями сечений водорода, сколько погрешностями сечений урана-235 (дающими в погрешность коэффициента размножения высококонцентрированных растворов по крайней мере вдвое больший вклад, чем погрешности сечений водорода), ясно, что уточнить сечения водорода путем учета данных интегральных экспериментов такого рода практически невозможно. С другой стороны, ясно, что при использовании этих экспериментов для уточнения сечений урана-235 учет погрешностей водорода, необходим: вносимые им вклады в погрешности коэффициентов размножения сравнимы или даже превосходят погрешности самих критических экспериментов.

¹⁷ При расчетах использовались коэффициенты чувствительности коэффициентов размножения к полному сечению водорода из диссертации Т.Е.Ивановой «Оценка погрешностей расчетного предсказания размножающих систем с высокообогащенным ураном», ФЭИ, 2005 г.

¹⁸ International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. NEA/NDC/DOC(95). Sept. 2004 Ed.

8. Перечень цитированных экспериментальных работ

8.1. Полное сечение

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|--------------|-----------------|------------------|---------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | от | до | |
| Schwartz69 | R.B.Schwartz, | J,PL/B,30,36 | 10005 | 1.4+06 | 1.5+07 | 1652 |
| Foster71 | D.G.Foster Jr, | J,PR/C,3,576 | 10047 | 2.3+06 | 1.5+07 | 238 |
| Davis71 | J.C.Davis, | J,PR/C,3,1798 | 10099 | 1.5+06 | 2.8+07 | 27 |
| Houk71 | T.L.Houk | J,PR/C,3,1886 | 10139 | 2.8-01 | 7.1+02 | 64 |
| Clement72 | J.M.Clement, | J,NP/A,183,51 | 10173 | 5.0+05 | 2.5+07 | 425 |
| Phillips80 | T.W.Phillips, | J,PR/C,22,384 | 10945 | 1.1+06 | 1.9+07 | 57 |
| Bailey46 | C.L.Bailey, | J,PR,70,583 | 11140 | 3.5+05 | 6.0+06 | 15 |
| Frich46 | D.H.Frisch | J,PR,70,589 | 11141 | 3.5+04 | 4.9+05 | 4 |
| Melkonian49 | E.Melkonian | J,PR,76,1750 | 11150 | 3.3-03 | 1.8+03 | 62 |
| Lagsford70 | A.Lagsford, | C,70ANL,51 | 21497 | 8.4+05 | 2.0+07 | 17 |
| Poenitz82 | W.P.Poenitz, | J,NP/A,383,224 | 12715 | 5.1+05 | 2.0+06 | 3 |
| Larson82 | D.C.Larson, | C,80BNL,277 | 12882 | 4.0+06 | 5.0+07 | 412 |
| Cierjacks69 | S.Cierjacks, | J,PRL,23,866 | 20015 | 7.0+05 | 3.2+07 | 1066 |
| Dilg75 | W.Dilg | J,PR/C,11,103 | 20597 | 1.3+02 | 1.3+02 | 4 |
| Fulita76 | Y.Fujita, | J,NP/A,258,(1) | 20700 | 2.4+04 | 2.4+04 | 1 |
| Priesmeier85 | H.G.Priesmeyer, | C,85SANTA,2,1463 | 22021 | 2.4+04 | 2.4+04 | 1 |
| Koester90 | L.Koester, | J,ZP/A,337,341 | 22217 | 2.0+03 | 1.4+05 | 2 |
| Dritsa67 | M.Dritsa, | R,EANDC(OR)-63L | 22613 | 1.0-02 | 1.5+01 | 243 |
| Kirilyuk87 | A.L.Kirilyuk, | C,87KIEV,2,298 | 40980 | 2.0+03 | 1.5+05 | 2 |
| Ryves87 | | | | | | |

8.2. Сечение радиационного захвата

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|-----------|-------------|---------------------------|---------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | от | до | |
| Suzuki95 | T.S.Suzuki, | J,AJ,439,(L),59 | 22310 | 2.0+04 | 6.4+04 | 3 |
| Arbildo86 | A.Arbildo, | J,ANE,13,679,8612 | 12819 | 2.53-02 | | 1 |
| Nagai97 | Y.Nagai, | J,PR/C,56,(6),3173,199712 | 22417 | 2.53-02 | | 1 |
| Kudo80 | K.Kudo | P,NEANDC(J)-83/U,5,8209 | 21866 | 2.53-02 | | 1 |
| Lolich80 | J.V.Lolich, | J,AKE,35,(1),23,80 | 30551 | 2.53-02 | | 1 |
| Cerineo61 | M.Cerineo, | J,PR,124,(6),1947 | 30005 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |

8.3. Анизотропия упругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|------------|--------------|----------------------|---------|----------------------|-------|-------------|
| | | | | от | до | |
| Paulsen69 | A.Paulsen, | J,PL/B,29,562,6908 | 20389 | 1.2+6 | 6.2+6 | 36 |
| Szibok69 | T.Czibok, | J,PL/B,29,105,6904 | 30327 | 2.46+6 | | 1 |
| Cambou61 | F.Cambou | R,CEA-2002,6102 | 21223 | 1.46+7 | | 1 |
| Nakamura60 | T.Nakamura | J,JPJ,15,1359,6008 | 20287 | 1.41+7 | | 1 |
| Seagrave55 | J.D.Seagrave | J,PR,97,757,5502 | 11084 | 1.41+7 | | 1 |
| Allerd53 | J.C.Allerd, | J,PR,91,90,5307 | 11066 | 1.41+7 | | 1 |
| Tanaka70 | M.Tanaka, | J,JPJ,28,11,7001 | 20296 | 1.41+7 | | 1 |
| Arvieux70 | J.Arvieux, | J,PL/B,32,468,7008 | 21852 | 1.4+7 | | 1 |
| Ryves90 | T.B.Rives, | J,ANE,17,(12),657,90 | 22225 | 1.45+7 | | 1 |

9. Заключение

9.1. Выводы.

В библиотеку РОСФОНД включается файл оцененных нейтронных данных из библиотеки ENDF/B-VII со следующими изменениями:

1. Файлу присвоен номер МАТ=101.
2. Энергия реакции радиационного захвата принята равной $Q=2.224566$ МэВ (в ENDF/B-VII указано $Q= 2.224631$ МэВ).
3. Значение AWR для дейтона в файле MF=6 принято равным 1.996800 (в ENDF/B-VII указано 1.996256).

9.2.Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle\sigma\rangle$ спектр Максвелла с $T= 1.35$ МэВ |
|-------------------|-----------------------------|-----------|---|
| Упругое рассеяние | 20.4363 б | 239.45 б | 3.9882 б |
| Рад. захват | 332.013 мб | 148.88 мб | 0.0396 мб |

9.3 Авторы проведенного отбора оцененных данных

М.Н.Николаев, В.Н.Кощев

ПРИЛОЖЕНИЕ:
Ковариационные матрицы погрешностей нейтронных данных для водорода
(30-групповое представление)

1. Погрешности полного сечения и коэффициенты корреляции между ними

| Gr. | Погр., % | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18-30 | |
|-------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|
| 1 | 0.5 | 100 | 90 | 80 | 50 | 20 | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 0.4 | 90 | 100 | 95 | 80 | 50 | 20 | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 0.35 | 80 | 95 | 100 | 90 | 80 | 50 | 30 | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 0.35 | 50 | 80 | 90 | 100 | 80 | 70 | 40 | 20 | | | | | | | | | | | |
| 5 | 0.40 | 20 | 50 | 80 | 80 | 100 | 60 | 40 | 20 | 10 | 10 | | | | | | | | | |
| 6 | 0.60 | | 20 | 50 | 70 | 60 | 100 | 60 | 40 | 20 | 10 | 10 | | | | | | | | |
| 7 | 0.60 | | | 30 | 40 | 40 | 60 | 100 | 60 | 40 | 20 | 10 | 10 | | | | | | | |
| 8 | 0.55 | | | | 20 | 20 | 40 | 60 | 100 | 80 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | | | | | |
| 9 | 0.40 | | | | | 10 | 20 | 40 | 80 | 100 | 95 | 80 | 50 | 30 | 20 | 15 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 10 | 0.30 | | | | | 10 | 10 | 20 | 50 | 95 | 100 | 95 | 80 | 50 | 30 | 20 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 11 | 0.25 | | | | | | 10 | 10 | 40 | 80 | 95 | 100 | 95 | 80 | 50 | 30 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 12 | 0.20 | | | | | | | 10 | 30 | 50 | 80 | 95 | 100 | 95 | 80 | 50 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| 13 | 0.20 | | | | | | | | 20 | 30 | 50 | 80 | 95 | 100 | 95 | 80 | 50 | 40 | 40 | 40 |
| 14 | 0.20 | | | | | | | | 10 | 20 | 30 | 50 | 80 | 95 | 100 | 95 | 80 | 70 | 70 | 70 |
| 15 | 0.20 | | | | | | | | | 15 | 20 | 30 | 50 | 80 | 95 | 100 | 95 | 90 | 90 | 90 |
| 16 | 0.20 | | | | | | | | | 10 | 15 | 20 | 30 | 50 | 80 | 95 | 100 | 100 | 100 | 95 |
| 17 | 0.20 | | | | | | | | | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 70 | 90 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 18-30 | 0.20 | | | | | | | | | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 70 | 90 | 95 | 100 | 100 | 100 |

2. Погрешности сечения радиационного захвата и коэффициенты корреляции между ними

| | ,% | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12-30 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1 | 10.0 | 1.00 | 0.80 | 0.70 | 0.60 | 0.50 | 0.40 | 0.30 | 0.20 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 8.0 | 0.80 | 1.00 | 0.90 | 0.80 | 0.70 | 0.60 | 0.50 | 0.40 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3 | 7.0 | 0.70 | 0.90 | 1.00 | 0.90 | 0.80 | 0.50 | 0.40 | 0.30 | 0.20 | 0.10 | 0.00 | 0.00 |
| 4 | 5.0 | 0.60 | 0.80 | 0.90 | 1.00 | 0.90 | 0.80 | 0.50 | 0.40 | 0.30 | 0.20 | 0.10 | 0.10 |
| 5 | 4.0 | 0.50 | 0.70 | 0.80 | 0.90 | 1.00 | 0.95 | 0.90 | 0.80 | 0.70 | 0.50 | 0.40 | 0.30 |
| 6 | 3.0 | 0.40 | 0.60 | 0.50 | 0.80 | 0.95 | 1.00 | 0.95 | 0.90 | 0.85 | 0.80 | 0.60 | 0.60 |
| 7 | 2.5 | 0.30 | 0.50 | 0.40 | 0.50 | 0.90 | 0.95 | 1.00 | 0.97 | 0.93 | 0.90 | 0.80 | 0.80 |
| 8 | 2.0 | 0.20 | 0.40 | 0.30 | 0.40 | 0.80 | 0.90 | 0.97 | 1.00 | 0.98 | 0.95 | 0.93 | 0.90 |
| 9 | 1.0 | 0.10 | 0.20 | 0.20 | 0.30 | 0.70 | 0.85 | 0.93 | 0.98 | 1.00 | 0.98 | 0.95 | 0.90 |
| 10 | 0.6 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.20 | 0.50 | 0.80 | 0.90 | 0.95 | 0.98 | 1.00 | 0.99 | 0.95 |
| 11 | 0.5 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.40 | 0.60 | 0.80 | 0.93 | 0.95 | 0.99 | 1.00 | 1.00 |
| 12-30 | 0.5 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.30 | 0.60 | 0.80 | 0.90 | 0.90 | 0.95 | 1.00 | 1.00 |

1.2. Дейтерий

1. Общие характеристики

$Z=1$

$A=2.01410177785 \pm 0.00000000036$

$A_w=1.9967996769 \pm 0.0000000012$

Содержание в естественной смеси: 0.015 ат%;
0.030 вес%

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|----------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 16 | (n,2n) | -2.224566±0.000015 | 3.336317 | H |
| 102 | (n, γ) | 6.257232±0.000015 | - | T |

Схема уровней: возбужденные состояния невозможны.

Радиоактивность: не радиоактивен

2. Резонансная область: (MF=2)

- 2.1. Спин и четность $J^\pi=1^+$;
- 2.2. Радиус рассеяния: $R=0.519770 \cdot 10^{-12}$ см.
- 2.3. Область неразрешенных резонансов отсутствует.

3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)

При отборе оцененных нейтронных данных для библиотеки РОСФОНД рассматривались следующие оценки, используемые в современных библиотеках оцененных данных:

- оценка Стюарта и Хорсли 1968 г.¹⁹, включенная в библиотеки ENDF/B-V и JEF-3;
- оценка Николаева, Базазянц и др. 1980 г.²⁰, включенная в библиотеку БРОНД;
- компиляция Зуанга Йоксянга²¹, принятая в библиотеке CENDL, практически совпадающая по полному сечению с данными из ENDF/B-V, но отличающаяся сечением реакции (n,2n), которое принято в соответствии с рекомендациями Данджю²²;

¹⁹ Stewart L. and Horsley A. LA-3271 (1968);

²⁰ Николаев М.Н., Базазянц Н.О., Забродская А.С., Кошечев В.Н., Ларина А.Ф. Нейтронные данные для дейтерия. Обзорная информация. Обнинск, ФЭИ. 1980.

²¹ Zhou Enchen "Chinese Evaluated Nuclear Data Library, Version-1" P. 38, 1980

²² Cai Dunjiu et al. CNDP, 4. 1990

- оценка Чедвика, Янга и Хэйла 1997 г.²³, принятая в библиотеках ENDF/B-VI.7, ENDF/B-VII и ФОНД-2.2;
- оценка Шибата, Нарита и Игараси²⁴, принятая в библиотеке JENDL-3.3.

3.1. Полное сечение (MT=1).

На рис. 1. сравниваются экспериментальные и оцененные данные для области энергии выше 6 МэВ. На рис. 2 оцененные данные в этой области сравниваются с оценкой Чедвика, Янга и Хэйла, принятой за основу. Заметим, что в библиотеках JEF-2, JEFF и CENDL принята оценка ENDF/B-V.

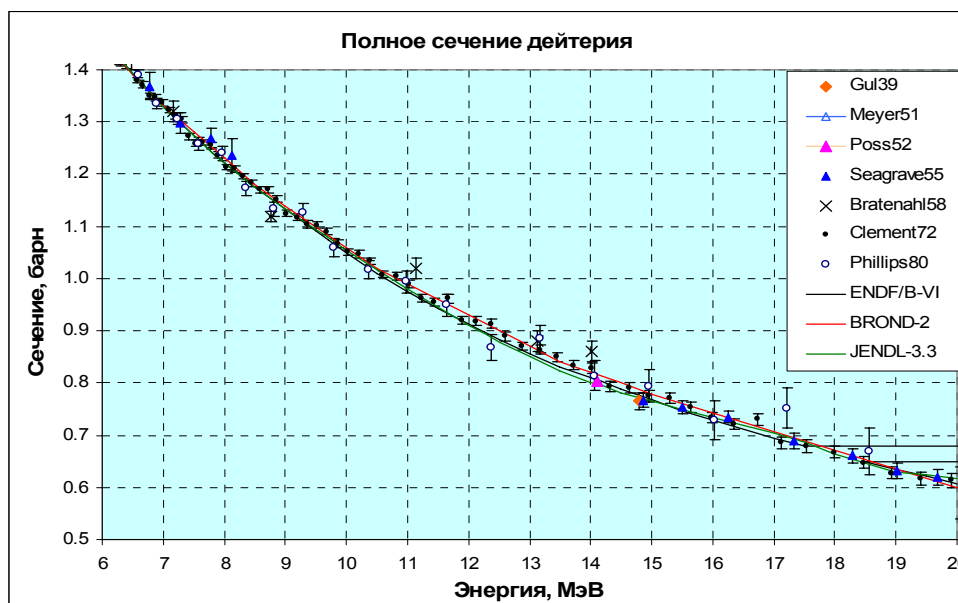


Рис. 1. Экспериментальные и оцененные данные в области первой группы.

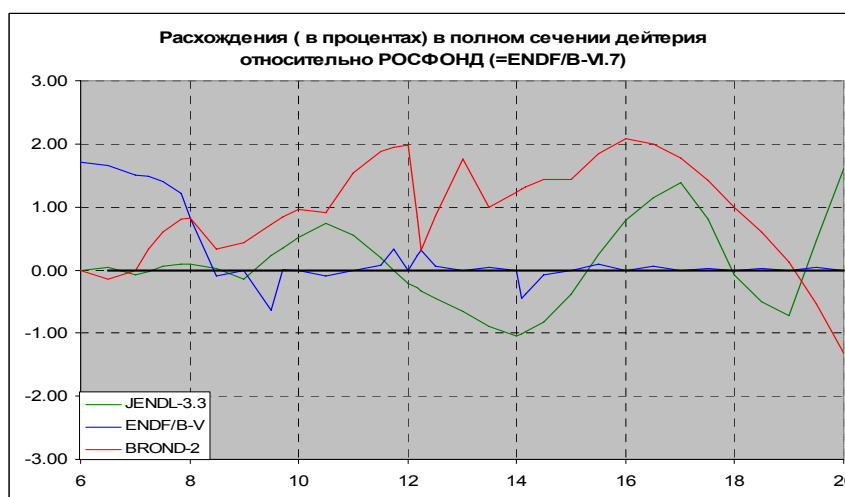


Рис.2. Расхождения в оцененных данных по полному сечению

Все оценки в равной мере согласуются с экспериментальными данными. Основной набор экспериментальных данных получен в работе Дж.М.Клемента и др. (Clement72) методом времени пролета. Более поздние данные Филиппса и др. (Phillips80)

²³ Chadwick M.B., Young P.G, and Hale G.M. "Evaluation of n+²H Cross Section", Group T-2 Progress Report for the Accelerator Production of Tritium Programm. Jan.-Feb. 1997.

²⁴ K.Shibata et al.JAERI-M 83-006 (1983)

согласуются с данными Клемента и др. в пределах погрешностей (заметно больших, чем у Клемента и др.).

В целом, погрешность полного сечения в области выше 6 МэВ едва ли превышает 1%.

На рис. 3. сравниваются экспериментальные и оцененные данные в интервале от 2.5 МэВ до 6.5 МэВ. На рис. 4 оцененные данные в этом энергетическом интервале сравниваются с оценкой Чедвика, Янга и Хэйла, принятой за основу. Данные JENDL-3 на Рис.3. не изображены т.к. они практически совпадают с оценкой БРОНД-2 (См. Рис.4).

Результаты, полученные Клементом и др. и в этой области являются определяющими. Данные Филиппса и др. подтверждают их, равно, как и совокупность остальных экспериментальных данных.

Сечение, принятое в ENDF/B-V (и в JEF-2, и в CENDL) при энергиях 3.5 – 6.5 МэВ неоправданно завышено. БРОНД и ENDF/B согласуются друг с другом в пределах 1 %.

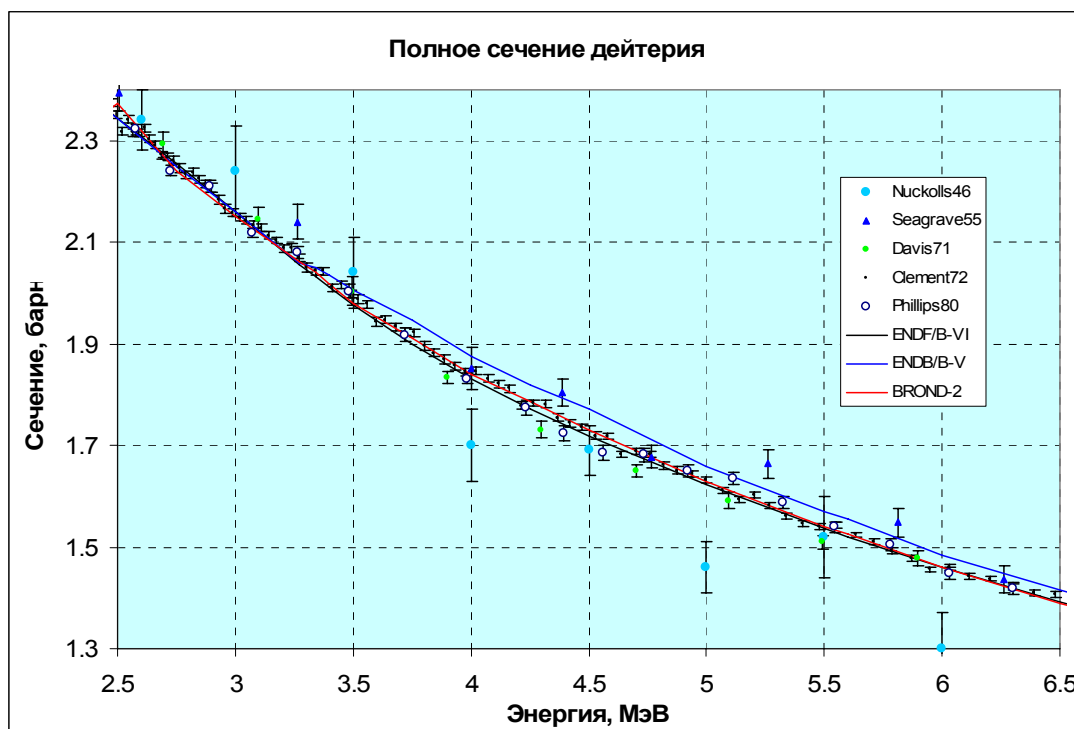


Рис. 3. Экспериментальные и оцененные данные в области 2-й и 3-й групп.

Примем, что погрешности сечений при 20 МэВ, 10 МэВ и 6.5 МэВ составляют 1%, а при 4 МэВ и 2.5 МэВ – 0.7% и что эти погрешности независимы, т.е. не коррелируют между собой (поскольку систематические погрешности, согласно описаниям, существенно ниже приведенных статистических погрешностей). В этом случае погрешности сечений, усредненных по интервалам между первыми тремя энергиями составят 1.4%; по интервалу от 4 до 6.5 МэВ – 1.2%, по интервалу 2.5 – 4 МэВ - 1%.

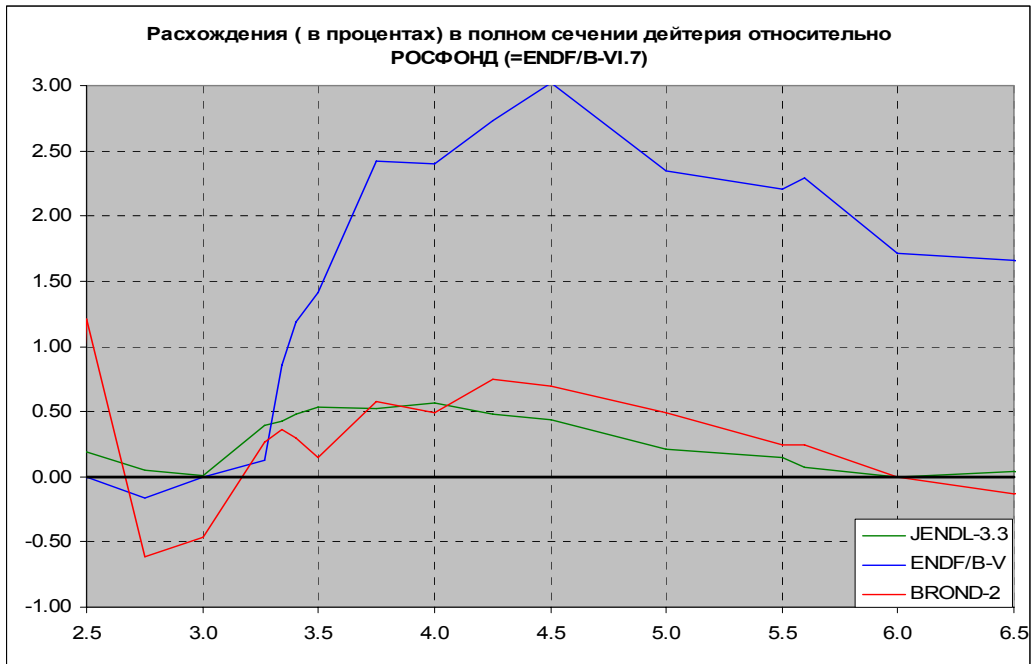


Рис.4. Расхождения в оцененных данных по полному сечению

На рис. 5. сравниваются экспериментальные и оцененные данные в интервале от 0.8 МэВ до 2.5 МэВ. На рис. 6 оцененные данные в этом энергетическом интервале сравниваются с оценкой Чедвика, Янга и Хэйла, принятой за основу. Данные ENDF/B-V на Рис.5. не изображены т.к. они практически совпадают с оценкой ENDF/B-VI.7 (См. Рис.6).

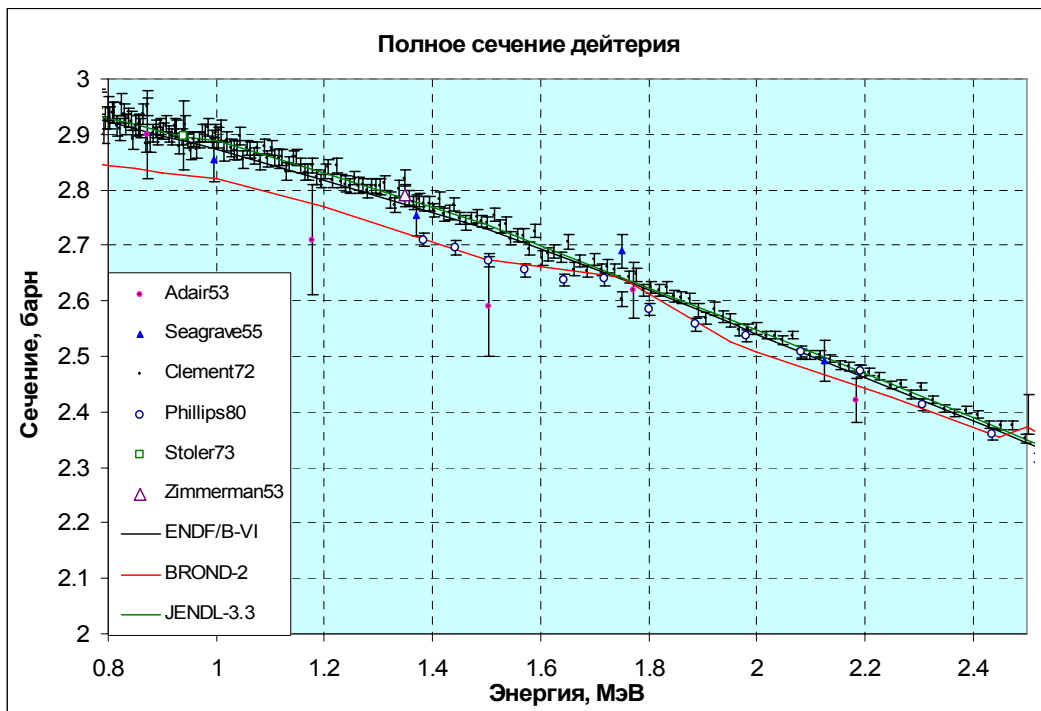


Рис. 5. Полное сечение дейтерия в области 4-й и 5-й групп.

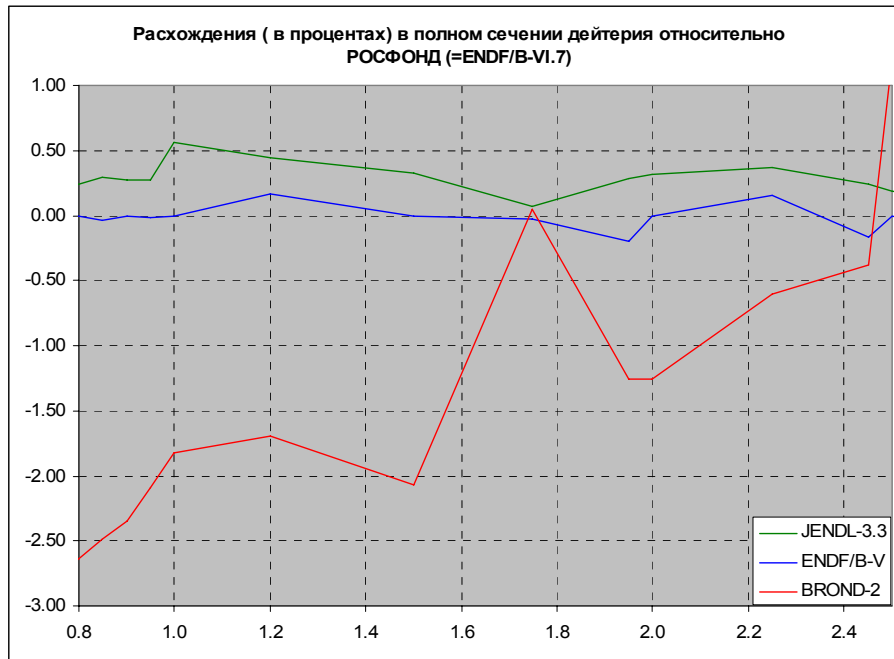


Рис. 6. Расхождения в оцененных данных по полному сечению.

Аномальное поведение полного сечения в оценке, принятой в БРОНД-2, обусловлено, очевидно, данными Филиппса и др. (Phillips80). Однако, именно труднообъяснимый излом в ходе полного сечения, проявившийся в этих данных и противоречащий плавному ходу сечения, следующему из совокупности данных всех других авторов (в частности, П. Столера и др. (Stoler73) и Р. Л. Циммермана и др. (Zimmerman53) заставляет признать этот излом артефактом.

На рис. 7. сравниваются экспериментальные и оцененные данные в интервале от 0.1 МэВ до 0.8 МэВ. На рис. 8 оцененные данные в этом энергетическом интервале сравниваются с оценкой Чедвика, Янга и Хэйла, принятой за основу. Данные ENDF/B-V на Рис.7. не изображены т.к. они практически совпадают с оценкой ENDF/B-VI.7 (см. Рис.8).

Еще раз подтверждается, что оценка, принятая в БРОНД-2, опирается исключительно на данные Филиппса (Phillips80) с полным игнорированием всех остальных результатов.

В то же время, в области 0.1 МэВ - 0.5 МэВ полное сечение, принятое в ENDF/B-VI.7 представляется несколько завышенным. **Было бы целесообразным в этой энергетической области под влиянием данных работ Столера (Stoler73) и Филиппса (Phillips80), подтверждаемых и данными Дж.Сигрейва(Seagrave55) прогнуть ход сечения так, как показано на рис. 7. При этом максимальный прогиб – при 0.25 МэВ составляет лишь 0.8%. Именно такой ход сечения принят в библиотеке РОСФОНД.**

Примем, что погрешности полного сечения при энергиях 0.8, 0.4, 0.2 и 0.1 МэВ независимы и составляют по 1 %. Тогда погрешности средних сечений в интервалах, ограниченных этими энергиями будут составлять по 1.4% а коэффициенты корреляции между ними $\rho = 0.7$.

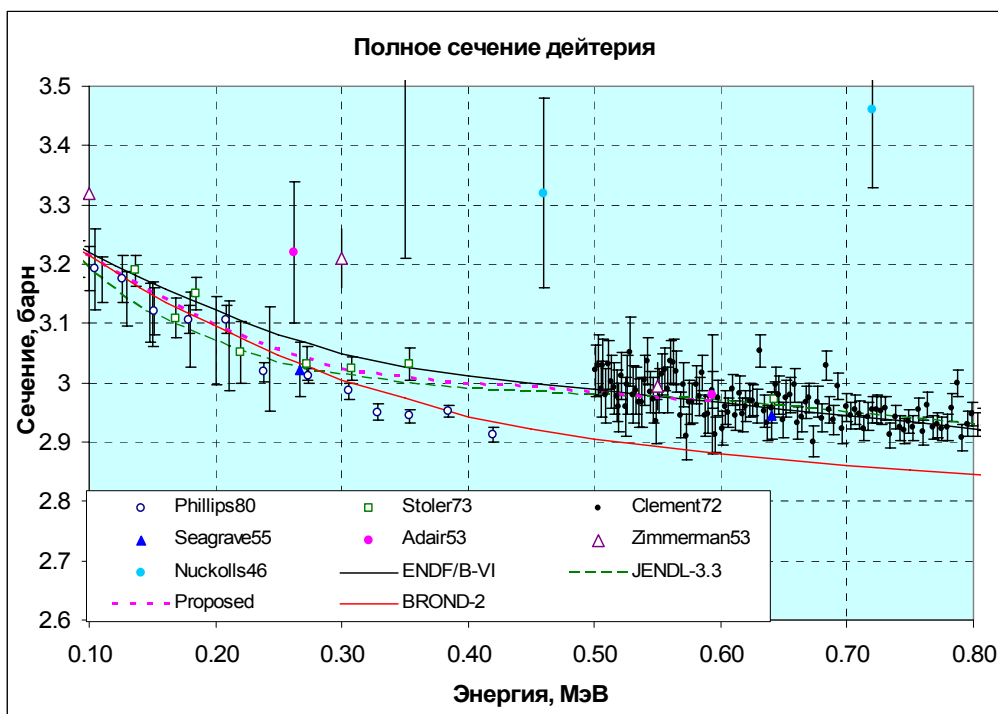


Рис.7. Полное сечение в области 6-й, 7-й и 8-й групп

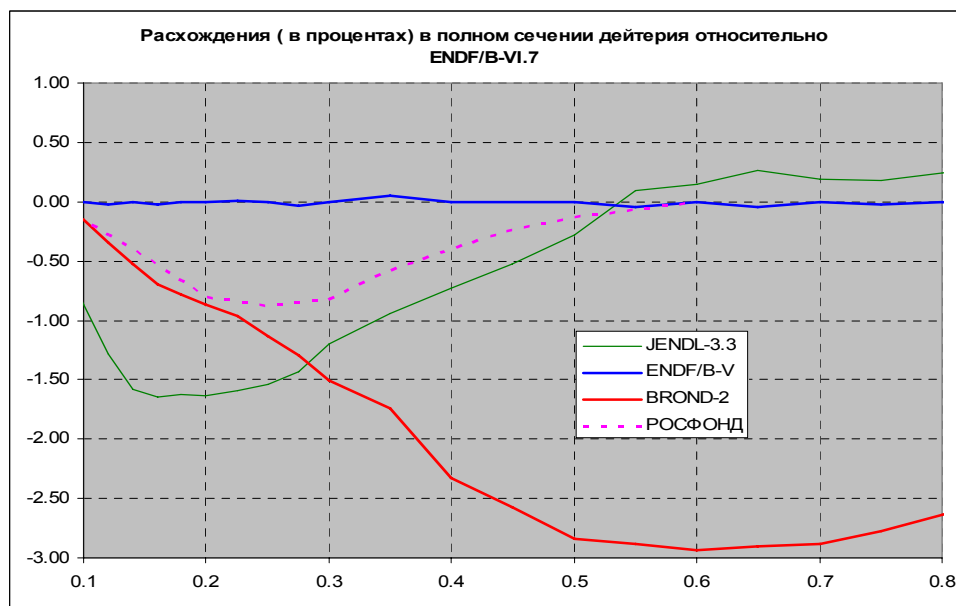


Рис.8. Расхождения в оцененных данных по полному сечению

Экспериментальные и оцененные данные в области энергий от 100 эВ до 100 кэВ приведены на Рис. 9. Экспериментальных данных в этом энергетическом диапазоне мало и они не согласуются между собой в пределах погрешностей. В работе Hibdon50 погрешности вообще не указаны. В этих условиях принимать столь сложный ход кривой энергетической зависимости сечения, как это сделано в библиотеке JENDL-3.3, или соглашаться с изломом этой кривой при 1 кэВ, проявившемуся в оценке Чедвика, Янга и Хэйла²⁵, не представляется обоснованным.

²⁵ Принявших в этой энергетической области старую оценку Стюарта и Хорсли¹.

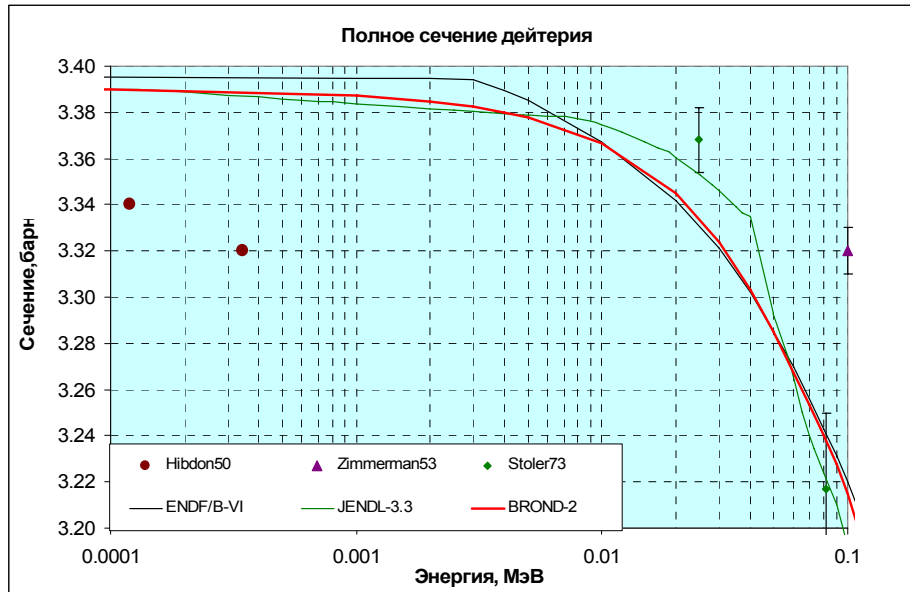


Рис.9. Полное сечение дейтерия в области низких энергий.

Как видно из рис.8, предлагаемое изменение хода сечений при энергиях 0.1 – 0.5 МэВ как раз таково, что предлагаемая для включения в РОСФОНД кривая при 100 кэВ плавно соединяется с кривой хода сечения, рекомендованной Николаевым и др.². При 50кэВ эта кривая очень плавно пересекает кривую, принятую в библиотеке ENDF/B-VI (см. рис.10). **Представляется рациональным при энергиях ниже 50 кэВ включить в РОСФОНД, кривую, рекомендованную Николаевым и др.², линейно интерполирующую сечение к значению, рекомендуемому Мухабхабом и др.²⁶**

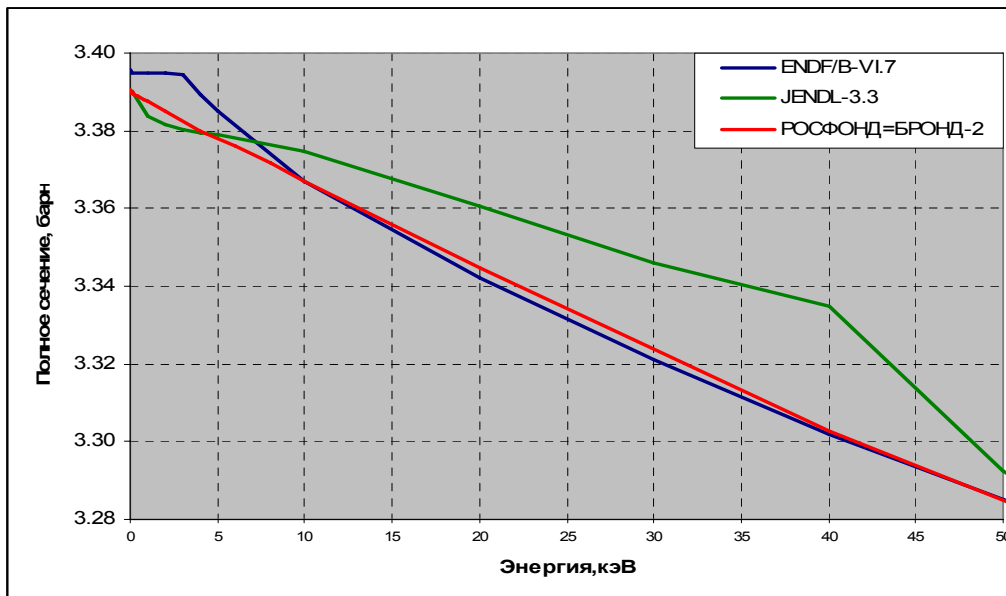


Рис.10. Оцененные данные по полному сечению в области низких энергий.

Согласно Мухабхабу, полное сечение при 0.0235 эВ равно $\sigma_0 = 3.3905 \pm 0.012$ барна, из них 0.00052 барна – захват.

²⁶ Mughabghab S.F., Divadeenam M., Holden N.E. Neutron Cross Sections, Vol.1. neutron Resonance Parameters and Thermal Cross sections. Part A, Z=1 – 60. Academic Press. N-Y, 1981.

3.2. Сечения упругого рассеяния (MT=2) и реакции (n,2n) (MT=16)

Ниже порога реакции (n,2n) отличие сечения рассеяния от полного сечения обусловлено только радиационным захватом, сечение которого даже при 0.0253 эВ составляет менее 0.02% от сечения рассеяния. Что касается области энергий выше порога реакции (n,2n), то здесь данные по сечению упругого рассеяния необходимо рассматривать совместно с данными по конкурирующему процессу.

На рис. 11 оцененные данные по сечению упругого рассеяния в области энергий выше порога реакции (n,2n) сравниваются с имеющимися экспериментальными данными; на рис.12 такое же сравнение делается для сечения реакции (n,2n).

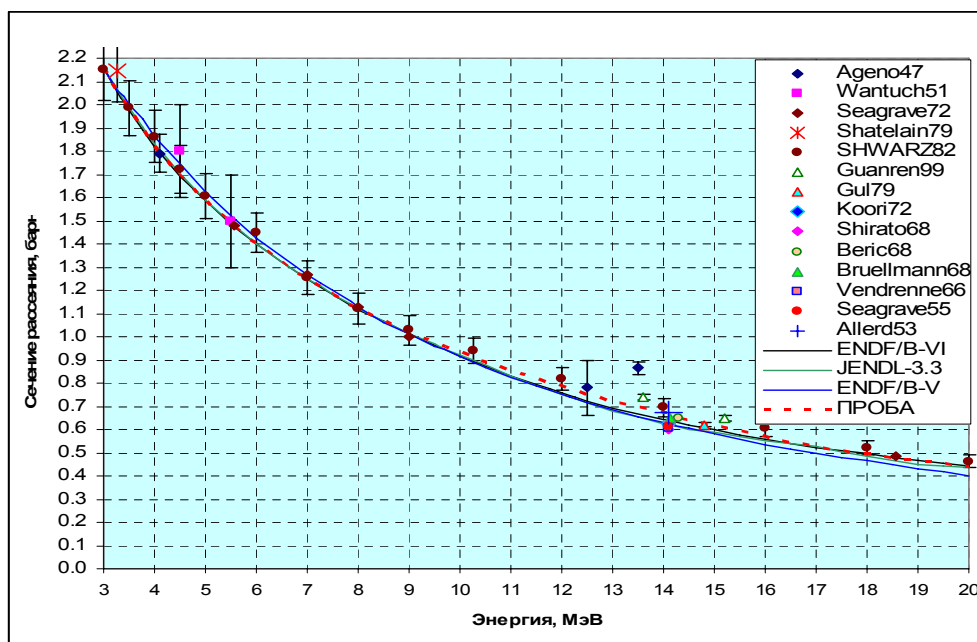


Рис.11. Сечение упругого рассеяния.

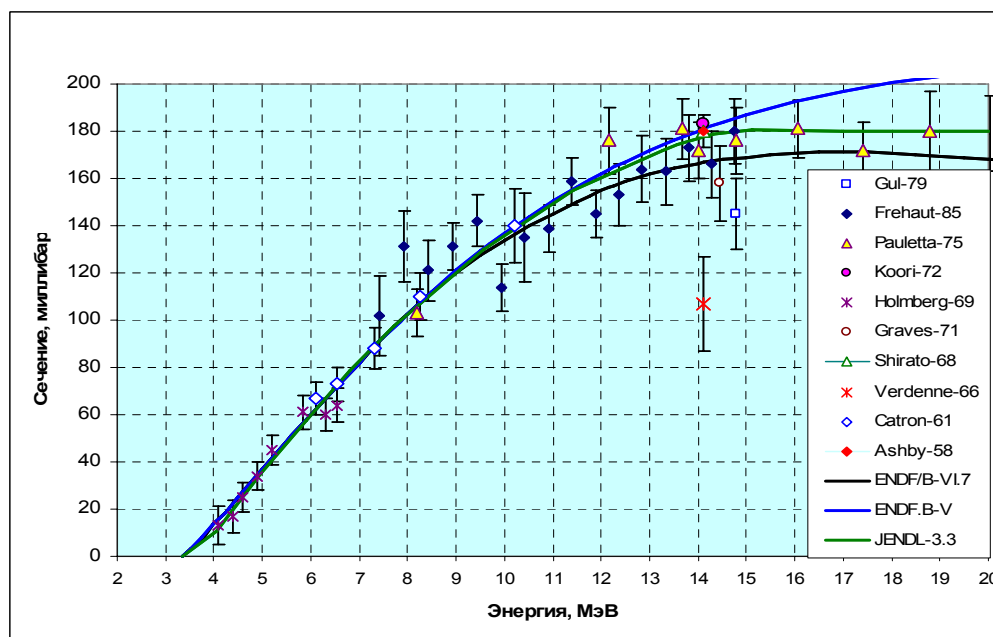


Рис.12. Сечение реакции (n,2n)

Из приведенных данных видно, что принимаемые во всех оценках сечения упругого рассеяния в области энергий 12 – 16 МэВ заметно ниже результатов последних экспериментов Guanregi99, Swarz82, Gul79. Расхождения достигают 70 миллибарн, т.е. 10%. Из рис. 12 видно, что столь большие расхождения не могут быть отнесены за счет переоценки сечения реакции (n,2n). Была предпринята попытка несколько улучшить согласие между результатами оценки сечения упругого рассеяния и недавними экспериментальными данными. Соответствующая кривая показана на рис.11 красным. То к чему приводит это изменение в сечении упругого рассеяния в полном сечении показано на рис. 13. Видно, что даже небольшое увеличение сечения упругого рассеяния в области около 14 МэВ, далеко не «дотягивающее» до результатов Guaniregi99, приводит к тому, что полное сечение превышает результаты большинства измерений.

С учетом этого обстоятельства было решено в этой энергетической области не вносить никаких изменений в оценки сечений упругого рассеяния и реакции (n,2n), принятые в библиотеке ФОНД-2.2, и включить их без изменений в РОСФОНД. Заметим, что в ENDF/B-VII сечение упругого рассеяния при 0.0253 эВ принято чуть более высоким: 3.395 барна. Разумеется, разница в 1.5% намного меньше погрешности, с которой известно это сечение.

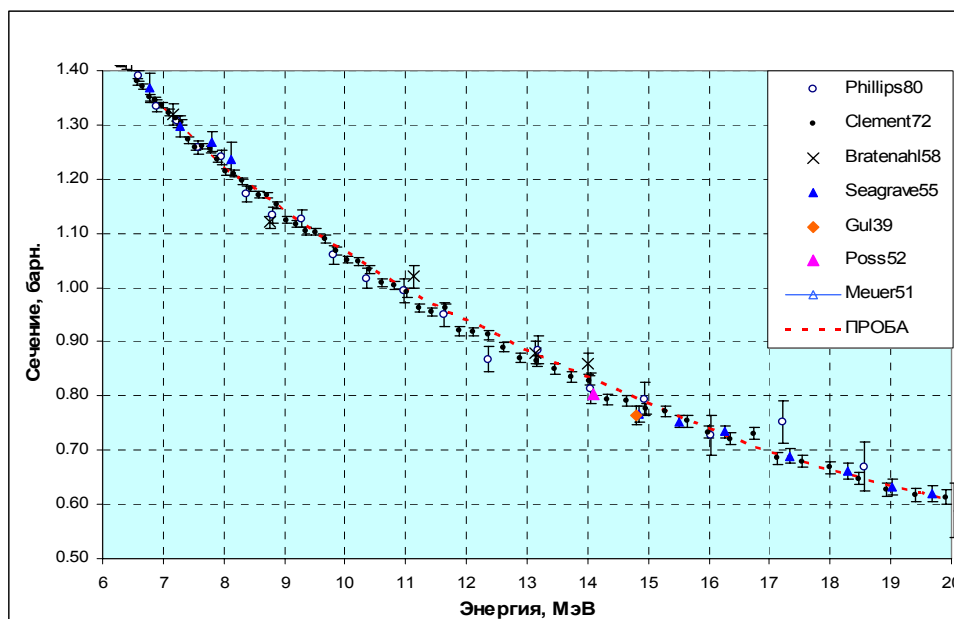


Рис. 13. Влияние увеличения сечения рассеяния на величину полного сечения.

3.3. Сечение радиационного захвата

Экспериментальные данные по сечению захвата нейтронов в дейтерии малочисленны и потому оценки, принятые в разных библиотеках близки. Как ни странно, сильнее всего различаются значения сечения в «тепловой» точке – при 0.0253 эВ: от 0.550 миллибарн, принятых в JENDL-3.3 до 0.506 миллибарн, принятых в ENDF/B-VI. В БРОНД-2 принято рекомендованное Мухабхабом значение – 0.519 миллибарн (± 0.007 миллибарн).

Сечение подчиняется закону $1/v$ вплоть до 1 – 3 кэВ, после чего начинает расти. Этот рост опирается на экспериментальные данные Mitev86 при 7 – 14 МэВ и Cerineo61 при 14.4 МэВ (см. рис.14).

В РОСФОНДе сечение захвата в тепловой области принято соответствующим оценке Мухабхаба, заново рассмотревшему в 2003 г. имеющиеся экспериментальные данные и сохранившем свою прежнюю оценку. Выше 1 кэВ сечение принято таким, как в ENDF/B-VI (и в других файлах оцененных данных).

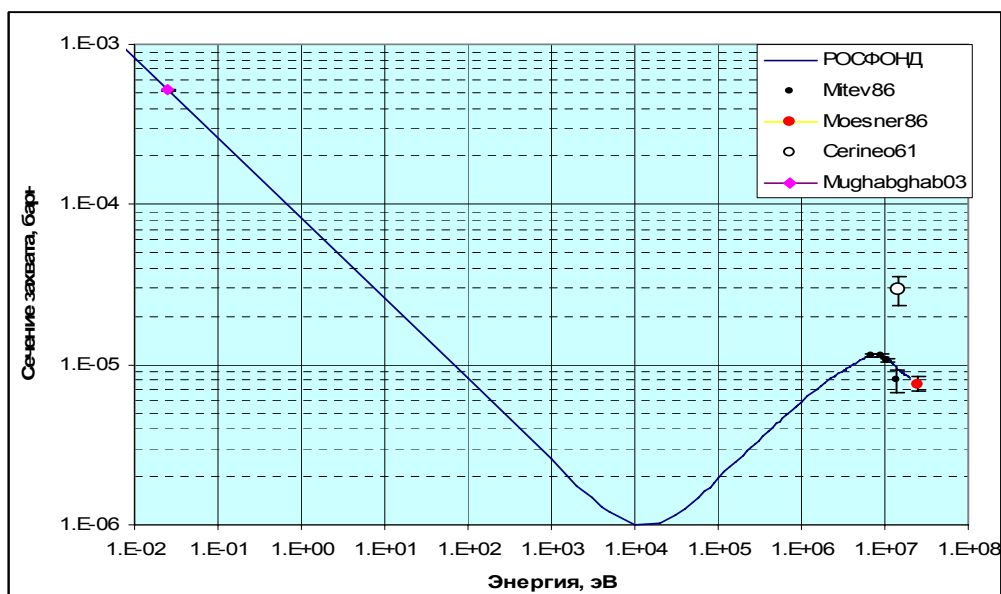


Рис.14. Сечение захвата

4. Энерго-угловые распределения

4.1. Анизотропия упругого рассеяния.

На приводимых ниже рисунках экспериментальные данные по дифференциальным сечениям упругого рассеяния сравниваются с результатами принятой для библиотеки РОСФОНД оценки⁵ и, с некоторыми другими из перечисленных выше оценок. Последние приводятся на графиках лишь в тех случаях, когда они заметно отличаются от принятой оценки.

На серии рисунков 15 приводятся данные для области энергии выше 6 МэВ. Экспериментальных данных в этой области достаточно много, принятая в РОСФОНД оценка хорошо с ними согласуется, а результаты остальных оценок в этой области практически неотличимы от принятой.

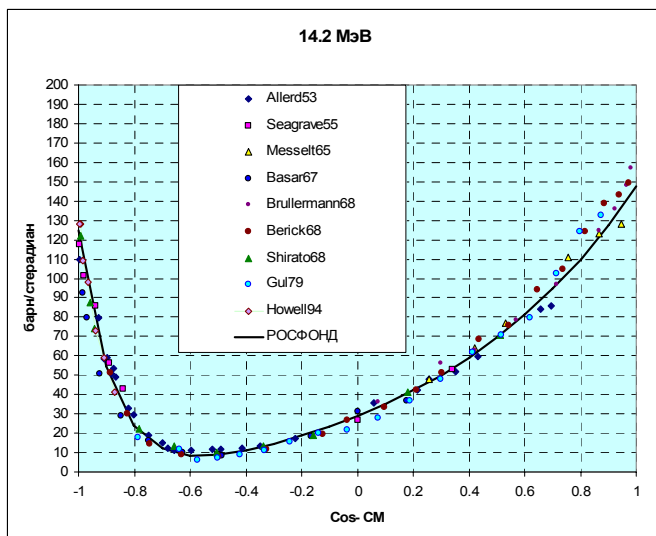


Рис. 15а.

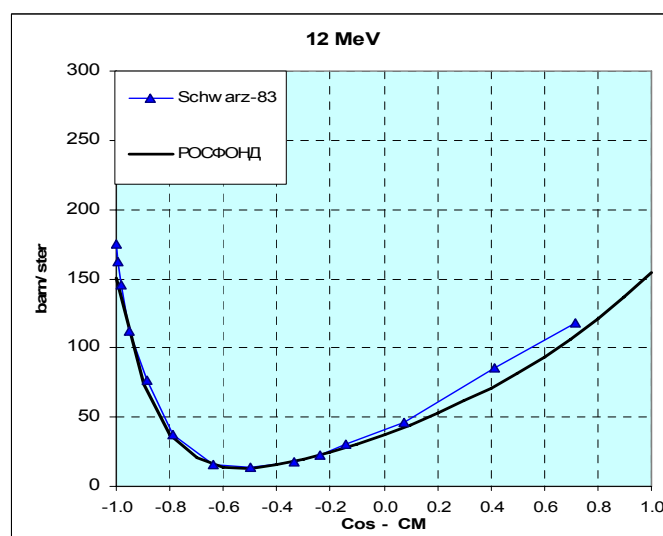


Рис. 15б.

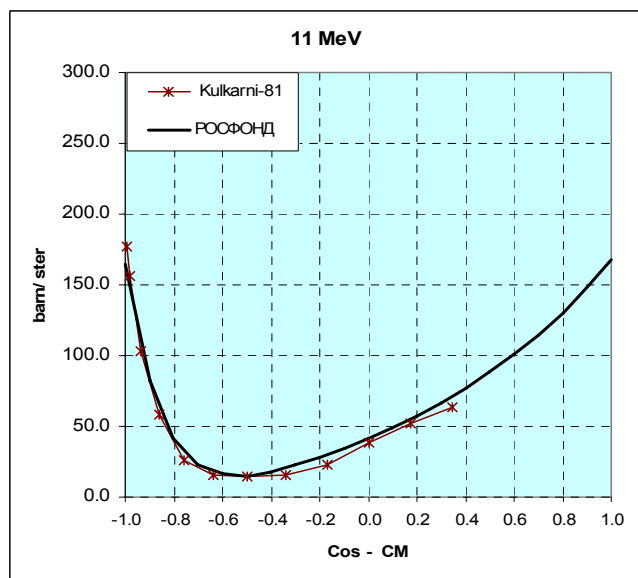


Рис. 15в.

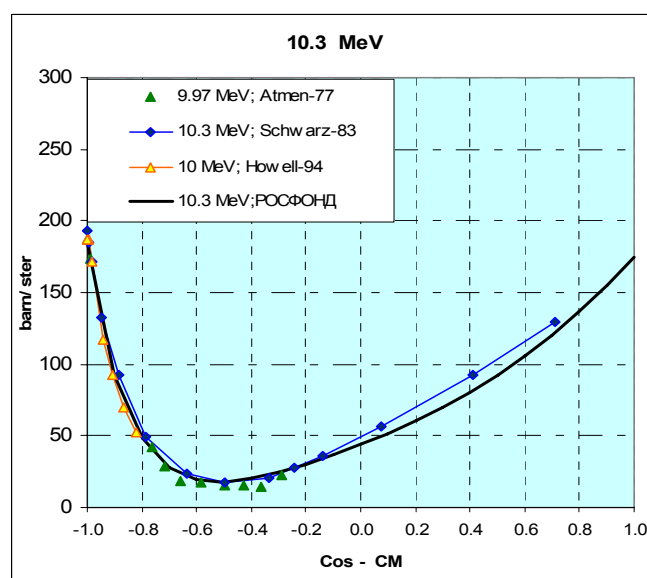


Рис. 15г.

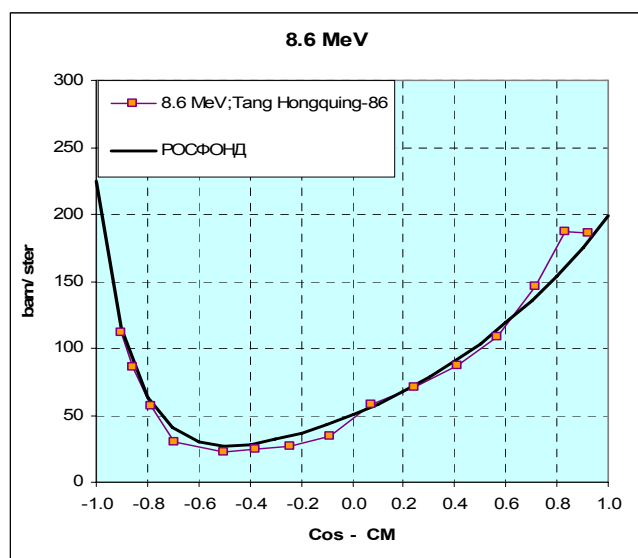


Рис. 15д.

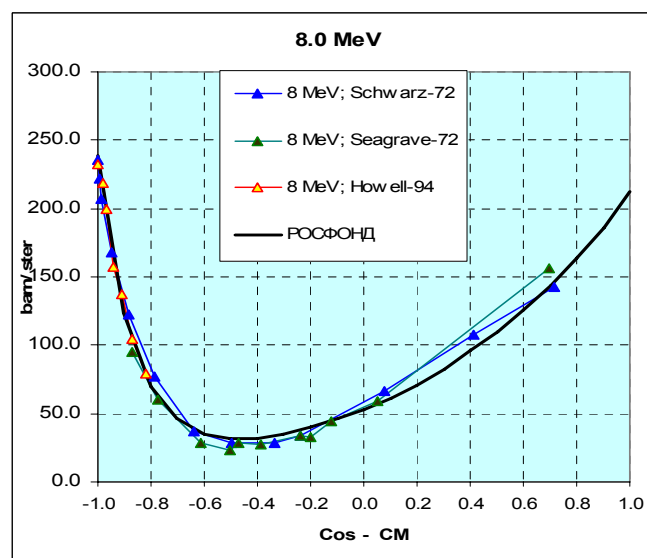


Рис. 15е.

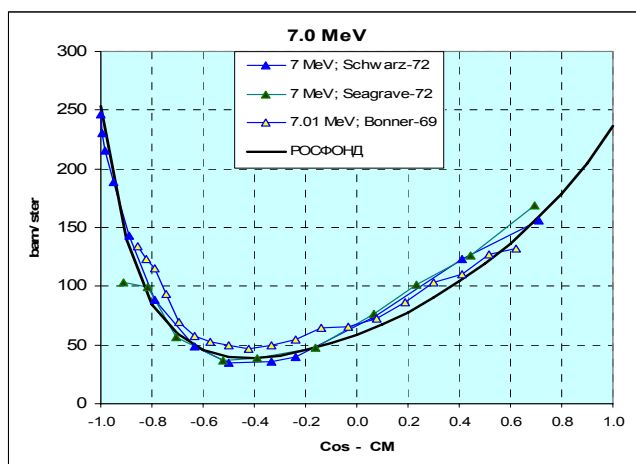


Рис.15ж.

На серии рисунков 16 приводятся экспериментальные данные для области энергий от 1.5 МэВ до 6 МэВ. И в этом энергетическом диапазоне оцененные данные по анизотропии упругого рассеяния опираются на достаточно большое число экспериментальных данных. Однако, нельзя не обратить внимание на то, что степень согласия между данными различных авторов здесь значительно хуже, чем при более высоких энергиях.

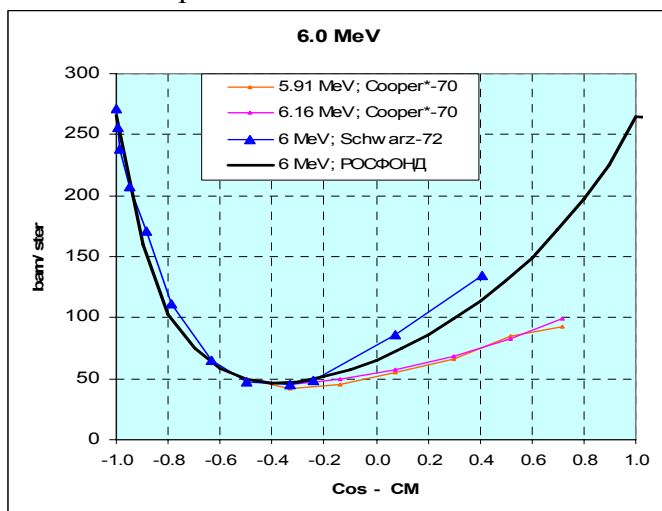


Рис.16а.

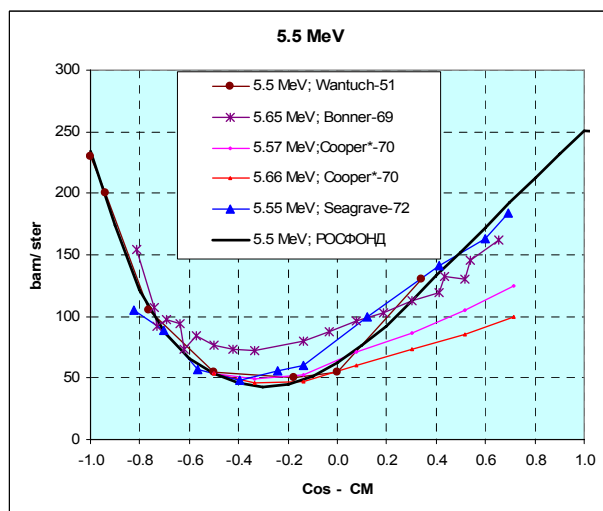


Рис.16б.

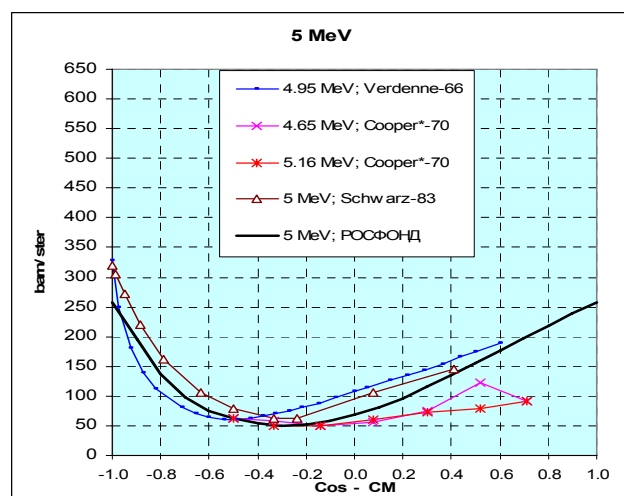


Рис.16в.

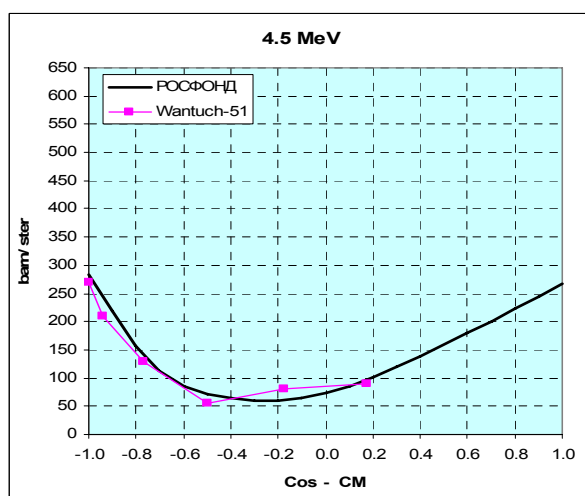


Рис.16г.

*) Данные Cooper70 отнормированы на сечение РОСФОНД при $\cos\theta = 0.5$

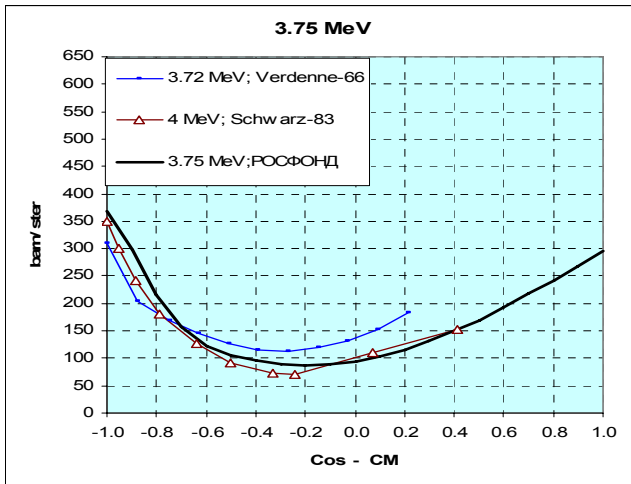


Рис.16д.

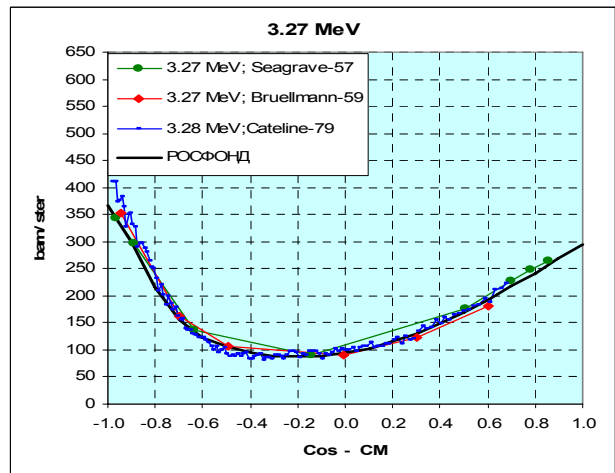


Рис.16е.

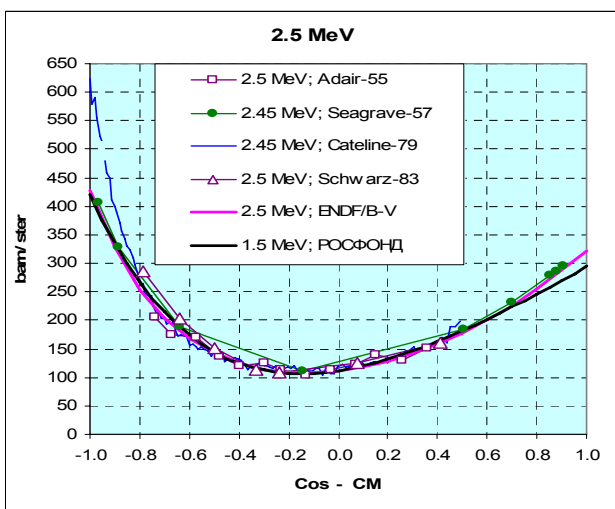


Рис.16ж.

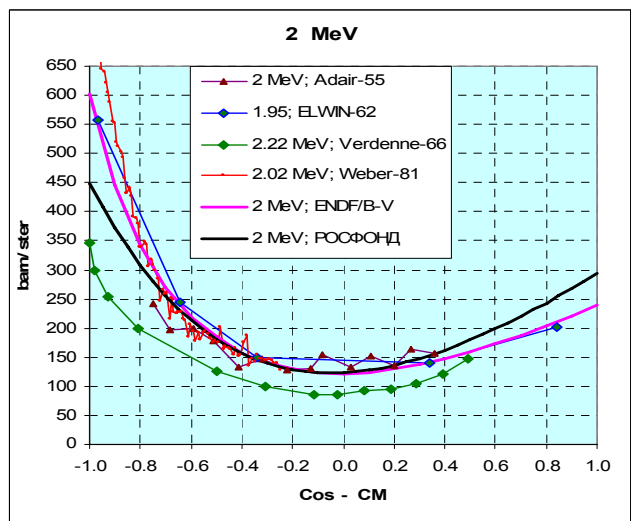


Рис.16з.

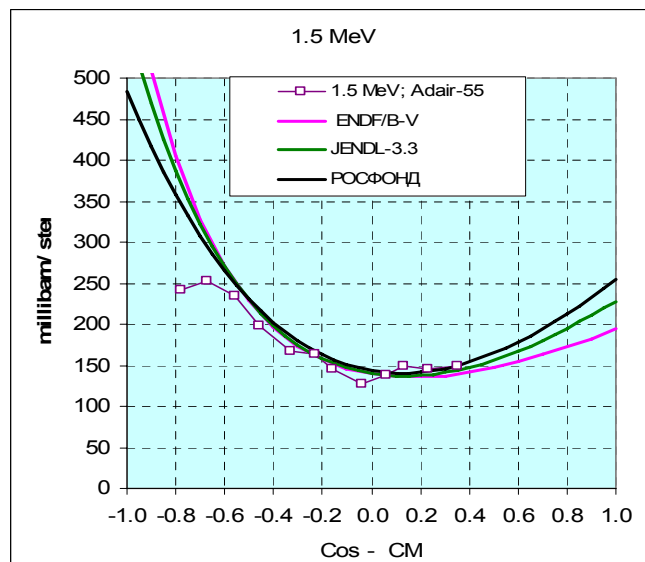


Рис.16и.

На серии рисунков 17 приводятся экспериментальные данные по угловым распределениям нейтронов с энергиями ниже 1.5 МэВ. Несмотря на то, что в этой важной с практической точки зрения области анизотропия рассеяния весьма существенна, экспериментальных данных мало, они неполны и порой противоречивы.

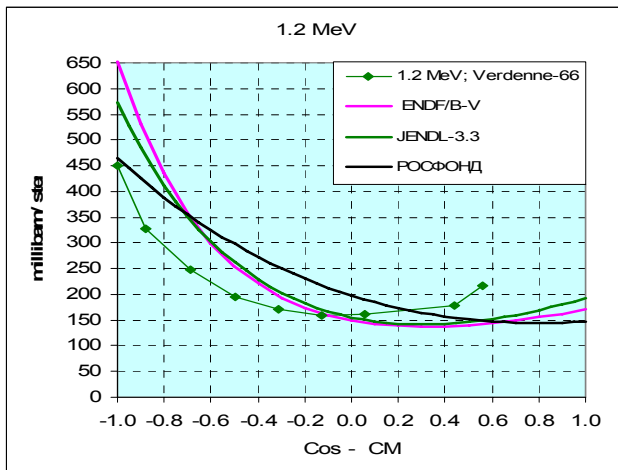


Рис.17а

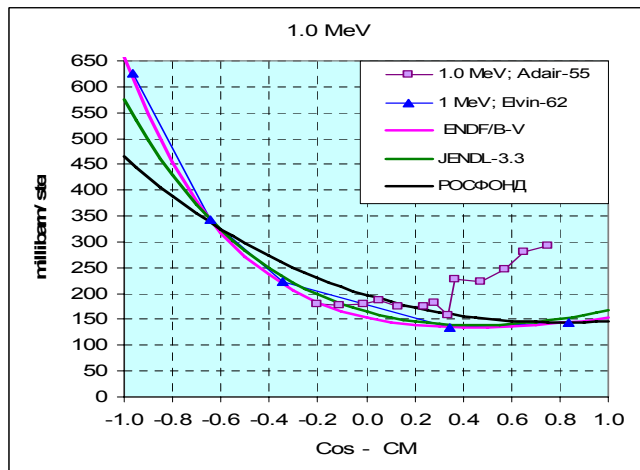


Рис.17б.

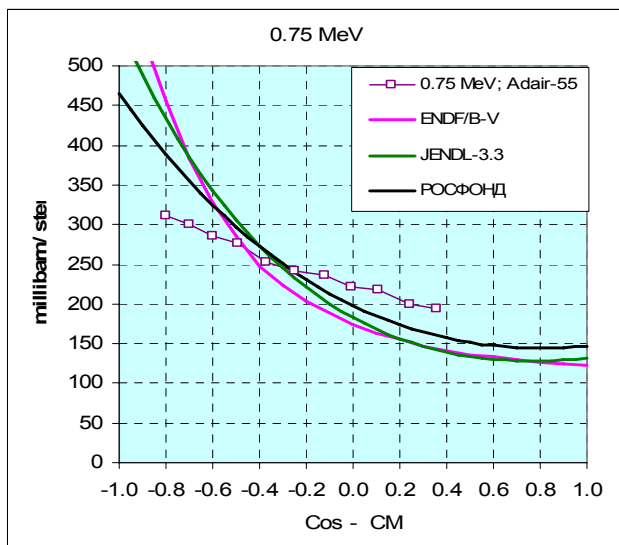


Рис.17в.

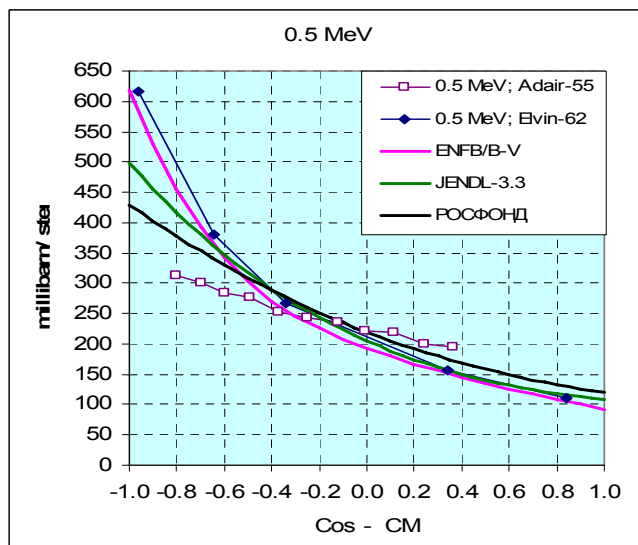


Рис.17г.

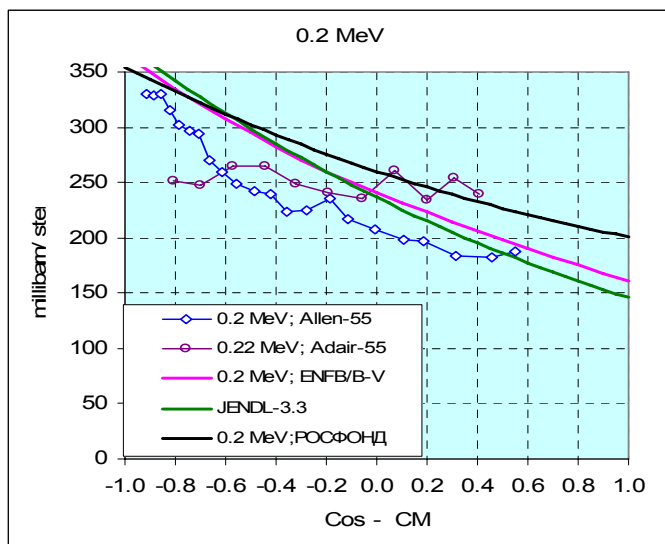


Рис.17д.

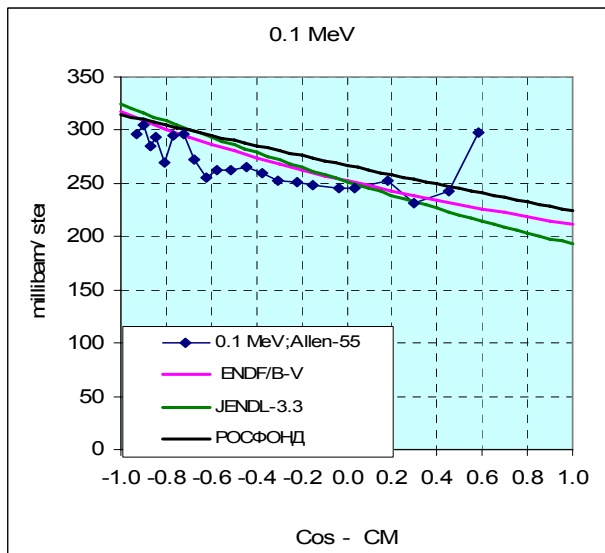


Рис.17е.

В области энергии ниже 1.5 МэВ оценка⁵, принятая в ENDF/B-VII и в ФОНД-2.2, которую решено сохранить и в РОСФОНДе, описывает несколько более

изотропные угловые распределения, чем это следует из оценки, принятой в JENDL-3.3. Угловые распределения, следующие из библиотеки ENDF/B-V, ещё более анизотропны. При 1 МэВ и при 0.5 МэВ эти более анизотропные распределения опираются на данные Elvin62. Однако данные Verdenne66, согласующиеся с ранними экспериментами Allen55 и Adair55, не подтверждают сильной анизотропии.

В этих условиях изменять в библиотеке РОСФОНД принятые в ФОНД-2.2 данные по анизотропии упругого рассеяния признано нецелесообразным.

4.2. Энерго-угловые распределения продуктов реакции (n,2n)

В современных библиотеках используются три несколько различных описания энерго-угловых распределений продуктов развала составного ядра – трития – на протон и два нейтрона. Первым и главным из них является описание по модели развала на три частицы равномерно в фазовом пространстве параметров – энергий и углов вылета – каждой из частиц с соблюдением законов сохранения энергии и импульса. В конкретном случае, когда развал происходит на три частицы это распределение в лабораторной системе координат имеет вид

$$P_i(\mu, E, E') = C(E') \sqrt{E[E_i^{\max}(E', \mu) - E]},$$

где E' – начальная, E – конечная энергия частицы, μ – косинус угла вылета по отношению к направлению нейтрона, вызвавшего реакцию. $E_i^{\max}(E', \mu)$ – максимально возможная энергия частицы, вылетающего под углом $\arccos \mu$. Эта энергия достигается если две другие частицы в системе центра инерции вылетают в направлении, противоположном направлению движения рассматриваемой частицы, т.е. если рассматриваемая частица – нейтрон, две другие частицы – протон и другой нейтрон – должны вылетать как несвязанный дейтрон. В этом случае

$$E_n^{\max}(E', \mu) = E' \frac{2\mu^2 + \frac{M^2}{m^2} \left(1 + \frac{M+m}{M} \frac{Q}{E'}\right) - 1 \pm 2\mu \sqrt{\mu^2 + \frac{M^2}{m^2} \left(1 + \frac{M+m}{M} \frac{Q}{E'}\right) - 1}}{\left(\frac{M}{m} + 1\right)^2}$$

Здесь Q – энергия реакции - энергия связи дейтона ($Q = -2.22457$ МэВ);

M – масса дейтона;

m – масса нейтрона (если рассматривается нейтрон) или протона (если рассматривается протон).

Если $E' > E_{\text{обр}} = QM/(M-m)$, то нейтроны могут наблюдаться под любыми углами вылета ($-1 < \mu < 1$) и знак минус в вышенаписанной формуле следует отбросить. Вблизи порога реакции, при $E_{\text{пор}} < E < E_{\text{обр}}$ нейтроны вылетают в лабораторной системе координат только под углами с косинусом

$$\mu < \mu_{\min} = \sqrt{(M^2 - 1) \left(-\frac{Q}{E'} \frac{M}{M-m} - 1 \right)}.$$

В этом интервале необходимо рассматривать две группы нейтронов – те, которые в системе координат центра инерции летят вперед и те, что летят назад. Этим группам нейтронов и соответствуют разные знаки в формуле для максимальной энергии.

Константа C определяется из условия нормировки плотности вероятности на единицу и равна при $E > E_{\text{обр}}$:

$$C(E') = \frac{2(M+m)^4}{\pi^2 E'^2 m^4 (a^2 + 8a/3 + 8/5)};$$

при $E_{\text{пор}} < E < E_{\text{обр}}$:

$$C(E') = \frac{2(M+m)^4}{\pi^2 E'^2 m^4 [a^2(1-\mu_{\min}) + 8a(1-\mu_{\min}^3)/3 + 8(1-\mu_{\min}^5)/5]}.$$

$$a(E') = \frac{M^2}{m^2} \left(1 + \frac{M+m}{M} \frac{Q}{E'} \right) - 1.$$

Задание энерго-углового распределения в такой форме предусмотрено в формате ENDF/B-VI (LAW=6) и вычисления, например, вероятностей и угловых моментов межгрупповых переходов производятся автоматически программой NJOY по заданным в файле данных значениям M/m , Q и числу частиц $n=3$. Тем самым достигается весьма компактная запись сложного энерго-углового распределения. Такая форма представления данных использована в библиотеках ENDF/B-VI, ФОНД-2 и JEF-3.

В ряде экспериментов по исследованию спектров нейтронов реакции $D(n,n')$; $D(p,n)$; $H(d,n)$ выяснилось, что в спектрах нейтронов и протонов, вылетающих под малыми углами, наблюдаются заметные отклонения от формы, определенной выше моделью развала. Именно, наблюдаются пики в области $E \approx E^{\text{max}}$ и $E \approx E^{\text{max}}/2$. Поскольку энергия E^{max} достигается когда оставшийся нейтрон и протон летят назад, пик при $E \approx E^{\text{max}}$ означает, что подобных случаев наблюдается заметно больше, чем это следует из модели развала на несвязанные частицы, что указывает, на взаимодействие между летящими назад нейтроном и протоном, т.е. действительно, назад вылетает несвязанный дейтон $-D^*$. В спектре нейтронов, вылетающих назад, при этом с необходимостью будет наблюдаться пик при энергии $E \approx E^{\text{max}}/2$ от нейтронов, образовавшихся при развале несвязанного дейтона.

Пик при $E \approx E^{\text{max}}/2$ у нейтронов, летящих вперед, указывает на то, что вылет в переднем направлении обоих нейтронов также более вероятен, чем следует из модели развала, что можно интерпретировать как реакцию с вылетом несвязанного дейтона или несвязанного бинейтрона $-B^*$.

В работе² пики вблизи $E \approx E^{\text{max}}$ и $E \approx E^{\text{max}}/2$ для нейтронов, летящих под малыми углами вперед и при $E \approx E^{\text{max}}/2$ для нейтронов, летящими под малыми углами назад, оценены на основе экспериментальных данных. Принято, что в результате реакции $D(n,D^*)n$, когда несвязанный дейтон вылетает вперед, угловые распределения нейтронов линейно меняются от максимального значения при $\mu=1$ до нуля при $\mu=0.955$ ($E \approx E^{\text{max}}(1)/2$) и от нуля при $\mu=-0.955$ до максимального значения при $\mu=-1$ ($E \approx E^{\text{max}}(-1)$). В результате реакции $D(n,B^*)p$, когда вперед вылетает несвязанный бинейтрон, вероятность вылета меняется от максимальной при $\mu=1$ до нуля при $\mu=0.94$ ($E \approx E^{\text{max}}(1)/2$). В результате реакции $D(n,p)B^*$, когда несвязанный бинейтрон вылетает назад, вероятность вылета меняется от нуля при $\mu=-0.94$ до максимальной при $\mu=-1$ ($E \approx E^{\text{max}}(1)/2$). Из анализа экспериментальных данных²⁷ следует, что вероятность вылета несвязанного бинейтрона назад маловероятна.

Вероятность осуществления реакции $(n,2n)$ по описанным механизмам, согласно оценке², равна нулю ниже 5 МэВ, составляет 9.2% при 14.2 МэВ и 14.6 % при 20 МэВ.

²⁷ Комаров В.В., Попова А.М. ЖЭТФ. 1960. т.38. с.1559.

Принято, что сечения реакций $D(n,p)B^*$ и $D(n,B^*)p$ одинаковы. Отношение сечений реакций $D(n,D^*)n$ и $D(n,B^*)p$ принято равным 1.5. Таким образом, энерго-угловое распределение вторичных нейтронов оказывается состоящим из 4-х ветвей: механизма развала, имеющего определяющее значение, и трех описанных выше механизмов, учитывающих взаимодействие частиц в конечном состоянии. Такой способ описания энерго-угловых распределений нейтронов реакции $(n,2n)$ принят в библиотеке БРОНД-2.

Более сложное теоретическое описание энерго-углового распределения нейтронов реакции $(n,2n)$ принято в библиотеках JENDL-3 и CNDL. Оно основано на решении уравнения Фаддеева, параметры которого подбираются под экспериментальные данные по угловым распределениям вторичных частиц, образующихся в реакциях $D(n,2n)p$ и $D(p, 2n)p$. В библиотеке JENDL-3 при этом дается ссылка на работу²⁸; CENDL – на работу²⁹. В обоих случаях энерго-угловые распределения в файлах задаются трижды-дифференциальными вероятностями вылета вторичных частиц и в этом виде трудно поддаются осознанию. В библиотеке JENDL-3 представление этих данных потребовало 10943 записи (образов перфокарт); в библиотеке CENDL – 30484 записи.

Для сравнения результатов разных оценок целесообразно рассмотреть среднегрупповые характеристики. В таблице 1 приводятся для 5 энергетических групп БНАБ средняя энергия нейтронов, испускаемых в реакции $(n,2n)$, и средний косинус угла их вылета (в лабораторной системе координат).

Таблица 1. Среднегрупповые характеристики энерго-угловых распределений нейтронов, испускаемых в реакции $(n,2n)$

| № группы | Нижняя граница, МэВ | Средняя энергия, МэВ | БРОНД-2 | | ENDF/B-6 | | JENDL-3.3 | | CENDL | |
|----------|---------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | | $\langle E \rangle$, МэВ | $\langle \cos\mu \rangle$ | $\langle E \rangle$, МэВ | $\langle \cos\mu \rangle$ | $\langle E \rangle$, МэВ | $\langle \cos\mu \rangle$ | $\langle E \rangle$, МэВ | $\langle \cos\mu \rangle$ |
| -1 | 13.98 | 14.5 | 2.02 | 0.60 | 1.95 | 0.58 | 1.85 | 0.55 | 1.79 | 0.54 |
| 0 | 10.5 | 11.5 | 1.57 | 0.62 | 1.54 | 0.60 | 1.50 | 0.59 | 1.46 | 0.57 |
| 1 | 6.5 | 7.61 | 0.96 | 0.66 | 0.94 | 0.65 | 0.99 | 0.67 | 0.95 | 0.65 |
| 2 | 4 | 4.90 | 0.51 | 0.77 | 0.51 | 0.77 | 0.59 | 0.80 | 0.58 | 0.76 |
| 3 | 2.5 | 3.14 | 0.31 | 1.00 | 0.31 | 1.00 | 0.31 | 1.00 | 0.32 | 1.00 |

Обращает на себя внимание следующее.

1. При высоких энергиях (-1-я и 0-я группы) учет взаимодействия частиц в конечном состоянии по данным² ведет к увеличению энергии вторичных нейтронов относительно модели развала, а по данным^{10,11} – к понижению этой энергии.
2. Средний косинус угла вылета по данным² слегка возрастает, тогда как по данным^{10,11} – слегка падает.
3. Согласно данным^{10,11} взаимодействие частиц в конечном состоянии проявляется и в области энергий ниже $E_{обр}$, но имеет противоположный знак: средняя энергия вторичных нейтронов несколько увеличивается.
4. В -1й группе различие между средними энергиями вторичных нейтронов, следующими из работ^{10 и 11}, основанных на одинаковом теоретическом базисе, составляет 3.3%, т.е. ровно столько же, сколько различие между средними

²⁸ Enebhoh W. The n+d Break-up Reaction with Separable Potential. Nucl.Phys. A191 (1972), p.97

²⁹ Cpr Liangyuan, Wang Cuilan and Lu Dinghui. Commun.Theor.Phys. 11. p.411 (1989).

энергиями вторичных нейтронов, рассчитанными по модели развала и с учетом взаимодействия частиц согласно работе².

Таким образом, надежность современных оценок учета взаимодействия частиц в конечном состоянии оставляет желать лучшего. В то же время, при энергиях ниже 20 МэВ, это влияние при всех сделанных оценках сравнительно невелико и едва ли может проявиться при использовании нейтронных данных для дейтерия в каких-либо практических расчетах. Тем не менее, решено в библиотеке РОСФОНД учесть влияние взаимодействия частиц в конечном состоянии так, как это рекомендовано в работе² (и как принято в библиотеке БРОНД-2). Выбор именно этой оценки обусловлен тем, что ее данные представлены в достаточно простой и легко контролируемой форме. В то же время сам факт введения учета частиц в конечном состоянии в будущем будет способствовать уточнению влияния этого эффекта тогда, когда к тому появятся достаточные расчетно-экспериментальные основания.

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

Единственной реакцией, в результате которой образуются фотоны при взаимодействии нейтронов с дейтерием является радиационный захват. Энергия этой реакции равна $Q=6.257232$ МэВ (см. п. 1.5). Энергия фотона при захвате теплового нейтрона (E_{phot}^0) чуть ниже этой энергии за счет отдачи тритона, испускающего фотон. Энергия отдачи равна

$$E_D = \frac{Q^2}{M_T m_n c^2},$$

где $M_T=2.99014$ – отношение массы тритона к массе нейтрона, $m_n c^2=939.55$ МэВ – энергетический эквивалент массы покоя нейтрона. Расчеты дают $E_T=0.013936$ МэВ. Таким образом, на энергию фотона, испускаемого при захвате теплового нейтрона в водороде приходится $E_{\text{phot}}^0=Q-E_D=6.243296$ МэВ. **Погрешность этой величины не более двойки в последнем знаке. Эта величина и принята в библиотеке РОСФОНД.**

При захвате нейтронов с большей энергией, энергия испускаемых фотонов меняется линейно с энергией нейтрона:

$$E_{\text{phot}}(E_n) = E_{\text{phot}}^0 + \frac{Aw}{(Aw+1)} E_n$$

Данные об образовании фотонов в библиотеке РОСФОНД представлены в файле MF=12 (множественность образования фотонов, равная в данном случае единице) для MT= 102 (радиационный захват). Угловое распределение – изотропное – определено в файле MF=14 для MT=102.

6. Погрешности нейтронных сечений.

6.1. Погрешность полного сечения.

Погрешность полного сечения варьируется от 1 - 1.4% при высоких энергиях до 0.35%, рекомендованных Мухабхабом при низких. Ход погрешности полного сечения с энергией и корреляционные свойства этих погрешностей обсуждались в разделе 3.1..

Из данных раздела 3.2, в частности из рис. 12, видно, что погрешности сечения реакции $(n,2n)$ едва ли лучше 5%. При этом погрешности достаточно сильно скоррелированы, поскольку энергетическое поведение сечения с энергией установлено до 10 МэВ весьма точно. При более высоких энергиях возможные вариации хода сечений (скажем, отношение сечений при 20 и при 10 МэВ) близки к погрешности абсолютных значений сечения.

6.2. Погрешность сечения захвата

Погрешность сечения захвата тепловых нейтронов, оцененная Мухабхабом (1.3%) в свете значительного разброса принятых оцененных данных представляется слишком оптимистичной. Усреднение всех имеющихся экспер иментальных данных о сечении захвата нейтронов в дейтерии с весом обратно пропорциональным квадратам указанных авторами погрешностей, дает 534 микробарн с погрешностью этого среднего, оцененного из авторских погрешностей, равной 2%. При этом средне-квадратичный разброс данных составляет 6%. Учитывая изложенное и высокую компетентность Мухабхаба, детально исследовавшего обоснованность погрешностей, приписываемых авторами своим данным, полагаем, что принятому в оценке сечению 519 микробарн можно приписать погрешность ± 10 микробарн (2%). Эта погрешность полностью скоррелирована в области энергии до 100 эВ, где нет оснований сомневаться в том, что сечение подчиняется закону $1/v$. (см. рис.14). В интервале от 100 эВ до 1 МэВ, где экспериментальные данные отсутствуют, погрешность сечения может быть очень большой, порядка 20 -30%. В области от 1 эВ до 20 МэВ, где ход сечения опирается на экспериментальные данные, которым приписана погрешность не хуже 10%, сечению можно приписать именно такую погрешность.

6.3. Погрешность среднего косинуса угла рассеяния

Из данных раздела 4.1 видно, экспериментальные данные по анизотропии упругого рассеяния нейтронов на дейтерии недостаточно полны и порой противоречивы. Это нашло отражение в значительном разбросе результатов оценок. На рис. 18 показана энергетическая зависимость среднего косинуса угла упругого рассеяния в системе координат центра инерции, следующая из разных оценок.

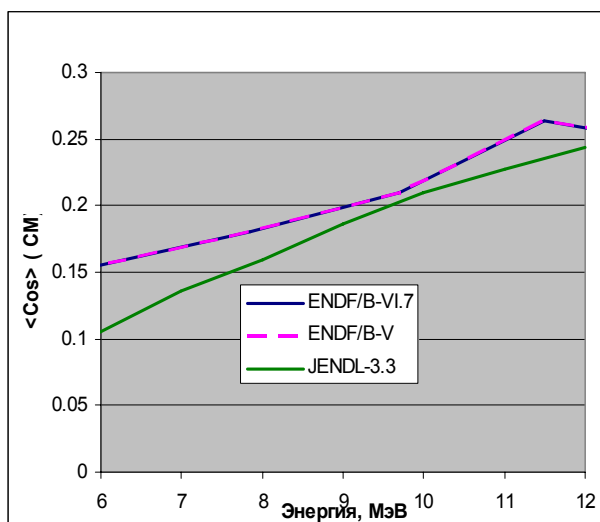


Рис.18а

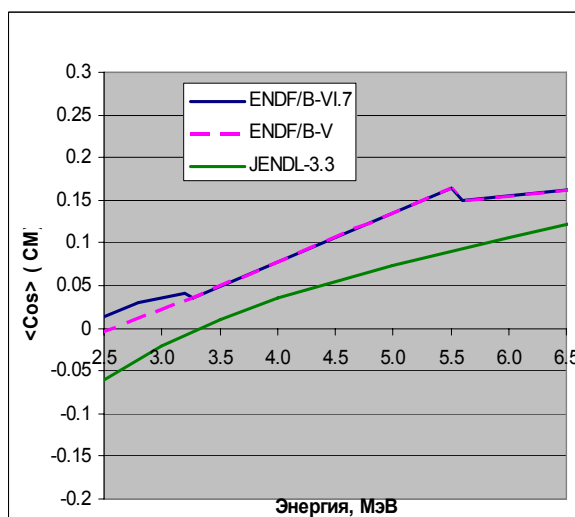


Рис.18б

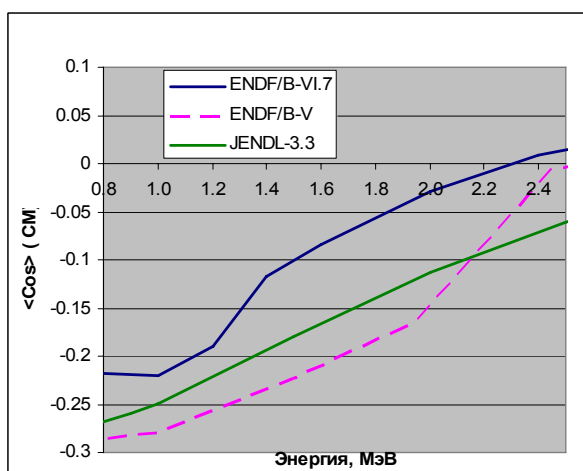


Рис.18в

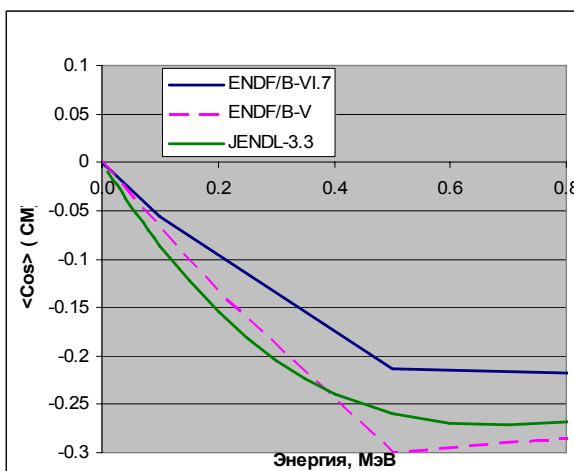


Рис.18г.

Из рассмотрения данных, представленных на рис. 18, можно прийти к следующим заключениям относительно погрешностей среднего косинуса угла упругого рассеяния: Выше 6 МэВ ~ 25%; от 2.5 до 6 МэВ (где средний косинус очень мал) – 80%; от 1ю4 до 2.5 МэВ – 60%; от 0.8 до 1.4 МэВ – 35%; от 0.4 до 0.8 МэВ – 50%; ниже 0.4 МэВ -60%. Более детальные оценки погрешностей даны в Приложении.

7. Валидация нейтронных данных по интегральным экспериментам.

Экспериментами, наиболее чувствительными к сечению рассеяния на водороде являются критические параметры высококонцентрированных тяжеловодных растворов высокообогащенного урана. В Справочнике³⁰ приводятся результаты двух серий таких экспериментов, выполненных в 50-х годах в Лос-Аламосской Лаборатории США – серия HEU-SOL-THERM-004 (6 критических сфер с раствором уранил-фторида в D₂O в тяжеловодном отражателе с атомарным отношением D/²³⁵U от 34.2 до 431) и серия HEU-SOL-THERM-020 (5 критических цилиндров с раствором уранил-фторида в D₂O без отражателя с атомарным отношением D/²³⁵U от 230 до 2081). Погрешности коэффициента размножения, приписанные авторами своим результатам варьируются от

³⁰ International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. NEA/NSC/DOC(095)03, Sept.2004 ed.

0.7% до 1.2%. Эти погрешности чрезвычайно сильно скоррелированы. Расчеты, основанные на вычисленных коэффициентах чувствительности коэффициентов размножения этих сборок к использованным при расчете полным сечениям дейтерия и оцененных здесь погрешностям этих сечений и корреляций между ними (см. Приложение) показали, что учет неточности современного знания сечений дейтерия вносит в результаты этих экспериментов дополнительные погрешности от 0.16% до 0.22% в зависимости от отношения $D/^{235}U$. К сожалению, оценить чувствительности к среднему косинусу угла рассеяния на дейтерии не удалось и оценить погрешность, вносимую за счет неточности знания анизотропии упругого рассеяния на дейтерии, не удалось. Возможно, она имеет тот же порядок величины, что и погрешность за счет неточности полного сечения. Как бы то ни было, погрешности, вносимые неточностью знания нейтронных данных дейтерия в критичность обсуждаемых размножающих систем, заметно ниже, чем погрешности, с которыми определены соответствующие коэффициенты размножения. Поэтому провести валидацию нейтронных данных дейтерия на этих экспериментах не представляется возможным.

8. Перечень цитированных экспериментальных работ

8.1. Полное сечение

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|-------------|---------------|------------------------|----------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | от | до | |
| Davis71 | J.C.Davis | J,PR/C,3,1798,197105 | 10099002 | 1.5+06 | 2.8+07 | 27 |
| Clement72 | J.M.Clement | J,NP/A,183,51,197203 | 10173002 | 5.0+05 | 3.0+07 | 432 |
| Stoler73 | P.Stoler | J,PR/C,8,1539,197310 | 10335003 | 2.2+04 | 9.9+05 | 446 |
| Phillips80 | T.W.Phillips | J,PR/C,22,384,8008 | 10945003 | 7.1+04 | 4.3+07 | 71 |
| Poss52 | H.L.Poss | J,PR,87,11,52 | 11053003 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Adair53 | R.K.Adair | J,PR,89,1165,5303 | 11061002 | 2.6+05 | 3.0+06 | 9 |
| Zimmerman53 | C.L.Zimmerman | J,PR,90,339(C5),5304 | 11063002 | 1.0+05 | 1.3+06 | 4 |
| Seagrave55 | J.D.Seagrave | J,PR,98,666,5505 | 11086002 | 2.7+05 | 2.2+07 | 29 |
| Nuckolls46 | R.G.Nuckolls | J,PR,70,805,4612 | 11142002 | 3.5+05 | 6.0+06 | 15 |
| Dratenahl58 | A.Bratenahl | J,PR,110,927,5805 | 11155003 | 7.2+06 | 1.4+07 | 5 |
| Meyer51 | D.I.Meyer | R,LA-1279,5107 | 12641003 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Hibdon50 | C.T.Hibdon | J,PR,79,747,5009 | 13041003 | 1.2+02 | 3.5+02 | 2 |
| Gul79 | K.Gul | C,79KNOX,,39(AB2),7910 | 30538005 | 1.5+07 | 1.5+07 | 1 |

8.2. Сечение упругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|--------------|---------------|------------------------|----------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | от | до | |
| Seagrave72 | J.D.Seagrave, | J,AP,74,250,1972 | 10159010 | 5.6+06 | 2.3+07 | 7 |
| Wantuch51 | E.Wantuch | J,PR,84,169,51 | 11050002 | 4.5+06 | 5.5+06 | 2 |
| Allerd53 | J.C.Allred, | J,PR,91,90,5307 | 11066004 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Seagrave55 | J.D.Seagrave | J,PR,97,757,5502 | 11084003 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Berick68 | A.C.Berick, | J,PR,174,1105,68 | 11126003 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Koori72 | N.Koori | J,JPJ,32,306,7202 | 20332002 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Shirato68 | S.Shirato, | J,NP/A,120,387,6811 | 20334002 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Verdenne66 | G.Vedrenne | J,JPR/C,27,(1),71,6603 | 21148022 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Bruellmann68 | M.Bruellmann, | J,HPA,41,435,6804 | 21173003 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Chatelain79 | P.Chatelain, | J,NP/A,319,1,71,790430 | 21623004 | 2.5+06 | 3.3+06 | 2 |

| | | | | | | |
|-----------|---------------|------------------------|----------|--------|--------|----|
| Ageno47 | M.Ageno, | J,PR,71,20,47 | 21787003 | 4.1+06 | 1.4+07 | 3 |
| Schwarz83 | P.Schwarz, | J,NP/A,398,(1),1,8304 | 21845003 | 2.5+06 | 3.0+07 | 20 |
| Gul79 | K.Gul, | C,79KNOX,,39(AB2),7910 | 30538004 | 1.5+07 | 1.5+07 | 1 |
| Guanren90 | Shen Guanren, | J,CNP,12,(3),241,9008 | 30997002 | 1.4+07 | 1.5+07 | 2 |

8.3. Сечение реакции (n,2n)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|------------|-------------|------------------------|----------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | от | до | |
| Graves71 | E.R.Graves, | R,NCSAC-42,158,7111 | 10970002 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Ashby58 | V.J.Ashby, | J,PR,111,616,58 | 11097003 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Catron61 | H.C.Catron, | J,PR,123,218,61 | 11111002 | 6.1+06 | 1.0+07 | 5 |
| Holmberg69 | M.Holmberg | J,NP/A,129,327,6912 | 20068002 | 4.1+06 | 6.6+06 | 8 |
| Koori72 | N.Koori | J,JPJ,32,306,7202 | 20332004 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Shirato68 | S.Shirato, | J,NP/A,120,387,6811 | 20334005 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Verdenne66 | G.Vedrenne | J,JPR/C,27,(1),71,6603 | 21148025 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Frehaut85 | J.Frehaut, | C,85SANTA,,(IB06),85 | 21971002 | 7.4+06 | 1.5+07 | 16 |
| Pauletta75 | G.Pauletta, | J,NP/A,255,267,7512 | 30331002 | 8.2+06 | 2.2+07 | 11 |
| Gul79 | K.Gul, | J,JP/G,5,(8),1107,7908 | 30470004 | 1.5+07 | 1.5+07 | 1 |

8.4. Сечение радиационного захвата

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|-----------|------------|------------------------|----------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | от | до | |
| Mitev86 | G.Mitev, | J,PR/C,34,389,8608 | 13121003 | 6.9+06 | 1.4+07 | 4 |
| Cerineo61 | M.Cerineo, | J,PR,124,(6),1947,1961 | 30005003 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Moester86 | J.Moesner, | J,FBS,1,83,86 | 30973002 | 2.5+07 | 2.5+07 | 1 |

8.5. Анизотропия упругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|--------------|---------------|------------------------|----------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | от | до | |
| Seagrave72 | J.D.Seagrave, | J,AP,74,250,1972 | 10159010 | 5.6+06 | 2.3+07 | 7 |
| Wantuch51 | E.Wantuch | J,PR,84,169,51 | 11050002 | 4.5+06 | 5.5+06 | 2 |
| Allerd53 | J.C.Allred, | J,PR,91,90,5307 | 11066004 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Seagrave55 | J.D.Seagrave | J,PR,97,757,5502 | 11084003 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Berick68 | A.C.Berick, | J,PR,174,1105,68 | 11126003 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Koori72 | N.Koori | J,JPJ,32,306,7202 | 20332002 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Shirato68 | S.Shirato, | J,NP/A,120,387,6811 | 20334002 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Verdenne66 | G.Vedrenne | J,JPR/C,27,(1),71,6603 | 21148022 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Bruellmann68 | M.Bruellmann, | J,HPA,41,435,6804 | 21173003 | 1.4+07 | 1.4+07 | 1 |
| Chatelain79 | P.Chatelain, | J,NP/A,319,1,71,790430 | 21623004 | 2.5+06 | 3.3+06 | 2 |
| Ageno47 | M.Ageno, | J,PR,71,20,47 | 21787003 | 4.1+06 | 1.4+07 | 3 |
| Schwarz83 | P.Schwarz, | J,NP/A,398,(1),1,8304 | 21845003 | 2.5+06 | 3.0+07 | 20 |
| Gul79 | K.Gul, | C,79KNOX,,39(AB2),7910 | 30538004 | 1.5+07 | 1.5+07 | 1 |
| Guanren90 | Shen Guanren, | J,CNP,12,(3),241,9008 | 30997002 | 1.4+07 | 1.5+07 | 2 |

9. Заключение

9.1 Выводы.

Файл оцененных данных, принятый в РОСФОНД, несколько отличается от файла, содержащегося в ENDF/B-VI и принятого в ENDF/B-VII. Отличия состоят в следующем.

1. Сечение упругого рассеяния ниже 100 эВ постоянно и равно 3.3900 барн. Полное сечение в этой области определено как сумма сечений упругого рассеяния и радиационного захвата.
2. Полное сечение от 100 эВ до 50кэВ принято из оценки Николаева и др. из библиотеки БРОНД-2.
3. Полное сечение от 50 кэВ до 600 кэВ принято в соответствии с настоящей оценкой.
4. Сечение радиационного захвата в области энергии ниже 1 кэВ задано в том же числе точек, что и полное сечение. Закон интерполяции везде – дважды логарифмический.
5. Устранен ряд мелких ошибок в задании значения энергии.
6. Уточнены энергии реакций (n,2n): $Q=2.224566E+6$ и (n, γ): $Q=6.257232E+6$. Соответственно изменен порог реакции (n,2n) и энергия фотона, испускаемого при радиационном захвате.
7. Энерго-угловые распределения нейтронов реакции (n,2n) приняты в соответствии с оценкой Николаева и др. из библиотеки БРОНД.
8. В файле MF=3 исключены секции MT=204 и MT=205 повторяющие уже содержащиеся в файле данные.
9. Исключены файлы MF=8 и MF=9.
10. Файлу присвоен номер MAT=102.

9.2. Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle\sigma\rangle$ спектр Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$ |
|-------------------|-----------------------------|-----------|---|
| Упругое рассеяние | 3.3900 б | 41.172 б | 2.5324 б |
| Рад. захват | 0.515 мб | 0.2416 мб | 0.007 мб |
| Реакция (n,2n) | 0 | 0 | 5.797 мб |

9.3. Автор проведенного отбора оцененных данных

Николаев М.Н.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Ковариационные матрицы погрешностей нейтронных данных для дейтерия
(30-групповое представление)

3. Погрешности полного сечения и коэффициенты корреляции между ними

4.

| № группы | Погрешность, % | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15-30 |
|----------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1 | 1.4 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 1.2 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3 | 1 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4 | 1 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 5 | 1.4 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.70 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 6 | 1.4 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.70 | 1.00 | 0.70 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 7 | 1.4 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.70 | 1.00 | 0.70 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 8 | 1.4 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.70 | 1.00 | 0.8 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 9 | 0.1 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.80 | 1.00 | 0.88 | 0.57 | 0.35 | 0.25 | 0.20 | 0.18 |
| 10 | 0.7 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.88 | 1.00 | 0.89 | 0.76 | 0.68 | 0.65 | 0.63 |
| 11 | 0.5 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.57 | 0.89 | 1.00 | 0.97 | 0.94 | 0.92 | 0.91 |
| 12 | 0.4 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.35 | 0.76 | 0.97 | 1.00 | 0.99 | 0.98 | 0.97 |
| 13 | 0.37 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.25 | 0.68 | 0.94 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 14 | 0.36 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.65 | 0.92 | 0.98 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 15-30 | 0.35 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.18 | 0.63 | 0.91 | 0.97 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

2. Погрешности сечения реакции (n,2n) и коэффициенты корреляции между ними

| № группы | Погрешн., % | 1 | 2 | 3 |
|----------|-------------|------|------|------|
| 1 | 5 | 1.00 | 0.50 | 0.00 |
| 2 | 5 | 0.50 | 1.00 | 0.80 |
| 3 | 5 | 0.00 | 0.80 | 1.00 |

5. Погрешности сечения радиационного захвата и коэффициенты корреляции между ними

| | ,% | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19-30 |
|-------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1 | 10 | 1.00 | 0.50 | 0.30 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| 2 | 20 | 0.50 | 1.00 | 0.70 | 0.60 | 0.50 | 0.40 | 0.30 | 0.20 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | |
| 3 | 20 | 0.30 | 0.70 | 1.00 | 0.70 | 0.60 | 0.50 | 0.40 | 0.30 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | |
| 4 | 30 | 0.10 | 0.60 | 0.70 | 1.00 | 0.70 | 0.60 | 0.50 | 0.40 | 0.30 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 5 | 30 | 0.00 | 0.50 | 0.60 | 0.70 | 1.00 | 0.70 | 0.60 | 0.50 | 0.40 | 0.30 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 6 | 40 | 0.00 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.70 | 1.00 | 0.70 | 0.60 | 0.50 | 0.40 | 0.30 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 7 | 50 | 0.00 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.70 | 1.00 | 0.70 | 0.60 | 0.50 | 0.40 | 0.30 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 8 | 50 | 0.00 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.70 | 1.00 | 0.50 | 0.30 | 0.20 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 9 | 50 | 0.00 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.00 | 0.50 | 1.00 | 0.50 | 0.30 | 0.20 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 10 | 50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.00 | 0.30 | 0.50 | 1.00 | 0.50 | 0.30 | 0.20 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 11 | 50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.30 | 0.00 | 0.20 | 0.30 | 0.50 | 1.00 | 0.50 | 0.30 | 0.20 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 12 | 50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.50 | 1.00 | 0.50 | 0.30 | 0.20 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 13 | 50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.50 | 1.00 | 0.50 | 0.30 | 0.20 | 0.10 | 0.00 | 0.00 |
| 14 | 50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.50 | 1.00 | 0.50 | 0.30 | 0.20 | 0.10 | 0.00 |
| 15 | 40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.50 | 1.00 | 0.50 | 0.30 | 0.20 | 0.10 |
| 16 | 20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.50 | 1.00 | 0.70 | 0.50 | 0.20 |
| 17 | 10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.70 | 1.00 | 0.90 | 0.80 |
| 18 | 2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.20 | 0.50 | 0.90 | 1.00 | 1.00 |
| 19-30 | 2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.20 | 0.80 | 1.00 | 1.00 |

4. Погрешности среднегрупповых значений среднего косинуса угла упругого рассеяния в системе центра инерции и коэффициенты корреляции между ними

| № группы | погр.,% | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10-30 |
|----------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1 | 26 | 1.00 | 0.70 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 80 | 0.70 | 1.00 | 0.50 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3 | 80 | 0.20 | 0.5 | 1.00 | 0.30 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4 | 60 | 0.00 | 0.1 | 0.30 | 1.00 | 0.40 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 5 | 35 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.40 | 1.00 | 0.30 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 6 | 40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.30 | 1.00 | 0.30 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |
| 7 | 50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.30 | 1.00 | 0.60 | 0.40 | 0.40 |
| 8 | 60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.60 | 1.00 | 0.80 | 0.80 |
| 9 | 60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.40 | 0.80 | 1.00 | 1.00 |
| 10-30 | 60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.40 | 0.80 | 1.00 | 1.00 |

1.3. Тритий

1. Нейтронные сечения

Полные наборы оцененных нейтронных данных для трития содержатся в библиотеках ФОНД-2.2 (оценка 1988 г., принятая и в БРОНД-2), в ENDF-B-VII.b1 (оценка 1965 г., взятая из ENDF/B-V) и в CENDL-2 (оценка 1991 г., взятая и в JEFF-3.1). В ENDF/B-VII.0 включена новая оценка Хэйла (G.M.Hale-2001). Эта оценка основана на R-матричном анализе данных по рассеянию протонов на ^3He с учетом того, что составное ядро ^4Li отличается от составного ядра 4H , образующегося при n-t-рассеянии, кулоновским сдвигом энергетическим собственными чисел на 0.86 МэВ. Полученные R-матричные параметры использовались для расчета полного сечения и угловых распределений.

Все оценки содержат данные о полном сечении, сечении упругого рассеяния и реакции (n,2n). Сечение реакции (n,2n) содержится также в EAF-99. Хэйл отмечает, что его оценка сечения этой реакции, вероятно, несколько завышена. В оценках из ФОНД-2.2 и CENDL-2 приводятся также данные о реакции (n,3n). Хэйл отмечает, что из его анализа следует, что сечение этой реакции должно быть равно нулю.

Все оценки сечений реакций (n,2n) и (n, 3n), кроме оценки Хэйла, основаны на результатах работ^{31, 32}. Оценки полного сечения основаны на результатах работы³³, на которую ссылается и Хэйл. Энергетические зависимости сечений приведены на Рис. 1, 2 и 3. На рис. 1 кроме данных Филиппса, на которой основаны результаты большинства оценок, приведены результаты более поздней работы Кирилюка, выполненной с низким разрешением на фильтрованных пучках. По расхождению этих результатов можно судить о погрешностях полного сечения.

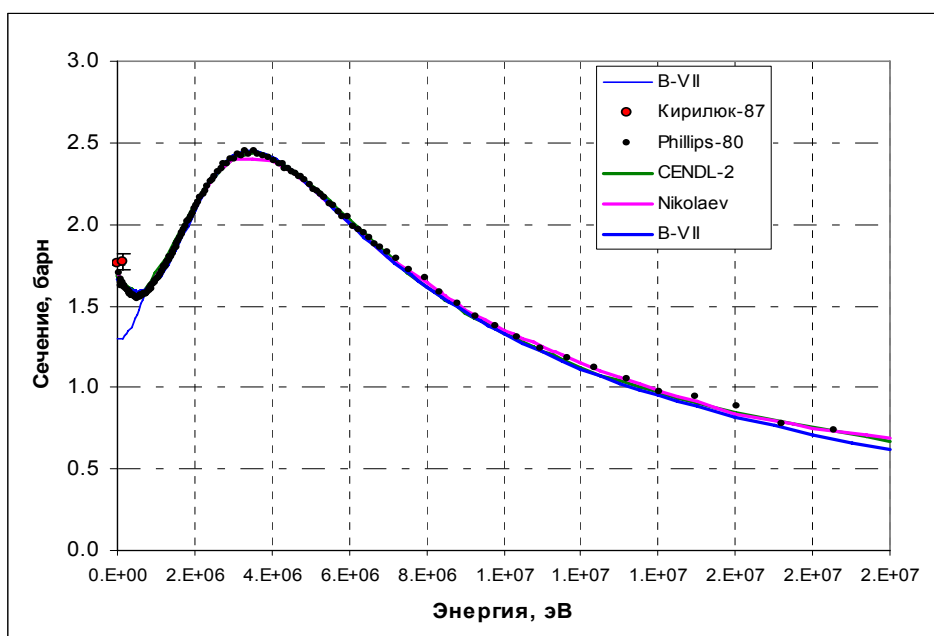


Рис. 1а. Полное сечение трития.

³¹ Mather D.S., Pain L.F. PR/B, 133, 1403(1964) EXFOR 20794.

³² Aldacic et al. PRL et.14, 144(1965) EXFOR 30131.

³³ Phillips T.W., Berman B.L., Seagrave J.D. PR/C, 22, 384.(1980) EXFOR 10945.

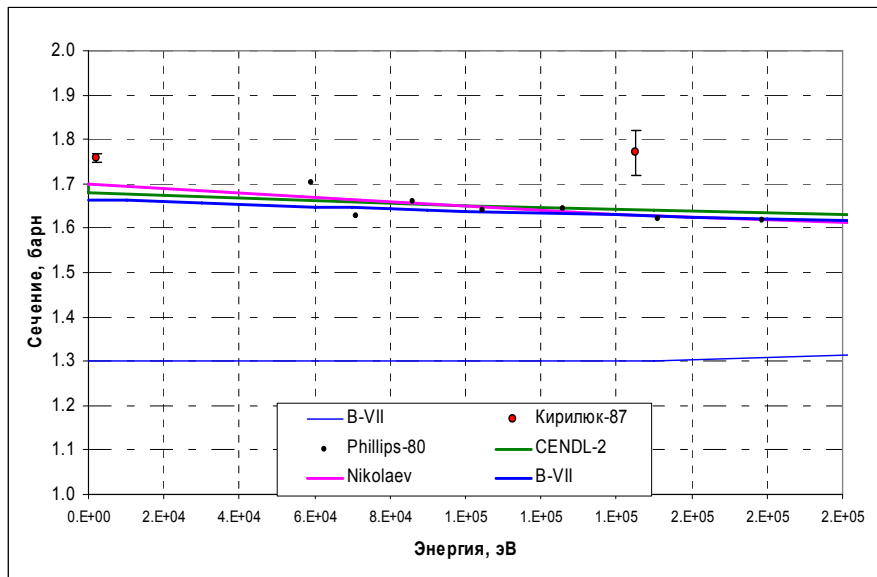


Рис. 16. Полное сечение трития при низких энергиях.

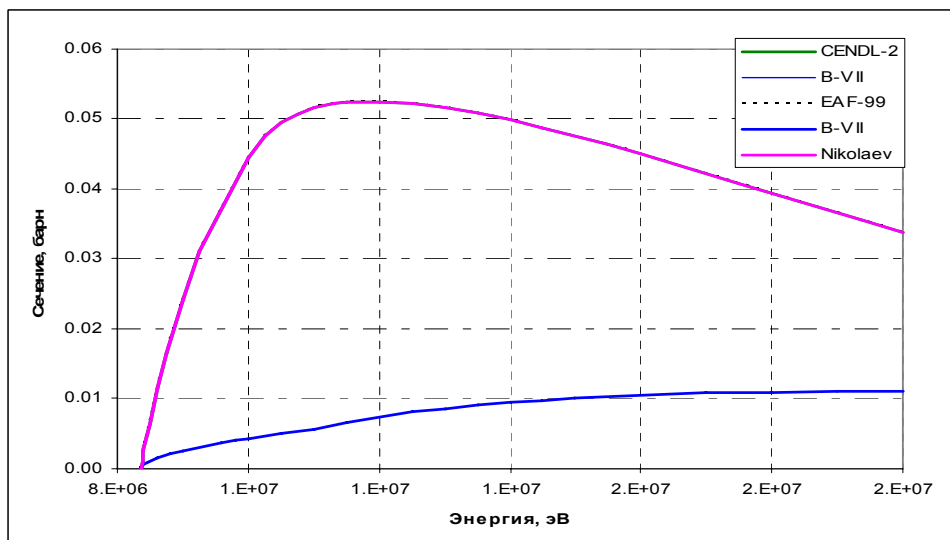


Рис. 2. Сечение реакции $(n,2n)D$

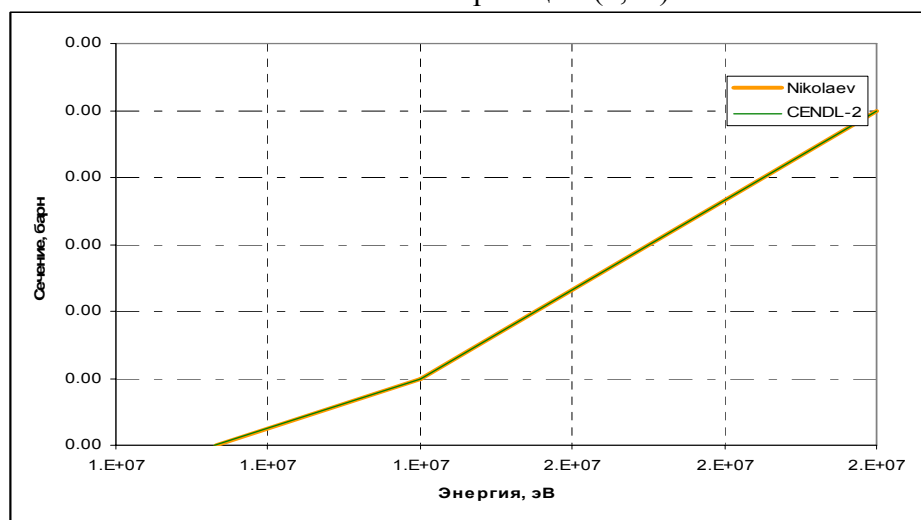


Рис. 3. Сечение реакции $(n,3n)H$

2. Энерго-угловые распределения

Угловые распределения упруго- рассеянных нейтронов в оценке, принятой в ФОНД-2.2, даны в форме разложения по полиномам Лежандра, тогда как в двух других оценках угловые распределения заданы поточечно, что затрудняет сравнение данных.

Полные энерго-угловые распределения продуктов реакций $(n,2n)D$ и $(n,3n)H$ даны только в оценке, содержащейся в библиотеке ФОНД-2.2.

3. Погрешности.

В библиотеке CENDL-2 в формате файла MF=33 содержатся оценки погрешностей нейтронных сечений. Поскольку надежность этих оценок не установлена, они (как и для других материалов) в РОСФОНД не включаются.

4. Заключение

4.1. Выводы:

Новая экспериментальная информация не дает оснований для пересмотра оцененных нейтронных данных. Новая теоретическая оценка, выполненная Хэйлом для ENDF/B-VII, согласуясь с экспериментальными данными по полному сечению гораздо лучше, чем ENDF/B-VI, все же существенно с ними расходится. Кардинально изменена и оценка сечения реакции $(n,2n)$. Едва ли можно считать, что расчеты Хэйла дезавуируют экспериментальные данные Филиппса. Поэтому в РОСФОНД принята прежняя оценка, содержащаяся в библиотеках ФОНД-2.2 и БРОНД-2.

4.2. Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle \sigma \rangle$ спектр Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$ |
|-------------------|-----------------------------|---------|---|
| Упругое рассеяние | 1.700 б | 20.70 б | 1.935 б |
| Реакция $(n,2n)$ | 0 | 0 | 0.1935 мб |
| Реакция $(n,3n)$ | 0 | 0 | 0.091 микробарн |

4.3. Автор проведенного отбора оцененных данных

Николаев М.Н.

2. ГЕЛИЙ

В библиотеке РОСФОНД содержатся данные для двух изотопов гелия – ^3He и ^4He .

2.1. Гелий-3

1. Общие замечания

В современных библиотеках содержатся три независимых оценки нейтронных данных для гелия-3, основанных на одних и тех же экспериментальных данных: оценка Николаева и др.¹ (принята в библиотеках ФОНД-2.2 и БРОНД-2), оценка Хейла, Доддера и Янга 1990 г. (принята в ENDF/B-VI, ENDF/B-VII и JEFF-3.1) и оценка Шибата 1987 г. (принята в JENDL-3.3 и в более ранних версиях этой библиотеки).

Различия в сечении основной реакции – $^3\text{He}(n,p)\text{T}$ – при 0.0253 эВ таковы:

ФОНД-2.2 – 5333 барн;

ENDF/B-VII – 5319 барн;

JENDL-3.3 – 5328 барн;

Mughabghab (1987) - 5333±7 барн.

Экспертная погрешность этого сечения, приведенная в ENDF/B-VII, больше: ±0.3%, т.е. ±16 барн. В пределах этой (видимо, более реалистичной) погрешности результаты всех оценок совпадают.

Отношение AWR для ^3He равно 2.990120. Энергии и пороги реакций, возможных при энергии нейтронов ниже 20 МэВ, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Энергии и пороги нейтронных реакций

| Реакция | Энергия, МэВ | Порог, МэВ |
|------------------------------------|--------------|------------|
| $^3\text{He}(n,\gamma)^4\text{He}$ | 20.57762 | - |
| $^3\text{He}(n,p)\text{T}$ | 0.7637556 | - |
| $^3\text{He}(n,d)\text{D}$ | -3.268912 | 4.362150 |
| $^3\text{He}(n,n'p)\text{D}$ | -5.493479 | 7.330689 |
| $^3\text{He}(n,2n2p)$ | -7.718046 | 1.029923 |

2. Нейтронные сечения

На рис.1. оцененное полное сечение сравнивается с основными экспериментальными результатами. Наибольшее расхождение в оценках имеет место при 0.75 МэВ, где оно достигает 7%. При более высоких энергиях расхождение снижается: при 5 МэВ до 2%. Причина расхождения, как видно, состоит в том, что в оценке Николаева и др. больший вес придан результатам измерений Хэзнера (Haesner-83) нежели более ранним результатам Голдинга (Goulding-71) и Батата (Battat-58).

¹ Николаев М.Н. и др. Файлы оцененных нейтронных сечений в библиотеке СОКРАТОР. Аналитический обзор. Обнинск, ФЭИ, 1977.

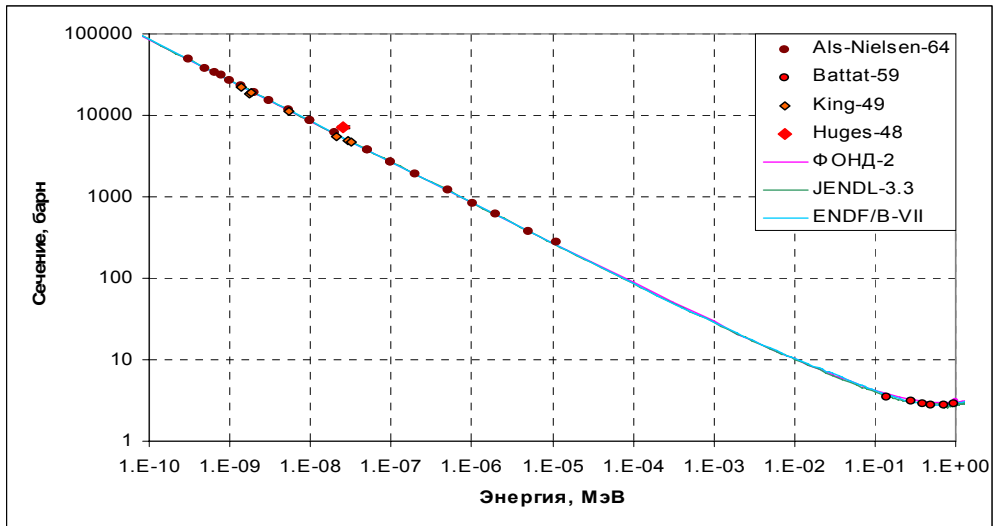


Рис.1а. Сравнение оценок полного сечения ^3He с экспериментальными данными при низких энергиях

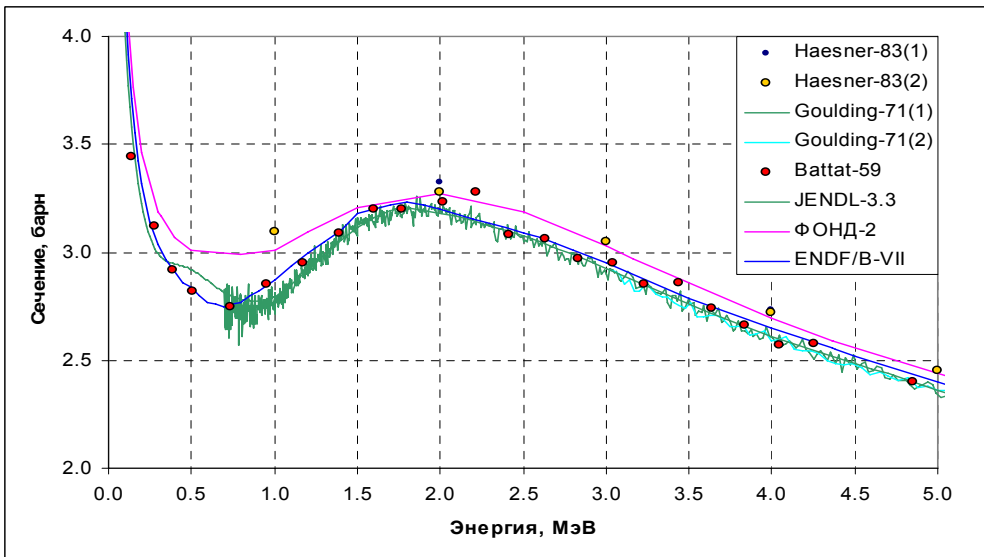


Рис.1б. Сравнение оценок полного сечения ^3He с экспериментальными данными в мегаэлектронвольтовой области энергий

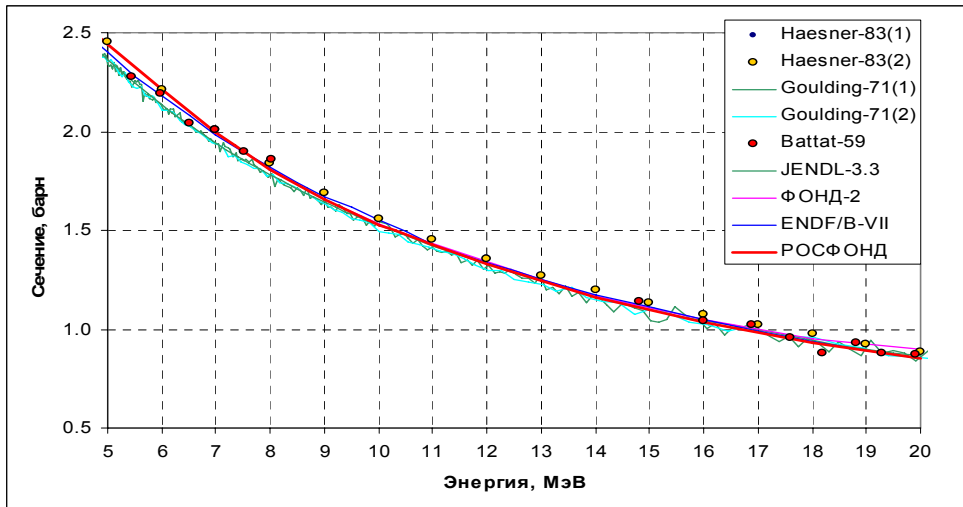


Рис.1в. Сравнение оценок полного сечения ^3He с экспериментальными данными в области высоких энергий.

При энергиях выше 10 МэВ различия в экспериментальных данных становятся незначительными. Перестают различаться и оценки; лишь оценка ФОНД-2.2 при 20 МэВ представляется слегка (примерно, на 0.03 барна) завышенной. В этой области сечение, рекомендуемое для включения в РОСФОНД, соответственно понижено (см. рис.1в). На рис.2 с экспериментальными данными сравниваются оценки сечения основной реакции – ${}^3\text{He}(n,p)\text{T}$. Как и в случае полного сечения, максимальное расхождение оценок и экспериментальных данных наблюдается в области сотен кэВ, однако наблюдающиеся расхождения не коррелируют друг с другом. Обращает на себя внимание тот факт, что низкие значения сечения реакции в области 100 кэВ, полученные в работе Борзакова и др. соответствуют верхнему пределу области разрешения в эксперименте на реакторе ИБР, где вероятность погрешности в оценке фона особенно велика. В области мегаэлектронвольт наблюдается согласие экспериментальных данных в пределах погрешностей (если не рассматривать результаты наиболее ранней работы Куна (Coon-50), которые, очевидно, занижены).

Оценка, принятая в ФОНД-2, представляется приемлемой во всей области энергий.

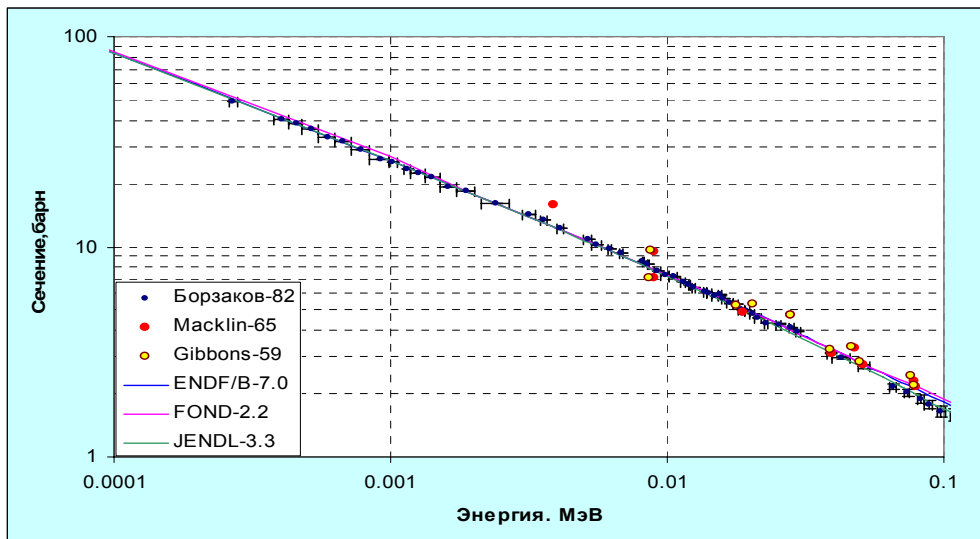


Рис.2а. Сравнение оценок сечения реакции ${}^3\text{He}(n,p)\text{T}$ с экспериментальными данными при низких энергиях.

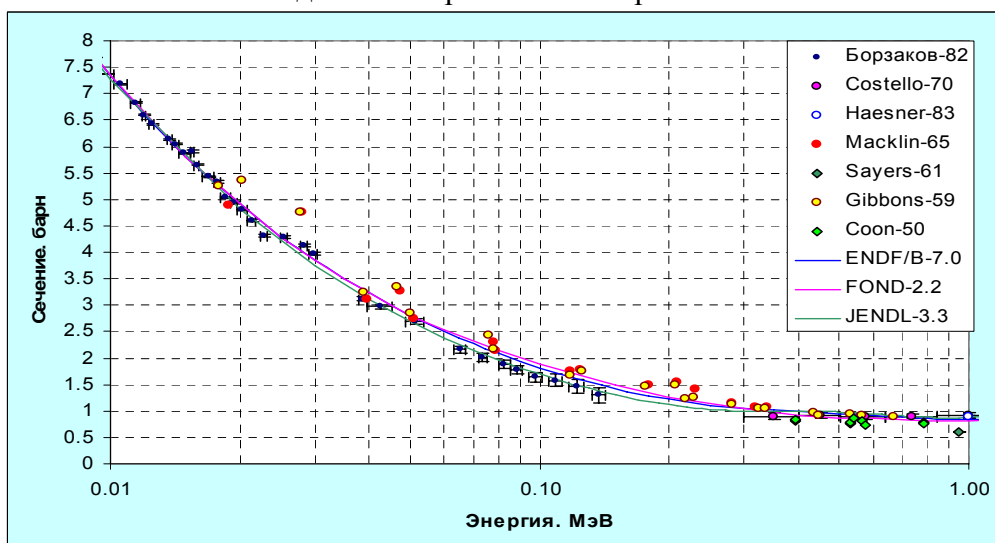


Рис.2б. Сравнение оценок сечения реакции ${}^3\text{He}(n,p)\text{T}$ с экспериментальными данными в области десятков и сотен кэВ.

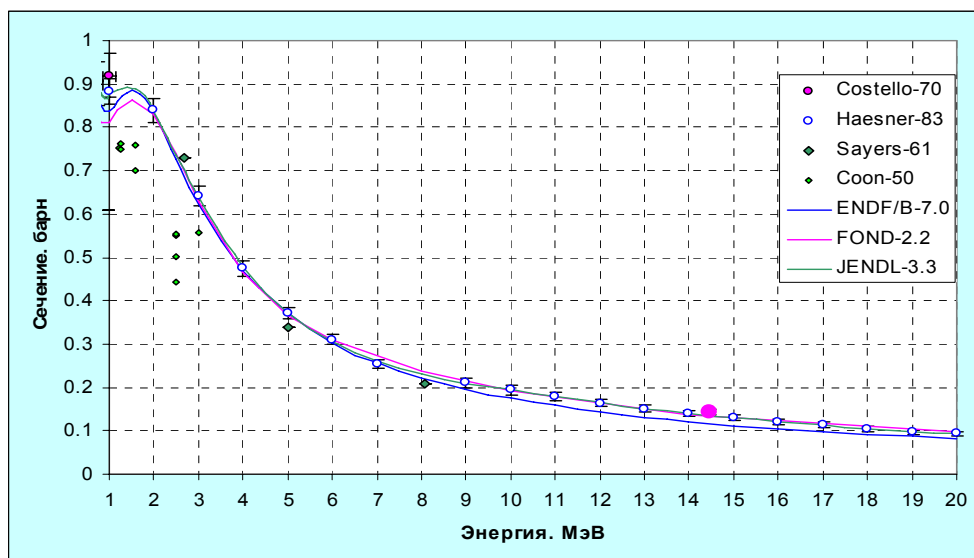


Рис.2в. Сравнение оценок сечения реакции ${}^3\text{He}(n,p)\text{T}$ с экспериментальными данными в области мегаэлектронвольт.

На рис.3 показано энергетическое поведение сечения радиационного захвата. Результаты Комара (Komar-93), оказались в прекрасном согласии с данным Варда и др., полученными при регистрации гамма-квантов под углом 90° , если последние (как и данные Комара) проинтегрировать по всему телесному углу в предположении, что гамма-излучение целиком является дипольным. Числовые значения результатов Варда в базе данных EXFOR отсутствуют. Данные были считаны с графика, приведенного в публикации.

Данные Комара и Варга побудили пересмотреть оценку сечения радиационного захвата при высоких энергиях так, как это показано на графике. Заметим, что данные Комара, как отмечено в публикации, хорошо согласуются с данными по фоторасщеплению гелия-4 (при их сравнении в рамках модели детального баланса).

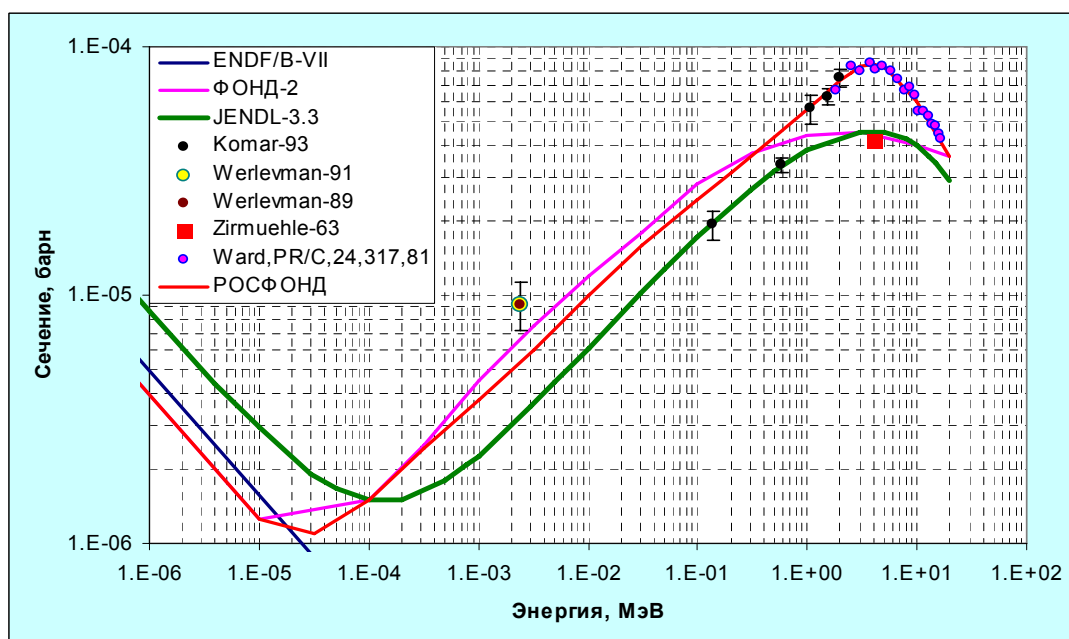


Рис.3. Оценки сечения радиационного захвата в сравнении с экспериментальными данными.

На рис. 4 показано энергетическое поведение сечения реакции ${}^3\text{He}(n,d)\text{D}$. В интервале 14-18 МэВ сечение этой реакции, принятое в ФОНД-2.2 представляется несколько заниженным. Небольшое повышение сечения приводит к лучшему согласию с данными Хэзнера.

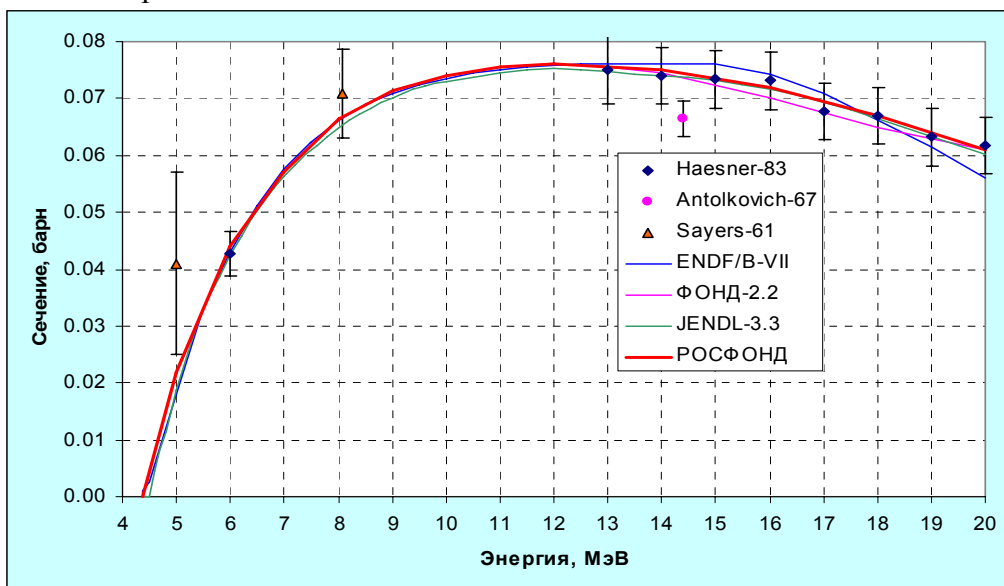


Рис. 4. Энергетическое поведение сечения реакции ${}^3\text{He}(n,d)\text{D}$

На рис. 5 показано сравнение оцененных сечений упругого рассеяния с экспериментальными данными. При низких энергиях оценка, принятая в ФОНД-2.2, прекрасно согласуется с суммарным сечением когерентного и некогерентного рассеяния, измеренного при 0.0227 эВ Кайзером и др. (Kaiser-79) и найденной равной 3.17 ± 0.17 (оцененное сечение в тепловой точке равно 3.16 барна).

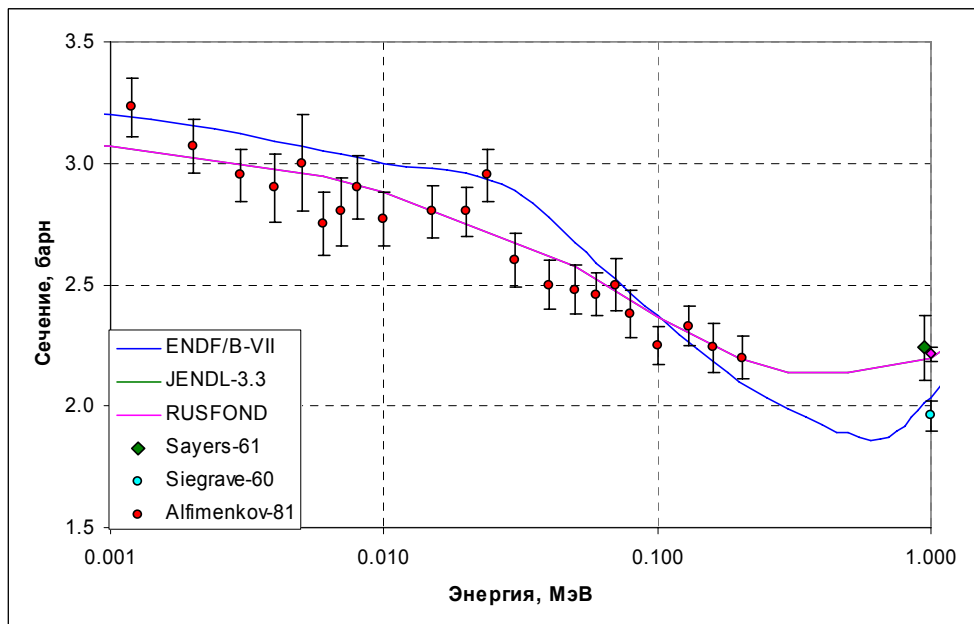


Рис.5а. Сечение упругого рассеяния при низких энергиях.

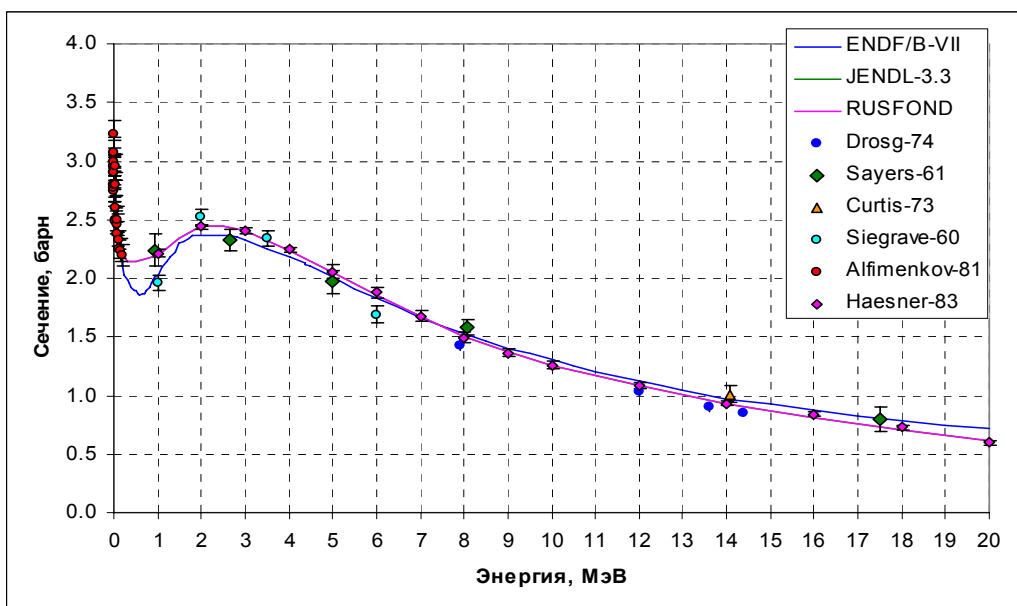


Рис.5б. Сечение упругого рассеяния при высоких энергиях.

На рис. 6 показаны оценки сечений реакции ${}^3\text{He}(n,np)\text{T}$ и реакции развала ${}^3\text{He}(n,2n2p)$, принятые в ФОНД-2.2. В других библиотеках сечения этих реакций не приводятся (т.е. положены равными нулю). Прямых экспериментальных данных о них не имеется. В РОСФОНДе решено сечения этих реакций снизить так, чтобы сохранить баланс сечений при понижении полного сечения относительно оценки, принятой в ФОНД-2.2. Различия видны из рис. 6.

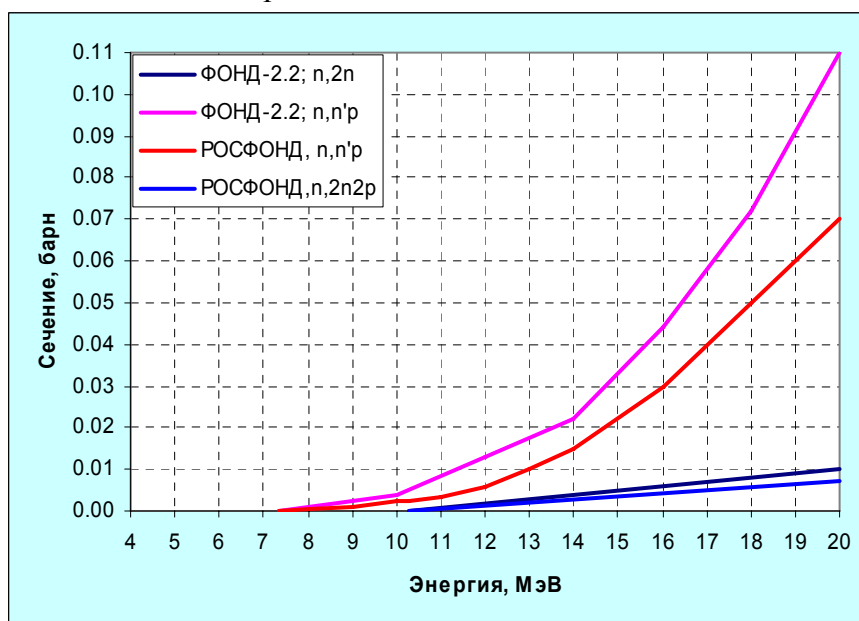


Рис.6. Сечения реакций ${}^3\text{He}(n,np)\text{T}$ и ${}^3\text{He}(n,2n2p)$.

3. Энерго-угловые распределения

3.1. Упругое рассеяние.

Угловые распределения упруго-рассеянных нейтронов в оценке ФОНД-2.2 до 100 кэВ приняты изотропными в системе центра инерции, а при более высоких энергиях основаны на данных Хэзнера (Haesner-83). При энергиях выше 3.5 МэВ эти

угловые распределения практически совпадают с оценкой, принятой в JENDL-3.3. Оценка угловых распределений в ENDF/B-VII основана на более ранних экспериментальных данных.

3.2. Радиационный захват.

В ФОНД-2.2 энерго-угловые распределения продуктов реакции описаны в Файле 6. Угловые распределения приняты изотропными в системе центра инерции; энергии однозначно определяются кинематикой реакции. В JENDL-3.3 те же данные представлены в форматах файлов 12 и 14. В ENDF/B-VII энерго-угловые данные для продуктов радиационного захвата не приводятся.

3.3. Другие реакции.

В ФОНД-2.2 энерго-угловые распределения всех остальных реакций описаны в соответствующих секциях файла 6. В других библиотеках эти данные не приводятся.

2. Заключение

2.1. Выводы:

В РОСФОНД решено сохранить оценку Николаева и др., поскольку в ней описаны все реакции нейтронов с гелием-3 и представлены данные об энерго-угловых распределениях продуктов этих реакций.

В файл внесены следующие коррективы.

1. Внесено изменение в сечение радиационного захвата (см. рис.3);
2. Внесено небольшое изменение в сечение реакции ${}^3\text{He}(n, d)\text{T}$ (см. рис.4);
3. Слегка понижено полное сечение при энергиях выше 15 МэВ (см.рис.1в);
4. Снижены сечения реакций ${}^3\text{He}(n, n'p)\text{T}$ и ${}^3\text{He}(n, 2n2p)$ (см. 6);
5. Опущены секции MT=251, 252 и 253 в файле MF=3 и файл MF=8.
6. Энергии реакций и их пороги приведены в соответствии с данными таблицы 1.
7. Устранен ряд небольших технических огрехов при записи оцененных сечений.

2.2. Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle\sigma\rangle$ спектр Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$ |
|-------------------|-----------------------------|-----------|---|
| Упругое рассеяние | 3.160 б | 26.953 б | 2.260 б |
| Рад. захват | 0.0250 мб | 0.0772 мб | 0.0425 мб |
| Реакция (n,p) | 5333.0 б | 2389.4 б | 0.8002 б |
| Реакция (n,d) | 0 | 0 | 3.055 мб |
| Реакция (n,2n) | 0 | 0 | 0.0023 мб |

2.3. Автор проведенного отбора оцененных данных

Николаев М.Н.

2.2. Гелий-4

1. Общие замечания

В современных библиотеках содержатся три независимых оценки нейтронных данных для гелия-4: оценка Николаева и др.¹ (принята в библиотеках ФОНД-2.2 и БРОНД-2), оценка Нисли, Хэйла и Янга (Nisley, Hale, Young) 1973 г. (принята в ENDF/B-VI и ENDF/B-VII) и оценка Шибата 1987 г. (принята в JENDL-3.3 и JEFF-3.1). Только в последней оценке учтены сравнительно недавние экспериментальные результаты Хэзнера² и в этом ее явное преимущество перед другими.

Упругое рассеяние является, по существу, единственным взаимодействием нейтронов с гелием, возможным при энергиях ниже 20 МэВ. Радиационный захват привел бы к образованию ⁵He, неустойчивого по отношению к испусканию нейтрона, что эквивалентно упругому рассеянию. Возможно, вообще говоря, образование ⁵He в возбужденном состоянии (например, в состоянии со спином 1.2- с энергией возбуждения 4.6 МэВ³) с последующим радиационным переходом в основное состояние и распадом ⁵He на нейтрон и ⁴He. Этот процесс был бы эквивалентен неупругому рассеянию. Вероятность этого процесса, очевидно, столь мала, что до сих пор он не был зарегистрирован.

На рис. 1. оцененное полное сечение сравнивается с экспериментальными данными Батата (Battat-59). Данные Хэзнера и др. для гелия-4 в EXFORе нами, к сожалению, не найдены.

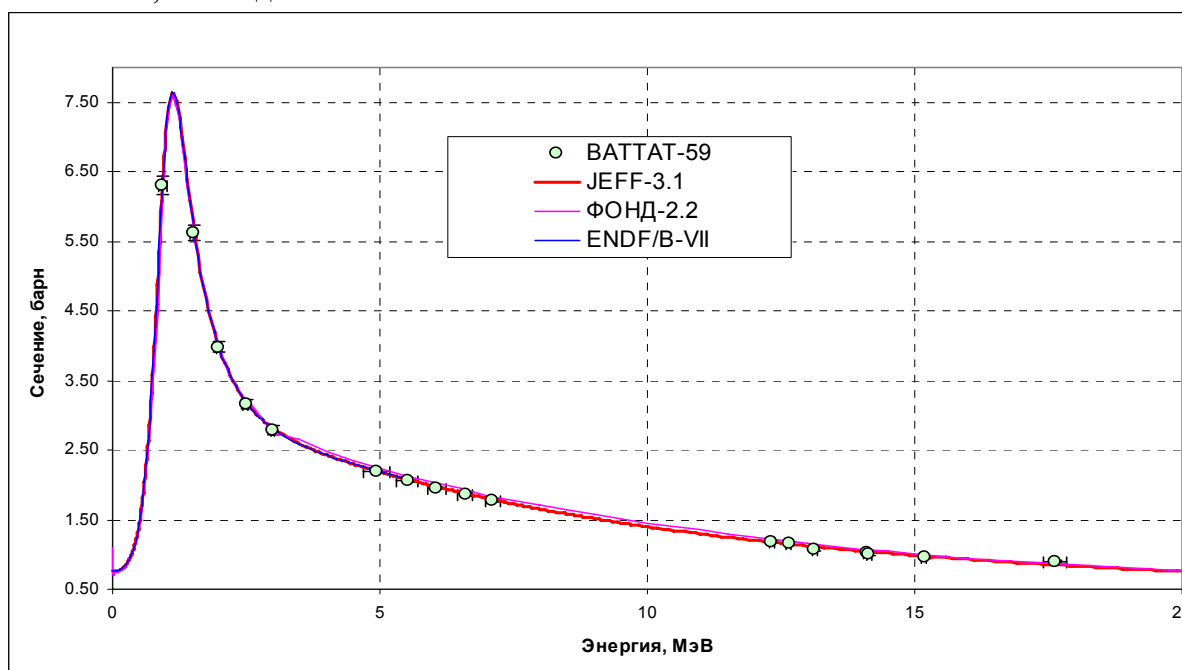


Рис.1. Сравнение оцененного полного сечений с экспериментальными данными

Оценка данных по анизотропии рассеяния основана на расчетах по оптической модели

² Haesner B. et al.: Phys. Rev. C28, 995 (1983).

³ Fiarman S. and Meyerhof W.E. Nucl. Phys. A206,1, 1973.

2. Заключение

2.1. Выводы:

В РОСФОНД решено принять оценку Шибата из JENDL-3.3

2.2. Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle\sigma\rangle$ спектр Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$ |
|-------------------|-----------------------------|-----------|---|
| Упругое рассеяние | 0.75926 б | 9.26815 б | 3.6567 б |

2.3. Автор проведенного отбора оцененных данных

Николаев М.Н.

3. ЛИТИЙ

Природный литий содержит два изотопа. Долгоживущих радиоактивных изотопов нет.

3.1. Литий-6

1. Общие характеристики [1]

- 1.1. $Z=3$ (заряд)
- 1.2. $A=6$ (атомный номер)
- 1.3. $A_w= 5.963400$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Содержание в естественной смеси 7.59 ± 0.04 (атомарные проценты)
- 1.5. Спин основного состояния 1^+
- 1.6. Каналы реакций и уровни составной системы ${}^6\text{Li}+n$ [2] (Рис. 1) :

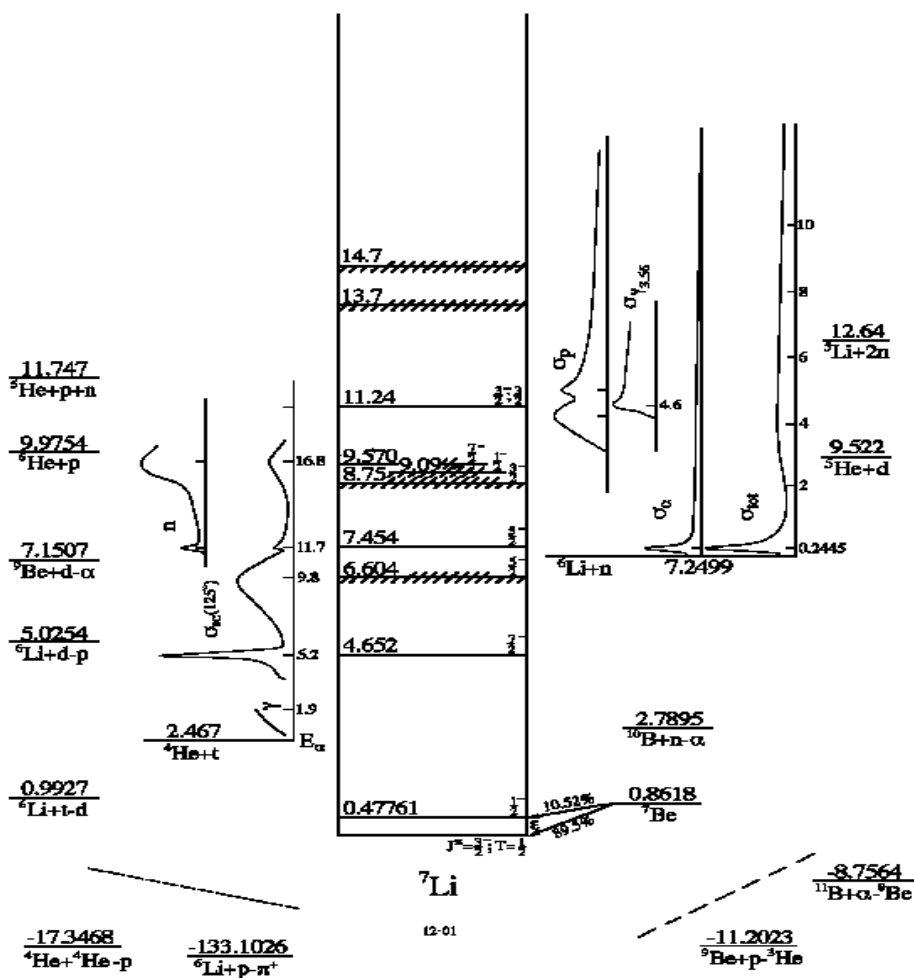


Рис.1. Каналы образования и распада составного ядра

1.7. Диаграмма уровней и каналы распада уровней неупругого рассеяния до энергии возбуждения ${}^6\text{Li}$ в 27 МэВ [2] (Рис. 2):

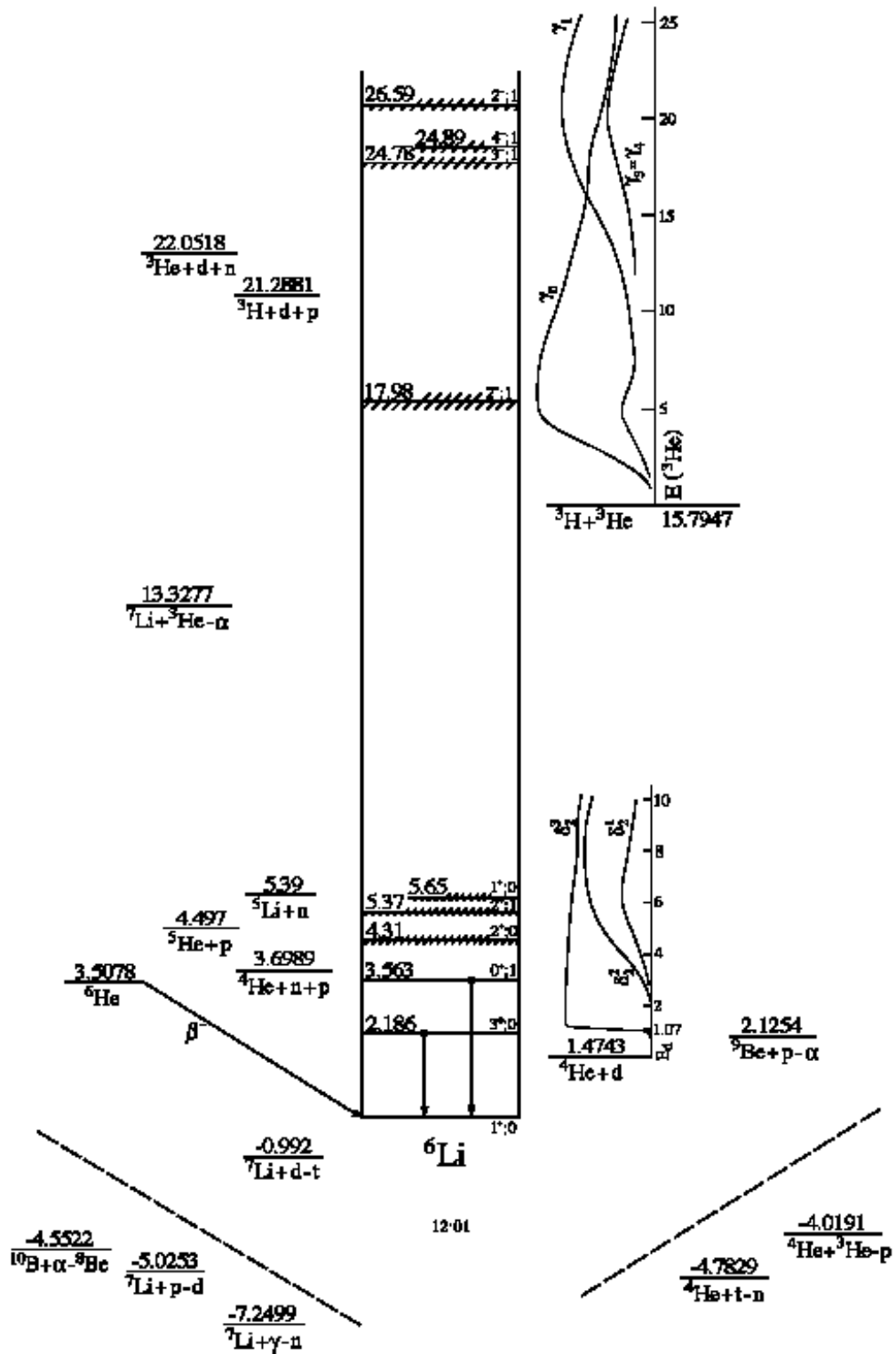


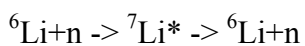
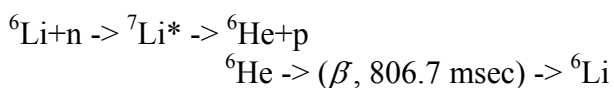
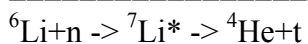
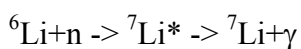
Рис.2. Диаграмма уровней ядра-мишени – Li-6

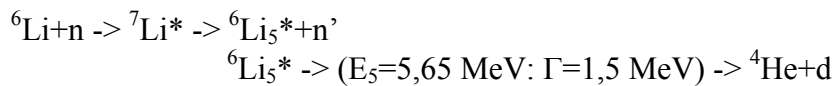
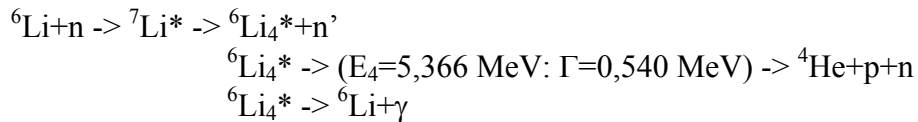
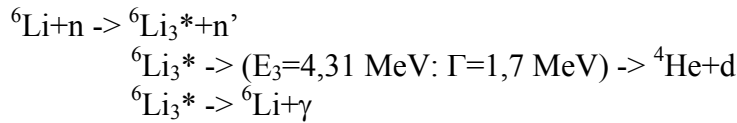
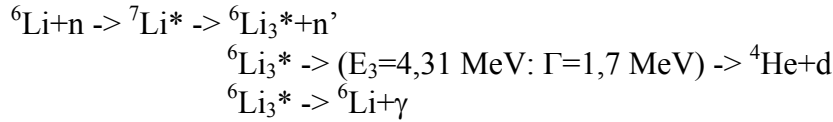
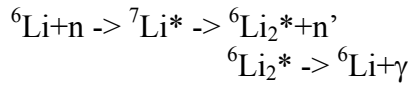
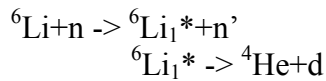
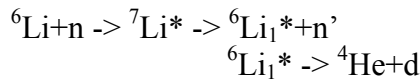
1.8. Характеристики уровней ${}^6\text{Li}$ [2] (Таблица 1):

Table 6.7: Energy levels of ${}^6\text{Li}$

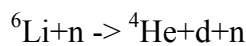
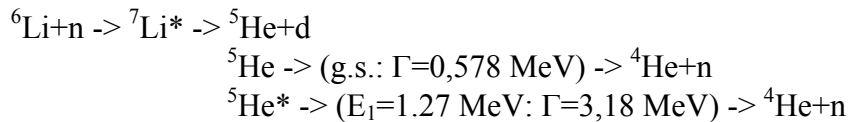
| E_x (MeV \pm keV) | $J^\pi; T$ | Γ_{exp} (MeV) | Decay |
|-----------------------|------------|--------------------------------|----------------------------------|
| g.s. | $1^+; 0$ | | stable |
| 2.186 ± 2 | $3^+; 0$ | 0.024 ± 0.002 | γ, d, α |
| 3.56288 ± 0.10 | $0^+; 1$ | $(8.2 \pm 0.2) \times 10^{-8}$ | γ |
| 4.31 ± 22 | $2^+; 0$ | 1.7 ± 0.2^a | γ, d, α |
| 5.366 ± 15 | $2^+; 1$ | 0.540 ± 0.020 | γ, n, p, α |
| 5.65 ± 50 | $1^+; 0$ | 1.5 ± 0.2 | d, α |
| 17.985 ± 25^b | $2^-; 1$ | 3.012 ± 0.007 | $\gamma, t, {}^3\text{He}$ |
| 24.779 ± 54^b | $3^-; 1$ | 6.754 ± 0.110 | $\gamma, n, t, {}^3\text{He}$ |
| 24.890 ± 55^b | $4^-; 1$ | 5.316 ± 0.112 | $\gamma, n, t, {}^3\text{He}$ |
| 26.590 ± 65^b | $2^-; 1$ | 8.684 ± 0.125 | $\gamma, n, d, t, {}^3\text{He}$ |
| ^c | | | |

1.9. Каналы и основные механизмы реакций ${}^6\text{Li}+n$ (механизм реакций с образованием ${}^7\text{Li}^*$ - механизм с образованием и распадом составного ядра) [1,2]:

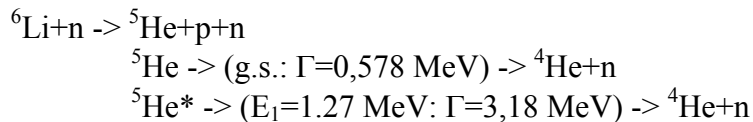




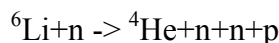
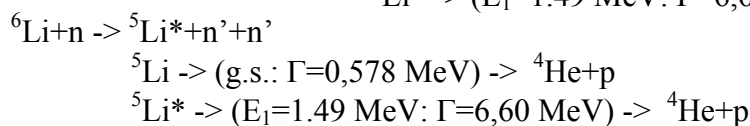
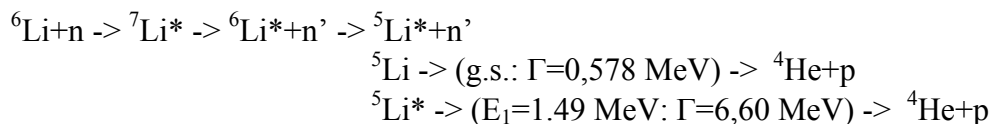
=====



=====



=====



=====

Комбинации частиц в выходных каналах при энергии падающих нейтронов ниже 20 MeV и частиц живущих $> 10^{-12}$ sec (все каналы, кроме упругого, могут включать гамма-кванты):

${}^7\text{Li}+\gamma$

${}^6\text{Li}+n$

${}^6\text{Li}+n'$

${}^6\text{He}+p$

${}^4\text{He}+t$

${}^4\text{He}+d+n$

${}^4\text{He}+p+n+n = {}^4\text{He}+p+2n$

При оценке энерго-угловых распределений вторичных частиц представляемых в лабораторной системе координат необходимо учитывать механизмы последовательного распада, прямых реакций неупругого рассеяния, многочастичных одновременных развалов, а также их возможных комбинаций, то есть учитывать все процессы, отличающиеся кинематикой или динамикой.

2. Файлы оцененных данных

ENDF/B-6.8 – оценка 1989 года, выполненная Хэйлом и Янгом [3]. R-матричное описание интегральных сечений и угловых распределений упругого рассеяния до 3.0 МэВ ((n,t) сечение заменено на ENDF/B-6 стандарт до 1 МэВ). Выше 3 МэВ интегральные сечения оценивались проведением гладких кривых через имеющиеся экспериментальные данные. Сечения неупругого рассеяния на уровне ${}^6\text{Li}$, имеющие большие ширины распада для тяжелых частиц, представлялись псевдо-уровнями с энерго-угловыми распределениями в модели трехтельного развала ($n+d+{}^4\text{He}$) с континуальным энергетическим спектром вторичных частиц и без учета взаимодействия между этими частицами. Сечения уровней с малыми ширинами при энергии 2.185 МэВ и 3.56 МэВ оценивались на основе имеющихся экспериментальных данных. Сечение захвата содержит результаты оценки, выполненной для библиотеки ENDF/B-5.

Оценка JEFF-3.1 взята из ENDF/B-6 без изменений [3].

Предварительная оценка ENDF/B-7 взята из ENDF/B-6 без изменений [4].

JENDL-3.3 – оценка 1985 года выполненная Чибой и Шибатой и модифицированная Чибой для JENDL-3.2 в 1993 году [3]. R-матричное описание интегральных сечений и угловых распределений упругого рассеяния до 1.0 МэВ; выше 1 МэВ сечения проведены по экспериментальным данным. Введены псевдо-уровни для представления энергоугловых распределений в реакции неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней с последующим распадом возбужденного ${}^6\text{Li}^*$ на дейтрон и ${}^4\text{He}$. При оценке энергоугловых распределений использовалась модель трехтельного развала, изотропного в системе центра масс, но с учетом (при нужде) кулоновского взаимодействия продуктов реакции. Затем энергоугловые распределения вторичных нейтронов из (n,n') и (n,2n) реакций были подогнаны под экспериментальные данные по энергоугловым распределениям эмиссии нейтронов при энергии 14 и 18 МэВ. Для уровней ротационной полосы (0+,1+, 2+, 3+) вклад прямых процессов оценивался в расчетах методом сильной связи каналов. При оценке нейтронных спектров реакции (n,2n) использовалась испарительная модель.

CENDL-2 - оценка 1978 года выполненная Жоу Де Лин [3]. Описание методологии оценки в файле отсутствует. Нейтронные сечения с эмиссией нейтронов заданы через неупругое

рассеяние с последующим испусканием гамма квантов, реакции $(n,2n)$ и реакции $(n,n'd)$. Реакции (n,p) и (n,α) заданы как реакции с последующим вылетом гамма-квантов.

BROND-2 – оценка выполненная Николаевым в 1989 году [3], где файл, подготовленный Бондаренко в 1984 году, был взят за основу. Оценка интегральных сечений основана в основном на анализе имеющихся экспериментальных данных. Неупругое рассеяние с возбуждением первого и третьего уровня и континуума уровней используется для описания сечений и энергоугловых распределений в реакциях, ведущих к вылету $n+d+\alpha$. Реакция с вылетом $2n+p+\alpha$ задана как $MT=41$. Энергетические распределения нейтронов для $n+d+\alpha$ оценивались в предположении, что основной вклад в реакцию вносит компаундный механизм последовательного двухступенчатого распада $(n,d)^5\text{He}$, $^5\text{He} \rightarrow n+\alpha$. Энергоугловые распределения $2n+p+\alpha$ оценивались в модели многотельного распада. Энергоугловые распределения в реакциях (n,p) и (n,t) рассчитывались в 2-х частичной кинематике с изотропным угловым распределением в системе центра масс.

Вывод: ни одна из оценок не основана на полном и последовательном учете вкладов различных механизмов реакций в энергоугловые распределения вторичных частиц.

3. Нейтронные сечения

Общий вид интегральных нейтронных сечений из предварительной оценки для библиотеки ENDF/B-VII приведен на рисунке 3, а интегрального и парциальных сечений неупругого рассеяния – на рисунке 4. Сечение реакции $^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$, являющегося стандартом нейтронных сечений, показано отдельно на рисунке 15.

3.1. Сечения в тепловой точке (Таблица 2, барн):

| Библиотека | Полное | Упругое | $(n,t)=(n,\alpha)$ | Захват | RI захвата |
|---------------------|---------------|----------------|--------------------|---------------|-----------------|
| ENDF/B-6.8 | 941,6929 | 0,67157 | 940,9828 | 0,0385 | 0,017345 |
| JENDL-3.3 | 941,103 | 0,7345 | 940,33 | 0,0385 | 0,017467 |
| CENDL-2 | 940,76 | 0,72124 | 940,039 | 0 | 0 |
| BROND-2 | 940,789 | 0,75 | 940 | 0,0385 | -0,356391* |
| Новая оценка | 938,85 | 0,68878 | 938,13 | 0,0385 | 0,017354 |

* - ошибка в сечении захвата в файле BROND-2.2.

Результаты новой оценки выполненной в R-матричном подходе в рамках координированной исследовательской программы МАГАТЭ [5] показаны в таблице как новая оценка.

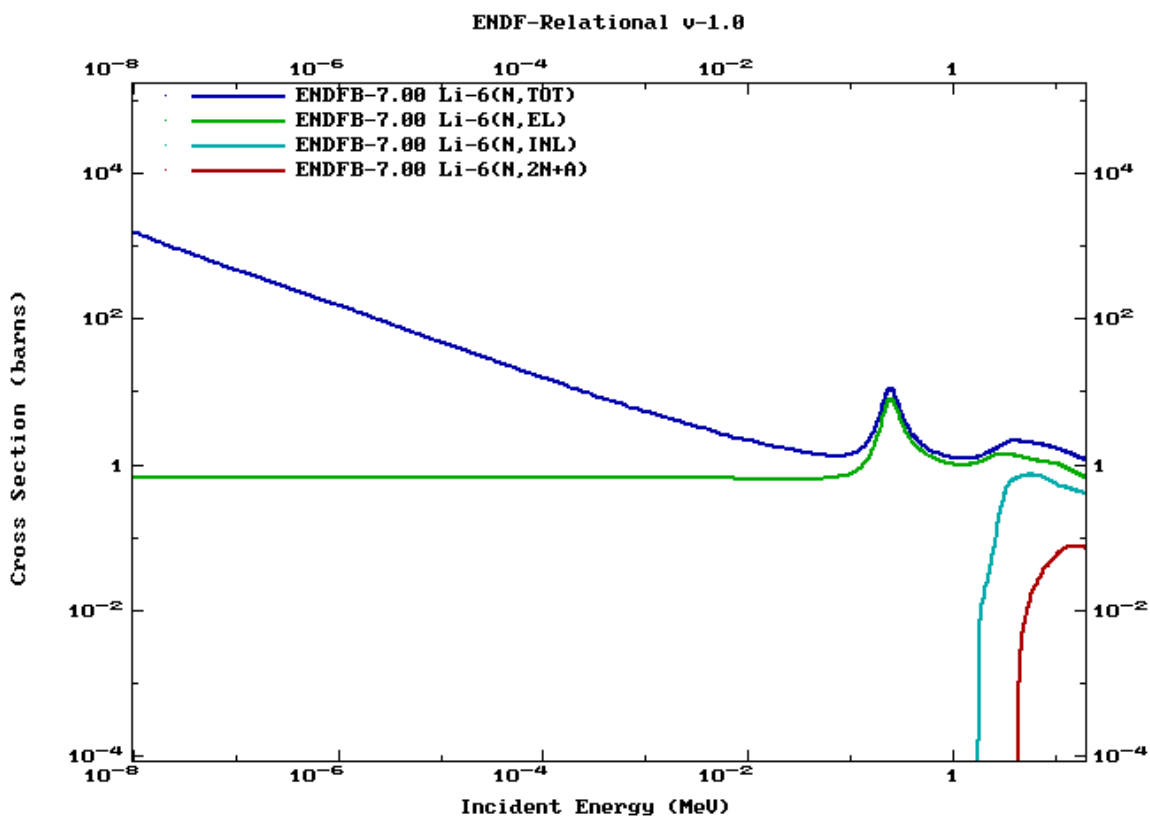


Рис. 3. Полное сечение, сечения упругого, неупругого рассеяния и реакции (n,2n) в библиотеке ENDF/B-6.8 (=ENDF/B-7.0).

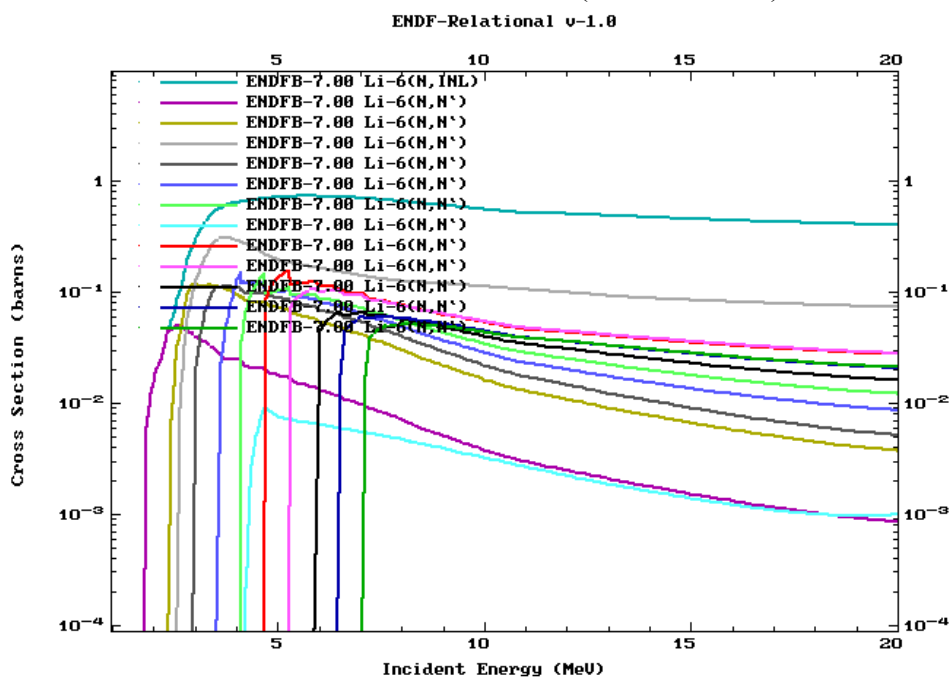


Рис. 4. Полное и парциальные сечения неупругого рассеяния в библиотеке ENDF/B-6.8 (=ENDF/B-7.0).

3.2. Сечения в области энергий до 1 МэВ

Реакция ${}^6\text{Li}(n,t)$ является стандартной реакцией в измерениях нейтронных сечений. Как стандарт она известна с хорошей точностью и результат оценки, выполненный в рамках координированной исследовательской программы МАГАТЭ[5], предлагается

использовать для ревизии оценки. Отличия от предыдущей оценки находятся в пределах 3% (Рис. 5). Так как оценка выполнена методом наименьших квадратов в модельном R-матричном подходе, учитывающем всю совокупность экспериментальных данных по сечениям прямых и обратных реакций, их угловых распределений и поляризаций, она по определению наилучшим образом описывает все имеющиеся экспериментальные данные. Результатом оценки стандартной реакции являются также полное сечение и сечение упругого рассеяния до 2.8 МэВ, а также угловые распределения вторичных частиц.

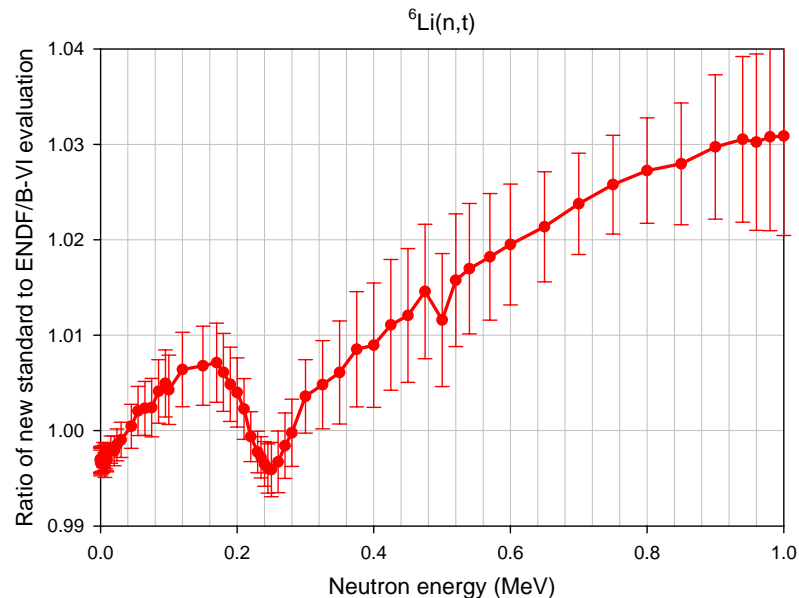


Рис. 5. Отношение новой оценки сечения стандарта ${}^6\text{Li}(n,t)$ к сечению из библиотеки ENDF/B-6.8. Оцененные погрешности нового стандарта показаны на рисунке.

3.3. Сечения в области энергий от 1 до 20 МэВ

Полное сечение и сечение упругого рассеяния для нейтронов с энергией от 1 до 20 МэВ показаны на рисунках 6 и 7 в сравнении с результатами последних измерений. Более детальный ход оцененного полного сечения в области энергий от 1 до 2.8 МэВ, где наблюдаются наибольшие расхождения с экспериментальными данными, показан на рисунке 8. Как видно, полное сечение в области энергий 1 – 2,8 МэВ на 3 - 5% ниже, что только частично может быть обусловлено трудностью эффективного учета канала многочастичного распада (реакции $(n,d+n+4\text{He})$, Q-реакции $-1,4743$ МэВ) в R –матричной теории. В тоже время, прецизионные данные Абфальтерера демонстрируют тенденцию на понижение сечения для энергии нейтронов выше 5 МэВ.

Необходимо заметить, что R-матричная оценка основывается на поиске параметров и описании методом наименьших квадратов в R-матричной модели ядра большого числа экспериментальных данных (сечений реакций проходящих через одно и тоже составное ядро, угловых распределений вторичных частиц в этих реакциях, их поляризаций) с построенными для них ковариационными матрицами ошибок, описания, при котором вклад полного сечения не является определяющим. Да и сами данные полученные в экспериментах с высоким разрешением (данные Харвея) являются не полностью обработанными данными (“raw” data). Ошибка приписанная этим данным как правило существенно недооценена. Например, в данных Книттера, также полученных с высоким разрешением, сечение в двух соседних точках 1.103 МэВ и 1.124 МэВ, где сечение практически не должно меняться из-за того что является гладким и, как следует из R-матричной модели почти постоянно, изменяется на 11% при полной ошибке приписанной

сечению в 1.5%. Учитывая, что для регистрации нейтронов использовался сцинтилляционный детектор, это различие объяснимо регистрацией посторонних гамма-линий, не удаляемых при отделении фона (например отделяемый фон берётся гладким, или присутствие образца изменяет фон). Поэтому для описания в R-матричном подходе данные тщательно отбирались, а ковариационная матрица погрешностей, строящаяся для этих данных, учитывала не только компоненты ошибок приписанные авторами, но и дополнительные систематические погрешности, которые могут быть получены только из анализа большого количества результатов измерений выполненных разными методами.

R-матричное описание в проекте МАГАТЭ оценки стандартов [5] было получено для всех сечений в диапазоне энергий нейтронов от тепловой области до 2.8 МэВ. Для этого использовались две независимые программы (EDA и RAC) а также ковариационные матрицы ошибок экспериментальных данных приготовленные различным образом. Параметры и сечения, оцененные этими двумя методами, отличались между собой. Это различие интерпретировалось как методическое и в качестве окончательной R-матричной оценки бралось среднее значение сечений полученное в двух описаниях а погрешность оценённых данных увеличивалась в соответствии с этим различием. Окончательная оценка была получена в обобщённом описании методом наименьших квадратов всех данных по реакциям являющихся стандартами или связанных различными отношениями включая R-матричную оценку для ${}^6\text{Li}$. По мнению автора данный подход к оценке сечений является наилучшим и её результаты рекомендуется включить в файл РОСФОНДА для ${}^6\text{Li}$.

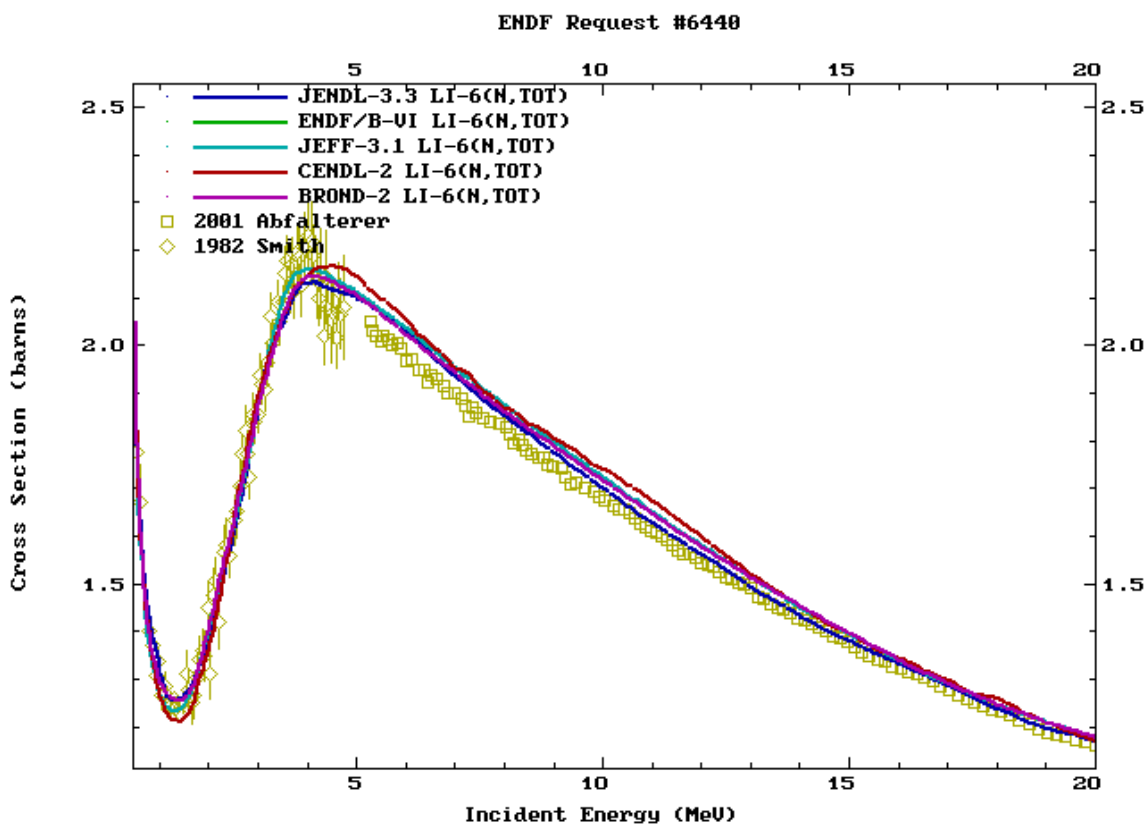


Рис. 6. Сечение ${}^6\text{Li}(n,\text{tot})$ из разных библиотек.

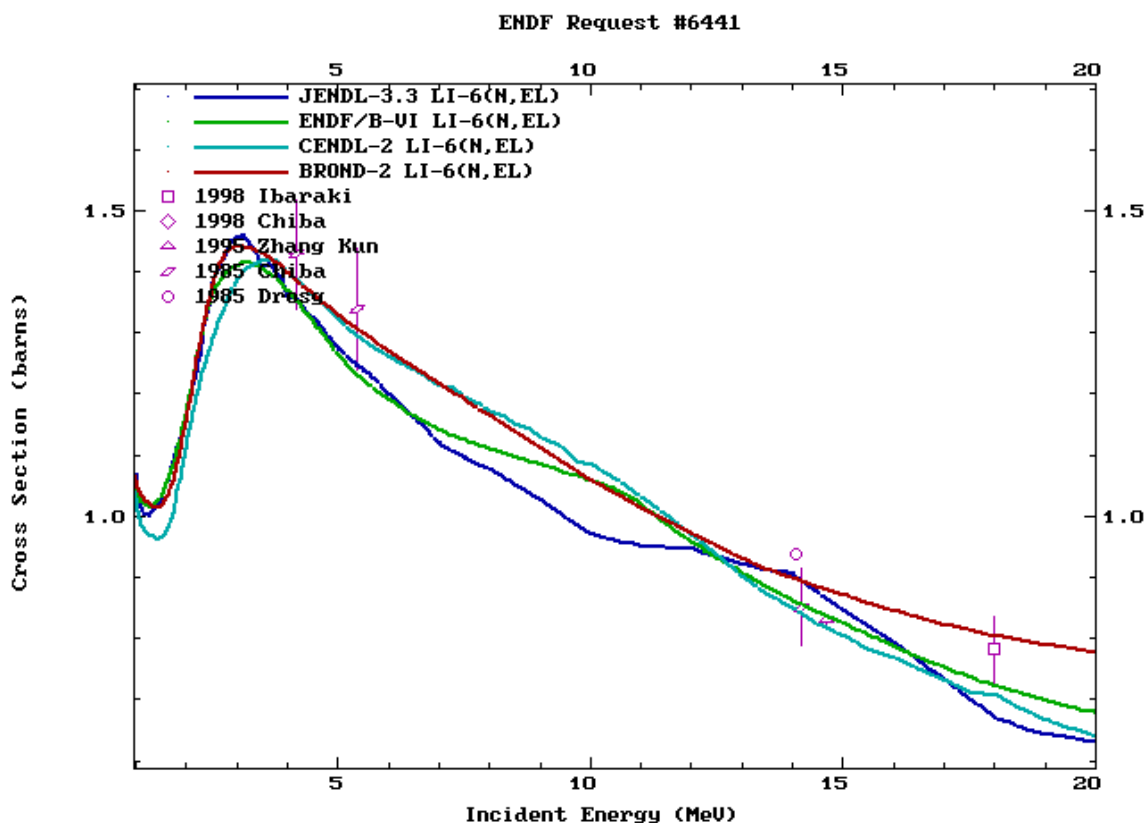


Рис. 7. Сечение ${}^6\text{Li}(n,el)$ из разных библиотек.

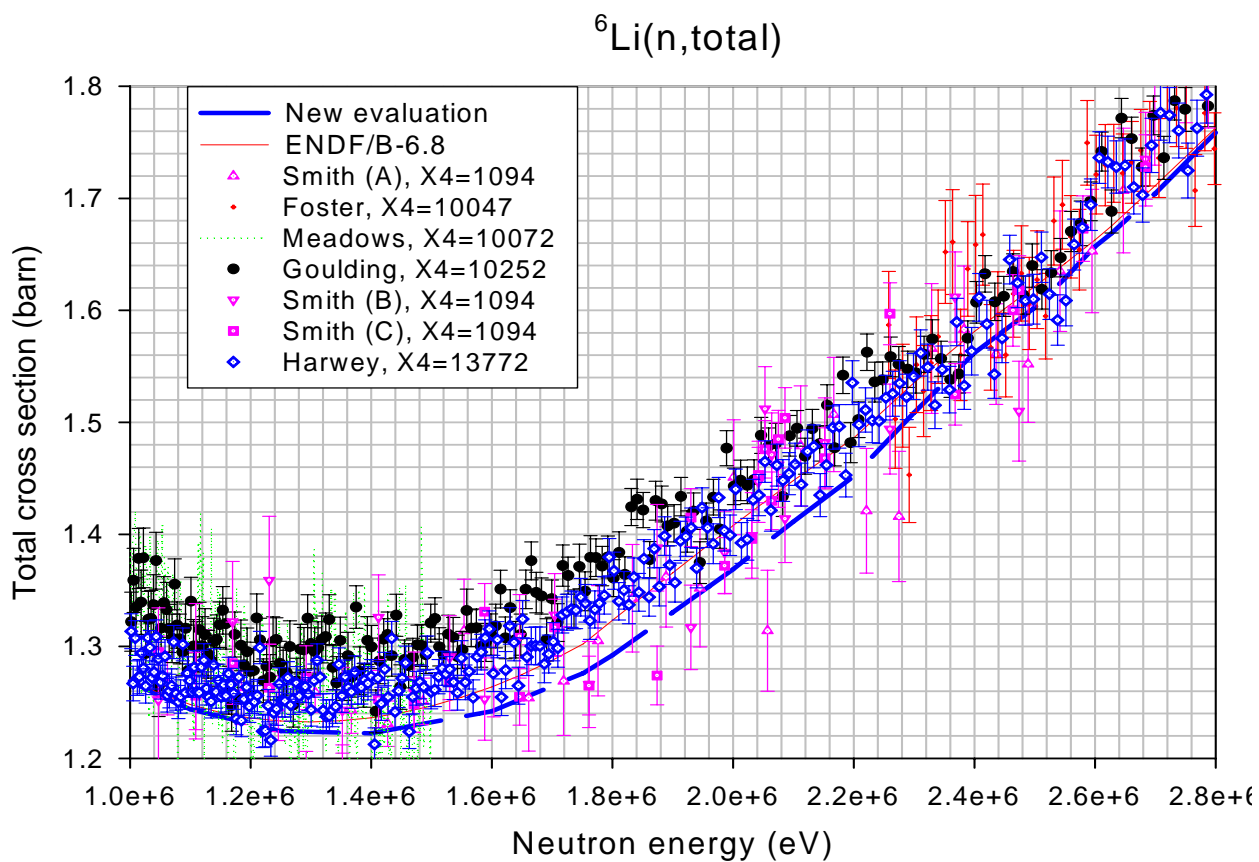


Рис. 8. Сравнение сечения ${}^6\text{Li}(n,tot)$ из библиотеки ENDF/B-6.8 с результатами новой оценки. Измерения выполнены Смитом в 1977 и 1982 годах, Фостером – в 1971, Мидоузом и Гоулдингом и Харвеем – в 1972 году.

Полное сечение неупругого рассеяния во всех библиотеках, кроме CENDL-2, задано как сумма всех парциальных неупругих процессов с последующим развалом ${}^6\text{Li}$ в возбужденном состоянии на дейтрон и альфа-частицу, или (как в случае единственного уровня при 3,563 МэВ) с гамма-переходом в основное состояние. В библиотеке CENDL-2 сечение полного неупругого рассеяния равно сечению рассеяния с возбуждением этого уровня, а **интегральное сечение ${}^6\text{Li}(n,n'd){}^4\text{He}$** задано в отдельной секции с MT=32. Сравнение сечений полного неупругого рассеяния показано на рисунке 9, а интегрального сечения (n,n'd) полученного суммированием вкладов от парциальных каналов неупругого рассеяния (ведущих к распаду остаточного ядра с вылетом дейтрона) для всех библиотек, кроме CENDL-2, где оно задано явно, - на рисунке 10. Так как сечение уровня с энергией возбуждения 3.563 МэВ мене 10 мбарн, то интегральное сечение неупругого рассеяния и реакции (n,n'd) отличаются незначительно. Сечение других реакций, таких как (n,2n) и (n,p) также мало, так что при хорошем знании полного сечения точность знания сечения реакции (n,n'd) может определяться точностью, с которой мы знаем сечение упругого рассеяния. Последние прецизионные измерения сечения реакции (n,n'd) Чибы (1985 год) хорошо согласуются с измерениями Хопкинса (1968 год) и существенно выше результатов остальных, более ранних экспериментов. Различие в описании сечения (n,n'd) в разных библиотеках вероятно лежит в пределах погрешности с которым оно в настоящее время известно, но учитывая качество описание упругого сечения (зависящего от описания сечения (n,n'd) при хорошо известном полном), можно рекомендовать для реакции (n,n'd) одну из трёх оценок: ENDF/B-VI.8, BROND-2 или CENDL-2.

ENDF Request #6442

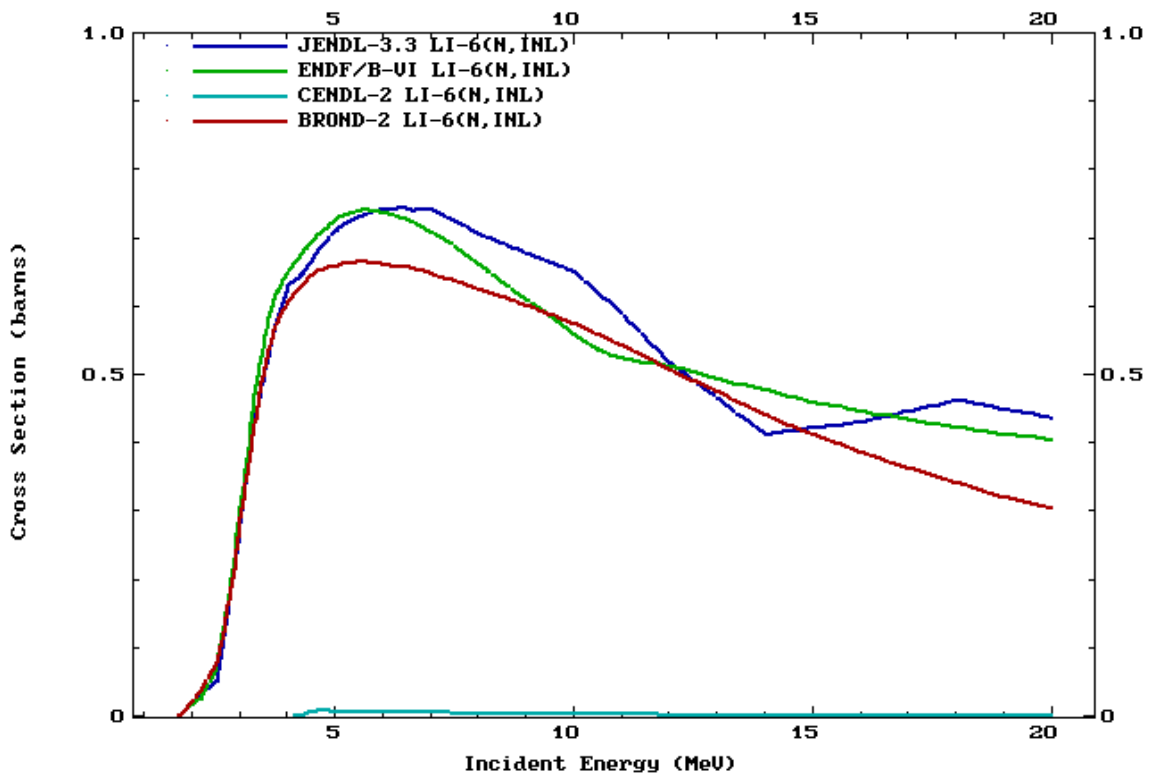


Рис. 9. Сравнение интегрального сечения ${}^6\text{Li}(n,inl)$ из разных библиотек.

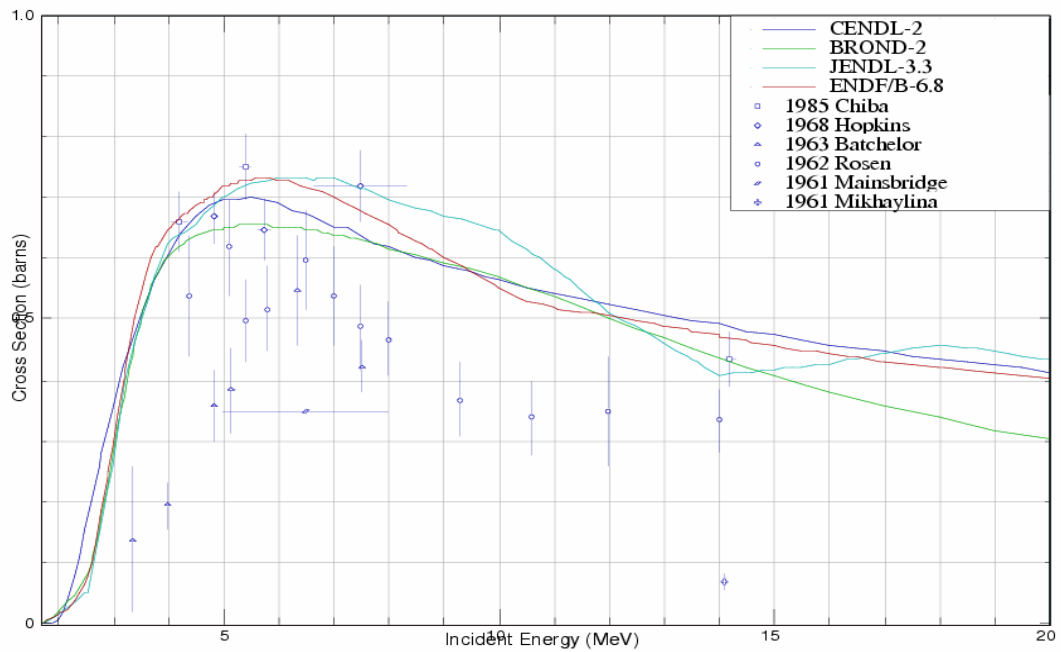


Рис. 10. Сравнение интегрального сечения ${}^6\text{Li}(n,n'd){}^4\text{He}$ из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными.

Неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней.

В JENDL-3.3 и ENDF/B-VII.0 для представления энергоугловых распределений неупругого рассеяния нейтронов кроме двух реальных уровней (первого и второго, Таблица 1), имеющих малые ширины распада, используются псевдоуровни, начинающиеся с 1.5 МэВ ($Q=-1.4743$ МэВ для реакции трёхтельного развала ${}^6\text{Li}+n \rightarrow n+d+{}^4\text{He}$), для которых и приводятся сечения. Сечения для суммы двух псевдоуровней расположенных ниже энергии возбуждения первого уровня и вероятно представляющих вклад от процессов трёхтельного развала и уровней неупругого рассеяния обладающих большой шириной (Таблица 1) показаны на рисунке 11. Как видно из рисунка различия достаточно велики, что ведёт к отличиям в описании жёсткой части спектра неупругого рассеяния.

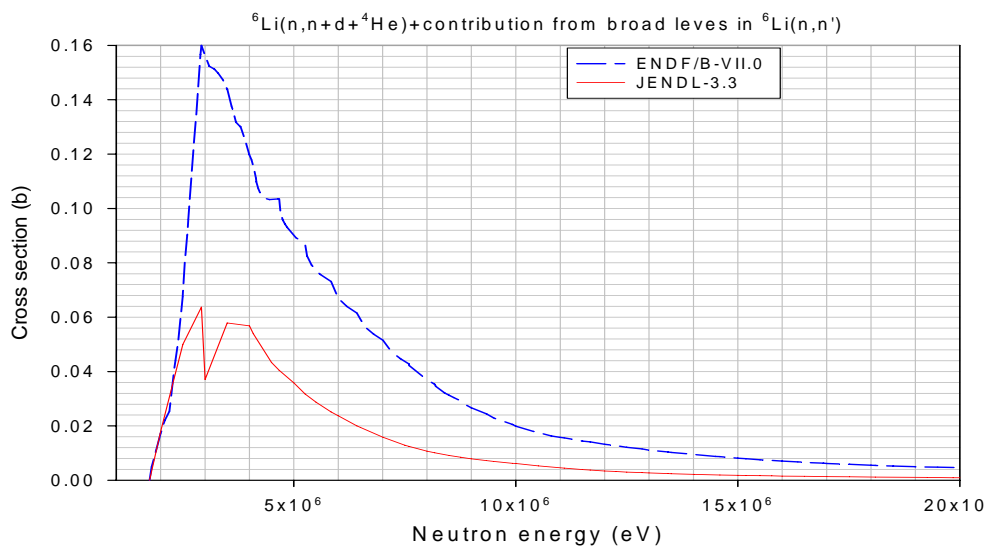


Рис. 11. Функция возбуждения первых двух псевдоуровней неупругого рассеяния

(с энергией ниже энергии первого уровня неупругого рассеяния в библиотеках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII.0).

В библиотеке BROND-2 приведены функции возбуждения для 3-х реальных уровней; остальные уровни представлены континуумом (MT=91), также с порогом вблизи трехкратного развала.

Функция возбуждения первого уровня неупругого рассеяния, принятая в разных библиотеках, показана на рисунке 12. Наблюдается хорошее согласие между данными разных экспериментов. Оценка ENDF/B-VII.0 лучше всего согласуется с данными.

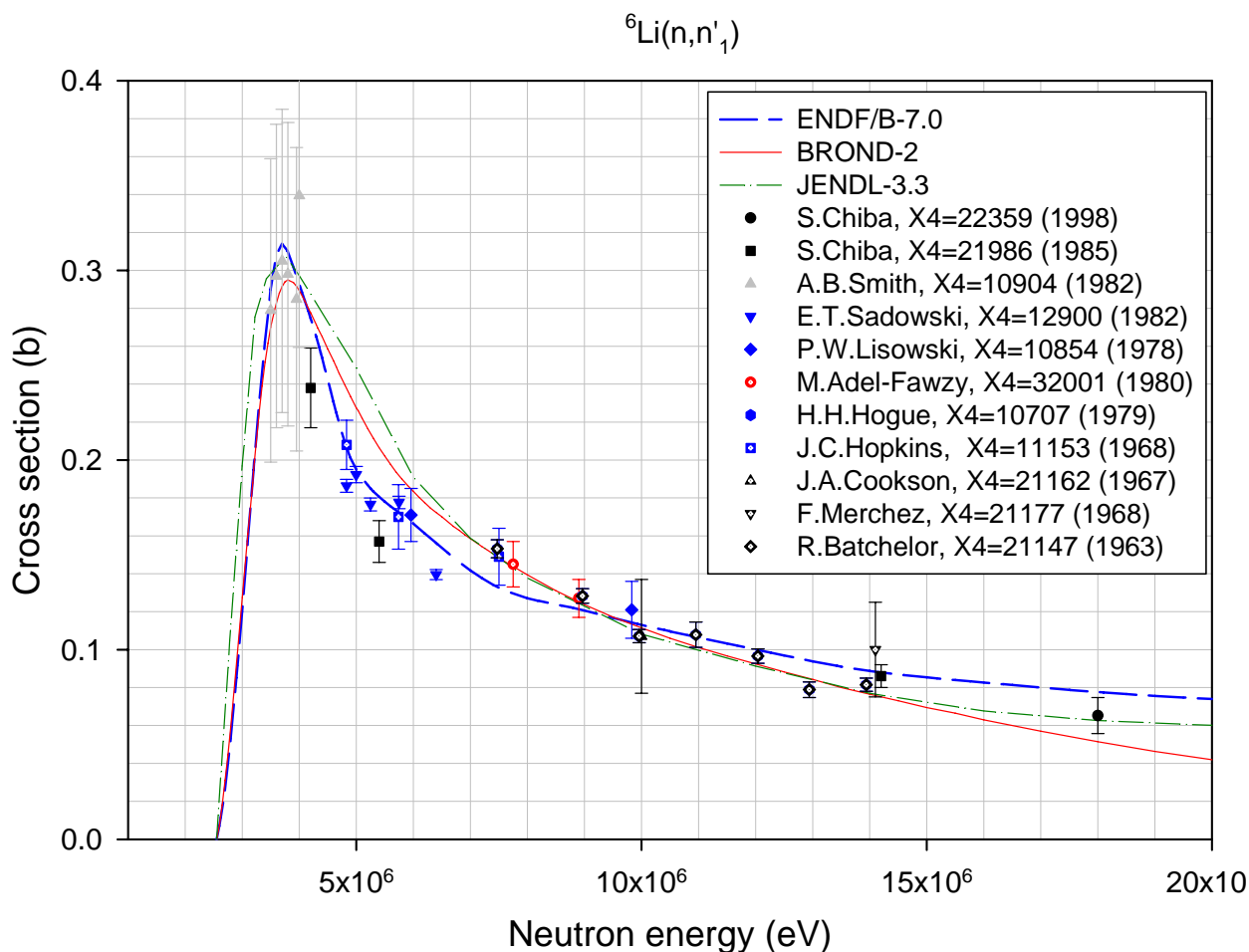


Рис. 12. Функция возбуждения первого уровня неупругого рассеяния в разных библиотеках.

В библиотеке CENDL-2 представлен единственный уровень неупругого рассеяния, а именно второй уровень, возбуждение которого снимается исключительно гамма-переходом в основное состояние. Сечение возбуждения этого уровня (Q-реакции равно -3.56199 МэВ) из разных библиотек приведено на рисунке 13. Оценки хорошо согласуются между собой.

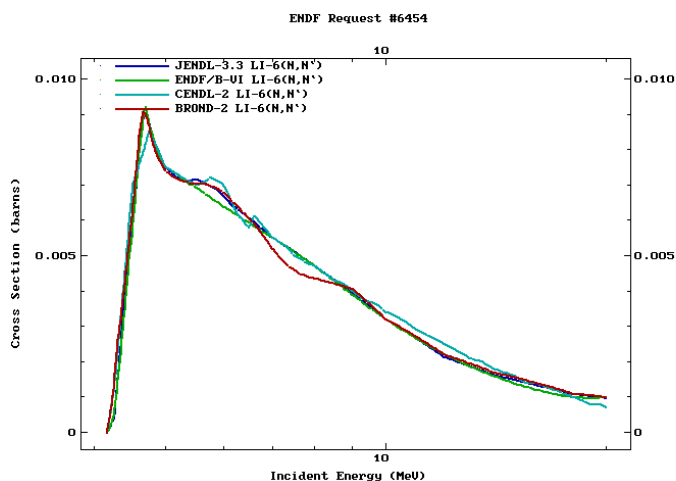


Рис. 13. Функция возбуждения уровня неупругого рассеяния с $QI = -3.56199$ МэВ в разных библиотеках.

Реакции, ведущие к распаду составной системы на два нейтрона с последующим развалом остаточного ядра ${}^5\text{Li}$ на протон и альфа частицу (т.е. реакции ${}^6\text{Li}(n,2n+p){}^4\text{He}$, $Q=3.698$ МэВ; ${}^6\text{Li}(n,2n){}^5\text{Li}^g \rightarrow {}^4\text{He}+p$, $Q=5.6629$ МэВ, и ${}^6\text{Li}(n,2n){}^5\text{Li}^m \rightarrow {}^4\text{He}+p$, $Q=7.153$ МэВ) определены либо как реакция $(n,2n\alpha)$ ($MT=24$ в ENDF/B-6.8) или реакция $(n,2np)$ ($MT=41$ в BROND-2), либо как реакция $(n,2n)$ ($MT=16$ в CENDL-2 и JENDL-3.3). Последнее означает пренебрежение каналом четырехтельного развала, имеющим более низкий порог. При энергиях выше порога реакции ${}^6\text{Li}(n,2n){}^5\text{Li}^g$ это пренебрежение имеет основание, поскольку канал четырехтельного развала, повидимому, дает небольшой вклад в суммарное сечение. Однако канал этот не закрыт и реакция может осуществляться начиная с энергии 4.318 МэВ. С другой стороны, в ENDF/B-VII роль этого канала явно переоценена и суммарное сечение реакции вблизи порога нарастает неоправданно быстро (см. рис.14). На рисунке 15 проводится сравнение оценок CENDL-2 и JENDL-3.3 с имеющимися экспериментальными данными. Как видно из предыдущего рисунка при 14 МэВ все сравниваемые оценки согласуются с измерением Мазера. При 10 МэВ все оценки, кроме ENDF/B-VII, согласуются и с данными Эшби. Оценки BROND-2 и CENDL-2 являются наилучшими хотя сечения малы и выбор оценки практически не важен для приложений.

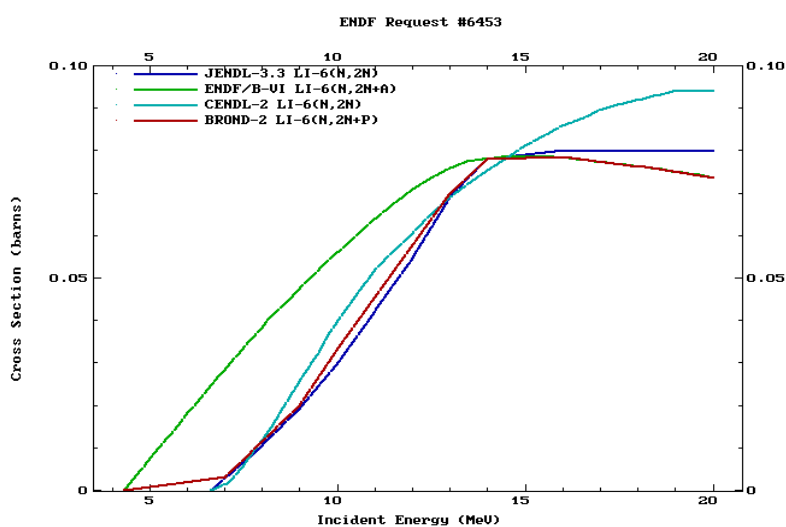


Рис. 14. Сравнение интегрального сечения ${}^6\text{Li}(n,2n+p){}^4\text{He}$ взятых или восстановленных из разных библиотек.

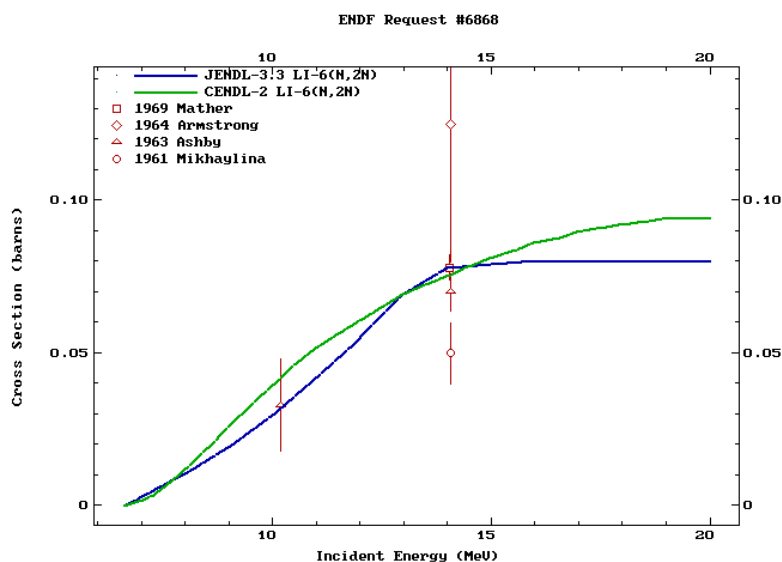


Рис. 15. Сравнение интегрального сечения ${}^6\text{Li}(n,2n){}^5\text{Li}$ из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными.

Значения сечения захвата из разных библиотек в области ниже 100 кэВ одинаковы (Рис. 16), и, учитывая, что BROND-2 содержит ошибку, а в CENDL-2 данные по захвату отсутствуют, проблема выбора оценки снимается.

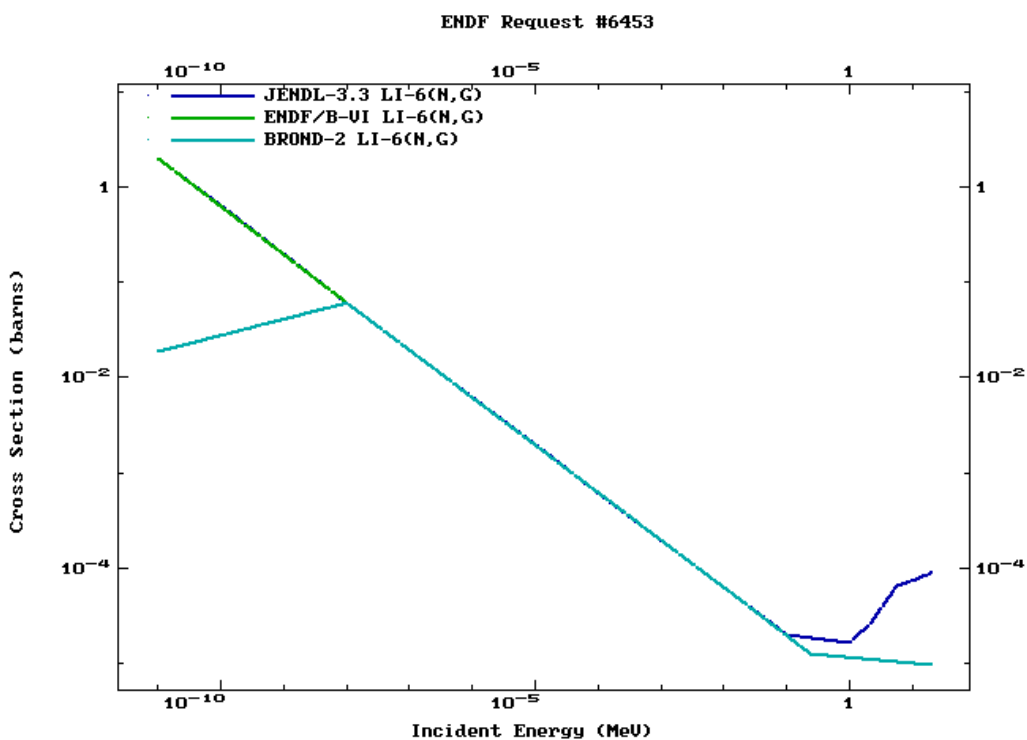


Рис. 16. Сравнение сечения ${}^6\text{Li}(n,\gamma)$ из разных библиотек.

Сечение реакции ${}^6\text{Li}(n,p){}^6\text{He}$, ${}^6\text{He} \rightarrow (\beta, 806.7 \text{ msec}) \rightarrow {}^6\text{Li}$ показано на рисунке 17. Качество описания экспериментальных данных в различных библиотеках приблизительно одинаковое.

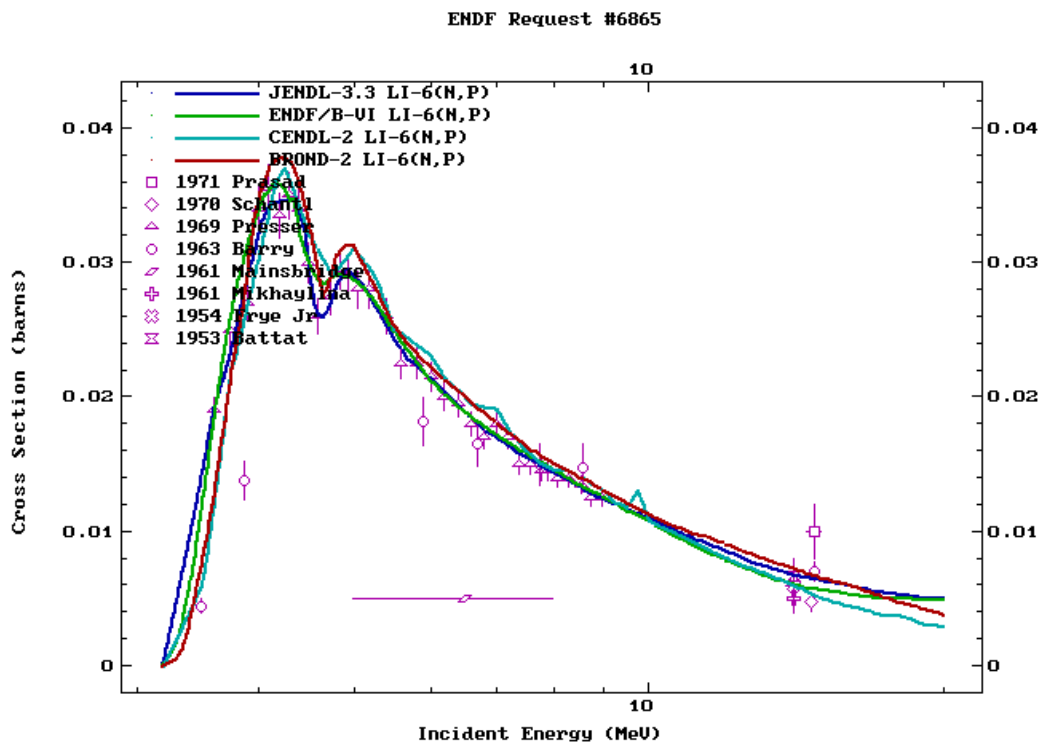


Рис. 17. Сравнение сечения ${}^6\text{Li}(n,p)$ из разных библиотек с экспериментальными данными.

Общий вид сечения реакции ${}^6\text{Li}(n,t)={}^6\text{Li}(n,\alpha)$ являющейся стандартом до энергии нейтронов в 1 МэВ показано на рисунке 18, а в интервале 0.5 – 20 МэВ – на рисунке 19. Новая оценка стандарта включает, как уже отмечалось, R - матричное описание сечений в нейтронном канале до 2,8 МэВ а также данные по реакциям с заряженными частицами и поляризации и наилучшим образом (с минимальным χ^2 значением) проходит через всю совокупность экспериментальных данных. Поэтому приводить рисунок, сравнивающий оценку с большим количеством экспериментальных данных по реакции (n,t) для энергии ниже 2,8 МэВ лишено смысла в силу его полной неинформативности. На рисунке 20 показано отношение сечения (n,t) полученного в рамках R - матричного описания до энергии 2,8 МэВ к оценке ENDF/B-6.8. Выше энергии 2,8 МэВ все оценки достаточно хорошо согласуются.

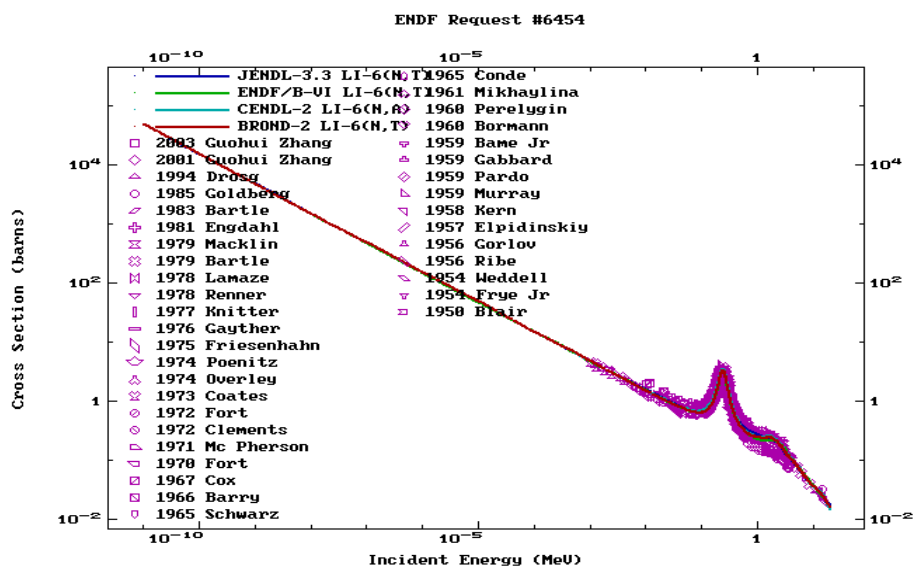


Рис. 18. Вид сечения ${}^6\text{Li}(n,t)$ являющегося стандартом до энергии 1 МэВ.

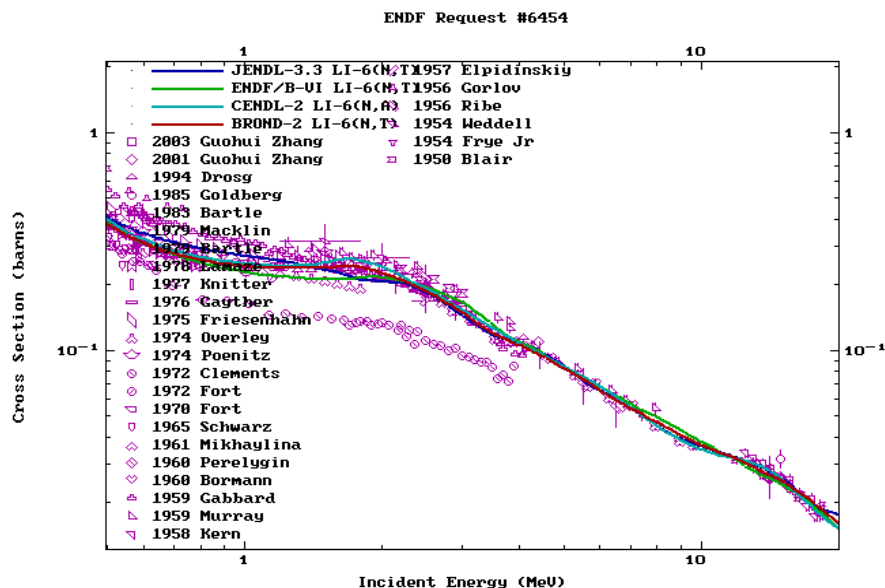


Рис. 19. Вид сечения ${}^6\text{Li}(n,t)$ для энергии выше 0,5 МэВ.

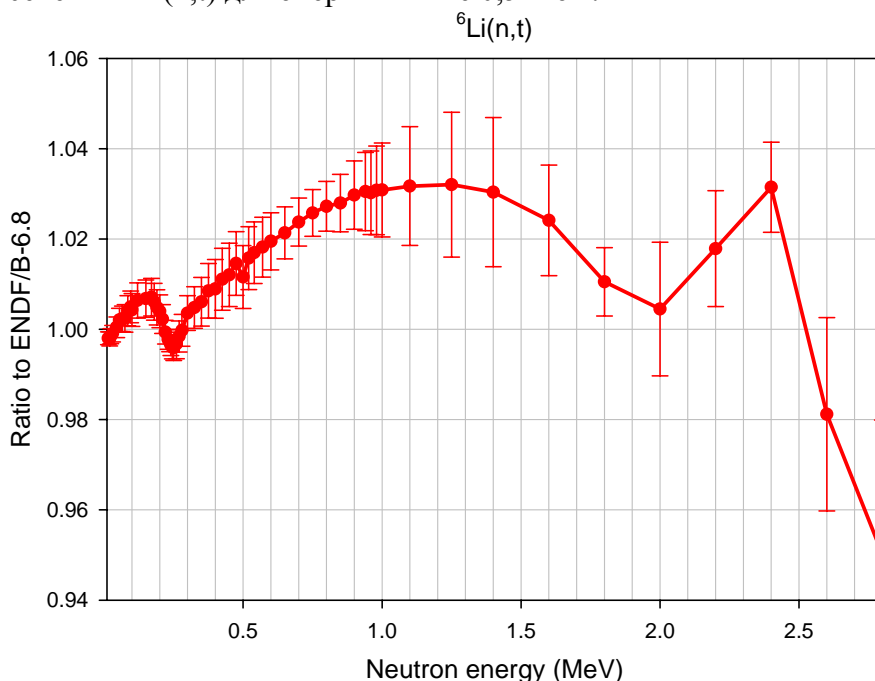


Рис. 20. Отношение новой оценки ${}^6\text{Li}(n,t)$ к сечению в ENDF/B-6.8 для энергии нейтронов до 2,8 МэВ.

4. Угловые распределения вторичных частиц.

4.1. Анизотропия упругого рассеяния сильно коррелирует с сечением и поэтому в современных оценках рассчитана в R – матричном подходе и детально задана в библиотеке ENDF/B-6.8 до 4 МэВ, а в JENDL-3.3 – до 0,5 МэВ. Для более высоких энергий угловые распределения упругого рассеяния оценивались на основе имеющихся экспериментальных данных и оптической модели. Энергетическая зависимость для первых двух коэффициентов разложения по полиномам Лежандра оцененная в ENDF/B-6.8 показана на рисунке 21. В библиотеке CENDL-2 они заданы с помощью 2-х полиномов до 3,356 МэВ и имеют более сложный вид для более высоких энергий. Оценка BROND-2 угловых распределений полностью основана на экспериментальных данных.

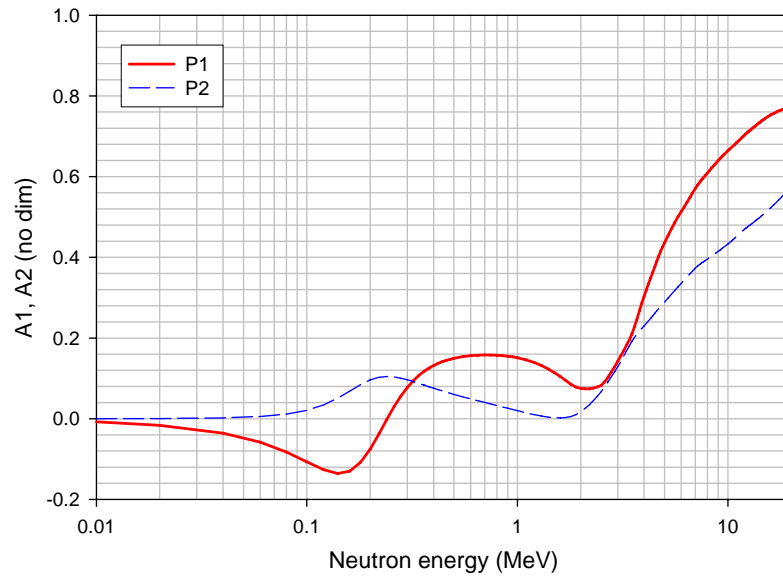


Рис. 21. Энергетическая зависимость для первых двух коэффициентов разложения по полиномам Лежандра (P1 и P2), оцененная в ENDF/B-6.8.

Из рис. 21 видно, что второй угловой момент в ниже 0.1 МэВ и в окрестности 1.5 МэВ весьма мал. Это существенно сказывается на характере угловых распределений при этих энергиях и в интервале между ними или при энергиях выше 2 МэВ.

На рисунках с 22 по 26 проводится сравнение оцененных угловых распределений упругого рассеяния при энергиях нейтронов в 0,1, 0,24, 1, 5 и 20 МэВ. Используемые сокращения для обозначения библиотек: B68 – ENDF/B-6.8; J33 – JENDL-3.3; C2 – CENDL-2; BR2 – BROND-2.2.

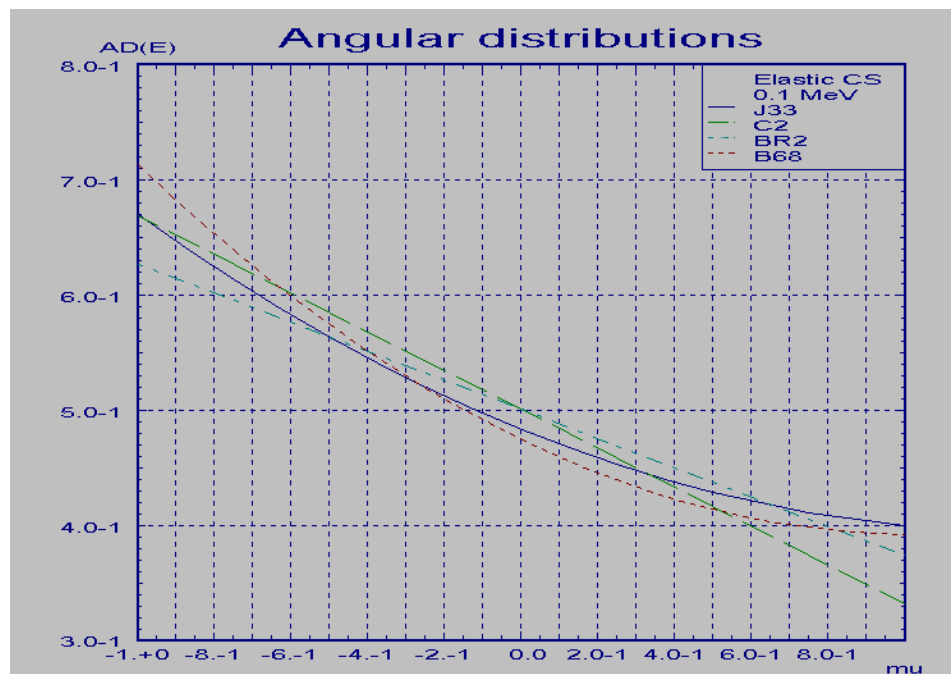


Рис. 22. Нормированные угловые распределения упругого рассеяния нейтронов при энергии 0.1 МэВ в зависимости от косинуса угла рассеяния в СЦМ.

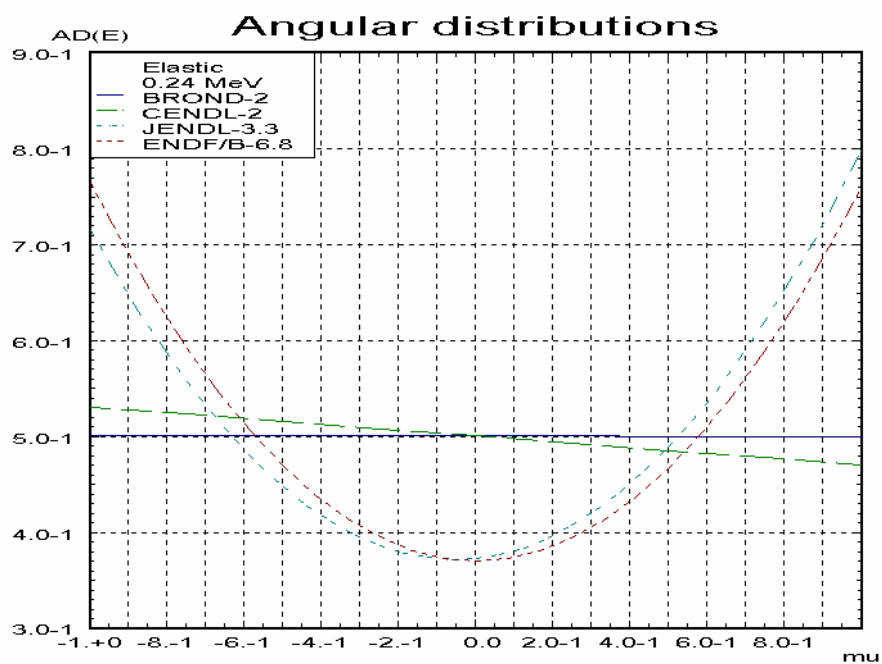


Рис. 23. Нормированные угловые распределения упругого рассеяния нейтронов при энергии 0.24 МэВ в зависимости от косинуса угла рассеяния в СЦМ.

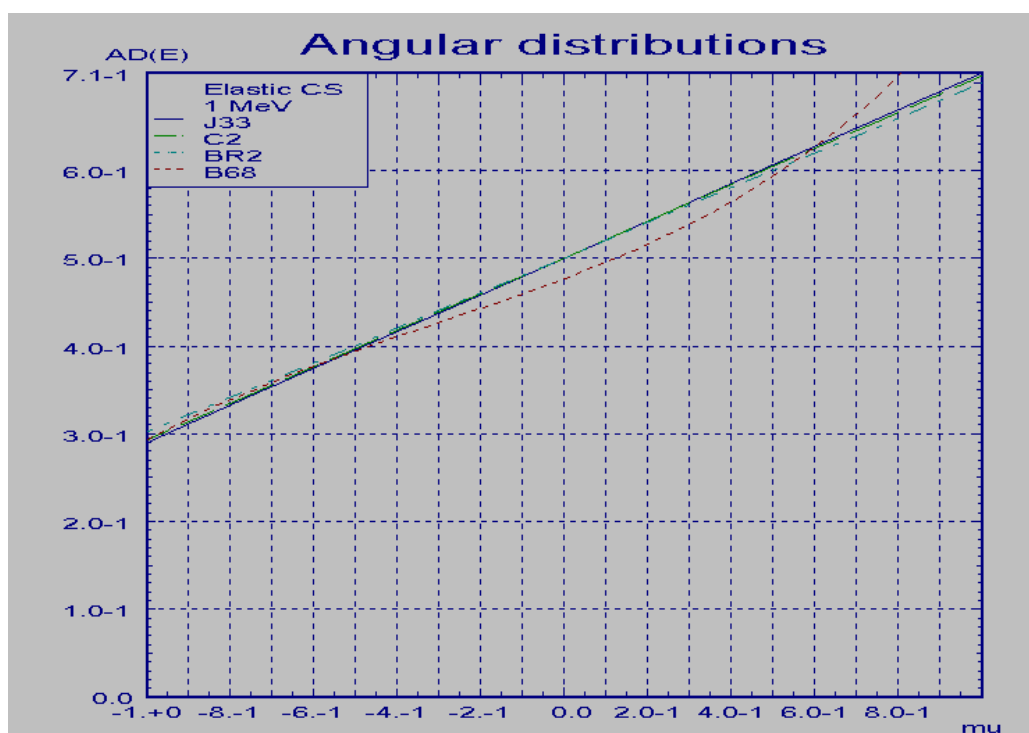


Рис. 24. Нормированные угловые распределения упругого рассеяния нейтронов при энергии 1 МэВ в зависимости от косинуса угла рассеяния в СЦМ.

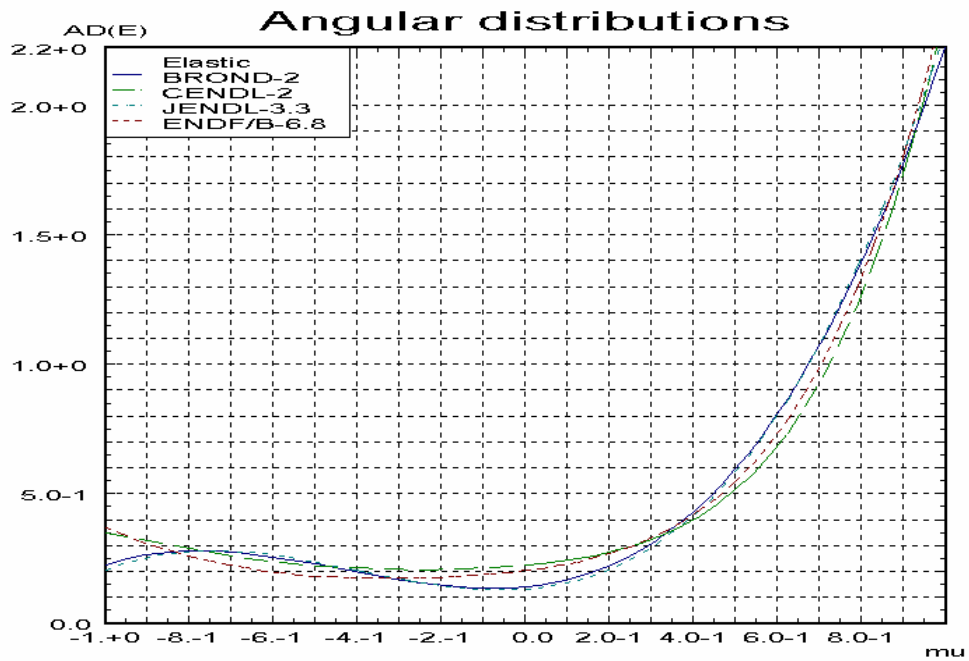


Рис. 25. Нормированные угловые распределения упругого рассеяния нейтронов при энергии 5 МэВ в зависимости от косинуса угла рассеяния в СЦМ.

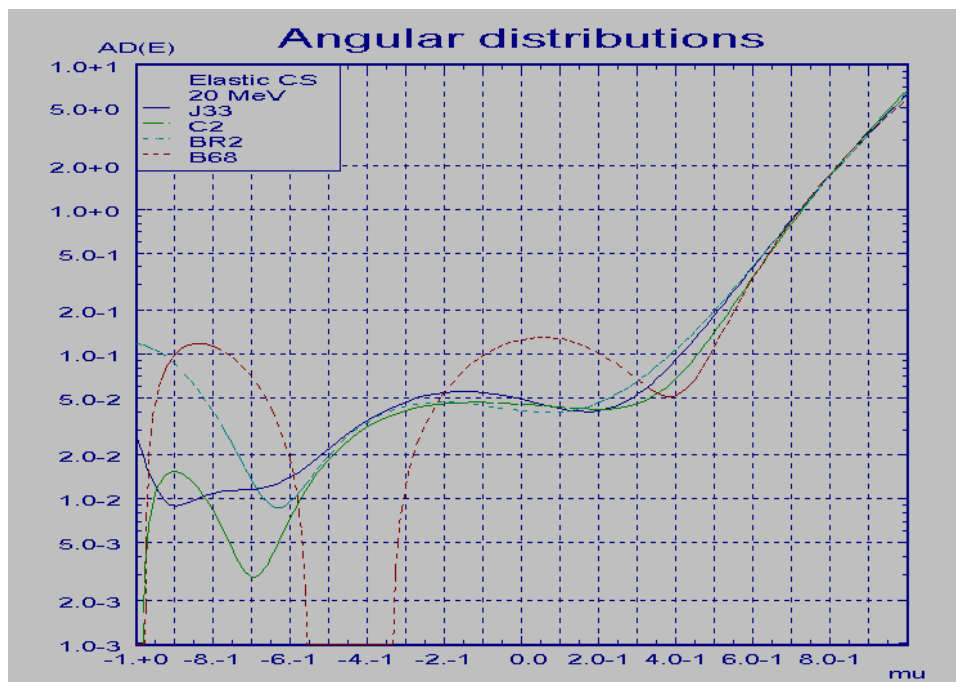


Рис. 26. Нормированные угловые распределения упругого рассеяния нейтронов при энергии 20 МэВ в зависимости от косинуса угла рассеяния в СЦМ.

В библиотеке ENDF/B-6.8 дифференциальные сечения упруго рассеянных нейтронов принимают при некоторых углах рассеяния отрицательные значения при $E_n > 11.8$ МэВ. В CENDL-2 то же самое имеет место при $E_n > 18$ МэВ. Причина этого – обрезание по числу полиномов используемых для описания угловых распределений, проведенное после того как описание выполнено. Чтобы устранить отрицательные сечения угловые распределения для $E_n > 11.8$ МэВ в РОСФОНД могут быть взяты из библиотеки BROND-2, в которой коэффициенты при полиномах низких порядков весьма близки к рекомендованным в ENDF/B-VI (Рис. 27).

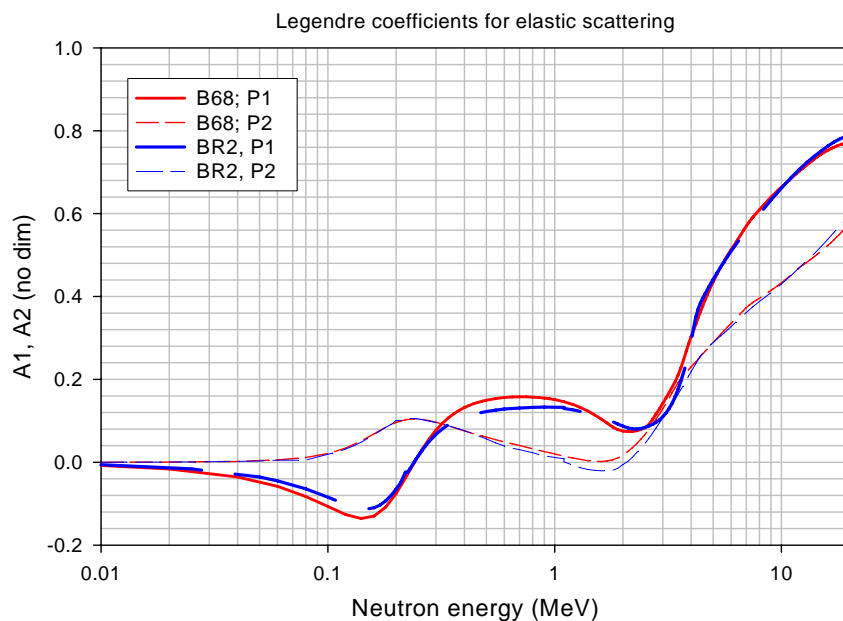


Рис. 27. Коэффициенты разложения (A_1 , A_2) по полиномам Лежандра первого (P1) и второго (P2) порядков в зависимости от энергии нейтронов.

4.2. Угловые распределения нейтронов реакций $(n,2n)\text{H}$ ($MT=24$) в библиотеках ENDF/B-6.8 и BROND-2 оценивались по модели четырехтельного развала на $p+n+p+\alpha$ без учета взаимодействия разлетающихся частиц. На рисунке 27 показана форма их угловых распределений при энергии падающих нейтронов в 14 МэВ. В CENDL-2 эти угловые распределения приняты изотропными, а в JENDL-3.3 оценены на основе имеющихся экспериментальных данных. Их сравнение показано на рисунке 28. оценки из любой библиотеки кроме CENDL-2 могут быть использованы в РОСФОНД.

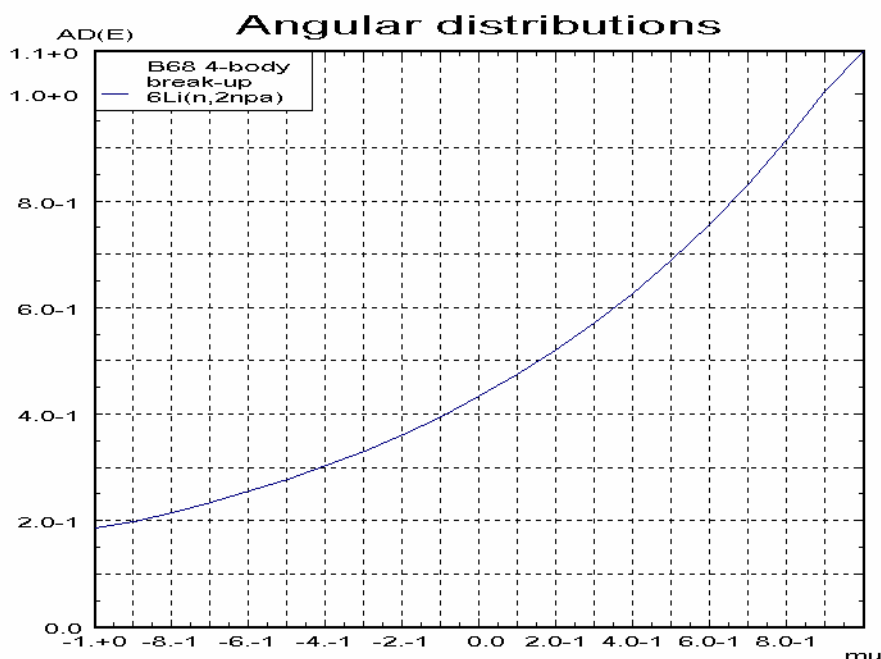


Рис. 28. Форма угловых распределений нейтронов из реакции $(n,2n)$ в библиотеке ENDF/B-6.8 при энергии падающих нейтронов в 14 МэВ.

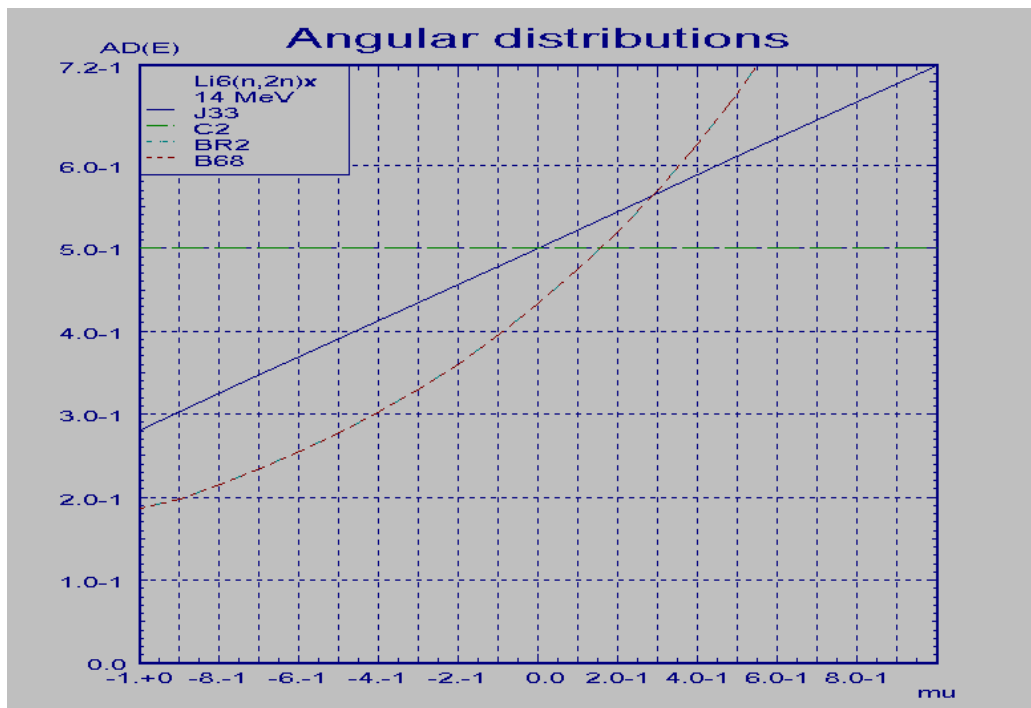


Рис. 29. Форма угловых распределений нейтронов из реакции $(n,2n)$ в различных библиотеках при энергии падающих нейтронов в 14 МэВ. Используемые сокращения для обозначения библиотек. B68 – ENDF/B-6.8; J33 – JENDL-3.3; C2 – CENDL-2; BR2 – BROND-2.2.

4.3. Угловые распределения трития из реакции ${}^6\text{Li}(n,t)$ в библиотеке BROND-2 заданы в файле MF=6 как изотропные в системе центра масс. В библиотеках CENDL-2 и JENDL-3.3 угловые распределения не даны. Угловые распределения трития из ENDF/B-6.8 приведены на рисунке 29. Угловые распределения до 1 МэВ получены в R-матричной параметризации. Для E_n выше 1 МэВ симметрия вперед-назад уменьшается с ростом энергии падающих нейтронов, что не отражает правильно физику процесса.

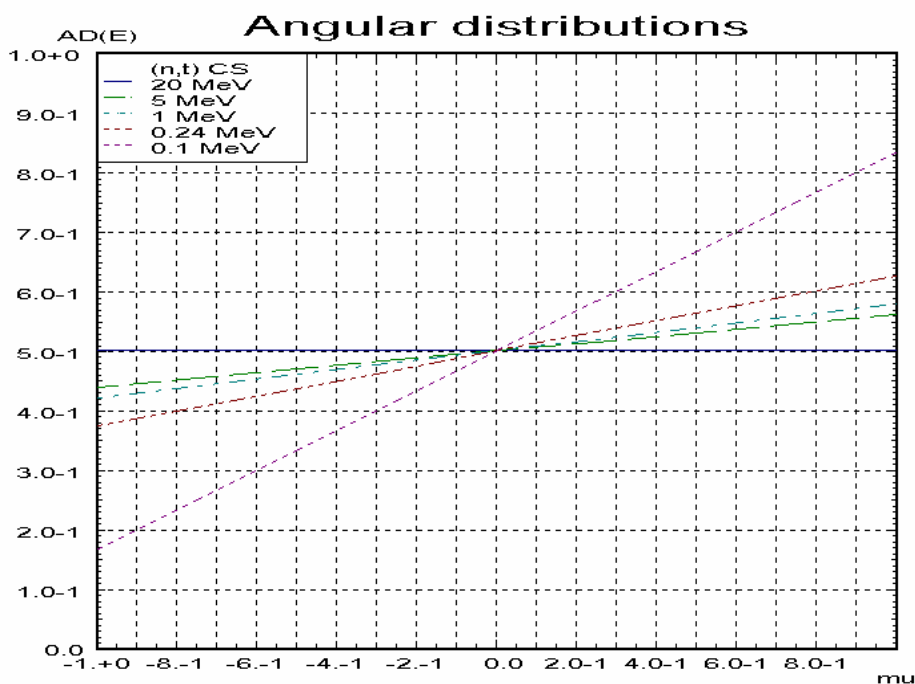


Рис. 30. Форма угловых распределений трития из реакции (n,t) в библиотеке ENDF/B-6.8.

4.3. Угловые распределения нейтронов из реакции (n,n'd) (MF=4 или MF=6, MT=32), отсутствуют во всех библиотеках кроме CENDL-2 (показаны на рисунке 31), поскольку в них эта реакция описывается как неупругое рассеяние ${}^6\text{Li}(n,n'){}^6\text{Li}^*$.

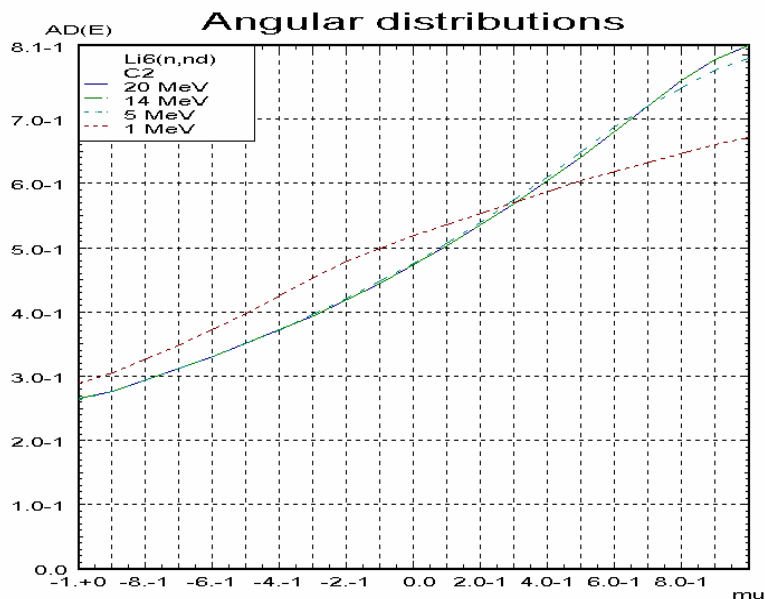


Рис. 31. Форма угловых распределений нейтронов из реакции ${}^6\text{Li}(n,n'd)\alpha$ в библиотеке CENDL-2.

Угловые распределения нейтронов из реакции ${}^6\text{Li}(n,n'd)\alpha$ описываемые в библиотеках ENDF/B-6.8 и JENDL-3.3 как неупругое рассеяние, заданы изотропными для всех уровней, за исключением уровня с энергией 2.185 МэВ (MT=53), первого, не являющегося псевдо-уровнем, а в JENDL-3.3 – также и для уровня с энергией 4.31 МэВ. В этих случаях они оценены на основе экспериментальных данных. В BROND-2 угловые распределения неупругого рассеяния с возбуждением первого уровня с энергией 2.185 МэВ были оценены на основе экспериментальных данных, а континуума уровней (рисунок 32) – с учетом всех возможных механизмов, включая реакции, не являющиеся рассеянием.

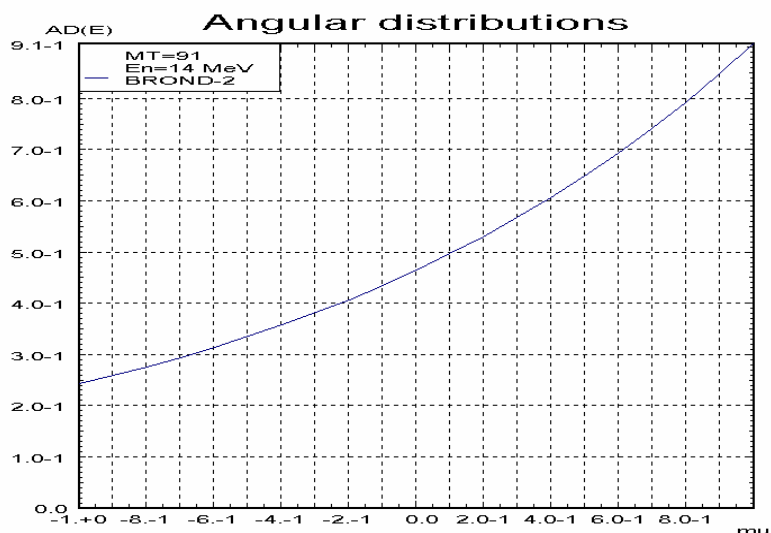


Рис. 32. Форма угловых распределений нейтронов из реакции $(n,n')x$ с возбуждением континуума уровней в библиотеке BROND-2.

Несомненным общим недостатком оценок угловых распределений вторичных частиц является то, что учитывались не все механизмы реакций последовательного и

одновременного распада. Кроме этого, отдельное задание угловых и энергетических распределений в области континуума уровней (а не коррелированных в MF=6) лишено большого смысла.

Учитывая, что качество описания угловых (и энергетических) распределений нейтронов из реакции ${}^6\text{Li}(n,n'd)\alpha$ не может быть улучшено без перехода от их представления в файлах MF=4 (MF=5) к файлу энерго-угловых распределений MF=6, где вносят вклад как различные механизмы так и разная кинематика реакций, в настоящее время для РОСФОНД можно рекомендовать угловые распределения из ENDF/B-6.8, так как неупругое рассеяние вероятно вносит основной вклад в полное сечение с выходом $n+d+\alpha$. является о.

5. Энергетические распределения вторичных частиц.

5.1. Спектр нейтронов из реакции ${}^6\text{Li}(n,n'd)\alpha$ задан в библиотеке BROND-2 для континуума уровней реакции неупругого рассеяния (MF=5, MT=91) и включает вклады разных механизмов последовательного и одновременного испускания частиц. Для нейтронов с энергией 14 МэВ он показан на рисунке 33. Тот же спектр в библиотеке CENDL-2 (рисунок 34) содержит вклад от дискретных уровней не выделенных в отдельные секции и поэтому является более жестким. В других библиотеках (ENDF/B-VI.8, JENDL-3.3) спектр нейтронов определяется через возбуждение псевдоуровней неупругого рассеяния и при энергии 14 МэВ представляет собой сумму спектра трехтельного развала представленного через псевдоуровни с максимумом при энергии в районе 5 МэВ и вклада от уровней коллективной природы. Без проведения детального сравнения и анализа спектров эмиссии вторичных нейтронов с последними экспериментальными данными, спектры из библиотеки ENDF/B-VI.8 могут быть рекомендованы для РОСФОНД.

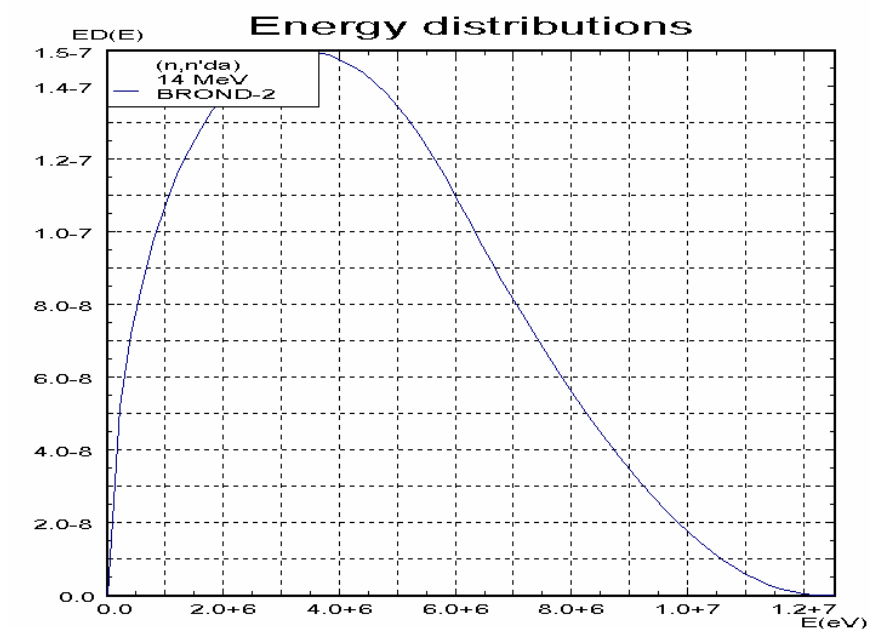


Рис. 33. Нормированный на 1 спектр нейтронов из реакции $(n,n'd)\alpha$ в библиотеке BROND-2 для нейтронов с начальной энергией 14 МэВ и возбуждением при неупругом рассеянии уровней непрерывного спектра .

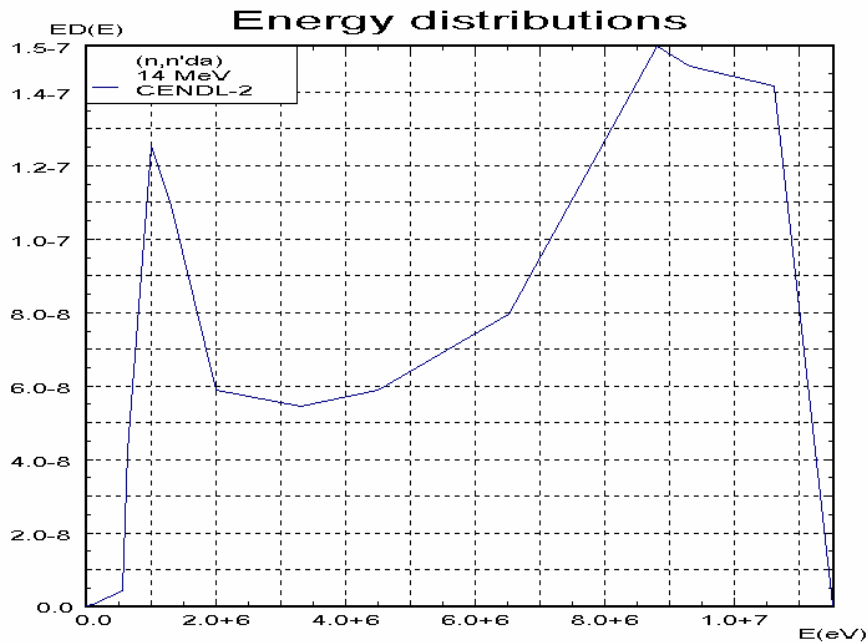


Рис. 34. Нормированный на 1 полный спектр нейтронов из реакции $(n,n'd\alpha)$ в библиотеке CENDL-2 для нейтронов с начальной энергией 14 МэВ.

5.2. Спектр нейтронов из реакции $(n,2n)$ в библиотеках ENDF/B-6.8 и BROND-2 задан как спектр четырехтельного развала $n+n+p+\alpha$ невзаимодействующих частиц и представлен на рисунке 35 для 14-МэВ падающих нейтронов. Тот же спектр в JENDL-3 определен в испарительной модели и является более мягким (рисунок 36). Наиболее реалистичным является по-видимому представление спектра в CENDL-2 (рисунок 37), где он задан вероятно суммой более жесткого спектра первого нейтрона и мягкого спектра второго нейтрона реакции $(n,2n)$.

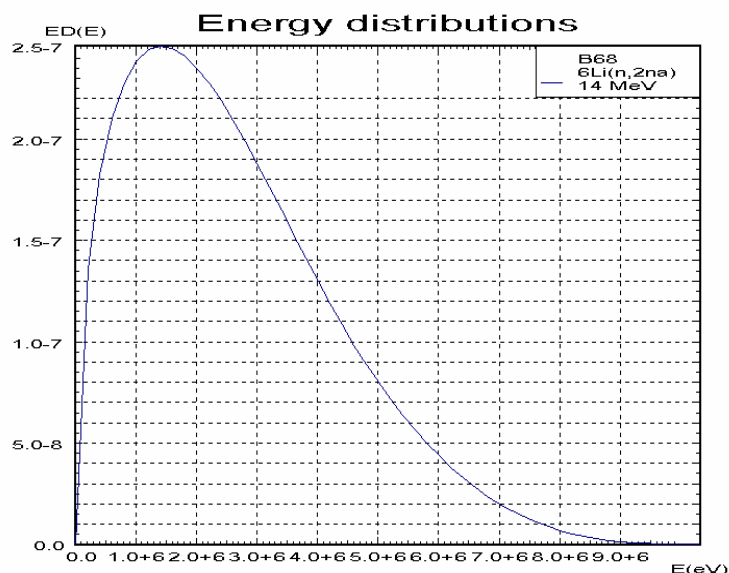


Рис. 35. Нормированный на 1 спектр вторичных нейтронов из реакции $(n,2n)_x$ в библиотеке ENDF/B-6.8 для нейтронов с энергией 14 МэВ.

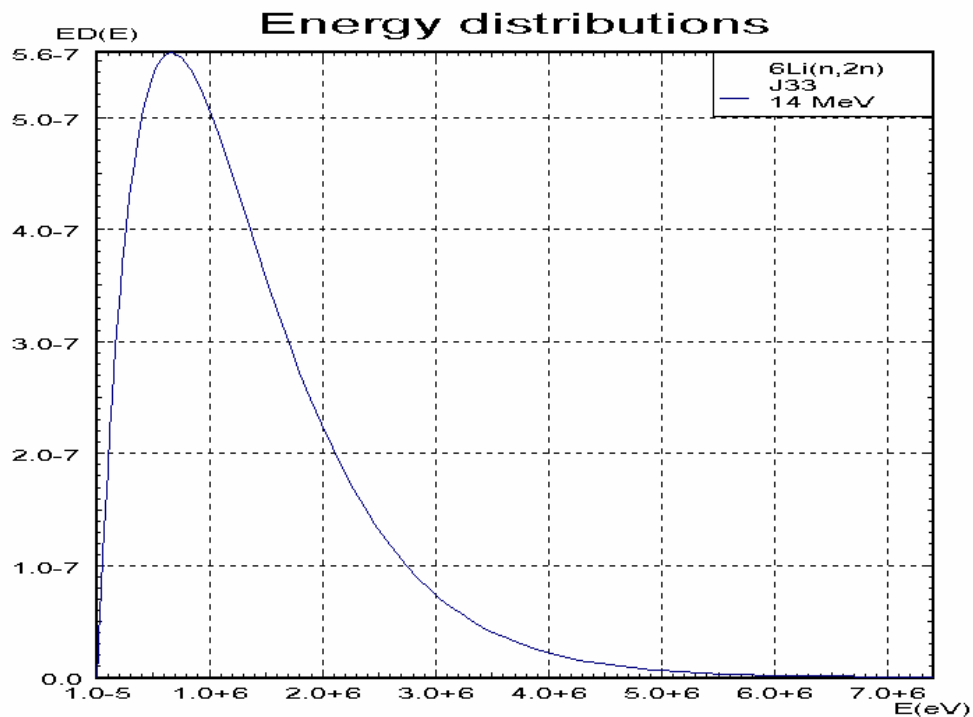


Рис. 36. Нормированный на 1 спектр вторичных нейтронов из реакции $(n,2n)_x$ в библиотеке JENDL-3.3 для нейтронов с энергией 14 МэВ.

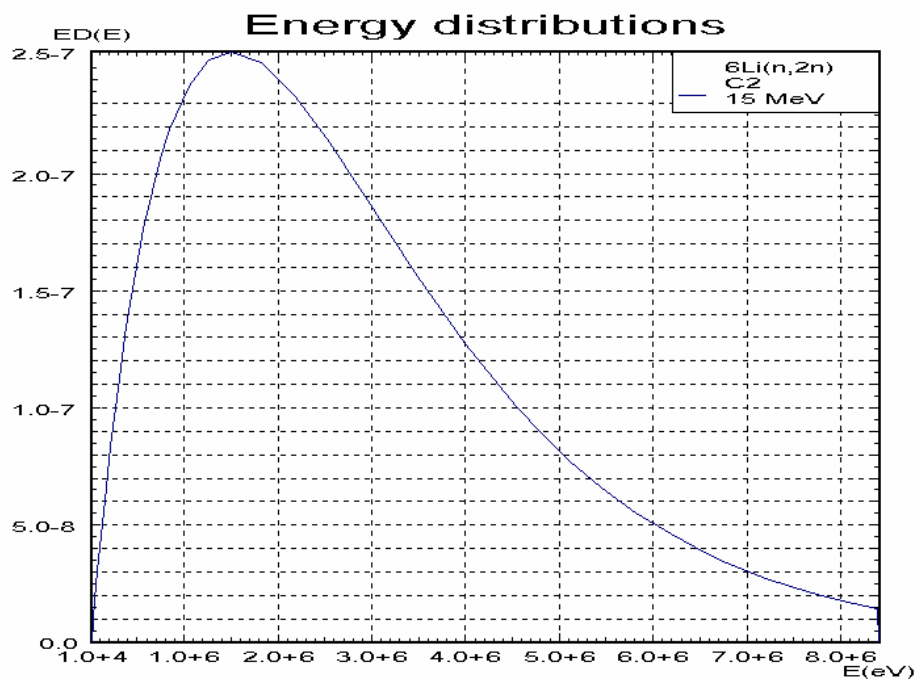


Рис. 37. Нормированный на 1 спектр вторичных нейтронов из реакции $(n,2n)_x$ в библиотеке CENDL-2 для нейтронов с энергией 14 МэВ.

6. Образование гамма лучей

6.1. Спектр гамма-лучей неупругого рассеяния в библиотеках ENDF/B-6.8 и JENDL-3.3 заданы в файле MF=12 только для MT=57 (возбуждение уровня с энергией 3.652 МэВ) единственным гамма переходом в основное состояние с единичной множественностью. Испускание изотропно и определено в файле MF=14. В БРОНД-2 этот процесс описывается в файле MF=6.

6.2. Спектр гамма-лучей захвата в библиотеках ENDF/B-6.8 и JENDL-3.3 определен файлом MF=12. Множественность равна 1.39. В 61% случаев испускается один квант с энергией 7.2505 МэВ; в 39% случаев – каскад из квантов с энергиями 6.7729 МэВ и 0.4776 МэВ. Испускание изотропно и определено в файле MF=14. В БРОНД-3 этот процесс описывается файлом MF=6 в котором допущена ошибка. В CENDL-2 образование гамма-квантов в нейтронных реакциях на литии-6 не приводится. Целесообразность принять данные из ENDF/B-6.8 и JENDL-3.3 не вызывает сомнений.

7. Ковариационные матрицы погрешностей

Декларировано в свободном тексте, что ковариационные матрицы погрешностей приведены в библиотеке ENDF/B-6.8 для сечения упругого рассеяния и (n,t) до энергии 4 МэВ как взятые из оценки стандартов. В действительности, приведены только экспертные оценки процентных погрешностей в свободном тексте (MF=1). В других библиотеках погрешности отсутствуют. В РОСФОНД рекомендуется включить ковариационную матрицу погрешностей подготовленную в рамках координационной исследовательской программы МАГАТЭ по оценке нейтронных стандартов (как и для сечения). Процентные погрешности полученные в рамках этой программы заметно меньше, чем приводятся в экспертной оценке. Обоснование таких погрешностей приводится в работе [5].

8. Перечень цитированных работ

1. J.K. Tuli, Nuclear Wallet Cards, NNDC, BNL, USA, April 2005.
2. <http://www.tunl.duke.edu/NuclData/>, выборка 25 июля 2005.
3. <http://www-nds.iaea.org/exfor/endlf00.htm>, выборка 4 июля 2005.
4. http://www.nndc.bnl.gov/csewg_members/eval/, выборка 4 июля 2005.
5. V.G. Pronyaev et al., Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Santa Fe, NM, USA, 26 September – 1 October 2004, p. 808 (2005).

9. Заключение

9.1. Рекомендованная оценка и ее улучшение

На основании всех представленных данных рекомендуется отобрать оценку из библиотеки ENDF/B-6.8 как базовую для ее последующего улучшения. При формировании файла библиотеки РОСФОНД в эту библиотеку внесены следующие изменения.

1. Угловые распределения упругого рассеяния для энергии выше 11.8 МэВ заменены на взятые из BROND-2 и положительны во всем интервале энергий и углов.
2. Сечение упругого рассеяния и реакции (n,t) до энергии нейтронов в 2,8 МэВ заменены на значения, полученные в новой оценке стандартов.
3. Введены ковариационные матрицы погрешностей для сечений упругого рассеяния и реакции (n,t) до энергии нейтронов в 2,8 МэВ приведённые в новой оценке стандартов. В связи с форматными требованиями эти матрицы были расширены до энергии нейтронов в 20 МэВ, при этом погрешностей выше энергии в 2,8 МэВ были приписаны весьма грубо методом экспертной оценки. Поэтому результаты приведённые в файле MF=33 являются предварительными и относятся именно к тем значениям сечений (n,t) и упругого рассеяния которые приведены в файле MF=3.

Проблему совместного описания полного, упругого сечения и сечения реакции (n,t) в интервале энергий 1 – 2,8 МэВ данной оценки нельзя считать полностью решённой, что связано с существующими противоречиями между экспериментальными данными. Сравнение оцененных данных показано на рисунках 38, 39 и 40, где парциальные и полные сечения приведены для удобства сравнения в одной и той же шкале. Отличия в принятых сечениях реакций (n,t) и упругого рассеяния и в принятом полном сечении от данных ENDF/B-VI невелики. Однако, несмотря на то, что произошло некоторое улучшение описания экспериментальных данных по сечению упругого рассеяния и сечению реакции (n,t) в области энергий 1 – 2,8 МэВ, расхождения с экспериментальными данными по полному сечению в этой области даже возросло. Частично это может быть объяснено тем, что результаты измерения сечения (n,t) с помощью камер деления должны быть поправлены на эффект утечки частиц широко обсуждаемый в последнее время. Эффект заключается в том, что существует область перекрытия сигналов, приходящих от тритона и альфа частицы, с сигналом от ядра отдачи при рассеянии нейтрона. Разделение сигналов методами, использовавшимися в ранних измерениях, приводило к занижению определяемого сечения реакции (n,t). В то же время, как было отмечено выше, полные сечения в измерениях с высоким разрешением приведённые на рисунке 38 не представлены окончательными результатами и нуждаются в введении поправок. Несмотря на то, что экспериментальные данные по полному сечению при оценке методом наименьших квадратов с использованием R- матричной модели учитывались, на результаты оценки вдали от резонанса они повлияли мало. При значении χ^2 порядка 1 при описании всех данных такое локальное расхождение свидетельствует о наличии противоречий в анализируемых данных (расхождений, превышающих приписанные результатам погрешности). Следует отметить, что обоснованное использование метода наименьших квадратов предполагает отсутствие подобных противоречий.

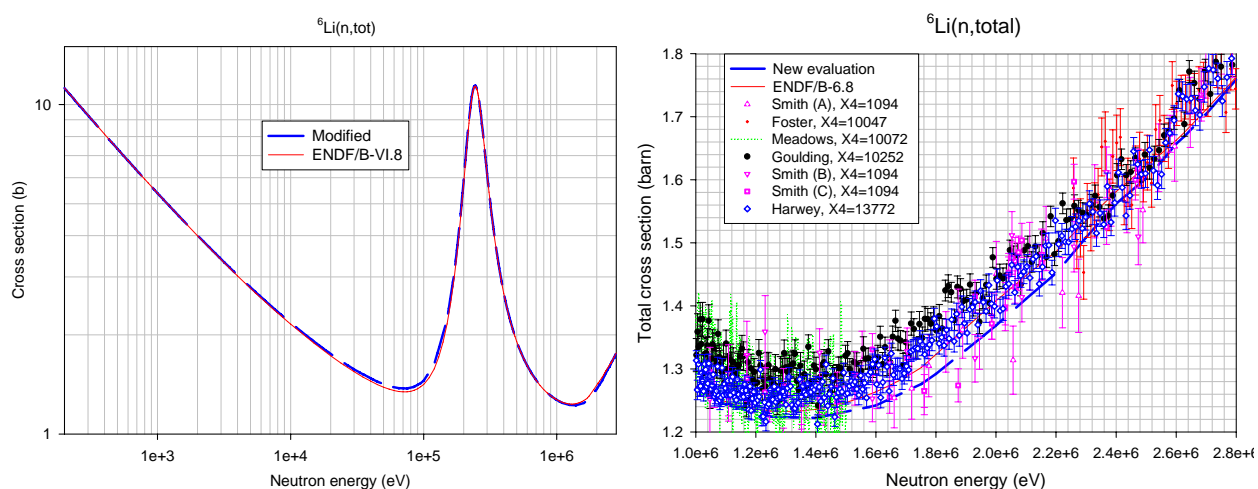


Рис. 38. Полное сечение в ENDF/B-6.8 и новой оценке стандартов.

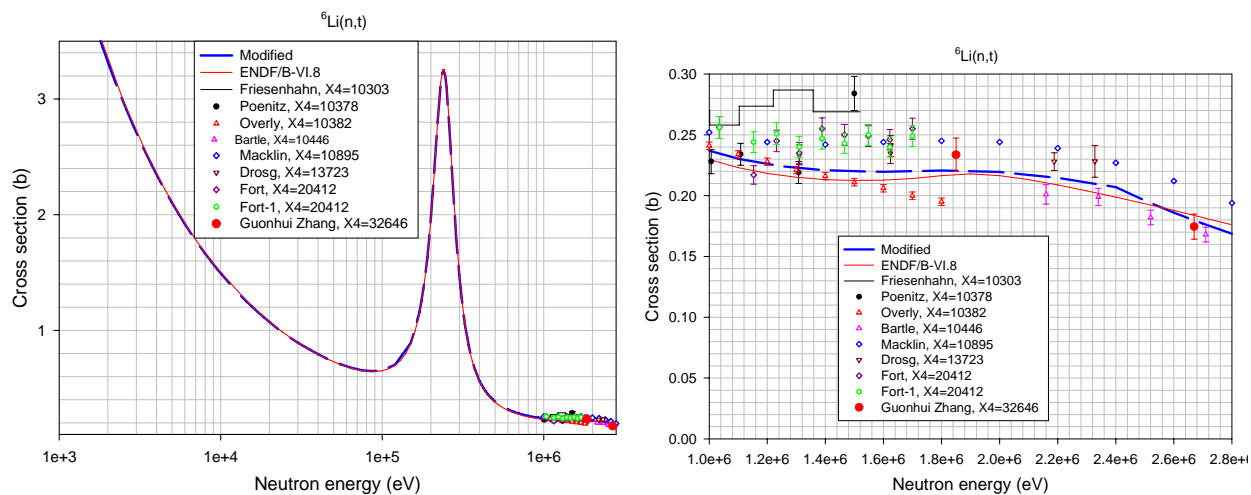


Рис. 39. Сечение реакции (n,t) в ENDF/B-6.8 и новой оценке стандартов.

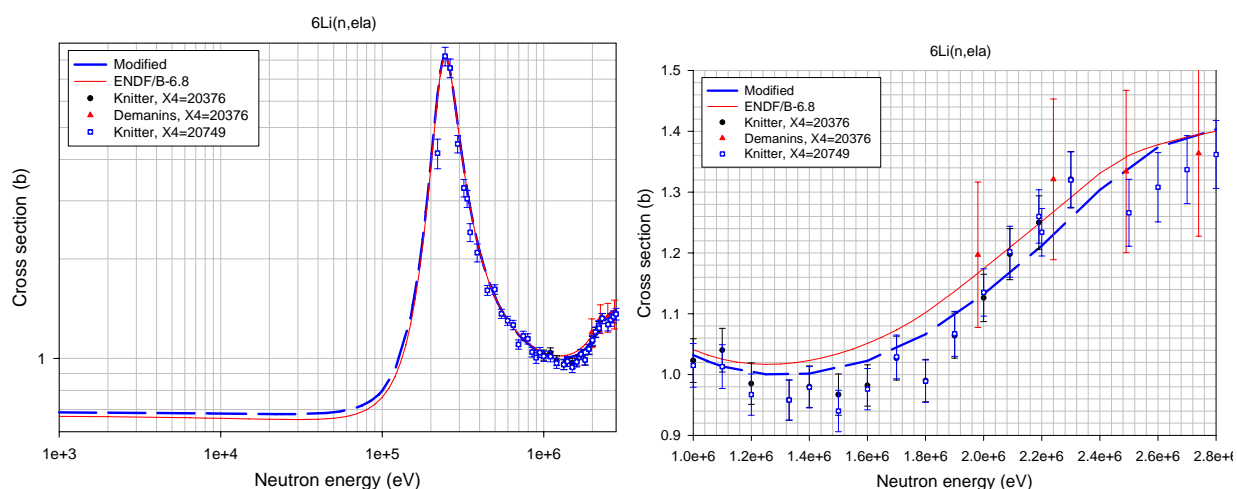


Рис. 40. Сечение упругого рассеяния в ENDF/B-6.8 и новой оценке стандартов.

На рисунке 41 приведены погрешности сечений упругого рассеяния и реакции (n,t), полученные при оценке стандартов. Там же показаны результаты прежней оценки стандартного сечения и экспертные оценки погрешностей, выполненные в 1991 г.. Приведённые процентные ошибки характеризуют только диагональную часть ковариационной матрицы ошибок. Ковариационные матрицы ошибок, оцененные в R-матричной модели, обладают существенными корреляциями. Сами оценки опираются на большой круг дополнительных данных, привлекавшихся для оценки сечений в нейтронных каналах и адекватную физическую модель, что в совокупности существенно уменьшает процентную ошибку. Этим и может быть объяснена существенная разница между экспертной оценкой и оценкой, получаемой на основе R-матричного модельного описания энергетического хода сечений методом наименьших квадратов.

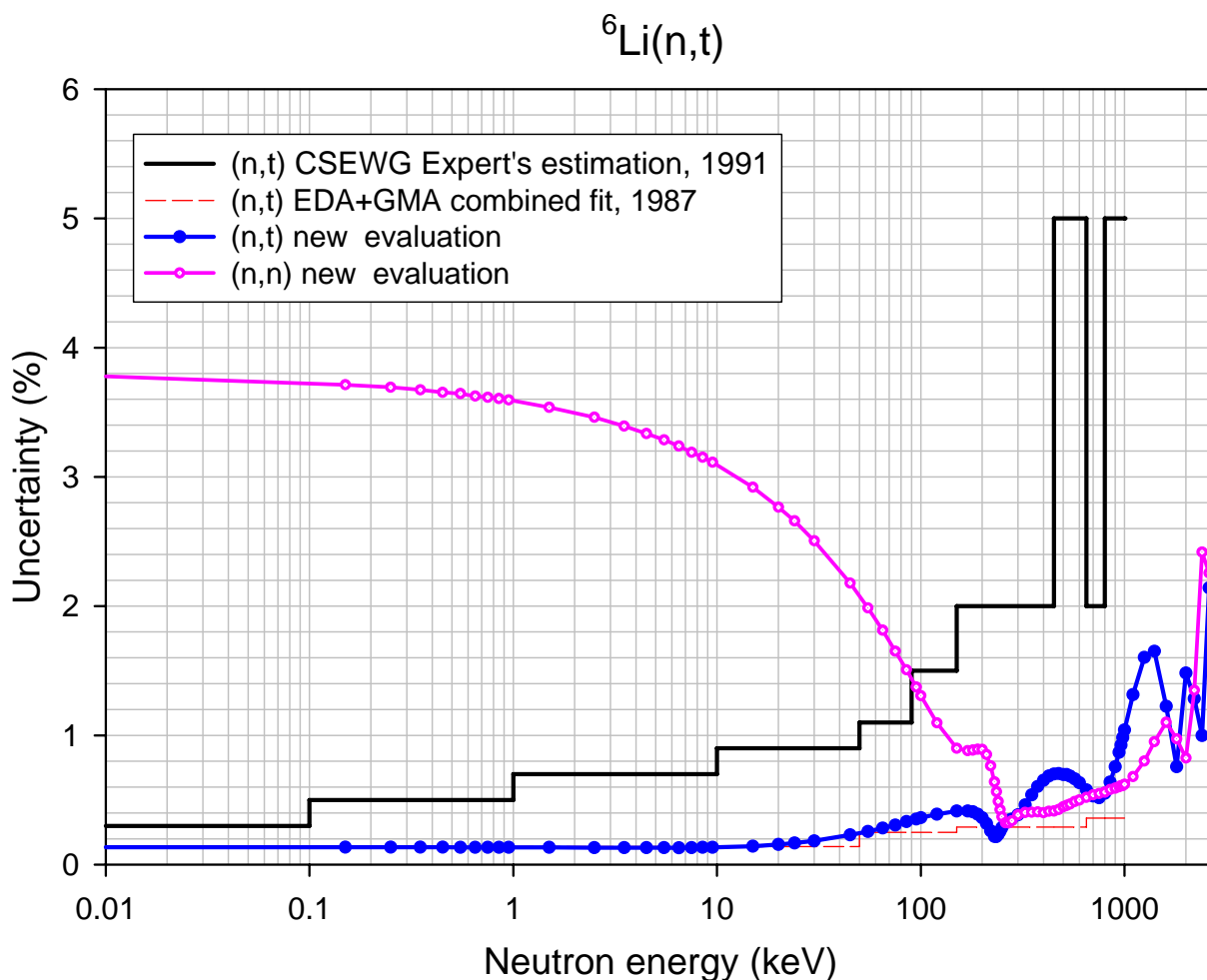


Рис. 41. Погрешности упругого рассеяния и реакции (n,t).

Устранение отмеченных выше противоречий в принятых оцененных данных - это задача будущего уточнения библиотеки РОСФОНД, которое для рассматриваемого материала, используемого в качестве нейтронного стандарта, должно, разумеется, осуществляться в рамках ведущегося международного сотрудничества.

9.2. Автор проведенного отбора оцененных данных

В.Г.Проняев.

9.3. Содержание файла РОСФОНД:

| MF | MT | |
|----|---------|---|
| 1 | 451 | – заголовочная секция. |
| 3 | 1 | – полное сечение. |
| 3 | 2 | – сечение упругого рассеяния. |
| 3 | 4 | – полное сечение неупругого рассеяния. |
| 3 | 24 | – сечение реакции ${}^6\text{Li}(n,2n\alpha){}^2\text{H}$ |
| 3 | 51 - 81 | – сечения неупругого рассеяния с возбуждением дискретных уровней и псевдоуровней. |
| 3 | 102 | – сечение радиационного захвата ${}^6\text{Li}(n,\gamma){}^7\text{Li}$ |
| 3 | 103 | – сечение реакции ${}^6\text{Li}(n,p){}^6\text{He}$. |
| 3 | 105 | – сечение реакции ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$. |
| 4 | 2 | – угловые распределения упруго рассеянных нейтронов. |

- 4 24 – угловые распределения нейтронов из реакции ${}^6\text{Li}(n,2n\alpha){}^2\text{H}$.
- 4 51 - 81 – угловые распределения неупругого рассеяния с возбуждением дискретных уровней и псевдоуровней нейтронов.
- 5 24 – энергетические спектры нейтронов из реакции ${}^6\text{Li}(n,2n\alpha){}^2\text{H}$.
- 12 57 – выходы дискретных фотонов при возбуждении уровня неупругого рассеяния.
- 12 102 – выходы дискретных фотонов радиационного захвата.
- 14 57 – угловые распределения дискретных фотонов при возбуждении уровня неупругого рассеяния.
- 14 102 – угловые распределения дискретных фотонов радиационного захвата.
- 33 1 – ковариационная матрица погрешностей полного сечения.
- 33 2 – ковариационная матрица погрешностей сечения упругого рассеяния.
- 33 105 – ковариационная матрица погрешностей сечение реакции ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$.

3.2. Литий-7

1. Общие характеристики

- a. $Z=3$
- b. $A=7.016004073 \pm 0.000000506$
- c. $A_w=6.955733173 \pm 0.000000561$
- d. Содержание в естественной смеси: 92.5 ат%;
93.5 вес%
- e. Перечень важнейших нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт [*]) |
|-----|------------------|---------|---------------------------|-----------------------------|
| 2 | (n,elas) | 0 | 0 | Li-7 |
| 16 | (n,2n) | -7.251 | 8.293 | Li-6 |
| 24 | (n,2n α) | -8.724 | 9.978 | H-2 |
| 25 | (n,3n α) | -10.949 | 12.523 | H-1 |
| 51 | (n,n) | -0.4776 | 0.5462 | Li-7 |
| 52 | (n,n') | -4.630 | 5.295 | Li-7 |
| 102 | (n, γ) | 2.033 | 0 | Li-8 |
| 205 | (n,xt)=(n,n't) | -2.483 | 2.840 | T, He-4 |

- f. Схема уровней:

| E (кэВ) | J π | Γ (кэВ) или $T_{1/2}$ | Распад |
|---------------------|---------|------------------------------|---------------|
| 0 | 3/2- | Стабильный | стабильный |
| 477.612 \pm 0.003 | 1/2- | 105 \pm 3 фтсек | γ |
| 4630 \pm 9 | 7/2- | 93 \pm 8 | t, α |
| 6680 \pm 50 | 5/2- | 875(+200 -100) | t, α |
| 7459.5 \pm 1.0 | 5/2- | 89 \pm 7 | n,t, α |
| 9670 \pm 100 | 7/2- | \approx 400 | n,t, α |
| 9850 | 3/2- | \approx 1200 | n, α |
| 11240 \pm 30 | 3/2- | 260 \pm 35 | n,p |
| 13700 | | \approx 500 | n |
| 14700 | | \approx 700 | n |

- g. Радиоактивность: не радиоактивен

2. Резонансная область: (MF=2)

- 2.1. Спин и четность $J^\pi = 3/2^-$;
- 2.2. Радиус рассеяния: $R = 0.2778311 * 10^{-12}$ см.
- 2.3. Область неразрешенных резонансов отсутствует.

3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)

При отборе оцененных нейтронных данных для библиотеки РОСФОНД рассматривались следующие оценки, используемые в современных библиотеках оцененных данных:

- оценка С.Чиба (S.Chiba) и К.Шибата (K.Shibata) 1984 г., включенная в библиотеку JENDL-3.3 без изменений из библиотеки JENDL-3.2;
- оценка Янга (P.Young), выполненная в 1988 году и включенная в библиотеку ENDF/B-6;
- оценка И.Бондаренко, выполненная в 1984 году и включенная в библиотеку БРОНД-2.

Оценки EFF-2.4, JEFF-3.1 не рассматривались, т.к. в них данные для лития-7 заимствованы (с незначительными изменениями) из библиотеки ENDF/B-6 или библиотеки ENDF/B-5.2. Оценка ENDF/B-6 без изменений принята и в ENDF/B-7.

3.1. Полное сечение (MT=1).

Оценка JENDL-3.3 выше 100 кэВ выполнена на основе экспериментальных данных [1-4]. Ниже этой энергии полное сечение получено как сумма 0.97 барн (сечение упругого рассеяния в тепловой точке) и сечения радиационного захвата.

Оценка BROND-2:

- а) воспроизводит экспериментальные данные [5] в интервале 1 – 100 кэВ,
- б) получена на основе экспериментальных данных [1] (взятых со сдвигом по энергии – 6 кэВ) в интервале 100 кэВ – 1 МэВ,
- в) воспроизводит экспериментальные данные [6] в интервале 1 – 2 МэВ,
- г) совпадает с оценкой ENDF/B-5.2 [7] в интервале 2 – 16 МэВ.

Оценка ENDF/B-6 выполнена на основе метода Байеса с помощью программы GLUCS [8]. В качестве априорных данных использовались результаты оценки ENDF/B-5.2 [7]. В области энергий нейтронов 16 – 20 МэВ единственными экспериментальными данными являются измерения полного сечения и сечения неупругого рассеяния. Для надежного определения парциальных сечений в этой области были выполнены расчеты в рамках сферической оптической модели по программе SCATOPT [9] в энергетическом интервале 10 – 20 МэВ. Кроме измерений полного сечения [10] в анализе использовались результаты измерений угловых распределений упругого рассеяния нейтронов [11,12].

Как следует из Рис.1, оценка ENDF/B-6 находится в приемлемом согласии с экспериментальными данными, в частности (см. Рис.2), с последними прецизионными измерениями полного сечения, выполненными Abfalterer et al. [13] (декларируемая

статистическая погрешность измерений – 0.5%), хотя в интервале 5 – 9 МэВ оценка ENDF/B-6 лежит систематически выше результатов этих измерений. Оценка JENDL-3.3, лежащая еще выше, представляется несколько завышенной, и потому предпочтение следует отдать оценке ENDF/B-6.

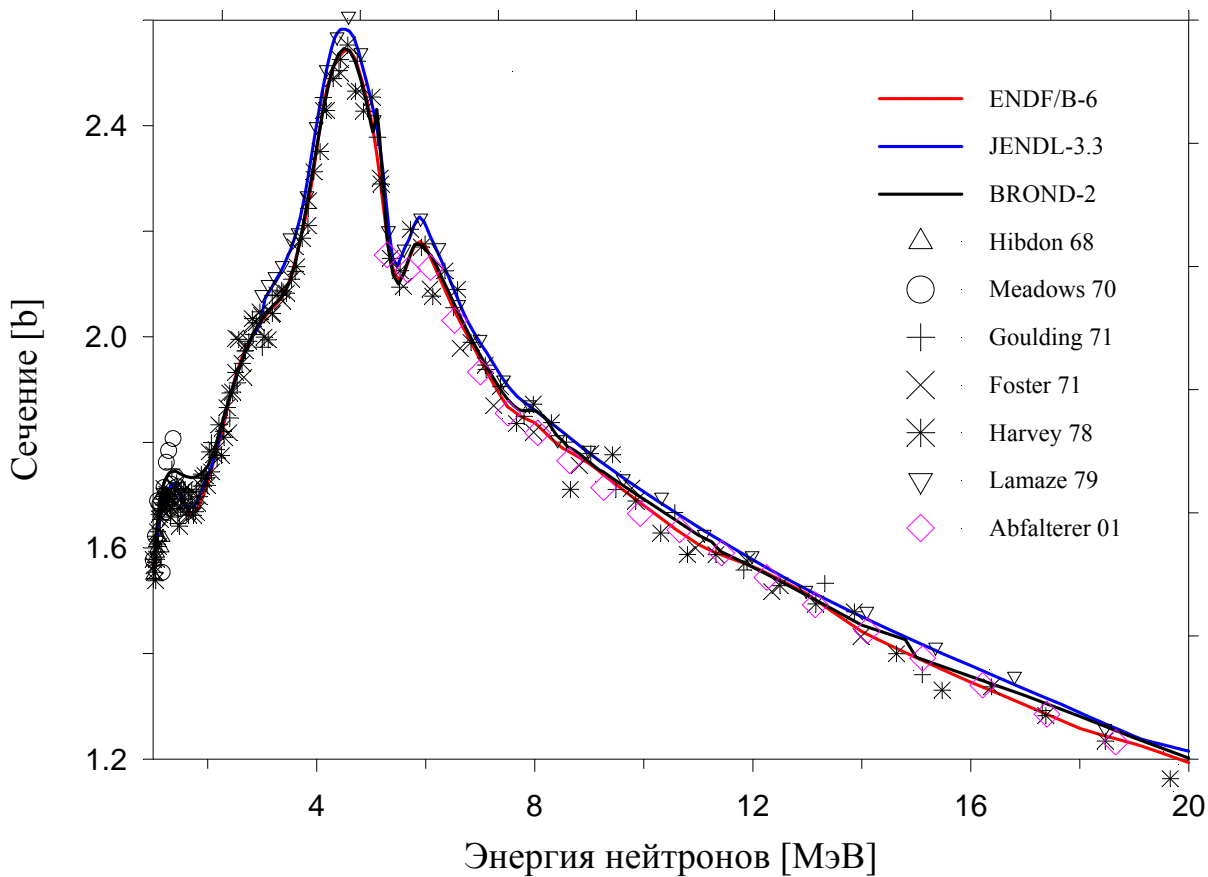


Рис.1 Оцененное сечение реакции ${}^7\text{Li}(n,\text{tot})$ из библиотек ENDF/B-6, JENDL-3.3 и BROND-2 в сравнении с экспериментальными данными.

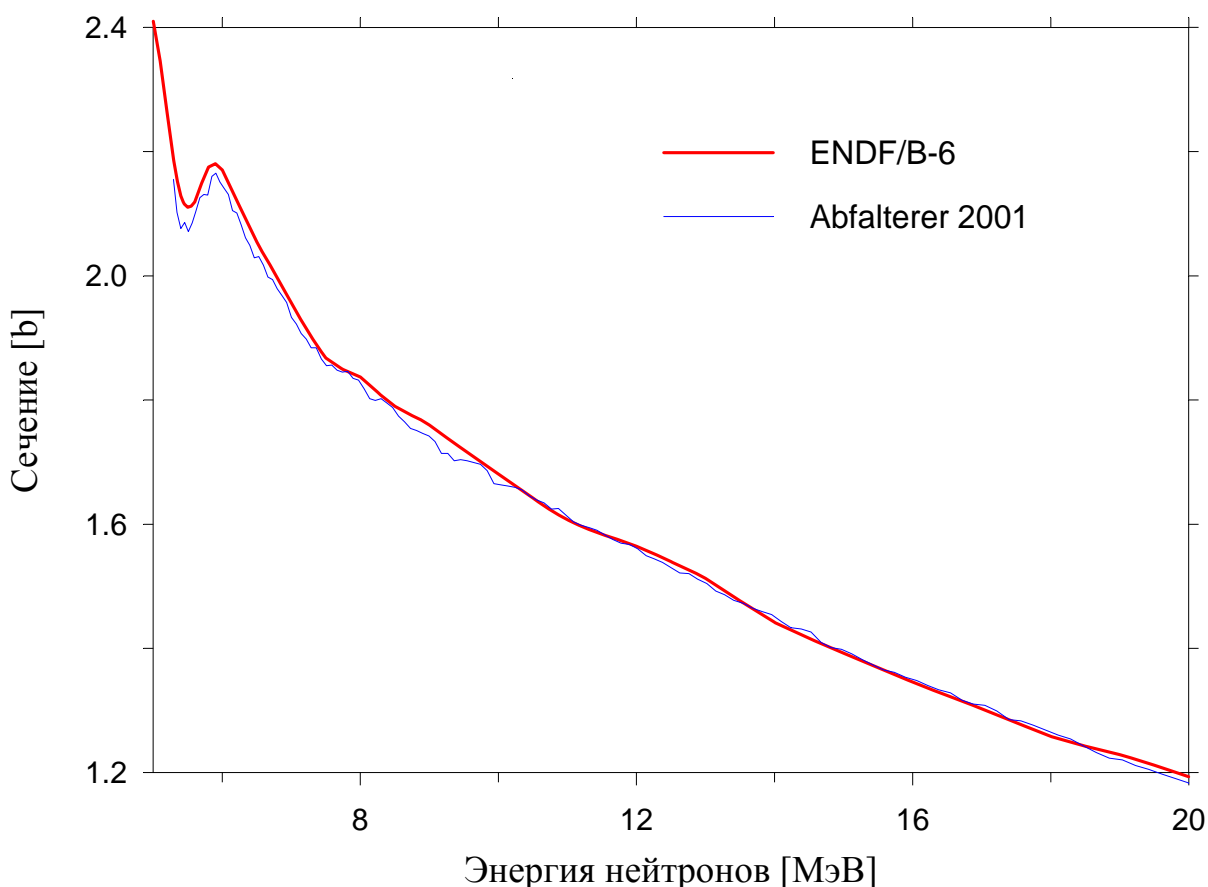


Рис.2 Оцененное сечение реакции ${}^7\text{Li}(n,\text{tot})$ из библиотеки ENDF/B-6 в сравнении с экспериментальными данными Abfalterer 2001.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Оценка сечения упругого рассеяния предопределена трудностями, сопровождающими

- а) прямые измерения данной величины вообще и
- б) процедуру разделения вкладов двух каналов нейтронного взаимодействия - сечения упругого рассеяния и сечения неупругого рассеяния на 1-м возбужденном уровне ядра Li-7.

Ниже 100 кэВ сечение упругого рассеяния в оценке JENDL-3.3 приравнено 0.97 барн (сечению упругого рассеяния в тепловой точке, оцененному Мухабхабом как 0.97 ± 0.04 барна). Выше 100 кэВ сечение упругого рассеяния получено как разность между полным сечением и сечением реакций из условия соблюдения баланса.

Сечение упругого рассеяния в оценке БРОНД-2 получено как разность между полным сечением и сечением реакций из условия соблюдения баланса на всем интервале изменения энергий нейтронов.

Оценка сечения упругого рассеяния в ENDF/B-6 выполнена следующим образом. На первом этапе в рамках байесовского подхода анализировались экспериментальные данные по

- 1) сечению неупругого рассеяния с возбуждением 1-го уровня ядра Li-7,
- 2) сумме сечений упругого и неупругого рассеяния.

На втором этапе сечение упругого рассеяния определялось по разности между двумя оцененными величинами.

Сравнение оценок с немногочисленными прямыми измерениями сечения упругого рассеяния нейтронов приведено на Рис.3. При энергиях ниже 6 МэВ для всех оценок характерно примерно одинаковое качество описания экспериментальных данных. В интервале 12 – 20 МэВ оценка БРОНД-2 существенно занижает сечение упругого рассеяния.

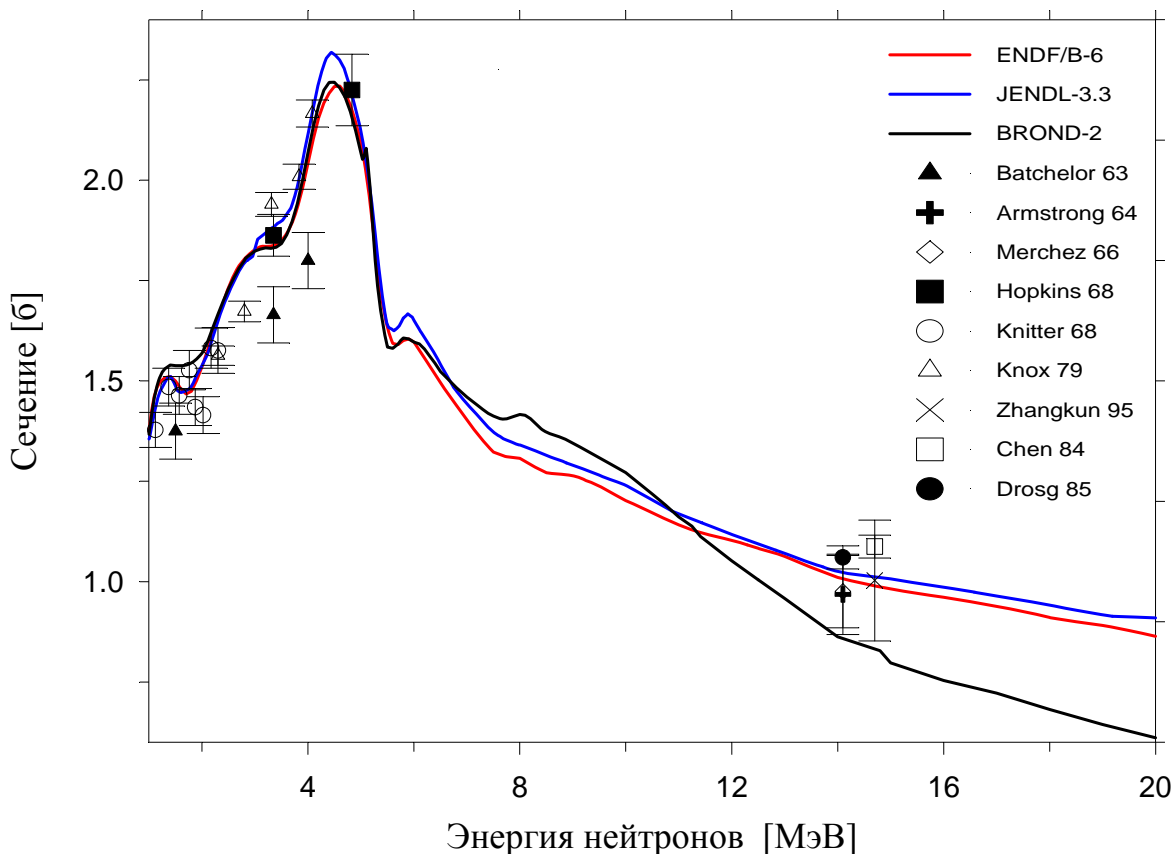


Рис.3 Оцененное сечение реакции ${}^7\text{Li}(n,el)$ из библиотек ENDF/B-6, JENDL-3.3, BROND-2.

3.3. Сечение неупругого рассеяния.

Как следует из схемы уровней ${}^7\text{Li}$ (см. пункт 1.6), классическое неупругое рассеяние осуществляется только при возбуждении первого уровня. При возбуждении остальных уровней осуществляется реакция $(n,n't)$, которая будет описана ниже. Соответственно, в данном разделе рассматривается только сечение неупругого рассеяния с возбуждением 1-го уровня.

3.3.1 Сечение неупругого рассеяния с возбуждением 1-го уровня (MT=51).

Все оценки (см. Рис.4) основаны на статистическом анализе экспериментальных данных. Соответственно, отличия в оценках обусловлены количеством и качеством анализируемых экспериментальных данных.

Оценка JENDL-3.3 выполнена с учетом единственного набора экспериментальных данных [14]. Методика оценки не приводится.

Оценка БРОНД-2 основана на экспериментальных данных [15-19]. Методика оценки не описана.

Оценка ENDF/B-6 выполнена в рамках байесовского подхода (по программе GLUCS [8]) с учетом всех доступных экспериментальных данных. В качестве априорной информации использовались оцененные сечения из библиотеки ENDF/B-5.2 [7]. Как видно из Рис.4, оценка ENDF/B-6 лучше других оценок описывает экспериментальные данные и является предпочтительной.

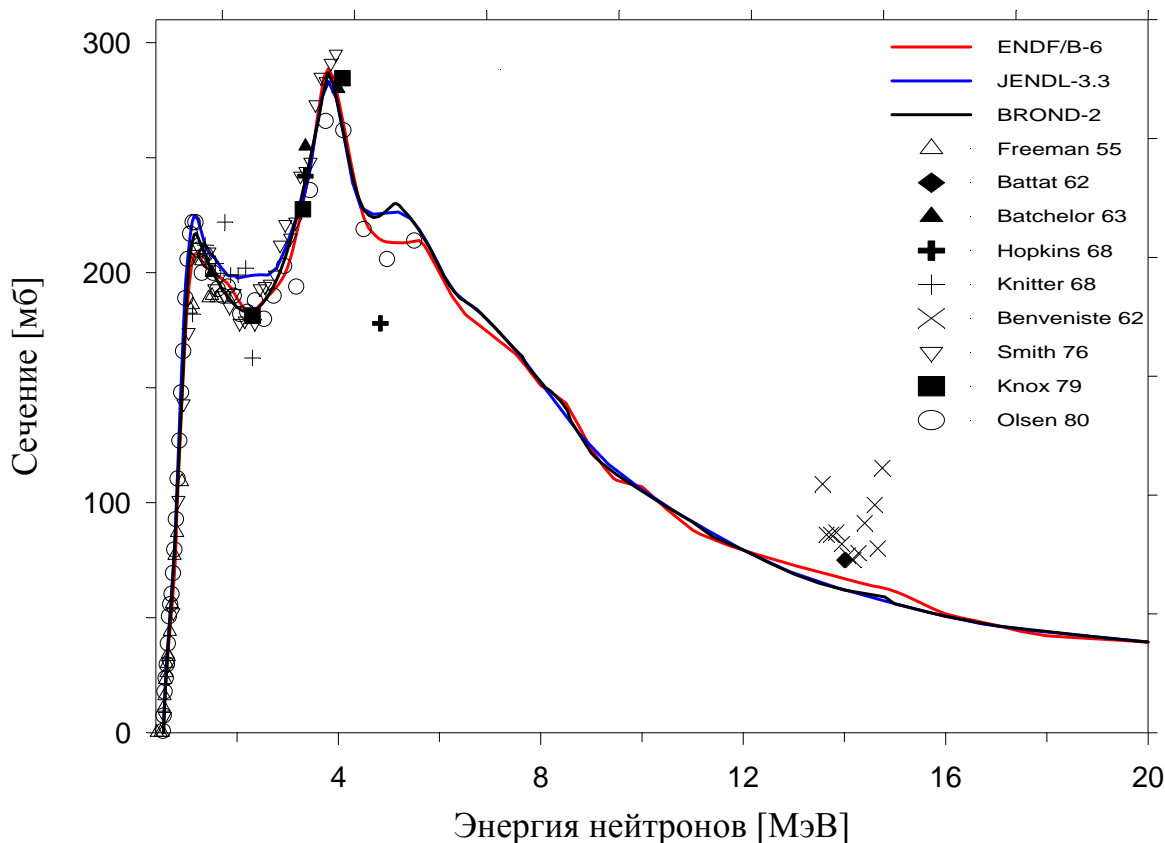


Рис.4 Оцененное сечение реакции ${}^7\text{Li}(n,inel)$ (с возбуждением 1-го уровня Li-7) из библиотек ENDF/B-6, JENDL-3.3, BROND-2.

3.4. Сечения реакций (n,2n) (MT=16), (n,2n α) (MT=24), (n,3n α) (MT=25).

Нейтронная реакция на Li-7 с вылетом двух нейтронов реализуется через два канала – реакцию (n,2n) с порогом 8.29 МэВ и реакцию (n,2n α) с порогом 9.98 МэВ. Сечения этих реакций малы (десятки миллибарн) на всем интервале изменения энергии нейтронов (см. Рис.5), имеют высокий эффективный порог и, соответственно, не представляют сколько-нибудь значимого практического интереса для реакторных приложений (за исключением термоядерных реакторов). Имеются только три измерения полного сечения реакции (n,2n), выполненные в экспериментах [41,42]. Именно они выступали в качестве реперных точек во всех рассматриваемых оценках.

Оценка JENDL-3.3 основана на экспериментальных данных. Методика оценки не приводится. В секции MT=16 дано полное сечение реакции (n,2n), которое включает и сечение реакции (n,2n α).

В отличие от JENDL-3.3 в других библиотеках полное сечение $(n,2n)$ расщеплено на компоненты.

В частности, в библиотеке BROND-2 полное сечение $(n,2n)$ заимствовано из оценки JENDL-3.3 и разбито на 2 равные доли – “чистое” сечение $(n,2n)$ (MT=16) и сечение $(n,2n\alpha)$ (MT=24).

В оценке для ENDF/B-6 на первой стадии был выполнен статистический анализ суммы сечений $(n,2n)$ и $(n,2n\alpha)$. На втором этапе сумма разделена на “чистое” сечение $(n,2n)$ (MT=16) и сечение $(n,2n\alpha)$ (MT=24) в пропорции, принятой в оценке ENDF/B-5.1.

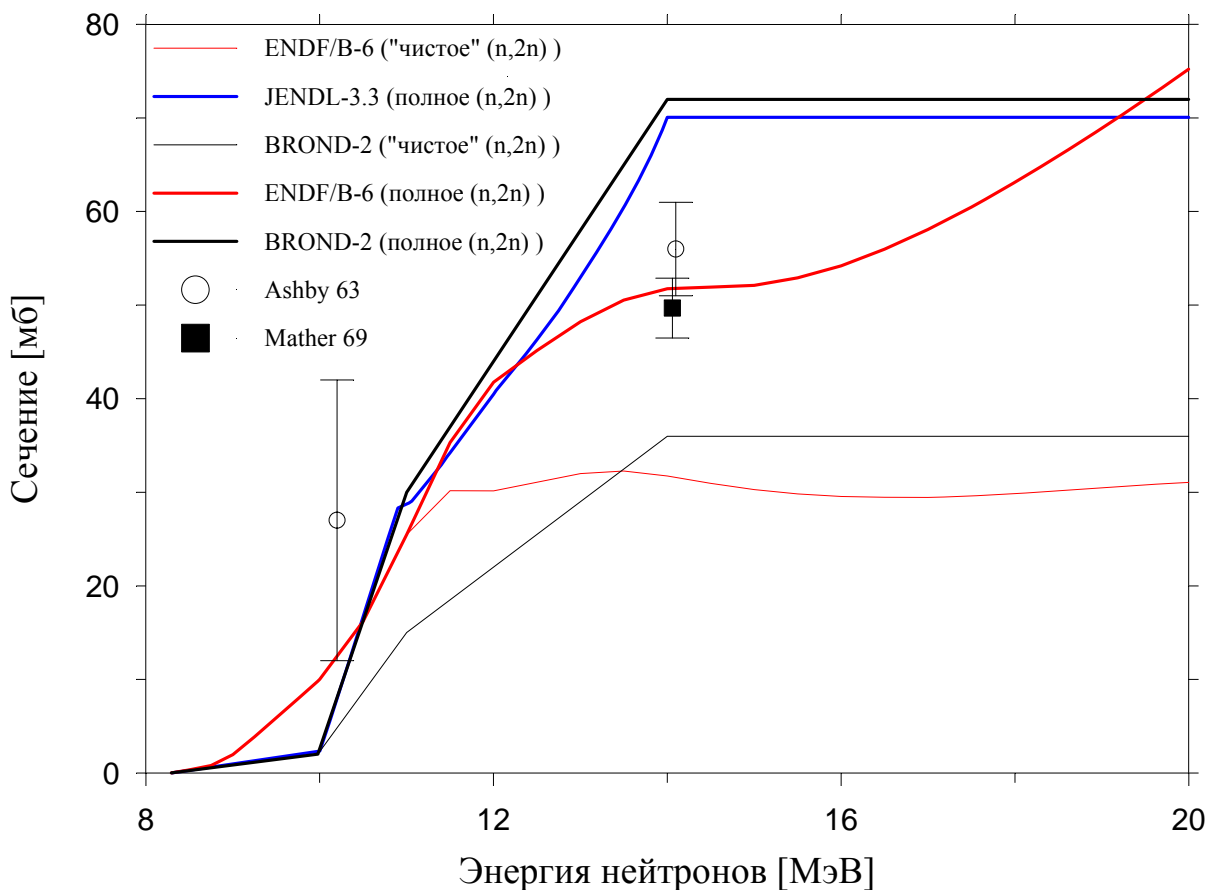


Рис.5 Оцененные сечения (“чистое” и полное) реакции ${}^7\text{Li}(n,2n)$ из библиотек ENDF/B-6, JENDL-3.3, BROND-2 в сравнении с измерениями полного сечения реакции $(n,2n)$.

Нейтронная реакция на Li-7 с вылетом трех нейтронов может быть реализована только через один канал – реакцию $(n,3n\alpha)$. Как следует из Рис.6, сечение реакции $(n,3n\alpha)$ не превышает 10 мб при энергиях нейтронов меньше 20 МэВ.

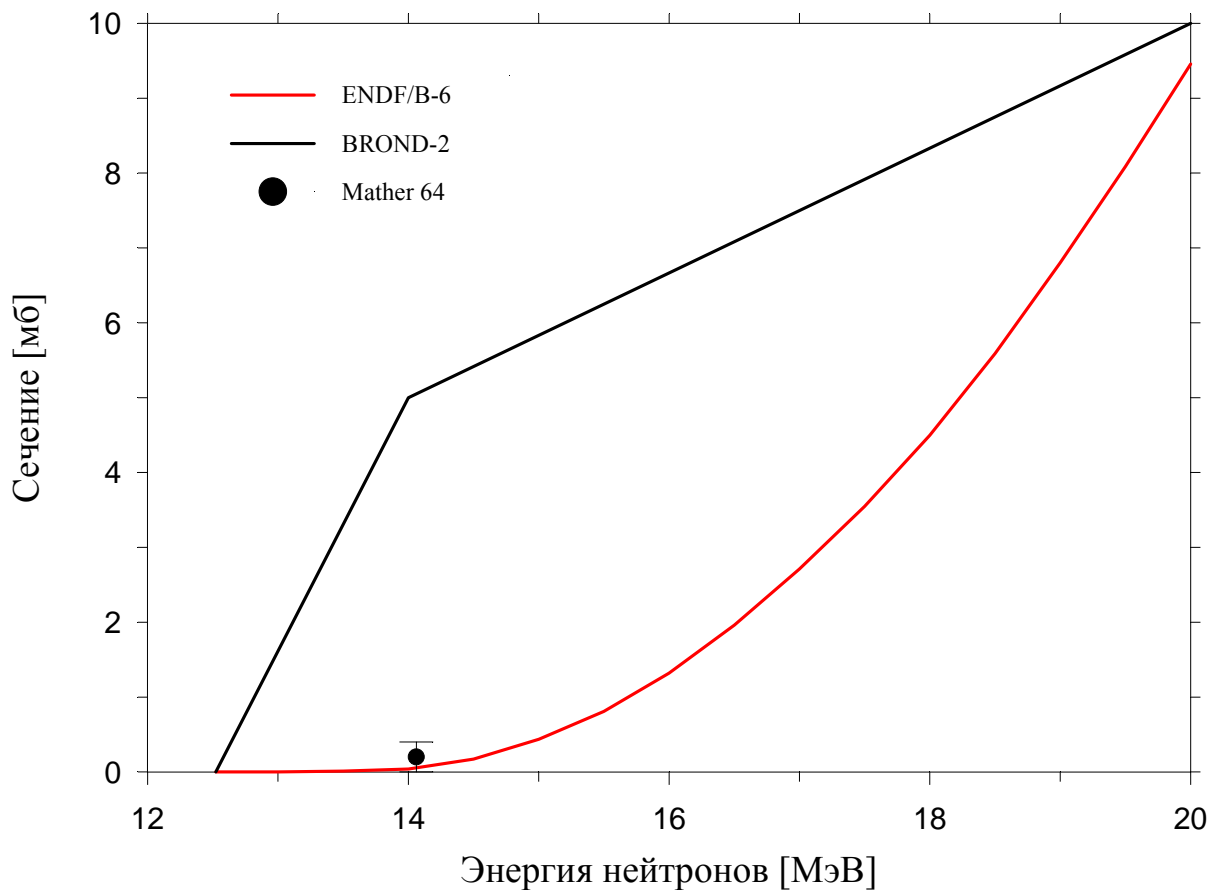
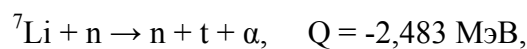


Рис.6 Оцененное сечение реакции ${}^7\text{Li}(n,3n)\alpha$ из библиотек ENDF/B-6 и BROND-2 в сравнении с экспериментальными данными.

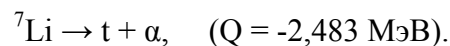
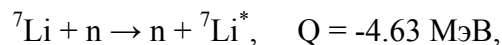
3.5. Сечение реакции (n,n't).

Реакция (n,n't) может протекать по следующим каналам [30]:

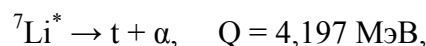
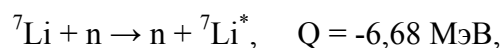
1) трехчастичный распад:



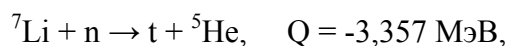
2) неупругое рассеяние нейтрона с возбуждением 2-го уровня ядра ${}^7\text{Li}$ с дальнейшим распадом его на тритон и альфа-частицу (соответствующее сечение обычно приводится в секции MT=52):



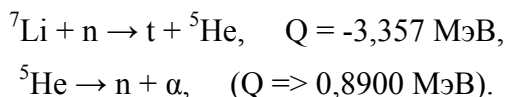
3) неупругое рассеяние нейтрона на 3-й возбужденный уровень ядра ${}^7\text{Li}$ с дальнейшим распадом на тритон и альфа-частицу:



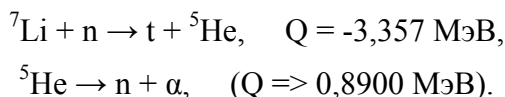
4) распад возбужденного ядра ${}^8\text{Li}$ на тритон и гелий-5 в основном состоянии с дальнейшим распадом гелия-5 на нейтрон и альфа-частицу:



5) распад возбужденного ядра ${}^8\text{Li}$ на тритон и гелий-5 в возбужденном состоянии с дальнейшим переходом гелия-5 в основное состояние и распадом на нейтрон и альфа-частицу:



5) распад возбужденного ядра ${}^8\text{Li}$ на тритон и гелий-5 в возбужденном состоянии с дальнейшим переходом гелия-5 в основное состояние и распадом на нейтрон и альфа-частицу:



Состояние экспериментальных данных по сечению реакции ${}^7\text{Li}(n,n't)$ таково, что сравнение оценок с результатами измерений может быть содержательным только для полного сечения реакции ${}^7\text{Li}(n,n't)$ и сечения неупругого рассеяния на ядре ${}^7\text{Li}$ с возбуждением второго уровня (одного из каналов реакций).

3.5.1 Сечение неупругого рассеяния с возбуждением 2-го уровня.

Все рассматриваемые оценки (см. Рис.7) для данного сечения основаны на экспериментальных данных. Различие в оценках обусловлено выбором используемых для анализа экспериментов.

Оценка JENDL-3.3 выполнена с учетом экспериментальных данных [12,23,28]. Методика оценки не приводится.

Оценка БРОНД-2 основана на экспериментальных данных [22,25]. Методика оценки не описана.

Оценка ENDF/B-6 выполнена в рамках байесовского подхода (по программе GLUCS [8]) с учетом всех доступных экспериментальных данных. В качестве априорной информации использовались оцененные сечения из библиотеки ENDF/B-5.2 [7]. Следует отметить существенное расхождение (вне декларируемых погрешностей) между результатами измерений [12,28] и данными других экспериментов [19-27]. Оценку ENDF/B-6 можно рассматривать как разумное компромиссное решение при выборе между двумя группами экспериментов.

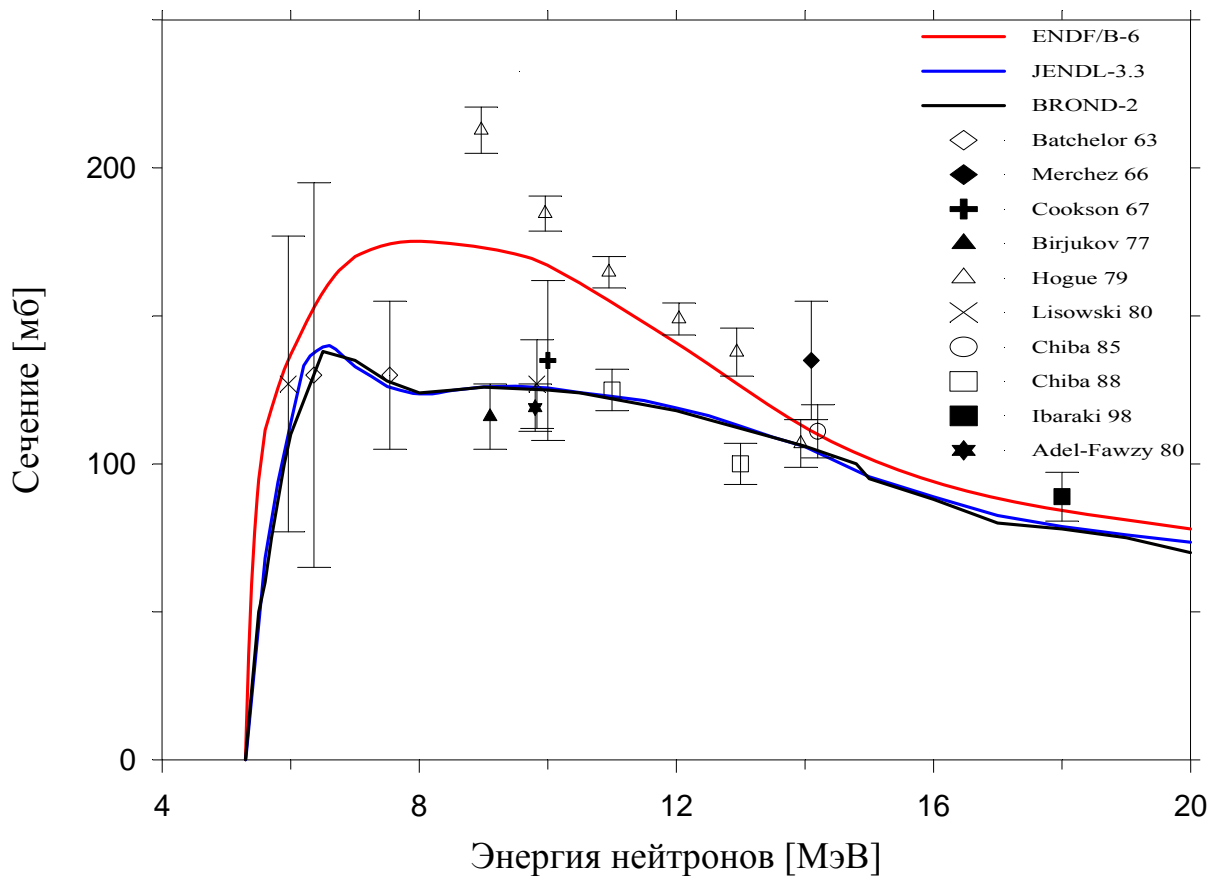


Рис.7 Оцененные сечения реакции ${}^7\text{Li}(n,\text{inel})$ (с возбуждением 2-го уровня) из библиотек ENDF/B-6, JENDL-3.3 и BROND-2 в сравнении с экспериментальными данными. Данная реакция является одним из каналов реакции ${}^7\text{Li}(n,n't)$.

3.5.2 Полное сечение образования трития (реакции ${}^7\text{Li}(n,n't)$).

Поскольку сечение образования трития состоит из нескольких компонент, возможны несколько вариантов его представления в формате ENDF. Как следствие, каждому варианту представления соответствует множество используемых при этом номеров МТ-секций.

Наиболее удачным представляется вариант, используемый в JENDL-3.3, где сечение образования трития представлено явно через секцию МТ=205 (суммарное сечение процессов образования трития). Оценка выполнена на основе экспериментальных данных [31-36]. Методика оценки не описана.

Оценка БРОНД-2 основана на экспериментальных данных [18,23,31,32,37,38].

Кривая энергетической зависимости сечения проводилась от руки. Сечение образования трития представлено в библиотеке неявным образом – через компоненты в секциях неупругого рассеяния на 2-м, 3-м, 4-м уровне и на континууме уровней (секции с МТ=52,53,54,91).

Оценка ENDF/B-6 выполнена в рамках байесовского подхода (по программе GLUCS [8]) с учетом экспериментальных данных [24,32-36, 39-40], ставших доступных после 1981 года. В качестве априорной информации использовались оцененные сечения из библиотеки ENDF/B-5.2 [7]. Сечение образования трития представлено в библиотеке неявным образом – как неупругое рассеяние на 2-м и на 3-м реальном уровне и на 30 фиктивных уровнях ${}^7\text{Li}$ (секции с МТ=52-82).

Отметим, что существенным недостатком неявного представления является то, что из номера реакции в файле MF=3 невозможно определить, что речь идет о реакции (n,nt), а не об обычном неупругом рассеянии. Понять существо реакции невозможно и по содержанию других файлов ибо даже в библиотеке JEFF-3.1, где в файле MF=6 присутствуют секции для MT=53 и MT=91, описывающих рассматриваемый процесс, данные содержатся только об энерго-угловом распределении нейтронов; возможность описания данных о других продуктах реакции не использована.

Как следует из Рис.8, оценки ENDF/B-6 и JENDL-3.3 в одинаковой степени находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными.

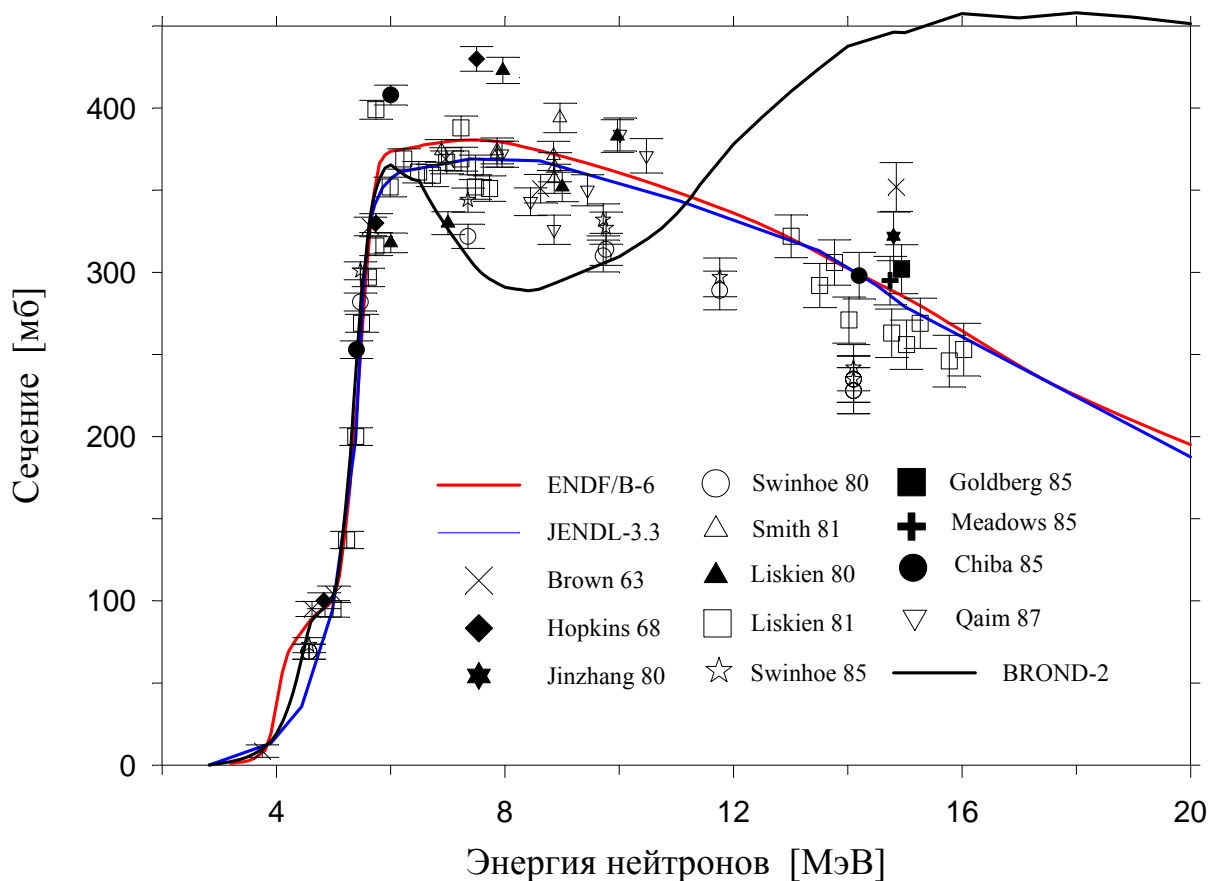


Рис.8 Оцененные полные сечения реакции ${}^7\text{Li}(n,n't)$ из библиотек ENDF/B-6, JENDL-3.3 и BROND-2 в сравнении с экспериментальными данными.

3.6 Сечение радиационного захвата (MT=102).

В библиотеке JENDL-3.3 в качестве оценки взята зависимость $1/v$, нормированная на измерение [43] (см. Рис.7).

Оценка БРОНД-2 выше 100 кэВ основана на экспериментальных данных [44]. Ниже 100 кэВ оценка нормирована на оценку [45] в тепловой точке.

Форма оценки ENDF/B-6 заимствована из библиотеки ENDF/B-5.1 за исключением области выше 10 кэВ, где сечение поднято для достижения согласия с экспериментальными данными 44. Ниже 10 кэВ сечение нормировано на оценку 45 в тепловой точке.

Как следует из Рис.9, оценки БРОНД-2 и ENDF/B-6 обеспечивают примерно одинаковое качество описания экспериментальных данных.

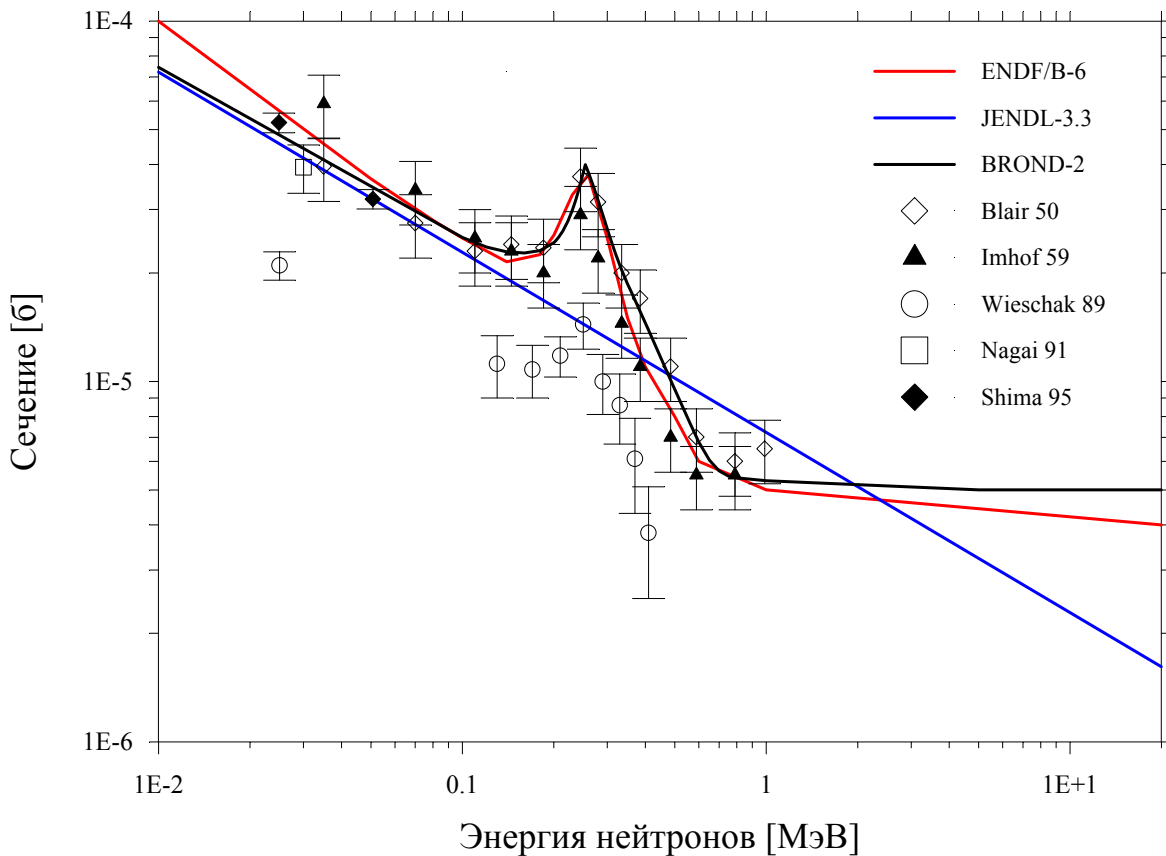


Рис.9 Оцененное сечение реакции ${}^7\text{Li}(n,\gamma)$ из библиотек ENDF/B-6, JENDL-3.3, BROND-2.

4. Угловые распределения вторичных частиц (MF=4)

Сечение упругого рассеяния нейтронов является доминирующим компонентом полного сечения практически при всех энергиях падающих нейтронов, не превышающих 20 МэВ. Соответственно, наибольший интерес для реакторных приложений представляют угловые распределения упруго рассеянных нейтронов (особенно в области 1-го и 2-го резонансов – 0.26 МэВ и 4-5 МэВ). Ниже эти распределения сравниваются с экспериментальными данными. Проводится сравнение с экспериментальными данными и угловых распределений нейтронов, неупруго рассеянных с возбуждением 2-го уровня литий-7 (соответствующее сечение не превышает 10% от сечения упругого рассеяния). Оцененные угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов с возбуждением 1-го уровня ядра литий-7 (соответствующее сечение не превышает 15% от сечения упругого рассеяния) с экспериментальными данными не сравниваются в связи с отсутствием последних в библиотеке EXFOR. Остальные сечения реакций с выходом нейтронов (например, реакции (n,2n)) малы по сравнению с сечением упругого рассеяния.

4.1 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов (MT=2).

Оценка JENDL-3.3 для энергий падающих нейтронов ниже 4 МэВ основана на R-матричных расчетах с параметрами, взятыми из работы [51]. В энергетическом интервале от 4 до 14 МэВ оценка основана на экспериментальных данных [47,50]. Выше 14 МэВ оценка основана на расчетах методом связанных каналов.

В оценке БРОНД-2 угловые распределения были приняты изотропными в системе центра масс для энергий падающих нейтронов ниже 10 кэВ. Выше 10 кэВ оценка основана на экспериментальных данных [50].

Оценка ENDF/B-6 выполнена на основе экспериментальных данных [46-49] для энергии падающих нейтронов ниже 14 МэВ. Выше 14 МэВ использовались расчеты по оптической модели.

На Рисунках 10-13 оценки угловых распределений из различных библиотек сравниваются с экспериментальными данными для энергии падающих нейтронов 4.08 МэВ, 0.26 МэВ, 0.275 МэВ, 0.29 МэВ. Следует отметить, что в измерениях *Knox A 79* (см. Рис.10) не выделен вклад неупруго рассеянных нейтронов с уровня 0.478 МэВ.

Как видно из Рис.10, при 4.08 МэВ все три оценки примерно одинаково описывают экспериментальные данные.

Совершенно иная картина наблюдается в окрестности 0.25 МэВ: Из Рисунков 11-13 видно, что только оценка JENDL-3.3 демонстрирует как качественное, так и количественное согласие с экспериментальными данными. Оценки БРОНД-2 и ENDF/B-6 неверны даже качественно.

Согласно экспериментальным данным угловое распределение при переходе от 0.275 МэВ к 0.29 МэВ меняет форму неожиданно сильно, что представляется весьма странным.

Как бы то ни было, оценка угловых распределений упругого рассеяния из JENDL-3.3 представляется самой убедительной.

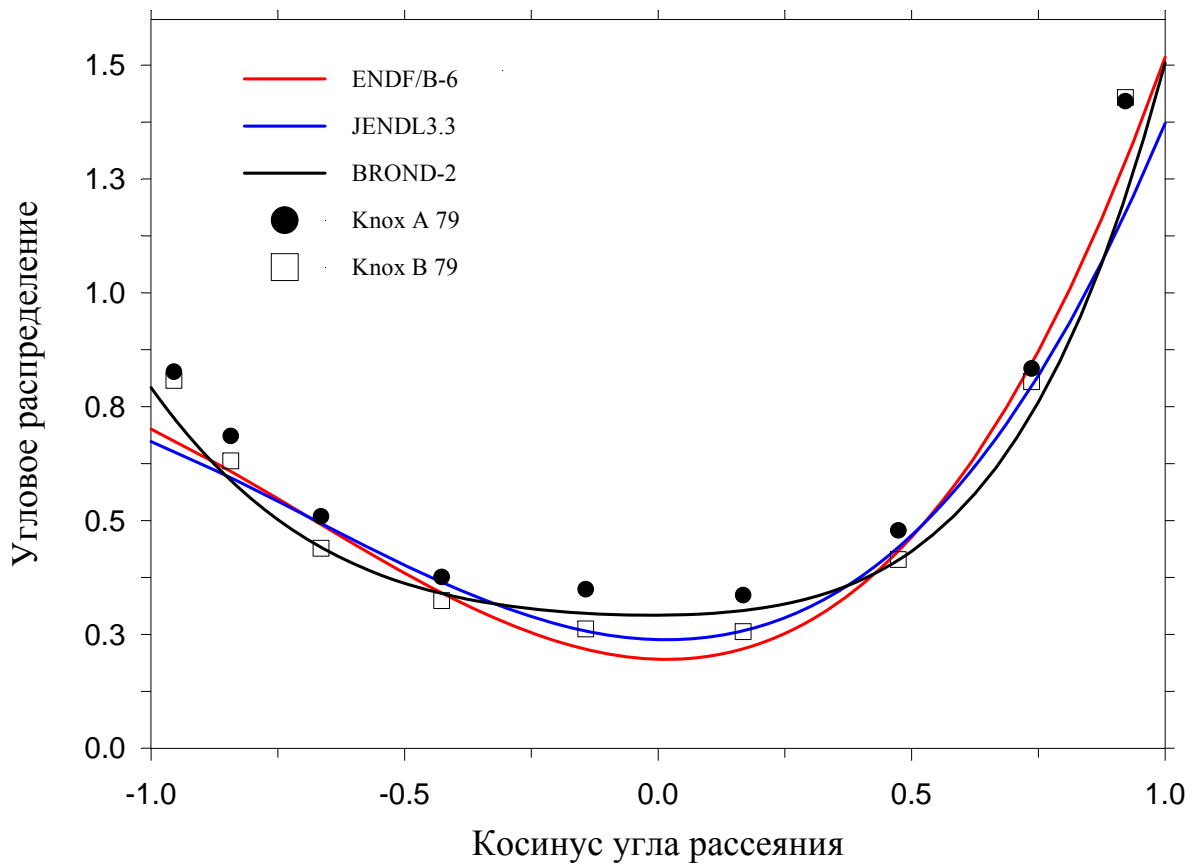


Рис.10 Угловое распределение упруго рассеянных нейтронов для ядра ${}^7\text{Li}$ из библиотек ENDF/B-6, JENDL-3.3, BROND-2 при энергии налетающих нейтронов 4.08 МэВ.

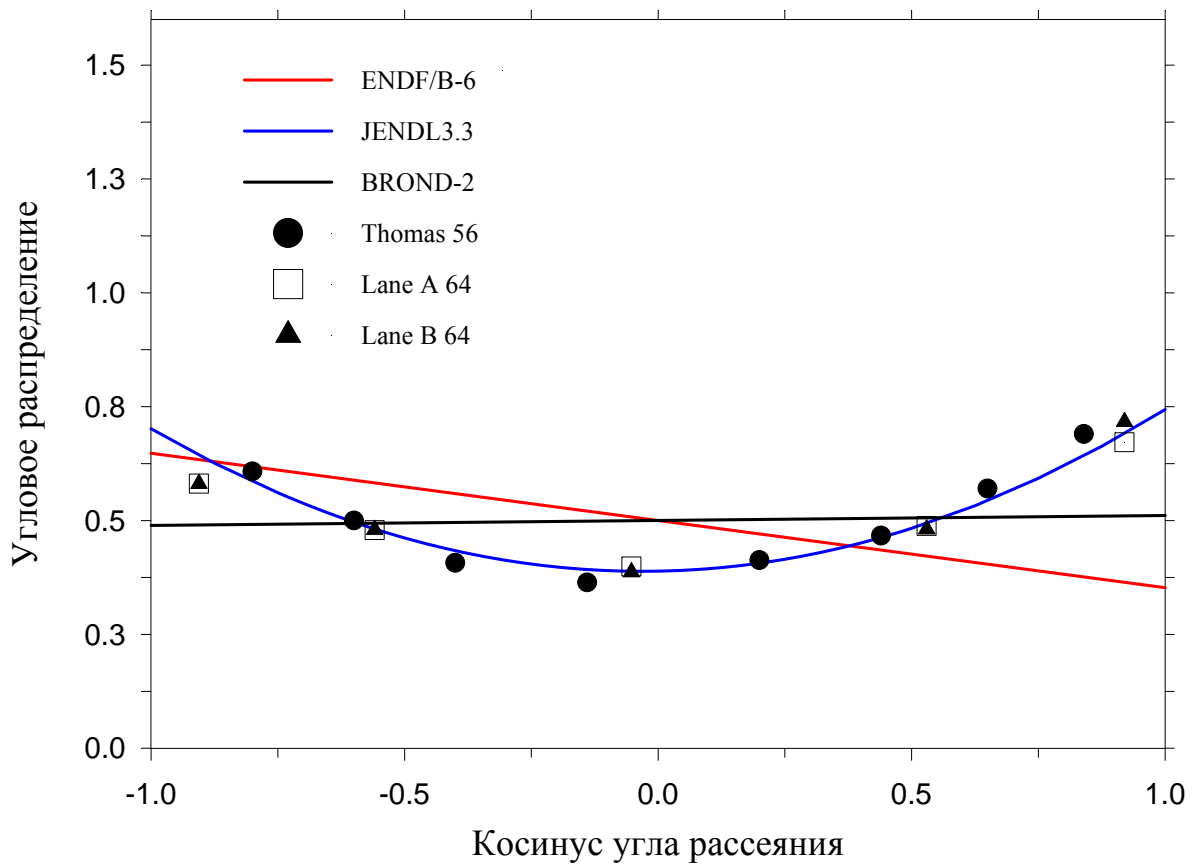


Рис.11 Угловое распределение упруго рассеянных нейтронов для ядра ${}^7\text{Li}$ из библиотек ENDF/B-6, JENDL-3.3, BROND-2 при энергии налетающих нейтронов 0.26 МэВ.

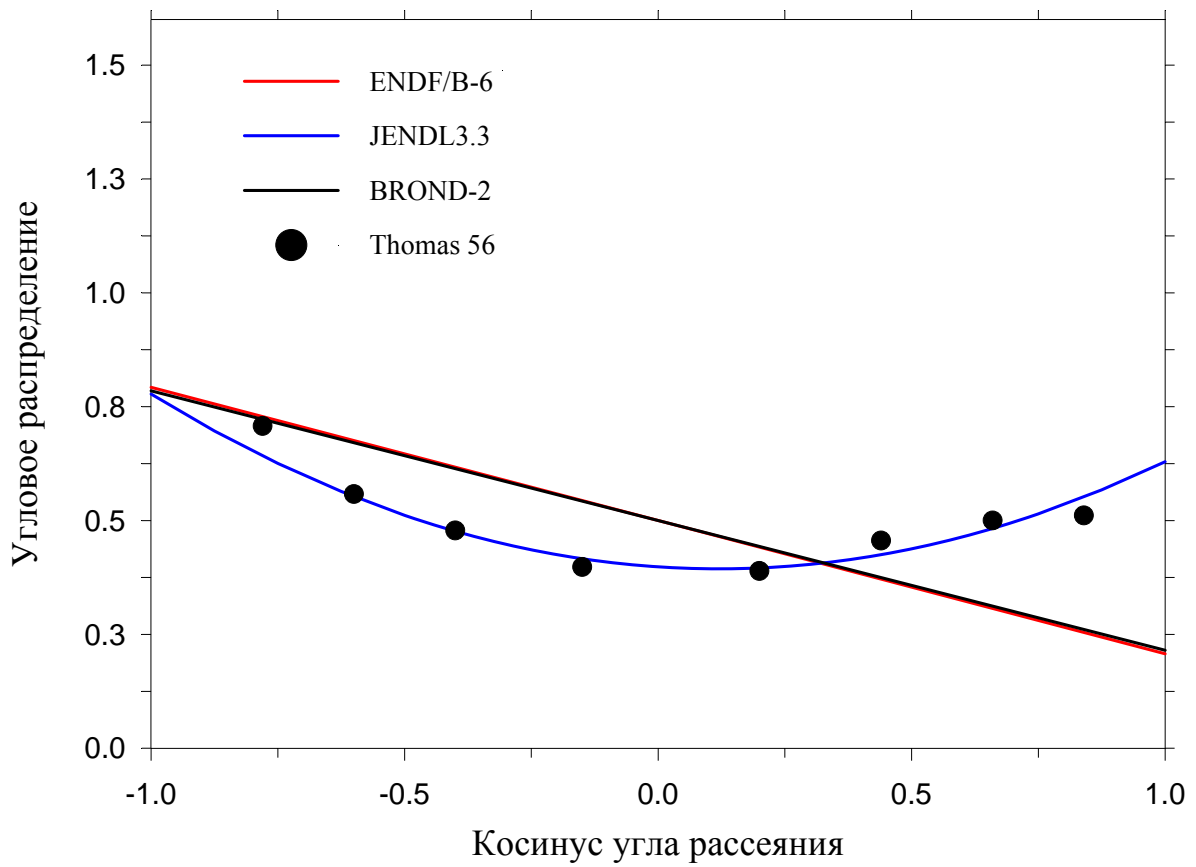


Рис.12 Угловое распределение упруго рассеянных нейтронов для ядра ${}^7\text{Li}$ из библиотек ENDF/B-6, JENDL-3.3, BROND-2 при энергии налетающих нейтронов 0.275 МэВ.

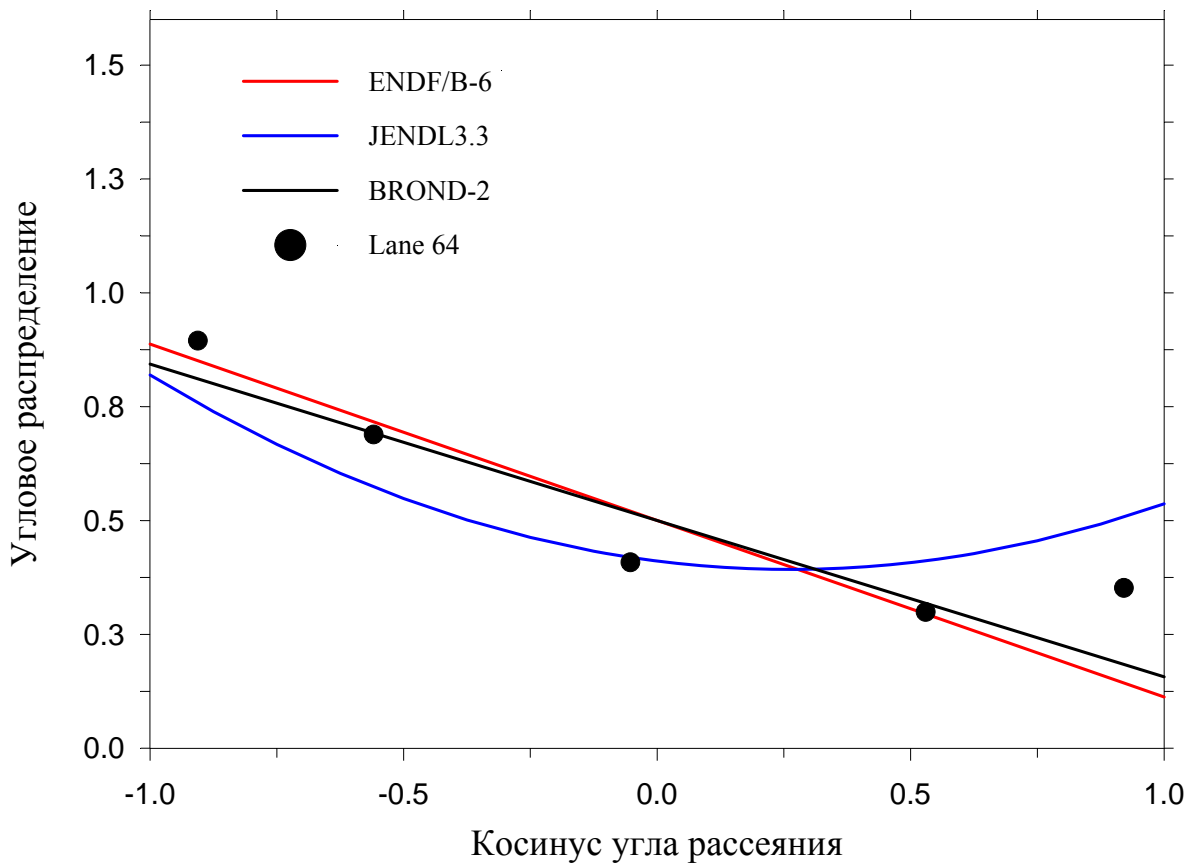


Рис.13 Угловое распределение упруго рассеянных нейтронов для ядра ${}^7\text{Li}$ из библиотек ENDF/B-6, JENDL-3.3, BROND-2 при энергии налетающих нейтронов 0.29 МэВ.

4.2 Угловые распределения нейтронов из реакции (n,n't).

Оценка JENDL-3.3 для энергий падающих нейтронов ниже 4 МэВ основана на R-матричных расчетах. В энергетическом интервале от 4 до 10 МэВ оценка основана на экспериментальных данных [52]. Выше 10 МэВ оценка основана на расчетах методом связанных каналов.

В оценке БРОНД-2 угловые распределения основаны на экспериментальных данных [52].

Оценка ENDF/B-6 выполнена на основе R – матричных расчетов ниже 6 МэВ. Выше 8 МэВ оценка основана на DWBA (Distorted Wave Born Approximation) расчетах. От 6 до 8 МэВ выполнено простое сглаживание.

Рисунки 13 и 14, где приведено сравнение оцененных распределений с экспериментальными данными, не дают целостного представления о качестве оценок. Если при энергии налетающих нейтронов 6.6 МэВ оценки ENDF/B-6 и JENDL-3.3 согласуются с экспериментальными данными, то при энергии 9.37 МэВ согласия не наблюдается. Тем не менее, на основе имеющейся информации можно отдать предпочтение оценкам ENDF/B-6 и JENDL-3.3.

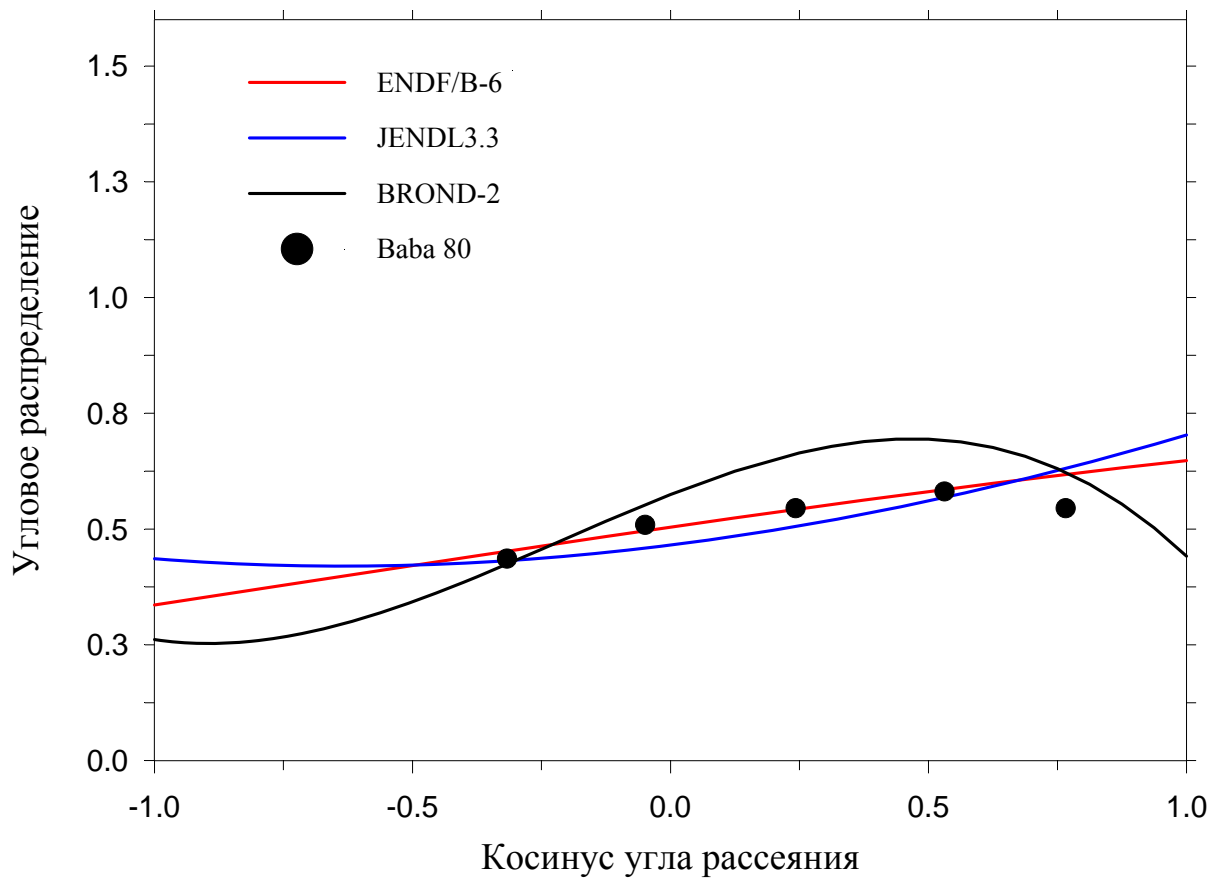


Рис.14 Угловое распределение нейтронов неупругого рассеяния с возбуждением 2-го уровня ядра ${}^7\text{Li}$ из библиотек ENDF/B-6, JENDL-3.3, BROND-2 при энергии налетающих нейтронов 6.6 МэВ.

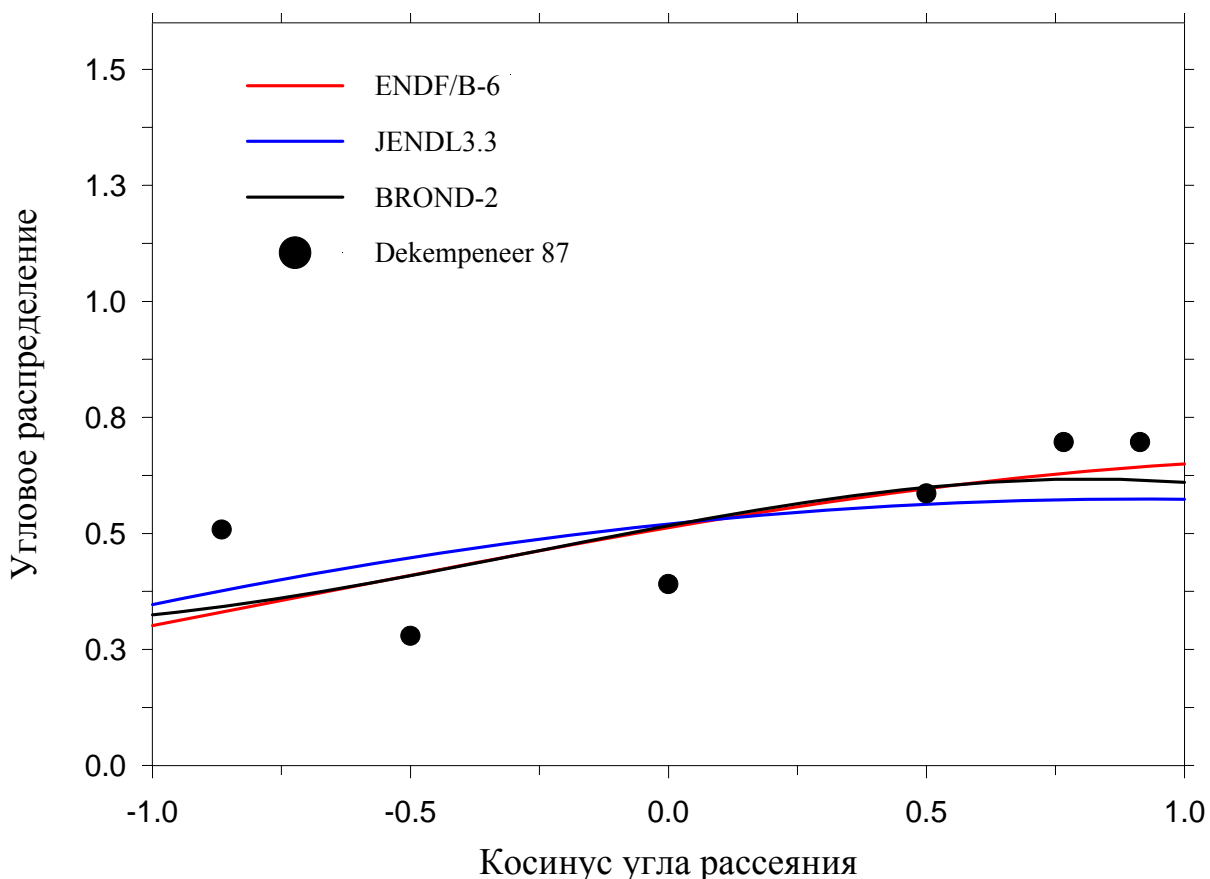


Рис.15 Угловое распределение нейтронов неупругого рассеяния с возбуждением 2-го уровня ядра ${}^7\text{Li}$ из библиотек ENDF/B-6, JENDL-3.3, BROND-2 при энергии налетающих нейтронов 9.37 МэВ.

5. Энергетические распределения вторичных нейтронов (MF=5)

Экспериментальные данные по энергетическим распределениям вторичных нейтронов отсутствуют. Во всех рассматриваемых библиотеках оцененные энергетические распределения представлены (или могут быть аппроксимированы – как в ENDF/B-6) испарительными спектрами.

В библиотеке JENDL-3.3 энергетические распределения даны только для вторичных нейтронов из реакции (n,2n) (секция MT=16). Энергетические распределения моделировались испарительными спектрами с параметром «температура» $T = 0.862 \pm 0.057$ МэВ, рассчитанной в результате анализа измерений дифференциальных сечений реакции (n,2n) при энергии налетающих нейтронов 14.2 МэВ [53]. При других энергиях налетающих нейтронов значение параметра экстраполировалось следующим образом $T = 0.229\sqrt{E}$ МэВ, где E – энергия нейтрона в лабораторной системе координат. Энергетические распределения в библиотеке BROND-2 представлены в секциях MT=16 и MT=24. Энергетические распределения вторичных нейтронов из реакции (n,2n) описаны испарительными спектрами с параметром «температура», взятым из библиотеки ENDF/B-4. Значение параметра находится в хорошем согласии с величиной из работы [53]. Энергетические распределения для реакции (n,2n α) оценены таким же образом, как и для реакции (n,2n). Наконец, в библиотеке ENDF/B-6 энергетические распределения являются

результатом численного решения задачи нескольких тел. Они представлены в секциях MT=16, 24, 25 (для реакций $(n,2n)$, $(n,2n\alpha)$, $(n,3n\alpha)$).

Сравнение оцененных энергетических распределений вторичных нейтронов из реакции $(n,2n)$ при энергиях налетающих нейтронов 10 МэВ и 14 МэВ приведено на Рисунках 16 и 17. С точки зрения теории предпочтение следует отдать оценке ENDF/B-6, поскольку при выполнении именно этой оценки использовалась строгая и последовательная методика. Однако, как видно из Рис.17., параметр «температура» для оценки ENDF/B-6, не согласуется с надежными экспериментальными данными из работы [53]. Поэтому следует сделать выбор в пользу оценки JENDL-3.3. Оценка BROND-2 весьма близка к оценке JENDL-3.3, поскольку обе оценки выполнены на основе одной и той же методики с использованием одних и тех же экспериментальных данных.

Для других секций оценка JENDL-3.3 отсутствует, поэтому представляется целесообразным включить в библиотеку РОСФОНД оценки ENDF/B-6 для энергетических распределений вторичных нейтронов из реакций $(n,2n\alpha)$, $(n,3n\alpha)$.

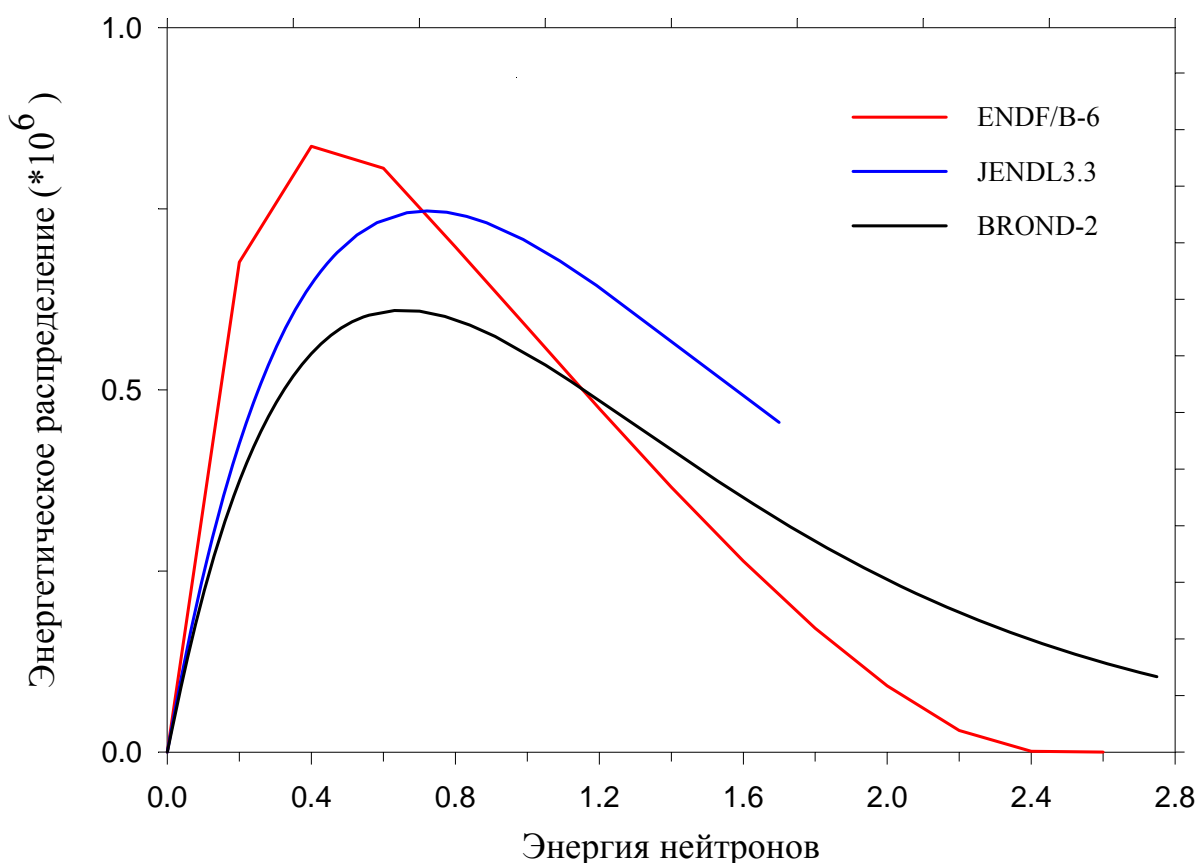


Рис.16 Энергетическое распределение вторичных нейтронов из реакции ${}^7\text{Li}(n,2n)$ из библиотек ENDF/B-6, JENDL-3.3, BROND-2 при энергии налетающих нейтронов 10 МэВ.

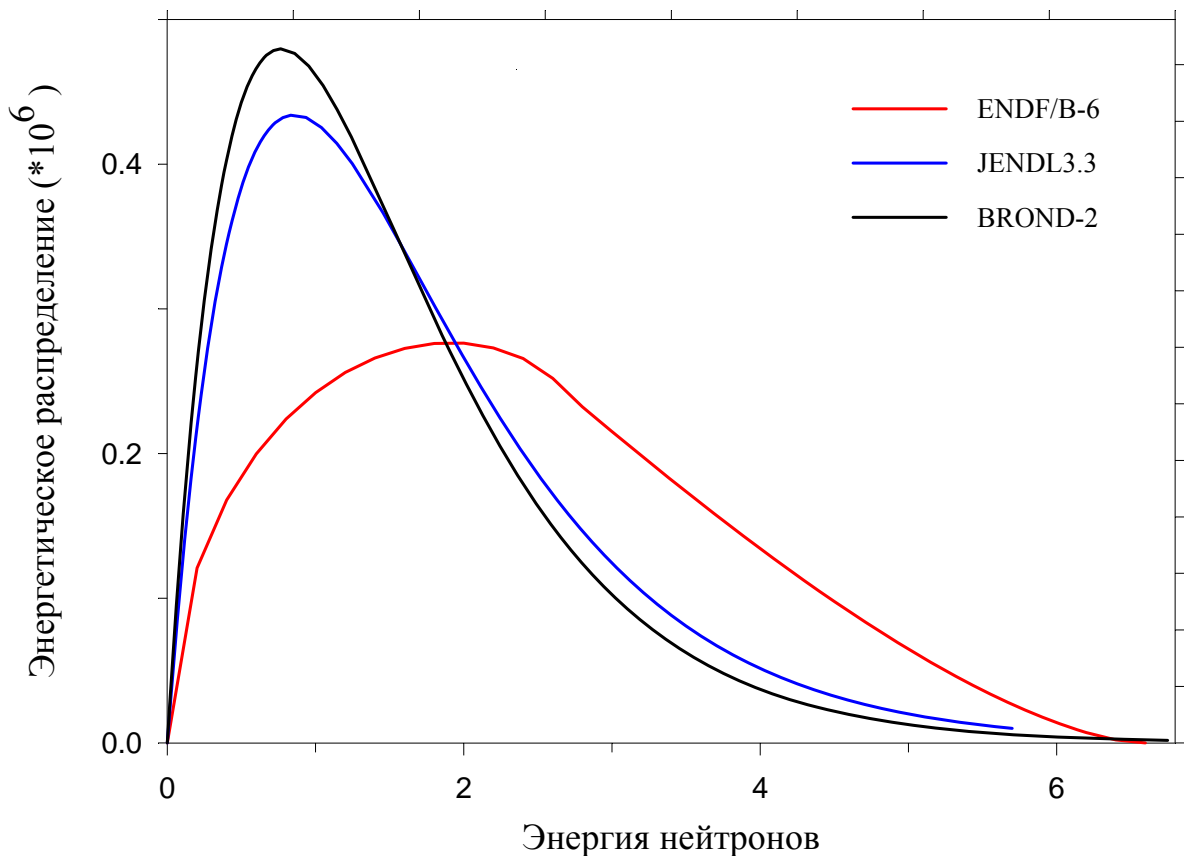


Рис.17 Энергетическое распределение вторичных нейтронов из реакции ${}^7\text{Li}(n,2n)$ из библиотек ENDF/B-6, JENDL-3.3, BROND-2 при энергии налетающих нейтронов 14 МэВ.

7. Литература

1. J.W.Meadows, J.W.Whalen. Nuclear Science and Engineering v.41, p.351, 1970.
2. D.G.Foster JR., D.W.Glasgow. Physical Review C3 p.576,1971.
3. C.A.Goulding. et al, Report USNDC-3, p.161, 1972.
4. G.P.Lamaze. et al, Bulletin of American Phys. Society v.64, p.862, 1979.
5. В.П.Алфименков и др. Ядерная физика т.53, вып.3, стр.542
6. T.W.Conlon. Report AERE-R-7166, 1972.
7. P.G.Young. Trans. Amer. Nucl. Soc. V.39, p.272, 1981.
8. D.M.Hetrick, C.Y.Fu. Report ORNL/TM-7341, 1980.
9. O.Bersillon, Bruyeres-le-Chatel, France, personal communication to E.Arthur, 1980.
10. J.A.Harvey, ORNL, personal communication to the NNDC, 1978.
11. C.A.Goulding, P.Stoler, RPI, personal communication to the NNDC, 1971
11. G.Shen et al. Nuclear Science and Engineering v.86, p.184, 1984.
12. H.H.Hogue et al. Nuclear Science and Engineering v.69, p.22, 1979.
13. W.P.Abfalterer et al. Physical Review C v.63, p.446, 2001.
14. G.L.Morgan. Report ORNL/TM-6247, 1978.

- 15.D.K.Olsen, G.L.Morgan, J.W.McConnell. Nuclear Science and Engineering v.74, N.3 p.219, 1980.
- 16.D.L.Smith. Ibid. v.61, N.4, p.540, 1976.
- 17.H.Knitter, M.Coppola. Report EUR-3903, Geel, Belgium, 1968.
- 18.J.C.Hopkins, D.M.Drake, H.Conde. Nuclear Physics v.A107, N.1, p.139, 1968.
- 19.R.Batchelor, J.H.Towle. Ibid. v.47, N.3, p.385, 1963.
- 20.F.Merchez. Proc. of International Conf. on , Paris 1966, v.1, p.393, 1966.
- 21.J.A.Cookson. Nuclear Physics A v.91, p.273, 1967.
- 22.N.S.Birjukov et al. Proc. of All-Union Conf. on Neutron Physics, Kiev, 1977, v.2, p.27, 1977.
- 23.P.W.Lisowski et al. Report LA-8342, 1980.
- 24.S.Chiba Nuclear Science and Technology v.22, p.771, 1985.
- 25.S.Chiba Nuclear Science and Technology v.25, p.210, 1988.
- 26.M.Ibaraki Nuclear Science and Technology v.35, p.843, 1998.
- 27.M.Adel-Fawzy et al. Nuclear Instruments and Methods v.169, p.533, 1980.
- 28.M.Baba et al. Proc. of International Conference Nuclear Cross Sections for Technology, 1979, p.143, 1980.
- 29.E.Dekempeneer et al. Nuclear Science and Engineering v.69, p.22, 1979.
- 30.J.A.Cookson, D.Dandy, J.G.Hopkins. Nuclear Physics A v.91, n.2, p.273, 1967.
- 31.D.L.Smith et al. Nuclear Science and Engineering v.78, p.359, 1981.
- 32.H.Liskien et al. Proceedings of International Conf. On Nuclear Data for Science and Technology, Antwerpen, 1982, p.349, 1983.
- 33.D.L.Smith D.L. et al. Report ANL/NDM – 87, 1984.
- 34.A.Takahashi et al. Proceeding of 13-th Symp. on Fusion Technology, Varese, Italy, 1984.
- 35.E.Goldberg et al. Nuclear Science and Engineering v.91, p.173, 1985.
- 36.H.Maekawa et al. Report JAERI-M 86-125, p.130, 1986.
- 37.F.Brown et al. Journal of Nuclear Energy A/B v.17, n.1, p.137, 1963.
- 38.M.E.Wyman, M.M.Thorpe. Report LA-2235, Los-Alamos, 1958.
- 39.H.Maekawa et al. Report JAERI-M-83-196, 1983.
- 40.S.M.Qaim, R.Wolfle. Nuclear Science and Engineering v.96, p.52, 1987.
- 41.D.S.Mather, L.F.Pain. Report AWRE-0-47/69, 1969.
- 42.V.J.Ashby et al. Physical Review v.129, p.1771, 1963.
- 43.E.T.Jurney. Report USNDC-9, p.109, 1973.
- 44.W.L.Imhof et al. Physical Review v.114, p.1037, 1959.
- 45.Neutron Cross Sections. v.1. Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. S.F.Mughabghab et al. Academic Press, 1981.

- 46.R.O.Lane et al, Physical Review v.136, p.1710, 1964.
- 47.H.D.Knox et al, Nuclear Science and Engineering v.69, p.223, 1979.
- 48.H.D.Knox et al. Proceedings of International Conf. On Nuclear Data for Science and Technology, Knoxwill, 1979, p.783, 1979.
- 49.H.H.Knitter, M.Coppola. Proceedings of International Conference on Neutron Cross Sections , Washington, p.827, 1968.
- 50.H.H.Hogue et al. Nuclear Science and Engineering v.69, p.22, 1979.
- 51.H.D.Knox, R.D.Lane. Nuclear Physics v.A359, p.131, 1981.
- 52.E.Dekempeneer, H.Liskien et al, EXFOR Subentries 22031151 – 22031156.
- 53.S.Chiba et al. Journal of Nuclear Science and Technology v.22, N.10, p.771, 1985.

8. Заключение

8.1. Выводы

В соответствии с вышеизложенным для библиотеки РОСФОНД решено сформировать новый файл оцененных данных, включающий данные о сечениях реакций (файл MF=3) из библиотеки ENDF/B-6, а угловые распределения вторичных нейтронов упругого и неупругого рассеяния (файл MF=4) - из библиотеки JENDL-3.3. Угловые распределения реакций $(n, 2n)$, $(n, 2n\alpha)$ и $(n, 3n\alpha)$ (MT=24 и 25) взять из ENDF/B-VI. Энергетические распределения вторичных нейтронов неупругого рассеяния и реакции $(n, n't)$, как и в JENDL-3.3 при этом автоматически будут рассчитываться на основе двухчастичной кинематики (т.е. так, как если бы неупругое рассеяние с последующим развалом возбужденного лития-7 было единственным механизмом реакции). Энергетические распределения вторичных нейтронов всех реакций и данные об образовании фотонов взять из ENDF/B-VI.

После того, как это заключение было сделано, стала доступна библиотека ENDF/B-VII. Выяснилось, что несмотря на то, что заголовочной секции этой библиотеки утверждается, что данные взяты из ENDF/B-VI, в действительности в файл MF=4 внесены коррективы, совпадающие с рекомендованными выше. **В связи с этим окончательно в РОСФОНД рекомендуется включить оценку ENDF/B-VII.**

8.2. Автор обоснования выбранной оценки

Бадиков С.

8.3. Содержание файла оцененных данных в РОСФОНДе для 3-Li-7

MF = 1 Общая и специальная информация о нуклиде

 MT = 451 заголовочная секция

MF = 2 Резонансные параметры

 MT = 151 секция резонансных параметров

MF = 3 Нейтронные сечения

- MT = 1 полное сечение
- MT = 2 упругое рассеяние
- MT = 4 суммарное сечение неупругого рассеяния
- MT = 16 реакция (n,2n) 3-Li- 6
- MT = 24 реакция (n,2nalpha) 1- H- 2
- MT = 25 реакция (n,3nalpha) 1- H- 1
- MT = 51 - 82 неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней
- MT = 102 радиационный захват: реакция (n,gamma) 3-Li- 8
- MT = 104 реакция (n,d) 2-He- 6
- MF = 4 Угловые распределения вторичных нейтронов
- MT = 2 упругое рассеяние
- MT = 16 реакция (n,2n) 3-Li- 6
- MT = 24 реакция (n,2nalpha) 1- H- 2
- MT = 25 реакция (n,3nalpha) 1- H- 1
- MT = 51 - 82 неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней
- MF = 5 Энергетические распределения вторичных нейтронов
- MT = 16 реакция (n,2n) 3-Li- 6
- MT = 24 реакция (n,2nalpha) 1- H- 2
- MT = 25 реакция (n,3nalpha) 1- H- 1
- MF = 12 Числа образующихся фотонов переходы между уровнями
- MT = 51 неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней
- MT = 102 радиационный захват: реакция (n,gamma) 3-Li- 8
- MF = 14 Угловые распределения фотонов
- MT = 51 неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней
- MT = 102 радиационный захват: реакция (n,gamma) 3-Li- 8
- MF = MasFd[k] Ковариации нейтронных данных

- MT = 1 полное сечение
- MT = 2 упругое рассеяние
- MT = 4 суммарное сечение неупругого рассеяния
- MT = 16 реакция (n,2n) ^3Li - 6
- MT = 24 реакция (n,2n α) ^1H - 2
- MT = 25 реакция (n,3n α) ^1H - 1
- MT = 51 - 82 неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней
- MT = 102 радиационный захват: реакция (n, γ) ^3Li - 8
- MT = 104 реакция (n,d) ^2He - 6

4. БЕРИЛЛИЙ

В библиотеке РОСФОНД содержатся данные для трёх изотопов бериллия: радиоактивного ${}^7\text{Be}$ (53.29 дн.), стабильного ${}^9\text{Be}$ и радиоактивного ${}^{10}\text{Be}$.

4.1. Бериллий-7

Радиоактивен. $T_{1/2}=53.12$ d.

Захват орбитального электрона

Последняя оценка нейтронных данных для этого изотопа выполнена Пейджем (P.R.Page) в 2004 г. для ENDF/B-VII. До этого имелась лишь оценка сечений нейтронных реакций, содержащаяся в EAF-2003. Из этих оценок получены следующие значения тепловых сечений и резонансных интегралов:

ENDF/B-VII:

$\sigma_{np}=37772$ барн $RI_{np}=16405$ барн

$\sigma_{n\alpha}=5 \cdot 10^{-6}$ барна $RI_{n\alpha}=0.02$ барна

EAF-2003:

$\sigma_{np}=39000$ барн $RI_{np}=16945$ барн

$\sigma_{n\alpha}=0.14$ барна $RI_{n\alpha}=0.06$ барна

Приведем для сравнения экспериментальные данные:

Bassi-63: $\sigma_{n\alpha}=0.155$ барна;

Koehler-88: $\sigma_{np}=38800 \pm 809$ барн;

Cervena-89: $\sigma_{np}=46800 \pm 4000$ барн.

Оценка Пейджа выполнена на основе анализа данных о реакциях: ${}^7\text{Li}(p,p)$ and ${}^7\text{Li}(p,n)$; ${}^6\text{Li}(d,n)$ и ${}^6\text{Li}(d,p)$; ${}^7\text{Li}(p,\alpha)$. Кроме реакций (n,p) и (n,α) оценены сечения упругого рассеяния и реакции (n,d) . К сожалению, оценка выполнена только до энергии 8.1 МэВ. Оцененные сечения главной реакции ${}^{-7}\text{Be}(n,p)$ – неплохо согласуются и между собой и с экспериментальными данными. Сечение реакции (n,α) в тепловой точке составляет всего 5 микробарн, тогда как результат единственного измерения – 155 миллибарн. Оцененные резонансные интегралы этой реакции отличаются не столь катастрофично. Достоинством оценки является представление информации об энерго-угловых распределениях продуктов реакций.

Ограниченность области рассмотрения нейтронных данных не позволяют рекомендовать оценку Пейджа в РОСФОНД непосредственно. Ее следует распространить до 20 МэВ, получить полное сечение, попытаться разобраться с сечением реакции (n,α) при тепловых энергиях. Подобная доработка для второстепенного нуклида, каковым является бериллий-7, выходит за рамки настоящей работы.

Заключение

Выводы:

В РОСФОНД принята оценка EAF-2003 (MAT=419) со следующими изменениями:

1. Присвоен MAT=407
2. Файл MF=8 опущен.

Автор проведенного отбора оцененных данных

Николаев М.Н.

4.2. Бериллий-9

1. Общие замечания

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся 4 различных оценки данных для бериллия:

1. Оценка Франкла, Риди и Янга (S.Francle, R.Reedy, P.Young, LASL, 2000), принятая в ФОНД-2.2 и ENDF/B-VII.
2. Оценка группы авторов из Вены и Обнинска, пересмотревших в 1997 г. файл данных из библиотеки EFF-3 (European Fusion File, Ver.3) для JEFF-3.1.
3. Оценка Шибаты (K. Shibata) 1984 г. вошедшая в JENDL-3.3.
4. Оценка Дзанг Дзенкуана (Zhang Zhengqian) 1978 г., принятая в CENDL-2.

На рис.1 полное оцененное полное сечение бериллия из оценки Франкла, Риди и Янга сравнивается с основными экспериментальными данными и оценкой из JEFF-3.1

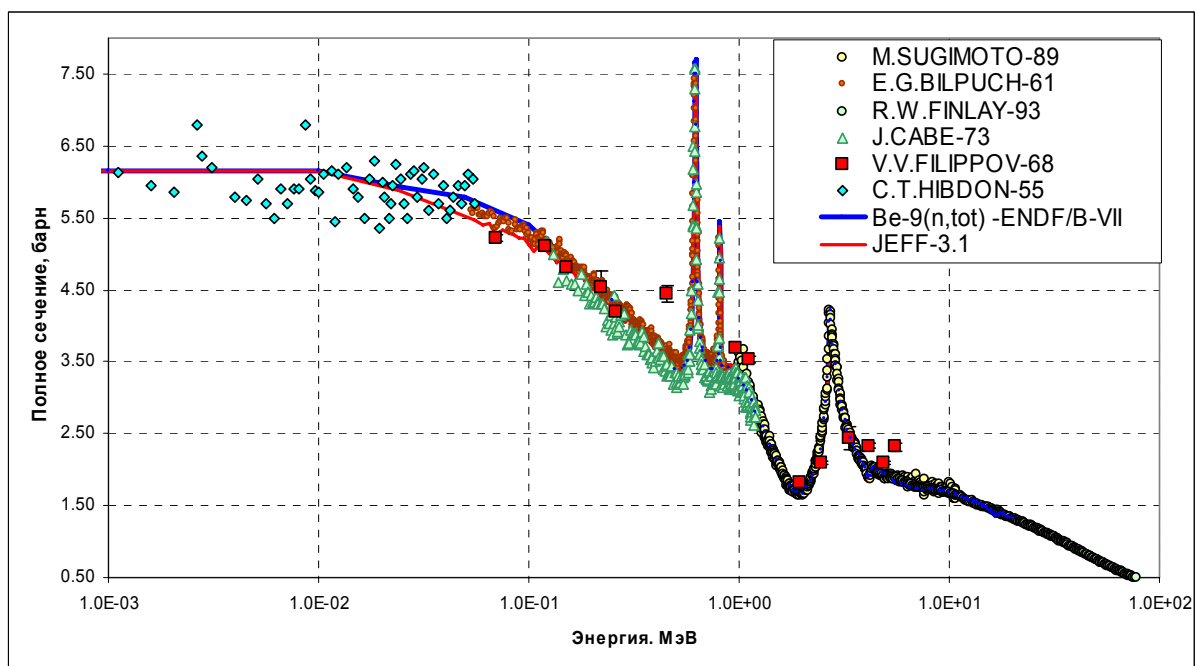


Рисунок 1. Полное сечение бериллия.

Единственное заметное различие в оценках связано с тем, что в LEFF-3.1 больший вес придан измерениям В.Филиппова, выполненными хоть и с низким разрешением, но с большим набором толщин образцов, обеспечившим высокую точность.

На Рис. 2. такое же сравнение делается для данных о реакции (n,2n)

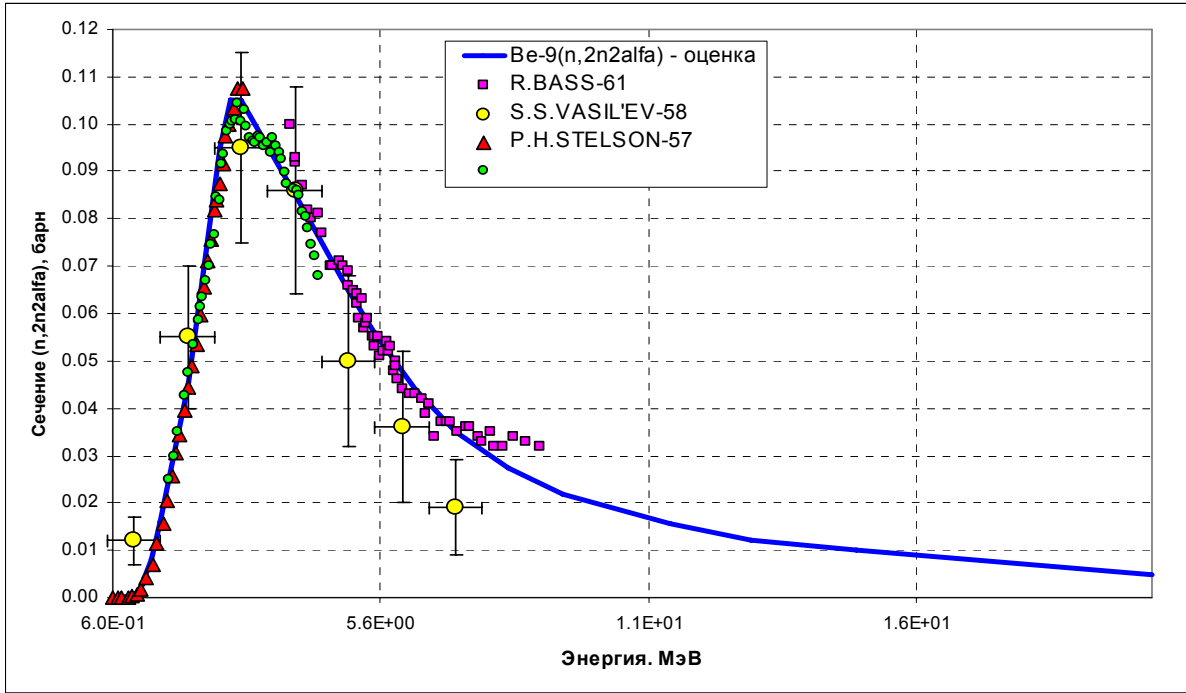


Рисунок 2.. Сечение реакции ${}^9\text{Be}(n,2n+2\alpha)$

Заметим, что оценка, принятая в JEFF-3.1, обладает тем преимуществом, что сечение реакции ${}^9\text{Be}(n,2n)$ описывается в ней явно как сумма реакций неупругого рассеяния на первых 11 уровнях ${}^9\text{Be}$, испытывающих затем распад на нейтрон и две альфа-частицы, реакций ${}^9\text{Be}(n,\alpha){}^6\text{He}^g$ и ${}^9\text{Be}(n,\alpha){}^6\text{He}^m$ с последующим испусканием двух нейтронов, реакции ${}^9\text{Be}(n,{}^5\text{He}){}^5\text{He}$ с последующим распадом ядер ${}^5\text{He}$ на нейтрон и альфа-частицу, реакции ${}^9\text{Be}(n,2n){}^8\text{Be}$ с распадом последнего на две альфа-частицы и, наконец, реакции ${}^9\text{Be}(n,\alpha){}^5\text{He}$ с последующим распадом ${}^5\text{He}$ на нейтрон и альфа-частицу. В оценке Франкла, Риди и Янга, судя по описанию, рассмотрен меньший набор возможных каналов реакции (не упоминается, в частности, о реакции ${}^9\text{Be}(n,{}^5\text{He}){}^5\text{He}$). Это различие в известной мере влияет на оценку энерго-угловых распределений вторичных нейтронов. Другим преимуществом JEFF-3.1 является наличие данных о погрешностях нейтронных данных. Судя по тому, что погрешности приводятся для каждого канала реакции ${}^9\text{Be}(n,2n)$, погрешности оценены методом наименьших квадратов при подгонке параметров расчетной модели под имеющиеся данные. Такие оценки, как правило, ведут к слишком оптимистическим погрешностям.

2. Заключение

2.1. Выводы:

В РОСФОНД следует принять оценку из JEFF-3.1.

2.2. Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle\sigma\rangle$ спектр Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$ |
|-------------------|-----------------------------|----------|---|
| Упругое рассеяние | 6.150 б | 74.418 б | 2.709 б |
| Рад. захват | 8.600 мб | 4.343 мб | 0.1000 мб |
| Реакция (n,p) | 0 | 0 | 0.00005 мб |

| | | | |
|------------------------|---|---|------------|
| Реакция (n,d) | 0 | 0 | 0.00010 мб |
| Реакция (n,t) | 0 | 0 | 0.00634 мб |
| Реакция (n, α) | 0 | 0 | 36.0354 мб |
| Реакция (n,2n) | 0 | 0 | 118.1 мб |

2.3. Автор проведенного отбора оцененных данных

Николаев М.Н.

4.3. Бериллий-10

Радиоактивен. $T_{1/2}=1.51E6$ у.

Бета-распад.

Полных наборов оцененных нейтронных данных ни в одной библиотеке не содержится. Последняя оценка сечений нейтронных реакций содержится в EAF-2003. Из этой оценки следуют следующие значения тепловых сечений и резонансных интегралов:

$$\sigma_c=0.001 \text{ барнf} \quad RI_{nr}=0.0004 \text{ барнf}$$

Заключение

Выводы:

В РОСФОНД принята оценка JEFF-3.0/A (MAT=428) со следующими изменениями:

1. Присвоен MAT=410
2. Файл MF=8 опущен.

Автор проведенного отбора оцененных данных

Николаев М.Н.

5. БОР

5.1. Бор-10

Содержание в естественной смеси: $19.8 \pm 0.3\%$.

Спин основного состояния: 3^+ .

1. Файлы

Реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ (MT=107) и $^{10}\text{B}(n,\alpha\gamma_1)$ (MT=801) используются в качестве стандартов при измерении нейтронных сечений¹. Поэтому только файлы, которые включают международные стандарты этих сечений могут быть рекомендованы для библиотек общего пользования. Последняя оценка стандартов была выполнена в 2005 году и в настоящее время включена только в оценку ENDF/B-VII. Однако, сравнение с другими оценками представляет интерес. Из-за большого количества экспериментальных данных и использованию в R-матричной модельной оценке методом наименьших квадратов экспериментальных данных по сечениям обратных реакций, сравнение оценённых сечений с экспериментальными данными не является информативным.

JENDL-3: оценка 1987 года. Ниже 10 кэВ – R-матричная оценка, 10 кэВ – 800 кэВ – оценка основана на экспериментальных данных, выше 800 кэВ – оценка основана на модельных расчётах и экспериментальных данных.

ENDF/B-VI (JEFF-3.1): оценка 1989 года. Ниже 100 кэВ – сечения стандартов (ENDF/B-VI), 100 кэВ – 1 МэВ – результаты R-матричной оценки выполненной при оценке стандартов, выше 1 МэВ – оценка основана на модельных расчётах и экспериментальных данных.

ENDF/B-VII: интегральные сечения ниже 1 МэВ взяты из новой международной оценки стандартов (2005), угловые распределения ниже 1 МэВ взяты из R-матричного описания (G. Hale, 2004), выполненного в рамках проекта при оценке стандартных сечений. Все сечения выше 1 МэВ взяты из оценки ENDF/B-VI.

2. Данные

Как уже отмечалось, отличие в сечениях ниже 1 МэВ, где оценки, как правило, выполнены описанием методом наименьших квадратов в R-матричной модели большого количества экспериментальных данных, являются небольшими, а их сравнение с экспериментальными данными – малоинформативным. На рисунках 1 и 2 показано сравнение полного и упругого сечений. Выше энергии 1 МэВ оценки ENDF/B-VI, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII совпадают. Из рисунка 3 видно, что ENDF/B-VII лучше описывает имеющиеся экспериментальные данные по упругому рассеянию при высоких энергиях.

Сравнение сечения (n,α) , рекомендованного стандартом ниже 1 МэВ показано на рисунке 4, а заметно отличающихся сечений неупругого рассеяния – на рисунке 5. В оценках использовались не прямые экспериментальные данные и модельные расчёты. Так как полное и упругое сечение в ENDF/B-VII лучше согласуется с экспериментом, то можно ожидать, что и парциальные сечения реакций (в сумме дающие разность между полным и упругим сечениями) так же лучше описаны в ENDF/B-VII.

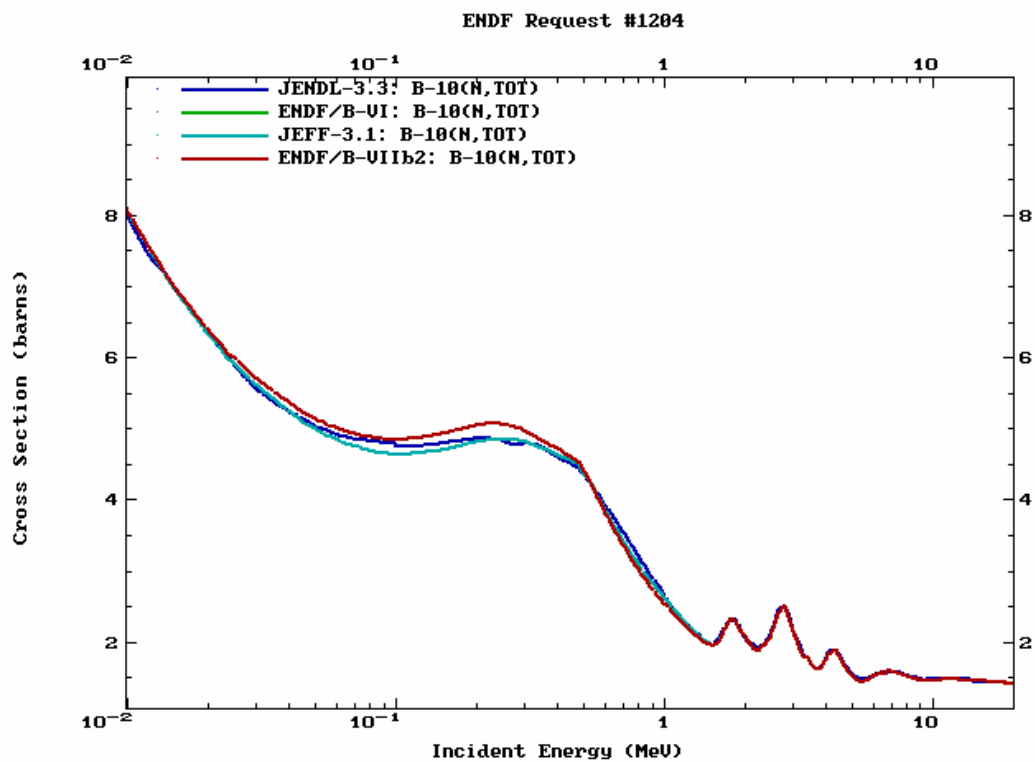


Рисунок 1. Сравнение полного сечения нейтронов из разных библиотек.

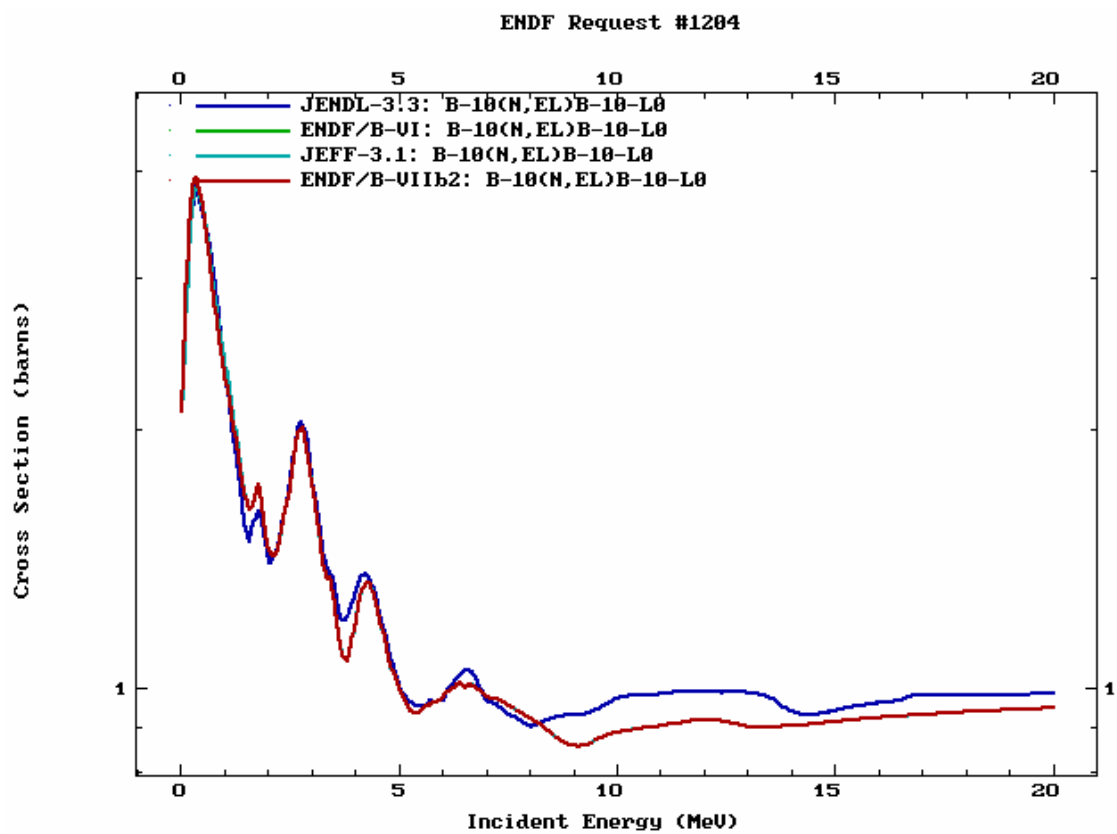


Рисунок 2. Сравнение сечения упругого рассеяния нейтронов из разных библиотек.

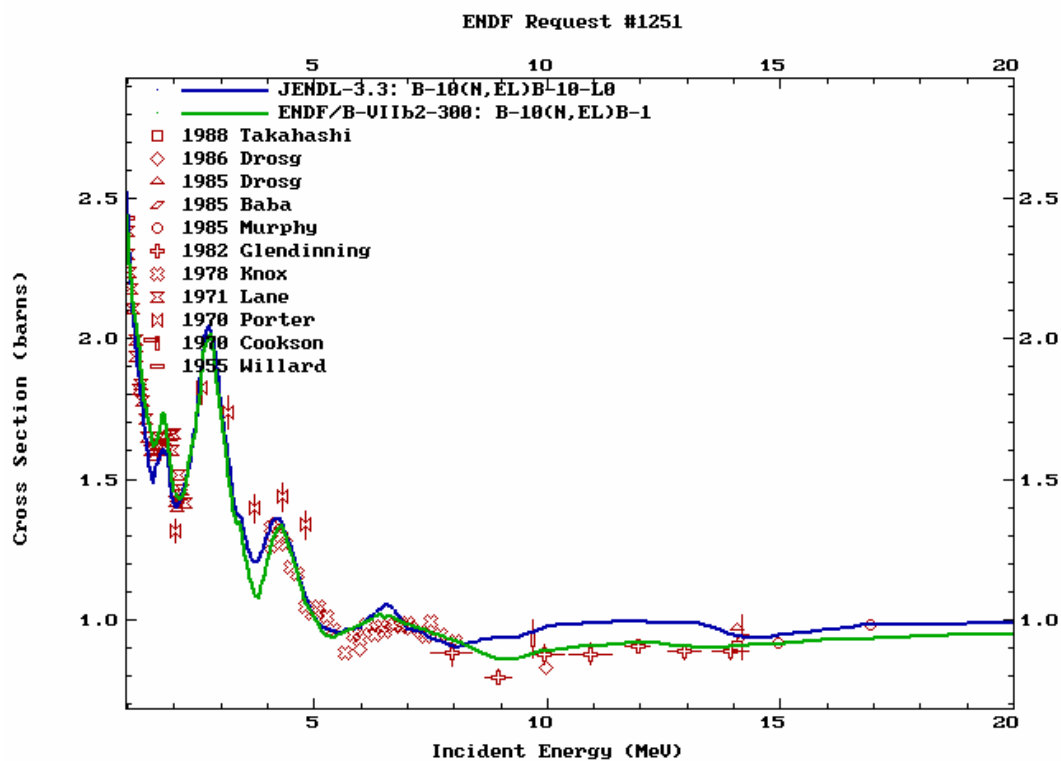


Рисунок 3. Сравнение сечения упругого рассеяния нейтронов из библиотек JENDL-3 и ENDF/B-VII с экспериментальными данными.

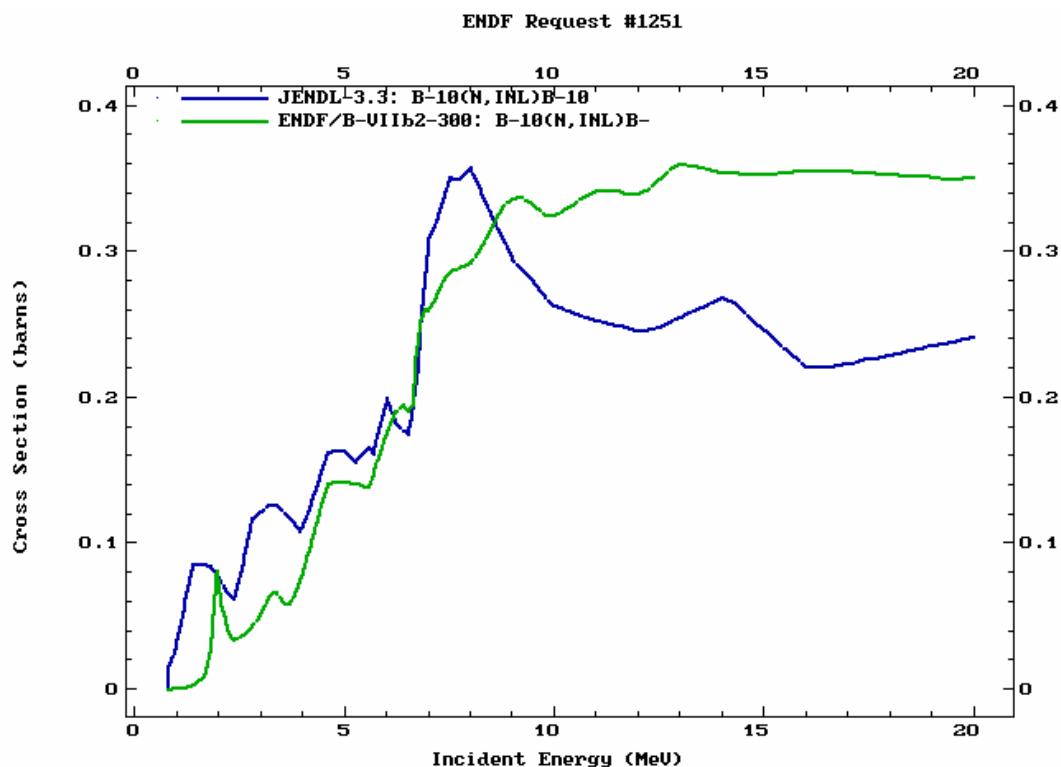


Рисунок 4. Сравнение полного сечения неупругого рассеяния нейтронов из библиотек JENDL-3 и ENDF/B-VII.

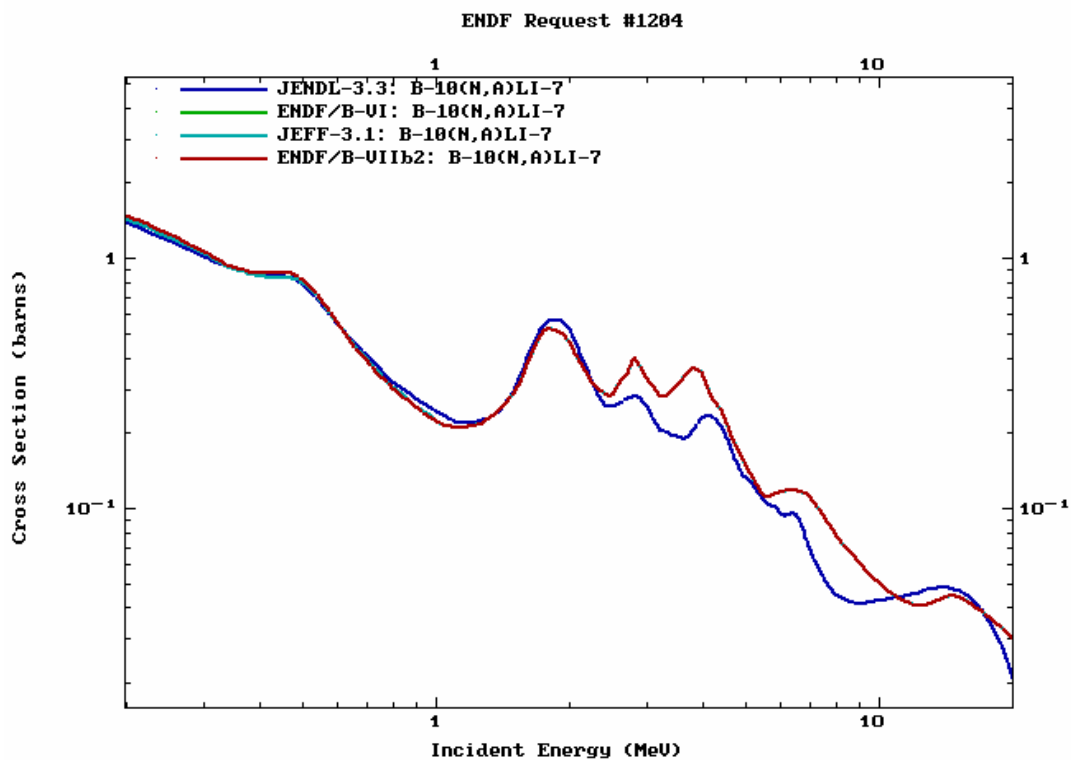


Рисунок 5. Сравнение сечения (n, α) из разных библиотек.

3. Заключение

3.1. Выводы

Для библиотеки РОСФОНД оцененные нейтронные данные для В-10 могут быть рекомендованы из библиотеки ENDF/B-VII.

3.2. Автор рекомендации

Проняев В.Г.

5.2. Бор-11

Содержание в естественной смеси: $80.2 \pm 0.3\%$.

Спин основного состояния: $3/2^-$.

1. Файлы

JENDL-3: оценка 1988 года. Ниже 1 МэВ – расчёты по многоуровневой формуле Брейта-Вигнера с резонансными параметрами С. Мугхабгхаба (1981), 1 МэВ – 4 МэВ – описание в R- матричном подходе. Для энергий выше 4 МэВ - описание экспериментальных данных с помощью теоретических моделей с учётом вклада всех возможных механизмов реакций.

ENDF/B-VII: (ENDF/B-VI, JEFF-3.1): оценка 1989 года. Ниже 1 МэВ – расчёты по многоуровневой формуле Брейта-Вигнера с резонансными параметрами С. Мугхабгхаба (1981), выше 1 МэВ оценка по экспериментальным данным и моделям с учётом вклада всех возможных механизмов реакций.

2. Данные

На рисунках 6 и 7 показано сравнение полного и упругого сечений из двух независимых оценок с имеющимися экспериментальными данными. Заметны отличия только в упругом рассеянии при энергии выше 12 МэВ. Большой разброс экспериментальных данных при энергии в 14 МэВ вероятно объясняется проблемами выделением упруго-рассеянных нейтронов из спектров эмиссии нейтронов получаемых на эксперименте.

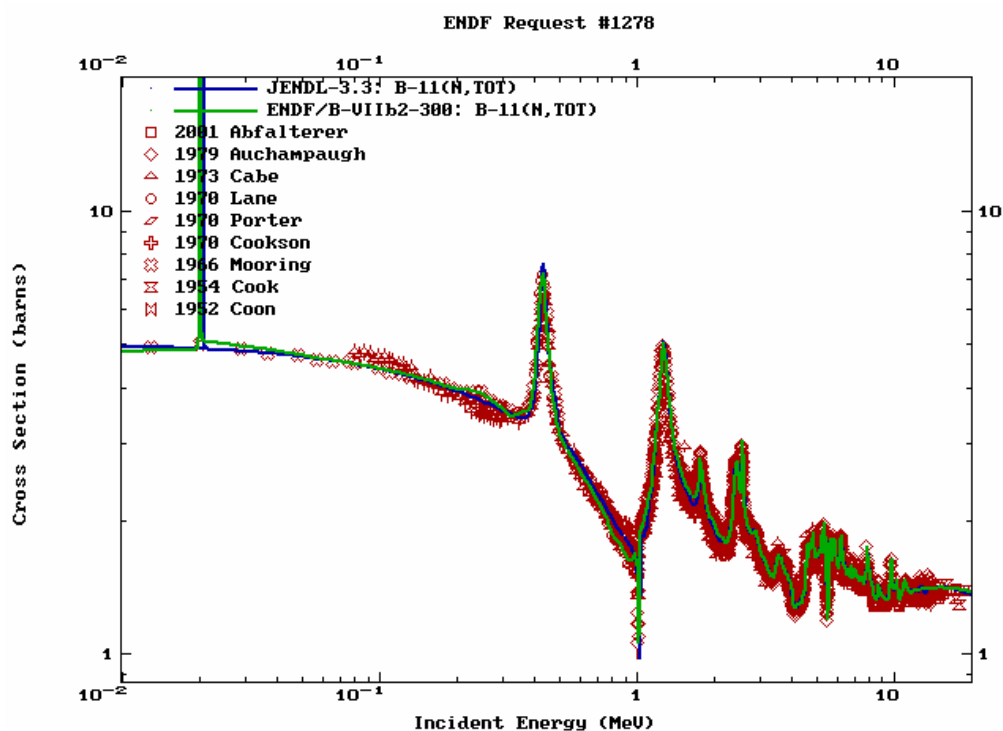


Рисунок 6. Сравнение полного сечения нейтронов В-11 из библиотек JENDL-3 и ENDF/B-VII с экспериментальными данными.

Хорошее согласие наблюдается в оценке полного сечения неупругого рассеяния (рисунок 8) и сечения (n,α) (рисунок 9). Однако оценки сечений реакций $(n, p\alpha)$ и последовательных реакций с выходом гелия и трития существенно отличаются (рисунки 10, 11). Прецизионное измерение сечения производства гелия Кнеффом ($X4=10933$) при энергии 14.8 МэВ даёт значение 306 ± 21 мб. Сечение производства гелия с учётом вклада от четырёх реакций в JENDL-3 – около 200 мб и двух реакций в ENDF/B-VII – 336 мб. учитывая также, что сечение упругого рассеяния в JENDL-3 полученное как разность между полным сечением и суммой сечений всех реакций имеет сильную энергетическую зависимость в области энергий выше 14 МэВ, то предпочтение при выборе должно быть отдано библиотеке ENDF/B-VII.

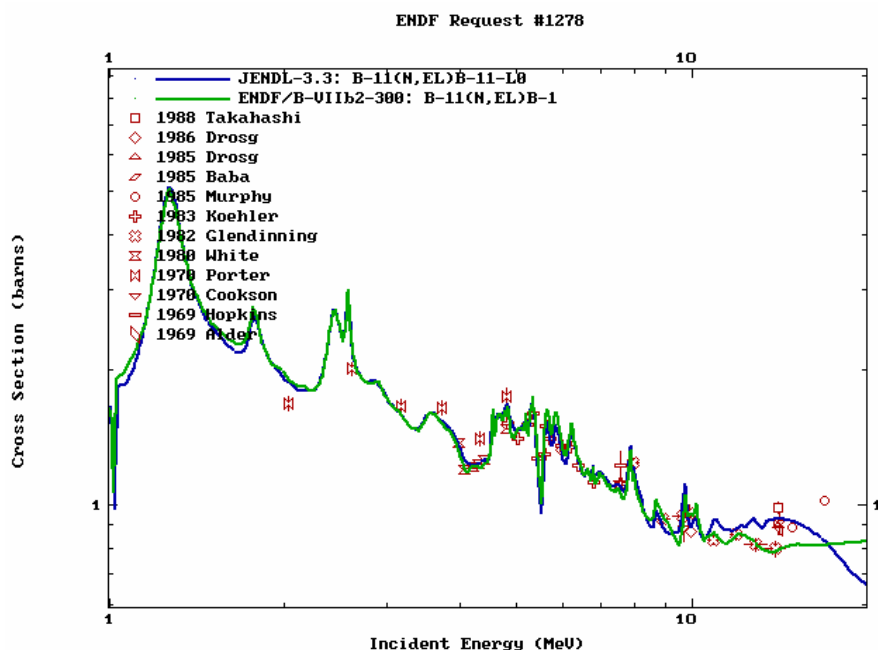


Рисунок 7. Сравнение сечения упругого рассеяния нейтронов из библиотек JENDL-3 и ENDF/B-VII с экспериментальными данными.

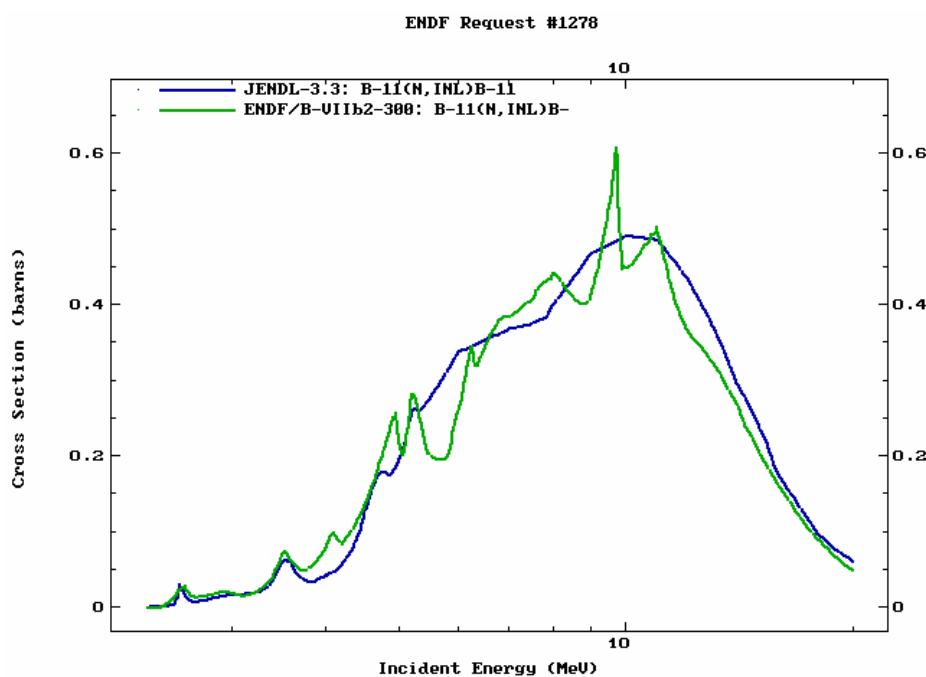


Рисунок 8. Сравнение сечения неупругого рассеяния нейтронов из библиотек JENDL-3 и ENDF/B-VII.

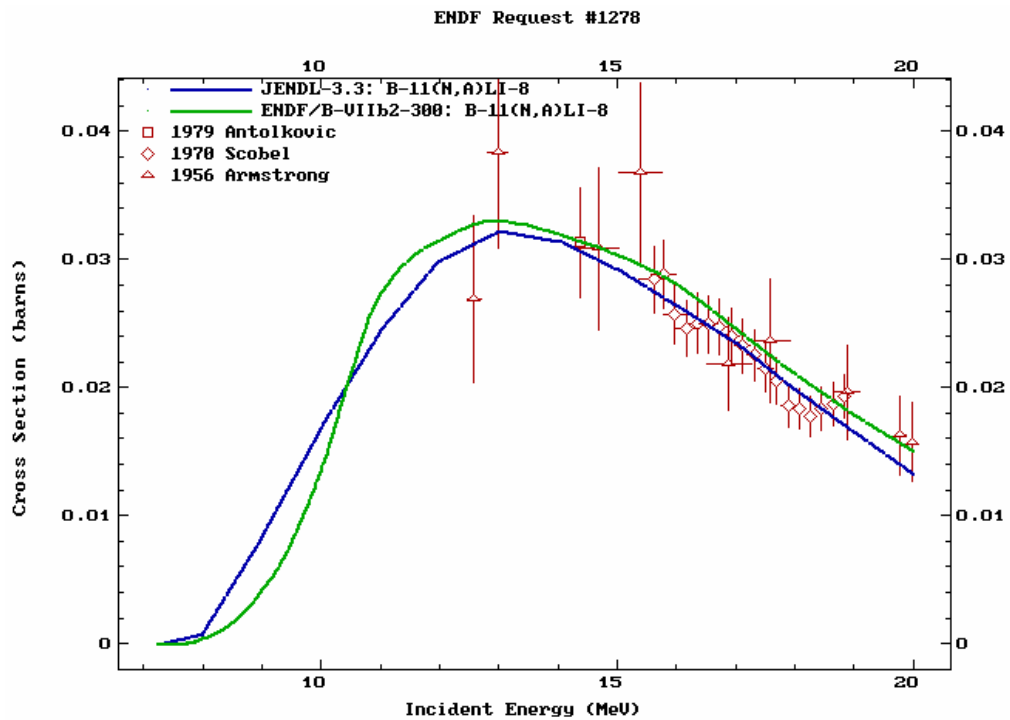


Рисунок 9. Сравнение сечения (n,α) из библиотек JENDL-3 и ENDF/B-VII с имеющимися экспериментальными данными.

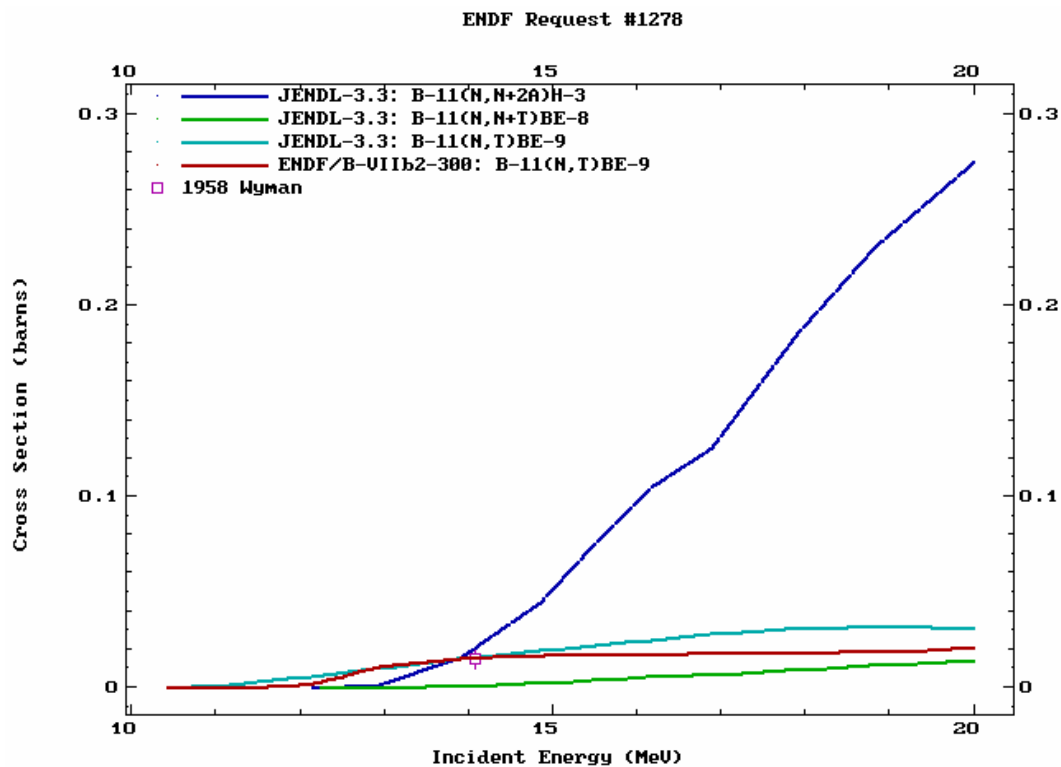


Рисунок 10. Сравнение сечения ведущих к производству трития из библиотек JENDL-3 и ENDF/B-VII с имеющимися экспериментальными данными.

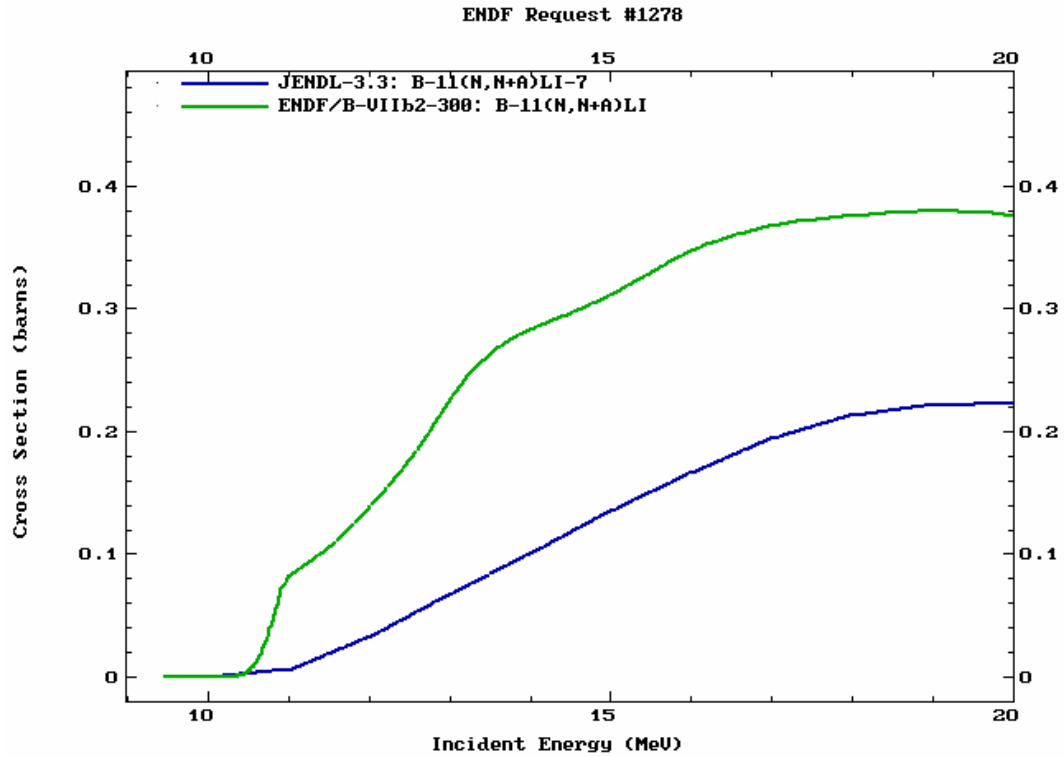


Рисунок 11. Сравнение сечения $(n, n \alpha)$ из библиотек JENDL-3 и ENDF/B-VII.

3. Заключение

3.1. Выводы

Для библиотеки РОСФОНД оцененные нейтронные данные для В-11 могут быть рекомендованы из библиотеки ENDF/B-VII или из JEFF-3.1.

3.2 Автор рекомендации

Проняев В.Г.

6. УГЛЕРОД

Общие замечания.

Природный углерод содержит два стабильных изотопа в следующих атомарных концентрациях:

^{12}C – 98.89%;

^{13}C – 1.11%.

Существует также весьма долгоживущий ($T_{1/2}=5730$ у) изотоп ^{14}C , сечения нейтронных реакций на котором также должны быть представлены в библиотеке.

Для отдельных изотопов углерода полных файлов оцененных данных нет. Только в библиотеке EAF-99 представлены данные о нейтронных сечениях, базирующиеся на оценках, сделанные в 1992г Копецким и Ниропом для EAF-3, частично пересмотренные в 1994 г. Грудзевичем, Зеленецким и Пащенко для библиотеки ADL-3 и еще дополненные и частично пересмотренные в 1998 г. Саблетом, Копецким и Форрестом. В современных версиях остальных библиотек углерод представлен файлом для естественной смеси. При этом при энергиях ниже 20 МэВ используются две независимых оценки:

оценка К. SHIBATA (JAERI, 1993г.), в которой сечения при энергиях ниже 4.8 МэВ заменены на оценку, принятую в ENDF/B-VI, используемая в библиотеке JENDL3.3;

оценка С.У. Fu, Е.А. Axton and F.А. Perey (ORNL, 1990г), используемая в библиотеках ENDF/B-VI, ENDF/B-VII, ФОНД-2.2 и JEF3.1

Ниже приводится сравнение двух этих оценок между собой и с экспериментальными данными.

В библиотеку РОСФОНД намечено включить полный файл данных для природного углерода (раздел А) и файл с данными о нейтронных сечениях для ^{14}C (раздел Б).

6.1 Углерод-13

Содержание в природной смеси 1.11%.

Полного набора нейтронных данных нет ни в одной библиотеке. В EAF-2003 содержится оценка нейтронных сечений всех реакций, возможных при энергиях до 20МэВ. Согласно этой оценке тепловое сечение захвата и резонансный интеграл составляют 1.27 миллибарна и 0.6 миллибарна. Изотоп имеет 3 резонанса, лежащих ниже 1-го резонанса основного изотопа (2078 кэВ) – при 152.9 кэВ, 173.6 кэВ и 1755кэВ. Они учтены в файле данных для природного углерода.

Заключение.

Принять в РОСФОНД файл данных из EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

6.2 Углерод-14

1. Общие характеристики C-14

Файл оценки нейтронных реакций для C-14 был взят из EAF-2003, поскольку при ее формировании рассматривались предыдущие оценки EAF99 и ADL3. Она была сделана в 2003 году J-Ch. Sublet, J. Kopecky and R. A. Forrest. В библиотеке содержатся файл нейтронных данных MF=3 для реакций MF=16,17,22,102,104,105,107 и для них же файл распадных данных MF=8, которые не вносятся в окончательный вариант файла C-14.

1.1. $Z=6$

1.2. $A=14$

1.3. $A_w= 1.388300+1$

1.4. Содержание в естественной смеси:

1.5. Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Энергия реакции, Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, эВ |
|-----|----------------|-------------------------|--------------------------|
| 16 | (n,2n) | -8.177500+6 | 8.766600+6 |
| 17 | (n,3n) | -1.312400+7 | 1.406900+7 |
| 22 | (n,na) | -1.201200+7 | 1.287700+7 |
| 102 | (n, γ) | | |
| 104 | (n,d) | -1.860700+7 | 1.994700+7 |
| 105 | (n,t) | -1.722700+7 | 1.846800+7 |
| 107 | (n, α) | -1.150800+7 | 1.233700+7 |

1.6. Радиоактивность: радиоактивен $T_{1/2}=5.73e+3$ лет
 β^- -распад, $E=49.5$ KeV

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi= 0^+$;

2.2. Радиус рассеяния: $R=3.253689-1$

2.3. Резонансные параметры не приводятся (сечения во всей области энергий заданы поточечно)

2.4. Область неразрешенных резонансов отсутствует

3. Сечения нейтронных реакций

На рисунке 1 представлены все нейтронные реакции, кроме радиационного захвата. Это сечение показано на отдельных рисунках(2,3), поскольку оно значительно меньше всех остальных.

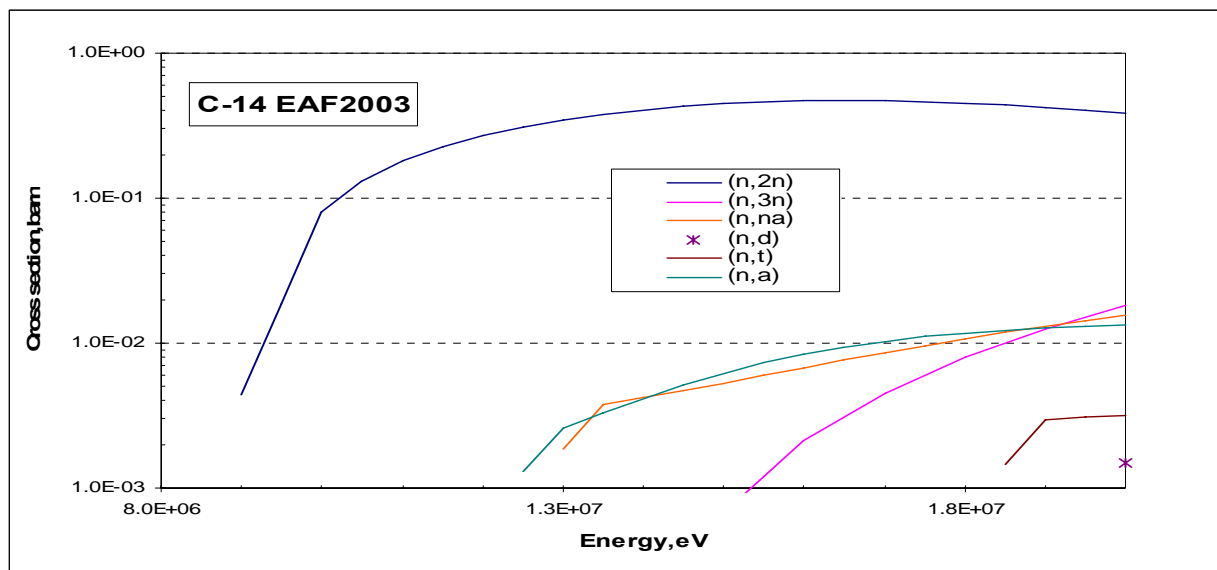


Рисунок 1. Нейтронные сечения на C-14.

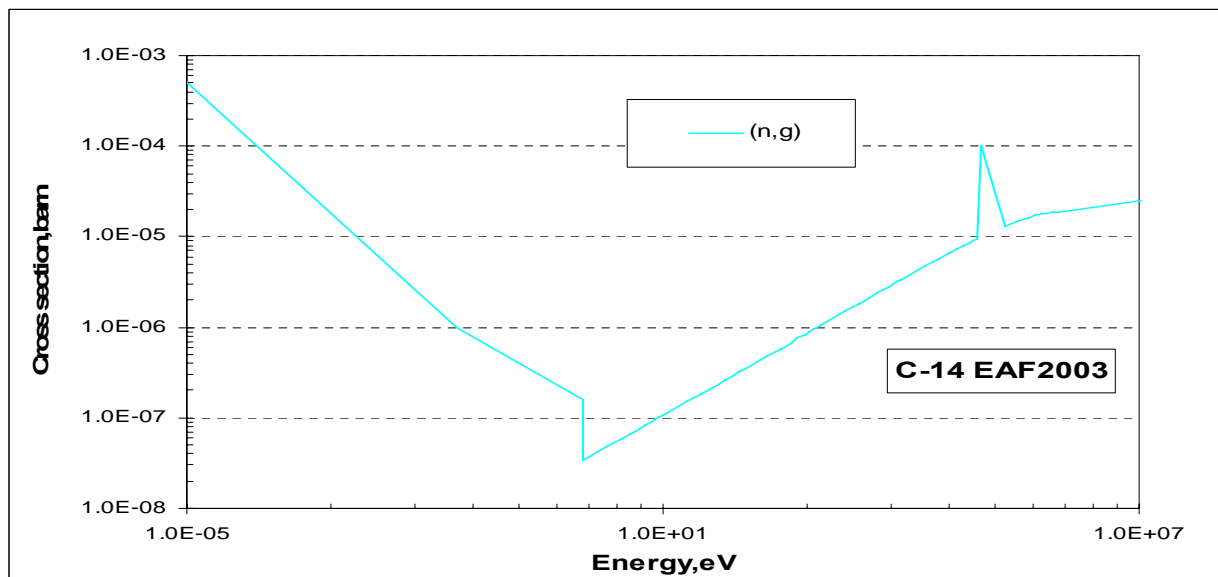


Рисунок 2. Сечение радиационного захвата на C-14 до 10 МэВ.

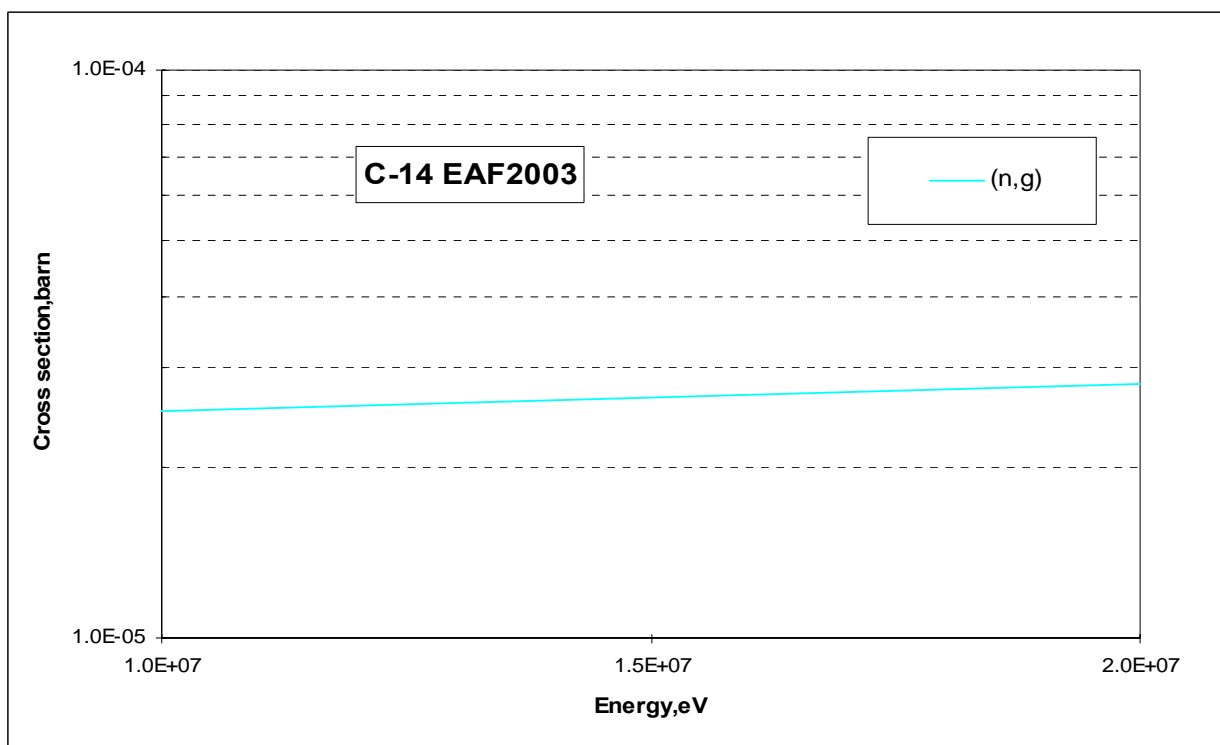


Рисунок3. Сечение радиационного захвата на С-14 от 10 до 20 МэВ.

4. Заключение

4.1. Вывод:

В РОСФОНД рекомендуется принять оценку нейтронных данных С-14 из библиотеки EAF-2003.

4.2. Автор обоснования оцененных данных:

Забродская С.В.

6.3. Природный углерод

1. Общие характеристики

1.7. $Z=6$

1.8. $A=12.00000$ (^{12}C); $A=13.003355$ (^{13}C). Среднее значение 12.011137

1.9. $A_w=11.89691$ (для ^{12}C); $A_w=11.90796$ для естественной смеси изотопов.

В оценке Φ_u и др. принято $A_w=11.8980$, что практически совпадает со значением для природной смеси изотопов; в оценке Шибата - $A_w=11.89690$, что практически совпадает со значением для ^{12}C . Последнее представляется более рациональным, т.к. ведет к правильным значениям порогов основных реакций, сечения которых определяются основным изотопом.

1.10. Содержание в естественной смеси:

1.11. Перечень нейтронных реакций на основном изотопе.

Таблица 1.
Характеристики нейтронных реакций

| MT | Реакция | Продукт, T1/2 | Энергия реакции, Q, МэВ | | | E _{порог} , эВ | | |
|-----|------------------|--------------------------|-------------------------|------------|-----------|-------------------------|------------|-----------|
| | | | Wapstra | ENDF/B-VII | JENDL-3.3 | Wapstra | ENDF/B-VII | JENDL-3.3 |
| 23 | (n,n' α) | He3 | -7.27475 | | | 7.88623 | | |
| 28 | (n,np) | B ¹¹ | -15.9569 | -15.95700 | | 17.29816 | 17.2980 | |
| 102 | (n, γ) | C ¹³ | 4.94630 | 4.94700 | 4.94638 | -5.36207 | | |
| 103 | (n,p) | B ¹² (20.2ms) | -12.5866 | -12.5880 | -12.5871 | 13.64452 | 13.6460 | 13.6450 |
| 104 | (n,d) | B ¹¹ | -13.7323 | -13.7330 | -13.7323 | 14.88661 | 14.8870 | 14.8866 |
| 107 | (n, α) | Be ⁹ | -5.70125 | -5.7020 | -5.70150 | 6.18047 | 6.18120 | 6.18075 |

Энергии всех реакций, принятые в ENDF/B-VII, достаточно (для практических целей) хорошо согласуются с последними оценками¹.

1.12. Радиоактивность: не радиоактивен

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi=0^+$ (приводятся данные для основного изотопа).

2.2. Радиус рассеяния:

$$R=0.614112(\text{ENDF/B7}); \quad R=0.63 \text{ ферми}(\text{JENDL3.3})$$

2.3. Резонансные параметры не приводятся (сечения во всей области энергий заданы поточечно)

2.4. Область неразрешенных резонансов отсутствует

¹ G.Audi, A.H.Wapstra and C.Thibault. "The Ame2003 atomic mass evaluation (II)". Nuclear Physics A729 p. 337, Dec, 2003.

3.Сечения нейтронных реакций (MF=3)

3.1.Полное сечение(MT=1)

Полное сечение в библиотеках ENDF/B-6 и JENDL3.3 приводится поточечно в двух интервалах – до 4.81 МэВ и выше этой энергии, являющейся порогом неупругого рассеяния. В первом из этих интервалов оценки полного сечения, основанные на совокупности экспериментальных данных и их R-матричного описания, совпадают (рис.1). Выше 4.81 MeV обе оценки основывались на экспериментальных данных: в ENDF/B-6 – в основном на эксперименте Perey(1972), в JENDL3.3 – на эксперименте Cierjacks(1980). Последний эксперимент характеризуется меньшим разбросом экспериментальных данных (см. рис.2), но систематических расхождений между данными этих экспериментов нет. В результате и оцененные данные оказываются весьма близкими: расхождения измеряются десятими процента и лишь к 20 МэВ возрастают до 1.5% (рис.3). Исключением является окрестность резонанса при 4.9371 МэВ, который в оценке JENFL-3.3 описывается более детально (рис.4). Учитывая, что этот резонанс рекомендован для калибровки энергетической шкалы при измерениях нейтронных сечений, представление данных в JENDL-3.3 представляется более оправданным.

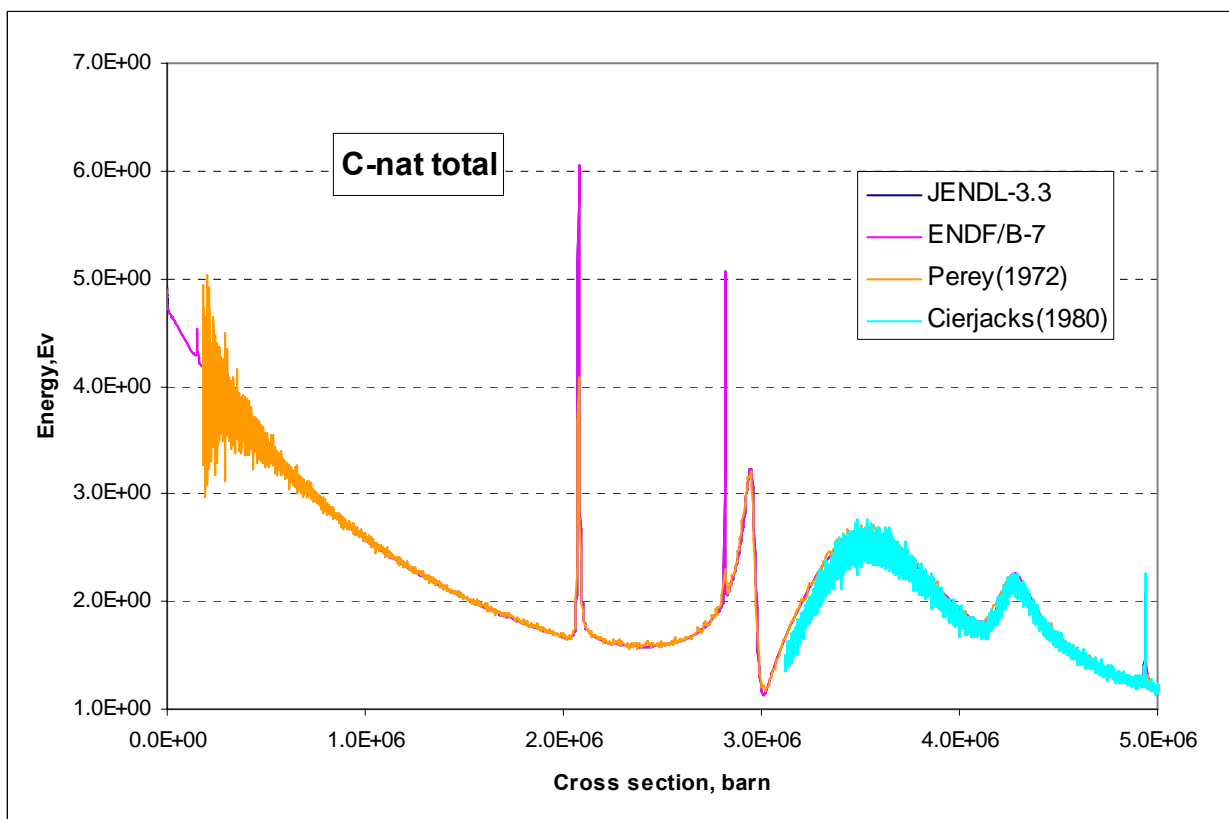


Рисунок 1. Полное сечение C-nat до 5 МэВ.

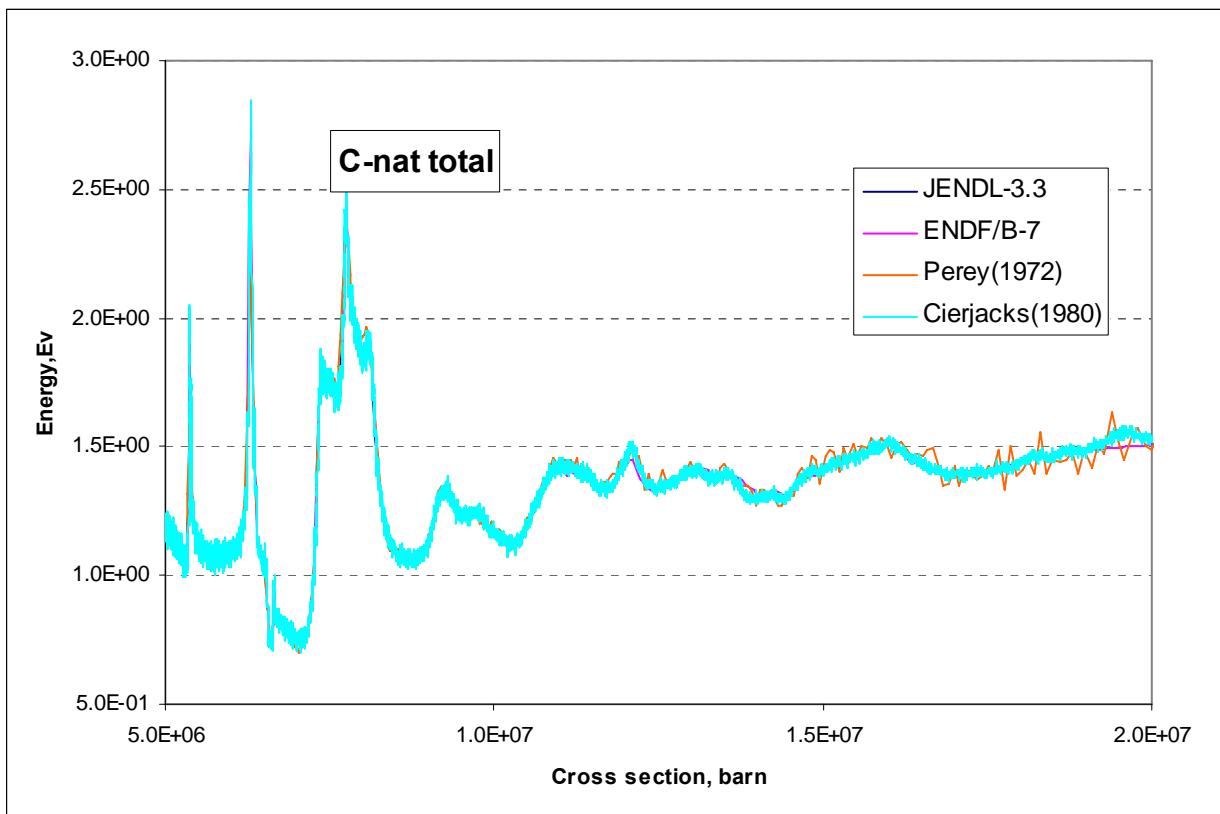


Рисунок 2. Полное сечение C-nat от 5 до 20 МэВ.

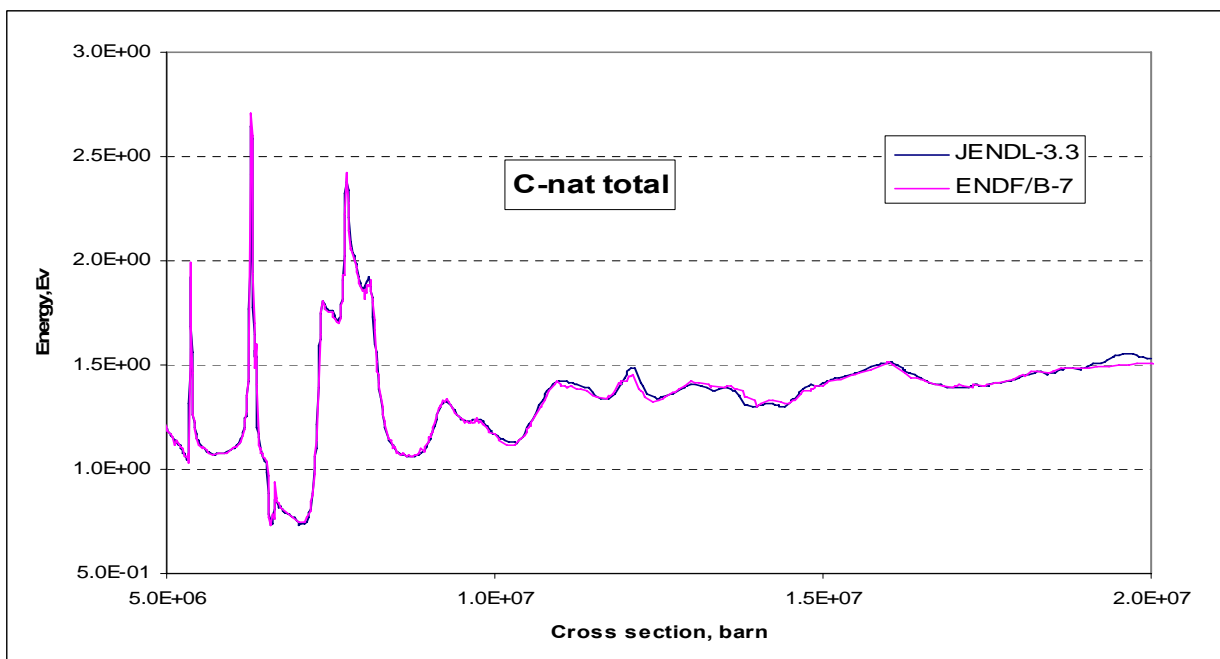


Рисунок 3. Полное сечение C-nat от 5 до 20 МэВ.

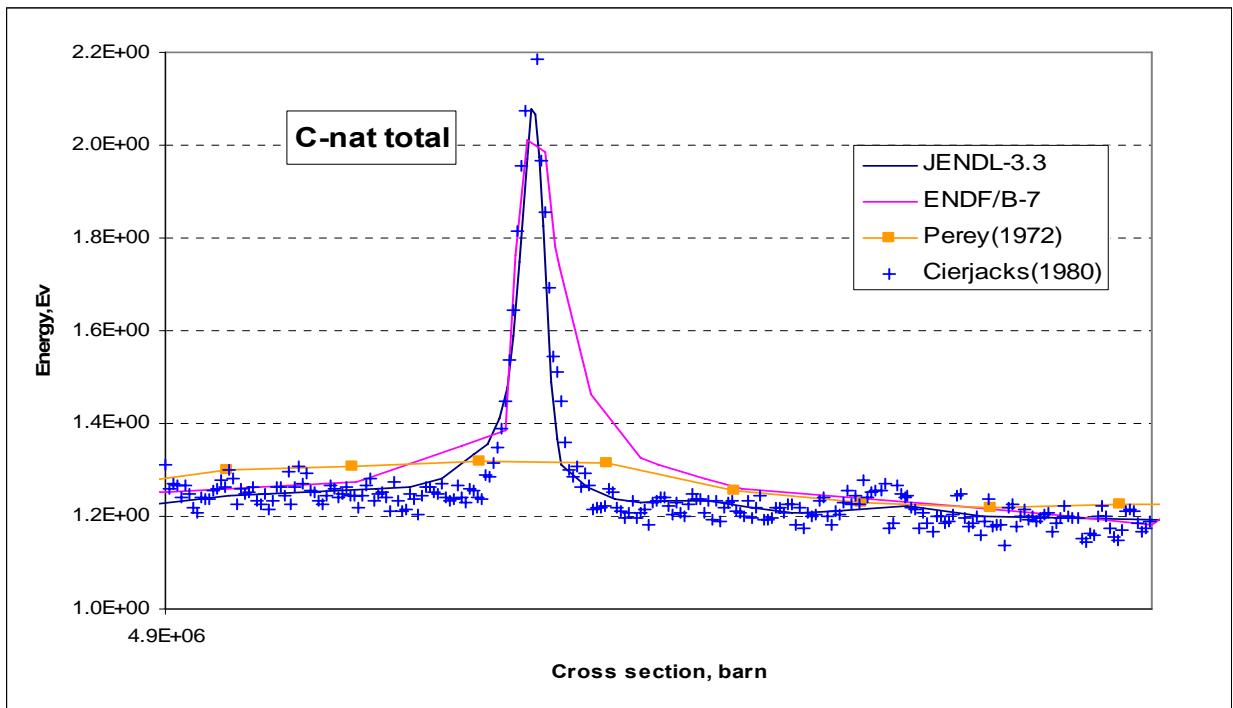


Рисунок 4. Полное сечение C-nat от 4.9 до 5 МэВ.

Результаты измерений Абфальтерера, появившиеся после выполнения оценок, отлично с ними согласуются (рис.5). Наблюдается, правда, огромные расхождения с данными Моксона (1990), которые настолько расходятся со всеми предыдущими и последующими (см. рис.2с), что их невозможно принимать во внимание: они очевидно ошибочны.

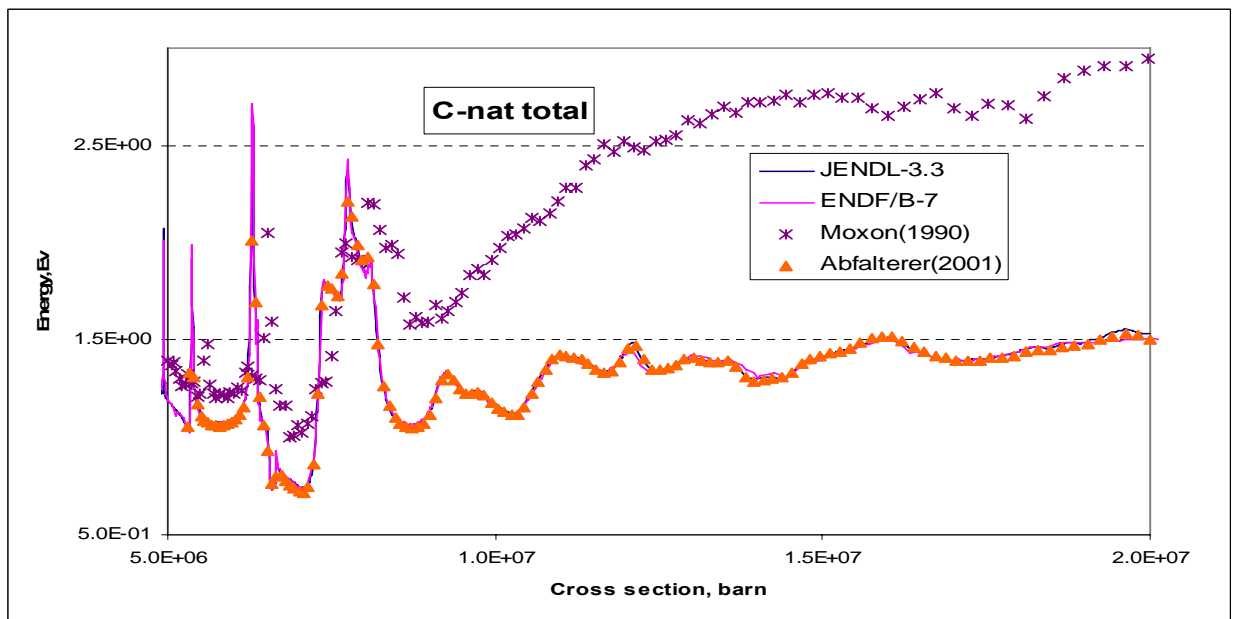


Рисунок 5. Полное сечение C-nat от 5 до 20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния(МТ=2)

Ниже порога неупругого рассеяния отличия сечения рассеяния от полного сечения отличаются только вкладом радиационного захвата в последнее. Даже в тепловой области этот вклад (3.54 миллибарна) не намного превышает погрешность, с которой известно сечение рассеяния (2 миллибарна). Понятно, что в области ниже порога оцененные сечения упругого рассеяния совпадают столь же хорошо, как и оценки полного сечения.

Упругое рассеяние на углероде при энергиях ниже 2 МэВ рекомендуется к использованию как один из стандартов при измерениях нейтронных сечений. В этой области сечения, принятые в рассматриваемых оценках в точности соответствуют рекомендациям Международной группы по нейтронным стандартам². Видимые расхождения в оценках проявляются только с 10 МэВ (рис.6). Приведенные на этом рисунке экспериментальные данные, не позволяют отдать преимущество какой-либо из оценок.

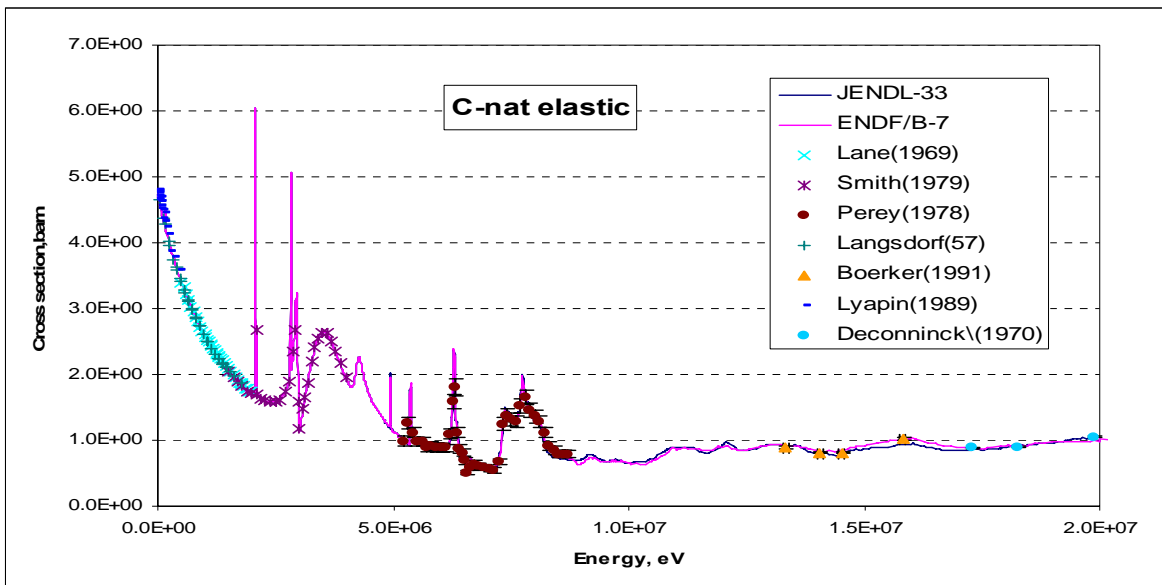


Рис.6а. Сечение упругого рассеяния на C-nat до 20 МэВ.

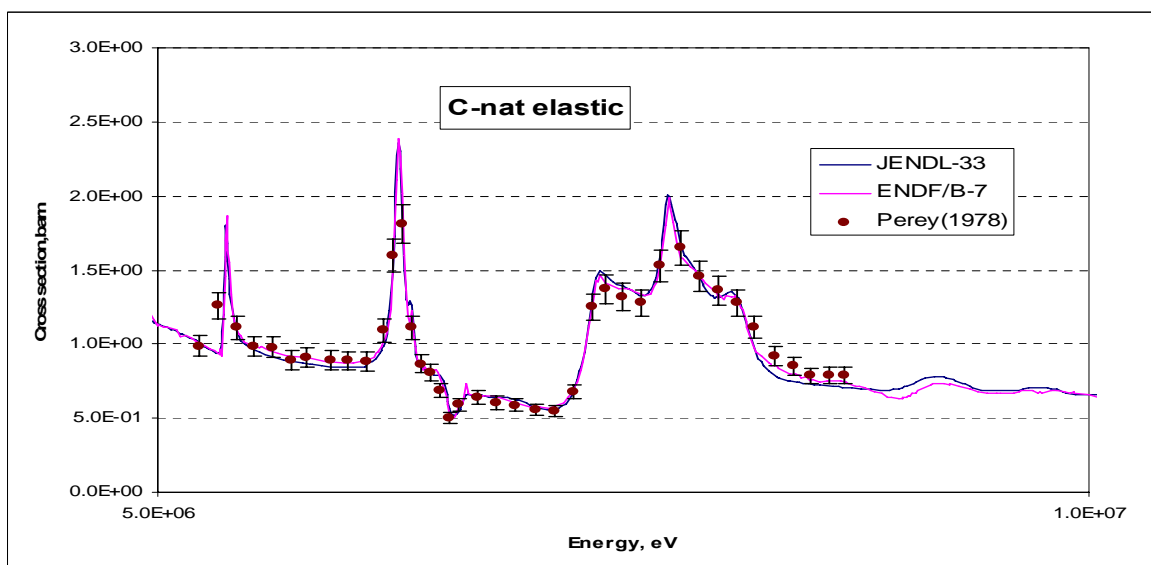


Рис.6б. Сечение упругого рассеяния на C-nat от 5 до 10 МэВ.

² Nuclear Standards for Nuclear Measurements. NEANDC-311"U", 1992. p. 34.

3.3. Сечение неупругого рассеяния(МТ=4)

Неупругое рассеяние описывается в библиотеках JENDL3.3 и ENDF/B-7 различным количеством уровней. В таблице 2 приведены энергии уровней в библиотеках.

Таблица 2-Уровни неупругого рассеяния для C-nat, МэВ.

| N | JENDL3.3 | ENDF/B-6 | N | JENDL3.3 | ENDF/B-6 |
|----|--------------|--------------|----|----------|----------|
| 51 | 4.439 | 4.439 | 63 | 12.000 | |
| 52 | 7.500 | 7.653 | 64 | 12.500 | |
| 53 | 7.650 | 9.638 | 65 | 13.000 | |
| 54 | 8.000 | 10.800 | 66 | 13.500 | |
| 55 | 8.500 | 11.800 | 67 | 14.000 | |
| 56 | 9.000 | 12.700 | 68 | 14.500 | |
| 57 | 9.500 | 13.350 | 69 | 15.000 | |
| 58 | 9.640 | 14.080 | 70 | 15.500 | |
| 59 | 10.000 | 15.080 | 71 | 16.000 | |
| 60 | 10.500 | 16.080 | 72 | 16.500 | |
| 61 | 11.000 | 17.080 | 73 | 17.000 | |
| 62 | 11.500 | 18.080 | 74 | 17.500 | |
| | | | 75 | 18.000 | |
| | | | 91 | 7.275 | 7.275 |

При энергии возбуждения выше 7.2748МэВ ядро углерода становится неустойчивым по отношению к распаду на три альфа-частицы. Поэтому неупругое рассеяние на уровнях, лежащих выше этой энергии, является по существу реакцией (n,n'3 α). Известны характеристики двух таких уровней – с энергиями 7.653 МэВ и 9.638 МэВ. Как видно из приводимой схемы, при расчете сечений неупругого рассеяния и в той и в другой оценке были введены фиктивные псевдоуровни. Их назначение – частично сократить неточности в описании спектров неупругого рассеяния моделью испарения, используемой для описания спектра неупругого рассеяния с возбуждением дискретных уровней. То, что число этих уровней в японской оценке больше, чем в американской, отнюдь не означает большую ее реалистичность.

Что касается неупругого рассеяния на первом уровне, то обе сравниваемые оценки опирались на экспериментальные данные, однако на данные разных работ. Результаты этих работ в большинстве своем не опубликованы, а опубликованные недоступны через базу данных EXFOR. Из рис. 7 видно, что эксперименты, на которых основана оценка ENDF/B-VII, отличались более высоким разрешением. Что касается неупругого рассеяния при энергиях выше порога второго уровня, то в американской оценке также использовались результаты целого ряда экспериментальных работ, не содержащихся в базе данных EXFOR, тогда как в JENDL-3.3 ссылок на экспериментальные работы, использовавшиеся при оценке сечений неупругого рассеяния быстрых нейтронов, не содержится. Исходя из изложенного оценка сечений неупругого рассеяния, включенная в ENDF/B-VII, представляется предпочтительней.

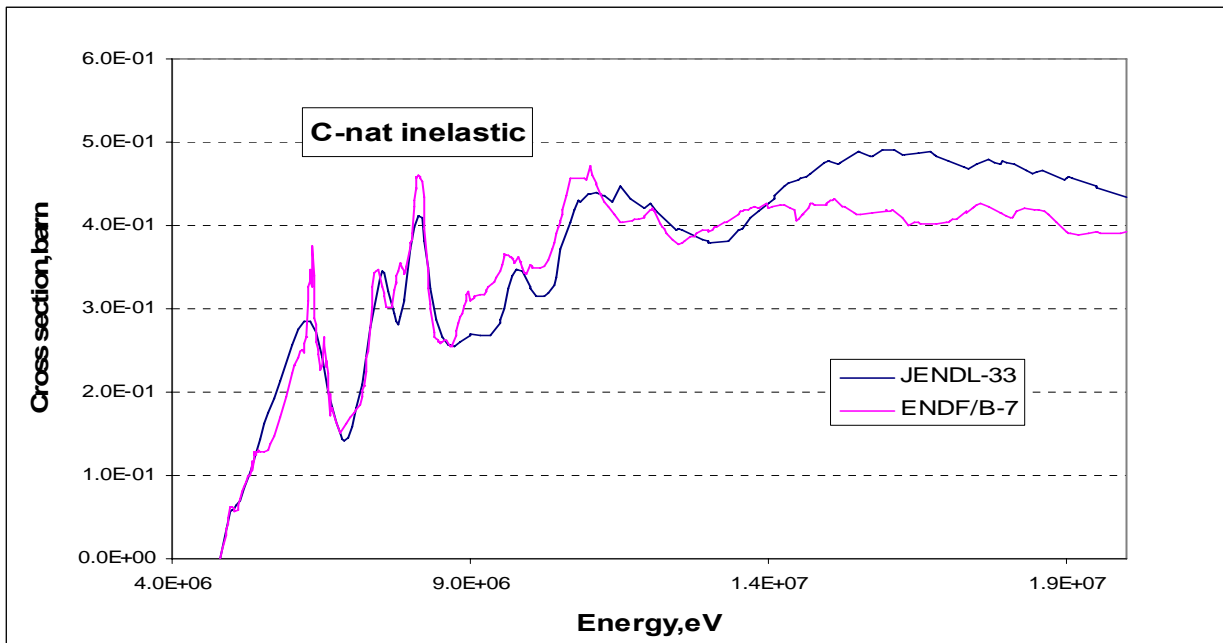


Рисунок 7. Сечение неупругого рассеяния на C-nat

3.4. Сечение реакции(n,np) (MT=28)

Сечение этой реакции в оценке JENDL-3.3 не определяется. В описании ENDF/B-7 сказано, что эта оценка эмпирическая. В EXFORе есть только одна работа P.Dimbylow(1980) для C-12, начиная с 20 MeV до 60 MeV. На рис. приводятся эти данные в двух точках – 20 и 22 MeV. Видно, что при 20 MeV экспериментальное сечение в 2 раза ниже. Сечение реакции (n,np) приводится также в библиотеке EAF-99 (оценка из ADL-3). Согласно этой оценке сечение при 20 МэВ превышает 81 миллибарн. Таким образом, оценка ENDF/B-VII все же ближе к единственному эксперименту, и тем предпочтительнее.

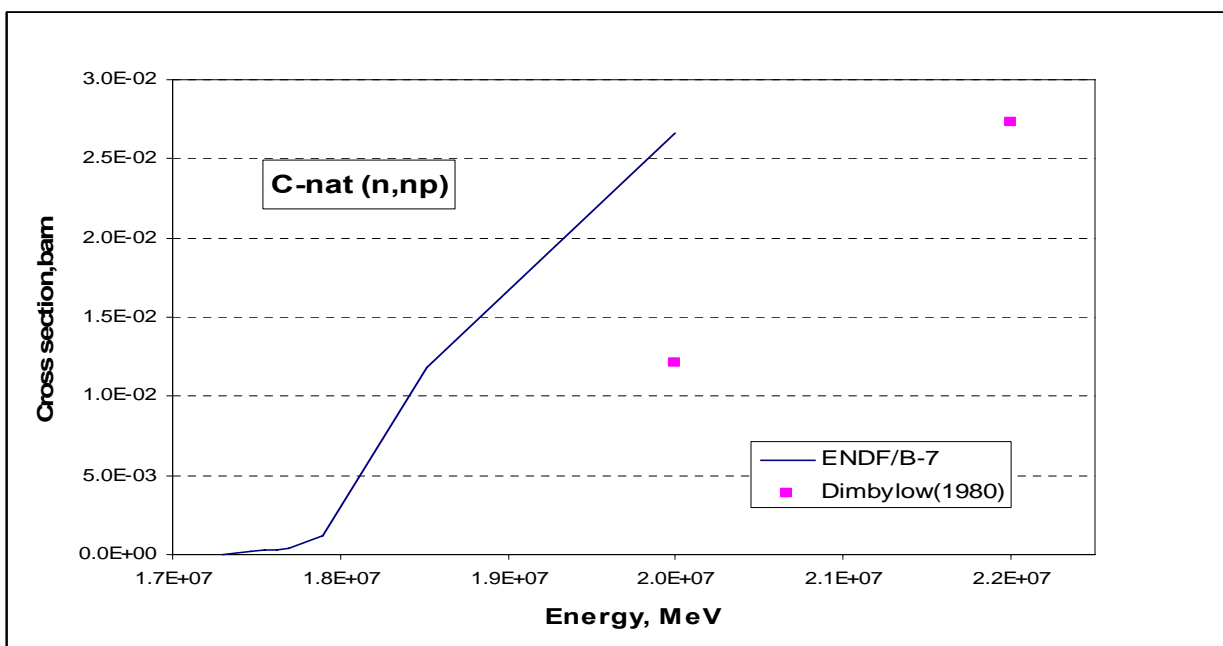


Рисунок 8. Сечение реакции (n,np) на C-nat

3.7. Сечение реакции(n, γ) (MT=102)

В ENDF/B-7 сечение радиационного захвата оценивалось до 1 MeV, как $1/v$ с тепловым сечением 3.36 mb, а выше использовались экспериментальные данные Cook(1957)(данные в EXFOR отсутствуют).

В JENDL3.3 сечение радиационного захвата до 100 keV представлено как $1/v$ с тепловым сечением 3.53 миллибарна, далее до 5 MeV – захват s- и p-волны с учетом данных Igashira(1993)(нет в EXFOR). Выше 5 MeV - экспериментальные данные Cook(1957).

На каком основании тепловое сечение захвата было принято в ENDF/B-VII равным 3.36 миллибарн, неясно. Последняя оценка Мухабхаба³ совпадает с предыдущей и дает 3.53 ± 0.07 миллибарн в точном соответствии с экспериментом Джарни⁴, отличающемся от предыдущих существенным повышением точности. Оценка сечения радиационного захвата в JENDL-3.3 представляется более обоснованной.

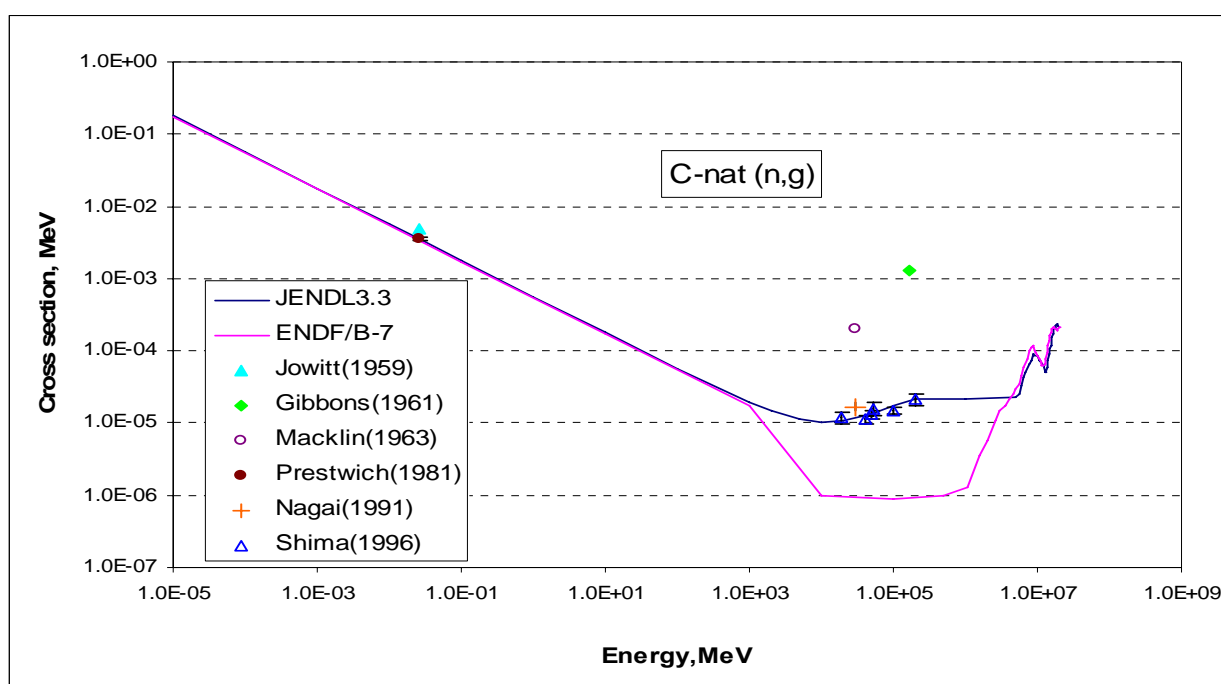


Рисунок 9. Сечение реакции (n, γ) на C-nat

3.5. Сечение реакции(n,p) (MT=103)

И в ENDF/B-7 и в JENDL3.3 оценки сечений реакции (n,p) строились на экспериментальных данных Rimmer(1968) для C-12, хотя как видно из рисунка 10, JENDL3.3 более точно повторяет эксперимент. В EXFORе содержатся также данные Ablesimov(1972) в области порога реакции, данные которой существенно выше результатов обеих оценок. Однако возрастание сечения до миллибарна при энергии 14.1 МэВ столь близкой к порогу (13.65 МэВ) представляется сомнительным и не может служить основанием для недоверия к оценке.

³ S.F.Mughabghab, Thermal Neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and G-Factors. INDC(IND)-25/GV. IAEA, Vienna, Feb. 2003.

⁴ E.T.Jurney et al. Phys.Rev/C, 25, p. 2810, 1982. EXFOR № 12744.

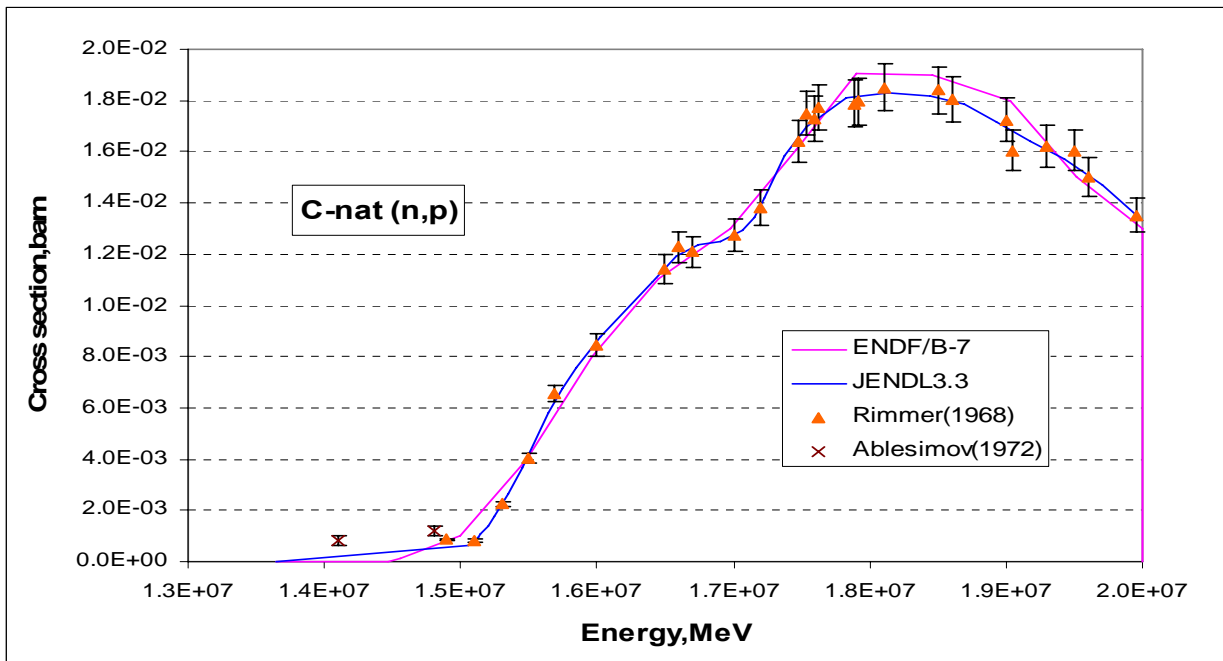


Рисунок 8. Сечение реакции (n,p) на C-nat

3.6. Сечение реакции(n,d) (MT=104)

В EXFOR экспериментальных данных нет ни для C-nat, ни для C-12 до 20 MeV. Оценка сечения в ENDF/B-7, как указано в описании, основывалась на данных Ames(1957) для обратной реакции. Она совпадает с данными, содержащимися в EAF-99. В JENDL3.3 использовали результаты модельных расчетов. На рисунке видно, что от порога оценки сильно расходятся. Оценка ENDF/B-VII представляется более надежной.

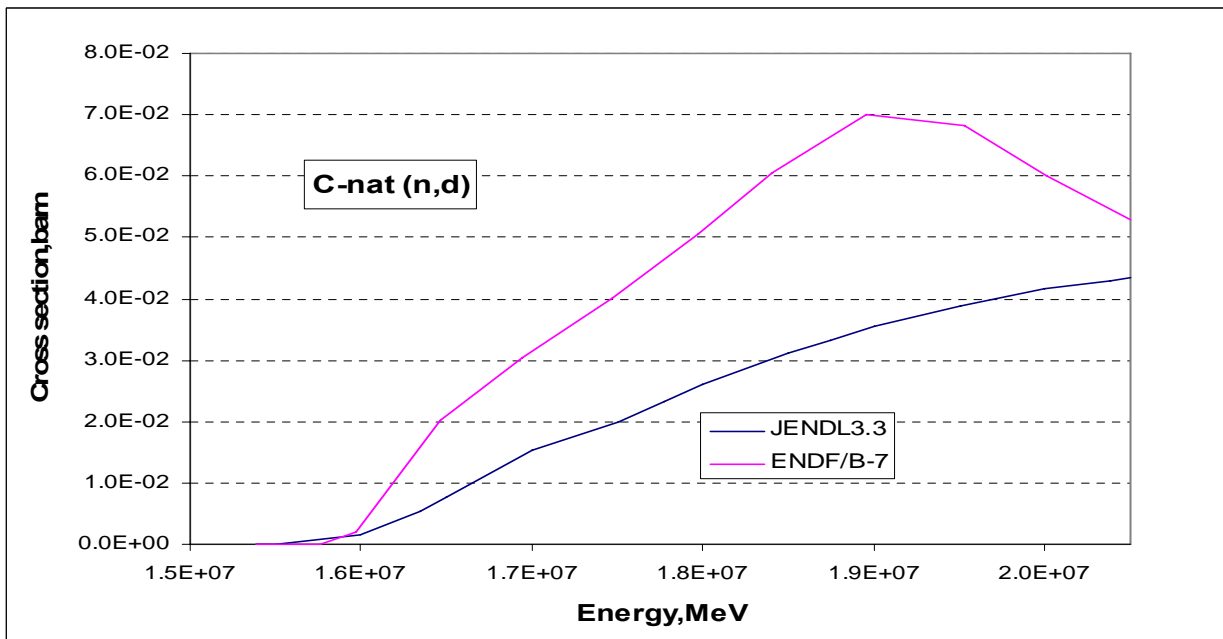


Рисунок 9. Сечение реакции (n,d) на C-nat

3.7. Сечение реакции(n, α) (MT=107)

Экспериментальных данных для реакции (n, α) на C-nat в EXFORe нет. В ENDF/B-7 оценка основывалась на 6 экспериментах 60-70-х годов, результаты которых отсутствуют в EXFORe. JENDL3.3 также ссылается на ряд экспериментов, три из которых представлены на рисунке(Stevens, Chatterjee, Brede). Все экспериментальные данные приведены для изотопа C-12.

Оценка ENDF/B-7 прекрасно согласуется с набором экспериментальных данных, не считая самый поздний эксперимент Brede(1991), результаты которого противоречат всем остальным.

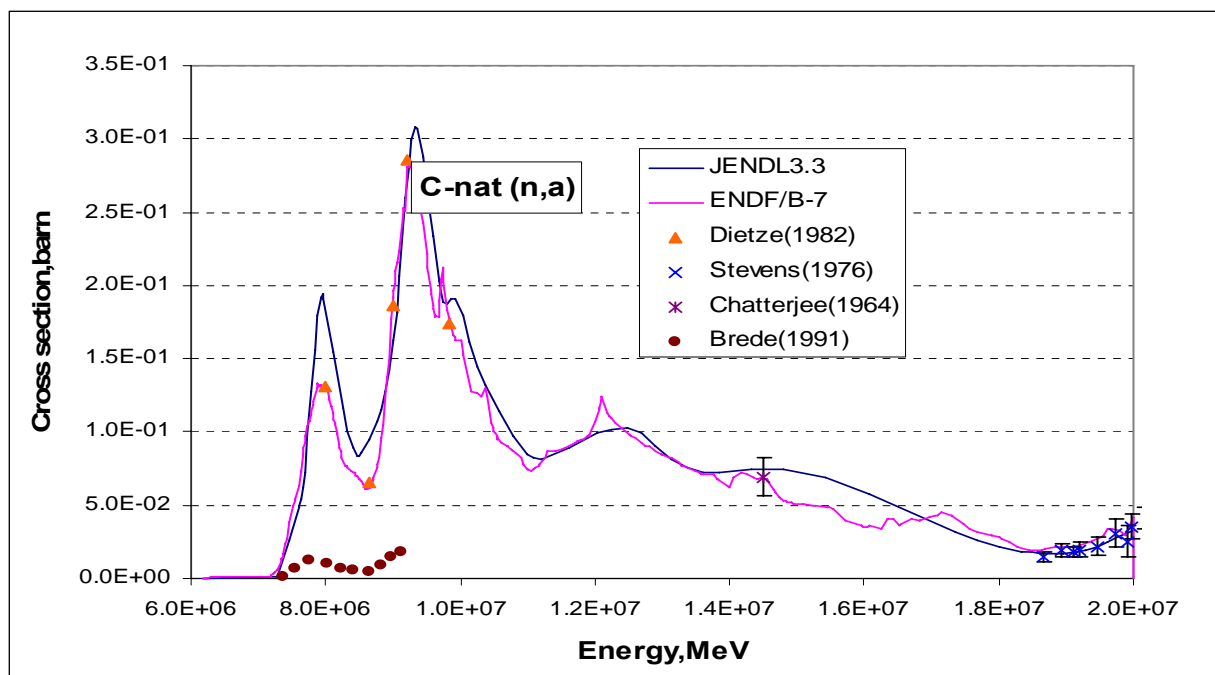


Рисунок 10. Сечение реакции (n, α) на C-nat

4. Угловые распределения (MT=4)

4.1. Упругое рассеяние

Поскольку упругое рассеяние на углероде используется в качестве стандарта при измерениях нейтронных данных при энергиях ниже 2 МэВ, оценка угловых распределений находилась (и находится) под международным контролем. Понятно, что угловые распределения упругого рассеяния в обеих оценках в этой области энергий совпадают с рекомендациями Международной рабочей группы по нейтронным стандартам². Оцененные данные совпадают друг с другом и при более высоких энергиях вплоть до 20 МэВ и, таким образом, вопрос о выборе оцененных данных не стоит. На рис. 11(а-г) приведены типичные примеры сравнения оцененных и экспериментальных данных при энергиях выше 2 МэВ.

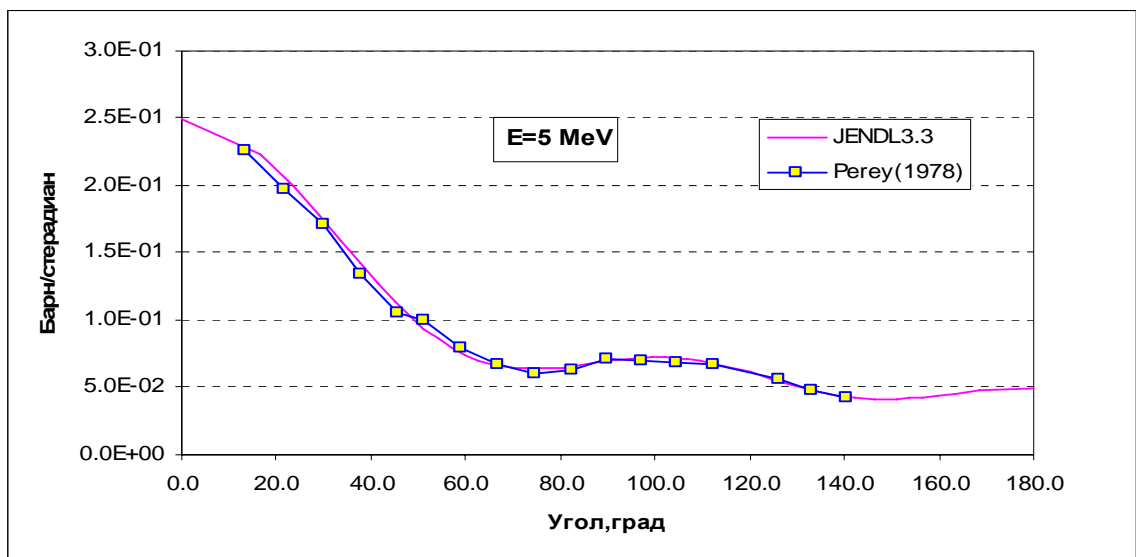


Рисунок 11.а. Угловое распределение упругого рассеяния.

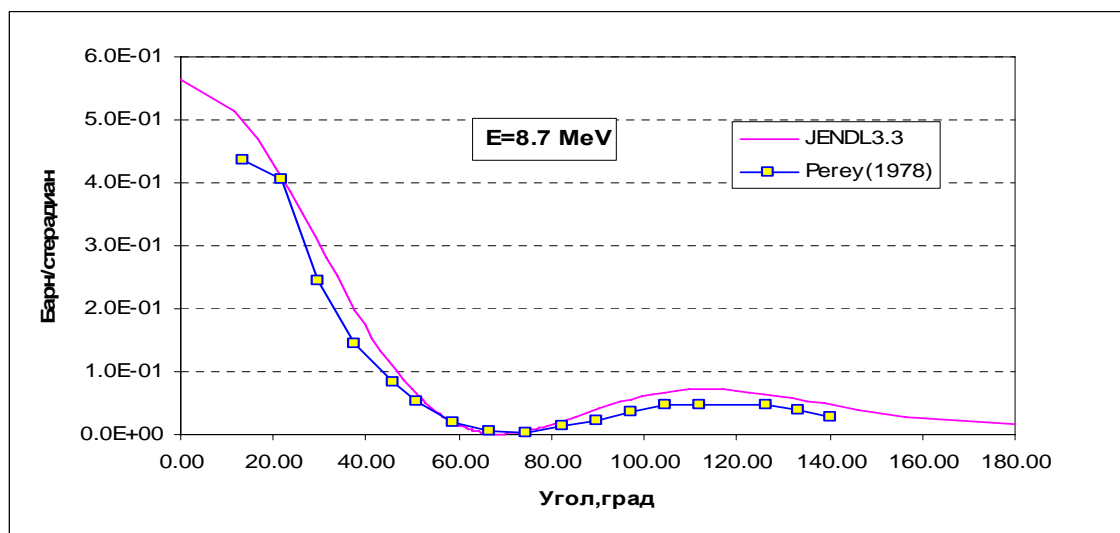


Рисунок 11.б. Угловые распределения упругого рассеяния.

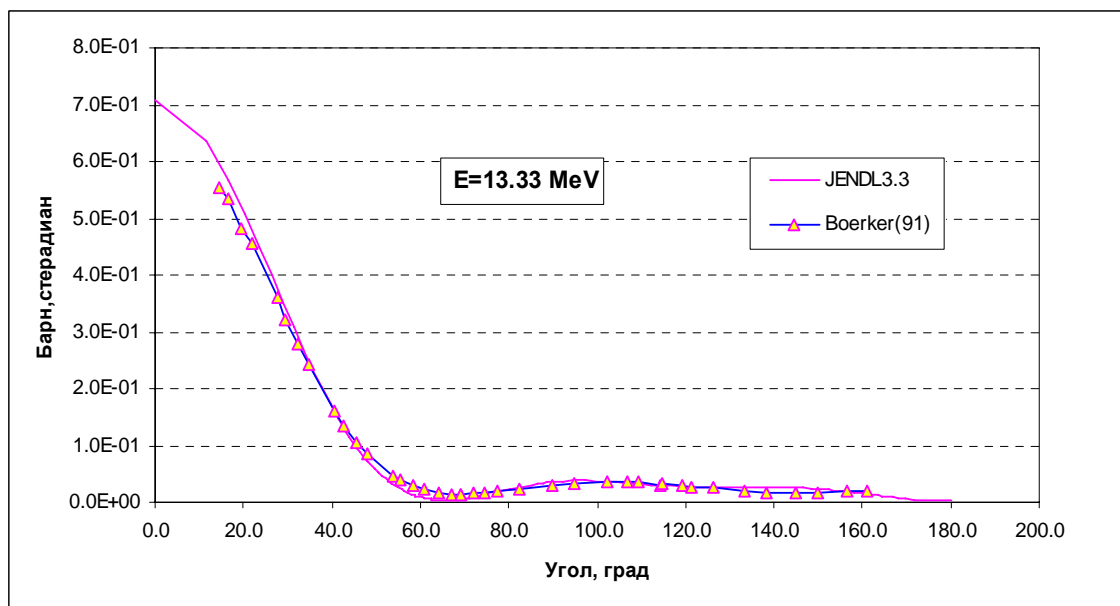


Рисунок 11.в. Угловые распределения упругого рассеяния.

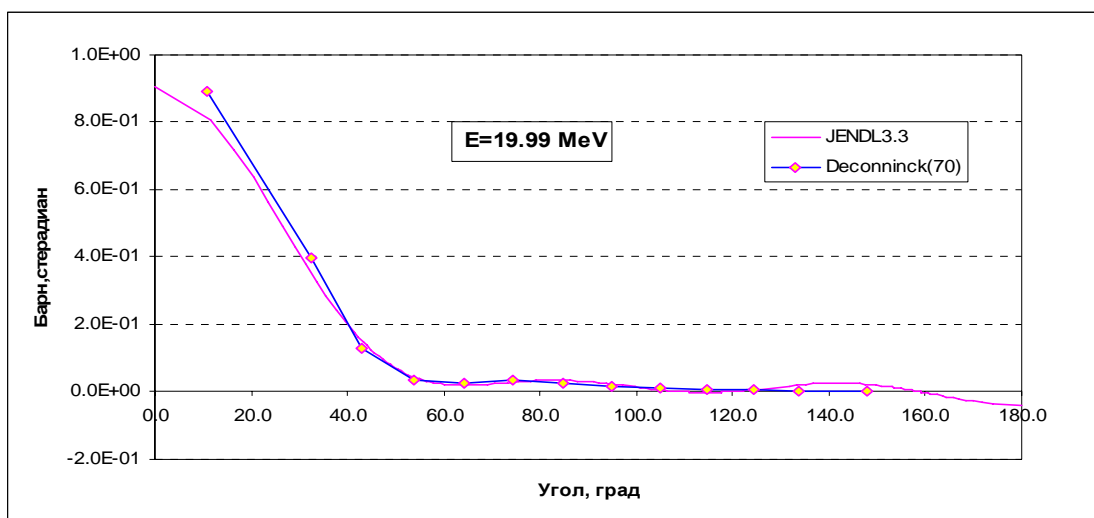


Рисунок 11.г. Угловые распределения упругого рассеяния.

4.2. Неупругое рассеяние.

Неупругое рассеяние, как описывалось выше, в библиотеках представлено по-разному. Естественно, различаются и угловые распределения. Сходство лишь в том, что для неупругого рассеяния на реальных уровнях в обоих оценках даются угловые распределения, оцененные на основе немногих экспериментальных данных, а для рассеяния на фиктивных уровнях и на континууме – изотропные. Коль скоро решено принять в РОСФОНД оцененные данные по сечениям неупругого рассеяния из ENDF/B-VII, естественно принять и угловые распределения из этой библиотеки. Заметим, что экспериментальные данные, доступные через EXFOR⁵, не позволяют отдать предпочтение какой-либо из оценок. (см., например, рис. 12а, б).

Угловые распределения на уровнях заданы изотропными в системе центра инерции, а при рассеянии на континууме – почему-то изотропными в лабораторной системе координат. С последним трудно согласиться и в файле РОСФОНД неупругое рассеяние на континууме изотропно в лабораторной системе координат.

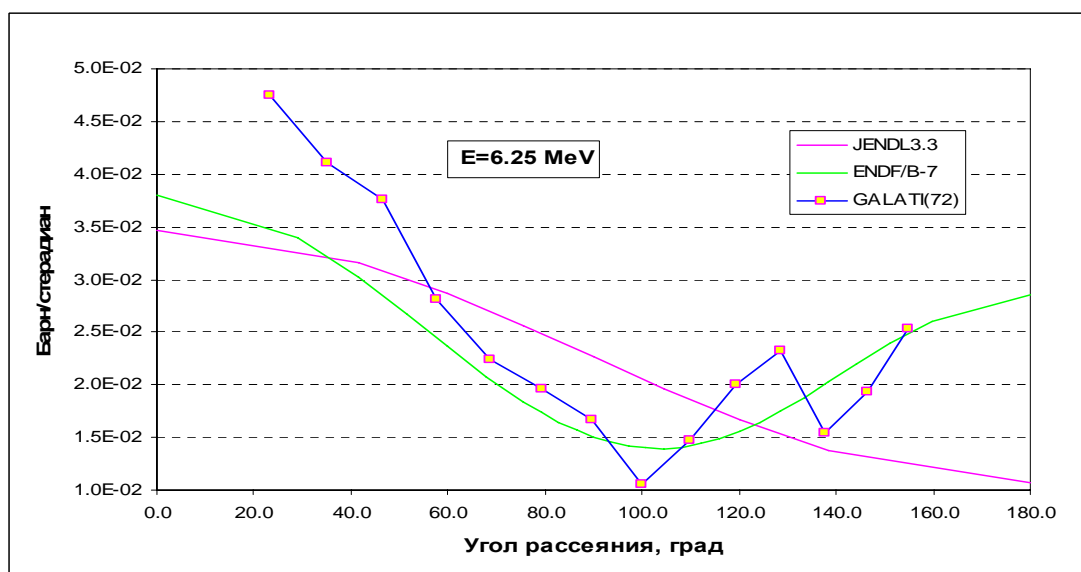


Рисунок 12а. Угловые распределения неупругого рассеяния.

⁵ W.Galati et al, PR/C,5,1508,197205 EXFOR №10174.

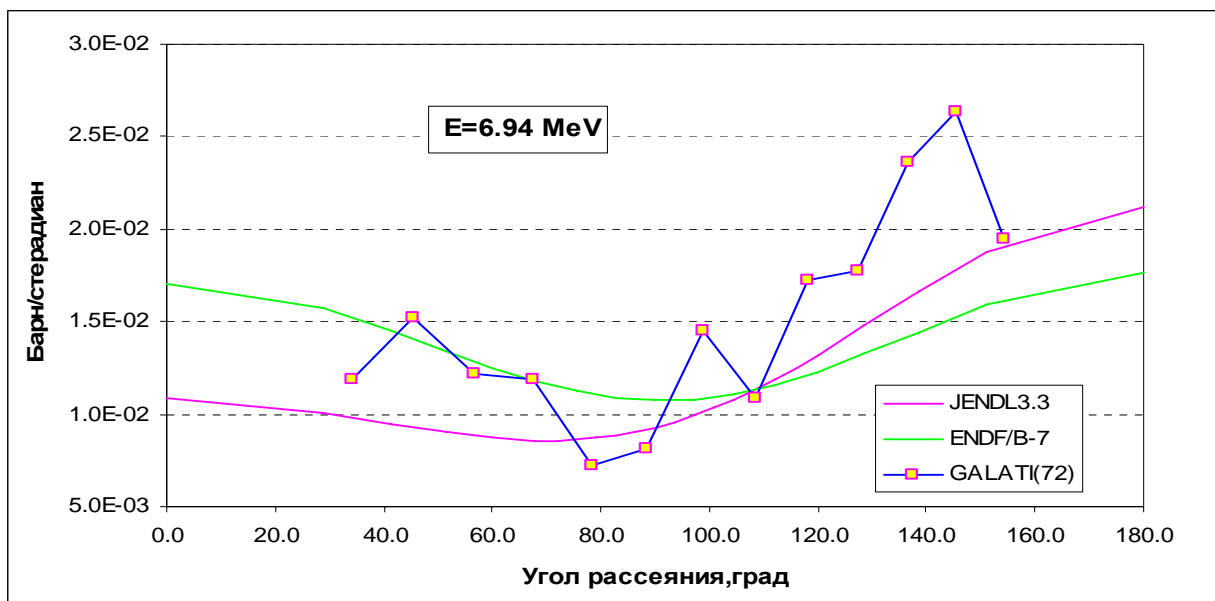


Рисунок .126. Угловые распределения неупругого рассеяния.

4.3. Угловые распределения нейтронов из реакции (n,n'p)

Заданы, естественно, только в ENDF/B-VII, где они приняты изотропными в лабораторной системе координат. В РОСФОНДЕ они приняты изотропными в системе центра инерции.

5. Энергетические распределения (MT=5)

В ENDF/B-7 энергетическое распределение задается для реакций (n,np) MT=28 и для континуума MT=91. Энергетический спектр в обеих реакциях представлен спектром испарения в двух точках(на пороге и при 20 MeV).

В JENDL3.3 для MT=91 задан энергетический спектр в форме таблично-заданной функции.

В РОСФОНД приняты спектры из ENDF/B-VII.

6. Фотонные данные

В обеих библиотеках принято, что фотоны при взаимодействии нейтронов с ядрами углерода могут образовываться только при радиационном захвате и при неупругом рассеянии на первом уровне.

При неупругом рассеянии на более высоколежащих уровнях, энергия возбуждения, как отмечалось, снимается путем развала ядра на три альфа-частицы.

В результате реакции (n,n'p) бор-11 в возбужденном состоянии может образоваться только при энергии налетающего нейтрона большей 19.42 МэВ, так что даже при энергии 20 МэВ выход фотонов от этой реакции пренебрежимо мал.

В результате реакции (n,d) возбужденные состояния бора-11 могут образовываться при энергиях выше 17 МэВ, т.о. образование фотонов при этой реакции в рассматриваемом энергетическом диапазоне возможно. Сечение этой реакции при 20 МэВ составляет около 10% от полного сечения неупругих взаимодействий и более половины сечения неупругого рассеяния на первом уровне – основной реакции образования фотонов при этой энергии. Поэтому пренебрежение вкладом реакции (n,d) в образование фотонов не представляется оправданным.

В реакции (n,p) образуется радиоактивный бор-12, который при энергиях, близких к 20 МэВ также может быть образован в возбужденных состояниях и вести к образованию фотонов. Правда, сечение этой реакции в несколько раз меньше, чем сечение реакции (n,d).

Наконец, в реакции (n, α), Be9 который в возбужденном состоянии распадается на нейтрон и две альфа частицы, образуя, таким образом, один из каналов реакции (n,p' 3α), непорждающей фотонов.

Отмечая целесообразность включения в файл оцененных данных об образовании фотонов в реакциях (n,d) и (n,p), мы не нашли возможности включить эти данные в РОСФОНД из-за отсутствия в настоящее время готовых оценок.

Спектр фотонов неупругого рассеяния (MT=51) представлен в файле MF=12 одним переходом в основное состояние с множественностью 1. Угловые распределения этих фотонов в обоих оценках основано на одних и тех же экспериментальных данных Моргана(1972) и в точности совпадают.

Спектр фотонов радиационного захвата в ENDF/B-VII описан тремя линиями с энергиями 4.95, 3.68 и 1.26 МэВ. В JENDL-3.3 задан непрерывный спектр.

В РОСФОНД приняты данные об образовании фотонов в нейтронных реакциях на углероде из ENDF/B-VII.

7. Погрешности

Файл с погрешностями MF=33 для всех реакций присутствует только в библиотеке ENDF/B-7. В РОСФОНД данные о погрешностях не включаются, поскольку согласованного набора погрешностей для основных материалов не имеется, а разрозненные оценки включать в национальную библиотеку представляется нецелесообразным. Включение этих данных – дело будущего.

8. Перечень цитированных экспериментальных работ

8.1. Полное сечение

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|----------------|----------------|------------------------|---------|
| Perey(72) | F.G.Perey | R,ORNL-4823,197212 | 7212 |
| Cierjacks(80) | S.Cierjacks | J,NIM,169,185,8004 | 8004 |
| Moxon(90) | M.C.Moxon | C,90MARSEI,1,(III),32 | 9004 |
| Abfalterer(00) | W.P.Abfalterer | J,PR/C,62,064312,20001 | 20001 |

8.2. Сечения реакций упругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|----------------|--------------|------------------|----------|
| Langsdorf(57) | A.Langsdorf | J,PR,107,1077 | 57 |
| Lane(69) | R.O.Lane | J,PR,188,1618 | 196912 |
| Perey(78) | F.G.Perey | P,NCSAC-42,190 | 7811 |
| Smith(79) | A.Smith | J,NSE,70,281 | 197906 |
| Lyapin(89) | D.I.Lyapin | R,JINR-P3-89-408 | 19890615 |
| Deconninck(70) | G.Deconninck | J,PR/C,1,1326 | 7004 |
| Boerker(91) | G.Boerker | C,91JUELIC,,317 | 199105 |

8.3.Сечения реакций (n, γ)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|---------------|---------------|-----------------|---------|
| Jowitt(59) | D.Jowitt | J,PNE,3,242 | 1959 |
| Gibbons(61) | J.H.Gibbons | J,PR,122,182,61 | 6101 |
| Macklin(63) | R.L.Macklin | J,PR,129,2695 | 63 |
| Prestwich(81) | W.V.Prestwich | J,NSE,78,182 | 8601 |

8.4.Сечение реакции (n,p)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|---------------|---------------|----------------|---------|
| Rimmer(68) | E.M.Rimmer | J,NP/A,108,567 | 6802 |
| Ablesimov(72) | V.E.Ablesimov | C,71KIEV,1,173 | 72 |

8.5.Сечение реакции (n, α)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|----------------|----------------|-----------------|---------|
| Chatterjee(64) | M.L.Chatterjee | J,NP,51,583,64 | 6401 |
| Stevens(76) | A.P.Stevens | R,INIS-MF-3596 | 7610 |
| Dietze(82) | G.Dietze | C,82ANTWER,930 | 8209 |
| Brede(91) | H.J.Brede | J,NSE,107,22,91 | 9101 |

9. Заключение

9.1 Вывод:

В РОСФОНД рекомендуется оценка нейтронных данных для C-nat из библиотеки ENDF/B-VII.

9.2 Авторы обоснования оцененных данных:

Забродская С.В., Николаев М.Н..

7.АЗОТ

В РОСФОНД вносятся данные для двух стабильных изотопов азота: N-14 (99.634%) и N-15 (0.366%).

Долгоживущих радиоактивных изотопов азот не имеет.

В процессе анализа нейтронных данных в работе использовались экспериментальные данные из библиотеки EXFOR (Database and Retrieval system, version 1.81, June 2005).

7.1. Азот-14

1. Общее описание

1.1. $Z=7$

1.2. $A=14.003\ 074\ 004\ 8(6)$

1.3. $A_{wr}=13.882\ 780\ 878\ 8(6)$

1.4. Содержание в естественной смеси: - 99.634 %

1.5. Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|----------------|----------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | (n,n') | -2.3128 | 2.4794 | N-14 |
| 16 | (n,2n) | -10.5535 | 11.3137 | N-13(9.965s) |
| 22 | (n,na) | -11.6134 | 12.4499 | B-10 |
| 28 | (n,np) | -7.5507 | 8.0946 | C-13 |
| 32 | (n,nd) | -10.2725 | 11.0124 | C-12 |
| 102 | (n, γ) | 10.5536 | 0.0 | N-15 |
| 103 | (n,p) | 0.6260 | 0.0 | C-14(5730y) |
| 104 | (n,d) | -5.3260 | 5.7097 | C-13 |
| 105 | (n,t) | -4.0152 | 4.3044 | C-12 |
| 107 | (n,a) | -0.1580 | 0.1694 | B-10 |
| 108 | (n,2a) | -8.8230 | 9.4585 | Li-6 |

1.6. Схема уровней:

| MT | LEVEL ENERGY (MEV) | SPIN-PARITY |
|----|--------------------|-------------|
| | 0.0 | 1+ |
| 51 | 2.1328 | 0+ |
| 52 | 3.9481 | 1+ |
| 53 | 4.9151 | 0- |
| 54 | 5.1059 | 2- |
| 55 | 5.6914 | 1- |
| 56 | 5.8343 | 3- |
| 57 | 6.2035 | 1+ |
| 58 | 6.4462 | 3+ |
| 59 | 7.0291 | 2+ |
| 60 | 7.9669 | 2- |
| 61 | 8.0620 | 1- |
| 62 | 8.4900 | 4- |
| 63 | 8.6180 | 0+ |

| | | |
|-----------|---------|----|
| 64 | 8.7760 | 0- |
| 65 | 8.9070 | 3- |
| 66 | 8.9640 | 5+ |
| 67 | 8.9800 | 2+ |
| 68 | 9.1290 | 3+ |
| 69 | 9.1723 | 2+ |
| 70 | 9.3380 | 2- |
| 71 | 9.5090 | 2- |
| 72 | 9.7030 | 1+ |
| 73 | 10.0790 | 3+ |
| 74 | 10.1010 | 2+ |
| 75 | 10.2260 | 1- |
| 76 | 10.4320 | 2+ |
| 77 | 10.5340 | 1- |
| 78 | 10.8120 | 5+ |
| 91 (cont) | 11.0000 | |

1.7. Радиоактивность: не радиоактивен

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 1^+$;

2.2. Радиус рассеяния: $R = 0.886366^{-12}$ см.

2.3. Область резонансных энергий.

3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)

Азот-14 – основной изотоп: содержание в естественной смеси 99.643 %.

Рассмотрим наиболее современные оценки для нейтронных сечений.

В библиотеке JEFF-3.1 принята, без каких либо изменений, оценка из ENDF/B-6 (release 8).

В версии библиотеки ENDF/B –VII betha1 нейтронные данные, также, без каких либо изменений приняты из ENDF/B-6 (release 8).

В свою очередь, в release 8 библиотеки ENDF/B-VI представляет собой:

- ниже 20 МэВ полностью новую оценку Янга, Хейла и Чедвика (LANL), выполненную в 1990 году,

- расширение данных на область энергий до 40 МэВ (1992 г.), и пересмотр сечений в соответствии с новыми подробными экспериментальными данными Харви (1991).

По сути, после этой ревизии, оцененные нейтронные данные в области энергий ниже 20 МэВ практически не изменялись. Было выполнено лишь следующее:

- небольшая корректировка данных по неупругому рассеянию выше 13 МэВ (1994 г.),

- переоценка данных выше 20 МэВ (1997 г.),

- подкорректированы данные об испускании фотонов при радиационном захвате (2000 г.).

В библиотеке JENDL-3.3 за основу принята оценка Шибата, Асами, Канда и Мурата, выполненная в 1989 году в рамках работы над версией JENDL-3.

В 1990 году были модифицированы спектры нейтронов при низких энергиях. Тогда же были переоценены энерго-угловые распределения. Сечения неупругого рассеяния и угловые распределения при неупругом рассеянии были значительно пересмотрены.

В 1994 году в рамках работы над версией JENDL-3.2 сечения основных реакций были пересмотрены на основе имеющейся экспериментальной информации. Добавлены

формально угловые распределения для $MT=54-90$ (изотропное рассеяние). Проведена корректировка фотонных данных.

В 2000 году при работе над 3-й версией библиотеки JENDL-3 сечение реакции (n,p) взято из JENFL fusion File-99 (Shibata) и модифицировано в 2001 году в области энергий до 40 кэВ. Полное и упругое сечения пересчитаны. Спектры нейтронов в реакциях $MT=16-32$ пересмотрены.

В оценке БРОНД-2, выполненной в 1988 году группой Блохин, Работнов и др (ЦЯД), находится откорректированная версия нейтронных данных из ENDF/B-V. Модификация полного сечения выполнена, главным образом, в области энергий выше 0.483 МэВ. В диапазоне энергий 0.483 – 8.533 МэВ сечение рассчитывались с помощью Паде-аппроксимации. Выше 8.533 МэВ оно рассчитывались по оптической модели, параметры для которой определялись путем подгонки сечений под экспериментальные данные. Сечение реакции (n,2n) взято из библиотеки пороговых реакций БОСПОР (ЦЯД). Сечения реакции $MT=22, 28, 32$ рассчитаны по модели испарения. Сечения неупругого рассеяния на дискретных уровнях посчитаны по формализму Хаузера-Фешбаха с учетом конкурирующих процессов (n,p), (nd), (nt), (n,a). Сечение радиационного захвата ниже 0.483 МэВ взято из ENDF/B-V без изменений. Выше сечение рассчитано по SLBW формализму с использованием резонансных параметров из компиляции Мухабхаба (1981).

3.1. Полное сечение ($MT=1$).

На рисунке 1 представлено общее сравнение оцененных нейтронных данных из перечисленных трех библиотек в области энергий от 10 эВ -10 МэВ, из которого видно, что оценки по-разному описывают ход сечения перед областью резонансных энергий (100 эВ – 10 кэВ).

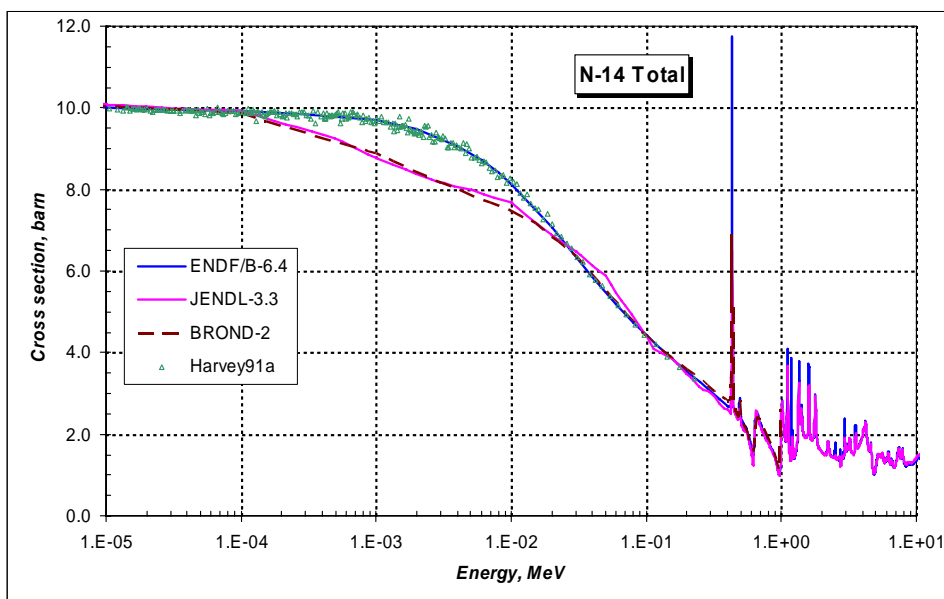


Рисунок 1 – Сравнение оцененных полных сечений для N-14 в области энергий от 1 эВ -10 МэВ.

Для этой области энергий в библиотеке EXFOR был единственный набор экспериментальных данных Harvey (1991). Прямое использование этих данных из библиотеки EXFOR приводит к предположению об ошибке в определении энергетической шкалы ($3.7E-4 - 2.3E+2$ эВ для первого набора данных). Учитывая тот факт, что в названии работы идет речь об энергетическом интервале от 0.5 эВ до 50 МэВ, мы приписали экспериментальному набору кэВ-ные значения. Что получилось – видно на рисунке 1. Оценка ENDF/B - единственная согласующаяся с экспериментом (поскольку эти данные использовались для корректировки сечений в 1992 году).

Более подробные сравнения оцененных кривых с экспериментальными данными представлены на рисунке 2 для области энергий от 10 кэВ до 1 МэВ, и на рисунке 3 - для области энергий от 1 – 10 МэВ.

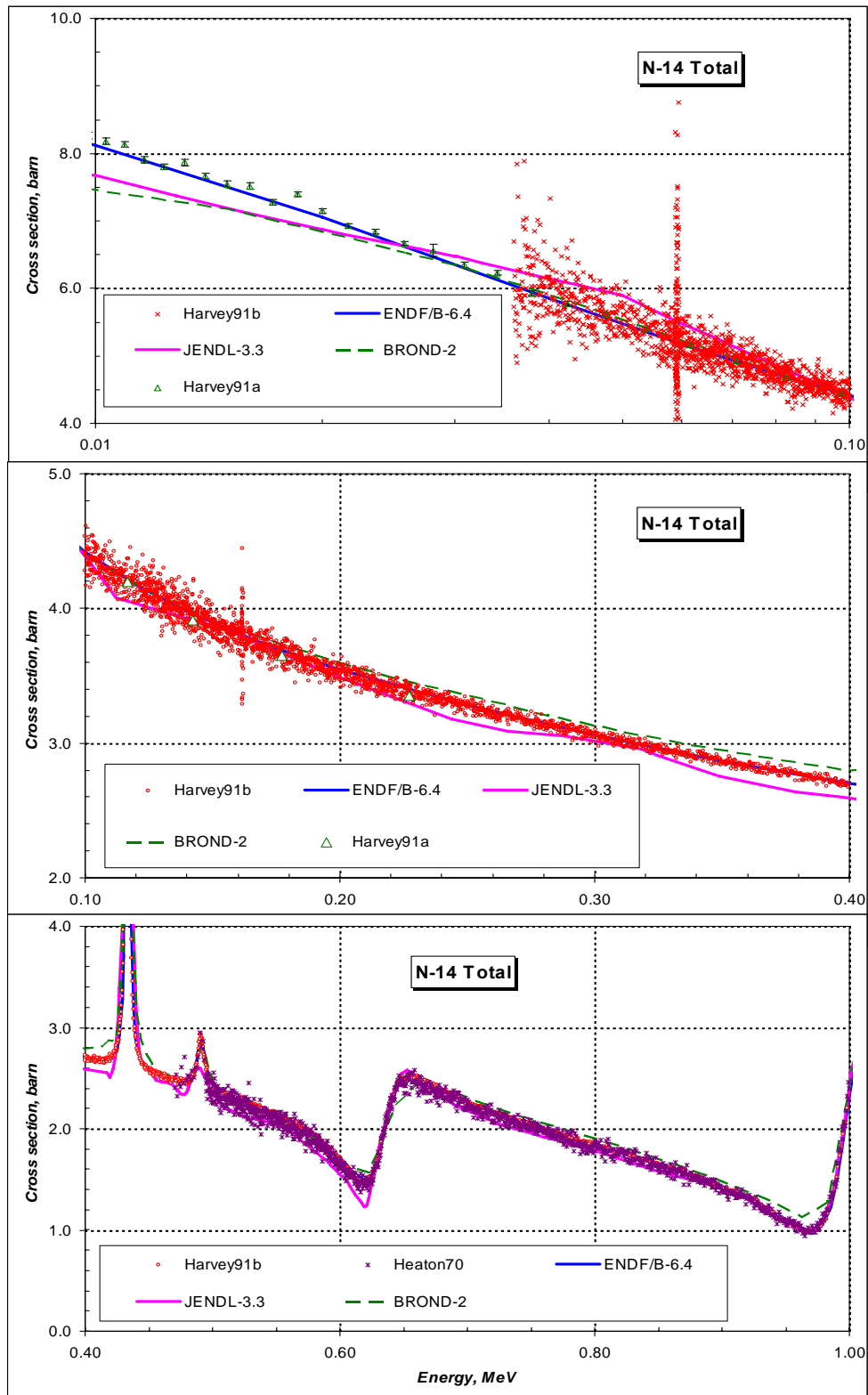


Рисунок 2 – Сравнение оцененных полных сечений для N-14 в области энергий от 10 кэВ -1 МэВ.

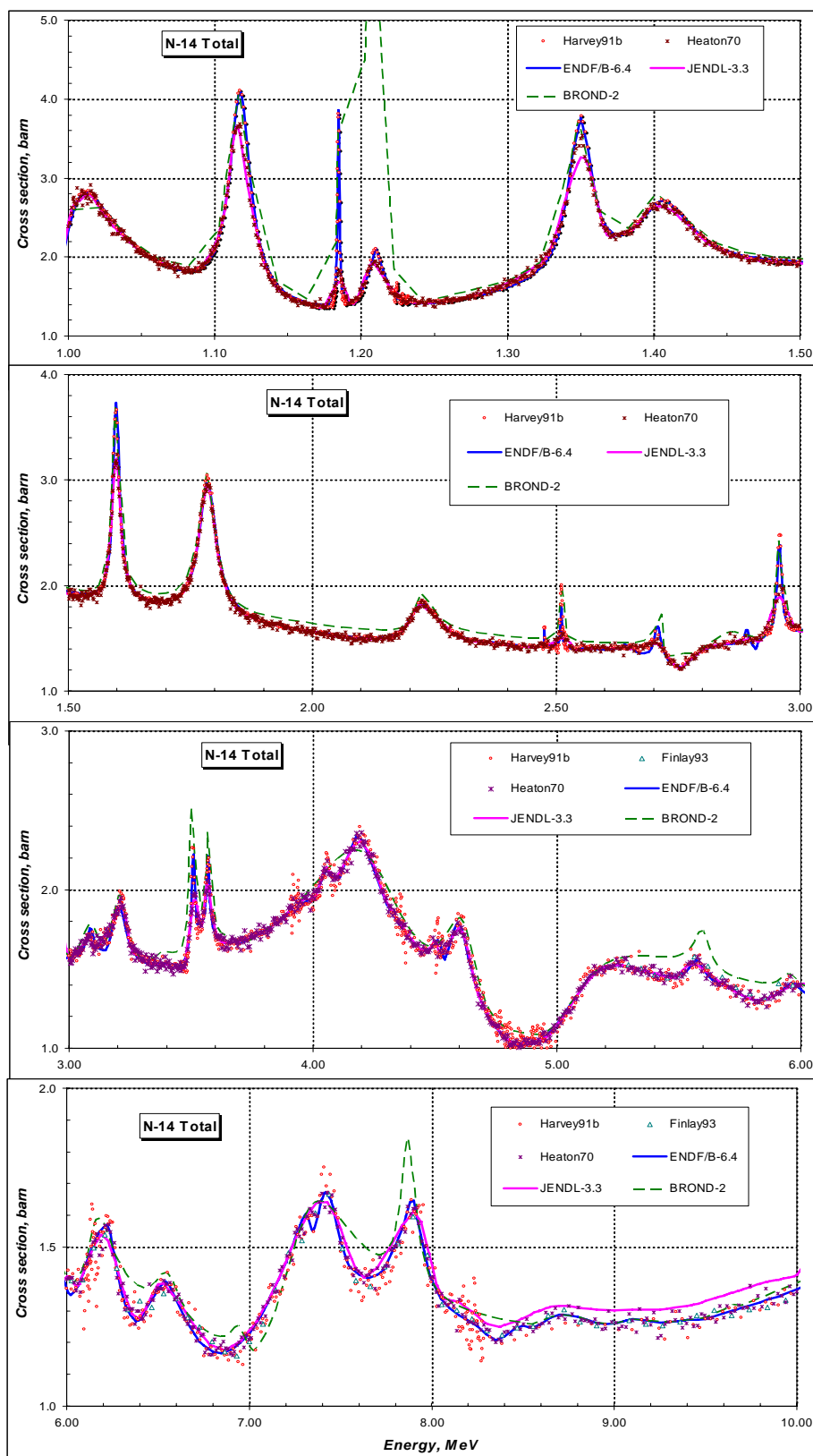


Рисунок 3 – Сравнение оцененных полных сечений для N-14 в области энергий от 1 -10 МэВ.

Из сравнения оцененных кривых сечения полного взаимодействия и экспериментальных данных (см. рисунки 1-3) следует, что **оценка сечения из ENDF/B наилучшим образом согласуется с экспериментальными микроданными.**

3.2. Сечение поглощения нейтронов.

Вклад различных составляющих в процесс поглощения нейтронов показан на рисунке 4 на основе оцененных сечений из библиотеки JENDL.

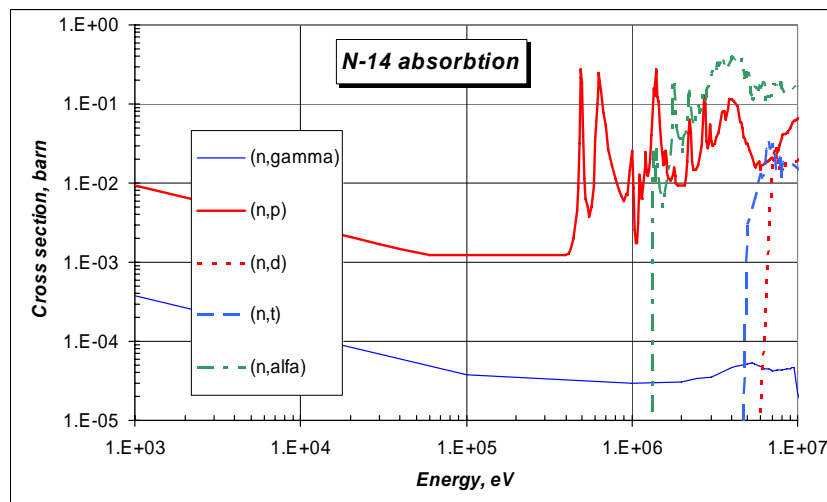


Рисунок 4 – Основные вкладчики в сечение поглощения на N-14.

Из рисунка 4 видно, что до 1 МэВ поглощение нейтронов, главным образом, происходит за счет реакции (n,p). Выше 1 МэВ становится определяющей реакция с испусканием альфа частицы. Величина сечения реакции с испусканием протона становится на порядок меньше. Выше 5 МэВ вклады в поглощение нейтронов от реакций (n,d) и (n,t) становятся сопоставимыми с вкладом реакции (n,p).

Вклад сечения радиационного захвата нейтронов на всем энергетическом интервале практически на два порядка меньше, чем вклад от реакции (n,p).

Ниже будет проведено сравнение сечений нейтронных реакций в порядке их значимости в процесс поглощения нейтронов.

3.2.1 Сечение реакции (n,p) (MT=103).

На рисунке 5 показано общее сравнение оцененных и экспериментальных данных для сечения реакции (n,p) в области энергий до 10 МэВ. Из рисунка видно, что не все оцененные кривые согласуются с экспериментальными данными.

На рисунке 6 показано сравнение оцененных и экспериментальных данных для сечения реакции (n,p) в области энергий до 1 МэВ. Из приведенного сравнения видно, что в области энергий, где ход сечения пропорционален $\sim 1/v$, все оценки хорошо согласуются между собой. “Вход” в первый резонансный уровень по-разному описан в различных оценках. Ход сечения из оценки ENDF/B находится в противоречии с экспериментальными данными в этой области энергий. На наш взгляд, оценка из JENDL-3.3 наиболее согласована с экспериментальными данными.

Насколько хорошо различные оценки описывают резонансные уровни показано на рисунке 7. Из представленного сравнения видно, что оценка ENDF/B не согласуется с имеющимися экспериментальными данными в области энергий 0.45 – 2.5 МэВ.

В области энергий выше 3 МэВ все оценки согласуются с экспериментом Мограна (1979), а выше 6 МэВ оценка из ENDF/B выполнена более корректно (см. рисунок 8).

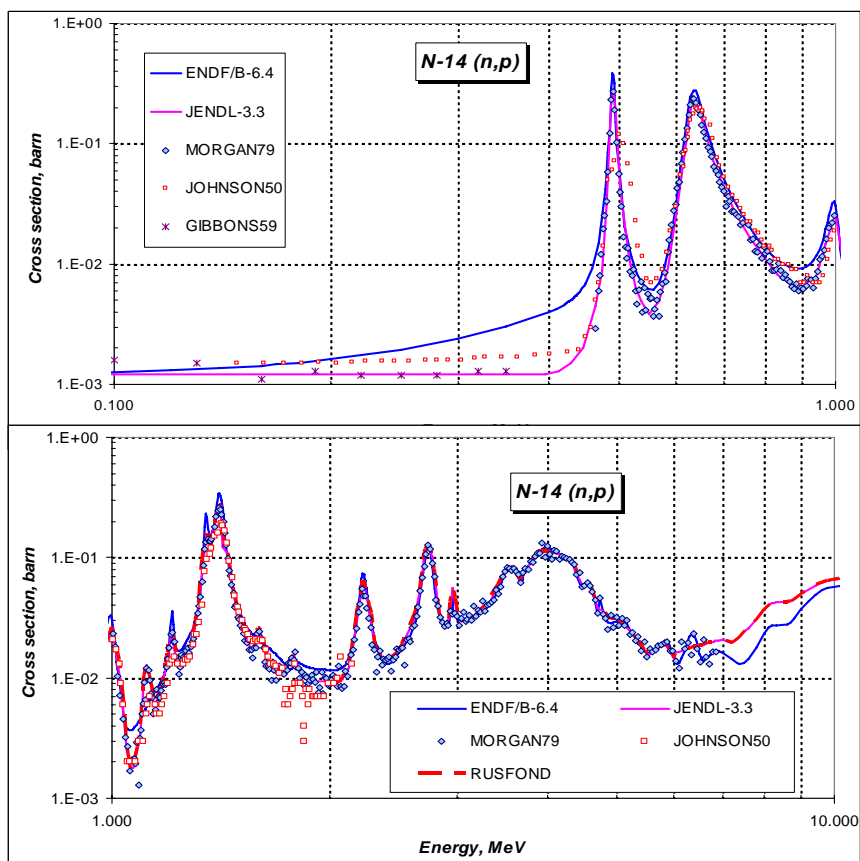


Рисунок 5 – Сечение реакции (n,p) в области энергий до 1 МэВ.

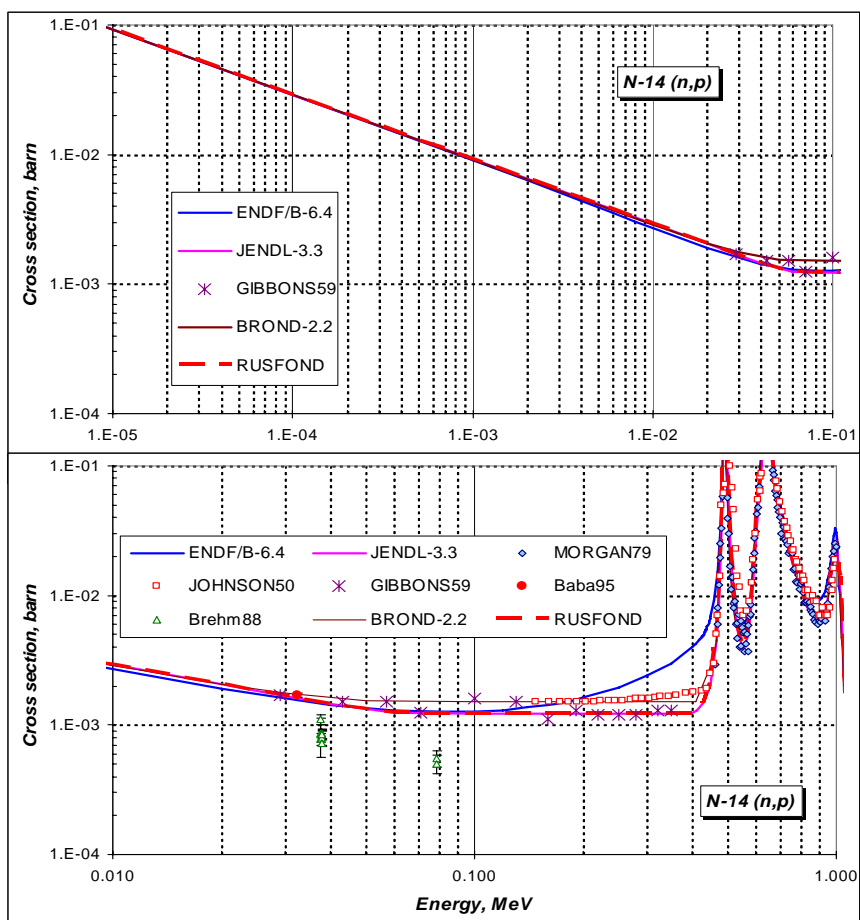


Рисунок 6 – Сечение реакции (n,p) в области энергий до 1 МэВ.

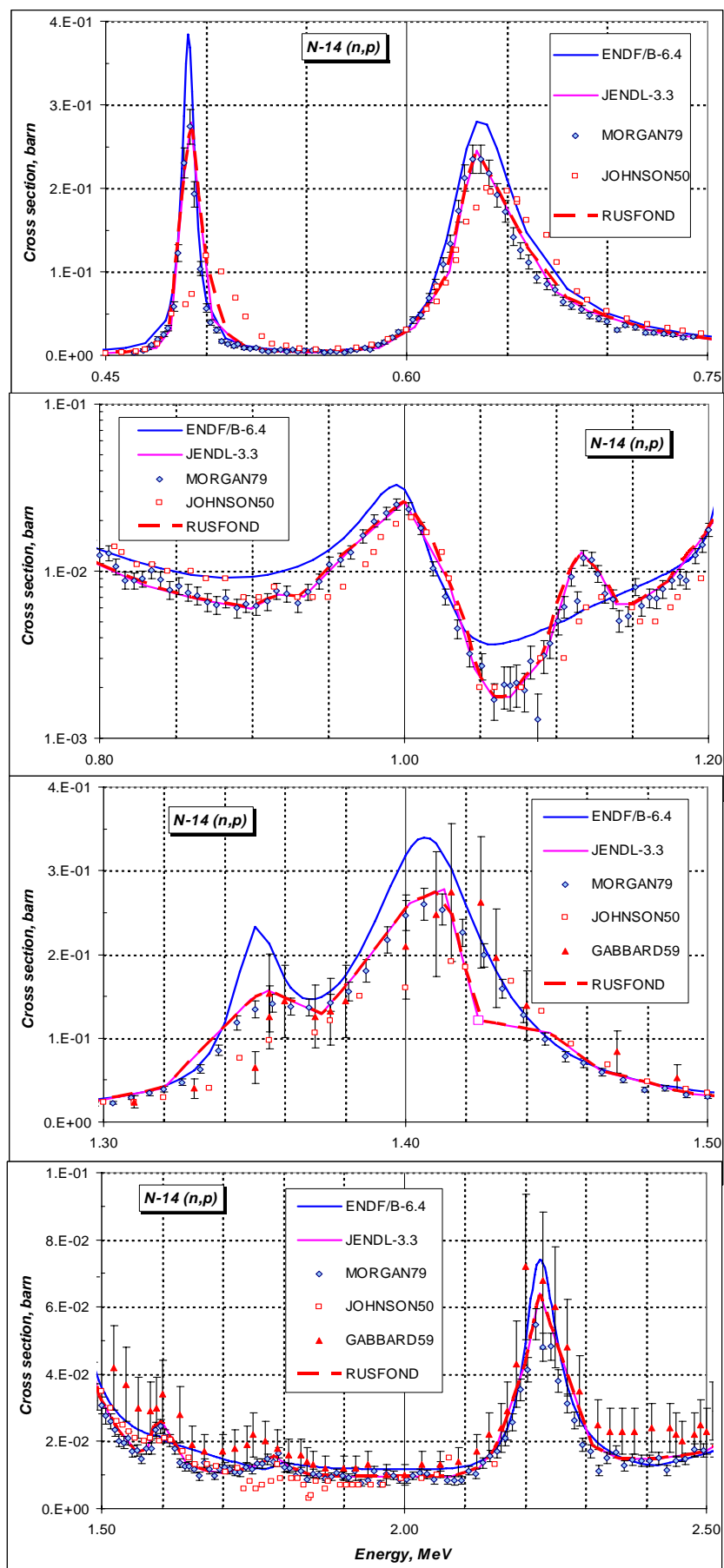


Рисунок 7 – Сечение реакции (n,p) в области энергий 0.45 – 2.5 МэВ.

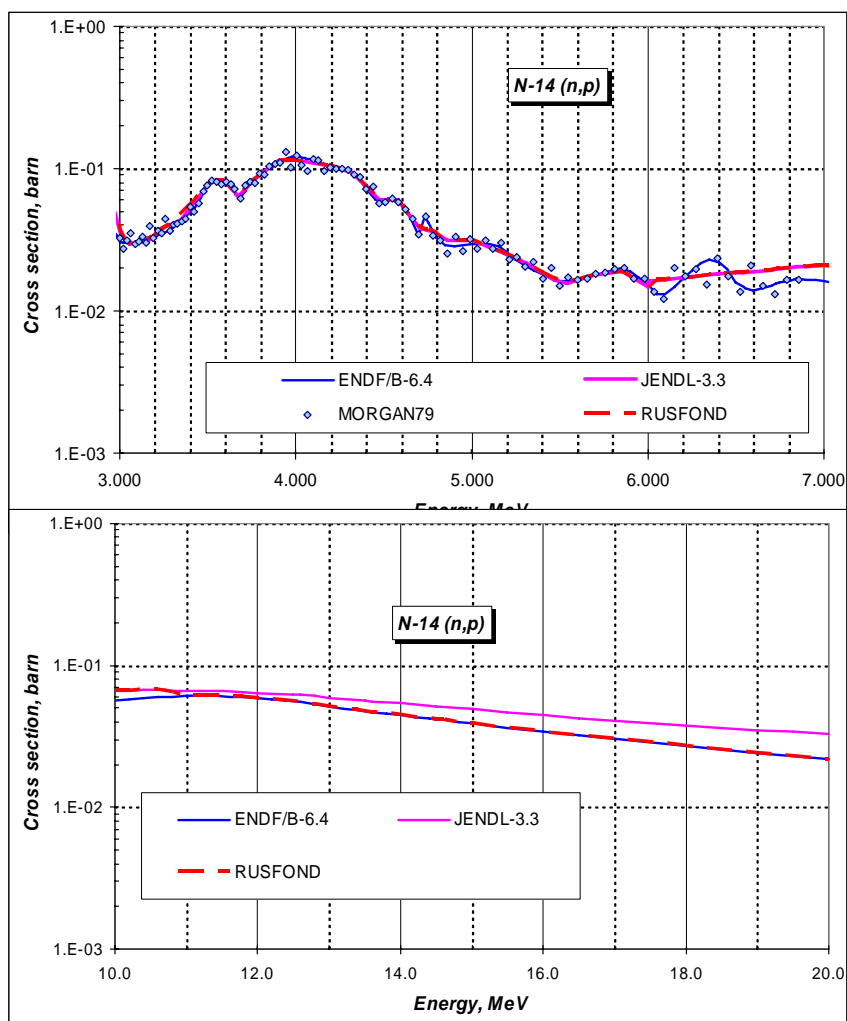


Рисунок 8 – Сечение реакции (n,p) в области энергий выше 3.0 МэВ.

Таким образом, из приведенного сравнения экспериментальных данных и оцененных кривых сечения реакции (n,p) следует, что оценка ENDF/B, в которой наилучшим образом учитывается новейшая экспериментальная информация по полному сечению, не согласуется с экспериментальными данными по сечению реакции (n,p).

При отборе оценки сечения реакции (n,p) для библиотеки РОСФОНД следует отдать предпочтение JENDL-3.3

3.2.2 Сечение реакции (n,alfa) (MT=107).

Порог реакции (n,a) составляет 0.1694 МэВ. Однако вплоть до 1 МэВ (n,a) процесс задавлен реакцией (n,p). Выше 1 МэВ эти две реакции начинают конкурировать между собой, и выше 2 МэВ вклад реакции (n,a) в поглощение нейтронов начинает превосходить вклад реакции (n,p). Выше 2 МэВ сечение реакции (n,a) в несколько раз больше сечения реакции (n,p).

На рисунке 9 показано сравнение оцененных кривых с имеющимися экспериментальными данными в области энергий до 4.0 МэВ.

Из представленного на рисунке 9 сравнения видно, что оценка JENDL-3.3 опираясь, главным образом, на экспериментальные данные Моргана (1979), слишком круто обозначает порог реакции. На наш взгляд оценка из EAF-99, которая взята за основу для РОСФОНДа в области порога реакции, является компромиссным вариантом поведения сечения в этой области энергии.

Оценка из ENDF/B вплоть до 2.5 МэВ лежит выше совокупности экспериментальных данных. Выше 2.5 МэВ она согласуется с экспериментальными данными в пределах заявленной погрешности. Ее преимущество перед JENDL-3.3 состоит в описании резонансных уровней, которые коррелируют с ходом полного сечения.

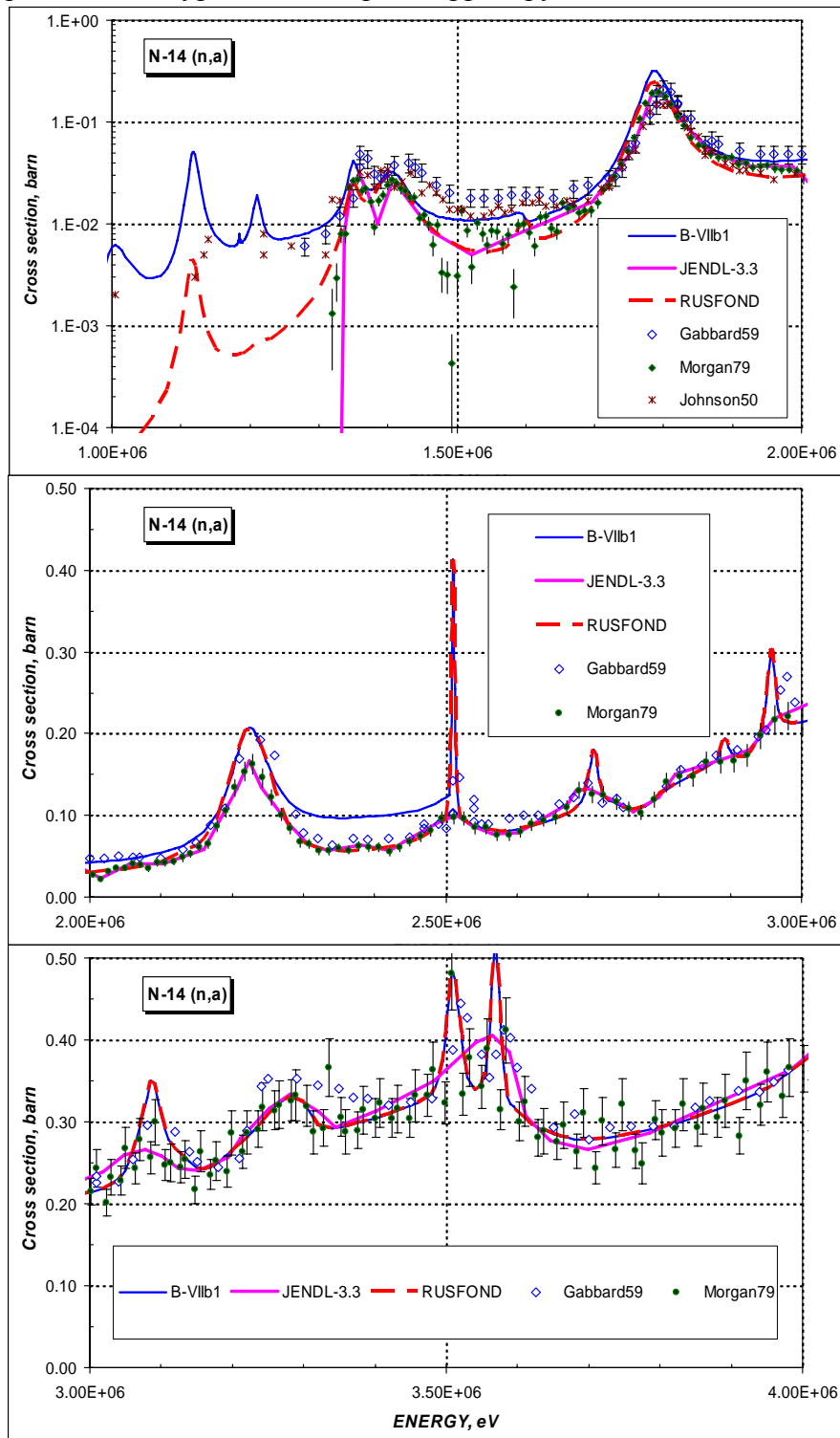


Рисунок 9 – Сечение реакции (n,a) в области энергий до 4.0 МэВ.

Выше энергии 4 МэВ обе оценки согласуются между собой в пределах погрешности экспериментальных данных (см. рисунок 10).

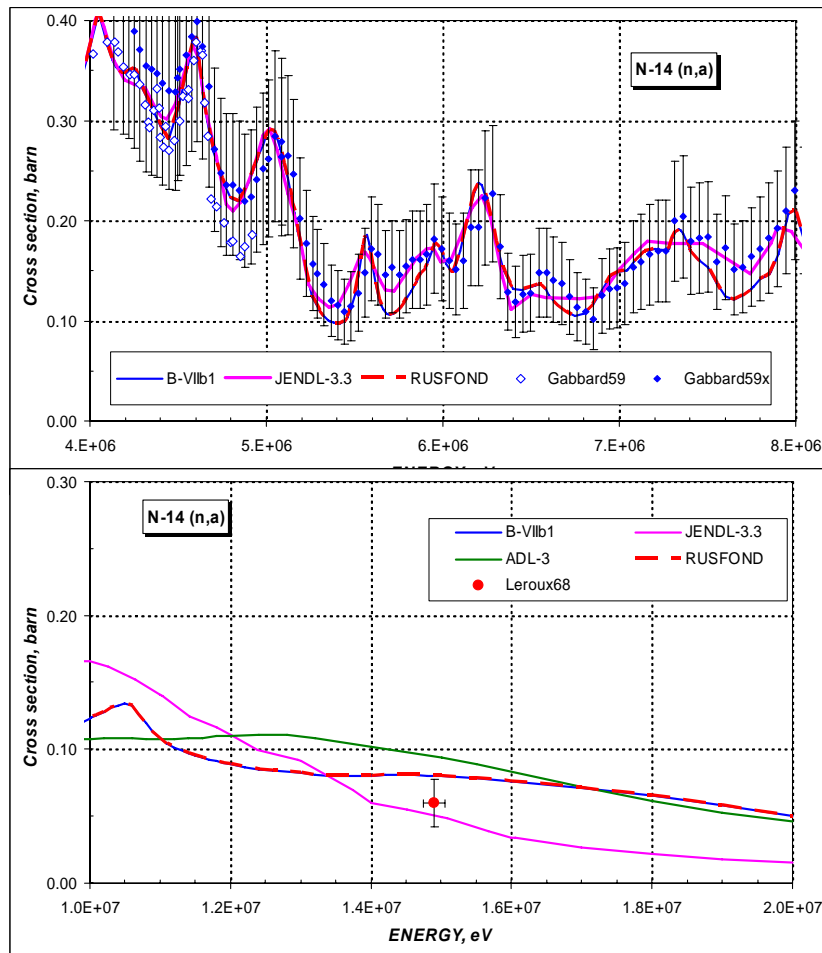


Рисунок 10 – Сечение реакции (n,a) в области энергий выше 4.0 МэВ.

Таким образом, для РОСФОНДА рекомендуется до 2.5 МэВ использовать оцененное сечение реакции (n,a) из EAF-99, а выше 2.5 МэВ принять оценку из ENDF/B.

3.2.3 Сечение реакции (n,d) (MT=104).

Экспериментальные данные для сечения реакции (n,d) отсутствуют. Имеется расчетная точка Димбидова для области выше 20 МэВ. Сравнение оцененных сечений показано на рисунке 11.

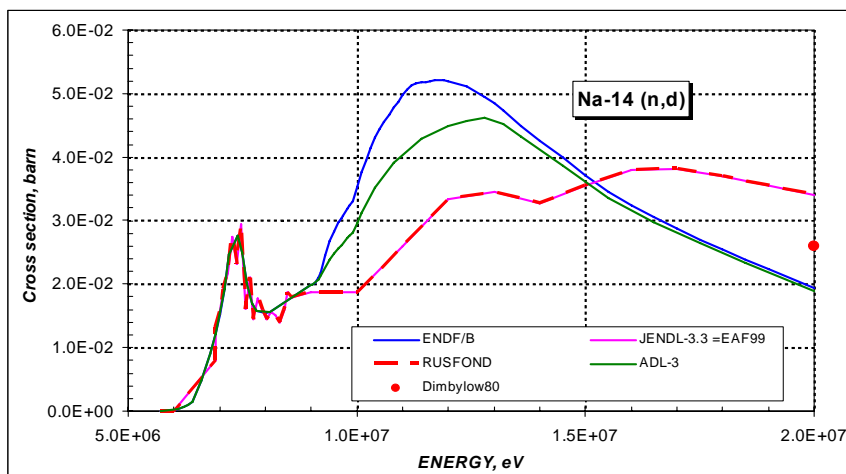


Рисунок 11 – Сечение реакции (n,d) в области энергий до 20.0 МэВ.

Решено принять в РОСФОНД сечение реакции (n,d) из библиотеки JENDL-3.3=EAF-99, хотя это решение является в значительной степени произвольным.

3.2.4 Сечение реакции (n,t) (MT=105).

Для сечения реакции (n,t) существует несколько наборов экспериментальных данных. Сравнение с ними показано на рисунке 12.

Из представленного сравнения видно, что в области порога реакции и вплоть до 9 МэВ лучшее согласие с экспериментальными данными имеет оценка из ENDF/B=EAF-99.

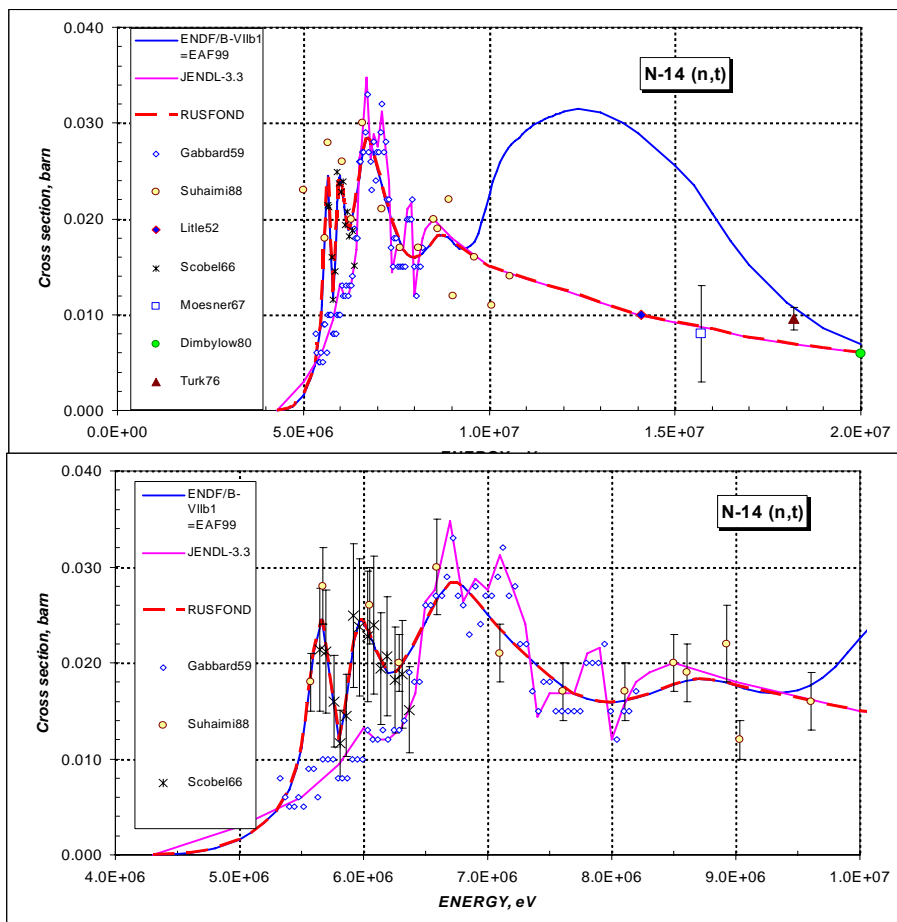


Рисунок 12 – Сечение реакции (n,t) в области энергий до 20.0 МэВ.

Выше 10 МэВ немногочисленные экспериментальные данные подтверждают ход сечения из JENDL-3.3.

В РОСФОНД предлагается включить комбинацию оценок из ENDF/B - до 9 МэВ и из JENDL-3.3 – выше этой энергии (см. рис.12).

3.3. Сечение неупругого рассеяния нейтронов (MT=4).

Для полного сечения неупругого рассеяния нейтронов отсутствуют экспериментальные данные, с помощью которых можно было бы оттестировать оцененные сечения из различных библиотек. Однако для первых девяти уровней, возбуждающихся при неупругом рассеянии нейтронов, экспериментальные данные имеются. Результат сравнения экспериментальных данных с оцененными функциями возбуждения первых двенадцати уровней показан на рисунке 13.

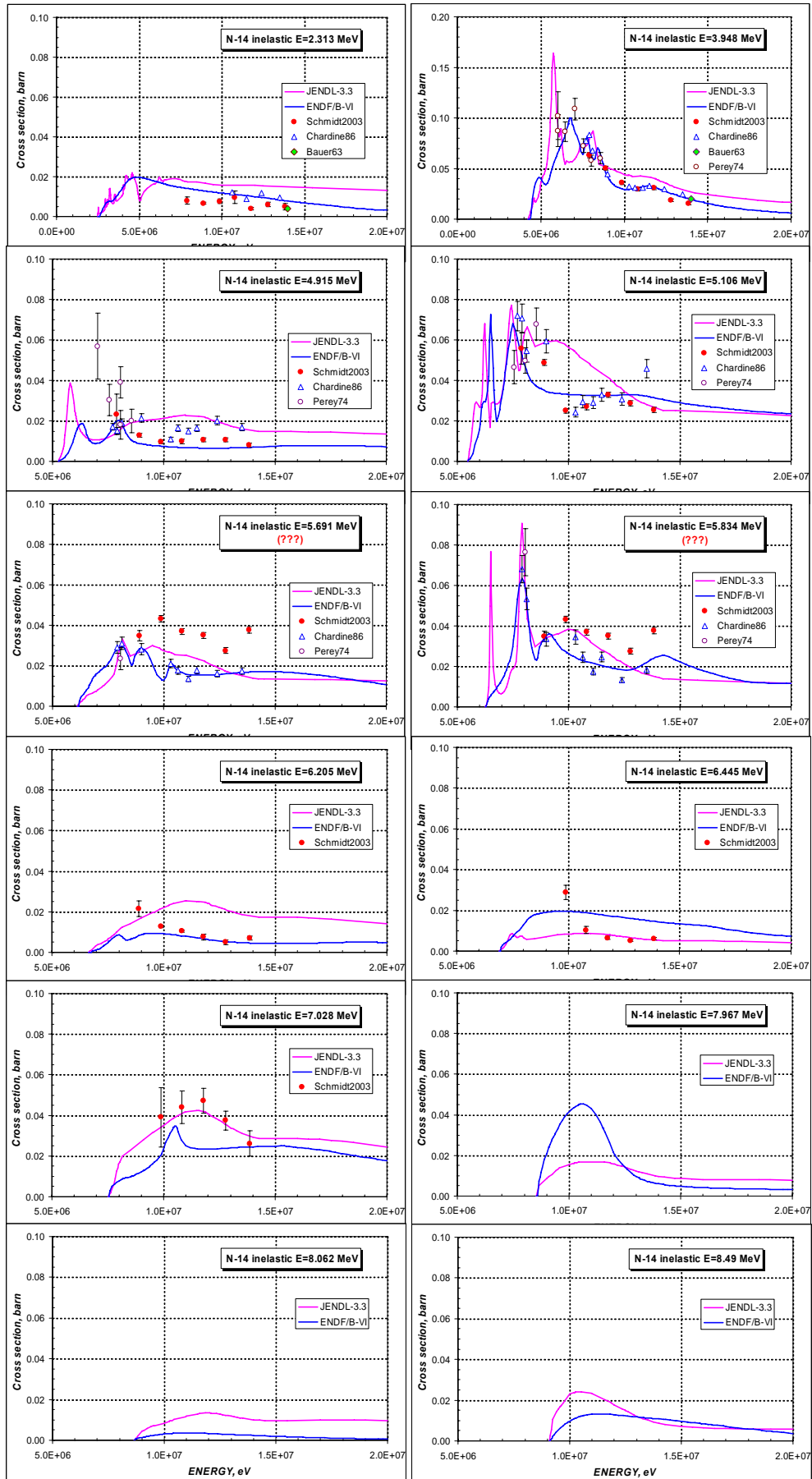


Рисунок 13 – Сечение неупругого рассеяния для первых двенадцати уровней.

Из представленного на рисунке 13 сравнения видно, что имеющиеся экспериментальные данные хорошо согласуются друг с другом, за исключением двух уровней с энергией 5.691 и 5.834 МэВ. Экспериментальные данные Шмидта (2003) вероятно приводятся для суммы этих уровней, как показано на рисунке 14.

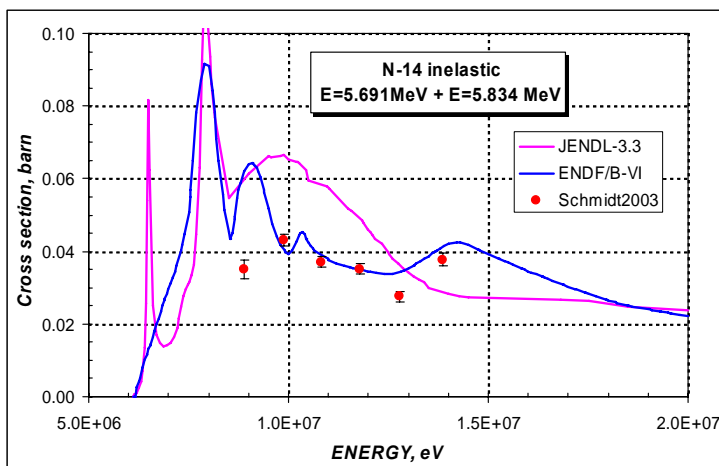


Рисунок 14 – Сечение неупругого рассеяния для уровней 5.691 и 5.834 МэВ.

Из приведенного на рисунках 13 и 14 сравнения, видно, что для первых шести уровней оцененные значения сечения неупругого рассеяния из ENDF/B лучше согласуются с экспериментальными данными, чем оценка из JENDL-3.3. Однако, начиная с седьмого уровня ($E=6.205$ МэВ), оцененные значения сечений неупругого рассеяния лучше согласуется с новейшими экспериментальными данными Шмидта (2003). Учитывая, также, что в оценке JENDL-3.3 выполнена оценка для большего числа уровней неупругого рассеяния, **рекомендуется для оценки в РОСФОНД использовать оценку первых шести уровней из ENDF/B, а для последующих уровней использовать оценку из JENDL-3.3.** В пользу этого решения послужил и тот факт, что в ENDF/B начиная с 10 уровня (7.967 МэВ) в сечение реакции неупругого рассеяния на возбужденных уровнях добавлены вклады от реакций (n,na) и (n,np).

Результат сравнения суммарного сечения неупругого рассеяния для различных оценок показан на рисунке 15.

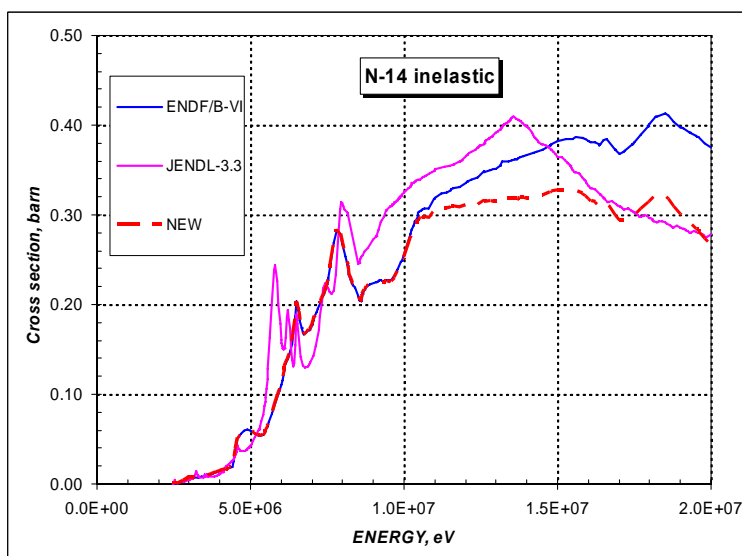


Рисунок 15 – Полное сечение неупругого рассеяния нейтронов.

3.4. Сечение неупругого рассеяния нейтронов с вылетом заряженных частиц (n,na), (n,np), и (n,nd).

Для указанных реакций экспериментальные данные отсутствуют. В оценке JENDL-3.3 имеется индивидуальная оценка для указанных реакций. В ENDF/B, как уже отмечено выше, сечения этих реакций замешаны с сечениями возбуждения уровнями неупругого рассеяния нейтронов.

На рисунке 16 показана энергетическая зависимость сечения реакций (n,na), (n,np) и (n,nd).

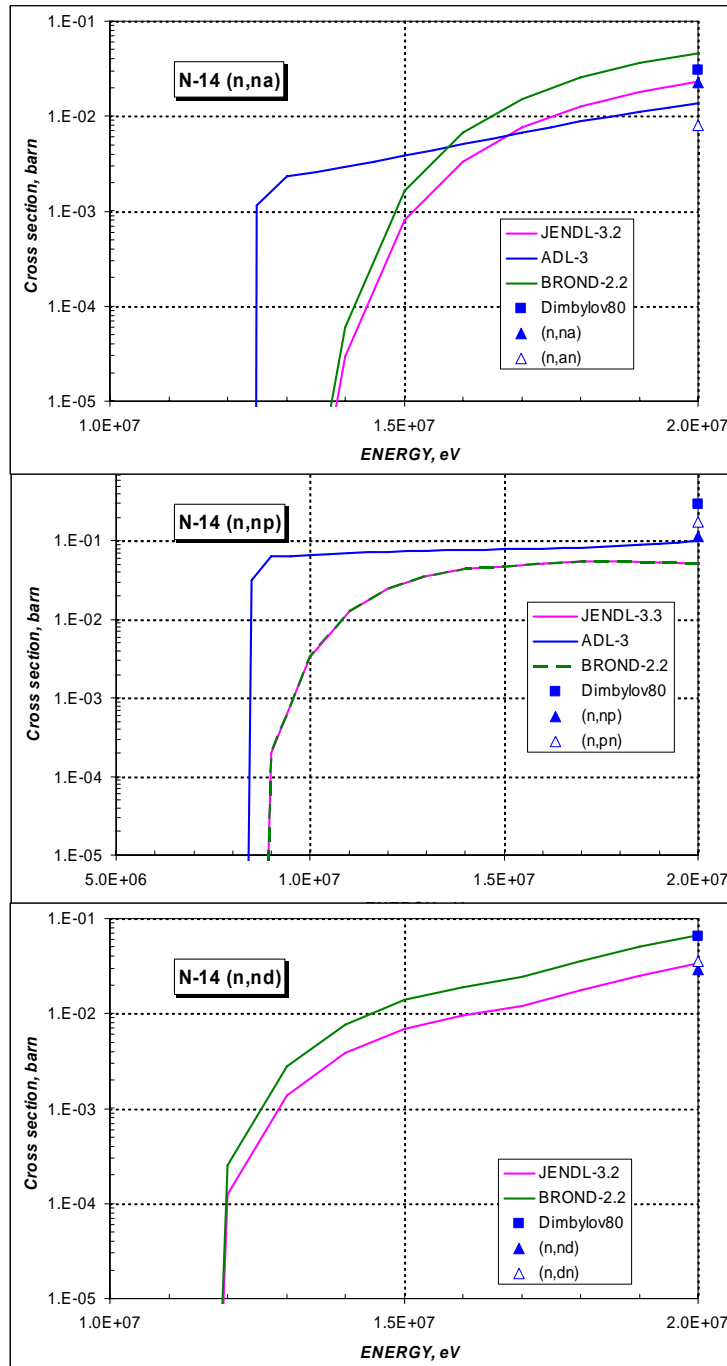


Рисунок 16 – Сечение реакции (n,na), (n,np) и (n,nd).

Сечения сравниваются с оценкой Димбилова (1980) с учетом очередности вылета заряженной частицы. Для **РОСФОНДА** рекомендуется использовать оценку из **JENDL-3.3**.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

Имеется большое количество экспериментальных данных для указанной реакции. На рисунке 17 представлено сравнение оцененных сечений и наиболее полных наборов экспериментальных данных.

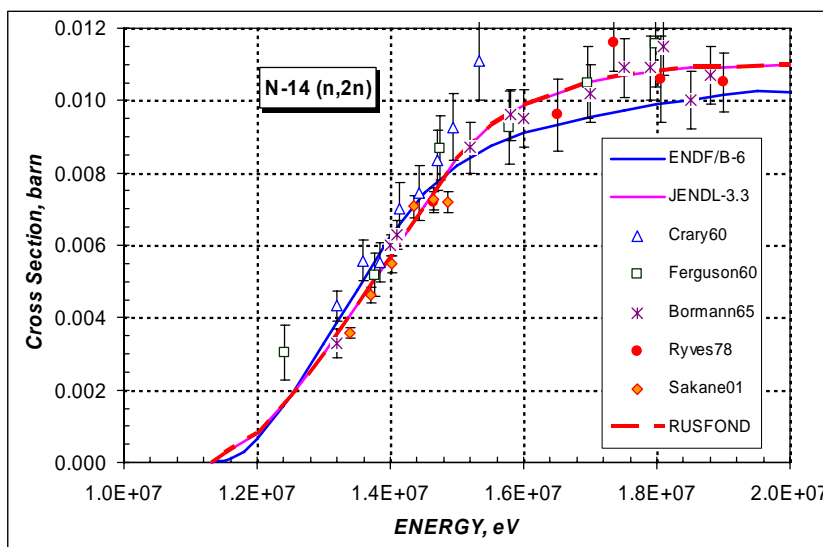


Рисунок 17 – Сечение реакции (n,2n).

Последние экспериментальные данные Сакане (2001) подтверждают форму кривой, принятой в JENDL-3.3. В целом, оценка из JENDL лучше согласуется с совокупностью экспериментальных данных во всем энергетическом диапазоне. Для **РОСФОНДА** рекомендуется использовать оценку из **JENDL-3.3**.

3.6. Сечение реакции (n,2alpha) (MT=108).

Сечение реакции (n,2a) имеет высокий порог реакции. Экспериментальных данных немного, точнее, одна работа Шмидта (1967), в которой приводятся результаты измерения сечения в 15 МэВ'ной точке. Сравнение оцененных сечений показано на рисунке 21.

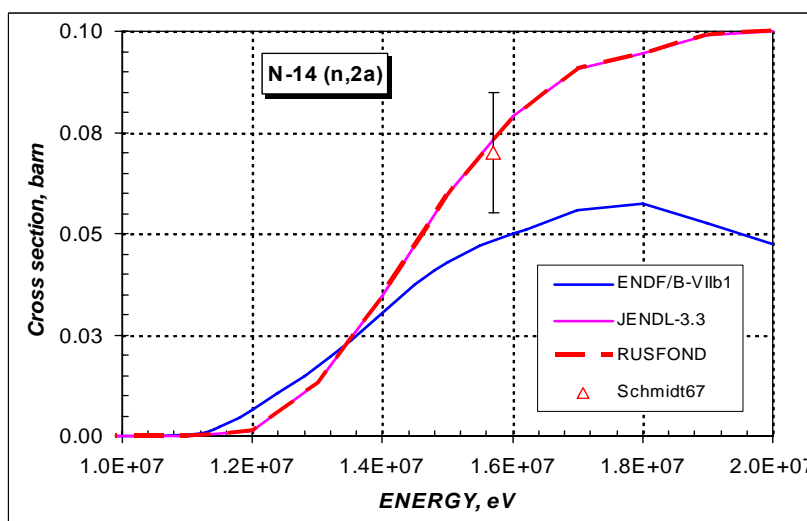


Рисунок 18 – Сечение реакции (n,2a).

Из представленного на рисунке 18 сравнения видно, что эксперимент Шмидта подтверждает оценку JENDL, которая и рекомендуется для РОСФОНДа.

3.7. Суммарное сечение неупругих взаимодействий (MT=3).

Сечений для этой реакции получают путем суммирования всех нейтронных сечений, приводящих к неупругому взаимодействию с ядром N-14. Наравне с сечением упругого рассеяния, оно приводится для контроля принятых выше сечений реакций, приводящих к неупругому взаимодействию с ядром N-14.

На рисунке 19 показано сравнение оцененных сечений неупругого взаимодействия в области энергий от 0.1 до 10 МэВ.

Экспериментальных данных немного, все они находятся в области энергий выше 5 МэВ. На рисунке 20 приводится сравнение оцененных сечений с имеющимися наборами экспериментальных данных.

Из представленного на рисунке 20 сравнения видно, что все оцененные сечения одинаковым образом согласуются с экспериментальными данными в пределах заявленных экспериментальных ошибок.

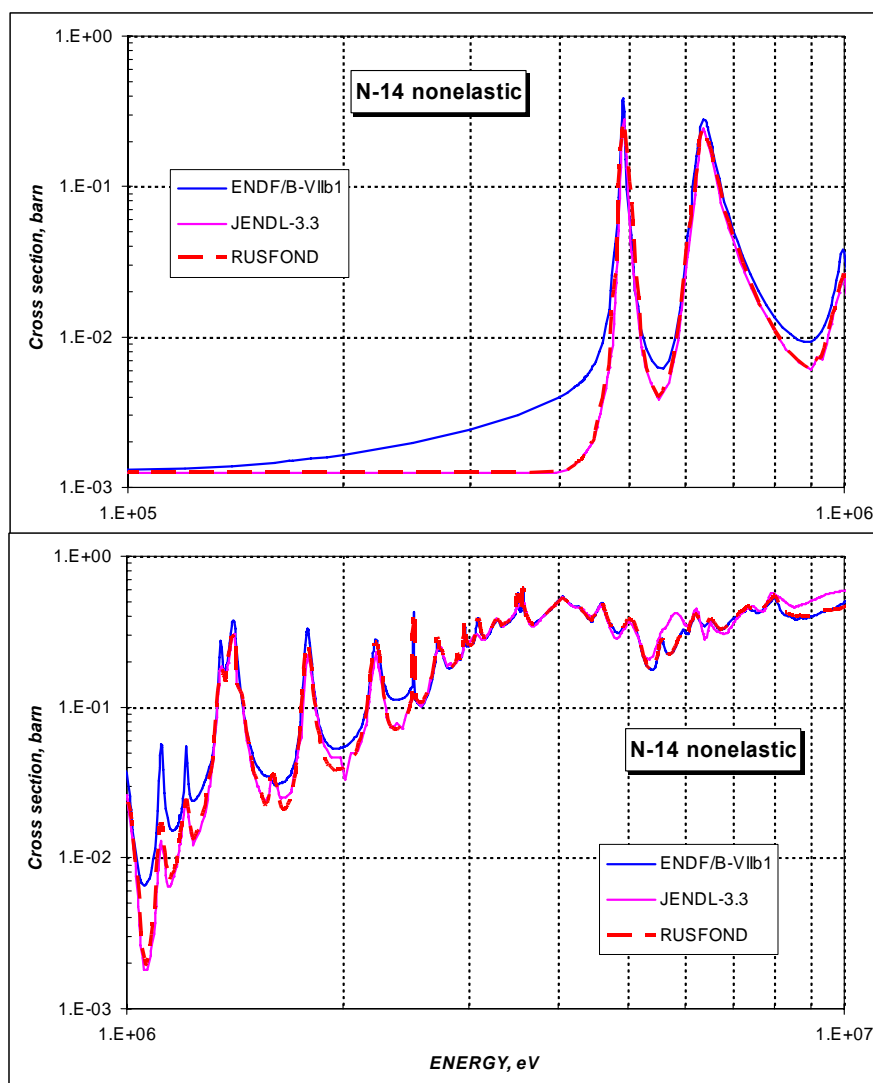


Рисунок 19 – Сравнение сечения реакции неупругих взаимодействий в области энергий 0.5 - 10.0 МэВ.

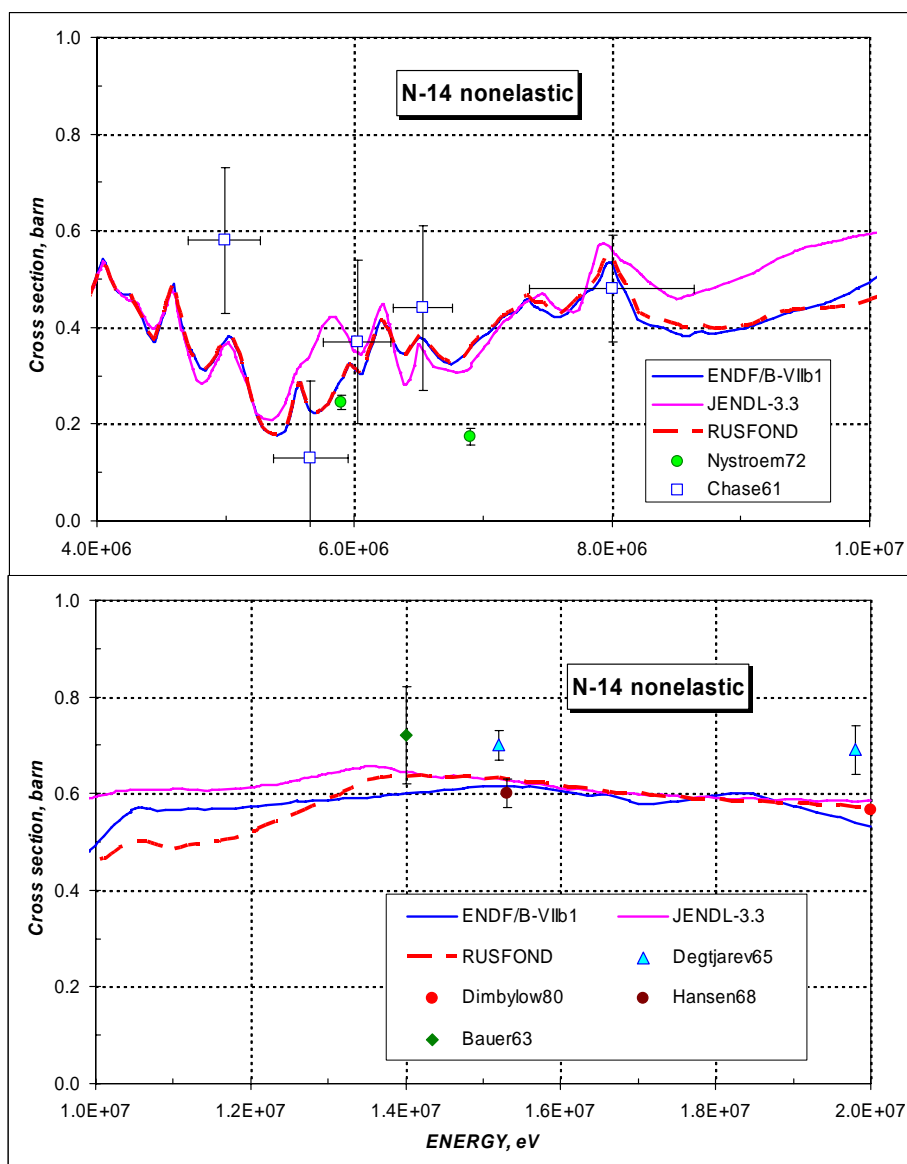


Рисунок 20 – Сравнение сечения реакции неупругих взаимодействий в области энергий выше 5 МэВ.

3.8. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Сечений для этой реакции получают из баланса сечений путем вычитания из величины сечения полного взаимодействия значений всех нейтронных сечений, приводящих к неупругому взаимодействию с ядром N-14. Наравне с сечением неупругих взаимодействий, оно приводится для контроля принятых выше сечений реакций с ядром N-14.

Экспериментальных данных по упругому рассеянию мало. На рисунках 21 – 23 показано сравнение оцененных и экспериментальных значений упругого рассеяния.

Из представленного на рисунках 21-23 сравнения видно, что все оцененные сечения одинаковым образом согласуются с экспериментальными данными в пределах заявленных экспериментальных ошибок.

В РОСФОНД рекомендуется включить сечение из JENDL-3.3. Основание для этого выбора – см. п. 4.1.

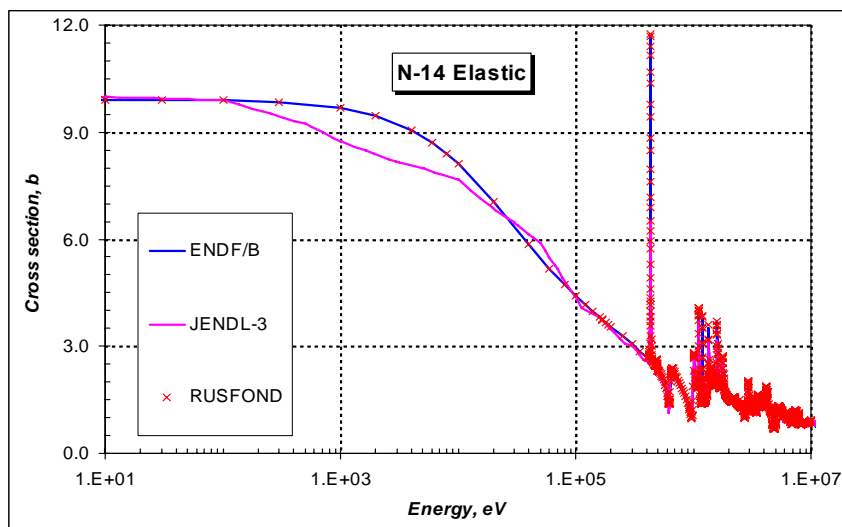


Рисунок 21 – Сечение упругого рассеяния в области 10 эВ – 10 МэВ.

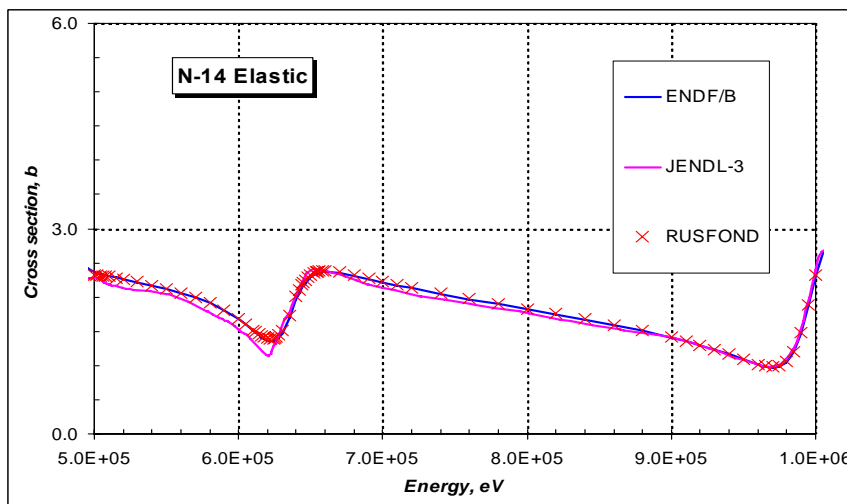
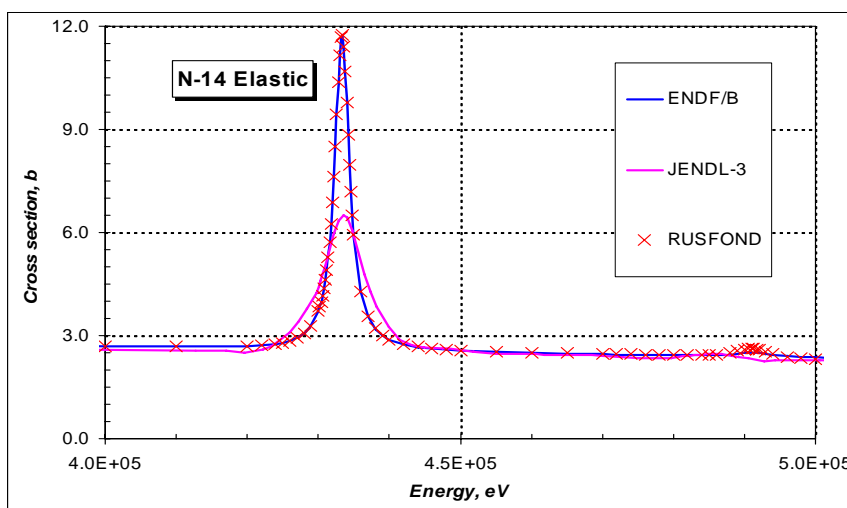


Рисунок 22 – Сечение упругого рассеяния в области 0.4 МэВ – 1.0 МэВ.

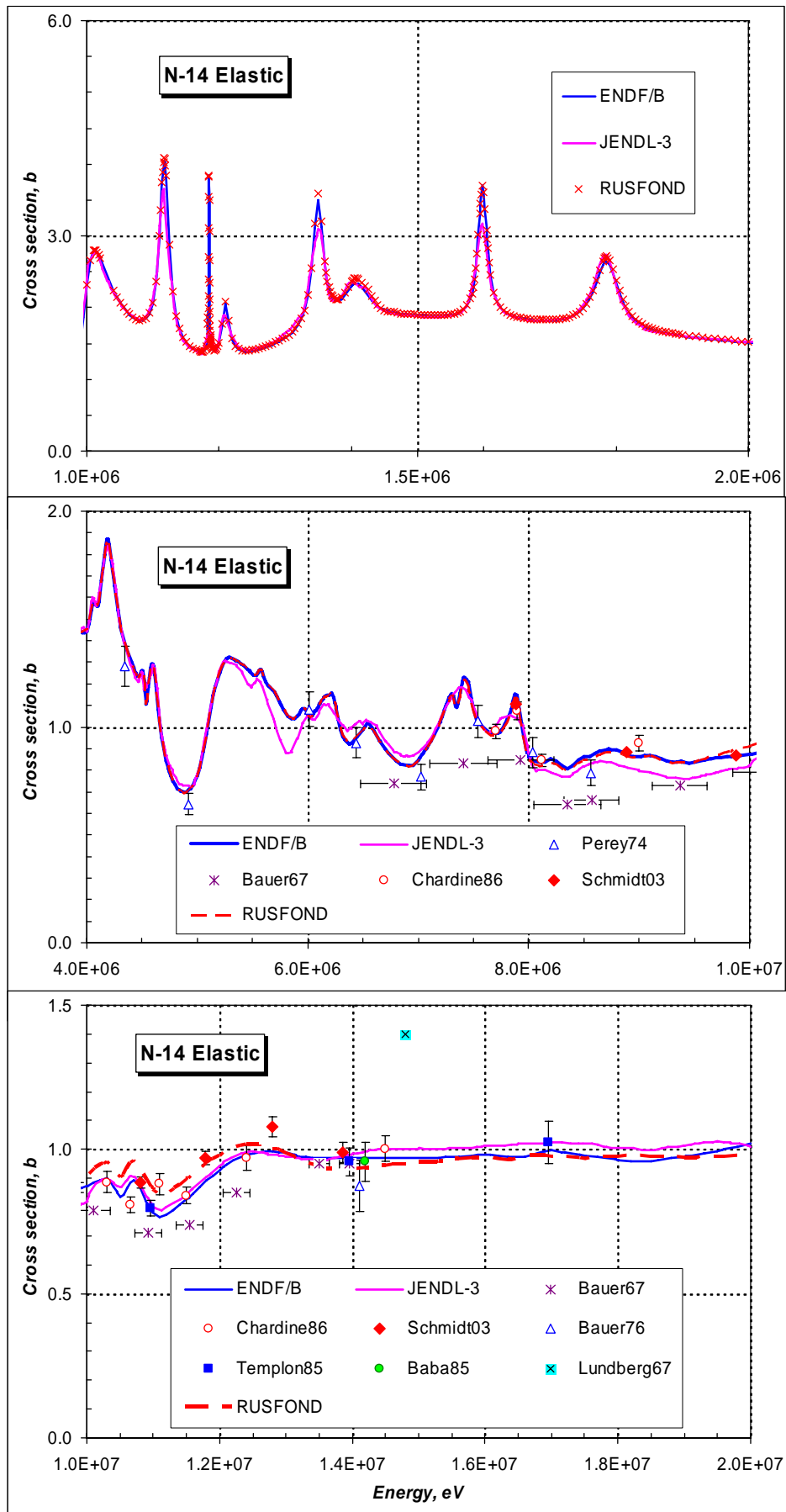


Рисунок 23 – Сечение упругого рассеяния в области 1.0 МэВ – 20.0 МэВ.

4. Угловые распределения нейтронов (MF=4)

4.1. Угловые распределения нейтронов при упругом рассеянии.

Угловые распределения в обеих оценках заданы с помощью разложения по полиномам Лежандра в системе центра масс.

В оценке ENDF/B угловое распределение задано в 614 точках по энергии. При этом, до 10 эВ распределение изотропно, от 10 эВ до 2.4 МэВ оно задано с помощью 4-х членов разложения, от 2.495 МэВ до 10 МэВ – с помощью 6 членов разложения, выше 10 МэВ угловое распределение задано с помощью 8 членов разложения по полиномам Лежандра.

В оценке JENDL угловое распределение задано в 91 точке по энергии. При этом, до 10 кэВ распределение изотропно, от 10 кэВ до 12 МэВ оно задано с помощью 10 членов разложения а выше 12МэВ угловое распределение задано с помощью 12 членов разложения по полиномам Лежандра.

Ниже на рисунке 24 -25 показано сравнение экспериментальных данных с восстановленными значениями функции углового распределения с помощью программы REBUS при использовании коэффициентов разложения из различных оценок. Сравнение приводится для ряда точек энергетического интервала таким образом, чтобы иметь представление о соответствии экспериментальных данных и восстановленных кривых во всем диапазоне энергий.

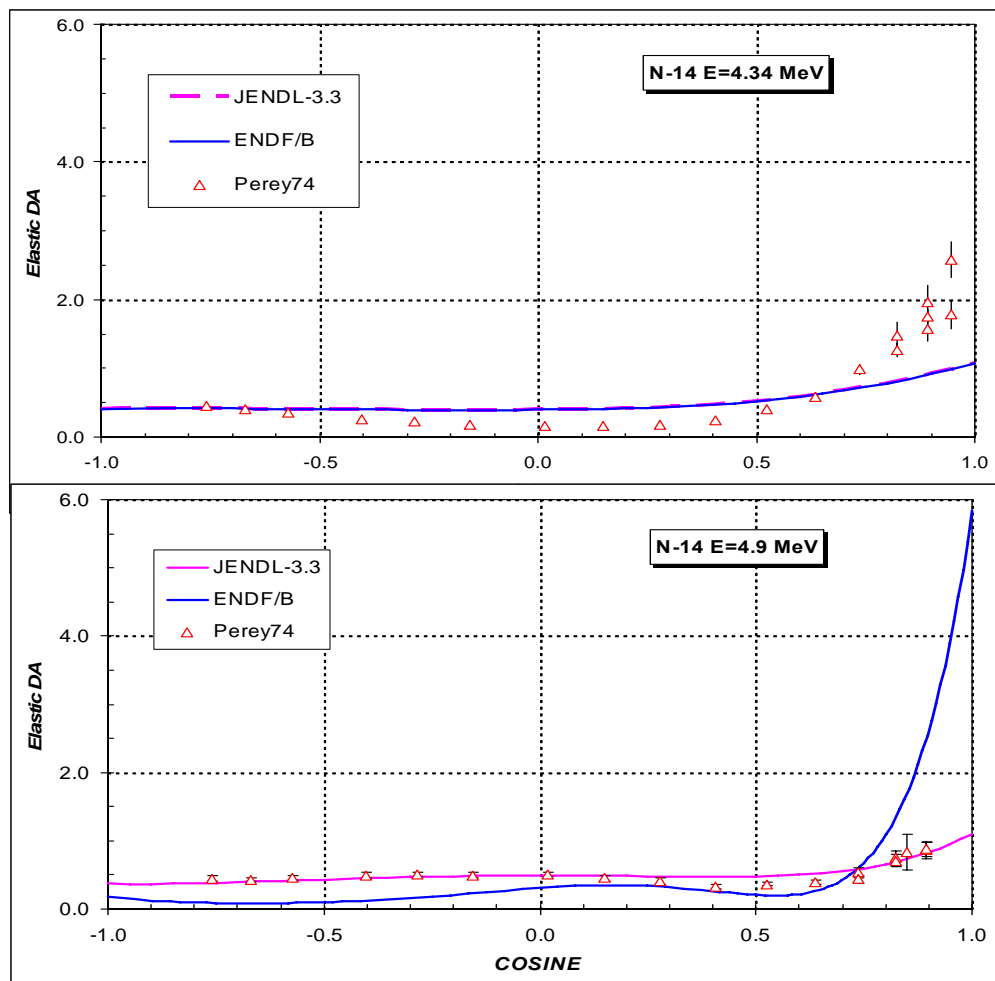


Рисунок 24 – Сравнение угловых распределений нейтронов рассеянных при упругом взаимодействии с N-14 в области энергий 4 - 5 МэВ.

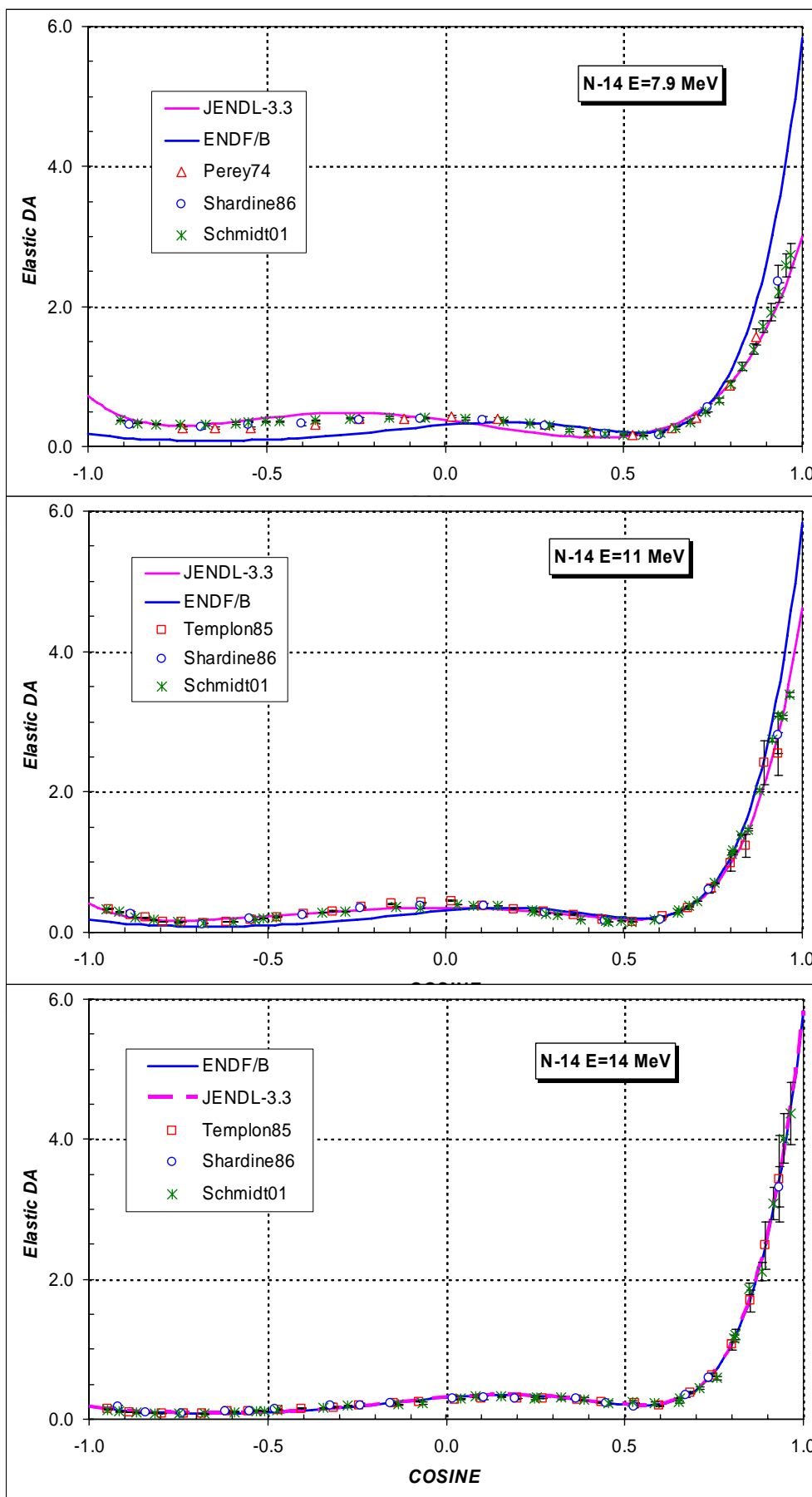


Рисунок 25 – Сравнение угловых распределений нейтронов рассеянных при упругом взаимодействии с N-14 в области энергий 8 - 14 МэВ.

Из приведенного на рисунках 24 - 25 сравнения видно, для лучшего согласия с имеющимися экспериментальными данными для восстановления угловых распределений нейтронов рассеянных при упругом взаимодействии с N-14 следует использовать коэффициенты разложения из оценки JENDL-3.3.

4.2. Угловые распределения нейтронов при неупругом рассеянии.

Сравнение последних экспериментальных данных Шмидта (2003) и оцененных угловых распределений нейтронов при неупругом рассеянии было сделано только для рассеяния на самом сильном уровне с энергией 3.943 МэВ. Сравнение приводится на рисунке 26.

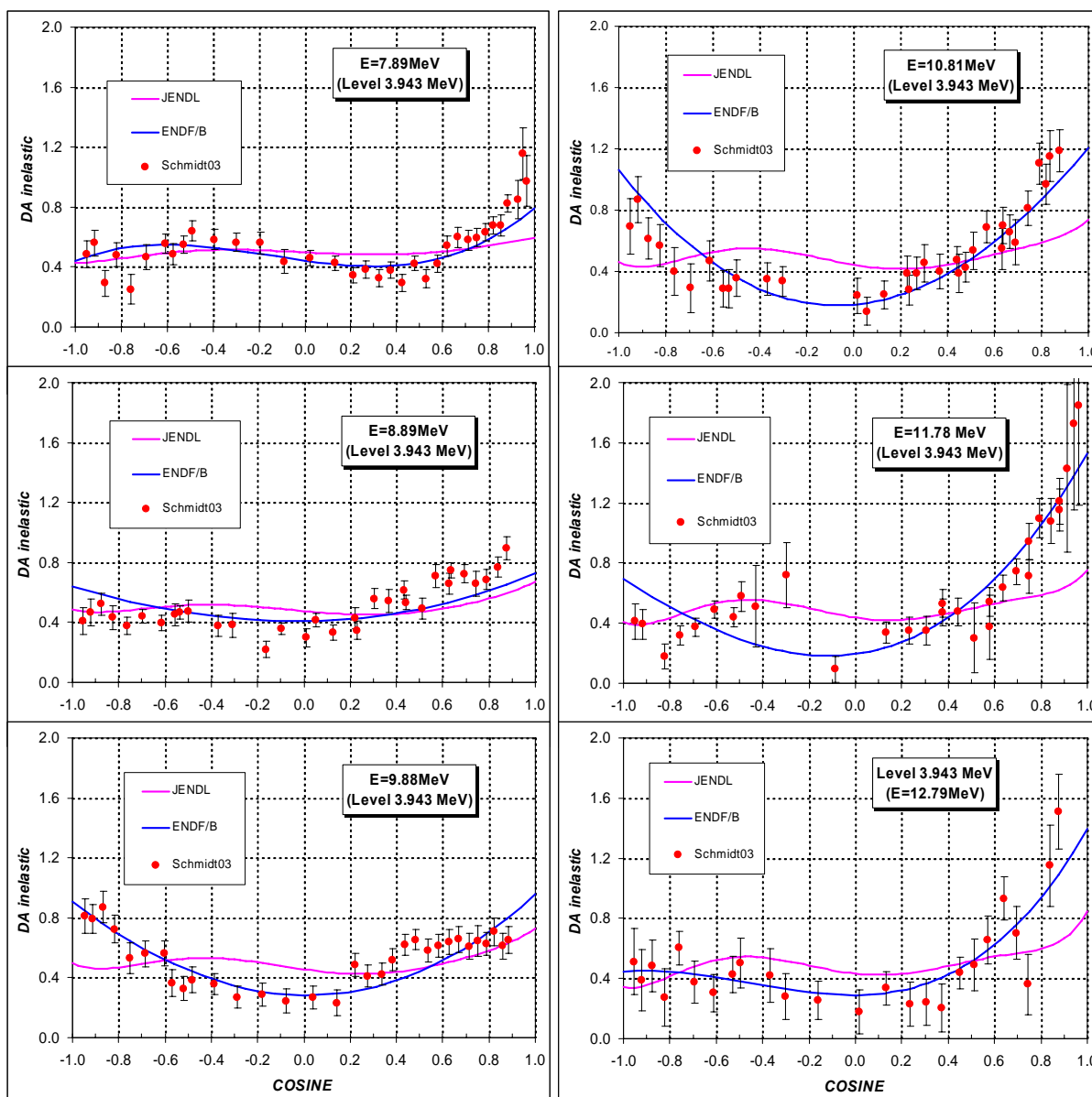


Рисунок 26 – Сравнение угловых распределений нейтронов рассеянных при неупругом взаимодействии с N-14 на уровне 3.943 МэВ.

Из приведенного на рисунке 26 сравнения видно, что, в целом, оценка ENDF/B согласуется с экспериментальными данными Шмидта (2003) лучше, чем оценка JENDL.

Поэтому, учитывая уже выполненную процедуру принятия оценки для *нейтронных сечений* неупругого рассеяния, **рекомендуется в РОСФОНД для угловых распределений нейтронов уровней неупругого рассеяния использовать оценку из ENDF/B.**

5. Энергетические распределения нейтронов (MF=5)

Спектры нейтронов для реакций (n,2n), (n,np), (n,na), (n,nd) для РОСФОНДА рекомендуются использовать из JENDL, поскольку несколько ранее (разделы 3.4, 3.5) и нейтронные сечения для соответствующих реакций были рекомендованы из JENDL.

6. Данные для фотонов (MF=12, 13, 14, 15)

При анализе фотонных данных использовались файлы оцененных нейтронных данных библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VIIb1. В них представлены две независимые оценки фотонных данных.

В JENDL-3.3 оценка фотонов была взята из JENDL-3.2, в которой K.Shibata в 1994 году откорректировал данные фотонов при радиационном захвате (MT=102). В настоящее время в библиотеке фотоны представлены следующим образом:

MF=12(множественности образования фотонов) содержит MT=102, 103,

MF=13(сечения образования) – MT=3,

MF=14(угловые распределения) – MT=3, 102, 103 – все изотропны,

MF=15(энергетические распределения) – MT=3, 102, 103.

Фотонные данные в файлах MT=12, 13, 15 были получены по программе GNASH (Young P.G. and Arthur E.D.: LA-6947 (1977)).

С первого взгляда в библиотеке ENDF/B-7 фотоны представлены более подробно и представляют собой более позднюю оценку фотонов (2000г):

MF=12 MT=102,

MF=13 MT= 4, 28, 32, 103, 104, 105, 107;

MF=14 MT= 4, 28, 32, 102, 103, 104, 105, 107,

MF=15 MT=102.

Оценки фотонных данных для всех реакций выполнялись на основе многочисленных экспериментальных данных.

Однако следует отметить, что для реакций MT=28 и MT=32 в файле нет нейтронных данных (возникает вопрос баланса). Далее, энергетические распределения фотонов приведены только для радиационного захвата MT=102.

В целом, подход к оценке фотонных данных в ENDF/B выглядит более физичным.

На наш взгляд, в оценке ENDF/B присутствует ошибка следующего характера. Согласно описанию выполненной оценки (MT=451) фотонные данные для реакции (n,na) (MT=22) ошибочно приписаны реакции (n,nd) (MT=32). На этот факт дополнительно указывает информация об оценке нейтронных сечений на отдельных уровнях неупругого рассеяния.

Для сравнения фотонных данных по программе NJOY были получены матрицы выходов вторичных гамма квантом (28_нейтронных × 15_фотонных групп). При сравнении полученных данных оказалось, что матрицы фотонов для реакций (n,g) и (n,p) (MT=102, 103) практически совпадают. В полной матрице именно эти реакции определяют фотоны при взаимодействии нейтронов с энергией ниже 1.4 МэВ (с 5 по 28 нейтронную группу). В более высокой области энергии нейтронов, наблюдаемые расхождения по выходам фотонов проявляются из-за вкладов дополнительных реакций в оценке ENDF/B.

Из выше изложенного, следует, что для РОСФОНД'а предпочтение следует отдать фотонным данным из ENDF/B, при этом откорректировать данные для реакции (n,na) и добавить энергетические распределения для реакции (n,p).

7. Заключение

7.1. Выводы.

Для библиотеки РОСФОНД файл нейтронных данных для азота-14 рекомендуется сделать комбинированным. Его следует сформировать согласно проведенному анализу всей совокупности экспериментальных и оцененных нейтронных данных и рекомендациям, сделанным по каждому разделу данных.

7.2. Автор отбора оцененных данных:

Кошечев В.Н.

7.2. Азот-15

1. Общее описание

Малораспространенный изотоп (содержание в естественной смеси (0.366%), выгодно отличающийся от основного изотопа – азота-14 – низким сечением поглощения. В связи с этим этот изотоп рассматривается как перспективный материал для изготовления нитридного топлива.

Имеется три полных файла для азота-15:

- оценка E.Arthur, P.Yound, G.Hale (1983), используемая в ФОНД, В-VII и JEFF-3.1,
- оценка T.Fukahori (1988), включенная в JENDL-3.3.
- и оценка А.Блохина и Н.Работнова и др. – БРОНД-2.2 (1989).

1.1. $Z=7$

1.2. $A=15.000\ 108\ 898\ 2(8)$

1.3. $A_{wr}=14.871\ 250\ 764\ 0(8)$

1.4. Содержание в естественной смеси: - 0.366 %

1.5. Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|----------------|----------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | (n,n') | -5.2702 | 5.6246 | N-15 |
| 16 | (n,2n) | -10.8337 | 11.5622 | N-14 |
| 22 | (n,na) | -10.9911 | 11.7302 | B-11 |
| 28 | (n,np) | -10.2074 | 10.8938 | C-14(5730 y) |
| 32 | (n,nd) | -16.1598 | 17.2464 | C-13 |
| 33 | (n,nt) | -14.8486 | 15.8471 | C-12 |
| 102 | (n, γ) | 2.4920 | 0.0 | N-16(7.13 s) |
| 103 | (n,p) | -8.9892 | 9.5937 | C-15(2.45 s) |
| 104 | (n,d) | -7.9827 | 8.5196 | C-14(5730 y) |
| 105 | (n,t) | -9.9022 | 10.5680 | C-13 |
| 107 | (n,a) | -7.6218 | 8.1344 | B-11 |

1.6. Схема уровней:

| MT | LEVEL ENERGY (MEV) | SPIN-PARITY |
|----|--------------------|-------------|
| | 0.0 | 1.2- |
| 51 | 5.2702 | 5/2+ |
| 52 | 5.2988 | 1/2+ |
| 53 | 6.3239 | 3/2- |
| 54 | 7.1551 | 5/2+ |
| 55 | 7.3008 | 3/2+ |
| 56 | 7.5671 | 7/2+ |
| 57 | 8.3126 | 1/2+ |
| 58 | 8.5714 | 3/2+ |
| 59 | 9.0497 | 1/2+ |
| 60 | 9.1519 | 3/2- |
| 61 | 9.1549 | 5/2+ |
| 62 | 9.2221 | 1/2- |
| 63 | 9.7600 | 5/2- |
| 64 | 9.8290 | 7/2- |

| | | |
|-----------|---------|------|
| 65 | 9.9250 | 3/2- |
| 66 | 10.0660 | 3/2+ |
| 91 (cont) | 10.4497 | |

1.7. Радиоактивность: не радиоактивен

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 1^+$;

2.2. Радиус рассеяния: $R=0.886366^{-12}$ см.

2.3. Область резонансных энергий. – области резонансных энергий нет.

3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)

Основные нейтронные реакции для N-15 в области энергий до 10 МэВ показаны на рисунке 27.

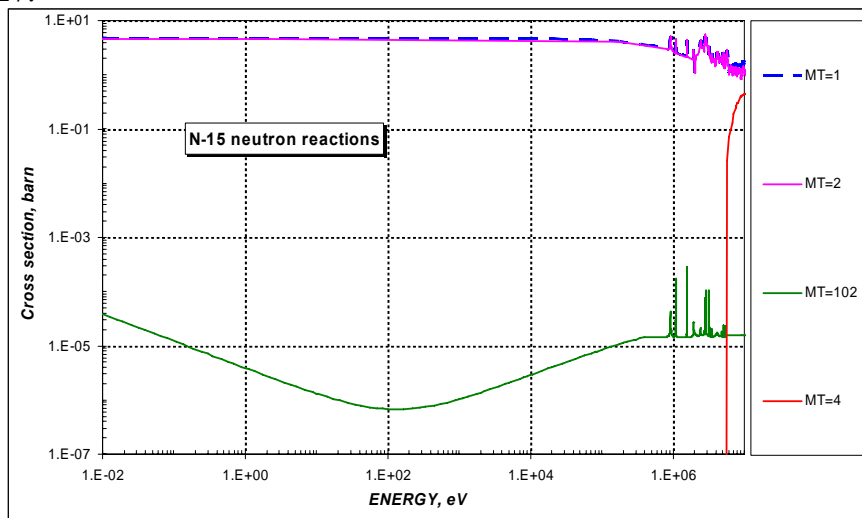


Рисунок 27 – основные нейтронные реакции на N-15.

Из приведенной на рисунке 27 информации видно, что в области энергий до 5 МэВ основным сечением является сечение упругого рассеяния. Сечение радиационного захвата по величине на несколько порядков меньше.

Энергетические зависимости пороговых реакций, которые возможны на N-15, показаны на рисунке 28. Откуда видно, что до 10 МэВ основной вклад в полное сечение из них дает неупругое рассеяние нейтронов.

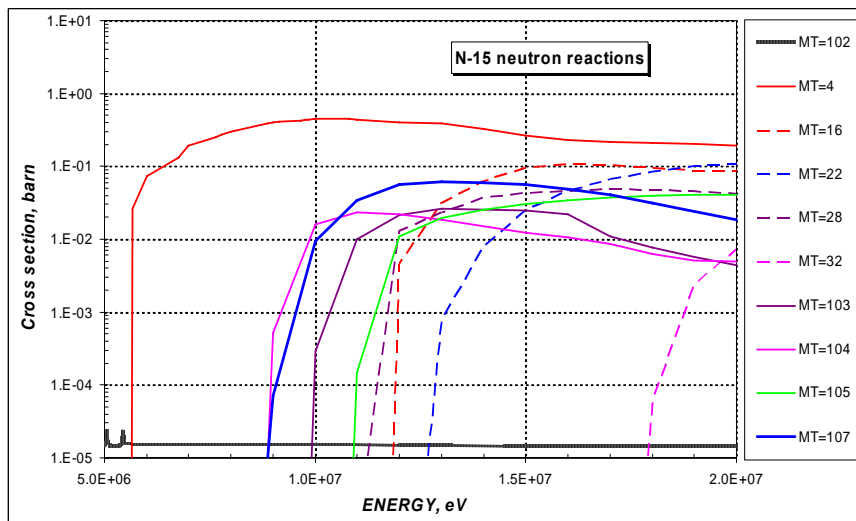


Рисунок 28 – основные нейтронные реакции на N-15.

3.1. Полное сечение (MT=1).

На рисунке 29 представлено сравнение оцененных нейтронных данных из перечисленных трех библиотек в области энергий от 10 эВ -1 МэВ, из которого видно, что оценки по-разному согласуются с рекомендованным значением Мухабхаба.

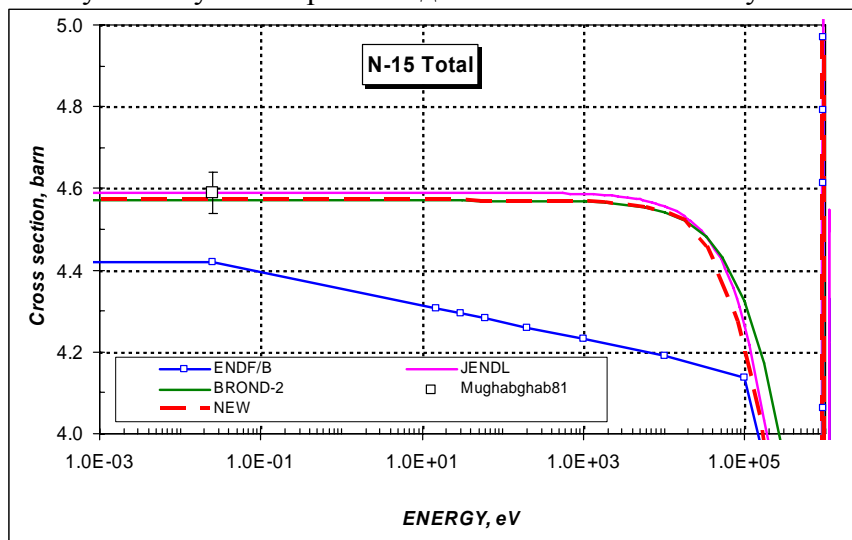


Рисунок 29 – Сравнение полных сечений N-15 в области энергий до 1 МэВ.

Из приведенного сравнения видно, что оценка ENDF/B не согласуется с рекомендованным значением полного сечения, а в области энергий от 0.0253 эВ до 100 кэВ скорее всего ошибочна из за некорректной интерполяции сечения на одном из рабочих этапов. На рисунке 30 показано сравнение расчетных сечений с экспериментальными данными в области энергий первого резонанса (0.85-1.0 МэВ).

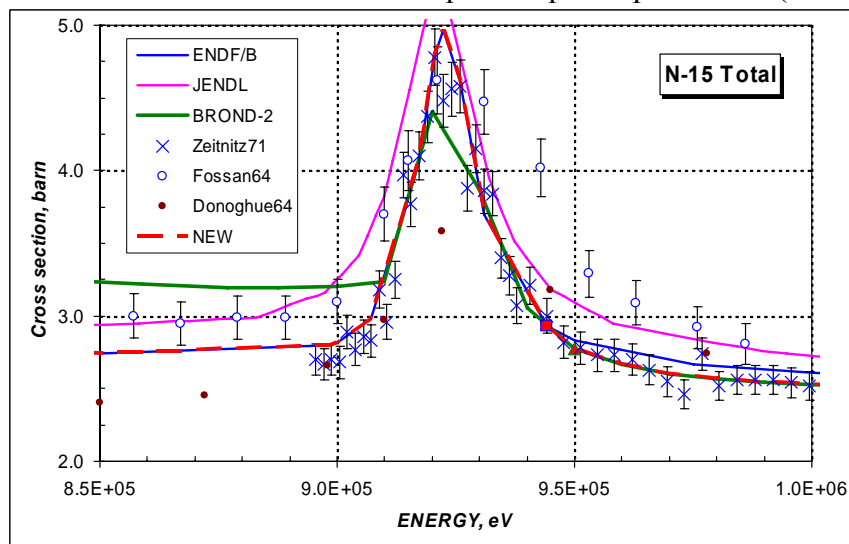


Рисунок 30 – Сравнение полного сечения N-15 в области энергий 0.850-1.0 МэВ.

Из приведенного сравнения видно, что оценка ENDF/B наилучшим образом описывает довольно подробный эксперимент Зейтнитца (1971), в то время, как другие оценки с эти экспериментом не согласуются.

На рисунке 31 показано сравнение оцененных и экспериментальных данных в области энергий от 1 – 20 МэВ.

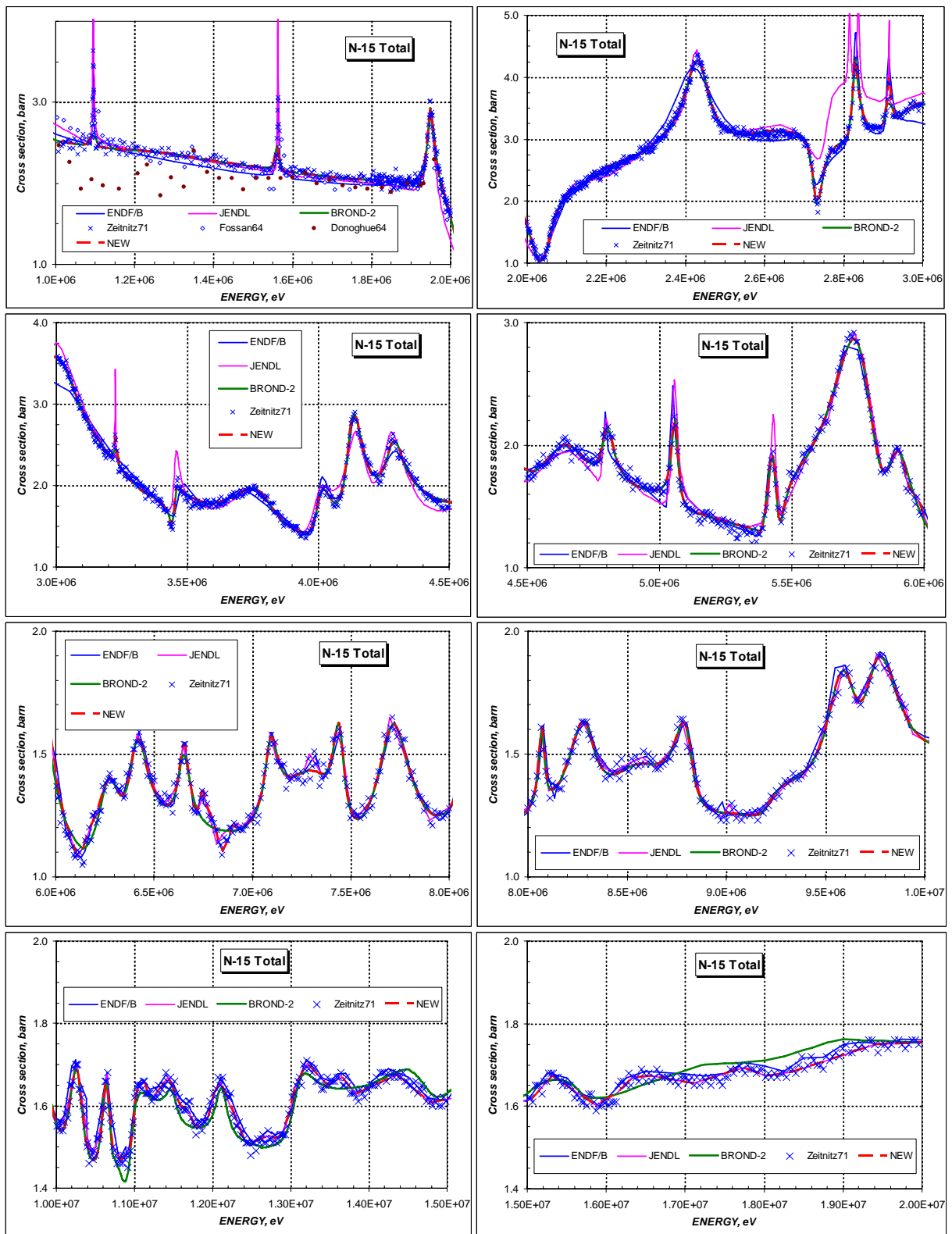


Рисунок 31 - сравнение оцененных и экспериментальных данных для полного сечения N-15 в области энергий от 1 – 20 МэВ

Из приведенного на рисунке 31 сравнения видно, что, в целом, все оценки в пределах экспериментальной точности согласуются между собой. Но в области энергий до 10 МэВ оценки БРОНД и ENDF/B лучше согласуются с экспериментом. А в области энергий выше 10 МэВ с экспериментом лучше согласуются оценки ENDF/B и JENDL.

Вывод

Для библиотеки РОСФОНД следует модифицировать оценку БРОНД на основе оценок ENDF/B и JENDL в тех областях энергий, где последние оценки лучше описывают эксперимент Зейтнитца (1971). На рисунках модифицированная кривая обозначена как оценка NEW.

3.2. Сечение радиационного захвата (MT=102).

Общее представление о поведении оцененных сечений радиационного захвата можно получить из рисунка 32 (при отсутствии экспериментальных данных).

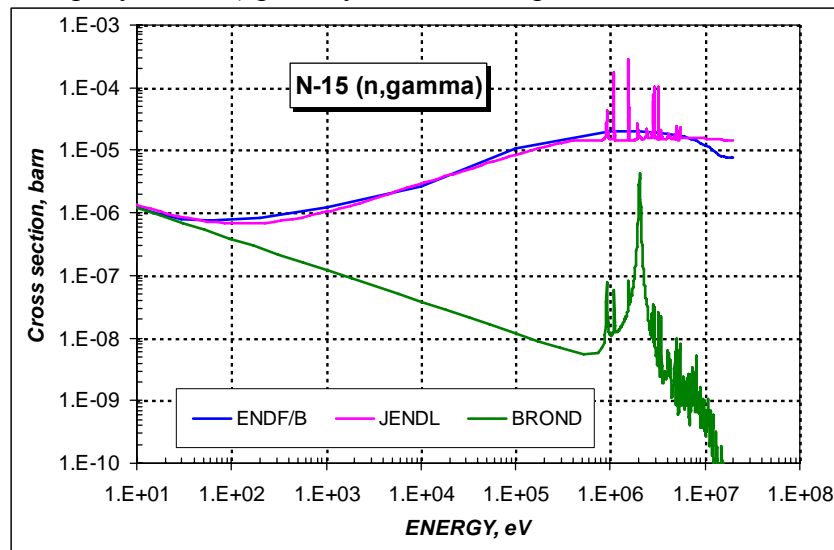


Рисунок 32 – Оцененные сечение радиационного захвата для N-15.

Различный характер поведения оцененных кривых объясняется тем, что в оценках ENDF и JENDL учитывается прямой p-wave захват. В JENDL его вклад оценивался по формуле Мейсснера и др. А в ENDF/B его вклад рассчитывался по статистической модели с использованием аппроксимации Акселя для коэффициентов прохождения гамма квантов гигантского дипольного резонанса. В оценке БРОНД сечение получено с использованием обычного формализма многоуровневого Брейта-Вигнера. Поскольку прямой захват, повидимому, присутствует в природе, то оценка JENDL является более привлекательной при наличии корреляций между полным сечением и сечением захвата.

На рисунке 33 показано сравнение резонансной структуры упомянутых двух сечений, приведенных к виду удобному для сравнения.

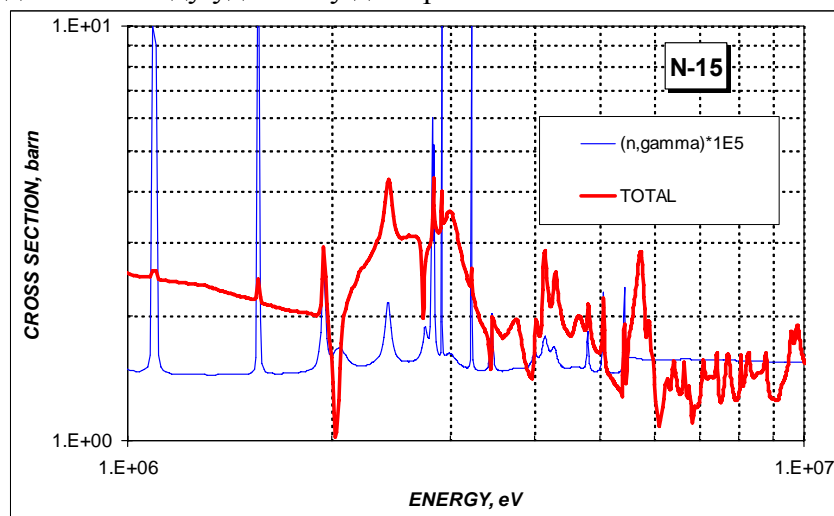


Рисунок 33 – Сравнение резонансной структуры сечений радиационного захвата и полного взаимодействия для N-15.

Вывод

Для библиотеки РОСФОНД следует использовать оцененную кривую сечения радиационного захвата на основе JENDL.

3.3. Сечение неупругого рассеяния нейтронов (MT=4).

На рисунке 34 приведено сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния нейтронов на N-15 (экспериментальные данные отсутствуют).

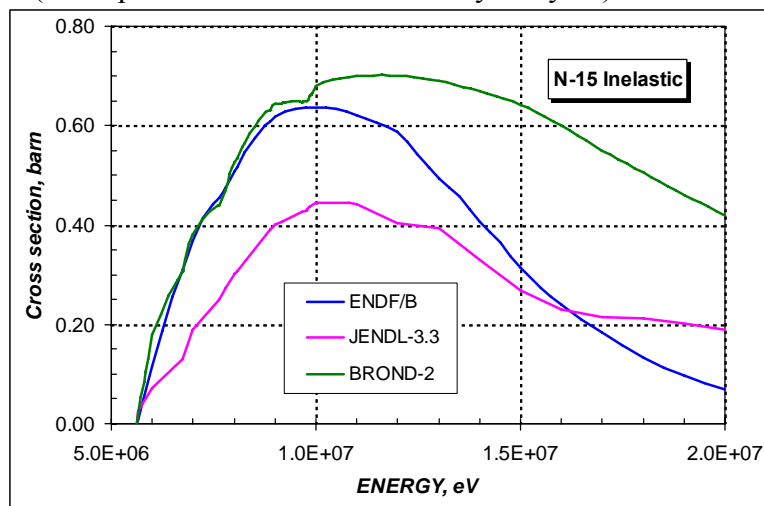


Рисунок 34 – Сечение неупругого рассеяния нейтронов на N-15.

Из приведенного на рисунке 34 сравнения видно, что оценки БРОНД и ENDF/B согласуются между собой в области энергий до 10 МэВ. Более резкий спад оценки ENDF/B вероятно вызван конкуренцией сечений пороговых реакций, имеющих более высокие значения сечений. В следующих разделах сравнения на это следует уделить внимание. Оценка JENDL, по-видимому, является чересчур заниженной.

3.4. Сечение реакций с вылетом протона (MT=103 и MT=28).

На рисунке 35 приводится сравнение оцененных сечений реакции (n,p) с экспериментальными данными.

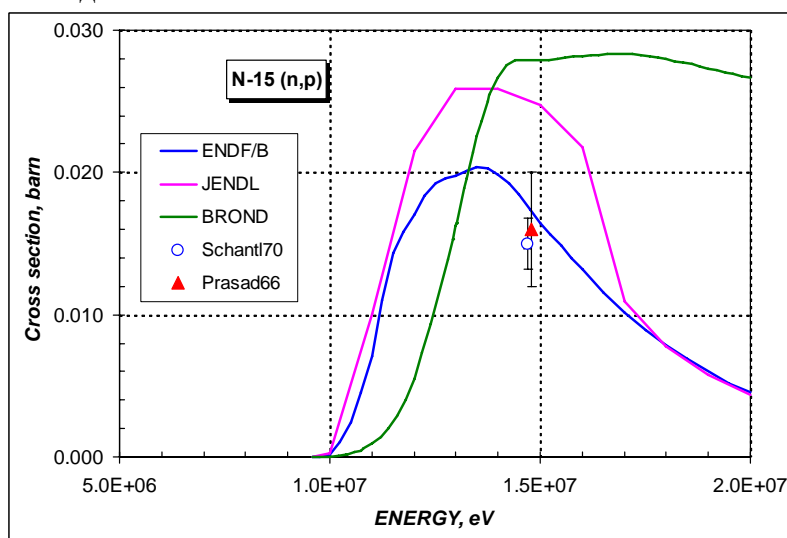


Рисунок 35 – Сечение реакции (n,p) на N-15.

Из приведенного на рисунке 35 сравнения видно, что оценка ENDF/B единственным образом согласуется с экспериментом.

На рисунке 36 приводится сравнение оцененных сечений реакции (n,np).

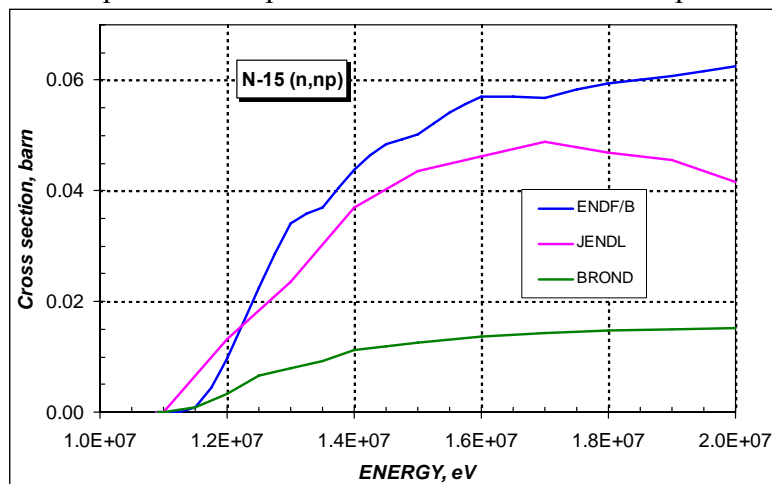


Рисунок 36 – Сечение реакции (n,np) на N-15.

Из приведенного на рисунке 36 сравнения, трудно отдать предпочтение какой либо оценке при отсутствии экспериментальных данных.

3.5. Сечение реакций с вылетом дейтона (MT=104 и MT=32).

На рисунке 37 приводится сравнение оцененных сечений реакции (n,d) и (n,nd).

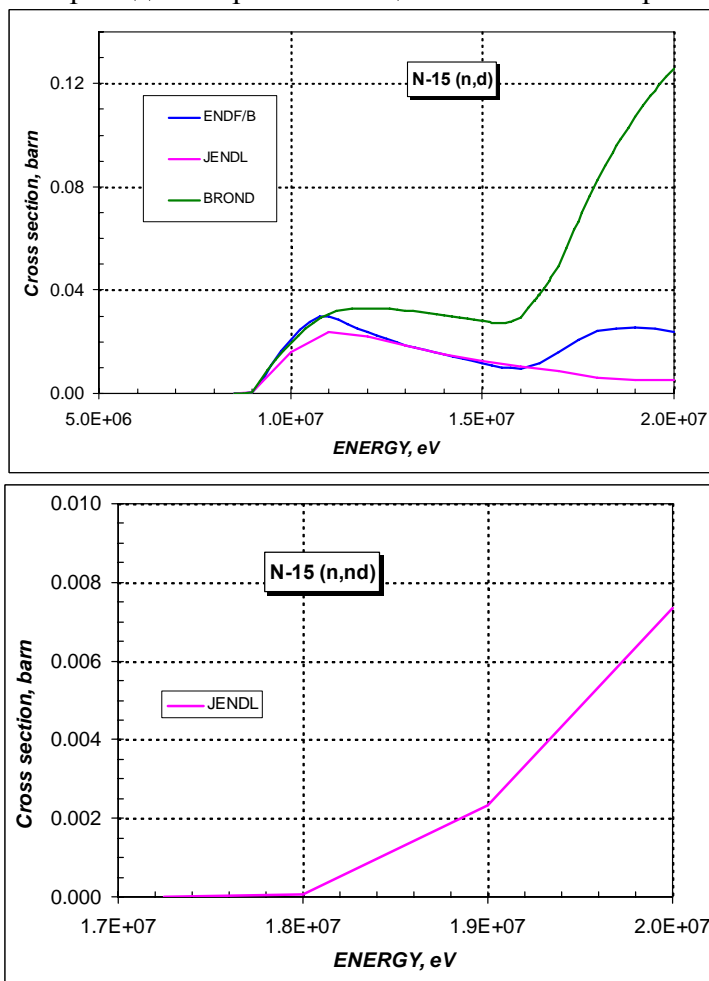


Рисунок 37 – Сечение реакции (n,d) и (n,nd) на N-15.

Из приведенного на рисунке 37 сравнения, видно, что оценки ENDF/B и JENDL согласуются между собой, в то время, как оценка БРОНД имеет другую форму кривой.

Из приведенного на рисунке 37 сравнения, трудно отдать предпочтение какой либо оценке при отсутствии экспериментальных данных.

3.6. Сечение реакций с вылетом альфа частицы (MT=107 и MT=22).

На рисунке 38 приводится сравнение оцененных сечений реакции (n,a) и (n,na).

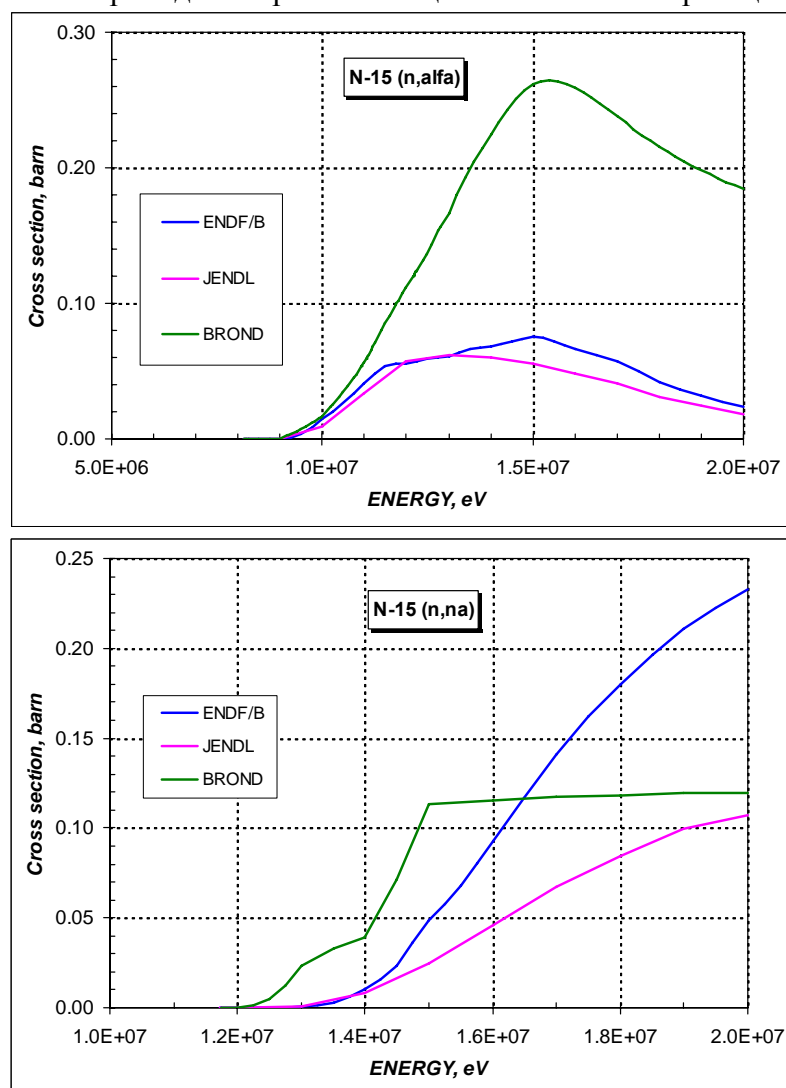


Рисунок 38 – Сечение реакции (n,a) и (n,na) на N-15.

Из приведенного на рисунке 38 сравнения, видно, что оценки ENDF/B и JENDL согласуются между собой, в то время, как оценка БРОНД имеет другую форму кривой.

Из приведенного на рисунке 38 сравнения, трудно отдать предпочтение какой либо оценке при отсутствии экспериментальных данных.

3.7. Сечение реакций с вылетом нейтрона (MT=16).

На рисунке 39 приводится сравнение оцененных сечений реакции (n,2n).

Из приведенного на рисунке 39 сравнения, видно насколько оценки ENDF/B, JENDL и БРОНД согласуются между собой. Отметим, что оценка ENDF/B имеет максимальные значения сечения.

Из приведенного на рисунке 39 сравнения, трудно отдать предпочтение какой либо оценке при отсутствии экспериментальных данных.

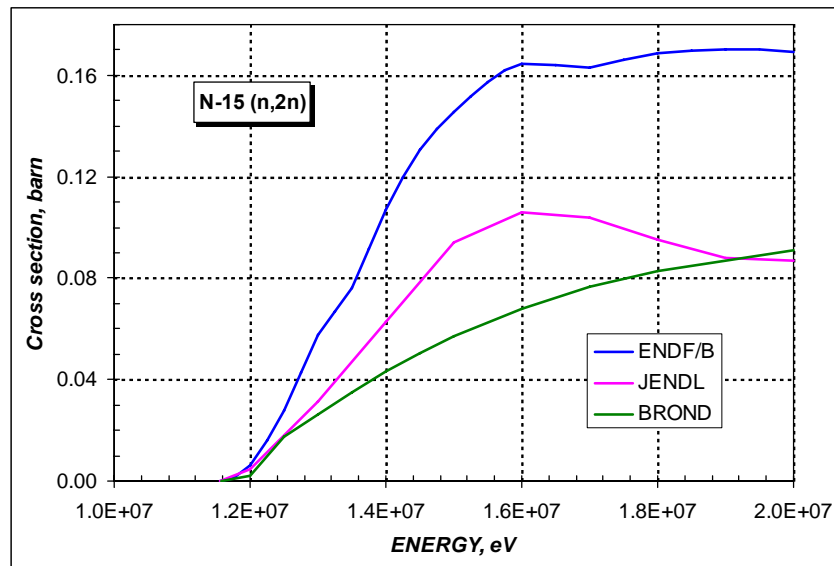


Рисунок 39 – Сечение реакции (n,2n) на N-15.

3.7. Сечение реакций с вылетом трития (MT=105 и MT=33).

На рисунке 40 приводится сравнение оцененных сечений реакции (n,a) и (n,na).

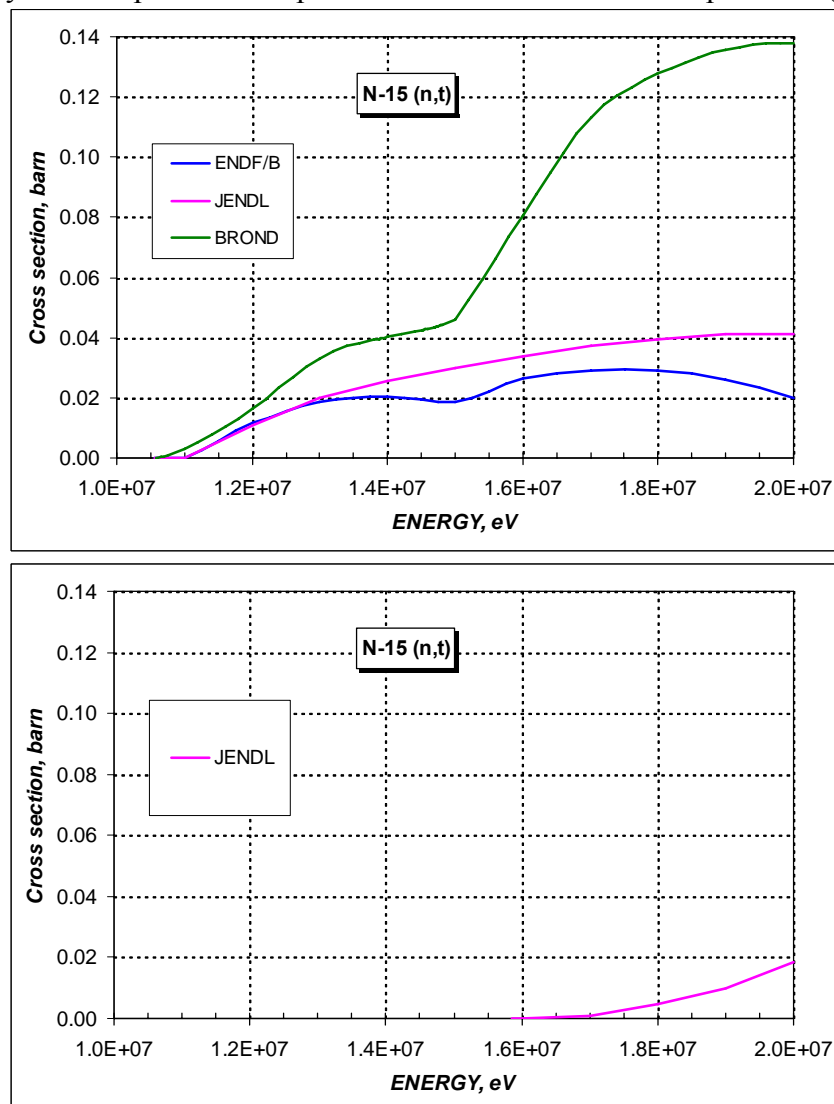


Рисунок 40 – Сечение реакции (n,t) и (n,nt) на N-15.

Из приведенного на рисунке 40 сравнения, видно, что оценки ENDF/B и JENDL согласуются между собой, в то время, как оценка БРОНД имеет другую форму кривой.

Из приведенного на рисунке 40 сравнения, трудно отдать предпочтение какой либо оценке при отсутствии экспериментальных данных.

Выводы

Из приведенного на рисунках 34 – 40 сравнения сечений пороговых реакций видно, что в целом, наиболее согласованной оценкой можно назвать оценку ENDF/B, поскольку она согласуется с экспериментом для реакции (n,p) а в отсутствии экспериментальных данных не противоречит другим оценкам.

4. Заключение

4.1. Выводы

В библиотеку РОСФОНД для изотопа N-15 предлагается включить модификацию оценки ENDF/B, выполненную следующим образом:

- обновить полное сечение на основе оценки БРОНД и экспериментальных данных Зейтнитца;
- обновить сечение захвата на основе оценки JENDL, в которой учтен прямой p-захват;
- остальные нейтронные и фотонные данные взять из оценки ENDF/B;
- сечение упругого рассеяния нейтронов получить из условия баланса всех сечений.

4.2. Автор отбора оцененных данных:

Кощев В.Н.

8. КИСЛОРОД

Общие замечания.

Природный кислород содержит три стабильных изотопа в следующих атомарных концентрациях:

^{16}O – 99.762%;

^{17}O – 0.038%;

^{18}O – 0.2%.

Долгоживущих радиоактивных изотопов кислорода не существует

8.1. Кислород-16

Для основного изотопа кислорода - ^{16}O – используются четыре различных оценки:

1. **Оценка Янга, Хэйла, Чедвика, Каро и Любца** (P.G. Young, G.M. Hale, M.V.Chadwick (LANL), E.Caro, C.R. Lubitz (KAPL)), выполненная в 2001 г. используется в первых версиях американской библиотеки ENDF/B-VII и европейской библиотеки JEFF-3.1¹.
2. **Оценка Шибата и др** (K.Shibata (JAERI)), основательно пересмотренная в 2002 г. , используется в японской библиотеке JENDF-3.3.
3. **Оценка Хейла, Чена и Янга** (G.Hale, Z.Chen, P. Young), выполненная в 1990 г. для первой версии библиотеки ENDF/B-VI, используется в библиотеке ФОНД-2.2.
4. **Оценка Тингджина и Жанфенга** (Liu Tingjin, Liu Janfeng) , выполненная в 1992 г., используется в китайской библиотеке CENDL-2.

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z=8$
- 1.2. $A=15.99491462$
- 1.3. $A_w=15.85751 \quad 1.585751+1$
- 1.4. Содержание в естественной смеси: 99.762 ат%;
99.735 вес%

¹ В окончательной редакции библиотеки ENDF/B-VII в этой оценке откорректировано сечение реакции (n, α), что будет отмечено в соответствующем разделе ниже.

1.5. Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Энергия реакции, Q, МэВ | | E _{порог.} , эВ | | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|---------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| | | В файле ENDF/B-VII | По данным Работы ² | В файле ENDF/B-VII | По данным работы ¹ | |
| 16 | (n,2n) | -15.6638 | -15.66392 | 16.651600 | 16.651710 | O15, 122.24с |
| 22 | (n,nα) | -7.16195 | -7.16192 | 7.613591 | 7.613559 | C-12 |
| 23 | (n,n3α) | -14.43676 | -14.43666 | 15.347170 | 15.347060 | He-4 |
| 28 | (n,np) | -12.1276 | -12.12741 | 12.892350 | 12.892180 | N-15 |
| 102 | (n,γ) | 4.1432343 | 4.1431292 | | | O-17 |
| 103 | (n,p) | -9.6368 | -9.63831 | 10.244510 | 10.246120 | N-16, 4.173с |
| 104 | (n,d) | -9.903 | -9.90284 | 10.527500 | 10.527330 | N-15 |
| 105 | (n,t) | -14.479 | -14.47891 | 15.392070 | 15.391970 | N-14 |
| 107 | (n,α) | -2.2143 | -2.21561 | 2.355319 | 2.355331 | C-13 |
| 108 | (n,2α) | -12.8632 | -12.86316 | 13.674350 | 13.674330 | Be-9 |

*) Для радиоактивных продуктов реакций указан период полураспада

Энергии нейтронных реакций, приведенные в файле оцененных данных, принятом за основу при отборе данных для библиотеки РОСФОНД, удовлетворительно согласуются с порогами этих реакций ($E_{пор} = Q \cdot (AWR + 1) / AWR$) во всех случаях кроме реакции (n, α), в которой для согласования с энергией порога энергия должна быть указана равной **2.21560 МэВ**, что соответствует данным рекомендации¹. В файл ранних РОСФОНД это исправление внесено.

Для остальных реакций различия в Q не превышают 0.16% (для реакции (n,p)), а как правило, на порядок ниже. Никакой корректировки этих данных при формировании файла РОСФОНД не производилось.

1.6. Радиоактивность: изотоп не радиоактивен

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 0^+$;

2.2. Радиус рассеяния: $R = 0.5562563$ ферми.

2.3. Резонансные параметры не приводятся (сечения во всей области энергий заданы поточечно)

2.4. Область неразрешенных резонансов отсутствует

3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)

На рис. 1 показан энергетический ход полного сечения и всех его составляющих (по данным ENDF/B-VII). Не виден лишь вклад сечения радиационного захвата, который, согласно принятой в названной библиотеке оценке, пренебрежимо мал во всей рассматриваемой энергетической области. Сечение упругого рассеяния, являющееся разностью между полным сечением и суммой сечений всех неупругих взаимодействий, не изображено. Обсуждение будет вестись по энергетическим областям и, порой, по реакциям.

² G.Audi, A.H.Wapstra and C.Thibault, Nucl. Phys. A729, p. 337-676, December 22, 2003

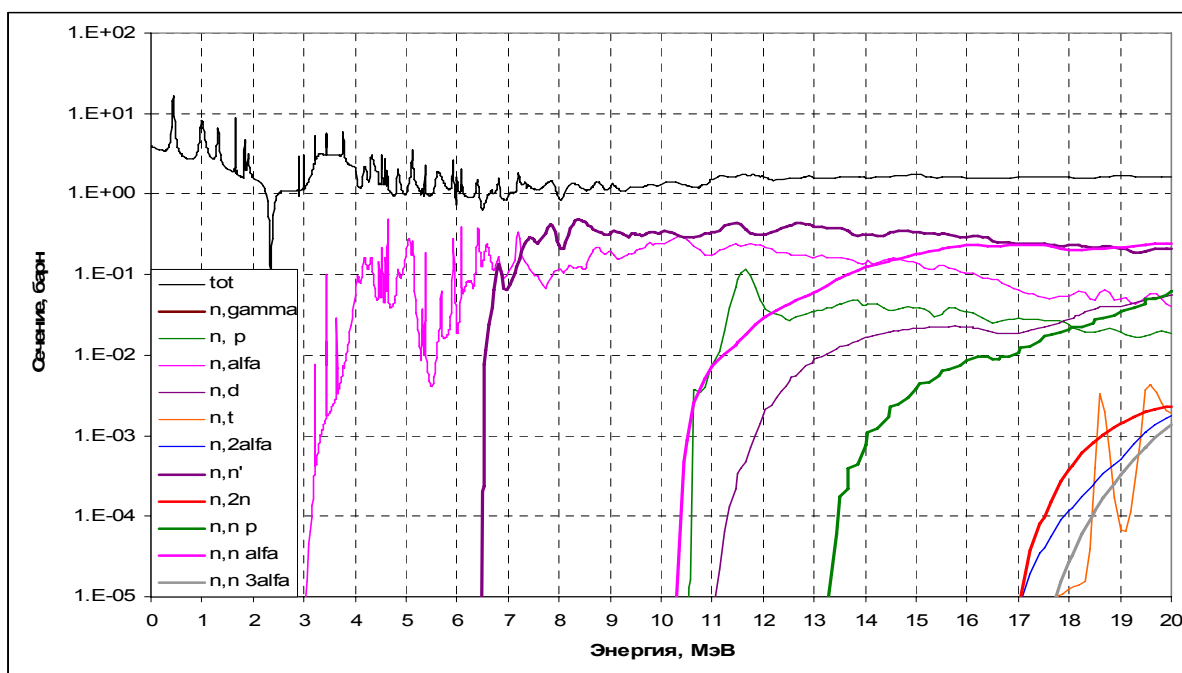


Рисунок 1. Нейтронные сечения ^{16}O

3.1 Сечения в области низких энергий (ниже 0.1 эВ)

В области низких энергий возможны лишь два процесса взаимодействия нейтронов с кислородом – радиационный захват и упругое рассеяние. В Таблице 1 приведены значения сечений этих процессов, принятые в различных оценках.

Таблица 1. Тепловые сечения

| Процесс | ENDF/B-VII | JENDL-3.3 | ФОНД-2.2 | Mughabghab |
|----------------|----------------|------------|----------|--------------------------------|
| Упр. рассеяние | 3.85181 | 3.78000 | 3.8830 | 3.761±0.006 ³ |
| Рад. захват | 0.000189866 | 0.00018987 | 0.00019 | 0.000190±0.000019 ⁴ |
| Полное сечение | 3.85200 | 3.78019 | 3.8849 | |

Заметим, что повышение полного сечения с 3.76 барн до 3.85 барн и выше оправдывается экспериментальными данными W.Ohkuba⁵, измерившим сечение в диапазоне от 79 эВ до 1 МэВ. Учет результатов этого эксперимента при оценке полного сечения не мог не привести к увеличению оцененного полного сечения в тепловой области энергий.

Сечение захвата в рассматриваемой области энергий подчиняется закону $1/v$. Что касается сечения упругого рассеяния, то в оценке, принятой в ENDF/B-VII, оно в этой области резко меняется от 3.852 барна при 0.1 МэВ до 3.842 барна при 10^{-5} эВ, так что полное сечение сохраняется практически постоянным и равным 3.852 барна. Поскольку оснований для предположения об изменении сечения упругого рассеяния на несвязанных покоящихся ядрах кислорода не имеется, в РОСФОНДе сечение упругого рассеяния при низких энергиях принято постоянным, а полное сечение получено суммированием сечений рассеяния и захвата.

³ S.F.Mughabghab, N.Divadeenam, N.E.Holden, Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. Vol.1 Part.A. Academic Press, 1981.

⁴ S.F.Mughabghab. Thermal Neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and G-factors. INDC(NDS)-440, Feb. 2003.

⁵ EXFOR Subent 21926, 1985.

3.2. Сечение захвата.

Как отмечалось, в ENDF/B-VII сечение захвата во всем энергетическом диапазоне подчиняется закону $1/v$. В JENDL-3.3 энергетический ход сечения захвата много сложнее (см. Рис. 2). Резонансный характер сечения радиационного захвата, разумеется, не является неожиданным, однако оснований для приписывания резонансам определенных радиационных ширин до недавнего времени не имелось. Такие основания появились благодаря эксперименту Игашира и др.⁶, в котором были измерены сечения радиационного захвата на широких спектрах со средними энергиями 20, 40, 60 и 280 кэВ. Из вида кривой, показанной на графике, ясно, что это результат качественной оценки, направленной на описание экспериментальных данных, а не результат модельного расчета.

Несмотря на это, учитывая огромное различие в принятых сечениях захвата быстрых нейтронов и выявление в оценке JENDL-3.3 определяющей роли поглощения нейтронов с орбитальным моментом $l=1$, целесообразно принять в РОСФОНД ход сечения захвата из этой оценки.

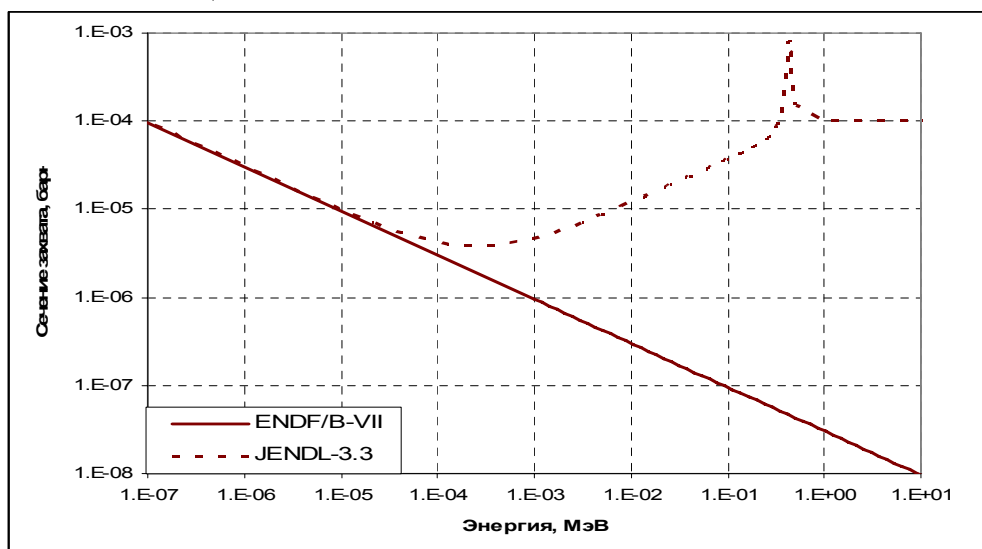


Рисунок 2. Сечение радиационного захвата ^{16}O

3.3. Полное сечение

На серии рисунков 3 значения полного сечения в области низколежащих резонансов (ниже 2.5 МэВ), принятые в рассматриваемых оценках, сравниваются с экспериментальными данными. В этом интервале структура сечений определяется s-резонансом при 2350 кэВ, который в результате интерференции с потенциальным рассеянием привел к глубокому и широкому минимуму в полном сечении, четырем р-резонансам при 434, 1310, 1830 и 1910 кэВ, двум d-резонансам при 1000 и 1830 кэВ и двум f-резонансам при 1650 и 1690 кэВ. Оцененные данные ENDF/B-VII JENDL-3.3 в этой области удовлетворительно согласуются между собой и с экспериментальными данными со следующими исключениями:

- слабый резонанс при 1690 кэВ в JENDL-3.3 отсутствует, а в ENDF/B-VII он выражен слабее, чем это следует из данных Foulер-73;

⁶ M.Igashira et al, J,AJ,441,(L),89,199510; EXFOR Subent 22356. 1995.

б) сечение в интерференционном минимуме в JENDL-3.3, равное 0.159 барна, существенно превышает значение, принятое в ENDF/B-VII (0.111 барна) и результаты специальных измерений сечений в минимуме (см. рис.3г):

Kalina-73 – 0.097 ± 0.009 барн;

Johnson-80- 0.111 ± 0.002 барн;

Larson-80 – 0.133 ± 0.017 барн.

Учитывая, что значение сечения в минимуме определяющим образом сказывается на проникающую способность водородсодержащих материалов, и, в частности, воды, завышение этого сечения в JENDL-3.3 представляется серьезным недостатком этой оценки.

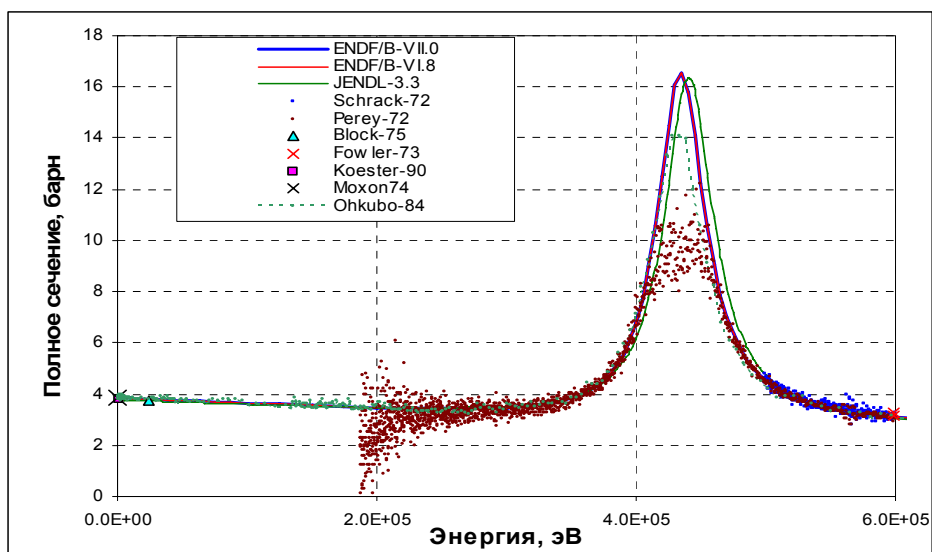


Рисунок 3а. Полное сечение O-16 до 600 кэВ.

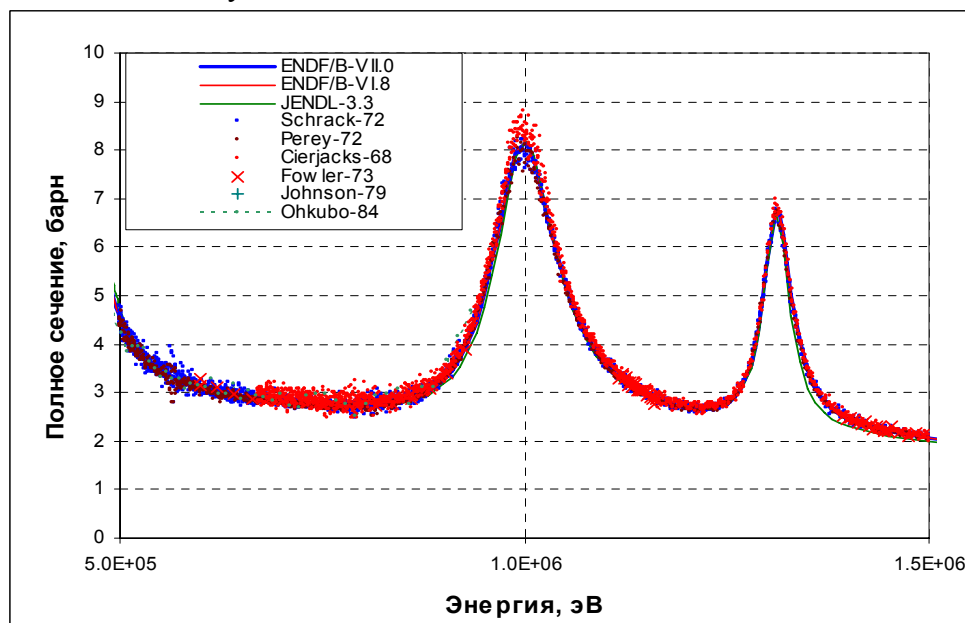


Рисунок 3б. Полное сечение O-16 от 0.5 до 1.5 МэВ.

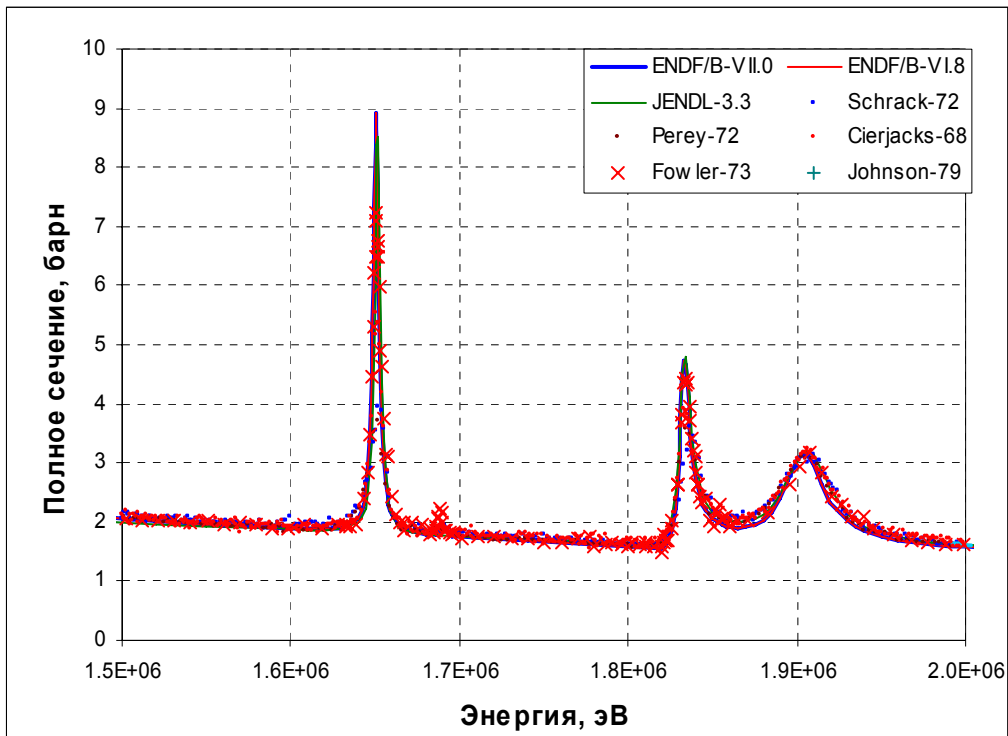


Рисунок 3в. Полное сечение O-16 от 1.5 до 2.0 МэВ.

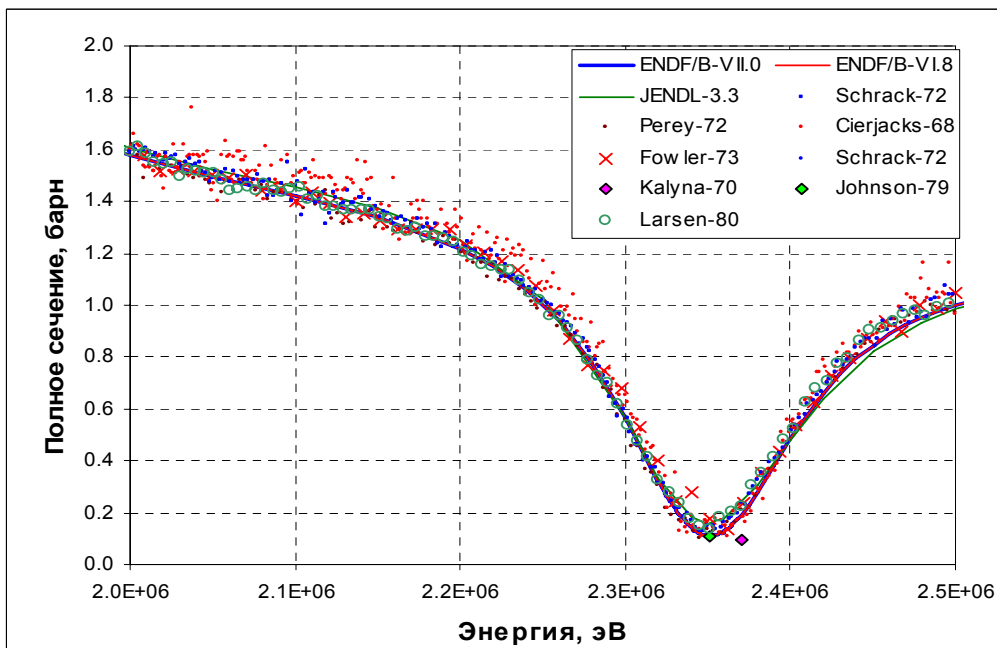


Рисунок 3г. Полное сечение O-16 от 2.0 до 2.5 МэВ.

На рис.4 оцененные данные сравниваются с результатами измерений в области 2.5 – 7.5 эВ, содержащей большое число резонансов, в том числе весьма узких. Для того, чтобы можно было видеть данные в окрестности этих узких резонансов на сериях рисунков 5 и 6 экспериментальные и оцененные данные представлены с высоким энергетическим разрешением. На последних рисунках результаты оценки, принятой в ENDF/B-VII.0, совпадающие с результатом предыдущей оценки, не приводятся.

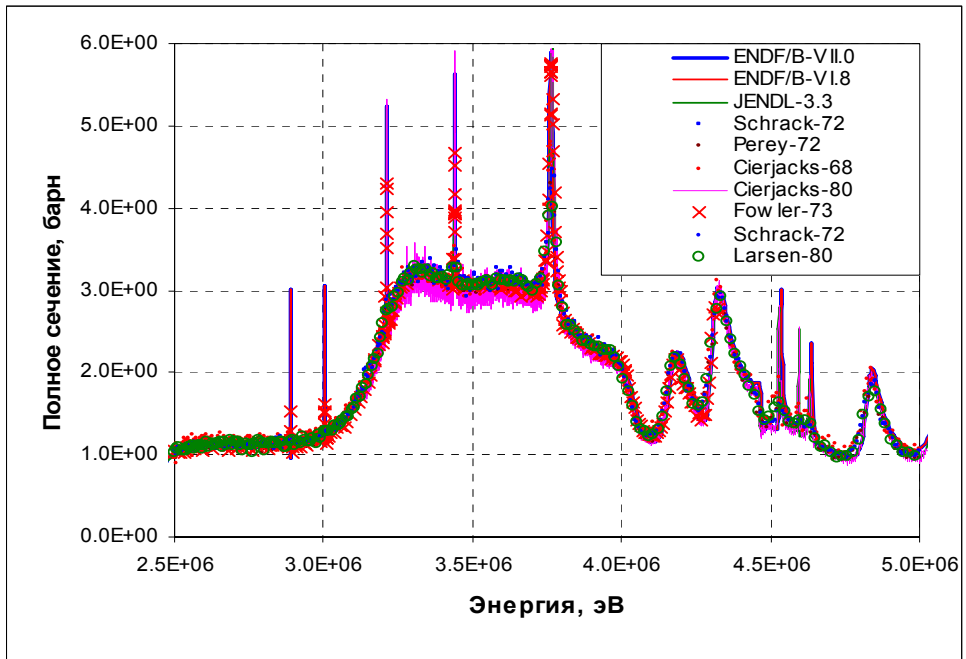


Рисунок 4а. Полное сечение O-16 от 2.5 до 5 МэВ.

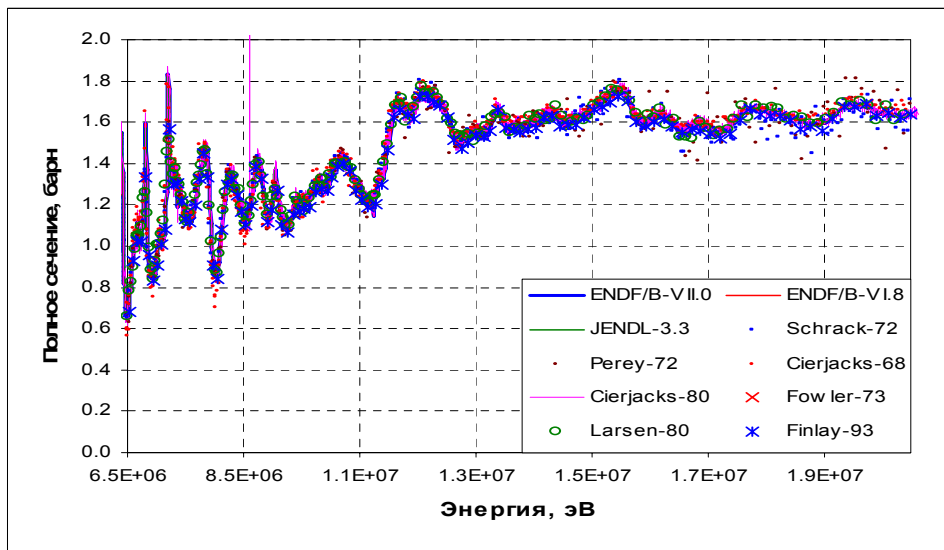


Рисунок 4б. Полное сечение O-16 от 6.5 до 20 МэВ.

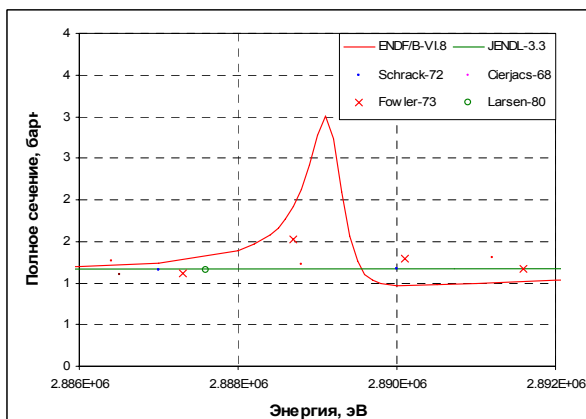


Рисунок 5а. Полное сечение O-16.

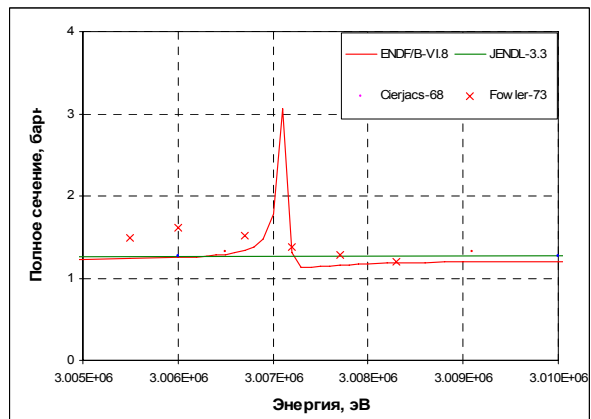


Рисунок 5б. Полное сечение O-16.

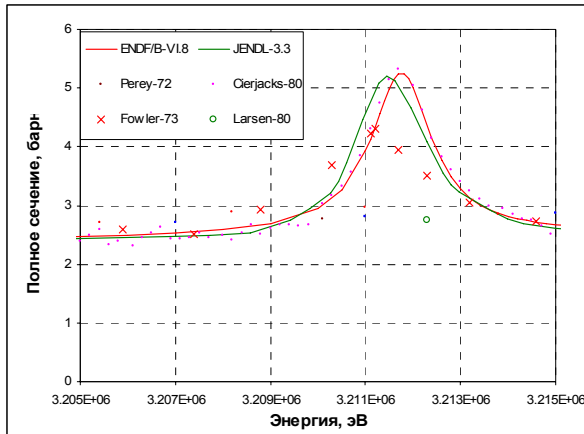


Рисунок 5в. Полное сечение O-16.

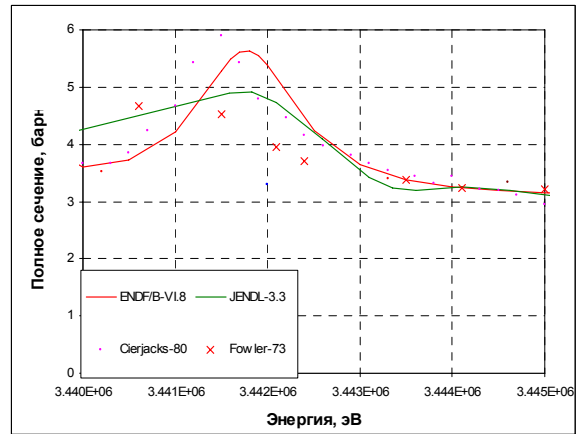


Рисунок 5г. Полное сечение O-16.

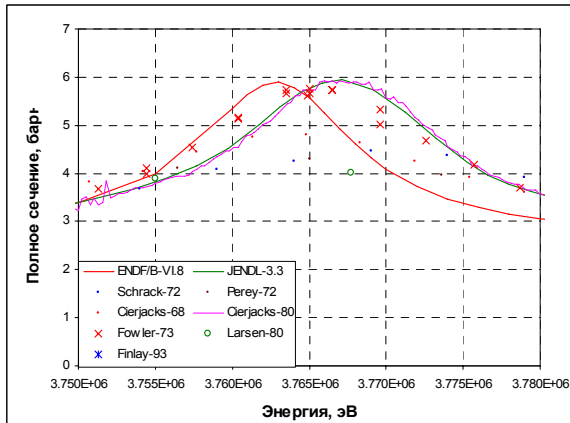


Рисунок 6а. Полное сечение O-16.

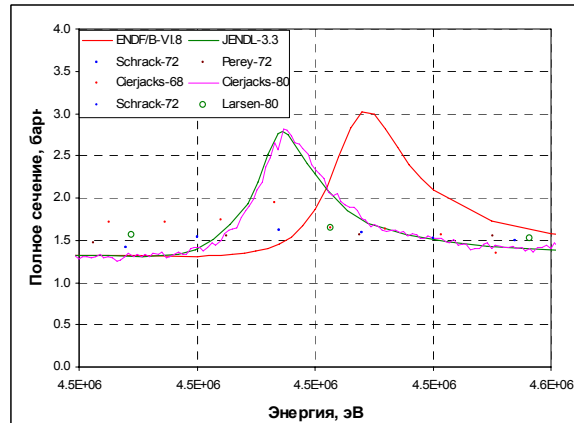


Рисунок 6б. Полное сечение O-16.

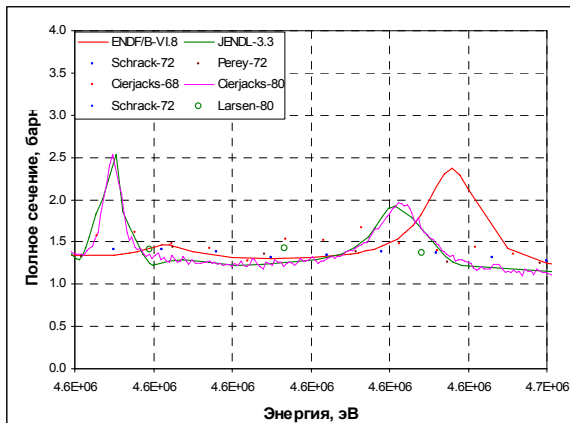


Рисунок 6в. Полное сечение O-16.

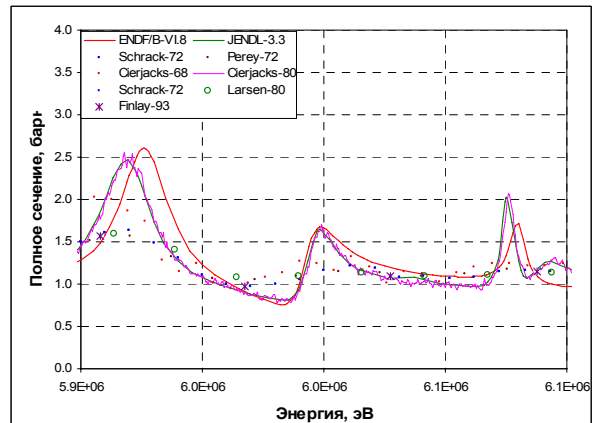


Рисунок 6г. Полное сечение O-16.

Отметим, что в заголовочной секции оценки, принятой в ENDF/B-VII, утверждается, что полное сечение ниже 3.4 МэВ оценивалось путем подбора параметров R-функции по совокупность данных, перечисленных в работе Каро⁷, тогда как в интервале от 3.4 до 6.25 МэВ использовалась R-матричная параметризация экспериментальных данных, выполненная в Лос-Аламосе (в интервале шириной 60 кэВ около 3.4 МэВ эти оценки были сшиты). При более высоких энергиях все сечения оценивались на основе комбинации анализа совокупности экспериментальных и расчетных данных. Сравнение данных, однако, показывает, что оцененные данные по

⁷ E. Caro, "O16 Neutron Cross Section Evaluation", Proceedings of the International Conference on the Physics of Nuclear Science and Technology, Long Island, N.Y., Oct.5-8, 1998

полному сечению в файлах, включенных в ENDF/B-VI.0 и в ENDF/B-VII ниже 7.6 МэВ совершенно идентичны.

В JENDL-3.3 использованы результаты R-матричного анализа, выполненного в 2001 г. Шибата специально для этой библиотеки.

Серия рисунков 5 показывает, что ниже 3.4 МэВ в оценке, принятой в ENDF/B-VII, проявляется несколько узких резонансов, отсутствующих в оценке Шибата. Это свидетельствует об использовании дополнительного экспериментального материала, не включенного в базу данных EXFOR и не учитывающегося Шибата. Таким образом при энергиях ниже 3.4 МэВ оценка, принятая в ENDF/B-VII, имеет очевидные преимущества перед оценкой Шибата. Однако в интервале от 3.4 до 6.5 МэВ, где принята параметризация сечений, выполненная в Лос-Аламосе, полное сечение, полученное Шибата значительно лучше соответствует детальным экспериментальным данным Сериякса, полученным в 1980 г., т.е. после выполнения оценки Хейлом, Ченом и Янгом. Серия рисунков 6 показывает, что в области от 3.4 до 6.5 МэВ узкие резонансы в оценке Шибата много лучше соответствуют эксперименту Сериякса, чем более ранняя оценка, выполненная в Лос-Аламосе. В этой области принять оценку Шибата было бы целесообразно. Однако, следует иметь в виду, что в рассматриваемом энергетическом интервале заметный вклад в полное сечение обусловлен реакцией (n,α) , резонансная структура которой должна соответствовать структуре полного сечения. Вопрос об этом соответствии будет обсужден ниже в разделе 3.4.

На Рис.7 обсуждаемые оцененные данные сравниваются с экспериментальными результатами в области энергий выше 6.5 МэВ. Обе оценки прекрасно согласуются с экспериментами последних лет⁸, и практически совпадают друг с другом (см. рис. 8). В этой области может быть принята любая из оценок.

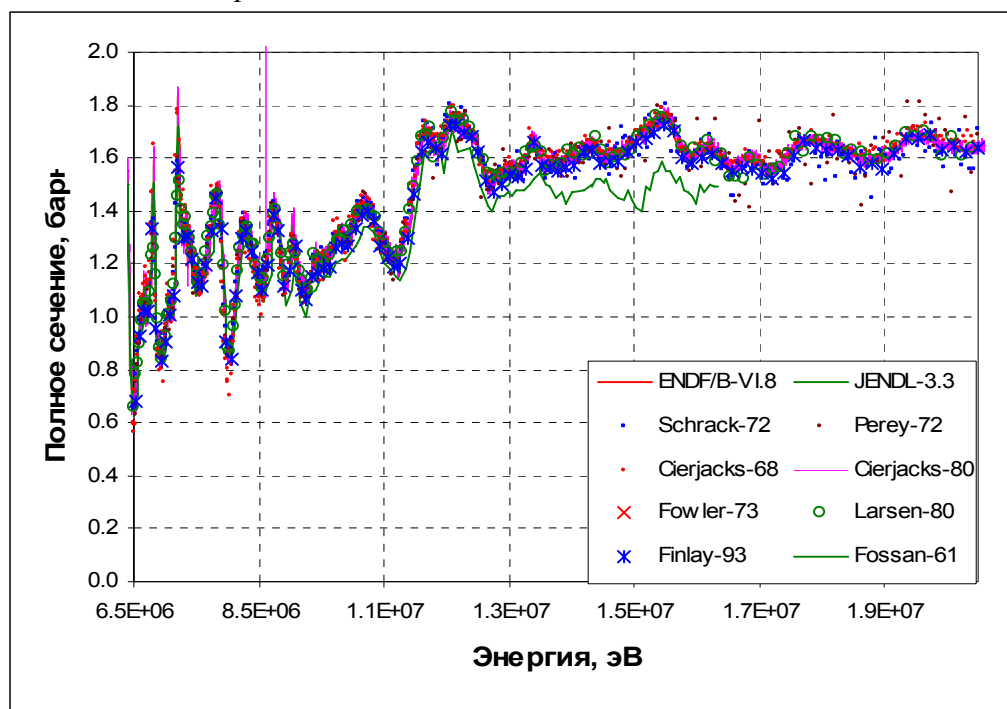


Рисунок 7. Сравнение оцененных полных сечений O-16 с экспериментальными данными выше 6.5 МэВ.

⁸ Пик при 8.61 МэВ, видимый в данных Cierjacks-80, является следствием ошибки в значении сечения, занесенном в EXFOR при этой энергии.

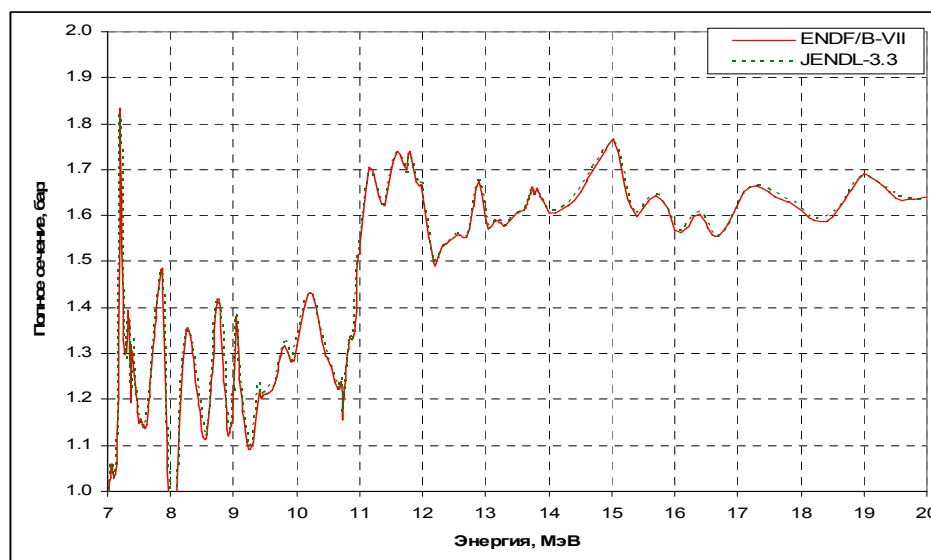


Рисунок 8. Сравнение оцененных полных сечений O-16.

3.4. Сечение реакций (n, α) и (n,n' α)

Реакция (n, α) обладает самым низким порогом среди всех реакций неупругих процессов (не считая радиационного захвата) и именно поэтому она рассматривается раньше других. На рис.9 полные сечения принятые в оценках ENDF/B-VII и JENDL-3.3, сравниваются с сечениями реакции (n, α). Как видно, структура сечения реакции (n, α) в оценке ENDF/B-VII коррелирует со структурой полного сечения, что и должно быть.

Заметим, что сечение реакции (n, α) в предварительно принятой версии ENDF/B-VII.b2 рассматривалось как сумма реакций, в результате которых ядро-продукт ^{13}C остается в основном состоянии, в первом ($E^*=3.0894$ МэВ), во втором ($E^*=3.684$ МэВ) или в третьем возбужденном состоянии ($E^*=3.8538$ МэВ). Сечение реакции $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}^0$ от порога до 6.2 МэВ оценивалось на основе R-матричного анализа, опирающемся на данные по полному сечению и по сечению обратной реакции $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}^0$. Выше 6.2 МэВ оценка также выполнялась на основе R-матричного, однако, выполненного независимо и опирающегося на данные Dundy-68 (см. рис.9), умноженные на коэффициент 1.5 для согласования с результатами анализа, выполненного при более низких энергиях. Сечения реакций $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}^1$, $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}^2$ и $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}^3$ были получены на основе результатов измерений Нельсона и Мишадона⁹, изучавших реакцию $^{16}\text{O}(n,\alpha\gamma)$, и данных¹⁰ о структуре уровней ^{13}C .

В окончательной редакции первой версии – ENDF/B-VII.0 – сечение реакции (n, α_0) пересмотрено: ниже 8.9 МэВ прежняя оценка понижена на 32%. Соответственно понижено и полное сечение реакции (n, α), а сечение упругого рассеяния – соответственно увеличено.

Структура сечения реакции (n, α), принятого в JENDL-3.3, выражена менее четко. Важно отметить, что если принять полное сечение в соответствии с оценкой JENDL-3.3, то корреляция резонансных структур полного сечения и сечения реакции (n, α) окажется нарушенной, причем если для этой реакции принять также оценку JENDL-3.3, то смещения резонансных пиков окажется еще большим. Так при переходе от ENDF/B-VII к JENDL-3.3 резонанс в полном сечении при 4.533 МэВ перемещается

⁹ R.O. Nelson and A. Michaudon, Los Alamos report LA-UR-99- 4170 (1999).

¹⁰ F. Ajzenberg-Selove, Nucl.Phys. A523, 1 (1991)

на 4.528 МэВ (см. рис.6б), а резонанс в сечении реакции (n, α) перемещается в противоположном направлении – от 4.533 МэВ на 4.550 МэВ; резонанс в полном сечении при 4.638 МэВ перемещается на 4.630 МэВ (см. рис. 6в), а резонанс в сечении реакции (n, α) перемещается 4.650 МэВ.

В этих условиях выбор оценки Шибата для библиотеки РОСФОНД представляется нецелесообразным ни для полного сечения, ни, тем более, для сечения реакции (n, α).

На рис. 10 оцененные данные по сечению реакции (n, α) сравниваются с экспериментальными в области энергий ниже 6 МэВ, а на рис. 11 – выше этой энергии. На последнем рисунке приведены также оцененные данные по реакции (n, n α).

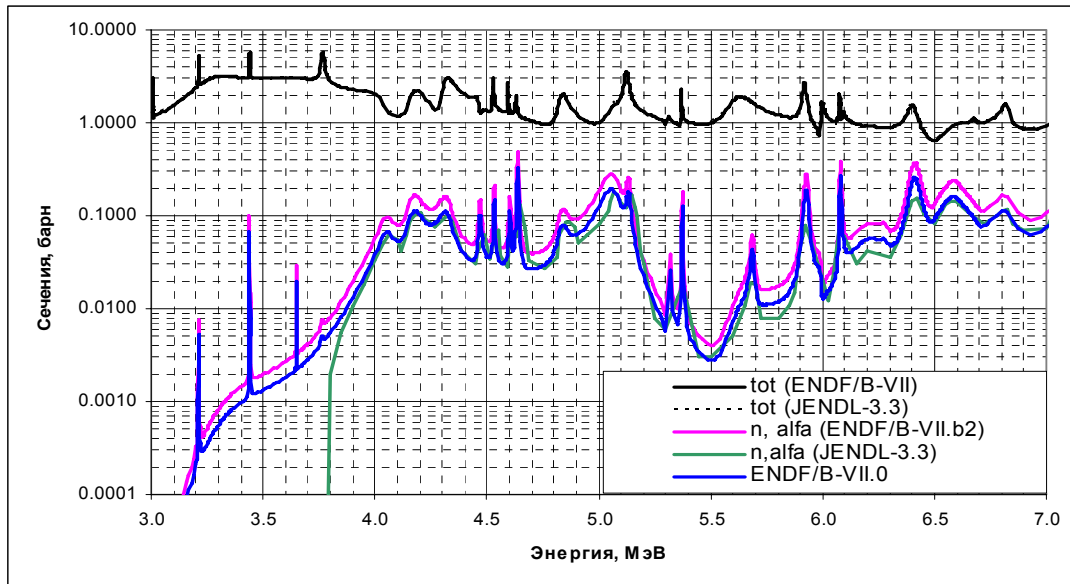


Рисунок 9. Сравнение оцененных данных по полному сечению и сечению реакции (n, α).

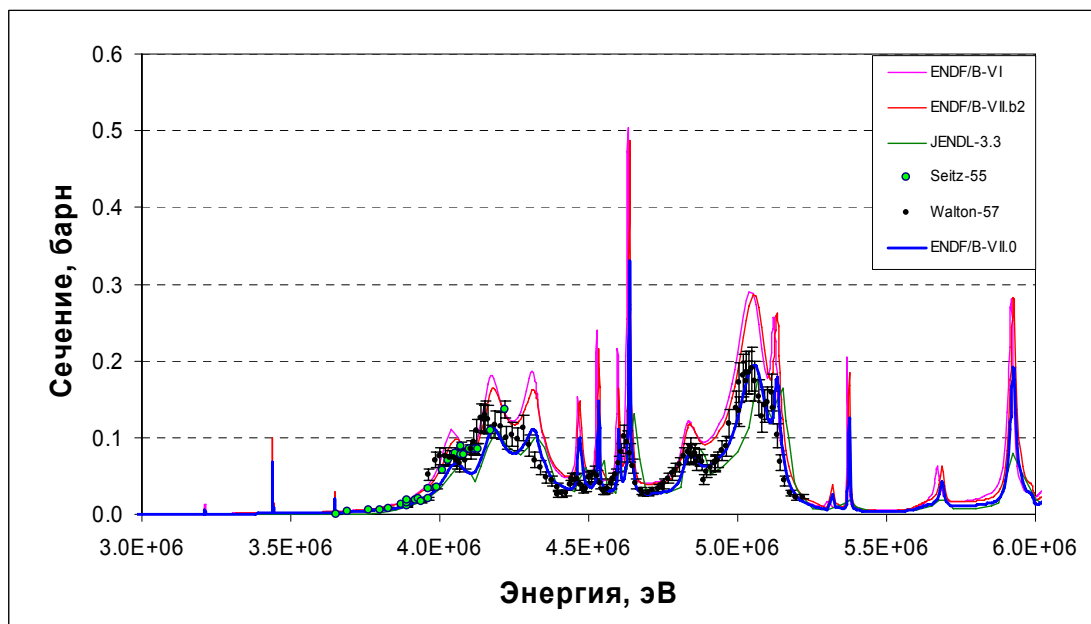


Рисунок 10. Сечение реакции (n, α)

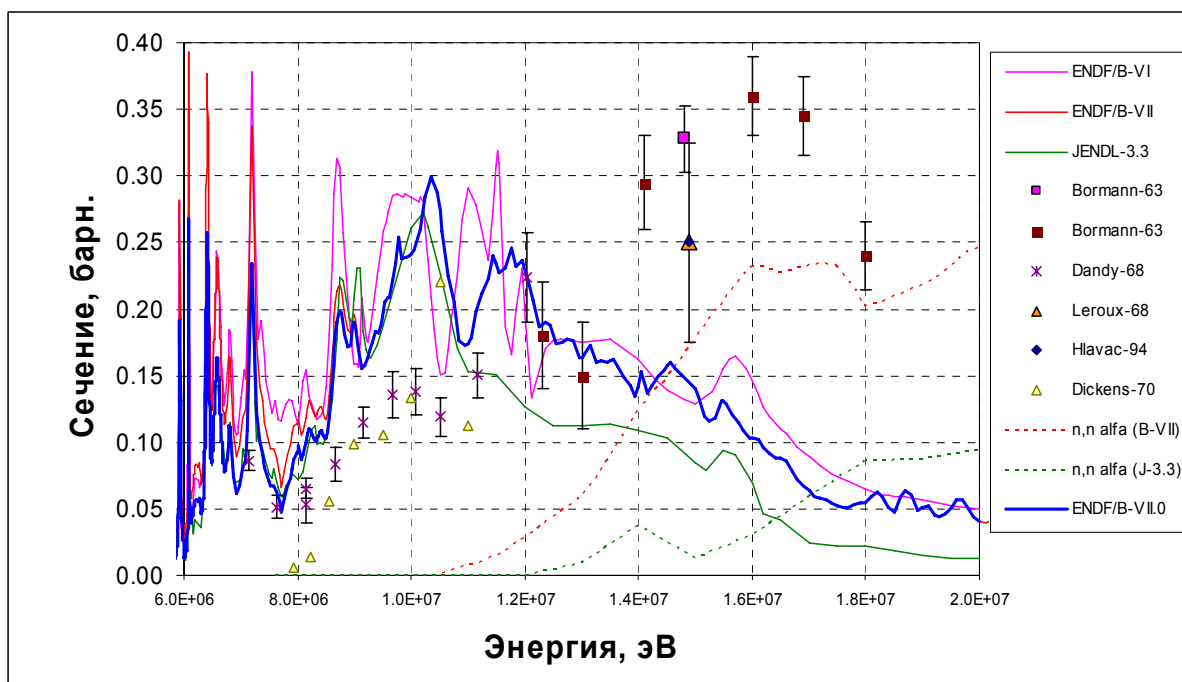


Рисунок 11. Сечения реакций (n,α) и $(n,n'\alpha)$.

Как видно из рис. 10, между экспериментальными данными и результатами последней оценки при энергиях ниже 5.5 МэВ имеется приемлемое согласие. При энергиях выше 14 МэВ расхождения между оцененными и экспериментальными данными меняют знак и прогрессивно увеличиваются. Причина этого достаточно ясна: в экспериментах регистрировались альфа-частицы, испускаемые при взаимодействии нейтронов с кислородом, и реакции (n,α) и $(n,n'\alpha)$ не различались. Сечение реакции $(n,n'\alpha)$ в ENDF/B-VII оценивалось по программе GNASH¹¹ с подгонкой суммарного сечения под данные Bormann-63. Из рис. 11 видно, что сумма оцененных сечений реакций (n,α) и $(n,n'\alpha)$ при использовании данных ENDF/B-VII удовлетворительно согласуется с этим экспериментом, не противоречащим и данным Leroux-68. Этого нельзя сказать о данных, принятых в JENDL-3.3, что служит дополнительным аргументом в пользу выбора для библиотеки РОСФОНД оцененных данных их ENDF/B-VII.

Выше отмечалось, что полное сечение в оценках ENDF/B-VII и ENDF/B-VI ниже 7.6 МэВ совпадают. На рис. 10 и 11 приведены оцененные сечения реакции (n,α) из этих библиотек. Видно, что хотя эти сечения и близки они отнюдь не идентичны и при энергиях ниже 7.6 МэВ, что свидетельствует об определенной независимости рассматриваемых оценок.

3.5 Сечения реакций (n,p) и (n,np)

Оцененные сечения реакции (n,p) на рис. 12 сравниваются с экспериментальными данными. Там же приведены оцененные сечения реакции $(n,n'p)$.

¹¹ Программа GNASH рассчитывает характеристики нейтронных взаимодействий по модели Хаузера-Фешбаха с учетом предравновесных процессов.

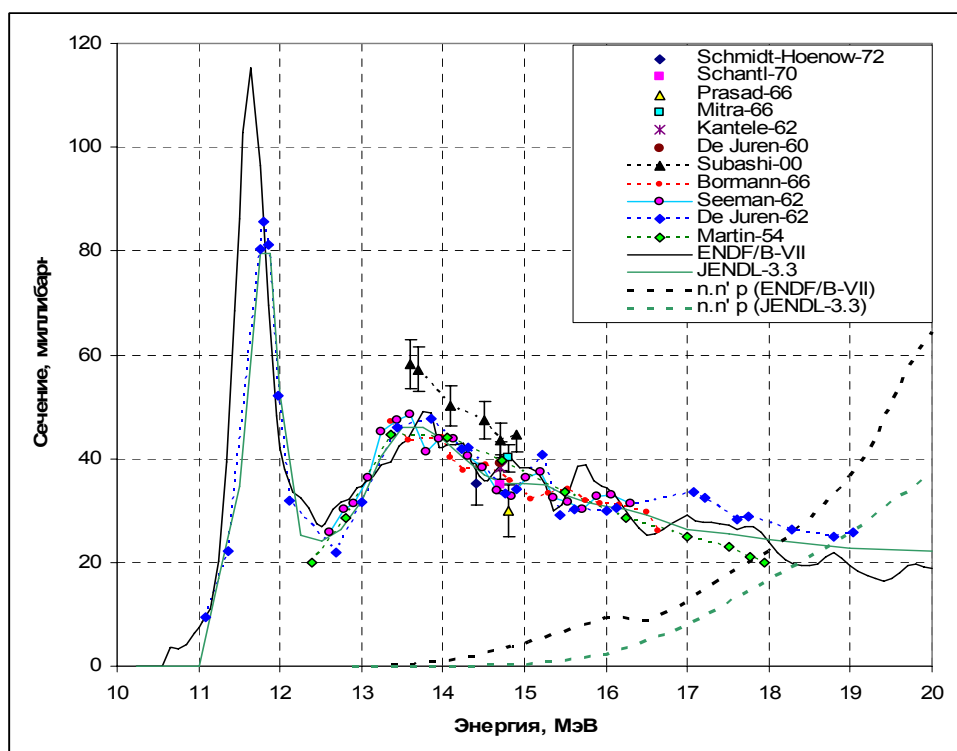


Рисунок 12. Сечение реакции (n,p).

Для первой из этих реакций оценка ENDF/B-VII выполнена на основе расчетов по программе GNASH, опирающихся на экспериментальные данные⁸ по сечению реакции (n,p). На основе схемы уровней ^{16}N , рекомендованной в работе 9, учитывались каналы образования ядра-продукта в основном и трех возбужденных состояниях (с энергиями 0.1201 МэВ, 0.2970 МэВ и 0.3975 МэВ). При этом рассчитанные сечения реакций $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}^0$ и $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}^1$ были понижены примерно на 30% для согласования с экспериментальными результатами. Естественно, учитывались и экспериментальные на рис.12. Японская оценка, очевидно, основана только на последних экспериментальных данных.

В РОСФОНД решено принять оценку ENDF/B-VII.

3.6. Сечение неупругого рассеяния.

На рис. 13 суммарное сечение неупругого рассеяния сравнивается с имеющимися немногими экспериментальными данными. Почти все эти данные лежат существенно ниже результатов современных оценок. Исключение составляет результат Коннера, полученный еще в 1953 г. с использованием камеры Вильсона. В этом эксперименте акты упругого рассеяния отличались от неупругого по большей длине треков ядер отдачи, а реакции с вылетом заряженных частиц отличались по образуемым ими вилками из двух треков. Погрешность этого интересного эксперимента, к сожалению, не указывается.

В практически наиболее значимой области энергий ниже 8 МэВ, все оцененные данные близки друг к другу; далее расхождения возрастают, а выше 12 МэВ оценка, принятая в JENDL-3.3, идет существенно ниже того, что принималось и принимается в файлах оцененных данных ENDF/B. Поскольку выбор оценки полного сечения и сечения реакции (n, α) уже сделан в пользу ENDF/B-VII, мы, отмечая имеющиеся расхождения в оценках и противоречия между ними и экспериментальными данными, не считаем, что эти несоответствия могут повлиять на сделанный выбор.

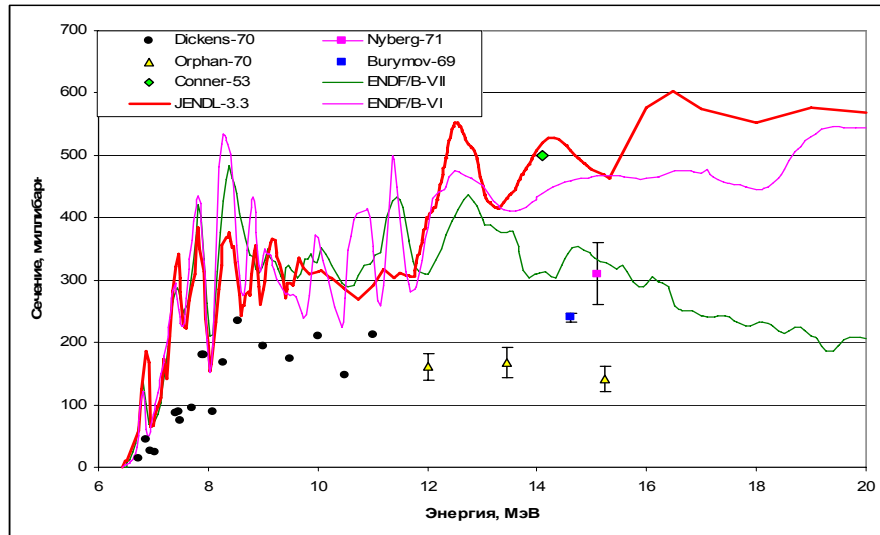


Рисунок 13. Сечение неупругого рассеяния.

Суммарное сечение неупругого рассеяния в оценке ENDF/B-VII представлено как сумма сечений возбуждения семи дискретных уровней ^{16}O и возбуждения континуума уровней, которое начинается с 9.585 МэВ. Ниже этой энергии лежит 5 уровней возбуждения кислорода с энергиями 6.0494 МэВ, 6.1299 МэВ, 6.9171 МэВ, 7.1169 МэВ и 8.8719 МэВ; выше, т.е. в области континуума, выделено еще два уровня с энергиями 10.957 МэВ и 11.08 МэВ. Возбуждение уровней с энергиями 9.585 МэВ, 9.6444 МэВ и 10.356 МэВ при неупругом рассеянии не учитывается, т.к. возбуждение с этих уровней снимается преимущественно путем испускания альфа-частиц. Эти уровни учтены в сечении реакции $(n, n'\alpha)$. Сечения возбуждения уровней с энергиями 6.1299 МэВ, 6.9171 МэВ и 7.1169 МэВ оценивалось по данным о гамма-лучах, испускаемых при переходах в основное состояние на основе результатов Нельсона и Мишадона⁸, измеривших спектры гамма-квантов под 22-мя углами в широком диапазоне энергий нейтронов. Сечения возбуждения более высоколежащих уровней оценивалось по данным той же работы об испускании квантов с энергией 2.742 МэВ (уровень 8.8719 МэВ), 3.839 мэВ (уровень 10.957 МэВ) и 4.950 МэВ (уровень 11.080 МэВ). Вероятности испускания названных гамма-квантов при снятии возбуждения с указанных уровней определялись по схеме уровней из работы⁹.

Сечение с возбуждением континуума уровней, рассчитанное по программе GNASH, корректировалось согласованно с корректировкой сечения упругого рассеяния.

Заметим, что в файле оцененных данных, принятом в JENDL-3.3, неупругое рассеяние представлено сечениями возбуждения 27 уровней с энергиями до 14.4 МэВ, начиная с которой возбуждается континуум уровней. В файле данных ENDF/B-VI, используемом и в библиотеке ФОНД-2.2, неупругое рассеяние представлено сечениями возбуждения 38 уровней с энергиями возбуждения до 18.55 МэВ. В обоих случаях при неупругом рассеянии учитывается возбуждение названных выше уровней, распадающихся на самом деле путем испускания альфа частиц. Различное представление неупругого рассеяния при энергиях выше 10 МэВ приводит к некоторому различию в спектрах неупругого рассеянных нейтронов. Ясно, что влияние этого различия несравненно меньше, чем влияние различия в суммарном сечении неупругого рассеяния. Менее подробное описание неупругого рассеяния возбуждением дискретных уровней, на наш взгляд, не может служить основанием для отказа от выбора оценки ENDF/B-VII в пользу других оценок.

3.7. Реакции $(n,2n)$, $(n,n'\alpha)$, (n,t) и $(n,2\alpha)$

Все эти реакции имеют высокие пороги и низкие сечения даже при 20 МэВ. В практических приложениях они не играют сколько-нибудь заметной роли. Лишь реакция (n,t) рассматривается порой с экологической точки зрения как источник трития. Сечения всех этих реакций в РОСФОНД, естественно, принимаются в соответствии с оценкой, принятой в ENDF/B-VII. Заметим, что в файле оцененных данных из JENDL-3.3 данных о сечениях трех последних реакций вообще не содержится.

На рис. 14 принимаемые сечения рассматриваемых реакций сравниваются с имеющимися скудными экспериментальными данными.

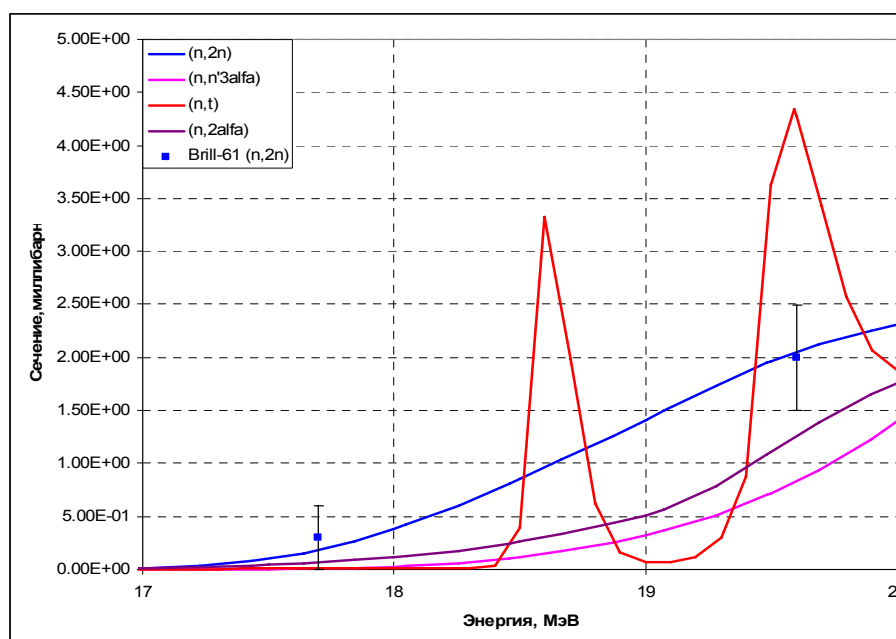


Рисунок 14. Оцененные сечения реакций $(n,2n)$, $(n,n'\alpha)$, (n,t) и $(n,2\alpha)$ и экспериментальные данные для первой из них

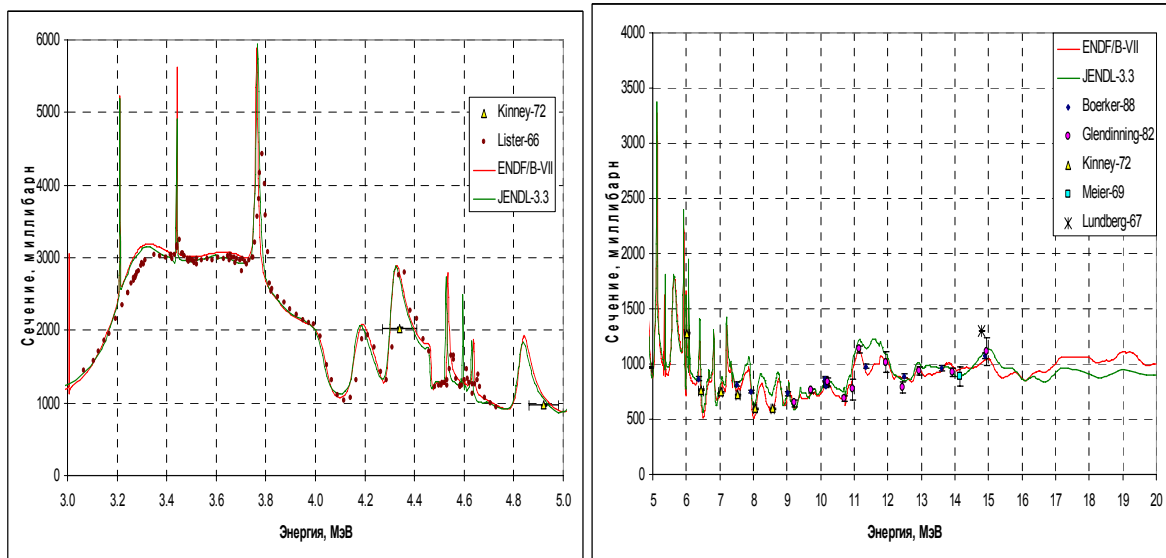
Сечение реакции $(n,2n)$, рассчитанное по программе GNASH, было понижено примерно на 30% для согласования с данными Брилла. По программе GNASH рассчитывался и ход сечений $(n,n'\alpha)$ и $(n,2\alpha)$. Сечение первой из них затем корректировалось для согласования с экспериментальными данными, имеющимися при энергиях 28 – 30 МэВ.

Что касается реакции (n,t) , то ее неожиданное энергетическое поведение обусловлено тем, что оценка этого сечения опиралась на не опубликованный пока эксперимент Нельсона и Мишадона⁸, измерявшими сечение реакции $(n,t \gamma)$. Сечение этой реакции является суммой сечений каналов, ведущих к образованию ядра-продукта в основном состоянии, $^{16}\text{O}(n,t)^{14}\text{C}^0$, в 8 возбужденных состояниях с энергиями возбуждения $E^*=2.3128$ МэВ, 3.9481 МэВ, 4.9151 МэВ, 5.1059 МэВ, 5.6914 МэВ, 6.2035 МэВ, 6.4735 МэВ и 7.0291 МэВ и в континууме более высоколежащих состояний. Энергии уровней ^{14}C приняты в соответствии с оценкой работы⁹. Именно на основе этой схемы уровней и производился анализ данных Нельсона и Мишадона⁸. Ниже порога реакции $^{16}\text{O}(n,t\gamma)$ сечение $^{16}\text{O}(n,t)^{14}\text{C}^0$ оценивалось на основе расчетов по программе GNASH, с перенормировкой для шивки с результатами Нельсона и Мишадона⁸ при более высоких энергиях.

Заметим, что из других доступных библиотек данные о сечении реакции $16O(n,t)14C$ содержатся только в CENDL и ADL-3. В первой из них в интервале от порога до 20 МэВ сечение нарастает плавно, но при 20 МэВ достигает 14 миллибарн, что на порядок превышает значение, оцененное в ENDF/B-VII. В ADL-3 сечение также нарастает плавно, но при 20 МэВ достигает 158 миллибарн, т.е. превышает оценку ENDF/B-VII на два порядка. Понятно, что для библиотеки РОСФОНД для всех рассматриваемых реакций выбрана оценка ENDF/B-VI.

3.8. Сечение упругого рассеяния.

Поскольку сечение радиационного захвата чрезвычайно мало, сечение упругого рассеяния ниже порога реакции (n,α) практически точно совпадает с полным сечением. При более высоких энергиях сечение упругого рассеяния оценивалось по разности между полным сечением и суммарным сечением неупругих взаимодействий. При этом, однако, следует помнить, что сечения неупругого рассеяния и реакции $(n,2n)$ оценивались с оглядкой на сечение упругого рассеяния, которое будет получаться при вычитании: требовалось, чтобы оно не противоречило результатам экспериментального определения этого сечения. На рис. 15, где оцененные сечения упругого рассеяния сравниваются с экспериментальными данными, видно, что эта цель была достигнута и в ENDF/B-VII и JENDL-3.



а б
Рисунок 15. Сечение упругого рассеяния ниже 5 МэВ.

4. Энерго-угловые распределения

4.1. Упругое рассеяние

Анизотропия упругого рассеяния в области энергий ниже 6.2 МэВ в оценке, принятой в ENDF/B-VII, рассчитывалась на основе параметрического описания данных по полному сечению и по анизотропии рассеяния, полученных до 1980 г. (см. раздел 3.3). Выше этой энергии, как сказано в заголовочной секции файла, энергетические зависимости коэффициентов разложения угловых распределений по полиномам Лежандра проводились от руки через экспериментальные данные, полученные до 1989 г. С тех пор новых экспериментальных данных не публиковалось.

Детали оценки угловых распределений для файла, принятого в JENDL-3.3, не сообщались. Известно лишь, что оценка выполнена в 1983 г.

Сравнение оцененных данных с экспериментальными в случае угловых распределений представляет не простую задачу. На рис. 16 сравниваются энергетические поведения важнейшей характеристики анизотропии рассеяния – среднего косинуса угла рассеяния (в системе координат центра инерции).

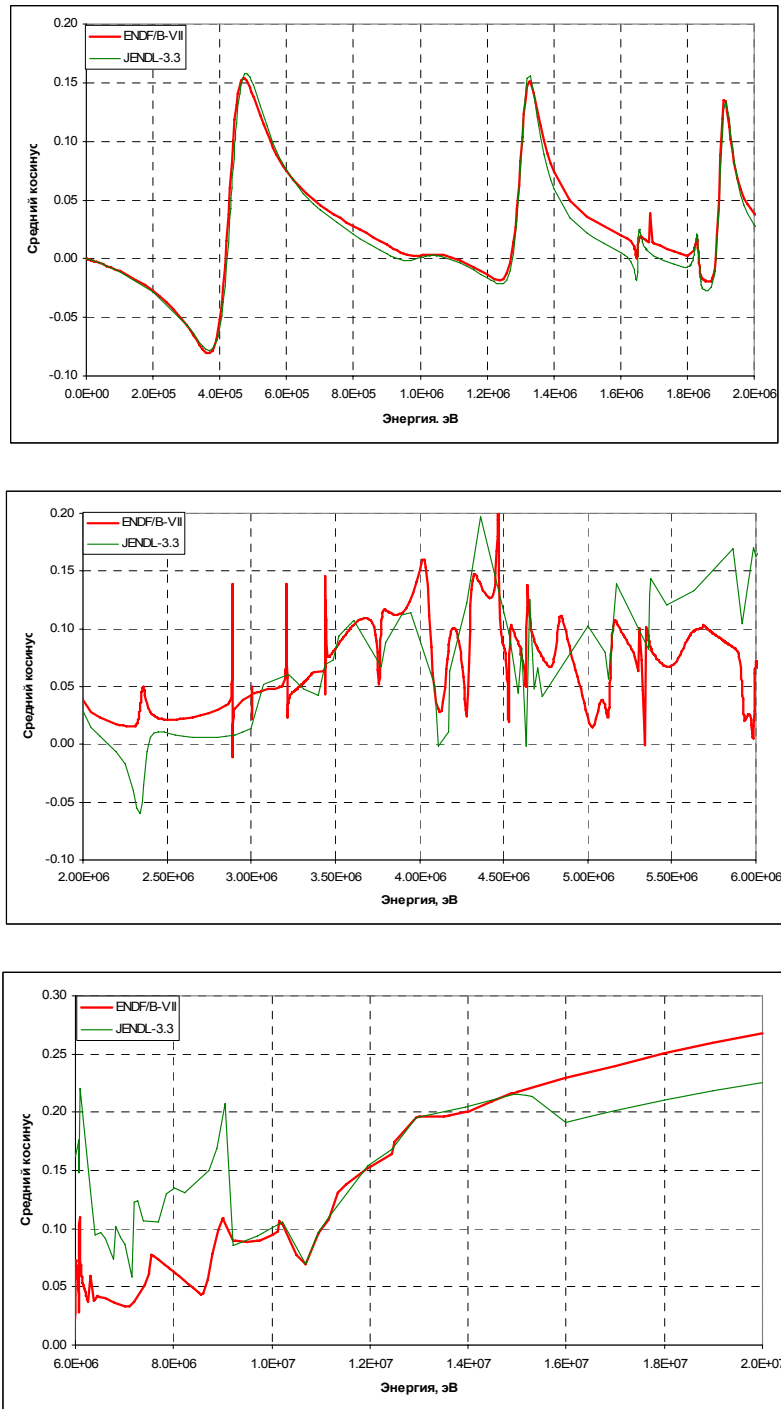


Рисунок 16. Энергетическое поведение среднего косинуса угла рассеяния.

Как видно, в JENDL-3.3 энергетическое поведение среднего косинуса до 2 МэВ весьма близко к принятому в ENDF/B-VII, но при более высоких энергиях оно задано гораздо менее подробно. Из сравнения, данных, представленных на рис. 16 с полным

сечением, представленным в разделе 3.3, видно, что до 6 МэВ структура среднего косинуса полностью соответствует структуре полного сечения, что подтверждает утверждение об одновременной оценке этих величин.

Что касается высокоэнергетической области, то здесь представляется целесообразным рассмотреть соответствие оцененных данных экспериментам, выполненным в последние годы. На рис. 17 проводится такое сравнение для интервала 6 – 8 МэВ.

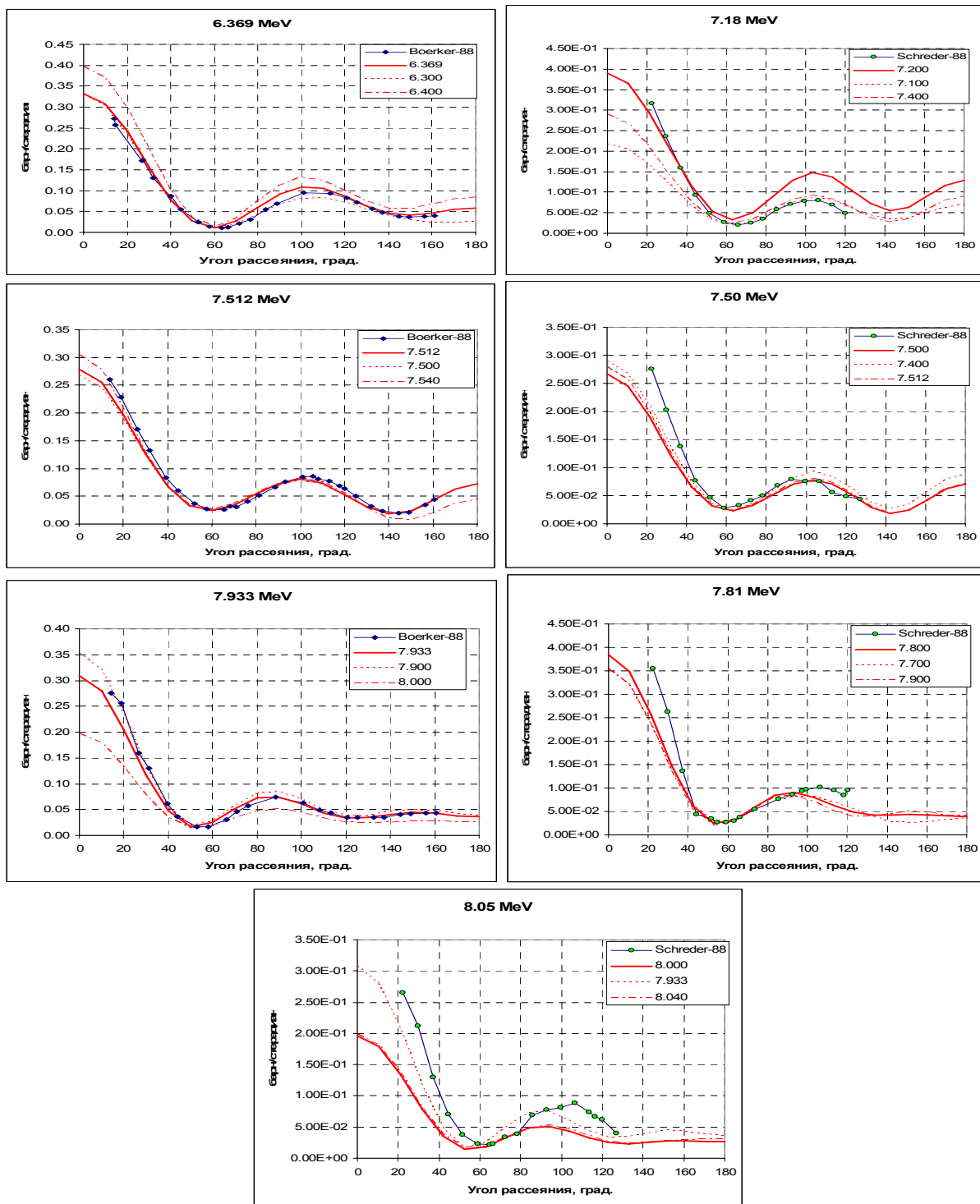


Рисунок 17. Сравнение дифференциальных сечений упругого рассеяния в интервале 6 – 8 МэВ

Как видно, в интервале 6 – 8 МэВ оцененные данные¹², хорошо соответствуя результатам Брокера, систематически занижают рассеяние вперед, измеренное Шредером.

На рис. 18а, б аналогичное сравнение проводится в интервале 9 – 12 МэВ.

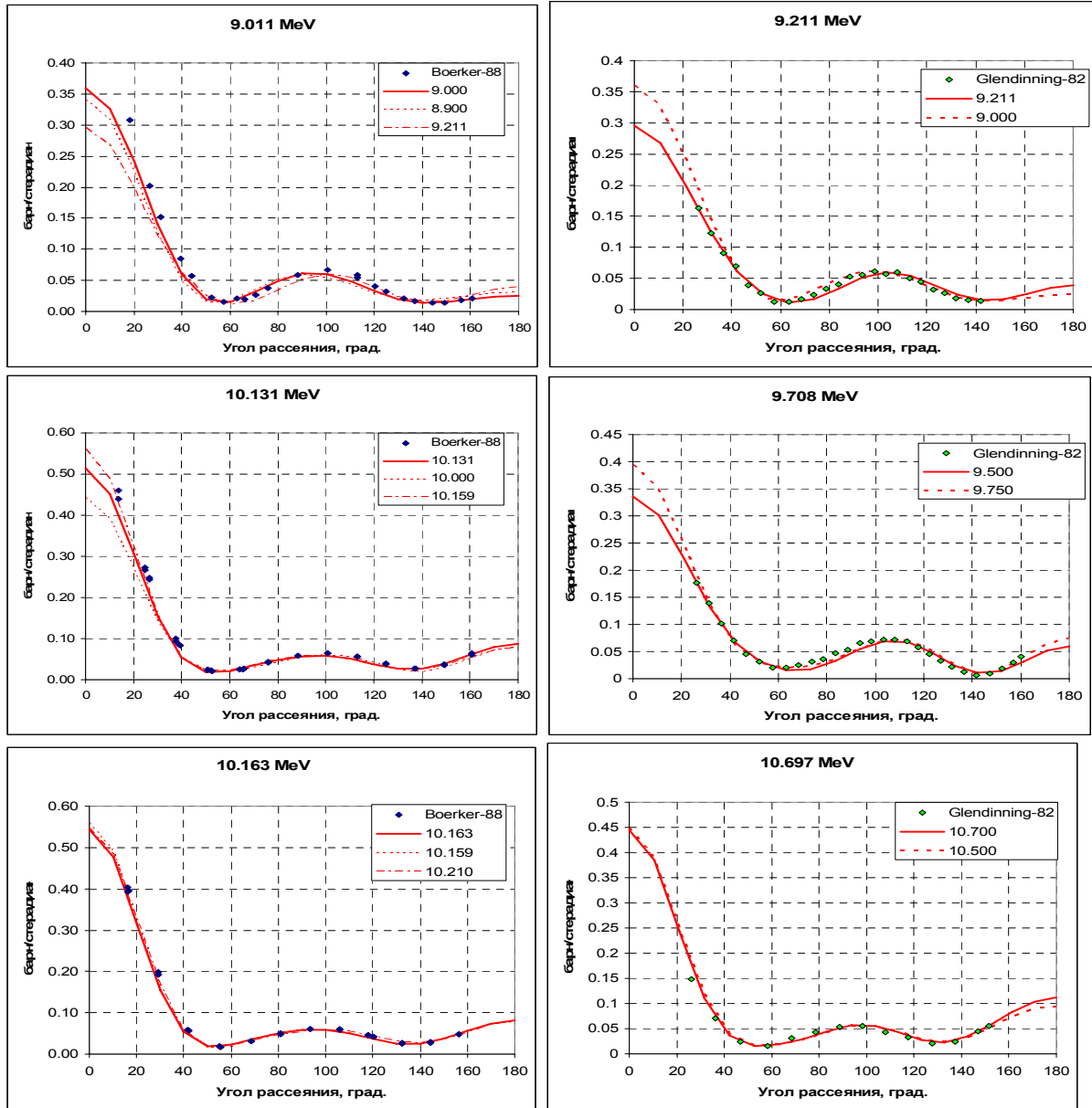


Рисунок 18а. Сравнение дифференциальных сечений упругого рассеяния в интервале 9 – 12 МэВ

¹² Оцененные данные приводятся не только для энергии, ближайшей к той, при которой проводились измерения, но и для соседних энергетических точек

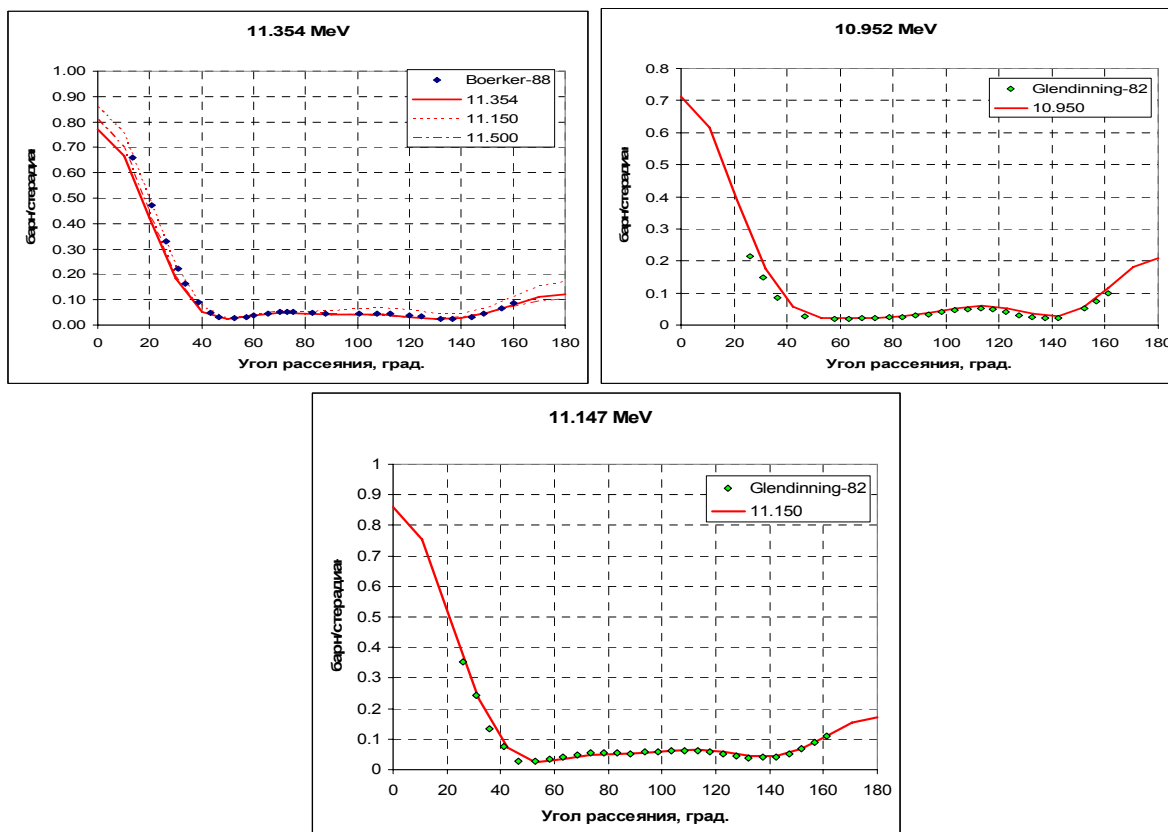


Рисунок 18б. Сравнение дифференциальных сечений упругого рассеяния в интервале 9 – 12 МэВ

Как видно, в рассматриваемом интервале результаты Брокера прекрасно согласуются с более ранними данными Глендиннера. Оцененные данные проходят посередине между этими весьма близкими наборами угловых распределений. Это вполне оправдывает недоучет данных Шредера в интервале 6 – 8 МэВ.

На рис. 19а,б оцененные данные сравниваются с экспериментальными при еще более высоких энергиях.

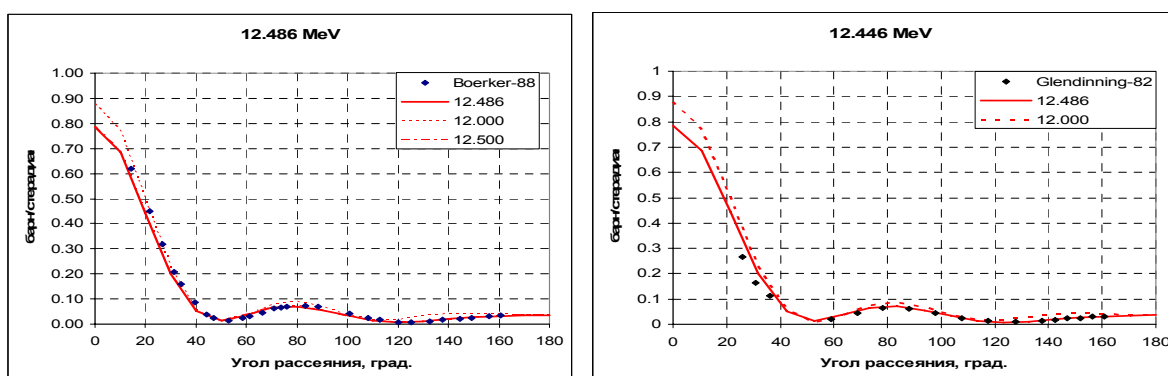


Рисунок 19а. Сравнение дифференциальных сечений упругого рассеяния при энергиях выше 12 МэВ.

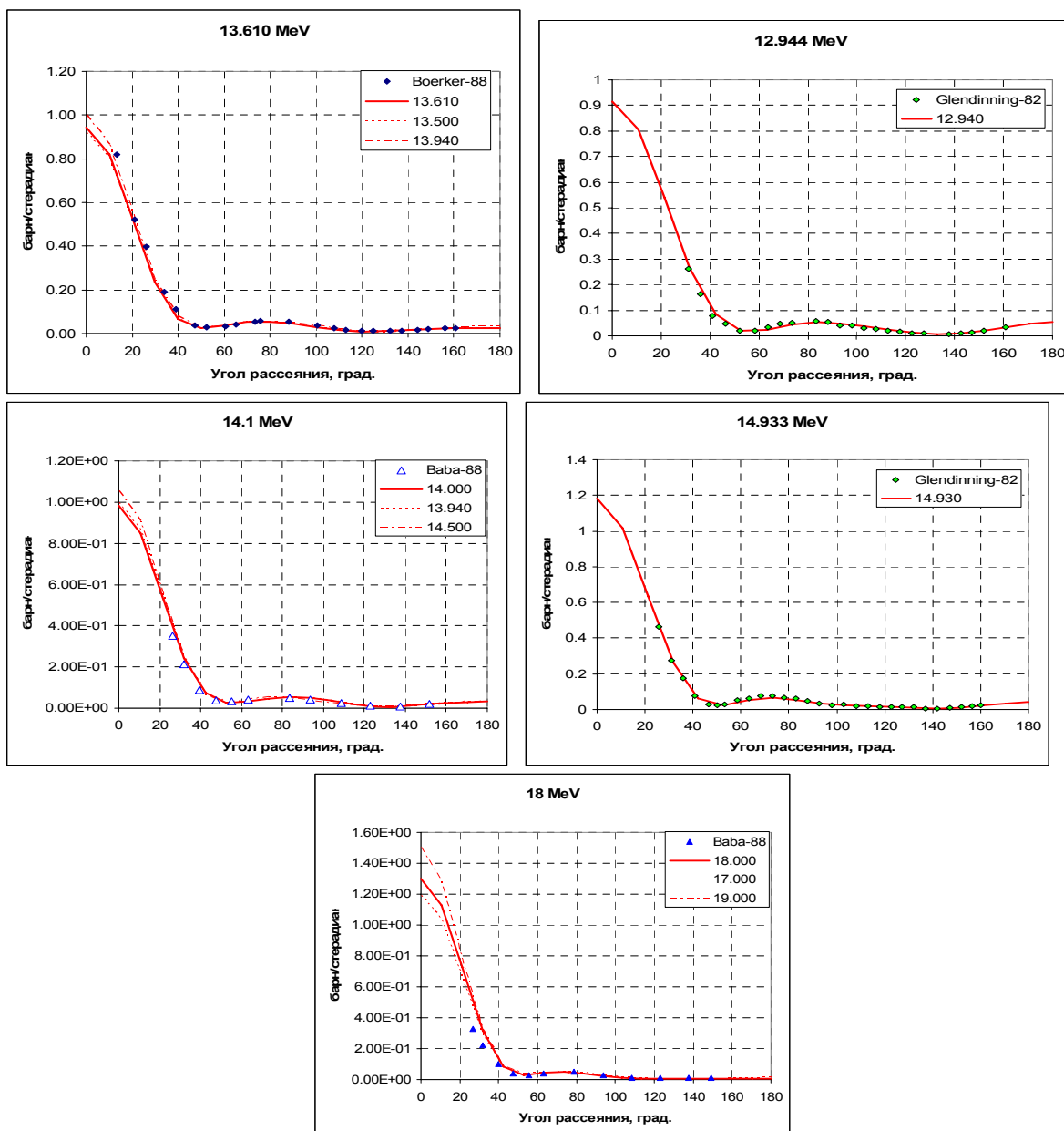


Рисунок 196. Сравнение дифференциальных сечений упругого рассеяния при энергиях выше 12 МэВ.

При высоких энергиях, данные Брокера и Глендиннера также прекрасно согласуются между собой, а также с данными Баба. Таким образом, при энергиях выше порога реакции (n, α) оцененные данные подтверждаются согласующимися между собой экспериментальными результатами.

Провести такое же сравнение при более низких энергиях затруднительно, т.к. энергетическое разрешение в файле и в эксперименте слишком сильно различаются. Примером может служить рис. 20, на котором сравниваются угловые распределения в окрестности 5 МэВ.

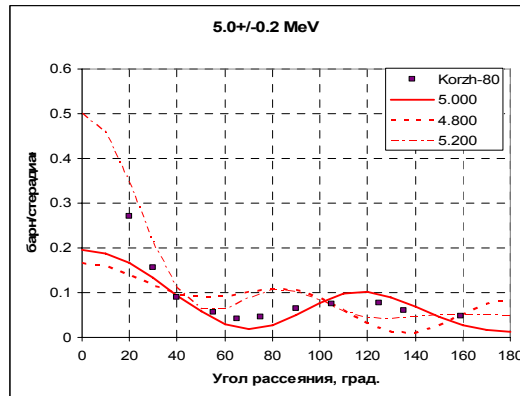


Рисунок 20. Сравнение дифференциальных сечений упругого рассеяния при 5 МэВ.

Видно, что в пределах экспериментальной функции разрешения угловые распределения меняются весьма существенно (в файле в этом интервале они заданы в 16 энергетических точках). При подгонке параметров расчетных моделей, как отмечалось, экспериментальные данные по анизотропии существенно использовались (при определении спинов резонансов эта информация была определяющей).

4.2. Нейтроны, испускаемые при неупругих взаимодействиях

4.2.1. Неупругое рассеяние. При энергиях ниже 10 МэВ неупругое рассеяние с возбуждением семи дискретных уровней кислорода, как заявлено в заголовочной секции файла ENDF-B/VII, считается изотропным в системе центра инерции, а выше этой энергии принято в соответствии с имеющимися экспериментальными данными, главным образом опираясь на неопубликованные данные Боркера и Маннхарта¹³. В действительности изотропными приняты только угловые распределения нейтронов, рассеянных на уровнях 10.957 МэВ и 11.080 МэВ (6-й и 7-й уровни), которые считаются изотропными при всех энергиях. На остальных уровнях угловые распределения нейтронов слабо анизотропны в системе центра инерции и вблизи порога. Анизотропия рассеяния вблизи порога принята такой же, как и в оценке, принимавшейся в ENDF/B-VI. Примером служат данные о первом угловом моменте $-a_1$ (утроенном среднем косинусе угла рассеяния в системе центра инерции) из названных библиотек (см. рис. 21а, б). При высоких энергиях, где анизотропия рассеяния становится заметной, оцененные данные существенно различаются. Для уровня с энергией 8.8719 МэВ различия в характере анизотропии весьма сильно (см. рис. 22), что, надо полагать, определяется учетом данных Брокера и Маннхарта.

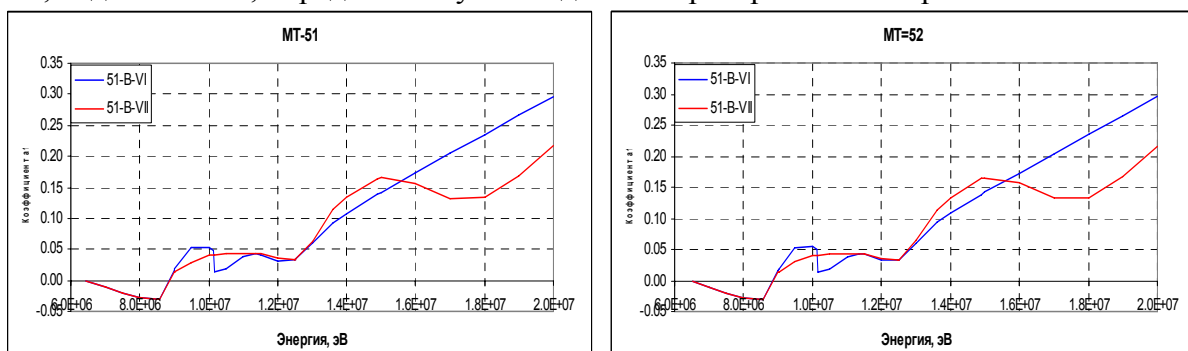


Рисунок 21а. Энергетические зависимости утроенного среднего косинуса угла неупругого рассеяния на низколежащих уровнях кислорода.

¹³ G. Borker, W. Mannhart, et al., report PTB-N-1 (1989) and private communication.

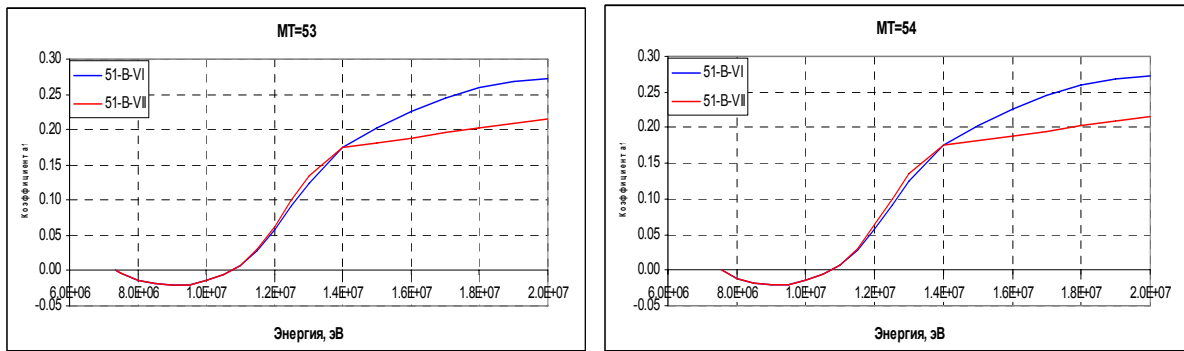


Рисунок 216. Энергетические зависимости утроенного среднего косинуса угла неупругого рассеяния на низколежащих уровнях кислорода.

Заметим, что в оценке, принятой в JENDL-3.3 неупругое рассеяние на рассматриваемых уровнях считается изотропным в системе центра инерции до 14.2 МэВ, а выше – не зависящей от энергии до 20 МэВ. Средний косинус угла рассеяния при этом принят весьма близким к тому, что принимается в ENDF/B-VII при 14 – 18 МэВ. В частности для первых двух уровней утроенный средний косинус уровня в JENDL-3.3 принят равным 0.209, для третьего и четвертого – 0.154, а для пятого -0.032.

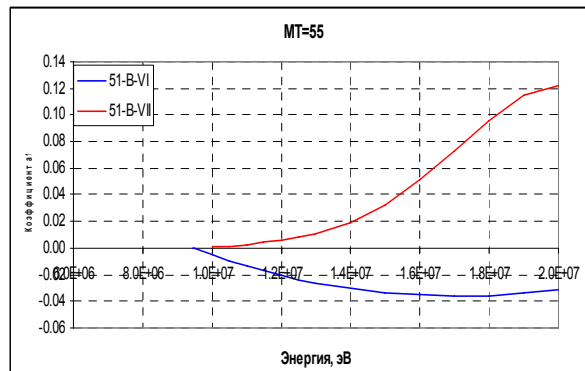


Рисунок 22. Первый угловой момент индикатрисы рассеяния на уровне с энергией 8.8719 МэВ

Отмеченная выше неточность в описании оценки в заголовочной секции не является основанием для сомнений в целесообразности принять эту оценку в РОСФОНД.

Что касается энерго-угловых распределений нейтронов, неупруго рассеянных на континууме уровней, то они заданы в файлом 6, т.е. угловые распределения скоррелированы с энергетическими. Спектры и угловые распределения нейтронов рассчитаны по программе GNASH. В файле 6 заданы также энергетические распределения ядер отдачи. Их угловые распределения приняты изотропными. Данные об образовании гамма-квантов представлены в файлах MF=13 и MF=14 (см. ниже).

4.2.2. Реакции $MT=16, (n,2n)$; $MT=22, (n,n'\alpha)$; $MT=23, (n,n'\alpha)$; $MT=28, (n,n'p)$.

Угловые распределения и скоррелированные с ними энергетические спектры нейтронов, испускаемых в этих реакциях, заданы в файле MF=6 с соответствующими значениями MT. Все эти данные получены путем расчетов по программе GNASH. Кроме энерго-угловых распределений нейтронов определяются и энергетические спектры альфа-частиц или протонов и ядер отдачи, угловые распределения которых считаются изотропными в системе центра инерции. Для реакции $(n,n'p)$ в файле MF=6

определен также непрерывный спектр испускаемых фотонов, также рассчитанный по программе GNASH. Для остальных реакций спектры и угловые распределения фотонов описываются файлами NF=13 и MF=14 (см. ниже).

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

5.1. Радиационный захват.

Спектр фотонов радиационного захвата в соответствии с данными Джорни и Мотца¹⁴ принят линейчатый, состоящим из 4-х линий:

| Энергия кванта, МэВ | Выход на акт захвата |
|---------------------|----------------------|
| 3.2722 | 0.146 |
| 2.1842 | 0.854 |
| 1.0880 | 0.854 |
| 0.8708 | 1.000 |

Суммарный выход 2.854 кванта на захват. Суммарная энергия квантов - 4.143МэВ. Энергии и выходы заданы в файле MF=12. Угловое распределение квантов – изотропное – в файле MF=14.

5.2. Неупругое рассеяние.

Образование фотонов при возбуждении дискретных уровней кислорода в результате неупругого рассеяния описывается в файле MF=13 для MT=4 сечениями образования 13 гамма-линий, испускаемых при переходах между уровнями с энергиями выше 6.05МэВ и линии с энергией 0.51 МэВ, обусловленной возбуждением первого уровня (предполагается, следовательно, что фотон, испускаемый при снятии возбуждения с этого уровня, испытывает внутреннюю конверсию с образованием электро-позитронной пары). Сечения образования гамма-линий оценены, естественно, по данным Нельсона и Мишадона⁸, использовавшимся и при оценке сечений возбуждения уровней. Как отмечалось в разделе 3.6, для оценки сечений возбуждения использовались данные только для некоторых (наиболее сильных) уровней, образуемых в каскаде распада. Угловые распределения гамма-квантов для линий с энергиями 1.755-, 2.742-, 6.130-, 6.917- и 7.117МэВ оценены по данным той же работы Нельсона и Мишадона. Угловые распределения остальных гамма-линий приняты изотропными.

Что касается гамма-лучей, испускаемых при неупругом рассеянии с возбуждением континуума состояний ядра-мишени, то их спектры определяются, как отмечалось в разделе 4.2.1, в файле MF=6 для MT=91.

5.3. Другие неупругие процессы.

5.3.1. Реакция (n,2n). Сечение образования и угловое распределение гамма-квантов с энергией 5.2409 МэВ оценено по данным Нельсона и Мишадона⁸. Сечения образования еще семи гамма-линий оценены с привлечением схемы уровней ¹⁵O рекомендованной Айзенбергом-Селовом⁹. Выходы дискретных квантов определены в файле MF=13, MT=16, а их угловые распределения – в файле MF=14, MT=16. Угловые распределения всех квантов, кроме кванта с энергией 5.2409 МэВ – изотропны.

¹⁴ E.T. Journey and H.T. Motz, Bull.Am.Phys.Soc. 9, 176 (1964)

5.3.2. Реакция ($n, n'\alpha$). На основе измерений Нельсона и Мишадона⁸ оценено сечение возбуждения и угловое распределение единственного кванта с энергией 4.438 МэВ.

5.3.3. Реакция (n, p). Спектр и угловое распределение (изотропное) испускаемых фотонов определены файлом MF=6 (см. 4.2.2).

5.3.4. Реакция (n, α). Сечения образования гамма-квантов с энергиями 3.0894, 3.8845 и 3.8538 МэВ оценено по данным Нельсона и Мишадона⁸. Сечения образования еще трех гамма-линий с энергиями 0.1993, 0.5951 и 0.7644 оценены с привлечением схемы уровней ¹³C рекомендованной Айзенбергом-Селовом⁹. Выходы дискретных квантов определены в файле MF=13, MT=16, а их угловые распределения – в файле MF=14, MT=16. Угловые распределения всех квантов, кроме квантов с энергиями 0.1993, 3.8845 и 3.8538 МэВ – изотропны. Угловые распределения последних оценены на основе данных Нельсона и Мишадона.

5.3.5. Реакция (n, d). Сечения образования гамма-квантов с энергиями 5.2701 и 5.2988 МэВ оценены по данным Нельсона и Мишадона⁸. Сечения образования еще 60 гамма-линий оценены по программе GNESH с перенормировкой для учета схемы распада ¹⁵N, рекомендованной Айзенбергом-Селовом, и сечений образования названных выше основных гамма-линий. Данные представлены в файле MF=13. Анизотропия испускания гамма-квантов определяется файлом MF=14 (все кванты, кроме кванта с энергией 5.2701 МэВ, испускаются изотропно; анизотропия названного кванта соответствует данным Нельсона и Мишадона).

5.3.5. Реакция (n, t). Сечение образования гамма-кванта с энергией 2.313 МэВ оценено по данным Нельсона и Мишадона⁸. Сечения образования еще 20 гамма-линий оценены по программе GNESH с перенормировкой для учета схемы распада ¹⁴N, рекомендованной Айзенбергом-Селовом, и сечений образования названной выше гамма-линии. Данные представлены в файле MF=13. Принято, что все кванты испускаются изотропно (файл MF=14).

6. Погрешность полного сечения.

С инженерной точки зрения наибольший интерес представляет погрешность полного сечения кислорода, определяющая характеристики переноса нейтронов в кислород содержащих средах. На рис. 23 сравниваются оценки погрешностей этого сечения принятые в различных источниках – в файлах погрешностей библиотек ENDF/B-V и JENDL-3.2, оценки погрешностей групповых констант БНАБ-93, погрешности, записанные в библиотеке LUND системы ИНДЕКС, а также расхождения групповых полных сечений, рассчитанных на основе последних оценок – ENDF/B-VII и JENDL-3.3. Как видно, последние существенно превосходят погрешности, принятые в JENDL-3.2 что свидетельствует об излишней оптимистичности последних. Представляется, что расхождение новейших оценок может рассматриваться в качестве нижней границы реальных погрешностей. На рис. 23 жирной коричневой линией проведена оценка погрешностей, сделанная нами на основе рассмотрения расхождений между принятой здесь оценкой ENDF/B-VII и экспериментальными данными. Полагалось, что в случае проведения в будущем дополнительных измерений полого сечения 2/3 результатов, которые будут получены, будут отличаться от принятых данных менее, чем на предлагаемые погрешности.

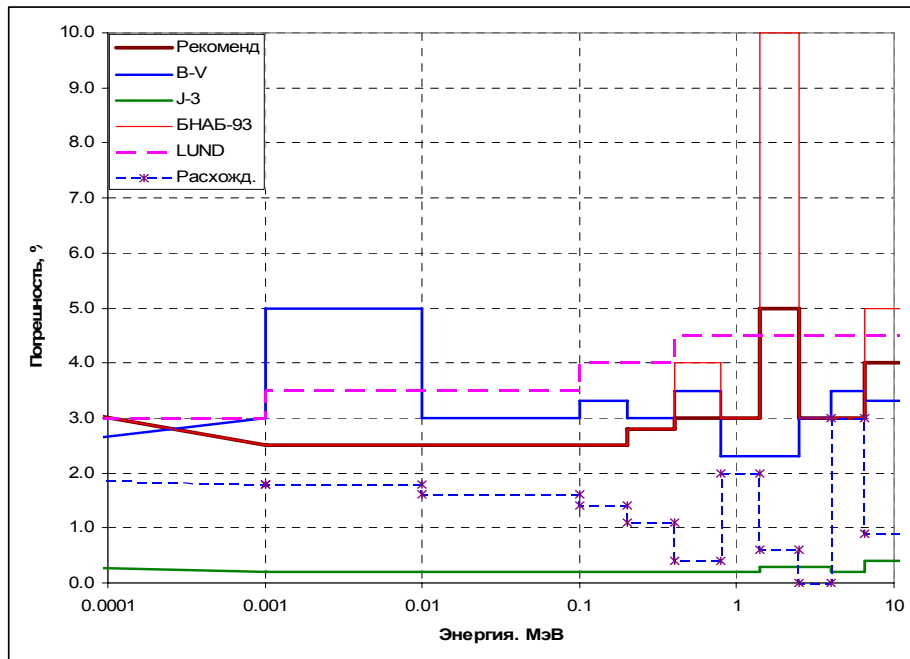


Рис. 23. Оценки погрешностей полного сечения кислорода.

7. Валидация в интегральных экспериментах

В заголовочной секции файла ENDF/B-VII дана краткая сводка результатов валидации оцененных сечений кислорода в интегральных экспериментах.

Прежде всего отмечается валидация по результатам расчетного анализа критических экспериментов с растворами высокообогащенного урана. В анализе использовались сечения урана-235 из файла ENDF/B-VI (Rev.5) и сечения водорода из той же библиотеки. Согласие с экспериментальными данными получено заметно лучшее, чем при использовании сечений урана-235 из оценки ENDF/B-VI(Rev/2). Эти результаты полностью соответствуют полученным в 2003 -2004 гг в ФЭИ при анализе более широкого набора критических экспериментов с растворами обогащенного урана, в которых для урана-235 рассматривались те же две оценки из ENDF/B-VI и те же оценки использовались для сечений водорода и кислорода. Подчеркнем, что в области энергий, важной для расчета критичности уран-водных растворов, в РОСФОНД включены те же сечения урана-235, что и в ENDF/B-VI(Rev.5). Для водорода и кислорода также использовались сечения из оценок отобранных для библиотеки РОСФОНД. Результаты валидации достаточно подробно изложены в обосновании выбора оцененных нейтронных данных для урана-235 для библиотеки РОСФОНД. Заметим, однако, что максимальная чувствительность коэффициента размножения к полному сечению кислорода, достигаемая при концентрациях урана порядка сотен грамм на литр (когда утечка нейтронов из размножающей системы велика) не превышает 0.014. Изменение полного сечения на 3% (т.е. на величину порядка погрешности – см. раздел 7) ведет к изменению коэффициента размножения менее, чем на 0.05%. Поскольку точность расчетного предсказания критичности с учетом всей совокупности оцененных экспериментов составляет, примерно 0.2%, ясно, что согласие с экспериментами этого типа не повышает надежности оцененных данных, а лишь убеждает в отсутствии в них нечаянных ошибок.

Гораздо убедительнее валидация оцененных данных для кислорода в так называемом broomstick-эксперименте. В условиях “хорошей” геометрии, когда каждое столкновение выводит нейтрон из пучка, измерялось пропускание нейтронов через

образцы жидкого кислорода различной толщины. Пучок нейтронов выводился из реактора и в нем присутствовали нейтроны самых различных энергий. Регистрация нейтронов проводилась с помощью нейтронного спектрометра, так что пропускание измерялось во всем энергетическом диапазоне, включающем, разумеется, и интерференционный минимум в полном сечении. Отмечается, что во всем энергетическом диапазоне, включая окрестность минимума, нейтронные данные из принятой оценки согласуются с результатами broomstick-эксперимента с точностью до погрешности последних. Сечения кислорода из предыдущей версии ENDF/B-VI вели к заметному занижению пропускания в области минимума в сечении.

Наконец, на основе оцененных данных для кислорода и водорода рассчитывался возраст нейтронов в воде. Он был найден равным 26.6 см^2 , что согласуется с экспериментальным значением $26.6 \pm 0.6 \text{ см}^2$. Предыдущая оценка сечений кислорода в ENDF/B приводила к возрасту 26.3 см^2 .

8. Перечень цитированных экспериментальных работ

8.1. Полное сечение

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|--------------|-------------|--------------------------|----------|
| Block-75 | R.C.Block | J,NST,12,1,7501 | 20420 |
| Moxon-74 | M.C.Moxon | NP-20,29,7401 | 21676 |
| Koester-90 | L.Koester, | J,ZP/A,337,341,90 | 22217 |
| Scharf-72 | R.A.Schrack | J,BAP,17,555(HE1),197204 | 10177 |
| Johnson-79 | C.H.Johnson | C,79KNOX,,807,7903 | 10992 |
| Perey-72 | F.G.Perey | R,ORNL-4823,197212 | 10377 |
| Finlay-93 | R.W.Finlay | J,PR/C,47,237,9301 | 13569 |
| Manero-68 | F.Manero | J,ARS,64,63,6802 | 20170 |
| Cierjacks-68 | S.Cierjacks | R, KFK-1000, 6806 | 2001 |
| Cierjacks-80 | S.Cierjacks | J,NIM,169,185,8004 | 20742 |
| Fouler-73 | J.L.Fowler | J,PR/C,8,545,197308 | 10137004 |
| Fouler-73 | J.L.Fowler | J,PR/C,8,545,197308 | 10137005 |
| Kalina-70 | J.Kalyna | R,NYO-73-340,1970 | 10197 |
| Fossan-61 | D.B.Fossan | J,PR,123,209,6108 | 11256 |
| Larson-80 | D.C.Larson | C,80BNL,,277,8007 | 12882 |

8.2. Сечения реакций (n, α) и (n,n' α)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|------------|-------------|-----------------------|----------|
| Seitz-55 | J.Seitz | J,HPA,28,227,5503 | 21072 |
| Walton-55 | R.B.Walton | J,PR,107,1065,57 | 11400 |
| Bormann-63 | M.Bormann | J,ZP,174,1,6302 | 21344002 |
| Bormann-63 | M.Bormann | J,ZP,174,1,6302 | 21344004 |
| Dandy-68 | D.Dandy | R,AWRE-O-60/68,,6810 | 21474 |
| Leroux-68 | B.Leroux | J,NP/A,116,1,196,6808 | 21461 |
| Hlavac-64 | S.Hlavac | R,INDC(SLK)-002,9408 | 31478 |
| Dickens-70 | J.K.Dickens | J,NSE,40,283,197005 | 10096 |

8.3. Сечения реакций (n,p) и (n,np)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|-------------------|------------------|-------------------|---------|
| Schmidt-Hoenow-72 | M.Schmidt-Hoenow | J,RCA,17,142,7210 | 20545 |

| | | | |
|-------------|--------------|--------------------------|-------|
| Schantl-70 | W.Schantl | T,SCHANTL,70 | 21846 |
| Prasad-66 | R.Prasad | J,NP,85,476,196609 | 30007 |
| Mitra-66 | B.Mitra | J,NP,83,157,6607 | 30013 |
| Kantele-62 | J.Kantele | J,NP,35,353,62 | 11196 |
| De-Juren-60 | J.A.De Juren | J,PR,120,901,60 | 11411 |
| Subashi-00 | M.Subashi | J,NSE,135,(3),260,200006 | 22494 |
| Bormann-66 | M.Bormann | C,66PARIS,1,225,6704 | 20898 |
| Soeman-62 | K.W.Seeman | R,KAPL-2214,6209 | 11369 |
| De-Juren-62 | J.A.De Juren | J,PR,127,1229,62 | 11415 |
| Martin-54 | H.C.Martin | J,PR,93,498,5402 | 11390 |

8.4. Сечение неупругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|------------|------------------|---------------------|---------|
| Dickens-70 | J.K.Dickens | J,NSE,40,283,197005 | 10096 |
| Orphan-70 | V.J.Orphan | J,NSE,42,352,197012 | 10097 |
| Conner-53 | J.P.Conner | J,PR,89,712,5302 | 11388 |
| Nyberg-71 | K.Nyberg-Ponnert | J,PS,4,165,71 | 20245 |
| Burymov-69 | E.M.Burymov | J,YF,9,(5),933,6905 | 40229 |

8.5. Сечение и угловые распределения упругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|----------------|-----------------|---------------------|---------|
| Boerker-88 | G.Boerker | C,88MITO,,193,88 | 22113 |
| Glendinning-82 | S.G.Glendinning | J,NSE,82,393,8212 | 10859 |
| Kinney-72 | W.E.Kinney | R,ORNL-4780,197204 | 10276 |
| Meier-69 | D.Meier | J,HPA,42,813,6904 | 20907 |
| Lundberg-67 | B.Lundberg | J,AF,34,247,6702 | 20163 |
| Lister-66 | D.Lister | J,PR,143,745,66 | 11334 |
| Lovchikova-62 | G.N.Lovchikova | J,AE,12,(1),48,6201 | 40230 |
| Boerker-88 | G. Boerker | C,88MITO,,193,88 | 22113 |
| Schreder-88 | G. Schreder | C,88MITO,,691,88 | 22121 |
| Glendinning-82 | S.G.Glendinning | J,NSE,82,393,8212 | 10859 |
| Baba-80 | M.Baba | C,88MITO,209,8805 | 22157 |

8.6. Сечение реакции (n,2n)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|-----------|-----------|---------------------|---------|
| Brill-61 | O.D.Brill | J,DOK,136,(1),55,61 | 40715 |

9. Заключение

9.1. Выводы.

В РОСФОНД рекомендуется включить файл оцененных данных для O-16 из библиотеки ENDF/B-VII.0 со следующими изменениями:

1. Номер материала MAT изменен на 816 (в ENDF/B – MAT 825).
2. Сечение захвата радиационного захвата принято в соответствии с данными принятыми в JENDL-3.3.
3. Сечение упругого рассеяния ниже 20 эВ принято постоянным.
4. Полное сечение ниже 1 кэВ определено как сумма парциальных.
5. Сечение упругого рассеяния выше 20 эВ определено как разность между полным сечением и суммой парциальных.

6. Рассматриваемая область энергий, распространявшаяся в ENDF/B-VII до 30 – 150 МэВ, ограничена 20 МэВ. Описания взаимодействий с кислородом нейтронов с энергиями выше 20 МэВ удалены.
7. Энергия реакции (n, α) откорректирована: Q=2.21560 МэВ вместо 2.2143 МэВ.
8. Секция MF=3, MT=3 удалена.

9.2.Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle\sigma\rangle$ спектр Максвелла с T= 1.35 МэВ |
|-------------------|-----------------------------|----------|---|
| Упругое рассеяние | 3.852 б | 46.803 б | 2.7846 б |
| Рад. захват | 0.1899 мб | 0.1590мб | 0.11400 мб |
| Реакция (n,p) | 0 | 0 | 0.0447 мб |
| Реакция (n,d) | 0 | 0 | 0.00555 мб |
| Реакция (n,t) | 0 | 0 | 0.000005 мб |
| Реакция (n,2n) | 0 | 0 | 0.000007 мб |

9.3.Автор обоснования оцененных данных

Николаев М.Н.

8.2. Кислород-17

Для ^{17}O в обиходе имеется лишь одна оценка, выполненная в 1978 г. Магурно (В.А. Magurno) для ENDF/B-V. Эта оценка используется в библиотеках ENDF/B-VII, JEFF-3.1 и ФОНД-2.2. В библиотеках JENDL-3.3 и CENDL-2 оцененные данные для этого изотопа отсутствуют.

Заключение

1. Выводы.

В РОСФОНД рекомендуется включить файл оцененных нейтронных данных для кислорода-17, оцененный Магурно.

2. Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle\sigma\rangle$ спектр Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$ |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|---|
| Упругое рассеяние | 3.743 б | 46.803 б | 2.7846 б |
| Рад. захват | 0.538 мб | 0.240 мб | 0.193 мб |
| Реакция (n,p) | 0 | 0 | 0.0215 мб |
| Реакция (n,d) | 0 | 0 | 0.0060 мб |
| Реакция (n,t) | 0 | 0 | 0.0059 мб |
| Реакция (n, ^3He) | 0 | 0 | 8E-6 мб |
| Реакция (n, α) | 0.235 б | 0.106 б | 0.0949 б |
| Реакция (n,2n) | 0 | 0 | 0.0616 мб |

3. Автор обоснования оцененных данных

Николаев М.Н.

8.3 Кислород-18

Для ^{18}O не существует ни одной полной оценки нейтронных данных. Правда, в библиотеку ФОНД-2.2 включен файл данных для этого изотопа, составленный Копецким и Ниропом (J.Кореску, D.Nierop), однако он не содержит данных о полном сечении, о сечении рассеяния, об энерго-угловых распределениях рассеянных нейтронов и не может быть использован в расчетах переноса нейтронов.

Решено было дополнить имеющийся файл данных ^{18}O данными о полном сечении и сечении рассеяния с расчетом, чтобы пользователи-инженеры могли получать из содержащихся в библиотеке данных сечения для природного кислорода. Заметим, что в интерференционном минимуме при 2.35 МэВ сечение ^{17}O составляет всего 0.1 барна и учет вклада ^{18}O увеличивает это сечение для природного кислорода примерно на 8%, что существенно больше погрешности, с которой известно сечение в этом минимуме.

Дополнение состояло во включении в файл параметров разрешенных резонансов из оценки Мухабхаба (1987) с помощью которых описываются сечения рассеяния и захвата до 3.15 МэВ. От 3.15 до 20 МэВ полное сечение оценено на основе экспериментальных данных, а сечение рассеяния получено как разность между этим полным и суммой сечений неупругих взаимодействий, оцененных Копецким и Ниропом. Всем резонансам приписана одинаковая радиационная ширина - 0.23 эВ.

На рис. 1 оцененное полное сечение сравнивается с экспериментальными данными. Видно, что не все резонансные параметры определены оптимально. Резонансный интеграл, рассчитанный по резонансным параметрам существенно ниже непосредственно измеренного и рекомендованного Мухабхабом (0.87 ± 0.04 мб). Это расхождение отмечается и самим Мухабхабом, предполагающим, что пропущен какой-то низколежащий резонанс.

Таким образом, ясно, что оценку нейтронных сечений кислорода-18 желательно в будущем уточнить.

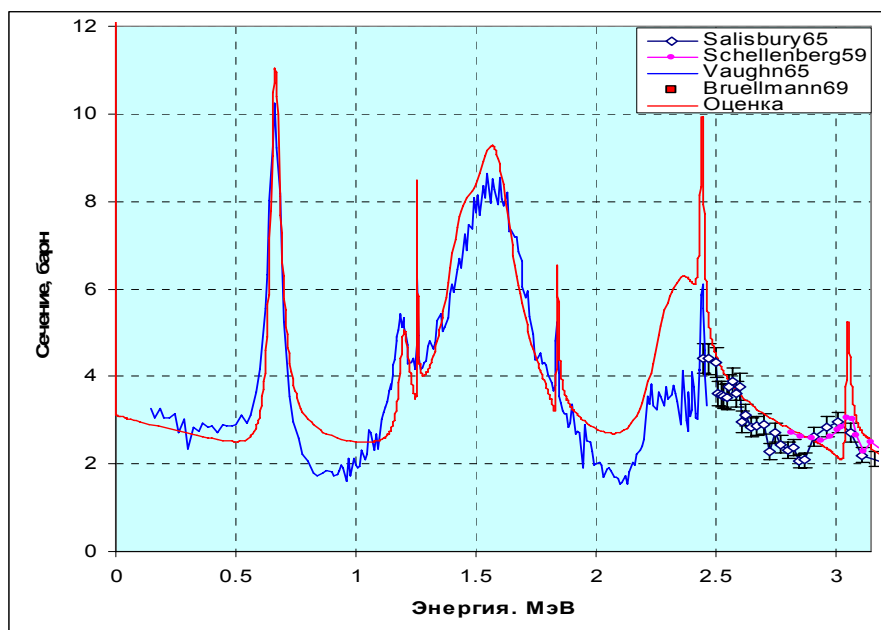


Рисунок 1а. Полное сечение кислорода-18.

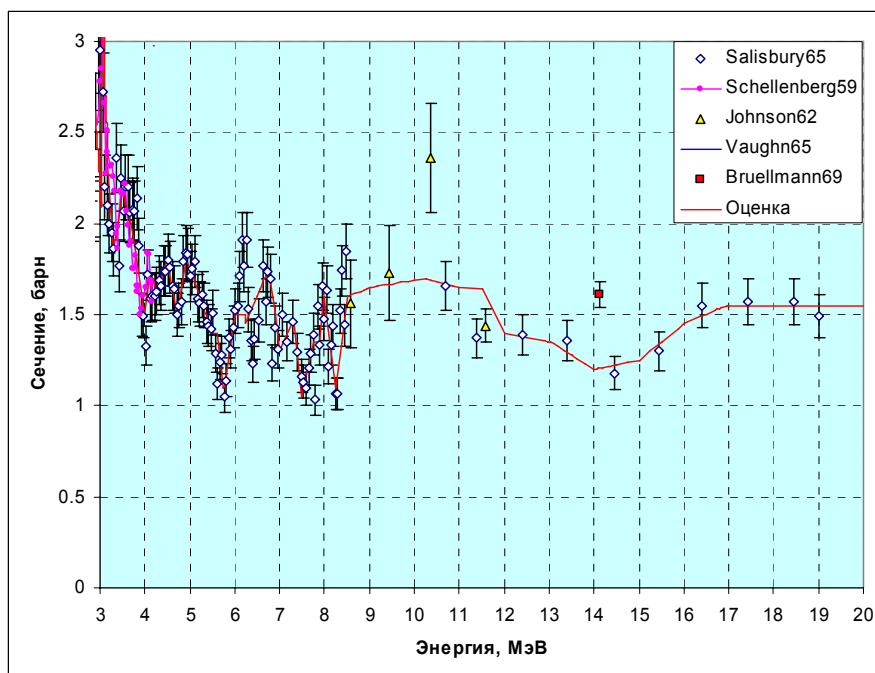


Рисунок 16. Полное сечение кислорода-18.

Заключение

1. Выводы

В РОСФОНД рекомендуется принять оценку Копецкого-Ниропа с добавлением данных о полном сечении и сечении упругого рассеяния.

2. Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle \sigma \rangle$ спектр Максвелла($T=1.35 \text{ МэВ}$) |
|------------------------|-----------------------------|-----------------|---|
| Упругое рассеяние | 3.202 | 37.850 б | 2.7846 б |
| Рад. захват | 0.154 мб | 0.0695 мб | 0.105 мб |
| Реакция (n,p) | 0 | 0 | $4 \cdot 10^{-4}$ мб |
| Реакция (n,d) | 0 | 0 | $9 \cdot 10^{-4}$ мб |
| Реакция (n,t) | 0 | 0 | $7 \cdot 10^{-7}$ мб |
| Реакция (n, α) | 0 | 0 | 0.189 мб |
| Реакция (n,2n) | 0 | 0 | 0.655 мб |
| Реакция (n,3n) | 0 | 0 | 0.005 мб |

3. Автор обоснования оцененных данных

Николаев М.Н.

9. ФТОР

Фтор не имеет долгоживущих радиоактивных изотопов. В РОСФОНД включены данные для единственного стабильного изотопа ^{19}F .

9.1. Фтор-19

В библиотеках ENDF/B-VIIb2, JEFF-3.1 и ФОНД-2.2 используется оценка Z.X,Zhao, C.Y.Fu and D.C.Larson (1990). Однако в JEFF-3.1 (=pre.ENDF/B-VII) и в ENDF/B-VIIb2 содержатся откорректированные данные в области энергий до 1 МэВ. В 2005 году группой Л.Лила, Х.Дерриена и Н.Грина были переоценены параметры разрешенных резонансов: с помощью программы SAMMY были обработаны данные эксперимента Ларсона (1976 г.), представляющие собой пропускания для трех наборов толщин образца.

В библиотеке JENDL-3.3 используется оценка T.Sugi (1989 г.) в которой резонансные параметры в области энергий до 100 кэВ определялись либо прямо из экспериментальных работ, либо путем подгонки под эксперимент Ларсона (1976 г.), а в тепловой области под рекомендации Мухабхаба.

1. Общие характеристики

1.1. $Z=9$

1.2. $A=18.998403(^{12}\text{C})$

1.3. $A_{\text{wr}}= 18.835198$ (для ^{12}C);

Во всех оценках принято $A_{\text{w}}=18.8350$.

1.4. Содержание в естественной смеси: 100%

1.5. Перечень нейтронных реакций на основном изотопе приводятся в таблице 1.

Таблица 1.
Характеристики нейтронных реакций

| MT | Реакция | Продукт, T1/2 | Энергия реакции, Q, МэВ | | E _{порог} , эВ | |
|-----|----------------|---------------|-------------------------|-----------|-------------------------|-----------|
| | | | ENDF/B-VII | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | JENDL-3.3 |
| 16 | (n,2n) | F18(109.77 m) | -10.4310 | -10.43106 | 10.9870 | 10.9854 |
| 22 | (n,na) | N15 | -4.0129 | -4.0128 | 4.2260 | 4.2259 |
| 28 | (n,np) | O18 | -7.9930 | -7.9928 | 8.4174 | 8.4172 |
| 32 | (n,nd) | O17 | | -13.815 | | 14.5485 |
| 102 | (n, γ) | F20(11.163 s) | 6.6013 | 6.6014 | | |
| 103 | (n,p) | O19(26.91 s) | -4.0360 | -4.0363 | 4.2503 | 4.2506 |
| 104 | (n,d) | O18 | -5.7680 | -5.7682 | 6.0742 | 6.0745 |
| 105 | (n,t) | O17 | -7.5570 | -7.5574 | 7.9582 | 7.9587 |
| 107 | (n, α) | N16(7.13 s) | -1.5230 | -1.5222 | 1.6039 | 1.6030 |

Энергии всех реакций, принятые в ENDF/B-VII и в JENDL-3.3, достаточно (для практических целей) хорошо согласуются друг с другом.

1.6. Радиоактивность: не радиоактивен. Отметим, также, что при взаимодействии нейтронов с ядром фтора не образуется никаких долгоживущих радиоактивных продуктов реакции.

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 1/2^+$.

2.2. Радиус рассеяния:

$R=5.36$ (ENDF/B7); $R=5.525$ ферми(JENDL3.3)

2.3. Резонансные параметры

В ENDF/B - не приводятся (сечения во всей области энергий заданы поточечно);

В JENDL – область разрешенных резонансов от 1.E-5 эВ – 100 кэВ.

В таблице 2 приводятся характеристики взаимодействия в тепловой и в резонансной областях энергии.

Таблица 2 – Тепловое сечение и резонансный интеграл для F-19.

| Оценка | Взаимодействие | Тепловое сечение | Резонансный интеграл |
|------------|----------------|------------------|----------------------|
| ENDF/B-VII | рассеяние | 3.740 барн | |
| | захват | 9.58 мбарн | 15.2 мбарн |
| | полное | 3.7496 барн | |
| JENDL-3.3 | рассеяние | 3.741 барн | |
| | захват | 9.57 мбарн | 18.0 мбарн |
| | полное | 3.7511 барн | |
| ENDF/B-V.2 | рассеяние | 3.708 барн | |
| | захват | 9.50 мбарн | 17.6 мбарн |
| | полное | 3.7175 барн | |

Из приведенной в таблице 2 информации видно, что в тепловой области оценки ENDF/B-VII и JENDL-3.3 хорошо согласуются друг с другом, но в области резонансных энергий между оценками наблюдается расхождение в резонансном интеграле ~ 20%.

По сравнению с широко используемой в качестве реперной оценки ENDF/B-V.2 изменилось сечение радиационного захвата с 9.5 мбарн до 9.57-9.58 мбарн. Резонансный интеграл в JENDL-3.3 изменился незначительно, а в ENDF/B-VII он уменьшился до 15.2 мбарн (~ 15 %).

В компиляции Мухабхаба имеется только рекомендованные данные по тепловому сечению захвата 9.6 ± 0.05 мбарн.

2.4. Область неразрешенных резонансов отсутствует

3.Сечения нейтронных реакций (MF=3)

3.1.Полное сечение(MT=1)

Оценка полного сечения во всех библиотеках основанно на экспериментальных данных с высоким разрешением группы Ларсона (1976). Однако, в оценке JENDL использовались экспериментальные данные, помещенные в библиотеку EXFOR, в то время как в ENDF/B-VII для R-матричного анализа использовались непосредственно экспериментальные значения пропусканий для трех образцов различной толщины. Вероятно, что эти данные получены группой L.C.Leal, H.Derrien, N.M.Green частным порядком.

В результате и оцененные данные оказываются весьма близкими. Однако, на рисунке 1 приводится сравнение оцененных значений полного сечения с экспериментальными данными Ларсона, доступных в библиотеке EXFOR.

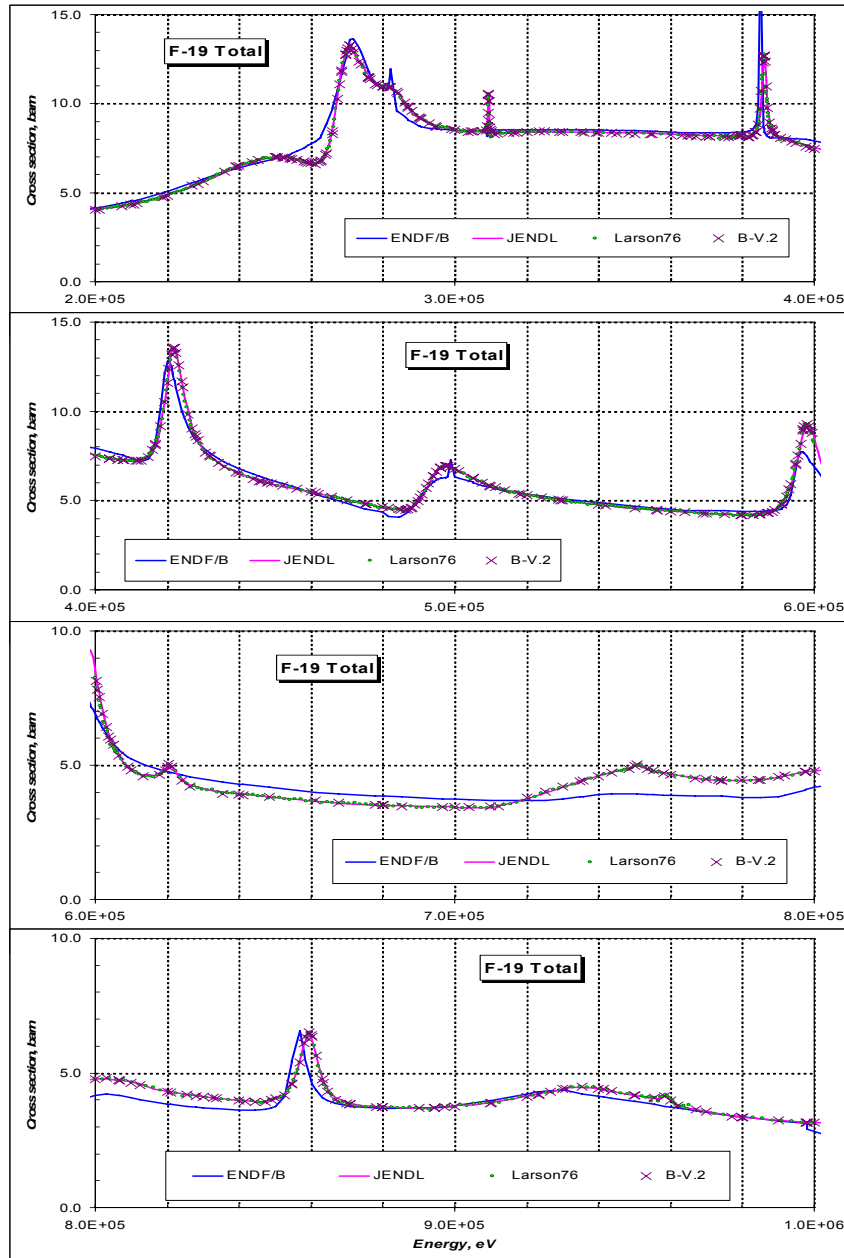


Рисунок 1 – Сравнение полного сечения F-19 в области энергий 0.1 – 1.0 МэВ.

Из приведенного на рисунке 1 сравнения видно, что публично представленные экспериментальные данные Ларсона наилучшим образом описываются в оценках ENDF/B-V.2 и в JENDL-3.3.

В области энергий выше 1 МэВ оценки ENDF/B-VII и -V.2 практически совпадают и хорошо согласуются с оценкой JENDL-3.3 и с экспериментальными данными Ларсона (смотри рисунок 2).

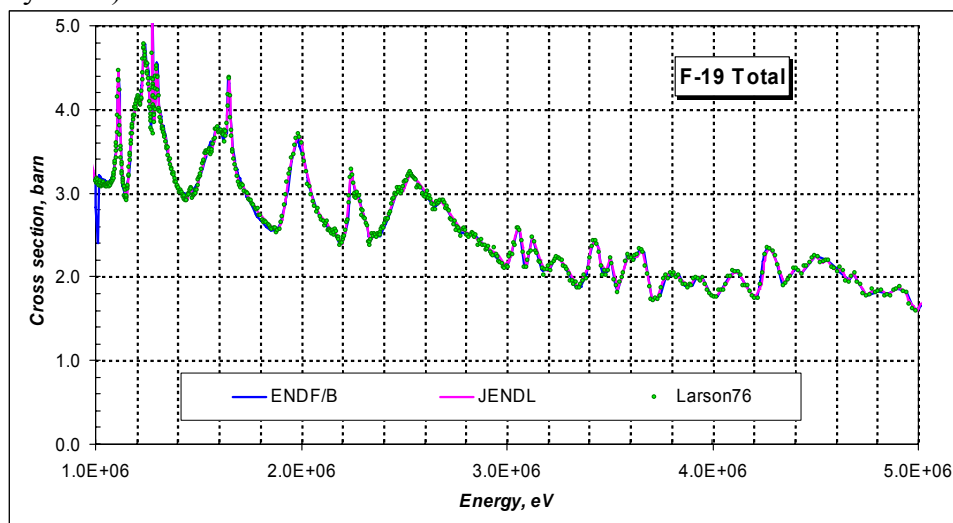


Рисунок 2 – Сравнение полного сечения F-19 в области энергий 1.0 – 5.0 МэВ.

Выводы

В оценке ENDF/B-VII проведена переоценка сечений в энергии до 1 МэВ, результаты которой приводят к худшему согласию полного сечения с экспериментальными данными Ларсона.

Оценки полного сечения из ENDF/B-V.2 и JENDL-3.3 практически совпадают друг с другом и хорошо согласуются с экспериментальными данными.

3.2. Сечение поглощения нейтронов.

Вклад различных составляющих в процесс поглощения нейтронов показан на рисунке 3 на основе оцененных сечений из библиотеки JENDL.

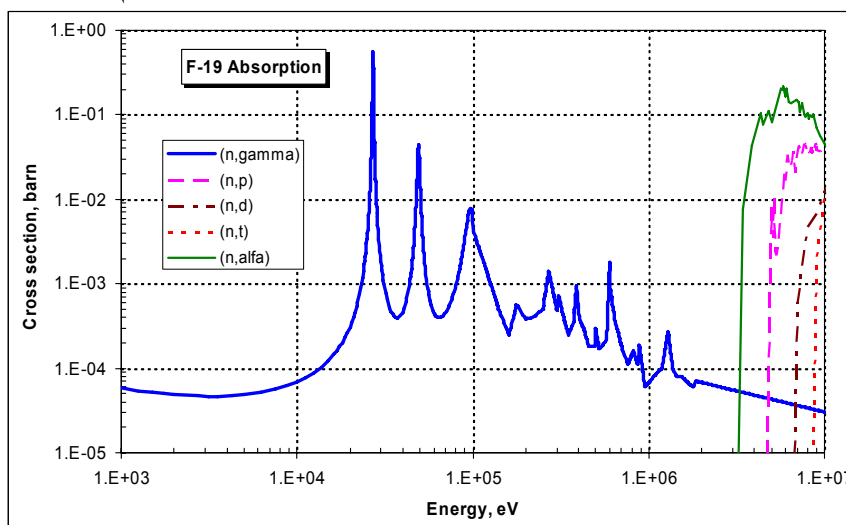


Рисунок 3 – Основные вкладчики в сечение поглощения на F-19.

Из рисунка 3 видно, что до 3 МэВ поглощение нейтронов, главным образом, происходит за счет реакции (n,gamma). Выше 3 МэВ становится определяющей реакция с испусканием альфа частицы, сечение которой в максимуме достигает порядка 200 мбарн.

В районе 5 МэВ становится заметным вклад реакции (n,p) ~ пятидесяти мбарн, а выше 5 МэВ вклады в поглощение нейтронов от реакций (n,d) и(n,t) становятся порядка нескольких мбарн.

Ниже будет проведено сравнение сечений нейтронных реакций в порядке их значимости в процесс поглощения нейтронов.

3.2.1 Сечение реакции (n,gamma).

На рисунке 4 показано общее сравнение оцененных и экспериментальных данных для сечения реакции (n,g) в области энергий до 10 МэВ. Из рисунка видно, что не все оцененные кривые согласуются с экспериментальными данными.

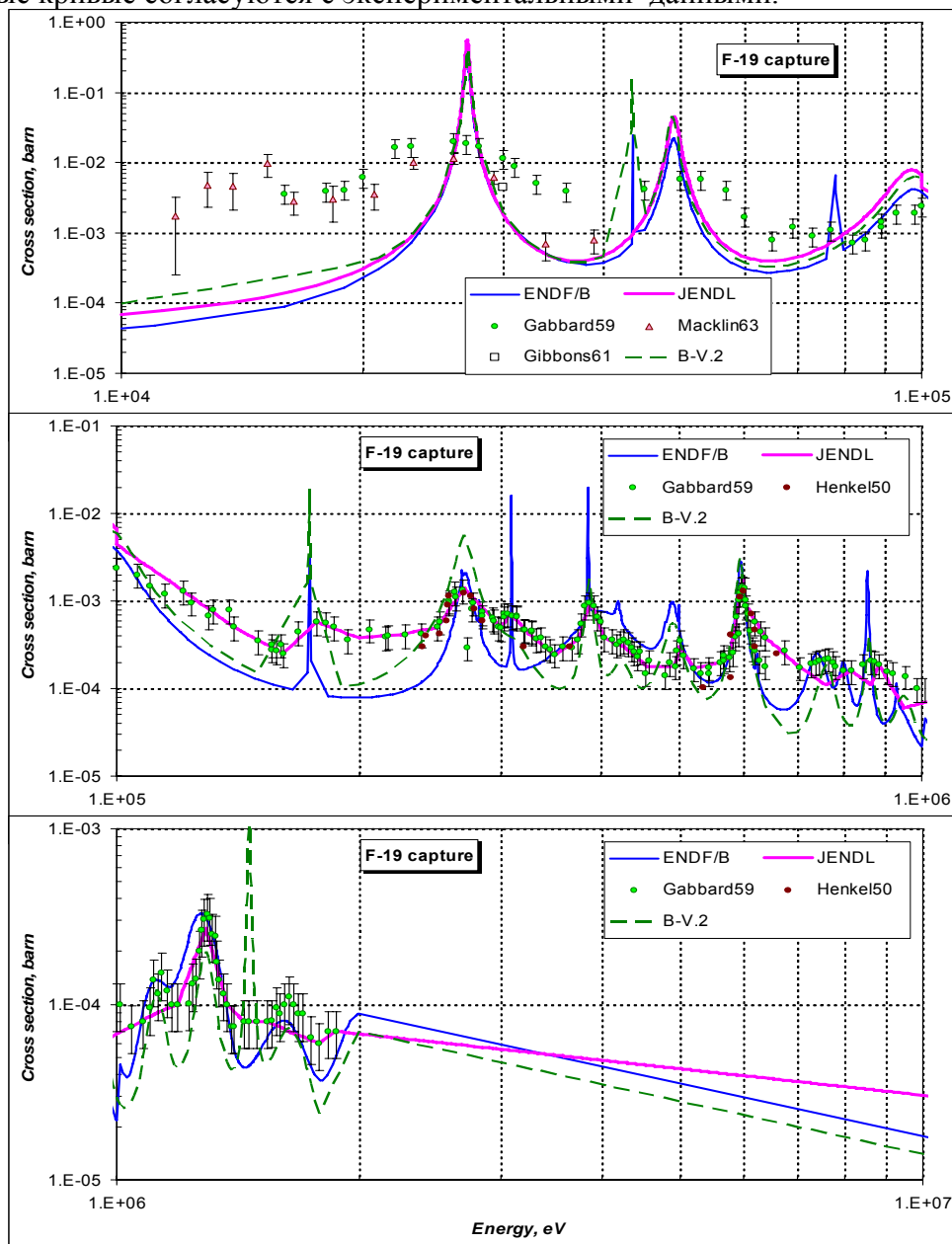


Рисунок 4 – Сравнение сечения радиационного захвата F-19 в области энергий 10.0 кэВ – 10.0 МэВ.

Из приведенного на рисунке 4 сравнения видно, что наиболее согласована с экспериментальными данными оценка JENDL-3.3, хотя воспроизведение резонансных пиков в области энергий выше 100 кэВ в этой оценке оставляет желать лучшего.

3.2.2 Сечение реакции (n,alfa).

На рисунке 5 показано общее сравнение оцененных и экспериментальных данных для сечения реакции (n,alfa) в области энергий до 20 МэВ.

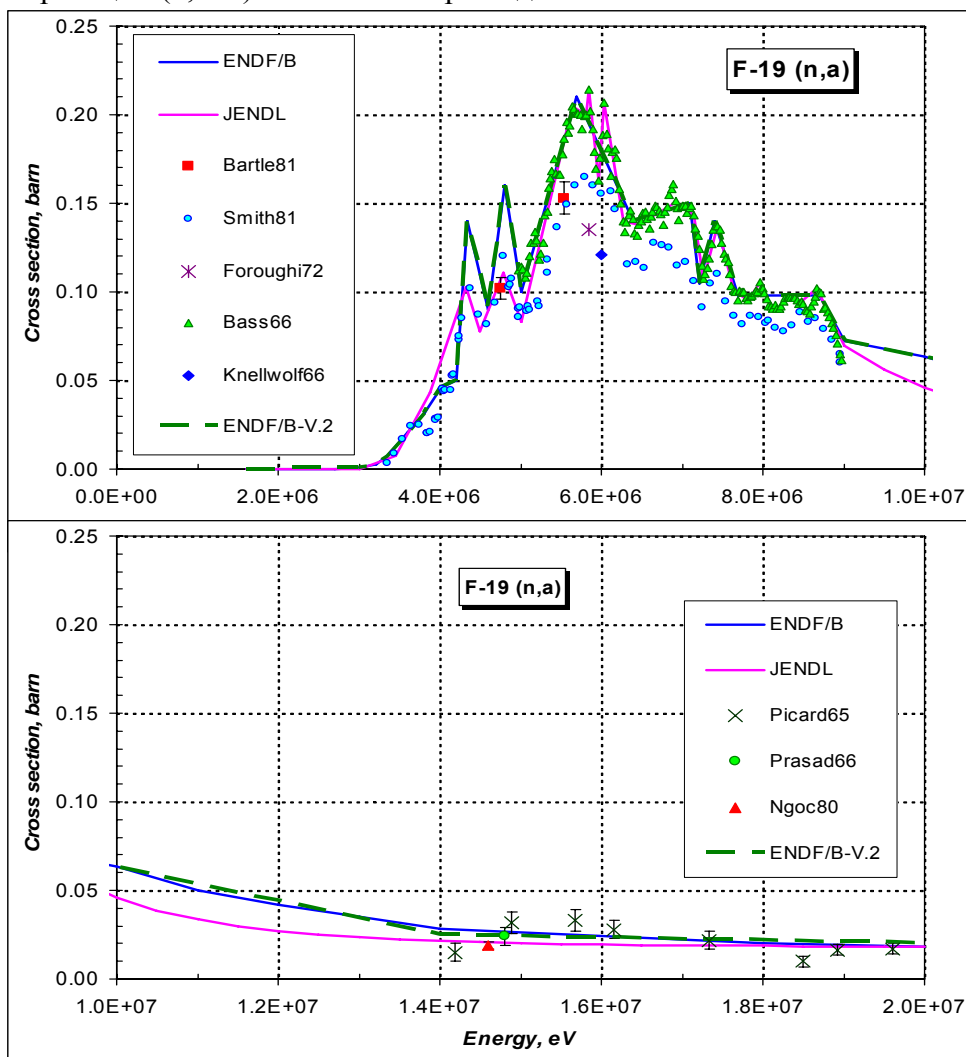


Рисунок 5 – Сравнение сечения реакции (n,a) на F-19 в области энергий до 20.0 МэВ.

Из приведенного на рисунке 5 сравнения видно, что оценка ENDF/B-VII не изменилась по сравнению с версией -V.2 и достаточно хорошо согласуется на начальном этапе с экспериментальными данными Кнеллвольфа (1966 г.), а выше 5 МэВ – с данными Прасада (1966 г.). Оценка JENDL хуже описывает порог реакции, а выше 5 МэВ согласуется и с экспериментальными данными и с оценкой ENDF/B. В области энергий от 9 МэВ до 14 МэВ экспериментальные данные отсутствуют, а расхождения в оцененных сечениях вызваны, главным образом типом интерполяции сечения. Наиболее “свежая” экспериментальная точка Нгока (1980 г.) наилучшим образом согласуется с оценкой JENDL.

3.2.3 Сечение реакции (n,p).

На рисунке 6 показано общее сравнение оцененных и экспериментальных данных для сечения реакции (n,p) в области энергий до 20 МэВ.

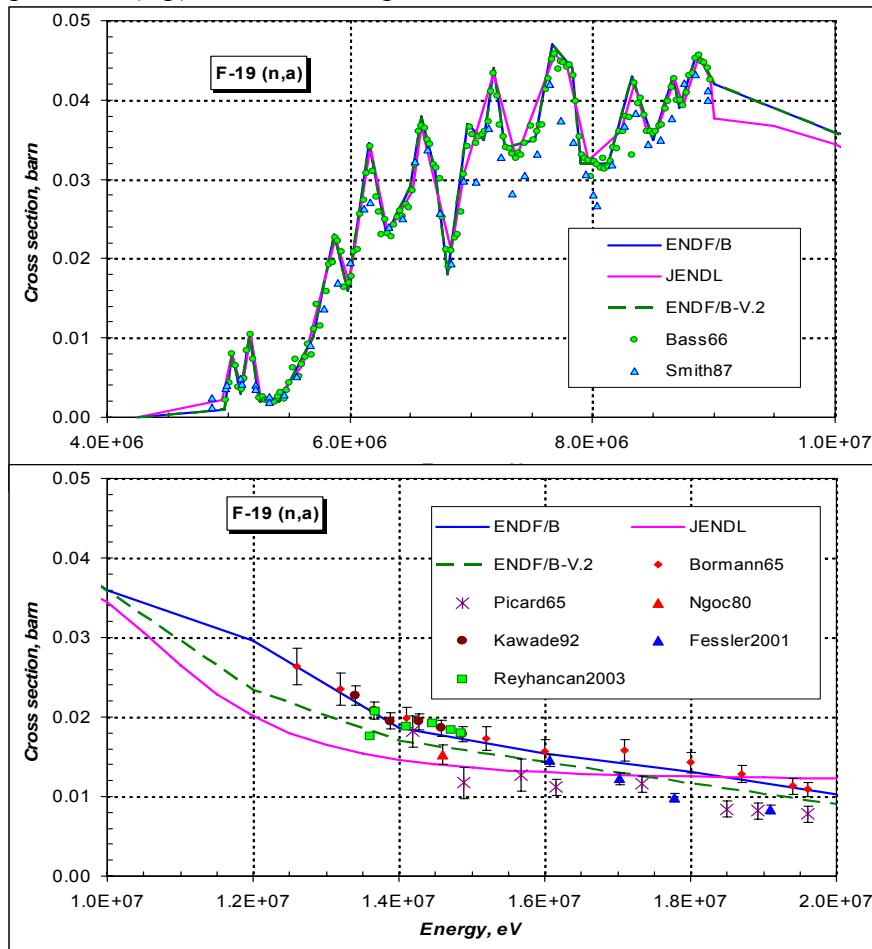


Рисунок 6 – Сравнение сечения реакции (n,p) на F-19 в области энергий до 20.0 МэВ.

Из приведенного на рисунке 6 сравнения видно, что в области энергий до 10 МэВ оценка ENDF/B-VII не изменилась по сравнению с версией -V.2. Они расходятся при энергии выше 10 МэВ.

Вплоть до 9 МэВ все оценки хорошо согласуются с имеющимися двумя наборами экспериментальных данных.

В области энергий выше 10 МэВ имеется значительно большее число экспериментальных наборов. В этой области энергий экспериментальные данные наилучшим образом согласуются с оценкой ENDF/B-VII как по величине сечения, так и по поведению.

Выводы

Поглощение нейтронов до 10 МэВ, в целом, лучше согласуется с экспериментальными микроданными в оценке JENDL.

Оценка ENDF/B-VII предпочтительна в области энергий выше 10 МэВ.

3.3. Сечение реакции неупругого рассеяния нейтронов.

В таблице 3 приводится сравнение энергий уровней и энергетических порогов уровней неупругого рассеяния нейтронов для оценок ENDF/B-VII и JENDL-3.3.

Таблица 3 – уровни и пороги реакции при неупругом рассеянии нейтронов на F-19.

| номер уровня | ENDF/B-VII | | JENDL-3.3 | |
|-----------------|------------|----------|-----------|----------|
| | Q, MeV | Eth, MeV | Q, MeV | Eth, MeV |
| 1 | -0.1099 | 0.1158 | -0.1100 | 0.1158 |
| 2 | -0.1970 | 0.2075 | -0.1972 | 0.2077 |
| 3 | -1.3460 | 1.4175 | -1.3457 | 1.4172 |
| 4 | -1.4590 | 1.5365 | -1.4585 | 1.5359 |
| 5 | -1.5540 | 1.6365 | -1.5541 | 1.6366 |
| 6 | -2.7800 | 2.9276 | -2.7798 | 2.9274 |
| 7 | -3.9070 | 4.1144 | -3.9071 | 4.1145 |
| 8 | -3.9990 | 4.2113 | -3.9985 | 4.2108 |
| 9 | -4.0320 | 4.2461 | -4.0325 | 4.2466 |
| 10 | -4.3780 | 4.6104 | -4.3777 | 4.6101 |
| 11 | -4.5490 | 4.7905 | -4.4000 | 4.6336 |
| 12 | -4.5580 | 4.7979 | | |
| 13 | -4.6480 | 4.8948 | | |
| 14 | -4.6830 | 4.9316 | | |
| 15 | -5.1060 | 5.3771 | | |
| 16 | -5.3660 | 5.6509 | | |
| 17 | -5.4300 | 5.7183 | | |
| 18 | -5.4640 | 5.7541 | | |
| 19 | -5.4990 | 5.7910 | | |
| 20 | -5.5400 | 5.8341 | | |
| 21 | -5.6210 | 5.9194 | | |
| continuum | -5.6400 | 5.9368 | | |

Из приведенной в таблице 3 информации видно, что первые десять уровней в обеих оценках близки по своему значению, а далее в оценке JENDL приводится континуум уровней. В оценке ENDF/B уровни приводятся вплоть до энергии 5.621 МэВ, а начиная с 5.64 МэВ приводится континуум уровней.

На рисунке 7 приводятся сечения неупругого рассеяния нейтронов для первых пяти уровней.

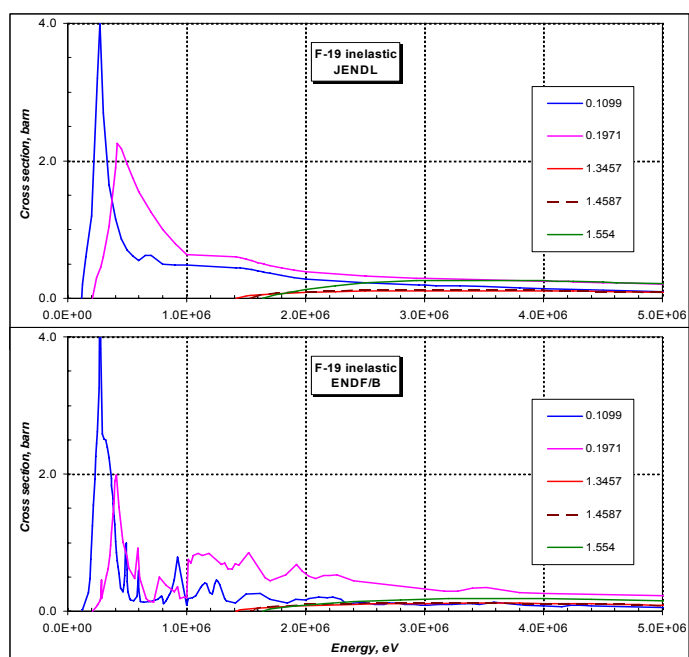


Рисунок 7 – Сечение неупругого рассеяния F-19 для отдельных уровней.

Из рисунка 7 видно, что основной вклад в сечение неупругого рассеяния дают первые два уровня с энергией $E=0.110$ МэВ и $E=0.197$ МэВ.

Сравнение оцененных значений сечения неупругого рассеяния для указанных уровней с имеющимися экспериментальными данными показано на рисунке 8 и 9 соответственно.

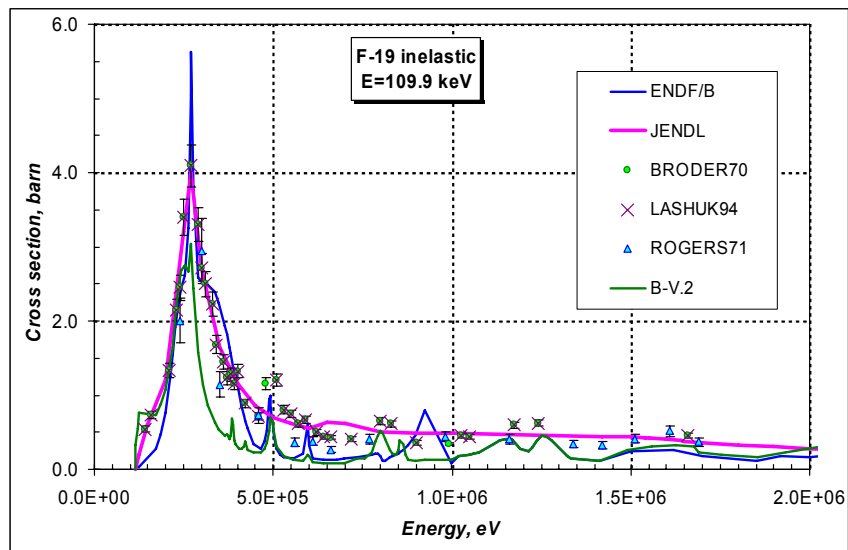


Рисунок 8 - Сечение неупругого рассеяния F-19 для уровня E=109.9 кэВ

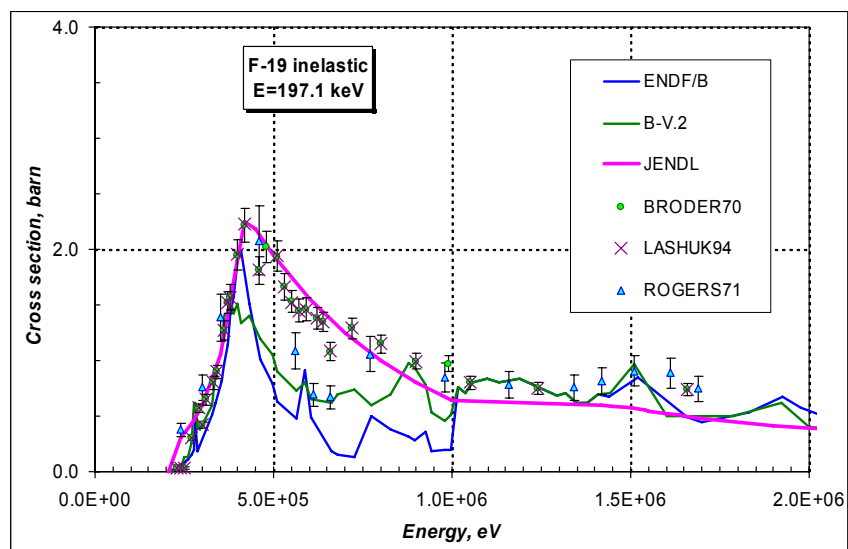


Рисунок 9 - Сечение неупругого рассеяния F-19 для уровня E=197.1 кэВ

Из приведенного на рисунках 8 и 9 сравнения видно, что эксперимент Лашука (1994) является подтверждением экспериментальных данных полученных группой Бродера ранее в 1970 году. Поэтому, имеется два независимых эксперимента, лучшее согласие с которыми, наблюдается у оценки JENDL.

Версия VIIb2 оценки ENDF/B для первого уровня улучшила согласованность с экспериментом по сравнению с версией -V.2. А для второго уровня наблюдается даже ухудшение с имеющимися экспериментальными данными.

Аналогичная картина согласованности сечений неупругого рассеяния нейтронов на F-19 с имеющимися экспериментальными данными наблюдается и для суммарного сечения неупругого рассеяния. Сравнение показано на рисунке 10.

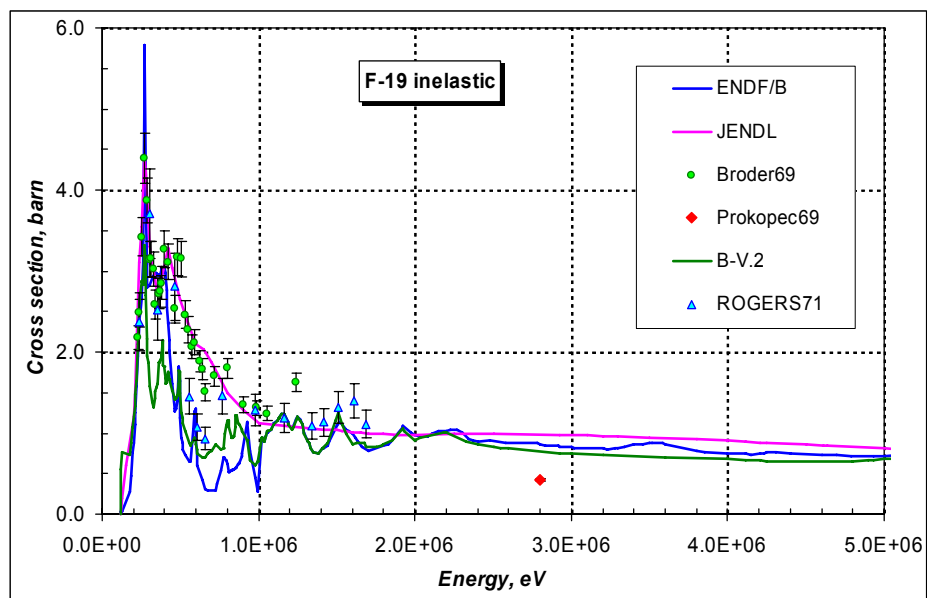


Рисунок 10 - Сечение неупругого рассеяния F-19.

Выводы

Неупругое рассеяние нейтронов на фторе, в целом, лучше описывается в оценке JENDL-3.3, поскольку она согласуется с имеющимися экспериментальными микроданными.

4. Заключение

4.1 Выводы

На основании анализа основных нейтронных реакций на F-19 предлагается в РОСФОНДе использовать оценку T.Sugi (1989 г.), присутствующую в JENDL-3.3.

4.2. Автор отбора оцененных данных:

Кощев В.Н.

10. НЕОН

Неон имеет три стабильных изотопа и ни одного долгоживущего радиоактивного. Поскольку неон в ядерной технике не используется, ни в одной из библиотек оцененных нейтронных данных неон содержится в полном файле нейтронных данных для природного неона или его стабильных изотопов. Имеются лишь файлы, содержащие данные о сечениях нейтронных реакций, ведущих к изменению ядра-мишени. Наиболее “свежие” этих файлов представлены в библиотеке EAF-2003.

10.1. Неон-20

Содержание в естественной смеси 90.48 ат%

Заключение

В библиотеку РОСФОНД включен файл данных из EAF-2003, не содержащий данных о полном сечении и сечениях упругого и неупругого рассеяния. Заметим, что резонансные параметры неона-20 известны до 5.1 МэВ; достаточно хорошо известна и схема уровней этого изотопа. Таким образом, при необходимости отмеченная неполнота файла данных может быть устранена.

10.2. Неон-21

Содержание в естественной смеси 0.27ат%

Заключение

В библиотеку РОСФОНД включен файл данных из EAF-2003, не содержащий данных о полном сечении и сечениях упругого и неупругого рассеяния. Заметим, что резонансные параметры неона-21 известны до 3.4 МэВ; достаточно хорошо известна и схема уровней этого изотопа. Таким образом, при необходимости отмеченная неполнота файла данных может быть устранена.

10.3. Неон-22

Содержание в естественной смеси 9.25ат%

Заключение

В библиотеку РОСФОНД включен файл данных из EAF-2003, не содержащий данных о полном сечении и сечениях упругого и неупругого рассеяния. Заметим, что резонансные параметры неона-22 известны до 2.7 МэВ; достаточно хорошо известна и схема уровней этого изотопа. Таким образом, при необходимости отмеченная неполнота файла данных может быть устранена.

Автор рекомендации

В.Кощев.

11.НАТРИЙ

Природный натрий содержит только один изотоп – натрий-23.

В реакторах с натриевым охлаждением за счет реакции (n,2n) нарабатывается долгоживущий (2.6 года) натрий-22. Содержание этого радионуклида в натрии определяется не только его накоплением, но и выгоранием. Данные для этого радионуклида также помещены в РОСФОНД.

11.1. Натрий-22

Имеется только одна полная оценка нейтронных данных, пригодная для решения задач расчета переноса нейтронов, выполненная в 1985 г. и включенная в последнюю версию европейской библиотеки оцененных ядерных данных JEFF-3.1. Кроме того, существуют две оценки отдельных сечений из активационных библиотек ADL-3 и EAF-99. В дальнейшем будет проведено сравнение лишь тех парциальных сечений, которые имеет смысл сравнивать. Так, например, необходимости в сравнении оценок сечения полного взаимодействия, сечения упругого рассеяния и сечений на отдельных уровнях неупругого рассеяния нет, поскольку существует лишь одна оценка этих сечений.

1. Общие характеристики

1.1. $Z=11$

1.2. $A=21.994\ 436\ 425$

1.3. $A_{wr}=21.805\ 493\ 660$

1.4. Содержание в естественной смеси: - отсутствует

1.5. Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт *) |
|-----|----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|
| 4 | (n,n') | -0.58300 | 0.60974 | |
| 16 | (n,2n) | -10.5840 | 11.0696 | Na-21 (22.5s) |
| 22 | (n,na) | -10.5180 | 11.0000 | F-18 (1.83h) |
| 28 | (n,np) | -6.69310 | 7.0000 | Ne-21 |
| 32 | (n,nd) | -11.2760 | 11.7930 | Ne-20 |
| 102 | (n, γ) | 12.4200 | 0.0 | Na-23 |
| 103 | (n,p) | 3.62500 | 0.0 | Ne-22 |
| 104 | (n,d) | -3.82460 | 4.0000 | Ne-21 |
| 105 | (n,t) | -5.01790 | 5.24800 | Ne-20 |
| 107 | (n,a) | 1.95000 | 0.0 | F-19 |
| 108 | (n,2a) | -2.06400 | 2.1590 | N-15 |
| 111 | (n,2p) | -11.6410 | 12.1750 | F-21(4.158s) |

1.6. Схема уровней:

| MT | LEVEL ENERGY (MEV) | SPIN-PARITY |
|-----------|--------------------|-------------|
| | 0.0 | 3+ |
| 51 | 0.58303 | 1+ |
| 52 | 0.65700 | 0+ |
| 53 | 0.89089 | 4+ |
| 54 | 1.52806 | 5+ |
| 55 | 1.9369 | 1+ |
| 56 | 1.9518 | 2+ |
| 57 | 1.9838 | 3+ |
| 58 | 2.2115 | 1- |
| 59 | 2.5715 | 2- |
| 60 | 2.9689 | 3+ |
| 61 | 3.0596 | 2+ |
| 91 (cont) | 3.3647 | |

1.7. Радиоактивность: тип распада: β^+ .

1.8. $T_{1/2}$ – 2.6019 лет.

1.9. Средняя энергия позитронов – 195.7 кэВ,

1.10. Средняя энергия распада γ – квантов – 2198.9 кэВ, из которых 1274.5 кэВ приходится на энергию γ – квантов перехода с 1-го уровня ^{22}Ne , остальное – энергия фотонов, возникающих при аннигиляции позитронов.

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 3^+$;

2.2. Радиус рассеяния: $R = 0.570 \cdot 10^{-12}$ см.

2.3. Область резонансных энергий.

Имеется только одна оценка резонансных параметров, используемая в библиотеке JEFF-3.1 (JEFF-3.0 <- JEF-2.2 <- RCN-2 (1985)).

Резонансная область распространяется до 15 кэВ. В ней содержится только один резонанс, параметры которого определены по данным Гледенова (1982), не содержащихся в базе данных EXFOR.

Область неразрешенных резонансов простирается от 15 кэВ до 100 кэВ. Силовые функции приняты из расчетов по оптической модели для натрия-23. Среднее расстояние между уровнями принято равным 30.8 кэВ. Захватные ширины для s-резонансов равны 1 эВ; для p-резонансов – 5.4 эВ. В файле MF=3 содержатся «плавные подложки» к сечению упругого рассеяния и радиационного захвата, имеющие отрицательные знаки и составляющие при энергии 0.0253 эВ -10.86 и -39.9 б соответственно. Сечения реакций (n,p) и (n, α) целиком определяются «плавными подложками», которые в этих случаях, разумеется положительны. Подложка к полному сечению, основной вклад в который дает реакция (n,p), также положительна.

3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)

Энергетические зависимости сечений реакций взаимодействия нейтронов с натрием-22 показаны на рис. 1 и 2.

Поскольку имеется только одна полная оценка нейтронных данных, для задач расчета переноса нейтронов и две оценки отдельных сечений из активационных библиотек ADL-3 и EAF-99, то в дальнейшем будет проведено сравнение лишь тех

парциальных сечений, которые имеет смысл сравнивать. Так, например, необходимости в сравнении сечения полного взаимодействия, сечения упругого рассеяния и сечений на отдельных уровнях неупругого рассеяния нет, поскольку они присутствуют в единственном исполнении.

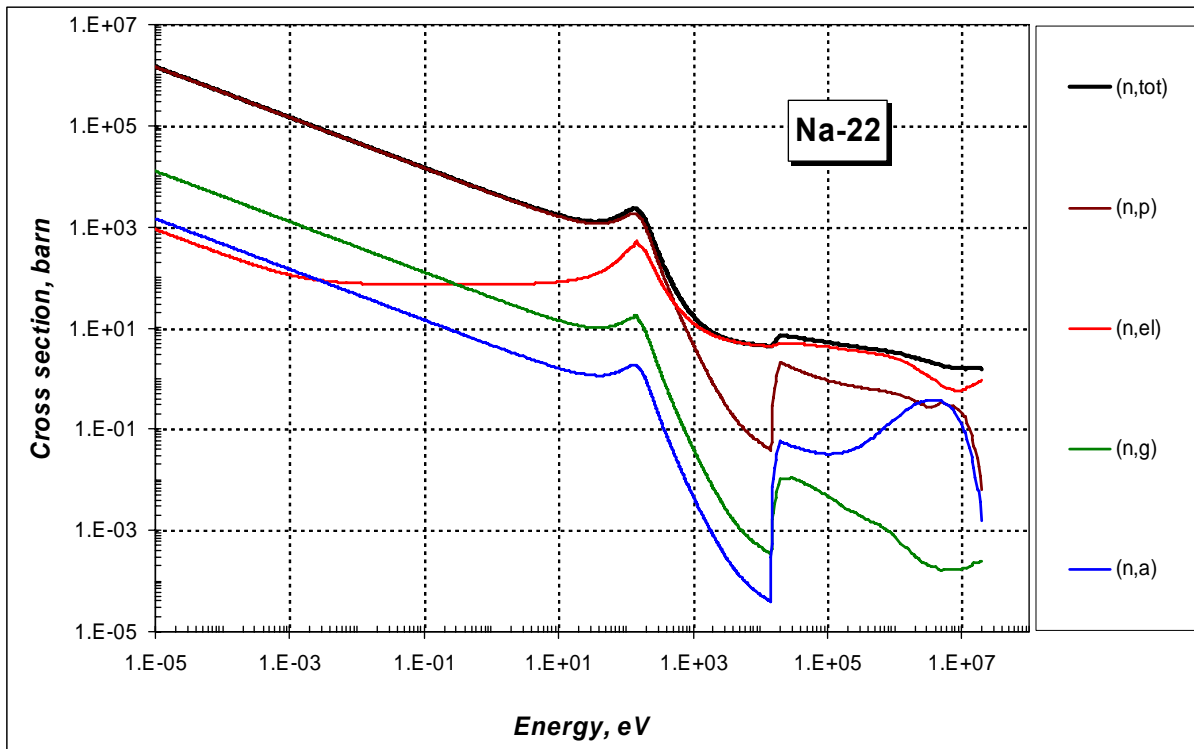


Рисунок 1 - Сечения экзотермических реакций (согласно JEFF-3.1).

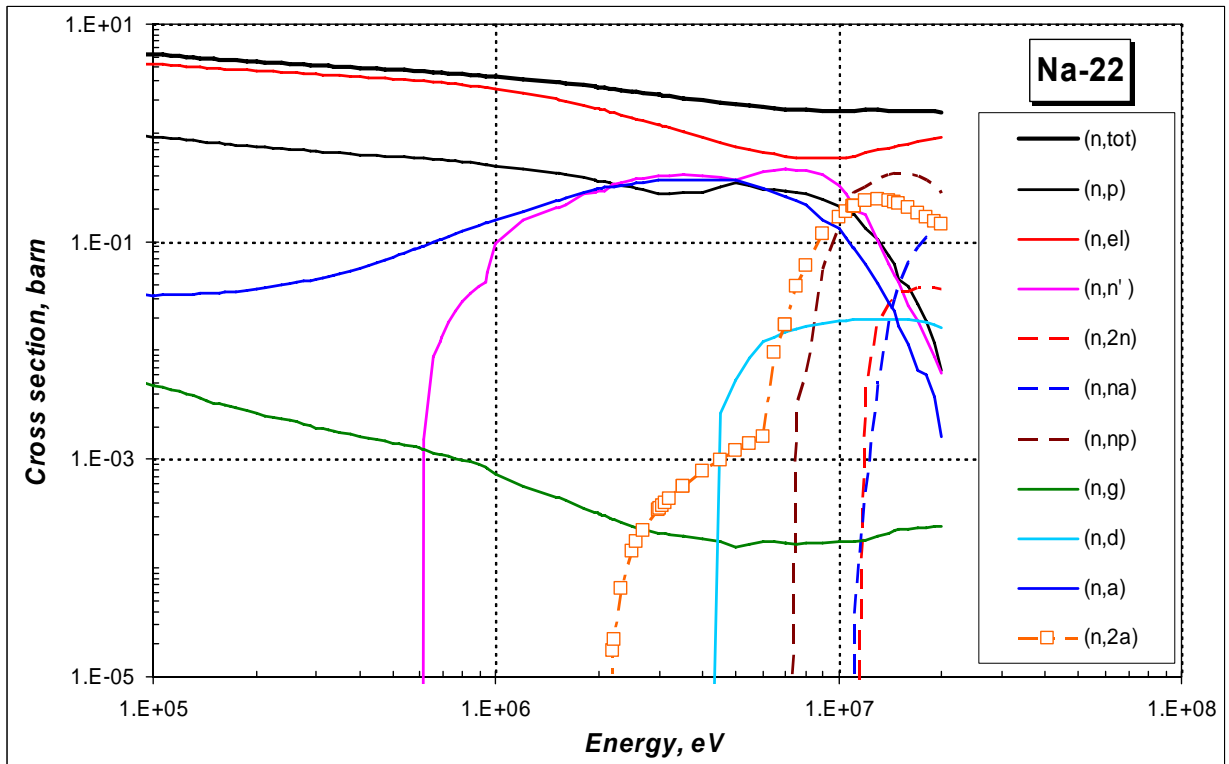


Рисунок 2 - Сечения пороговых реакций (согласно JEFF-3.1).

3.1. Сечения экзотермических реакций

В области тепловых сечений основным процессом является поглощение нейтрона с испусканием протона - **реакция (n,p)** - сечение которой практически совпадает с полным сечением взаимодействия.

На рисунке 3 приводится сравнение оцененных значений сечения реакции (n,p) с немногочисленными экспериментальными данными.

Из приведенного сравнения видно, что все оцененные кривые согласуются между собой лучше, чем совокупность экспериментальных данных. Из совокупности экспериментальных данных только результаты Квитека81 приводятся как сечение реакции (n,p) в тепловой точке. Остальные данные - сечение активации. Но поскольку в тепловой точке преобладающим является процесс (n,p), а погрешности измерения меньше чем величины сечений других экзотермических реакций, результаты измерения сечения активации соотнесены с сечением реакции (n,p).

Все оцененные кривые ориентируются на оценку сечения активации Мухабхаба-81, которая составляет $\sim (29 \pm 1) \cdot 10^3$ барн.

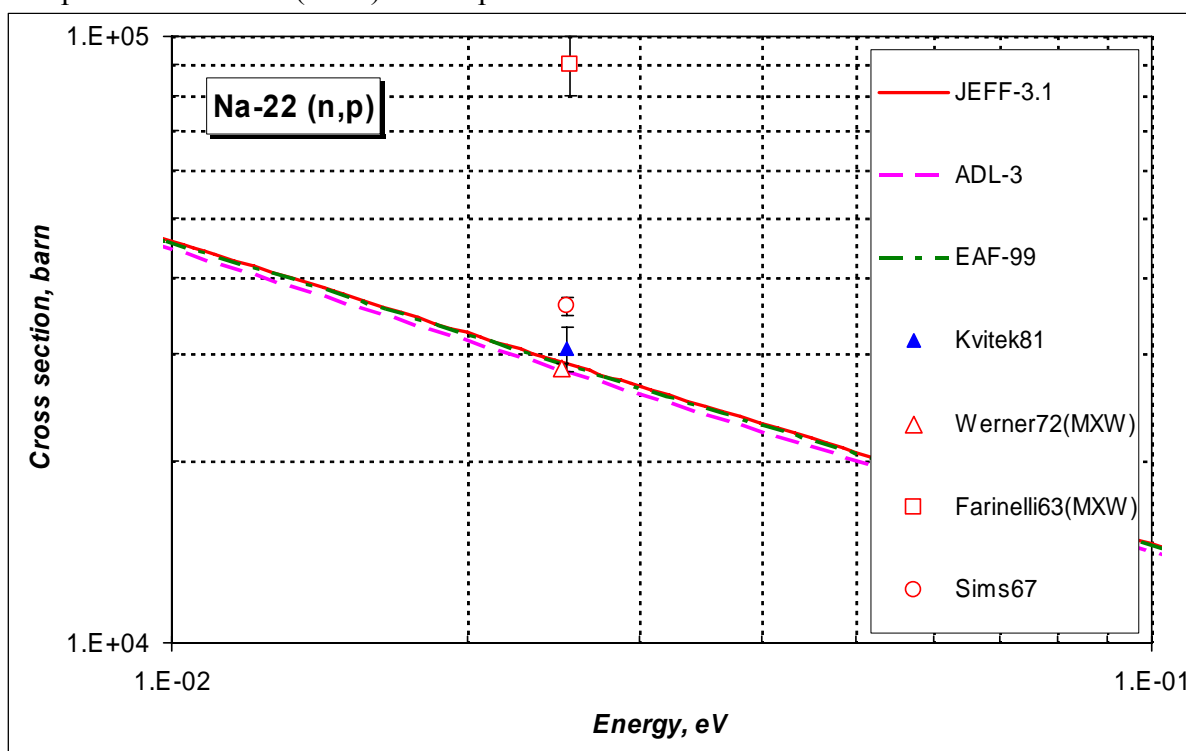


Рисунок 3 – Сечение реакции (n,p) Na-22 в тепловой области энергий.

На рисунке 4 показано сравнение оцененных кривых в диапазоне энергий до 20 МэВ с экспериментальными данными Квитека81.

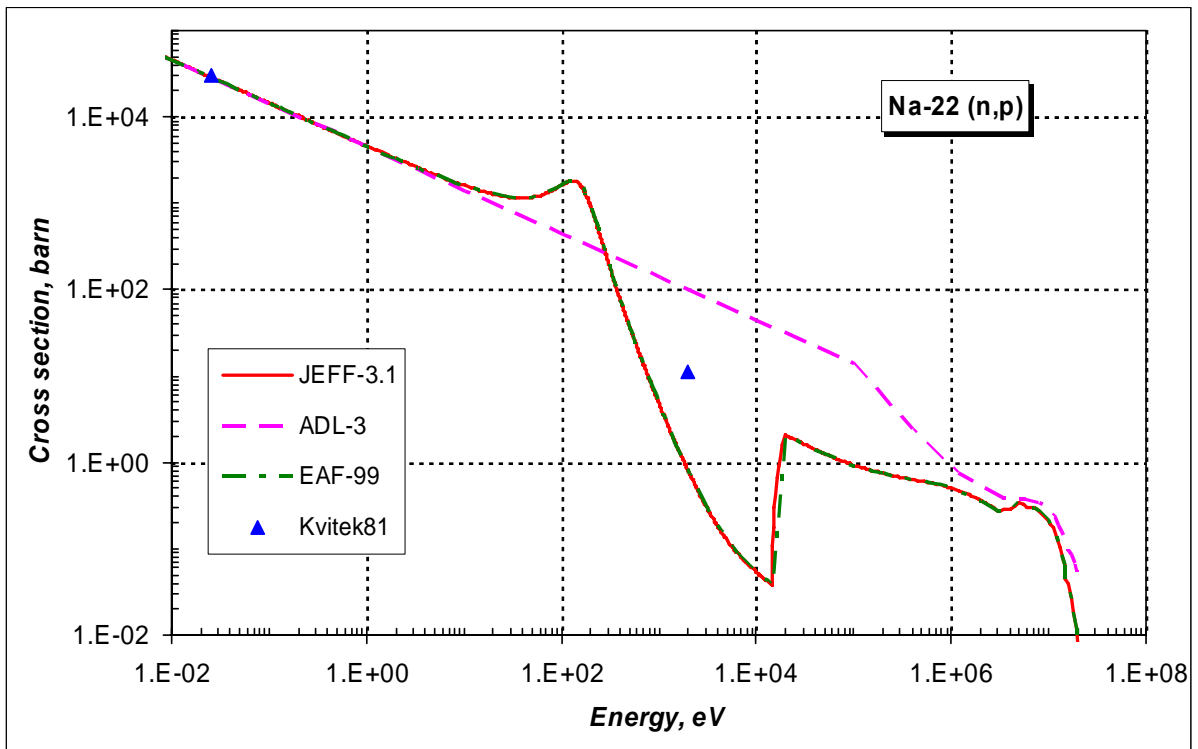


Рисунок 4 – Сечение реакции (n,p) Na-22 в области энергий до 20 МэВ.

Оцененные сечения радиационного захвата на натрия-22, принятые в различных библиотеках, хорошо согласуются между собой, вероятно, благодаря полному отсутствию экспериментальных данных (см. рисунок 5).

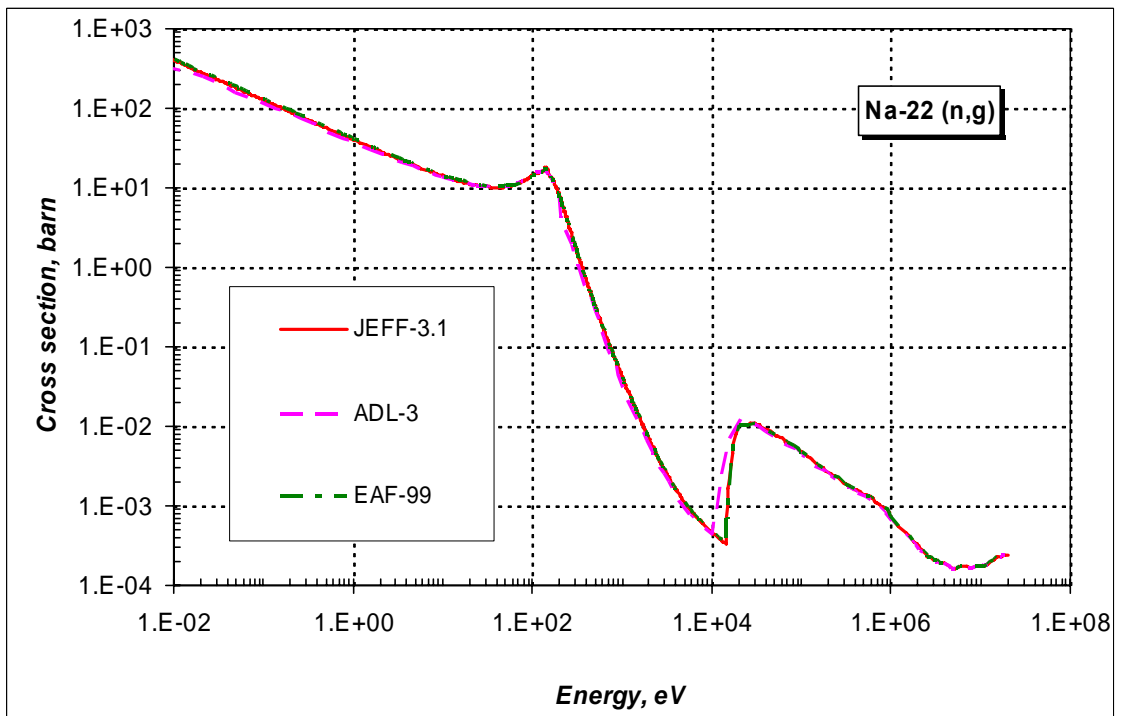


Рисунок 5 – Сравнение различных оценок сечения радиационного захвата Na-22.

Сечение реакции (n,a) на натрия-22 – еще одна экзотермическая реакция. Сравнение различных оценок приведено на рисунке 6.

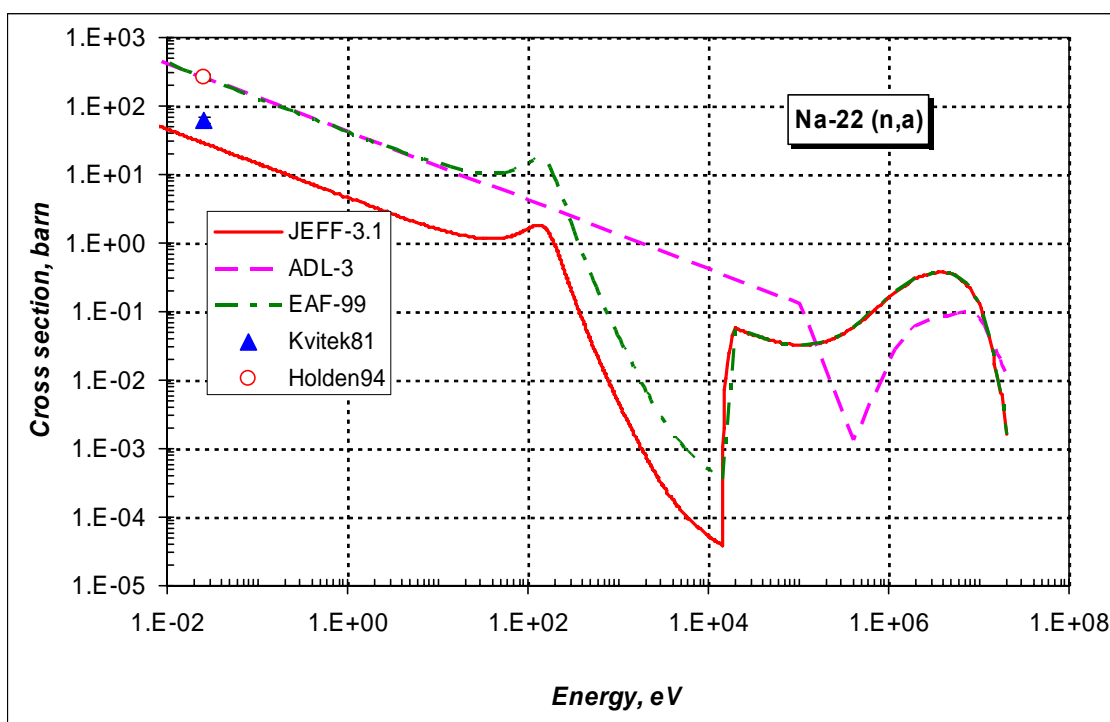


Рисунок 6 – Сравнение различных оценок сечения реакции (n,a) на Na-22.

Видно, что экспериментальная точка Квитка81 лежит ближе к оценке JEFF-3.1. В библиотеке EXFOR для данных Квитка приводится измеренное отношение между реакциями (n,a)/(n,p) = 2.0E-3. Откуда и получено экспериментальное значение сечения реакции (n,a) в тепловой точке. Н.Е. Холден приводит другое значение величины сечения реакции (n,a) в тепловой точке, на которое были отнормированы сечения в библиотеках ADL-3 и в EAF-99.

Тепловые сечения и резонансный интеграл:

В таблице приводится сравнение характеристик сечений в тепловой и в резонансной области энергий рассчитанных по программе INTER из пакета программ ENDF Utility Codes (release 6.13).

Таблица 1 – Сравнение тепловых значений сечений и резонансных интегралов I_x основных экзотермических реакций.

| | σ_p , барн | I_p , барн | σ_γ , барн | I_γ , барн | σ_a , барн | I_a , барн |
|----------|-------------------|--------------|------------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| JEFF-3.1 | 2.88E+4 | 1.47E+4 | 252. | 128. | 28.1 | 14.7 |
| ADL-3 | 2.80E+4 | 1.68E+4 | 231. | 260. | 260. | 156. |
| EAF-99 | 2.87E+4 | 1.47E+4 | 260. | 132. | 260. | 133. |

Из приведенного в таблице сравнения оцененных сечений видно, что количественно и качественно отличается только сечение реакции (n,a), которое в тепловой области на два порядка меньше сечения реакции (n,p).

3.2. Сечения пороговых реакций

Экспериментальных данных по пороговым реакциям в библиотеке EXFOR нет, поэтому ниже на рисунках 7-10 будут графически показаны сравнения имеющихся оцененных сечений, полученных расчетным путем по разным программам.

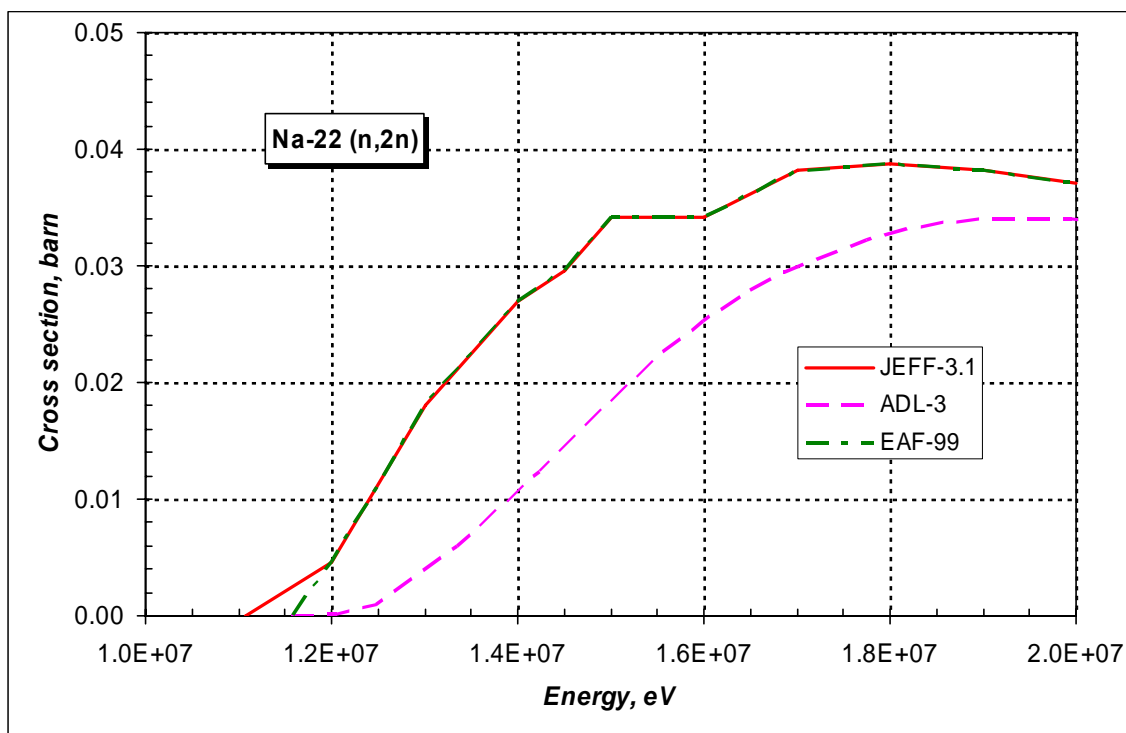


Рисунок 7 – Сравнение различных оценок сечения реакции $(n,2n)$ на Na-22.

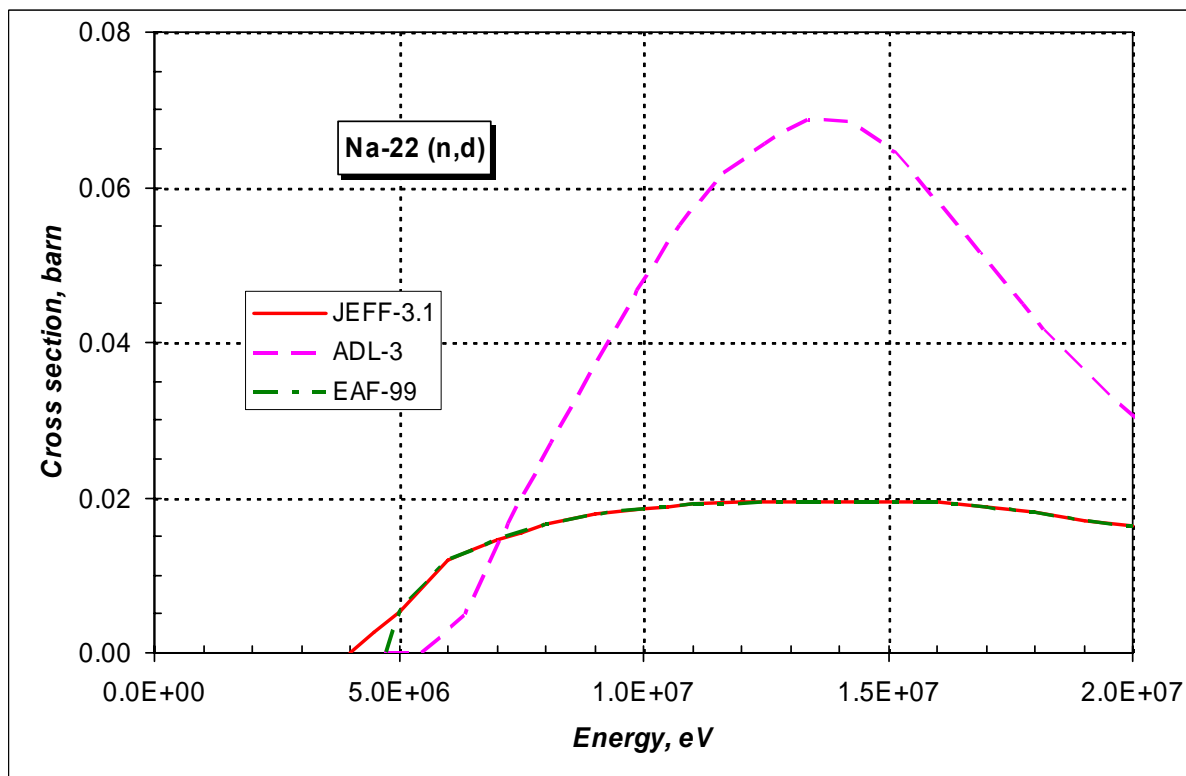


Рисунок 8 – Сравнение различных оценок сечения реакции (n,d) на Na-22.

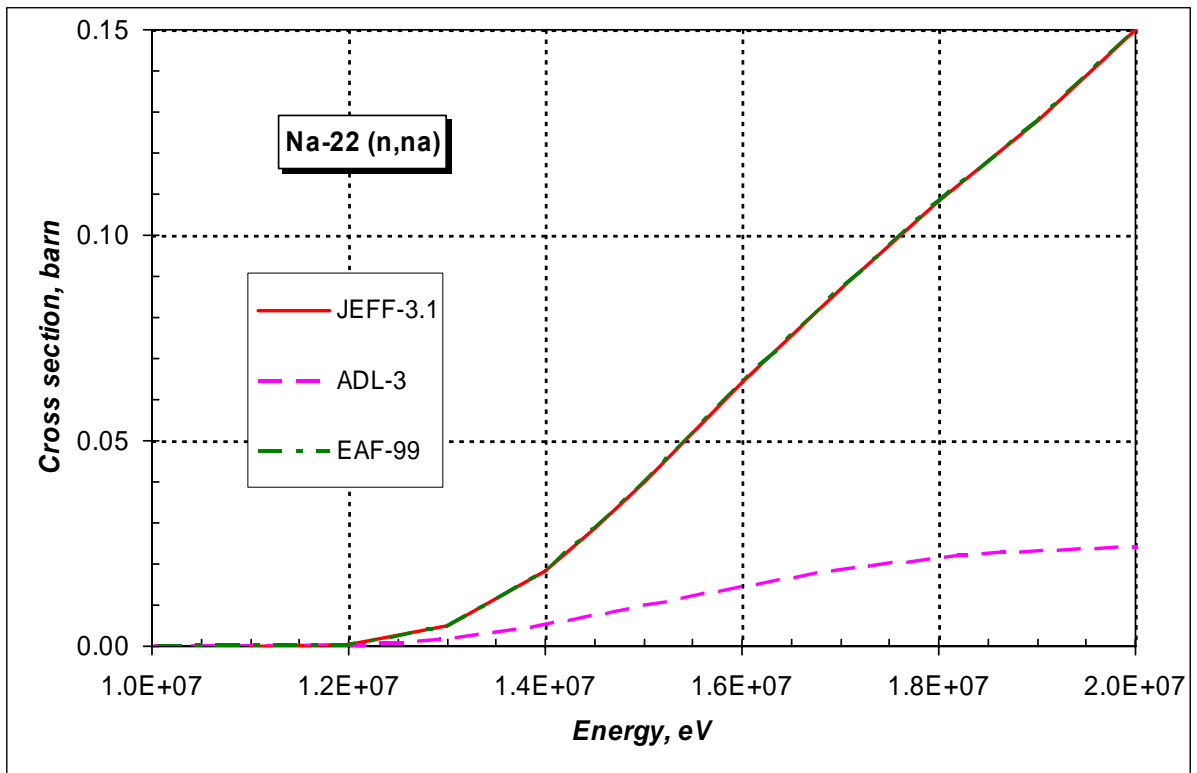


Рисунок 9 – Сравнение различных оценок сечения реакции (n,na) на Na-22.

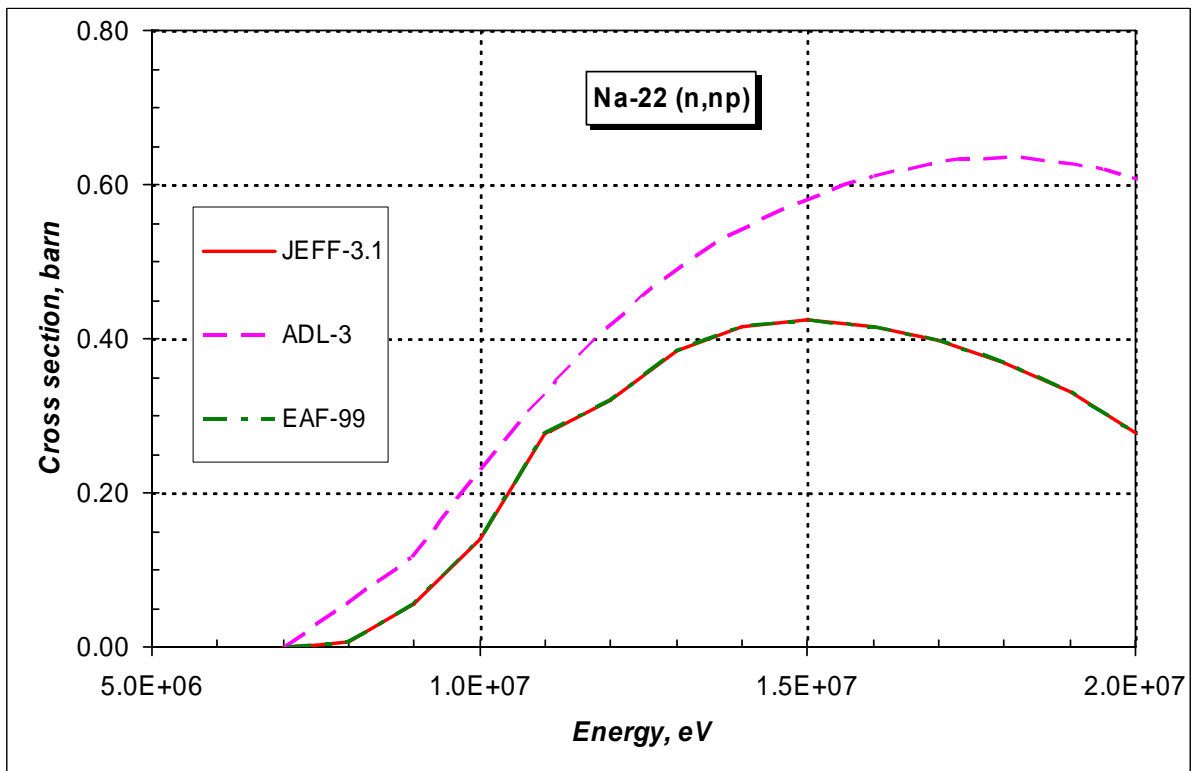


Рисунок 10 – Сравнение различных оценок сечения реакции (n,np) на Na-22.

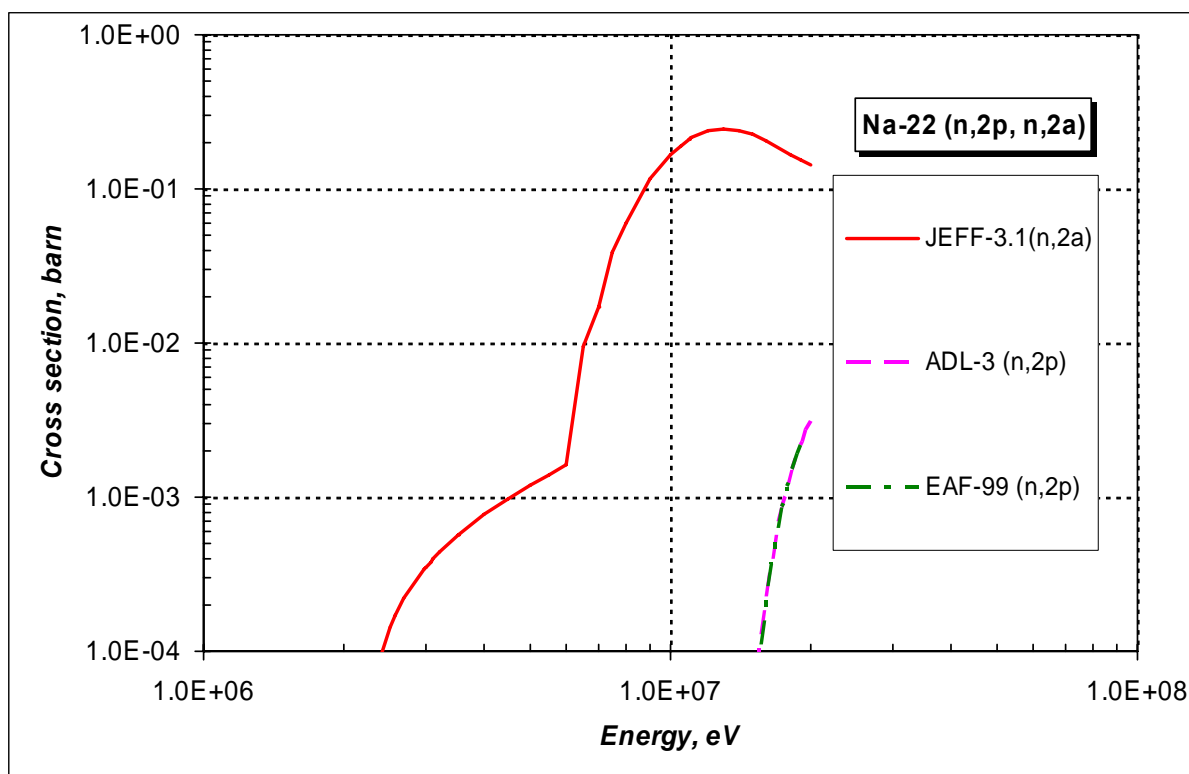


Рисунок 11 – Сравнение различных оценок сечения реакции (n,2a и n,2p) на Na-22.

Из рисунков 7-10 видно, что в EAF-99 и JEFF-3.1 используются одни и те же оцененные сечения пороговых реакции. В ADL-3 пошли своим путем. Их оценка заметно отличается от европейских расчетов.

На рисунке 11 приведена энергетическая зависимость сечений (n,2a) и (n,2p). Причем сечение реакции (n,2a) присутствует только в библиотеке JEFF-3.1. А оно на три порядка (!) больше, чем сечение в максимуме реакции (n,2p). Что это – ошибка в JEFF-3.1 или простой недосмотр в EAF-99 (=ADL-3)?

4. Энерго-угловые распределения

Для описания углового рассеяния нейтронов при упругом рассеянии нейтронов используется разложение по полиномам Лежандра.

Остальные процессы с испусканием нейтронов предполагаются изотропными в системе центра масс.

Спектры испускаемых нейтронов описываются с помощью спектра испарения.

5. Заключение

В библиотеку РОСФОНД рекомендуется включить оцененные нейтронные данные из библиотеки JEFF-3.1. В дальнейшем этот файл при нужде может быть расширен за счет добавления данных о сечениях реакций (n,2p), (n,t) и (n,nd), например, из EAF-99.

5.2. Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle\sigma\rangle$ на спектре Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$ |
|-------------------------|-----------------------------|-------------|--|
| Упругое рассеяние | 7.420 барн | 961.3 барн | 2.045 барн |
| Рад. захват | 252.1 барн | 128.4 барн | 0.773 мбарн |
| Реакция (n,p) | 28826. барн | 14666. барн | 445.9 мбарн |
| Реакция (n,d) | - | - | 0.833 мбарн |
| Реакция (n, α) | 28.82 барн | 14.73 барн | 229.9 мбарн |
| Реакция (n, 2α) | - | - | 16.04 мбарн |
| Реакция (n, $2n$) | - | - | 0.010 мбарн |

5.3. Автор обоснования оцененных данных

Кошечев В.Н.

11.2. Натрий-23

1. Общие характеристики

$Z=11$

$A=22.989\ 769\ 280\ 9 \pm 0.000\ 000\ 002\ 9$

$A_{wr}=22.792\ 276\ 129\ 6 \pm 0.000\ 000\ 003\ 0$

Содержание в естественной смеси: 100. вес%;

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|----------------|------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | (n,n') | -0.4399±0.0001 | 0.4592 | |
| 16 | (n, $2n$) | -12.4178±0.0001 | 12.9626 | Na-22 (2.6 y) |
| 22 | (n,na) | -8.7931±0.0001 | 9.1789 | F-19 |
| 28 | (n,np) | -10.4678±0.0001 | 10.9271 | Ne-22 |
| 102 | (n, γ) | 6.9596±0.0001 | 0.0 | Na-24(14.951h) |
| 103 | (n,p) | -3.5965±0.0001 | 3.7543 | Ne-23(37.24 s) |
| 104 | (n,d) | -6.5655±0.0001 | | Ne-22 |
| 105 | (n,t) | -10.6710±0.0001 | | Ne-21 |
| 107 | (n,a) | -3.8665±0.0001 | 4.0362 | F-20(11.07 s) |

Схема уровней: (согласно оценке JENDL)

| MT | LEVEL ENERGY (MEV) | SPIN-PARITY |
|----|--------------------|-------------|
| | 0.0 | 3/2+ |
| 51 | 0.439899 | 5/2+ |
| 52 | 2.0764 | 7/2+ |
| 53 | 2.3909 | 1/2+ |
| 54 | 2.6398 | 1/2- |

| | | |
|-----------|---------|-------|
| 55 | 2.7037 | 9/2+ |
| 56 | 2.9824 | 3/2+ |
| 57 | 3.6783 | 3/2- |
| 58 | 3.8480 | 5/2- |
| 59 | 3.9147 | 5/2+ |
| 60 | 4.4320 | 1/2+ |
| 61 | 4.7756 | 7/2+ |
| 62 | 5.3800 | 3/2+ |
| 63 | 5.5360 | 11/2+ |
| 64 | 5.7410 | 3/2+ |
| 65 | 5.7660 | 5/2+ |
| 66 | 5.9310 | 1/2- |
| 67 | 5.9670 | 3/2- |
| 68 | 6.0430 | 1/2- |
| 69 | 6.1170 | 11/2+ |
| 70 | 6.1910 | 11/2+ |
| 71 | 6.2360 | 13/2+ |
| 72 | 6.3080 | 1/2+ |
| 73 | 6.3506 | 9/2- |
| 74 | 6.5770 | 5/2+ |
| 75 | 6.6170 | 9/2+ |
| 76 | 6.7340 | 3/2+ |
| 77 | 6.8680 | 5/2+ |
| 91 (cont) | 6.89999 | |

Радиоактивность: не радиоактивен

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 3/2^+$;

2.2. Радиус рассеяния: $R = 0.520 \cdot 10^{-12}$ см.

2.3. Область разрешенных резонансов.

К настоящему времени опубликованы три полных оценки резонансных параметров натрия:

- Мухабхаба, приведенная в известном справочнике BNL-325¹;
- Ларсона, включенная в библиотеку ENDF/B-V.2 и во все версии библиотеки ENDF/B-VI;
- Шибата, включенная во все версии библиотеки JENDL-3.

Кроме того, существует оценка положений резонансов и их нейтронных ширин, выполненная Моксоном, с учетом, как предыдущих измерений пропускания, так и его собственных, выполненных с высоким разрешением.

В российской библиотеке ФОНД-2.2. используется оценка Ларсона, рекомендованная к использованию от 600эВ до 500кэВ (ниже 600 эВ сечения задаются поточечно. Во всей резонансной области к сечению, рассчитанному по резонансным параметрам добавляется небольшая, знакопеременная подложка сечения рассеяния). Экспериментальная информация, положенная в основу этой оценки, та же, что и у Мухабхаба, однако методика обработки данных в этой оценке представляется несколько более обоснованной (анализ проводился на основе многоуровневой резонансной формулы). Резонансные энергии и нейтронные ширины определены, главным образом, на основе работ Зельцера и Фирка и Ларсона, Харви и Хилла², радиационные ширины – на основе данных Масгроува, Алена и Маклина³. Оценка параметров первого резонанса проводилась с учетом результатов и ряда других работ.

¹ S.F.Mughabghab et al, Neutron Cross Sections, v.1, part A. Academic Prass 1981.

² Larson, Harvey, Hill ORNL-TM-5614, 1976

³ Musgrove, Allen, Macklin, preprint ORNL, 1977

Во всех версиях европейских библиотек (JEF, JEFF) используется оценка Шибата, рекомендованная к использованию от 10-5 эВ до 350 эВ (ниже 250 кэВ к сечению, рассчитанному по резонансным параметрам, добавляется небольшая плавная подложка сечения рассеяния). В этой оценке за основу принимались параметры, рекомендованные Мухабхабом, откорректированные для лучшего описания хода полного сечения. Измеренного, видимо, в работе² (ссылок на другие измерения в описании оценки не содержится). Таким образом, новая экспериментальная информация к оценке параметров Шибата не привлекалась.

Изложенные выше соображения не дают оснований для перехода от уже принятой в российской библиотеке оценки Ларсона к оценке Шибата в резонансной области энергий.

В таблице 1 приведено сравнение резонансных параметров для всех упомянутых двух оценок.

Из приведенного сравнения видно, что оценки, принятые в библиотеках оцененных нейтронных данных, содержат меньшее число резонансов, чем рекомендуется Мухабхабом. Не учитывается, разумеется, вклад слабых резонансов. Однако выбор этих слабых резонансов Ларсоном и Шибата различен. Обращает на себя внимание, что Моксон, наблюдает все резонансы, на которые указывает Мухабхаб в области до 300 кэВ (есть даже один дополнительный резонанс при 243 кэВ). Очевидна, таким образом, целесообразность переоценки резонансных параметров натрия. Решающим стимулом к такой переоценке послужило бы измерение сечения захвата в широком диапазоне энергий с использованием современных экспериментальных методик.

На рисунках 1-2 показано, как обе оценки **полного сечения** согласуются с экспериментальными данными в районе первого S-резонанса. Смещение резонанса в сторону низких энергий, имеющее место в оценке Ларсона, подтверждается данными Зельтцера и Рана, тогда как оценка Шибата опирается, видимо, на ранние результаты Линна. На крыльях резонанса оценка Ларсона также выглядит более правдоподобно (см. рис.2).

Сравнение различных оценок резонансных параметров натрия

| Мухабхаб (BNL-325) | | | | | | Ларсон (ENDF/B-VI) | | | | | | (JENDL-3.) | | | | | | Монон90 | | | | |
|--------------------|---|---|---------|-------|-------------|--------------------|---|---|--------|-------|--------------|------------|---|---|---------|-------|--------------|---------|---------|---|----------|-----------|
| Е, кэВ | J | l | Гn | Гγ | gГnГγ/Г | Е, кэВ | J | l | Гn | Гγ | gГnГγ/Г | Е, кэВ | J | l | Гn | Гγ | gГnГγ/Г | Е, кэВ | J | l | Гn | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | -381.4 | 1 | 0 | 2.50 |
| -100.0 | 2 | 0 | | | | | | | | | | -100 | 2 | 0 | 1600 | 0.3 | | | -100.0 | 2 | 0 | 14192.00 |
| 2.850 | 1 | 0 | 676.7 | 0.35 | 0.07 | 2.81 | 1 | 0 | 376.34 | 0.353 | 0.08 | 2.85 | 1 | 0 | 411 | 0.333 | 0.07 | 2.787 | 1 | 0 | 361.40 | |
| 7.617 | | | 0.0 | | | 7.617 | 2 | 1 | 0.0058 | 0.600 | 0.002 | 7.617 | 1 | 1 | 0.00296 | 1 | 0.001 | | | | | |
| 35.380 | 3 | 1 | 1.0 | 0.788 | 0.22 | 35.39 | 1 | 1 | 1.6 | 1.900 | 0.19 | 35.38 | 1 | 1 | 0.549 | 0.788 | 0.07 | 35.295 | 2 | 1 | 1.37 | |
| 53.040 | 2 | 1 | 2016.0 | 1 | 0.36 | 53.22 | 2 | 1 | 1112 | 0.785 | 0.28 | 53.04 | 2 | 1 | 1152 | 1 | 0.36 | 52.973 | 2 | 1 | 1045.00 | |
| 113.800 | | | | 0.216 | | | | | | | | 113.8 | 2 | 2 | 0.144 | 0.216 | 0.03 | 113.427 | 3 | 2 | 0.43 | |
| 117.500 | | | | | | 117.43 | 1 | 1 | 26.8 | 4.230 | 0.78 | | | | | | | 117.348 | 1 | 1 | 24.71 | |
| 131.900 | 0 | 1 | | 1.6 | | | | | | | | 131.9 | 2 | 1 | 1.07 | 1.6 | 0.23 | 131.849 | 3 | 2 | 0.64 | |
| 143.100 | | | | 0.89 | | 143.13 | 0 | 1 | 16.5 | 7.100 | 0.35 | 143.1 | 2 | 1 | 5.48 | 0.89 | 0.27 | 143.068 | 0 | 2 | 18.74 | |
| 190.100 | | | | | | 190.06 | 0 | 2 | 18.2 | 9.300 | 0.44 | | | | | | | 190.034 | 3 | 2 | 2.59 | |
| 200.200 | 1 | 1 | 9566.7 | 4 | 0.86 | 201.15 | 1 | 1 | 4925 | 2.940 | 0.63 | 200.2 | 1 | 1 | 5470 | 4 | 0.86 | 200.997 | 1 | 1 | 4233.00 | |
| 212.600 | 0 | 1 | 4000.0 | 4.9 | 2.45 | 214.3 | 0 | 1 | 1428 | 4.640 | 0.33 | 212.6 | 0 | 1 | 1600 | 4.9 | 0.35 | 213.596 | 0 | 1 | 18635.00 | |
| 236.700 | | | | | | 236.71 | 2 | 2 | 65.2 | 1.590 | 0.55 | | | | | | | 236.772 | 3 | 1 | 43.41 | |
| 237.500 | 2 | 1 | 9632.0 | 1.4 | 0.50 | 239.05 | 2 | 1 | 5349 | 1.200 | 0.43 | 237.5 | 2 | 1 | 5500 | 1.4 | 0.50 | 239.153 | 2 | 1 | 5576.00 | |
| 243.000 | 0 | 1 | 3150.0 | 4.81 | 0.34 | 242.97 | 1 | 0 | 328 | 1.500 | 0.32 | 243 | 0 | 0 | 1790 | 4.610 | 0.33 | 242.806 | 0 | 1 | 426.40 | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 242.994 | 1 | 0 | 361.40 | |
| 298.650 | 2 | 0 | 3500.0 | 1.14 | 0.41 | 298.32 | 2 | 0 | 2038 | 1.020 | 0.36 | 298.65 | 2 | 0 | 2000 | 1.14 | 0.41 | 298.650 | 2 | 0 | 2141.00 | |
| 299.200 | 1 | 1 | 525.0 | 2.6 | 0.55 | 299.41 | 1 | 1 | 130 | 2.560 | 0.54 | 299.2 | 1 | 1 | 300 | 2.6 | 0.55 | 299.543 | 3 | 1 | 60.43 | |
| 305.100 | | | | | | 305.2 | 0 | 2 | 68.3 | 9.700 | 0.61 | | | | | | | 305.408 | 2 | 1 | 18.33 | |
| 380.900 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 384.300 | 1 | 1 | 4526.7 | 12 | 2.56 | | | | | | | 384.3 | 1 | 1 | 500 | 12 | 2.51 | | | | | |
| 393.800 | 1 | 1 | 44566.7 | | | 392.32 | 1 | 1 | 22760 | 9.870 | 2.11 | 393.8 | 1 | 1 | 25500 | 1.2 | 0.26 | 394.939 | 1 | 1 | 27435.00 | |
| 431.300 | 0 | 1 | 1900.0 | 11 | 5.47 | 430.9 | | | 4000 | 5.290 | 0.38 | 431.3 | 0 | 1 | 7600 | 11 | 0.78 | 431.529 | 0 | 1 | 6866.00 | |
| 445.500 | 2 | 2 | 15750.0 | 4.2 | 1.50 | 448.82 | | | 7026 | 3.520 | 0.25 | | | | | | | 449.723 | 2 | 1 | 6710.00 | |
| 468.500 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 495.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 495.839 | 0 | 2 | 535.20 |
| 508.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 510.219 | 4 | 2 | 54.90 |
| 537.000 | 1 | 0 | 61833.3 | 10.6 | 2.27 | 538.57 | 1 | 0 | 62770 | 10.14 | 2.17 | 537.5 | 1 | 1 | 35300 | 10.6 | 2.27 | 539.655 | 1 | 0 | 32164.00 | |
| 564.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 566.108 | 4 | 2 | 107.60 |
| 576.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 584.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 598.000 | 1 | 1 | 42437.5 | 0.8 | 0.18 | 598 | 1 | 1 | 25800 | | | | | | | | | | 597.668 | 1 | 1 | 18636.00 |
| 599.000 | 1 | 1 | | 7 | | | | | | | | | | | | | | | 602.228 | 4 | 2 | 103.50 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 629.906 | 0 | 1 | 263.00 |
| 697.000 | 4 | 2 | | 135 | | 697 | 4 | 2 | 60000 | | | | | | | | | | 686.730 | 3 | 2 | 379.80 |
| | | | | | | 727 | 3 | 2 | 45000 | | | | | | | | | | 715.431 | 2 | 1 | 131420.00 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 710.788 | 3 | 1 | 61594.00 |
| 726.000 | 3 | 1 | 79000.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 753.374 | 3 | 2 | 1000.00 |
| | | | | | | 780 | 4 | 2 | 44000 | | | | | | | | | | 771.392 | 1 | 1 | 5830.00 |
| 780.500 | 4 | 2 | 76300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | 784.266 | 3 | 1 | 32450.00 |
| 911.200 | 3 | 2 | 70200.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 985.100 | 2 | 2 | 28560.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

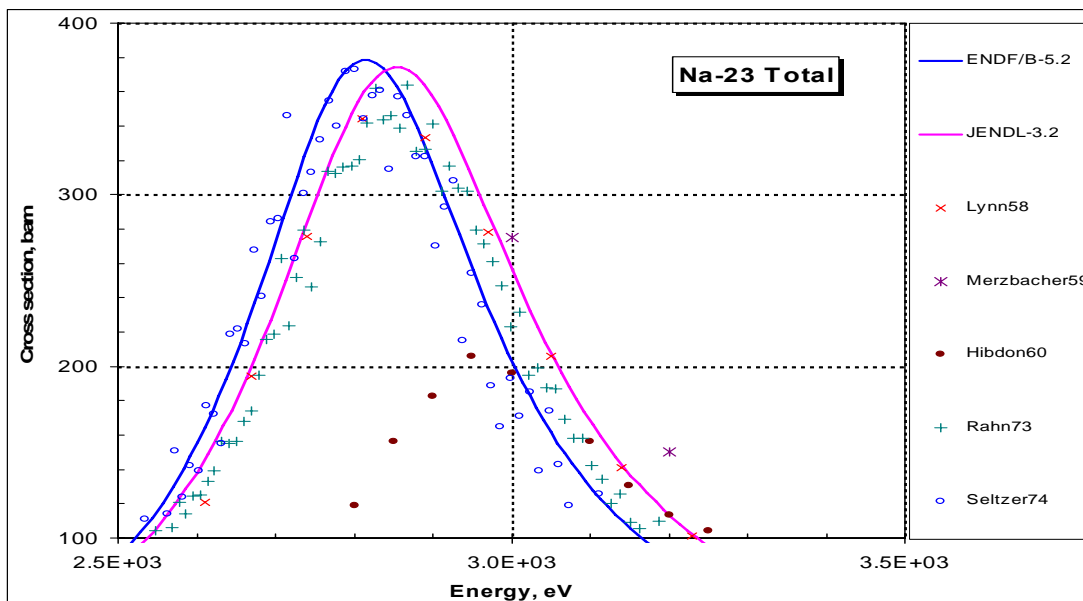


Рисунок 1 – Полное сечение Na-23 в районе максимума первого S-резонанса.

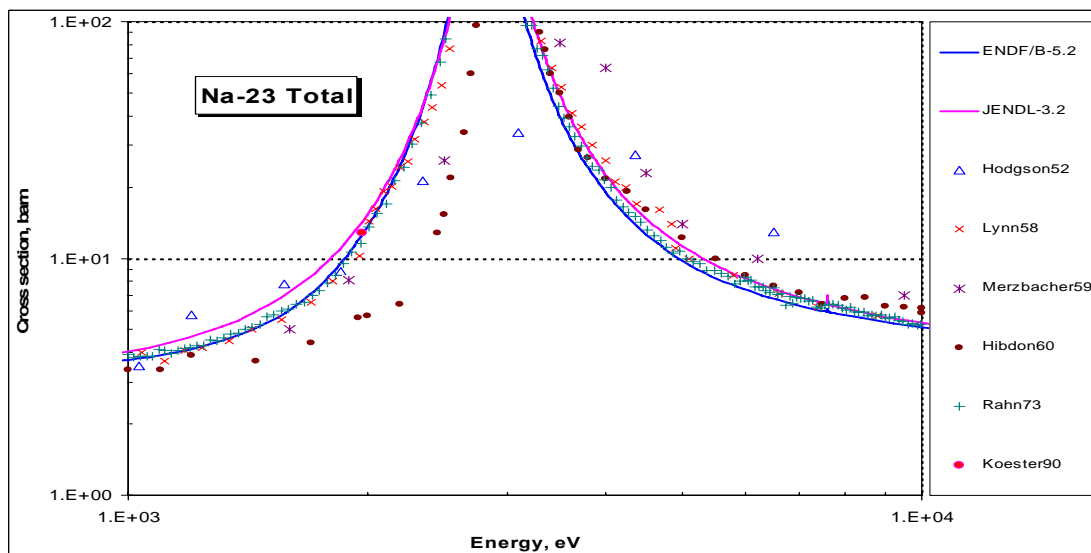


Рисунок 2 – Полное сечение Na-23 в районе первого S-резонанса.

На рисунке 3 показано сравнение оцененных кривых с экспериментальными данными в области энергий от 0.1 до 0.5 МэВ, из которого видна общая картина соответствия экспериментальных данных и оцененных кривых на этом энергетическом участке.

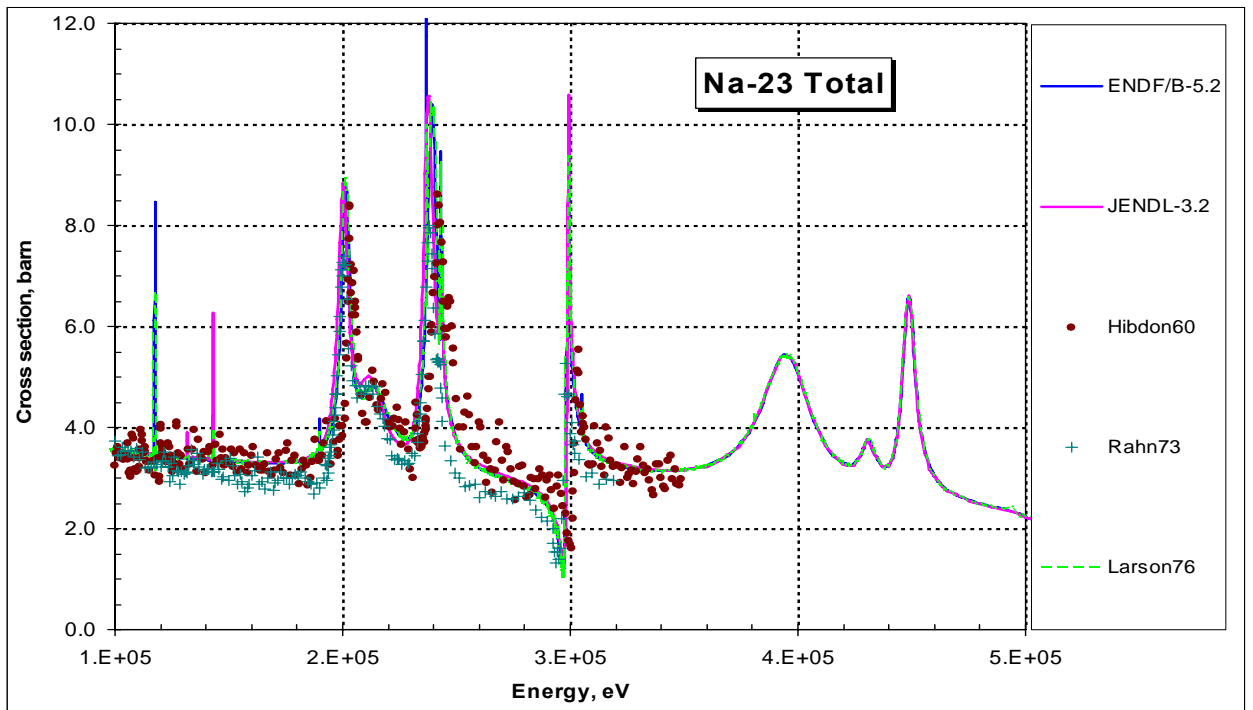


Рисунок 3 – Полное сечение Na-23 в области энергий 0.1-1.0 МэВ.

На рисунках 4 - 6 показано более детальное сравнение оцененных кривых в диапазоне энергий от 0.1 до 0.5 МэВ с наиболее подробными экспериментальными данными Ларсона76, которые взяты за основу в оценке ENDF/B.

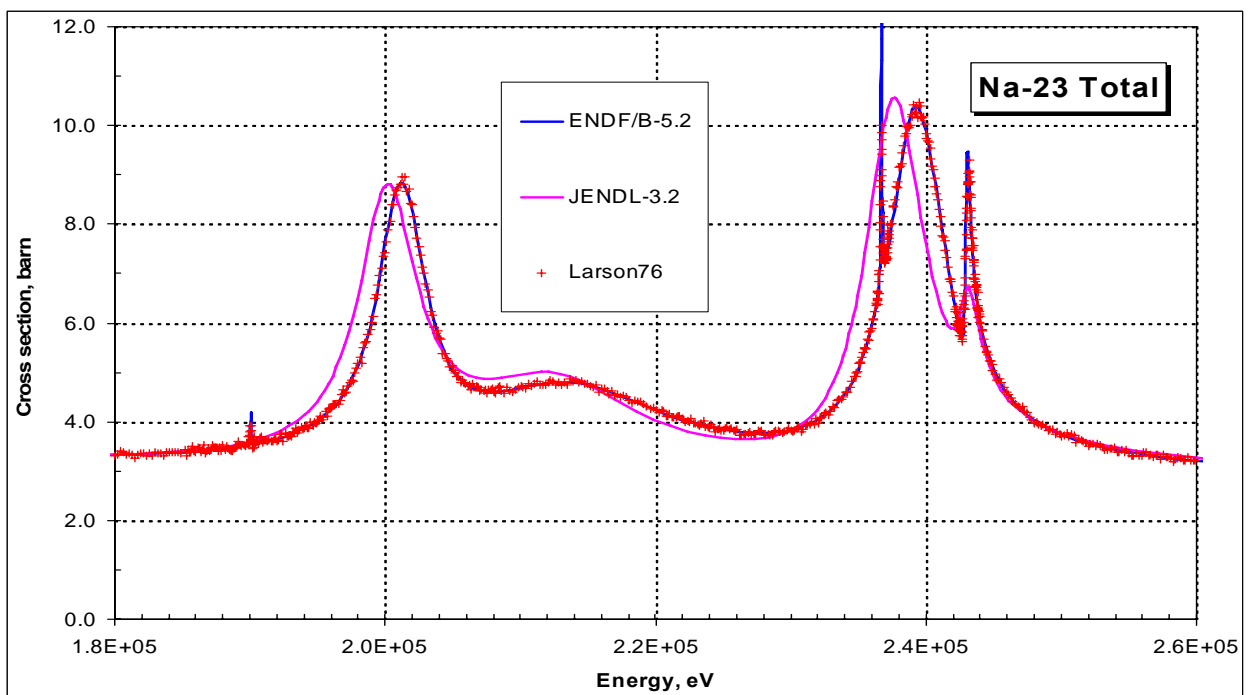


Рисунок 4 – Полное сечение Na-23 в области энергий 0.18-0.26 МэВ.

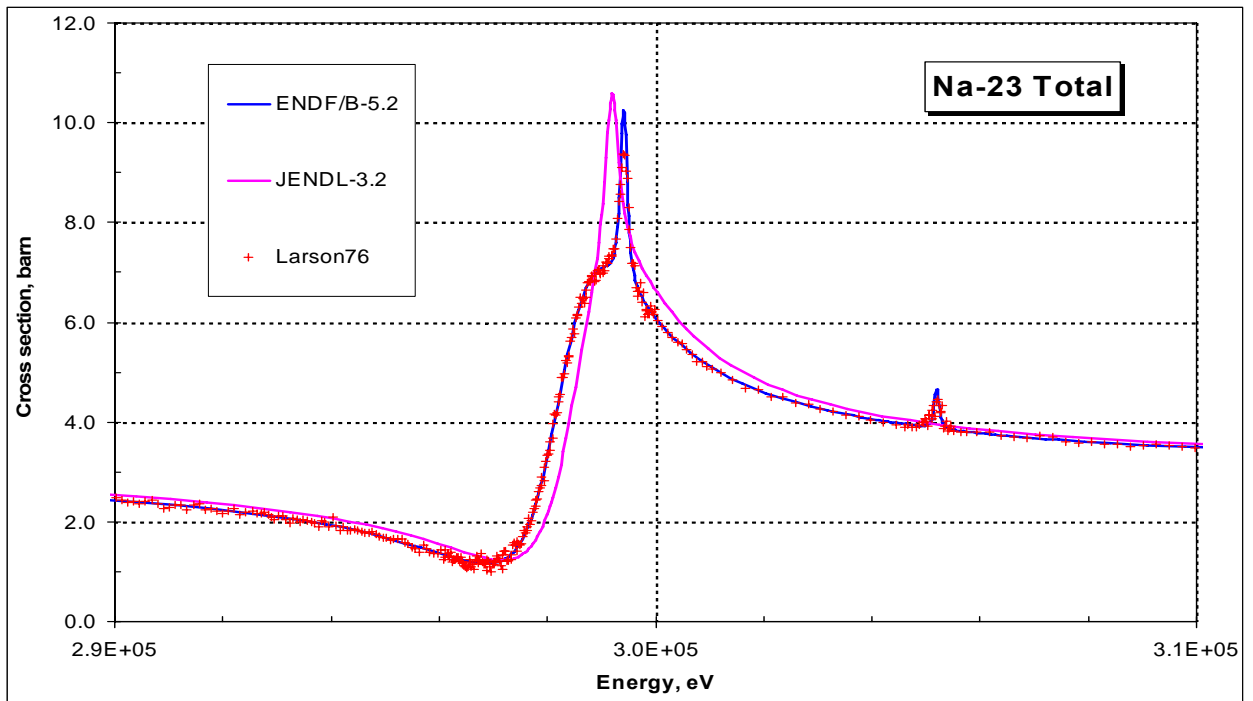


Рисунок 5 – Полное сечение Na-23 в области энергий 0.29-0.31 МэВ.

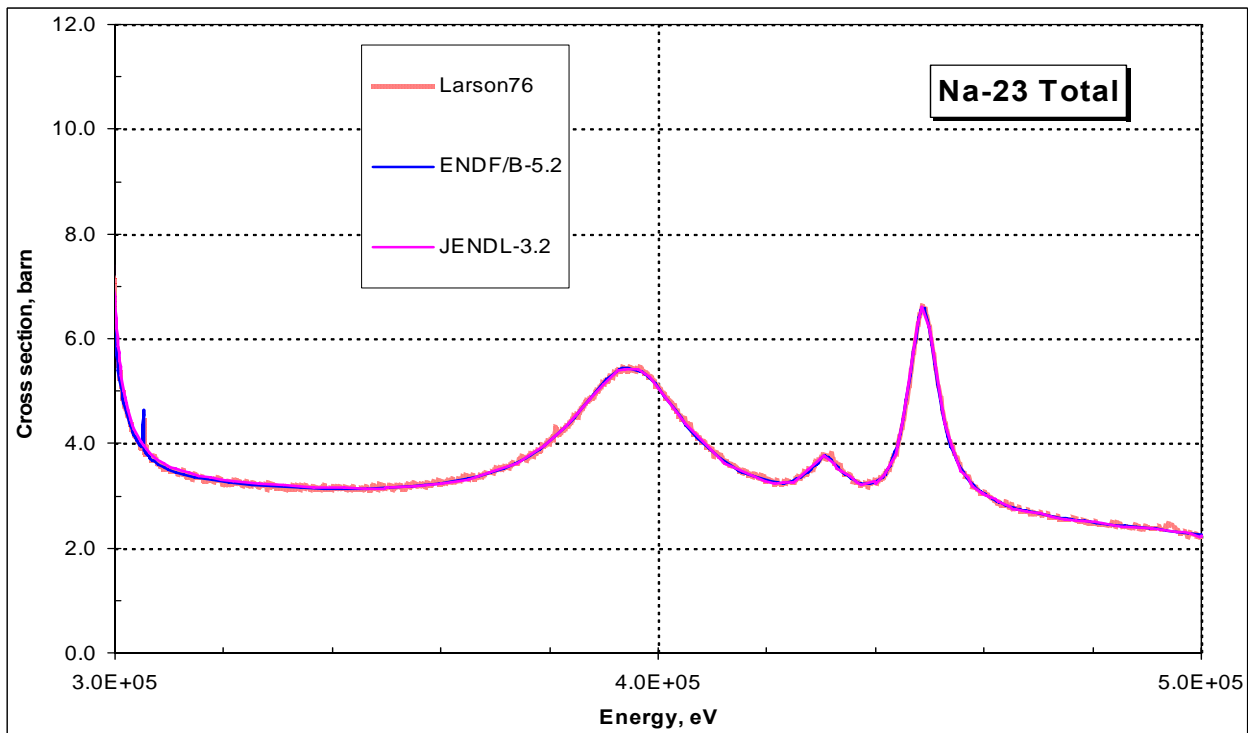


Рисунок 6 – Полное сечение Na-23 в области энергий 0.3-0.5 МэВ.

Из приведенного на рисунках 4 - 6 сравнения видно, что имеющиеся в библиотеке EXFOR экспериментальные данные Ларсона наилучшим образом согласуются с оценкой из библиотеки ENDF/B. К сожалению, не доступными являются экспериментальные данные Моксона, выполненные с высоким разрешением в 1990 году. Они могли бы либо “закрепить” энергетическую зависимость полного сечения, либо указать на разногласие с данными Ларсона.

Сечение радиационного захвата на натрия в резонансной области измерено с низким разрешением. Оно не может быть использовано для выводов о преимуществе той или иной оценки параметров отдельных резонансов. На рисунках 7 - 8 сечения радиационного захвата, рассчитанные по резонансным параметрам, сравниваются с имеющимися экспериментальными данными из библиотеки EXFOR.

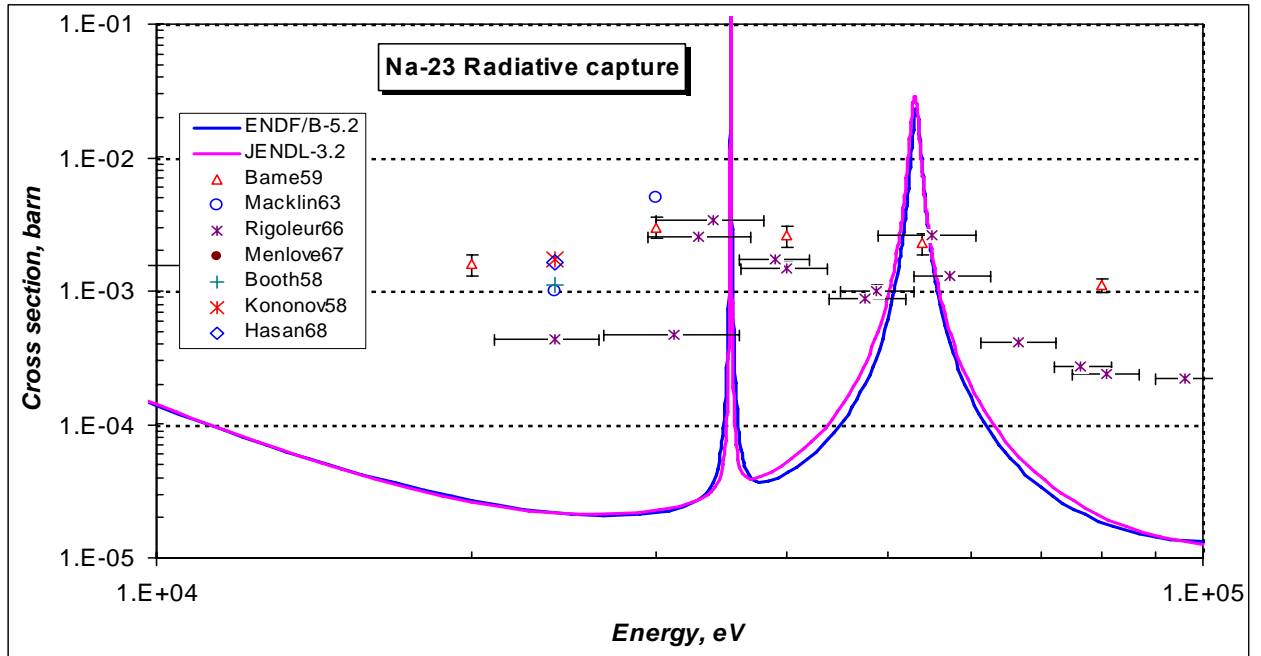


Рисунок 7 – Сечение радиационного захвата Na-23 в области энергий 0.01-0.1 МэВ.

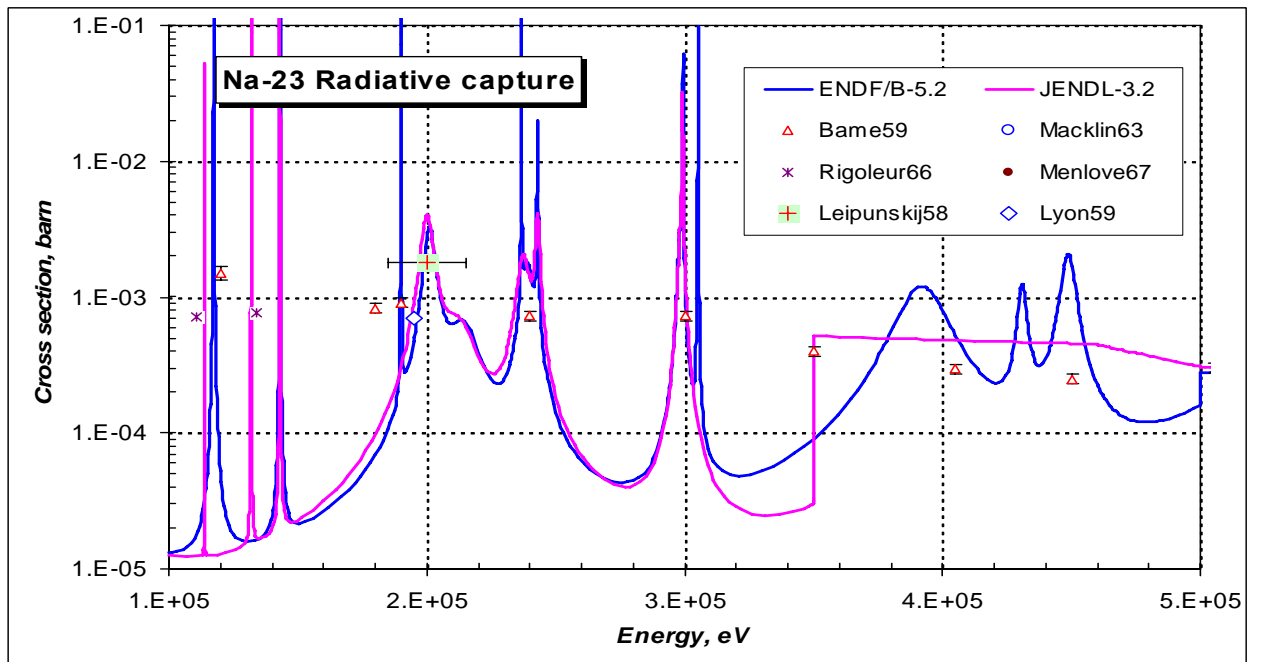


Рисунок 8 – Сечение радиационного захвата Na-23 в области энергий 0.1-0.5 МэВ.

2.4. Область неразрешенных резонансов отсутствует.

2.5. Тепловые сечения и резонансный интеграл:

Итак, экспериментальные данные по **полному сечению** в области разрешенных резонансов лучшим образом описывает оценка Ларсона для библиотеки ENDF/B.

Что, касается **сечения радиационного захвата**, то имеющихся экспериментальных данных недостаточно для определения наилучшего согласия с ними рассматриваемых оценок.

Для этого обратимся к сравнению простейших интегральных характеристик: к сечениям в тепловой точке ($E=0.0253$ эВ), к фактору Весткотта и к резонансному интегралу I_γ , значения которых приведены в таблице 2 вместе с последними рекомендациями Мухабхаба (2003).

Таблица 2 – Сравнение тепловых значений сечений и резонансного интеграла I_γ

| | $\sigma_s(0.0253$ эВ), барн | $\sigma_\gamma(0.0253$ эВ), барн | G-фактор | I_γ , барн |
|---------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------|-------------------|
| Мухабхаб-2003 | $3.025\pm 0.02^*)$ | 0.530 ± 0.005 | 1.0003 | 0.311 ± 0.010 |
| ENDF/B-VI | 3.319 | 0.528 | 1.0001 | 0.314 |
| JENDL-3 | 3.024 | 0.531 | 1.0001 | 0.310 |

*) Сечение рассеяния в работе Мухабхаба 2003 г. не приводится. Здесь дана его же оценка 1981 г.

Различие в данных по сечению рассеяния обусловлено тем, что в библиотеке ENDF/B-VI приводятся для температуры 300К, тогда как в JENDL-3 сечение рассеяния рассчитывается по резонансным параметрам для покоящихся ядер. Эффектом теплового движения и объясняется различие тепловых сечений рассеяния.

Заметим, что в базе данных EXFOR содержится лишь две работы, в которых измерялось полное сечение натрия при низких энергиях. Первой из них является работа Жоки, Миллера и Эванса⁴, измерившие полное сечение натрия в интервале энергии от 0.02эВ до 10 эВ. При 0.025 эВ они получили сечение, равное 3.85 ± 0.05 барна; при 1.26 эВ и при 5.2 эВ – одинаковое сечение, равное 3.30 ± 0.05 барн. В работе Кёстерса, Кнопфа и Вачковского⁵ при последних двух энергиях было получено 3.14 ± 0.07 барна и 3.23 ± 0.04 барна (при опорных полных сечениях природного хлора, равных 20.6 барн и 18.0 барн в соответствии с ENDF/B-VI). Таким образом, величина сечения, принятая в оценке Ларсона не противоречит экспериментальным данным, как могло бы показаться при сравнении с рекомендацией Мухабхаба.

Из приведенных в таблице 2 данных видно, что обе оценки соответствуют современному знанию сечения радиационного захвата нейтронов в тепловой области и резонансной областях.

Все изложенное привело к выводу о целесообразности включения в библиотеку РОСФОНД оценки Ларсона.

Как отмечалось, в библиотеке EXFOR имеется еще одна (более свежая) оценка резонансных параметров, которая выполнена М. Моксоном (EXFOR-22184) на основе совокупной обработки экспериментальных данных Ларсона(1976) и Моксона(1990). Однако поскольку в этой оценке не приводятся радиационные ширины, ее использование без доработки и дополнительного анализа невозможно. Учет новых данных в оценке – дело будущего.

⁴ E.G.Joki,L.G.Miller, J.E.Evans. Phys. Rev. ,99, 610 (1955)

⁵ L.Koesters, K.Knopf, W.Waschnowski ZP/A, 292, (5) ,81 ,(1979)

3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)

3.1. Полное сечение (MT=1).

Оцененные данные в области энергии выше 0.5 МэВ, т.е. выше той области, где энергетический ход сечений описывается аналитически через резонансные параметры, сравниваются на рисунках 9 - 13 с основными экспериментальными результатами, полученными в работах Ларсона, Клемера и Сьержекса.

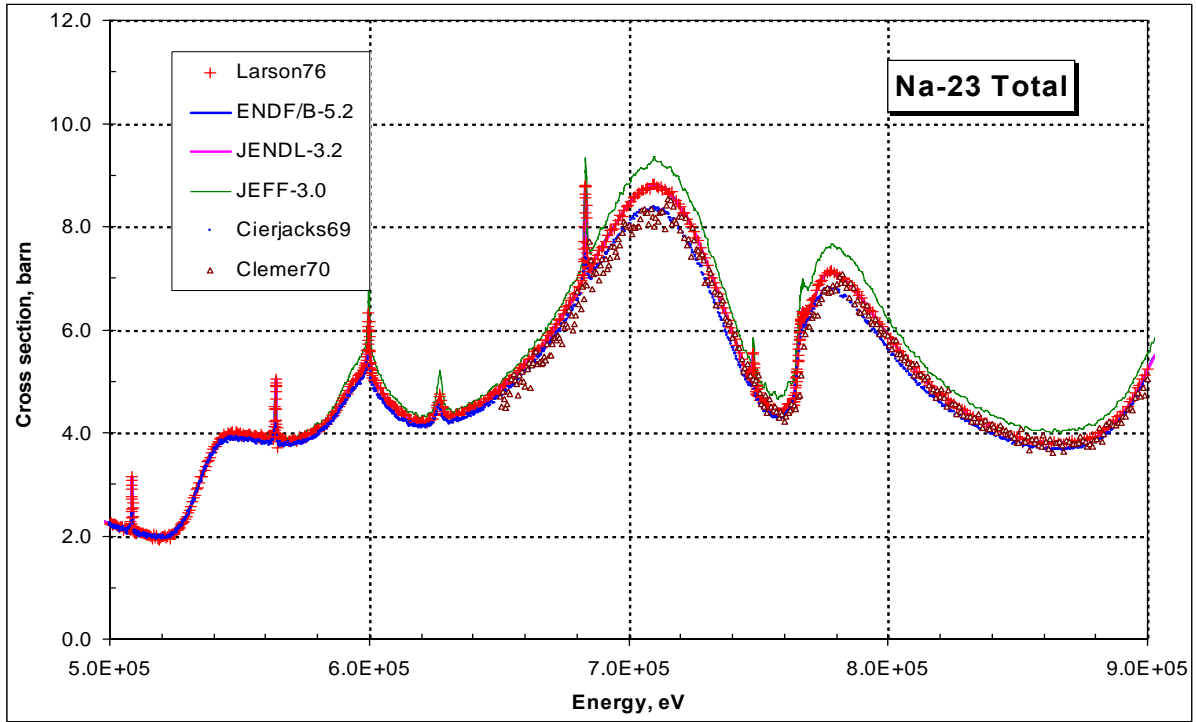


Рисунок 9 – Полное сечение Na-23 в области энергий 0.5 – 0.9 МэВ.

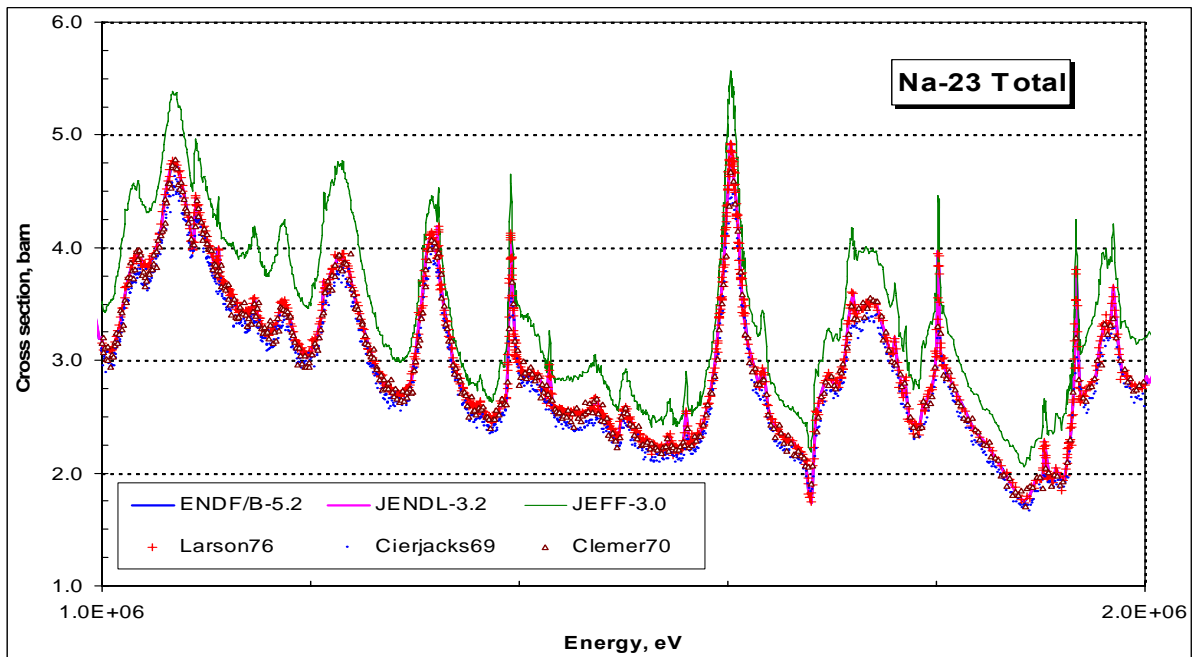


Рисунок 10 – Полное сечение Na-23 в области энергий 1.0 – 2.0 МэВ.

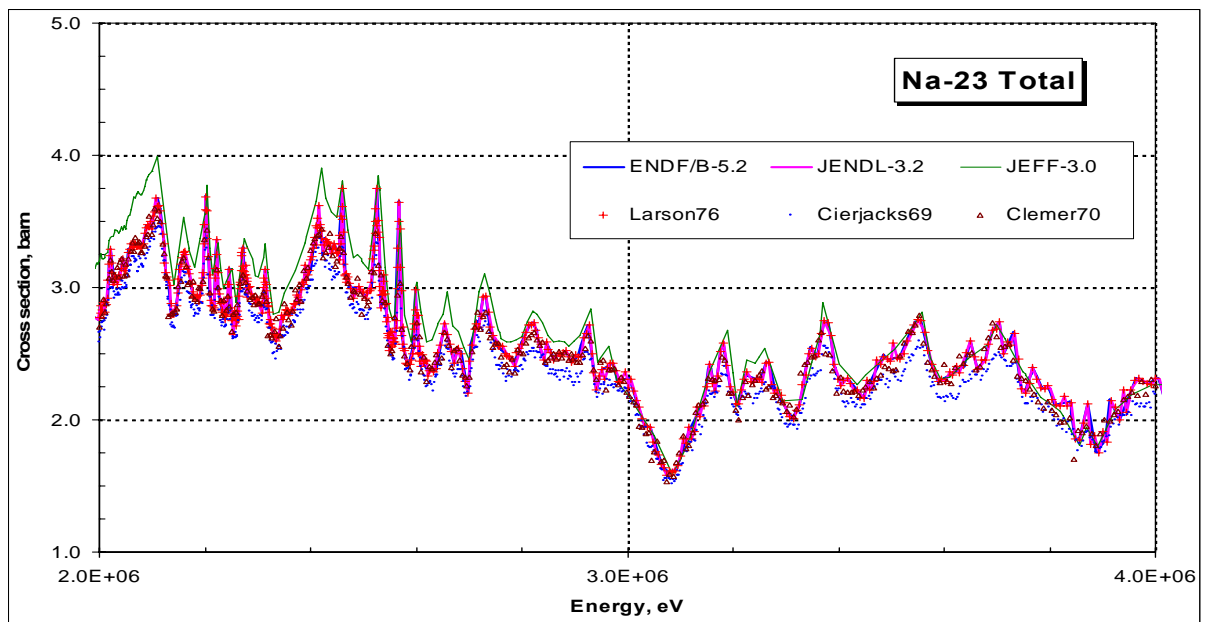


Рисунок 11 – Полное сечение Na-23 в области энергий 2.0 – 4.0. МэВ.

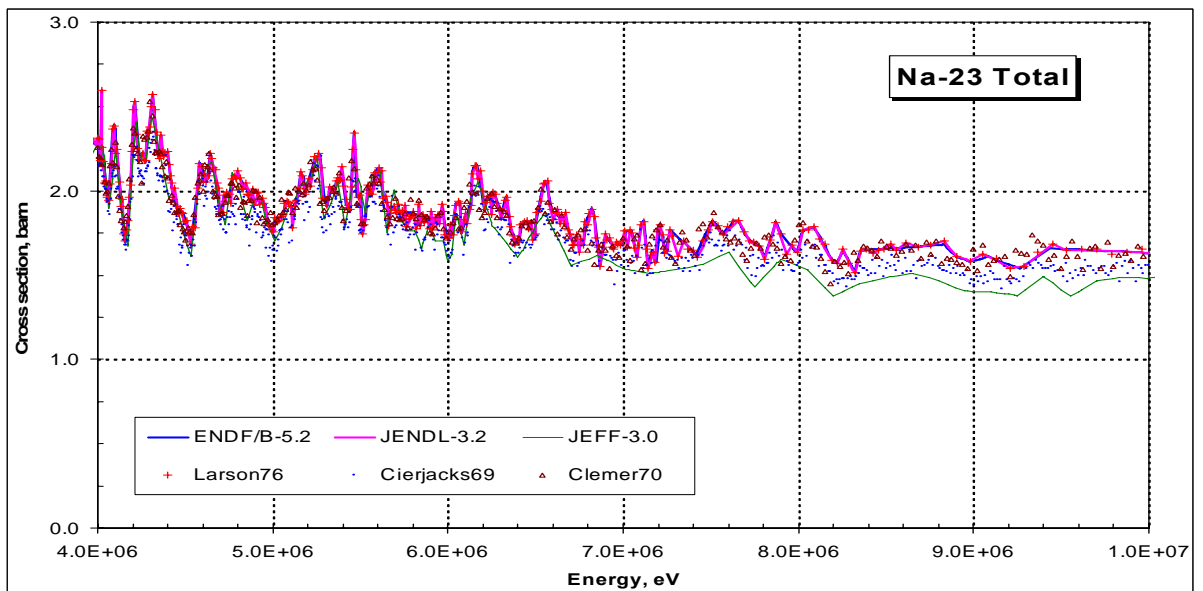


Рисунок 12 – Полное сечение Na-23 в области энергий 4.0 – 10.0. МэВ.

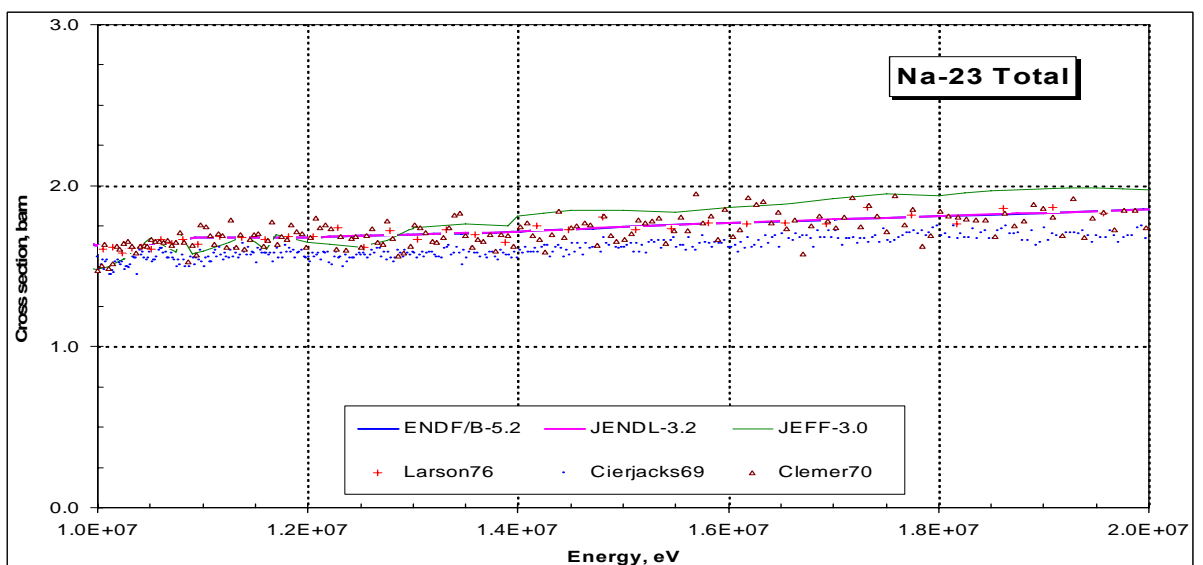


Рисунок 13 – Полное сечение Na-23 в области энергий 10.0 – 20.0. МэВ.

Как видно из рисунков, результаты Ларсона прекрасно согласуются с более ранними данными Клемера везде, кроме области ниже, примерно 800 кэВ, где сечения, измеренные Ларсоном, оказались несколько выше прежних результатов (см. рис.9), но систематически выше результатов данных Сьержекса. Принятая в ENDF/B-V оценка, выполненная Ларсоном, основывается на результатах именно этого автора; ссылка на работу Сьержекса отсутствует, как в оригинальном описании оценки 1977 г. в заголовочной секции файла ENDF/B-V, так и в ревизованной в 1991г. (и сохраненной прежней) версии, принятой в ENDF/B-VI.

Во всей рассматриваемой энергетической области оцененная кривая полного сечения из JENDL-3 хорошо согласуется с оценкой Ларсона.

Что касается оценки принятой в JEFF-3, то вне зависимости от того, как следует относиться к результатам Сьержекса, ясно, что результаты дифференциальных экспериментов не дают никаких оснований проводить оцененную кривую так высоко. Заметим, что последняя переоценка в JEFF-3 выполнялась, имея задачу описать эксперименты по натриевому пустотному эффекту реактивности (НПР) в быстрых натриевых реакторах, требовавших повышения транспортного сечения натрия. Однако, повышение полного сечения в противоречии с экспериментальными данными не является единственным путем согласования расчета НПР с экспериментом.

3.2. Сечения упругого рассеяния (MT=2)

Для сечения упругого рассеяния экспериментальных данных намного меньше, чем для сечения полного взаимодействия. В основном, это данные Кини (1976) в области энергий от 0.5 до 2.0 МэВ.

На рисунках 14-21 показано сравнение оцененных кривых с имеющимися экспериментальными данными.

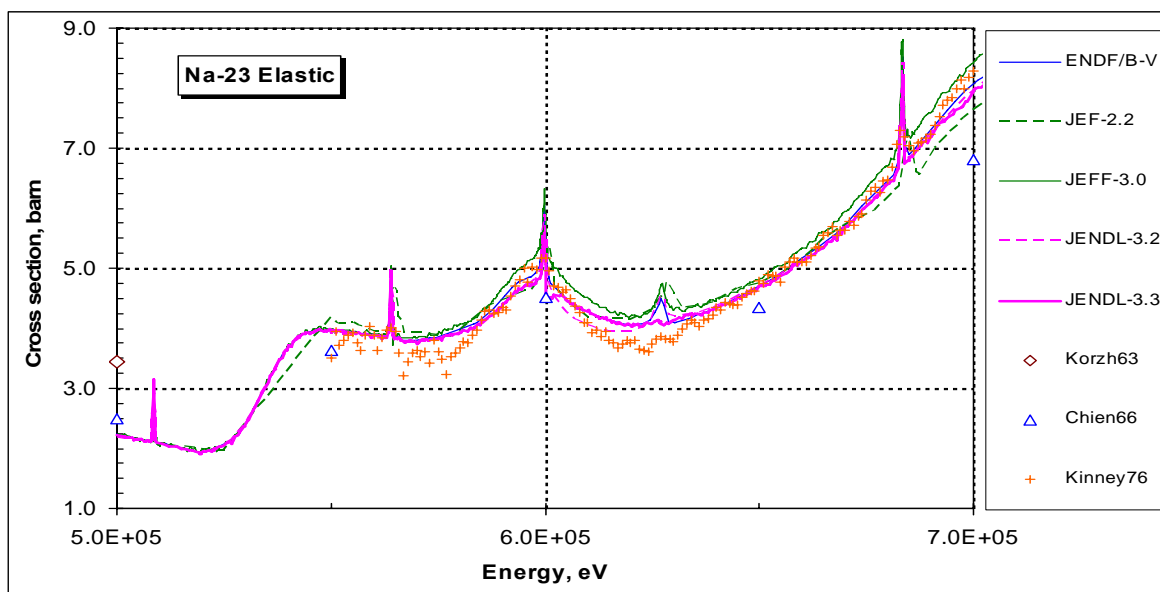


Рисунок 14 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 0.5 – 0.7 МэВ.

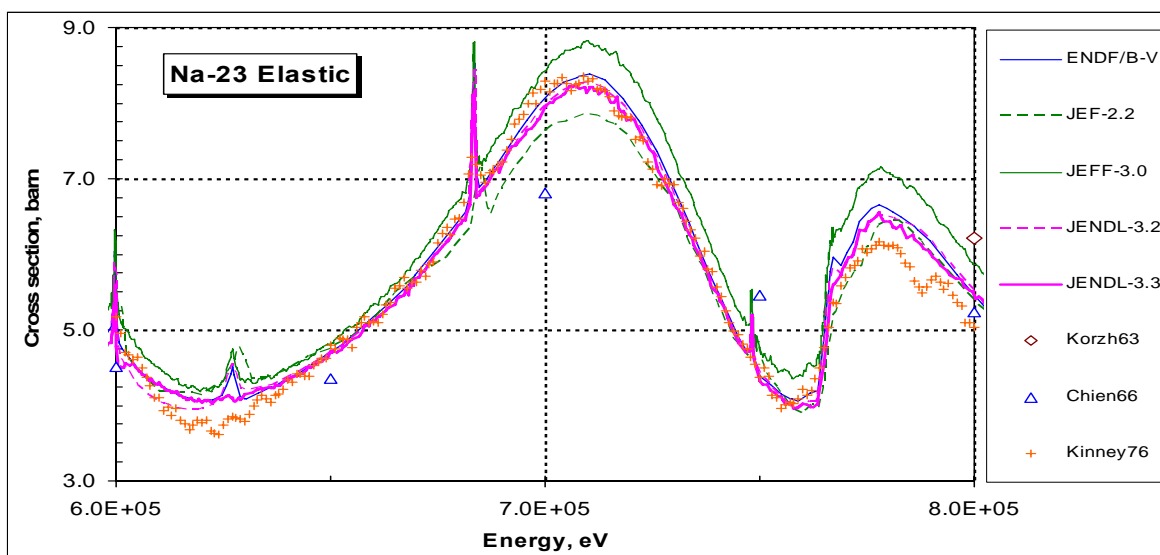


Рисунок 15 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 0.6 – 0.8 МэВ.

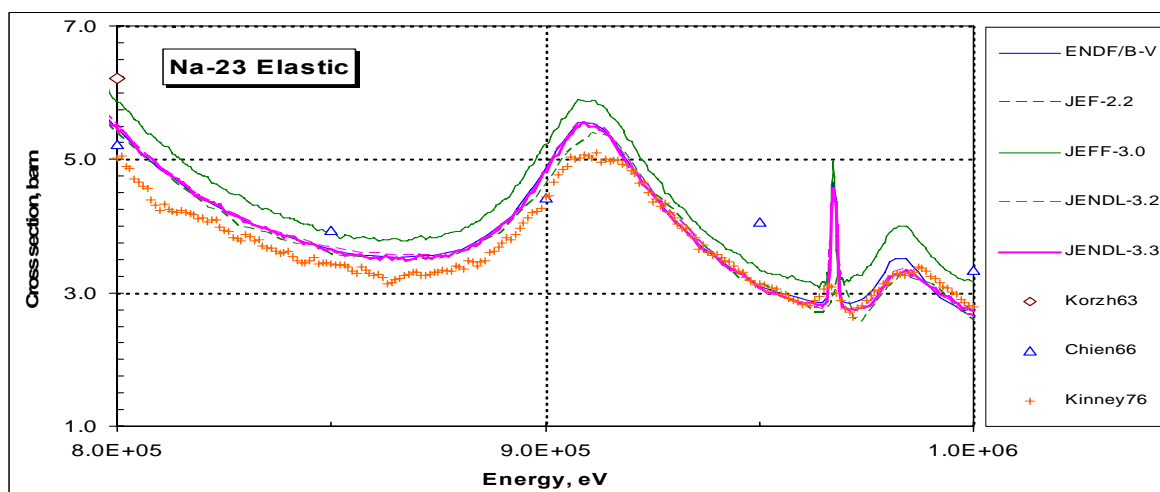


Рисунок 16 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 0.8 – 1.0 МэВ.

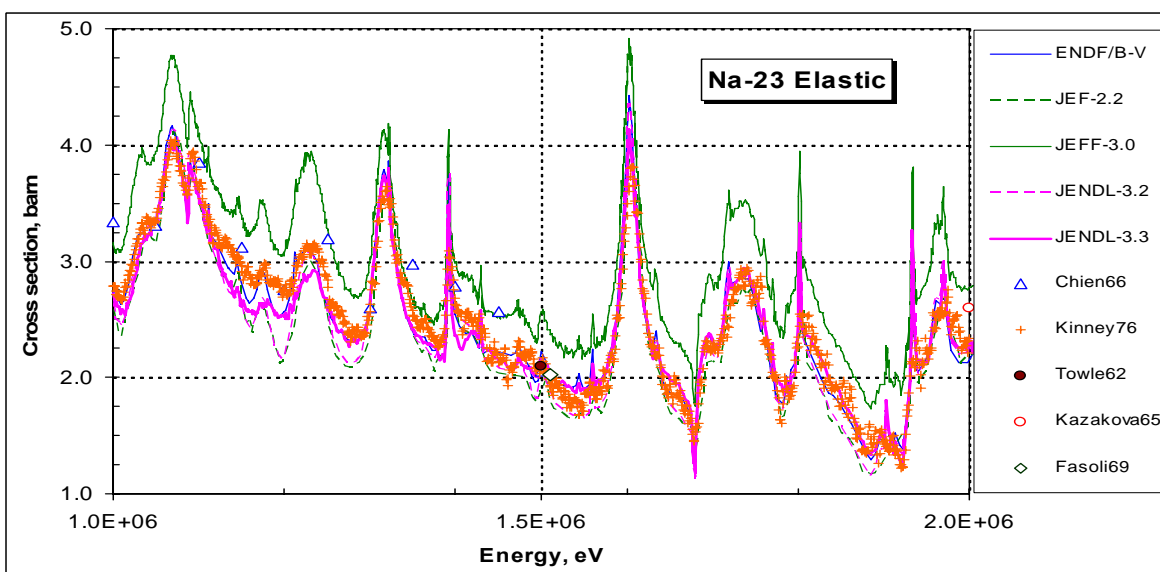


Рисунок 17 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 1.0 – 2.0 МэВ.

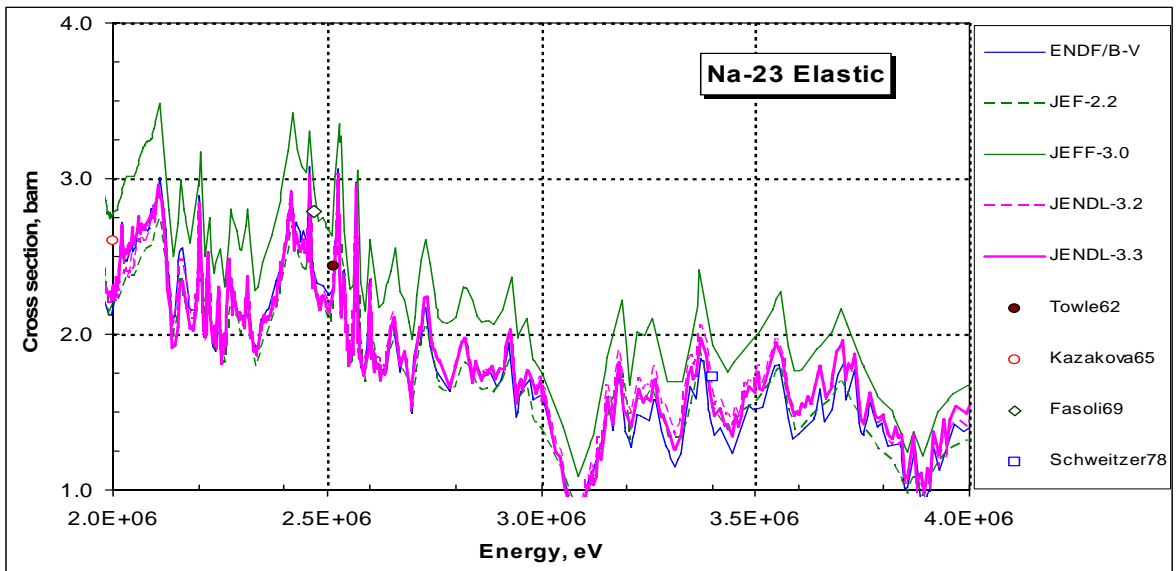


Рисунок 18 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 2.0 – 4.0 МэВ.

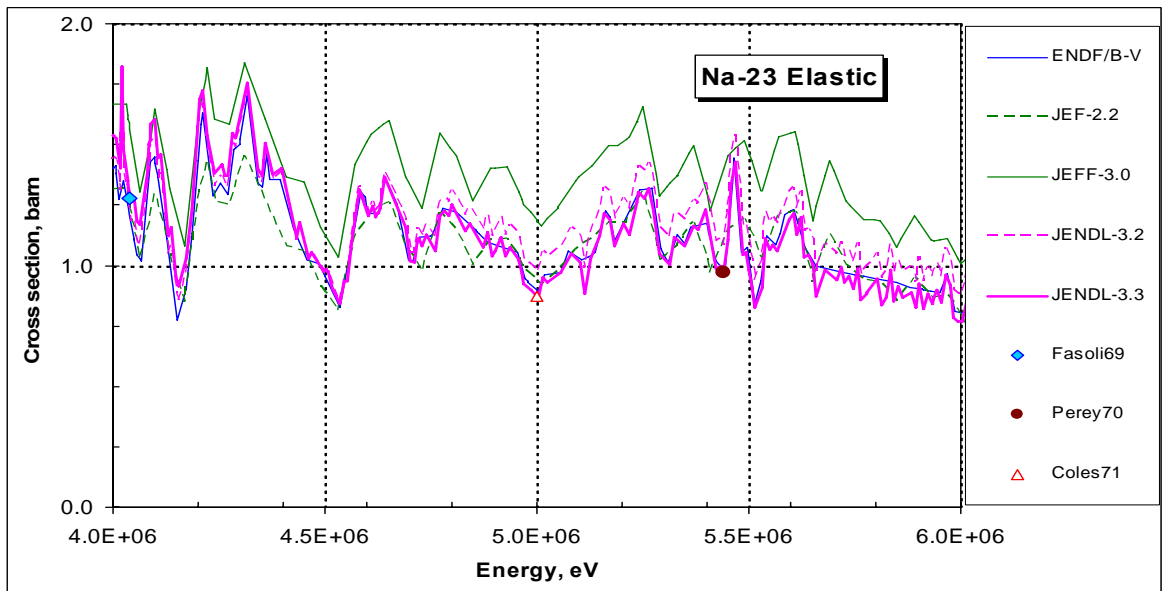


Рисунок 19 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 4.0 – 6.0 МэВ.

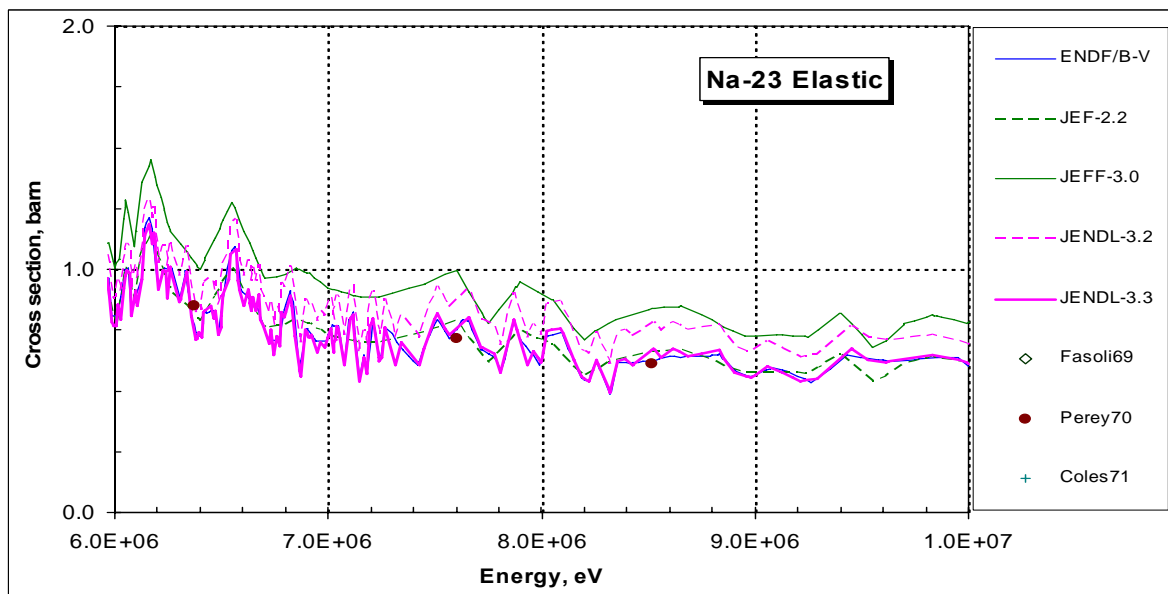


Рисунок 20 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 6.0 – 10.0 МэВ.

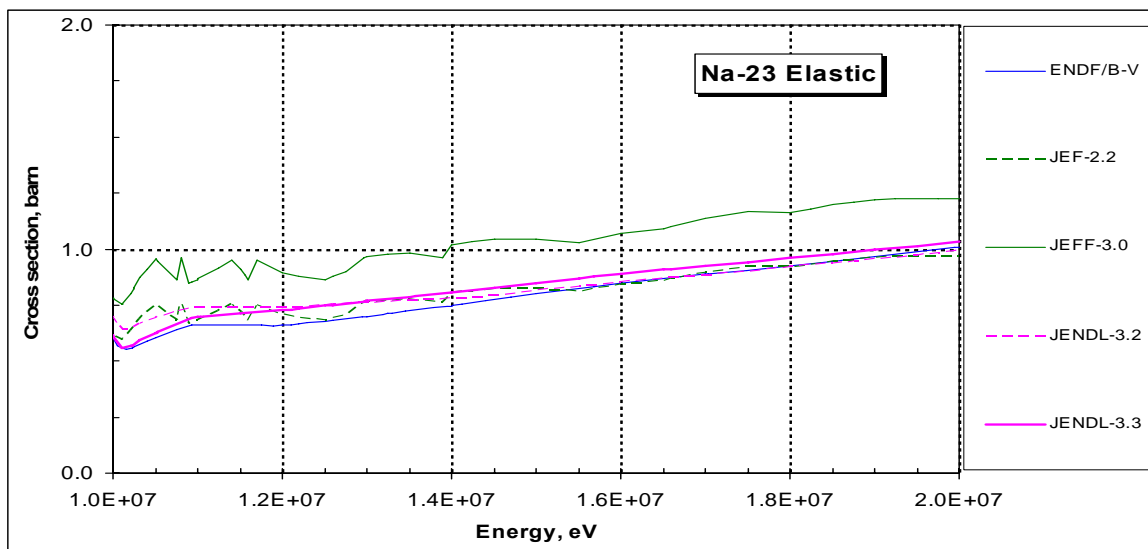


Рисунок 21 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 10.0 – 20.0 МэВ.

Как видно, экспериментальные данные по сечению упругого рассеяния также не дают никаких оснований для повышения сечения рассеяния до уровня, принятого в JEFF-3.

Все остальные оценки, и, особенно, последние версии – JENDL-3.3 и ENDF/B-VI (совпадающая с ENDF/B-V) различаются между собой несущественно.

3.3. Сечение радиационного захвата

На рисунках 22 - 23 приведено сравнение экспериментальных и оцененных кривых в области энергий выше 0.5 МэВ.

Экспериментальные данные для этого процесса еще более скудные, чем для упругого рассеяния.

Следует отметить, что в библиотеках JEFF осталась без изменения оценка сечения радиационного захвата из JENDL-3. Поэтому на рисунках сравниваются только две оцененные кривые.

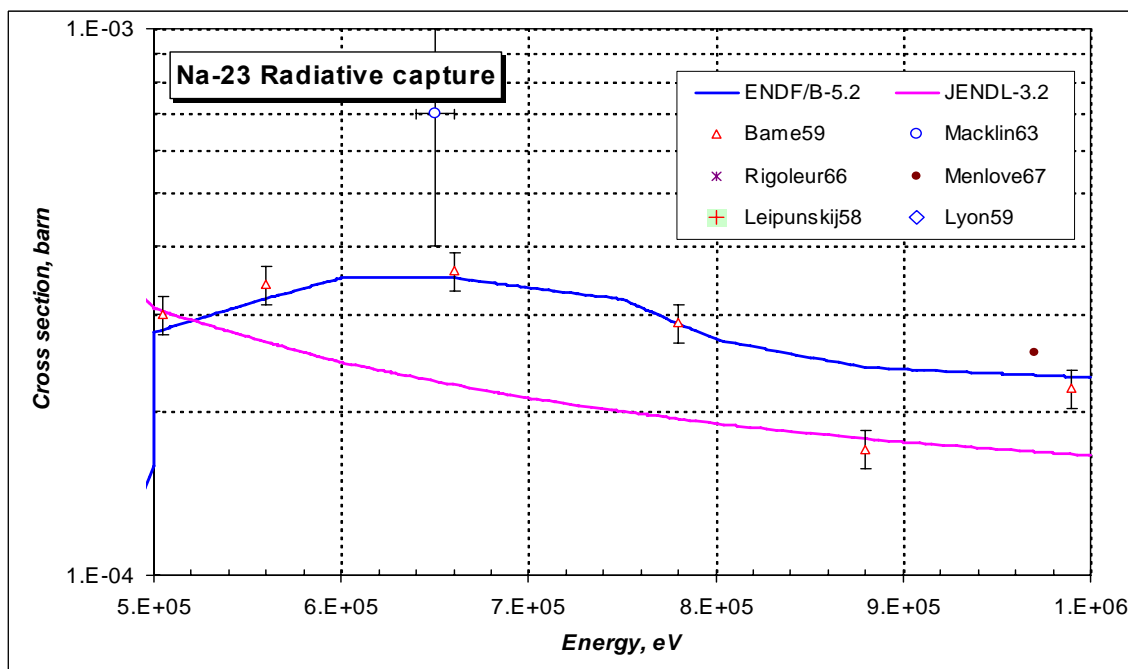


Рисунок 22 – Сечение радиационного захвата Na-23 в области энергий 0.5 – 1.0. МэВ.

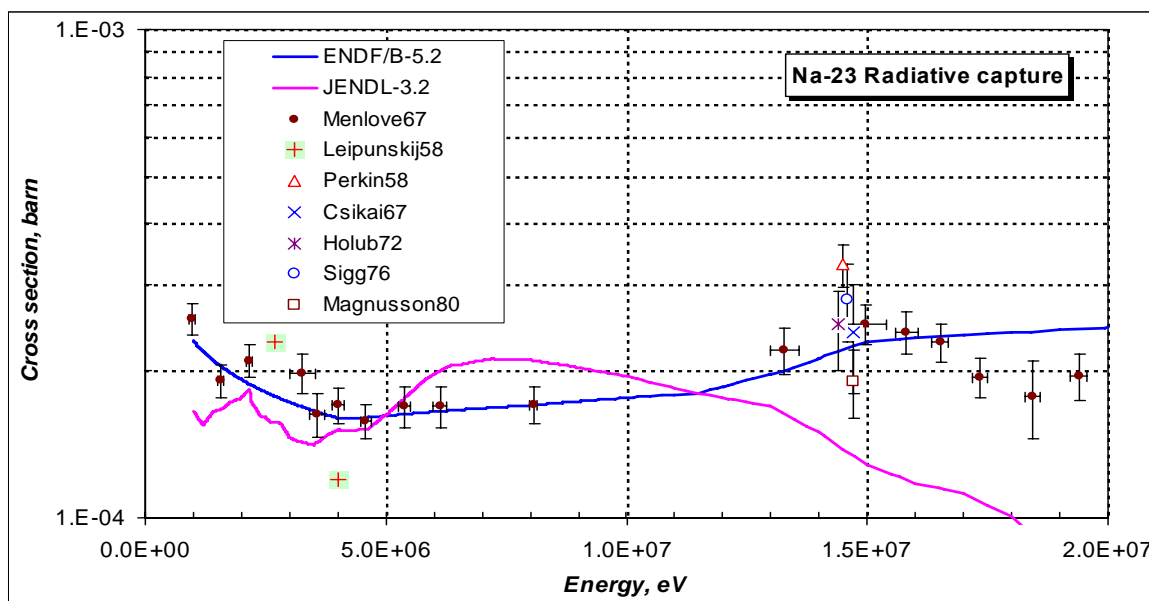


Рисунок 23 – Сечение радиационного захвата Na-23 в области энергий 0.5 – 1.0. МэВ.

Из представленных на рисунках данных видно, что, несмотря на то обстоятельство, что экспериментальные данные по сечению захвата нейтронов малочисленны, а оценки достаточно близки друг к другу, тем не менее, они по-разному согласуются с экспериментальными данными.

Оценка ENDF/B является более привлекательной, по сравнению с оценкой JENDL-3.

3.4. Сечение неупругого рассеяния

Процесс неупругого рассеяния нейтронов на натрия ($E_{\text{порог}} \sim 0.4592$ МэВ) начинается ниже границы разрешенных резонансов. В параметрах разрешенных резонансов в оценке Ларсона конкуренция со стороны неупругого рассеяния не учитывается. Неупругое рассеяние в области разрешенных резонансов описывается плавной подложкой, величина которой на границе этой области составляет всего 15 миллибарн, т.е. менее 1% от полного сечения. Измеренное сечение неупругого рассеяния имеет более ярко выраженную резонансную структуру, чем полное сечение, поскольку значительный вклад в этот процесс (или, точнее, процессы) вносит нейтронное взаимодействие с передачей составному ядру высоких орбитальных моментов. Возбуждаемые при этом резонансы слишком слабы, чтобы быть замеченными при измерениях полного сечения на фоне сечения потенциального рассеяния.

Экспериментальных работ по измерению сечения неупругого рассеяния мало – всего 3 работы. Среди них выделяется эксперимент Перри (1971), выполненный с весьма высоким разрешением. В остальных работах сечение неупругого рассеяния было измерено в одной – двух точках. В 1997 году сечение неупругого рассеяния с высокой точностью измерялось в Гиле (Бельгия) группой С.Копецкий, Р.Шелли, Х.Мертен и Х.Вейгман. Однако результатов измерения именно сечения неупругого рассеяния в библиотеке EXFOR не имелось. Поэтому сравнение проводилось с отмеченными выше немногочисленными экспериментальными данными.

На рисунках 24 – 28 показано сравнение оцененных и имеющихся экспериментальных данных.

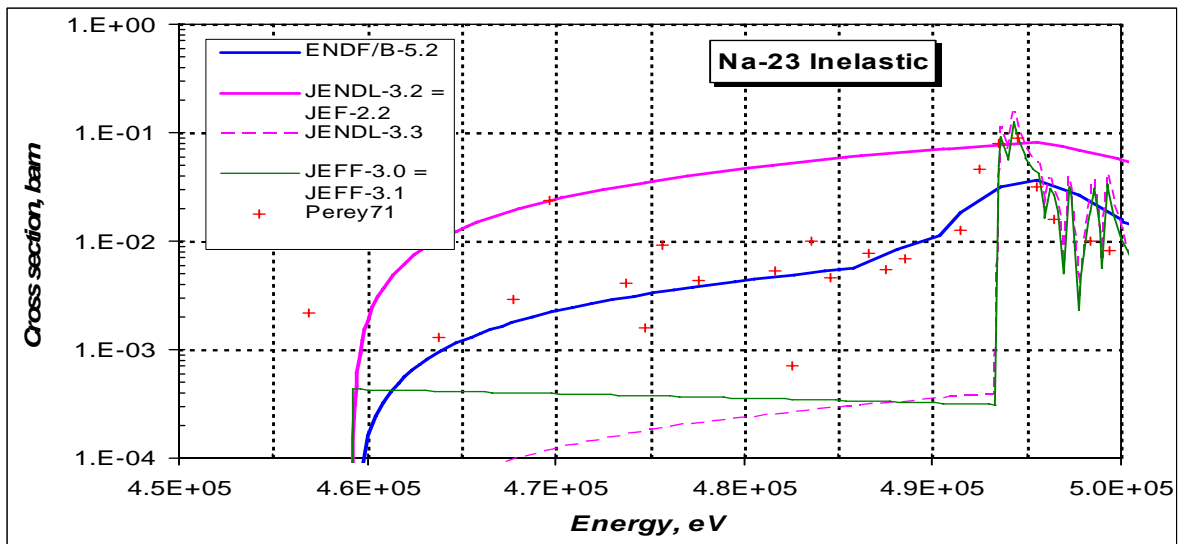


Рисунок 24 – Сечение неупругого рассеяния Na-23 в области порога.

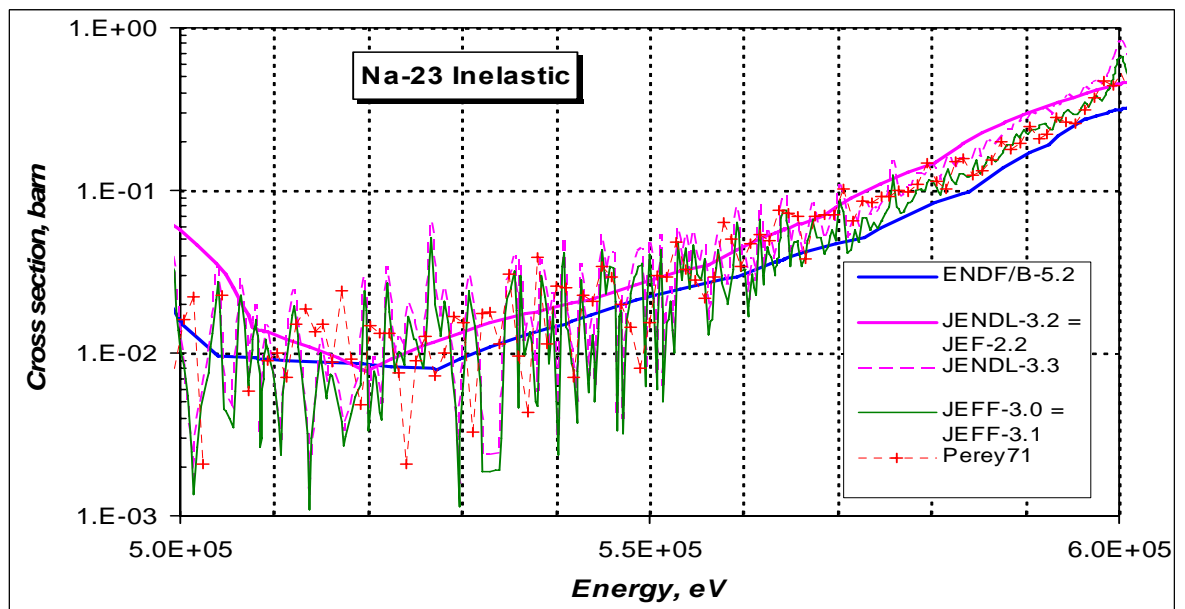


Рисунок 25 – Сечение неупругого рассеяния Na-23 в области 0.5 – 0.6 МэВ.

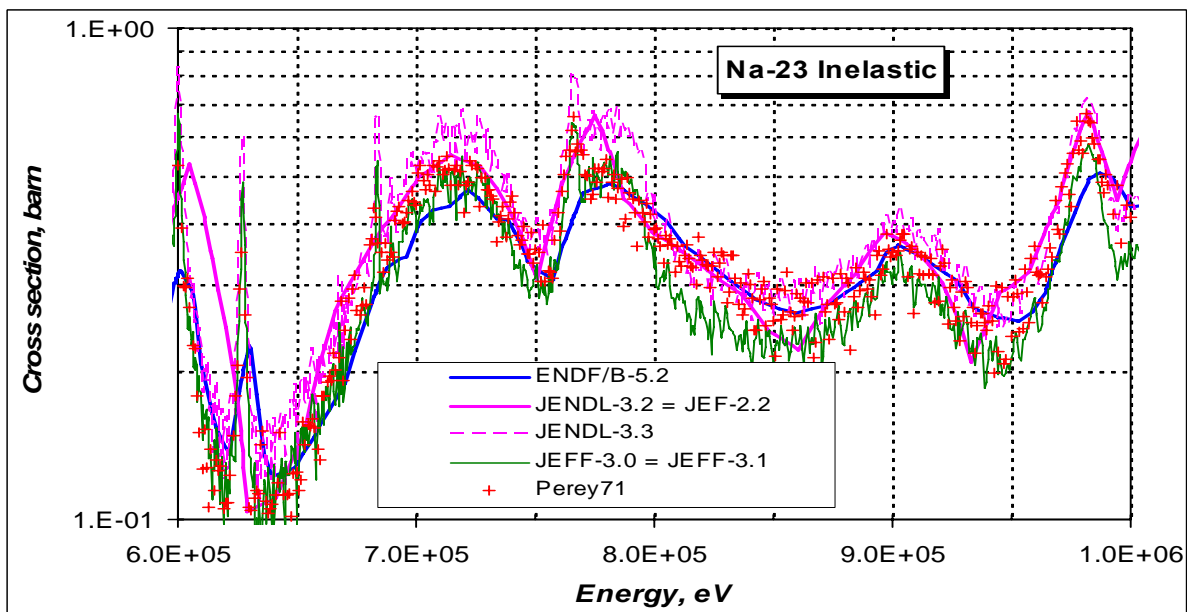


Рисунок 26 – Сечение неупругого рассеяния Na-23 в области 0.6 – 1.0 МэВ.

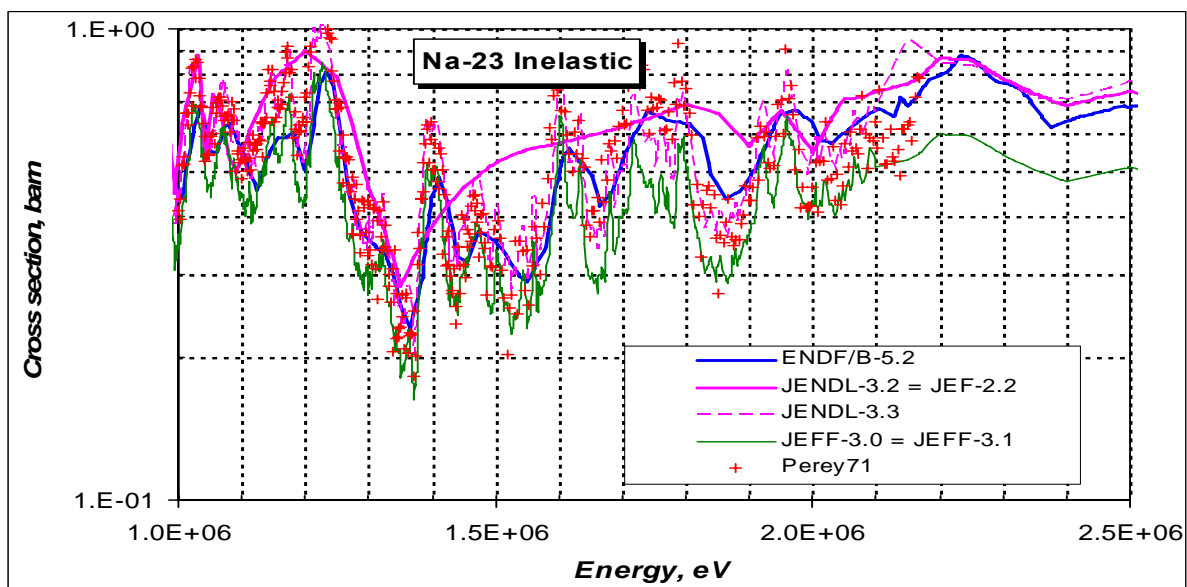


Рисунок 27 – Сечение неупругого рассеяния Na-23 в области 1.0 – 2.5 МэВ.

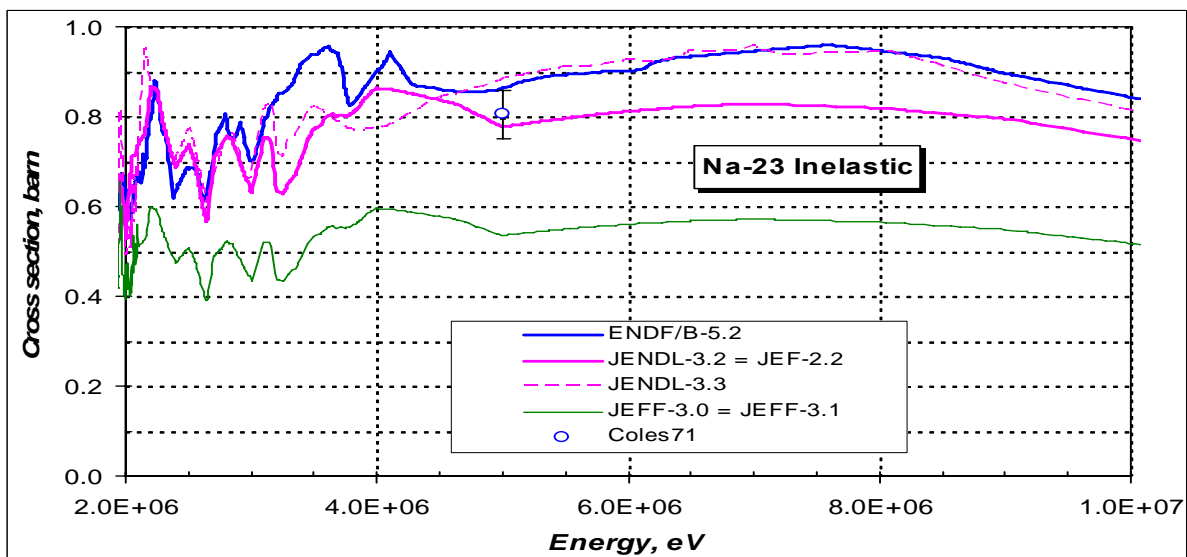


Рисунок 28 – Сечение неупругого рассеяния Na-23 в области 2.5 – 10.0 МэВ.

Выводы:

При сравнении оцененных кривых с экспериментальными данными, прежде всего, обращает на себя внимание детальная резонансная структура, принятая в оценке JEFF, которая далеко не всегда совпадает со структурой сечения неупругого рассеяния, измеренной Перри и являющейся в настоящее время единственным источником данных о тонкой структуре сечений в этой энергетической области. В полном сечении эта структура практически не проявляется, так что ни к какой резонансной самоэкранировке сечений неупругого рассеяния она не ведет. Выше, примерно, 800 кэВ оценка JEFF-3 проведена в среднем ниже экспериментальных данных, лишь местами соприкасаясь с ними.

Оценка, принятая в JENDL-3.3 также пытается следовать измеренной структуре сечения неупругого рассеяния, но в среднем она отклоняется от экспериментальных данных в сторону, противоположную оценке JEFF.

Оценка JENDL-3.2, напротив, не отражает даже очевидных нерегулярностей в ходе сечения неупругого рассеяния в области около 1.5 МэВ.

Оценка Ларсона, не учитывая тонкой структуры, обнаруженной Перри, хорошо согласуется с его данными в среднем.

3.5. Сечение реакции (n,2n)

Сечение реакции (n,2n) имеет очень высокий порог ~ 13 МэВ, и к 20 МэВ ее сечение дорастает до ~ 0.1 барна. На рисунке 29 представлено сравнение оцененных кривых и экспериментальных данных.

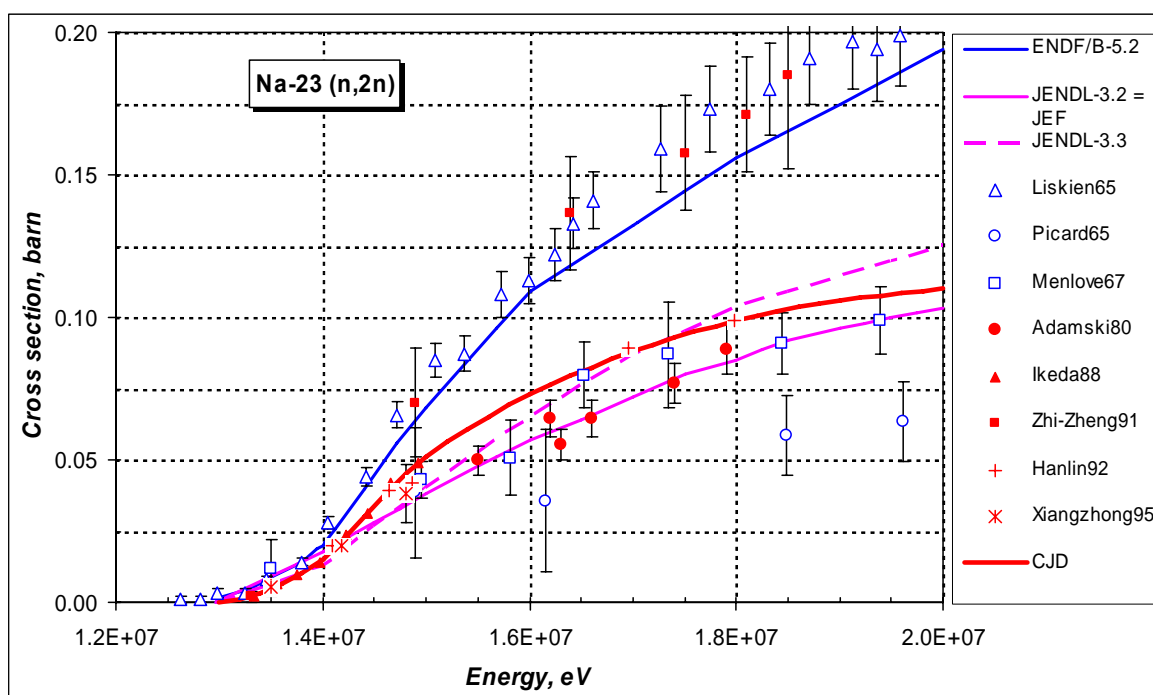


Рисунок 29 – Сечение реакции (n,2n) в области энергий 12.0 –20.0 МэВ.

Из представленного на рисунке сравнения видно, что проблема хода сечения реакции (n,2n), возникшая в середине 60-х годов (эксперимент Лискина с одной стороны и эксперименты Пикарда и Менлова с другой стороны), не получила разрешения с появлением новых экспериментальных данных, появившихся в 80-х и 90-х годах. Согласно систематике, разработанной в Центре по ядерным данным (г. Обнинск) В.Н.Манохиным, сечение реакции (n,2n) имеет не такой резкий подъем, как в оценке Ларсона, и хорошо согласуется с оценкой из JENDL-3.

По всей видимости, оценка сечения, выполненная в ЦЯД, является предпочтительной.

3.6. Сечения реакций (n, n'p) и (n, n'α)

На рисунке 30 показано сравнение оцененных кривых сечения реакции (n,n'p) с результатами измерений в двух экспериментах. Отметим, что сечение реакции (n,n'p) в оценке ENDF/B отсутствует.

Заметим, что в то время как реакции (n,n'p) и (n,pn') являются идентичными с практической точки зрения и их пороги совпадают (и равны 9.18 МэВ), реакция (n,d) имеет более низкий порог (6.858 МэВ) и не сопровождается испусканием нейтронов. Сечения реакций с вылетом других заряженных частиц – (n,p), (n,α) – как будет показано ниже, при 14 -15 МэВ равны, примерно, 100 миллибарнам.

Если предположить, что вклад реакции (n,d) в сечение, измеренное Лейчем, имеет тот же порядок величины, придется констатировать расхождение между его результатом и результатом, полученным Козиром и др. Для оценки вероятного значения сечения реакции (n,d), рассмотрим алюминий, для которого эта реакция измерялась непосредственно и при 14 -16 МэВ равна 3 -4 миллибарн, тогда как сечения реакций (n,p) и (n,α) при этих энергиях, как и в случае натрия, равны, примерно 100 миллибарнам. Порог

реакции (n,d) на алюминии даже несколько ниже, чем на натрии. Можно поэтому полагать, что и в случае натрия сечение реакции (n,d) при 14-16 МэВ составит несколько миллибарн, т.е. ее вклад в измеренное Лейчем сечение существенно меньше экспериментальной погрешности.

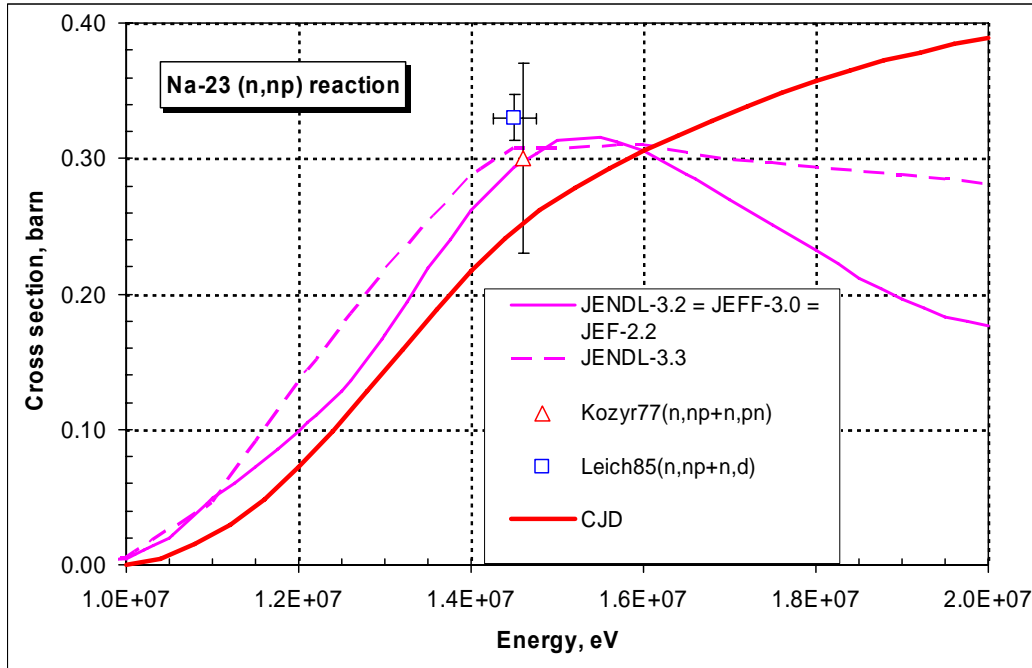


Рисунок 30 – Сечение реакции (n,n'p) в области энергий 10.0 –20.0 МэВ.

Исходя из выше изложенного, констатируем, что оцененные экспериментальные данные по сечению реакции (n,n'p) имеют достаточно надежное экспериментальное подтверждение. Оценка сечения, выполненная в ЦЯД, по величине сечения согласуется с другими оценками, а по форме отличается - особенно выше энергии 16 МэВ.

На рисунке 31 показано сравнение оцененных кривых сечения реакции (n,na) с экспериментальными данными.

Отметим, что в оценке ENDF/B сечение такой реакции нет.

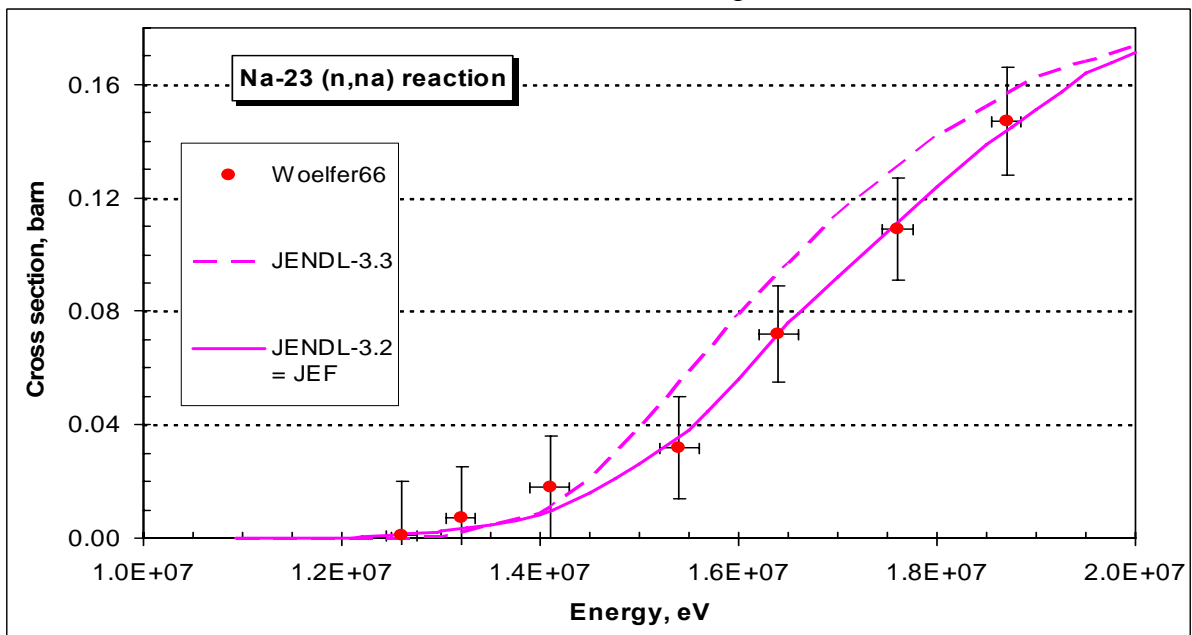


Рисунок 31 – Сечение реакции (n,n'a) в области энергий 10.0 –20.0 МэВ.

Из приведенного рисунка видно, что оценка JENDL-3.2 проведена просто по экспериментальным точкам, тогда как более поздняя оценка JENDL-3.3 основана на модельных расчетах. Различие между оценками невелико, и сама реакция с практической точки зрения не очень существенна.

3.7. Сечения реакций (n,p) и (n, α)

Сравнение оцененных кривых энергетической зависимости сечения реакции (n,p) с экспериментальными данными приводится на рисунках 32 – 36. В экспериментах Вейгемана, выполненных с высоким разрешением, проявилась резонансная структура. В целом же результаты этой работы согласуются в пределах погрешностей с данными более ранних работ Вильямсона, Басса и Бартле вплоть до 9 МэВ.

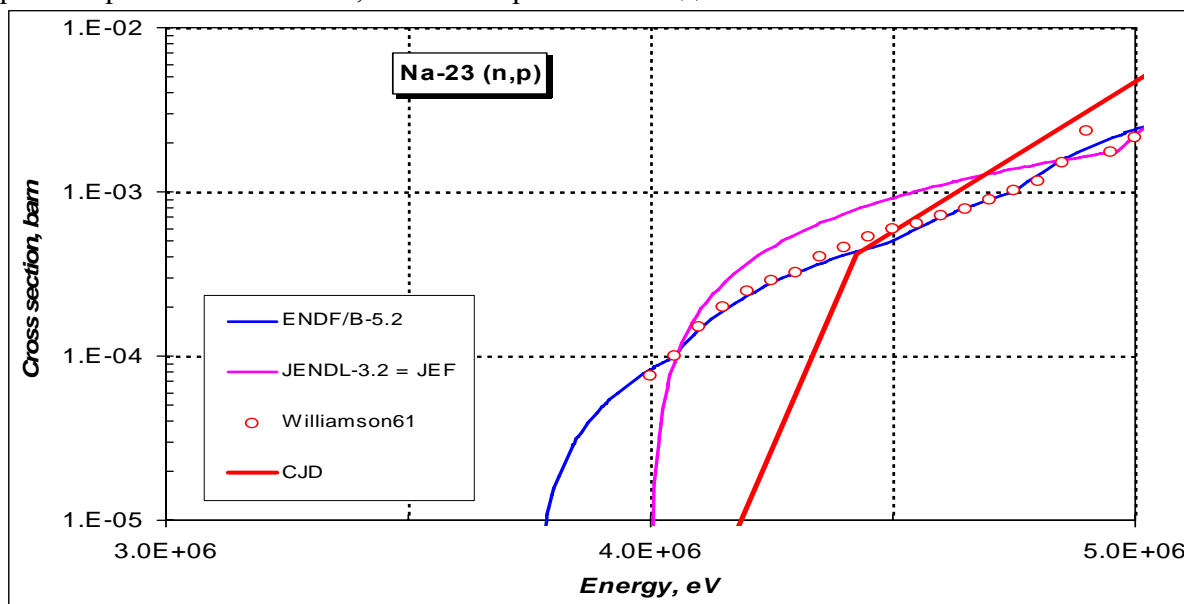


Рисунок 32 – Сечение реакции (n,p) в области энергий 3.5 – 5.0 МэВ.

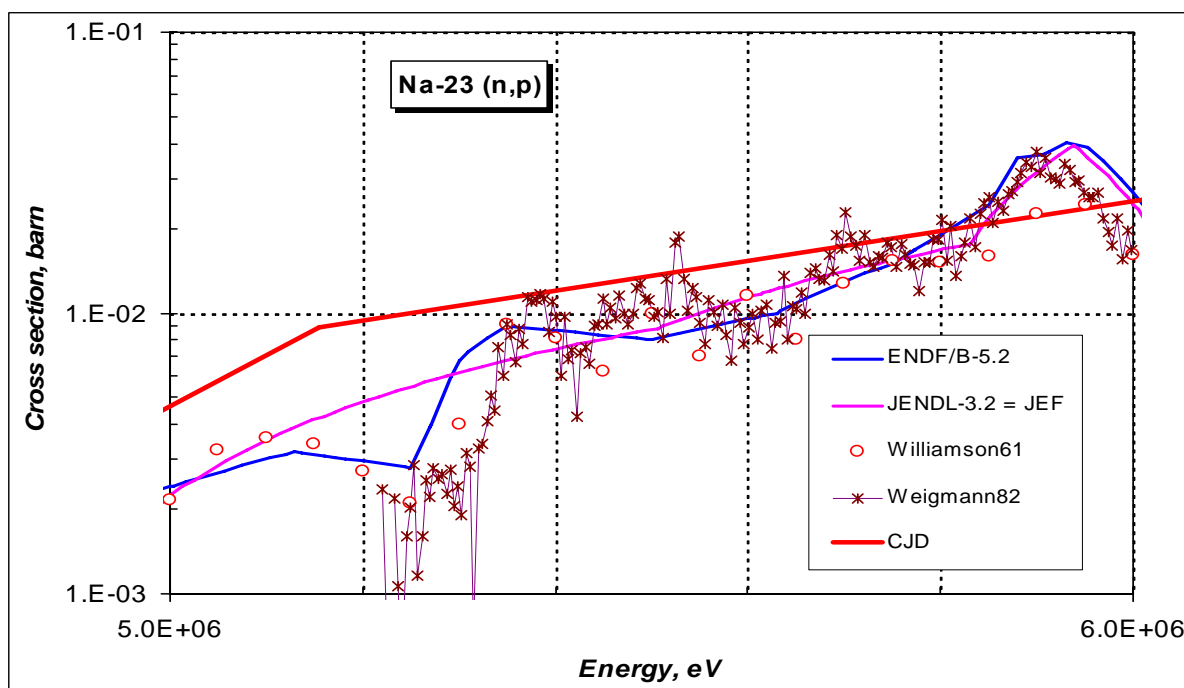


Рисунок 33 – Сечение реакции (n,p) в области энергий 5.0 – 6.0 МэВ.

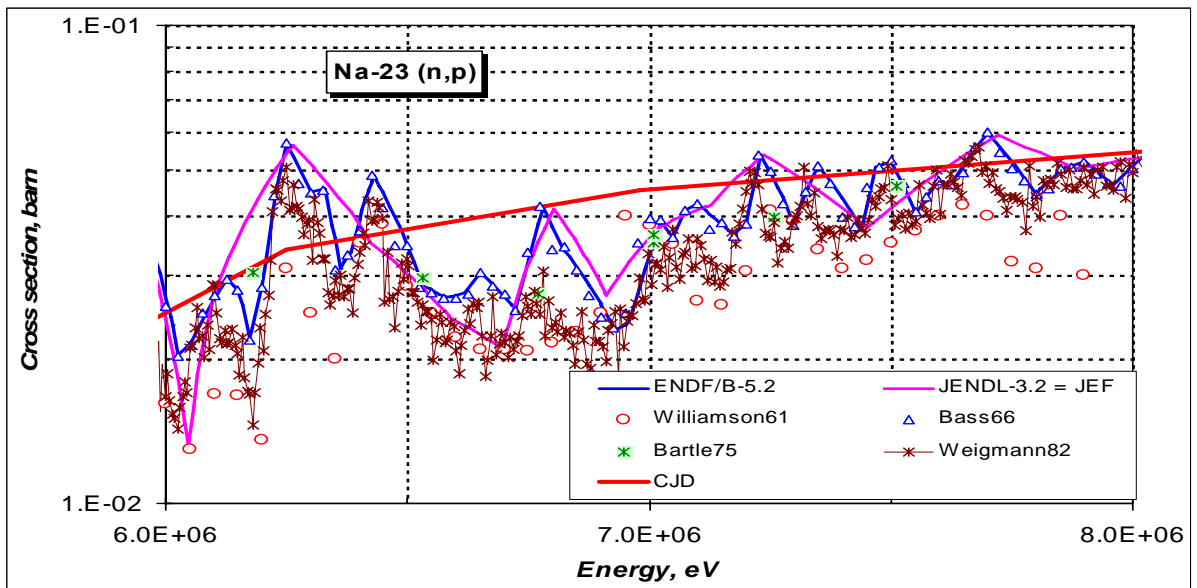


Рисунок 34 – Сечение реакции (n,p) в области энергий 6.0 – 8.0 МэВ.

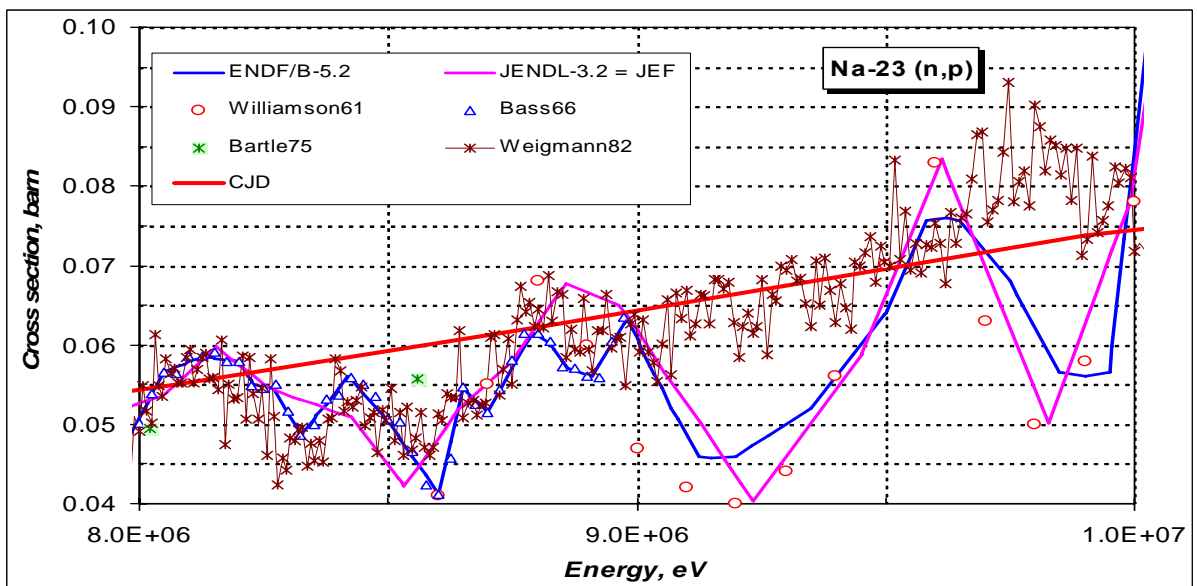


Рисунок 35 – Сечение реакции (n,p) в области энергий 8.0 – 10.0 МэВ.

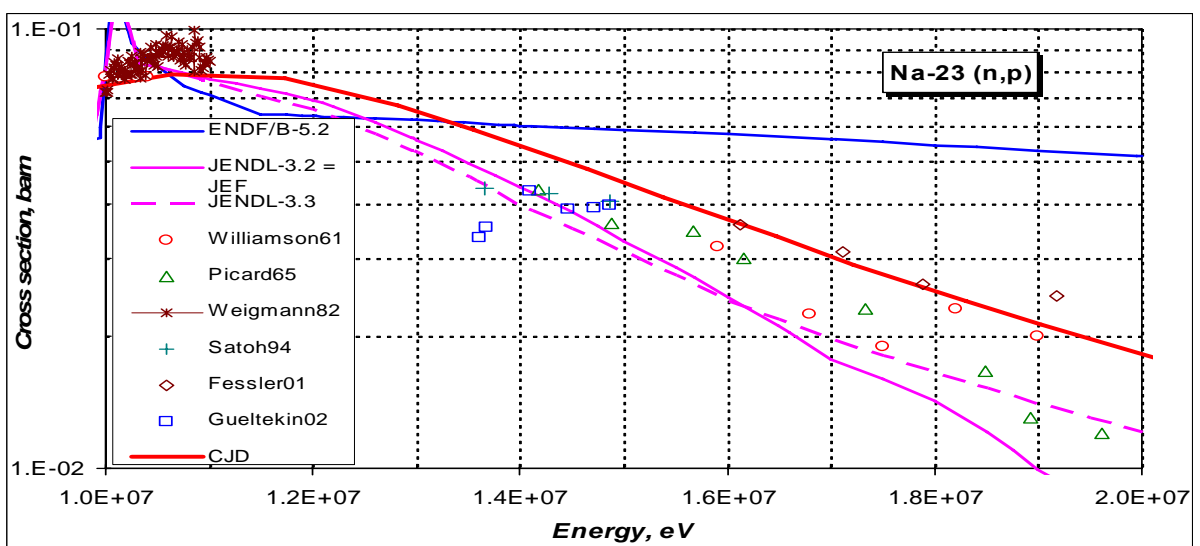


Рисунок 36 – Сечение реакции (n,p) в области энергий 10.0 – 20.0 МэВ.

Выше этой энергии результаты Вильямса испытывают сильную осцилляцию, не подтверждаемую более поздними данными Вайгемана 1982 г.. Отметим, что последние не учитывались при оценке сечений ни в ENDF/B ни в JENDL-3. Из приведенных рисунков видно, что оценка ENDF/B лучше описывают совокупность экспериментальных данных, за исключением области энергий выше 13 МэВ, где оценка из JENDL-3.3 имеет очевидное преимущество. Оценка сечения, выполненная в ЦЯД, не отражает структуру сечения, наблюдаемую в экспериментах, но хорошо согласуется с совокупностью экспериментов выше 11 МэВ.

Очевидно, что сечение реакции (n,p) нуждается в переоценке на основе данных Вайгемана.

Выводы:

Оценка из ENDF/B предпочтительна по сравнению с другими. Она требует небольшой корректировки в области порога реакции, а также, в области энергий выше 10-МэВ. Имеется возможность откорректировать сечение в этой области энергий согласно оценке ЦЯД.

3.6. Сечение реакции (n,a)

Сравнение оцененных кривых с экспериментальными данными показано на рисунках 37-39.

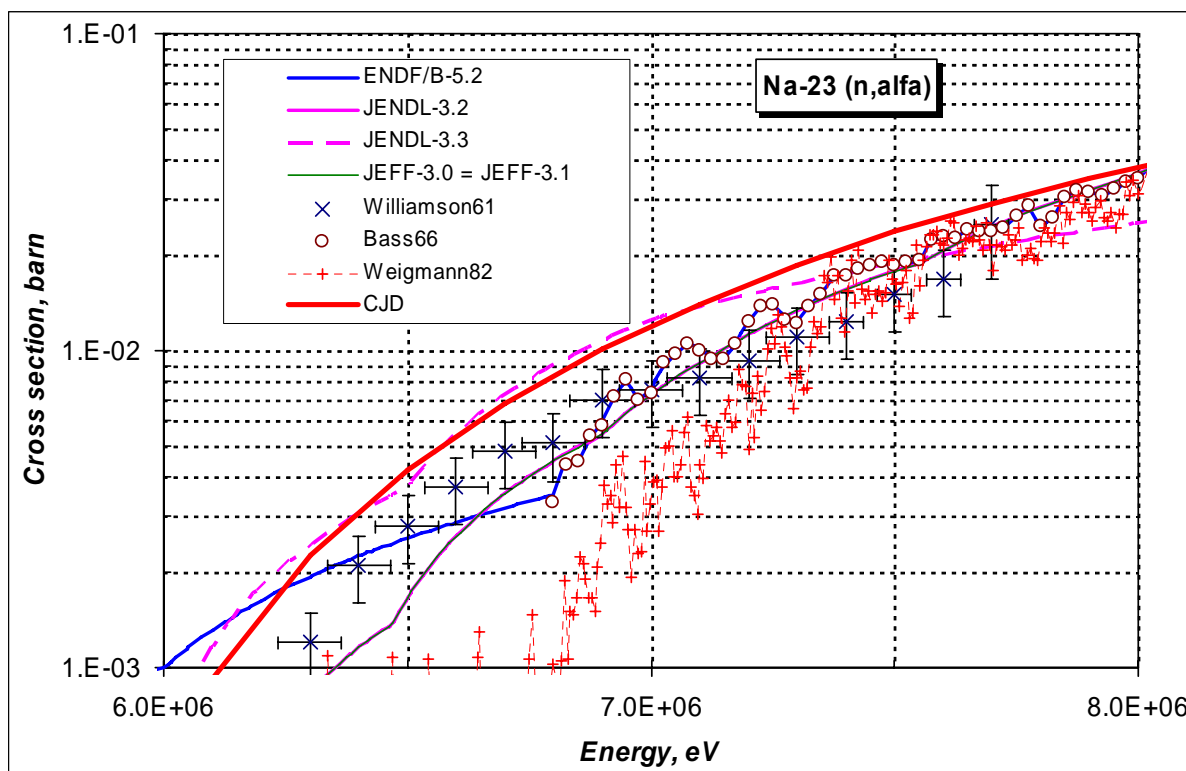


Рисунок 37 – Сечение реакции (n,a) в области энергий 6.0 –8.0 МэВ.

Новые экспериментальные данные Вайгемана вблизи порога указывают на плавное нарастание сечения реакции (как это имеет место в случае фтора или алюминия, например). Все оценки в этой области (ниже 7.5 МэВ) опираются на данные Вильямсона и Басса и, по нашему мнению, требуют корректировки.

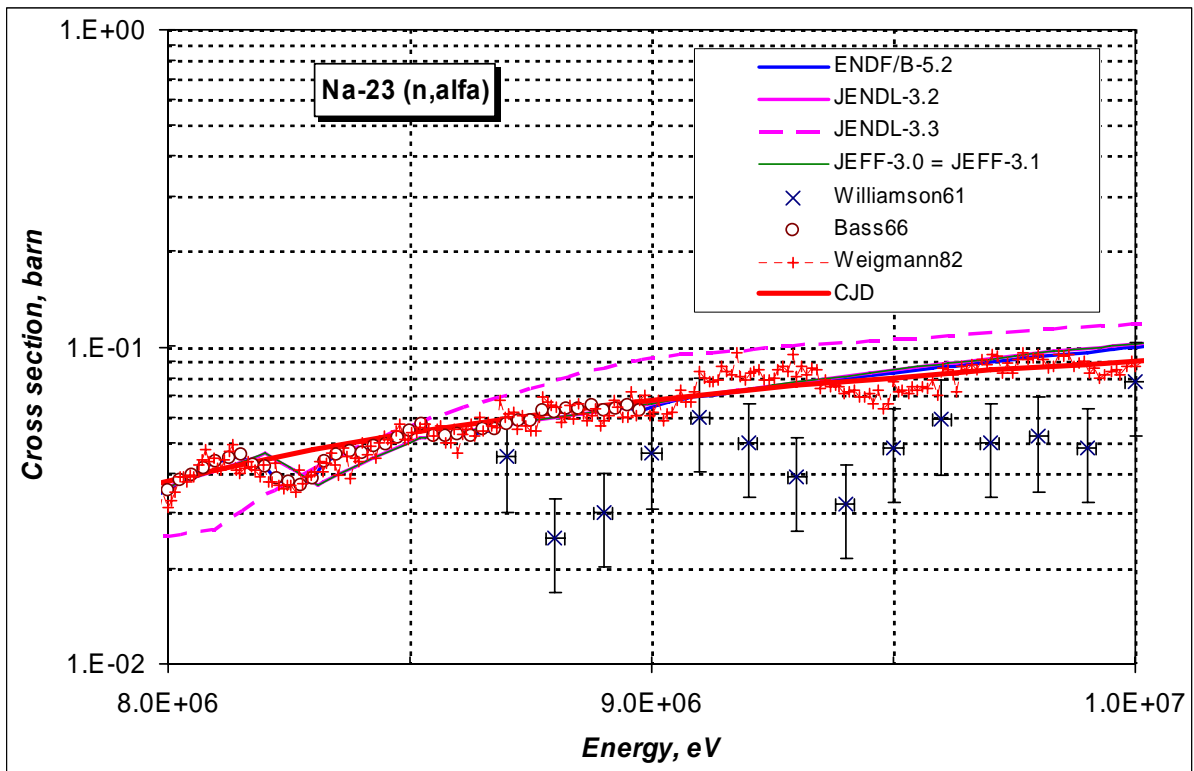


Рисунок 38 – Сечение реакции (n,а) в области энергий 8.0 –10.0 МэВ.

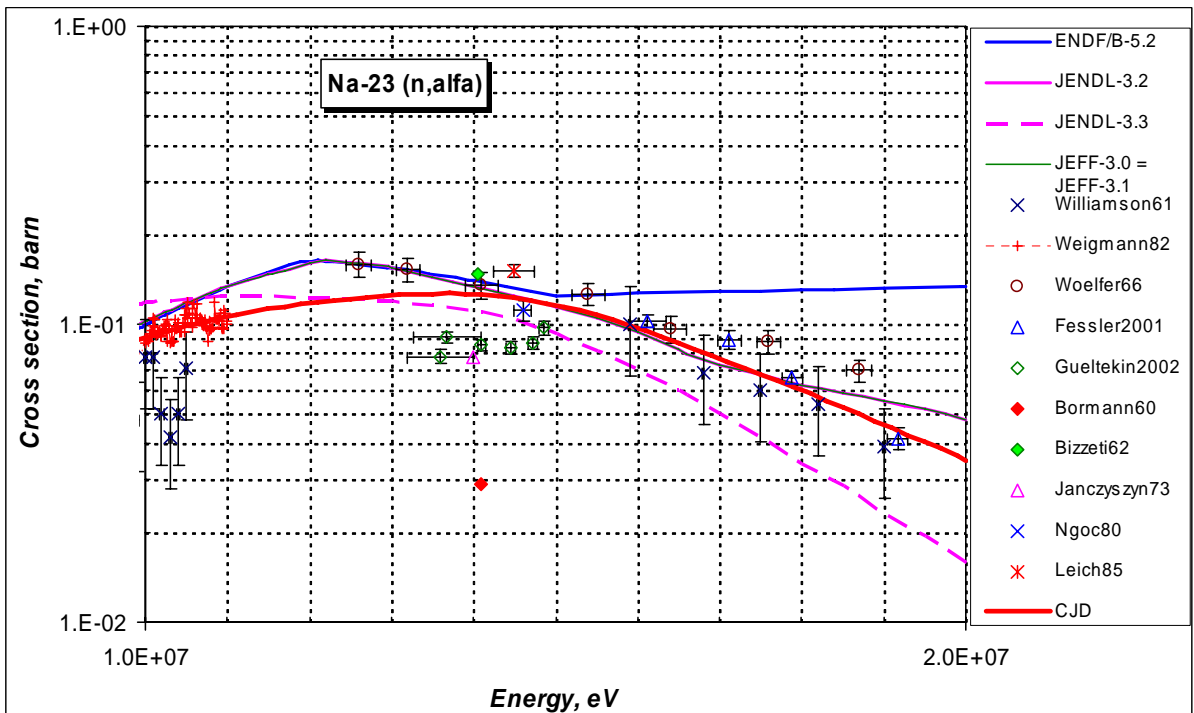


Рисунок 39 – Сечение реакции (n,а) в области энергий 10.0 –20.0 МэВ.

От 7.5 до 14 МэВ оценка ENDF/B-V получила подтверждение в более поздних результатах Вайгемана и представляется наиболее надежной. При этой энергии оценка ENDF/B-V «сшивается» с оценкой JEFF, которая наилучшим образом согласуется с совокупностью данных при более высоких энергиях, включая недавние измерения Фесслера. В то же время, нельзя не отметить и расхождение экспериментальных данных в области 15 Мэв, где результаты Гвелтекина (2002) и Джакцисцина(1973) лежат существенно ниже данных Вольфера и Бизетти, полученных в 60-х годах и более позднего

результата Лейча (85). Нельзя не обратить внимания и на то, что данные Вольфера подтверждаются и результатами Фесслера. Оценка, выполненная в ЦЯД, носит более плавный характер и хорошо согласуется с экспериментальными данными выше 10 МэВ.

3.7. Сечения реакций (n,d) и (n,t)

Сечения реакций (n,d) и (n,t) в рассматриваемых оценках отсутствуют, вероятно, по причине их малой величины. Однако, в силу необходимости знания этих сечений в задачах активации, следовало бы включить в новую оценку соответствующие секции. За основу их можно взять оценку сечений, выполненных в ЦЯД (см. рис.40 – 41).

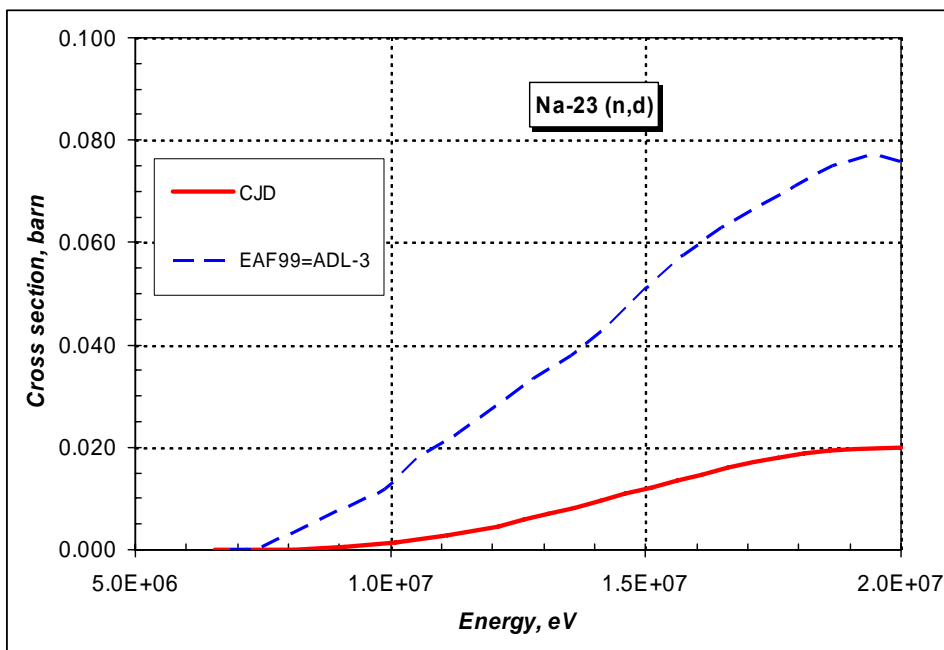


Рисунок 40 - Сечение реакции (n,d) в области энергий 5.0 –20.0 МэВ

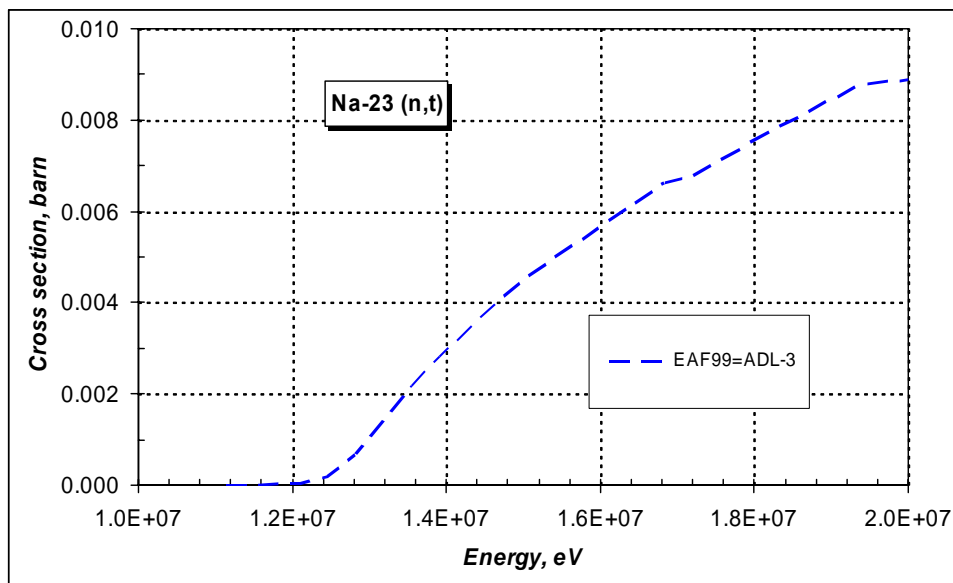


Рисунок 41 - Сечение реакции (n,t) в области энергий 10.0 –20.0 МэВ

4. Энерго-угловые распределения

4.1. Анизотропия упругого рассеяния.

В оценке ENDF/B-5 угловые распределения представлены полиномами Лежандра на основе данных работы Кени и Перри(1976). Привлекались расчеты, выполненные по оптической модели. В оценках JENDL-3 и JEFF-3 использовались расчеты по программе CASTHY.

Одним из основных параметров углового распределения упругого рассеяния нейтронов является средний косинус угла рассеяния.

На рисунке 42 приводится сравнение различных оценок среднего косинуса угла рассеяния при упругом рассеянии нейтронов.

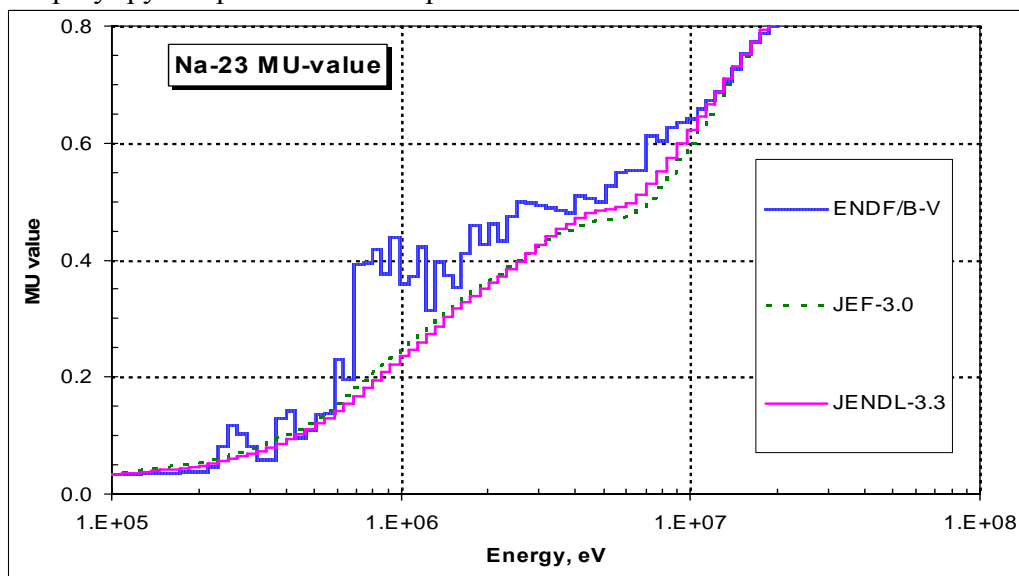


Рисунок 42 – Энергетическая зависимость $\mu(E)$.

Из приведенного на рисунке сравнения видно, что эта величина в оценке ENDF/B имеет принципиально различный характер энергетической зависимости $\mu(E)$. В районе 1 МэВ значения различных оцененных значений отличаются в ~ 2 раза. Оцененная кривая из ENDF/B, в целом, лежит выше кривых из JEFF-3 и JENDL-3. Экспериментальные данные Кени и Перри, находящиеся в библиотеке EXFOR, подтверждают ход кривой из ENDF/B (см. рис. 43).

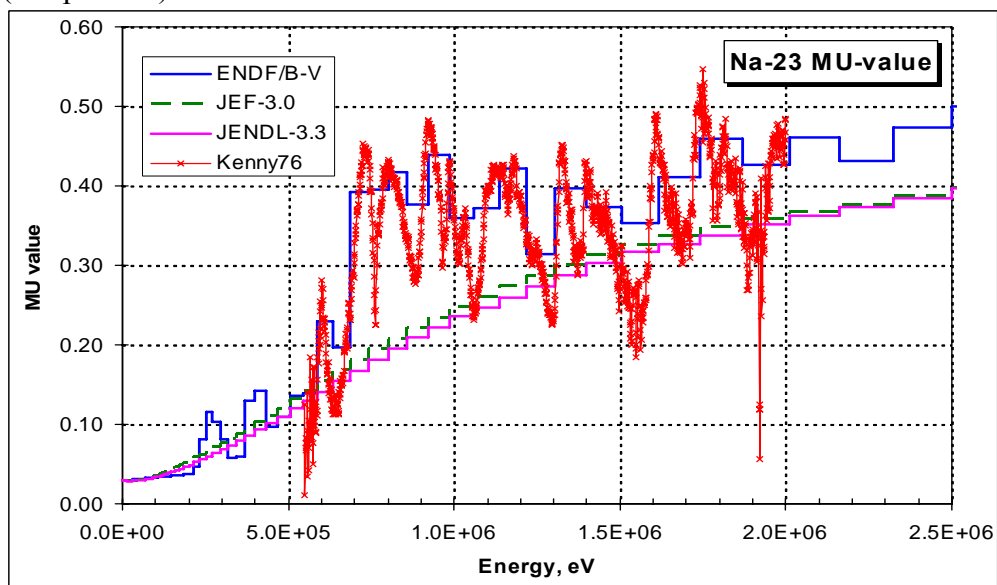


Рисунок 43 – Сравнение оцененных и экспериментальных значений $\mu(E)$.

Однако, наряду с экспериментом Кени и Перри, в библиотеке EXFOR имеются экспериментальные данные по угловым распределениям упруго рассеянных нейтронов, выполненные в Гиле группой С.Копески и др. Данные приводятся как угловые распределения рассеянных нейтронов под разными углами 24, 40, 60, 90, 120, 137 и 150 градусов. Величина среднего косинуса угла рассеяния после обработки этих данных Николаевым М.Н. приведена на рисунке 44.

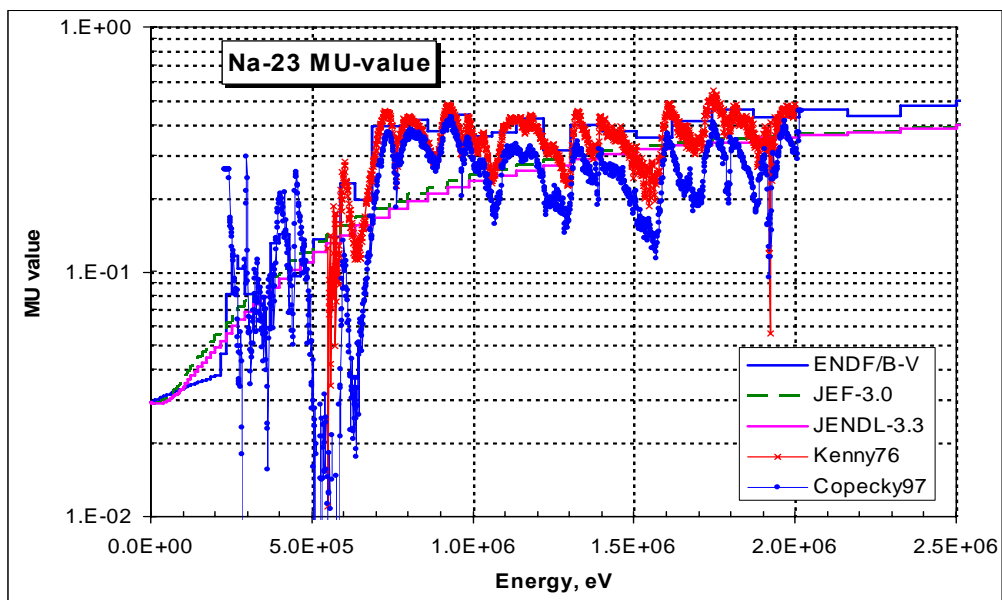


Рисунок 44 – Сравнение оцененных и экспериментальных значений $\mu(E)$.

Из приведенного на рис.44 сравнения видно, что характер энергетической зависимости величины $\mu(E)$ в обоих экспериментах совпадают. Значения из эксперимента С.Копески и др. находятся систематически ниже данных Кении и Перри. Если обработка эксперимента, выполненного в Гиле, подтвердится, то это значит, что средний косинус угла упруго рассеянных нейтронов можно значительно понизить относительно оценки из ENDF/B до уровня, например, оценки из JENDL-3.3.

Выводы:

Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов нуждаются в переоценке. Для этого имеются достаточно подробные экспериментальные работы, выполненные недавно в Гиле группой С.Копески и др.

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

При анализе фотонных данных рассматривались данные из библиотек ENDF/B6r8, JEF2.2, JENDL3.2, JENDL3.3.

Данные в библиотеке ENDF/B6.r8 представлены неполно: присутствуют только фотоны при неупругом рассеянии и радиационном захвате нейтронов. В неупругом рассеянии выделен первый уровень, остальные уровни объединены в реакцию nonelastic (MT=3) вместе с другими реакциями неупругого взаимодействия.

Из остальных библиотек наиболее полно фотонные данные представлены в библиотеке JENDL-3.3. В файле MF=12 (множественности образования фотонов и вероятности переходов) представлены данные для реакций MT= 4, 16, 22, 28, 51-78,102,103,107. Для этих же реакций присутствуют файлы MF=14(угловые распределения) и MF=15(энергетические спектры).

Поскольку нейтронные данные в основном были взяты из библиотеки ENDF/B6.r8, то была выполнена небольшая редакционная работа в представлении фотонных данных из библиотеки JENDL-3. Для неупругого рассеяния область непрерывного спектра опустилась до 6.1 МэВ (7.2 МэВ в ENDF/B6.r8) и были приведены в соответствие пороговые энергии. В связи с этим число дискретных уровней стало 63, т.е. уменьшилось по сравнению с JENDL-3.3. Множественности образования фотонов и спектры в JENDL-3.3 рассчитывались по программе TNG. Для уровней 60, 61, 63 приводится большое количество переходов (до 30-ти) с маленькой вероятностью образования фотонов. Для этих уровней решено было оставить схемы, представленные в JENDL3.2 из Nuclear Physics, Vol.A30,1978.

Ниже в таблице дана схема гамма-переходов для неупругого рассеяния, представленная в окончательном варианте секций фотонных данных в библиотеке РОСФОНД.

В секциях MF=14 и MF=15 были выполнены аналогичные замены границы непрерывного спектра и порогов.

| N | Энергия уровня, MeV | Переход | Энергия гамма-кванта, MeV | Вероятность перехода, %. |
|-----|---------------------|---------|---------------------------|--------------------------|
| 0. | 0.0000 | | | |
| 51. | 0.4400 | 1: 1→0 | 0.4400 | 100 |
| 52. | 2.0780 | 3: 2→0 | 2.0780 | 9 |
| | | 2→1 | 1.6380 | 91 |
| | | 1→0 | 0.4400 | 91 |
| 53. | 2.3930 | 3: 3→0 | 2.3930 | 66 |
| | | 3→1 | 1.9530 | 34 |
| | | 1→0 | 0.4400 | 34 |
| 54. | 2.6400 | 6: 4→0 | 2.6400 | 98 |
| | | 4→1 | 2.2000 | 1 |
| | | 4→2 | 0.5620 | 1 |
| | | 2→0 | 2.0780 | 0.09 |
| | | 2→1 | 1.6380 | 0.91 |
| | | 1→0 | 0.4400 | 1.91 |
| 55. | 2.7050 | 6: 5→1 | 2.2650 | 64 |
| | | 5→2 | 0.6270 | 35 |
| | | 5→0 | 2.7050 | 1 |
| | | 2→0 | 2.0780 | 3.15 |
| | | 2→1 | 1.6380 | 31.85 |
| | | 1→0 | 0.4400 | 95.85 |
| 56. | 2.9830 | 3: 6→0 | 2.9830 | 59 |
| | | 6→1 | 2.5430 | 41 |

| | | | | |
|-----|--------|---------|--------|-------------|
| | | 1→0 | 0.4400 | 41 |
| 57. | 3.6800 | 12: 7→1 | 3.2400 | 78.0 |
| | | 7→2 | 1.6020 | 2.0 |
| | | 7→3 | 1.2870 | 1.0 |
| | | 7→4 | 1.0400 | 19.0 |
| | | 3→0 | 2.3930 | 0.66 |
| | | 3→1 | 1.9530 | 0.34 |
| | | 4→0 | 2.6400 | 18.62 |
| | | 4→1 | 2.2000 | 0.19 |
| | | 4→2 | 0.5620 | 0.19 |
| | | 2→0 | 2.0780 | 0.1971 |
| | | 2→1 | 1.6380 | 1.9929 |
| | | 1→0 | 0.4400 | 80.05229 |
| 58. | 3.8800 | 13: 8→0 | 3.8800 | 24 |
| | | 8→1 | 3.4400 | 9 |
| | | 8→2 | 1.8020 | 61 |
| | | 8→4 | 1.2400 | 4 |
| | | 8→6 | 0.8970 | 2 |
| | | 2→0 | 2.0780 | 5.4936 |
| | | 2→1 | 1.6380 | 55.5464 |
| | | 4→0 | 2.6400 | 3.92 |
| | | 4→1 | 2.2000 | 0.04 |
| | | 4→2 | 0.5620 | 0.04 |
| | | 6→0 | 2.9830 | 1.18 |
| | | 6→1 | 2.5430 | 0.82 |
| | | 1→0 | 0.4400 | 65.4064 |
| 59. | 4.4300 | 5: 9→0 | 4.4300 | 94 |
| | | 9→3 | 2.0370 | 6 |
| | | 3→0 | 2.3930 | 3.96 |
| | | 3→1 | 1.9530 | 2.04 |
| | | 1→0 | 0.4400 | 2.04 |
| 60. | 4.7700 | 8: 10→1 | 4.3300 | 60 |
| | | 10→2 | 2.6920 | 27 |
| | | 10→5 | 2.0650 | 13 |
| | | 5→1 | 2.2650 | 8.32 |
| | | 5→2 | 0.6270 | 4.68 |
| | | 2→0 | 2.0780 | 2.8512 |
| | | 2→1 | 1.6380 | 28.8288 |
| | | 1→0 | 0.4400 | 97.1488 |
| 61. | 5.3800 | 6: 11→0 | 5.3800 | 13 |
| | | 11→1 | 4.9400 | 60 |
| | | 11→2 | 3.3020 | 27 |
| | | 2→0 | 2.0780 | 2.43 |
| | | 2→1 | 1.6380 | 24.57 |
| | | 1→0 | 0.4400 | 84.57 |
| 62. | 5.5300 | 7: 12→2 | 3.4520 | 21 |
| | | 12→5 | 2.8250 | 79 |
| | | 5→0 | 2.7050 | 0.79 |
| | | 5→1 | 2.2650 | 50.56 |
| | | 5→2 | 0.6270 | 27.65 |
| | | 2→0 | 2.0780 | 4.43785 |
| | | 2→1 | 1.6380 | 44.2715 |

| | | | | |
|-----|--------|---------|--------|-----------|
| | | 1→0 | 0.4400 | 94.8315 |
| 64. | 5.7600 | 3: 13→0 | 5.7600 | 67 |
| | | 13→1 | 5.3200 | 33 |
| | | 1→0 | 0.4400 | 33 |
| 91 | 5.8436 | | | |

7. Погрешности нейтронных сечений.

На нижеследующих рисунках показаны энергетические зависимости погрешностей нейтронных сечений, принятые в библиотеках ENDF/B-V, JENDL-3.3, в многогрупповой библиотеке БНАБ-93.1⁶ и в недавней оценке Пальмиотти и Сальватореса⁷. Из сравнения оцененных и экспериментальных данных, проведенного в разделе 2, не усматривается причин для резкого повышения погрешности полного сечения в интервале от 40 до 100 кэВ, как это принято в оценке БНАБ-93.1. В области энергий порядка МэВ разброс экспериментальных данных, как видно из графиков, приведенных в разделе 3, не превышает 0.2 барна, составляя в среднем порядка 0.1 барна, т.е. примерно 5%. Оценка, принятая в БНАБ-93 и в этой области представляется завышенной. В то же время погрешности порядка 2 -2.5%, принятые в JENDL-3, представляются чрезмерно оптимистичными. Оценки ENDF/B-V и Пальмиотти различаются не существенно и обе представляются вполне реалистичными.

7.1. Погрешность полного сечения.

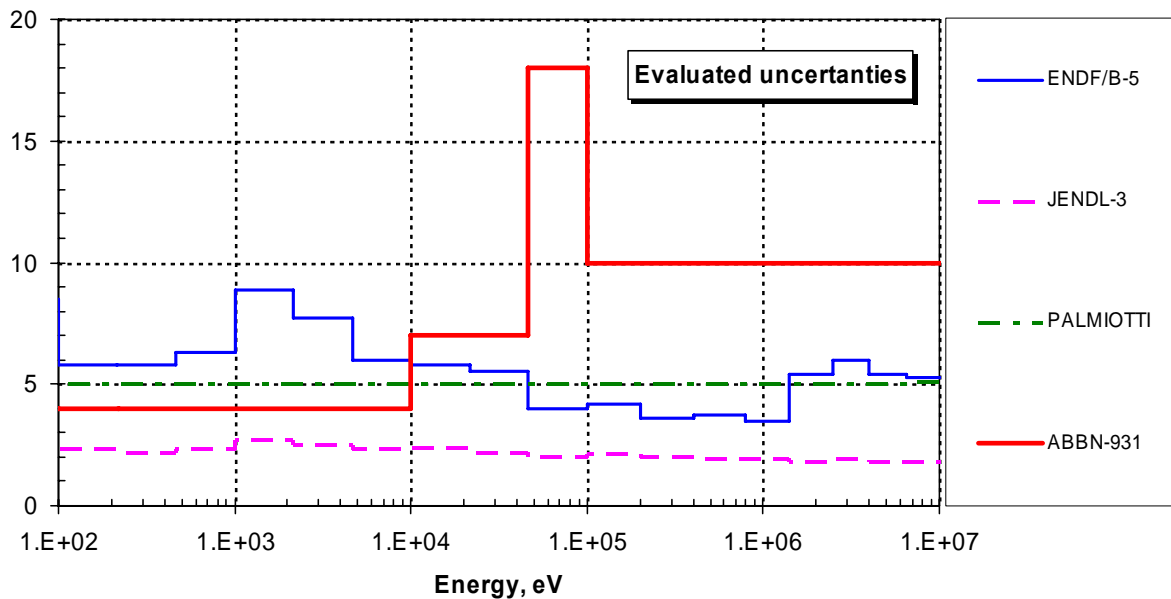


Рисунок 45 – Оценки погрешностей полного сечения.

7.2. Погрешность сечения упругого рассеяния.

Погрешности сечения упругого рассеяния во всех оценках практически совпадают с оценками погрешностей полного сечения. Исключением является оценка ENDF/B-V, в которой (вполне обоснованно) учитывается повышение погрешности сечения рассеяния при высоких энергиях, где конкуренция со стороны неупругих взаимодействий становится существенной. Это повышение должно вести к наличию сильных корреляций между погрешностями сечений упругого рассеяния и сечением неупругих взаимодействий.

⁶ Ссылка на БНАБ

⁷ Ссылка на Пальмиотти (с Сальваторесом?)

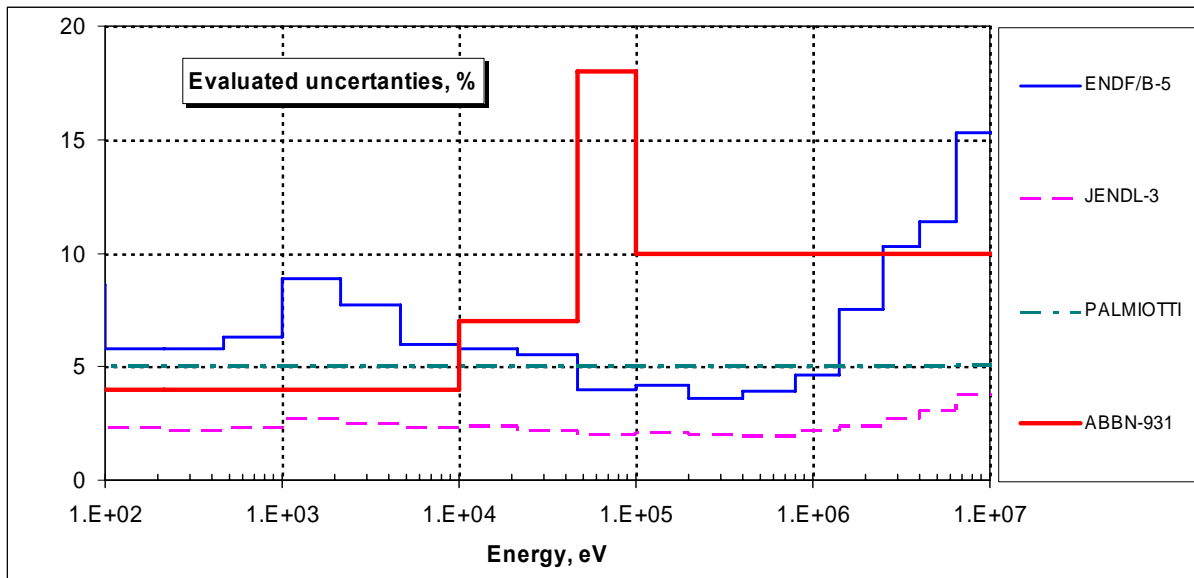


Рисунок 46 – Оценки погрешностей сечения упругого рассеяния.

7.3. Погрешность сечения радиационного захвата.

Погрешности сечения захвата, оцененные в Японии, в резонансной области энергий наиболее осторожны. Основанием для этого служит, очевидно, большой разброс экспериментальных данных в этом энергетическом диапазоне (см. рис.7). При более высоких энергиях расхождения в оценках не принципиальны.

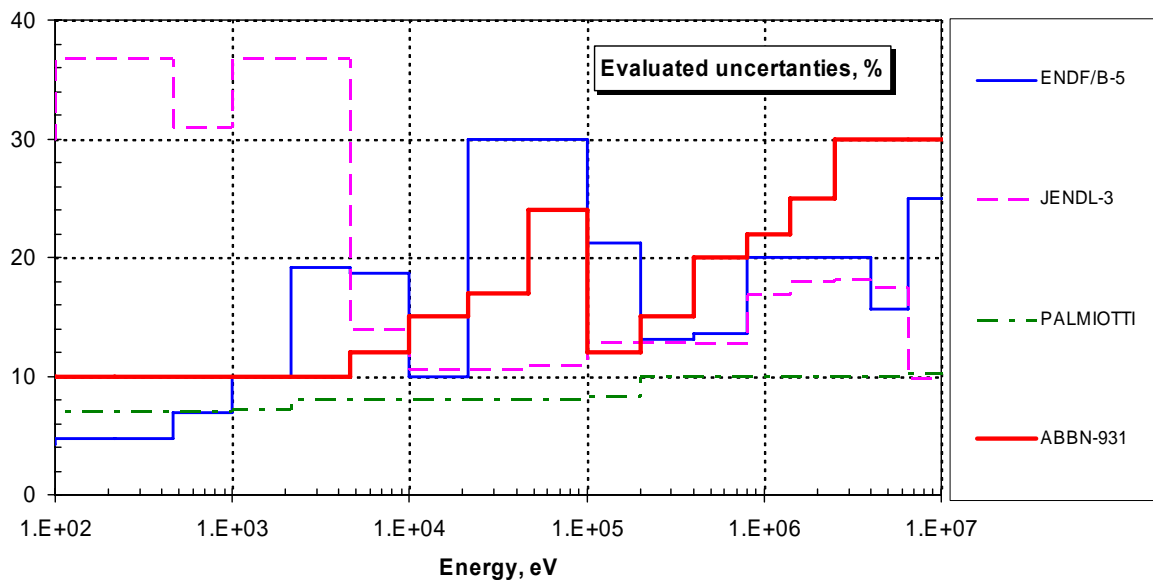


Рисунок 47 – Оценки погрешностей сечения захвата.

7.4. Погрешность сечения неупругого рассеяния.

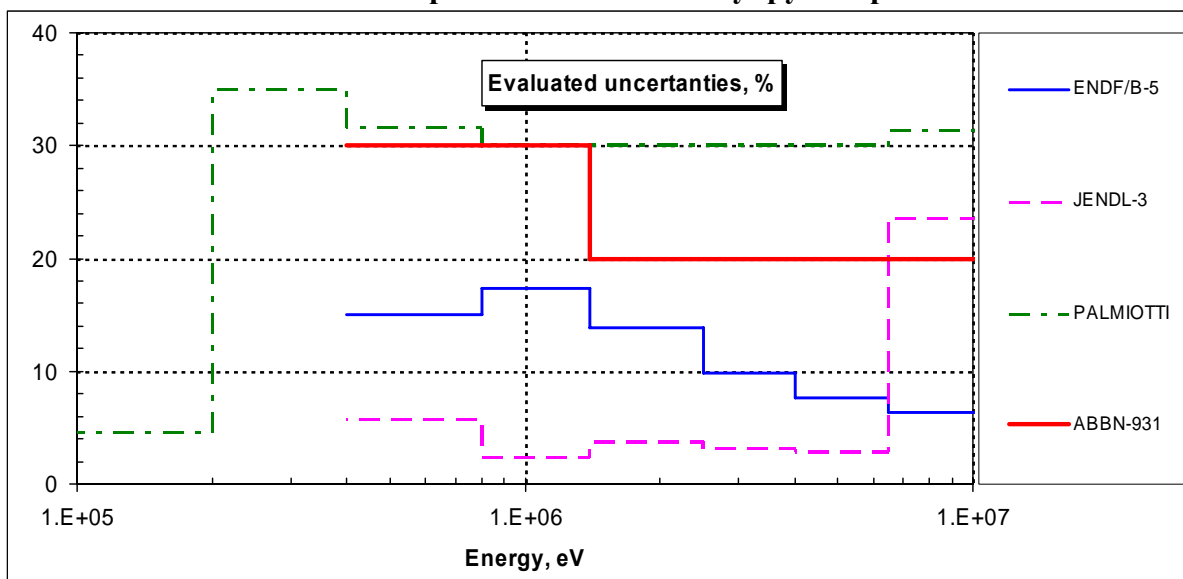


Рисунок 48 - Оценки погрешностей сечения неупругого рассеяния.

Рекомендаций по поводу выбора оценок погрешностей здесь не делается, т.к. для выдачи таких рекомендаций требуется точно знать, для какой цели будут использоваться рекомендованные погрешности, будут ли и каким образом учитываться корреляции между погрешностями и т. п. Приводимые выше данные могут быть полезны для специалистов, которые в будущем сделают такие рекомендации.

9. Заключение

9.1. Выводы

В библиотеку РОСФОНД рекомендуется принять оцененные данные, для Na-23 компилированные следующим образом:

В области резонансных энергий

- принять оценку Ларсона и др. (ENDF/B-VI).

В области гладких сечений

- для сечения полного взаимодействия принять оценку Ларсона и др. (ENDF/B-VI);
- сечение упругого рассеяния получить из баланса;
- для сечения на уровнях неупругого рассеяния и континууме уровней принять оценку Ларсон и др. (ENDF/B-VI);
- для сечений реакций (n2n,), (n,na), (n,np), (n,p) принять новую оценку Манохина (ЦЯД);
- для сечения реакции (n,t) принять оценку из ADL-3;
- для сечений реакций (n,p) и (n,a) принять до 9.0 МэВ оценку Ларсона и др. (ENDF/B-VI), выше 9.0 МэВ оценку Манохина (ЦЯД)

Данные по угловым распределениям принять из ENDF/B-VI.

Данные по энергетическим спектрам нейтронов в (реакции n,2n) и на континууме уровней неупругого рассеяния принять из ENDF/B-VI.

Энерго-угловые данные для следующих реакций (n,na), (n,np), (n,p), (n,d) принять из JENDL-3.3.

Данные об образовании радионуклидов принять из ENDF/B-VI.

Для данных об образовании фотонов, угловых распределениях фотонов и их энергетических спектров использовать оценку Забродской, Николаева (ABBN).

Ковариационные данные из файлов MF=32, 33 оставить из ENDF/B-VI для информативности, но не рекомендовать для использования.

9.2. Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle\sigma\rangle$ на спектре Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$ |
|------------------------|-----------------------------|------------|--|
| Упругое рассеяние | 3.394 барн | 117.8 барн | 2.709 барн |
| Рад. захват | 0.528 барн | 0.314 барн | 0.280 мбарн |
| Реакция (n,p) | - | - | 1.69 мбарн |
| Реакция (n,d) | - | - | 0.011 мбарн |
| Реакция (n,t) | - | - | 0.86 мкбарн |
| Реакция (n, α) | - | - | 0.776 мбарн |
| Реакция (n,2n) | - | - | 6.7 мкбарн |

9.3. Автор обоснования отбора оцененных данных

Кощев В.Н.

12. МАГНИЙ

Магний не имеет долгоживущих радиоактивных изотопов. Для трех стабильных изотопов имеются оценки V.Hatchya and T.Asoni (1987), принятые в ФОНД-2.2 из JENDL-3.2. В 2001 г. Shibata внес в эти оценки некоторые дополнения и небольшие усовершенствования. В модифицированном виде оценки были включены в JENDL-3.3 и JEFF-3.1.

В ENDF/B-VII содержится оценка данных для природного магния из ENDF/B-VI, выполненная Ларсоном в 1978 г. и оценка данных для основного изотопа – магния-24, выполненная годом позже Ларсоном и Манном. В библиотеке CENDL содержатся результаты оценки Tang Guo-You (1983).

Целесообразность выбора файла данных из JENDL-3.3 (по крайней мере, в качестве основы) очевидна. Заметим, что в ENDF/B-VII также приняты оценки данных для изотопов магния из JENDL-3.3

12.1. Магний-24

Содержание в естественной смеси 78.99ат%

В оценке JENDL-3.3 описано 4 s-резонанса и 23 p-резонансов (из них 9 с $J=1/2$). Параметры резонансов практически совпадают с указанными в атласе Мухабхаба¹. Исключение составляют параметры связанного состояния, которое отодвинуто с 67.9 кэВ на 100 кэВ. На рис.1 показаны нарастающие числа резонансов с разными спинами и четностями. Указана также принятая в JENDL-3.3 граница области разрешенных резонансов. Представляется, что она неоправданно занижена. В то же время, при энергиях выше этой границы полное сечение и сечение упругого рассеяния в файле MF=3 представлены весьма детально. Все резонансные пики, обусловленные резонансами, описанными в файле MF=2, в детальной энергетической зависимости полного сечения четко видны (см. рис.2а). Кроме того, проявляется еще целый ряд слабых резонансов, параметры которых, видимо, не были определены (что и явилось, вероятно, причиной снижения границы области разрешенных резонансов).

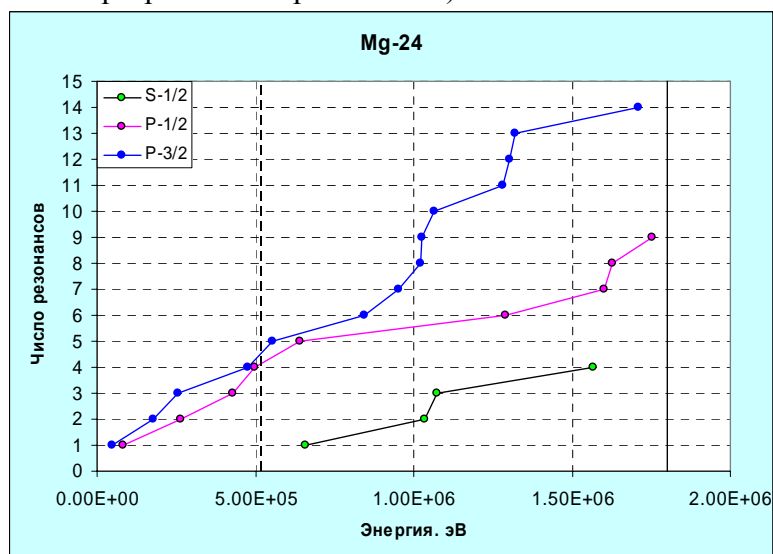


Рис.1 Нарастающие числа резонансов магния-24. Прежняя граница области разрешенных резонансов указана штриховой линией; граница, принятая в Росфонде, – сплошной.

¹ S.F.Mughabghab. Atlas of Neutron Resonances. Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. ELSEVIER,2005.

Резонансная структура четко проявляется и при более высоких энергиях (см. рис.2б, на котором оцененное полное сечение сравнивается с единственным экспериментальным результатом, помещенным в EXFOR).

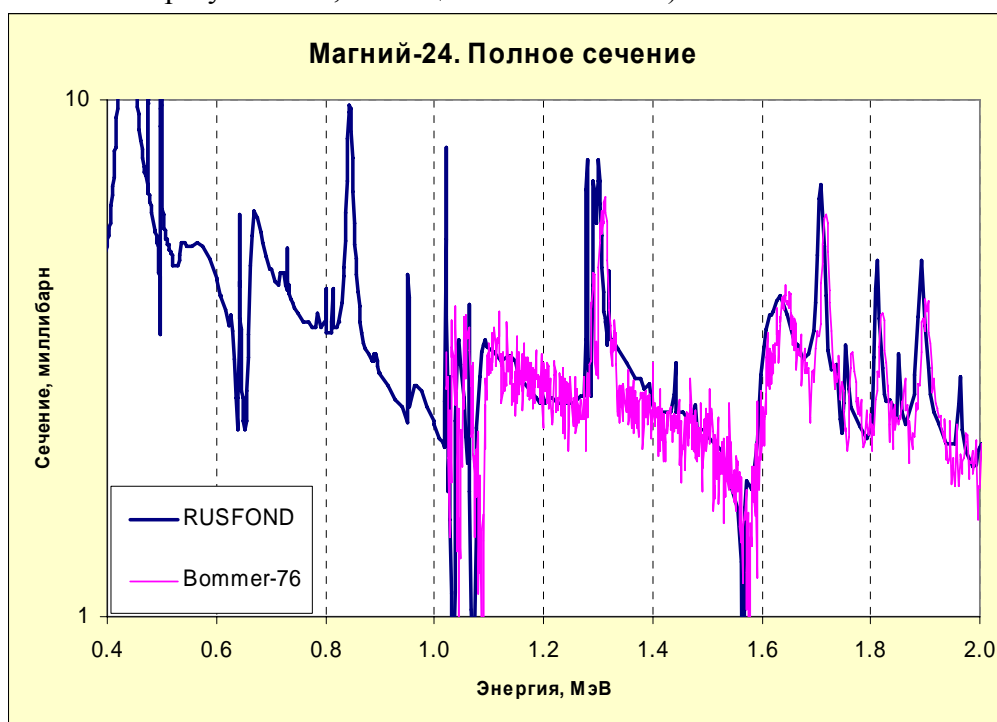


Рис.2а.

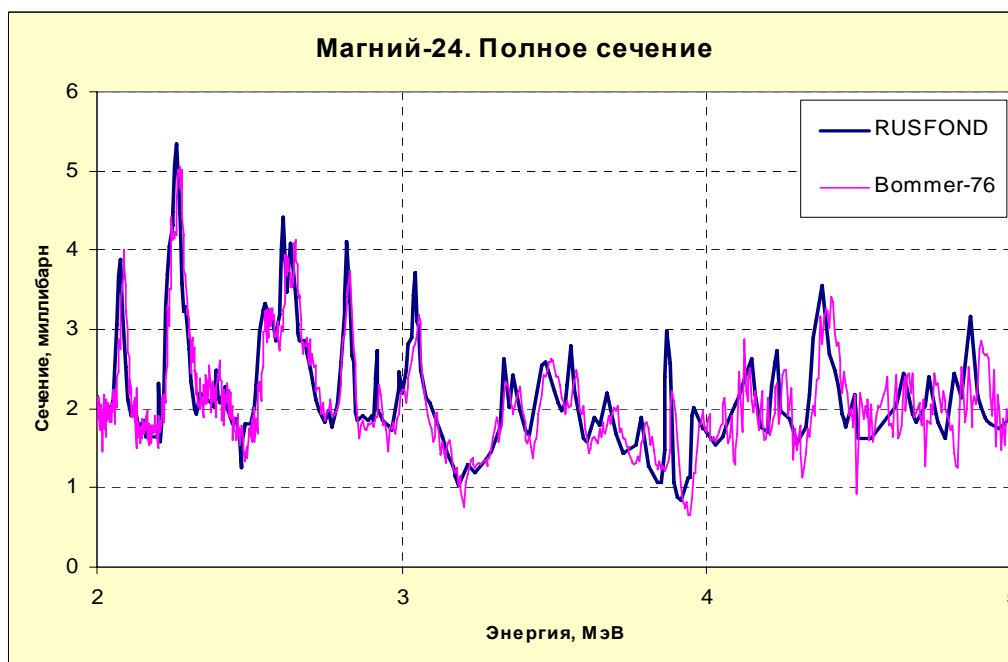


Рис.2б.

В табл. 1. тепловые сечения и резонансный интеграл захвата, указанные в заголовочной секции файла JENDL-3.3, сравниваются с оценками Мухабхаба¹ и данными, вычисленными на основе детального хода сечений, полученного с помощью программы NJOY. Расхождения в резонансном интеграле выходят за пределы погрешности, указанной Мухабхабом. В перечне литературных ссылок в атласа Мухабхаба, нет ни одного указания на работу, в которой определялся резонансный интеграл для магния-24. Нет таких ссылок и в EXFORe. Поэтому 10-процентная погрешность, указанная Мухабхабом, не представляется достаточно обоснованной.

Расхождение в сечении рассеяния также существенно (втрое) превышает указанную Мухабхаб погрешность. Устранение этого расхождения позволило бы устранить и небольшое расхождение в полном сечении природного магния (см. ниже п. 12.4). Заметим также, что в оцененном сечении захвата выше границы области разрешенных резонансов структура не проявлена. Очевидно, переоценка сечений основного изотопа магния в области разрешенных резонансов была бы желательной. Эта переоценка, однако, не может быть выполнена в рамках настоящей работы.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл магния-24.

| Величина | Мухабхаб | Указано в MF=451 | Рассчитано по NJOY |
|-----------------|---------------|------------------|--------------------|
| σ_γ | 0.0538±0.0013 | 0.050 | 0.0503 |
| σ_{el} | 3.74±0.04 | 3.75 | 3.829 |
| RI | 0.037±0.004 | 0.0312 | 0.0300 |

На рис.3 -5 с экспериментальными данными сравниваются оцененные сечения реакций (n,p), (n, α) и (n,2n). Следует отметить, что в случае реакции (n, α) расхождение с единственным экспериментом Лавиелла существенно.

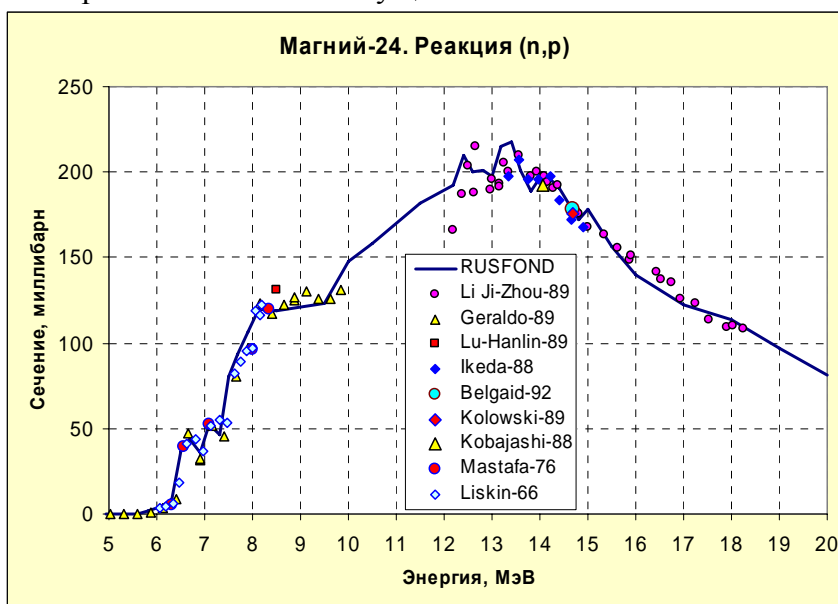


Рис.3.

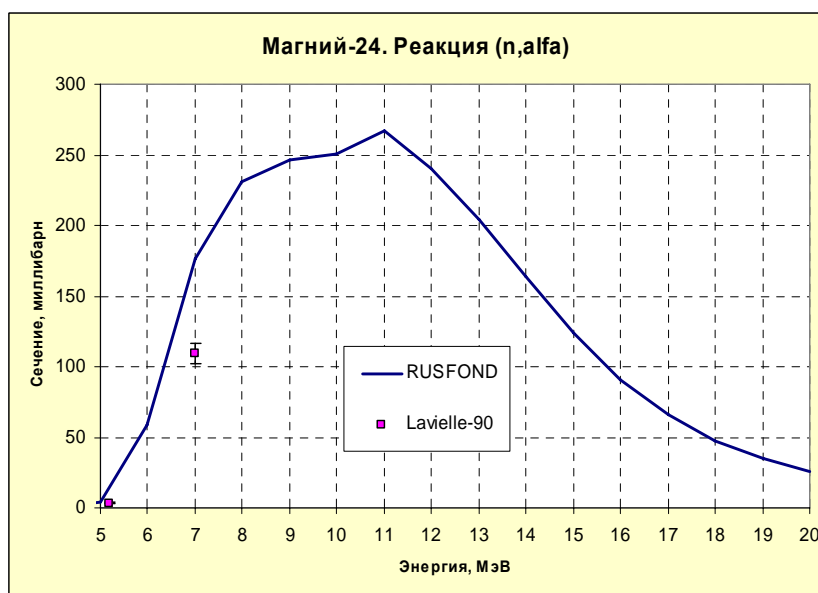


Рис.4.

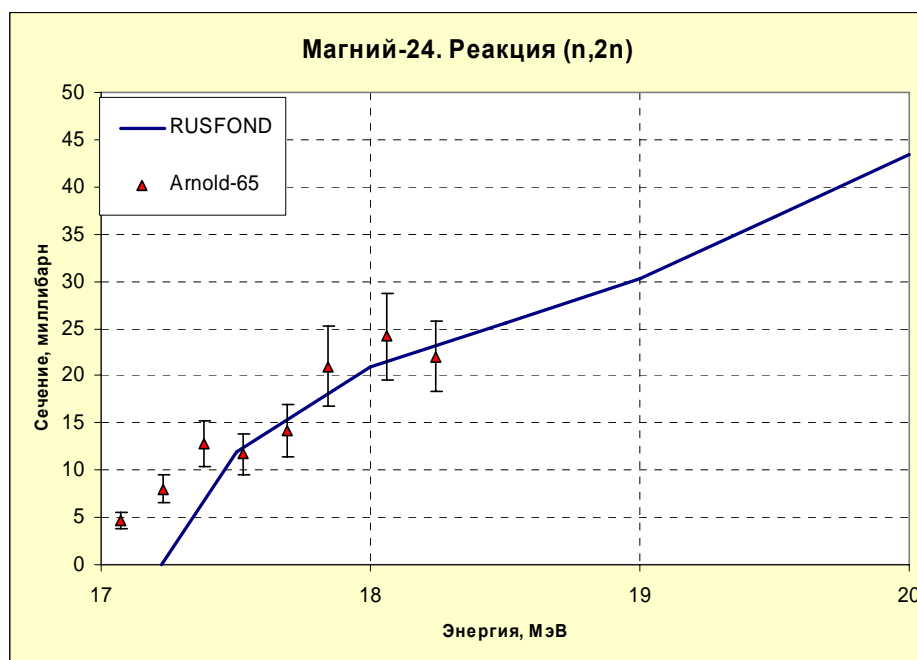


Рис.5.

Заключение

В библиотеку РОСФОНД рекомендуется включить файл данных для Mg-24 из JENDL-3.3 (2001 г.). Уточнить значения тепловых сечений и резонансного интеграла в секции MT=451.

Переоценка сечений в области разрешенных резонансов (ниже 2 МэВ) была бы желательной.

Автор проведенного отбора оцененных данных

Николаев М.Н.

12.2. Магний-25

Содержание в естественной смеси 10.00ат%

В оценке JENDL-3.3, описаны параметры 9 резонансов с максимальной энергией 261 кэВ. Граница области разрешенных резонансов 220 кэВ. Резонансные параметры соответствуют атласу Мухабхаба, изданному в 1984 г. В новом атласе Мухабхаба¹ в этой энергетической области приведены параметры 20 резонансов, из которых четыре являются, предположительно, мультиплетами. Существенно отличаются и параметры тех резонансов, которые имеются в обеих оценках. Казалось бы, целесообразно включить в оценку, принимаемую в РОСФОНД параметры резонансов из нового издания атласа. К сожалению, эти параметры ведут к тепловым сечениям и резонансному интегралу, существенно отличающимся и от прежних значений, и от указанных в последнем издании атласа (см. таблицу 2). Для согласования данных необходим подбор параметров связанного состояния, вариация радиуса рассеяния и т.п. В создавшейся ситуации мы ограничиваемся констатацией факта расхождения оценок резонансных параметров и необходимости согласования данных в дальнейшем.

Таблица 2. Тепловые сечения и резонансный интеграл магния-24.

| Величина | Мухабхаб | Указано в MF=451 | Рассчитано по NJOY | Рассчитано с новыми параметрами |
|-----------------|-------------|------------------|--------------------|---------------------------------|
| σ_γ | 0.199±0.003 | 0.190 | 0.190 | 0.176 |
| σ_{el} | 1.70±0.13 | 2.60 | 2.649 | 1.003 |
| RI | 0.195±0.004 | 0.0989 | 0.1005 | 0.0922 |

Заключение

В библиотеку РОСФОНД рекомендуется включить файл данных для Mg-25 из JENDL-3.3 (2001 г.). Уточнить значения тепловых сечений и резонансного интеграла в секции MT=451.

Переоценка сечений в области разрешенных резонансов (ниже 0.22 МэВ) была бы желательной.

Автор проведенного отбора оцененных данных

Николаев М.Н.

12.3. Магний-26

Содержание в естественной смеси 11.01ат%.

В оценке JENDL-3.3 приведены параметры пяти резонансов, как и в атласе Мухабхаба¹ и почти при тех же энергиях. Максимальная резонансная энергия -432 кэВ; граница области разрешенных резонансов 450 кэВ. Нейтронные и радиационные ширины первого резонанса практически совпадают; для остальных различия существенны. Не удивительно, что при хорошем согласии значений тепловых сечений, значения резонансных интегралов заметно отличаются (см. таблицу 3). Очевидных оснований для пересмотра оценки JENDL-3.3 не усматривается.

Таблица 3. Тепловые сечения и резонансный интеграл магния-26.

| Величина | Мухабхаб | Указано в MF=451 | Рассчитано по NJOY |
|-----------------|---------------|------------------|--------------------|
| σ_γ | 0.0384±0.0006 | 0.038 | 0.0383 |
| σ_{el} | 2.83±0.17 | 2.83 | 2.886 |
| RI | 0.024±0.002 | 0.019 | 0.0178 |

Заключение

В библиотеку РОСФОНД рекомендуется включить файл данных для Mg-26 из JENDL-3.3 (2001 г.). Уточнить значения тепловых сечений и резонансного интеграла в секции MT=451.

Автор проведенного отбора оцененных данных

Николаев М.Н.

12.4 Природный магний

Файл нейтронных данных для природного магния не составлялся. В таблице 4 проводится сравнение тепловых сечений и резонансного интеграла захвата с оценкой Мухабхаба¹.

Таблица 4. Тепловые сечения и резонансный интеграл природного магния.

| Величина | Мухабхаб | Рассчитано по файлам |
|-----------------|---------------------|----------------------|
| σ_γ | 0.0666 ± 0.0011 | 0.0629 |
| σ_{el} | 3.4140 ± 0.0024 | 3.607 |
| RI | 0.038 ± 0.004 | 0.0357 |

Имеется также возможность провести сравнение данных для природного магния на уровне мультигрупповых констант с имеющимися экспериментальными данными.

На рис.6 проводится сравнение данных по полному сечению.

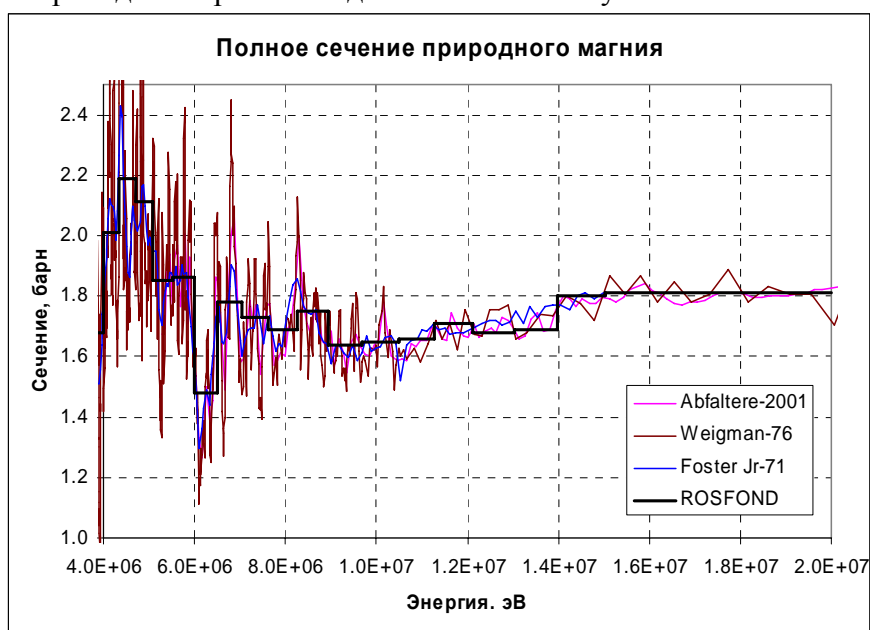


Рис.6а

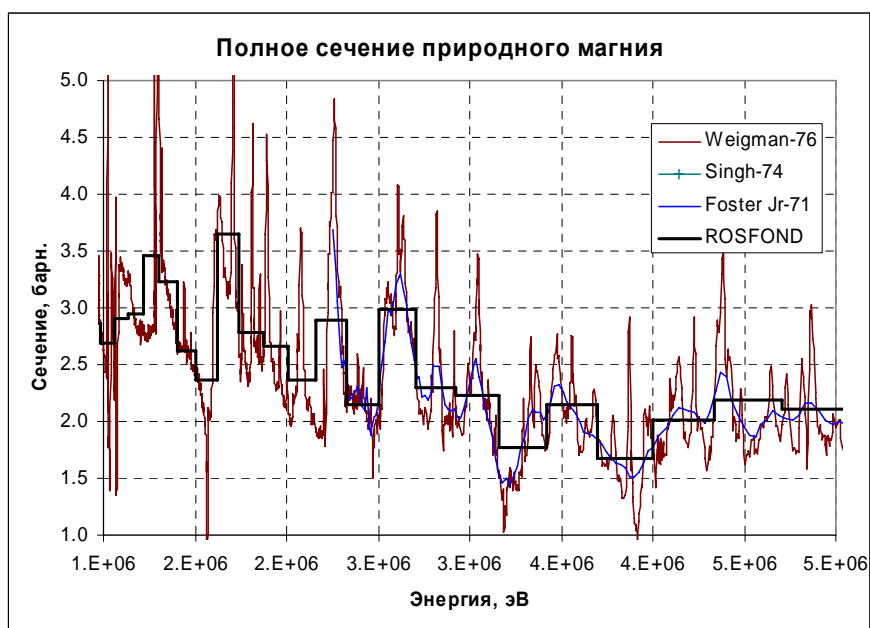


Рис.6б

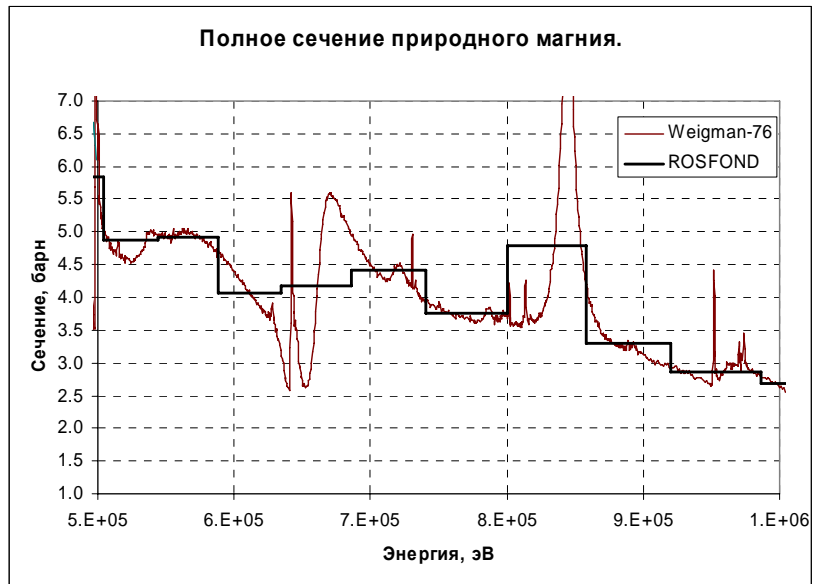


Рис.6в

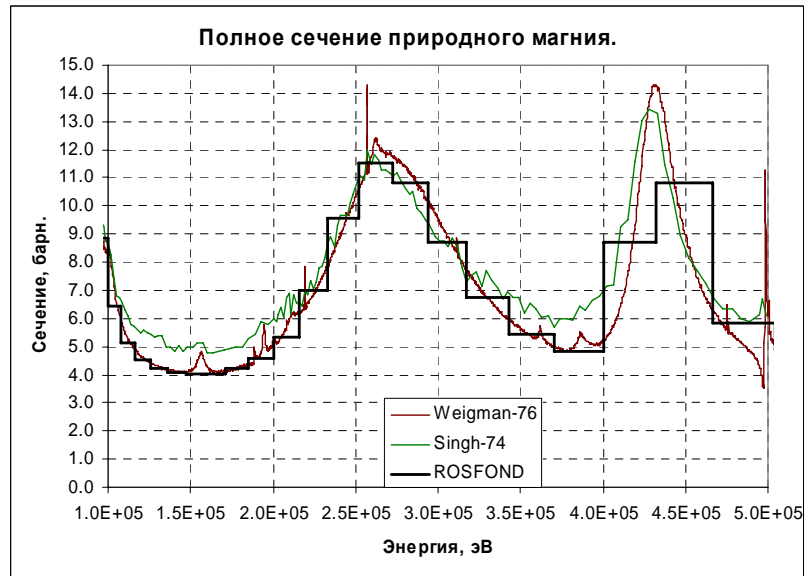


Рис.6г

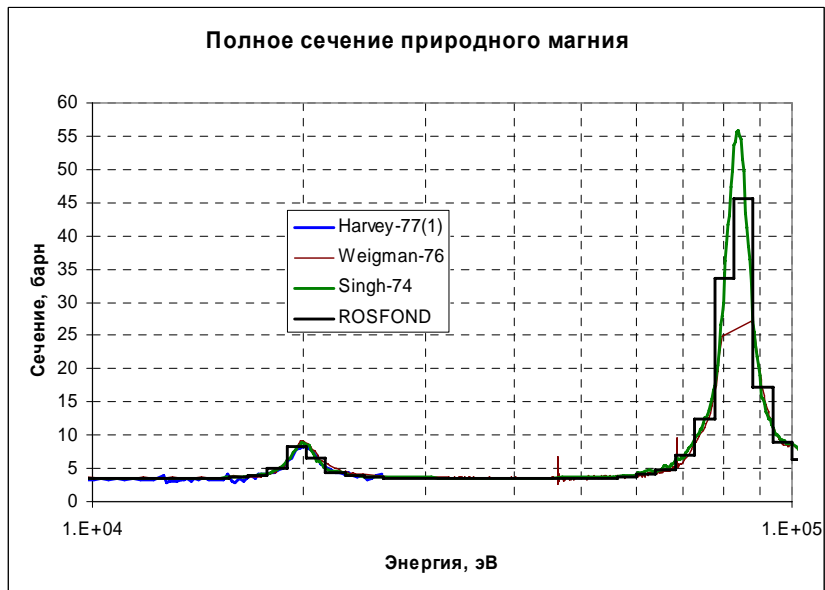


Рис.6д

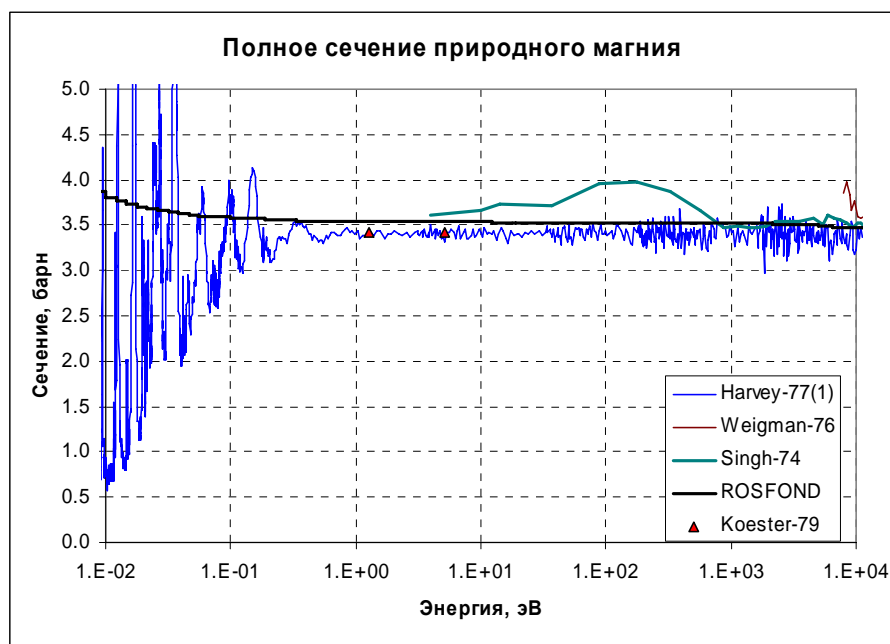


Рис.6е.

Из последнего рисунка видно, что при низких энергиях оцененное полное сечение завышено относительно экспериментальных данных Харви и Кёстера примерно на 0.15 барна. Примерно на столько же оцененные сечения рассеяния тепловых нейтронов для основного изотопа и для природного магния превышают оценки Мухабхаба. Это подтверждает целесообразность пересмотра параметров низколежащих резонансов, которая отмечалась выше. В то же время вне области разрешенных резонансов групповые сечения, полученные из оцененных параметров полных сечений изотопов, вполне удовлетворительно подтверждаются экспериментальными данными.

Экспериментальные данные по радиационному захвату нейтронов в магнии весьма скудны. Имеющиеся сравниваются с многогрупповыми сечениями захвата, полученными на основе оцененных данных для изотопов на рис. 7. Результаты, полученные Гиббсом, подтверждают оцененные данные. Результаты эксперимента Белановой и др., представляются, завышенными. Заметим, кстати, что в EXFORе данные этой работы приведены завышенными на порядок. На рис.7 этот недочет устранен.

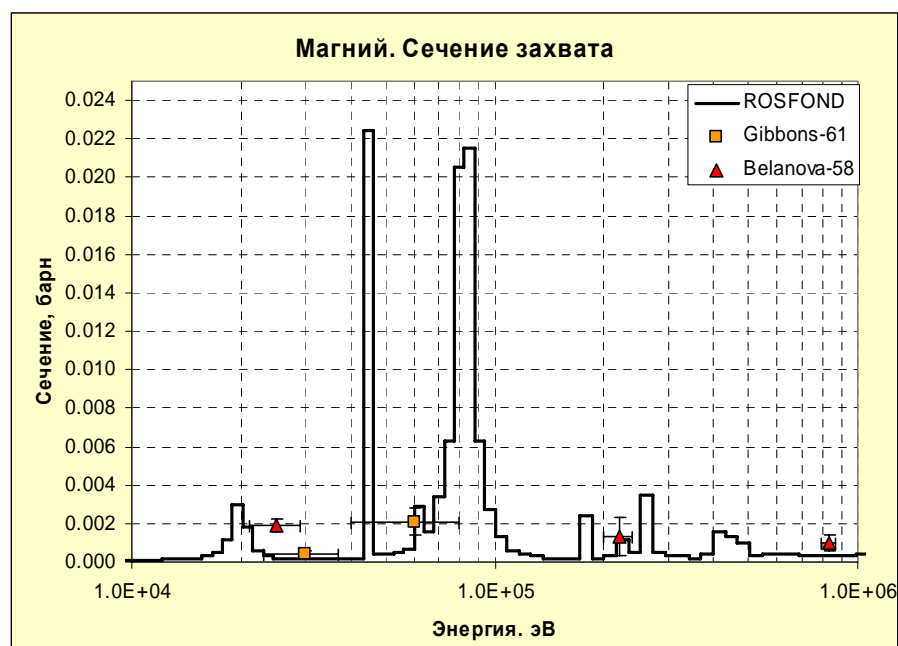


Рис.7

Валидация принятых оцененных данных для изотопов магния по экспериментальным данным для природной смеси изотопов показывает приемлемую согласованность результатов оценок. Возможность и желательность небольших уточнений в области низких энергий уже была отмечена выше.

Представляется желательным компиляции файла данных для природного магния на основе файлов для отдельных изотопов. Это позволит более корректно учитывать резонансную самоэкранировку сечений этого элемента в многогрупповых расчетах, чем это может быть сделано на основе многогрупповых констант для отдельных изотопов

13. АЛЮМИНИЙ

Природный алюминий содержит один изотоп – ^{27}Al . Существует также долгоживущий изотоп ^{26}Al , данные для которого также должны быть представлены в библиотеке РОСФОНД.

13.1. Алюминий-26

Радиоактивен. $T_{1/2}=7.16 \cdot 10^5$ лет. Испытывает позитронный распад в стабильный магний-26. В РОСФОНД приняты нейтронные данные из JEFF=3.1 (Forrest, Koresky, Sublet, Koning, 2003 г.) со следующими изменениями:

1. материалу присвоен номер МАТ=1326;
2. удален файл MF=8;
3. удалены реакции образования короткоживущего изомера $^{24}\text{Na}^m$.

13.2. Алюминий-27

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 13$ -зарядовое число;
- 1.2. $A = 27$ (атомный вес);
- 1.3. $AWR = 26.74975$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Стабилен, 100% моноизотоп;
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт |
|-----|---------------|----------|---------------------------|---------------|
| 4 | n,n' | -.84375 | .87529 | Al-27 |
| 16 | n,2n | -13.0582 | 13.5463 | Al-26, Al-26m |
| 22 | n,n α | -10.0898 | 10.4670 | Na-22 |
| 28 | n,np | -8.2721 | 8.5814 | Mg-26 |
| 32 | n,nd | -17.1402 | 17.7810 | Mg-25 |
| 33 | n,nt | -18.2136 | 18.8945 | Al-26 |
| 45 | n,np α | -18.8839 | 19.5899 | Ne-21 |
| 102 | n,g | 7.7251 | 0 | Al-28 |
| 103 | n,p | -1.8285 | 1.8969 | Mg-27 |
| 104 | n,d | -6.0475 | 6.2736 | Mg-26 |
| 105 | n,t | -10.8829 | 11.2898 | Mg-25 |
| 107 | n, α | -3.1303 | 3.2474 | Na-23, Na-23m |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.1 Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках ENDF/B-VI и JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мугабгхабом и др. [81M]. В JENDL-3.3 эти параметры представлены непосредственно в секции MF=2 с верхней границей резонансной области 210 кэВ и радиусом потенциального рассеяния $R_0 = 5.098$ ферми, тогда как в ENDF/B-VI секции MF=2 ограничивается областью энергий до 1 кэВ и содержит только радиус потенциального рассеяния $R_0 = 3.2753$ ферми. Нейтронные сечения, вычисленные на основе резонансных

параметров в приближении MLBW, в оценке ENDF/B-VI (Release≤5) даны непосредственно в секции MF=3.

Новый анализ параметров нейтронных резонансов для JEFF-3.0 и более поздних версий ENDF/B-VI (Release≥6) был выполнен в ORNL Дерриеном и др. в рамках R-матричного подхода на основе программы SAMMY [98L]. Параметры разрешенных резонансов были определены в области энергий до 850 кэВ и использовано представление спина каналов, разделяющее угловые моменты J, образованные нейтронами с угловыми моментами $s=1 \pm 1/2$. В анализ были включены следующие экспериментальные данные:

1) Результаты двух измерений пропускания на ORELA в диапазоне энергий нейтронов от 0.5 эВ до 400 кэВ с 80 м пролетной базой и толщиной образцов 0.01892 и 0.1513 атом/барн [99G].

2) Результаты двух измерений пропускания на спектрометре Geel в диапазоне энергий от 200 до 850 кэВ с 400 м пролетной базой и толщиной образцов 0.05334 и 0.01920 атом/барн [94R].

3) Данные измерений пропускания на ORELA в диапазоне энергий 200 до 850 кэВ с 47 м пролетной базой и толщиной образцов 0.7639 атом/барн [72P].

4) Данные измерений сечений захвата нейтронов на ORELA в диапазоне энергий нейтронов от 100 эВ до 670 кэВ с 40 м пролетной базой и толщиной образцов 0.01892 и 0.1513 атом/барн [99G].

5) Данные о полном сечении, сечении рассеяния и захвата тепловых нейтронов, имеющиеся в литературе.

Ниже приведено сопоставление сечения для тепловых нейтронов (0.0253 эВ), полученных в данном анализе и предыдущей ENDF/B-VI.5 оценке:

| | Mug81 | JENDL-3.3 | ENDF/B-VI.5 | ORNL |
|-----------|----------------|-----------|-------------|---------|
| Total | 1.644 ± .004 b | 1.645 b | 1.60 b | 1.68 b |
| Elastic | 1.413 ± .001 b | 1.414 b | 1.37 b | 1.45 b |
| Capture | 0.231 ± .003 b | 0.231 b | 0.232 b | 0.233 b |
| Res. Int. | 0.17 ± .07 b | 0.123 b | 0.134 b | 0.131 b |

В следующей таблице представлено сравнение средних полных сечений и сечений захвата нейтронов для предыдущей ENDF/B-VI.5 и новой оценки (вычисления проведены с программой NJOY):

| Energy (keV) | Total (b) | | Capture (b) | |
|-----------------|-----------|-------|-------------|----------|
| | ENDF | ORNL | ENDF | ORNL |
| 1.0e-5 - 1.0e-3 | 1.417 | 1.496 | 6.718e-2 | 6.753e-2 |
| 1.0e-3 - 0.1 | 1.354 | 1.428 | 6.720e-3 | 6.699e-3 |
| 0.1 - 0.5 | 1.350 | 1.408 | 2.718e-3 | 2.173e-3 |
| 0.5 - 1.0 | 1.349 | 1.381 | 1.985e-3 | 1.216e-3 |
| 1.0 - 100.0 | 5.385 | 5.228 | 4.376e-3 | 3.370e-3 |
| 100.0 - 200.0 | 5.286 | 5.814 | 1.994e-3 | 1.376e-3 |
| 200.0 - 500.0 | 3.925 | 4.130 | 8.734e-4 | 6.180e-4 |
| 500.0 - 800.0 | 3.912 | 4.003 | 8.585e-4 | 3.093e-4 |

Параметры разрешенных нейтронных резонансов, полученные в ORNL, включены в оценку JEFF-3.0 (=JEFF-3.1), тогда как в оценке ENDF/B-VI представлены только сечения, восстановленные для этих параметров и включенные в секцию MF=3. Радиус потенциального рассеяния в оценке JEFF-3.0 принят равным 4.3226 фм.

2.2 Статистические характеристики разрешенных резонансов.

На рис. 1 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и JEFF-3.0, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Отчетливо виден значительный пропуск p-резонансов в оценке JENDL-3.3 уже при достаточно низких энергиях (< 200 кэВ) и, по-видимому, завышенные значения нейтронных ширин p-резонансов при энергиях выше 300 кэВ. В JEFF-3.0 линейному участку нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0=(60 \pm 7)$ кэВ, и для p-резонансов – $D_1=(24 \pm 3)$ кэВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (2.4 \pm 0.4) 10^{-4}$ и $S_1 = (1.5 \pm 0.3) 10^{-4}$.

Следует отметить, что в анализе ORNL, включенном в JEFF-3.0, определены также параметры для 22 d-резонансов, тогда как в JENDL-3.3 таких резонансов было только два. Анализ кумулятивных сумм числа резонансов и приведенных нейтронных ширин соответствует $D_2=(30 \pm 6)$ кэВ и $S_2 = (2.3 \pm 0.8) 10^{-4}$, но статистический анализ распределения Портера-Томаса для d-резонансов указывает на существенный вклад слабых резонансов, которые следовало бы отнести к f-волне. С другой стороны, полученное значение D_2 представляется слишком большим по отношению к D_1 и указывает на примерно двукратный пропуск d-резонансов. Поэтому неопределенности анализа средних параметров d-резонансов, по-видимому, оказываются значительно большими, чем приведенные выше статистические погрешности.

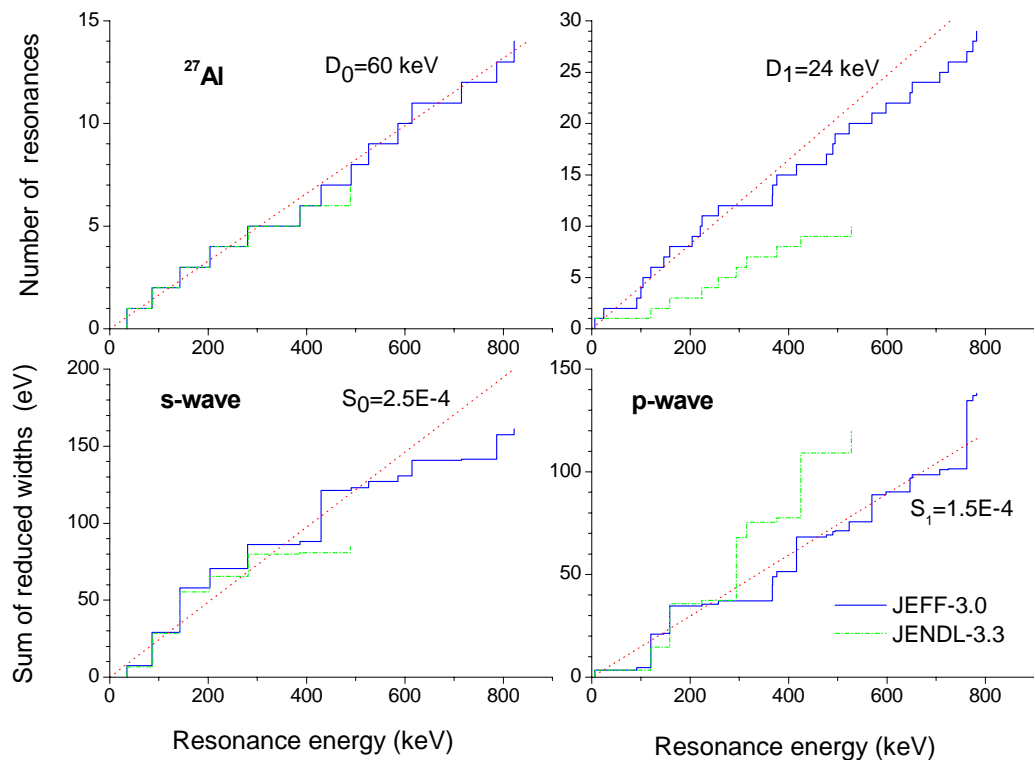


Рисунок 1. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI (JEFF-3.0)

Так как ни одна из имеющихся оценок не содержит области неразрешенных резонансов, то рассмотренные средние параметры резонансов представляют, в основном, общепознавательный интерес, но не влияют на оценки основных нейтронных сечений. На рис. 2 оценки полных нейтронных сечений в области разрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Все оценки

хорошо согласуются с экспериментальными данными, и незначительные разногласия оценок возникают лишь в минимумах между резонансами. На рис. 2 не приведены данные наиболее детальных измерений полных сечений в области энергий нейтронов выше 250 кэВ [94R]. В этих измерениях получено столь большое число точек, что они практически полностью перекрывают все предыдущие измерения. Сравнение оценок с этими данными показано на рис. 3. Так как данные [94R] непосредственно использовались при определении параметров разрешенных нейтронных резонансов, то хорошее согласие с ними оценок ENDF/B-VI и JEFF-3.0 является вполне закономерным. Оценка JENDL-3.3 выше 210 кэВ проведена непосредственно по усредненным экспериментальным данным и практически не отличается от ENDF/B-VI.

На рис. 4 показано сравнение оценок сечений упругого рассеяния нейтронов в области разрешенных резонансов. Экспериментальные данные об интегральных сечениях упругого рассеяния получены лишь в экспериментах с плохим разрешением, и они не позволяют что-либо уточнить в параметрах разрешенных резонансов.

На рис. 5 показаны оценки сечений радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Как и для упругого рассеяния, данные по радиационному захвату получены в экспериментах с плохим разрешением, и они не дают дополнительной информации для анализа параметров разрешенных резонансов.

Проведенный анализ показал, что **область разрешенных резонансов до 850 кэВ наиболее полно представлена в оценке JEFF-3.0 (=JEFF-3.1). Отличия от оценок ENDF/B-VI и JENDL-3.3 для полных нейтронных сечений и сечений упругого рассеяния сравнительно невелики, но для сечений радиационного захвата в промежутках между резонансами они весьма значительны. Так как оценка JEFF-3.0 получена на основе наиболее поздних экспериментальных данных, то ее следует признать предпочтительной.**

Следует еще раз отметить, что только в оценке JEFF-3.0 (JEFF-3.1) область разрешенных резонансов простирается до 850 кэВ. В JENDL-3.3 верхняя граница разрешенных резонансов принята равной 210 кэВ и в ENDF/B-VI принята граница 1 кэВ, т.е. все резонансы представлены непосредственно в энергетической зависимости сечений ($MF=3$). Различие представлений не очень сильно отражается на полных нейтронных сечениях (рис. 3) и сечениях упругого рассеяния (рис. 4), но для сечений радиационного захвата нейтронов различия оказываются значительными (рис. 5).

Перечень цитированных работ

72P F.G.Perey, T.A.Love and W.E.Kenney, "A Test of Neutron Total Cross Section Evaluations from 0.2 eV To 20 MeV for C, O, Al, Si, Ca, Fe and SiO₂, ORNL-4823, ENDF-8 (1972).

81M S.F.Mughabghab et al., Neutron Cross Sections, Academ Press, NY, 1981, v. 1, part A.

94R G.Rohr et al., Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Gatlinburg, Tennessee, May/1994

98L N.M.Larson, Updated User Guide for SAMMY: Multilevel R-Matrix Fits to Neutron Data Using Bayes' Equations, ORNL/TM-9179/R4 (December 1998). See also ORNL/TM-9170/R5.

99G K.H.Guber et. al., in Proc. 10th Symp. On Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, Los Alamos, New Mexico, August 30 to September/1999.

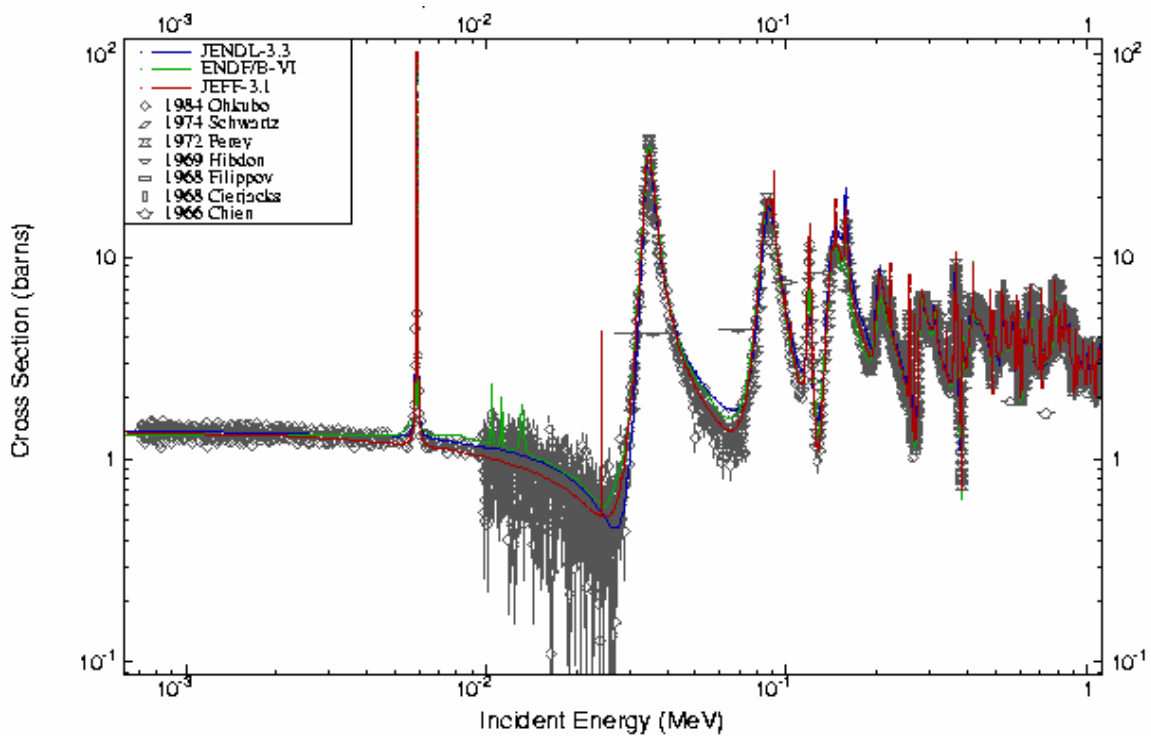


Рисунок 2. Экспериментальные данные о полных нейтронных сечениях в области энергий до 850 кэВ в сравнении с различными оценками

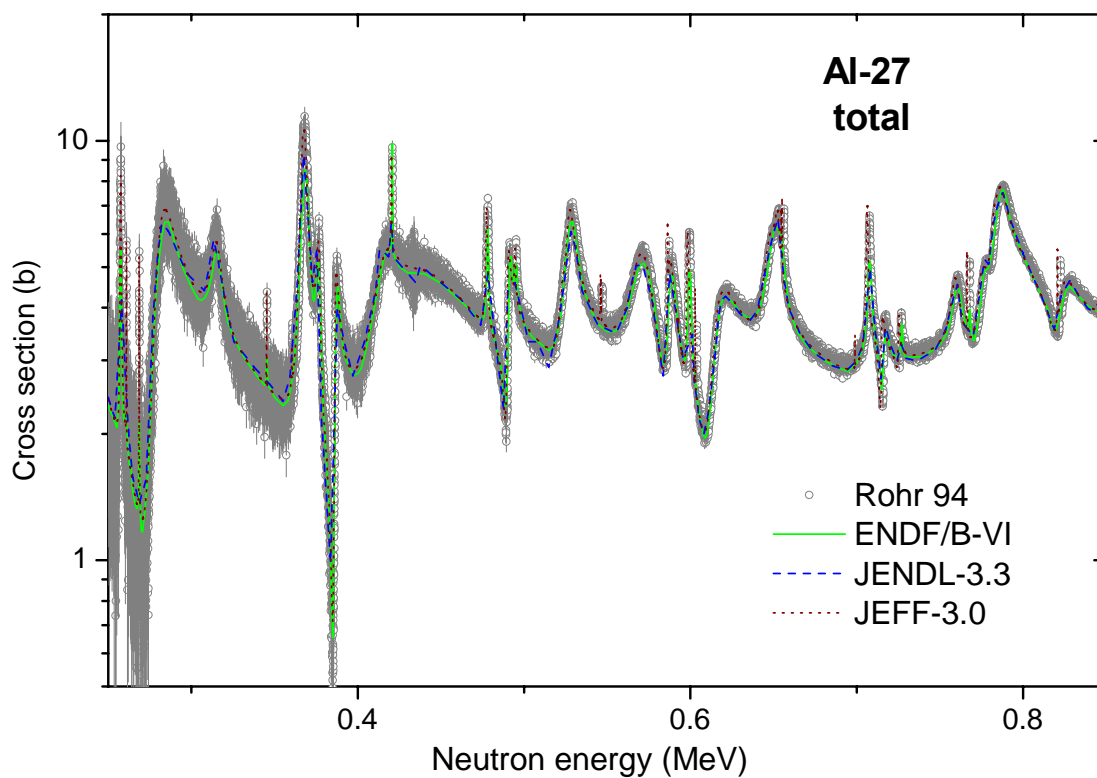


Рисунок 3. Экспериментальные данные работы [94R] в области энергий нейтронов до 850 кэВ в сравнении с оценками

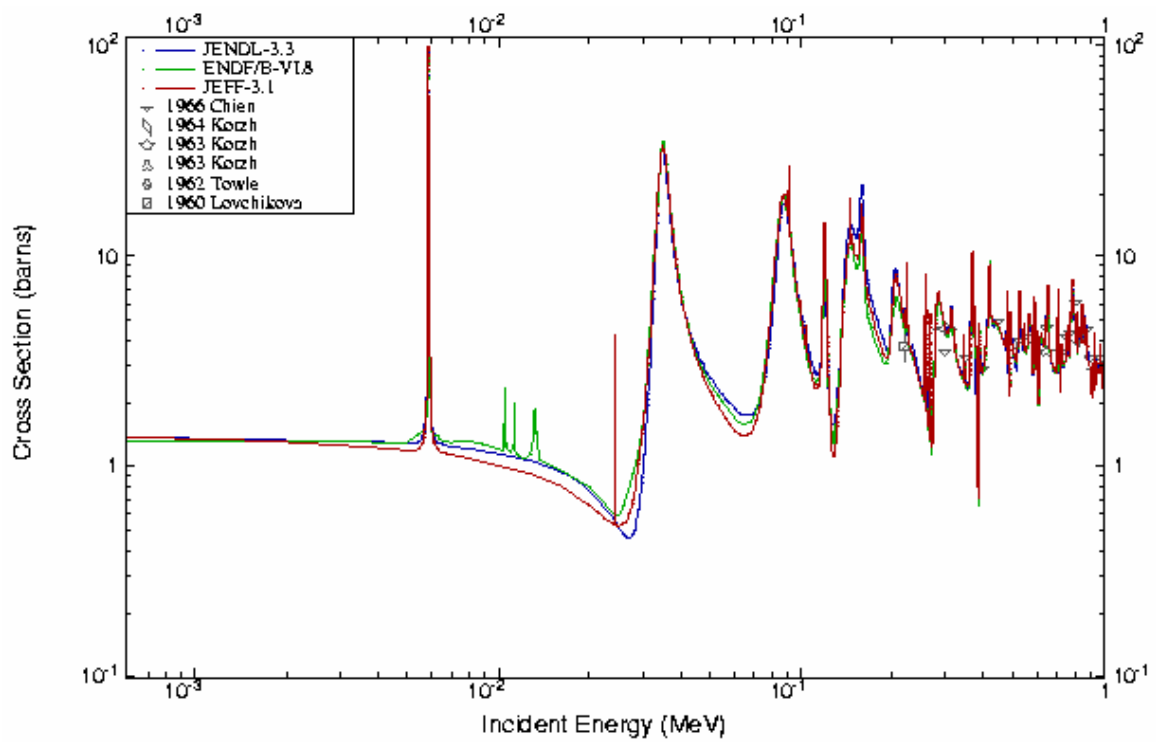


Рисунок 4. Сравнение оценок упругого рассеяния нейтронов в области разрешенных резонансов

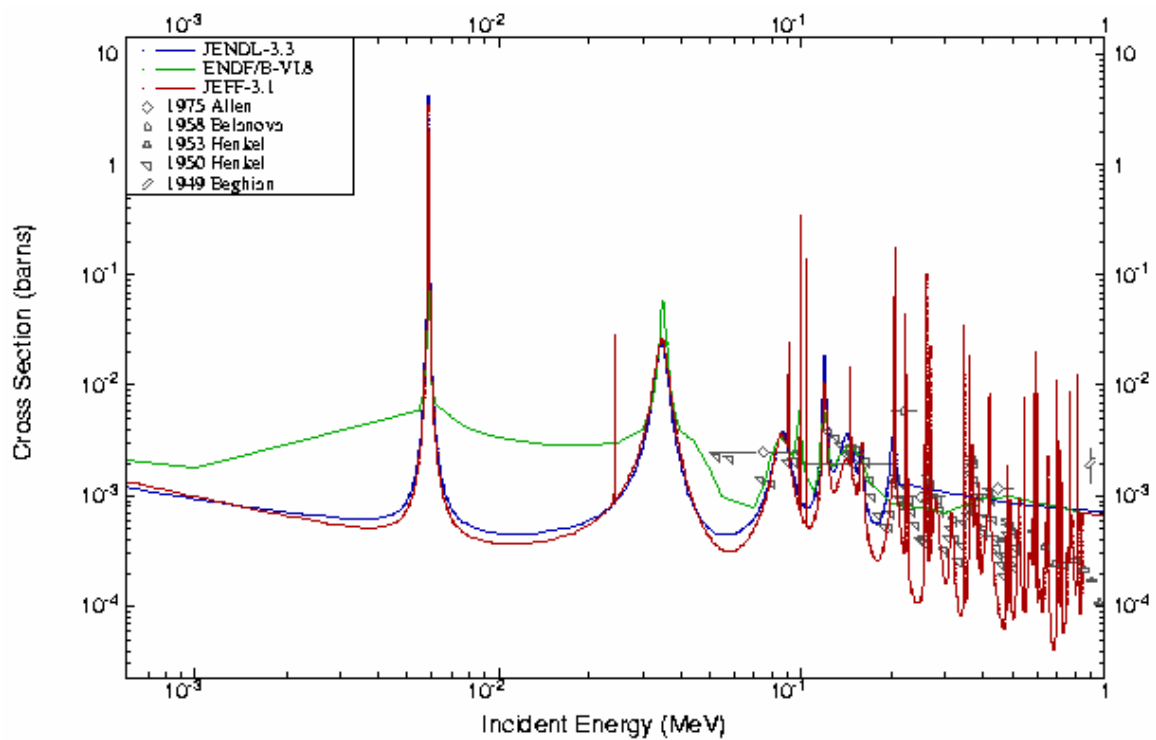


Рисунок 5. Экспериментальные данные о сечениях радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с различными оценками

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3, 4, 5, 6)

3.1. Полное сечение

Вне резонансной области оценка JEFF-3.0 (JEFF-3.1) для всех сечений целиком взята из ENDF/B-VI, поэтому при дальнейшем сравнении с экспериментальными данными будут рассматриваться только независимые оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI. Резонансная структура полных нейтронных сечений сохраняется и выше области разрешенных резонансов вплоть до энергии ~ 10 МэВ. На рис. 6 и 7 показана совокупность имеющихся экспериментальных данных в сравнении с оценками. Все оценки получены непосредственным усреднением экспериментальных данных, и разногласия между оценками пренебрежимо малы во всем диапазоне энергий нейтронов выше 850 кэВ. Данные измерений [94], выполненных с более высоким разрешением, чем предыдущие измерения, демонстрируют более сильные резонансные эффекты, чем учитываемые в оценках (рис. 7), но детальное воспроизведение наблюдаемых структур остается пока за рамками оценок.

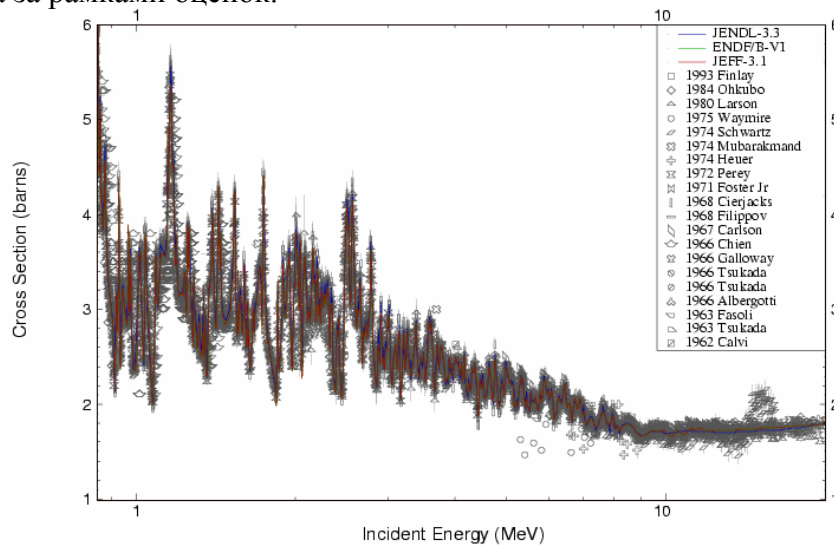


Рисунок 6. Оценки полных нейтронных сечений ^{27}Al вне резонансной области в сравнении с экспериментальными данными

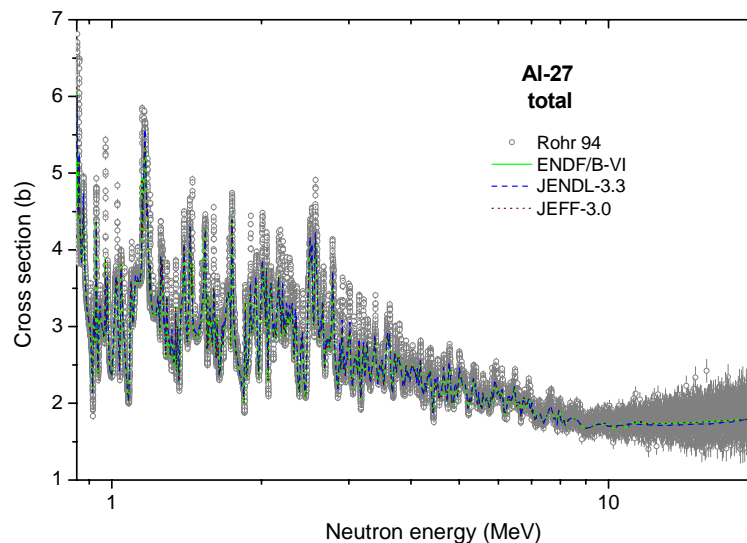


Рисунок 7. Оценки полных нейтронных сечений ^{27}Al вне резонансной области в сравнении с данными работы [94R]

3.2. Упругое рассеяние и угловые распределения нейтронов

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 8 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния с экспериментальными данными. В целом, вся совокупность экспериментальных данных хорошо согласуется с оценками, между которыми нет существенных разногласий. Следует отметить, что большинство измерений упругого рассеяния нейтронов было выполнено со сравнительно низким энергетическим разрешением; в таких данных не проявляется резонансная структура сечений.

На нейтронном спектрометре Гиля были выполнены измерения сечений упругого рассеяния в диапазоне энергий нейтронов от 0.26 до 2.0 МэВ для пяти углов в условиях хорошего разрешения [97K], сравнимого с разрешением в рассмотренных выше измерениях полных нейтронных сечений. Эти данные показаны для двух углов 40° и 120° на рис. 9 в сравнении с оценками. Оценки достаточно хорошо воспроизводят как общую анизотропию рассеяния нейтронов, так и наблюдаемую резонансную структуру сечений рассеяния под различными углами. При этом оценка ENDF/B-VI лучше описывает сечения для обратных углов при энергиях нейтронов выше 1 МэВ. Это обусловлено, главным образом, более детальным представлением угловых распределений нейтронов (MF=4, MT=2) в оценке ENDF/B-VI по сравнению с аналогичной секцией JENDL-3.3.

Для энергий нейтронов выше 2 МэВ оценки угловых распределений существенно не отличаются. На рис. 9-12 показана лишь часть имеющихся экспериментальных данных для наиболее характерных энергий налетающих нейтронов. Отобраны энергии, для которых имеются результаты нескольких независимых измерений. Оценки достаточно хорошо воспроизводят основные закономерности изменения угловых распределений при увеличении энергии нейтронов, и расхождения оценок с экспериментом оказываются примерно такими же, как разногласия экспериментальных данных.

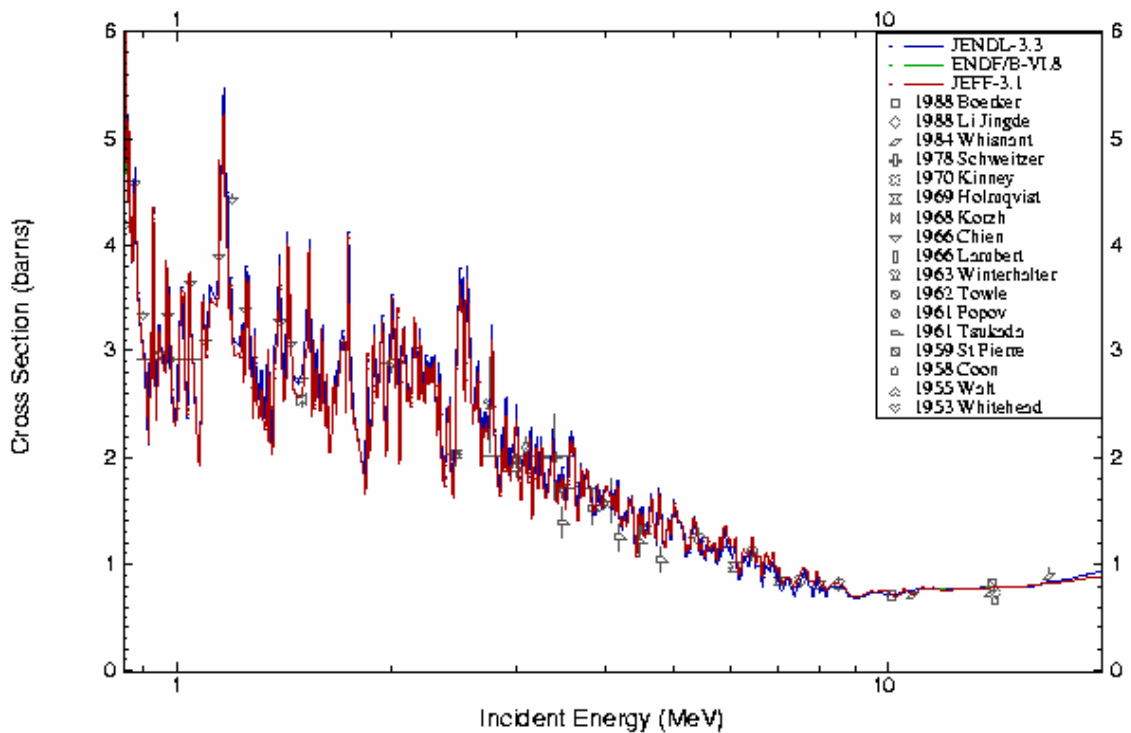


Рисунок 8. Оценки сечений упругого рассеяния нейтронов в сравнении с экспериментальными данными

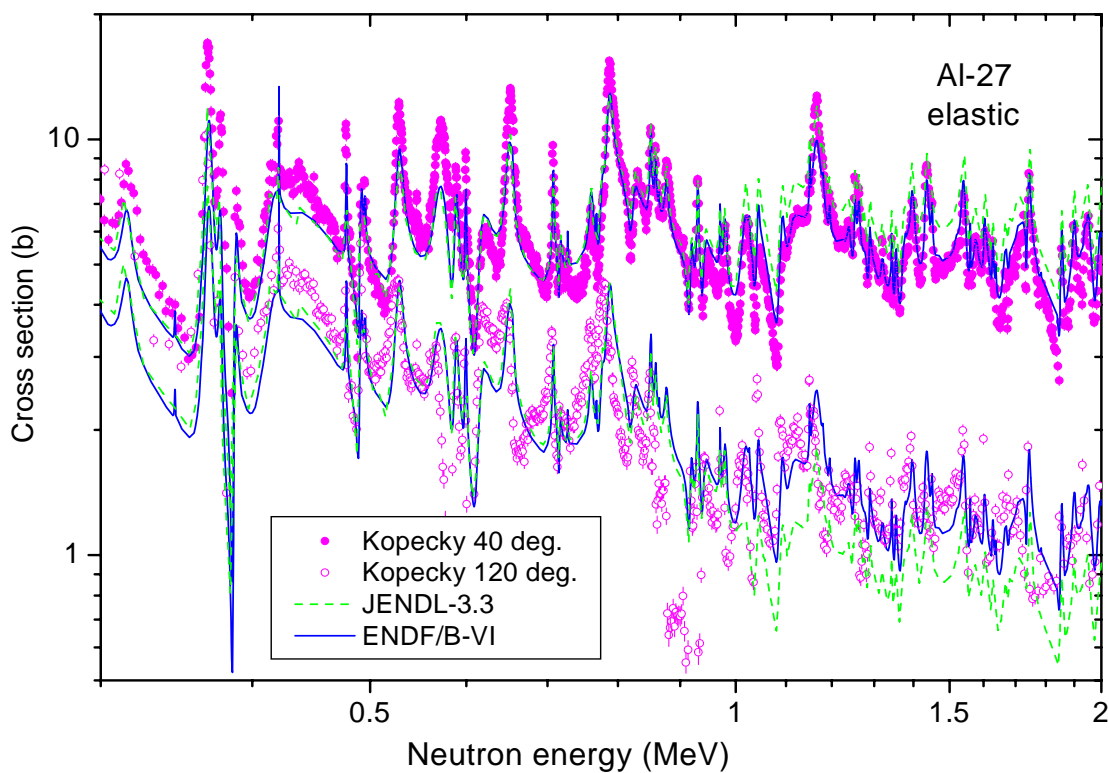


Рисунок 9. Экспериментальные данные [97К] о сечениях упругого рассеяния нейтронов для переднего (40°) и заднего (120°) углов в сравнении с оценками

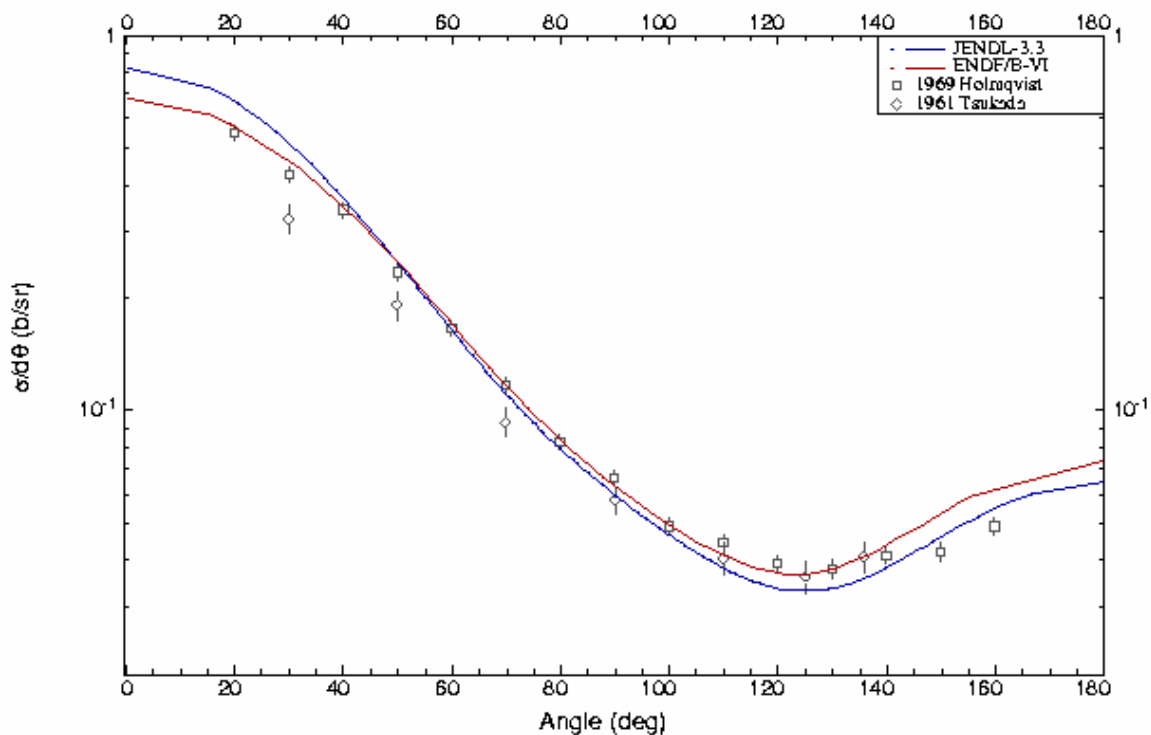


Рисунок 10. Экспериментальные данные об угловом распределении упруго рассеянных нейтронов с энергией 3.5 МэВ в сравнении оценками

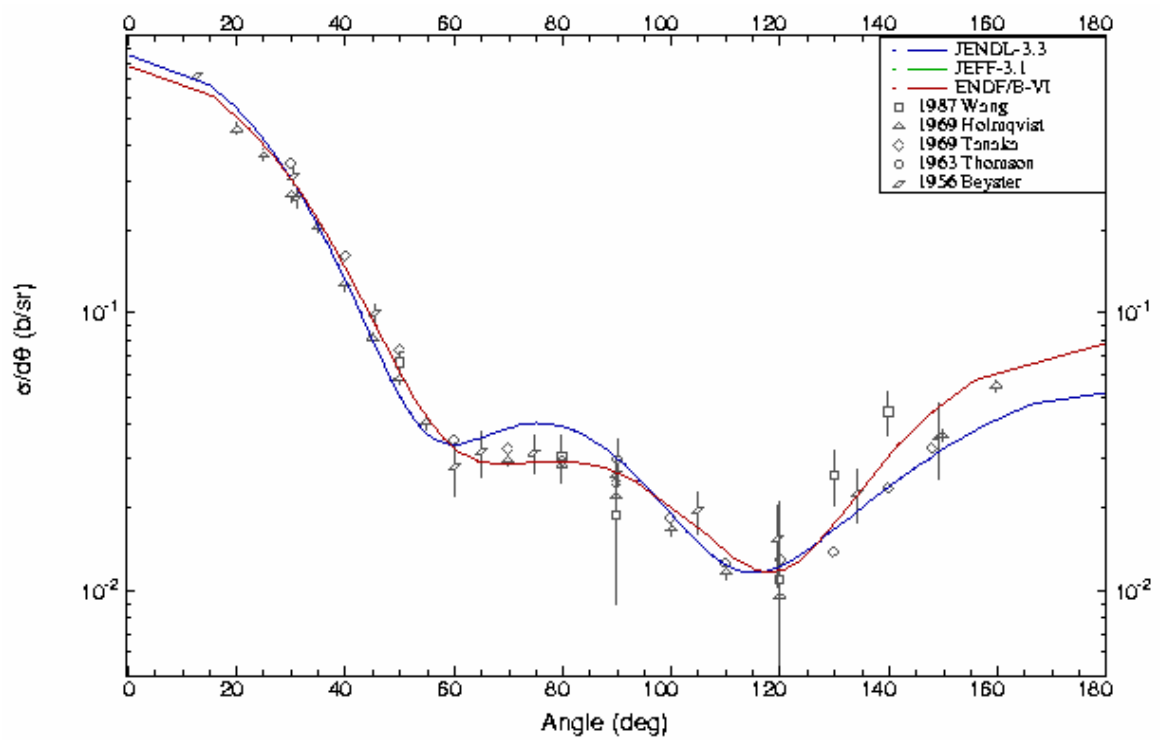


Рисунок 11. Экспериментальные данные об угловом распределении упруго рассеянных нейтронов с энергией 7.0 МэВ в сравнении оценками

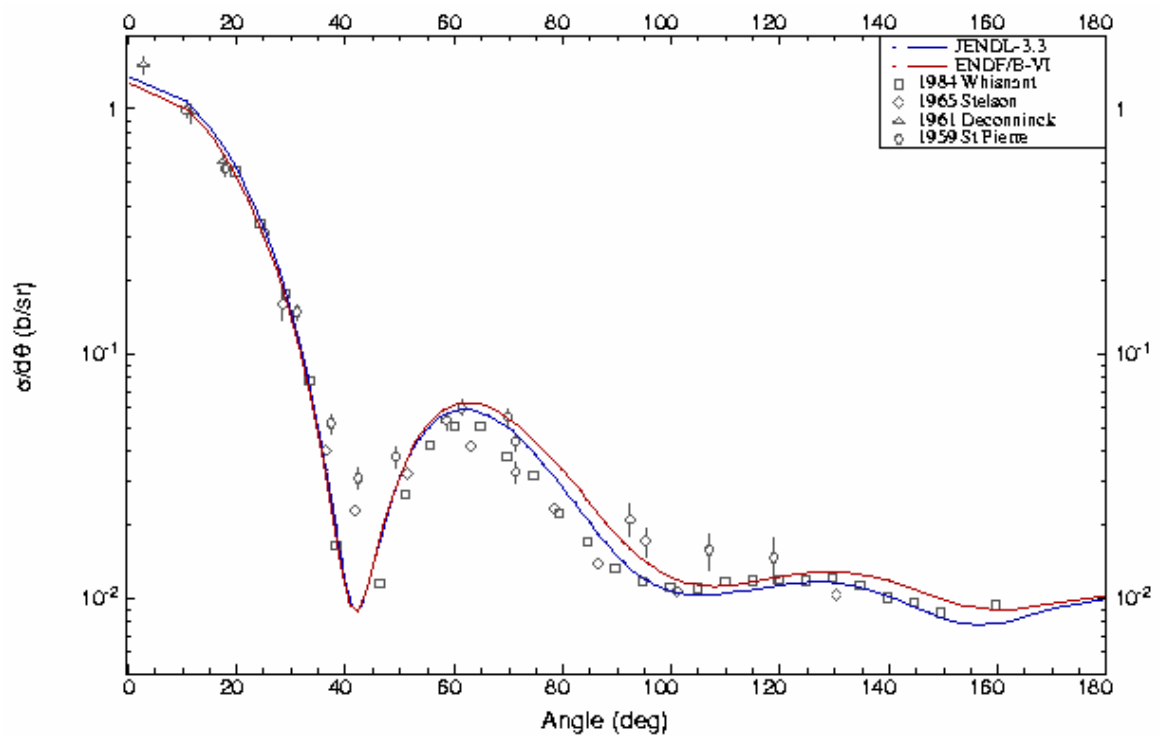


Рисунок 12. Экспериментальные данные об угловом распределении упруго рассеянных нейтронов с энергией 13.9 МэВ в сравнении оценками

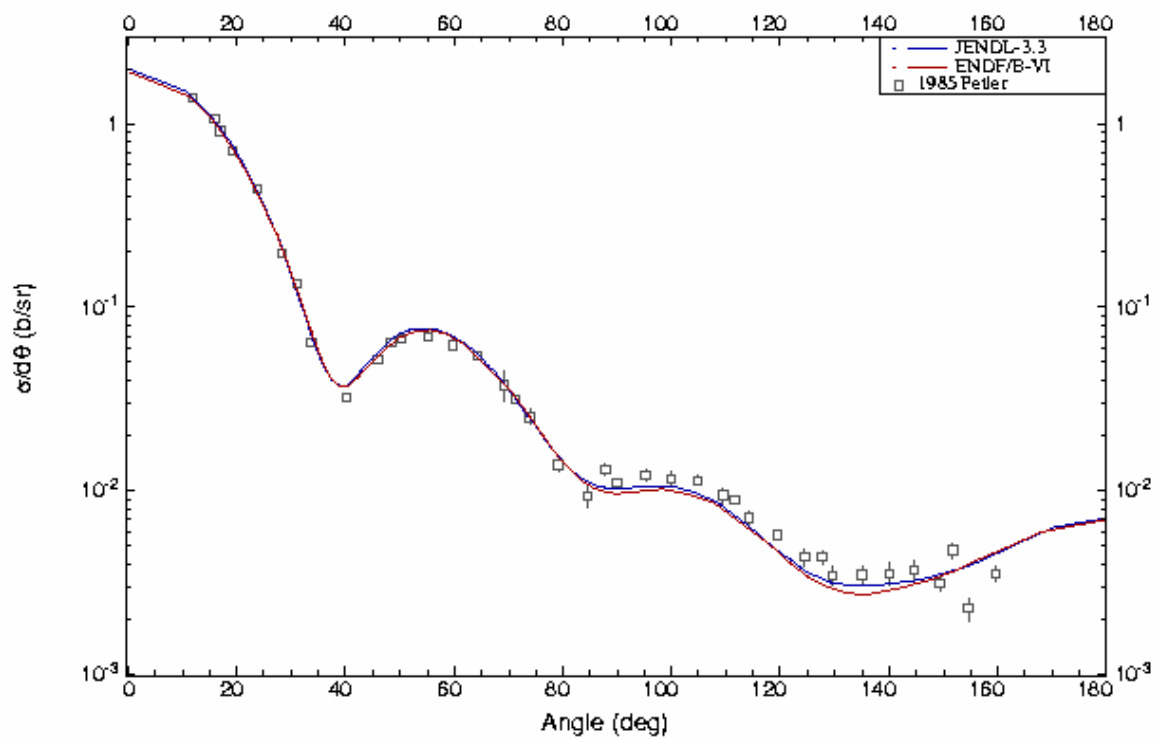


Рисунок 13. Экспериментальные данные об угловом распределении упруго рассеянных нейтронов с энергией 20 МэВ в сравнении оценками

3.3. Сечение радиационного захвата нейтронов

Экспериментальные данные по сечению радиационного захвата нейтронов в диапазоне энергий выше 1 МэВ весьма противоречивы (рис. 14). В ранних измерениях [53Н] были получены очень низкие значения сечений захвата нейтронов в области энергий от 1 до 3 МэВ, и оценки JENDL-3.1 и ENDF/B-V ориентировались на эти данные. Однако, в более поздних измерениях для энергий нейтронов 3 – 5 МэВ были получены на порядок более высокие значения сечений [62С, 67Р, 68С]. Хотя разногласия в данных [62С, 67Р, 68С], также как в результатах измерений для нейтронов с энергией ~14 МэВ, остаются весьма значительными, оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI ориентируются на усредненные значения данных [62С, 67Р, 68С].

Оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия в области энергий выше 3 МэВ обусловлено различными приближениями в описании конкуренции радиационных и нейтронных ширин на начальных этапах каскада гамма-переходов. В области энергий выше 8-10 МэВ во всех оценках рассматривается механизм прямого-коллективного захвата нейтронов, но приближения, привлекаемые для его описания, различаются весьма значительно. Следует, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 1 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не оказывает сколь-либо заметного влияния на расчеты характеристик ядерных реакторов.

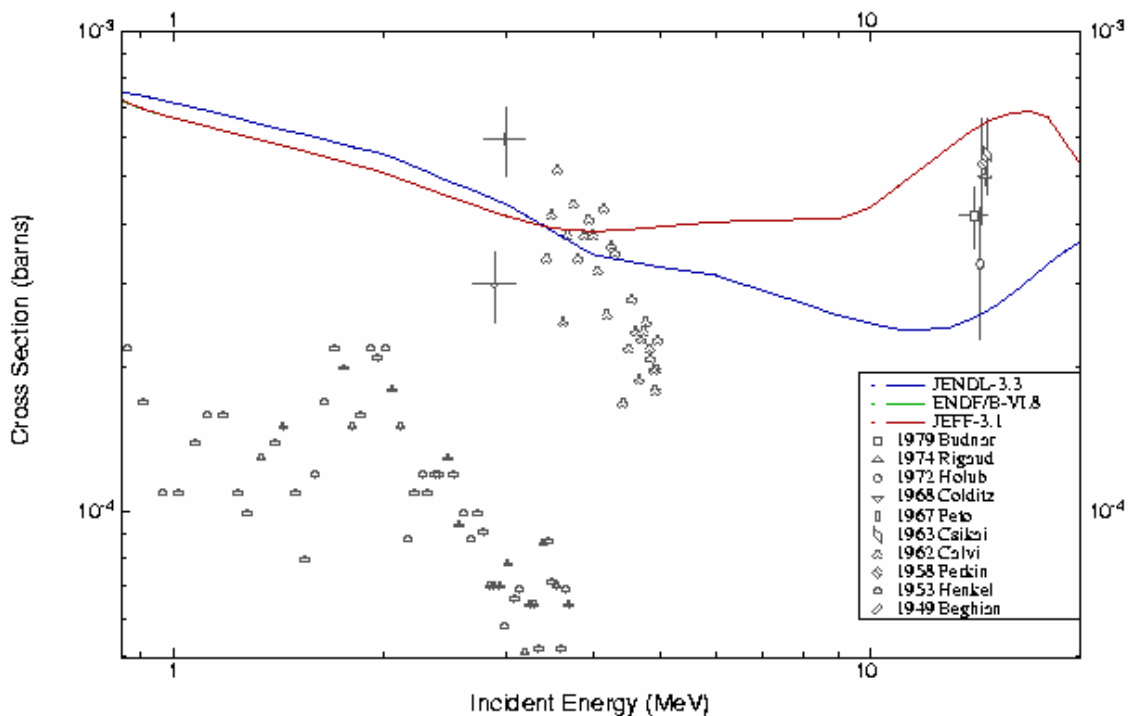


Рисунок 14. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов на ^{27}Al вне резонансной области в сравнении с экспериментальными данными

3.4 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведены схемы низколежащих уровней ^{27}Al , используемые в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI:

| № | JENDL-3.3 | | ENDF/B-VI | |
|------|----------------|---------|----------------|---------|
| | Энергия МэВ | J π | Энергия МэВ | J π |
| g.s. | 0.0 | 5/2 + | 0.0 | 5/2 + |
| 1. | 0.8438 | 1/2 + | 0.84375 | 1/2 + |
| 2. | 1.0145 | 3/2 + | 1.01445 | 3/2 + |
| 3. | 2.2100 | 7/2 + | 2.2111 | 7/2 + |
| 4. | 2.7340 | 5/2 + | 2.7348 | 5/2 + |
| 5. | 2.9814 | 3/2 + | 2.9811 | 3/2 + |
| 6. | 3.0040 | 9/2 + | 3.0040 | 9/2 + |
| 7. | 3.6780 | 1/2 + | 3.6781 | 1/2 + |
| 8. | 3.9560 | 5/2 + | 3.9568 | 5/2 + |
| 9. | 4.0540 | 3/2 - | 4.0543 | 3/2 - |
| 10. | 4.4090 | 5/2 + | 4.4100 | 5/2 + |
| 11. | 4.5103 | 11/2 + | 4.5103 | 11/2 + |
| 12. | 4.5800 | 7/2 + | 4.5800 | 7/2 + |
| 13. | 4.8120 | 5/2 + | 4.8117 | 5/2 + |
| 14. | 5.1550 | 3/2 - | 5.1563 | 3/2 - |
| 15. | 5.2460 | 5/2 + | 5.2482 | 5/2 + |
| 16. | 5.4199 | 5/2 + | 5.4199 | 9/2 + |
| 17. | 5.4330 | 9/2 + | 5.4328 | 7/2 - |
| 18. | 5.6000 | Contin. | 5.4384 | 5/2 - |
| 19 | | | 5.4998 | 11/2 + |
| 20 | | | 5.5507 | 5/2 - |
| 21 | | | 5.6670 | 9/2 + |
| 22 | | | 5.7513 | 1/2 + |
| 23 | | | 5.8268 | 3/2 - |
| 24 | | | 5.9596 | 7/2 - |
| 25 | | | 6.0800 | 3/2 + |
| 26 | | | 6.1154 | 5/2 + |
| 27 | | | 6.1592 | 3/2 - |
| 28 | | | 6.2870 | 7/2 + |
| 29 | | | 6.4640 | 5/2 + |
| 30 | | | 6.4773 | 7/2 - |
| 31 | | | 6.5118 | 9/2 - |
| 32 | | | 6.5330 | 7/2 + |
| 33 | | | 6.6053 | 3/2 - |
| 34 | | | 6.6515 | 5/2 - |
| 35 | | | 6.7130 | 9/2 + |
| 36 | | | 6.7650 | 5/2 + |
| 37 | | | 6.7754 | 3/2 - |
| 38 | | | 6.8142 | 1/2 + |
| 39 | | | 6.8200 | 3/2 + |
| 40 | | | 6.8200 | Contin. |

В оценке ENDF/B-VI учтено значительно больше уровней, чем в JENDL-3.3. Однако, различие в числе дискретных уровней и соответствующих границах непрерывного спектра не влияет сколь-либо заметным образом на результаты расчетов интегральных сечений и спектров неупруго рассеянных нейтронов. На рис. 15 оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов показаны в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Все экспериментальные данные получены путем измерения выходов гамма-лучей, сопутствующих неупругому рассеянию нейтронов, и погрешности такой методики, связанные с дешифровкой спектра гамма-лучей при возбуждении многих уровней, достаточно велики. Поэтому расхождение

оценок с экспериментальными данными выше энергии нейтронов ~ 3 МэВ, по-видимому, следует отнести к погрешностям измерений. Согласие оценок ENDF/B-VI и JENDL-3.3 достаточно хорошее во всем диапазоне энергий нейтронов, исключая участок от 5.5 до 8 МэВ, где в оценке JENDL-3.3 проявляется локальное возрастание сечения. Такое поведение сечения обусловлено, скорее всего, погрешностями моделирования непрерывного спектра, и оценка ENDF/B-VI в этой области кажется предпочтительной.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов обе оценки учитывают вклад прямых и предравновесных процессов, которые приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов. Оценки опираются на современные теоретические модели и систематики асимметрии угловых распределений нейтронов для близлежащих ядер, но прямых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям неупругого рассеяния нейтронов для ^{27}Al нет.

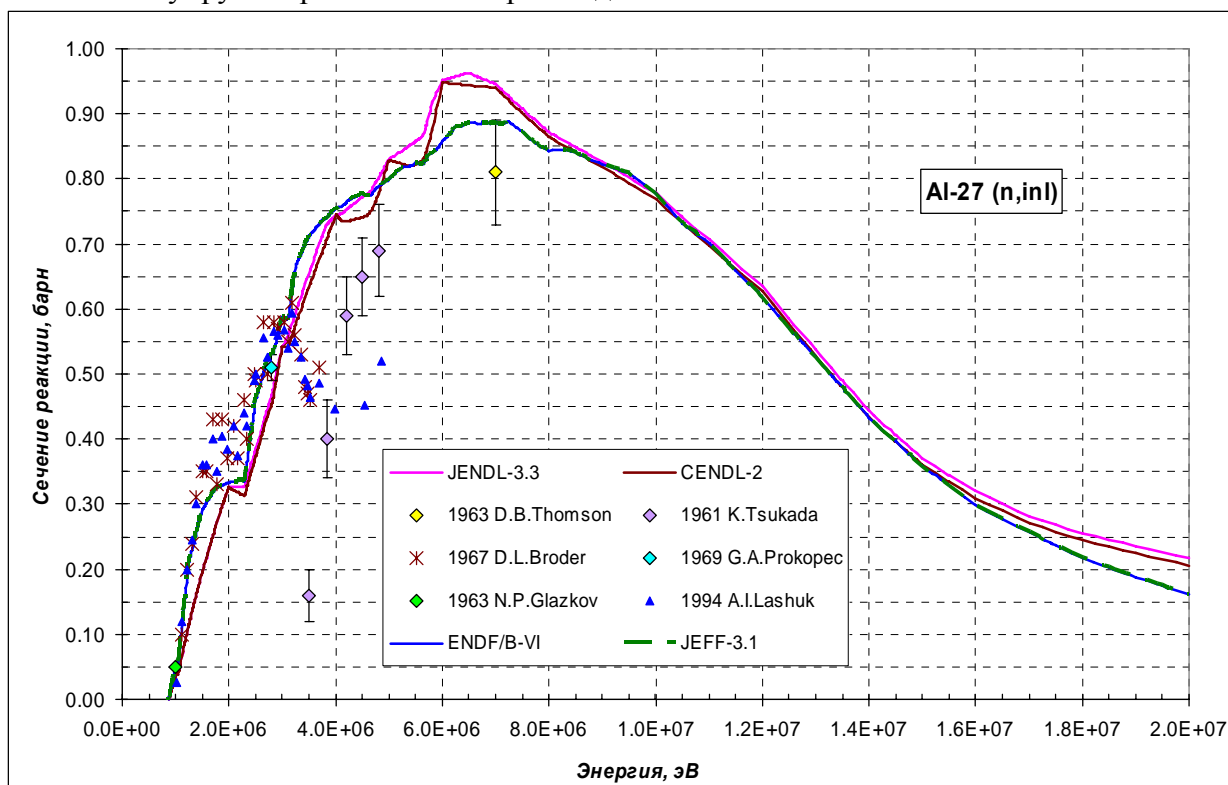


Рисунок 15. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов на ^{27}Al в сравнении с экспериментальными данными

3.5. Реакция n,2n (MT=16):

Экспериментальные данные о сечении реакции (n,2n) показаны на рис. 16 совместно с соответствующими оценками. Очевидно, что оценка JENDL-3.3 ориентировалась на данные работ [88I, 96I], тогда как ENDF/B-VI – на данные [99F]. Последние измерения [01S] имеют столь большую погрешность, что их вряд ли можно использовать для предпочтения какой-либо из оценок. В целом, однако, сечение реакции (n,2n) сравнительно невелико, и значительные разногласия его оценок не очень существенны для большинства практических приложений. Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6, и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

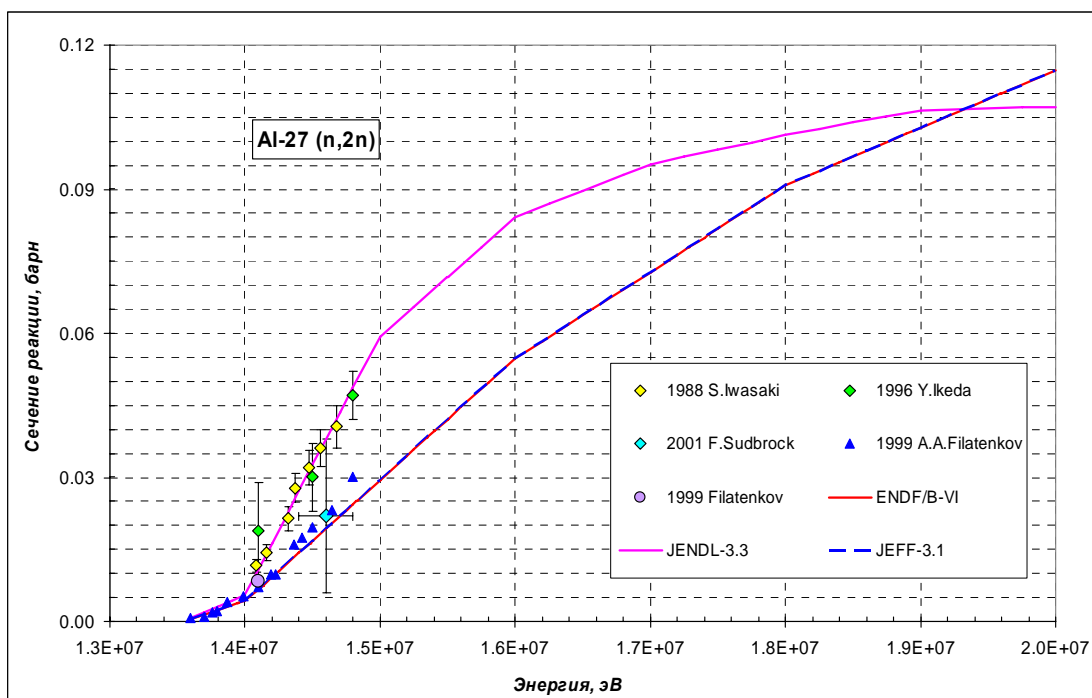


Рис. 16. Экспериментальные данные о сечении реакции $^{27}\text{Al}(n,2n)$ в сравнении с оценками

3.6. Реакции (n,n α), (n,np), (n,nd) и (n,nt) и (MT=22, 28, 31 и 45):

В большинстве случаев для подобных реакций нет надежных экспериментальных данных, и их оценка обычно опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. На рис. 17 показаны оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI для реакции $^{27}\text{Al}(n,n\alpha)$ и на рис. 18 для реакции $^{27}\text{Al}(n,np)$. Все оценки основаны на расчетах по программе GNASH, и разногласия оценок обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей. Полученные сечения сравнимы с сечением реакции (n,2n), и это оправдывает интерес к таким реакциям. Экспериментальные данные для реакции $^{27}\text{Al}(n,np)$ сильно противоречат результатам расчетов, но согласно общепринятому мнению, эти противоречия обусловлены недостатками экспериментальных данных. Очевидна необходимость проведения более надежных измерений сечения обеих реакций.

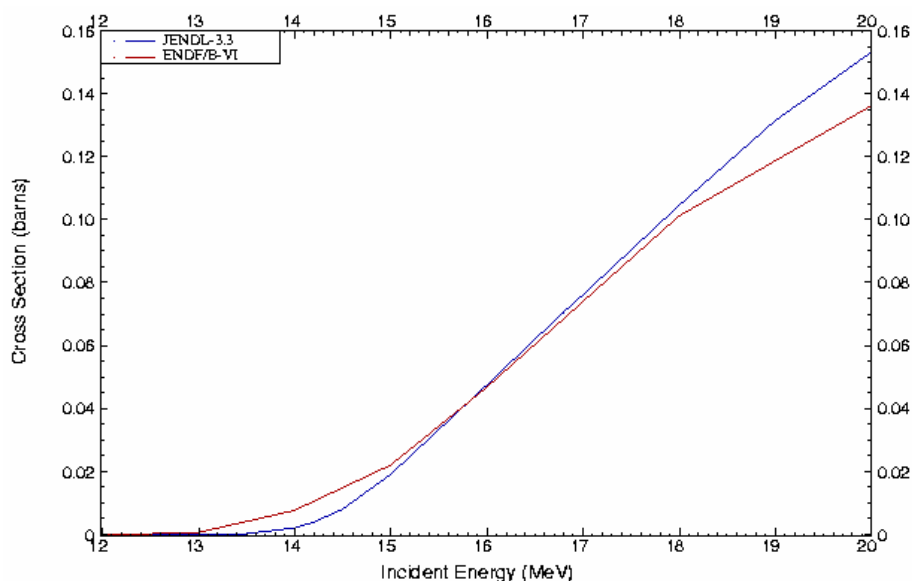


Рисунок 17. Оценки сечений реакции $^{27}\text{Al}(n,n\alpha)$

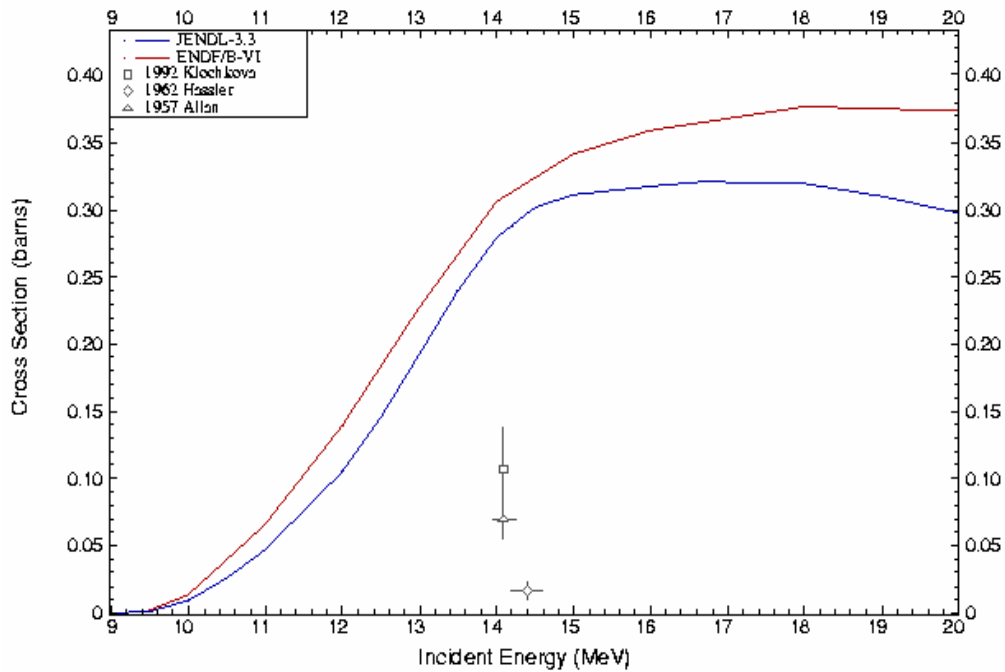


Рисунок 18. Оценки сечений реакции $^{27}\text{Al}(n,np)$ в сравнении с экспериментальными данными.

Реакции (n,nd) и (n,nt) также оцениваются только на основе теоретических расчетов, но пороги столь высокие, что полученные сечения оказываются пренебрежимо малы даже при энергии нейтронов 20 МэВ. Оценки сечений этих реакций включены в ENDF/B-VI, но отсутствуют в JENDL-3.3.

Спектры и угловые распределения нейтронов для рассматриваемых реакций представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6, и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

3.7. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104, 105 и 107):

Реакции $^{27}\text{Al}(n,p)$ и $^{27}\text{Al}(n,\alpha)$ широко используются для дозиметрии нейтронов, поэтому для них имеются большие наборы экспериментальных данных. На рис. 19 показаны результаты измерений сечений реакции (n,p) в сравнении с оценками. Чтобы не загромождать рисунок, на нем опущены результаты измерений, выполненных до 1970 года, а также ряд данных с погрешностями, превышающими 20%. Основные разногласия между оценками относятся к области энергий 6 – 12 МэВ, и они обусловлены выбором экспериментальных данных, положенных в основу оценки. ENDF/B-VI ориентирована на данные [75S], тогда как в JENDL-3.3 предпочтение отдано результатам недавних измерений [04S]. Однако, учитывая весьма значительную погрешность последних данных, выбор JENDL-3.3 не кажется достаточно оправданным. По-видимому, надо искать дополнительные аргументы для выбора более достоверной оценки.

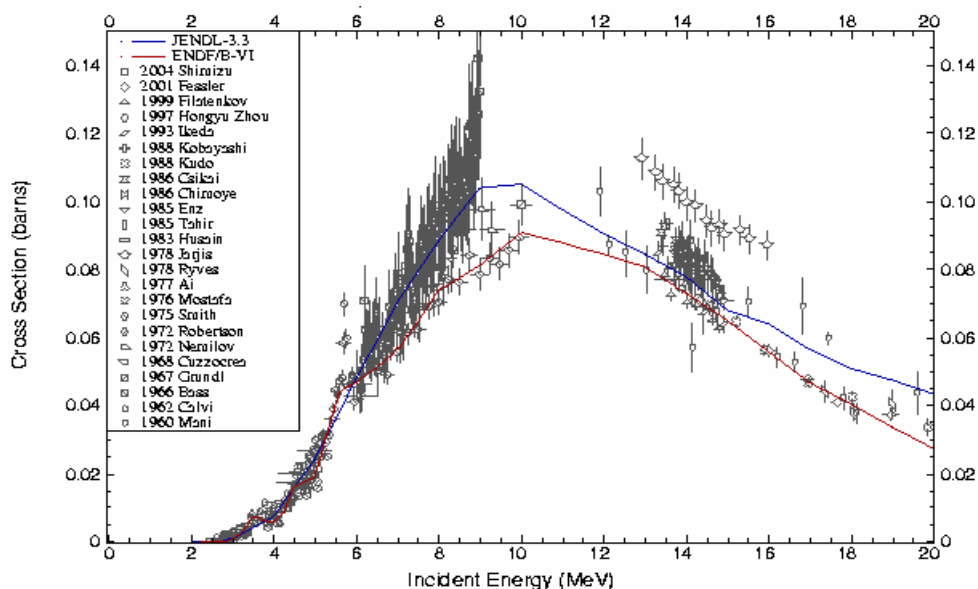


Рисунок 19. Экспериментальные данные о сечении реакции $^{27}\text{Al}(n,p)$ в сравнении с оценками.

На рис. 20 показано сравнение оценок с экспериментальными данными для реакции (n,α) . Здесь нет существенных разногласий в данных измерений, и оценки хорошо согласуются между собой и с экспериментальными данными.

Реакция (n,α) на алюминии является одним из нейтронных стандартов. Величина сечения этой реакции была рекомендована в 1991 г. Международной рабочей группой по ядерным стандартам при NEA OECD¹. В цитированной работе приведены также погрешности сечения. Сравнения рекомендованной десятилетие назад оценки с принятой в JEFF-3.1 показывает, что различия между ними не выходят за пределы погрешностей и не носят систематического характера.

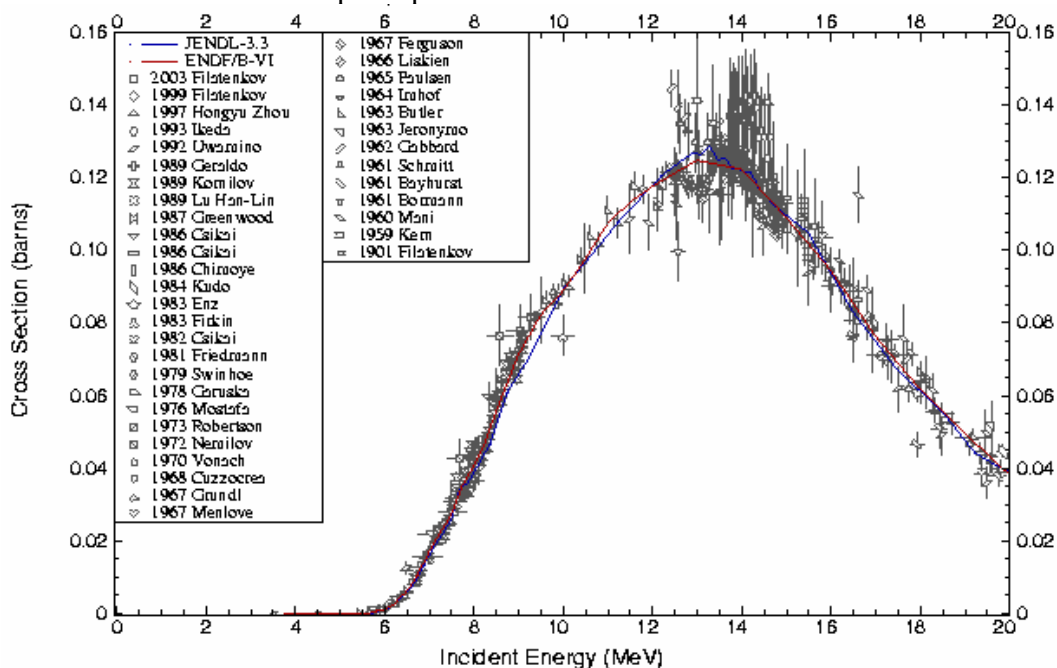


Рис. 20. Экспериментальные данные о сечении реакции $^{27}\text{Al}(n,\alpha)$ в сравнении с оценками

Оценки сечений (n,d) и (n,t) реакций имеются только в ENDF/B-VI, и они показаны на рис. 21 и 22 совместно с экспериментальными данными. Экспериментальные данные не

¹ NEANDC-311 "U" (INDC(SEC)-101) Nuclear Data Standard for Nuclear Measurements. Ed. H.Conde. p75

кажутся достаточно надежными, но сечения реакций (n,d) и (n,t) сравнительно малы, и они, по-видимому, представляют интерес лишь для специальных задач.

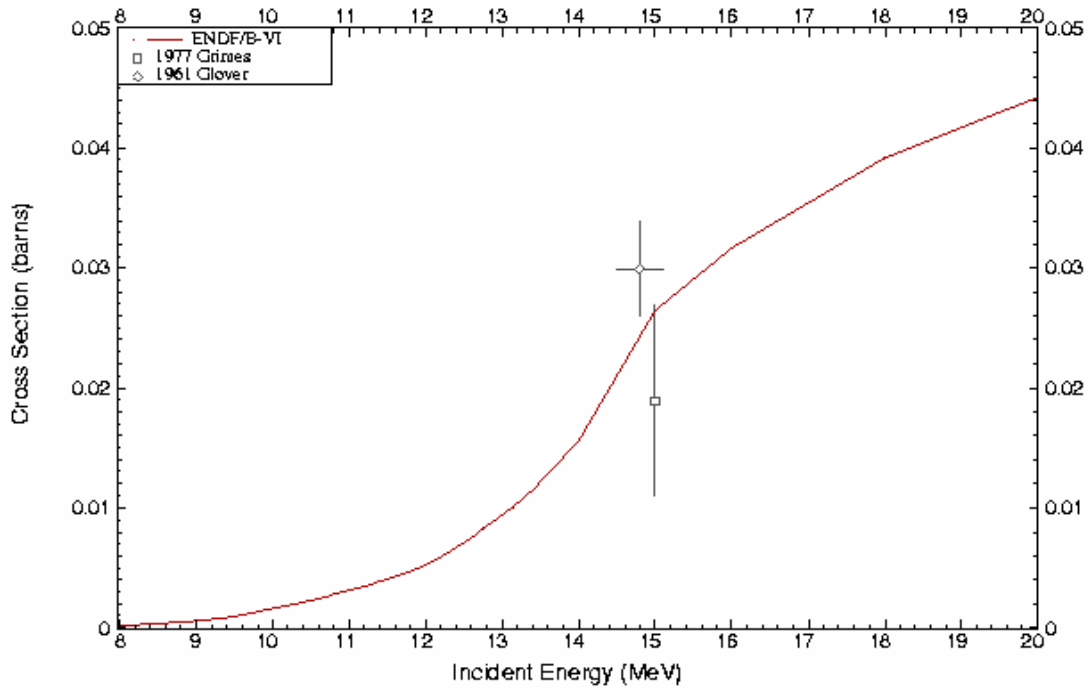


Рис. 21. Оценки сечений реакции $^{27}\text{Al}(n,d)$ в сравнении с экспериментальными данными

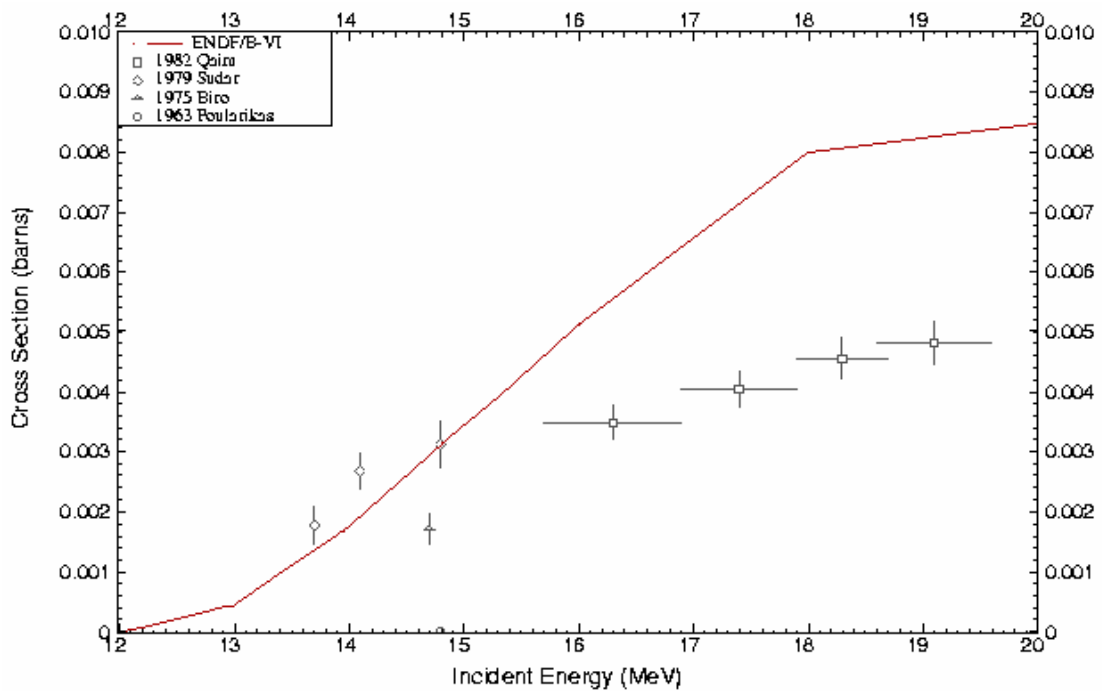


Рис. 22. Оценки сечений реакции $^{27}\text{Al}(n,t)$ в сравнении с экспериментальными данными

Перечень цитированных работ.

- 53H R.Henkel et al., EXFOR 11518 (1953).
62C G.Calvi et al., Nucl. Phys., **39** (1962) 621.
67P G.Peto et al., J. Nucl. Energy, **21** (1967) 797.
68C J.Colditz, P.Hille, EXFOR 20092 (1968).
72H E.Holub et al., Report LNS-4, 1972.
74R F.Rigaud et al., Nucl. Sci. Eng., **55** (1974) 17.
75S D.L.Smith et al., Nucl. Sci. Eng., **58** (1975) 314.
79B M.Budnar et al., Report INDC(Yug)-6, Vienna, 1979.
88I S.Iwasaki et al., Nuclear Data for Science and Technology (Mito, 1988), p. 295.
94R G.Rohr et al., Nuclear Data for Science and Technology (Gatlinburg, 1994), p. 215.
96I Y.Ikeda et al., Report INDS(NDS)-342, Vienna, 1996, p. 19.
97K S.Kopecky et al., Nuclear Data for Science and Technology (Trieste, 1997), v. 1, p. 523.
99F A.Filatenkov et al., Report RI-252, St. Petersburg, 1999.
01S T.Sudbrock et al., Radiochemica Acta, 88 (2001) 829.
04S T.Shimizu et al., Ann. Nucl. Energy, 31 (2004) 975.

4. Образование фотонов

В файлах JENDL-3.3 и ENDF/B-VI содержится достаточно полные оценки интегральных выходов и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата и неупругого взаимодействия нейтронов с ядром-мишенью. В JENDL-3.3 такая информация представлена в секциях MF=12, 13, 14 и 15, тогда как в ENDF/B-VI в секциях MF=12, 14 и 15 содержится только данные о гамма-лучах, обусловленных радиационным захватом нейтронов, а данные о множественности и спектрах гамма-лучей, сопровождающих неупругие процессы, включены в секцию MF=6. Угловые распределения всех типов гамма-излучения в обеих оценках приняты изотропными.

Интегральные выходы гамма-лучей достаточно близки в обеих оценках, но ENDF/B-VI содержит более детальную информацию о дискретных гамма-переходах, сопутствующих радиационному захвату и неупругому рассеянию нейтронов, а также дифференциальные оценки выходов гамма-лучей для реакций $(n,2n)$, (n,np) , $(n,n\alpha)$ и др.

Перечень цитированных работ.

- 93М Г.Н.Мантуров, М.Н.Николаев, А.М.Цибуля. Система групповых констант БНАБ-93, ВАНТ, 1993, вып. 1, с. 59.
04Н. Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. NEA/NDC/DOC(95). Sept. 2004 Ed.

5. Валидация оцененных данных по интегральным экспериментам.

Для валидации оценок нейтронных данных алюминия были проведены расчеты $K_{эфф}$ для ряда критических сборок с алюминиевым отражателем, представленных в международном справочнике по критическим экспериментам [04Н]. Были рассмотрены две системы с компактными металлическими активными зонами из плутония или высокообогащенного урана с алюминиевыми отражателями, 3 гетерогенных критических сборок ZPR-9 с уран-вольфрамовым топливом и 2 гетерогенных сборки ZPR-3 с урановым топливом также с толстыми алюминиевыми отражателями. Нейтронные спектры в активных зонах рассмотренных сборок приведены в 28-групповом представлении на рис. 23.

Расчеты для всех сборок проводились методом Монте-Карло как в 299-групповом приближении по программе KENO-V, так и с детальным описанием энергетической зависимости сечений по программе MCNP-V. Для всех материалов использовались оцененные данные из библиотеки ФОНД-2.2. Исключение составляли нейтронные данные

для алюминия, для которых использовались данные разных библиотек. Результаты расчетов по обеим использовавшимся программам совпали в пределах статистической погрешности, не превышавшей 0.1%. Отклонения от экспериментальных значений коэффициентов размножения для бенчмарк-моделей рассмотренных экспериментов оказались гораздо существеннее. Результаты представлены в нижеследующей таблице.

Расчетно-экспериментальные расхождения для критических сборок с алюминиевым отражателем.

| Критсборка | Эксп. | Погр. | (C/E-1)*100% | | | | | |
|------------------------------------|--------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| | | | JENDL-2.0 | ENDF/B-VI(7) | JEF-2.2 | JEFF-3.1 | JENDL-3.3 | ENDF/B-V |
| PMF09001 | 1.0000 | 0.0027 | -0.24% | -0.24% | 0.82% | -0.10% | -0.29% | -0.33% |
| HMF01201 | 0.9992 | 0.0018 | -0.61% | -0.61% | -0.23% | -0.55% | -0.65% | -0.70% |
| HMF06001 | 0.9955 | 0.0024 | 0.96% | 0.96% | 2.09% | 0.71% | 1.01% | 0.98% |
| HMF06701 | 0.9959 | 0.0024 | 1.35% | 1.31% | 2.31% | 1.02% | 1.54% | 1.59% |
| HMF06702 | 0.9938 | 0.0024 | 0.66% | 0.63% | 2.14% | 0.30% | 0.63% | 0.60% |
| IMF01301 | 0.9941 | 0.0023 | 0.80% | 0.80% | 1.73% | 0.69% | 0.93% | 0.91% |
| IMF01401 | 0.9958 | 0.0022 | 0.74% | 0.74% | 1.46% | 0.64% | 0.83% | 0.82% |
| IMF01402 | 0.9927 | 0.0022 | 0.87% | 0.82% | 1.50% | 0.72% | 0.91% | 0.88% |
| Среднее | | | 2.77% | 0.57% | 0.55% | 1.48% | 0.43% | 0.61% |
| Среднее по 2-м компактным | | | 2.55% | -0.43% | -0.43% | 0.29% | -0.33% | -0.47% |
| Среднее по 5-м гетерогенным | | | 3.41% | 1.08% | 1.05% | 2.25% | 0.82% | 1.17% |

При оценке расчетно-экспериментальных расхождений следует обратить внимание на два обстоятельства.

Во-первых, расчетно-экспериментальные расхождения обусловлены не только погрешностями сечений алюминия, но и неточностями нейтронных данных для других материалов, входивших в состав критических сборок. В частности, в случае PMF-009 – констант плутония, в случае HMF-012 – констант ^{235}U . В этих двух сборках влияние неточности знания констант активной зоны можно грубо оценить сравнивая расчетно-экспериментальные расхождения для сборок с отражателями и без отражателей. Очевидно, разность между этими расхождениями будет значительно менее чувствительна к константам топливного материала. Расчеты критичности систем без отражателя (Jesabel, голая плутониевая сфера, PMF-001; Godiva, голая сфера из высокообогащенного урана, HMF-001) показали, что расхождения имеют тот же знак, что и для сфер с алюминиевыми отражателями и составляют -0.14% и -0.24% соответственно. Таким образом «эффект отражателя» оценивается расчетом с погрешностью -0.04% в случае плутониевой активной зоны и -0.24% в случае активной зоны из высокообогащенного урана. Эти расхождения лежат в пределах экспериментальных погрешностей. Таким образом, можно констатировать, что нейтронные данные успешно прошли вверификацию по данным об эффективности алюминиевых отражателей компактных металлических систем.

Источников дополнительных погрешностей в результатах расчетов сборок ZPR со сложным составом активной зоны значительно больше и учесть их много сложнее. В частности, расхождения в критичности сборок ZPR-9 содержащих вольфрам в активной зоне, сильно зависят от принимавшихся при расчете констант вольфрама. Активные зоны всех сборок ZPR содержали значительное количество конструкционной стали, неточность знания констант которой также могла существенно повлиять на расчетно-экспериментальное расхождение.

Второе обстоятельство связано с геометрией сборок. Сборки HMF-009 и HMF-012 характеризовались не только простым составом, но и простой – сферической – геометрией. Сборки ZPR характеризуются сложной гетерогенной структурой. Между тем, нельзя не обратить внимание на тот факт, что погрешности, приписанные результатам

экспериментов на гетерогенных сборках ZPR, оказались того же порядка и даже ниже, чем погрешности результатов экспериментов с компактными металлическими сферическими системами. Между тем значительные отличия кэфф от единицы для этих систем указывают на внесение в результаты значительных поправок (главным образом, на отличие гомогенизированной бенчмарк-модели от реальной гетерогенной активной зоны). Приписанная результатам погрешность во всех этих сборках определяется погрешностью введенных поправок. Последняя оценивалась как статистическая погрешность результатов расчетов точной модели эксперимента и упрощенной (гомогенной с регулярной границей) методом Монте-Карло по программе VIM. Таким образом, методические погрешности введения поправок не учитывались. Между тем они, несомненно, также имели место, за счет того, например, что в программе VIM, осуществлявшей розыгрыш нейтронных траекторий с детальным слежением за энергией нейтронов, не был предусмотрен учет резонансной самоэкранировки сечений в области неразрешенных резонансов (в отличие от расчетов по программам KENO-V и MCNP-V, в которых этот учет проводился). Таким образом, приведенные в Справочнике (и в нашей таблице) значения «экспериментальных» кэфф содержат неизвестную систематическую погрешность и не могут считаться независимыми результатами.

Из сказанного выше следует, что систематические расхождения порядка 1% между расчетными и экспериментальными значениями кэфф дляборок ZPR не могут служить основанием для критики констант алюминия. Требуется более тщательная оценка экспериментальных погрешностей для этихборок и глубокий анализ чувствительностей их коэффициентов размножения к константам чтобы решить – могут эти сборки рассматриваться в качестве бенчмарков для верификации констант алюминия или нет.

Из данных таблицы видно, что за время, прошедшее с момента оценки данных для алюминия в JENDL-2.0, оцененные нейтронные данные для алюминия существенно изменились и позволили значительно лучше описать результаты критических экспериментов. При этом оценка JEFF-3.1, отобранная в РОСФОНД исходя из анализа дифференциальных данных, заметно лучше других согласуется и с результатами интегральных экспериментов.

В то же время очевидно, что желательно привлечь к анализу большее число различных интегральных экспериментов (включая результаты измерений пропускания нейтронов через большие толщи алюминия) и более тщательно произвести оценку экспериментов, выполненных на критсборках со сложной гетерогенной структурой.

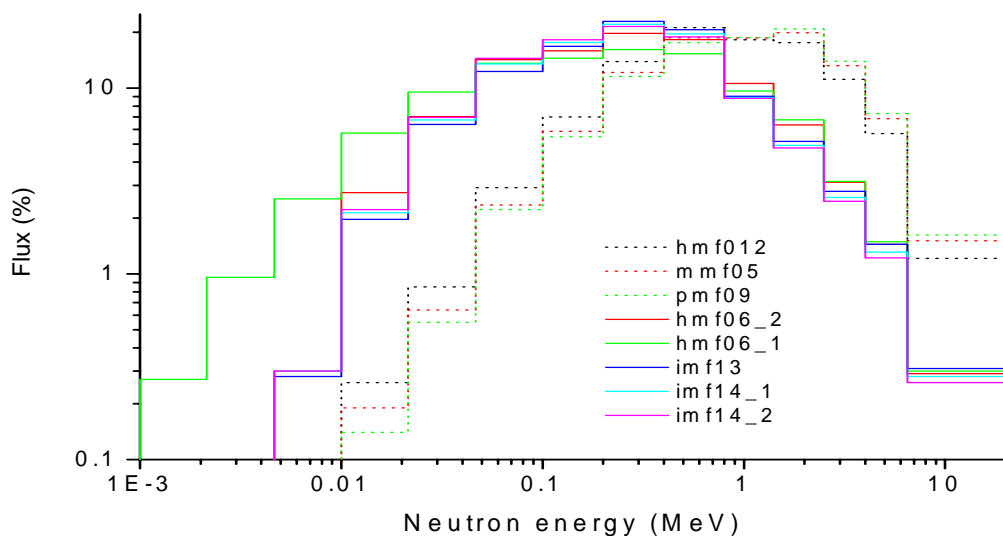


Рис. 23. Нейтронные спектры критическихборок, используемых для валидации файлов оцененных данных

6. Заключение

6.1 Выводы На основе проведенного рассмотрения оценок и имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что **более достоверной и детальной является оценка ENDF/B-VI.8**. Следует, однако, отметить, что область разрешенных резонансов в самой оценке ENDF/B-VI.8 представлена в виде непрерывных сечений (MF=3). Соответствующие резонансные параметры оценки ENDF/B-VI.8 имеются в файле библиотеки JEFF-3.0 (=JEFF-3.1) с непосредственной ссылкой на ENDF/B-VI.8, как источник данных. Поэтому оценку **ENDF/B-VI.8 следует взять из файлов JEFF-3.0 (=JEFF-3.1)**. **В РОСФОНД принят файл данных из JEFF-3.1 со следующими изменениями.**

1. Изменен номер файла: MAT=1327.
2. Файл ограничен областью энергий ниже 20 МэВ; данные о реакциях, протекающих при более высоких энергиях, удалены.
3. Удалены данные об образовании радионуклидов – файл MF=8 и MF=9.

6.2. Автор проведенного отбора оцененных данных:

А.В.Игнатюк

14. КРЕМНИЙ

Общие замечания.

Природный кремний содержит три стабильных изотопа в следующих атомарных концентрациях:

^{28}Si – 92.23%; ^{29}Si – 4.67%; ^{30}Si – 3.10% .

Кроме того, существует бета-активный изотоп ^{32}Si , имеющий период полураспада 132 г.

14.1. Кремний-28

1. Общие характеристики

- a. **Z**=14
- b. **A**=28
- c. **AWR**= 27.73700
- d. Содержание в естественной смеси: 92.23%
- e. Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | E _{порог.} , МэВ |
|-----|----------------------------------|-----------|---------------------------|
| 16 | (n,2n) ^{27}Si | -17.17700 | 17.79700 |
| 22 | (n,n α) ^{24}Mg | -9.985600 | 10.34600 |
| 28 | (n,np) ^{27}Al | -11.58600 | 12.00400 |
| 102 | (n, γ) ^{29}Si | 8.473900 | |
| 103 | (n,p) ^{28}Al | -3.860000 | 3.999160 |
| 107 | (n, α) ^{25}Mg | -9.361300 | 9.698800 |

- f. Радиоактивность: не радиоактивен

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных приняты следующие оценки:

ENDF/B-7 - M.B.Chadwick, P.G.Young, D.Hetrick. EVAL-JUN97; REV1-SEP99.

JENDL3.3 - H.Kitazawa, Y.Narima, T.Fukahori. EVAL-MAR88; REV3-JUL01.

JEFF3.1 –S.Tagesen, H.Vonach, A. Trkov. EVAL-MAY96

Надо отметить, что оценка в библиотеке JEFF3.1 была получена из файла ENDF/B-VI путем пересмотра некоторых данных.

В ENDF/B-VII ^{28}Si также представлен оценкой ENDF/B-6, только продленной до 150 MeV.

2. Резонансная область: (MF=2)

В JENDL3.3 область разрешенных резонансов находится в интервале 10^{-5} эВ до 1.81 MeV (что чуть ниже порога неупругого рассеяния). Резонансные параметры были получены на основе атласа Мухабхаба 1981 г.¹ Приводятся параметры 48 резонансов (7 s-, 17p- и 15d- резонансов) и одного связанного s-состояния.

¹ Mughabghab S.F. et al. ("Neutron Cross Sections, Vol. 1 Academic Press, 1981).

В ENDF/B-7 и JEFF3.1 область разрешенных резонансов простирается до 1.75 МэВ, но резонансные параметры заданы до гораздо более высоких энергий. Параметры резонансов близки к указанным в новом атласе Мухабхаба². Приводятся параметры 54 резонансов (12 s-, 17p- и 25d- резонансов) и шести связанных s-состояний. Параметры получены в 1996 г. Л.Лилом и др. по программе SUMMY с учетом экспериментальных данных для всех стабильных изотопов и для природного кремния.

В таблице 1 проводится сравнение тепловых сечений и резонансного интеграла захвата с данными, рекомендованными Мухабхабом².

Таблица 1. Сравнение тепловых сечений и резонансных интегралов.

| Величина | JEFF-3.1 | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Мухабхаб ² |
|-----------------|----------|-----------|------------|-----------------------|
| σ_t | 2.161 | 2.353 | 2.161 | 2.169±0.007 |
| σ_e | 1.992 | 2.177 | 1.992 | 1.992±0.006 |
| σ_γ | 0.1693 | 0.1769 | 0.1693 | 0.177±0.004 |
| $R\Gamma$ | 0.0820 | 0.0821 | 0.0820 | 0.080±0.015 |

Расхождение, превышающее указанную Мухабхабом погрешность имеет место только в случае сечения захвата. Поскольку процедура оценки данных по программе SUMMY более строга и определена, чем субъективная оценка данных Мухабхабом, менять тепловое сечение захвата не представляется целесообразным.

3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)

3.1. Полное сечение (MT=1)

Во всех оценках полное сечение вне резонансной области оценивалось на основе экспериментальных данных для природного кремния.

Сравнение с представленными в EXFORe экспериментальными данными для основного изотопа, демонстрирует приемлемое согласие всех рассматриваемых оценок вплоть до 10 МэВ. При более высоких энергиях результаты двух последних оценок повторяют одну и ту же структуру, проявившуюся в экспериментах по полному сечению природного кремния (в частности, в эксперимента Larson-80, результаты которого приведены для сравнения на рис.3)

² Mughabghab S.F. Atlas of neutron Resonances. Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. ELSEVIER, 2006.

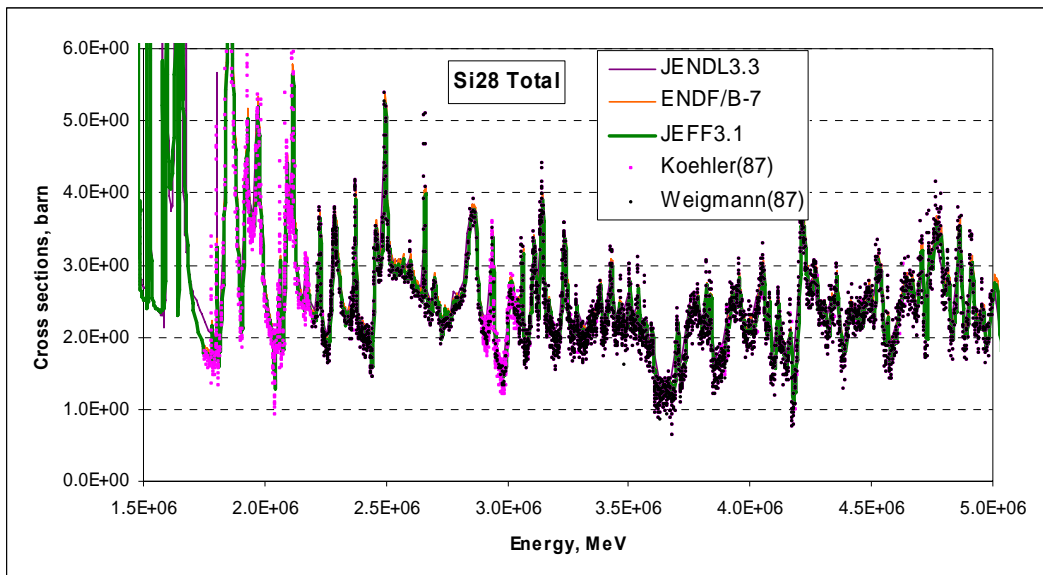


Рис.1. Полное сечение Si28 до 5 MeV

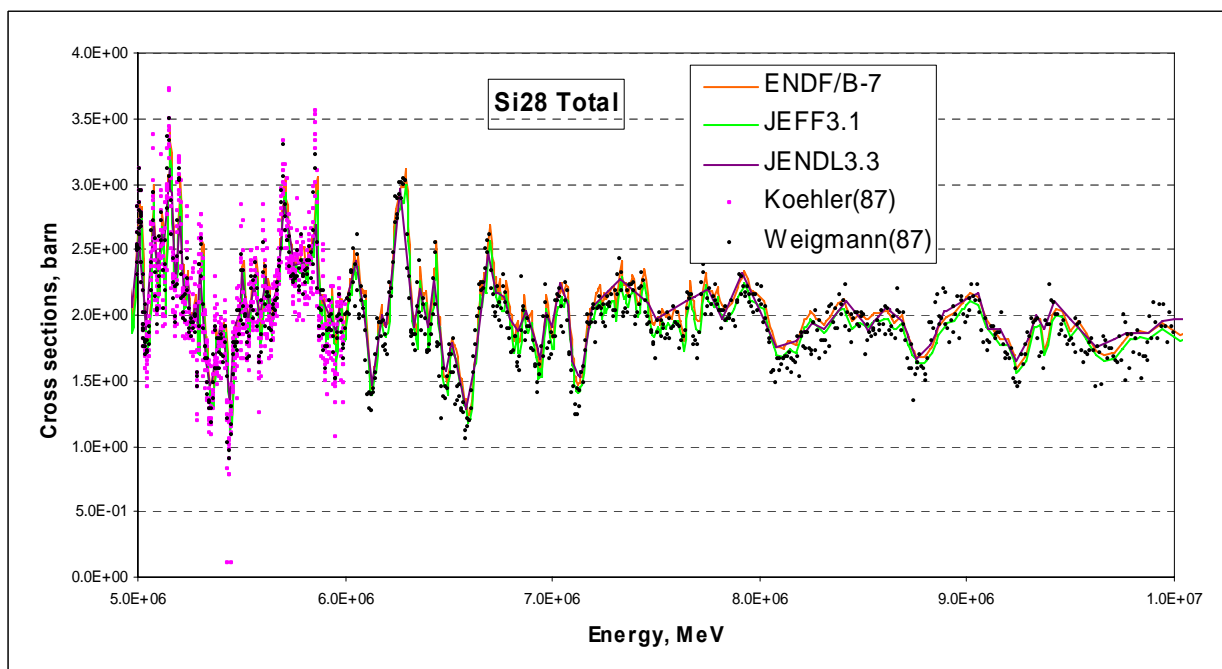


Рис.2. Полное сечение Si28 от 5 до 10 MeV

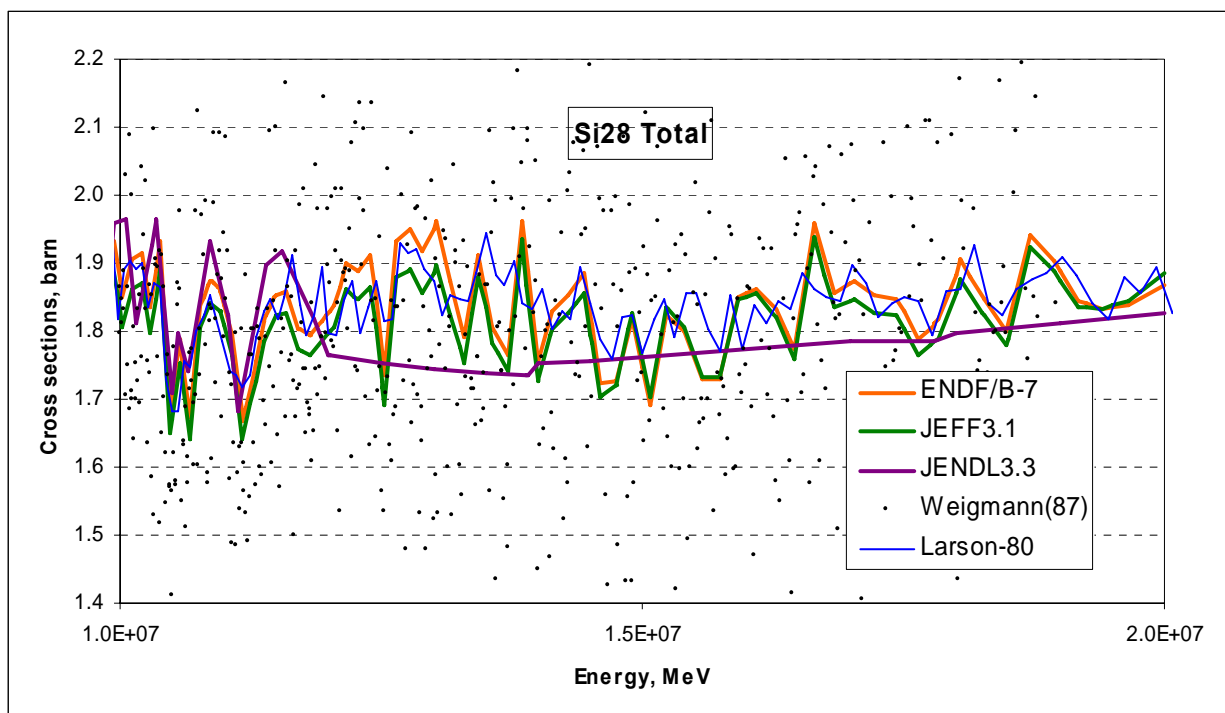


Рис.3. Полное сечение Si28 от 10 до 20 MeV

3.2.Сечение упругого рассеяния(MT=2)

Во всех библиотеках сечение упругого рассеяния получается вычитанием из полного всех имеющихся нейтронных реакций. Экспериментальных данных нет.

3.3.Сечение неупругого рассеяния

На рис.4 оцененные сечения неупругого рассеяния сравниваются с результатами немногих измерений. Очевидна определяющая роль эксперимента Пири в оценках ENDF/B-7 и JEFF-3.1, определившего структуру сечения при энергиях ниже 3.5 МэВ. При более высоких энергиях структура оцененного сечения неупругого рассеяния определяется структурой полного сечения. В оценке JENDL-3.3 структура отсутствует и это является серьезным недостатком этой оценки относительно двух остальных.

Схемы уровней в оценках ENDF/B-7 и JEFF-3.1 близки друг к другу, но не совпадают: в ENDF/B-7 рассматривается два уровня (при энергиях 6.879 МэВ и 7.799 МэВ), отсутствующие в JEFF-3.1. Заметим, что уровень при 7.799 МэВ отсутствует и в базе данных PCNUDAT-2000. Возможно, что именно с этим связано несколько большая величина сечения неупругого рассеяния в ENDF/B-7.

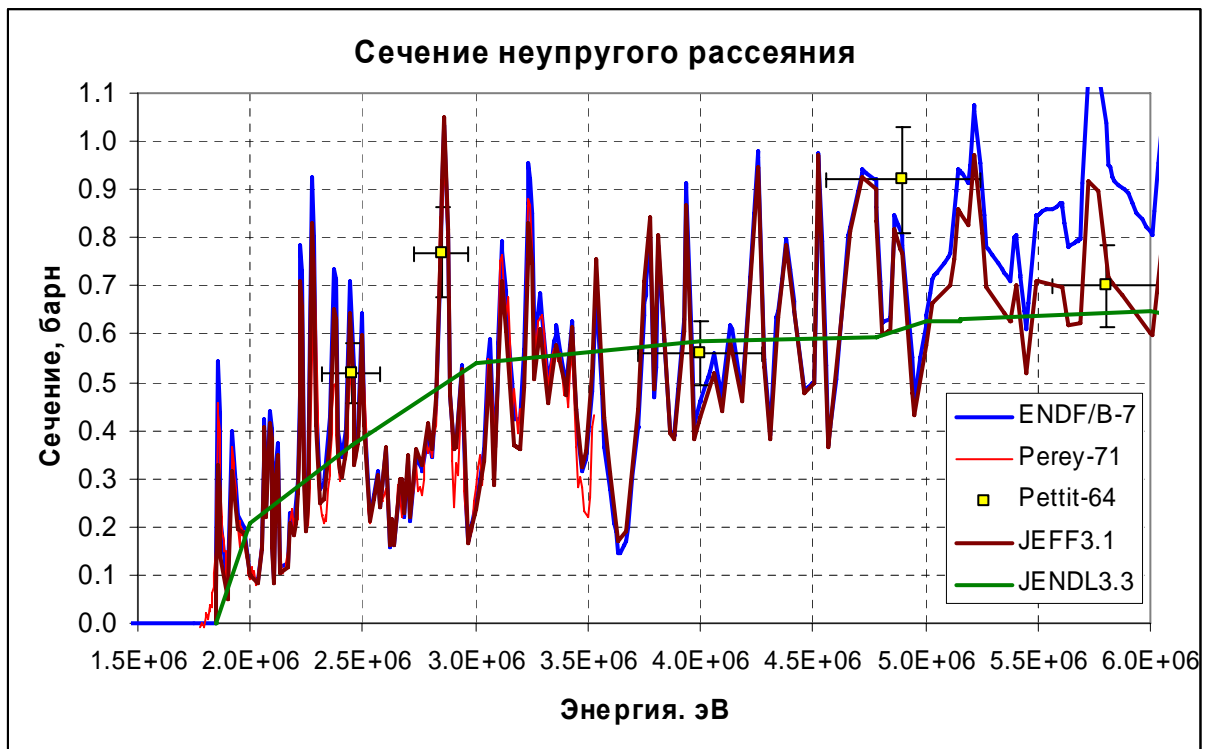


Рис. 4 Сечение неупругого рассеяния Si28

3.5. Сечение реакции (n,2n)

В JENDL3.3 расчет сечения (n,2n) проводился по программе GNASH с использованием статистической модели. В ENDF/B-7 сечения также получены расчетами по программе TNG. В JEFF3.1 ничего не сказано про способ получения сечений, но из рисунка видно, что они предпочли оценку JENDL3.3. Единственный эксперимент из EXFORa не согласуется с оцененными данными. Измерения проводились относительно реакции $^{141}\text{Pr}(n,2n)$, для которой принимались данные Рэйнборда (1963), согласующиеся с современными оценками. Заметим, что кремний-27, образующийся в результате рассматриваемой реакции, имеет период полураспада всего 4.16 с, что, разумеется, сильно осложняет применение активационной методики. Как бы то ни было, столь быстрый рост сечения вблизи порога, который следует из данных Арнольда, не согласуется с современными представлениями о возможном поведении сечения реакции (n,2n) вблизи порога.

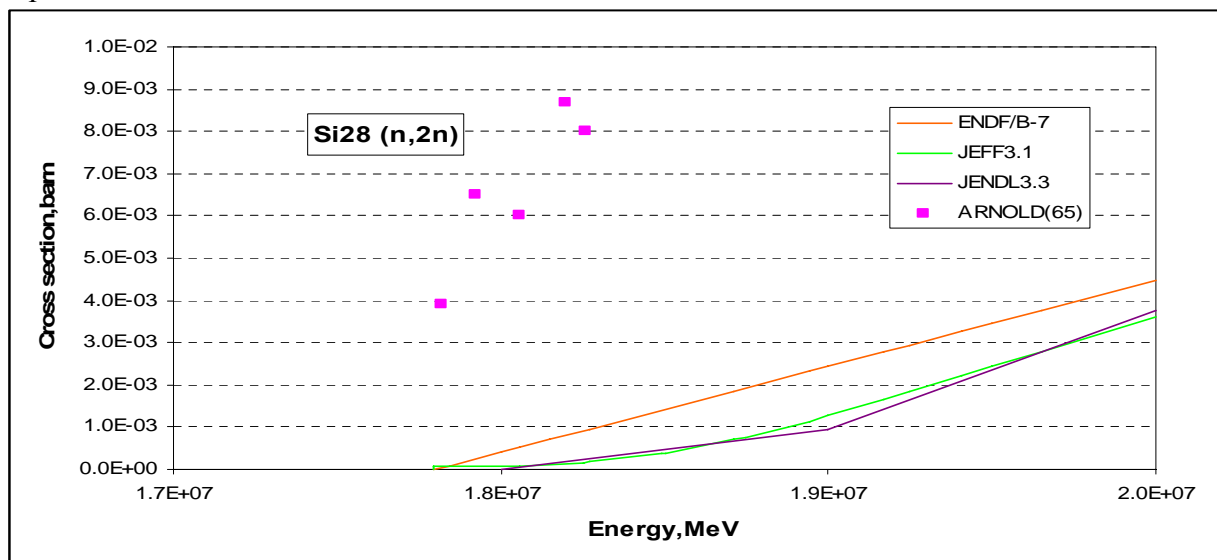


Рис.5. Сечение (n,2n)

3.4. Сечение реакции (n,na), (n,np)

В JENDL3.3 сечения реакций (n,na), (n,np) получено расчетным путем по программе GNASH с использованием статистической модели. В ENDF/B-7 сечения также рассчитывались по программе TNG. В JEFF3.1 нет информации о сечениях.

Экспериментальных данных практически нет.

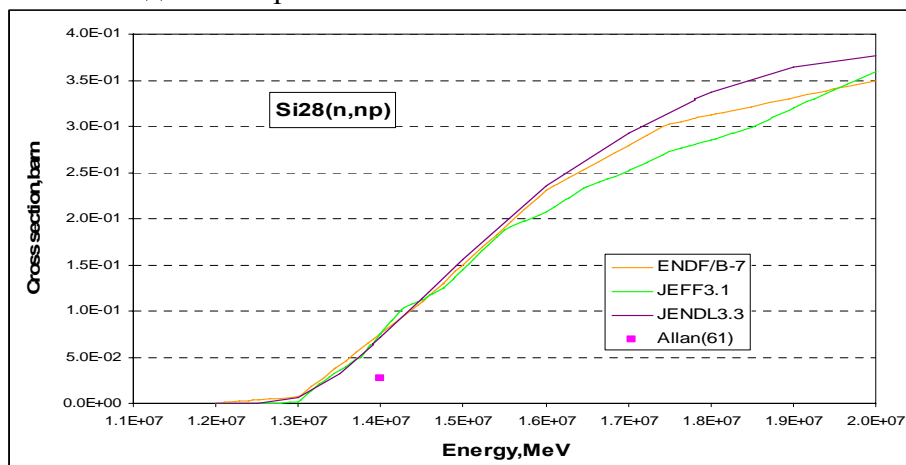


Рис.6. Сечение реакции (n,n α)

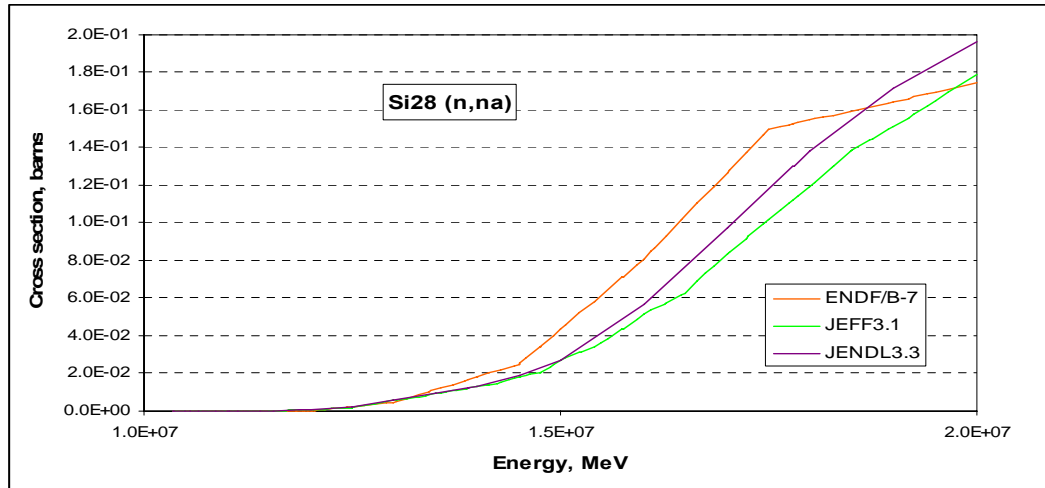


Рис.7. Сечение реакции (n,np)

3.5. Сечение реакции (n, γ)

Сечение радиационного захвата в JENDL3.3 рассчитывалось по программе GNASH. В ENDF/B-7 и JEFF3.1 оценки в области разрешенных резонансов совпадают, далее в JEFF3.1 сечение, как видно из рисунков 8, 9, повторяет практически оценку JENDL3.3

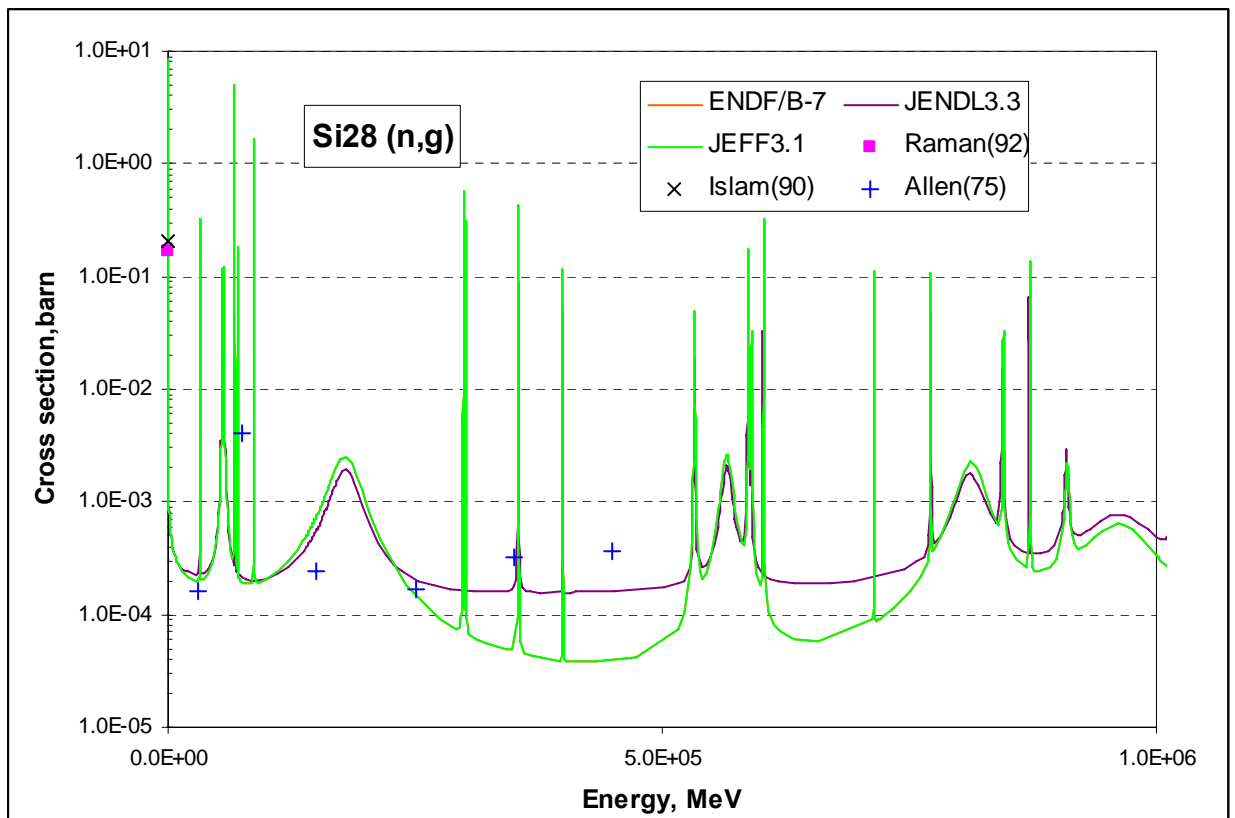


Рис.7. Сечение Si28(n, γ) до 1MeV

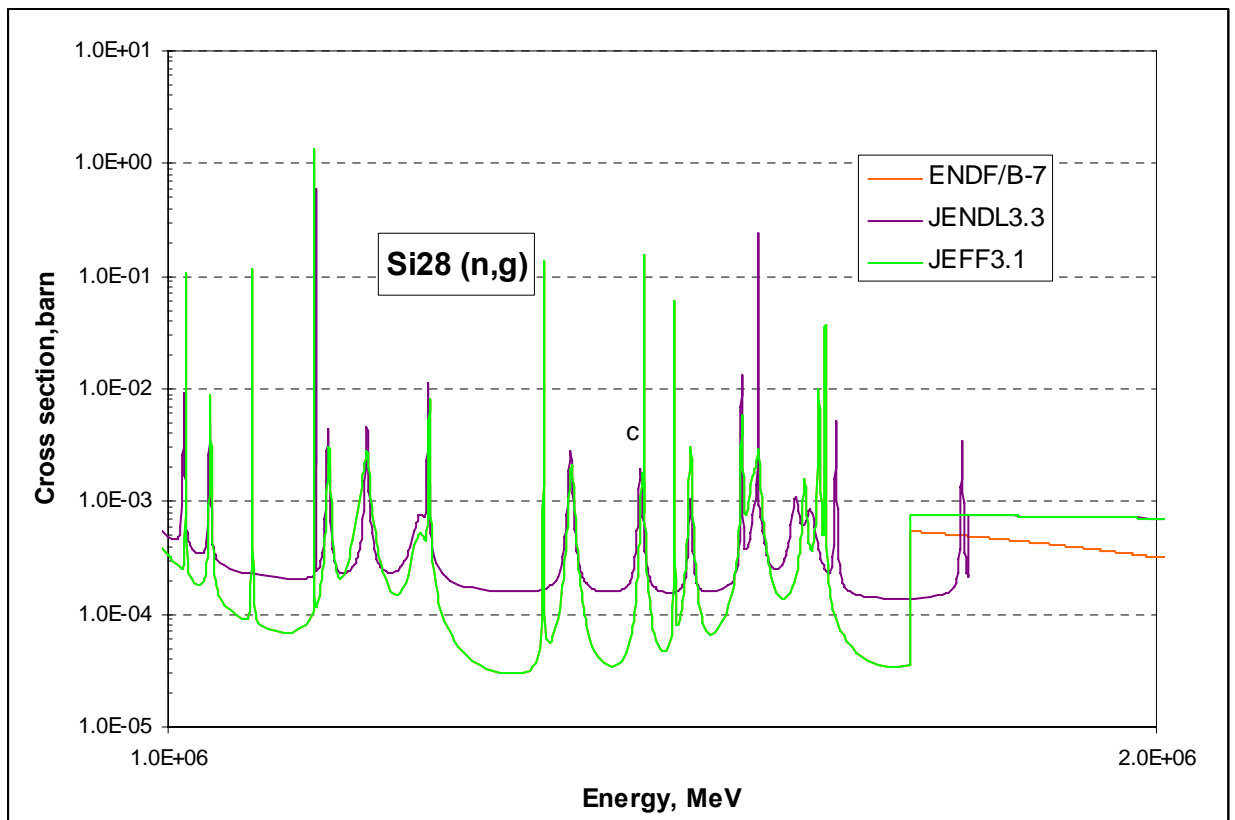


Рис.8. Сечение Si28(n, γ) от 1 до 2 MeV

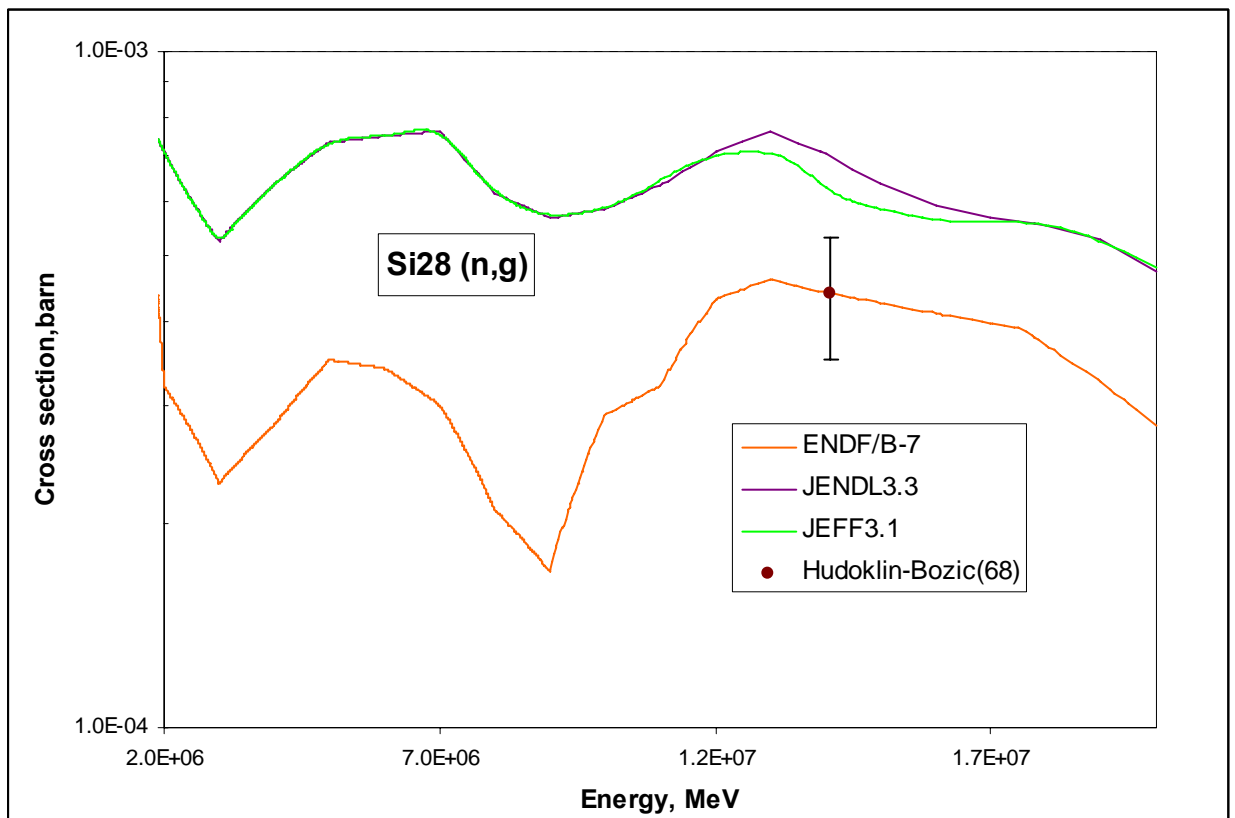


Рис.9. Сечение Si28(n, γ) от 2 до 20 MeV

Экспериментальные данные недостаточны для того, чтобы отдать предпочтение какой-либо из оценок (совпадение Оценки ENDF/B-VII с единственным старым экспериментом при 14 МэВ едва ли можно считать основанием для предпочтения этой оценки).

3.10. Сечение реакции (n,p)

Поведение сечения реакции (n,p) во всех трех оценках разное. В ENDF/B-7 и JENDL3.3. расчеты проводились соответственно по программам TNG и GNASH. Оценка в JEFF3.1 была выполнена на основе экспериментов, как видно из рисунков.

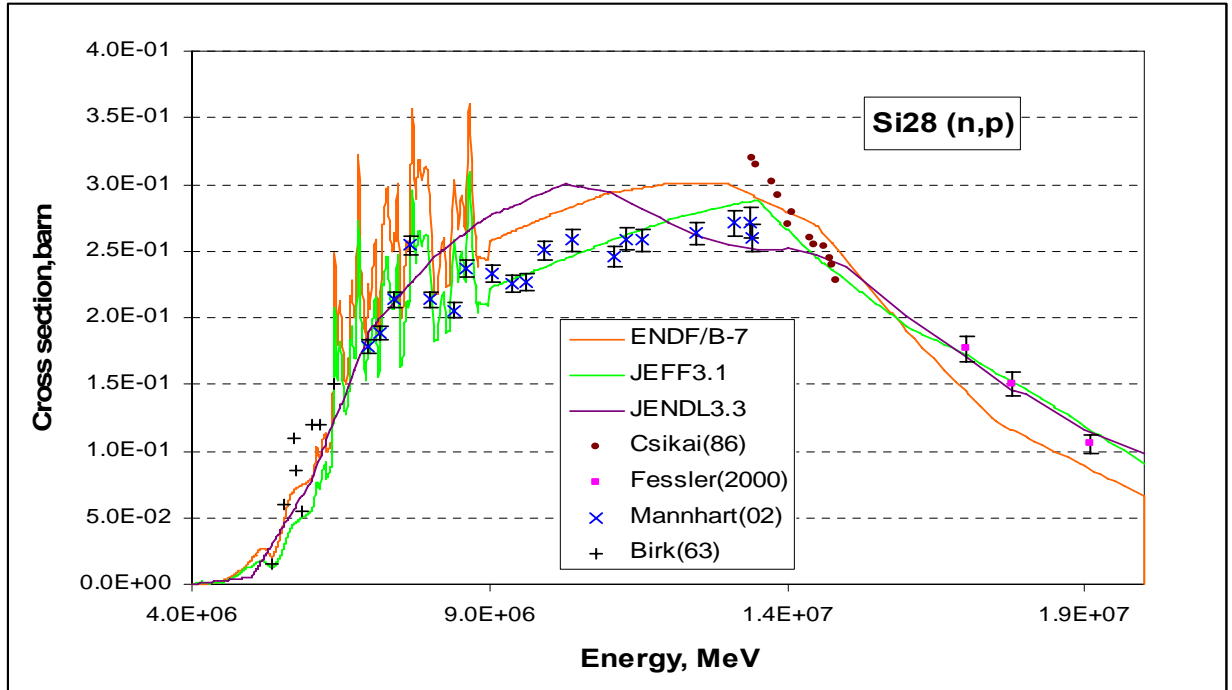


Рис.18. Сечение (n,p)

3.12. Сечение реакции (n,d)

Сечение реакции (n,d) присутствует только в двух библиотеках. Оценки отличаются довольно сильно друг от друга, отдать предпочтение какой-либо нельзя, т.к. экспериментальных данных нет.

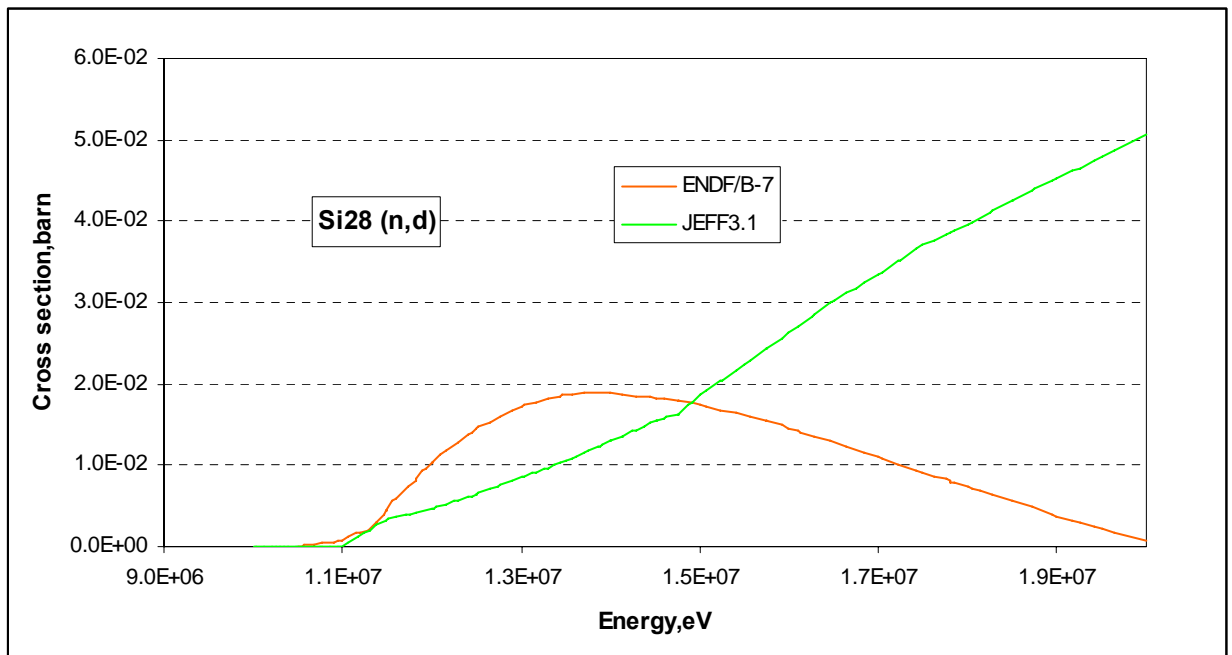


Рис.19. Сечение (n,d)

3.12. Сечение реакции (n,t)

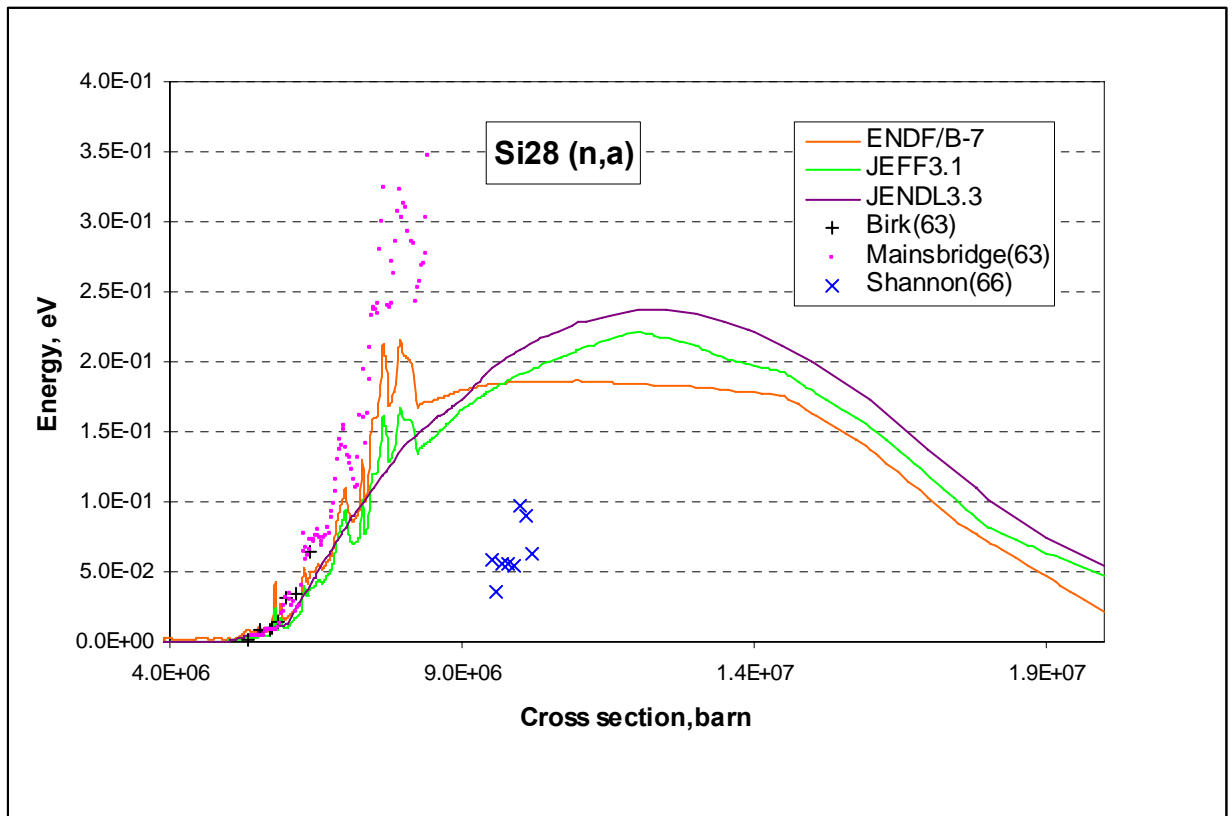


Рис.20. Сечение (n,α)

Как видно, разброс экспериментальных данных столь велик, что не позволяет отдать предпочтение какой-либо из оценок,

4. Заключение

Изложенное выше показывает, что оценка, принятая в JENDL-3.3 уступает по качеству двум другим. Между оценками JEFF-3.1. и ENDF/B-VII трудно сделать выбор: в практически весьма важной области разрешенных резонансов они полностью совпадают, а при более высоких энергиях достаточно близки друг к другу. Решено рекомендовать в РОСФОНД оценку из JEFF-3.1 в частности потому, что она не распространяется на область энергий выше 20 МэВ, как ENDF/B-VII (в РОСФОНДе область энергий выше 20 МэВ не рассматривается)

4.2. Автор обоснования оцененных данных: Забродская С.В.

14.2. Кремний-29

Z=14

A=29

AWR= 28.72760

Содержание в естественной смеси: 4.683%

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | E _{порог.} , МэВ |
|-----|-------------------------|-----------|---------------------------|
| 16 | (n,2n) ²⁸ Si | -8.47388 | 8.76886 |
| 22 | (n,nα) ²⁵ Mg | -11.12670 | 11.5140 |
| 28 | (n,np) ²⁸ Al | -12.3337 | 12.7630 |
| 102 | (n,γ) ³⁰ Si | 10.6143 | |
| 103 | (n,p) ²⁹ Al | -2.89783 | 2.9987 |
| 107 | (n,α) ²⁶ Mg | -0.33150 | 0.343039 |
| 111 | (n,2p) ²⁸ Mg | -13.38310 | 13.8490 |

Радиоактивность: не радиоактивен

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных приняты следующие оценки: ENDF/B-7 - M.B.Chadwick, P.G.Young, D.Hetrick. EVAL-JUN97; REV2-NOV01.

JENDL3.3 и JEFF3.1 - H.Kitazawa, Y.Narima, T.Fukahori. EVAL-MAR88; REV3-JUL01.

14.2.1. Резонансная область: (MF=2)

В JENDL-3.3 область разрешенных резонансов распространяется только до 200 кэВ и содержит параметры двух р-резонансов и одного связанного s-состояния. В файле MF=3 в этой области задана существенная подложка.

В ENDF/B-7 область разрешенных резонансов простирается до 1300 кэВ и содержит параметры 4-х s-, 17 р- и 2-х d-резонансов не считая Парме тров 3-х связанных состояний и 3-х резонансов, лежащих выше границы области. Резонансные параметры были определены Лилом и др. по программе SUMMY с учетом всех имеющихся экспериментальных данных для всех стабильных изотопов кремния и для природного кремния. Параметры заметно отличаются от приведенных в атласе Мухабхаба² (в частности, отсутствует самый низколежащий s-резонанс при 15.3 кэВ с малой нейтронной шириной – 7.5 эВ). Учитывая, что оценка Лила и др. принята и для остальных стабильных изотопов кремния и использование ее позволяет надеяться на взаимокompенсацию погрешностей в оцененных данных для стабильных изотопов, целесообразно включить в РОСФОНД именно эту оценку резонансных параметров.

В таблице 2 проводится сравнение тепловых сечений и резонансного интеграла захвата с данными, рекомендованными Мухабхабом².

Таблица 2. Сравнение тепловых сечений и резонансных интегралов для кремния-29.

| Величина | JEFF-3.1 | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Мухабхаб ² |
|-----------------|----------|-----------|------------|-----------------------|
| σ _t | 2.995 | 2.995 | 2.750 | 2.739±0.050 |
| σ _e | 2.893 | 2.893 | 2.630 | 2.62±0.13 |
| σ _γ | 0.1016 | 0.1016 | 0.120 | 0.119±0.003 |
| R _{Iγ} | 0.0648 | 0.0648 | 0.0625 | 0.077±0.015 |

14.2.2. Сечения вне резонансной области

Оценка, принятая в JENDL-3.3, в окончательном виде выполнена в 2000 г. В ENDF/B-VII в области ниже 20 МэВ принята оценка из ENDF/B-VI, которая, как сказано в заголовочной секции взята из ENDF/B-V. Между тем в ENDF/B-V файла для Si-28 не содержится, имеются данные только для природного кремния.

Вне резонансной области в JENDL-3.3 и в ENDF/B-VII сечения нейтронных реакций описаны с разной детальностью. Так в JENDL-3.3 описывается возбуждение при неупругом рассеянии 29 уровней ядра-мишени до энергии 7.06 МэВ (в ENDF/B-VII только 14 уровней до энергии 6 МэВ). С другой стороны, в ENDF/B-VII описывается возбуждение 15 уровней ядер-продуктов, образующихся в реакции (n,p) и 19 уровней ядер-продуктов, образующихся в реакции (n, α), тогда как в JENDL-3.3 приводятся только полные сечения этих реакций. В JENDL-3.3 приводится сечение реакции (n,2p), которой в ENDF/B-VII нет.

На рис. 21 сравниваются полные сечения вне резонансной области. Экспериментальные данные отсутствуют (по крайней мере, их нет в EXFORe). Происхождение структуры полного сечения в оценке ENDF/B неясно. Возможно, эта структура повторяет структуру сечения природного кремния.

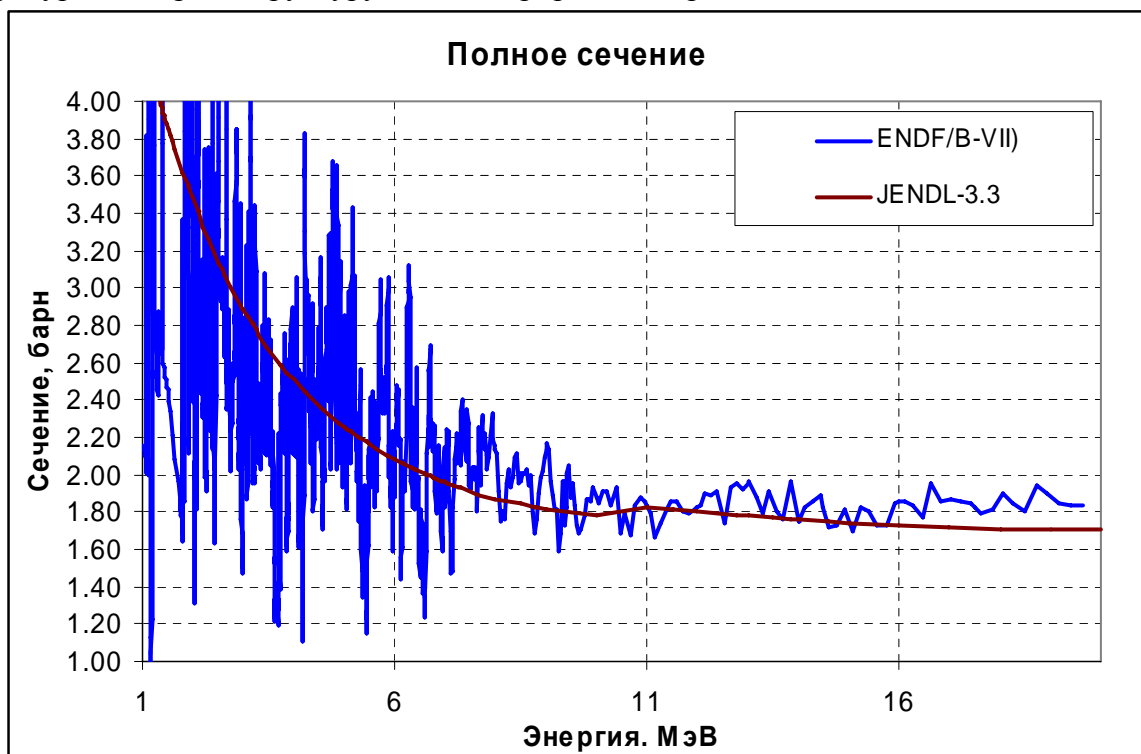


Рис.21. Полное сечение кремния-29 вне резонансной области.

На рис. 22 сравниваются оцененные сечения неупругого рассеяния и реакции (n,2n). Экспериментальных данных не имеется.

На рис. 23 приводятся оцененные сечения реакций с вылетом заряженных частиц вместе с экспериментальными данными. Как видно, отдать предпочтение той или иной оценке на основе сравнения с экспериментальными данными нелегко; разве что оценка сечения реакции (n,p) в JENDL-3.3 лучше согласуется с экспериментами, выполненными много позже ее.

14.2.3. Энерго-угловые распределения вторичных частиц.

Эти данные приводятся и в той и в другой оценке. Для сравнения их по надежности никаких оснований нет.

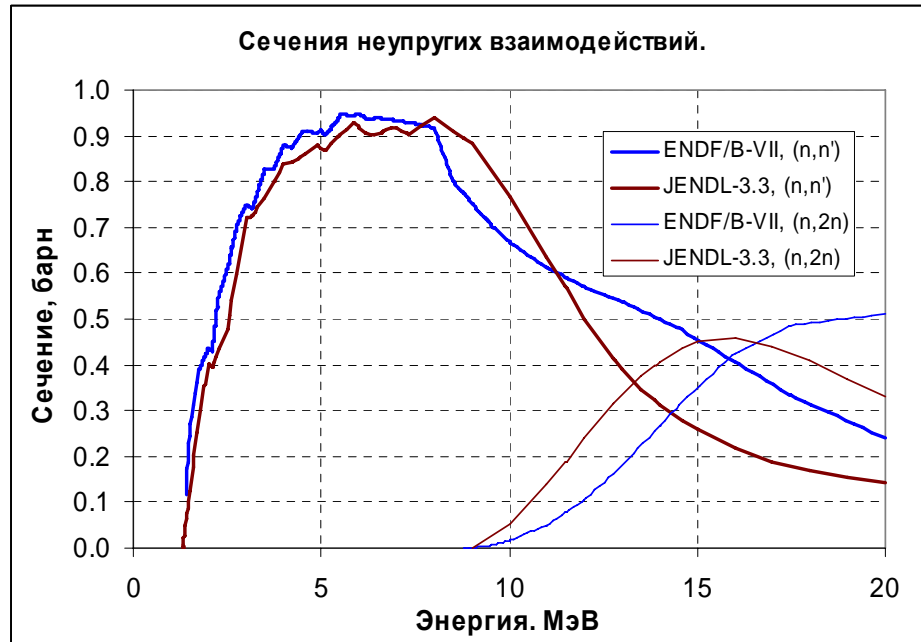


Рис.21. Сечения неупругого рассеяния и реакции (n,2n) для кремния-29

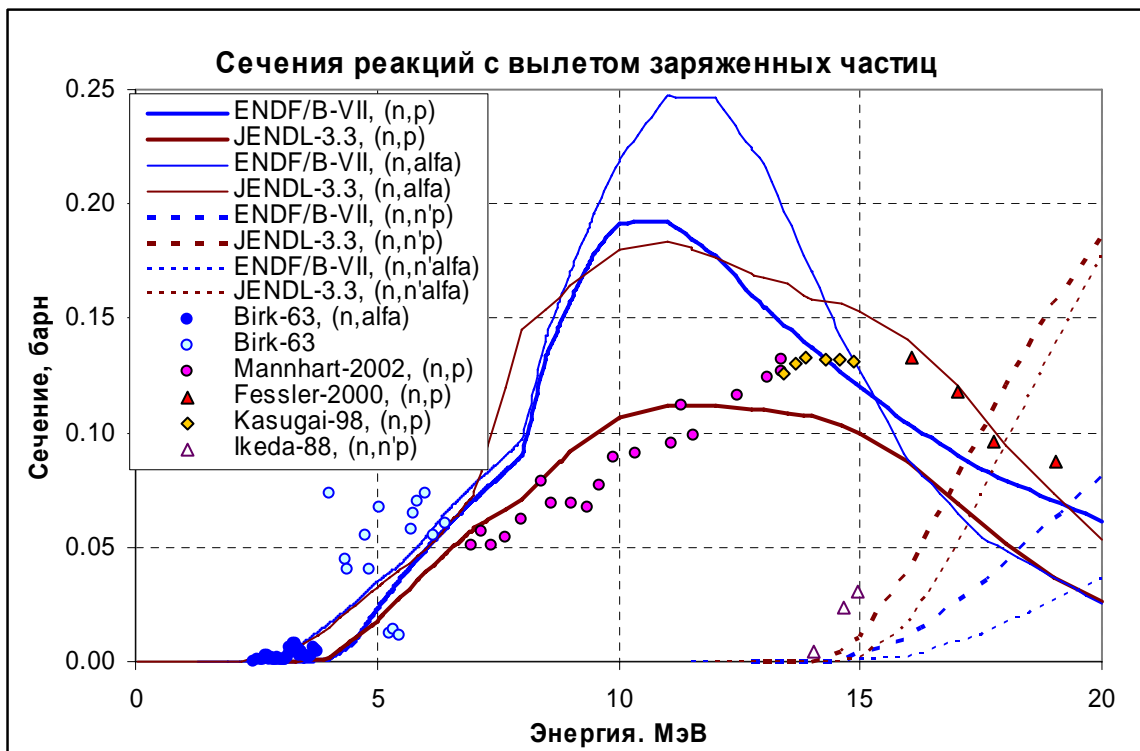


Рис.23. Сечения реакций с вылетом заряженных частиц

14.2.4. Заключение

Представляется целесообразным сформировать для РОСФОНДа комбинированный файл взяв резонансные параметры из ENDF/B-VII, а сечения вне резонансной области – из

JENDL-3.3. Избыточные данные о суммарных сечениях образования протонов и альфа-частиц, содержащиеся в JENDL-3.3, в файл РОСФОНДа не включать.

Автор рекомендации – Николаев М.Н.

14.3. Кремний -30

Z=14

A=30

AWR= 29.74230

Содержание в естественной смеси: 3.087%

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | E _{порог.} , МэВ |
|-----|-------------------------|----------|---------------------------|
| 16 | (n,2n) ²⁹ Si | -10.6097 | 10.9667 |
| 22 | (n,nα) ²⁶ Mg | -10.6428 | 11.0009 |
| 28 | (n,np) ²⁹ Al | -13.5075 | 13.9620 |
| 102 | (n,γ) ³¹ Si | 6.59199 | |
| 103 | (n,p) ³⁰ Al | -7.75882 | 8.019930 |
| 107 | (n,α) ²⁷ Mg | -4.19984 | 4.34118 |
| 111 | (n,2p) ²⁹ Mg | -18.3851 | -19.0038 |

Радиоактивность: не радиоактивен

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных приняты следующие оценки: ENDF/B-7 - M.B.Chadwick, P.G.Young, D.Hetrick. EVAL-JUN97; REV2-NOV01.

JENDL3.3 и JEFF3.1 - H.Kitazawa, Y.Narima, T.Fukahori. EVAL-MAR88; REV3-JUL01.

14.3.1. Резонансная область: (MF=2)

В JENDL-3.3 область разрешенных резонансов распространяется только до 500 кэВ и содержит параметры одного s- резонанса, двух p-резонансов и трех d-резонансов. В файле MF=3 в этой области задана существенная подложка.

В ENDF/B-7 область разрешенных резонансов простирается до 1500 кэВ и содержит параметры одного s-резонанса, 16 p-резонансов и 7 d-резонансов не считая параметров 3-х связанных состояний и 2-х резонансов, лежащих выше границы области. Резонансные параметры были определены Лилом и др. по программе SUMMY с учетом всех имеющихся экспериментальных данных для всех стабильных изотопов кремния и для природного кремния. Параметры заметно отличаются от приведенных в атласе Мухабхаба² (в частности, отсутствует самый низколежащий s-резонанс при 15.1 кэВ с малой нейтронной шириной – 5 эВ и резонансы при 5 кэВ и при 63.4 кэВ, проявившиеся в (d,p)-реакции). Учитывая, что оценка Лила и др. принята и для остальных стабильных изотопов кремния и использование ее позволяет надеяться на взаимокompенсацию погрешностей в оцененных данных для стабильных изотопов, целесообразно включить в РОСФОНД именно эту оценку резонансных параметров.

В таблице 2 проводится сравнение тепловых сечений и резонансного интеграла захвата с данными, рекомендованными Мухабхабом².

Таблица 2. Сравнение тепловых сечений и резонансных интегралов для кремния-29.

| Величина | JEFF-3.1 | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Мухабхаб ² |
|----------------|----------|-----------|------------|-----------------------|
| σ _t | 2.641 | 2.641 | 2.607 | 2.597±0.040 |

| | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|-------------|
| σ_e | 2.533 | 2.533 | 2.500 | 2.49±0.04 |
| σ_γ | 0.1078 | 0.1078 | 0.1072 | 0.107±0.002 |
| $R\Gamma_\gamma$ | 0.7048 | 0.7048 | 0.5812 | 0.63 ±0.03 |

14.3.2. Сечения вне резонансной области

В ENDF/B-VII в области ниже 20 МэВ принята оценка из ENDF/B-VI, которая, как сказано в заголовочной секции, взята из ENDF/B-VI.5.

Как и в случае кремния-28, вне резонансной области в JENDL-3.3 и в ENDF/B-VII сечения нейтронных реакций описаны с разной детальностью: неупругое рассеяние в JENDL-3.3 описывается возбуждение при неупругом рассеянии большего числа уровней, чем в ENDF/B-VII; в ENDF/B-VII описывается возбуждение уровней ядер-продуктов, образующихся в реакции (n,p) и (n, α), тогда как в JENDL-3.3 приводятся только полные сечения этих реакций. В JENDL-3.3 приводится сечение реакции (n,2p), которой в ENDF/B-VII нет.

На рис. 24 сравниваются полные сечения вне резонансной области. Экспериментальные данные отсутствуют (по крайней мере, их нет в EXFORe). Происхождение структуры полного сечения в оценке ENDF/B неясно. Возможно, эта структура повторяет структуру сечения природного кремния.

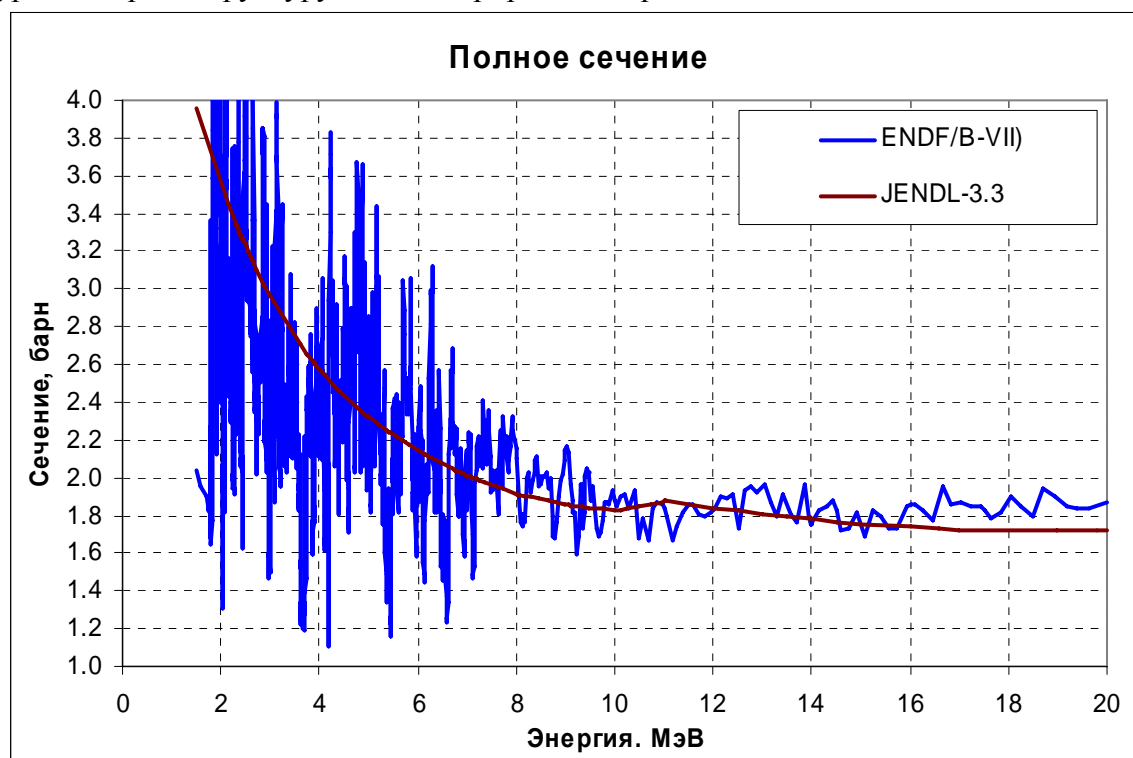


Рис.24. Полное сечение кремния-30 вне резонансной области

На рис.25 проводится сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния и реакции (n,2n).

На рис.26 оцененные сечения реакций с вылетом заряженных частиц сравниваются с экспериментальными данными. Экспериментальные данные по сечению реакции (n,p) весьма противоречивы. Интересно, что оценки ближе к последним результатам, полученным уже после завершения оценок.

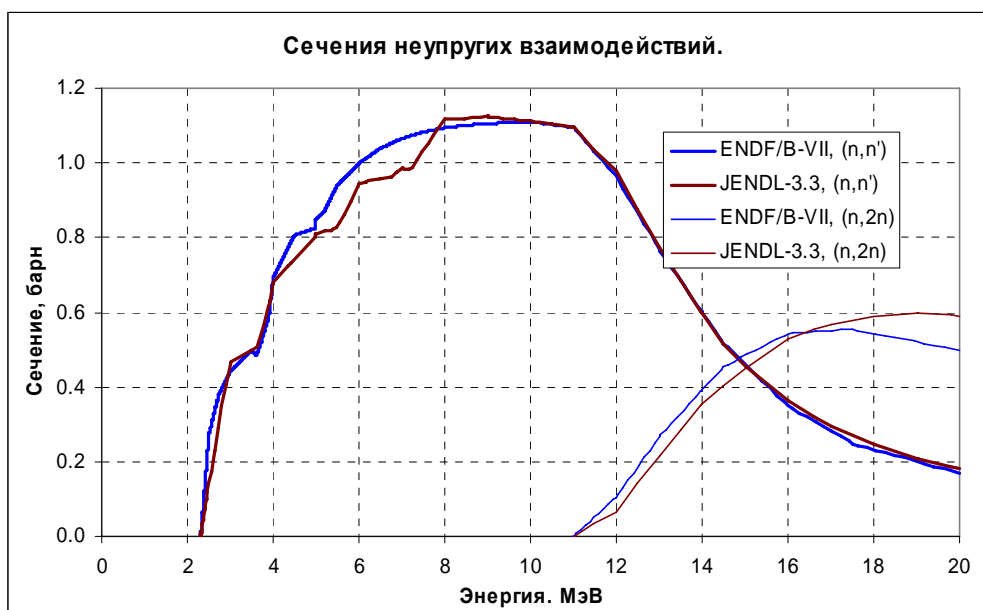


Рис.25. Неупругое рассеяние и реакция (n,2n) на кремнии-30

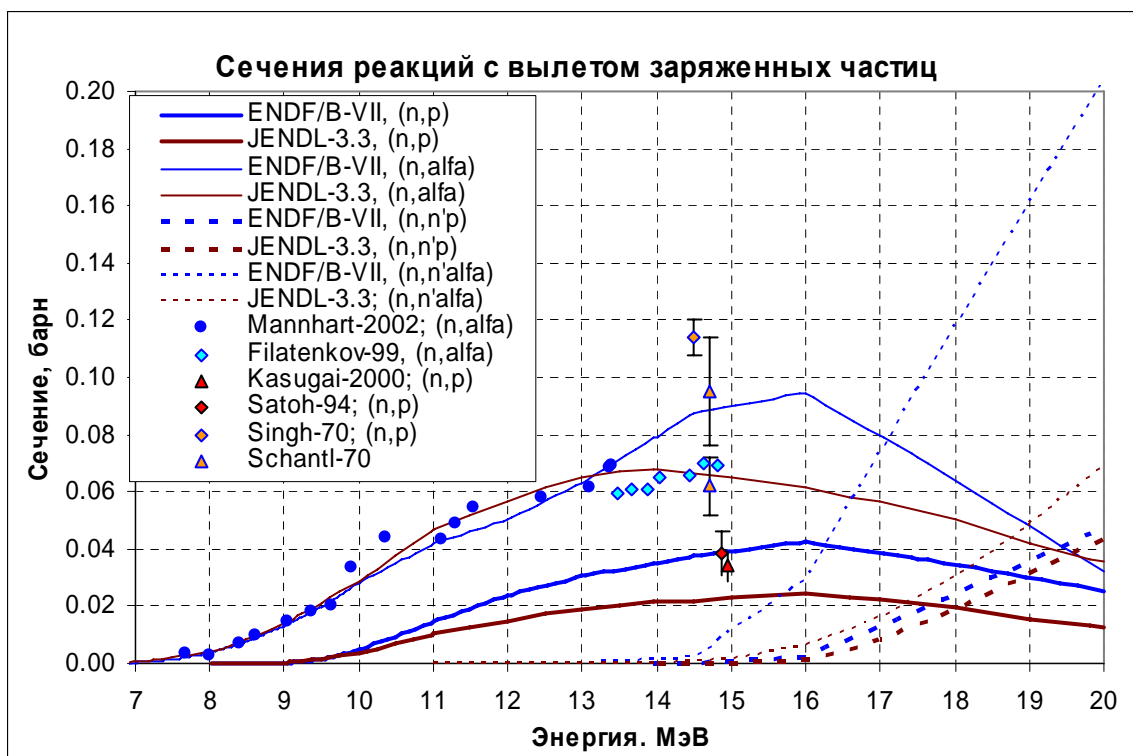


Рис.26. Сечения реакций с вылетом заряженных частиц.

14.3.3. Энерго-угловые распределения вторичных частиц.

Эти данные приводятся и в той и в другой оценке. Для сравнения их по надежности никаких оснований нет.

14.2.4. Заключение

Представляется целесообразным сформировать для РОСФОНДа комбинированный файл взяв резонансные параметры из ENDF/B-VII, а сечения вне резонансной области – из JENDL-3.3. Преимущество ENDF/B-VII перед JENDL-3.3 проявившееся в лучшем

согласии оценки сечения реакции (n,p) с экспериментальными данными компенсируется недостатком, проявившемся в явно избыточном сечении реакции (n,n'α). Избыточные данные о суммарных сечениях образования протонов и альфа-частиц, содержащиеся в JENDL-3.3, в файл РОСФОНДа не включать.

Автор рекомендации – Николаев М.Н.

14.4. Кремний-32

Z=14

A=32

AWR= 31.6995

Содержание в естественной смеси: нет

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | E _{порог.} , МэВ |
|-----|-------------------------|-----------|---------------------------|
| 16 | (n,2n) ³¹ Si | -9.200 | 9.4875 |
| 17 | (n,3n) ³⁰ Si | -15.798 | 16.2870 |
| 22 | (n,nα) ²⁸ Mg | -11.490 | 11.8490 |
| 28 | (n,np) ³¹ Al | -16.41566 | 16.93322 |
| 102 | (n,γ) ³³ Si | 4.4829 | |
| 103 | (n,p) ³² Al | -12.23 | 12.612 |
| 104 | (n,d) ³¹ Al | -14.19108 | 14.63854 |
| 105 | (n,t) ³⁰ Al | -15.09 | 15.562 |
| 107 | (n,α) ²⁹ Mg | -7.78 | 8.0231 |

Радиоактивность: испытывает бета-распад в ³²P с периодом T_{1/2}=132 г., а затем – в ³²S с периодом T_{1/2}=14.262 д.

Полных файлов нейтронных данных для этого радионуклида ни в одной из известных библиотек нет. В EAF-2003 содержится файл Форреста, Копецкого и Саблета, содержащий только оценки сечений нейтронных реакций, ведущих к изменению исходного ядра. Этот файл и рекомендуется включить в РОСФОНД.

Следующие из файла тепловое сечение захвата и резонансный интеграл равны, соответственно, 5.62 миллибарна и 60.617 миллибарн.

Автор рекомендации - В.Н.Кошцев

15. ФОСФОР

Единственным стабильным изотопом является фосфор-31. Данные для Р-32 и Р-33, имеющих периоды полураспада несколько дней, также представлены в РОСФОНДе

15.1. Фосфор-31

В JENDL-3.3 и JEFF-3.1 включена оценка Н. Nakamura (1987 г). В ENDF/B-VII – оценка 1997 г., совпадающая в области энергий ниже 20 МэВ с прежней оценкой R.Howerton (1977). В ФОНД-2.2 содержится оценка В.Кощева (1989), базирующаяся на оценке Накамура и более свежих экспериментальных данных.

На рис.1. сравниваются полные сечения из оценок Кощева и Накамура с экспериментальными данными. Видно, что оценка Накамура лучше соответствует недавним данным Абфальтерера, но не отражает gross структуру сечений в более практически значимой области ниже 5 МэВ.

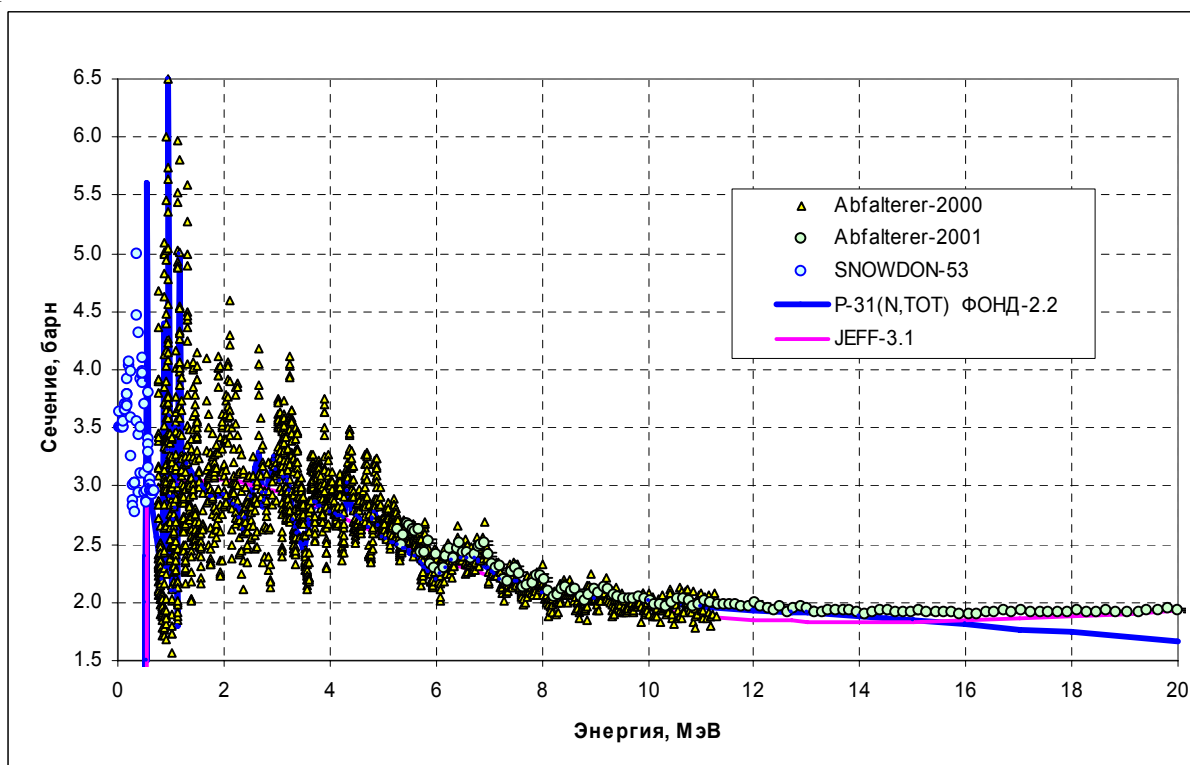


Рис.1. Полное сечение

Заключение

В РОСФОНДе помещается оценка В.Кощева. Желателен пересмотр оценки с учетом новых экспериментальных данных.

Автор рекомендации
Кощев В.Н.

15.2. Фосфор-32

Радиоактивен: испытывает бета-распад в серу-32 ($T_{1/2}=14.26$ д).

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных из EAF-2003

Автор рекомендации

Кошечев В.Н.

15.3. Фосфор-33

Радиоактивен: испытывает бета-распад в серу-32 ($T_{1/2}=25.34$ д).

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных из EAF-2003

Автор рекомендации

Кошечев В.Н.

16. СЕРА

В РОСФОНДе представлены данные для всех 4-х стабильных изотопов серы и для радиоактивной серы-35

16.1. Сера-32

Содержание в природной смеси 95.02% - основной изотоп. Во всех современных библиотеках принята оценка Н.Nakamura (1987).

Область разрешенных резонансов простирается до 1.56585 МэВ и содержит параметры 42 –х s-,22-х р- и 19 d-резонансов. На рис.1 показаны нарастающие числа резонансов в зависимости от энергии. Видно, что граница области разрешенных резонансов неоправданно завышена.

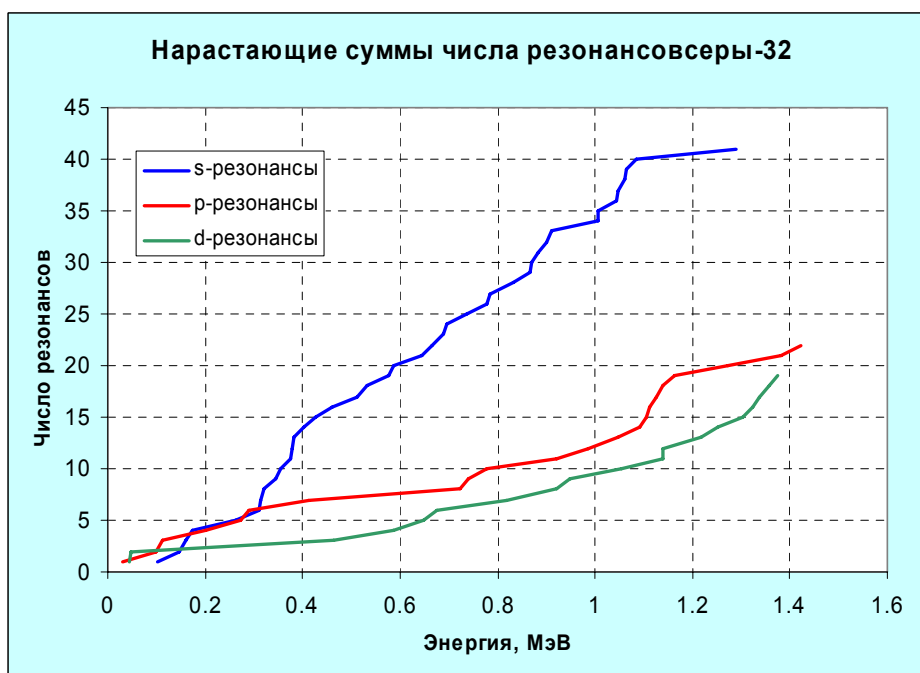


Рис.1.

На рис.2 оценка Хакамуры сравнивается с новейшими экспериментальными данными Абфальтерера в той области энергий, в которой эти данные имеются. Согласие вне резонансной (выше 1.59 МэВ) области вполне приемлемо. Однако вблизи границы области разрешенных резонансов (рис 2б) характер расхождений указывает, что эта граница в оценке JENDL-3.3 неоправданно завышена. Представляется целесообразным снизить в РОСФОНДе эту границу до 1.45 МэВ (см. Рис.2б).

Ясно, что было бы целесообразно переоценить резонансные параметры серы с учетом данных Абфальтерера, однако такая переоценка выходит за возможности настоящей работы.

В таблице 1 приведены тепловые сечения и резонансный интеграл захвата из оценки Мухабхаба¹, из секции 451 файла JENDL-3.3 и результаты, рассчитанные с помощью программы NJOY. Уточненные данные согласуются с оценкой Мухабхаба.

В файле РОСФОНД в секции 451 следует привести уточненные данные по тепловым сечениям и резонансному интегралу захвата.

¹ S.F.Mughabghab. Atlas of Neutron Resonances. Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. ELSEVIER,2005.

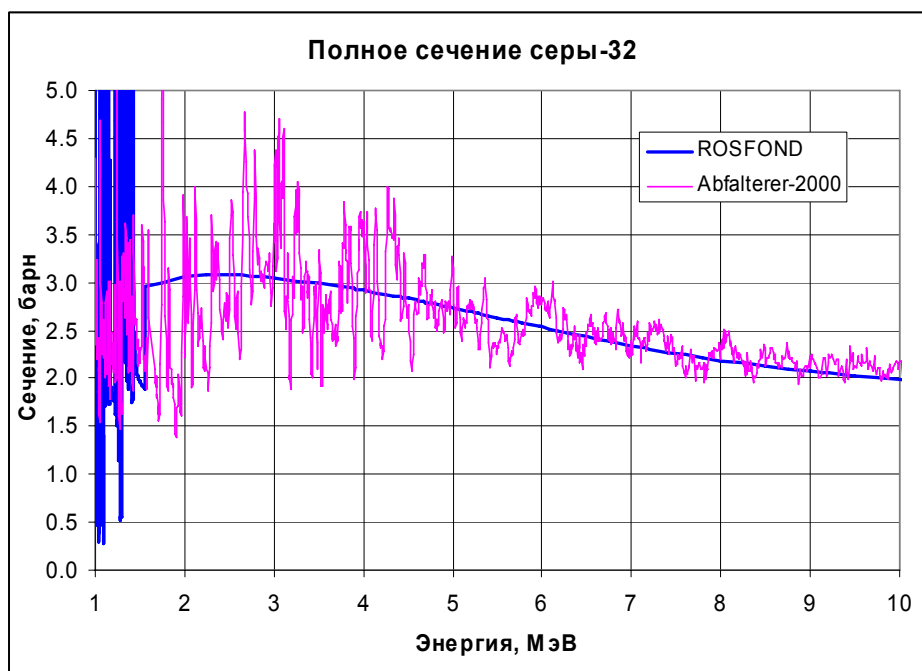


Рис.2а

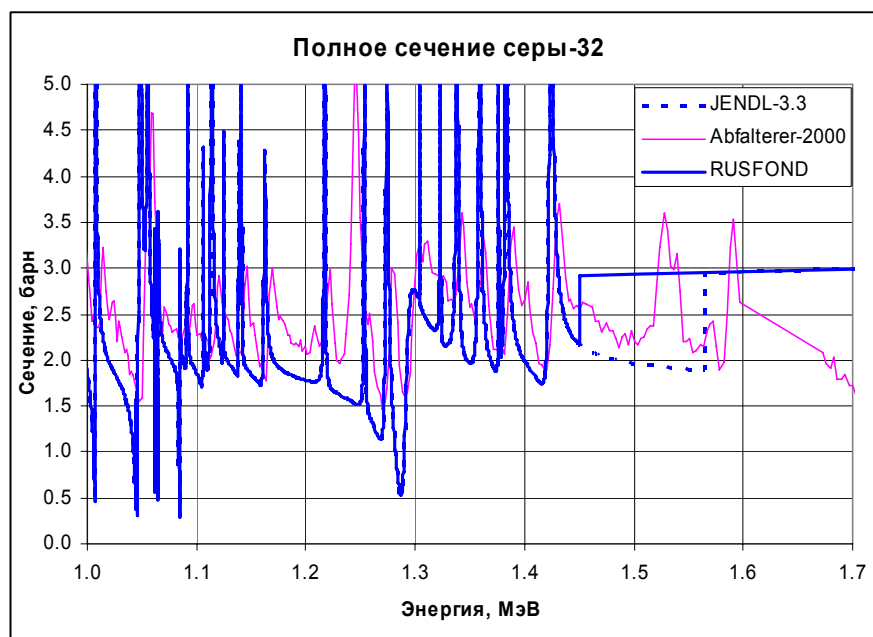


Рис.2б.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл серы-32.

| Величина | Мухабхаб | Указано в MF=451 JENDL-3.3 | Рассчитано по NJOY |
|-----------------|-------------------|----------------------------|--------------------|
| σ_γ | 0.518 ± 0.014 | 0.528 | 0.528 |
| σ_{el} | 0.973 ± 0.002 | 0.963 | 0.979 |
| RI | 0.246 ± 0.004 | 0.250 | 0.245 |

Заключение.

В РОСФОНД принять оценку из JENDL-3.3 с корректировкой границы области разрешенных резонансов. Внести коррективы в секции MT=1, MT=2 и MT=102 путем экстраполяции к сниженной границе области разрешенных резонансов.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

16.2. Сера-33

Содержание в природной смеси 0.75%. Во всех современных библиотеках принята оценка Н.Nakamura (1987).

Особенностью серы-33 является то, что на этом изотопе реакции (n,p) и (n, α) могут происходить под действием нейтронов любых энергий.

В оценке Накамуры область разрешенных резонансов простирается до 260 кэВ и содержит параметры 7 s-резонансов (не считая двух введенных связанных состояний). В атласе Мухабхаба1 в этой области приведены параметры 22 резонансов и указывается на наличие еще для 8 резонансов приведены полные ширины и величины $g\Gamma_n\Gamma_\gamma/\Gamma$. Для большинства резонансов приводятся значения Γ_α . В то же время, резонансные параметры в атласе Мухабхаба, не согласованы: указанные там полные ширины не совпадают с суммой парциальных (отличия составляют, примерно, 25% в ту и другую сторону). Таким образом, просто заменить в оценке Накамуры резонансные параметры на приведенные Мухабхабом невозможно: требуется их переоценка с целью ликвидации противоречий.

В таблице 2 приведенные Мухабхабом тепловые сечения и резонансные интегралы сравниваются с рассчитанными на основе файла и с приведенными в заголовочной секции этого файла.

Таблица 2. Тепловые сечения и резонансный интеграл серы-33.

| Величина | Мухабхаб | Указано в MF=451 JENDL-3.3 | Рассчитано по NJOY |
|-----------------|-------------|----------------------------|--------------------|
| σ_γ | 0.454±0.002 | 0.35 | 0.350 |
| σ_p | 0.002±0.001 | | 0.0016 |
| σ_α | 0.115±0.010 | | 0.171 |
| σ_s | 2.73±0.25 | 2.84 | 2.889 |
| RI_γ | 0.229±0.015 | 0.164 | 0.163 |
| RI_p | | | 0.020 |
| RI_α | | | 2.058 |

Обращает на себя внимание весьма высокое значение резонансного интеграла (n, α). Это высокое значение обусловлено тем, что во всей области интегрирования от 0.05 эВ до 100 кэВ в оценке принято постоянное сечение этой реакции, равное 0.16862.

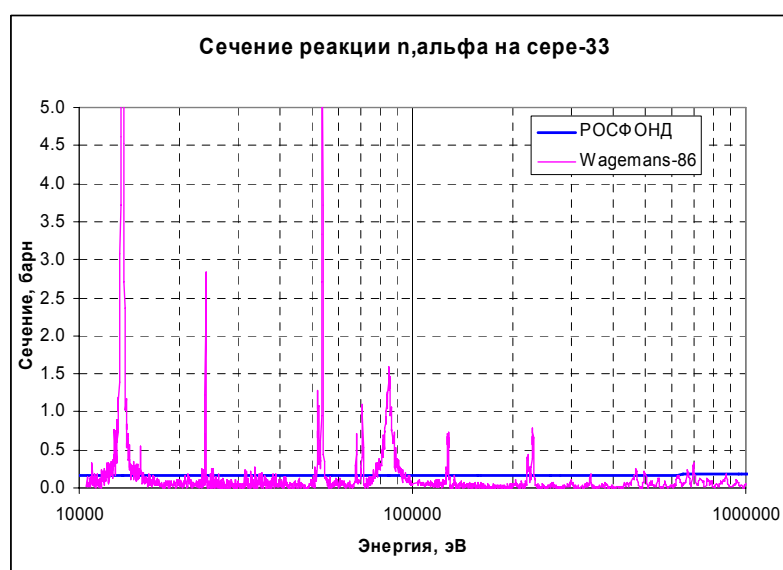


Рис.3

На рис.3 принятое сечение этой реакции сравнивается с экспериментальными данными Вагеманса, не учитывавшимися в оценке. Очевидно, что сечение реакции (n,α) требует переоценки (согласованной с переоценкой резонансных параметров и полного сечения). Что касается последнего, то из приводимого ниже рис. 4а видно, что в оценке не учтено множество резонансов, отмеченных в атласе Мухабхаба и проявившихся в эксперименте Годденса. Заметим, что некоторые из последних в атласе Мухабхаба не указаны – например резонанс при 30.7 кэВ, показанный на рис. 4б в увеличенном масштабе.

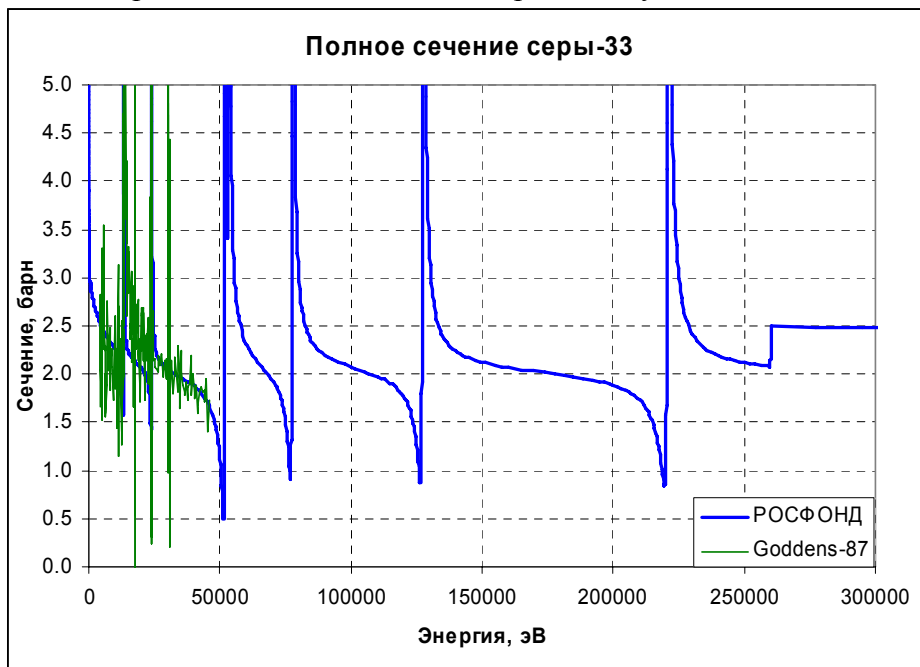


Рис.4а

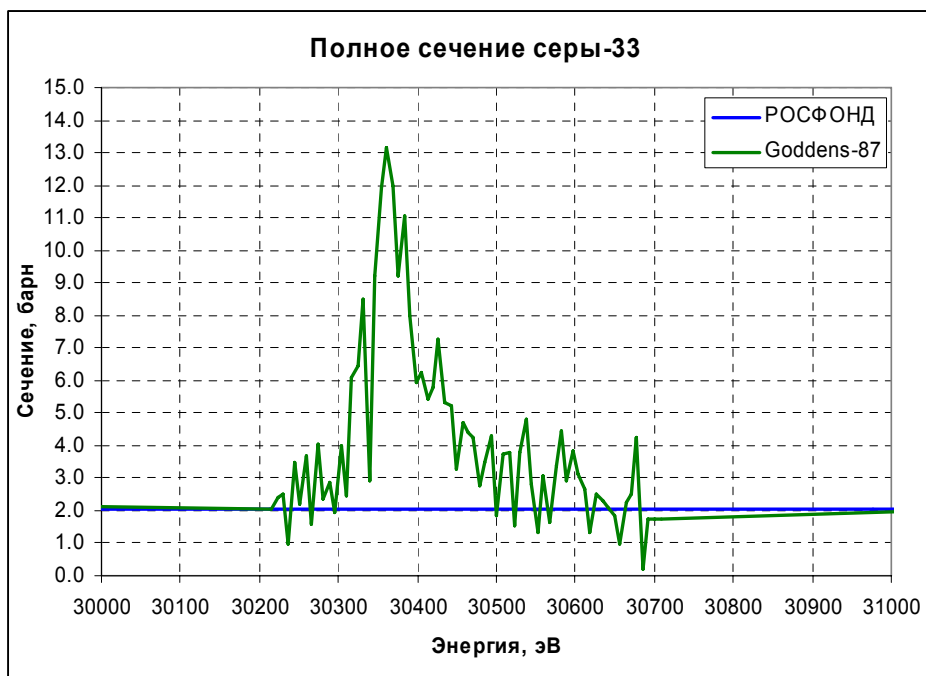


Рис.4б

Заключение

В РОСФОНД временно принять оценку Накамуры, отметив необходимость ее пересмотра с учетом вновь появившейся экспериментальной информации.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

16.3. Сера-34

Содержание в природной смеси 4.21%. Во всех современных библиотеках принята оценка Н.Nakamura (1987).

Как и в случае серы-32, резонансные параметры приняты на основе оценки Мухабхаба 1984 г. В новом атласе Мухабхаба¹ отмечено гораздо большее число резонансов, параметры которых, однако в большинстве случаев не полны (приводятся лишь резонансные энергии и величины $g \Gamma n \Gamma / \Gamma$). Наличие гораздо более сложной резонансной структуры, чем это следует из оценки Накамуры, видно и из сравнения результатов этой оценки с экспериментальными данными Зейбеля мл. и Карлтона. Заметим, что ни на одну из этих работ в атласе Мухабхаба ссылок не имеется. Дополнительная структура сечений, выявленная Зейбелем мл., слабо коррелирует с резонансами, указанными в атласе Мухабхаба. Эксперимент Карлтона выявляет резонансную структуру в области энергий ниже 10 кэВ, в которой в атласе Мухабхаба не отмечено ни одного резонанса. Заметим, что Карлтоном измерялось и сечение захвата, однако результаты измерений не были включены в EXFOR (отмечено лишь, что они хранятся на магнитной ленте в Харвелле).

В табл. 3 приведены тепловые сечения и резонансный интеграл захвата в сравнении с данными атласа Мухабхаба¹.

Таблица 3. Тепловые сечения и резонансный интеграл серы-34.

| Величина | Мухабхаб | Указано в MF=451 JENDL-3.3 | Рассчитано по NJOY |
|-----------------|-------------|----------------------------|--------------------|
| σ_γ | 0.256±0.009 | 0.22 | 0.224 |
| σ_{el} | 1.46±0.03 | 2.08 | 2.109 |
| RI | 0.106±0.005 | 0.101 | 0.099 |

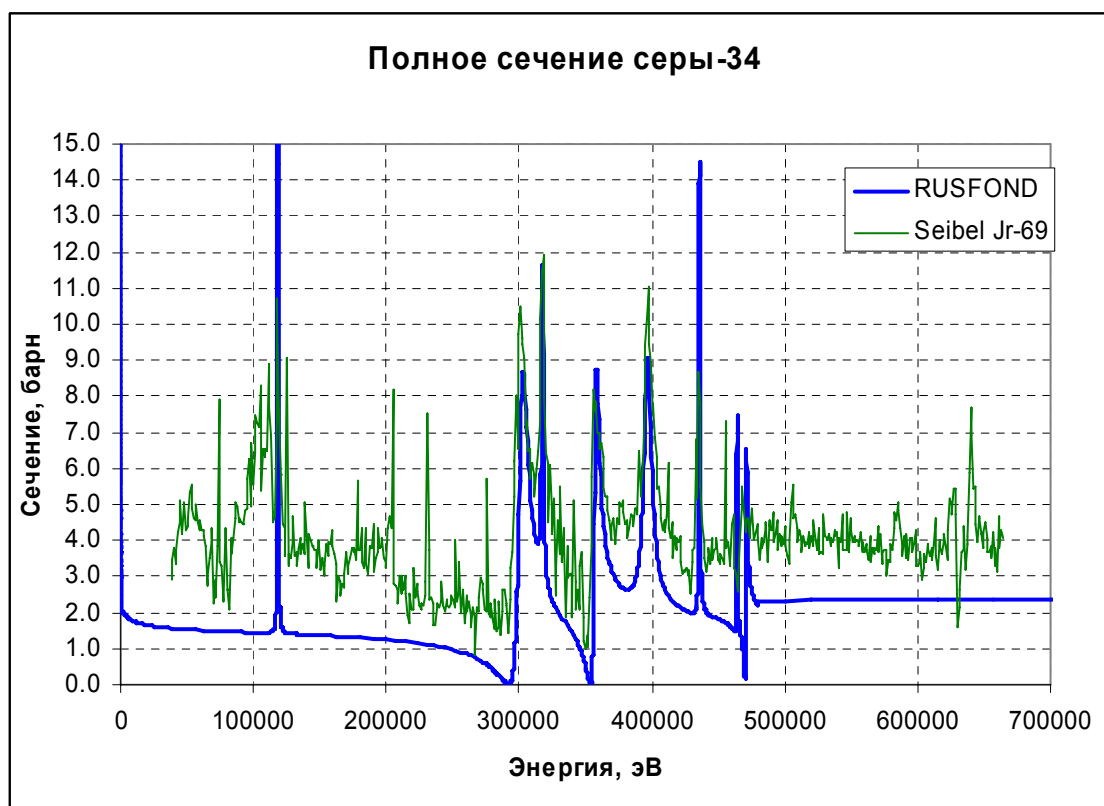
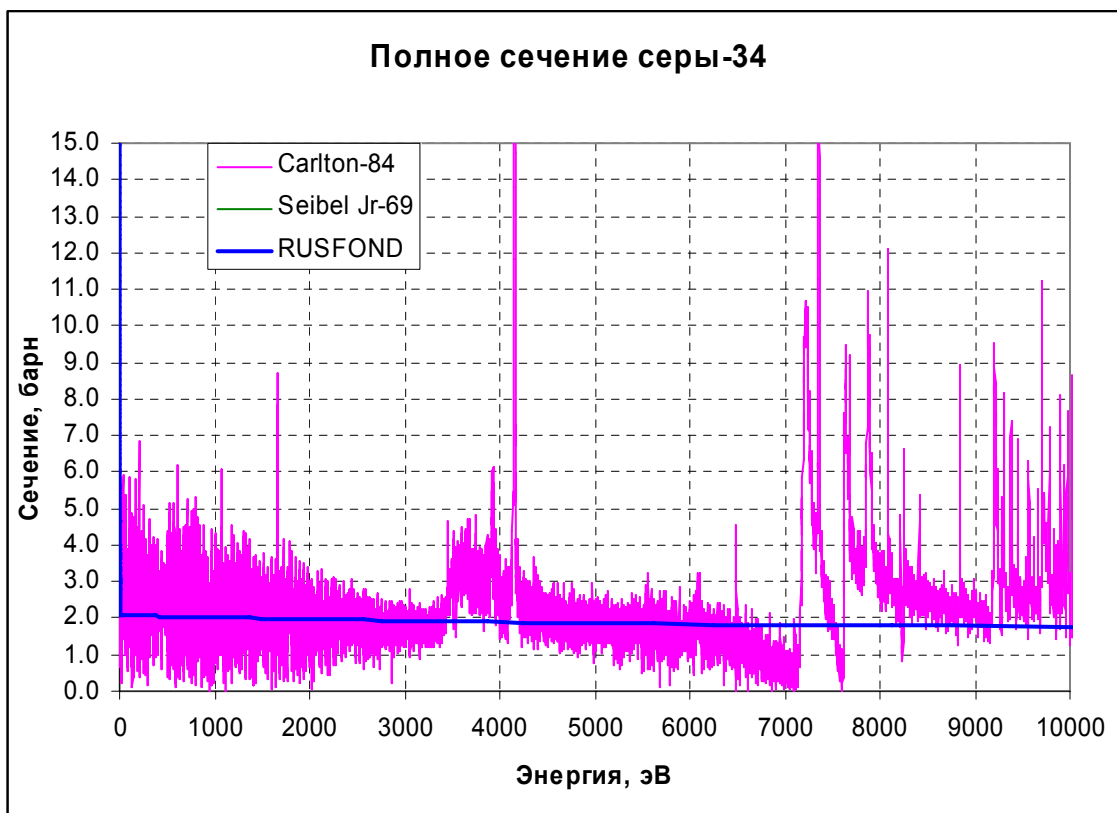


Рис.5а



Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных из EAF-2003. Отмечается желательность пересмотра принятой оценки с целью уточнения резонансной структуры сечений.

Заключение

В РОСФОНД принять оценку Накамуры.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

16.4. Сера-35

Радиоактивна: испытывает бета-распад в хлор-35 ($T_{1/2}=87.5$ д).

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

16.5. Сера-36

Содержание в природной смеси 0.02%. В JEFF-3.1 и JENDL-3.3 принята оценка Хакамуры. В ФОНД-2.2 – неполная оценка из EAF-99.

Заключение

В РОСФОНД принять оценку Хакамуры.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

17.ХЛОР

В ФОНД-2.2 содержится полная оценка данных для натурального хлора (М.Н.Николаев и др., 1990) и оценки нейтронных сечений для двух стабильных изотопов и радиоактивного хлора-36.

В ENDF/B-VII содержатся данные как для природного хлора (оценка M.Allen, M.Drake, 1967), так и для стабильных изотопов – Cl-35 и Cl-37. Оценки для последних выполнены R.Sayer, K. Guber, L.Leal и N.Larson с использованием новых измерений на ускорителе ОРЕЛА, позволивших распространить область разрешенных резонансов до 1.2 МэВ. Данные для области разрешенных резонансов представлены, однако, в файле MF=3 в секциях MT=1, 2, 102, 103 и 107. Это связано с тем, что стандартные процедуры не позволяют рассчитывать сечения реакций с вылетом заряженных частиц по резонансным параметрам.

В JEFF-3.1 приняты данные из ENDF/B-VII

В JENDL-3.3 приняты оценки Т. Watanabe (1994), в которых область разрешенных резонансов простирается лишь до 200 кэВ.

17.1. Хлор-35

Содержание в естественной смеси -75.77%.

В таблице 1 проводится сравнение тепловых сечений и резонансного интеграла захвата с данными, рекомендованными Мухабхабом¹.

17.1.1. Сравнение тепловых сечений

Таблица 1. Сравнение тепловых сечений и резонансных интегралов.

| Величина | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Мухабхаб ² |
|-----------------|-----------|------------|-----------------------|
| σ_t | 64.2 | 65.13 | |
| σ_e | 20.6 | 20.98 | 20.6±0.3 |
| σ_γ | 43.6 | 43.67 | 43.6±0.4 |
| σ_p | 0.489 | 0.481 | 0.489±0.014 |
| σ_α | 8E-5 | 8E-5 | 8E-5±4E-5 |
| RI_γ | 17.8 | 17.94 | 18±2 |
| RI_p | | 0.473 | |

Как видно, данные обоих файлов хорошо согласованы между собой и с оценкой Мухабхаба.

17.1.2. Сечения вне резонансной области

На рис.1 сравниваются оценки полного сечения вне резонансной области. Как видно, они совпадают практически везде, кроме области выше 19 МэВ, где имеются небольшие расхождения.

На рис.2 оцененные данные по сечению реакции (n,2n) сравниваются с имеющимися экспериментальными данными. Заметим, что хлор-34 в этой реакции может образовываться как в основном состоянии, имеющем период полураспада всего 1.53 сек, так и в метастабильном состоянии, имеющем период полураспада 32 мин. На рис. 2 экспериментальные данные, в которых измерялось сечение образования ядра-продукта в изомерном состоянии, изображены сплошными точками, а результаты измерений сечения

¹ Mughabghab S.F. Atlas of neutron Resonances. Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. ELSEVIER, 2006.

образования короткоживущего основного состояния – крестами. Как видно, разброс результатов измерений последнего типа весьма велик. Тем не менее, ясно. Что вероятность образования изомера заметно меньше единицы, откуда можно заключить, что оценка сечения реакции (n,2n) в ENDF/B-VII, опирающаяся, видимо, на данные Фесслера, занижена. Оценка JENDL-3.3 представляется более реалистичной.

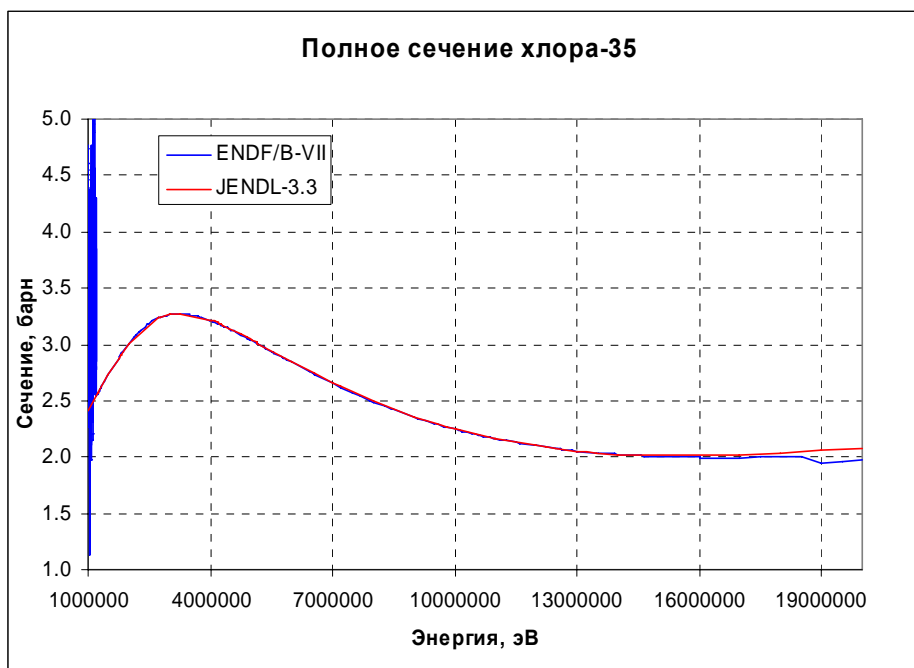


Рис.1. Полное сечение хлора-35

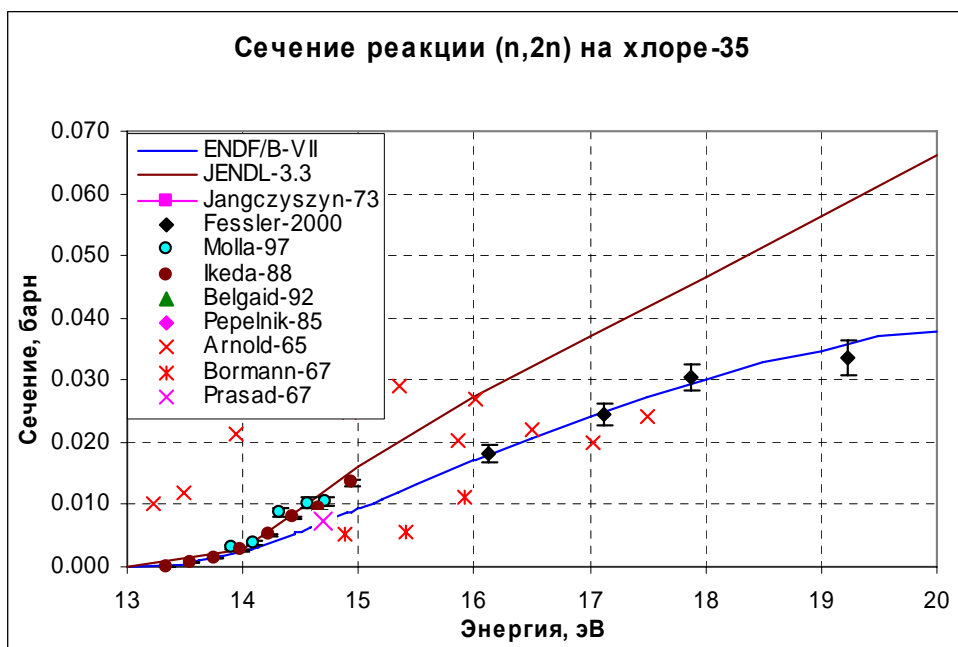


Рис.2. Сечение реакции (n,2n)

На рис.3 оценки сечения реакции (n,p) сравниваются между собой и с экспериментальными данными. Обе оценки в равной степени с ними согласуются. На рис. 4 проводится такое же сравнение для области низких энергий, где сечение определяется узким резонансом. Видно, что и новейшие экспериментальные данные не позволяют его разрешить. Сечения в этой области оценены на основе резонансных параметров.

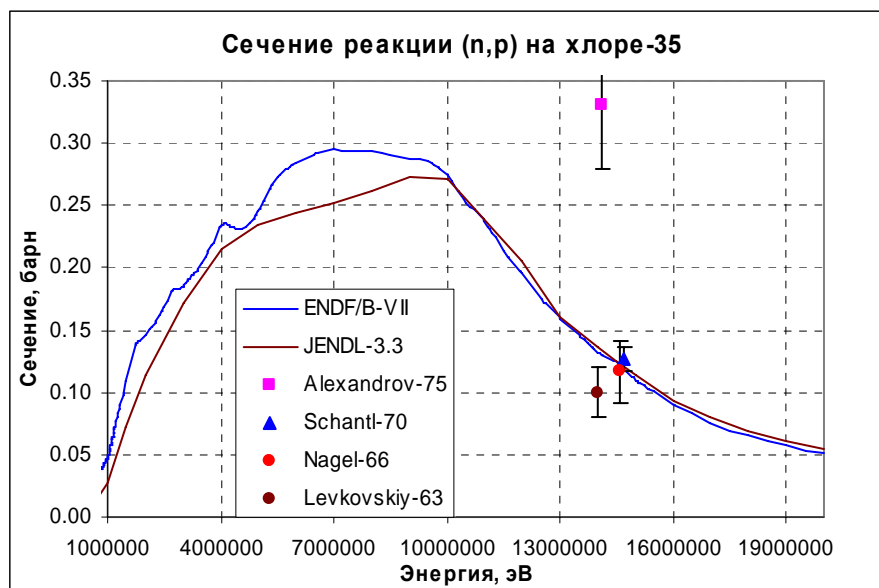


Рис.3. Сечение реакции (n,p) при высоких энергиях.

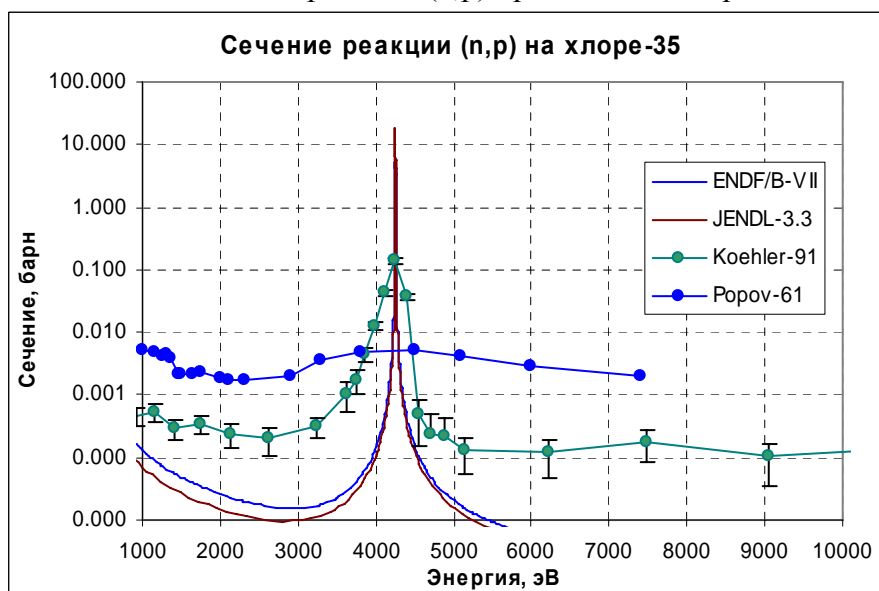


Рис.4. Сечение реакции (n,p) в области резонанса. Следует обратить внимание на логарифмический масштаб по оси сечений.

Наконец, на рис.5 сравниваются оценки сечения реакции (n, α). В этом случае более соответствует экспериментальным данным оценка ENDF/B-VII.

17.1.3. Энерго-угловые распределения вторичных ней тронов и гамма-квантов.

Эти данные содержатся в обеих сравниваемых оценках. Экспериментальных данных для выбора более достоверной оценки не имеется.

Заключение

В РОСФОНД принята оценка R.Sayer, K. Guber, L.Leal и N.Larson (2003г) – ENDF/B-VII., в которой оценка сечений в области разрешенных резонансов представляется более надежной.

Автор заключения
Николаев М.Н.

17.2. Хлор-36

Радиоактивен. Испытывает бета-распад в аргон-36 и распад в серу-36 (испускание позитронов или захват орбитального электрона) ($T_{1/2}=3*10^5$ лет).

Полных наборов оцененных нейтронных данных для этого радионуклида нет ни в одной библиотеке.

Заключение

В РОСФОНД принята оценка из EAF-2003.

Автор заключения

Николаев М.Н.

17.3. Хлор-37

Содержание в естественной смеси -24.23%.

В таблице 2 проводится сравнение тепловых сечений и резонансного интеграла захвата с данными, рекомендованными Мухабхаб².

17.1.1. Сравнение тепловых сечений

Таблица 2. Сравнение тепловых сечений и резонансных интегралов.

| Величина | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Мухабхаб ² |
|-----------------|-----------|------------|-----------------------|
| σ_t | 1.583 | 1.597 | |
| σ_e | 1.15 | 1.164 | 1.15±0.05 |
| σ_γ | 0.433 | 0.433 | 0.433±0.006 |
| RI_γ | 0.203 | 0.203 | 0.30±0.04 |

Как видно, тепловые сечения обоих файлов хорошо согласованы между собой и с оценкой Мухабхаба. Что касается резонансного интеграла, то оценки, принятые в файле, существенно отличаются от оценки Мухабхаба.

В ENDF/B-VII область разрешенных резонансов простирается, как и в случае хлора-35, до 1, 2 МэВ, хотя сечения в этой области и представлены в файле MF=3 детальным ходом, рассчитанным по резонансным параметрам. В JENDL-3.3 область разрешенных резонансов ограничена 0.42 МэВ.

17.1.2. Сечения вне резонансной области

На рис.5 сравниваются оценки полного сечения вне резонансной области. Как видно, за пределами области разрешенных резонансов ENDF/B-VII они практически совпадают.

На рис.6 приведены оцененные сечения захвата в сравнении с экспериментальными данными. Впечатление такое, что вне резонансной области это сечение в оценке ENDF/B-VII завышено.

На рис. 7 сравниваются оценки сечения реакции (n,p). Выше 13 МэВ, где имеются сильно разбросанные экспериментальные данные, они совпадают. Ниже 13 МэВ расхождения в оценках велики, но экспериментальные данные отсутствуют.

² Mughabghab S.F. Atlas of neutron Resonances. Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. ELSEVIER, 2006.

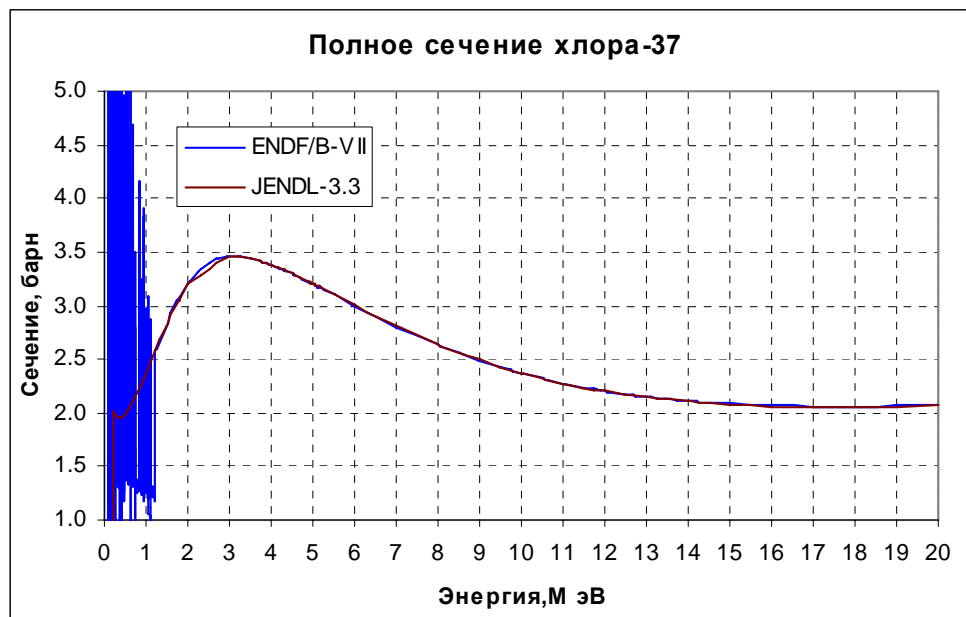


Рис.5. Полное сечение хлора=37

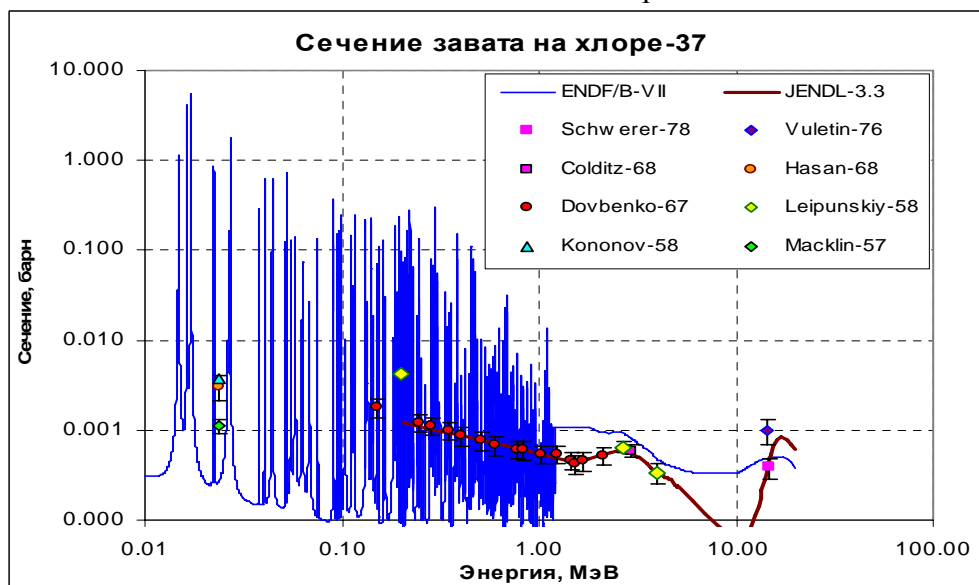


Рис.6. Сечение захвата для хлора-37

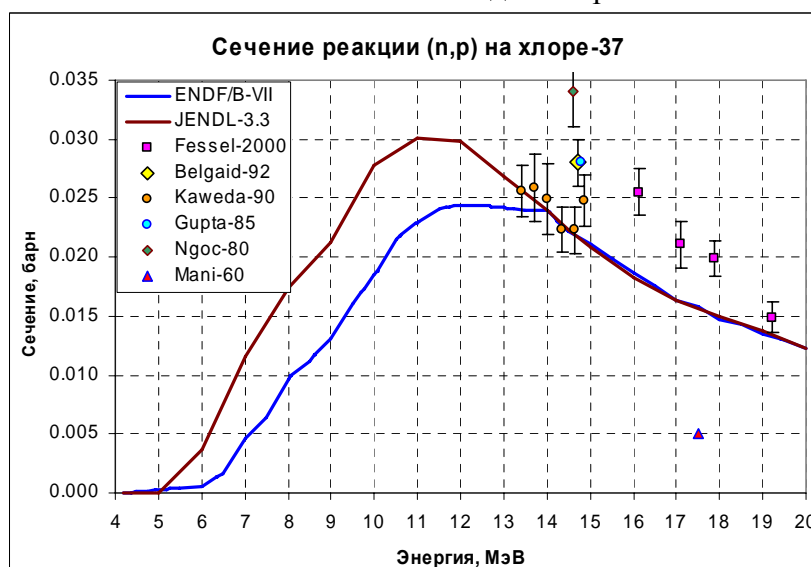


Рис.7. Сечение реакции (n,p) на хлоре-37

На рис.8. сравниваются сечения реакции (n,α) . Расхождения в оценках носят тот же характер, что и в случае с реакцией (n,p) , но разброс экспериментальных данных еще больше.

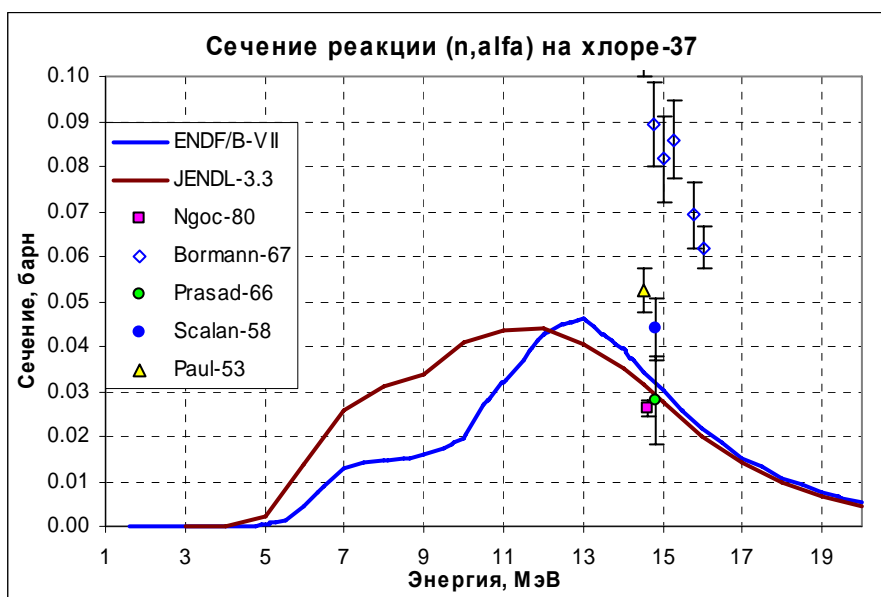


Рис.8. Сечение реакции (n,α) на хлоре-37.

Заключение

Как и в случае хлора-35, РОСФОНД принимает оценку R.Sayer, K. Guber, L.Leal и N.Larson (2003г) – ENDF/B-VII.

Автор заключения

Николаев М.Н.

18. АРГОН

В ФОНД-2.2 содержались данные о нейтронных сечениях стабильных и радиоактивных изотопов аргона из EAF-3, а также полный набор данных для природного аргона (оценка Howerton, 1983, из ENDL-84).

В JENDL-3.3 содержатся данные только для природного аргона (T.Watanabe, 1994)

В ENDF/B-VII также содержатся данные только для природного аргона (Mann, 1979)

В JEFF-3.1 для аргона-36 и -38 приняты оценки H.Gruppelaar и H. Wan Der Kamp, 1983. для аргона-40 принята оценка Ватанабе для природного аргона из JENDL-3.3.

18.1. Аргон-36

Содержание в естественной смеси 0.337%

Оценка H.Gruppelaar и H. Wan Der Kamp, 1983, выполнена на основе модельных расчетов. Область разрешенных резонансов простирающаяся до 46кэВ содержит единственный резонанс при 20 кэВ (не считая связанного состояния при -10 кэВ). Область неразрешенных резонансов, простирающаяся до 1.2 МэВ, содержит существенную знакопеременную подложку. В Таблице 1 тепловые сечения и резонансный интеграл захвата, вычисленные на основе файла JEFF-3.1, сравниваются с рекомендацией Мухабхаба¹. Наблюдается приемлемое согласие.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл аргона-36.

| Величина | Мухабхаб | Рассчитано по NJOY |
|-------------------|---------------|--------------------|
| σ_{γ} | 5.2±0.5 | 5.04 |
| σ_s | 73.7±0.4 | 74.8 |
| σ_{α} | 0.0055±0.0001 | 0 |
| RI_{γ} | | 2.26 |

Заключение

Учитывая отмеченное выше, а также в связи с отсутствием альтернативы и низким содержанием аргона-36 в естественной смеси, решено принять в РОСФОНД оценку H.Gruppelaar и H. Wan Der Kamp, 1983. из JEFF-3.1

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

18.2. Аргон-37

Радиоактивен. Распадается путем захвата орбитального электрона в хлор-37 ($T_{1/2}=35.0$ д). В оценке EAF-2003 тепловые сечения согласуются с рекомендацией Мухабхаба (см. таблицу 2). Однако в энергетическом ходе сечений резонансная структура сечений в этой оценке не проявляется, тогда как Мухабхаб приводит параметры двух резонансов – при 1540эВ и 2630 эВ и указывает наличие резонансов также при 21.5 кэВ и при 38 кэВ, проявившихся в (n, α)-реакции². В оценке EAF-2003 резонансные параметры

¹ S.F.Mughabghab. Atlas of Neutron Resonances. Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. ELSEVIER, 2005.

²Goeminne, Nucl. Phys. 678, 11, 2000.

традиционно не приводятся. Не проявлены они и в энергетическом ходе сечения реакции (n,α) (см. рис.1). В то же время значения сечений нейтронных реакций при тепловой энергии практически совпадают с рекомендованными Мухабхабом (см. табл.2)

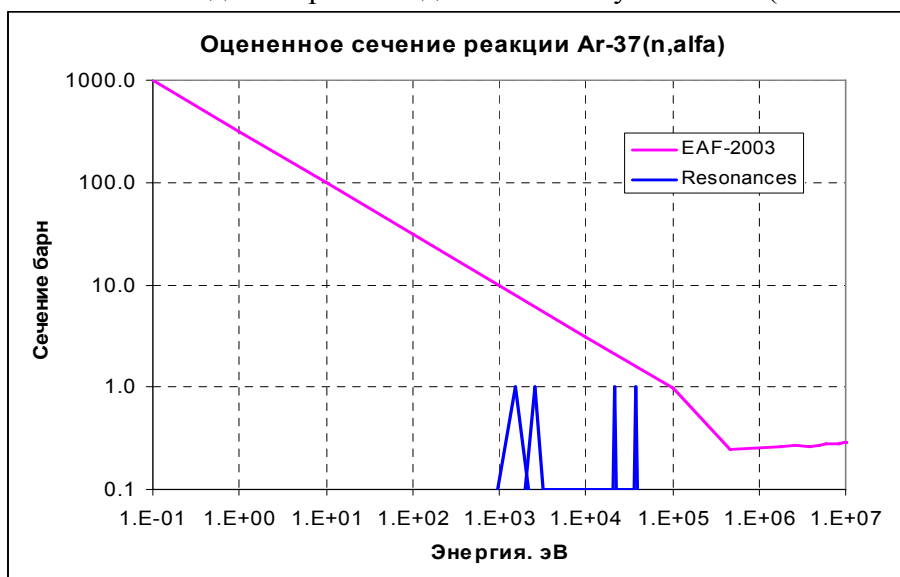


Таблица 2. Тепловые сечения и резонансные интегралы аргона-37.

| Величина | Мухабхаб | Рассчитано по NJOY |
|-----------------|----------|--------------------|
| σ_γ | | 0.50 |
| σ_p | 69±14 | 65 |
| σ_α | 1970±330 | 1970 |
| RI_γ | | 0.23 |
| RI_p | | 29 |
| RI_α | | 884 |

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку нейтронных сечений из EAF-2003. Рекомендовать пересмотр этой оценки с учетом вновь появившихся данных по сечениям реакций с вылетом заряженных частиц.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

18.3. Аргон-38

Содержание в естественной смеси 0.063%.

Оценка H.Gruppelaar и H. Wan Der Kamp, 1983, выполнена на основе модельных расчетов. Область разрешенных резонансов простирающаяся до 300кэВ содержит единственный резонанс при 135 кэВ (не считая связанного состояния при -4.96 кэВ). Область неразрешенных резонансов, простирающаяся до 1.2 МэВ, содержит существенную знакопеременную подложку. В Таблице 1 тепловые сечения и резонансный интеграл захвата, вычисленные на основе файла JEFF-3.1, сравниваются с рекомендацией Мухабхаба¹.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл аргона-36.

| Величина | Мухабхаб | Рассчитано по NJOY |
|-----------------|----------|--------------------|
| σ_γ | 0.8±0.2 | 0.80 |
| σ_s | 1.5±1.5 | 8.9 |
| RI_γ | | 0.35 |

Заключение

Учитывая согласие данных по сечению захвата, а также в связи с отсутствием альтернативы и низким содержанием аргона-36 в естественной смеси, решено принять в РОСФОНД оценку H.Gruppelaar и H. Wan Der Kamp, 1983. из JEFF-3.1 несмотря на существенное расхождение в не надежно измеренном сечении рассеяния.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

18.4. Аргон-39

Радиоактивен. Испытывает бета-распад в калий-38 ($T_{1/2}=269$ г).

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку нейтронных сечений из EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

18.5. Аргон-40

Содержание в естественной смеси 99.600%.

В оценке T.Watanabe, 1994 область разрешенных резонансов простирается до 1.49774 эВ и содержит 26 s-резонансов, 122 p-резонанса, 54 d-резонанса и 7 f-резонансов.

Нарастающие суммы этих резонансов показаны на рис.2.

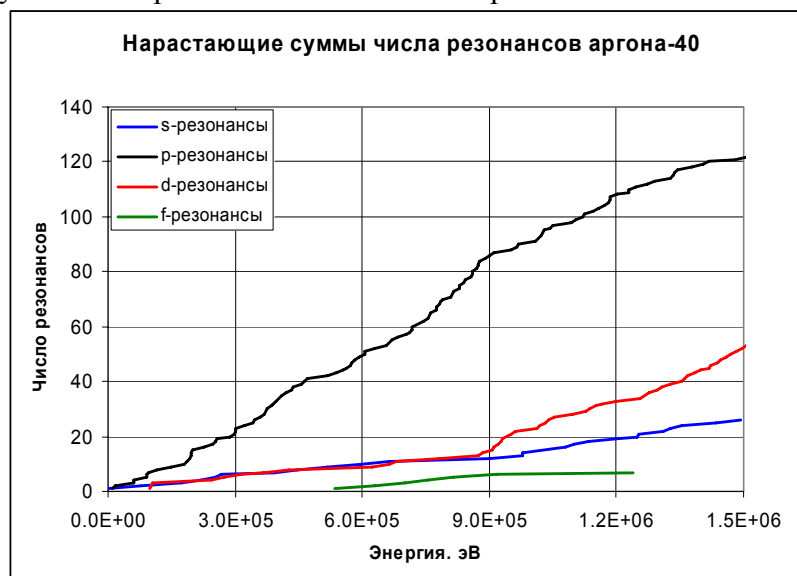


Рис.2.

Резонансные параметры соответствуют рекомендации Мухабхаба¹. Судя по характеру нарастающих сумм резонансов пропуск резонансов едва ли существенен. На рис.3 оцененное полное сечение аргона-40 сравнивается с экспериментальными данными для природного аргона.

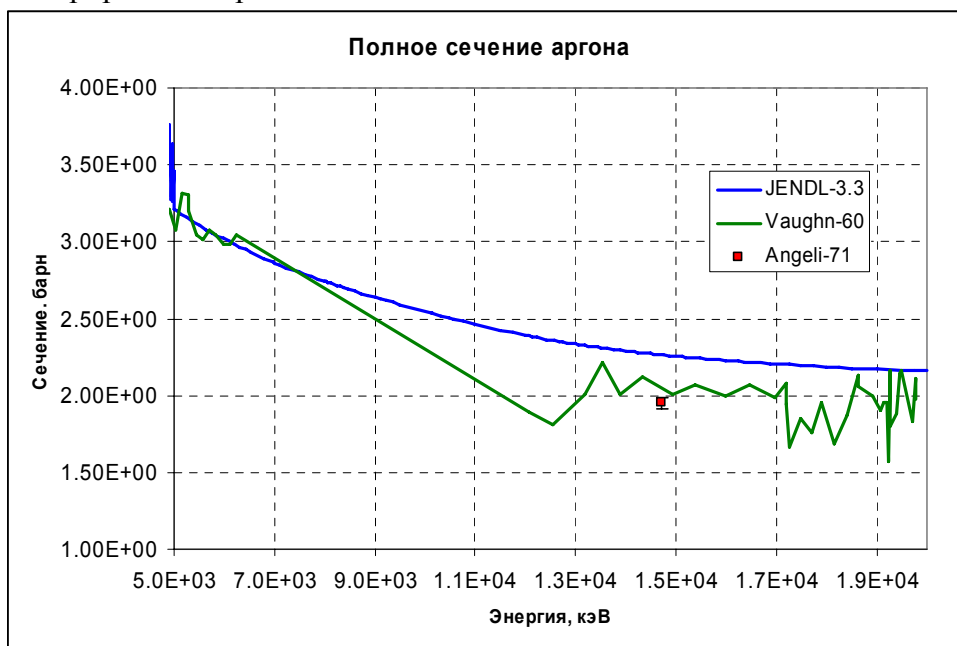


Рис.3а

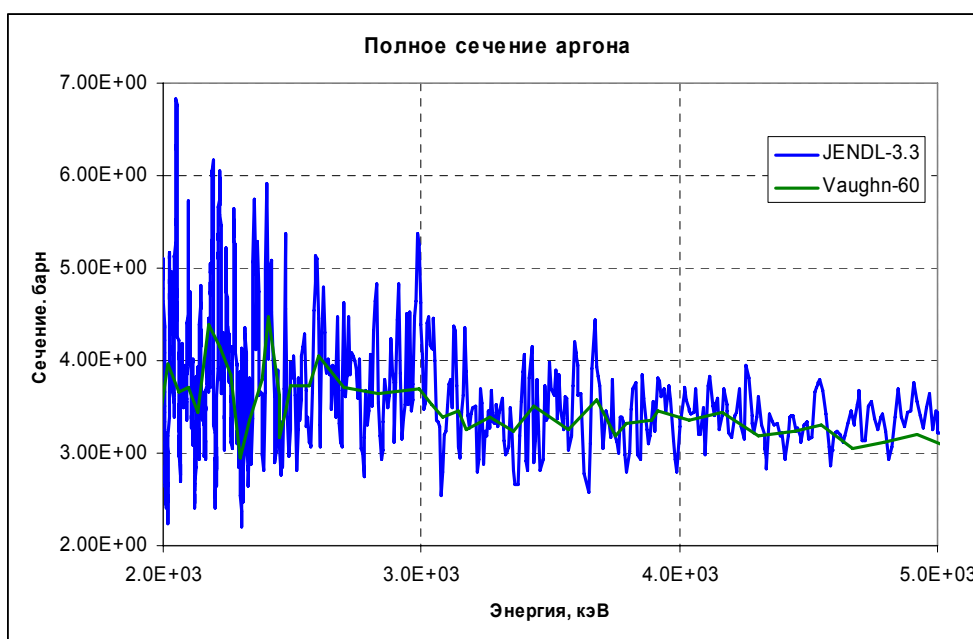


Рис.3б

Как видно, в области высоких энергий принятое в оценке сечение существенно превышает результаты измерений для природного аргона. Объяснить это расхождение влиянием примесей легких изотопов невозможно: сечения всех изотопов аргона при 10-20 МэВ близки к 2 барнам. Очевидно, требуется переоценка полного сечения (и, соответственно, сечения упругого рассеяния при энергиях выше 8 кэВ).

При более низких энергиях оцененные данные приемлемо согласуются с результатами измерений, приведенными в EXFORe.

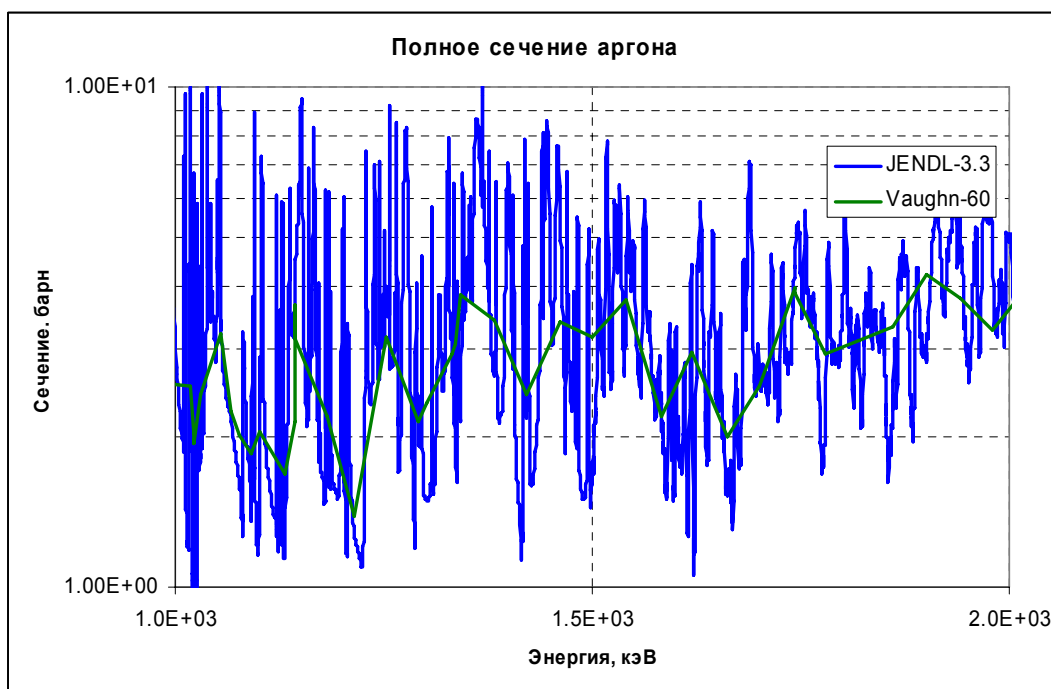


Рис.3в

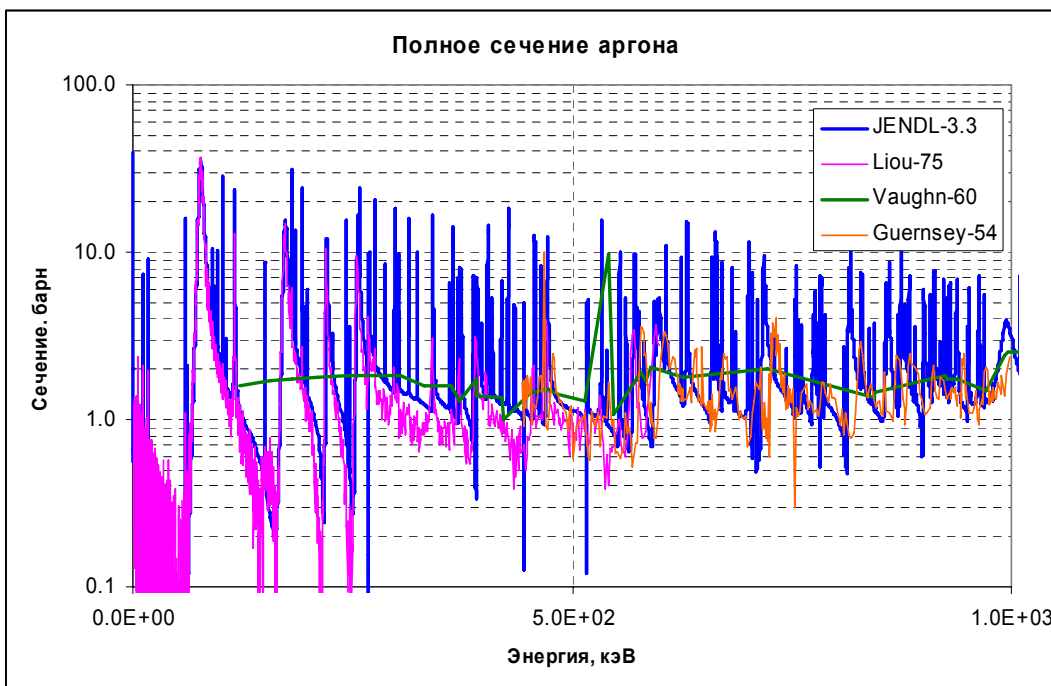


Рис.3г.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку T.Watanabe, 1994. из JENDL-3.3.

Автор рекомендации
Николаев М.Н.

18.6. Аргон-42

Радиоактивен. Испытывает бета-распад в калий-42 ($T_{1/2}=32.9$ г), который, в свою очередь, распадается в Са-42. ($T_{1/2}=12\text{ю}321$ ч). Полных наборов оцененных нейтронных данных ни в одной библиотеке нет.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку нейтронных сечений из EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

19.КАЛИЙ

В ФОНД-2.2 полный файл данных содержится только для природного калия (H.Nakamura, 1987). Для стабильных и долгоживущих изотопов принята оценка EAF-3

В ENDF/B-VII содержатся данные для природного калия (M.Drake, 1967) и калия-41 (Mann, 1979).

В JENDL-3.3 и JEFF-3.1 для стабильных изотопов приняты оценки (H.Nakamura, 1987).

19.1. Калий-39

Содержание в естественной смеси 93.2581%.

В оценке Накамуры область разрешенных резонансов простирается до 200 кэВ и содержит параметры 33 резонансов (не считая связанного состояния), из которых 8- s-резонансы. Параметры соответствуют атласу Мухабхаба 1981г¹. В новом атласе² Мухабхаб приводит параметры 69 резонансов, также лежащих ниже 200 кэВ. Число и положение s-резонансов сохранилось. При этом тепловые сечения и резонансный интеграл захвата остались без изменения (см. табл.1)

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл калия-39.

| Величина | Мухабхаб | Рассчитано по NJOY |
|-------------------|---------------|--------------------|
| σ_{γ} | 2.1±0.2 | 2.098 |
| σ_s | 1.99±0.17 | 2.089 |
| σ_{α} | 0.0043±0.0005 | 0.0043 |
| RI_{γ} | 1.1±0.1 | 1.068 |

На рис. 1 полное сечение калия-39 сравнивается с экспериментальными данными для природного калия и единственным результатом, полученным для калия-39 Гудом в 1974 г. Сравнение проводится вне резонансной области, где различия между полным сечением основного изотопа и естественной смеси невелики (при 1 МэВ различие составляет 0.4%). Согласие можно считать вполне приемлемым.

По иному обстоит дело с сечениями реакций с вылетом альфа- частиц. На рис. 2а оцененное сечение реакции (n, α) сравнивается с экспериментальными данными. Видно, что тоцененное сечение неоправданно завышено. Такая же картина наблюдается и для сечения реакции (n,n' α) – см. рис.2б. Между тем сечение реакции (n,p) удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными (см. рис. 3). Что касается сечения реакции (n,2n), то оно также сильно завышено относительно экспериментальных данных (см. рис.4).

¹ S.F.Mughabghab, M/Divadinem, N.e.Holden. Neutron Cross Sections. Vol.1 Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. BNL, 1981.

² S.F.Mughabghab. Atlas of Neutron Resonances. Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. ELSEVIER,2005.

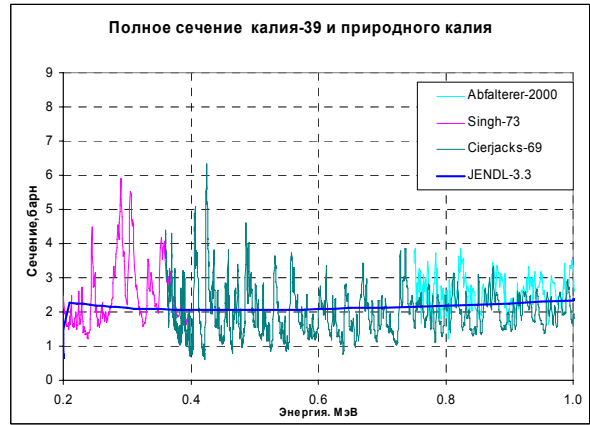
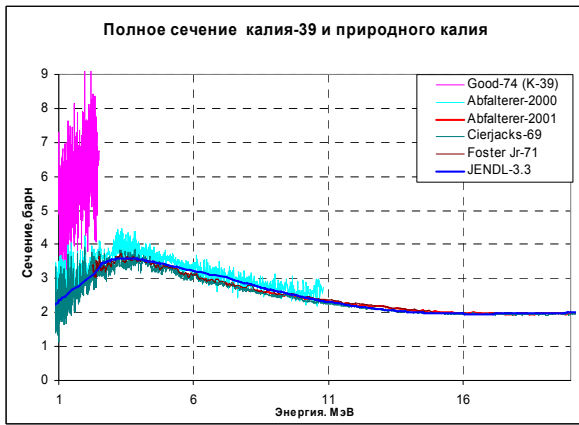


Рис1

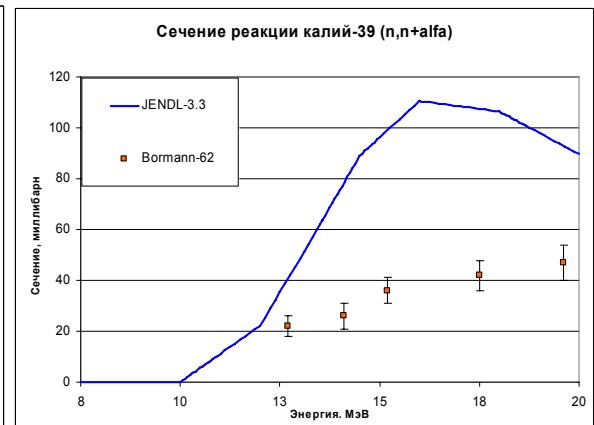
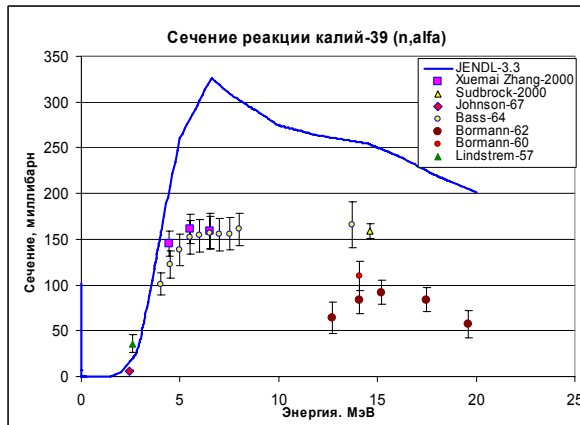


Рис.2а и 2б.

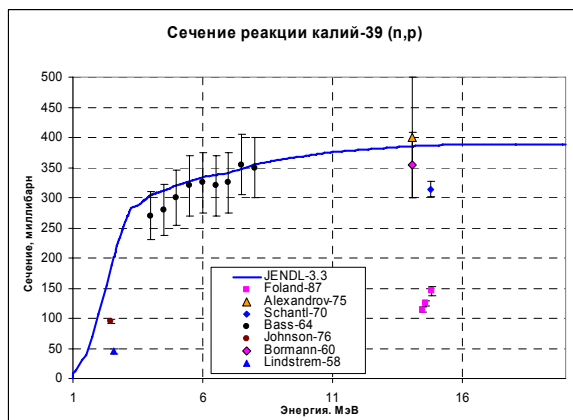


Рис.3

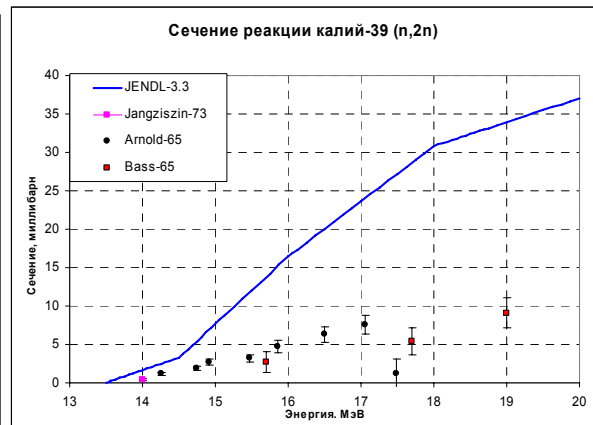


Рис.4.

Заключение

В РОСФОНД включена оценка Н.Nakamura, 1987 из JENDL-3.3. Пересмотр оцененных данных, базирующийся на уточненные Мухабхабом резонансные параметры и имеющиеся экспериментальные данные по сечениям реакций, весьма желателен.

Автор рекомендации
Николаев М.Н.

19.2. Калий-40

Содержание в естественной смеси 0.0117%.

Радиоактивен. Испытывает бета-распад в кальций-40 и распад в аргон-40 путем испускания позитрона или захвата орбитального электрона. ($T_{1/2}=1.28 \cdot 10^9$ лет).

В оценке Накамуры область разрешенных резонансов отсутствует. Не проявляется резонансная структура и в энергетическом поведении сечений, заданных в файле MF=3 (см. рис.5)

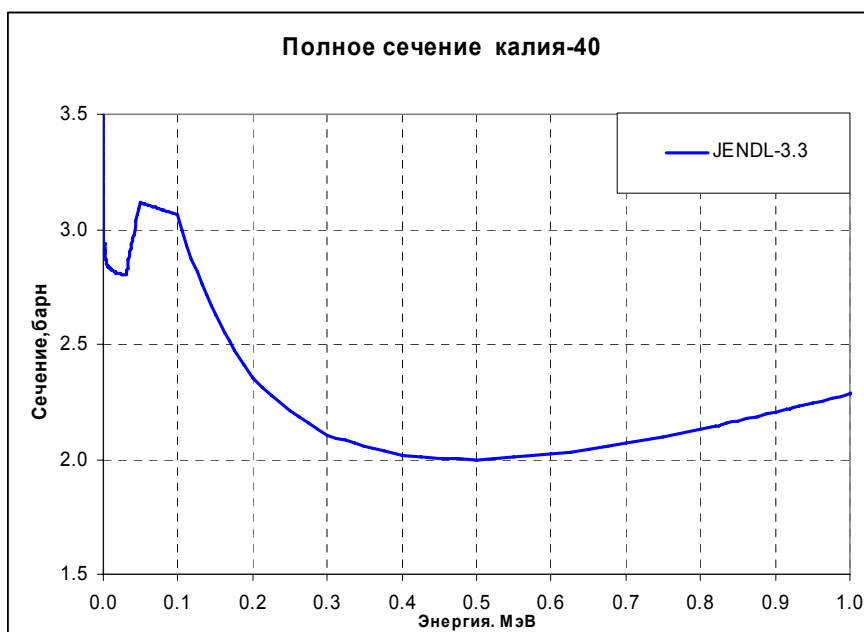


Рис.5.

Между тем в атласе Мухабхаба приведены значения $g\Gamma n\Gamma p/\Gamma$ и $g\Gamma n\Gamma \alpha/\Gamma$ для 20 резонансов, лежащих при энергиях ниже 21 кэВ (основанные на данных Вейгманна³). Указаны положения и еще нескольких резонансов. Таким образом, имеется очевидная возможность уточнения оценки Накамуры.

В таблице 2. тепловые сечения и резонансные интегралы для калия-40 сравниваются с рекомендациями Мухабхаба.

Таблица 2. Тепловые сечения и резонансный интеграл калия-40.

| Величина | Мухабхаб | Рассчитано по NJOY |
|-----------------|-----------|--------------------|
| σ_γ | 30±8 | 30.0 |
| σ_s | | 7.286 |
| σ_α | 0.39±0.03 | 0.392 |
| σ_p | 4.4±0.3 | 4.38 |
| RI_γ | 13±4 | 13.44 |
| RI_p | 2.0±0.2 | 1.28 |
| RI_α | | 0.806 |

Заключение

В РОСФОНД включить оценка Н. Nakamura, 1987 из JENDL-3.3. Пересмотр этой оценки с учетом данных Мухабхаба² был бы весьма желателен.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

³ Weigmann. Nucl. Phys./AM, 368, 117, 1981.

19.3. Калий-41

Содержание в естественной смеси 6.7302%.

В оценке Накамуры область разрешенных резонансов простирается до 125 кэВ и включает параметры 5s-резонансов (не считая связанного состояния) и 19 p-резонансов. Параметры этих резонансов близки к рекомендованным Мухабхабом¹. В файле MF=3 задана небольшая плавная подложка в резонансной области, учитывающая вклад слабых резонансов, для которых в атласе¹ приведены только резонансные энергии. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата сравниваются с рекомендациями Мухабхаба в табл. 3.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл калия-41.

| Величина | Мухабхаб | Рассчитано по NJOY |
|-----------------|-----------|--------------------|
| σ_γ | 1.46±0.03 | 1.46 |
| σ_s | 0.92±0.20 | 2.60 |
| RI_γ | 1.42±0.06 | 1.549 |

Расхождение в сечении рассеяния существенно, но оно, разумеется, может быть устранено подбором параметров связанного состояния при переоценке области разрешенных резонансов, которая была бы весьма желательной. В частности, вклад неразрешенных резонансов мог бы быть учтен более корректно, чем это сделано сейчас, если применить статистическое рассмотрение, оценить вероятные нейтронные ширины для пропущенных резонансов и либо ввести их в оценку в явном виде, либо учесть их вклад в сечение подложки.

Для калия-41 имеется ряд измерений сечения захвата для быстрых нейтронов. Сравнение оцененного сечения с экспериментальными данными при высоких энергиях указывают на явную недооценку сечения в этой, мало значимой для практики области энергий (см. рис.6).

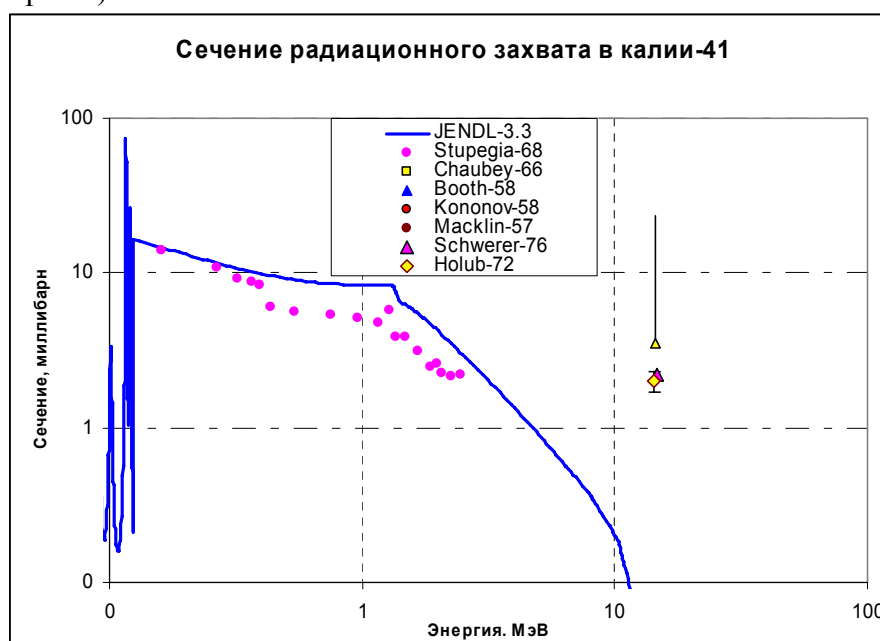


Рис.6.

На рис. 7 с экспериментальными данными сравнивается оценка сечения реакции (n,α). В отличие от калия-39 здесь не наблюдается систематического завышения сечения. В то же время ход сечения в окрестности 14 МэВ совершенно отличен от того, что наблюдается в эксперименте и, вероятно, является следствием конкуренции со стороны других пороговых реакций(см. рис.8)

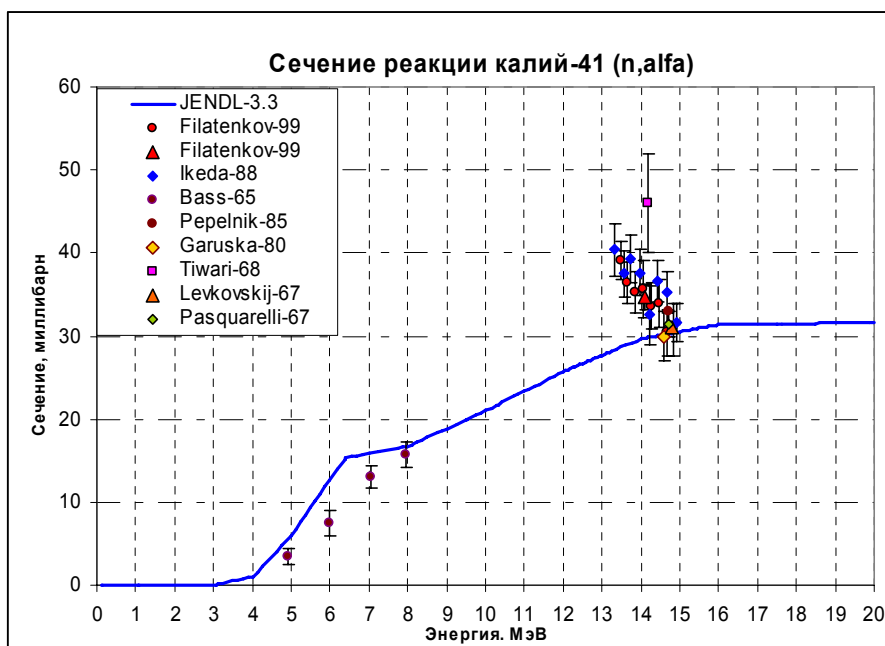


Рис.7

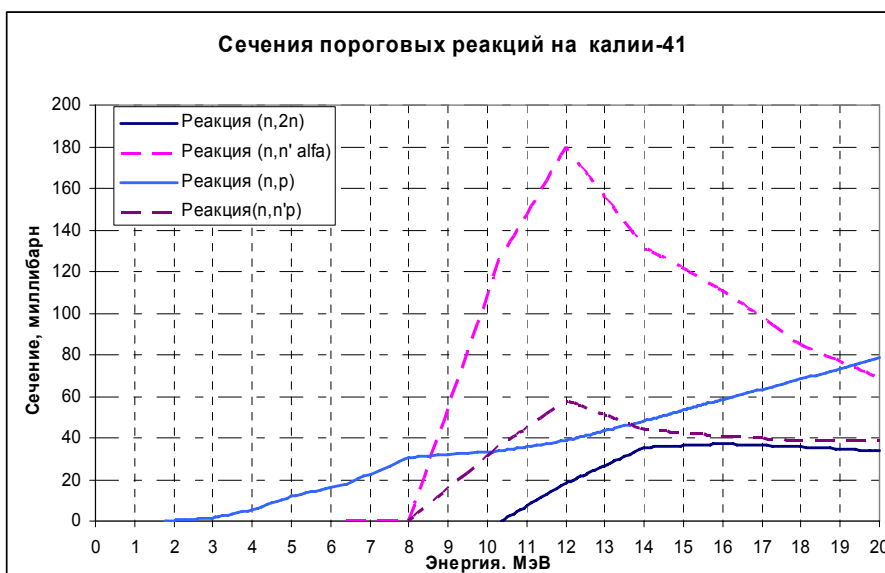


Рис.8.

Заключение

В РОСФОНД включена оценка Н.Nakamura, 1987 из JENDL-3.3. Была бы желательна переоценка нейтронных данных для этого изотопа с учетом сделанных выше замечаний.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

20. КАЛЬЦИЙ

В ФОНД-2.2 полный набор данных содержится только для природного кальция. Для стабильных и радиоактивных изотопов приняты оценки нейтронных сечений из EAF-3.

В ENDF/B-VII содержатся данные только для природного кальция (M.V.Chadwick, P.Young, C.Fu, 1997).

В JENDL-3.3 приведены полные данные для всех стабильных изотопов (M. Hatchya, 1987)

В JEFF-3.1 содержатся более свежие оценки данных для стабильных изотопов (A..Koning,2004)

20.1. Кальций-40

Содержание в естественной смеси 96.941%.

В оценке JEFF-3.1 область разрешенных резонансов простирается до 500кэВ. Резонансные параметры приводятся до значительно более высоких энергий (см. рис.1). Из характера энергетической зависимости нарастающих сумм числа резонансов видно, что есть основания полагать, что выше 500 кэВ заметная часть p- и d-резонансов пропущена, что, видимо, и послужило основанием для установления сравнительно низкой границы области разрешенных резонансов. На рис. 2 приведены нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин s- p- и d-резонансов. Видно, что предположение о пропуске значительной доли p- и, особенно, d-резонансов, вполне оправдано. В то же время пропуск s- резонансов, как видно, не существенен.

Вне резонансной области структура сечений описывается детальным ходом в файле MF=3 (см. рис.3). Эта структура подтверждается экспериментальными данными Джонсона, в которых эта структура выявлена более отчетливо (см. например, фрагмент на рис. 3б).

При высоких энергиях полное сечение подтверждено данными Финлея (рис.3 в).

К сожалению никакой структуры в сечении радиационного захвата вне резонансной области в оцененных данных не проявляется (см. рис.4)

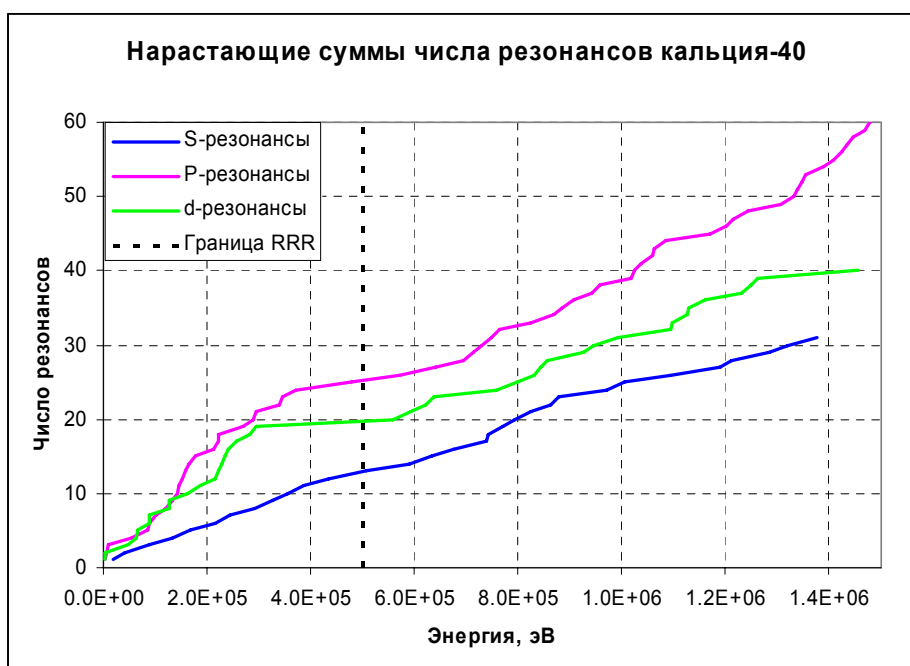


Рис.1.

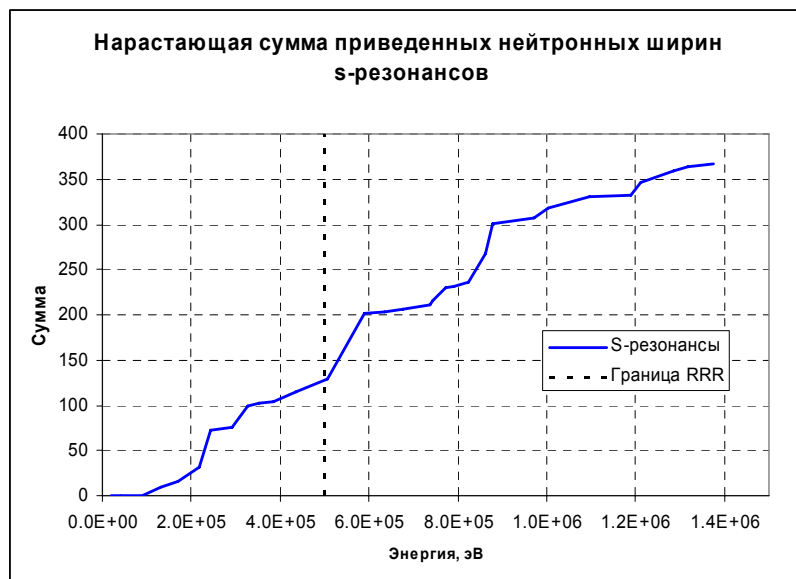


Рис.2а

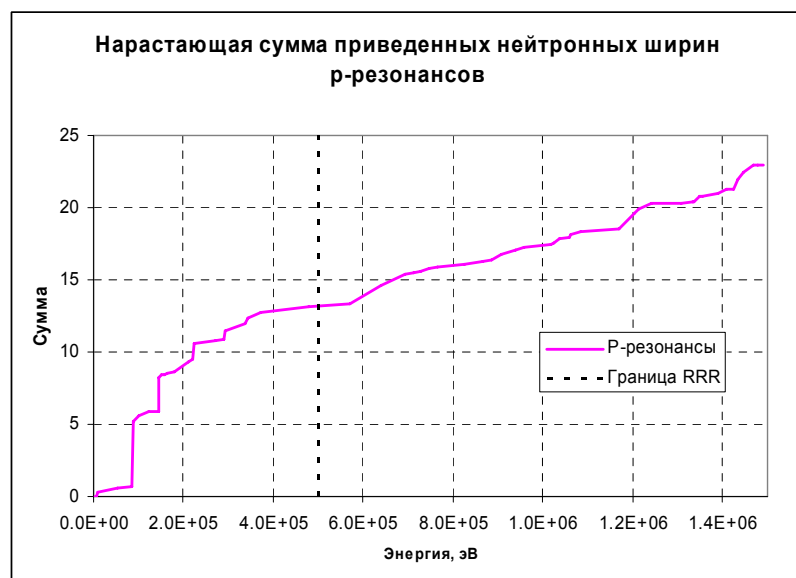


Рис.2б

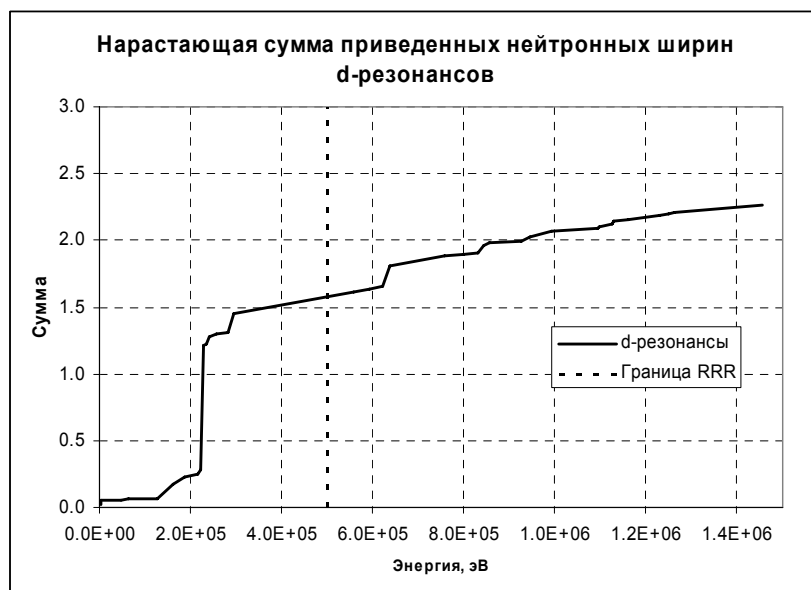


Рис.2в.

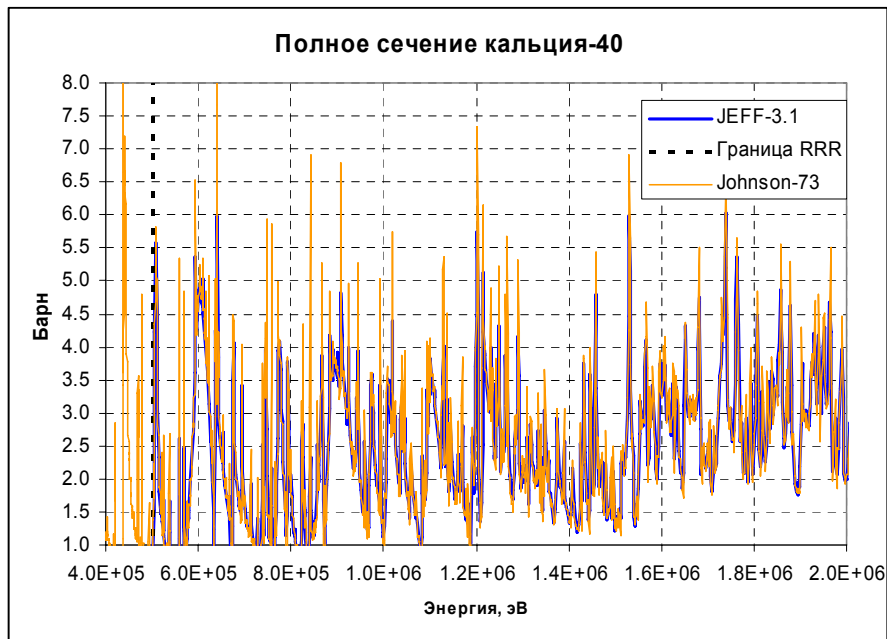


Рис.3а

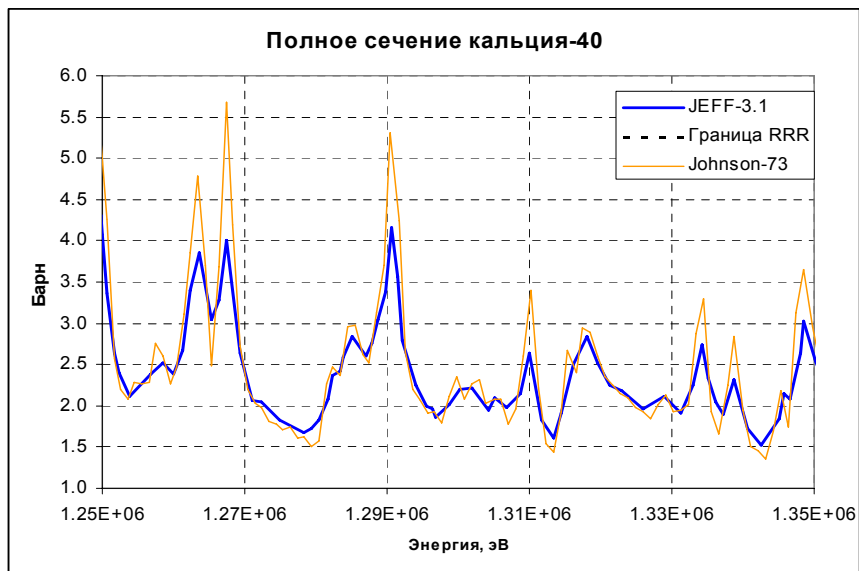


Рис.3б

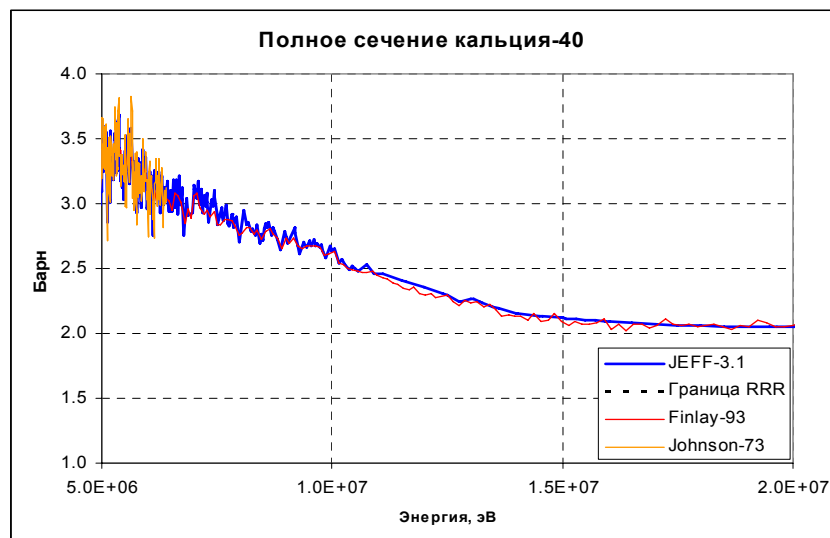


Рис.3в.

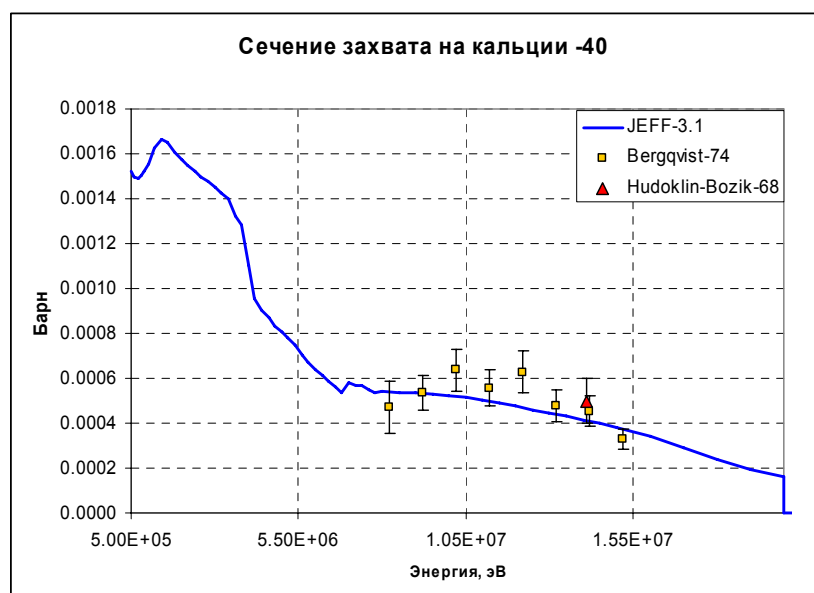


Рис.4.

В таблице 1 тепловые сечения и резонансный интеграл, рассчитанные по файлу JEFF-3.1, сравниваются с рекомендациями Мухабхаба¹.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл кальция-40.

| Величина | Мухабхаб | Рассчитано по NJOY |
|-----------------|---------------|--------------------|
| σ_γ | 0.41±0.02 | 0.4075 |
| σ_s | 2.73±0.06 | 3.061 |
| σ_α | 0.0025±0.0011 | 0.0024 |
| RI_γ | 0.22±0.02 | 0.205 |

Заключение

В РОСФОНД принять оценку А. Koning, 2004 из JEFF-3.1. Весьма желателен пересмотр этой оценки в области разрешенных резонансов (которую следует расширить до 1.5 МэВ, учтя вклад неразрешенных резонансов в плавной подложке, заданной в файле MF=3).

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

20.2. Кальций-41

Радиоактивен. Распадается путем захвата орбитального электрона в калий-41. ($T_{1/2}=1.03 \cdot 10^5$ лет).

Сечение радиационного захвата тепловых нейтронов, следующее из файла (4 барна) в точности соответствует рекомендации Мухабхаба.

Заключение

В РОСФОНД принята оценка из EAF-2003

Автор рекомендации

Кошечев В.Н.

¹ S.F.Mughabghab. Atlas of Neutron Resonances. Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. ELSEVIER, 2005.

20.3. Кальций-42

Содержание в естественной смеси 0.647%.

Область разрешенных резонансов в оценке Кёнинга простирается до 300 кэВ.

Резонансные параметры соответствуют атласу Мухабхаба издания 1981г². В новом издании атласа параметры несколько изменены, но число резонансов, для которых приведены параметры осталось прежним. Ограничение области разрешенных резонансов 300 кэВ представляется оправданным. В таблице 2 тепловые сечения и резонансный интеграл, следующие из файла, сравниваются с рекомендацией Мухабхаба.

Таблица 2. Тепловые сечения и резонансный интеграл кальция-42.

| Величина | Мухабхаб | Рассчитано по NJOY |
|-------------------|-------------|--------------------|
| σ_{γ} | 0.680±0.070 | 0.683 |
| σ_s | 1.38±0.08 | 1.237 |
| RI_{γ} | 0.392±0.04 | 0.363 |

Заключение

В РОСФОНД принять оценку А..Koning, 2004 из JEFF-3.1

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

20.4. Кальций-43

Содержание в естественной смеси 0.135%.

Область разрешенных резонансов в оценке Кёнинга простирается до 400 кэВ.

Резонансные параметры соответствуют атласу Мухабхаба издания 1981г. В новом издании атласа параметры заметно изменены, приведены энергии и резонансные интегралы захвата для многих дополнительных резонансов.. В таблице 3 тепловые сечения и резонансный интеграл, следующие из файла, сравниваются с рекомендацией Мухабхаба.

Таблица 3. Тепловые сечения и резонансный интеграл кальция-43.

| Величина | Мухабхаб | Рассчитано по NJOY |
|-------------------|-----------|--------------------|
| σ_{γ} | 6.2±0.6 | 11.66 |
| σ_s | | 4.21 |
| RI_{γ} | 3.93±0.15 | 5.77 |

Заключение

В РОСФОНД принята оценка А..Koning, 2004 из JEFF-3.1. Переоценка сечений, особенно в области разрешенных резонансов, весьма желательна.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

² S.F.Mughabghab, M/Divadinem, N.e.Holden. Neutron Cross Sections. Vol.1 Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. BNL, 1981.

20.5. Кальций-44

Содержание в естественной смеси 2.086%.

Область разрешенных резонансов в оценке Кёнинга простирается до 500 кэВ. Эта область содержит параметры 24 s- и 15 p-резонансов, соответствующих атласу Мухабхаба¹. Лишь 10 резонансов лежат выше границы этой области. В таблице 3 тепловые сечения и резонансный интеграл, следующие из файла, сравниваются с рекомендацией Мухабхаба.

Таблица 3. Тепловые сечения и резонансный интеграл кальция-44.

| Величина | Мухабхаб | Рассчитано по NJOY |
|-------------------|-----------|--------------------|
| σ_{γ} | 0.88±0.5 | 0.888 |
| σ_s | | 3.359 |
| RI_{γ} | 0.56±0.01 | 0.418 |

Расхождение в резонансном интеграле намного превосходит погрешность, указанную Мухабхабом. Величина последней, однако, вызывает сомнения: резонансный интеграл измерялся в единственной работе Sims&Juhnke относительно резонансного интеграла кобальта-59 (погрешность которого, согласно Мухабхабу, составляет 3%). Тем не менее, приходится констатировать противоречие в имеющихся данных для резонансной области, которое, вероятно, могло бы быть устранено корректировкой резонансных параметров методом наименьших квадратов.

Заключение

В РОСФОНД принята оценка A..Koning, 2004 из JEFF-3.1. Переоценка сечений в области разрешенных резонансов была бы желательной.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

20.6. Кальций-45

Радиоактивен. Испытывает бета-распад в скандий-45. ($T_{1/2}=163$ д).

Сечение радиационного захвата тепловых нейтронов, следующее из файла (15 барн) в точности соответствует рекомендации Мухабхаба.

Заключение

В РОСФОНД принята оценка из EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

20.7. Кальций-46

Содержание в естественной смеси 0.004%.

В файле из JEFF-3.1 полное сечение и сечение рассеяния ниже 1 кэВ равны нулю. В ENDF/B-VII, включившем оценку Кёнинга, этот недостаток устранен с использованием данных из JENDL-3.3.

Заметим, что в то время, как тепловое сечение захвата для кальция-46, следующее из оценки (0.70 барн) согласуется с рекомендацией Мухабхаба, резонансный интеграл (0.336 барн) втрое ниже указанного Мухабхабом (0.96±0.10).

Заключение

В РОСФОНД принята оценка А..Koning, 2004, откорректированная при ее включении в ENDF/B-VII.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

20.6. Кальций-47

Радиоактивен. Испытывает бета-распад в скандий-47 ($T_{1/2}=4.536$ дн.), который, в свою очередь распадается с периодом $T_{1/2}=3.35$ дн. в стабильный титан-47. Следующие из файла сечение захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл равны, соответственно, 1.589 барн и 0.825 барн. Экспериментальные данные не известны.

Заключение

В РОСФОНД принята оценка из EAF-2003.

Автор рекомендации

Кошечев В.Н.

20.9. Кальций-48

Содержание в естественной смеси 0.187%.

Область разрешенных резонансов в оценке Кёнинга простирается до 500 кэВ и содержит параметры одного s- и 4-х p-резонансов. Имеются существенные отличия в параметрах первых резонансов по сравнению с оценкой Мухабхаба¹. Указанные Мухабхабом резонансы при 19.3 кэВ и 106.9 кэВ в оценке отсутствуют. Резонансу при 161.4 кэВ в оценке приписана нейтронная ширина 590 эВ, тогда как в атласе Мухабхаба она равна 0.059±5.000 эВ. Можно думать, что в атласе имеется ошибка на 4 порядка. Параметры резонансов, лежащих при более высоких энергиях, совпадают.

В таблице 4 тепловые сечения и резонансный интеграл захвата, следующие из оценки, сравниваются с данными Мухабхаба. Двукратное расхождение в резонансном интеграле объясняется отсутствием в оценке резонанса при 106.9 кэВ.

Таблица 4. Тепловые сечения и резонансный интеграл кальция-48.

| Величина | Мухабхаб | Рассчитано по NJOY |
|-------------------|-----------|--------------------|
| σ_{γ} | 1.09±0.14 | 1.090 |
| σ_s | | 3.756 |
| RI_{γ} | 0.89±0.18 | 0.376 |

Заключение

В РОСФОНД принята оценка А..Koning, 2004 из JEFF-3.1.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

21. СКАНДИЙ

Скандий имеет лишь один стабильный изотоп –Sc-45. Долгоживущих радиоактивных изотопов -4.

Для нейтронных данных стабильного нуклида Sc-45 имеется следующее положение дел:

В ФОНД-2.2 принята оценка из JENDL-2 (Y.Oka, T.Nakagawa, Y.Kikuchi, 1982).

В ENDF/B-VII находится оценка A.Smith, R.Howerton, выполненная в 1992 году.

В JENDL-3.3 принята оценка T.Watanabe, 1988. В 1993 году для версии JENDL-3.2 были уточнены параметры 3.295 кэВ-го резонанса, а также ход сечения упругого рассеяния и радиационного захвата.

В JEFF-3.1 – новая оценка A. Koning, выполненная в 2004 на основе нейтронных данных из JENDL-3.2 (область резонансных энергий до 100 кэВ), нейтронных данных из ENDF/B-VI.8 (от 100 кэВ до 9 МэВ) и расчетных значениях по новой программе TALYS version 0.56. Оценка нейтронных данных расширена до 200 МэВ, вследствие чего оценены новые типы нейтронного взаимодействия.

21.1. Скандий-44m

Радиоактивен. Распадается ($T_{1/2}=2.44$ д) путем захвата орбитального электрона в кальций-44 или испытывает изомерный переход в основное состояние, а затем путем позитронного распада в тот же кальций-44 ($T_{1/2}=3.92$ ч).

Заключение

В РОСФОНД принимается файл данных из EAF-2003

21.2. Скандий-45

Содержание в естественной смеси -100%

Основными нейтронными сечениями Sc-45 являются полное сечение взаимодействия с нейтронами, сечение радиационного захвата и сечение неупругого рассеяния.

21.2.1. Полное сечение.

Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия на основе 28-групповых сечений, полученных с помощью программы NJOY, приведено на рисунке 1.

Из приведенного на рисунке 1 сравнения видно, что современные оценки согласуются между собой в пределах 10 %, за исключением энергетической области минимума S-резонанса (3.295 кэВ). В этой области энергий в JENDL-3.3 сечение подгонялось по экспериментальные значения, полученные Фужитой в 1983.

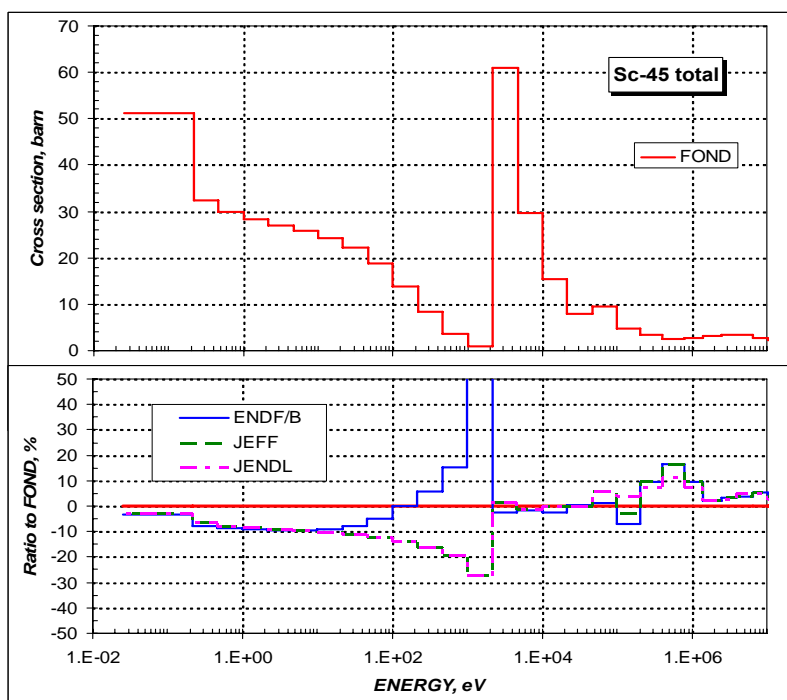


Рис. 1 – Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия для Sc-45.

Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия с экспериментом Фужита (1983) показано на рисунке 2.

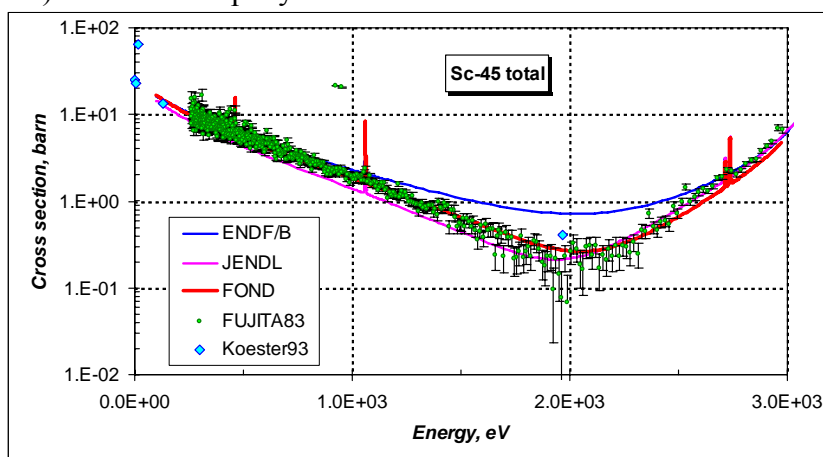


Рисунок 2 – Сравнение полного сечения Sc-45 в области энергий до 3.0 кэВ.

Из приведенного на рисунке 2 сравнения видно, что оценка ENDF/B завышает полное сечение в области минимума резонанса. В этой области энергий оценка ENDF/B ориентируется на эксперимент Харви (1982). Экспериментальные данные Харви имеются в библиотеке EXFOR. Они выполнены большим разрешением, однако производят впечатление предварительно заявленных данных.

Напомним, что оценка JEFF совпадает с JENDL в этой области энергий.

Выводы:

Предпочтительнее всех выглядит оценка сечения полного взаимодействия из JENDL-3.3.

21.2.2. Сечение захвата нейтронов

Сравнение оцененных сечений захвата нейтронов на основе 28-групповых сечений, полученных с помощью программы NJOY, приведено на рисунке 3.

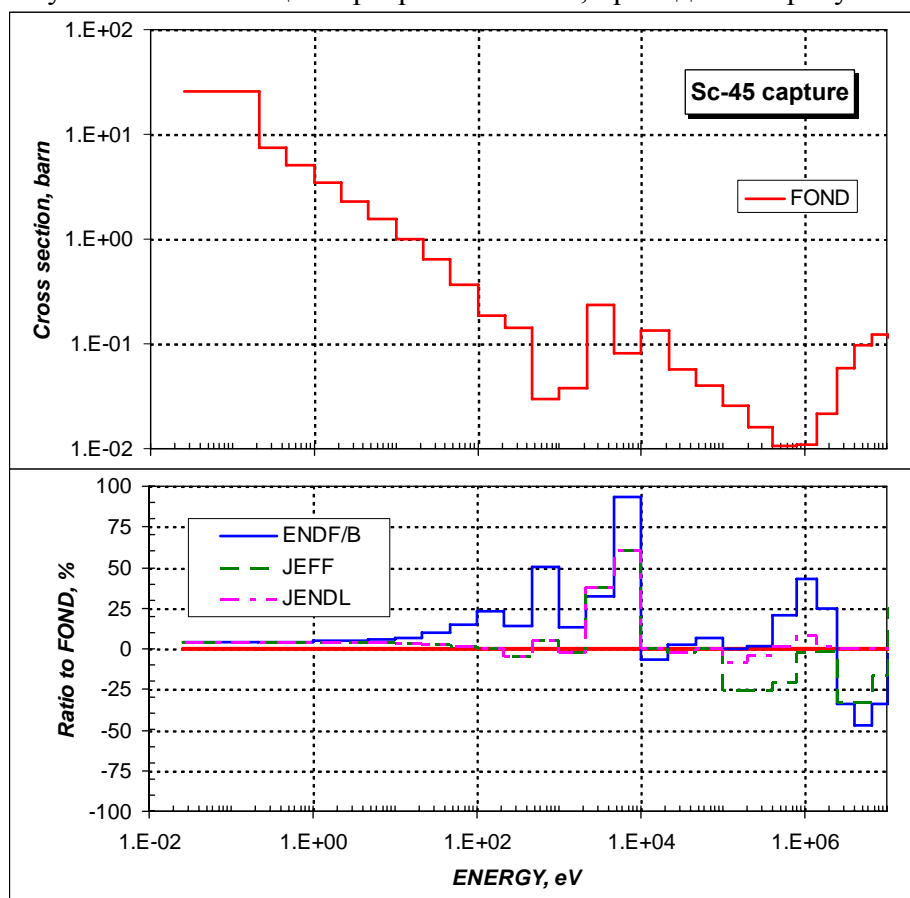


Рисунок 3 – Сравнение оцененных сечений захвата нейтронов на Sc-45.

Из приведенного на рисунке 3 сравнения видно, что современные оценки сечения захвата согласуются между собой в пределах 20 – 25%.

Выводы:

Отсутствие экспериментальной информации в области резонансных энергий не позволяет отдать предпочтение какой-либо современной оценке сечения захвата нейтронов.

21.2.3. Сечение неупругого рассеяния нейтронов

Сравнение оцененных сечений упругого рассеяния нейтронов выполнено на основе 28-групповых сечений, полученных с помощью программы NJOY. На рисунке 4 приводится сравнение сечений по отношению с оценке ФОНД-2.2..

Экспериментальные данные по измерению сечения неупругого рассеяния отсутствуют. Наблюдаемые различия характеризуют прогресс в теоретических моделях для расчета сечений.

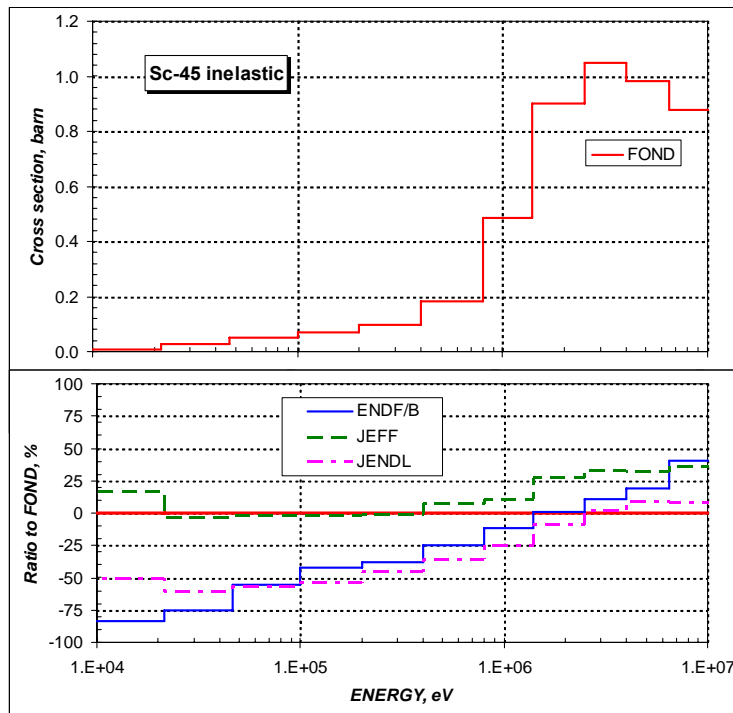


Рисунок 4 – Сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния нейтронов на Sc-45.

Выводы:

Отсутствие экспериментальной информации не позволяет отдать предпочтение какой-либо современной оценке сечения неупругого рассеяния нейтронов.

21.2.4. Угловое распределение упруго рассеянных нейтронов.

На рисунке 5 приводится сравнение значений среднего косинуса угла рассеяния нейтронов при упругом взаимодействии.

Из приведенного на рисунке 5 сравнения видно, что в оценке ENDF/B находится ошибка, связанная с определением среднего косинуса угла рассеяния нейтронов в тепловой области энергий, где рассеяния изотропно и описывается простой формулой

$$\mu_0 \sim 2/3A = 2/3 \cdot 44.57 = 0.01495.$$

Полученная величина совпадает с оценкой JENDL, JEFF и не совпадает с оценкой ENDF/B, в которой $\mu_0 = 0.0316$.

Расхождения в области энергий 200-300 кэВ вызваны использованием различных расчетных моделей.

Выводы:

В оценке ENDF/B в параметрах определяющих угловое распределение нейтронов при упругом рассеянии имеются ошибки, которые существенно завышают средний косинус угла рассеяния нейтронов. Остальные оценки неплохо согласуются друг с другом.

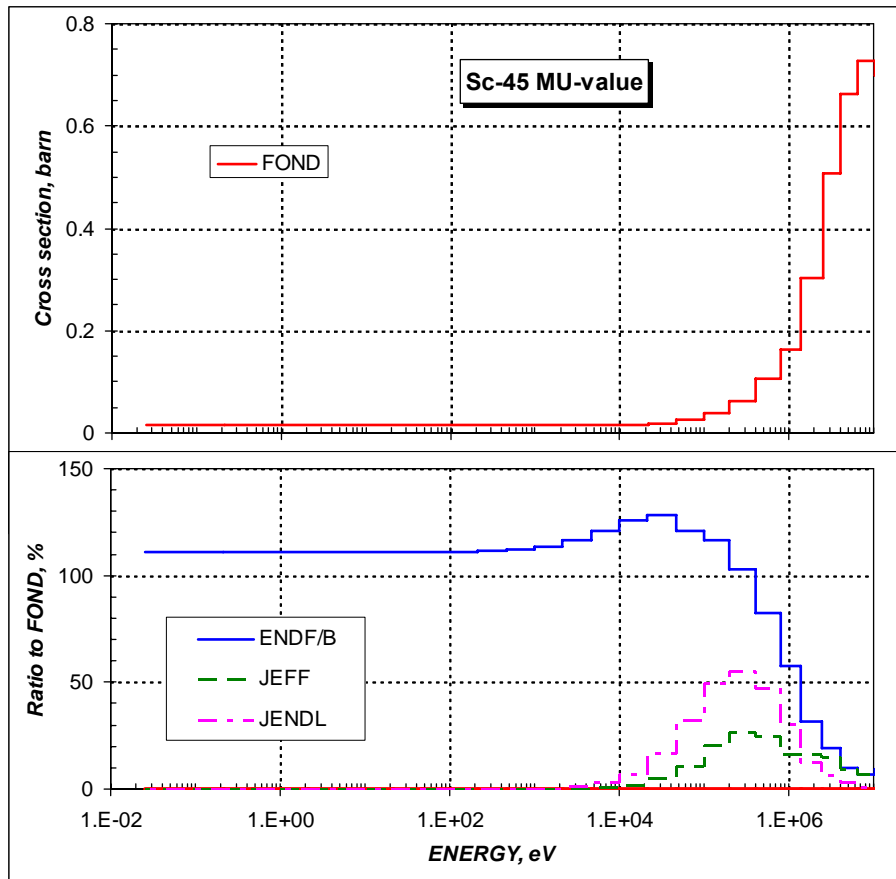


Рисунок 5 – Сравнение значений среднего косинуса угла рассеяния нейтронов при упругом их взаимодействии на Sc-45.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется оцененные нейтронные данные из JENDL-3.3 (T.Watanabe, 1988-1993)

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

21.3. Скандий-46

Радиоактивен. Испытывает бета-распад в титан-46 ($T_{1/2}=83.82$ д).

Заключение

В РОСФОНД принимается файл данных из EAF-2003

21.4. Скандий-47

Радиоактивен. Испытывает бета-распад в титан-47 ($T_{1/2}=3.35$ д).

Заключение

В РОСФОНД принимается файл данных из EAF-2003

21.5. Скандий-48

Радиоактивен. Испытывает бета-распад в титан-48 ($T_{1/2}=43.67$ ч).

Заключение

В РОСФОНД принимается файл данных из EAF-2003

22.ТИТАН

Титан имеет 5 подряд идущих стабильных изотопов – от Ti-46 до Ti-50 и достаточно долгоживущий радиоактивный изотоп Ti-44.

ФОНД-2.2 содержит полный набор оцененных данных только для природного титана (Philis, Howerton, Smith, 1982); для радиоактивных изотопов приведены только сечения из EAF-3.

В JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для всех стабильных изотопов принята оценка К. Kobayashi Н. Hashikura 1988 г.

В JEFF-3.1 для стабильных изотопов принята оценка S. Tagesan, H. Vonach, 2004.

Последняя оценка отличается от всех остальных тем, что полное сечение для всех изотопов во всей области энергий принято одинаковым и совпадающим с полным сечением природного титана, данные для которого несравненно полнее, чем для изотопов. Для остальных сечений приняты оценки, полученные расчетным путем с последующей тщательной подгонкой по совокупности экспериментальных данных. Для пороговых реакций (кроме неупругого рассеяния) приняты оценки EAF-2003, которые практически не отличались от полученных авторами.

Очевидна сомнительность такого подхода к области разрешенных резонансов, к которой нет никаких оснований принимать для всех изотопов одинаковые сечения. Однако и в области более высоких энергий оценка, принятая в JEFF-3.1 представляется сомнительной. На нижеследующих рисунках сравниваются оцененные полные сечения и сечения радиационного захвата с имеющимися немногочисленными данными.

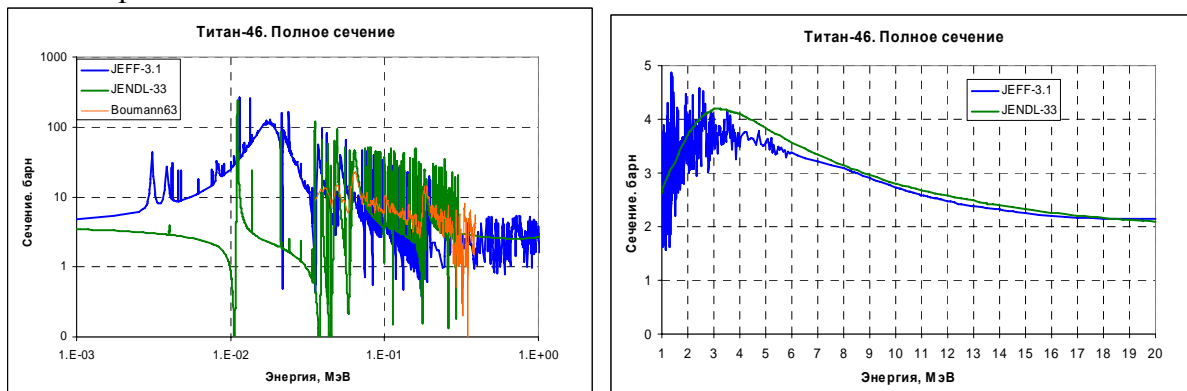


Рис.1а

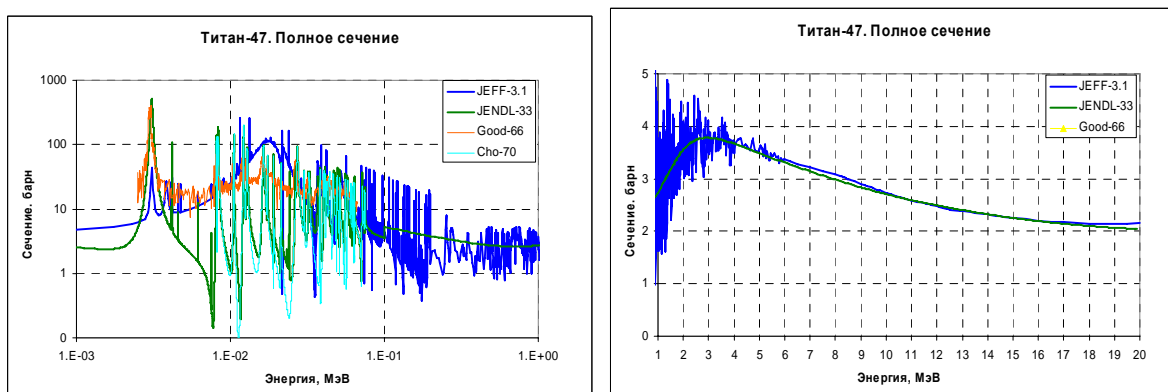


Рис.1б.

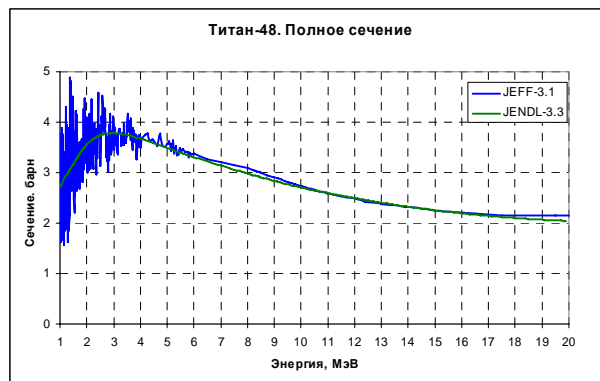
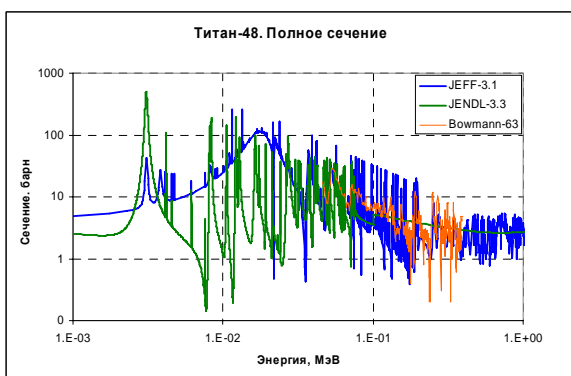


Рис.1в

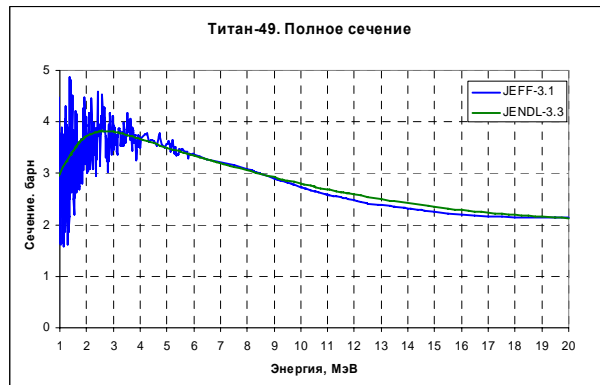
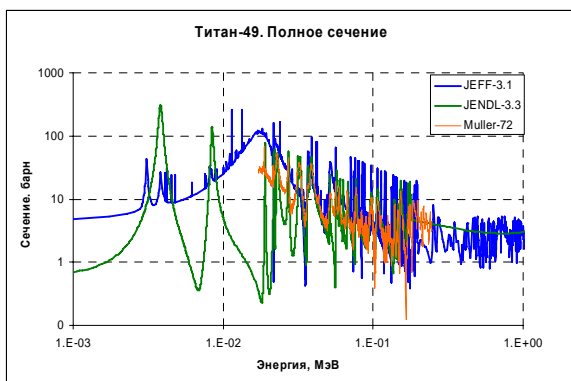


Рис.1г.

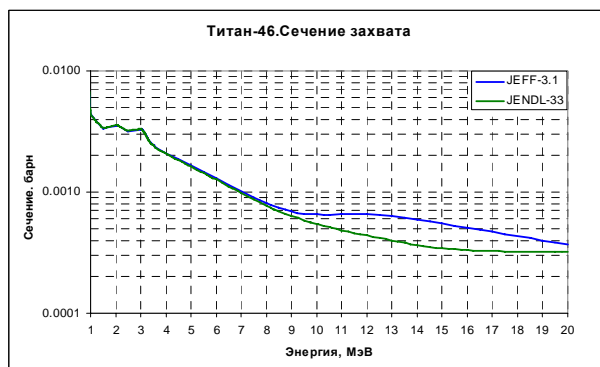
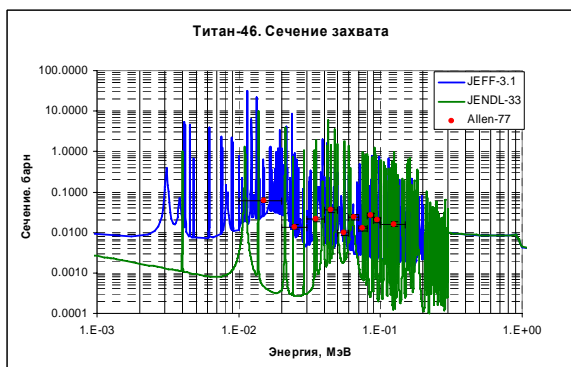


Рис.2а

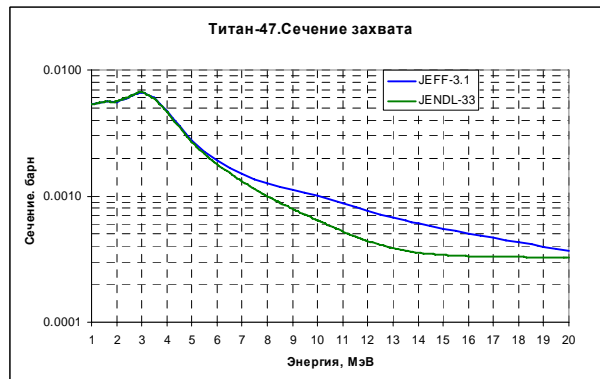
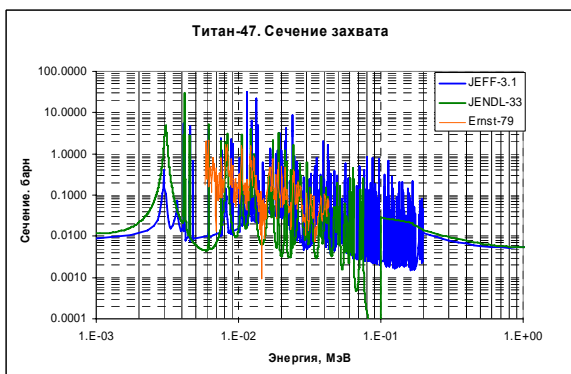


Рис.2б

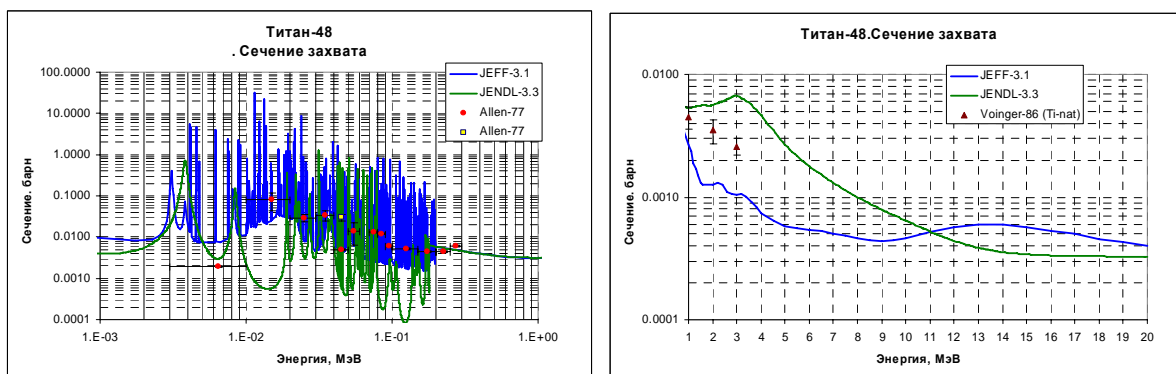


Рис.2в

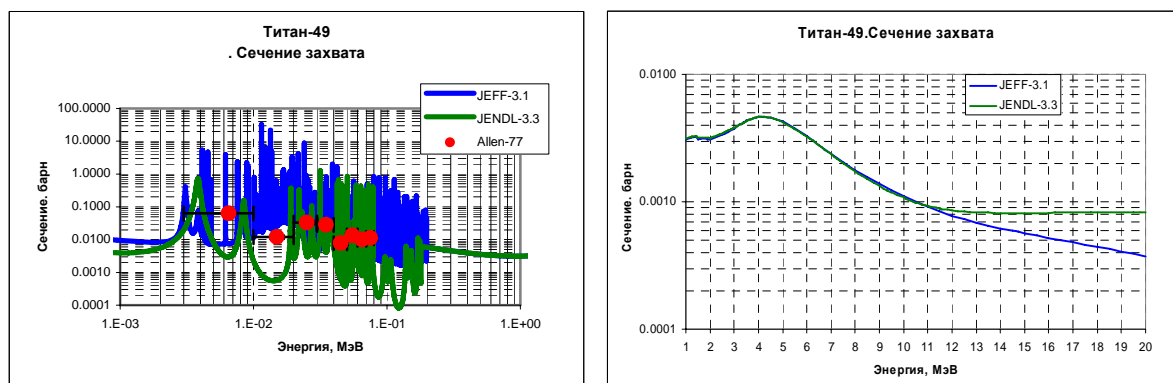


Рис.2г.

Для основного изотопа расхождения в оценках сечения захвата быстрых нейтронов максимальны. Имеющиеся для этой области экспериментальные данные Воинджера не выявляют преимущество какой-либо из оценок. В остальных случаях вне резонансной области оценки весьма близки, а в резонансной области преимущество JENDL-3.3 очевидно.

В РОСФОНД для стабильных изотопов рекомендуется принять оценку JENDL-3.3.

22.1. Титан-44

Радиоактивен, ($T_{1/2}=47.3$ г.). Путем захвата орбитального электрона распадается в скандий-44, который затем тем же путем распадается кальций-44 с $T_{1/2}=3.92$ ч.

Полных файлов оцененных данных ни в одной библиотеке нет. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Заключение

В РОСФОНД принимается файл данных из EAF-2003. Сечения образования отдельных состояний ядер-продуктов, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Сформировать файл MF=9 с секцией MT=103 с вероятностями образования основного и изомерного состояний скандия-44 в реакции $^{44}\text{Ti}(n,p)$.

Автор рекомендации
Кошечев В.Н.

22.2. Титан-46

Содержание в естественной смеси 8.0%.

Заключение

В РОСФОНД принимается файл данных из JENDL-3.3 кроме секций MT=203 и MT-207 (полные сечения образования протонов и альфа-частиц), которые удалить.

Автор рекомендации

Кощев В.Н.

22.3. Титан-47

Содержание в естественной смеси 7.3%.

Заключение

В РОСФОНД принимается файл данных из JENDL-3.3 кроме секций MT=203 и MT-207 (полные сечения образования протонов и альфа-частиц), которые удалить.

Автор рекомендации

Кощев В.Н.

22.4. Титан-48

Содержание в естественной смеси 73.8%.

Заключение

В РОСФОНД принимается файл данных из JENDL-3.3 кроме секций MT=203 и MT-207 (полные сечения образования протонов и альфа-частиц), которые удалить.

Автор рекомендации

Кощев В.Н.

22.5. Титан-49

Содержание в естественной смеси 5.5%.

Заключение

В РОСФОНД принимается файл данных из JENDL-3.3 кроме секций MT=203 и MT-207 (полные сечения образования протонов и альфа-частиц), которые удалить.

Автор рекомендации

Кощев В.Н.

22.6. Титан-50

Содержание в естественной смеси 5.4%.

Заключение

В РОСФОНД принимается файл данных из JENDL-3.3 кроме секций MT=203 и MT-207 (полные сечения образования протонов и альфа-частиц), которые удалить.

Автор рекомендации

Кощев В.Н.

23. ВАНАДИЙ

Природный ванадий содержит два изотопа V-50 (слаборadioактивный изотоп с содержанием 0.25%) и V-51. Таким образом, природный ванадий состоит почти полностью из одного изотопа. Ещё два радиоизотопа V-48 и V-49 являются достаточно долгоживущими, и данные для них должны быть представлены в РОСФОНДе.

В ФОНД-2.2 полный набор данных приведен лишь для V-51 (Gurrer, Havel, Howerton, 1977). Для остальных изотопов, включая стабильный V-50, приведены лишь данные из EAF-3.

В ENDF/B-VII содержится оценка А. и D. Smith для природного ванадия (1988)

В JENDL-3.3 – оценка T. Watanabe того же года.

В JEFF-3.1 – оценка Gruppelaar, Van Der Kamp, Kopetcky, Nierop (1991) для природного ванадия выполненная, главным образом, на основе нейтронных данных из библиотеки ENDF/B-VI.8, т.е. на основе оценки А. и D. Smith (1988).

23.1. Ванадий-48

Радиоактивен. Испытывает позитронный распад или захват орбитального электрона с переходом в титан-48. ($T_{1/2}=15.97$ д).

Заключение

В РОСФОНД принимается файл данных из EAF-2003. Сечения образования отдельных состояний ядер-продуктов, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3.

23.2. Ванадий-49

Радиоактивен. Испытывает захват орбитального электрона с переходом в титан-49. ($T_{1/2}=330$ д).

Заключение

В РОСФОНД принимается файл данных из EAF-2003. Сечения образования отдельных состояний ядер-продуктов, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3.

23.3. Ванадий-50

Содержание в естественной смеси 0.25%

Радиоактивен. Испытывает захват орбитального электрона с переходом в титан-50. или бета-распад в хром-50 ($T_{1/2}=1.4*10^{17}$ лет).

Заключение

В РОСФОНД принимается файл данных из EAF-2003

23.4. Ванадий-51

Заключение

В РОСФОНД принят файл ванадия-51, полученный из файла для природного ванадия (см. ниже) путем вычитания вклада ванадия-50, заданного поточечной подложкой в резонансной области.

23.5. Ванадий-природный

Из за высокого сечения поглощения ванадия-50 (более 60 барн при 0.0253эВ) его вкладом в поглощение природного ванадия пренебрегать не следует.

Основными нейтронными сечениями V-nat являются полное сечение взаимодействия с нейтронами, сечение радиационного захвата и сечение неупругого рассеяния.

Поскольку для ванадия-50 в РОСФОНД включен файл, содержащий данные только о ней тронных сечениях, включение файла данных для природного ванадия необходимо.

23.4.1. Полное сечение.

Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия на основе 28-групповых сечений, полученных с помощью программы NJOY, приведено на рисунке 1.

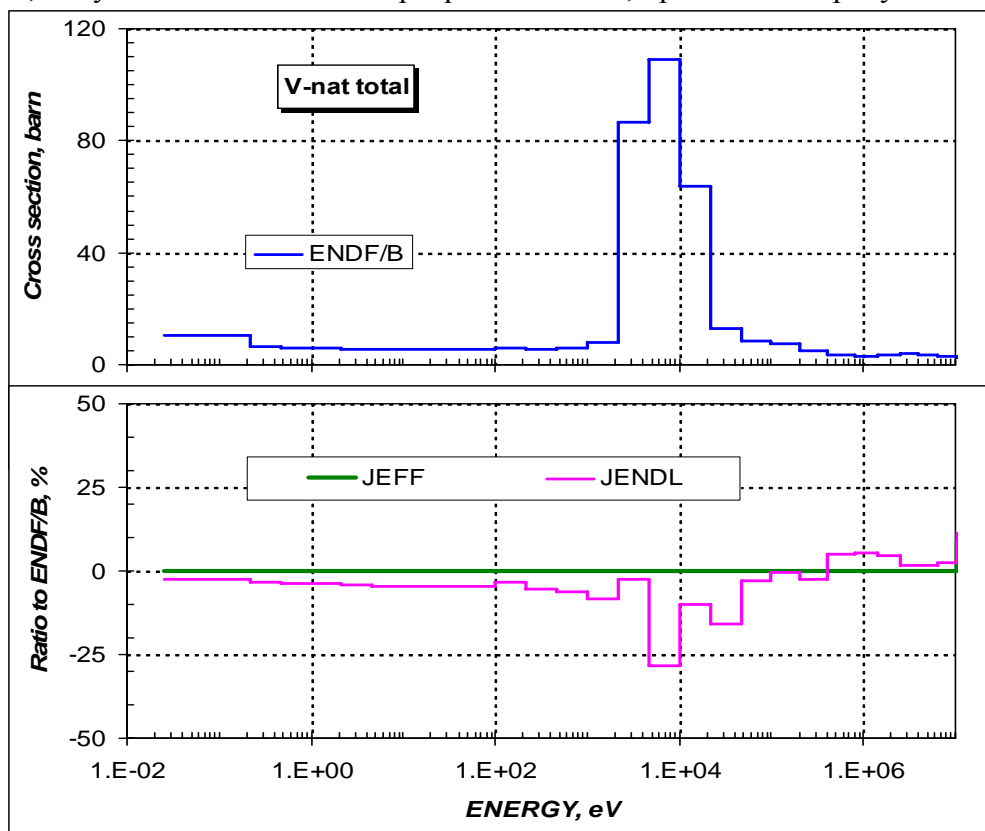


Рисунок 1 – Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия для V-nat.

Из приведенного на рисунке 1 сравнения видно, что отличия оценки JENDL от оценки ENDF/B достигает максимуму в области энергий 1 кэВ – 100 кэВ и достигают 30%. Напомним, что оценка JEFF совпадает с JENDL в этой области энергий.

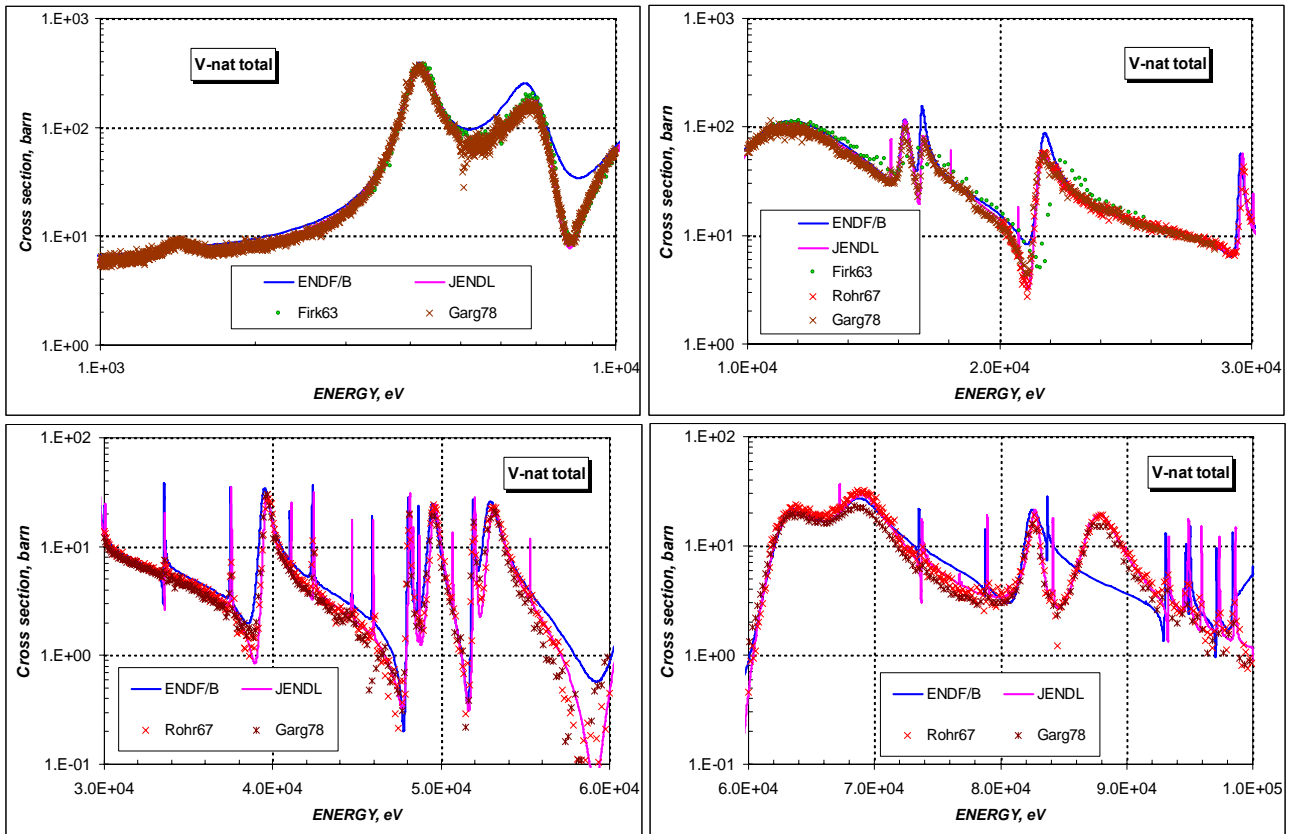


Рисунок 2 – Сравнение полного сечения Sc-45 в области энергий до 3.0 кэВ.

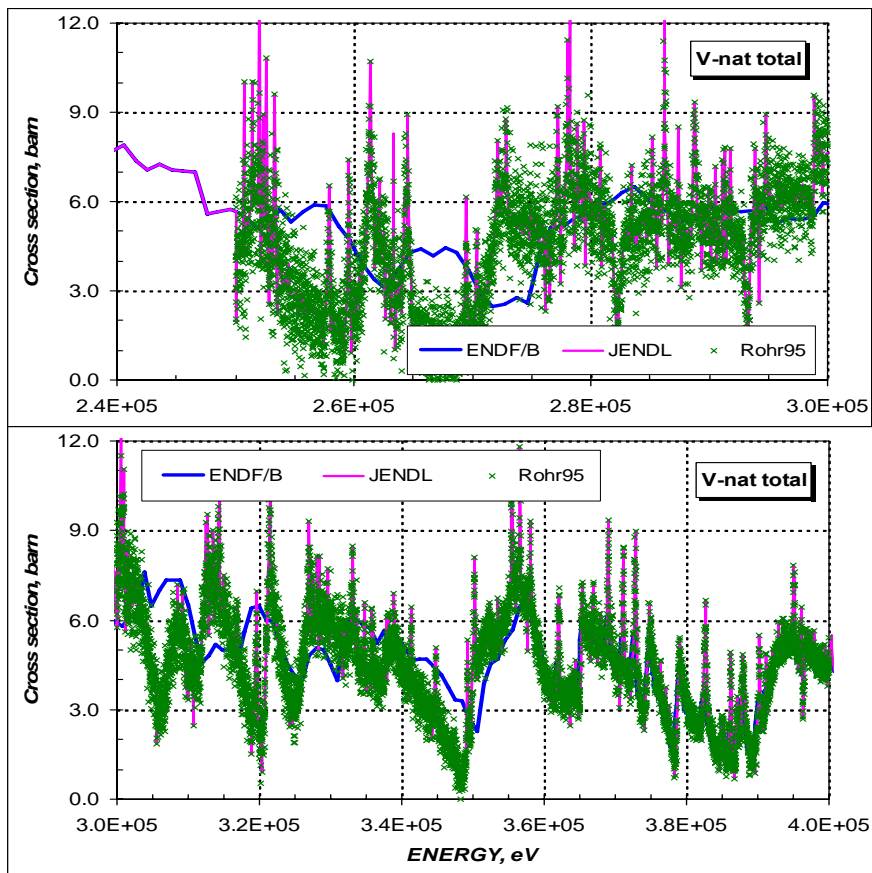


Рисунок 3 – Сравнение полного сечения Sc-45 в области энергий до 3.0 кэВ.

В этой области энергий имеется несколько наборов экспериментальных данных. Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия с некоторыми наиболее свежими экспериментальными данными в области энергий 1 – 100 кэВ, где наблюдаются наибольшие различия в оценках, показано на рисунке 2. На рисунке 3 показано сравнение оцененных и экспериментальных данных в области более высоких энергий 200 – 400 кэВ.

Из приведенного на рисунках 2 и 3 сравнения видно, что оценка ENDF/B (а также и JEFF) не согласуется со структурой полного сечения, наблюдаемой в эксперименте. В то время, как оценка JENDL прекрасно согласуется с имеющимися наборами экспериментальных измерений.

Выводы:

Оценка сечения полного взаимодействия из JENDL-3.3 выглядит предпочтительнее других.

23.4.2. Сечение захвата нейтронов

Сравнение оцененных сечений захвата нейтронов на основе 28-групповых сечений, полученных с помощью программы NJOY, приведено на рисунке 4.

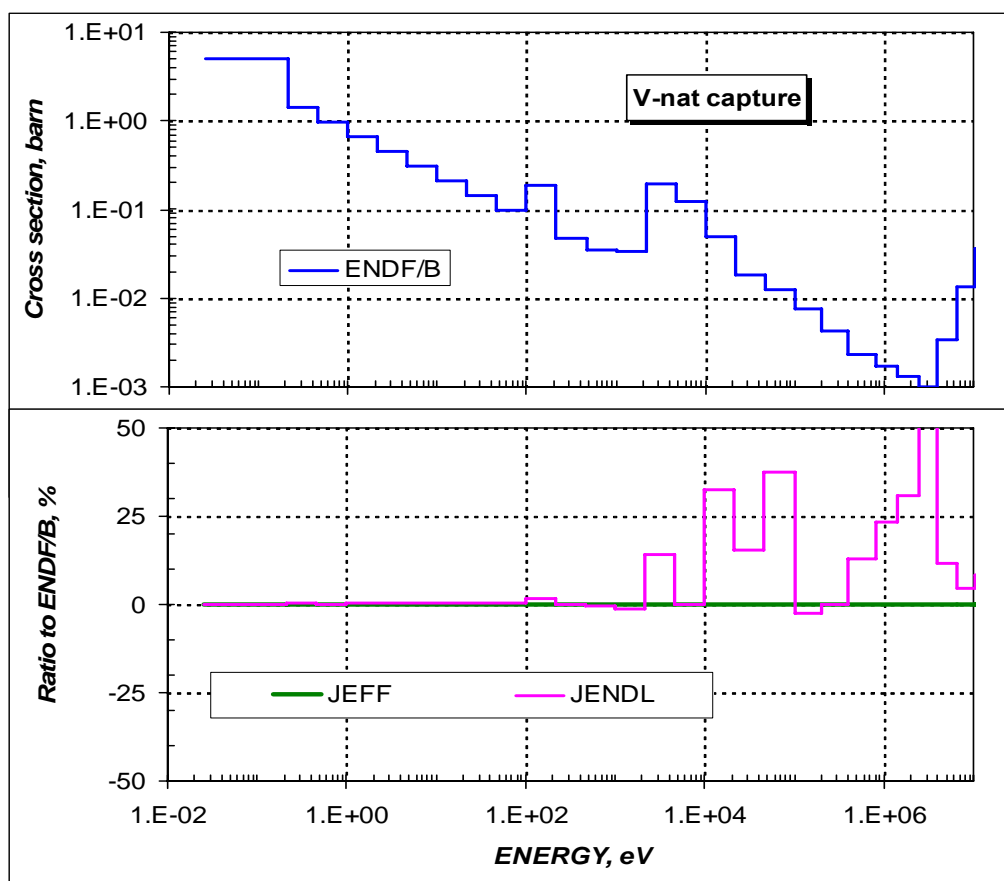


Рисунок 4 – Сравнение оцененных сечений захвата нейтронов на V-nat в области энергий 0.01 эВ – 10 МэВ.

Из приведенного на рисунке 4 сравнения видно, что до 10 кэВ оценки хорошо согласуются между собой. Выше 10 кэВ оценка JENDL в среднем на 25% выше чем оценка ENDF/B.

В этой области энергий имеется только один набор экспериментальных данных группы Стиглитца (Stieglitz, 1971 г.). Сравнение оцененных сечений захвата с

экспериментальными данными в области энергий 10 – 100 кэВ, где наблюдаются наибольшие различия в оценках, показано на рисунке 5..

Из приведенного на рисунке 5 сравнения оцененных сечений и экспериментальных данных видно, что

- имеющиеся экспериментальные данные вследствие их плохого разрешения не позволяют оценить надежность той или иной оценки;

- оценка ENDF/B (а также и JEFF) по сравнению с оценкой JENDL имеет меньшее количество резонансных уровней, что и послужило причиной занижения сечения захвата в области энергий выше 10 кэВ.

Учитывая тот факт, что структура полного сечения согласуется со структурой сечения захвата можно утверждать, что оценка сечения захвата из JENDL .носит более достоверный характер.

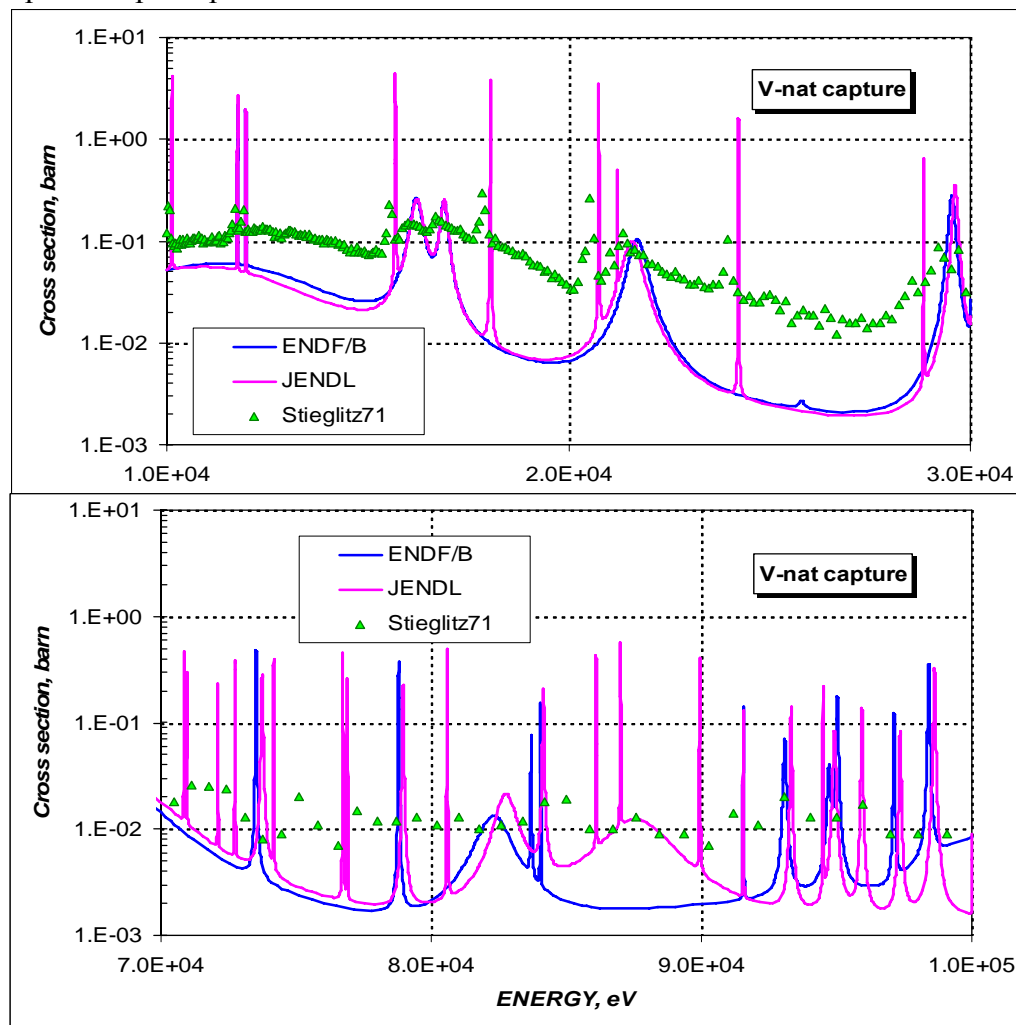


Рисунок 5 – Сравнение оцененных сечений захвата нейтронов на V-nat в области энергий 10-100 кэВ.

Выводы:

Оценка сечения радиационного захвата нейтронов из JENDL-3.3 выглядит предпочтительнее других.

21.2.3. Сечение неупругого рассеяния нейтронов

Сравнение оцененных сечений упругого рассеяния нейтронов выполнено на основе 28-групповых сечений, полученных с помощью программы NJOY. На рисунке 6 приводится сравнение сечений по отношению с оценке ENDF/B.

Экспериментальные данные по измерению сечения неупругого рассеяния отсутствуют. Наблюдаемые различия характеризуют согласие в используемых теоретических моделях для расчета сечений.

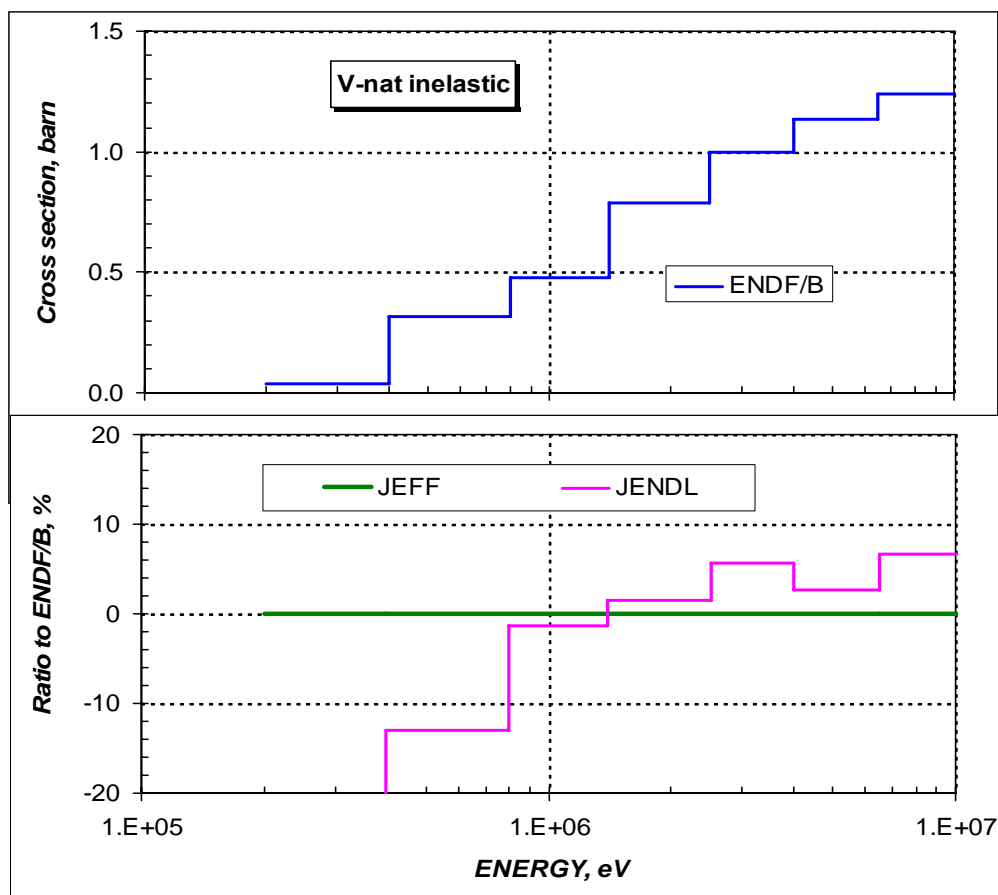


Рисунок 6 – Сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния нейтронов на V-nat.

Выводы:

Отсутствие экспериментальной информации не позволяет отдать предпочтение какой-либо современной оценке сечения неупругого рассеяния нейтронов.

Заключение

На основе проведенного сравнения основных нейтронных сечений для природного ванадия в РОСФОНД рекомендуется взять оцененные нейтронные данные из JENDL-3.3 (T.Watanabe, 1988-1993). Ковариационные данные исключить. Их анализ следует выполнить на следующем этапе.

Целесообразно при возможности заменить файл для природного ванадия на два – для каждого из изотопов: в принятой оценке вклад ванадия-50 учтен в виде подложки к области разрешенных резонансов, которой учитываются только первые три из 17

резонансов этого изотопа. Удаление этого вклада даст файл для ванадия-51. Построить файл для ванадия-50 сложнее, т.к. требуется оценка полного сечения выше резонансной области.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

24. ХРОМ

Природный хром содержит четыре стабильных изотопа:

^{50}Cr - 4.345 %,

^{52}Cr - 83.789 %,

^{53}Cr - 9.501 %,

и ^{54}Cr - 2.365 %.

Существует также один долгоживущий изотоп ^{51}Cr ($T_{1/2}=27.78$ д), данные для которого также представлены в библиотеке РОСФОНД.

24.1. Хром-50

Оцененные данные рассматриваются в диапазоне энергий до 20 МэВ. Различные модификации, выполненные выше 20 МэВ, не комментируются.

Экспериментальные данные, используемые при сравнении с оцененными кривыми, взяты из интерактивной библиотеки EXFOR-CINDA (Database and Retrieval System, version 1.80, June 2005).

Ниже рассматриваются две современные оценки нейтронных данных, а именно – ENDF/B-VII betha1 version и JENDL-3.3. По каждой оценке приводятся краткие пояснения. Отметим, что в библиотеке JEFF-3.1 находится оценка ENDF/B-VI.8=ENDF/B-VIIb1. В библиотеке ФОНД-2.2 находится оценка из БРОНД-2.2, которая явно проигрывает вышеупомянутым оценкам. В дальнейшем сечения из библиотеки БРОНД-2 не рассматривались, поскольку при ее компиляции не учитывались экспериментальные данные, выполненные с высоким разрешением в последующие после оценки годы.

ENDF/B

Последняя версия (ENDF/B-VIIb1) содержит оценку ORNL, выполненную в 1989 году авторским коллективом: D.Larson, C.Perey, D.Hetrick, C.Fu.

Основные моменты:

Используются программы DWUCK, в которой ядерная модель описывается THE DISTORTED WAVE BORN APPROXIMATION (DWBA) и программа TNG, в которой используется формализм Хаузера-Фешбаха.

С помощью TNG получены угловые и энергетические распределения частиц, испускаемых в реакциях по модели компаунд ядра и предравновесного процесса. При этом обеспечивается согласованность между всеми реакциями и обеспечивается энергетический баланс оцененных данных.

Область резонансных энергий от $1.E-5$ эВ до 792 кэВ. Резонансные параметры для формализма Райха-Мура получены на основе частного сообщения группы Бруссегана и др. Резонансные параметры подгонялись под результаты работы Харви и Агравела (1988). В области энергий 325 – 792 кэВ в захват добавляется подложки (MF3, MT102) для согласования с усредненными экспериментальными данными.

Полное сечение выше 792 кэВ получено при анализе нескольких наборов измерений с высоким разрешением, которые также использовались и при получении резонансных параметров.

Сечения первых пяти уровней неупругого рассеяния получены при помощи программы TNG, в которой учитывается вклад прямых процессов с подгонкой под экспериментальные данные. Сечение континуума уровней получено также при помощи TNG.

Сечение радиационного захвата выше 792 кэВ получено на основе расчетов по TNG программе.

Сечение реакции (n,2n) взято из оценки Хораи и др.(1987) и Икеда и др.(1988).

Сечения реакций с вылетом заряженных частиц получены при помощи TNG расчетов. При этом учитывались немногочисленные экспериментальные данные.

JENDL-3.3

В основе лежит оценка Асами, выполненная для JENDL-3 в 1987 году. В 1988 году проведена небольшая модификация данных, а именно mf/mt=3/107.

В 1993 году для версии JENDL-3.2 часть данных была переоценена.

В 2000 году данные переоценены Асами, а в 2001 году скомпилированы К.Шибата (JAERI) для последующей версии библиотеки JENDL-3.3. Изменения коснулись данных в следующих разделах

MF2

MT151 – резонансные параметры пересмотрены. Область резонансных параметров увеличена до 600 кэВ. Используется формализм Райха- Мура.

MF1

MT2 пересчитано с учетом баланса сечений;
 MT22, 28, 102, сечения вычислено с помощью SINCROS-II;
 103, 104, 105, сечения вычислено с помощью SINCROS-II;
 106, 107, 111, сечения вычислено с помощью SINCROS-II;
 203, 207 сечения вычислено с помощью SINCROS-II.

MF4, MF5

MT16, 22, 28, 91 данные исключены.

MF6

MT16, 22, 28, 91, взяты из JENDL fusion file;
 206, 207 взяты из JENDL fusion file.

MF12, MF15

MT102 данные пересмотрены.

1. Общие характеристики

Z=24

A=49.946 044 ± 0.000 001

A_{wr}=49.516 938 ± 0.000 001

Содержание в естественной смеси: - 4.345%

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | E _{порог.} , МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|---------|----------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | (n,n') | -0.7833 | 0.7991 | Cr-50 |
| 16 | (n,2n) | -12.9397 | 13.2010 | Cr-49(42m) |
| 22 | (n,na) | -8.5561 | 8.7289 | Ti-46 |
| 28 | (n,np) | -9.5900 | 9.7837 | V-49(330d) |
| 102 | (n,γ) | +9.2615 | 0.0 | Cr-51(27.70d) |
| 103 | (n,p) | -0.2557 | 0.2608 | V-50 |
| 104 | (n,d) | -7.3655 | 7.5142 | V-49(330d) |
| 105 | (n,t) | -12.6627 | 12.9184 | V-48(15.97d) |
| 106 | (n,He3) | -8.6301 | 8.8044 | Ti-48 |
| 107 | (n,a) | +0.3213 | 0.0 | Ti-47 |

| | | | | |
|-----|--------|---------|--------|-------|
| 111 | (n,2p) | -8.2057 | 8.3714 | Ti-49 |
|-----|--------|---------|--------|-------|

Схема уровней: (согласно оценке JEFF-3.1)

| MT | LEVEL ENERGY (MEV) | SPIN-PARITY |
|----------|--------------------|-------------|
| | 0.0 | 0+ |
| 51 | 1.4793 | 2+ |
| 52 | 2.5018 | 4+ |
| 53 | 2.8243 | 2+ |
| 54 | 2.9535 | 1+ |
| 55 | 2.9942 | 0+ |
| 56 | 3.0909 | 2+ |
| 57 | 3.3216 | 2+ |
| 58 | 3.4805 | 3+ |
| 91(cont) | 3.5813 | |

Радиоактивность: не радиоактивен.

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 0^+$;

2.2. Радиус рассеяния: $R = 0.640 \cdot 10^{-12}$ см.

2.3. Область разрешенных резонансов.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 1. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 1. Резонансные свойства Cr-50.

| Оценка | Граница области RRR, keV | σ_γ (2200), барн | G-factor | I_γ , барн |
|------------|--------------------------|------------------------------|----------|-------------------|
| ENDF/B | 792 | 15.93 | 1.00006 | 7.45 |
| JENDL | 600 | 16.03 | 1.00006 | 7.47 |
| Mughabghab | | 15.9 ± 0.2 | 1.0002 | 7.8 ± 0.4 |

Из приведенной в таблице 1 информации видно, что обе оценки согласуются с рекомендациями Мухабхаба. Несколько лучшее согласие с оцененным значением сечения захвата из компиляции Мухабхаба имеет оценки ENDF/B.

В таблице 2 для нескольких энергетических участков приводится сравнение нарастающих сумм резонансов.

Таблица 2 – Сравнение числа резонансов.

| Система уровней | S-wave | P-wave | D-wave | Сумма |
|-----------------|--------|--------|--------|------------|
| JENDL | | | | |
| до 600 кэВ | 42 | 70 | 2 | 112 |
| ENDF/B | | | | |
| до 600 кэВ | 40 | 67 | 77 | 184 |
| до 800 кэВ | 25 | 136 | 41 | 202 |

Из приведенной в таблице 2 информации следует, что в оценке ENDF/B число резонансных уровней до 600 кэВ возросло по сравнению с оценкой JENDL. Далее, плотность резонансов всех систем, разрешенных от 600 до 800 кэВ выше, чем в области энергий ниже 600 кэВ. Таким образом, в оценке ENDF/B область разрешенных резонансов расширена обосновано.

ВЫВОДЫ:

Из проведенного сравнения следует, что для РОСФОНДА предпочтительнее использовать оценку параметров разрешенных резонансов из ENDF/B.

3. Сечения нейтронных реакций

3.1. Полное сечение

На рисунке 1 представлены энергетический ход сечения полного взаимодействия из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1), переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотеки JENDL-3.3. в области резонансных энергий 100 эВ - 1 МэВ.

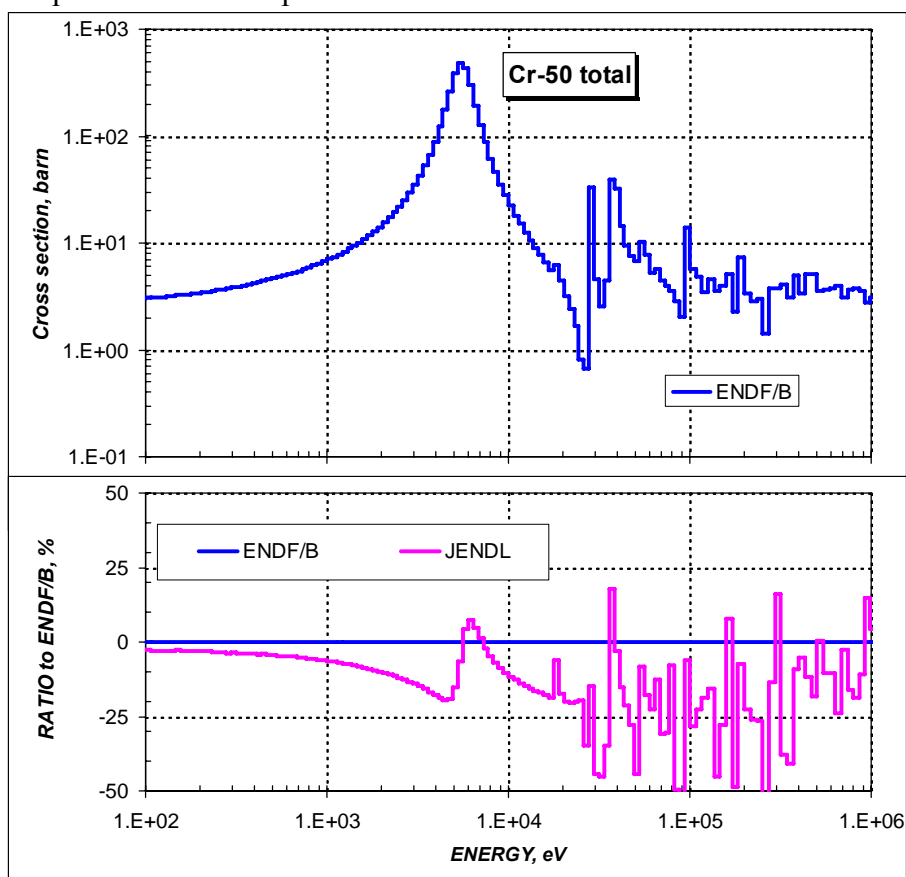


Рисунок 1 – Ход полного сечения Cr-50 в области энергий 100 эВ – 1 МэВ.

Из рисунка 1 видно, что в резонансной области энергий ~ до 800 кэВ различия в полном сечении достигает 20-25%. Оно связано, главным образом, с полнотой набора резонансных параметров, описывающих резонансное взаимодействие нейтронов с нуклидом.

Ниже, на рисунке 2 показан аналогичный ход полного сечения в области энергии 1 МэВ - 10 МэВ.

Отметим, что сечения из библиотеки БРОНД-2 не рассматривались, поскольку при ее компиляции не учитывались экспериментальные данные, выполненные с высоким разрешением в последующие после оценки годы.

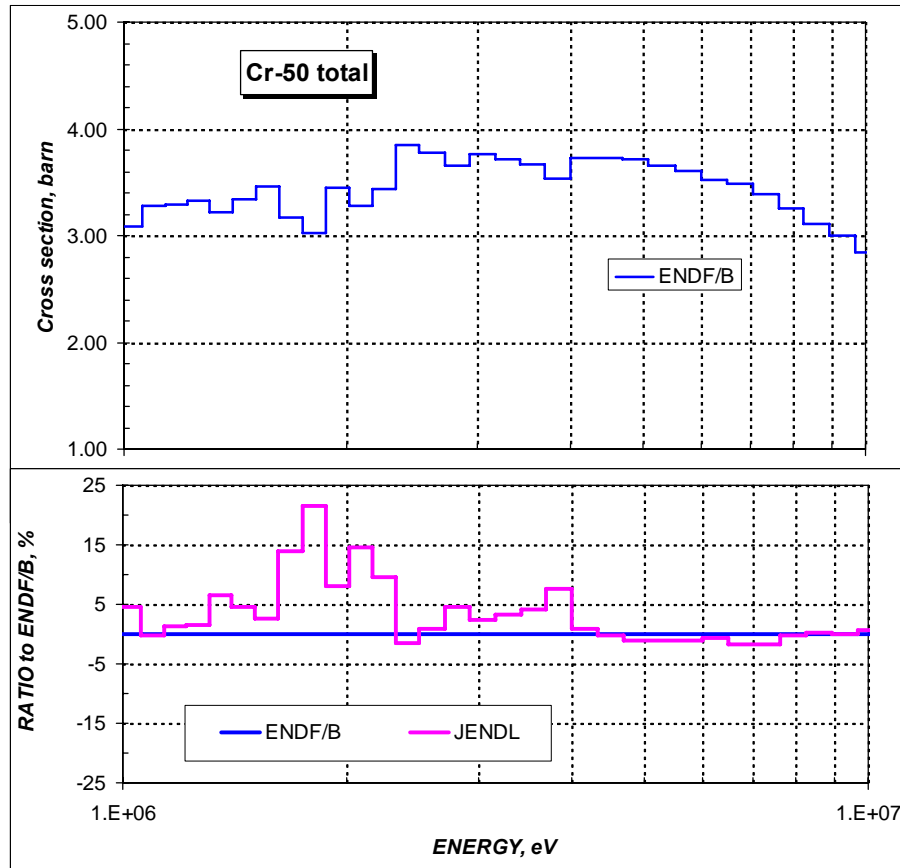


Рисунок 2 – Ход полного сечения Cr-50 в области энергий 1 МэВ – 10 МэВ.

Из представленной на рисунке 2 информации видно, что различия между JENDL и ENDF/B-VI достигают до 15 %. Доступной экспериментальной информации в этой области энергий не оказалось с тем, чтобы установить правильность той или иной оценки.

В области энергий выше 10 МэВ имеется только один эксперимент по измерению полного сечения. Сравнение оцененных сечений с экспериментом приведено на рисунке 3.

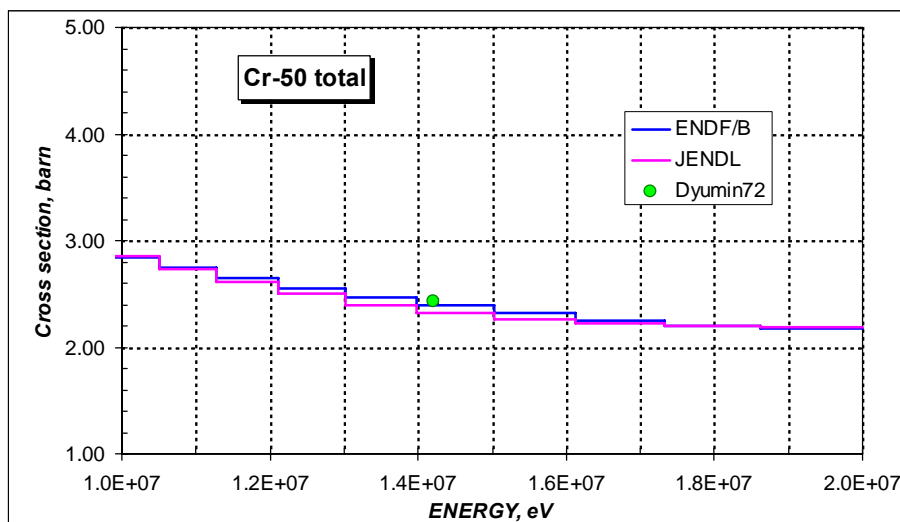


Рисунок 3 – Ход полного сечения Cr-50 в области энергий 10 – 20 МэВ.

Из приведенного на рисунке 3 сравнения видно, что оценка ENDF/B согласуется с экспериментом, в то время как оценка JENDL проходит ниже экспериментальной точки.

ВЫВОДЫ:

Таким образом, полное сечение из оценки ENDF/B является более предпочтительным, чем из оценки JENDL.

3.2. Сечение радиационного захвата

На рисунке 4 представлены энергетический ход сечения радиационного захвата нейтронов из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1), переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотеки JENDL-3.3. в области энергий 10 кэВ -10 МэВ. Там же приведены экспериментальные данные, полученные в 2002 году.

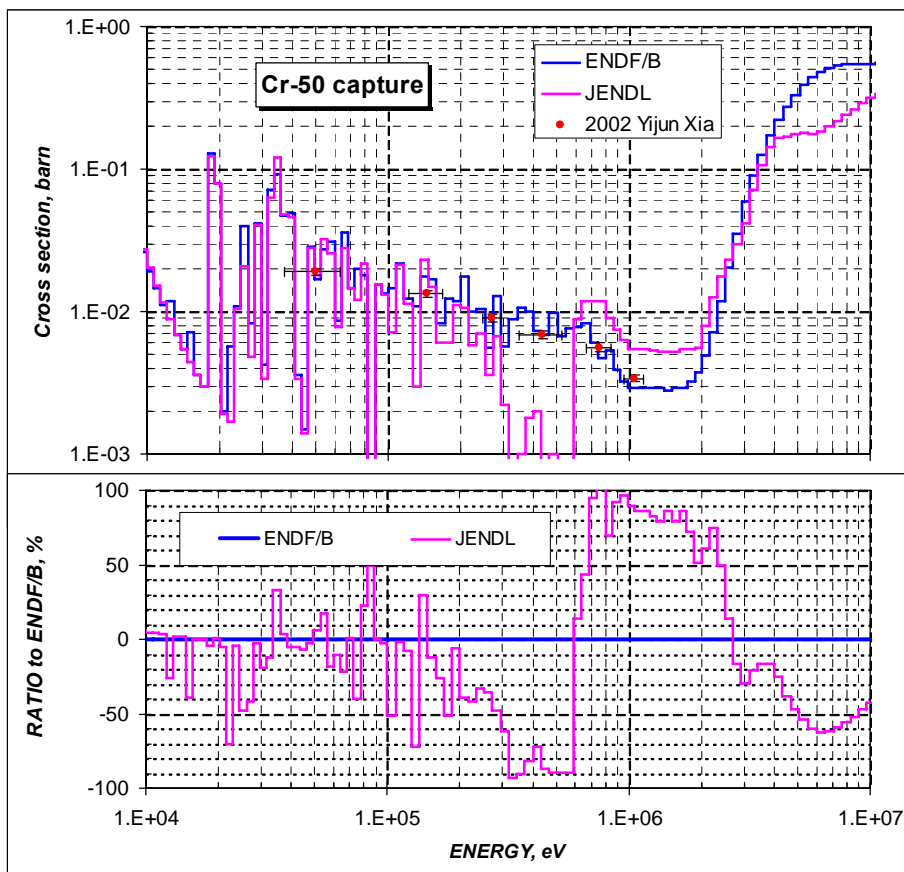


Рисунок 4 – Ход сечения радиационного захвата нейтронов на Cr-50 в области энергий 10 кэВ – 10 МэВ.

Из приведенного на рисунке 4 сравнения видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются с сечением захвата из ENDF/B. Оценка JENDL не соответствует экспериментальным данным.

ВЫВОДЫ:

Таким образом, и сечение радиационного захвата из оценки ENDF/B является более предпочтительным, чем из JENDL.

3.3. Сечение неупругого рассеяния

На рисунке 5 показан энергетический ход сечения неупругого рассеяния нейтронов из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1) и из библиотеки JENDL-3.3. в области энергий выше 800 кэВ - 20 МэВ. В этой области энергий имеется лишь один набор экспериментальных данных, выполненный Ван Паттером в 1962 году.

Из приведенного на рисунке 5 сравнения видно, что в области энергий, где имеются экспериментальные данные, оценки неплохо согласуются друг с другом, при этом, ход сечения оценки JENDL вблизи порога реакции более пологий, чем у ENDF/B. В начальной области энергий оценка JENDL отображает структуру сечения, в то время, как в оценке ENDF/B сечение имеет гладкий характер.

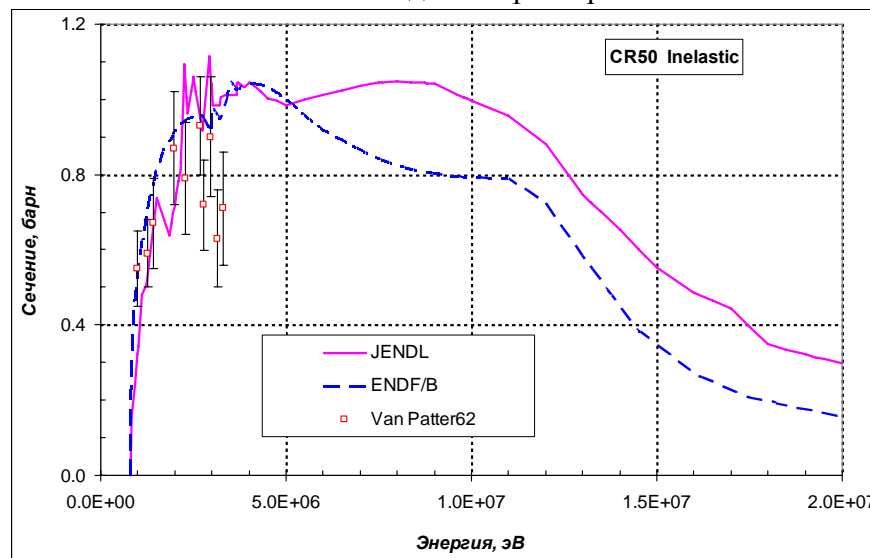


Рисунок 5 – Ход сечения неупругого рассеяния нейтронов на Cr-50.

В области энергий выше 5 МэВ между оценками имеется принципиальное расхождение в поведении сечения. Для разрешения этого противоречия было бы достаточно иметь одну точку в районе традиционных экспериментальных энергий ~14 МэВ.

ВЫВОДЫ:

Имеющиеся экспериментальные данные не позволяют определить наиболее достоверное сечение неупругого рассеяния нейтронов на Cr-50.

3.4. Сечение реакции (n,2n)

На рисунке 6 показан энергетический ход сечения реакции (n,2n) из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1) и из библиотеки JENDL-3.3. в области энергий выше 13 - 20 МэВ. В этой области энергий имеется достаточно много наборов экспериментальных данных, выполненных различными авторами в разное время.

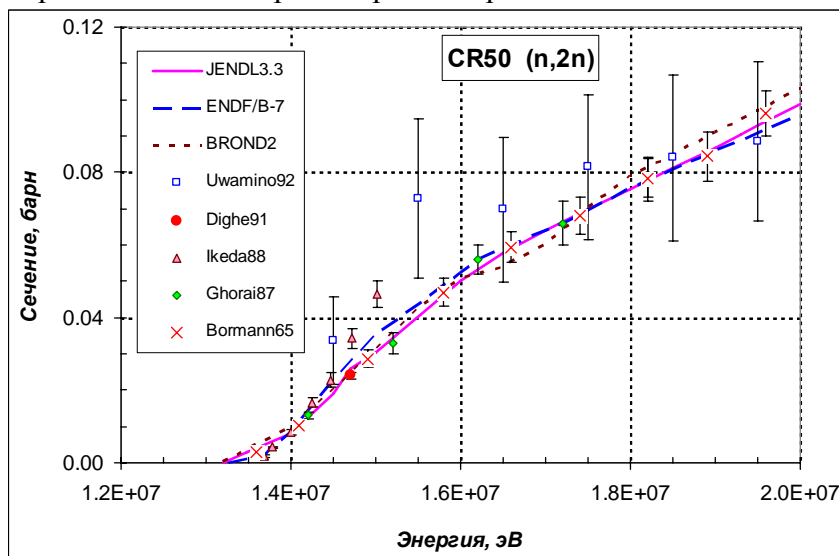


Рисунок 6 – Ход сечения реакции (n,2n) на Cr-50.

Из приведенного на рисунке 6 сравнения видно, что в целом, оценки неплохо согласуются друг с другом и с имеющимися экспериментальными данными.. Вызывают удивление экспериментальные данные, выполненные в 1992 году группой Увамино и др. тем обстоятельством, что им приписаны очень большие погрешности.

ВЫВОДЫ:

Имеющиеся экспериментальные данные не позволяют определить наиболее достоверное сечение реакции (n,2n) на Cr-50.

Заключение

На основе проведенного анализа параметров разрешенных резонансов и наиболее важных нейтронных сечений, в библиотеку РОСФОНД'а для хрома-50 рекомендуется принять оценку нейтронных данных из библиотеки JEFF-3.1~ ENDF/B-VII. В JEFF нейтронные данные приводятся до 20 МэВ, в то время как оценка ENDF/B содержит нейтронные данные до 150 МэВ.

Ковариационные данные следует исключить. Они будут анализироваться в дальнейшем.

Автор рекомендации

Кошечев В.Н.

24.2. Хром-51

Радиоактивен ($T_{1/2}=27.70$ дн.). Распадается путем захвата орбитального электрона в ванадий-51.

Полных наборов нейтронных данных нет. Последняя оценка нейтронных сечений содержится в EAF-2003. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Заключение

В РОСФОНД принять оценку EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

24.3. Хром-52

Оцененные данные рассматриваются в диапазоне энергий до 20 МэВ. Различные модификации, выполненные выше 20 МэВ, не комментируются.

Экспериментальные данные, используемые при сравнении с оцененными кривыми, взяты из интерактивной библиотеки EXFOR-CINDA (Database and Retrieval System, version 1.80, June 2005).

Ниже рассматриваются три современные оценки нейтронных данных, а именно – ENDF/B-VII bethal version, JEFF-3.1 и JENDL-3.3. По каждой оценке приводятся краткие пояснения. В библиотеке ФОНД-2.2 находится оценка из БРОНД-2.2, которая явно проигрывает вышеупомянутым оценкам. В дальнейшем сечения из библиотеки БРОНД-2 не рассматривались, поскольку при ее компиляции не учитывались экспериментальные данные, выполненные с высоким разрешением в последующие после оценки годы.

ENDF/B

Последняя версия (ENDF/B-VIIb1) содержит оценку ORNL, выполненную в 1989 году авторским коллективом: D. Larson.

Основные моменты:

Используются программы DWUCK, в которой ядерная модель описывается THE DISTORTED WAVE BORN APPROXIMATION (DWBA) и программа TNG, в которой используется формализм Хаузера-Фешбаха.

С помощью TNG получены угловые и энергетические распределения частиц, испускаемых в реакциях по модели компаунд ядра и предравновесного процесса. При этом обеспечивается согласованность между всеми реакциями и обеспечивается энергетический баланс оцененных данных.

Область резонансных энергий от 1.E-5 эВ до 980 кэВ. Резонансные параметры для формализма Райха-Мура получены на основе частного сообщения группы Бруссегана и др. Резонансные параметры подгонялись под результаты работы Харви и Агравела (1988). В области энергий 375 – 980 кэВ в захват добавляется подложки (MF3, MT102) для согласования с усредненными экспериментальными данными.

Полное сечение выше 980 кэВ получено при анализе нескольких наборов измерений с высоким разрешением, которые также использовались и при получении резонансных параметров.

Сечения десяти уровней неупругого рассеяния получены при помощи программы TNG, в которой учитывается вклад прямых процессов с подгонкой под экспериментальные данные. Сечение континуума уровней получено также при помощи TNG.

Сечение радиационного захвата выше 980 кэВ получено на основе расчетов по TNG программе.

Сечение реакции (n,2n) взято из оценки Хораи и др.(1987) и Икеда и др.(1988).

Сечения реакций с вылетом заряженных частиц получены при помощи TNG расчетов. При этом учитывались немногочисленные экспериментальные данные.

JEFF-3.1

В библиотеке содержится новая оценка нейтронных данных для Cr-52. Авторы: С.Тагесен, Х.Вонах (IRK Vienna) и О.Боулэнд (CEA Cadarache).

Оценка резонансных параметров выполнена по программе SAMMY на основе большого набора доступных экспериментальных данных, как по измерению сечения захвата, так и по полному пропусканию. Полученный набор резонансных параметров описывает сечения взаимодействия с нейтронами в области энергий от 1.E-5 эВ до 1.2 МэВ. В области резонансных энергий нет никакой подложки па пропуски резонансов.

В области энергий выше 1.2 МэВ сечения рассчитывались по программе GLUCs с использованием экспериментальных данных с высоким разрешением для натурального хрома, главным образом данные Ларсона (1996).

Угловые распределения нейтронов до 1 МэВ получены с помощью резонансных параметров и представлены разложениями в ряд по полиномам Лежандра. Выше 1 МэВ были использованы переоцененные данные из EFF-2.4.

Энерго-угловые распределения нейтронов для всех приведенных реакций протестированы на результатах бенчмарк экспериментов.

Сечения, угловые и энергетические распределения фотонов получены с помощью расчетов по программе TNG.

JENDL-3.3

В основе лежит оценка Асами, выполненная для JENDL-3 в 1987 году. В 1988 году проведена небольшая модификация данных, а именно $mf/mt=3/107$.

В 1993 году для версии JENDL-3.2 часть данных была переоценена.

В 2000 году данные переоценены Асами, а в 2001 году скомпилированы K.Shibata (JAERI) для последующей версии библиотеки JENDL-3.3. Изменения коснулись данных в следующих разделах

MF2

MT151 – резонансные параметры пересмотрены. Область резонансных параметров увеличена до 855 кэВ. Используется формализм Райха- Мура.

MF1

MT2 пересчитано с учетом баланса сечений;

MT16, 22, 28, 102, 107 сечения модифицированы;

104, 105, 106, сечения оценены заново;

111, 203, 207, сечения оценены заново;

MF4, MT16, 22, 28, 91 исключены.

MF5, MT16, 22, 28, 91 исключены.

MF6

MT16, 22, 28, 91, взяты из JENDL fusion file;

203, 207 взяты из JENDL fusion file.

MF12, MT16-107 оценены заново

MF14, MT16-107 изотропное распределение

MF15, MT16-107 оценены заново

MF33, MT1-107 взяты из JENDL-3.3.

MF34, MT2 взяты из JENDL-3.3.

1. Общие характеристики

$Z=24$

$A=51.940\ 507\ 5 \pm 0.000\ 000\ 8$

$A_{wr}=51.494\ 313\ 6 \pm 0.000\ 000\ 8$

Содержание в естественной смеси: - 83.789%

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт [*]) |
|----|---------|--------|---------------------------|-----------------------------|
|----|---------|--------|---------------------------|-----------------------------|

| | | | | |
|-----|----------------|----------|---------|---------------|
| 4 | (n,n') | -1.4340 | 1.4618 | Cr-52 |
| 16 | (n,2n) | -12.0384 | 12.2722 | Cr-51(27.70d) |
| 22 | (n,na) | -9.3521 | 9.5337 | Ti-46 |
| 28 | (n,np) | -10.5050 | 10.7090 | V-51 |
| 102 | (n, γ) | +7.9401 | 0.0 | Cr-53 |
| 103 | (n,p) | -3.1956 | 3.2577 | V-52(3.75m) |
| 104 | (n,d) | -8.2805 | 8.4413 | V-51 |
| 105 | (n,t) | -13.0737 | 13.3276 | V-50(1.4E7y) |
| 106 | (n,He3) | -10.8414 | 11.0519 | Ti-50 |
| 107 | (n,a) | -1.2097 | 1.2332 | Ti-49 |
| 111 | (n,2p) | -12.1947 | 12.4315 | Ti-51(5.8m) |

Схема уровней: (согласно оценке JENDL-3.3)

| MT | LEVEL ENERGY (MEV) | SPIN-PARITY |
|----------|--------------------|-------------|
| | 0.0 | 0+ |
| 51 | 1.4341 | 2+ |
| 52 | 2.3696 | 4+ |
| 53 | 2.6470 | 0+ |
| 54 | 2.7677 | 4+ |
| 55 | 2.9648 | 2+ |
| 56 | 3.1138 | 6+ |
| 57 | 3.1617 | 2+ |
| 58 | 3.4152 | 4+ |
| 59 | 3.4722 | 3+ |
| 60 | 3.6158 | 5+ |
| 61 | 3.7000 | 2+ |
| 62 | 3.7717 | 2+ |
| 91(cont) | 3.8000 | |

Радиоактивность: не радиоактивен.

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 0^+$;

2.2. Радиус рассеяния: $R = 0.640 \cdot 10^{-12}$ см.

2.3. Область разрешенных резонансов.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 3. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 3. Резонансные свойства Cr-52.

| Оценка | Граница области RRR, keV | $\sigma_\gamma(2200)$, барн | G-factor | I_γ , барн |
|------------|--------------------------|------------------------------|----------|-------------------|
| ENDF/B-VII | 980 | 0.745 | 1.0001 | 0.440 |
| JEFF-3.1 | 1200 | 0.760 | 1.0001 | 0.451 |
| JENDL-3.3 | 855 | 0.775 | 1.0001 | 0.455 |
| Mughabghab | | 0.76 ± 0.06 | 1.0003 | 0.50 ± 0.06 |

Из приведенной в таблице 3 информации видно, что все оценки согласуются с рекомендациями Мухабхаба. Несколько лучшее согласие с оцененным значением сечения захвата из компиляции Мухабхаба имеет оценки JEFF-3.1.

На рисунке 7 приводятся графики нарастающих сумм резонансов для S, -P, и D-ВОЛН.

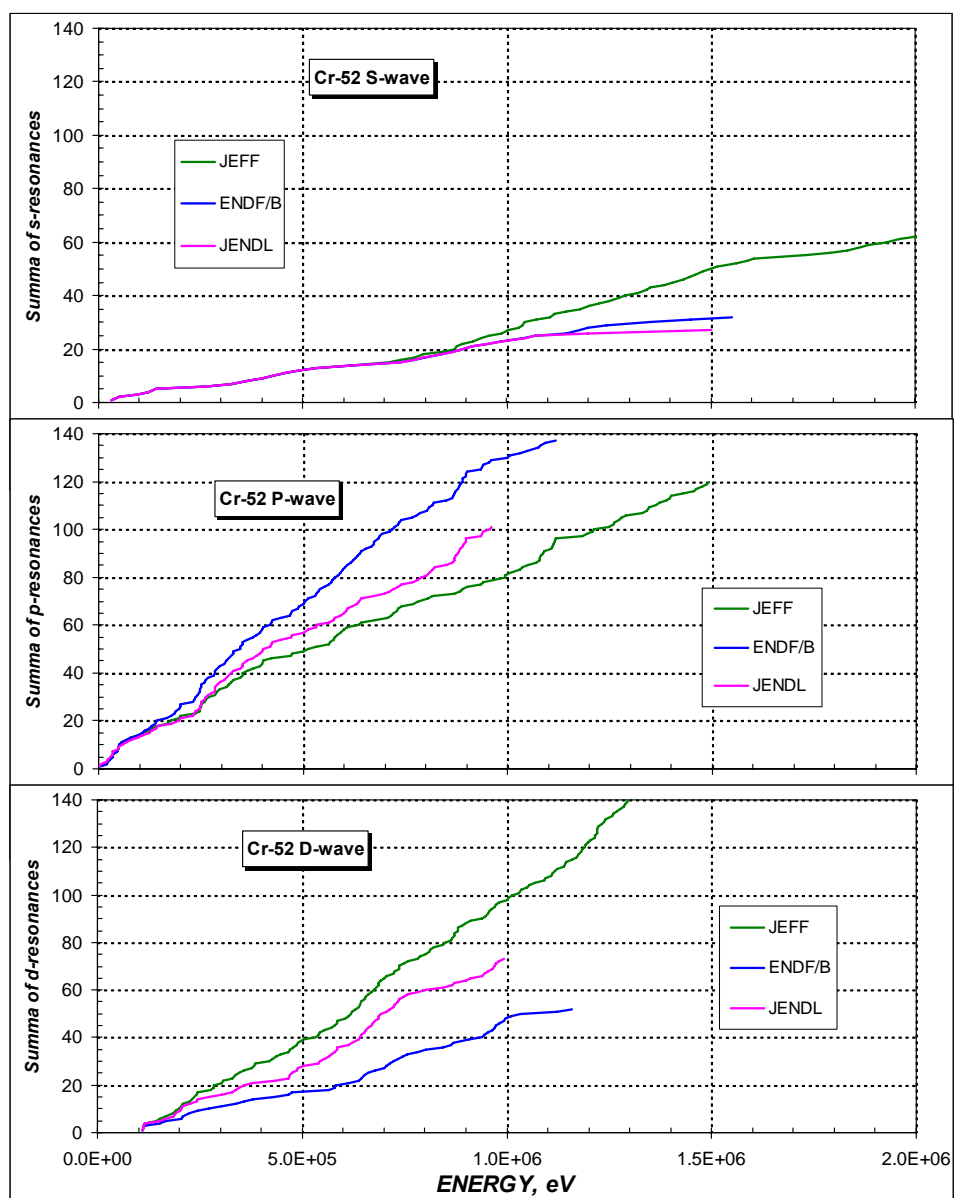


Рисунок 7 – Нарастающие суммы резонансов для Cr-52.

Из приведенного на графике 7 сравнения видно, что наиболее полный набор резонансных параметров находится в JEFF. Во-вторых, начиная с 700 кэВ, число S-резонансов в JEFF больше чем в ENDF/B и JENDL. Различие в числе резонансов увеличивается с ростом энергии, т.е. пропуски резонансов в отмеченной области становятся не столь существенными, как в оценках ENDF/B или JENDL. Что касается идентификации их в оценке JEFF, то разделение резонансов на S-, P- и D-резонансы во всех оценках выполнено не совсем корректно.

Рассмотрим энергетическую зависимость сечений, восстановленную из набора параметров разрешенных резонансов. На рисунке 8 представлено сравнение оцененных кривых и доступных экспериментальных данных в начале области резонансных энергий от 40 – 150 кэВ.

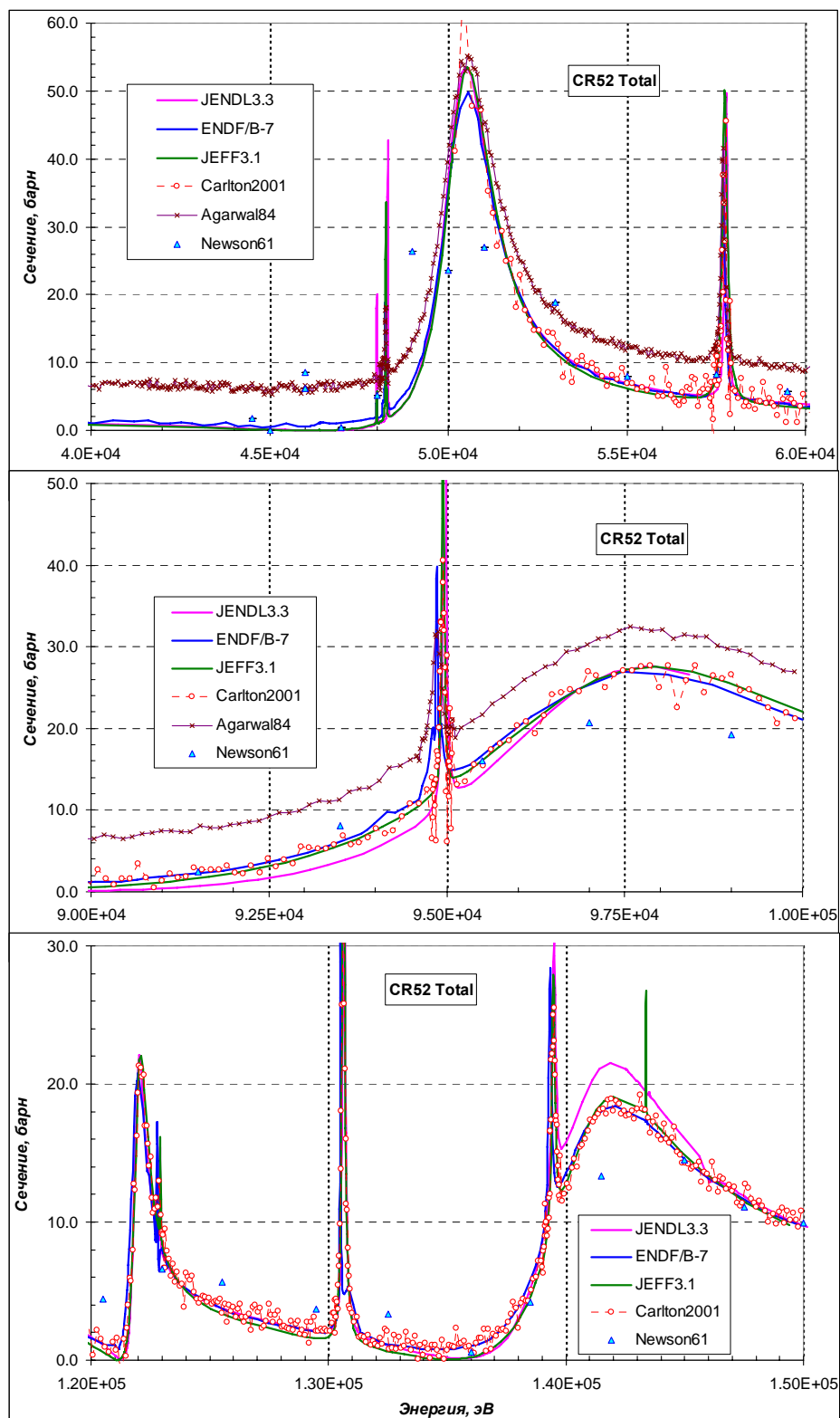


Рисунок 8 – Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия на Cr-52 с экспериментальными данными в области энергий до 150 кэВ.

Из приведенного на рисунке 8 сравнения видно, что эксперимент Агарвала (1984 г.) вероятно в базе экспериментальных данных EXFOR содержит ошибочные значения. Остальные экспериментальные данные (главным образом, это – эксперимент с высоким разрешением, выполненный группой Карлтона и др на установке LINAC(ORNL) в 2000 г.) лучшим образом согласуются с оценкой ENDF/B и JEFF.

На рисунке 9 показано сравнение оцененных сечений полного взаимодействия на Cr-52 с экспериментальными данными в середине области резонансных энергий от 300 до 600 кэВ.

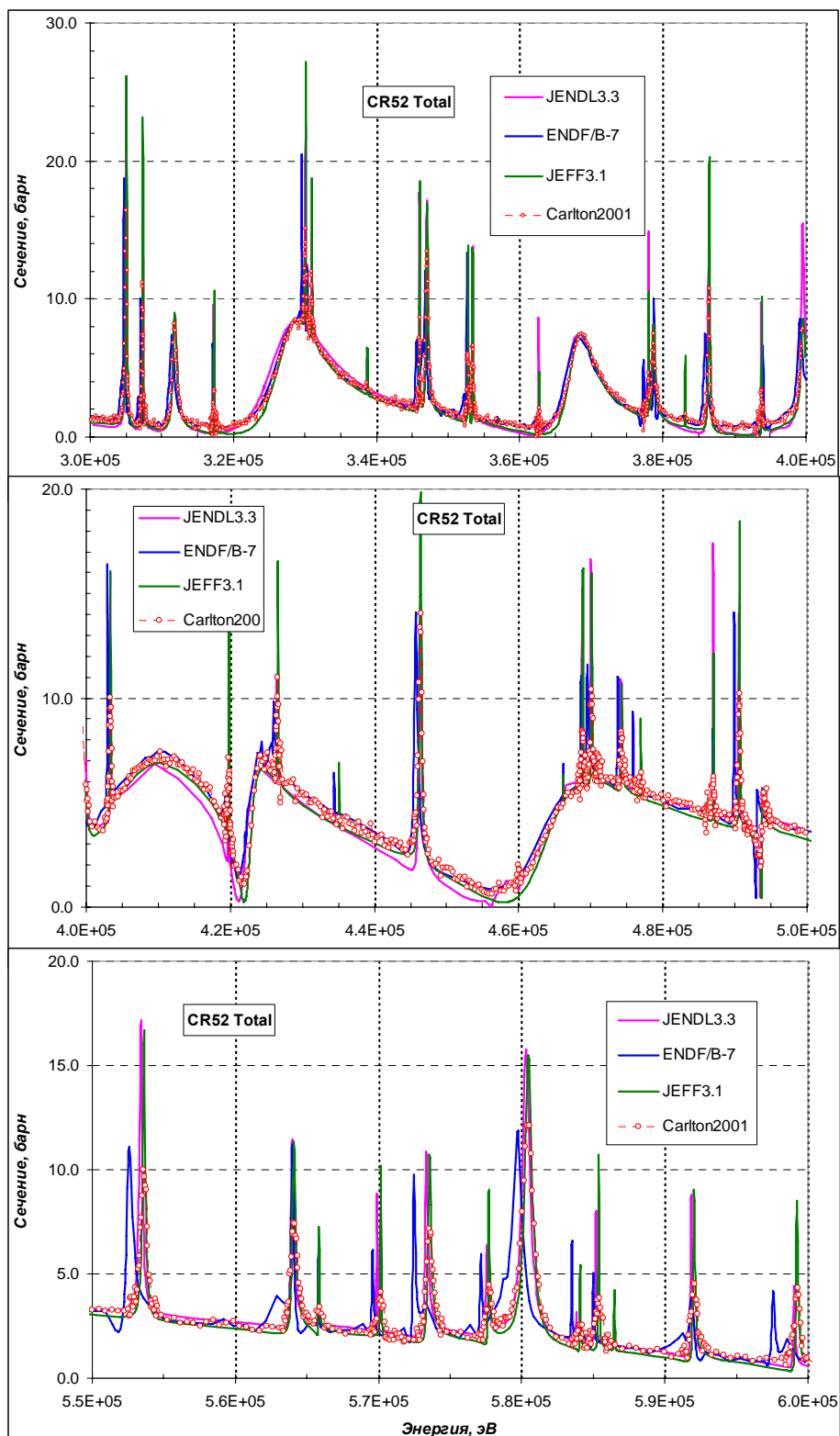


Рисунок 9 – Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия на Cr-52 с экспериментальными данными в области энергий 300 - 600 кэВ.

Из приведенного на рисунке 9 сравнения видно, что в этой области энергий полное сечение, восстановленное с помощью резонансных параметров из оценки JEFF,

согласуется с экспериментальными данными несколько лучше, чем аналогичные сечения, полученные из оценок ENDF/B и JENDL. В области энергий 550 -600 кэВ видно, что положение резонансных уровней в ENDF/B ошибочно.

Ниже, на рисунке 10 показано сравнение оцененных сечений полного взаимодействия на Cr-52 в верхней области резонансных энергий от 0.7 до 1.0 МэВ.

Из приведенного на рисунке 10 сравнения видно, что и в верхней области разрешенных резонансов оценка JEFF является предпочтительной.

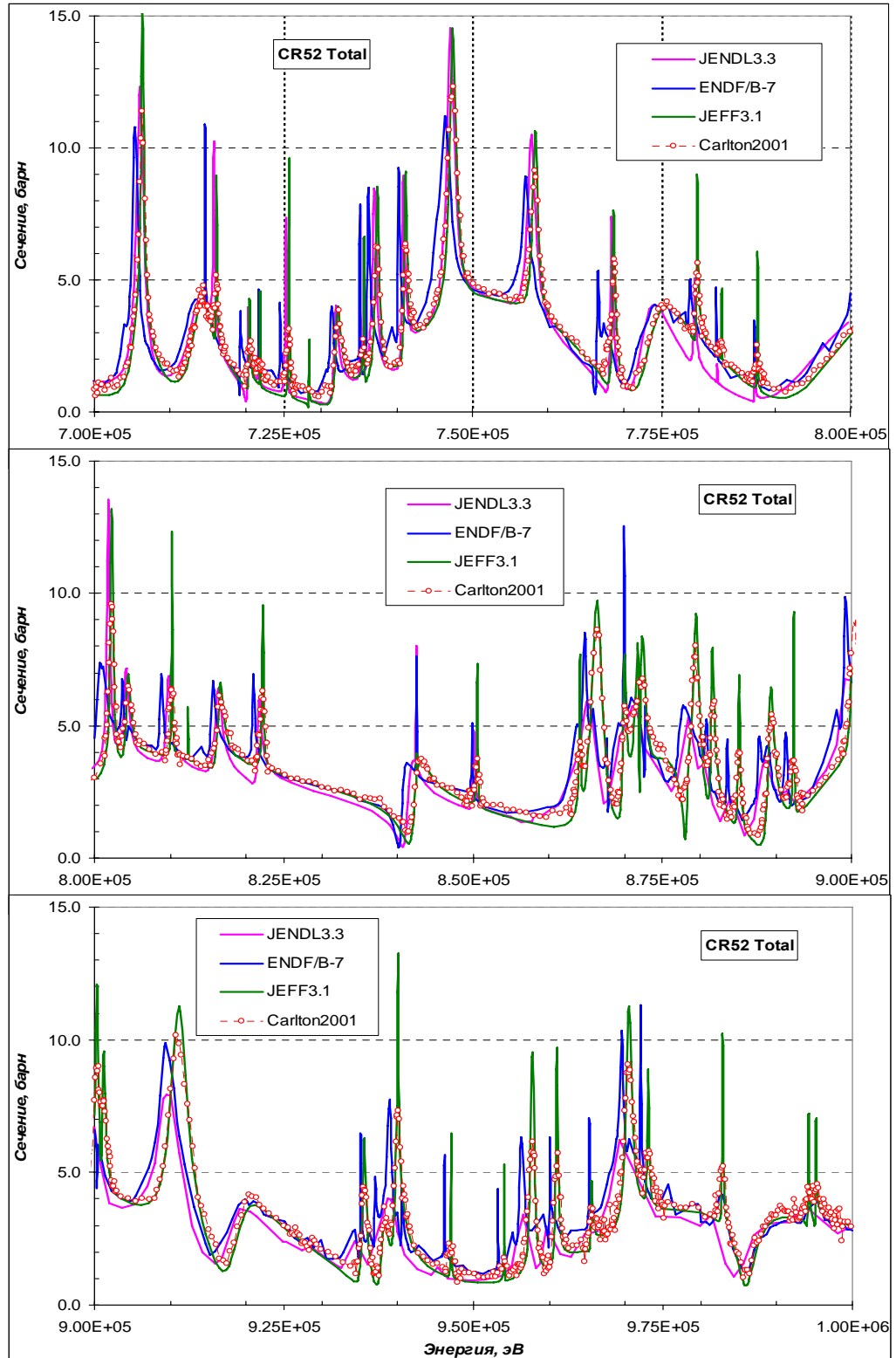


Рисунок 10 – Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия на Cr-52 в области энергий 700 кэВ – 1 МэВ.

Сравнение восстановленных сечений радиационного захвата на Cr-52 с имеющимися не многочисленными экспериментальными данными приведенное на рисунке 11 не позволяет отдать предпочтение той или иной оценке.

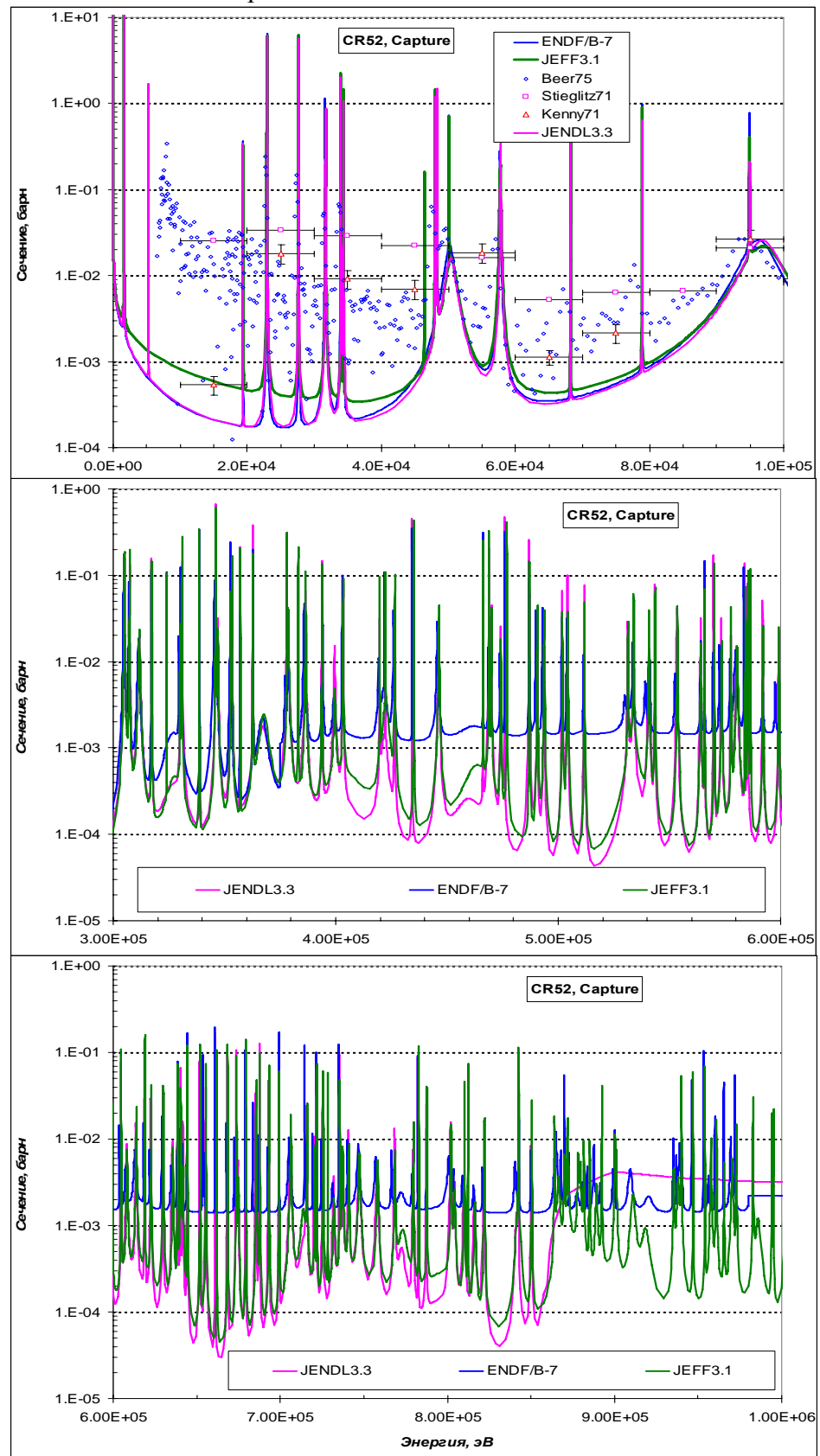


Рисунок 11 – Сравнение оцененных сечений радиационного захвата на Cr-52 в области резонансных энергий до 1 МэВ.

ВЫВОДЫ:

Из проведенного сравнения следует, что, оценка JEFF имеет не только большую привлекательность набора резонансных параметров оценки JEFF-3.1 в смысле полноты набора, но восстановленное сечение полного взаимодействия лучше других оценок согласуется с экспериментальными данными группы Карлтона. Для РОСФОНДА рекомендуется использовать оценку параметров разрешенных резонансов из JEFF-3.1.

3. Сечения нейтронных реакций

3.1. Полное сечение

На рисунке 12 представлено сравнение оцененных сечений полного взаимодействия Cr-52 из различных библиотек с экспериментальными данными в области энергий 5 - 20 МэВ.

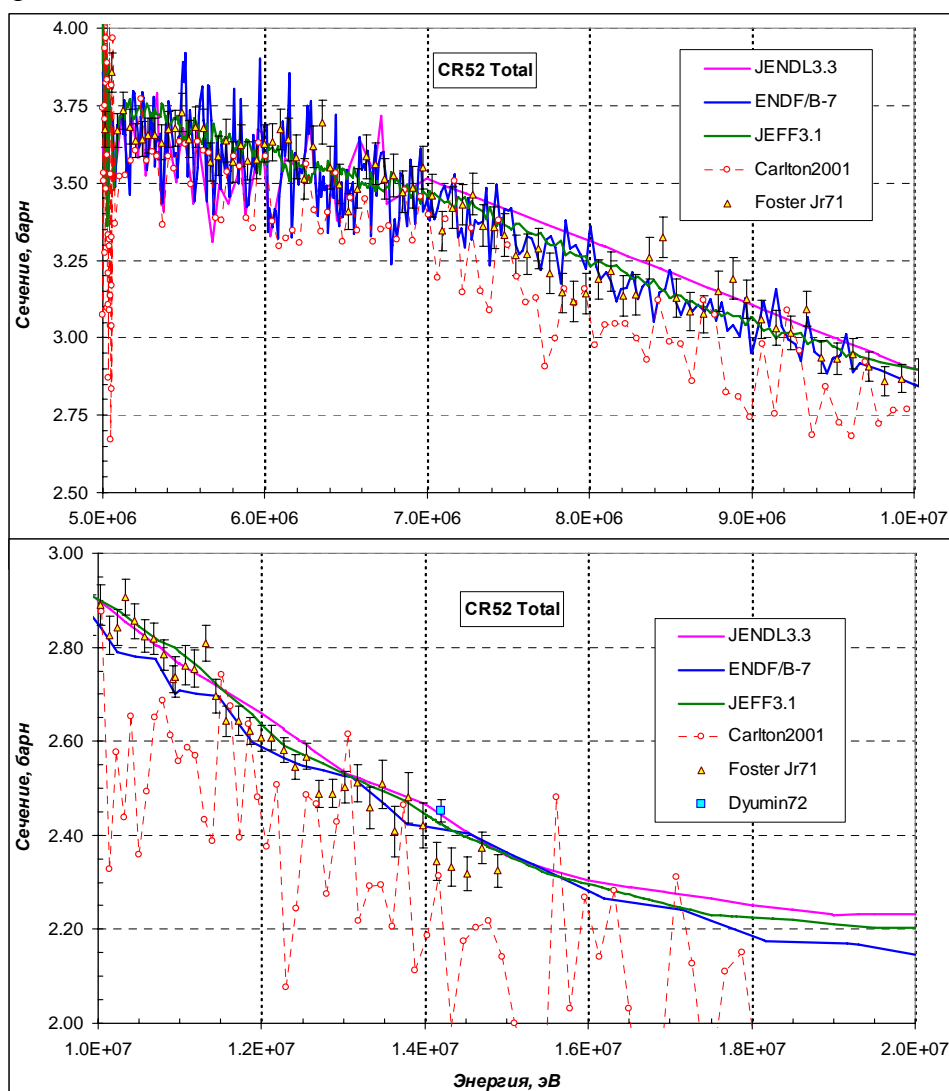


Рисунок 12 – Энергетическая зависимость полного сечения Cr-52 в области энергий 5 МэВ – 20 МэВ.

Из рисунка 12 видно, что в области высоких энергий оцененные сечения согласуются между собой лучше, нежели экспериментальные данные. В этой области энергий экспериментальные данные Карлтона и др. располагаются неожиданно низко. Прецизионное измерение Дюбина (1972) в точке 14.2 МэВ хорошо согласуется с

оценками JENDL и JEFF. Ниже, на рисунке 2 показан аналогичный ход полного сечения в области энергии 1 МэВ - 10 МэВ.

ВЫВОДЫ:

В области высоких энергий, имеющиеся экспериментальные данные не позволяют выделить наиболее достоверное сечение полного взаимодействия на Cr-52.

3.2 Сечение радиационного захвата

На рисунке 13 представлено сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов на Cr-52 из различных библиотек с экспериментальными данными в области энергий 1 - 20 МэВ.

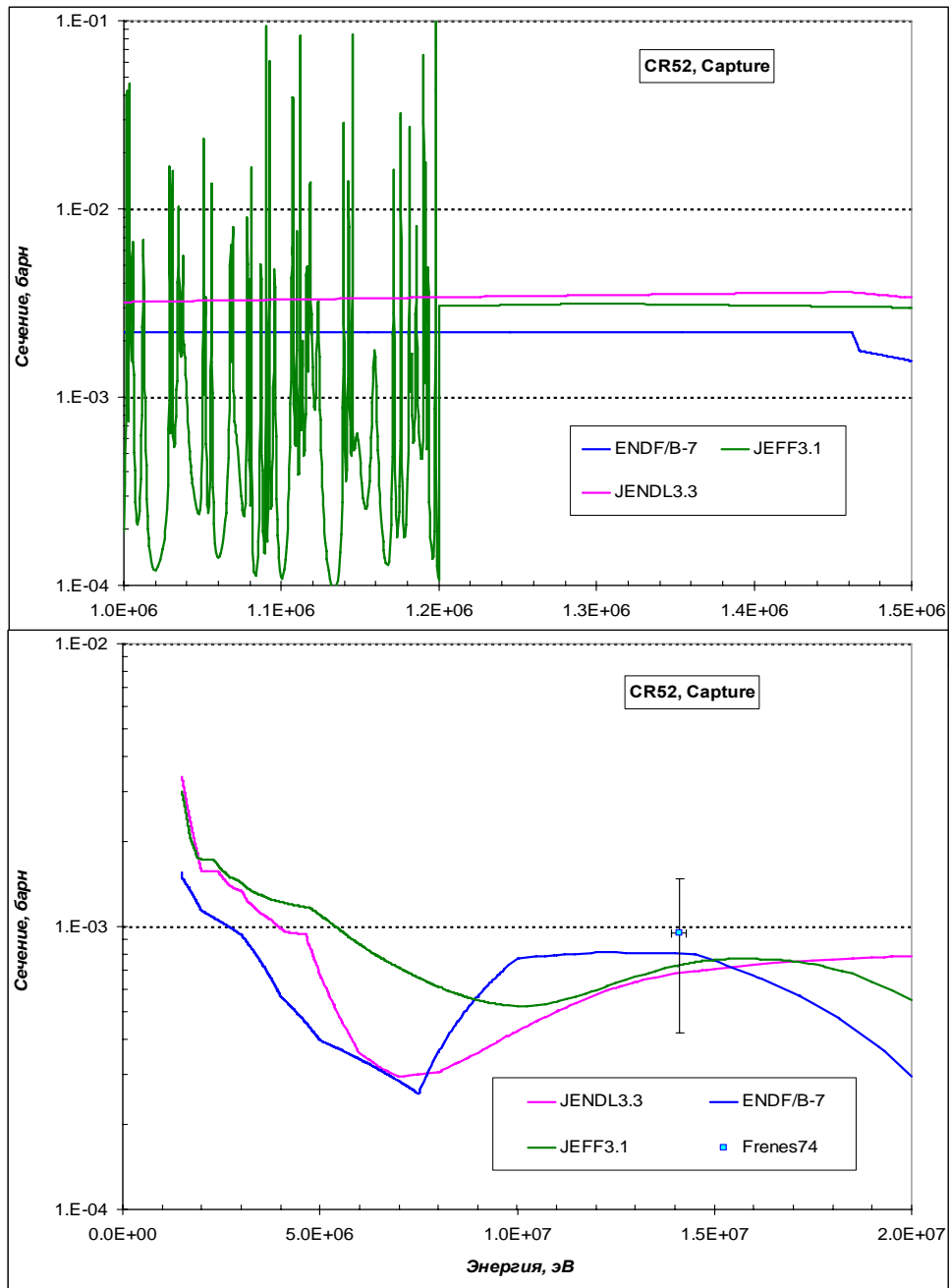


Рисунок 13 – Энергетическая зависимость сечения радиационного захвата нейтронов на Cr-52 в области энергий 1 МэВ – 20 МэВ.

Из приведенного на рисунке 13 сравнения видно, что в области высоких энергий оцененные сечения радиационного захвата согласуются между собой в области где

имеется одна экспериментальная точка. Если всему интервалу высоких энергий приписать погрешность единственного экспериментального измерения, то, в целом, оцененные сечения неплохо согласуются друг с другом.

ВЫВОДЫ:

В области высоких энергий, имеющиеся экспериментальные данные не позволяют выделить наиболее достоверное сечение радиационного захвата нейтронов на Cr-52.

3.3. Сечение неупругого рассеяния

На рисунке 14 представлено сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния нейтронов на Cr-52 с экспериментальными данными.

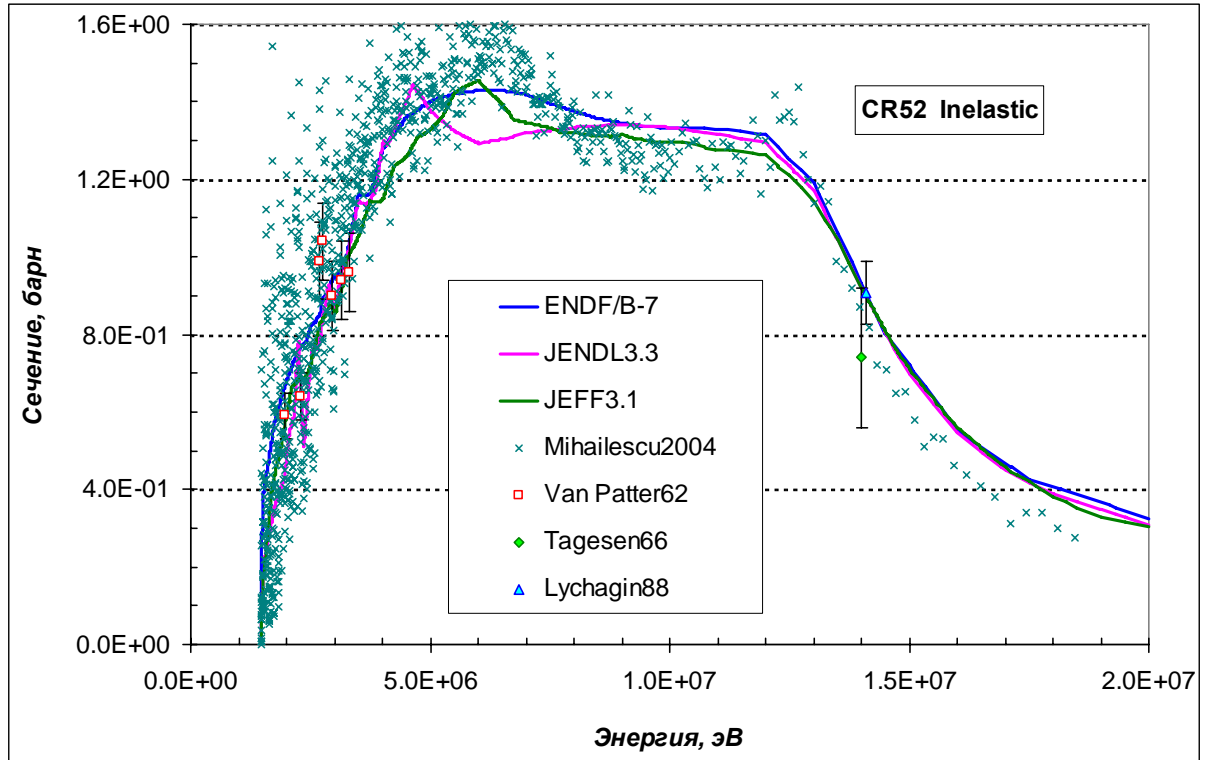


Рисунок 14 – Энергетическая зависимость сечения неупругого рассеяния нейтронов на Cr-52 в области энергий до 20 МэВ.

Из приведенного на рисунке 14 сравнения видно, что оцененные сечения неупругого рассеяния согласуются между собой лучше, чем наблюдаемый разброс экспериментальных данных. Наиболее свежие экспериментальные данные с высоким разрешением группы Михайлеску (2004 г.), вероятно, не были учтены при оценке сечения в рассматриваемых оценках. Учет их в дальнейшем может повысить точность сечения неупругого рассеяния на Cr-52.

ВЫВОДЫ:

Все оцененные сечения неупругого рассеяния хорошо согласуются с экспериментальными данными. Учет последних экспериментальных данных с высоким разрешением группы Михайлеску (2004 г) в дальнейшем может повысить точность сечения неупругого рассеяния на Cr-52.

3.4. Сечение реакции (n,2n)

На рисунке 15 показано сравнение оцененных сечений реакции (n,2n) с экспериментальными данными, выполненных различными авторами в разное время.

Из приведенного на рисунке 15 сравнения видно, что оцененные кривые хорошо согласуются друг с другом, в то время, как экспериментальные данные выше 16 МэВ различаются между собой до 20-30%.

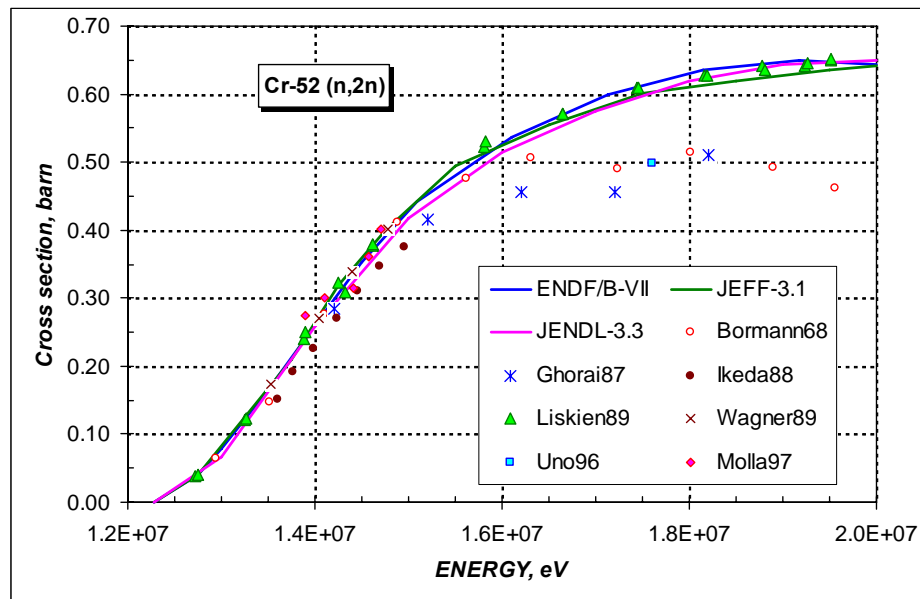


Рисунок 15 – Энергетическая зависимость сечения реакции (n,2n) на Cr-52.

ВЫВОДЫ:

Все оцененные сечения реакции (n,2n) хорошо согласуются между собой. Имеющиеся экспериментальные данные не позволяют выделить наиболее достоверное сечение реакции (n,2n).

3.5. Сечение реакции (n,p)

На рисунке 16 показано сравнение оцененных сечений реакции (n,p) с экспериментальными данными, выполненных различными авторами в разное время.

Из приведенного на рисунке 16 сравнения видно, что с имеющимися экспериментальными данными оптимально согласуется оценка JEFF, в то время, как оценка ENDF/B и JENDL на некоторых энергетических интервалах не согласуются с экспериментальными данными.

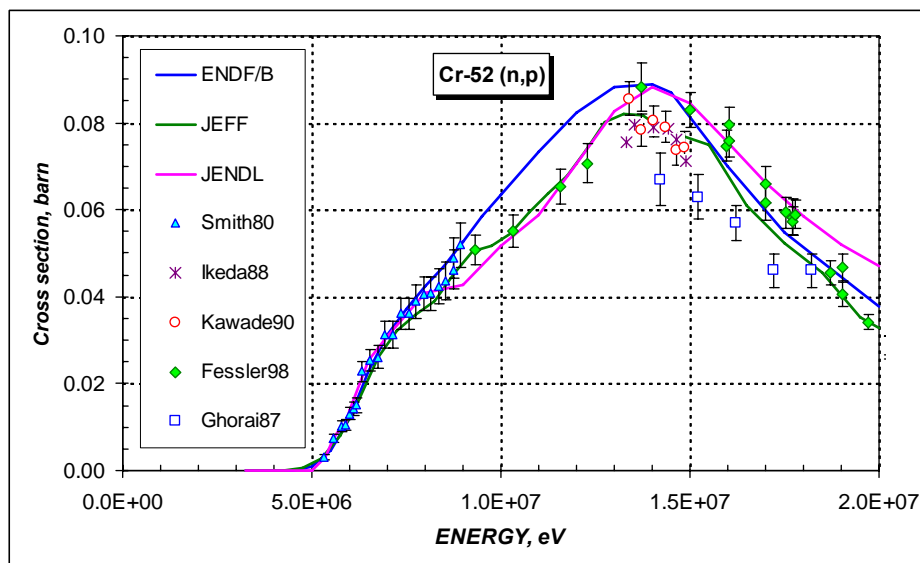


Рисунок 16 – Энергетическая зависимость сечения реакции (n,p) на Cr-52.

ВЫВОДЫ:

Оценка сечения реакции (n,p) из JEFF наилучшим образом согласуется с экспериментальными данными.

Заключение

На основе проведенного анализа параметров разрешенных резонансов и наиболее важных нейтронных сечений рекомендуется в библиотеку РОСФОНД'а для хрома-52 принять оценку нейтронных данных из библиотеки JEFF-3.1.

Автор рекомендации

Кощев В.Н.

24.4. Хром-53

Ниже рассматриваются две современные оценки нейтронных данных, а именно – ENDF/B-VII betha1 version и JENDL-3.3. По каждой оценке приводятся краткие пояснения. Отметим, что в библиотеке JEFF-3.1 находится оценка ENDF/B-VI.8=ENDF/B-VIIb1. В библиотеке ФОНД-2.2 находится оценка из БРОНД-2.2, которая явно проигрывает вышеупомянутым оценкам. В дальнейшем сечения из библиотеки БРОНД-2 не рассматривались, поскольку при ее компиляции не учитывались экспериментальные данные, выполненные с высоким разрешением в последующие после оценки годы.

ENDF/B

Последняя версия (ENDF/B-VIIb1) содержит оценку ORNL, выполненную в 1989 году авторским коллективом: D.Hetrick, D.Larson, N.Larson и C.Fu.

Основные моменты:

Используются программы DWUCK, в которой ядерная модель описывается THE DISTORTED WAVE BORN APPROXIMATION (DWBA) и программа TNG, в которой используется формализм Хаузера-Фешбаха.

С помощью TNG получены угловые и энергетические распределения частиц, испускаемых в реакциях по модели компаунд ядра и предравновесного процесса. При этом обеспечивается согласованность между всеми реакциями и обеспечивается энергетический баланс оцененных данных.

Область резонансных энергий от 1.E-5 эВ до 200 кэВ. Резонансные параметры для формализма Райха-Мура получены на основе частного сообщения группы Бруссегана и др. Резонансные параметры подгонялись под результаты работы Харви и Агравела (1988).

Полное сечение выше 200 кэВ получено при анализе нескольких наборов измерений с высоким разрешением, которые также использовались и при получении резонансных параметров.

Сечения уровней неупругого рассеяния получены при помощи программы TNG, в которой учитывается вклад прямых процессов с подгонкой под экспериментальные данные. Сечение континуума уровней получено также при помощи TNG.

Сечение радиационного захвата выше 200 кэВ получено на основе расчетов по TNG программе.

Сечение реакции (n,2n) и сечения реакций с вылетом заряженных частиц получены при помощи TNG расчетов. При этом учитывались немногочисленные экспериментальные данные.

JENDL-3.3

В основе лежит оценка Асами, выполненная для JENDL-3 в 1987 году. В 1988 году проведена небольшая модификация данных, а именно $mf/mt=3/107$.

В 1993 году для версии JENDL-3.2 часть данных была переоценена.

В 2000 году данные переоценены Асами, а в 2001 году скомпилированы К. Shibata (JAERI) для последующей версии библиотеки JENDL-3.3. Изменения коснулись данных в следующих разделах

MF2

MT151 – резонансные параметры пересмотрены. Область резонансных параметров увеличена до 245 кэВ. Используется формализм Райха- Мура.

MF1

| | | |
|------------|---------------------|---------------------------------------|
| | MT2 | пересчитано с учетом баланса сечений; |
| | MT28, 102, 103, 107 | сечения пересмотрены; |
| | 104, 105, 106, | сечения переоценены заново; |
| | 111, 203, 207, | сечения переоценены заново; |
| MF4, MF5 | MT16, 22, 28, 91 | данные исключены. |
| MF6 | | |
| | MT16, 22, 28, 91, | взяты из JENDL fusion file; |
| | 206, 207 | взяты из JENDL fusion file. |
| MF12, MF15 | MT16-107 | данные пересмотрены. |

1. Общие характеристики

$Z=24$

$A=52.940\ 649 \pm 0.000\ 001$

$A_{wr}=52.485\ 862 \pm 0.000\ 001$

Содержание в естественной смеси: - 9.500%

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|----------------|----------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | (n,n') | -0.5640 | 0.5747 | Cr-53 |
| 16 | (n,2n) | -7.9405 | 8.0918 | Cr-52 |
| 22 | (n,na) | -9.1514 | 9.3258 | Ti-49 |
| 28 | (n,np) | -11.1330 | 11.3447 | V-52(3.75m) |
| 102 | (n, γ) | 9.7193 | 0.0 | Cr-54 |
| 103 | (n,p) | -2.6403 | 2.6906 | V-53(1.6m) |
| 104 | (n,d) | -8.9085 | 9.0779 | V-52(3.75m) |
| 105 | (n,t) | -9.9617 | 10.1512 | V-51 |
| 106 | (n,He3) | -12.4048 | 12.6407 | Ti-51(5.8m) |
| 107 | (n,a) | 1.7903 | 0.0 | Ti-50 |
| 111 | (n,2p) | -12.3257 | 12.5601 | Ti-52(1.7m) |

Схема уровней: (согласно оценке JENDL-3.3)

| MT | LEVEL ENERGY (MEV) | SPIN-PARITY |
|----|--------------------|-------------|
| | 0.0 | 3/2- |
| 51 | 0.5640 | 1/2- |
| 52 | 1.0063 | 5/2- |

| | | |
|----------|--------|-------|
| 53 | 1.2895 | 7/2- |
| 54 | 1.5366 | 7/2- |
| 55 | 1.9736 | 5/2- |
| 56 | 2.1724 | 11/2- |
| 57 | 2.2330 | 9/2- |
| 58 | 2.3208 | 3/2- |
| 59 | 2.4531 | 3/2- |
| 60 | 2.6695 | 1/2- |
| 61 | 2.7720 | 5/2- |
| 62 | 2.8266 | 11/2- |
| 63 | 2.9930 | 7/2- |
| 91(cont) | 3.0500 | |

Радиоактивность: не радиоактивен.

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 3/2^-$

2.2. Радиус рассеяния: $R = 0.548 \cdot 10^{-12}$ см.

2.3. Область разрешенных резонансов.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 4. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 4. Резонансные свойства Cr-53

| Оценка | Граница области RRR, keV | $\sigma_\gamma(2200)$, барн | G-factor | I_γ , барн |
|------------|--------------------------|------------------------------|----------|-------------------|
| ENDF/B | 200 | 18.06 | 1.0001 | 8.41 |
| JENDL | 245 | 17.59 | 1.0001 | 8.35 |
| Mughabghab | | 18.2 ± 1.5 | 1.0003 | 8.9 ± 0.9 |

Из приведенной в таблице 1 информации видно, что обе оценки согласуются с рекомендациями Мухабхаба. Несколько лучшее согласие с оцененным значением сечения захвата из компиляции Мухабхаба имеет оценки ENDF/B.

На рисунке 17 приводятся графики нарастающих сумм резонансов для S, и P-волн.

Из приведенного на графике 17 сравнения видно, что наиболее полный набор резонансных параметров находится в ENDF/B. Особенно это касается количества P-резонансов.

ВЫВОДЫ:

Из проведенного сравнения следует, что для РОСФОНДА предпочтительнее использовать оценку параметров разрешенных резонансов из ENDF/B.

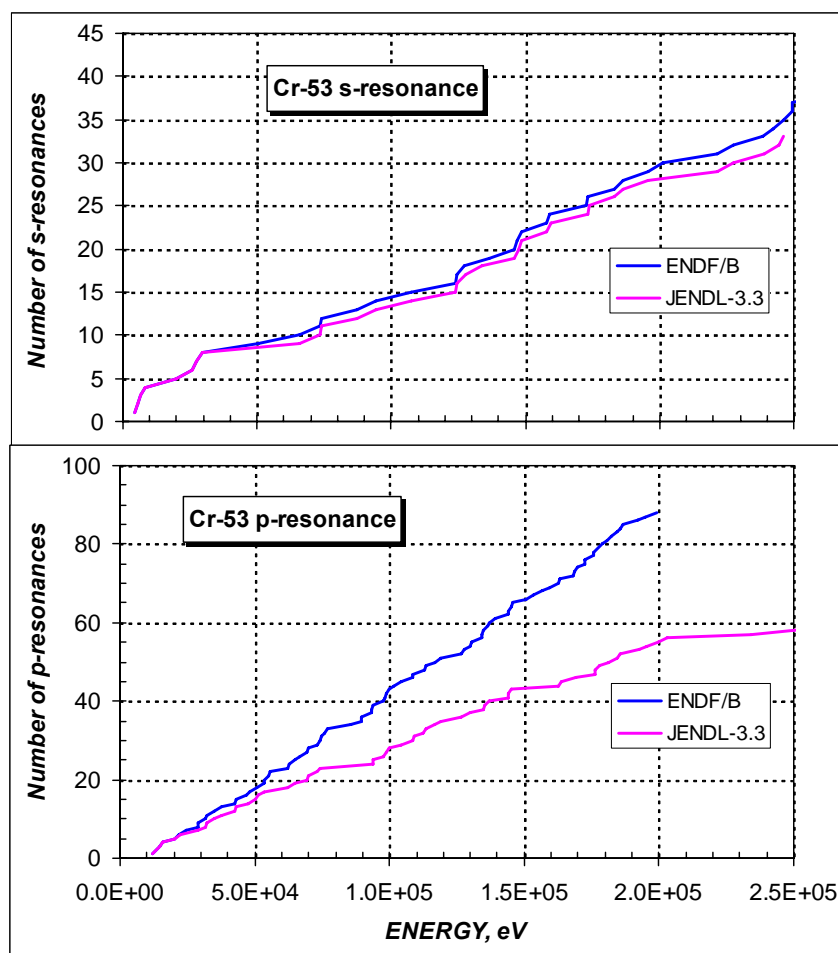


Рисунок 17 – Нарастающие суммы резонансов для Cr-53.

3. Сечения нейтронных реакций

3.1. Полное сечение

На рисунке 18 представлены энергетический ход сечения полного взаимодействия из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1), переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотеки JENDL-3.3. в области резонансных энергий 0.01 эВ -100 кэВ.

Из рисунка 18 видно, что в резонансной области энергий ~ до 100 кэВ различия в полном сечении достигает до 50%. Оно связано, главным образом, с полнотой набора резонансных параметров, описывающих резонансное взаимодействие нейтронов с нуклидом.

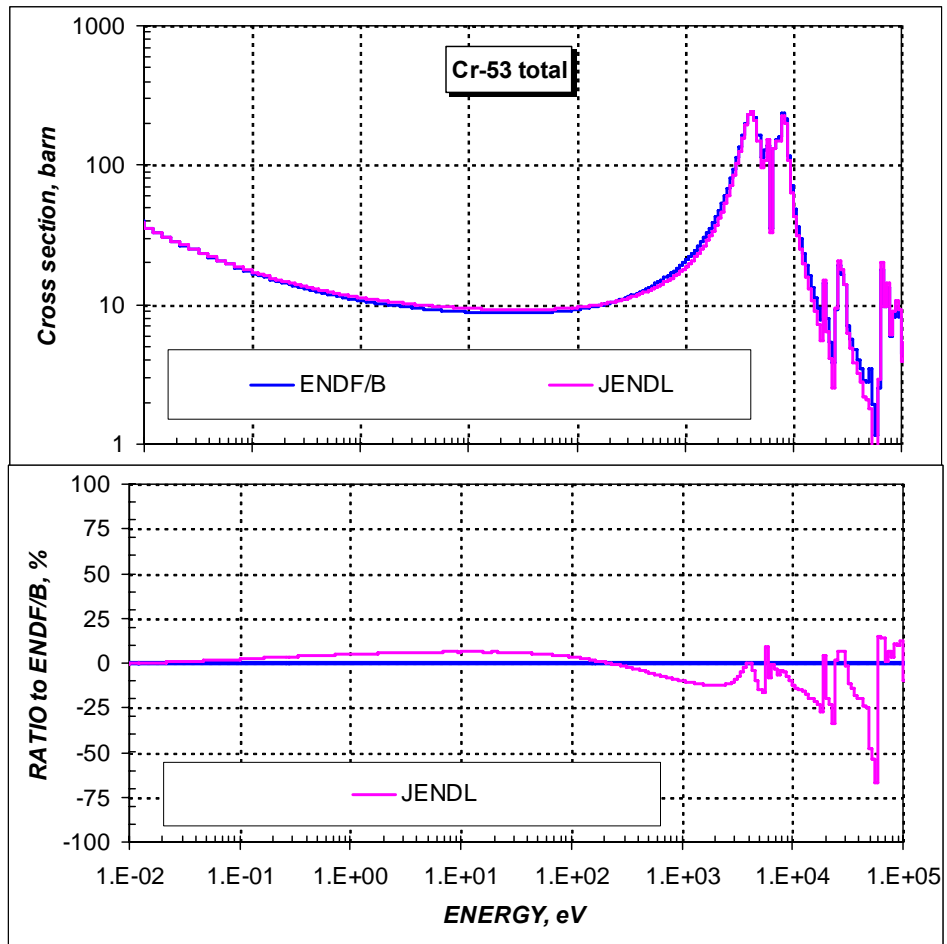


Рисунок 18 – Ход полного сечения Cr-53 в области энергий 0.01 эВ – 100 кэВ.

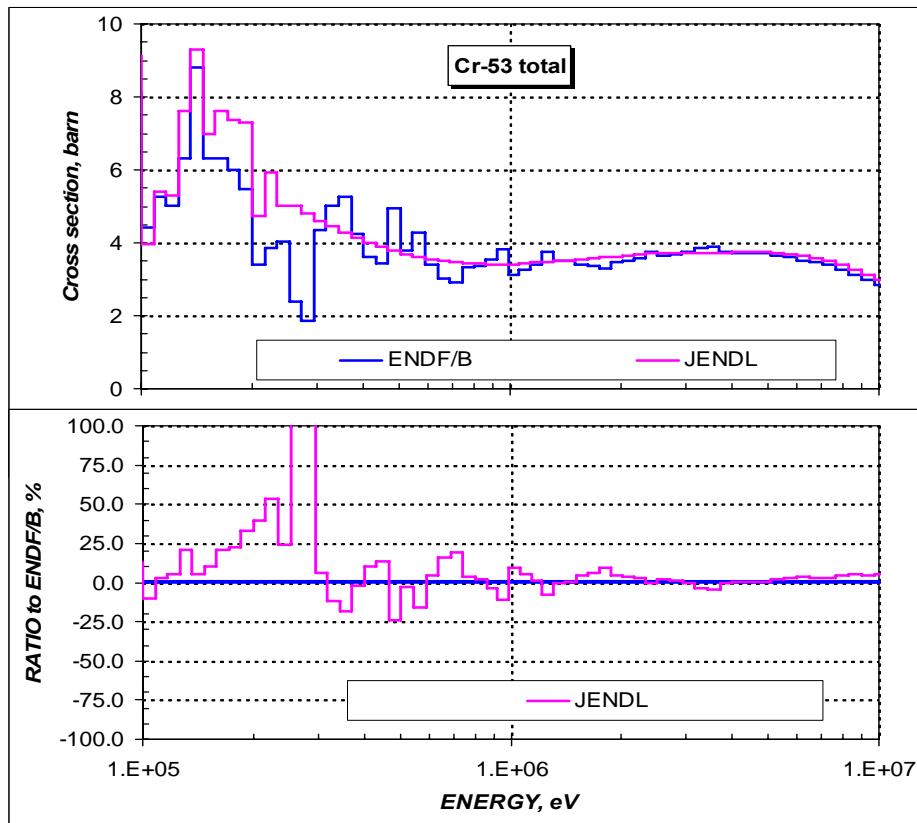


Рисунок 19 – Ход полного сечения Cr-53 в области энергий 100 кэВ – 10 МэВ.

Ниже, на рисунке 19 показан аналогичный ход полного сечения в области энергии 100 кэВ - 10 МэВ.

Из представленной на рисунке 19 информации видно, что максимальные различия между JENDL и ENDF/B-VI достигают до 100%. в области энергий 200-300 кэВ. В этой области энергий оказались доступными экспериментальные данные Мюллера(1971). Сравнение экспериментальных и оцененных кривых представлено на рисунке 20.

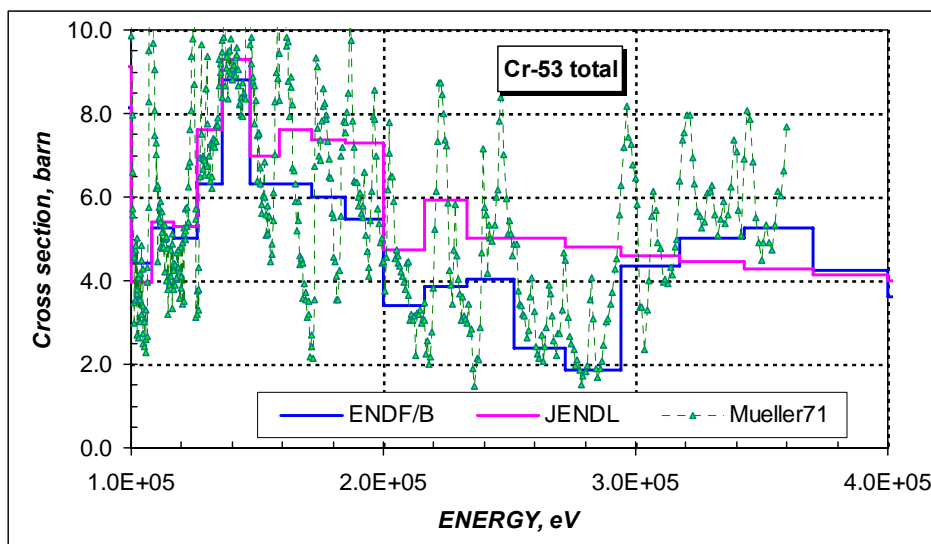


Рисунок 20 – Сравнение полного сечения Cr-53 в области энергий 100 – 400 кэВ.

Из представленного на рисунке 20 сравнения видно, что в области энергий выше 200 кэВ с экспериментальными данными наилучшим образом согласуется оценка ENDF/B.

В области МэВ-ных энергий имеется два набора экспериментальных данных по измерению полного сечения. Сравнение оцененных сечений с экспериментом приведено на рисунке 21.

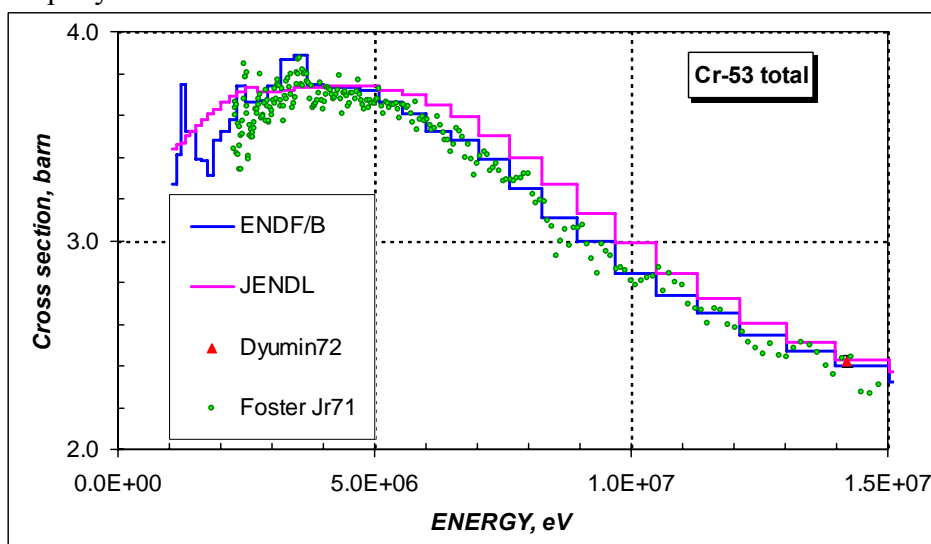


Рисунок 21 – Ход полного сечения Cr-53 в области энергий 2 – 20 МэВ.

Из приведенного на рисунке 21 сравнения видно, что оценка ENDF/B согласуется с экспериментом, в то время как оценка JENDL проходит выше экспериментальных данных.

ВЫВОДЫ:

Таким образом, полное сечение из оценки ENDF/B является более предпочтительным, чем из оценки JENDL.

3.2. Сечение радиационного захвата

На рисунке 22 представлены энергетический ход сечения радиационного захвата нейтронов из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1), переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотеки JENDL-3.3. в области резонансных энергий 10 эВ - 100 кэВ. Там же приведены и различия в оценках, выраженные в процентах отношения к оценке ENDF/B.

На другом рисунке 23 представлено сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов на Cr-53 в области энергий от 100 кэВ до 10 МэВ. Экспериментальные данные, в этой области энергий отсутствуют.

ВЫВОДЫ:

Отсутствие экспериментальных данных не позволяет определить наиболее надежную оценку сечения радиационного захвата нейтронов на Cr-53.

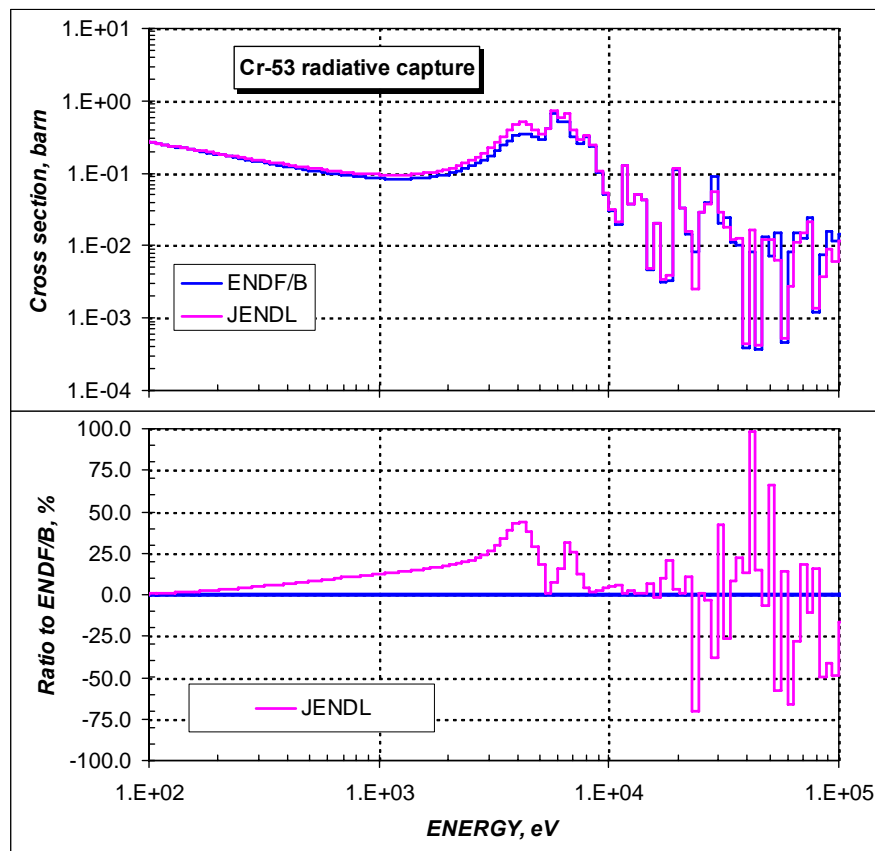


Рисунок 22 – Ход сечения радиационного захвата нейтронов на Cr-53 в области энергий 100 эВ – 100 кэВ.

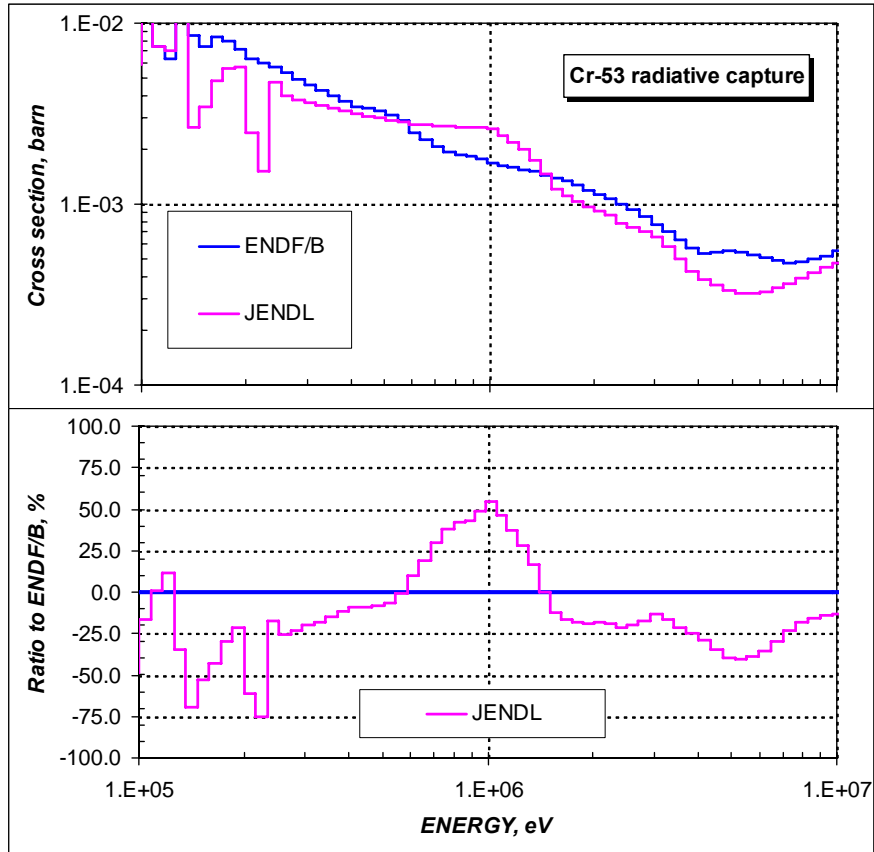


Рисунок 23 – Ход сечения радиационного захвата нейтронов на Cr-53 в области энергий 100 кэВ – 10 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния

На рисунке 24 представлено сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния нейтронов на Cr-53 с экспериментальными данными.

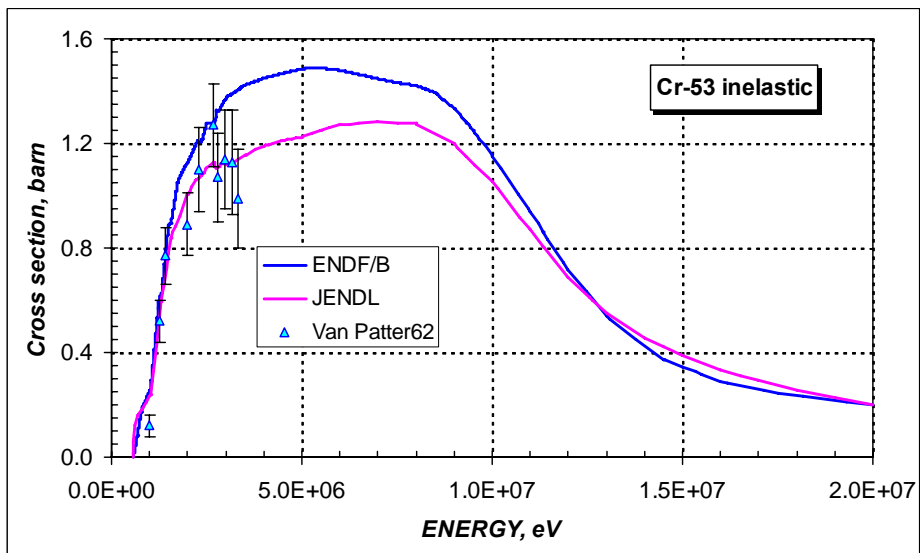


Рисунок 24 – Энергетическая зависимость сечения неупругого рассеяния нейтронов на Cr-53 в области энергий до 20 МэВ.

Из приведенного на рисунке 24 сравнения видно, что имеющиеся экспериментальные данные наилучшим образом описывает оценка JENDL. В области энергий от 2 до 10 МэВ оцененные сечения различаются между собой до 30 %.

ВЫВОДЫ:

Сечение неупругого рассеяния на Cr-53 наилучшим образом описывает оценка JENDL..

3.4. Сечение реакции (n,p)

Сравнение оцененных сечений реакции (n,p) было проведено, поскольку для этой реакции имелся достаточно представительный набор экспериментальных данных.

На рисунке 25 показано сравнение оцененных сечений и экспериментальных данных для сечения реакции (n,p).

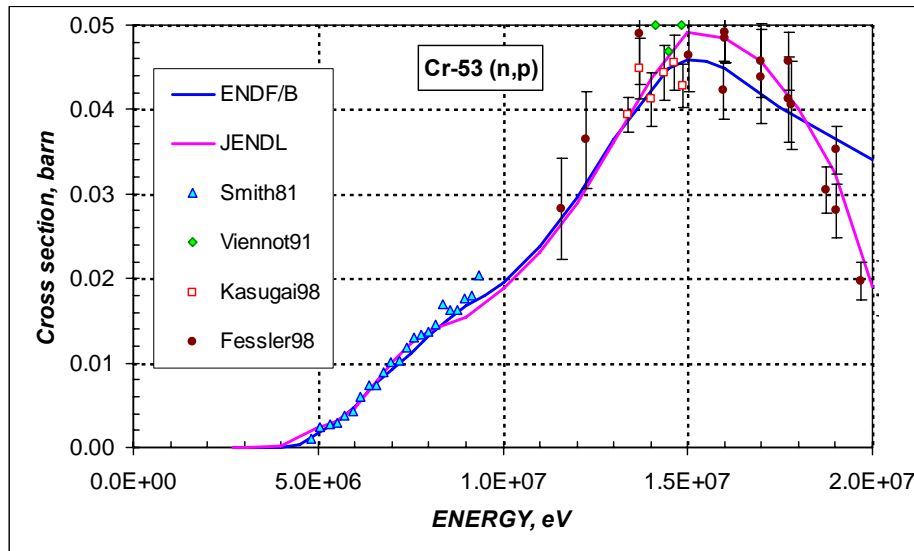


Рисунок 25 – Сравнение оцененных сечений реакции (n,p) на Cr-53.

Из приведенного на рисунке 25 сравнения видно, что вплоть до 15 МэВ обе оценки хорошо согласуются между собой и описывают экспериментальные данные. Выше 15 МэВ оценка JENDL лучше согласуется с экспериментальными данными.

ВЫВОДЫ:

Сечение реакции (n,p) на Cr-53 наилучшим образом описывает оценка JENDL.. Однако, до 15 МэВ обе оценки практически не различаются между собой.

Заключение

На основе проведенного анализа параметров разрешенных резонансов и наиболее важных нейтронных сечений, в библиотеку РОСФОНД'а для хрома-53 рекомендуется принять оценку нейтронных данных из библиотеки JEFF-3.1~ ENDF/B-VII. В JEFF нейтронные данные приводятся до 20 МэВ, в то время как оценка ENDF/B содержит нейтронные данные до 150 МэВ.

Ковариационные данные следует исключить. Они будут анализироваться в дальнейшем.

Автор рекомендации

Кощев В.Н.

24.5. Хром-54

Оцененные данные рассматриваются в диапазоне энергий до 20 МэВ. Различные модификации, выполненные выше 20 МэВ, не комментируются.

Экспериментальные данные, используемые при сравнении с оцененными кривыми, взяты из интерактивной библиотеки EXFOR-CINDA (Database and Retrieval System, version 1.80, June 2005).

Ниже рассматриваются две современные оценки нейтронных данных, а именно – ENDF/B-VII betha1 version и JENDL-3.3. По каждой оценке приводятся краткие пояснения. Отметим, что в библиотеке JEFF-3.1 находится оценка ENDF/B-VI.8=ENDF/B-VIIb1.

ENDF/B

Последняя версия (ENDF/B-VIIb1) содержит оценку ORNL, выполненную в 1989 году авторским коллективом: D.Hetrick, D.Larson, N.Larson и C.Fu. (ORNL).

Основные моменты:

Используются программы DWUCK, в которой ядерная модель описывается THE DISTORTED WAVE BORN APPROXIMATION (DWBA) и программа TNG, в которой используется формализм Хаузера-Фешбаха.

С помощью TNG получены угловые и энергетические распределения частиц, испускаемых в реакциях по модели компаунд ядра и предравновесного процесса. При этом обеспечивается согласованность между всеми реакциями и обеспечивается энергетический баланс оцененных данных.

Область резонансных энергий от $1.E-5$ эВ до 900 кэВ. Резонансные параметры для формализма Райха-Мура получены на основе результатов работы Харви и Агравела (1984). В области энергий 100 – 900 кэВ в захват добавляется подложки (MF3, MT102) для согласования с усредненными экспериментальными данными.

Полное сечение выше 900 кэВ получено при анализе нескольких наборов измерений с высоким разрешением, которые также использовались и при получении резонансных параметров.

Сечения первых четырех уровней неупругого рассеяния получены при помощи программы TNG, в которой учитывается вклад прямых процессов с подгонкой под экспериментальные данные. Сечение континуума уровней получено также при помощи TNG.

Сечение радиационного захвата выше 900 кэВ получено на основе расчетов по TNG программе.

Сечение реакции $(n,2n)$ и сечения реакций с вылетом заряженных частиц получены при помощи TNG расчетов. При этом учитывались немногочисленные экспериментальные данные.

JENDL-3.3

В основе лежит оценка Асами, выполненная для JENDL-3 в 1987 году. В 1988 году проведена небольшая модификация данных, а именно $mf/mt=3/107$.

В 1993 году для версии JENDL-3.2 часть данных была переоценена.

В 2000 году данные переоценены Асами, а в 2001 году скомпилированы K.Shibata (JAERI) для последующей версии библиотеки JENDL-3.3. Изменения коснулись данных в следующих разделах

MF2

MT151 – резонансные параметры пересмотрены. Область резонансных параметров увеличена до 750 кэВ. Используется формализм Райха- Мура.

MF1

MT2

пересчитано с учетом баланса сечений;

| | | |
|-----------------|---|--|
| | MT102, 104, 105, 106, 1116 203, 207 | сечение пересмотреноI; сечения переоценены заново; сечения переоценены заново I. |
| MF4, MF5 MF6 | MT16, 22, 28, 91 | данные исключены. |
| | MT16, 22, 28, 91, 206, 207 | взяты из JENDL fusion file; взяты из JENDL fusion file. |
| MF12, MF15 | MT16 - 107 | данные оценены заново. |

1. Общие характеристики

Z=24

A=53,938 880 ± 0.000 001

A_{wr}=53,475 518 ± 0.000 001

Содержание в естественной смеси: - 2,365%

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | E _{порог.} , МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|---------|----------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | (n,n') | -0.8349 | 0.8505 | Cr-54 |
| 16 | (n,2n) | -9.7202 | 9.9020 | Cr-53 |
| 22 | (n,na) | -7.9236 | 8.0718 | Ti-50 |
| 28 | (n,np) | -12.3605 | 12.5916 | V-53(1.6m) |
| 102 | (n,γ) | 7.9401 | 0.0 | Cr-55(3.5m) |
| 103 | (n,p) | -6.2198 | 6.3361 | V-54(50s) |
| 104 | (n,d) | -10.1485 | 10.3383 | V-53(1.6m) |
| 105 | (n,t) | -12.3697 | 12.6010 | V-52(3.75m) |
| 106 | (n,He3) | -14.3223 | 14.5901 | Ti-52(1.7m) |
| 107 | (n,a) | -1.5466 | 1.5755 | Ti-51(5.8m) |
| 111 | (n,2p) | -16.6077 | 16.9183 | Ti-53(3.75m) |

Схема уровней: (согласно оценке JENDL-3.3)

| MT | LEVEL ENERGY (MEV) | SPIN-PARITY |
|----------|--------------------|-------------|
| | 0.0 | 0+ |
| 51 | 0.8349 | 2+ |
| 52 | 1.8237 | 4+ |
| 53 | 2.6195 | 2+ |
| 54 | 2.8294 | 0+ |
| 55 | 3.0739 | 2+ |
| 56 | 3.1600 | 4+ |
| 91(cont) | 3.2000 | |

Радиоактивность: не радиоактивен.

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 0^+$;

2.2. Радиус рассеяния: $R = 0.53 \cdot 10^{-12}$ см.

2.3. Область разрешенных резонансов.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 5. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 5. Резонансные свойства Cr-54.

| Оценка | Граница области RRR, keV | $\sigma_{\gamma}(2200)$, барн | G-fact | I_{γ} , барн |
|------------|--------------------------|--------------------------------|--------|---------------------|
| ENDF/B | 900 | 0.360 | 1.0001 | 0.190 |
| JENDL | 750 | 0.342 | 1.0001 | 0.171 |
| Mughabghab | | 0.36 ± 0.04 | 1.0003 | 0.20 ± 0.03 |

Из приведенной в таблице 5 информации видно, что обе оценки согласуются с рекомендациями Мухабхаба. Лучшее согласие с оцененным значением сечения захвата из компиляции Мухабхаба имеет оценки ENDF/B.

На рисунке 26 представлены энергетический ход сечения полного взаимодействия из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1), переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотеки JENDL-3.3. в области резонансных энергий 100 эВ - 1 МэВ.

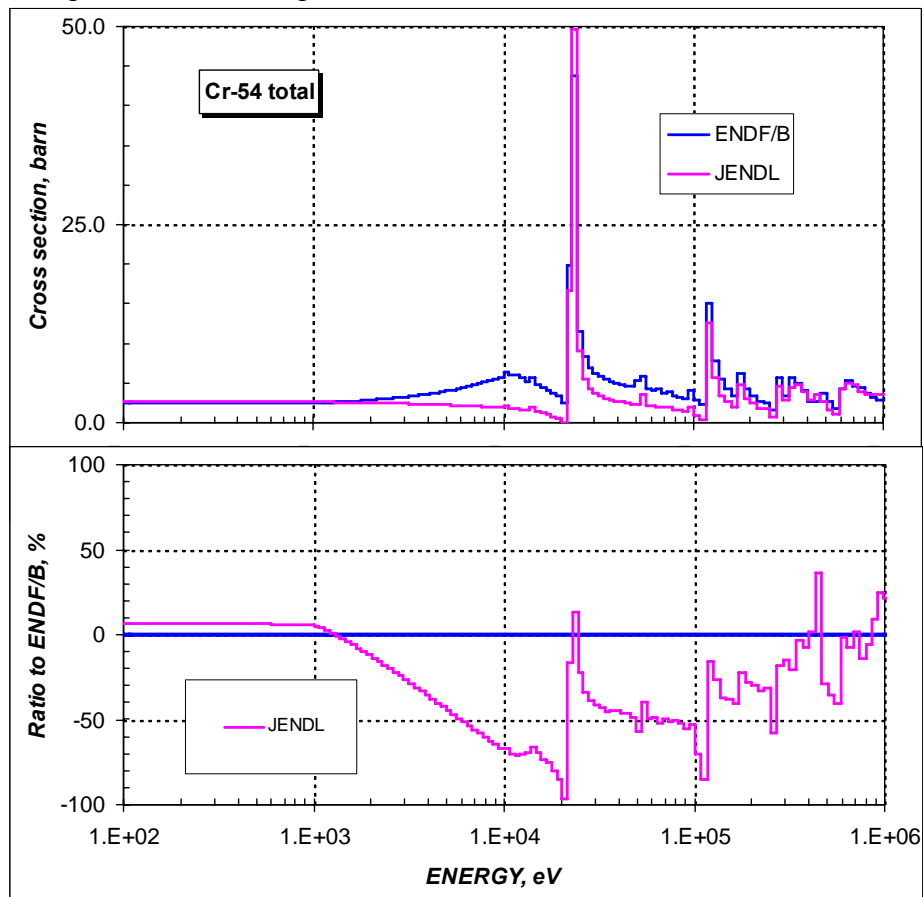


Рисунок 26 – Ход полного сечения Cr-54 в области энергий 100 эВ – 1 МэВ.

Из представленного на рисунке 26 сравнения видно, что полное сечение из JENDL-3.3, в среднем, на 50 % ниже, чем в ENDF/B. Особенно это заметно на первых двух резонансных уровнях. Сравнение резонансных параметров для первого S-резонансного уровня показано в таблице 6. Там же приводятся значения резонансных параметров, определенные авторами экспериментальных работ. Следует отметить, что в ENDF/B использовалась работа Agarwal et al. В оценке JENDL - остальные

источники. Из приведенных в таблице 6 результатов сравнения видно, что в оценке ENDF/B неоправданно завышено значение нейтронной ширины в три раза (!). В то время как, все экспериментальные данные согласуются с оценкой JENDL.

Таблица 6 – Сравнение резонансных параметров для первого S-уровня.

| | EN | AJ | GN | GG |
|--------------|------------|-----|---------------|-------------|
| ENDF/B | 2.2624E+04 | 0.5 | 1866.1 | 0.202 |
| JENDL | 2.3050E+04 | 0.5 | 600.0 | 0.190 |
| Stieglitz-71 | 2.3100E+04 | | 590.0±35.0 | 0.190±0.050 |
| Agarwal-86 | 2.3050E+04 | | 600.0±50.0 | |
| Froener-77 | 2.3050E+04 | 0.5 | 590.0 | |

Далее, на рисунке 27 представлены энергетический ход сечения радиационного захвата нейтронов из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1), переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотеки JENDL-3.3 в области резонансных энергий 100 эВ - 1 МэВ.

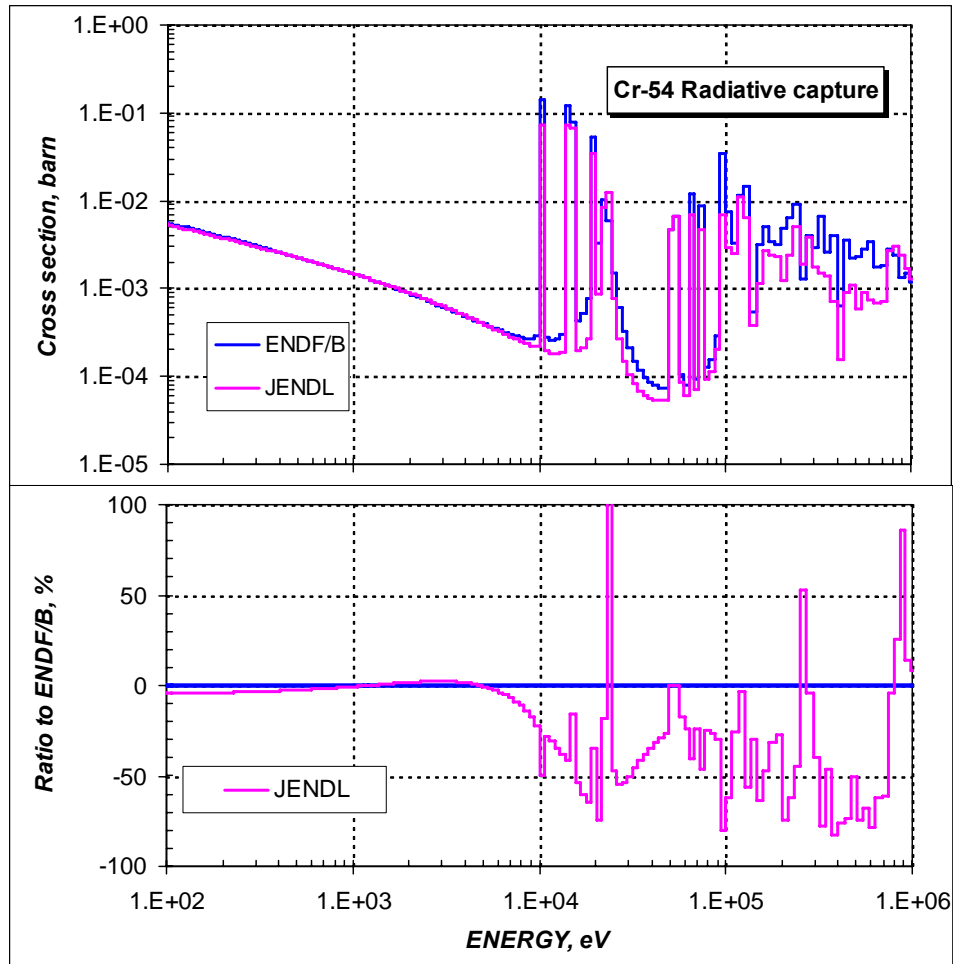


Рисунок 27 – Ход сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий 100 эВ – 1 МэВ.

Из представленного на рисунке 27 сравнения видно, что и сечение радиационного захвата нейтронов из JENDL-3.3, в среднем, на 50 % ниже, чем в ENDF/B. Имеющиеся в этой области энергий экспериментальные данные

представляют собой усредненные по энергетическим интервалам значения. Сравнения оцененных сечений и экспериментальных величин показано на рисунке 28.

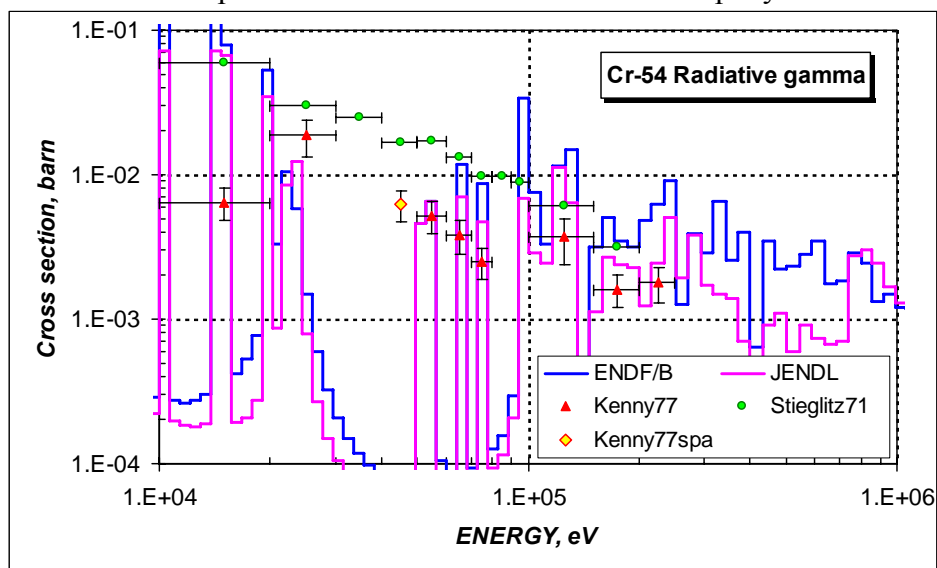


Рисунок 28 – Ход сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий 10 кэВ – 1 МэВ.

Из приведенного на рисунке 28 сравнения видно, что данные Стиглица-71 не согласуются с оцененными значениями сечения в области энергий 30 – 100 кэВ. Экспериментальные данные Кенни-77 в области энергий выше 100 кэВ лучше согласуются с оценкой из JENDL, нежели с ENDF/B.

ВЫВОДЫ:

Из проведенного анализа параметров разрешенных резонансов следует, что для РОСФОНДА предпочтительнее использовать оценку параметров разрешенных резонансов из оценки JENDL.

3. Сечения нейтронных реакций

3.1. Полное сечение

На рисунке 29 представлены энергетический ход сечения полного взаимодействия из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1), переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотеки JENDL- в области энергий выше 1 МэВ.

Из приведенного на рисунке 29 сравнения видно, что оценки в этом интервале энергий согласуются друг с другом в пределах лучше, чем 10 %. Экспериментальная точка Демина-72 лучше согласуется с оценкой JENDL.

Следует отметить, что нам не удалось использовать экспериментальные данные с высоким разрешением Агарвола(1986), выполненные в ORNL. По-видимому, в библиотеке EXFOR приводятся не сами наблюдаемые сечения, а некие функционалы от полного сечения, которые нам не удалось определить.

ВЫВОДЫ:

Имеющиеся экспериментальные данные не позволяют определить наиболее надежную оценку полного сечения взаимодействия нейтронов с ядром Cr-54.

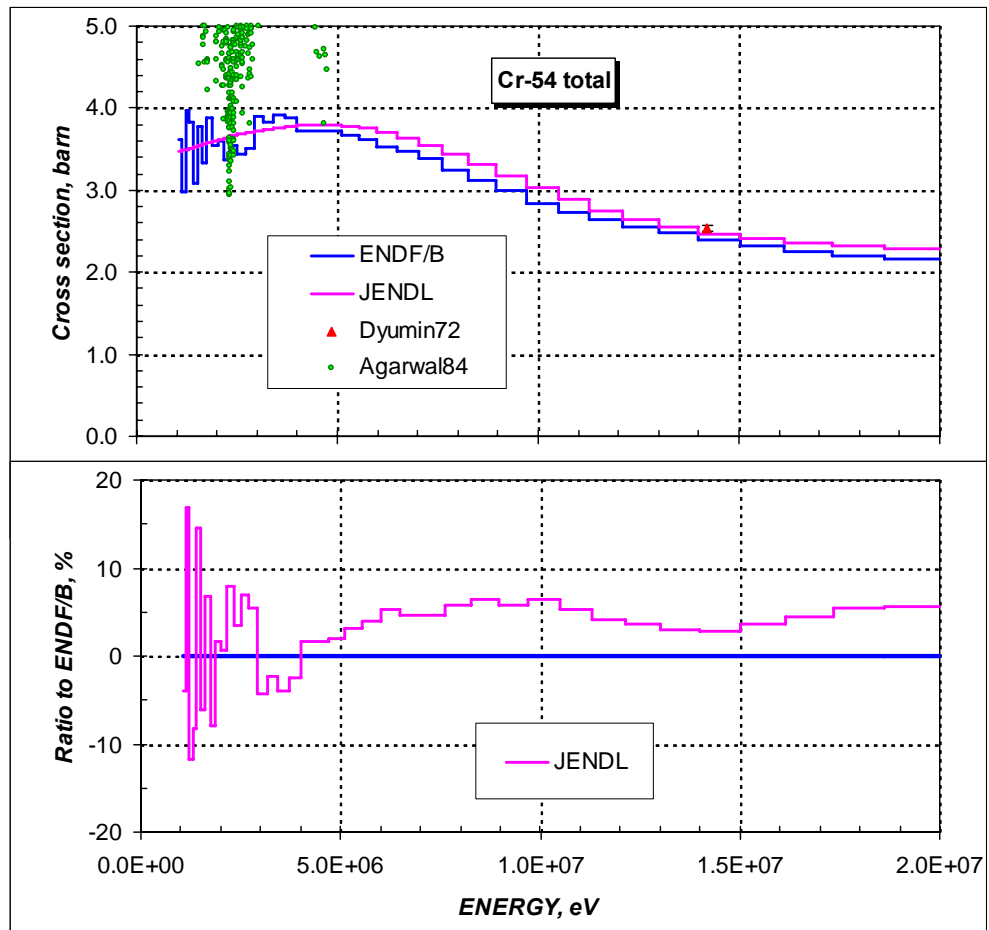


Рисунок 29 – Ход полного сечения Cr-54 в области энергий выше 1 МэВ.

3.2. Сечение радиационного захвата

На рисунке 30 представлены энергетический ход сечения радиационного захвата нейтронов из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1), переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотеки JENDL-3.3. в области резонансных энергий выше 1.0 МэВ. Там же приведены и различия в оценках, выраженные в процентах отношения к оценке ENDF/B.

Экспериментальные данные, в этой области энергий отсутствуют.

Вследствие этого нет возможности достоверно сделать выбор оцененного сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 1 МэВ. Обе оценки согласуются между собой в пределах 10-20 %.

ВЫВОДЫ:

Отсутствие экспериментальных данных не позволяет определить наиболее надежную оценку сечения радиационного захвата нейтронов на Cr-54.

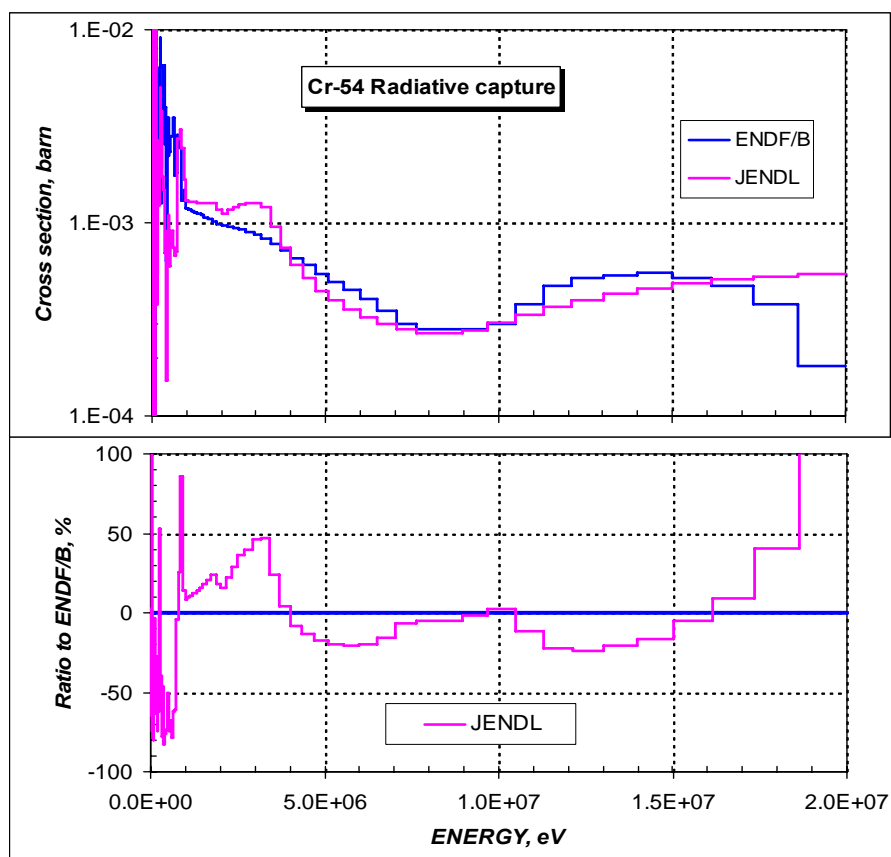


Рисунок 30 – Ход сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 1 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния

На рисунке 31 представлено сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния нейтронов на Cr-54 с экспериментальными данными.

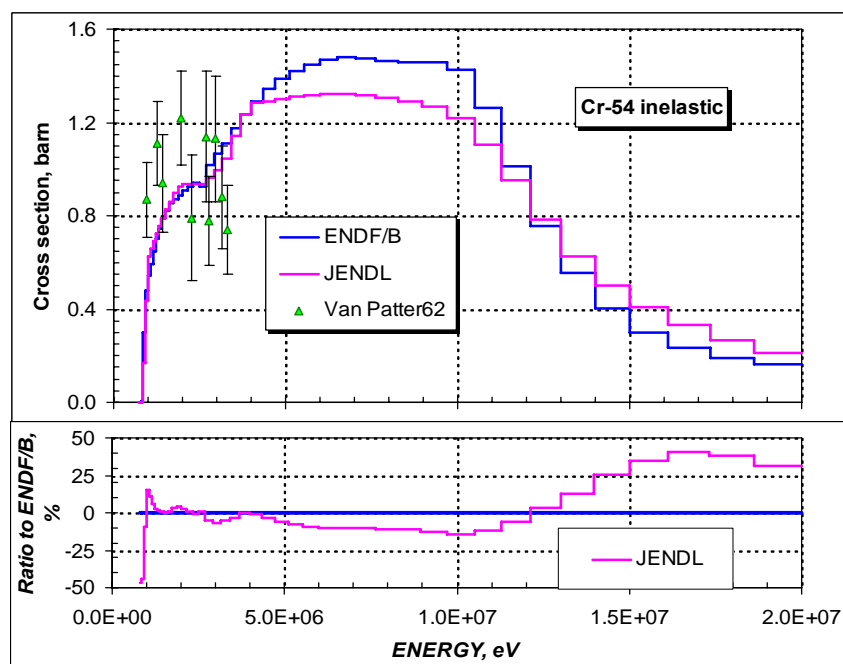


Рисунок 31– Энергетическая зависимость сечения неупругого рассеяния нейтронов на Cr-54 в области энергий до 20 МэВ.

Из приведенного на рисунке 24 сравнения видно, что имеющиеся экспериментальные данные не позволяют определить наиболее надежную оценку сечения неупругого рассеяния. В области энергий от 2 до 15 МэВ оцененные сечения различаются между собой в пределах 20 - 25 %.

ВЫВОДЫ:

Имеющиеся экспериментальных данных не позволяет определить наиболее надежную оценку сечения неупругого рассеяния нейтронов на Cr-54.

3.4. Сечение реакции (n,a)

Сравнение оцененных сечений реакции (n,a) было проведено, поскольку для этой реакции имелся достаточно представительный набор экспериментальных данных.

На рисунке 32 показано сравнение оцененных сечений и экспериментальных данных для сечения реакции (n,a).

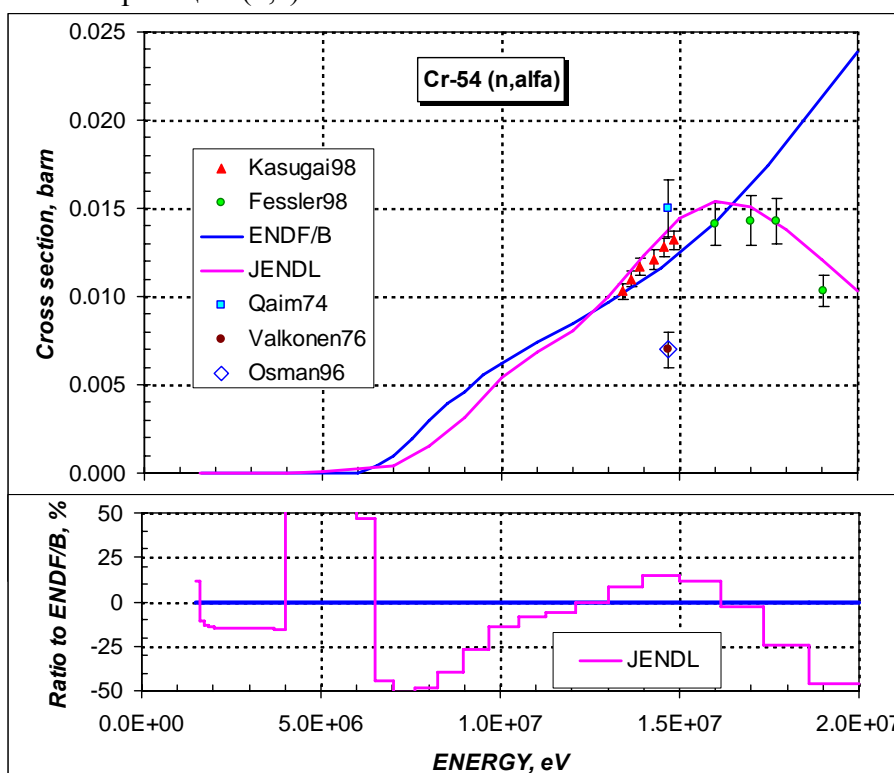


Рисунок 32 – Сравнение оцененных сечений реакции (n,a) на Cr-54.

Из приведенного на рисунке 32 сравнения видно, что вплоть до 15 МэВ обе оценки достаточно хорошо согласуются между собой и описывают экспериментальные данные. Выше 15 МэВ оценка JENDL лучше согласуется с экспериментальными данными.

ВЫВОДЫ:

Сечение реакции (n,a) на Cr-54 наилучшим образом описывает оценка JENDL.

Заключение

На основе проведенного анализа параметров разрешенных резонансов и наиболее важных нейтронных сечений и с рекомендуется в библиотеку РОСФОНД'а для хрома-54 принять оценку нейтронных данных из библиотеки JENDL-3.3.

Автор рекомендации

Кошечев В.Н.

24.6. Хром-природный

Из перечисленных оцененных данных были получены нейтронные сечения для природной смеси хрома. Ниже приведено сравнение оцененных сечений полного взаимодействия Cr-nat с имеющимися экспериментальными данными.

На рисунке 33 приводится сравнение оцененных сечений полного взаимодействия в области резонансных энергий от 0.01 эВ до 10 эВ с имеющимися экспериментальными данными.

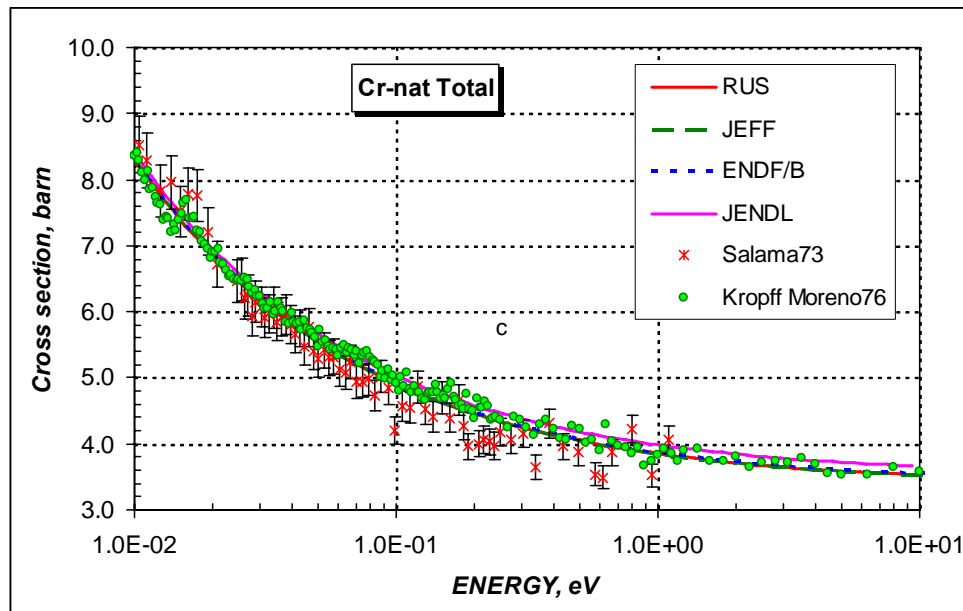


Рисунок 33 – Ход полного сечения Cr-nat в области энергий 0.01 - 10 эВ.

Из приведенного на рисунке 33 сравнения видно, что только оценка JENDL лежит выше совокупности экспериментальных данных. В то время, как остальные оценки практически совпадают друг с другом.

В таблице 7 сравниваются характеристики сечения радиационного захвата нейтронов в тепловой точке, резонансный интеграл и сечение, усредненное на спектре деления. Все значения получены с помощью программы INTER и пакета программ PREPRO-2002.

Таблица 7. Характеристики сечения радиационного захвата Cr-nat.

| Оценка | $\sigma_\gamma(2200)$, барн | G-fact | I_γ , барн | $\sigma_\gamma(fis)$, мбарн |
|--------|---------------------------------|--------|-------------------|---------------------------------|
| ENDF/B | 3.04 | 1.0001 | 1.50 | 2,02 |
| JEFF | 3.05 | 1.0001 | 1.51 | 2,20 |

| | | | | |
|------------|-----------------|--------|---------------|------|
| JENDL | 3.02 | 1.0001 | 1.50 | 2,35 |
| RUSFOND | 3.05 | 1.0001 | 1.51 | 2,19 |
| Mughabghab | 3.07 ± 0.08 | 1.0003 | 1.6 ± 0.1 | |

Из приведенной в таблице 7 информации видно, что все оценки сечения радиационного захвата нейтронов согласуются со значениями, рекомендованными в компиляции Мухабхаба. Сечения в быстрой области энергий, усредненные по спектру деления U-235, различаются между собой до 15 - 20%.

На рисунке 34 приводится сравнение оцененных сечений полного взаимодействия в области резонансных энергий от 100 эВ до 1 МэВ и различия в сечениях от оценки ENDF/B (%) на основе 299 групповых констант. Из приведенного сравнения видно, что оценка Росфонда и JEFF близки друг к другу, поскольку в Росфонде нейтронные данные для основного нуклида (Cr-52) приняты из JEFF.

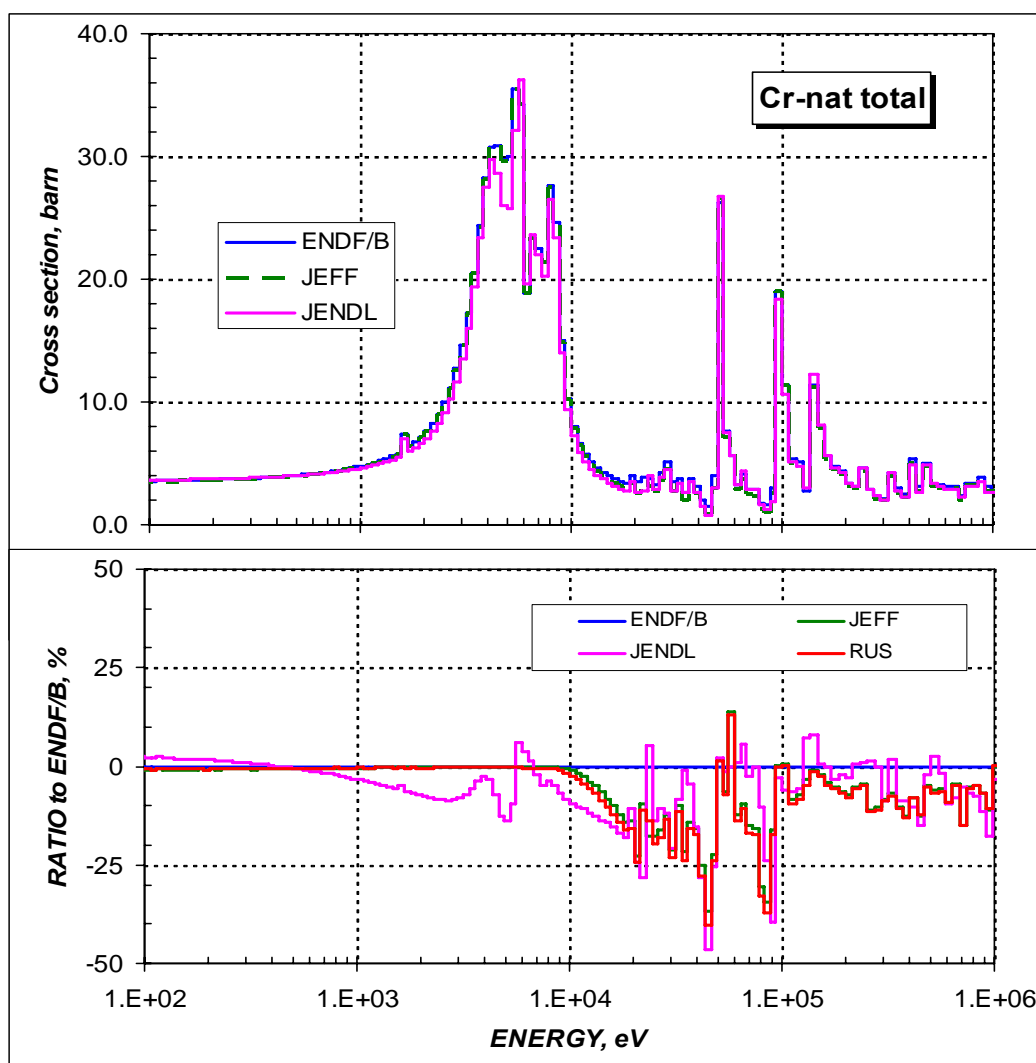


Рисунок 34 – Ход полного сечения Cr-nat в области энергий 100 эВ - 1 МэВ.

На рисунке 35 приводится сравнение полного сечения в области энергий от 5 до 10 МэВ с экспериментальными данными Ларсона (1980) и Абфальтерера(2001). С тем, чтобы оцененные сечения лучше сопоставлялись с экспериментальными данными, на отдельных частях рисунка приводится сравнение не более двух оценок. Оценка JENDL находится на всех частях рисунка, поскольку сечение в ней имеет наиболее высокие значения.

Из приведенного на рисунке 35 сравнения видно, что лишь оценка JENDL хорошо согласуется с экспериментальными данными Ларсона (1980) и Абфальтерера(2001). Поскольку, основной вклад в полное сечение Cr-nat дает изотоп Cr-52, рассмотрим еще раз сравнение оцененных сечений полного взаимодействия для этого изотопа с экспериментальными данными.

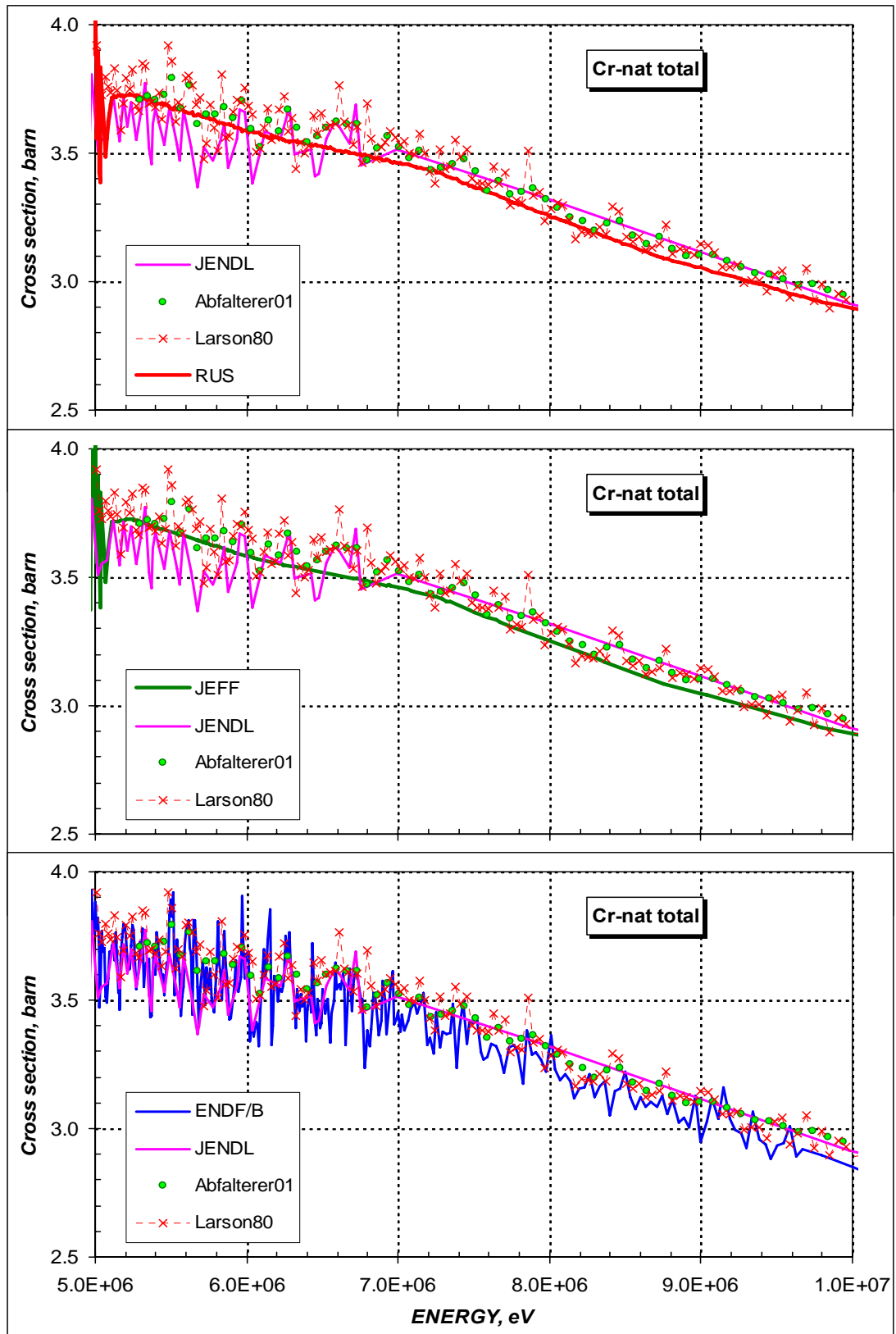


Рисунок 35 – Ход полного сечения Cr-nat в области энергий 5 - 10 МэВ.

На рисунке 36 приводится такое сравнение в области энергий 5-10 МэВ.

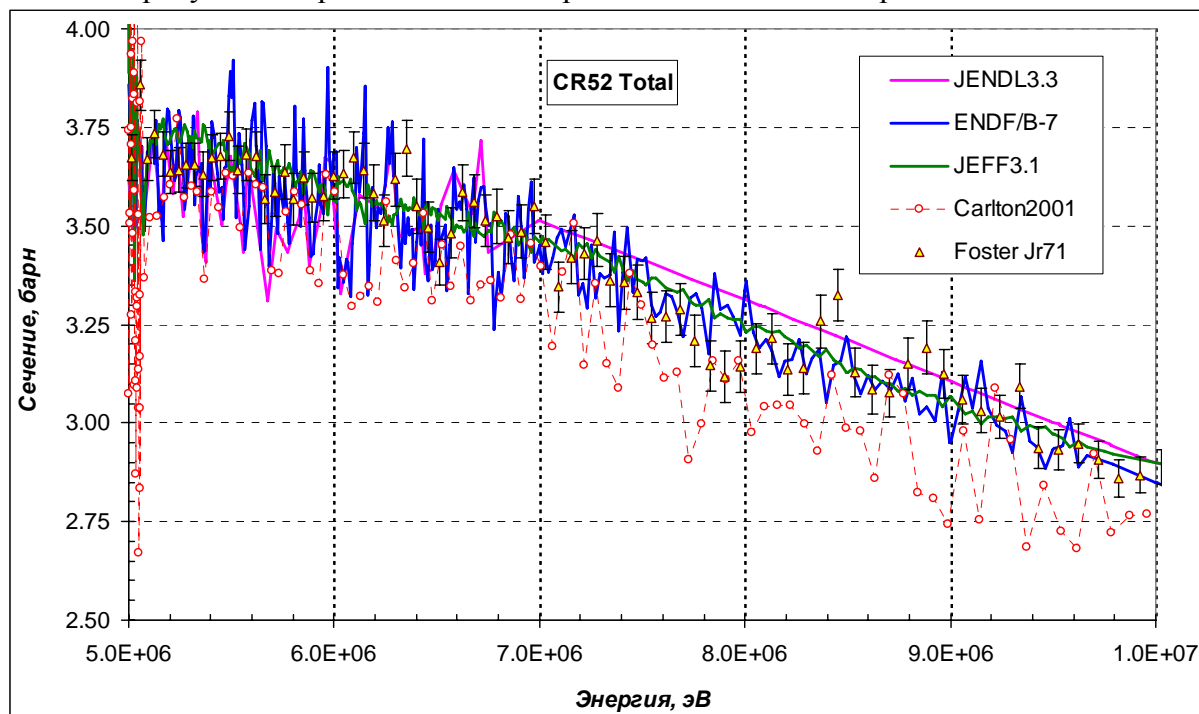


Рисунок 36 – Ход полного сечения Cr-52 в области энергий 5 - 10 МэВ.

Из приведенного на рисунке 36 сравнения видно, что оценка JENDL лежит в отмеченной области энергий выше не только других оценок, но и выше всех экспериментальных данных. Правда, последние экспериментальные данные здесь это - данные Карлтона (2001), которые представляются заниженными. Ранние данные Фостера (1971) подтверждают оценку JEFF-3.1.

ВЫВОДЫ:

Оцененные сечения полного взаимодействия Cr-nat из библиотек ENDF/B, JEFF и RUSFOND наилучшим образом согласуются с экспериментальными данными в области тепловых энергий 0.01 - 10 эВ.

Сечения радиационного захвата нейтронов согласуются с рекомендациями Мухабхаба во всех оценках.

В области энергий 5 - 15 МэВ наилучшим образом с экспериментальными данными по полному сечению для природной смеси согласуется оценка JENDL. Расхождение с JEFF-3.1 достигает 2%. В то же время, для основного изотопа – хрома-52 оценка JEFF-3.1 прекрасно согласуется с совокупностью экспериментальных данных. Скомпенсировать 2-процентное расхождение в полном сечении природного хрома другими изотопами представляется практически невозможным. Таким образом проведенная валидация данных выявила небольшое противоречие между экспериментальными и оцененными данными для основного изотопа и для природной смеси.

Автор рекомендации
Кощев В.Н.

25. МАРГАНЕЦ

Природный марганец содержит 1 стабильный изотоп. Кроме того, в РОСФОНД включены данные о сечениях нейтронных реакций для 3 изотопов с периодами полураспада более суток из библиотеки JEFF-3.0/A.

Во всех библиотеках используются данные, базирующиеся на оценке К. Shibata , Т.Ноjуyаmа, 1987. В ФОНД-2.2 – без модификаций, в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII с некоторыми модификациями. JEFF-3.1=JENDL-3.3. Данные для радионуклидов включены только в ФОНД-2.2 (из EAF-3).

25.1. Маргнец-52

Радиоактивен ($T_{1/2}=5.6$ d.). Испытывает позитронный распад или захват орбитального электрона с образованием хрома-52.

Заключение

В РОСФОНД принята оценка EAF2003 (МАТ-2516) со следующими изменениями:

1. Присвоен МАТ=2552
2. Файл MF=8 опущен.
3. Файл MF=10 опущен.

Автор рекомендации

Забродская С.В.

25.2. Марганец-53

Радиоактивен ($T_{1/2}=3.7 \cdot 10^6$ у.). Испытывает захват орбитального электрона с образованием хрома-53.

Заключение

В РОСФОНД принята оценка EAF2003 (МАТ-2519) со следующими изменениями:

1. Присвоен МАТ=2553.
2. Файл MF=8 опущен.
3. Данные из файла MF=10 перенесены в файл MF=3. Файл MF=10 опущен.

Автор рекомендации

Забродская С.В.

25.3. Марганец-54

Радиоактивен ($T_{1/2}=312.2$ d.). Испытывает захват орбитального электрона с образованием хрома-54.

Заключение

В РОСФОНД принята оценка JEFF-3.0/A (МАТ-2522) со следующими изменениями:

1. Присвоен МАТ=2554
2. Файл MF=8 опущен.

Автор рекомендации

Забродская С.В.

25.4. Марганец-55

1. Общие характеристики

1.1. $Z=25$

1.2. $A=54.938\ 045\ 141 \pm 0.000\ 000\ 729$

1.3. $A_w=54.466\ 100\ 965 \pm 0.000\ 000\ 723$

1.4. Содержание в естественной смеси: 100.0 ат%;
100.0 вес%

1.5. Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|---------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | (n,n') | 0.1260 ± 0.0001 | 0.1283 | |
| 16 | (n,2n) | -10.2270 ± 0.0001 | 10.4148 | 25 Mn 54 |
| 22 | (n, α) | -7.9358 ± 0.0001 | 8.0815 | 23 V 51 |
| 28 | (n,np) | -8.0679 ± 0.0001 | 8.2160 | 24 Cr 54 |
| 102 | (n, γ) | 7.2705 ± 0.0001 | 0.0 | 25 Mn 56 |
| 103 | (n,p) | -1.8212 ± 0.0001 | 1.8546 | 24 Cr 55 |
| 104 | (n,d) | -5.8433 ± 0.0001 | 5.9506 | 24 Cr 54 |
| 105 | (n,t) | -9.3050 ± 0.0001 | 9.4758 | 24 Cr 53 |
| 106 | (n, He^3) | -12.7070 ± 0.0001 | 1.2940 | 23 V 53 |
| 107 | (n, α) | 0.6243 ± 0.0001 | 0.6358 | 23 V 52 |

1.6. Радиоактивность: не радиоактивен

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 2.5^+$;

2.2. Радиус рассеяния: $R=0.515 \cdot 10^{-12}$ см.

2.3. Область разрешенных резонансов (область неразрешенных резонансов отсутствует).

Во всех версиях библиотек оцененных данных (JENDL3.3, ENDF/B7, JEFF3.1) область разрешенных резонансов представлена одной оценкой Т.Ноуяума 1987г., который принял решение о выборе резонансных параметров. Ниже приводится описание этого выбора.

Энергетическая область разрешенных резонансов определена от $1.0E-5$ эВ до 100 кэВ. Разрешенные резонансные параметры представлены в многоуровневом приближении Брейта-Вигнера (52 s-резонанса, 97 p-резонансов). Параметры 4-х резонансов, лежащих ниже 3 кэВ были взяты из работы Macklin R.L.(Nucl. Sci. Eng., 89, 362 1985), остальные – из компиляции Mugabghab S.F. et al ("Neutron Cross Sections", Vol. 1, Part A, Academic Press 1981), кроме двух отрицательных резонансов, параметры которых были определены путем подгонки к экспериментальному тепловому сечению.

В резонансной области до 100 кэВ к сечениям, рассчитанным по резонансным параметрам, никаких подложек не добавляется.

Рассмотрим статистические характеристики оцененных резонансных параметров. На рис. 1. показаны нарастающие суммы числа s-резонансов со спинами 2 и 3, а на рис. 2 – нарастающие суммы их приведенных нейтронных ширин. Проведенные

там линии тренда позволяют оценить средние расстояния между резонансами и силовые функции. Как видно, и те и другие для резонансов с разными спинами оказались практически одинаковыми. Из статистических соображений плотность резонансов со спином J пропорциональна $2J+1$, т.е. можно было бы ожидать среднее расстояние между уровнями со спином 3 процентов на 20 меньшим, чем для уровней со спином 2. Однако наблюдаемое противоречие при небольшом числе резонансов каждого спина не является статистически значимым.

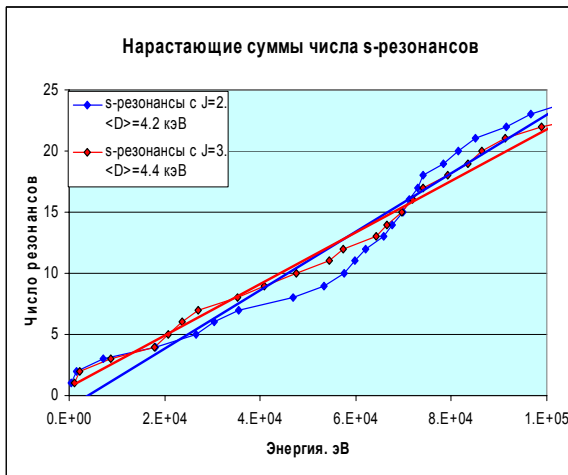


Рис. 1.

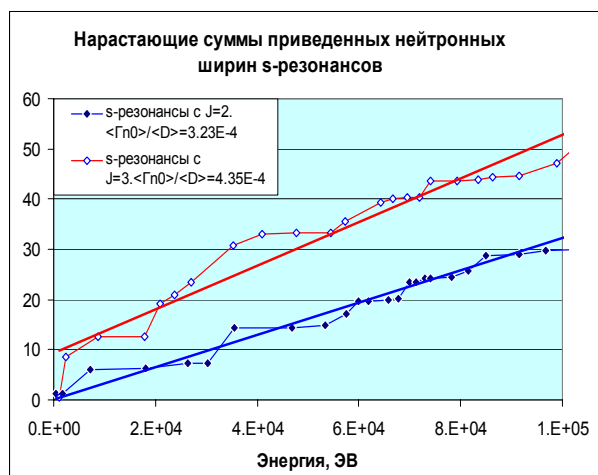


Рис.2

На рис. 3 показаны нарастающие суммы числа р-резонансов с различными спинами. Спиновая зависимость плотности уровней выражена весьма сильно, но отнюдь не так, как следовало бы ожидать исходя из статистических соображений: Плотность уровней со спином 2 оказалась максимальной и во много раз превышает таковую для уровней со спином 1 и со спином 4; почти втрое превышает плотность уровней со спином 3. Выше 80 кэВ, плотность уровней со спином 4 внезапно резко возрастает. Все это порождает сомнения в корректности определения спинов р-резонансов. Заметим, что полное число р-резонансов в интервале до 100 кэВ (87) превышает число s-резонансов в этом интервале (45) почти равно вдвое, что соответствует ожидаемой зависимости плотности уровней от спина.

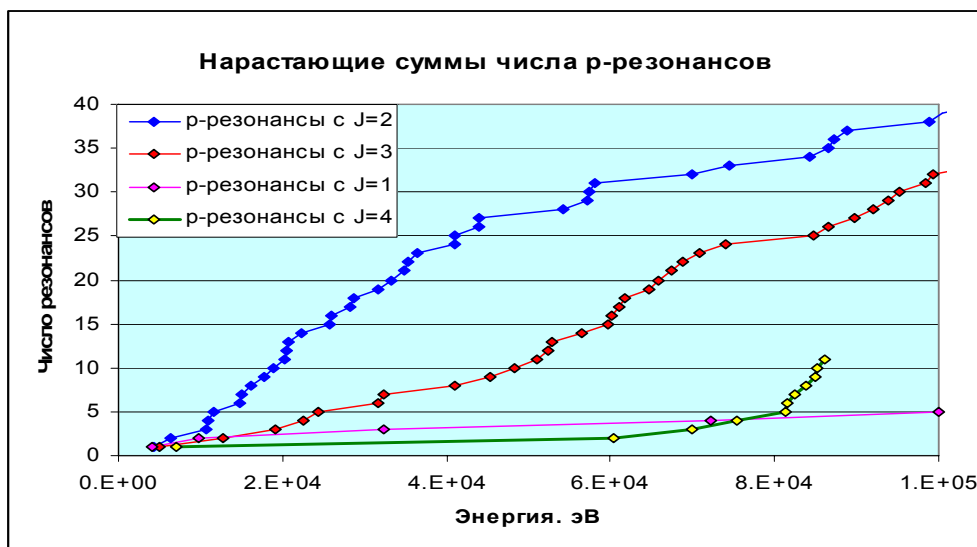


Рис.3.

Таким образом, представляется, что

- пропуск слабых резонансов в рассматриваемой области не существен;

- разделение резонансов по четности выполнено корректно,
- определение спинов резонансов сомнительно (особенно для р-резонансов).

На оцененные значения нейтронных сечений последняя неточность влияет, однако, слабо, поскольку параметры большинства резонансов определены на основе измерений полных сечений, а интегралы под резонансами полного сечения пропорциональны $g\Gamma_n$, где $g = \frac{2J+1}{2(2I+1)}$ - статистический множитель. Неправильное определение спина J влечет за собой такую погрешность в величине нейтронной ширины, что $g\Gamma_n$ сохраняется.

2.5. Тепловые сечения и резонансный интеграл:

Как ясно из изложенного выше, тепловые сечения и резонансные интегралы целиком определяются резонансными параметрами. Сравним рассчитанные таким образом сечения и резонансные интегралы с оценками Мухабхаба 1981¹ г. и 2003² г. Во втором столбце таблицы 1 приведены данные по ENDF/B-7.

Таблица 1. Сравнение тепловых сечений и резонансного интеграла

| σ, барн | S.F.Mughabghab(1981) | S.F.Mughabghab(2003) | ENDF/B-7 |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------|
| elastic | 2.2±0.2 | | 2.167 |
| capture | 13.3±0.2 | 13.36±0.05 | 13.413 |
| Γ _γ , барн | 14.0±0.3 | 14.0±0.3 | 11.73 |

Обращает на себя внимание различие в оценках резонансного интеграла, далеко выходящее за пределы оцененных Мухабхабом погрешностей. Причиной изменения параметров низколежащих резонансов в оценке ENDF/B-7. послужили результаты эксперимента Маклина³ на ускорителе ORELA, специально ориентированные на уточнение радиационных ширин низколежащих резонансов марганца и, в первую очередь, первого из этих резонансов - при 337.3 эВ, вносящего определяющий вклад в резонансный интеграл. Величина Γ_γ для этого резонанса была известна с большой погрешностью¹: 0.435±0.100 эВ. Маклин получил значительно более низкое значение – 0.310±0.020 эВ, которое и было принято в оценке ENDF/B-7. Несмотря на то, что Маклиным был обнаружен дополнительный слабый резонанс при 1658 эВ, снижение радиационной ширины первого резонанса повлекло за собой существенное снижение резонансного интеграла.

Заметим, что основанием для того, чтобы приписать резонансному интегралу величину, равную 14 барнам послужили многочисленные непосредственные измерения этой величины (см. таблицу 2, содержащую результаты работ, выполненных после 1960г.). После небольших поправок на отличие принимавшегося значения стандарта - резонансного интеграла золота – на современную величину 1559 барн усреднение результатов этих измерений с весом обратно пропорциональным погрешностям, приписанным этим результатам авторами 14.3 барна, что совпадает в пределах погрешности с оценкой Мухабхаба – 14.0 барн. Погрешность ±0.3 барна получается как

¹ Mughabghab S.F., Divadeenam M., Holden N.E., Neutron Cross Sections, Vol.I, Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. Part A, Z=1 – 60 < Academic Press/ N-Y/, 1981.

² Mughabghab S.F., Thermal Neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and G-Factors. INDC(NDS)-440 Feb. 2003.

³ Macklin R.L. Nucl/ Sci. Eng. 89, 362 (1985)

путем усреднения погрешностей результатов отдельных измерений, так и путем оценки по средне-квадратичному отклонению результатов измерений от среднего. Таким образом, налицо противоречие между результатами многочисленных интегральных измерений и единственного дифференциального эксперимента. Следует отметить, что в отличие от измерений резонансного интеграла, выполнявшихся с использованием активационной методики, детальное измерение энергетической зависимости сечения захвата требовало использовать образец достаточно большой толщины для обеспечения приемлемой эффективности регистрации мгновенных гамма-квантов. Это требовало введения в результаты измерений поправок на самоэкранировку и многократное рассеяние, которые вводились расчетным путем. В случае резонанса при 337.3 эВ эффект поправки на многократное рассеяние составлял 77% (от эффекта поглощения в первом столкновении). Учет этой поправки, разумеется, привел к снижению площади под резонансом, т.е. к снижению радиационной ширины. Поправка на эффект резонансной самоэкранировки имеет, очевидно, противоположный знак. Хотя методика учета многократных столкновений в образце методом Монте – Карло, казалось бы, должна была учитывать и эффект резонансной самоэкранировки, о вкладе этого эффекта в поправку в публикации ничего не говорится, что порождает определенные сомнения в достоверности результата эксперимента.

Сохраняя в оценке, принимаемой в РОСФОНД, те же резонансные параметры, что и в ENDF/B-7, мы подчеркиваем наличие отмеченного выше противоречия, которое должно быть разрешено в будущем и которое следует иметь в виду при использовании данных для марганца в практических расчетах.

3.Сечения нейтронных реакций (MF=3)

При выборе файла по нейтронным сечениям рассматривались три библиотеки – JENDL3.3, ENDF/B7, JEFF3.1, в которых оказалась одна оценка K.Shibata, выполненная 1988г. На рис.4(а,b,c) видно, что полное сечение практически совпадает во всей энергетической области.

Для сравнения на графиках приводится также оценка Mn-55 в библиотеке ENDF/B-5, сделанная Мухабхабом.

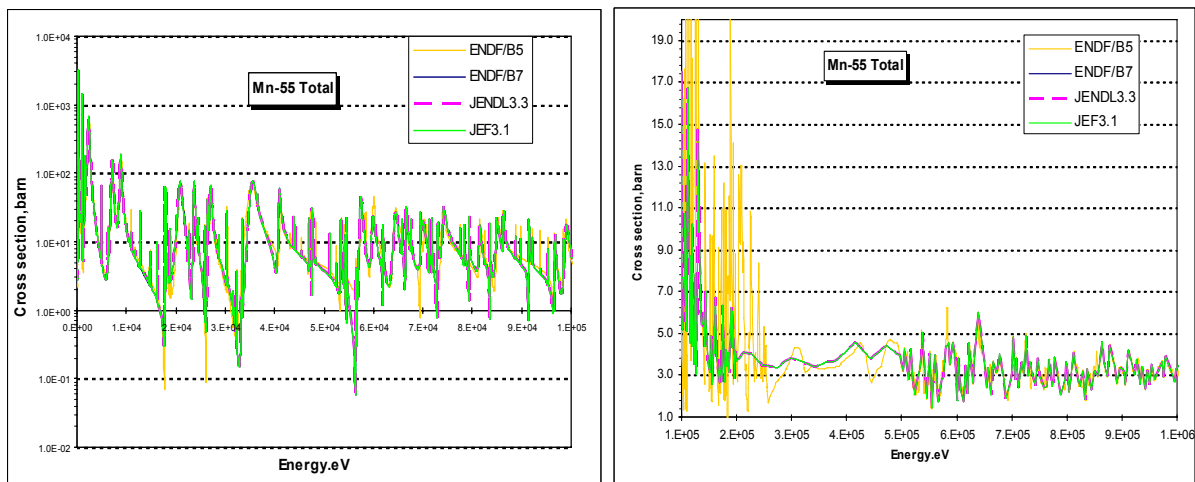


Рис.4(а,b)

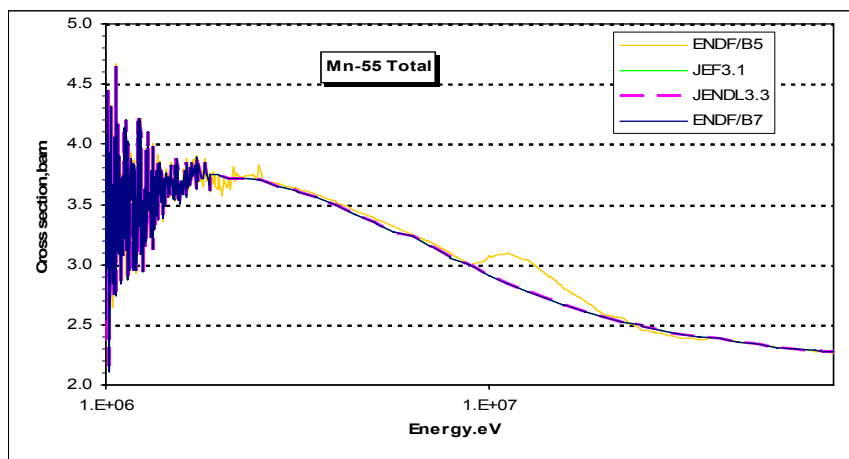


Рис.4с

3.1. Полное сечение (MT=1).

Полное сечение в файле (секция MF=3 MT=1) начинается выше 100 кэВ и представлено поточечно на основе экспериментальной информации из трех работ:

- от 0.584 кэВ до 200 кэВ,
Garg, J.B., Rainwater, J. and Havens, Jr., W.W.; Nucl. Sci. Eng., 65, 76 (1978).
- от 20 кэВ до 625 кэВ,
Pineo, W.F.E., Divadeenam, M., Bilpuch, E.G., Seth, K.K. and Newson, H.W.: Ann. Phys., 84, 165 (1974).
- от 500 кэВ до 32 МэВ
Cierjacks, S., Forti, P., Kopsch, D., Kropp, L., Nebe, J. and Unseld, H.: "High Resolution Total Cross Sections for Na, Cl, K, V, Mn and Co between 0.5 and 30 MeV", KfK-1000 (1968)

На рис.5(а-к) представлены эти экспериментальные данные с оценкой полного сечения с добавлением более поздних экспериментов.

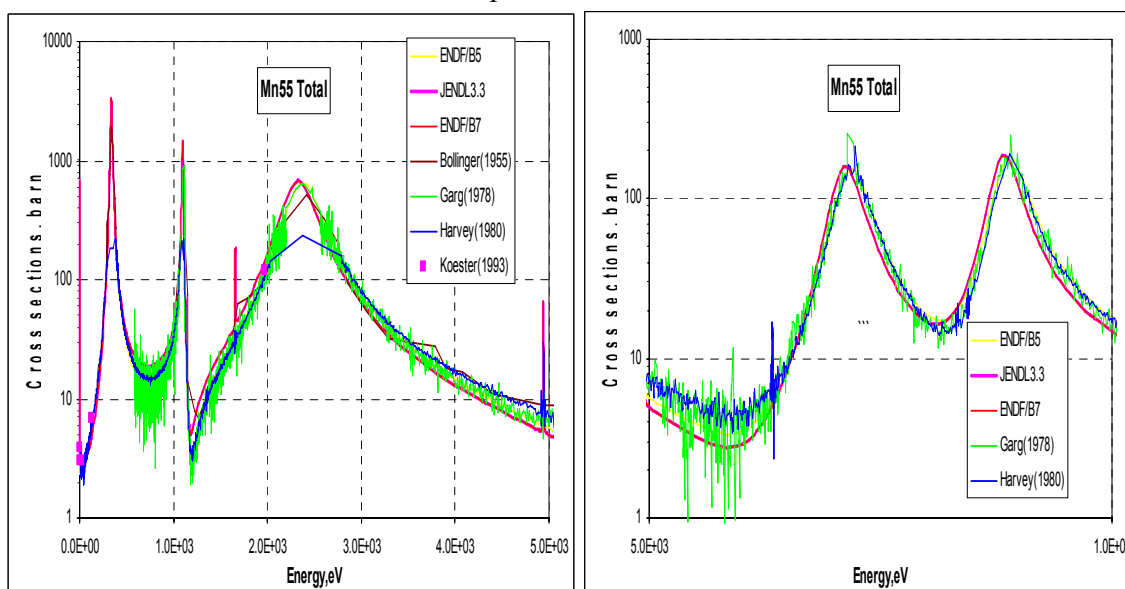


Рис.5(а,б). Полное сечение от 0 до 10 кэВ

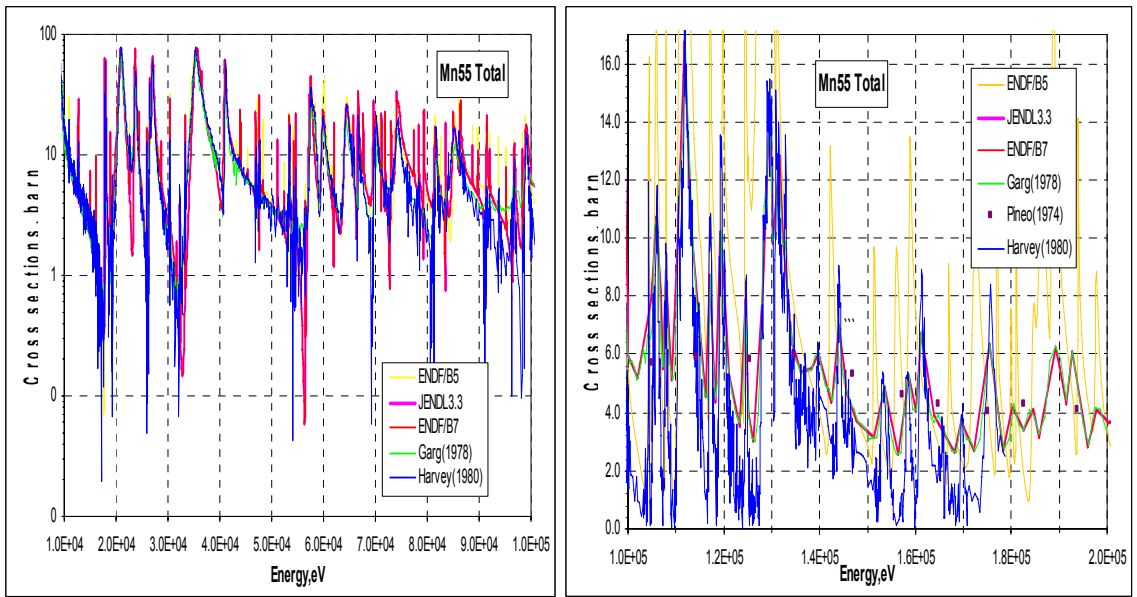


Рис.5(с,d). Полное сечение до 10 до200 кэВ

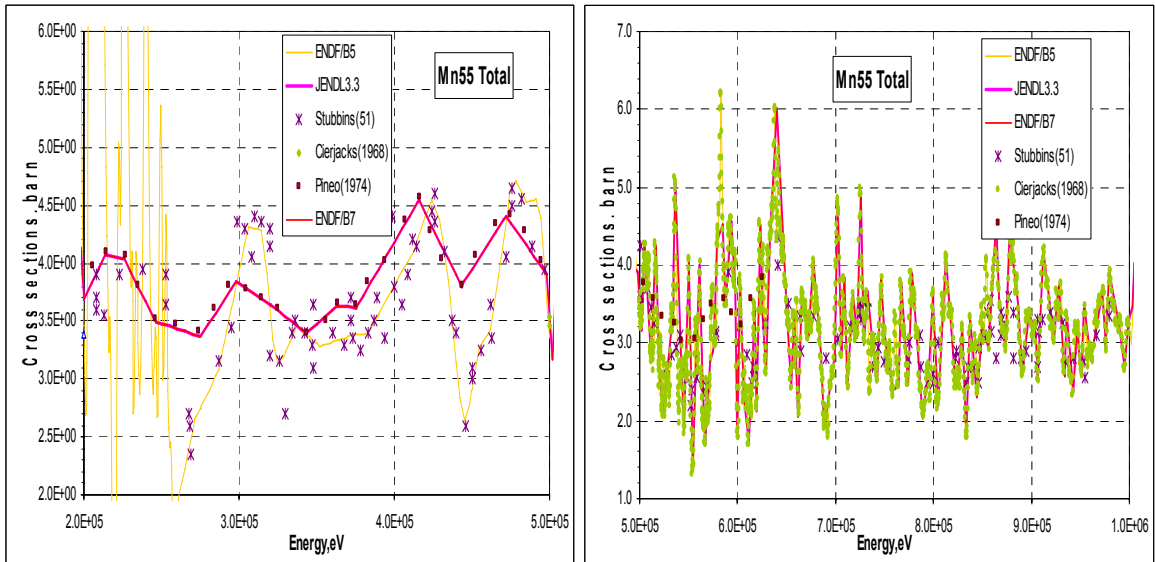


Рис.5(f,g). Полное сечение от 200 кэВ до 1 МэВ

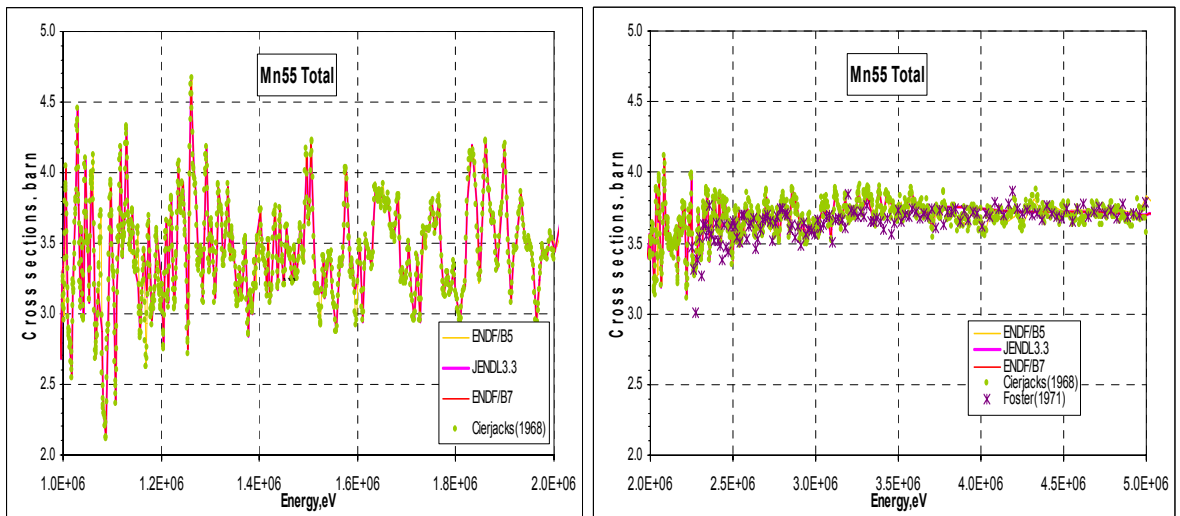


Рис.5(h,i). Полное сечение от 1 до 5 МэВ

Рис

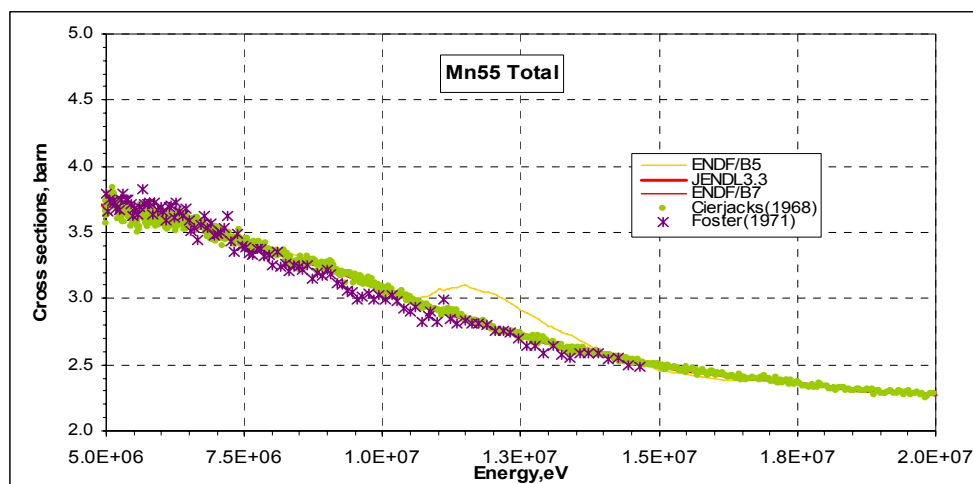
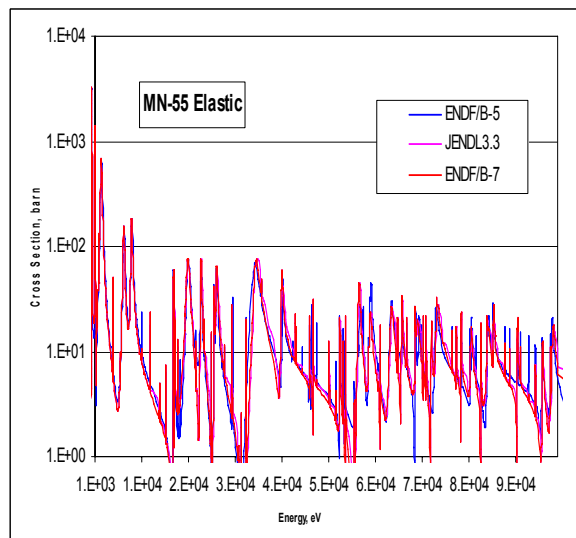
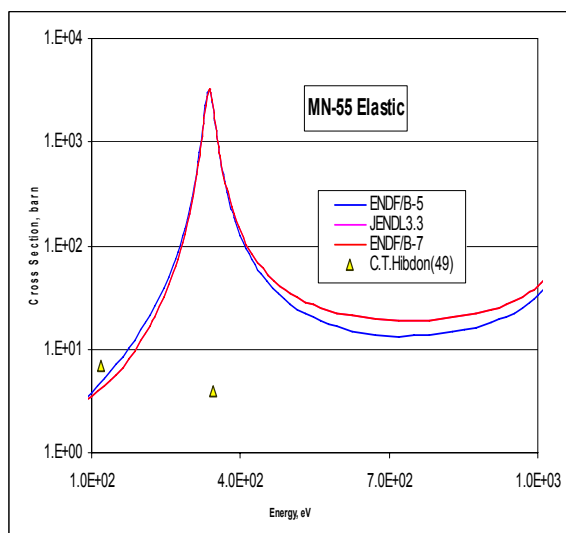


Рис.5(j,k). Полное сечение от 5 до 20 МэВ

Из рисунков видно, что для полного сечения новые экспериментальные данные появились до 1.8 KeV(Harvey,1990), от 2-15 MeV(Forster,1971). Они не противоречат экспериментам, на которых строилась оценка ENDF/B7(или JENDL3.3) для полного сечения.

3.2. Сечения упругого рассеяния (MT=2)

Сечение упругого рассеяния получено как разница полного сечения и сечения неупругого взаимодействия. Экспериментальных данных для сечения неупругого рассеяния мало и они довольно старые. До 100 МэВ данные библиотек не сильно отличаются, исключая первые резонансы. Дальнейшее поведение или расхождение будет понятно из анализа сечений неупругого рассеяния.



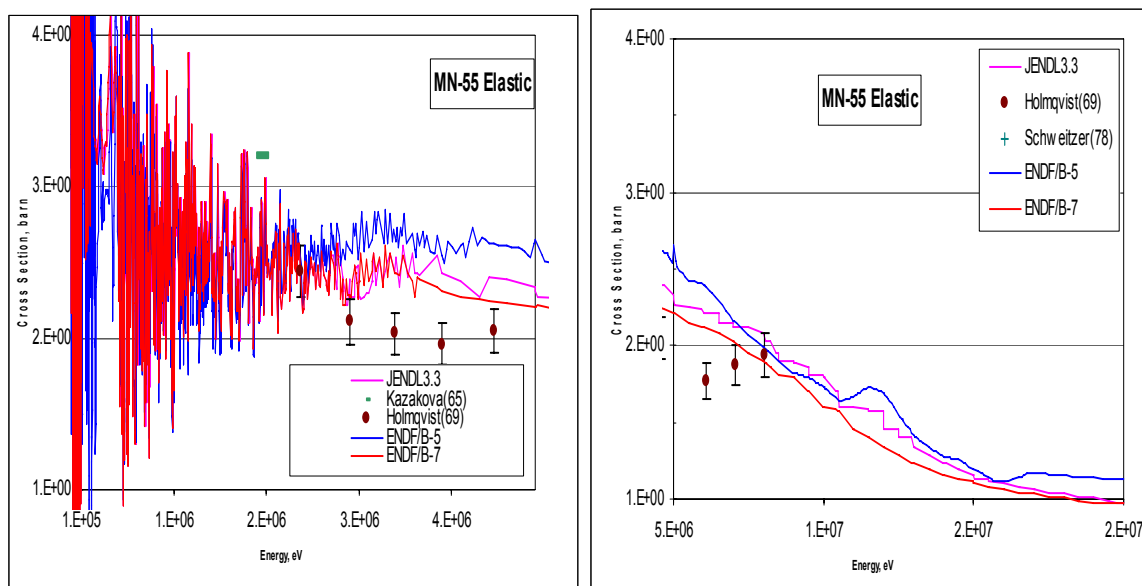


Рис.6(a,b,c,d) Эксперименты по сечению упругого рассеяния

3.3. Сечение радиационного захвата

Сечение радиационного захвата по всем рассматриваемым библиотекам совпадает, кроме ENDF/B-5.

Сечение радиационного захвата до 100 кэВ полностью определяется резонансными параметрами. На рис. 7 приводится восстановленное по резонансным параметрам сечение до 100 кэВ в поточечном и групповом представлении. Там же представлены имеющие экспериментальные данные. Надо отметить, что в области первых резонансов экспериментальных данных о сечении радиационного захвата практически нет.

В области 0.46 кэВ до 3.4 МэВ в 90-м году появились данные эксперимента Gautan, которые выше всех предыдущих измерений (см. рис.8)

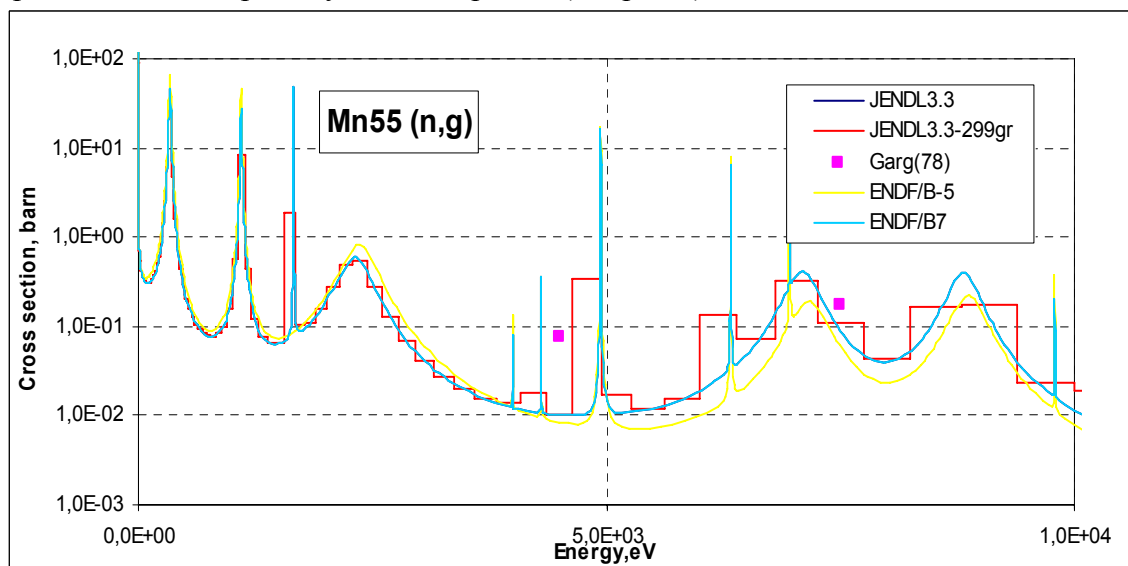


Рис. 7а Сечение радиационного захвата от 0 до 10 кэВ

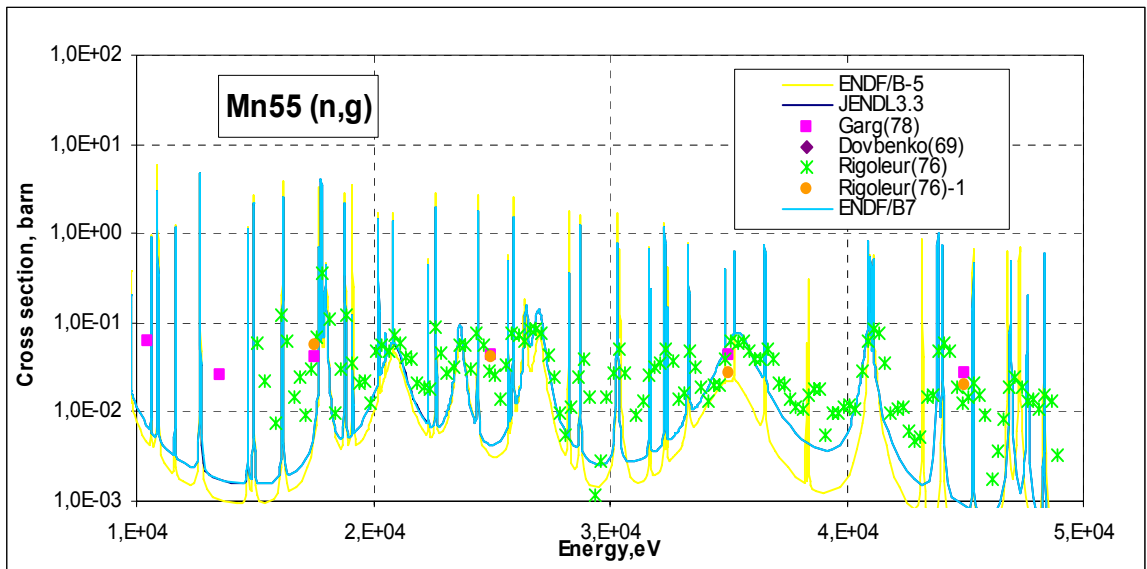


Рис 7 б.Сечение радиационного захвата от 10 до 50 кэВ

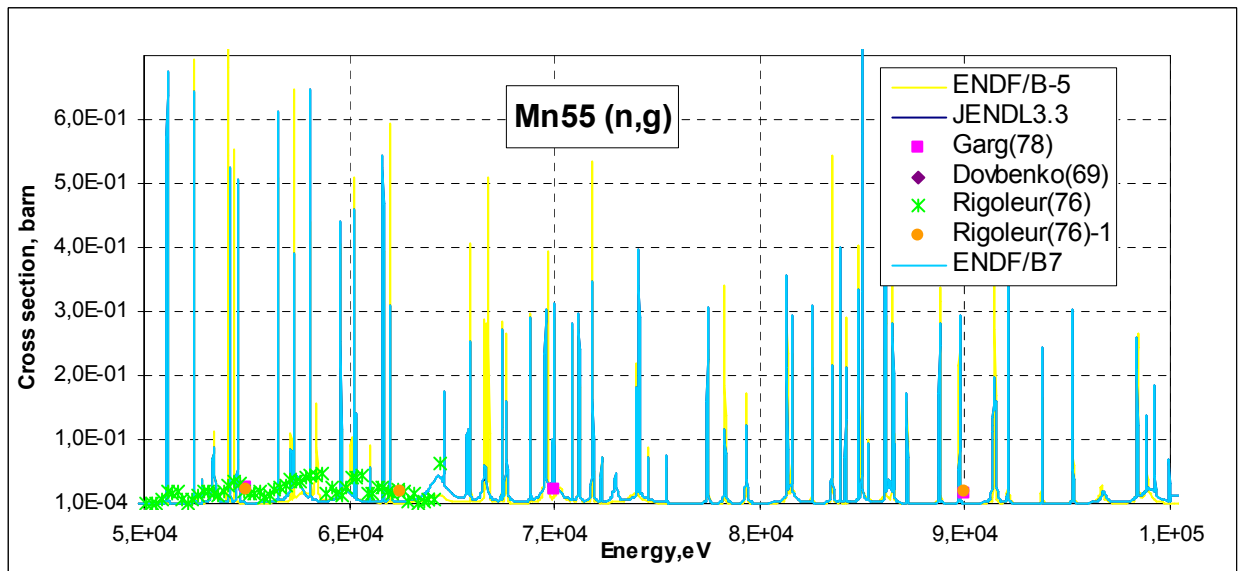


Рис. 7.с.Сечение радиационного захвата от 50 до 100 кэВ

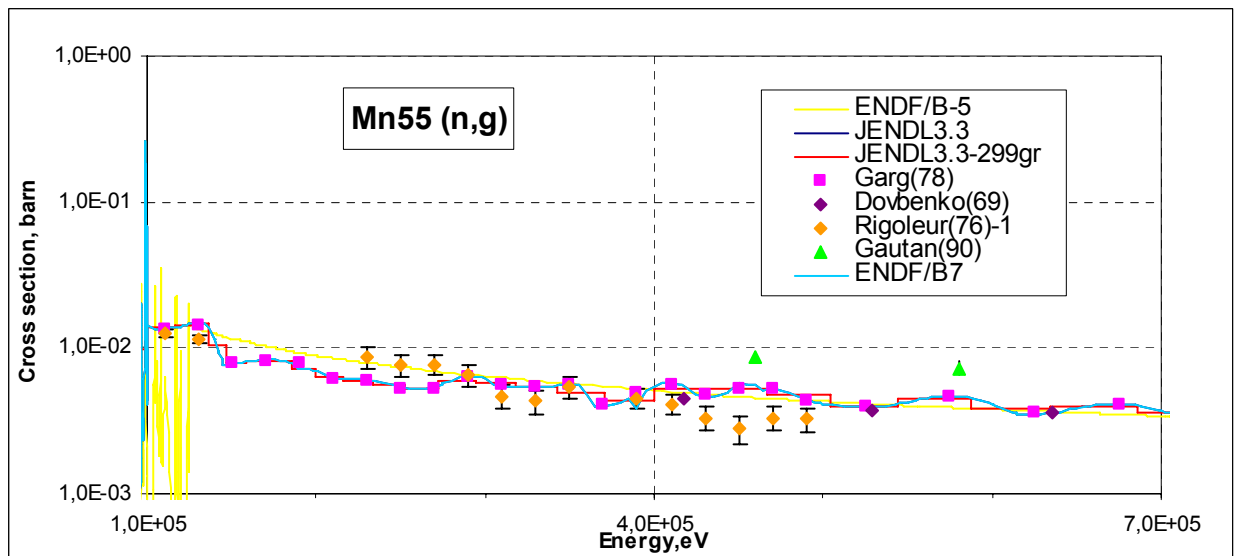


Рис.7д Сечение радиационного захвата от 100 кэВ до 700 КэВ

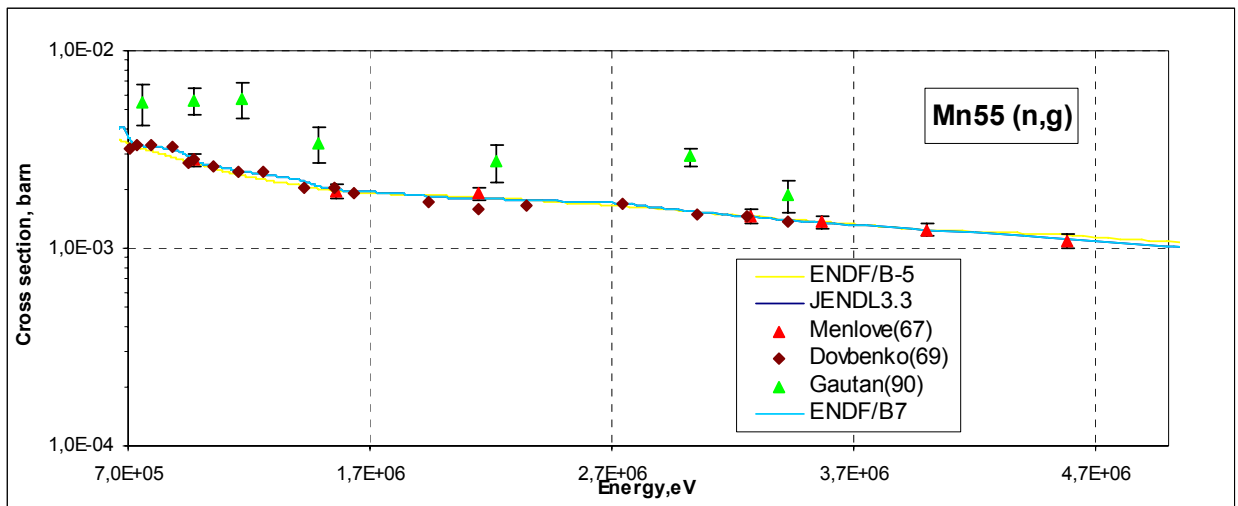


Рис.7е. Сечение радиационного захвата от 700 кэВ до 5 МэВ

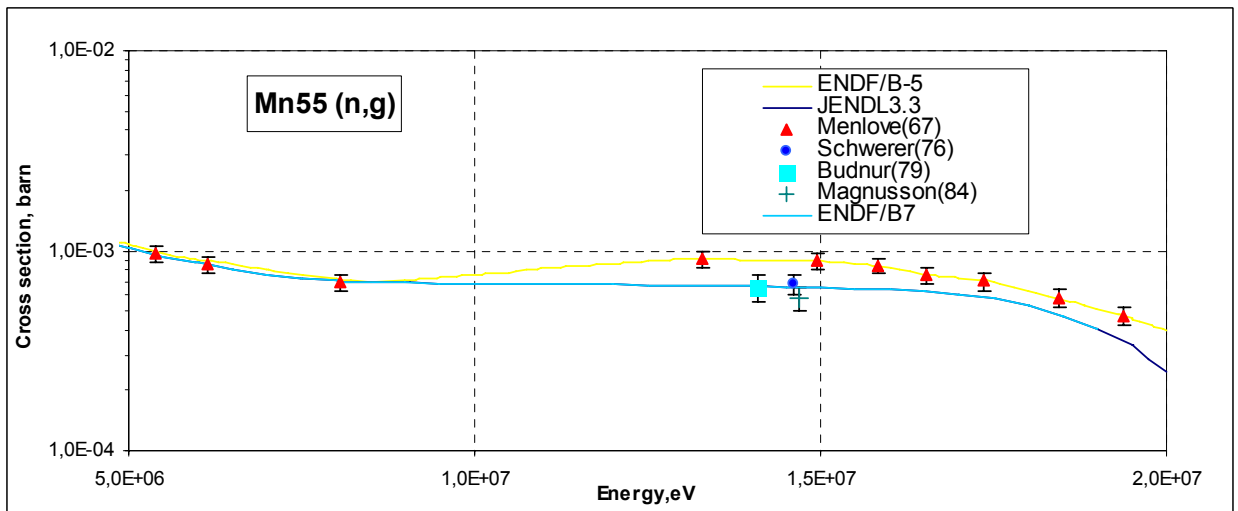


Рис.7ф. Сечение радиационного захвата от 5 МэВ до 20 МэВ

3.4. Сечение неупругого рассеяния

Процесс неупругого рассеяния нейтронов на марганце ($E_{\text{порог}} \sim 0.126$ МэВ) начинается выше границы разрешенных резонансов. Неупругое рассеяние на Mn-55 представлено 16-ю уровнями в JENDL3.3 (которые ниже приводятся в таблице в разделе фотонных данных). и 29-ю в ENDF/B7. В обеих библиотеках область континуума начинается с 3.04 МэВ. Расчеты в ENDF/B7 были выполнены по программе TNG, где после 66 уровня ($E=2.427$ MeV) через каждые приблизительно 0.1 MeV до области континуума добавлены еще 13 уровней.

На рис.10 представлены все имеющиеся в EXFOR экспериментальные данные, которых немного.

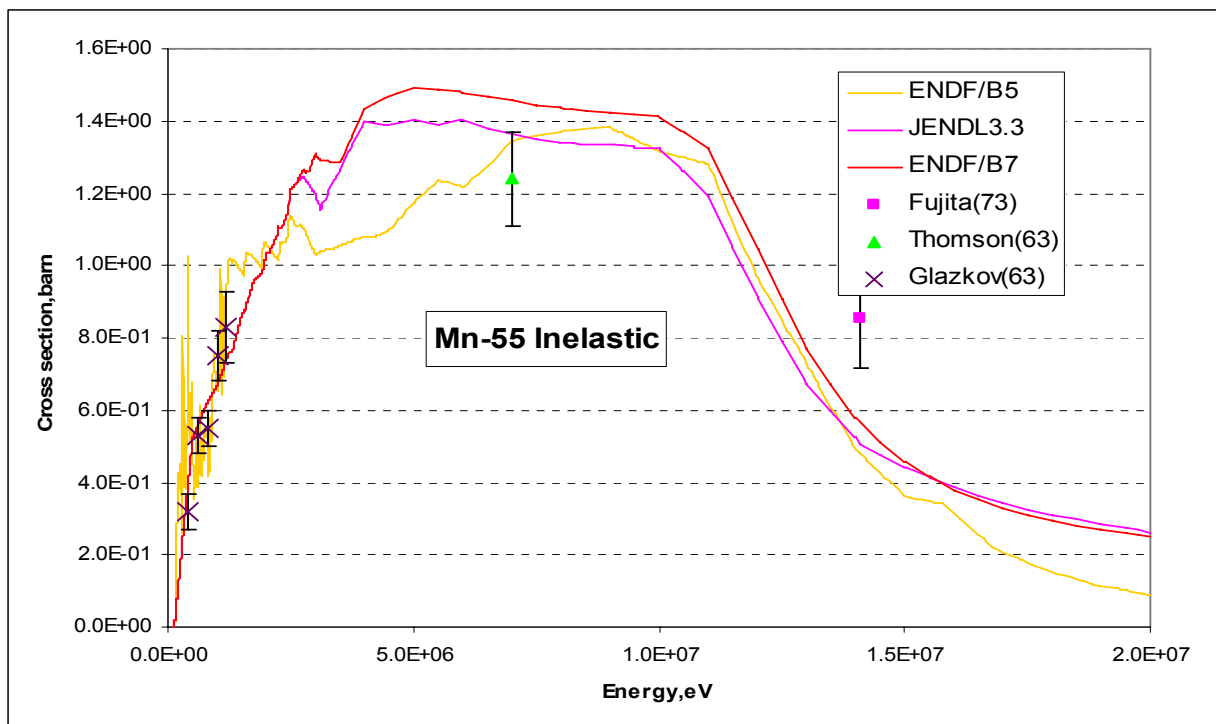


Рис. 8. Сечение неупругого рассеяния

3.5. Сечение реакции (n,2n)

Сечение реакции (n,2n) довольно хорошо измерялось в разное время и есть современные данные. Все они, за исключением данных Paulsen(65) и Soerwasono(92), в пределах ошибки согласуются. В библиотеках оценки совпадают, поэтому не видно различий ENDF/B-7 и JENDL3.3. Такая же ситуация и для всех остальных реакций. Поэтому на рисунках приводится одна оценка.

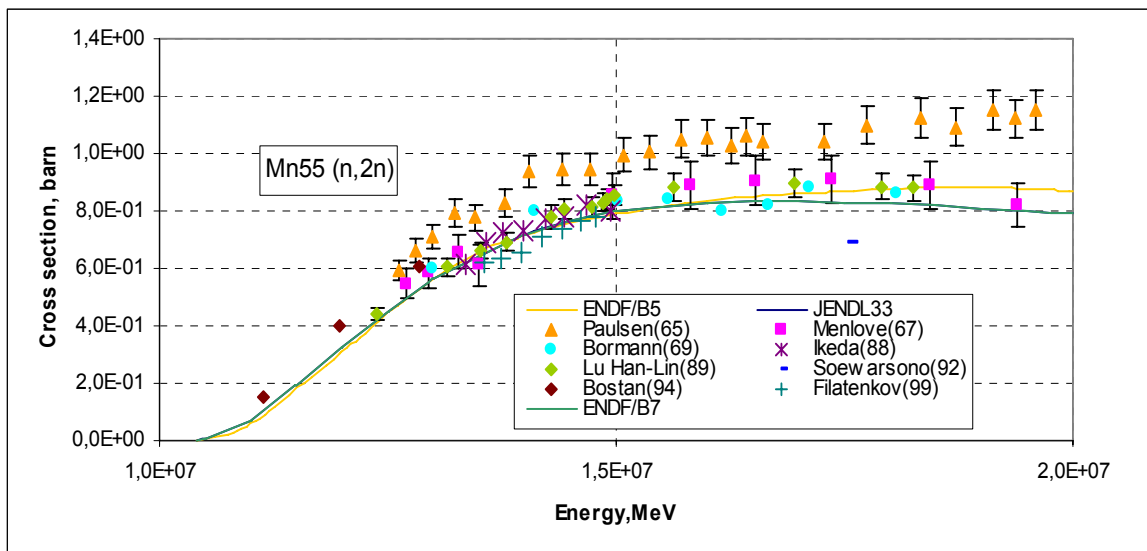


Рис.9. Сечение реакции (n,2n)

3.6. Сечения реакций (n, n'p), (n, n'α), (n,d),(n,t) и (n,He³)

Для этих реакций оцененные данные были получены по программе TNG(как и для реакций (n,p) и (n,α) – см следующий пункт). Экспериментальных данных в EXFOR для сечений (n, n'p), (n, n'α), (n,d) нет. Поэтому на рис. приводятся сравнение экспериментальных данных для (n,t) и (n,He³). На экспериментальных данных Sudar(79) основывалась оценка сечения (n,t)(голубая линия), как указано в файле. Реакция (n,He³) – на эксперименте Diksic(74), у которого указана погрешность 50%. Новых данных нет.

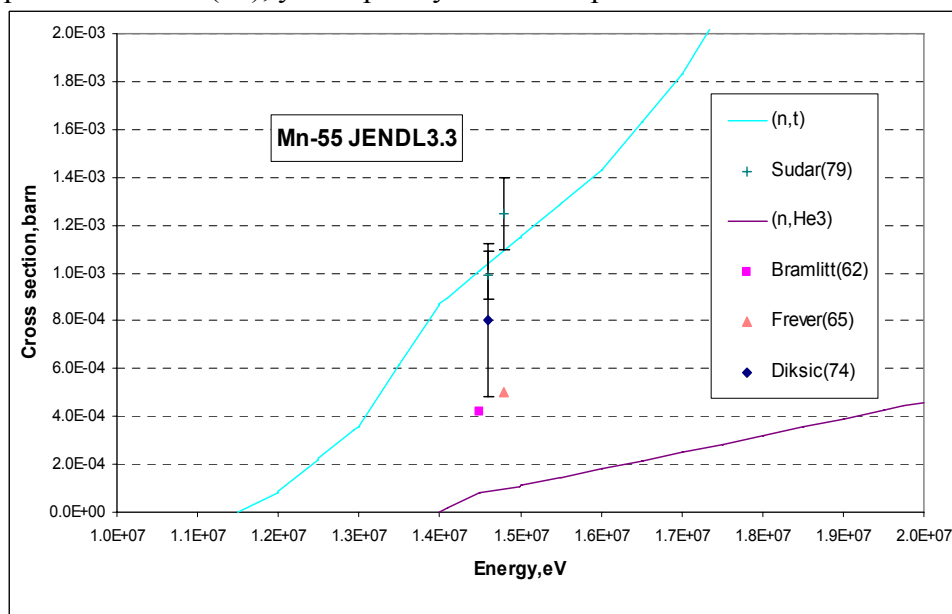


Рис.10.Сечение реакций (n,t) и (n,He³)

3.7. Сечения реакций (n,p) и (n,α)

Сечение реакций (n,p) и (n,α) хорошо представлено экспериментальными данными. Сечение (n,p) до 13 МэВ практически повторяет поведение данных эксперимента Bostan(94),но идет немного выше. Выше 13 МэВ видно, что кривая оценки прошла между двумя экспериментальными данными.

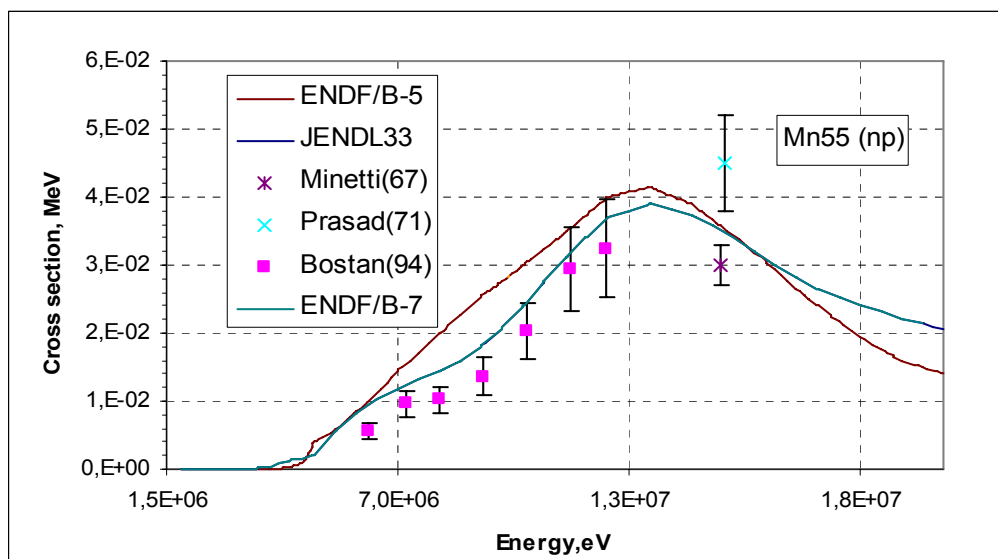


Рис.11.Сечение реакций (n,p)

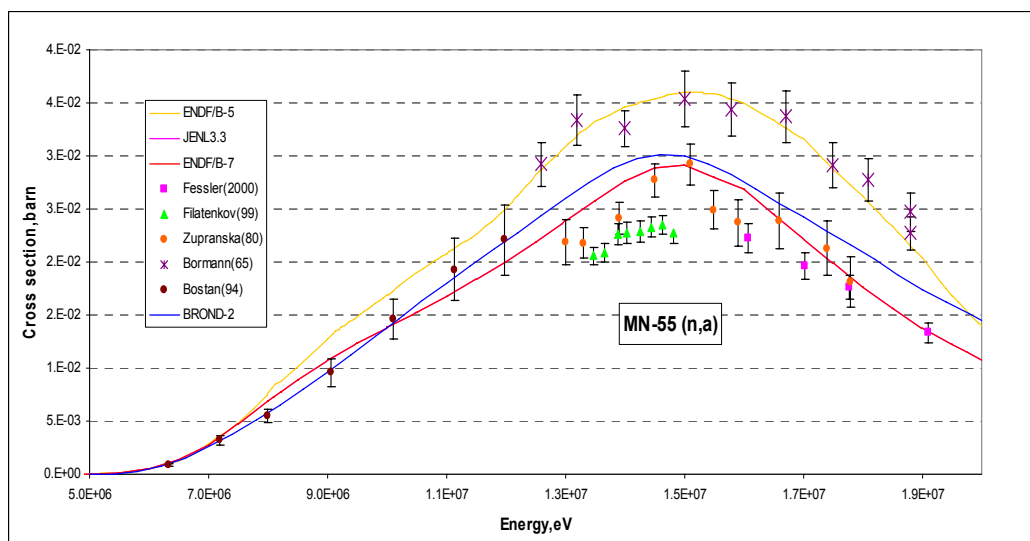


Рис.12.Сечение реакций (n,α)

Сечение (n,α) до 13 МэВ хорошо описывается экспериментом Bostan(94). Выше 13 МэВ разброс экспериментальных данных большой. Оценка проходит по середине и ближе всего к данным Zupranska(80). Синим цветом приводится оценка из библиотеки BROND-2.

3.8. Другие реакции

В оценке присутствуют следующие сечения реакций:

| MT | Реакция образования | Сумма сечений |
|-----|---------------------|---------------|
| 203 | протона | 28+103 |
| 204 | дейтерия | 104 |
| 205 | трития | 105 |
| 206 | He ³ | 106 |
| 207 | α-частицы | 22+107 |

Они остаются в файле.

4. Энерго-угловые распределения

4.1. Анизотропия упругого и неупругого рассеяния.

В оценке JENDL3.3 угловые распределения MF=4 приведены для упруго и неупругого рассеяния. Они представлены коэффициентами Лежандра в системе центра масс. В библиотеке ENDF/B7 в файле 4 приводится только угловое распределение упругого рассеяния, которые полностью повторяют оценку JENDL3.3. На рис.13 приводятся угловые распределения для выборки по энергии нейтрона 3,7,14.1 MeV.

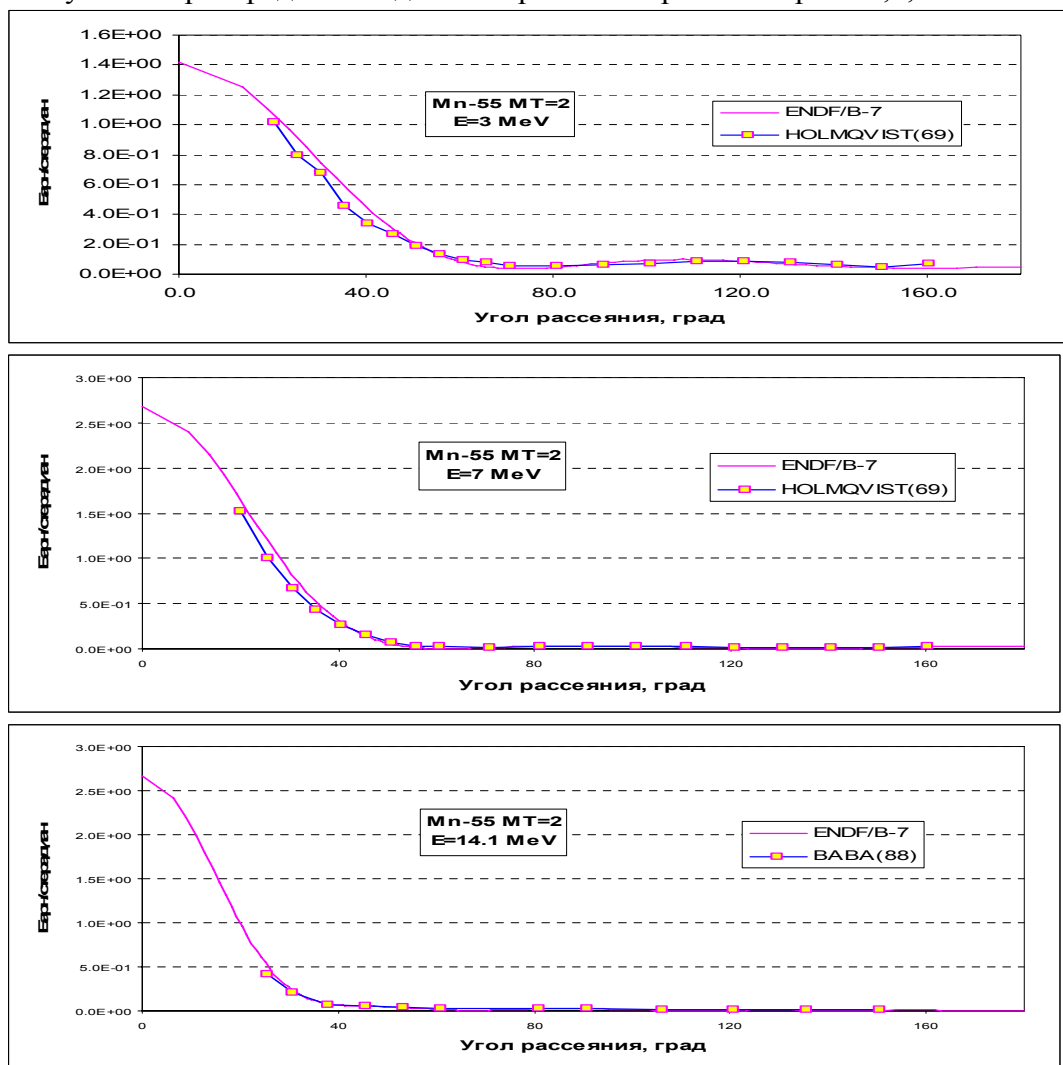


Рис.13а-с. Угловые распределения Mn-55

Видно, что согласие довольно хорошее с имеющимися экспериментальными данными. Неупругое рассеяние измерялось довольно активно в 70-х годах. Поскольку в оценке угловое распределение представлено по уровням, то сравнение было решено не проводить в силу большой подготовительной работы.

4.2. Энерго-угловые распределения других реакций

В оценке JENDL3.3 энерго-угловые распределения нейтронов для реакций (n,2n), (n, p), (n, n'p), (n, n'α), неупругий континуум представлены в файлах MF=6. Там же приводятся энерго-угловые распределения продуктов реакций с образованием протона, дейтерия, трития, He³ и α-частицы. Распределения заданы коэффициентами разложения по полиномам Лежандра.

В оценке ENDF/B7 энерго-угловые распределения продуктов реакций (n,2n), (n, n'p), (n, n'α), (n,p), (n, α) получены по программе TNG.

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

Фотоны образуются на Mn55 в реакциях неупругого рассеяния MT=4,(51-), (n,2n) MT=16, (n,n'a) MT=22, (n,n'p) MT=28, (n,γ) MT=102, (n,p) MT=103, (n,α) MT=107. В библиотеках ENDF/B7 и JENDL3.3 фотонные данные получены по программе TNG.

В JENDL3.3 в файле MF=12 (множественности образования гамма-квантов и вероятности переходов) неупругое рассеяние представлено множественностями для MT=4, как и для всех остальных реакций(MT=16, 22,28,102,103,107). В файлах MF=14,15 находятся данные по угловому и энергетическому распределению для реакций всех этих реакций. Угловые распределения – изотропны для всех реакций.

В ENDF/B7 приводятся сами уровни(29) и схемы вероятностей переходов, которые приведены в Таблице1. Кроме фотонов неупругого рассеяния в файле MF=12 приводятся множественности фотонов радиационного захвата.MT=102. Фотоны и их распределения остальных реакций MT=16,22,28,102,103,107 представлены через файл MF=6.

Поскольку в ENDF/B7 приводятся вероятности и схемы уровней, то предпочтение было отдано данным именно этой библиотеки.

Таблица 1.
Схема уровней и вероятностей переходов для Mn-55

| N | Энергия уровня, eV | Переход | Энергия гамма-кванта, eV | Вероятность перехода, %. |
|----|-----------------------|---------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0 | 0.0000 | | | |
| 51 | 1.2600E+05 | 1→0 | 1.2600E+05 | 1.00 |
| 52 | 9.8400E+05 | 2→1 | 8.5800E+05 | 0.95 |
| | | 2→0 | 9.8400E+05 | 0.05 |
| 53 | 1.2900E+06 | 3→2 | 3.0600E+05 | 0.90 |
| | | 3→1 | 1.1640E+06 | 0.10 |
| 54 | 1.2920E+06 | 4→0 | 1.2920E+06 | 0.20 |
| | | 4→1 | 1.1660E+06 | 0.80 |
| 55 | 1.2930E+06 | 5→0 | 1.2930E+06 | 1.00 |
| 56 | 1.5280E+06 | 6→1 | 1.4020E+06 | 0.03 |
| | | 6→0 | 1.5280E+06 | 0.97 |
| 57 | 1.8840E+06 | 7→1 | 1.7580E+06 | 0.43 |
| | | 7→0 | 1.8840E+06 | 0.57 |
| 58 | 2.0150E+06 | 8→2 | 1.0310E+06 | 0.92 |
| | | 8→0 | 2.0150E+06 | 0.08 |
| 59 | 2.1980E+06 | 8→2 | 1.2140E+06 | 0.33 |
| | | 8→1 | 2.0720E+06 | 0.06 |
| | | 8→0 | 2.1980E+06 | 0.61 |
| 60 | 2.2150E+06 | 10→0 | 2.2150E+06 | 1.00 |
| 61 | 2.2520E+06 | 11→0 | 2.2520E+06 | 1.00 |
| 62 | 2.2670E+06 | 12→6 | 7.3900E+05 | 0.28 |
| | | 12→0 | 2.2670E+06 | 0.72 |
| 63 | 2.3120E+06 | 13→4 | 1.0200E+06 | 0.90 |
| | | 13→2 | 1.3280E+06 | 0.10 |
| 64 | 2.3660E+06 | 14→1 | 2.2400E+06 | 0.74 |
| | | 14→0 | 2.3660E+06 | 0.26 |
| 65 | 2.3980E+06 | 15→2 | 1.4140E+06 | 0.25 |
| | | 15→1 | 2.2720E+06 | 0.75 |
| 66 | 2.4270E+06 | 16→0 | 2.4270E+06 | 1.00 |

| | | | | |
|----|------------|-------|------------|------|
| 67 | 2.5630E+06 | 17→0 | 2.5630E+06 | 1.00 |
| 68 | 2.7270E+06 | 18→4 | 1.4350E+06 | 0.2 |
| | | 18→2 | 1.7430E+06 | 0.3 |
| | | 18→0 | 2.7270E+06 | 0.5 |
| 69 | 2.7530E+06 | 19→7 | 8.6900E+05 | 0.33 |
| | | 19→1 | 2.6270E+06 | 0.43 |
| | | 19→0 | 2.7530E+06 | 0.24 |
| 70 | 2.8220E+06 | 20→7 | 9.3800E+05 | 0.36 |
| | | 20→3 | 1.5300E+06 | 0.64 |
| 71 | 2.8240E+06 | 21→7 | 9.4000E+05 | 0.30 |
| | | 21→1 | 2.6980E+06 | 0.70 |
| 72 | 2.8730E+06 | 22→7 | 1.3450E+06 | 0.77 |
| | | 22→1 | 2.8730E+06 | 0.23 |
| 73 | 2.9540E+06 | 23→1 | 2.8280E+06 | 0.84 |
| | | 23→0 | 2.9540E+06 | 0.16 |
| 74 | 2.9760E+06 | 24→6 | 1.4480E+06 | 0.23 |
| | | 24→1 | 2.9760E+06 | 0.77 |
| 75 | 2.9920E+06 | 25→2 | 2.0080E+06 | 0.32 |
| | | 25→1 | 2.8660E+06 | 0.68 |
| 76 | 3.0060E+06 | 26→0 | 3.0060E+06 | 1.00 |
| 77 | 3.0360E+06 | 27→0 | 3.0360E+06 | 1.00 |
| 78 | 3.0380E+06 | 28→12 | 3.0380E+06 | 1.00 |
| 79 | 3.0400E+06 | 29→0 | 3.0400E+06 | 1.00 |
| 91 | 3.0460E+06 | | | |

6. Образование радиоактивных продуктов

Лишь одна из нейтронных реакций на марганце – реакция (n,2n) -ведет к образованию сравнительно долгоживущего радионуклида – ^{54}Mn ($T_{1/2}= 312.1$ день, 100% позитронная активность). Во всех остальных реакциях образуются либо стабильные, либо короткоживущие радионуклиды. Наиболее важным из них является ^{56}Mn ($T_{1/2}= 2.579$ часа, 100% бета- активность), образующийся при радиационном захвате.

7. Погрешности нейтронных сечений.

7.1. Погрешность полного сечения.

Ковариационные матрицы погрешности представлены и в JENDL3.3 и в ENDF/B7.

В тепловой области погрешности можно оценить по Мухабхабу (новый дает для сечения захвата $13.36\pm 0.05(0.4\%)$; старый – $13.3\pm 0.2(1.5\%)$) У него же есть оценка погрешности резонансного интеграла. $14.0\pm 0.3(2.1\%)$.

Имеются также погрешности сечений марганца и корреляции между ними в LUNDe. Для захвата там 1.5% в тепловой точке, что слишком много (это и отметить).

| % | Мухабхаб(old), | LUND |
|------------------------|----------------|------|
| $\sigma_{\text{тепл}}$ | 1.5 | 1.5 |
| I_{γ} | 2 | 7 |

8. Перечень цитированных экспериментальных работ

8.1. Полное сечение

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|-----------------|---------------|------------------------|---------|
| Stubbins(1951) | W.F.Stubbins | J,PR,84,902,51 | 5101 |
| Cierjacks(1969) | S.Cierjacks | R,KFK-1000,(SUPP.2),69 | 6902 |
| Foster(19871) | D.G.Foster Jr | J,PR/C,3,576,197102 | 7102 |
| Pineo(1974) | W.F.E.Pineo | J,AP,84,165,7405 | 7405 |
| Garg(1978) | J.B.Garg | J,NSE,65,76,7801 | 7801 |
| J.A.Harvey | J.A.Harvey | W,HARVEY,1980 | 8001 |

8.2. Сечения реакций упругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|----------------|---------------|---------------------|---------|
| Hibdon(49) | C.T.Hibdon | J,PR,76,100,4907 | 4907 |
| Kazakova(65) | L.Ya.Kazakova | S,EANDC-50,200,6507 | 6507 |
| Holmqvist(69) | B.Holmqvist | R,AE-366,6906 | 6906 |
| Schweitzer(78) | Th.Schweitzer | W,SEELIGER,781116 | 7811 |

8.3. Сечения реакций (n,γ)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|---------------|---------------|-----------------------|---------|
| Menlove(67) | H.O.Menlove | J,PR,163,1299,67 | 6701 |
| Dovbenko(69) | A.G.Dovbenko | J,AE,26,(1),67,6901 | 6901 |
| Rigoleur(76) | C.Le Rigoleur | R,CEA-R-4788,7610 | 7610 |
| Schwerer(76) | O.Schwerer | J,NP/A,264,105,760621 | 7606 |
| Garg(78) | J.B.Garg | J,PR/C,18,2079,7811 | 7811 |
| Budnar(79) | M.Budnar | R,INDC(YUG)-6,7912 | 7912 |
| Magnusson(80) | G.Magnusson | J,PS,21,(1),21,8001 | 8001 |
| Gautam(90) | R.P.Gautam | J,IPA,28,235,9005 | 9005 |

8.4. Сечение неупругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|-------------|-------------|------------------------|---------|
| Thomson(63) | D.B.Thomson | J,PR,129,1649,6302 | 6302 |
| Glazkov(63) | N.P.Glazkov | J,AE,15,(5),416,196311 | 6311 |
| Fujita(63) | I.Fujita | J,NST,9,301,197305 | 7305 |

8.5. Сечение ($n,2n$)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|----------------|----------------|------------------------|---------|
| Paulsen(65) | A.Paulsen | J,JNE/AB,19,907,6511 | 6511 |
| Menlove(67) | H.O.Menlove | J,PR,163,1308,67 | 6701 |
| Bormann(69) | M.Bormann | J,NP/A,130,195,6906 | 6906 |
| Ikeda(88) | Y.Ikeda | R,JAERI-1312,88 | 8801 |
| Han-Lin(89) | Lu Han-Lin | R,INDC(CPR)-16,8908 | 8908 |
| Geraldo(92) | L.P.Geraldo | J,RCA,57,63,92 | 9201 |
| Soewarsono(92) | T.S.Soewarsono | S,JAERI-M-92-027,354,9 | 9203 |
| Bostan(94) | M.Bostan | J,PR/C,49,266,94 | 9401 |
| Filatnikov(99) | A.A.Filatnikov | R,RI-252,199905 | 9905 |

8.6. Сечение реакции ($n,He3$) и (n,t)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|--------------|--------------|-----------------|---------|
| Bramlitt(62) | E.T.Bramlitt | J,PR,125,297,62 | 6201 |

| | | | |
|-------------|-----------|---------------------|------|
| Frevert(65) | E.Frevert | J,APA,20,304,6508 | 6508 |
| Diksic(74) | M.Diksic | J,JIN,36,477,74 | 7401 |
| Sudar(79) | S.Sudar | J,NP/A,319,157,7904 | 7904 |

8.10.Сечение реакции (n,p)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|-------------|-----------|-----------------------|---------|
| Minetti(67) | B.Minetti | J,ZP,199,275,6701 | 6701 |
| Prasad(71) | R.Prasad | J,NC/A,3,(3),467,7106 | 7106 |
| Bostan(94) | M.Bostan | J,PR/C,49,266,94 | 94 |

8.11.Сечение реакции (n, α)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR |
|----------------|----------------|------------------------|---------|
| Fessler(00) | A.Fessler | J,NSE,134,(2),171,2000 | 2001 |
| Filatenkov(99) | A.A.Filatenkov | R,RI-252,199905 | 9905 |
| Bostan(94) | M.Bostan | J,PR/C,49,266,94 | 9401 |
| Zupranska(80) | E.Zupranska | J,APP/B,11,853,8011 | 8011 |
| Bormann(65) | M.Bormann | J,NP,63,438,6503 | 6503 |

9. Заключение

9.1.Вывод: в библиотеку РОСФОНД данные для Mn55 приняты в соответствии с оценкой ENDF/B-7.

9.2. Автор обоснования оцененных данных
Забродская С.В.

26. ЖЕЛЕЗО

В РОСФОНД включаются данные для четырех стабильных изотопов железа и трех радиоизотопов.

26.1. Железо-54

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 26$ (заряд)
- 1.2. $A = 54$ (атомный номер)
- 1.3. $A_w = 53.476$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Содержание в естественной смеси 5.845 ± 0.035 (атомарные проценты)
- 1.5. Спин основного состояния 0^+

Годы проведения оценок для ^{54}Fe в разных библиотеках приведены в Таблице 1. Библиотека ENDF/B-VII.1 отличается от библиотеки ENDF/B-VI.8 только данными в секции MF=6, MT=5 (энерго-угловыми распределениями вторичных нейтронов при энергии выше 20 МэВ исправлены).

2. Область разрешённых резонансов и тепловые сечения

Значения в ENDF/B-6.8 получены из R-матричного анализа с помощью программы SAMMY данных Харви (1989) с высоким разрешением. Фоновое сечение добавлено к сечению захвата в области разрешённых резонансов для описания данных Аллена (1977) с низким разрешением, что позволило учесть захватную площадь под пропущенными резонансами. Данные в области разрешённых резонансов в библиотеках JENDL-3.3 и JEFF-3.1 взяты из библиотеки ENDF/B-VI.8. Оценки BROND-2.2 и CENDL-2 основываются на старых измерениях выполненных до 1985 года. Основные характеристики всех оценок приведены в Таблице 1. Анализ статистических распределений приведенных нейтронных ширин, расстояний между уровнями и графиков нарастающих сумм уровней показывает избыток узких s- резонансов выше 400 кэВ и недостаток p- резонансов ниже 400 кэВ, возможно неправильную идентификацию первого d- уровня как уровня d- волны из-за его аномально большой нейтронной ширины и небольшой недостаток p- резонансов ниже 70 кэВ.

Сечения в тепловой точке и резонансный интеграл захвата полученный программой PSYCHE7.1 в разных библиотеках согласуются с последней рекомендацией Мугхабгхаба (Mu03).

Таблица 1. Характеристики оценок в тепловой точке и резонансной области.

| Библиотека | Год оценки | σ_{el}^{therm} барн | $\sigma_{n,\gamma}^{therm}$ барн | RI барн | R_0 фм | $E_{min}(RRR)$ эВ | $E_{max}(RRR)$ кэВ |
|-------------|------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------|-------------|----------------------|-----------------------|
| ENDF/B-VI.8 | 1996 | 2.181 | 2.251 | 1.182 | 5.48 | 0.00001 | 700 |
| BROND-2 | 1985 | 2.165 | 2.140 | 1.198 | 5.00 | 0.00001 | 500(s) 200(p, d) |
| JEFF-3.1 | 2004 | 2.181 | 2.251 | 1.186 | 5.48 | 0.00001 | 700 |
| JENDL-3.3 | 2000 | 2.181 | 2.251 | 1.189 | 5.48 | 0.00001 | 700 |
| CENDL-2 | 1990 | 0.4329 | 2.156 | 1.303 | 5.6 | 0.00001 | 250 |
| Mu03 | 2003 | | 2.25±0.18 | 1.2±0.2 | | | |

Выводы: оценка библиотеки ENDF/B-VI.8 (ENDF/B-VII.b1) является в настоящее время наилучшей, несмотря на то, что идентификация спиновых характеристик резонансов и может быть улучшена. Это улучшение идентификации практически не повлияет на средние сечения.

3. Сечения для быстрых нейтронов ($E_n > 700$ кэВ)

Сравнение различных сечений для быстрых нейтронов приводится на рисунках 1 – 11. Верхняя граница энергии нейтронов в библиотеке ENDF/B-VI.8 равна 150 МэВ, в библиотеке JEFF-3.1 – 200 МэВ и во всех других библиотеках – 20 МэВ. Из анализа рисунков можно отметить следующее. Полное и упругое сечения в библиотеке CENDL-2 в интервале энергий 5 – 12 МэВ являются заниженными. Это связано с тем, что оценка CENDL-2 упругого рассеяния базируется на экспериментальных данных Эль Кади, которые для других ядер лежат систематически ниже результатов других работ. Полное сечение неупругого рассеяния (рис. 5) во всех библиотеках, кроме BROND-2, испытывает заметное падение при энергии выше 11 МэВ, которое может быть объяснено только заметной конкуренцией со стороны канала реакции, который открывается при этой энергии. Таким каналом является реакция (n,pn).

Учитывая имеющиеся экспериментальные данные, можно заключить, что **сечения неупругого рассеяния и реакции (n,pn) во всех библиотеках кроме BROND-2 оценены не корректно.**

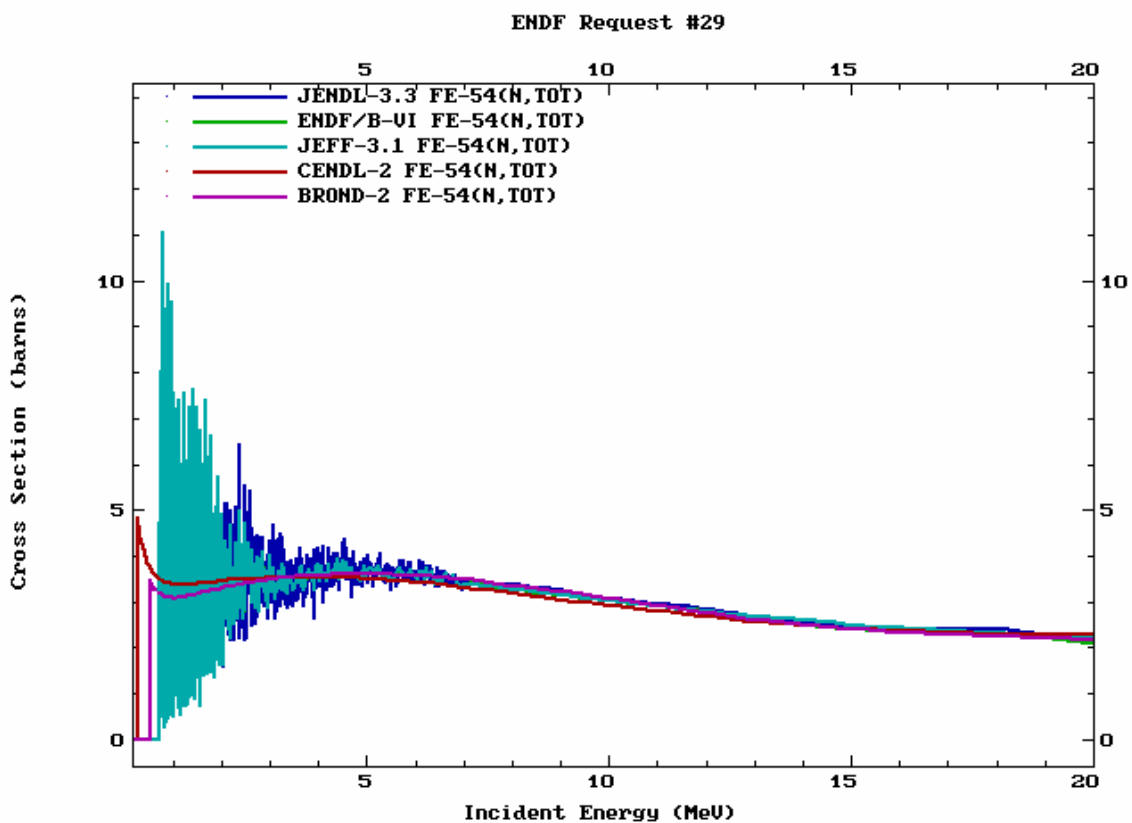


Рис. 1. Полное сечение в различных библиотеках для энергий выше области разрешённых резонансов.

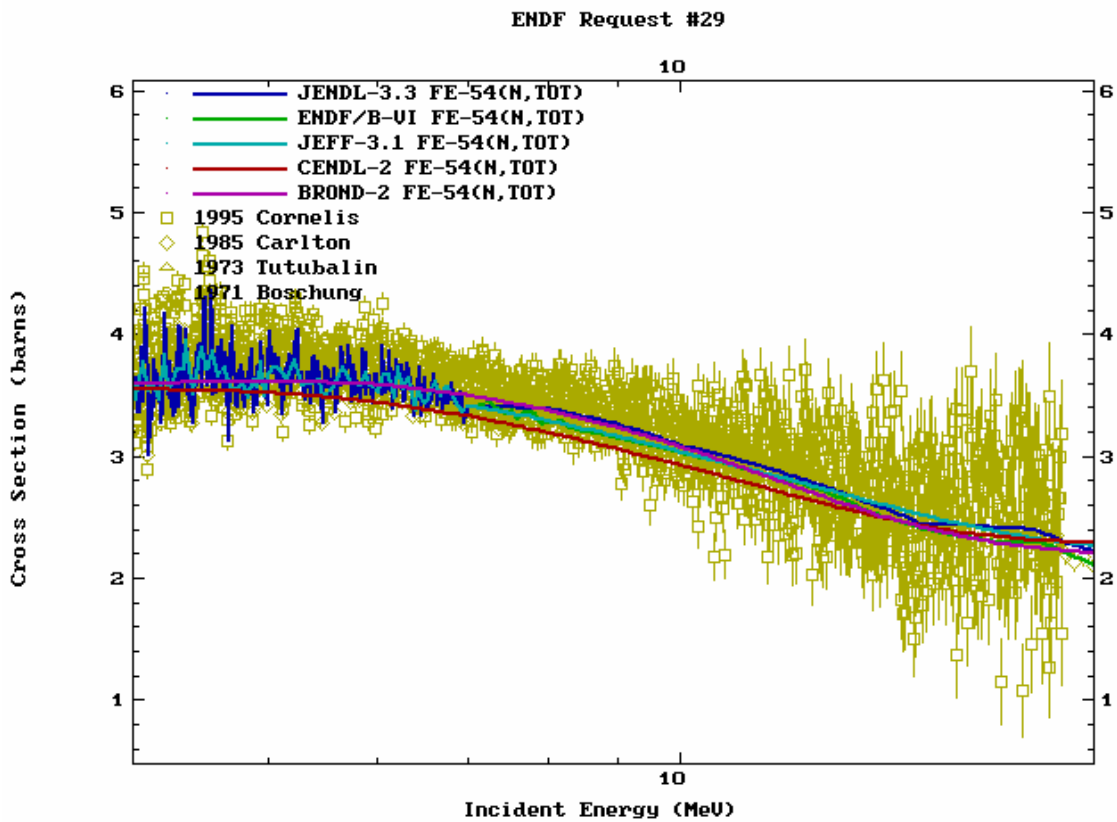


Рис. 2. Полное сечение в различных библиотеках в сравнении с экспериментальными данными для энергий выше 4 МэВ.

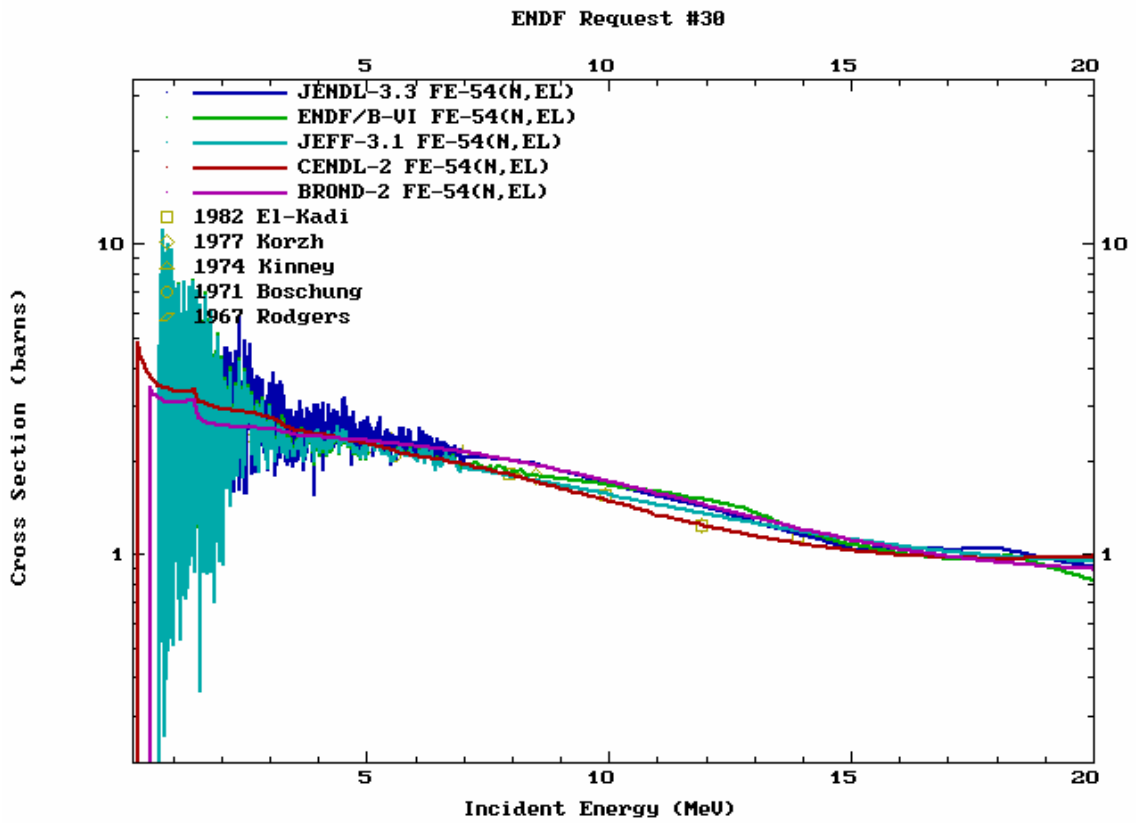


Рис. 3. Сечение упругого рассеяния в различных библиотеках для энергий выше области разрешённых резонансов.

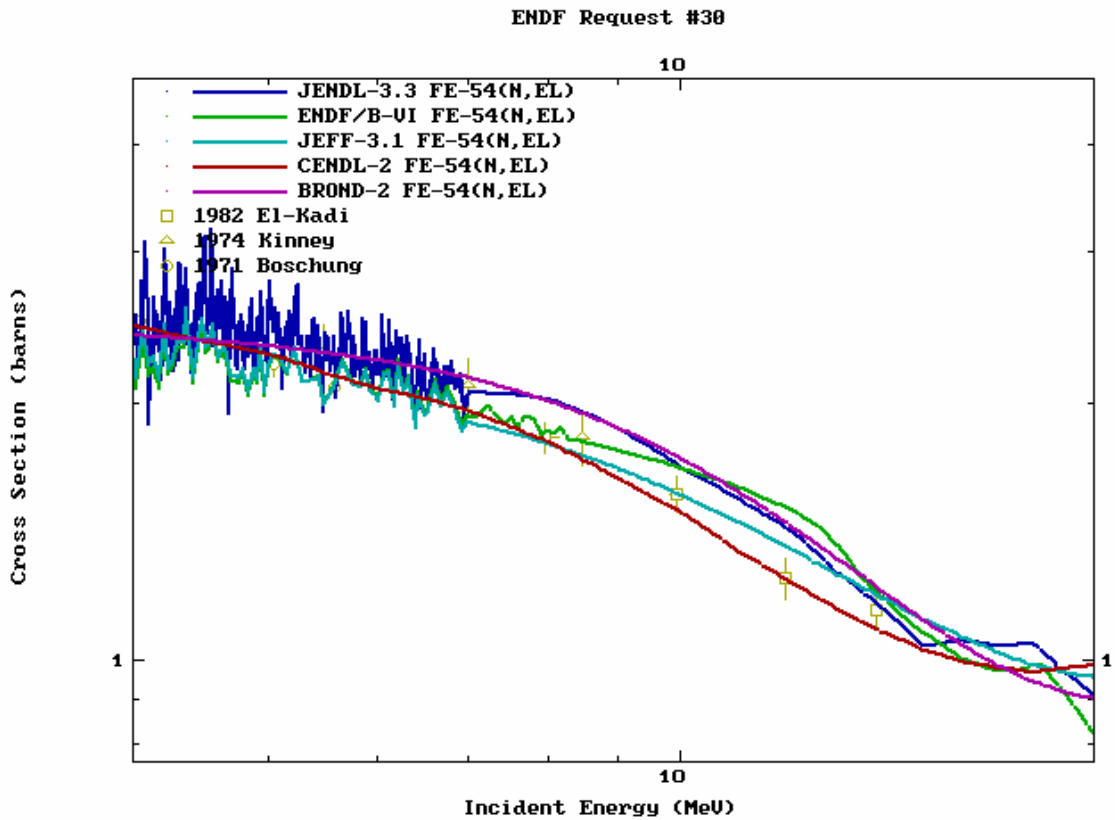


Рис. 4. Сечение упругого рассеяния в различных библиотеках в сравнении с экспериментальными данными для энергий выше 4 МэВ.

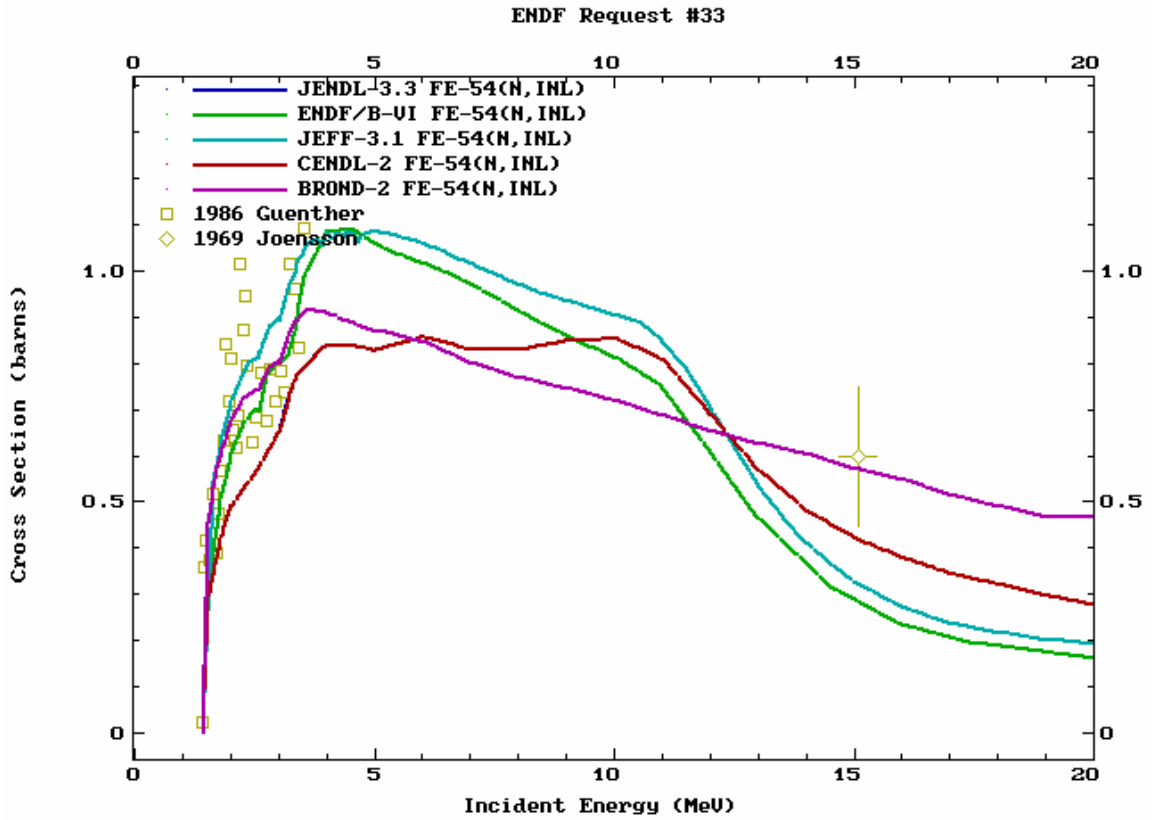


Рис. 5. Сечение неупругого рассеяния в различных библиотеках в сравнении с экспериментальными данными.

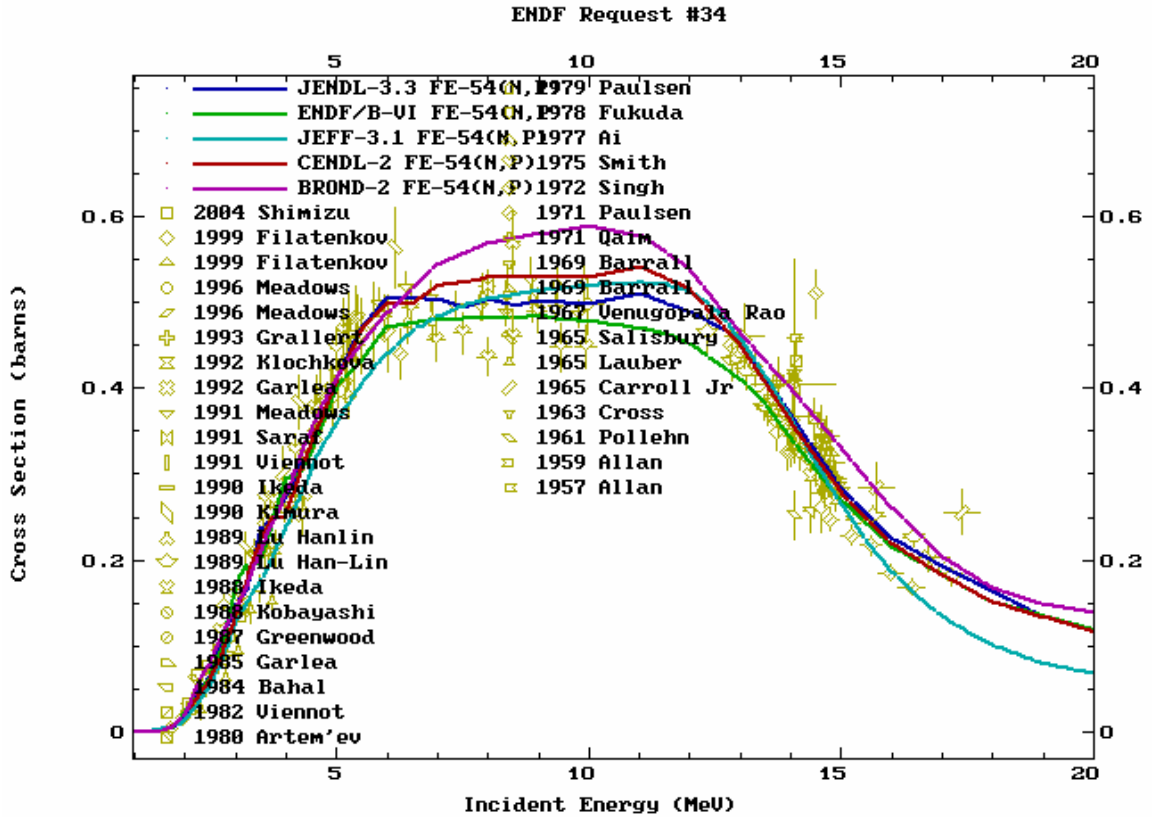


Рис. 6. Сечение (n,p) в различных библиотеках в сравнении с экспериментальными данными.

Для реакции (n,2n), показанной на рисунке 7, экспериментальные данные представлены двумя наборами данных: более высокие данные представляют полное

сечение (n,2n), а более низкие данные – парциальную реакцию (n,2n) заселяющее основное состояние $^{55}\text{Fe}^g$. BROND-2 наилучшим образом описывает сечение (n,2n).

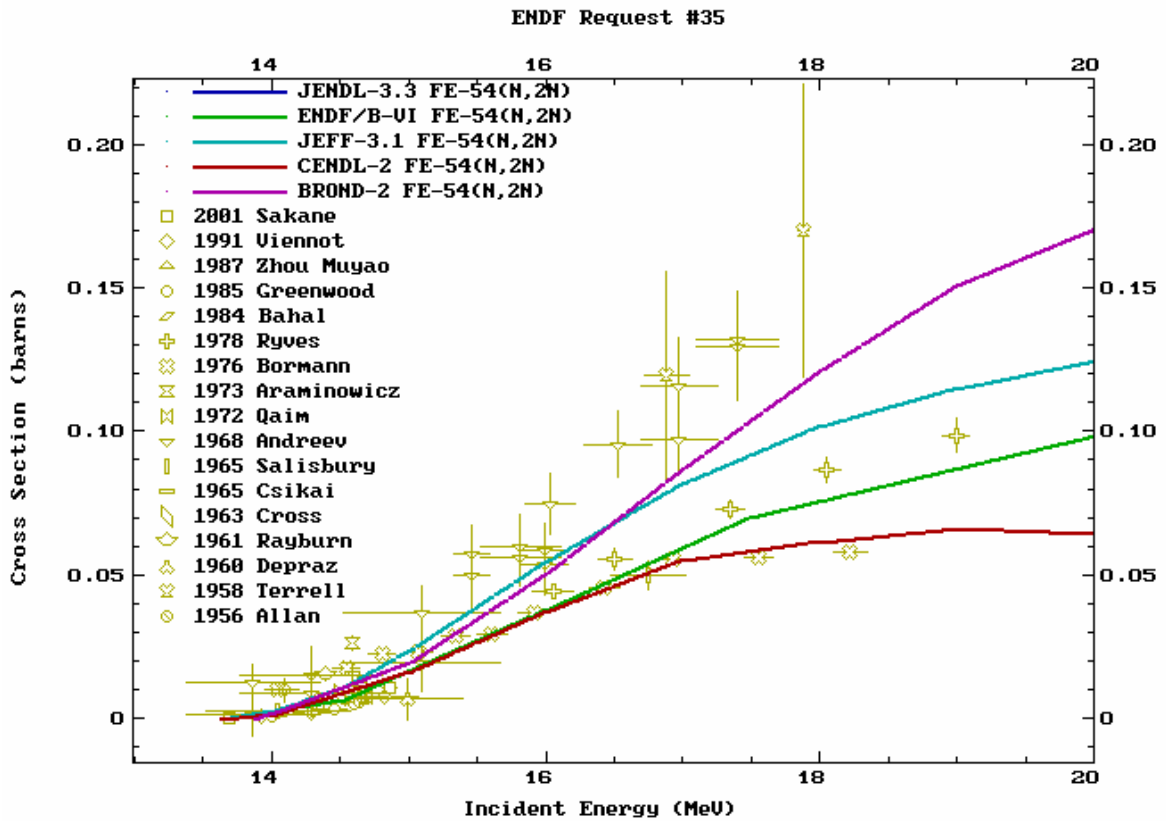


Рис. 7. Сечение (n,2n) в различных библиотеках в сравнении с экспериментальными данными.

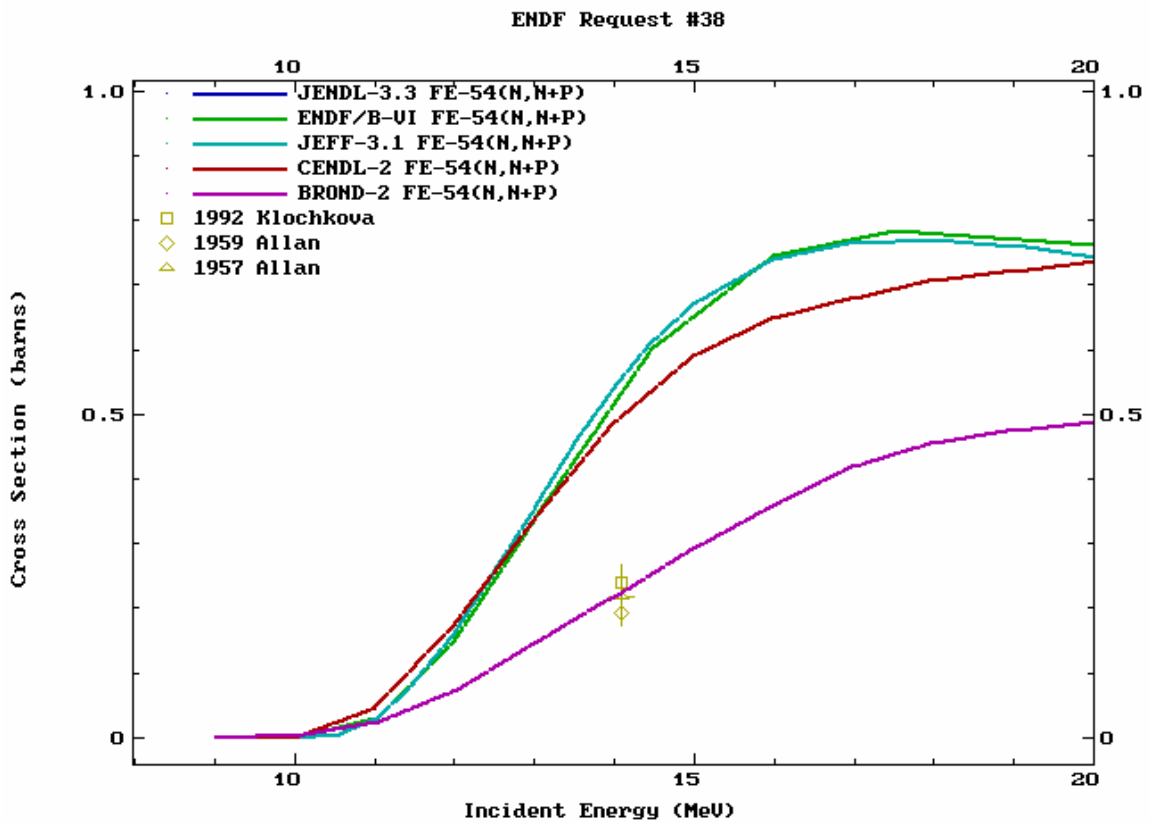


Рис. 8. Сечение (n,np) в различных библиотеках в сравнении с экспериментальными данными.

BROND-2 и JEFF-3.1 недооценивают сечение (n,α) в интервале энергий от 6 до 14 МэВ, а сечение (n,p) в BROND-2 является немного завышенным. Большое различие сечений захвата наблюдается в области энергий в несколько МэВ. Экспериментальные данные для ^{54}Fe отсутствуют в EXFOR, но анализ всех других данных для ядер области Cr-Fe-Ni и то, что в библиотеке ENDF/B-VI.8 учтены "сырые" данные Аллена до 5 МэВ делает оценку ENDF/B-VI.8 (и JEFF-3.1 близкую к ней) предпочтительней.

Выводы: несмотря на имеющиеся недостатки, оценки библиотек ENDF/B-VI.8 (ENDF/B-VII.b1) и JEFF-3.1 в быстрой области энергий являются предпочтительными.

4. Угловые и энергетические распределения вторичных частиц

BROND-2: угловые распределения упругого рассеяния взяты как для естественного железа в библиотеке ENDF/B-IV. Приведены 20 дискретных уровней неупругого рассеяния, в 9 из которых, являющихся уровнями коллективной природы, учтены вклады прямых процессов. Все энерго-угловые распределения в реакциях с возбуждением континуума уровней приведены как изотропные распределения Максвелла с заданной температурой.

ENDF/B-VI.b1 (ENDF/B-VI.8), JENDL-3.3 (JENDL-3.1) и JEFF-3.1: содержат полные и детальные энерго-угловые распределения всех вторичных частиц для нейтронов с энергией до 150 (ENDF/B-VII.b1) и 200 МэВ (JEFF-3.1). Учтены все механизмы реакций определяющие энерго-угловые распределения. Однако анализ интегральных сечений, выполненный выше, и анализ спектров нейтронов реакции (n,n') показывает, что сечение одного из 2-х каналов, вносящих вклад в реакцию $(n,np)=(n,n+p)+(n,p+n)$, а именно реакции $(n,n+p)$, является сильно завышенным, что приводит к завышенной оценке всего сечения (n,np) и к неправильной форме сечения (n,n') .

CENDL-2: представляет ревизию JENDL-3.1, где оценка энерго-угловых распределений выполнена независимо от оценки сечений, что может привести к потере согласованности между интегральными и дифференциальными сечениями.

Вывод: Оценки библиотек ENDF/B-VI.8 (ENDF/B-VII.b1), JENDL-3.3 и JEFF-3.1 несмотря на отмеченные недостатки являются предпочтительными.

5. Погрешности оценённых сечений

Одинаковые оценённые погрешности сечений приведены в ENDF/B-VI.b1 (ENDF/B-VI.8) и JEFF-3.1. Погрешности получены методом весьма грубой "экспертной" оценки. Ковариационные матрицы (за исключением реакции (n,p)) не заданы.

Вывод: Оценки погрешностей из библиотек ENDF/B-VI.8 (ENDF/B-VII.b1) и JEFF-3.1 являются единственно доступными.

6. Заключение

6.1. Общий вывод

Файл из библиотеки JEFF-3.1 может быть рекомендован как наилучший из рассмотренных. Для улучшения файла при его использования в расчетах термоядерных установках необходима совместная переоценка сечений (n,n') и (n,np). При внесении в РОСФОНД файлы MF=8, MF=10 и MF=33 опустить т.к. долгоживущие изомеры не образуются, а надежность оценки погрешностей здесь не анализировалась.

6.2. Автор обоснования оцененных данных

Проняев В.Г.

6.2 Содержание файла

26.2. Железо-55

Радиоактивно. ($T_{1/2}=2.73$ г) распадается в марганец-55 путем захвата орбитального электрона.

Заключение

В РОСФОНД принята оценка из EAF-2003

26.3. Железо-56

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z=26$ (заряд)
- 1.2. $A=56$ (атомный номер)
- 1.3. $A_w=55.454$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Содержание в естественной смеси 91.754 ± 0.036 (атомарные проценты)
- 1.5. Спин основного состояния 0^+

2. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата

Сечения при энергии 0.0253 эВ и резонансный интеграл захвата в различных библиотеках (Таблица 1) рассчитанные с помощью программы PSYCHE7.1 отличаются несущественно и находятся в пределах погрешности новой оценки С. Мугхабгхаба[1].

Таблица 1.

| Библиотека | Упругое сечение, б | Сечение захвата, б | Резонансный интеграл захвата, б |
|------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|
| BROND-3 | 12.08 | 2.590 | 1.340 |
| ENDF/B-VI.8 | 12.05 | 2.589 | 1.344 |
| JENDL-3.3 | 12.08 | 2.590 | 1.348 |
| JEFF-3.1 | 12.10 | 2.585 | 1.300 |
| CENDL-2 | 12.05 | 2.589 | 1.338 |
| С. Мугхабгхаб[1] | | 2.59 ± 0.14 | 1.4 ± 0.2 |

3. Резонансная область

Резонансная область представлена разрешёнными резонансами в области энергий нейтронов до 850 кэВ. Количество резонансов, их квантовые характеристики, положение и нейтронные ширины практически не отличаются от библиотеки к библиотеке. Небольшая вариация ширин захвата для р- и d- резонансов между ENDF/B-VI.8 (CENDL-2) и BROND-3 (JEFF-3.1, JENDL-3.3) ведёт к небольшим отличиям в средних сечениях захвата. JEFF-3.1 содержит на 5 р- и 2 d- резонанса больше, чем другие библиотеки. Статистические распределения характеристик уровней, несмотря на то, что идентификация р- и d- уровней не является однозначной, следуют ожидаемым из статистической модели реакций. На рисунках 1 – 3 показано сравнение распределений Вигнера, Портера-Томаса, нарастающей суммы резонансов и силовых функций с их модельной оценкой для s-, р- и d- волн в библиотеке BROND-3. Как показывает сравнение усреднённых сечения захвата с экспериментальными данными полученными с низким разрешением, выше энергии 400 кэВ возможна потеря части захватных площадей при восстановлении сечений из параметров резонансов. Для компенсации этого, в BROND-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VI.8 вводится фоновое сечение.

Вывод: Резонансные параметры в файлах различных библиотек отличаются незначительно и не влияют на выбор лучшей оценки. Сечение захвата в библиотеке JEFF-3.1 ниже средних сечений наблюдаемых на эксперименте.

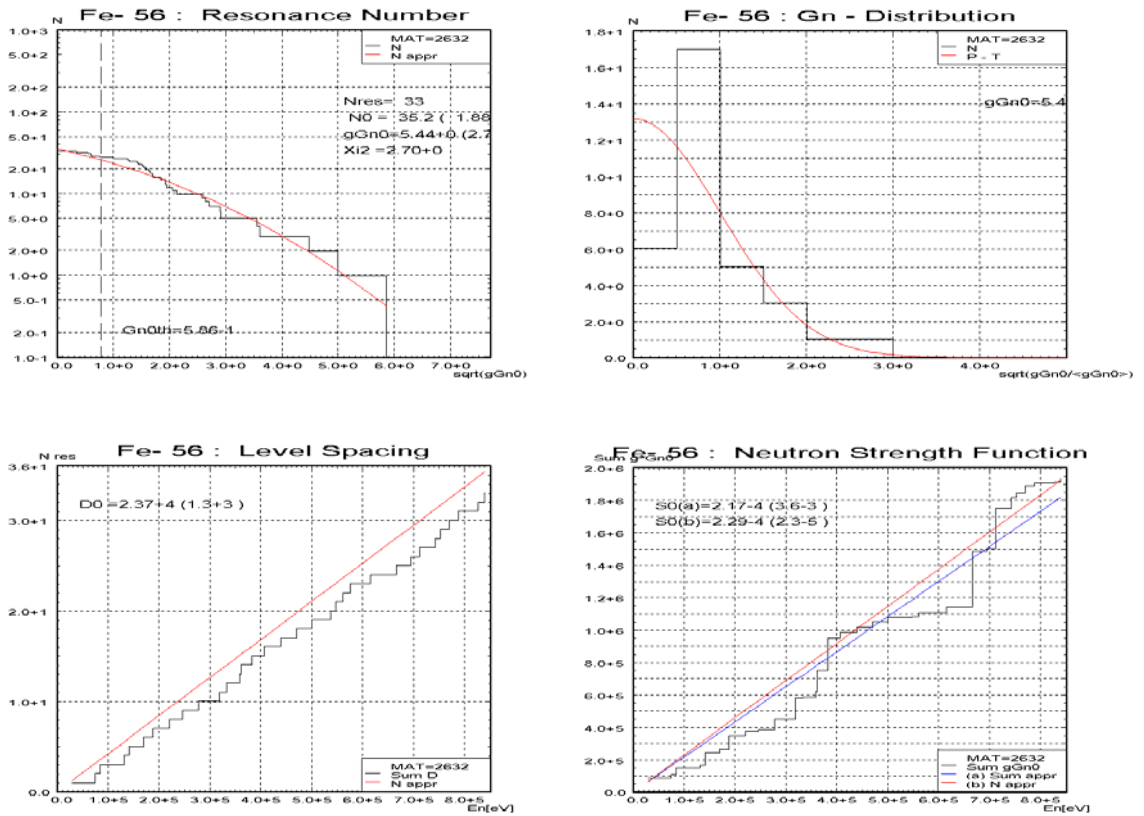
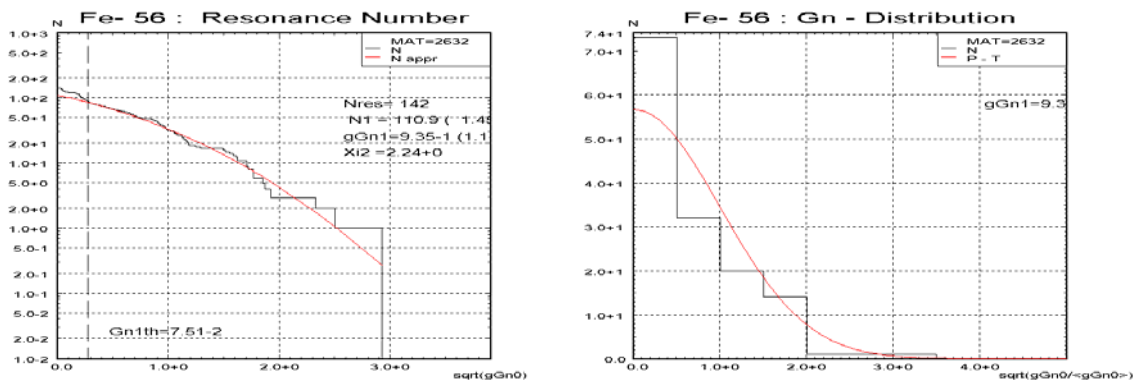


Рис. 1 (слева – направо и сверху – вниз). Распределение Вигнера, Портера-Томаса, суммы нарастающего числа уровней и приведённых нейтронных ширин для s-волны в библиотеке BROND-3.



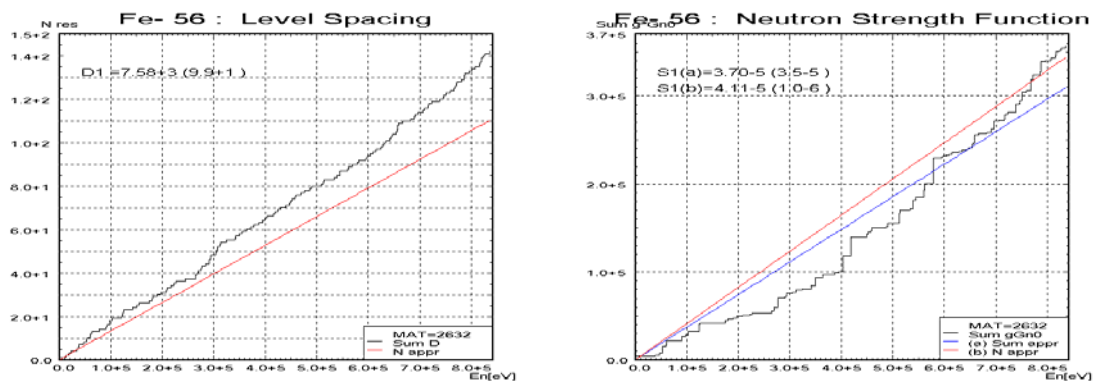


Рис. 2 Тоже что на Рис. 1, но для p- волны.

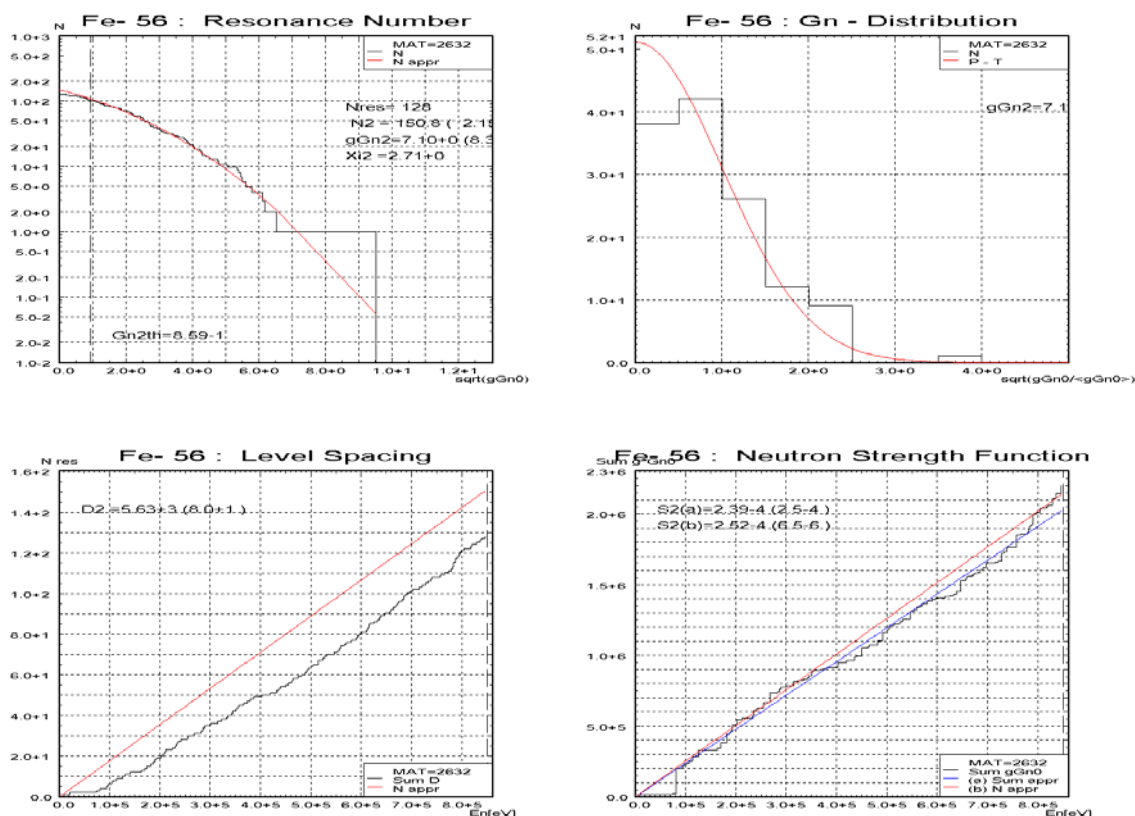


Рис. 3 Тоже что на Рис. 1, но для d- волны.

4. Сечения в области энергий 0.85 – 20 МэВ

Так как оценка BROND-3 (JEFF-3.1) в области быстрых нейтронов основана на одновременном описании методом наименьших квадратов всех экспериментальных данных по парциальным и полным сечениям доступным до 1993 года то вполне обосновано можно считать, что оценка наилучшим образом проходит через совокупность этих данных[2,3]. Поэтому в дальнейшем, для сравнения как правило привлекались только последние экспериментальные данные.

Сравнение полного сечения из библиотек BROND-3, ENDF/B-VI.8 и JENDL-3.3 показано на Рис. 4. Отметим, что новейшие данные показывают, что сечение в BROND-3 возможно недооценено приблизительно на 2 % при энергии выше 16 МэВ.

Сравнение сечения упругого рассеяния из библиотек BROND-3, ENDF/B-VI.8 и JENDL-3.3 показано на Рис. 5. Согласие оценки BROND-3 с прецизионными результатами последних измерений хорошее.

Сравнение различных оценок сечения неупругого рассеяния проведено в главе X посвящённой проверке данных в интегральных экспериментах.

Сечение реакции $(n,2n)$ из библиотеки BROND-3 хорошо согласуется с экспериментальными данными. Из-за высокого порога реакции $(n,3n)$ и небольших сечений реакций (n,np) и $(n,n\alpha)$ конкурирующих с реакцией $(n,2n)$, форма реакции $(n,2n)$ является плоской при энергии 18 – 20 МэВ.

На рисунке 7 показано сравнение сечения захвата в групповом представлении из библиотеки BROND-3 с имеющимися экспериментальными данными. Обсуждение качества оценок захвата проводится в главе X посвящённой проверке данных в интегральных экспериментах. Необходимо отметить, что фоновая подложка в сечение захвата введена в ENDF/B-VI.8 в область разрешённых резонансов для $E_n=400 - 850$ кэВ в групповом виде, в BROND-3 линейно, между тепловой точкой и 850 кэВ, в JENDL-3 – в групповом виде от 500 до 850 кэВ и отсутствует в JEFF-3.1. Это приводит к заметной недооценке сечения захвата в JEFF-3.1 для интервала 400 – 850 кэВ.

Сравнение сечения реакции (n,p) и (n,α) из библиотек оценённых данных с экспериментальными данными полученными после завершения оценки показаны на рисунках 8 и 8а. Согласие между оценёнными и новыми экспериментальными данными хорошее.

Экспериментальные данные по сечениям реакции (n,np) и $(n,n\alpha)$ малочисленны. Сравнение имеющихся данных с результатами оценок из разных библиотек показано на рисунках 9 и 10. Сечения всех других реакций малы и не важны для большинства приложений.

Вывод: Сечения в быстрой области в различных библиотеках отличаются незначительно и не могут служить основанием для предпочтения одной библиотекой перед другой.

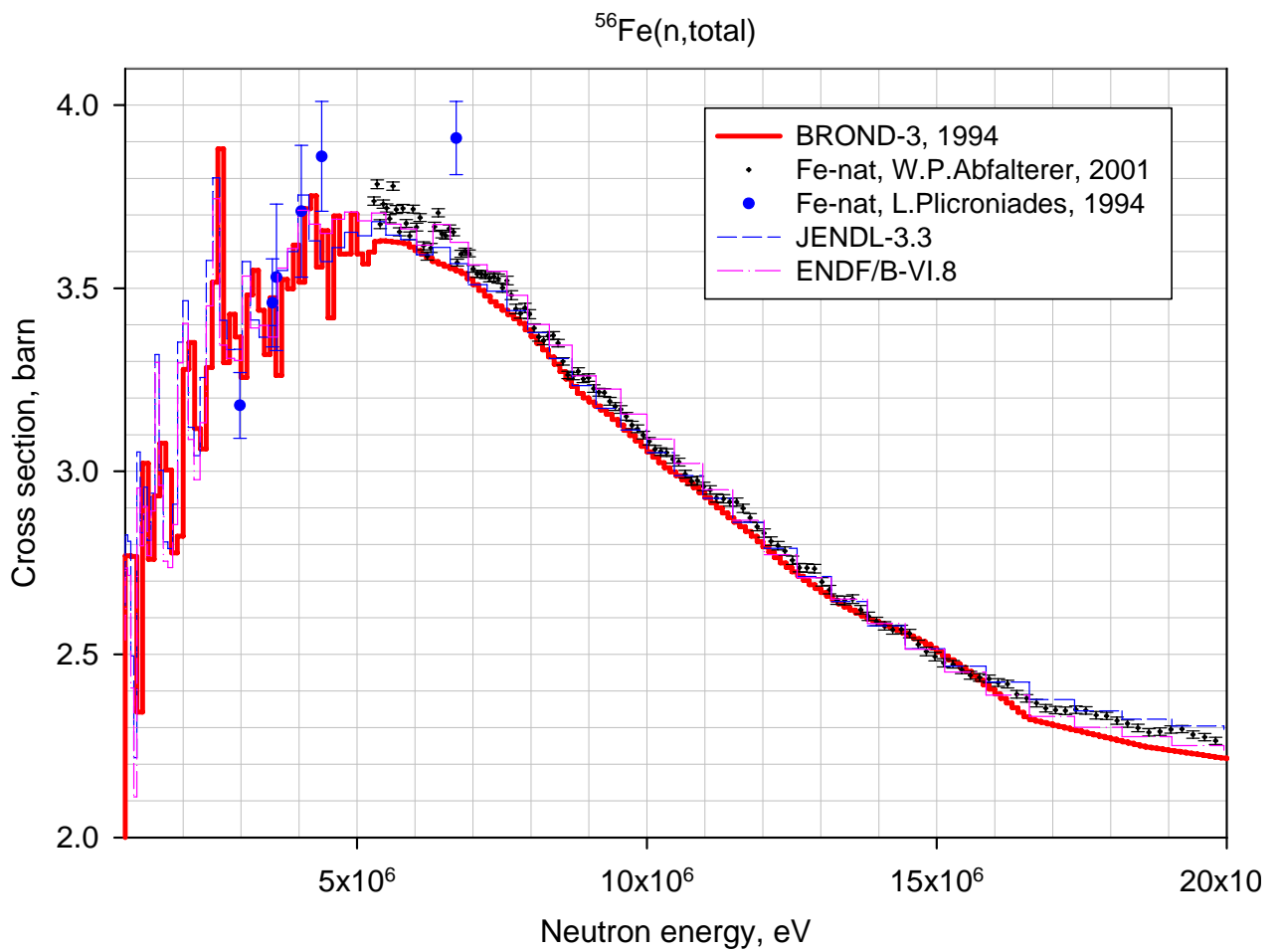


Рис. 4. Сравнение полных сечений из различных библиотек с последними экспериментальными данными.

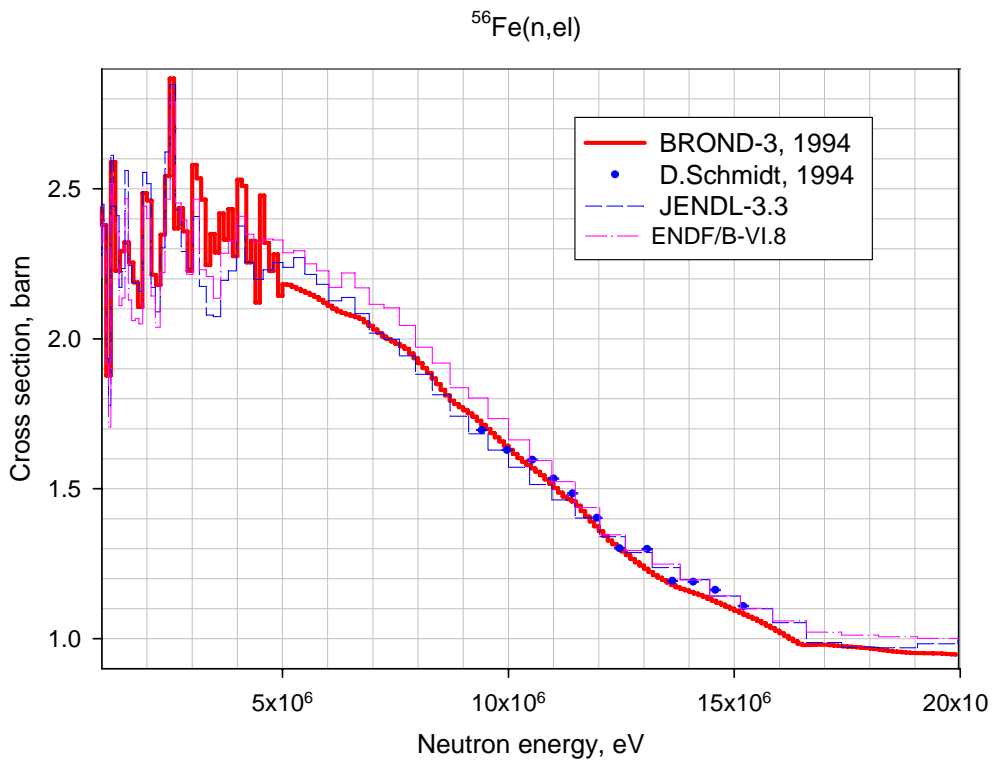


Рис. 5. Сравнение сечения упругого рассеяния из различных библиотек с последними экспериментальными данными.

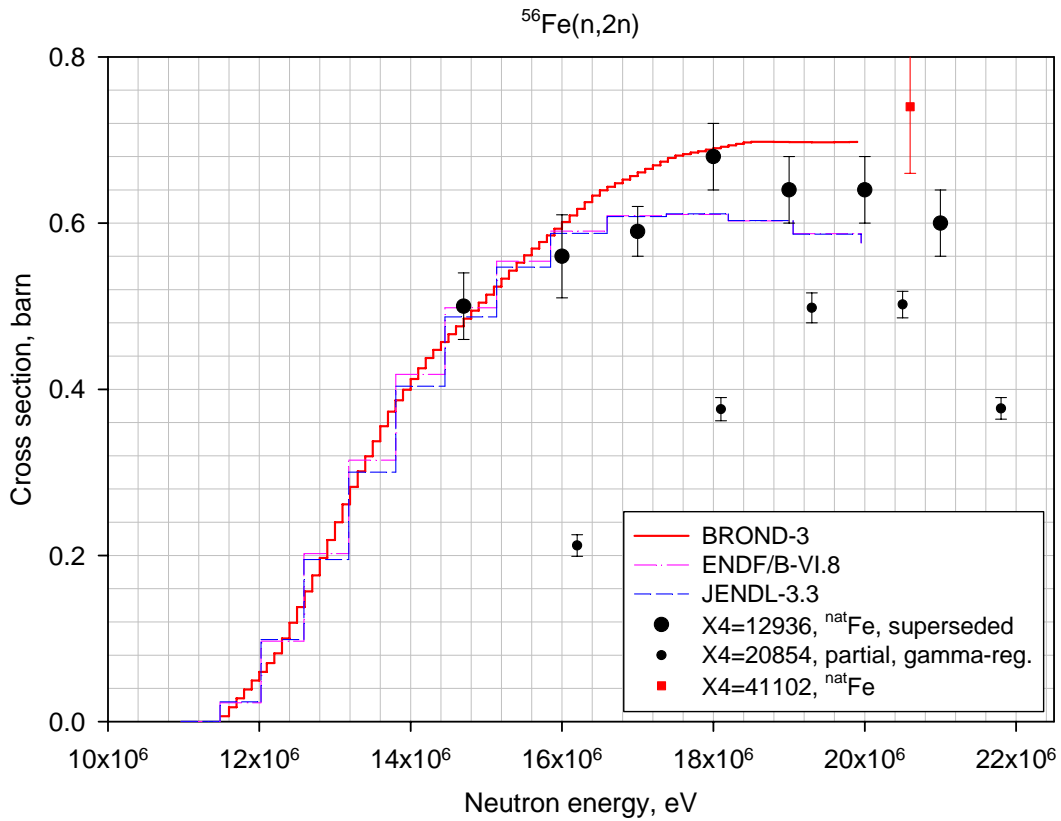


Рис. 6. Сравнение сечения (n,2n) из различных библиотек с последними экспериментальными данными из библиотеки экспериментальных данных ЭКСФОР (X4 – номер работы в ЭКСФОРе).

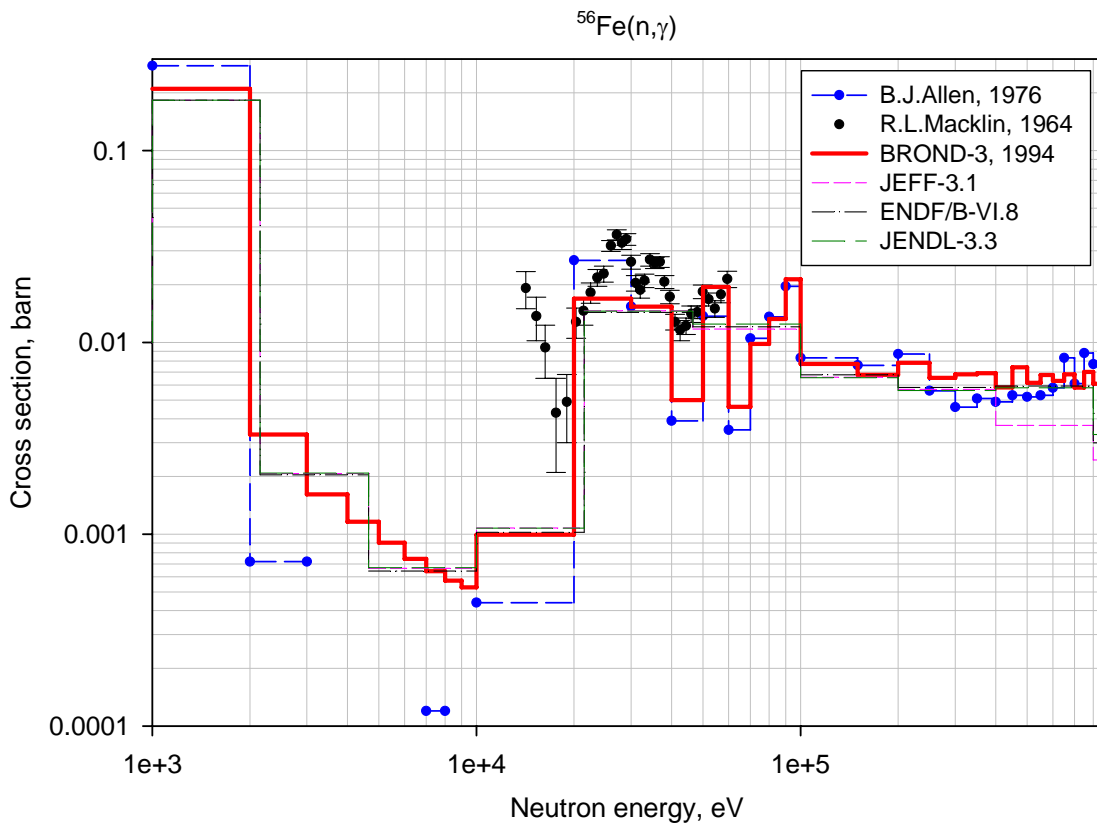


Рис. 7. Сравнение сечения (n,γ) из библиотеки BROND-3, JEFF-3.1, ENDF/B-VI.8 и JENDL-3.3 с экспериментальными данными полученными при “плохом” разрешении в наиболее важной для реакторных приложений области энергий.

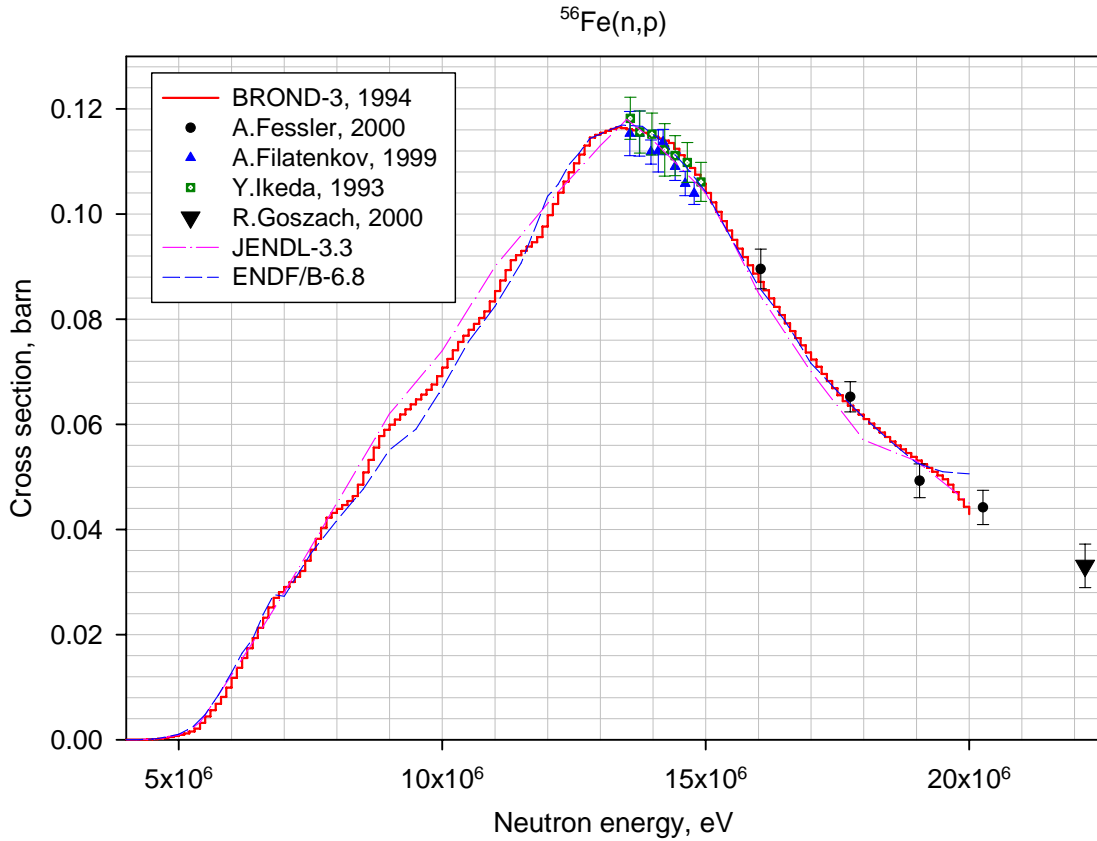


Рис. 8. Сравнение сечения (n,p) из библиотеки BROND-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VI.8 с экспериментальными данными полученными после выполнения оценки BROND-3.

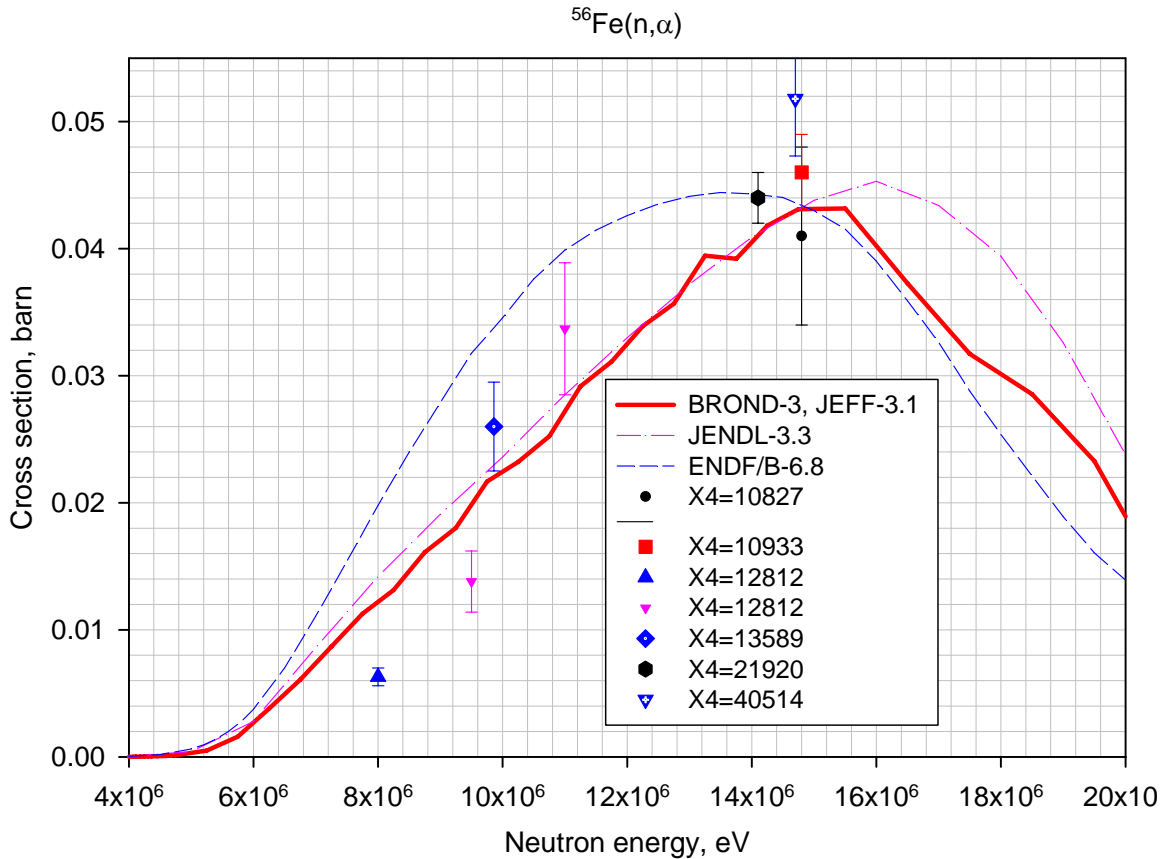


Рис. 8а. Сравнение сечения (n, α) из библиотеки BROND-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VI.8 с экспериментальными данными.

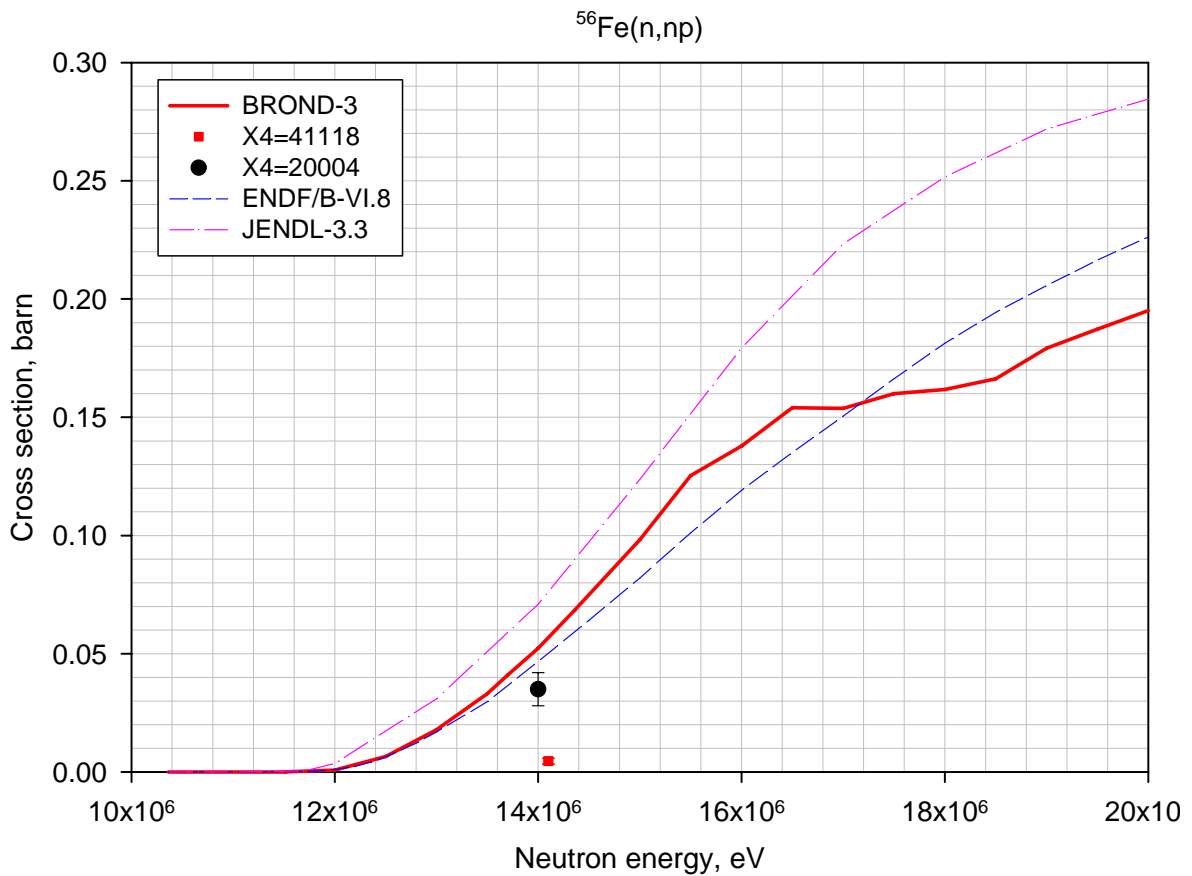


Рис. 9. Сравнение сечения (n,np) из разных библиотеки с имеющимися экспериментальными данными.

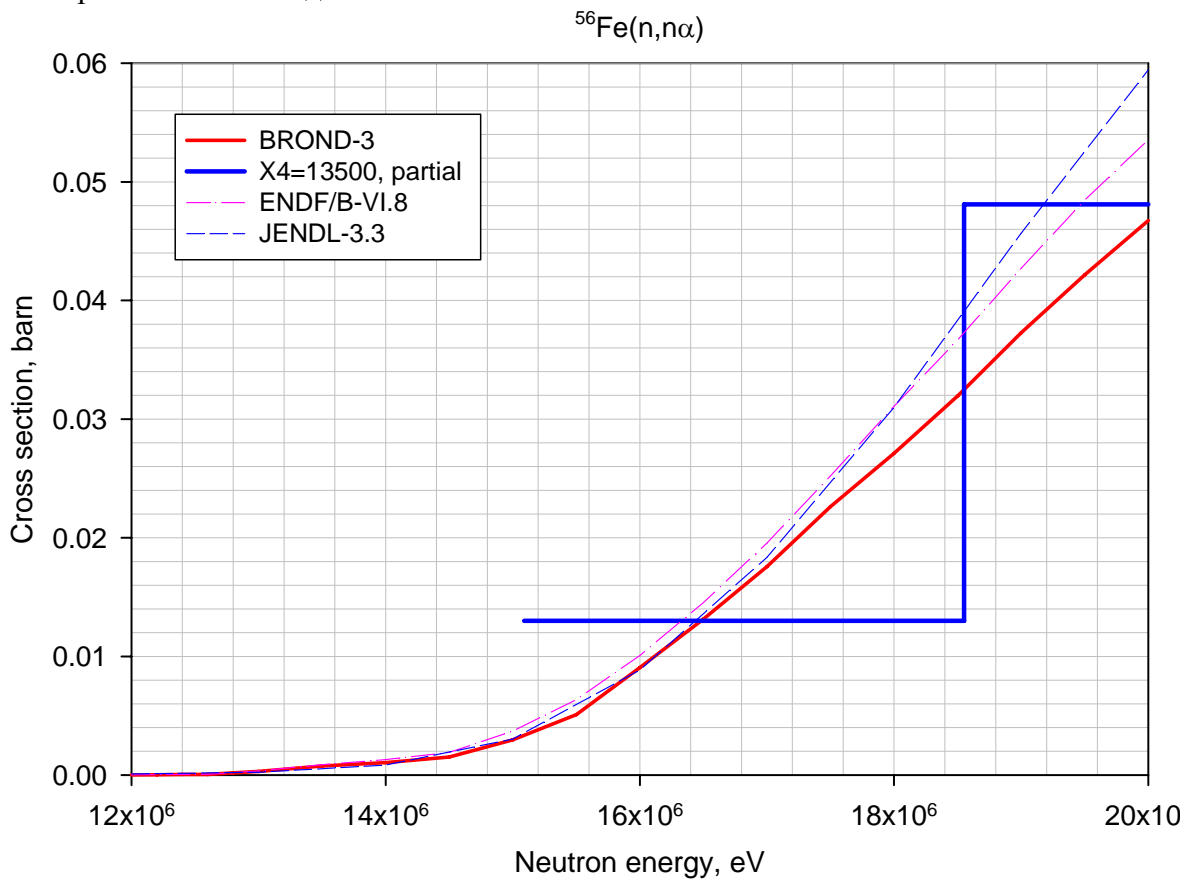


Рис. 10. Сравнение сечения ($n, n\alpha$) из разных библиотеки с имеющимися экспериментальными данными.

5. Угловые распределения нейтронов

Угловые распределения упругого рассеяния нейтронов в области разрешённых резонансов конструкционных материалов могут существенно определять утечку нейтронов и эффект их глубокого проникновения в средах содержащих эти материалы. Рекомендация использовать в таких расчётах угловые распределения упругого рассеяния восстановленные из резонансных параметров трудно реализовать, потому что программы подготовки данных как правило не содержат модулей расчёта угловых распределений. Поэтому в большинстве оценённых файлов угловые распределения упругого рассеяния заданы через коэффициенты разложения по полиномам Лежандра. Однако эти коэффициенты разложения или получены из оптико-модельных расчётов или, в лучшем случае, оценены из данных экспериментов выполненных с плохим разрешением. Для демонстрации этого на рисунке 11 показана энергетическая зависимость коэффициента a_1 полинома Лежандра разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в резонансной области и оцененная в ENDF/B-VI.8 из экспериментальных данных с низким разрешением, в JEFF-3.1 – усреднённая по энергии рассчитанная из резонансных параметров, в BROND-3 – детальная зависимость полученная из оценённых резонансных параметров. Форма энергетической зависимости a_1 с резким знакопеременным изменением величина a_1 определяется интерференцией резонансного и потенциального рассеяния в минимумах сечений. На рисунках с 14 по 39 показано сравнение детальной зависимости коэффициентов Лежандра a_1 и a_2 для различных интервалов области разрешённых резонансов. Такая резкая зависимость формы угловых распределений от энергии естественно наблюдается и на эксперименте. Так на рисунке 40 приведено сечение упругого рассеяния под углом 140 градусов для ^{56}Fe и $^{\text{nat}}\text{Fe}$. Эти же зависимости под углами 39, 90 и 140 градусов вблизи широкого s- и узкого d-резонанса показаны на рисунках 41 – 43. Энергетическая зависимость коэффициентов a_1 и a_2 для этой области энергий из библиотек BROND-3 и ENDF/B-VI.8 показана на рисунках 44 – 45. Очевидно, что экспериментальное разрешение существенно сглаживает энергетическую зависимость коэффициентов разложения по полиномам Лежандра. Интегральные сечения в минимумах вычисленные из таких угловых распределений будут существенно выше полных сечений измеренных с высоким разрешением (рисунок 46).

Вывод: Для приложений, где глубокое проникновение нейтронов или их утечка играет существенную роль, детальная зависимость угловых распределений от энергии нейтронов в резонансной области должна быть учтена. Все библиотеки кроме BROND-3 не учитывают её.

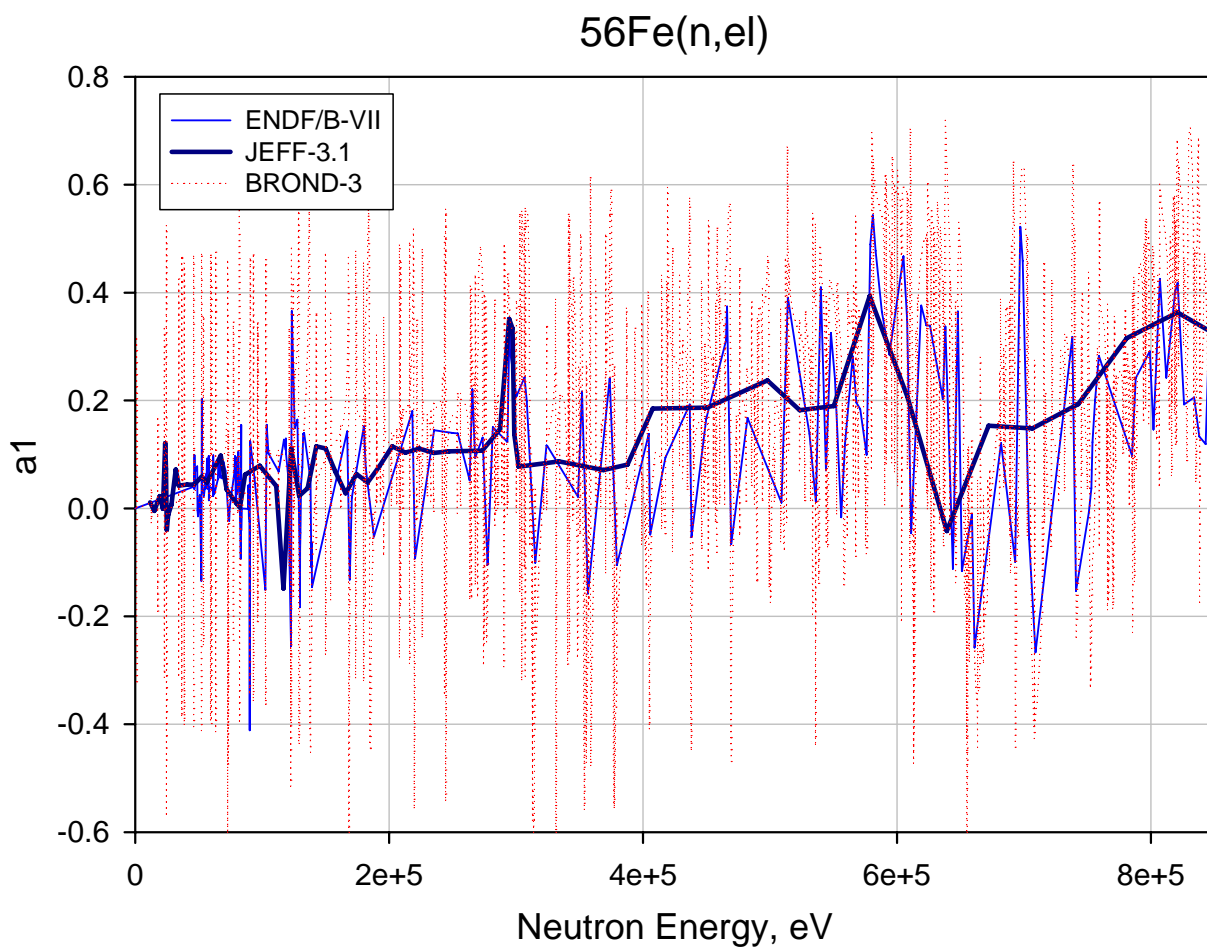


Рис. 11. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в резонансной области.

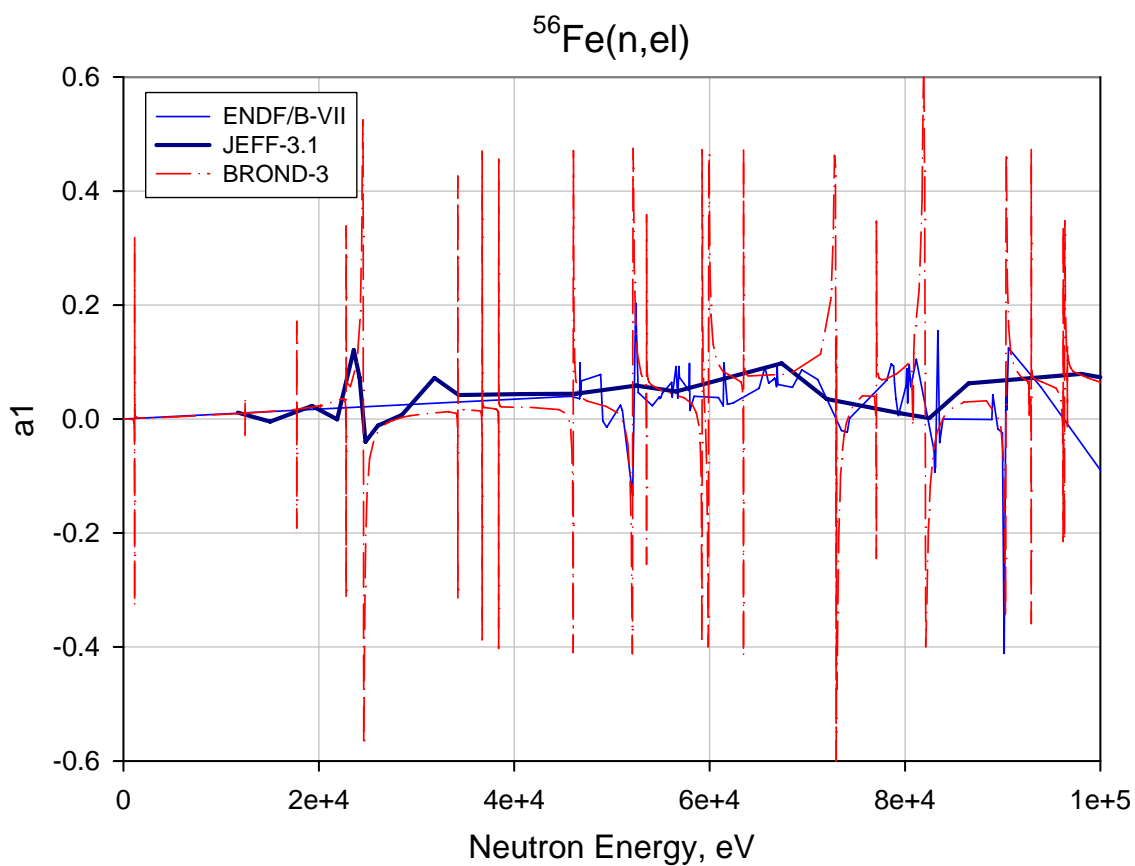


Рис. 12. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в области энергий 0 – 100 кэВ.

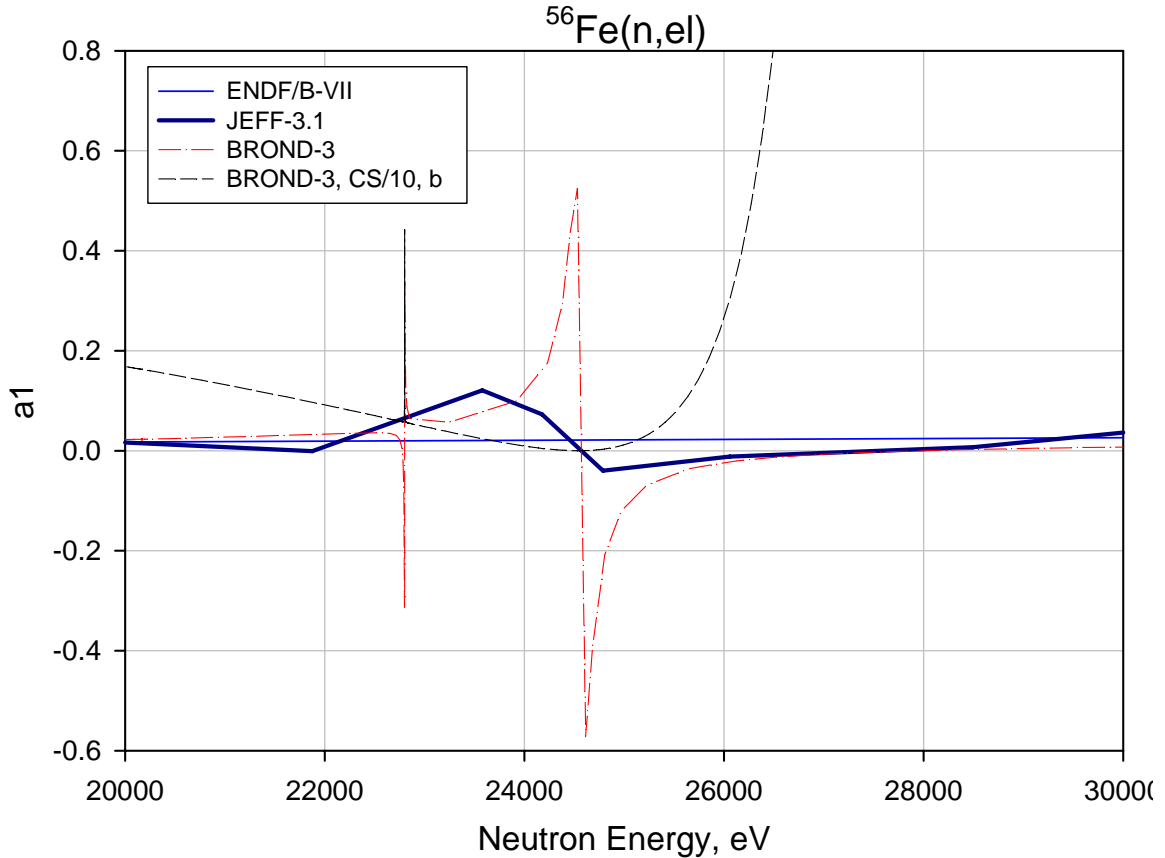


Рис. 13. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в области энергий вблизи 26 – кэВ s-резонанса.

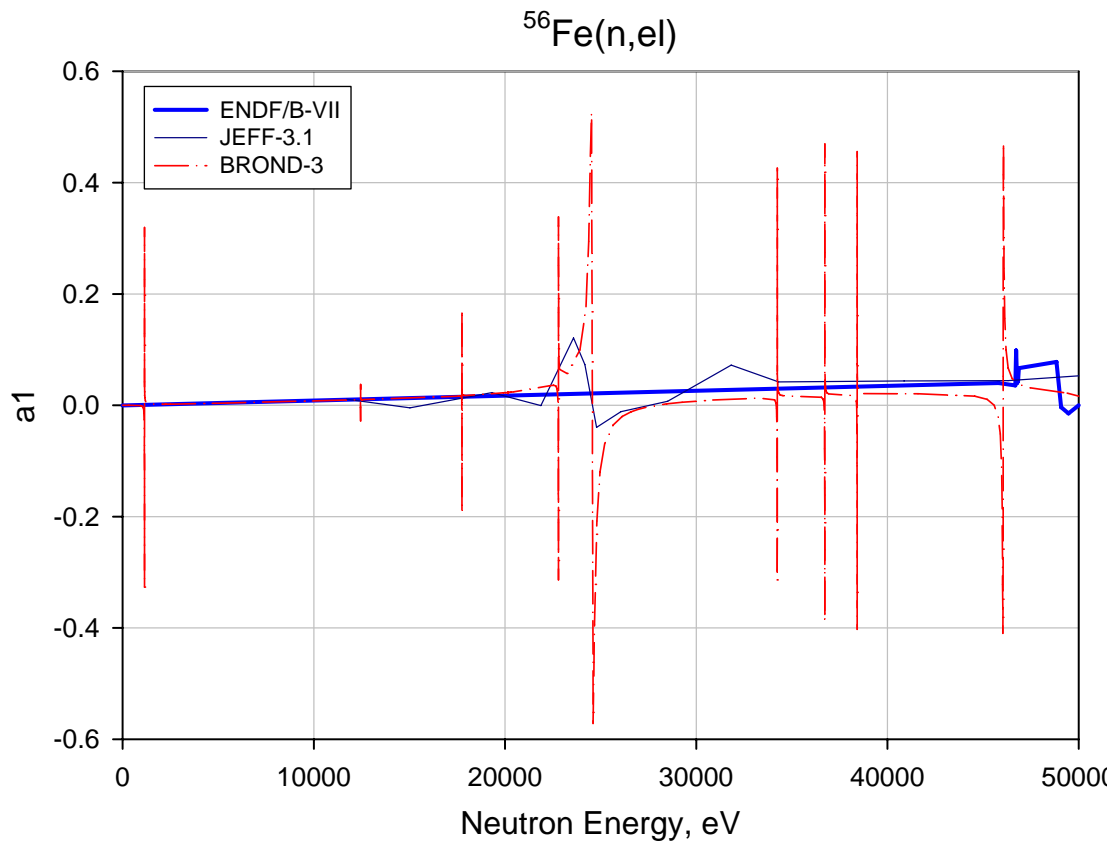


Рис. 14. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 0 – 50 кэВ.

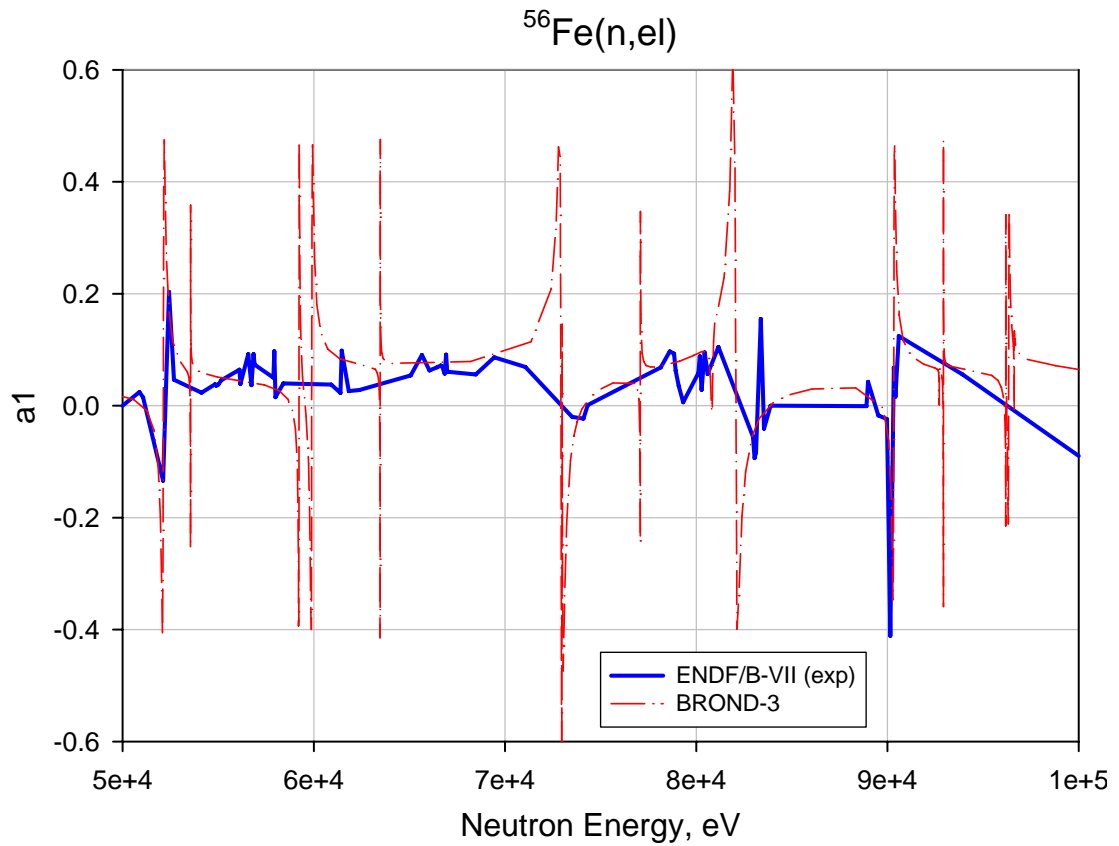


Рис. 15. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 50 – 100 кэВ.

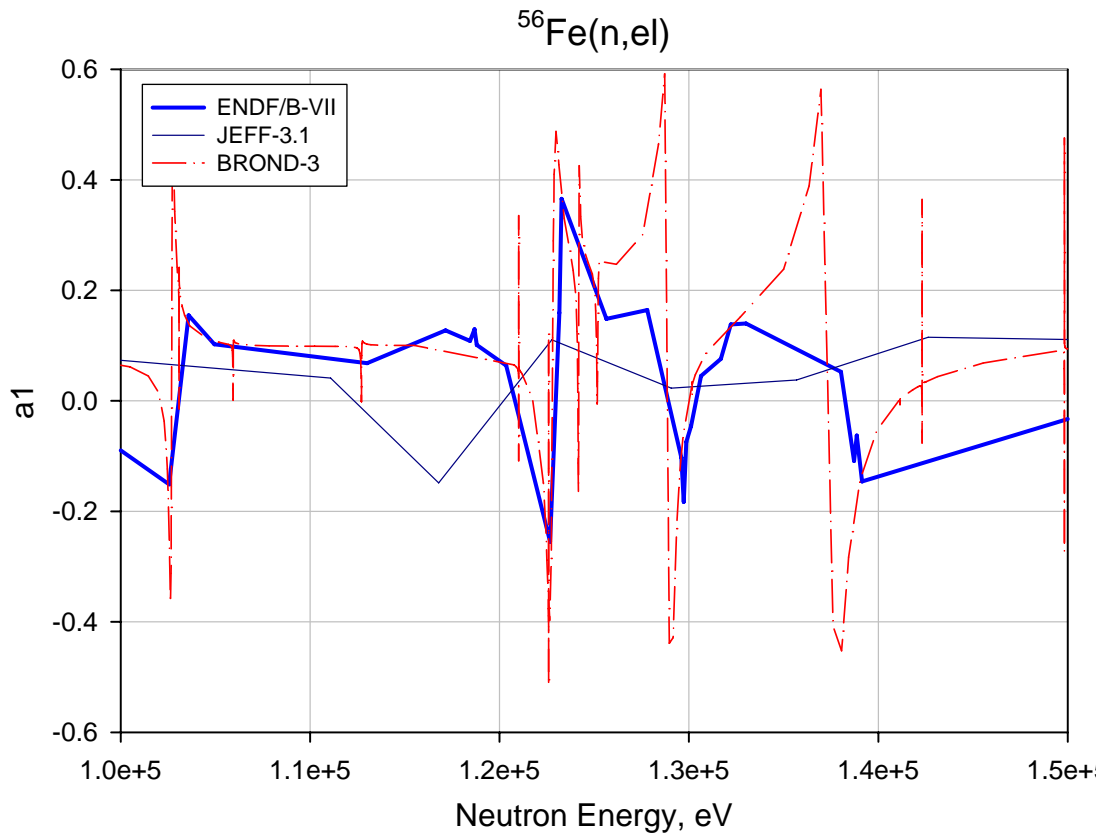


Рис. 16. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 100 – 150 кэВ.

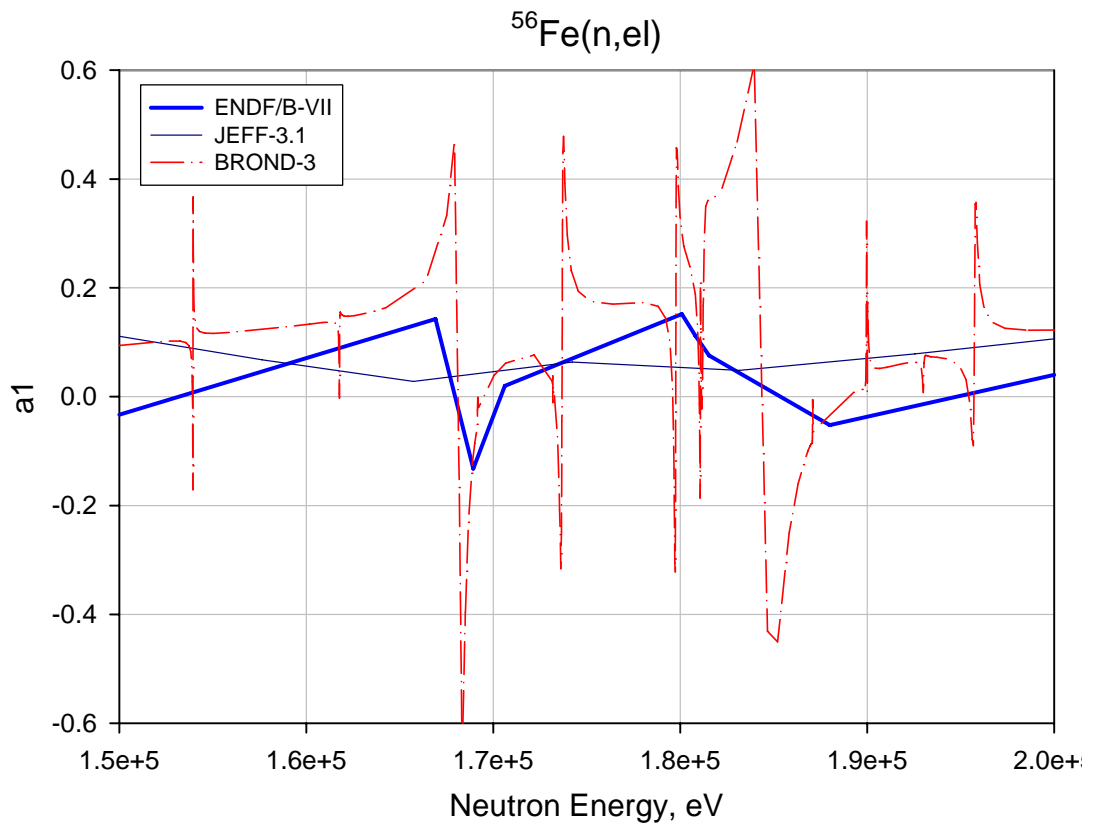


Рис. 17. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 150 – 200 кэВ.

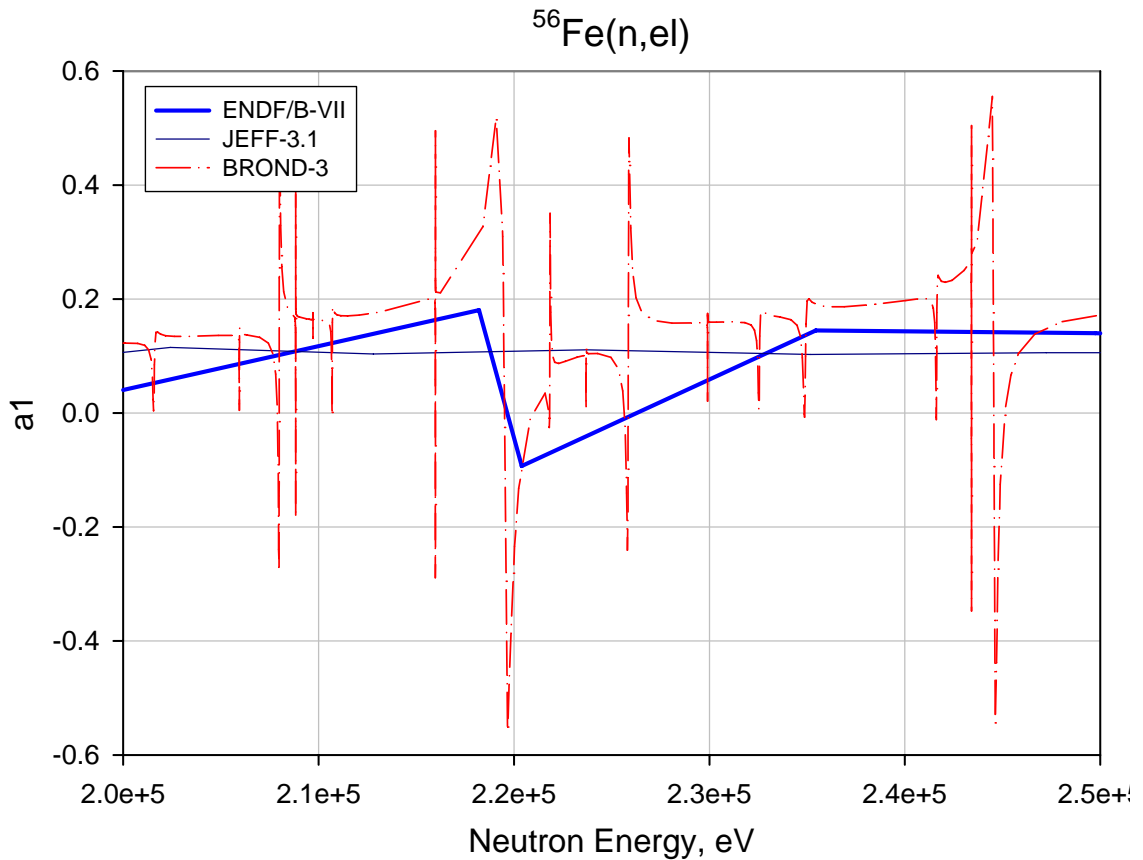


Рис. 18. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 200 – 250 кэВ.

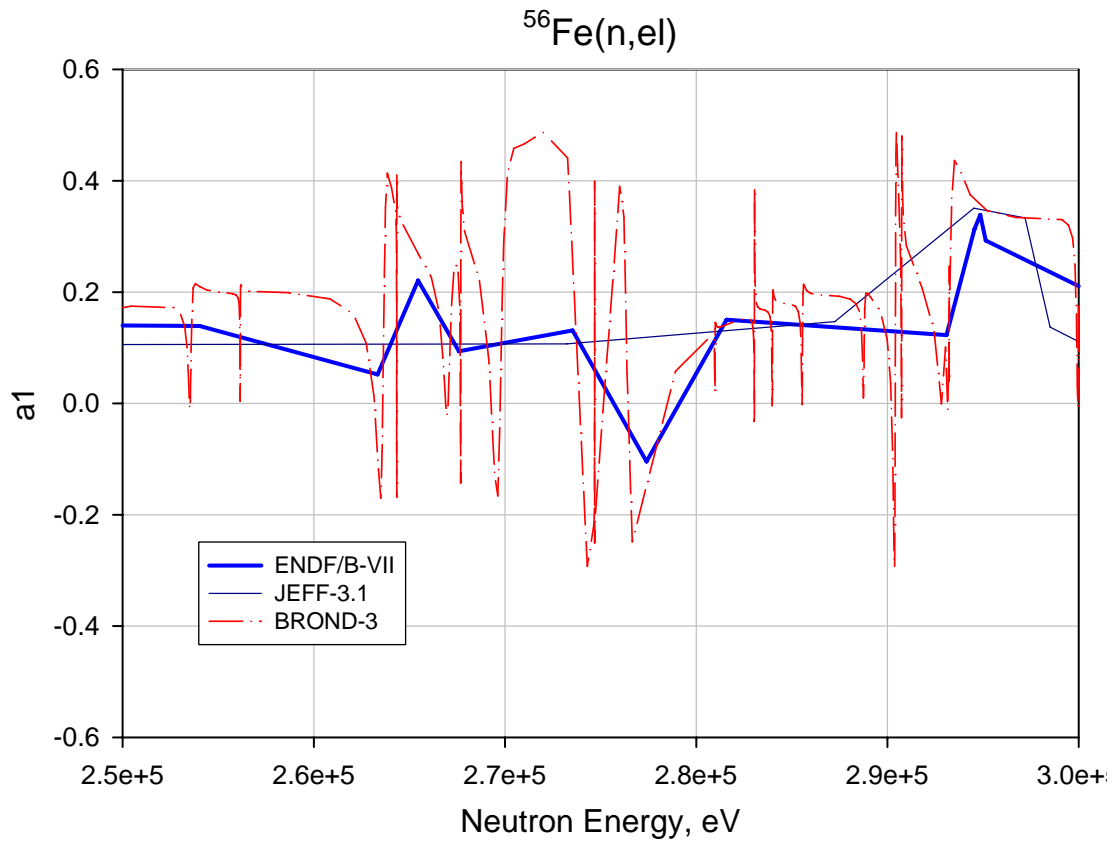


Рис. 19. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 250 – 300 кэВ.

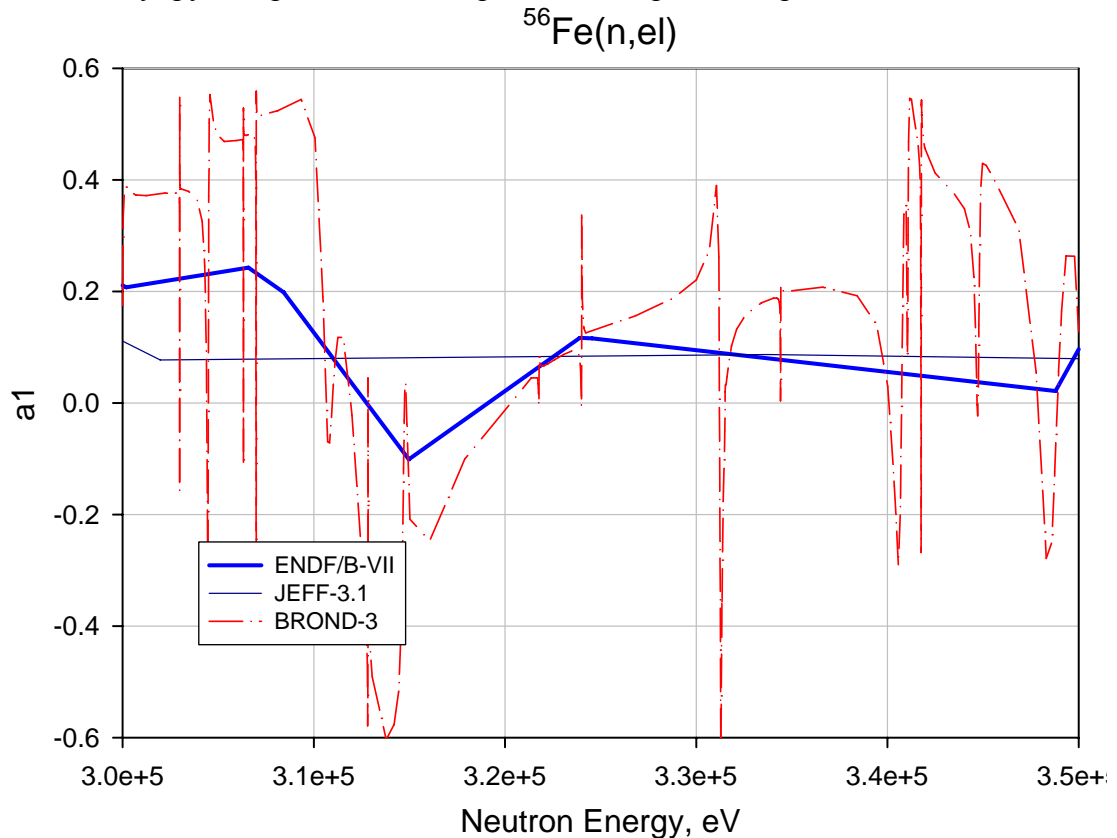


Рис. 20. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 300 – 350 кэВ.

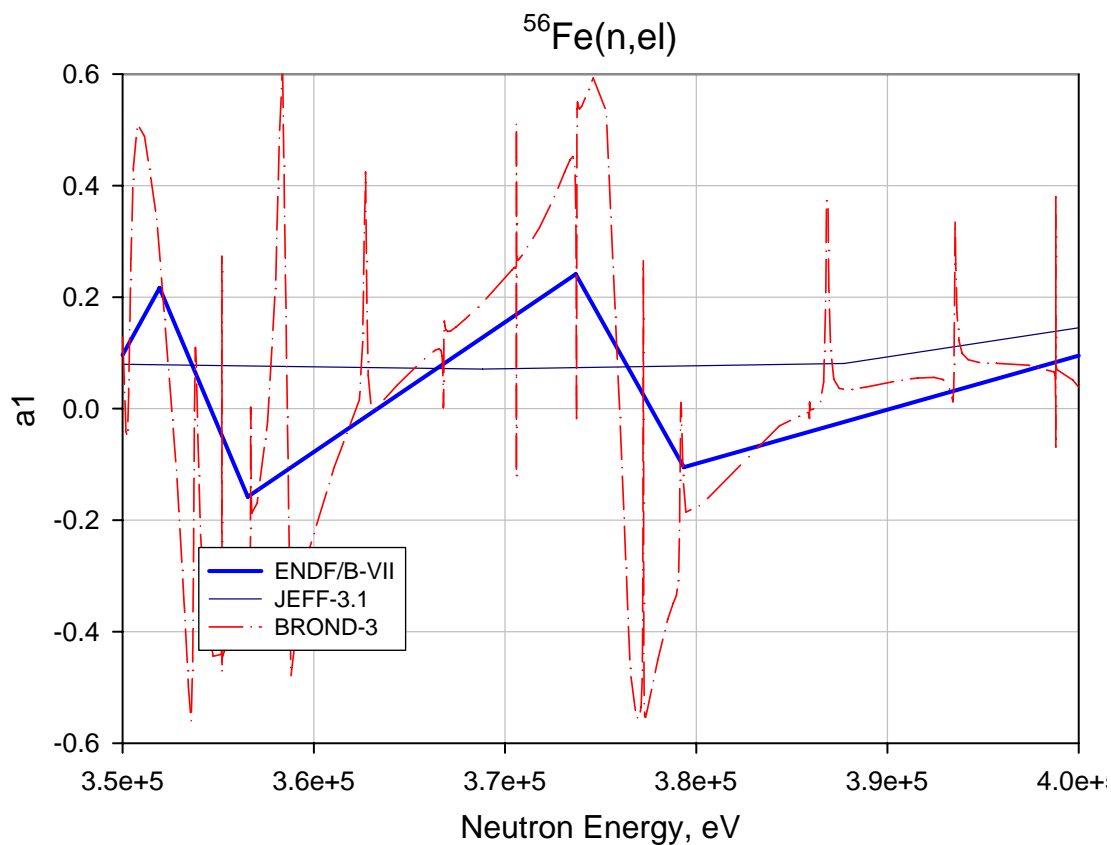


Рис. 21. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 350 – 400 кэВ.

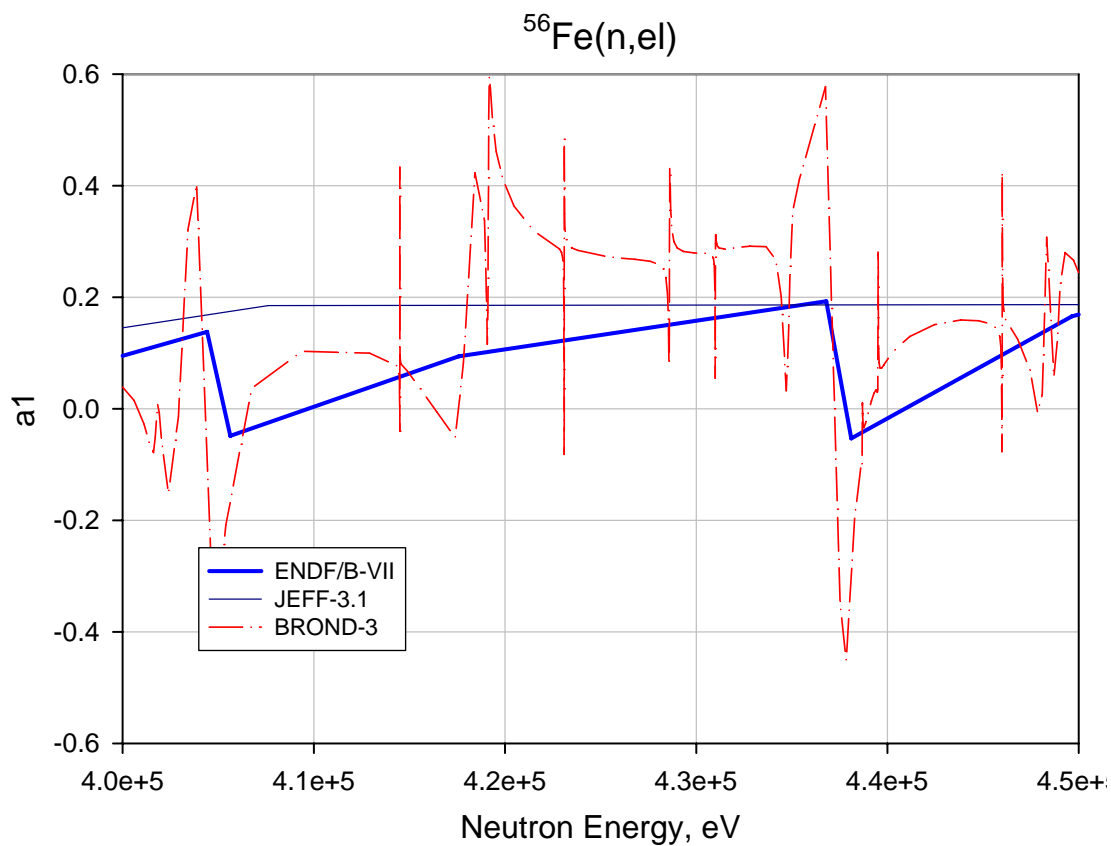


Рис. 22. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 400 – 450 кэВ.

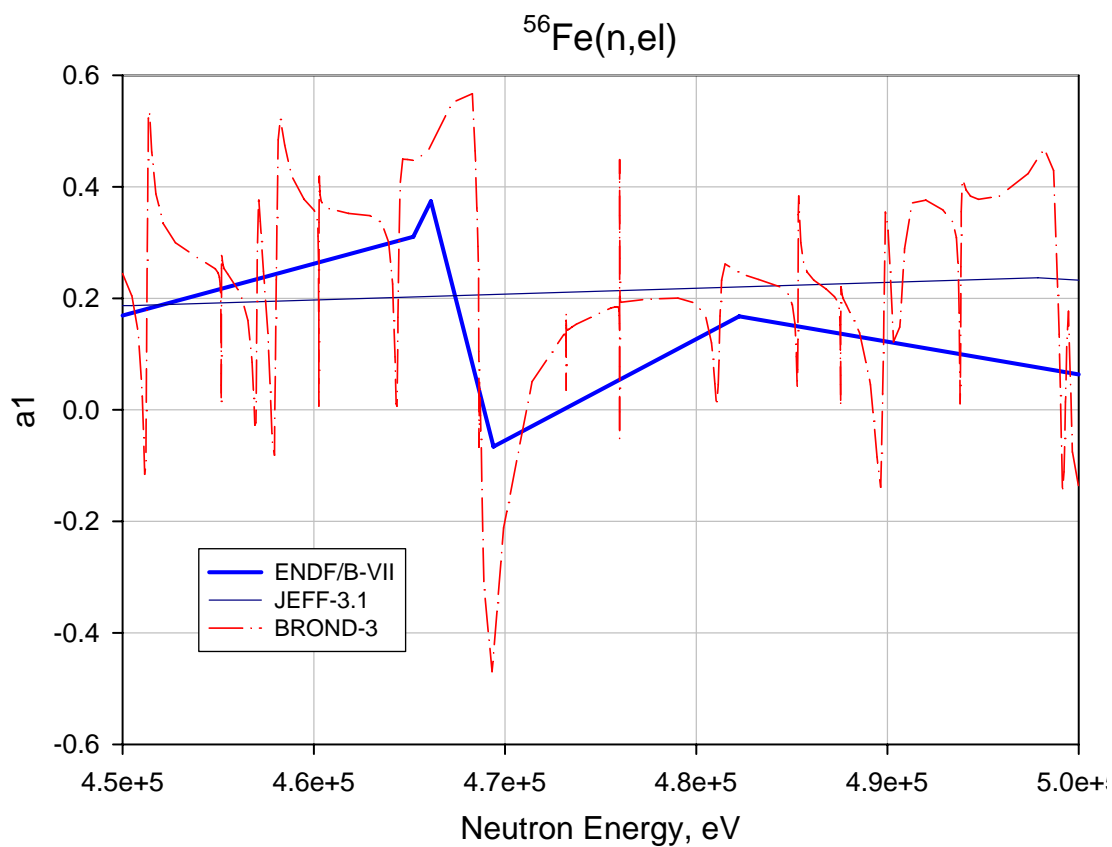


Рис. 23. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 450 – 500 кэВ.

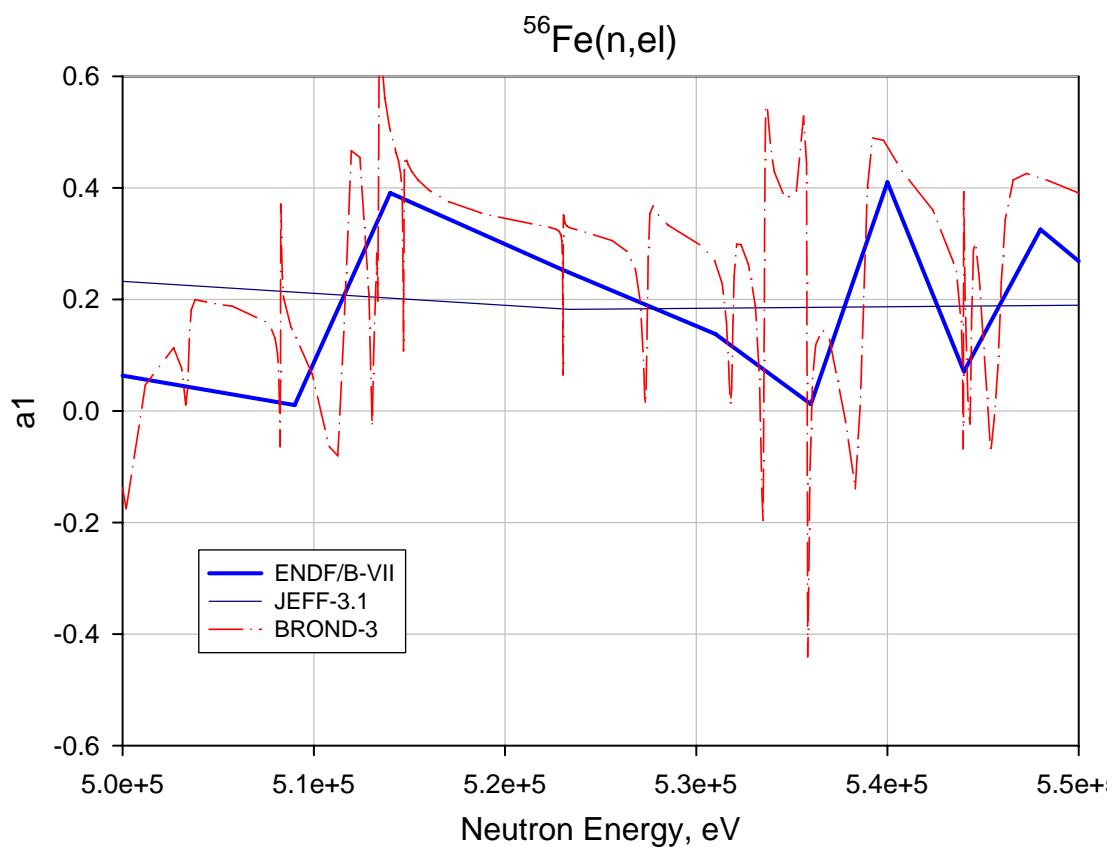


Рис. 24. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 500 – 550 кэВ.

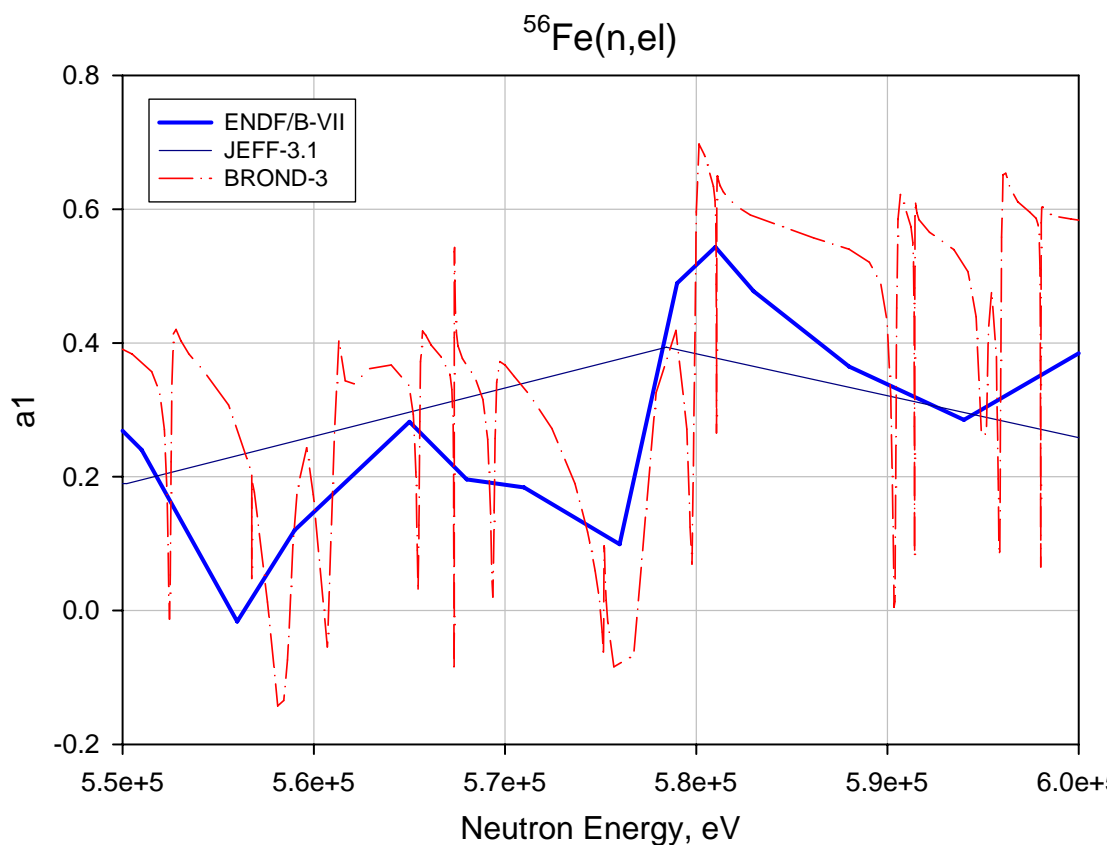


Рис. 25. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 550 – 600 кэВ.

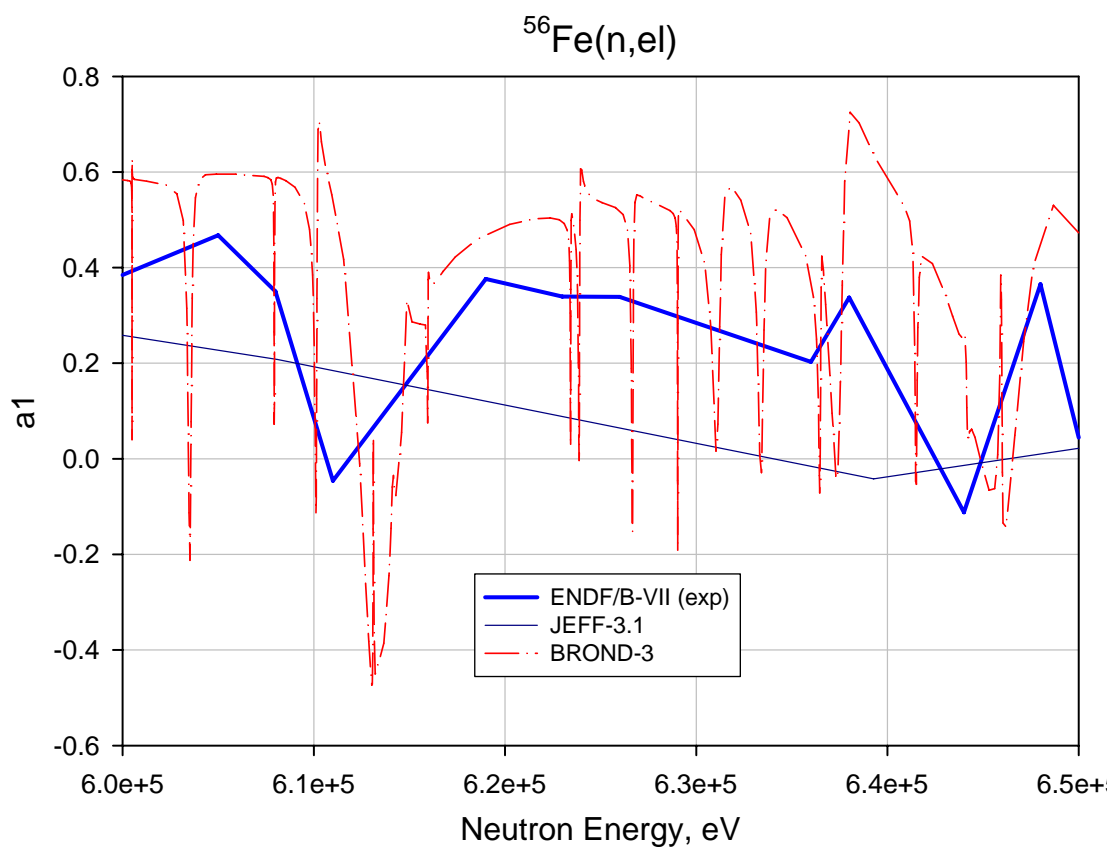


Рис. 26. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 600 – 650 кэВ.

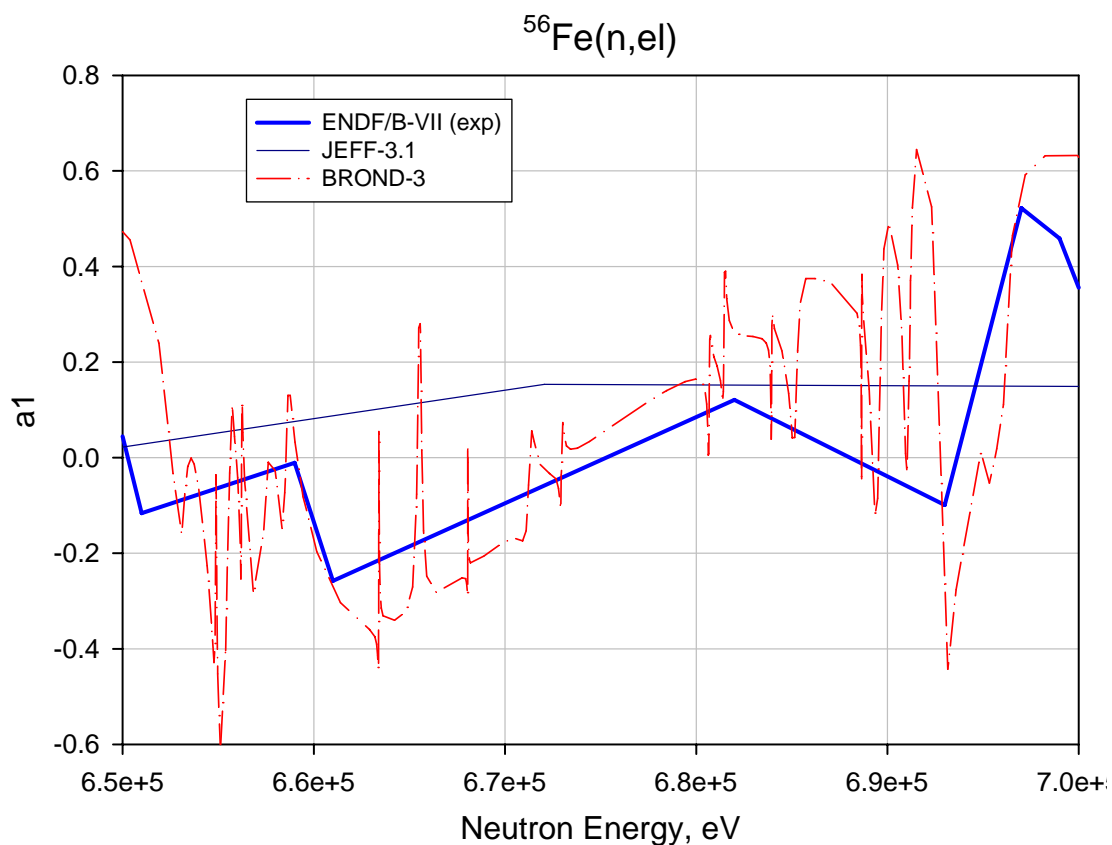


Рис. 27. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 650 – 700 кэВ.

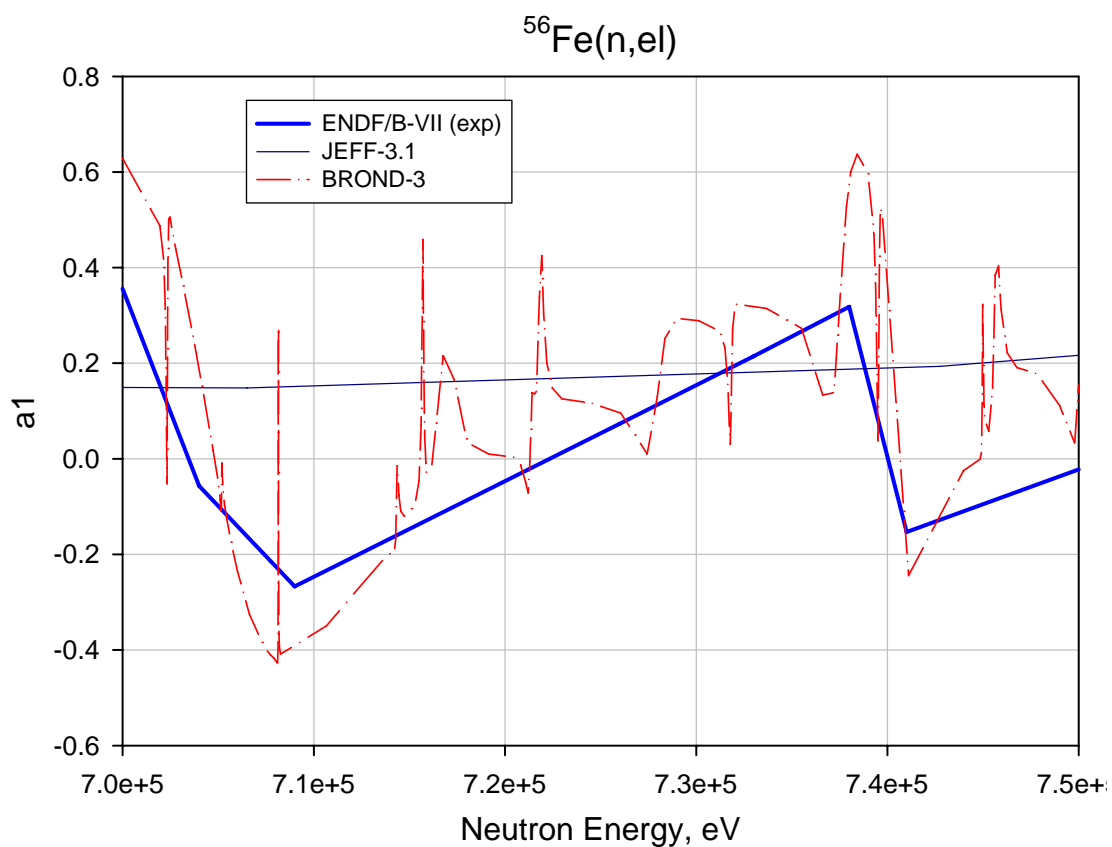


Рис. 28. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 700 – 750 кэВ.

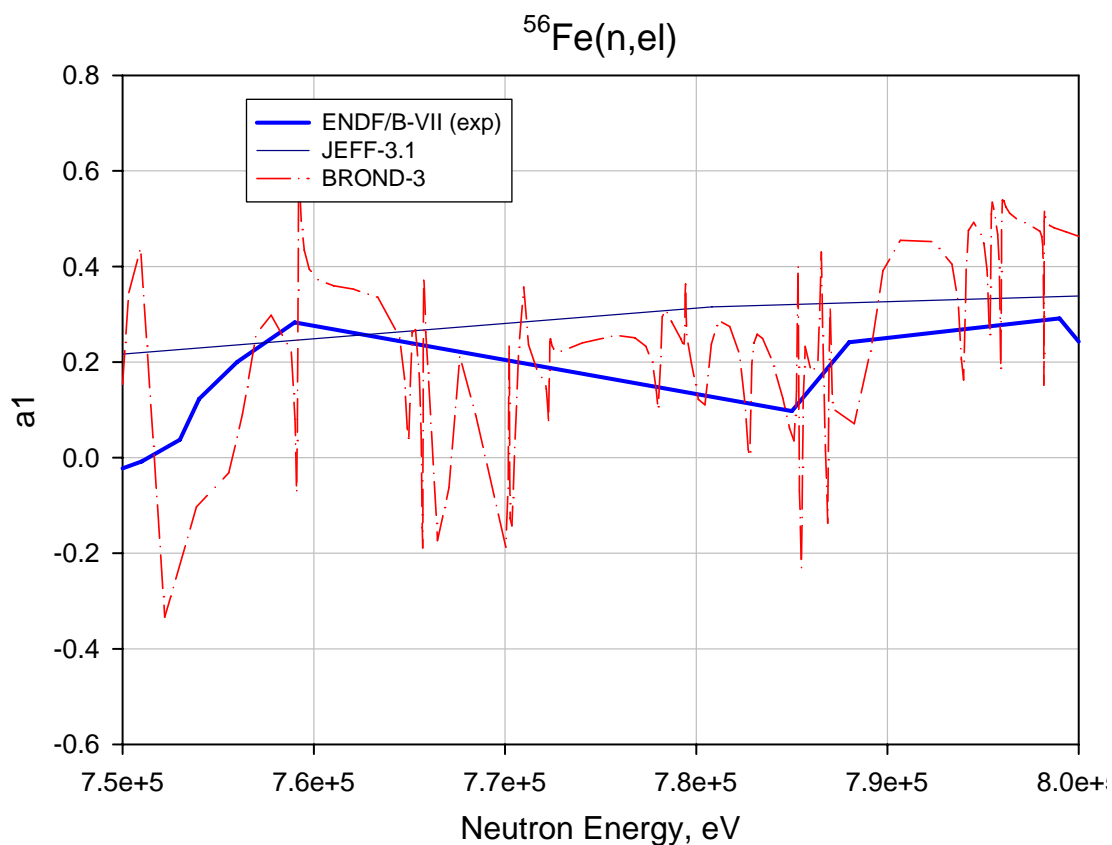


Рис. 29. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 750 – 800 кэВ.

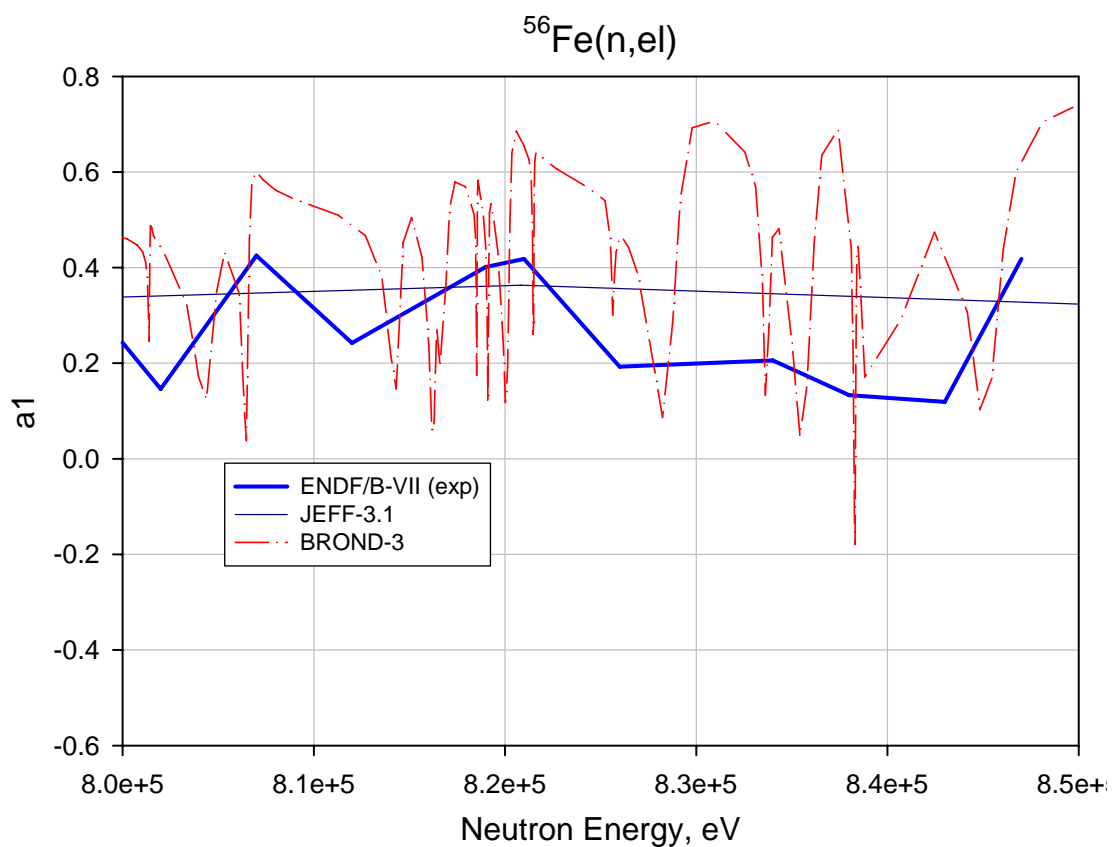


Рис. 30. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 800 – 850 кэВ.

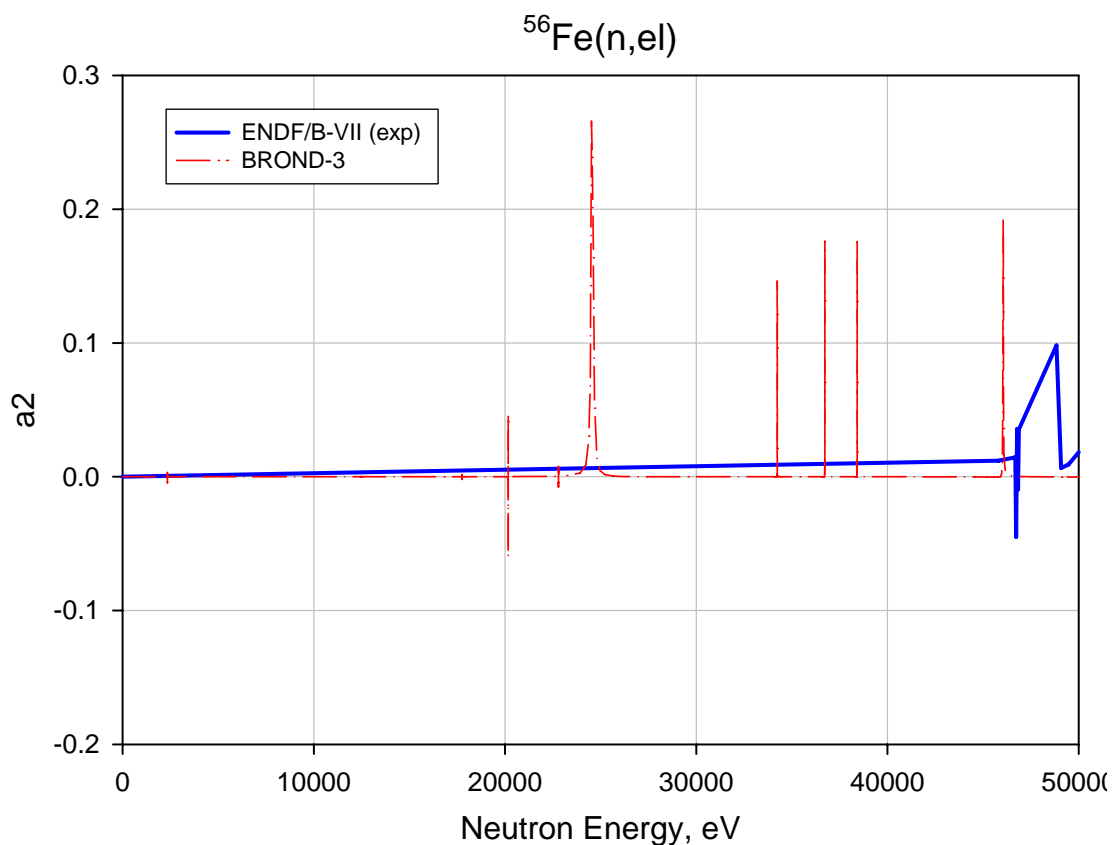


Рис. 31. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 0 – 50 кэВ.

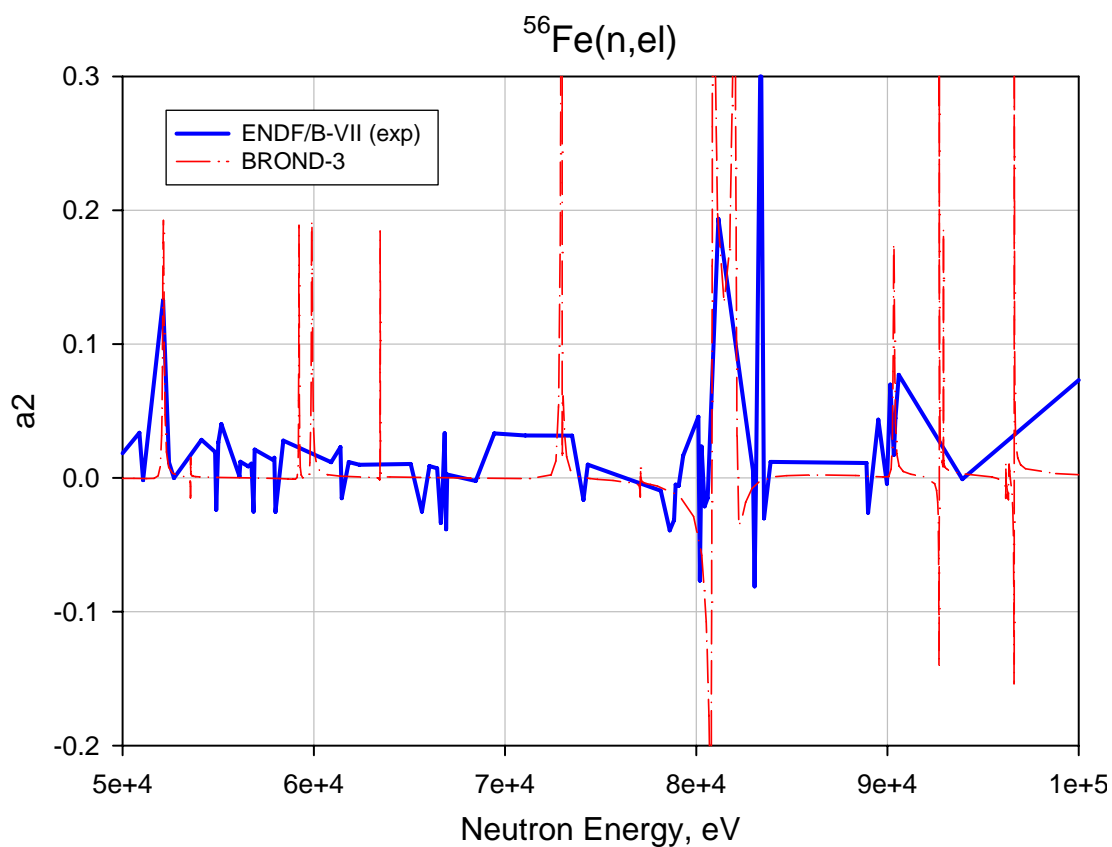


Рис. 32. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 50 – 100 кэВ.

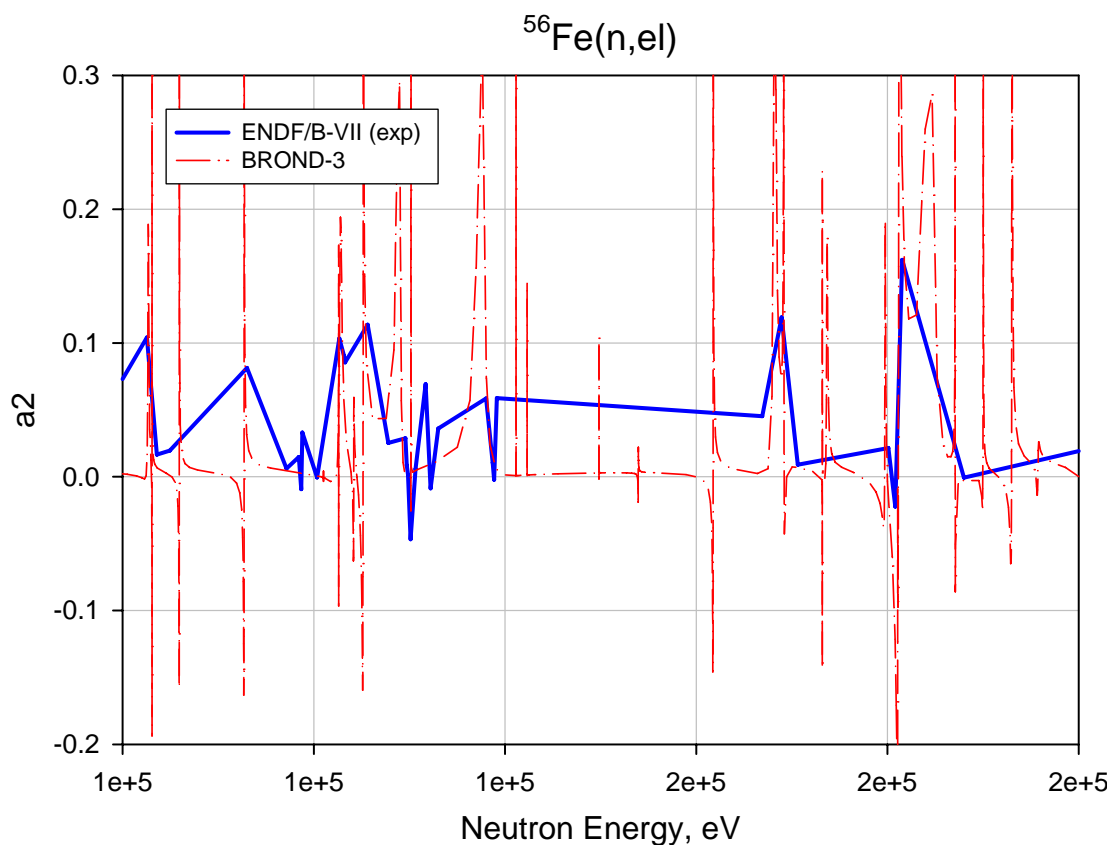


Рис. 33. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 100 – 200 кэВ.

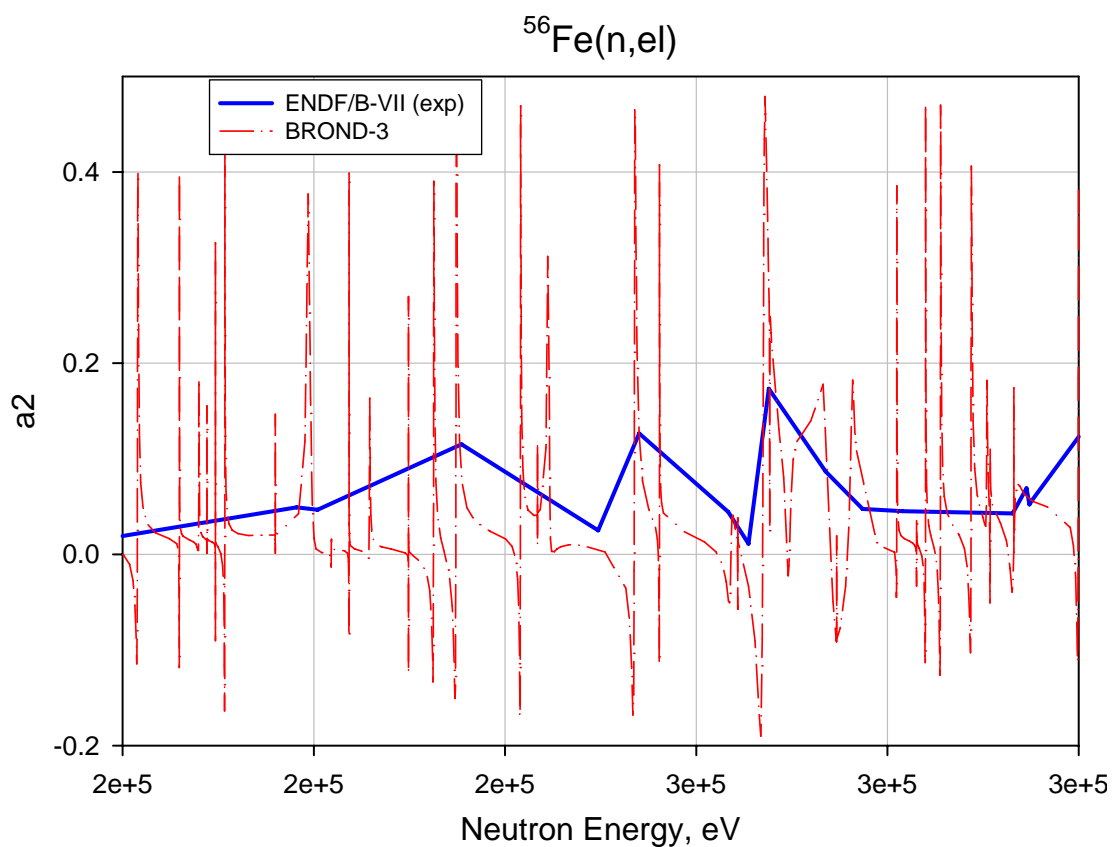


Рис. 34. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 200 – 300 кэВ.

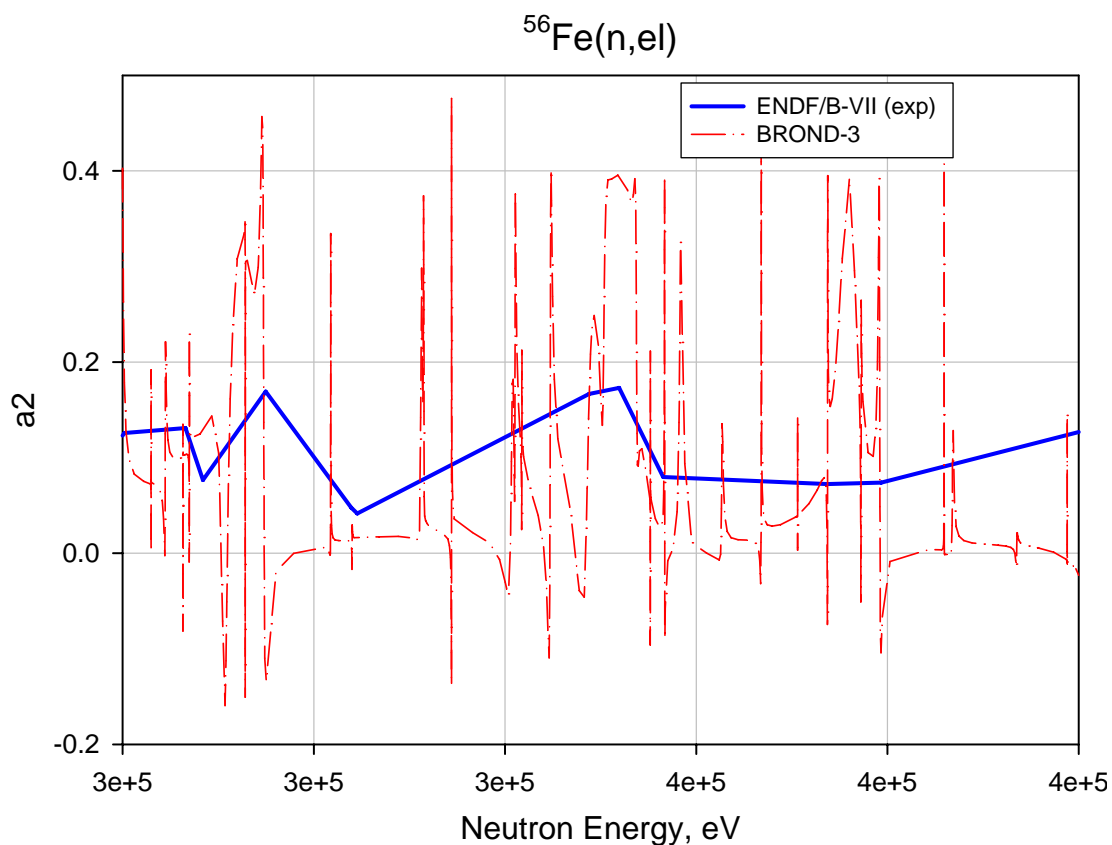


Рис. 35. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 300 – 400 кэВ.

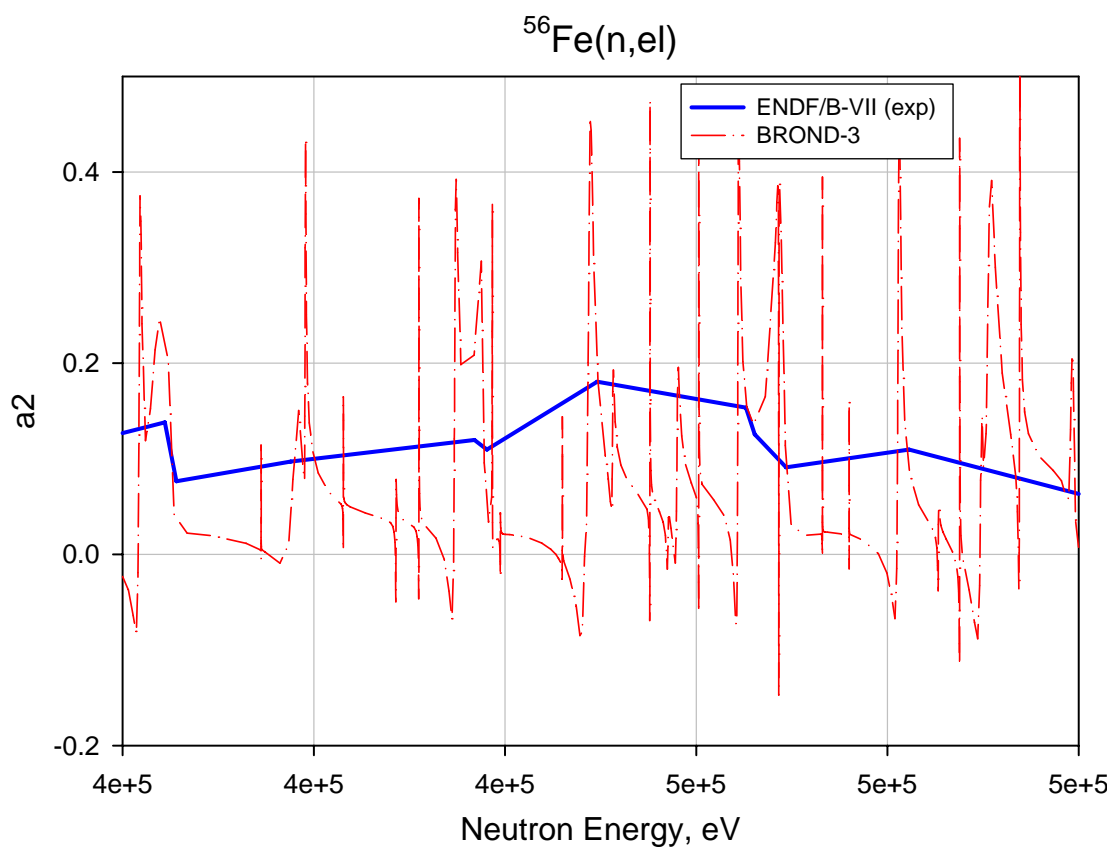


Рис. 36. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 400 – 500 кэВ.

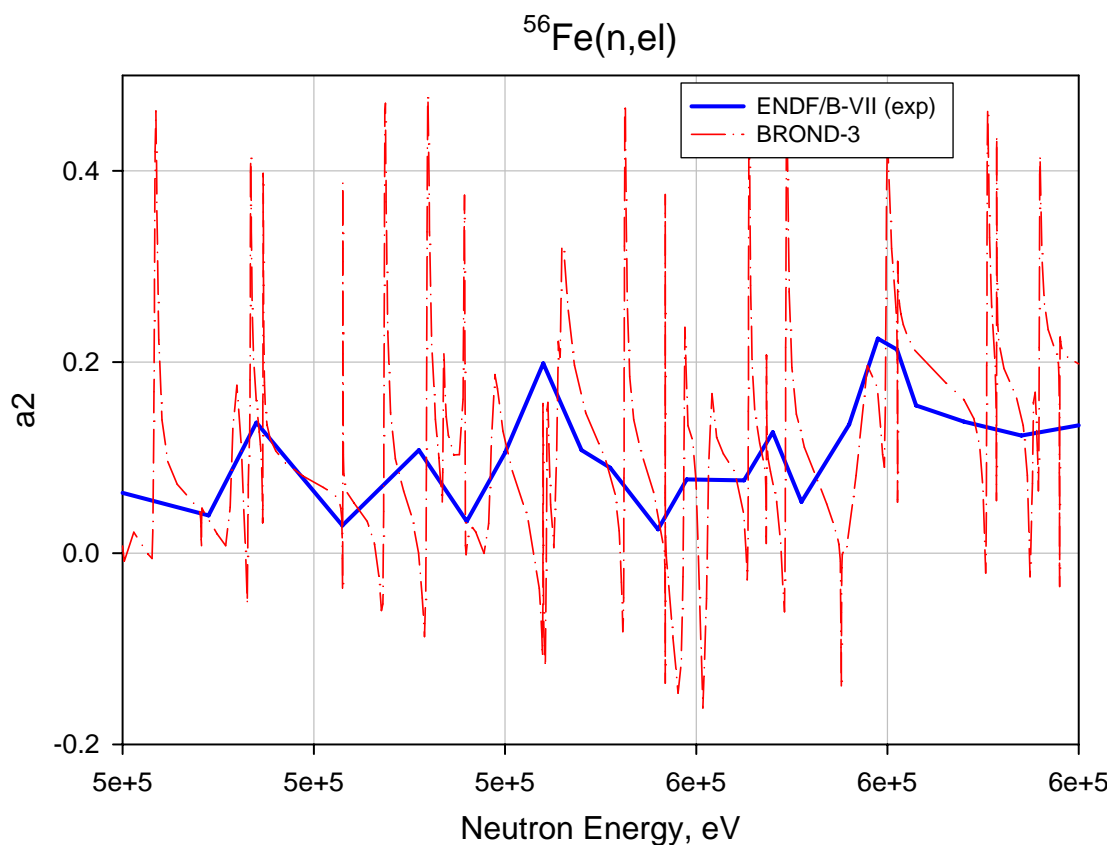


Рис. 37. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 500 – 600 кэВ.

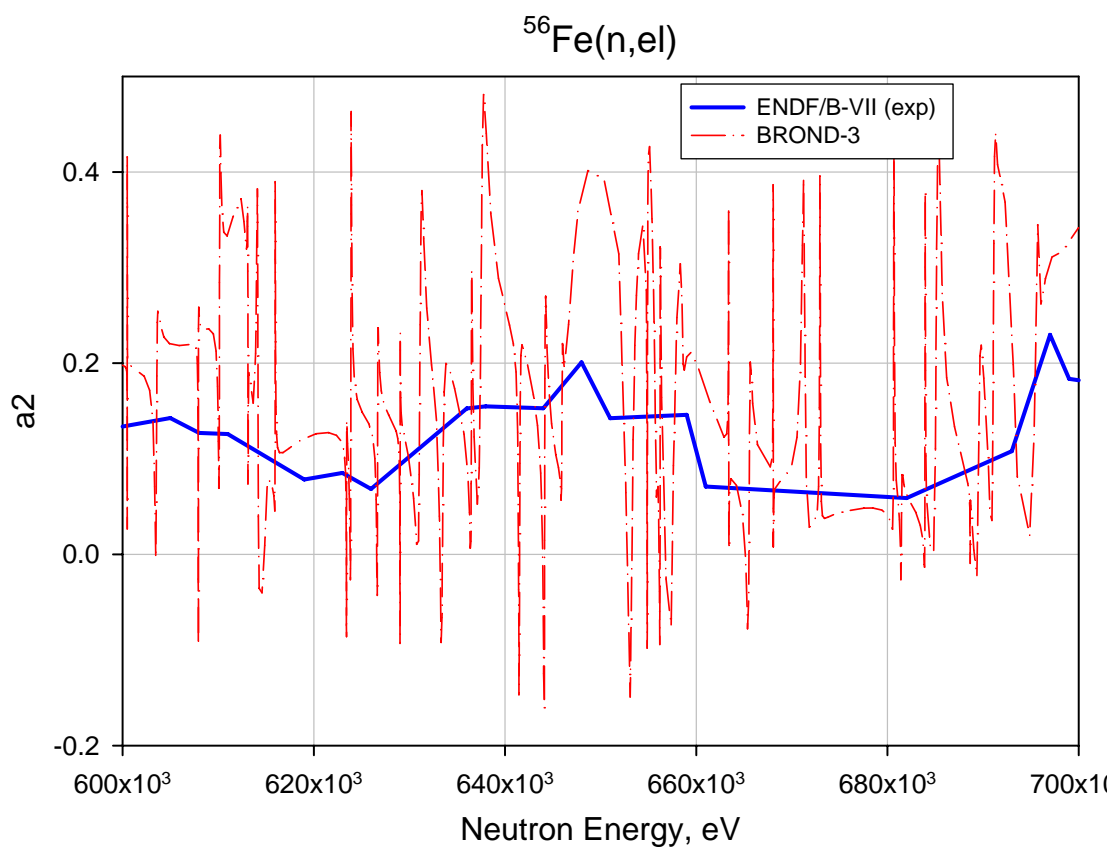


Рис. 38. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 600 – 700 кэВ.

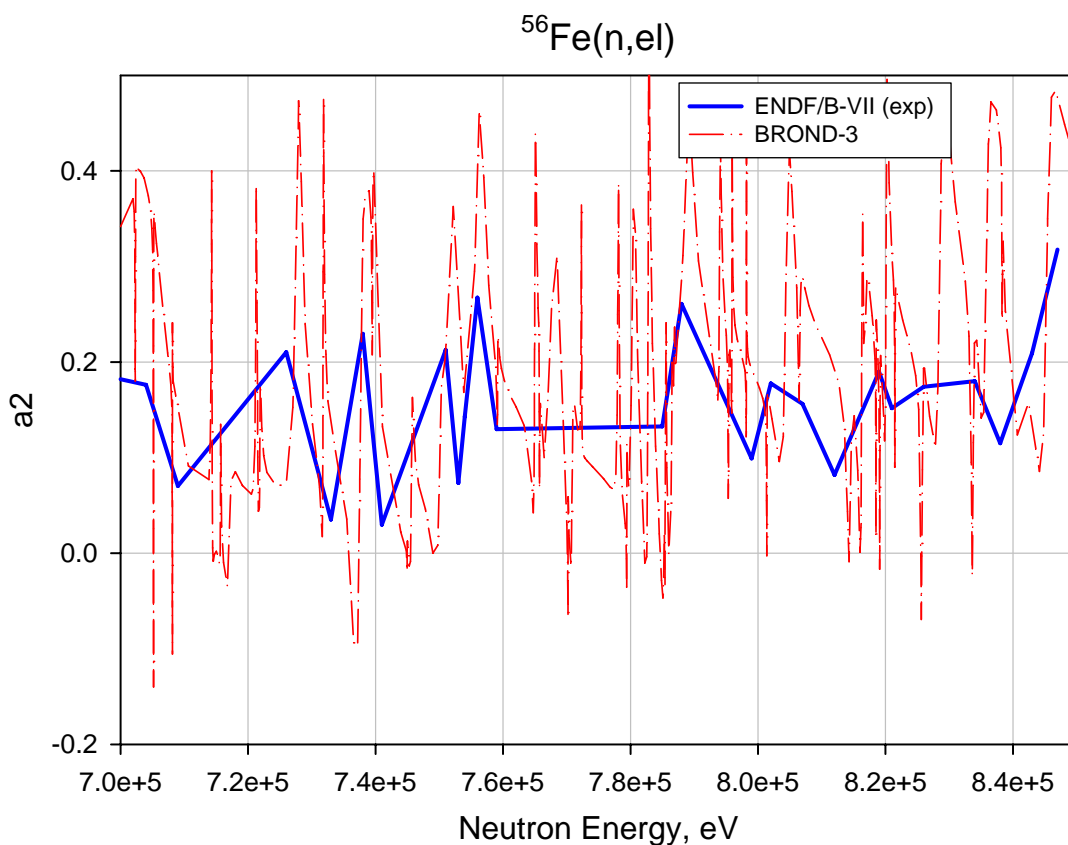


Рис. 39. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 700 – 850 кэВ.

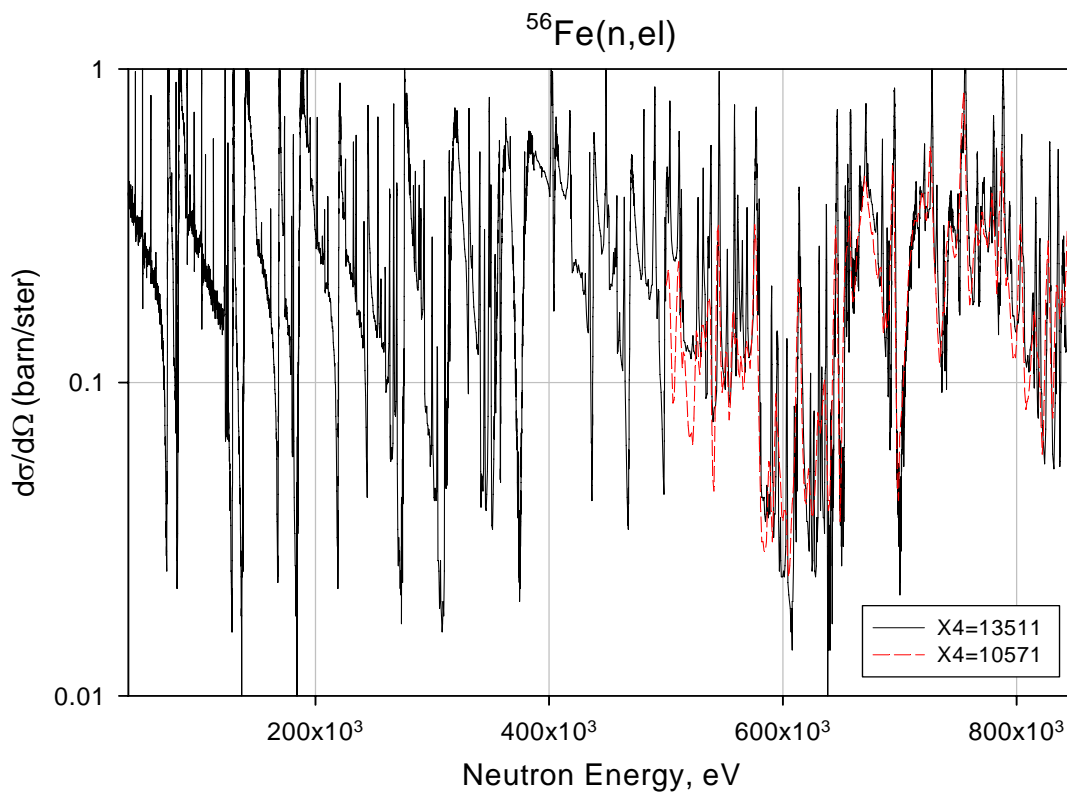


Рис. 40. Сечения упругого рассеяния на ^{56}Fe (X4=13511) и $^{\text{nat}}\text{Fe}$ (X4=10571) измеренные с высоким разрешением под углом 140 градусов в лабораторной системе.

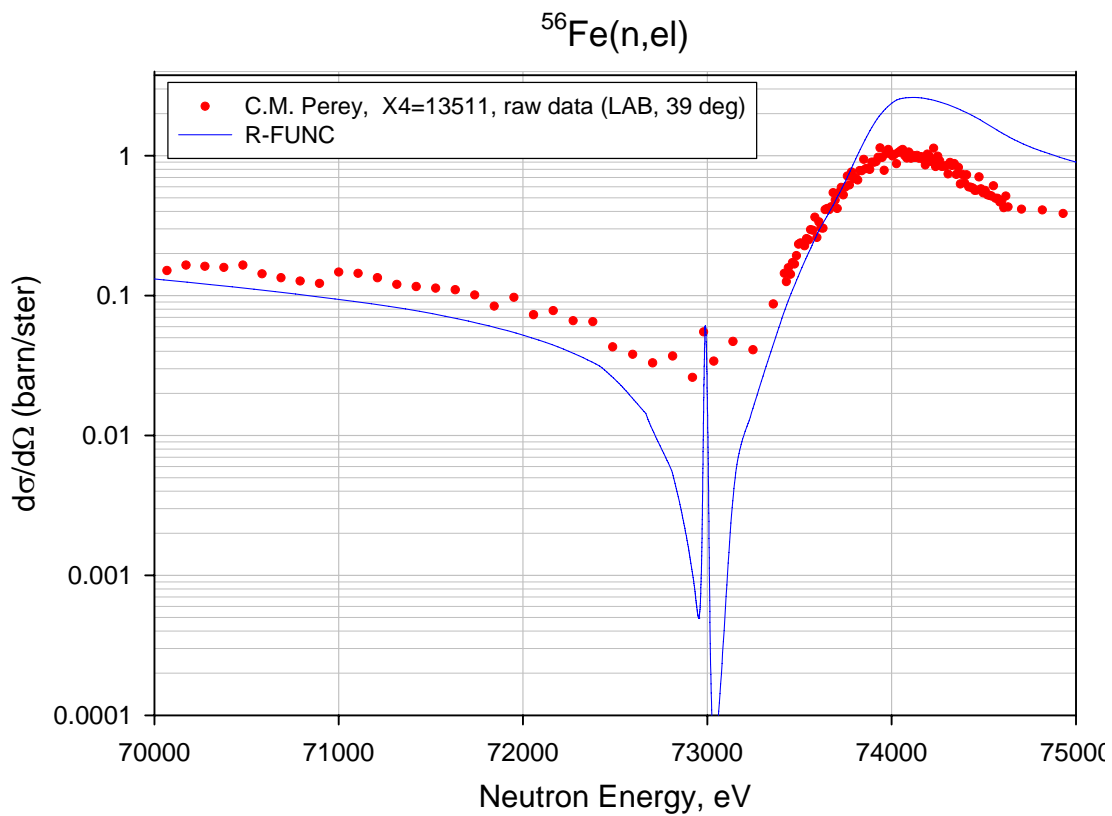


Рис. 41. Энергетическая зависимость сечения упругого рассеяния на ^{56}Fe (X4=13511) измеренного с высоким разрешением под углом 39 градусов в лабораторной системе в сравнении с вычисленной из R-матричных параметров (R-FUNC=BROND-3).

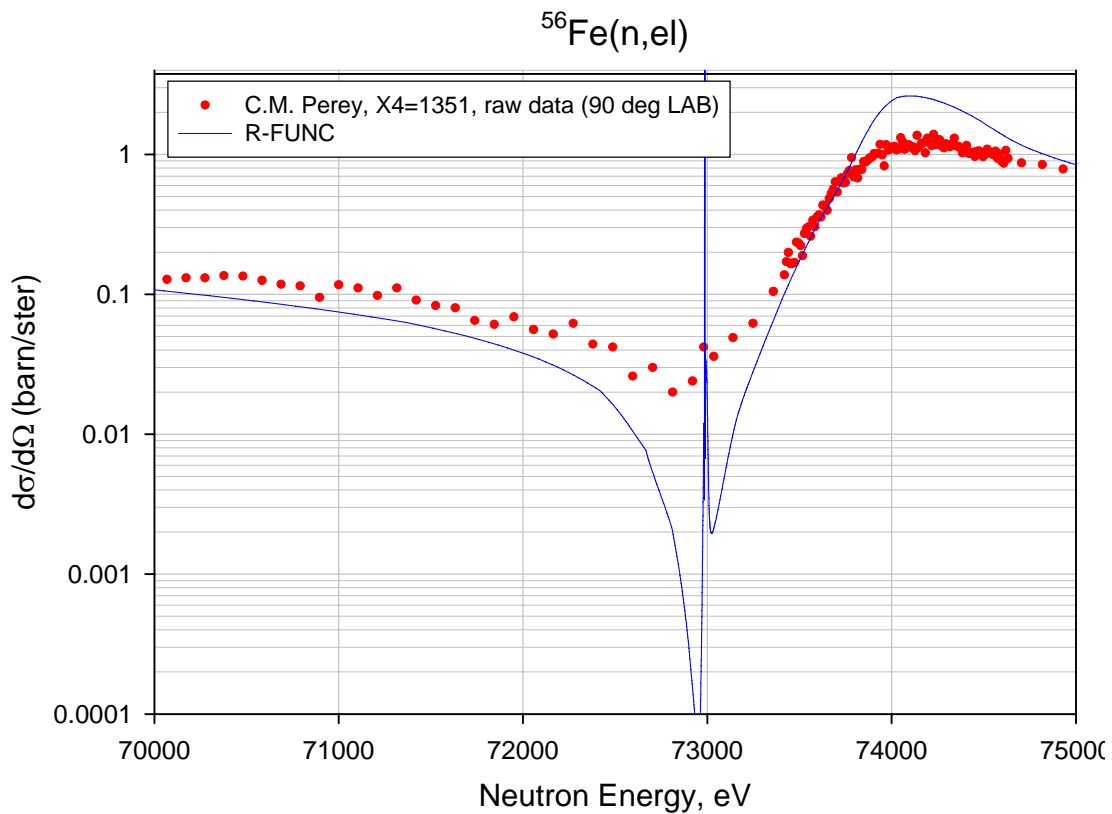


Рис. 42. Энергетическая зависимость сечения упругого рассеяния на ^{56}Fe (X4=13511) измеренного с высоким разрешением под углом 90 градусов в лабораторной системе в сравнении с вычисленной из R-матричных параметров (R-FUNC=BROND-3).

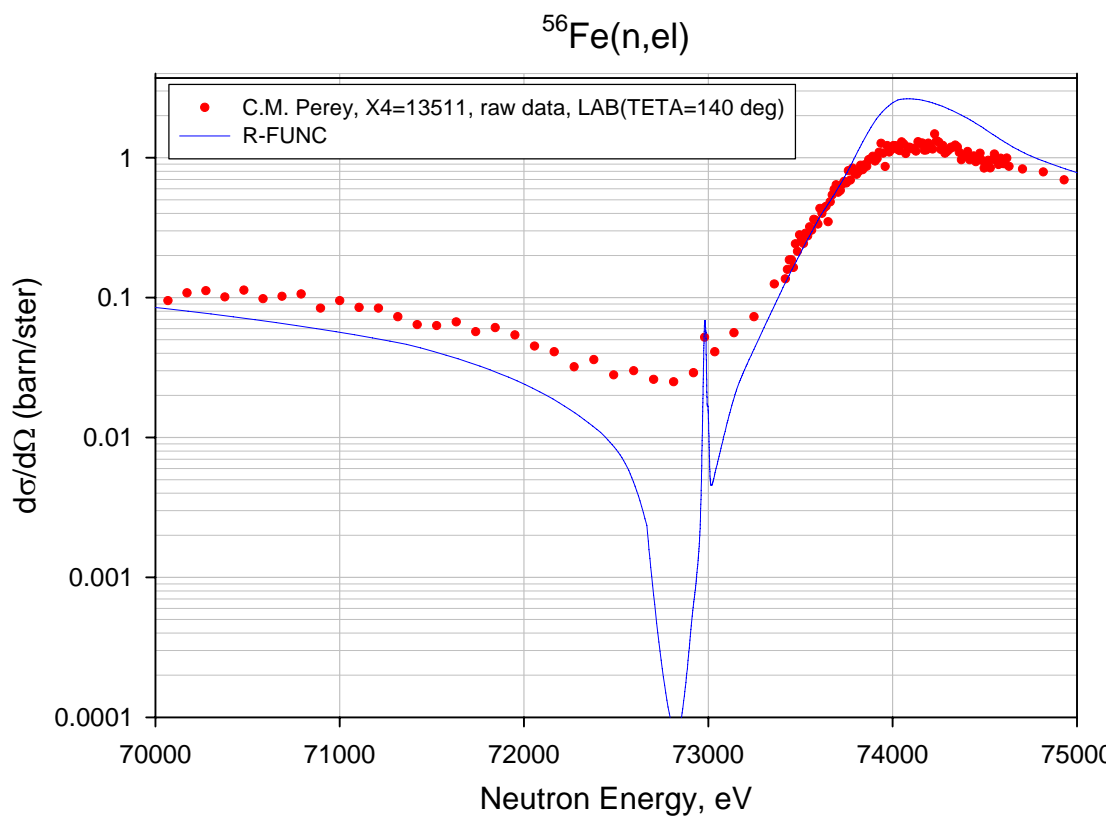


Рис. 43. Энергетическая зависимость сечения упругого рассеяния на ^{56}Fe (X4=13511) измеренного с высоким разрешением под углом 140 градусов в лабораторной системе в сравнении с вычисленной из R-матричных параметров (R-FUNC=BROND-3).

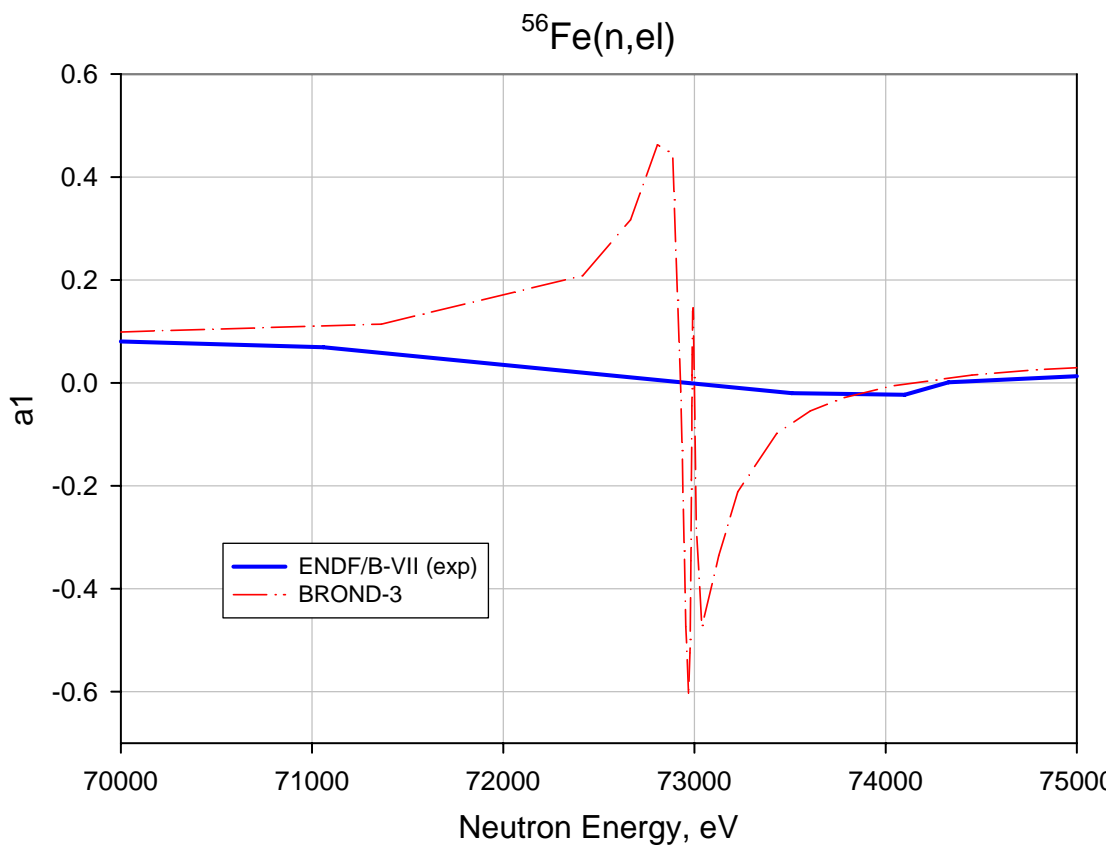


Рис. 44. Энергетическая зависимость коэффициента a_1 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 70 – 75 кэВ.

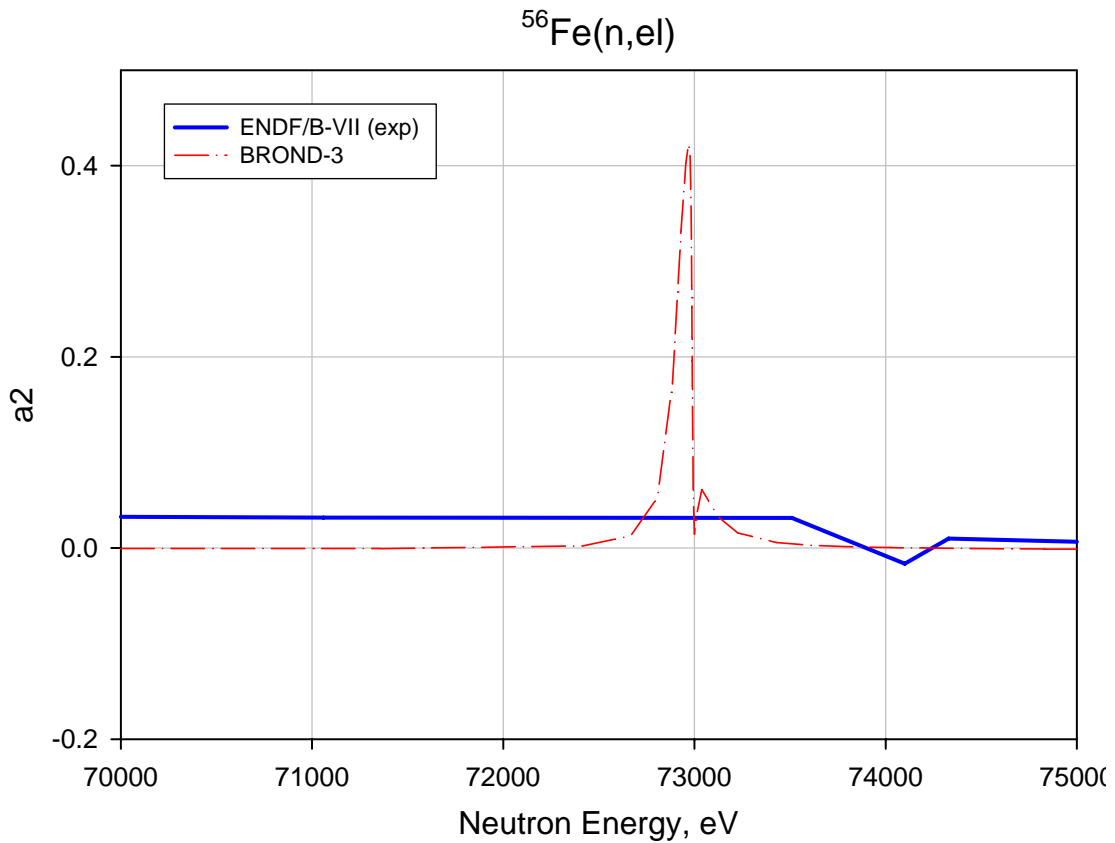


Рис. 45. Энергетическая зависимость коэффициента a_2 разложения углового распределения упругого рассеяния нейтронов в интервале энергий 70 – 75 кэВ.

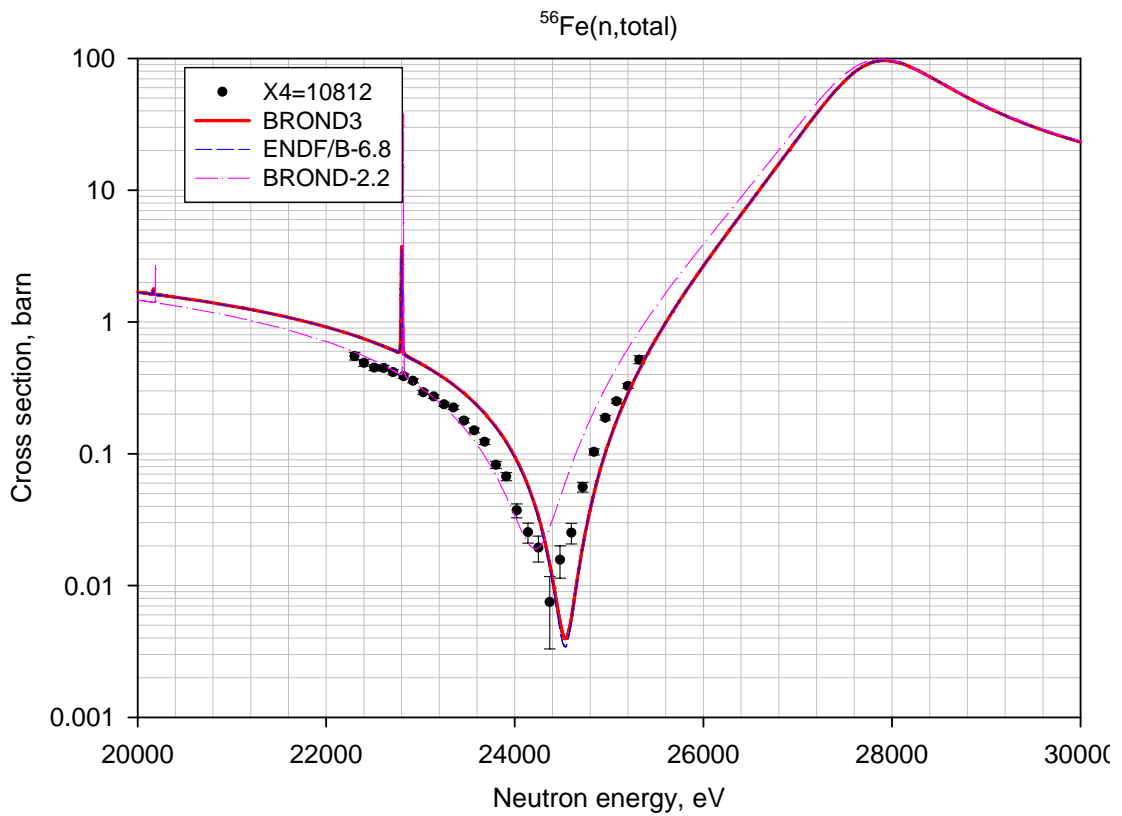


Рис. 46. Полное сечение вблизи интерференционного минимума при 26 кэВ резонансе.

6. Энерго-угловые распределения продуктов реакций

Для сравнения энергетических распределений вторичных частиц на рисунках 47 – 50 представлены полные энергосвыделения через вторичные нейтроны и гамма-кванты в различных библиотеках для основных нейтронно- и гамма-производящих каналов (n, n') континуум – $MT=91$ и $(n, 2n)$ в зависимости от энергии падающих нейтронов. В целом, можно отметить хорошее согласие между различными библиотеками, в особенности между BROND-3 и ENDF/B-VI.8, где оценки хотя и выполнены независимо, но с использованием одной и той же программы TNG.

Угловые распределения вторичных частиц для области непрерывного спектра во всех библиотеках параметризовались в приближении Калбах-Манна, а для дискретных уровней неупругого рассеяния коллективной природы – оценивались вклады прямых реакций и компаундного механизма. Полное число дискретных уровней и число уровней коллективной природы учтённых в библиотеках: BROND-3 – 32 (12), ENDF/B-VI.8 – 25 (2), JEFF-3.1 – 32 (11) и JENDL-3.3 – 27 (5).

В библиотеке ENDF/B-VI заданы спектры ядер отдачи, в библиотеке JEFF-3.1 их средние энергии существенно занижены, а в других библиотеках средние энергии ядер отдачи могут быть получены как разность между полной выделяемой энергией и средними энергиями других частиц.

Вывод: Энерго-угловые распределения вторичных частиц в различных библиотеках отличаются незначительно.

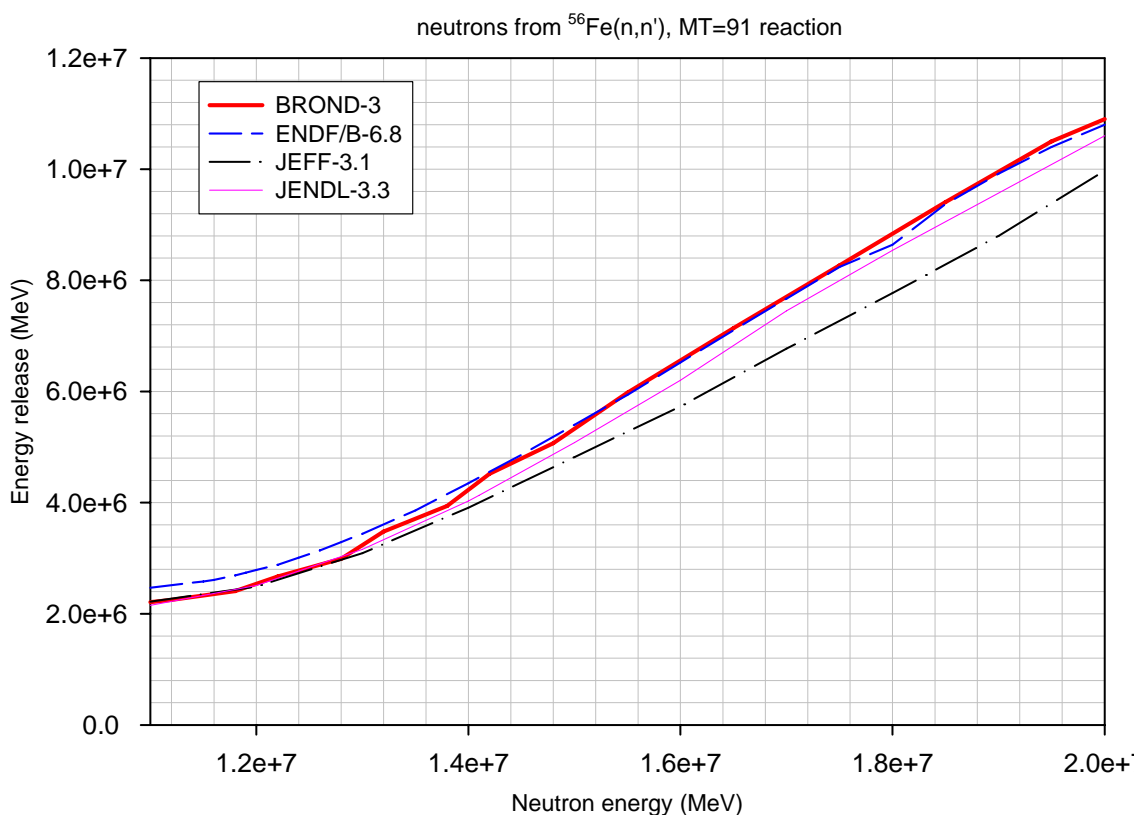


Рис. 47. Энергосвыделение (произведение средней энергии по спектру на множественность) за счет вторичных нейтронов в реакции неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней в различных библиотеках.

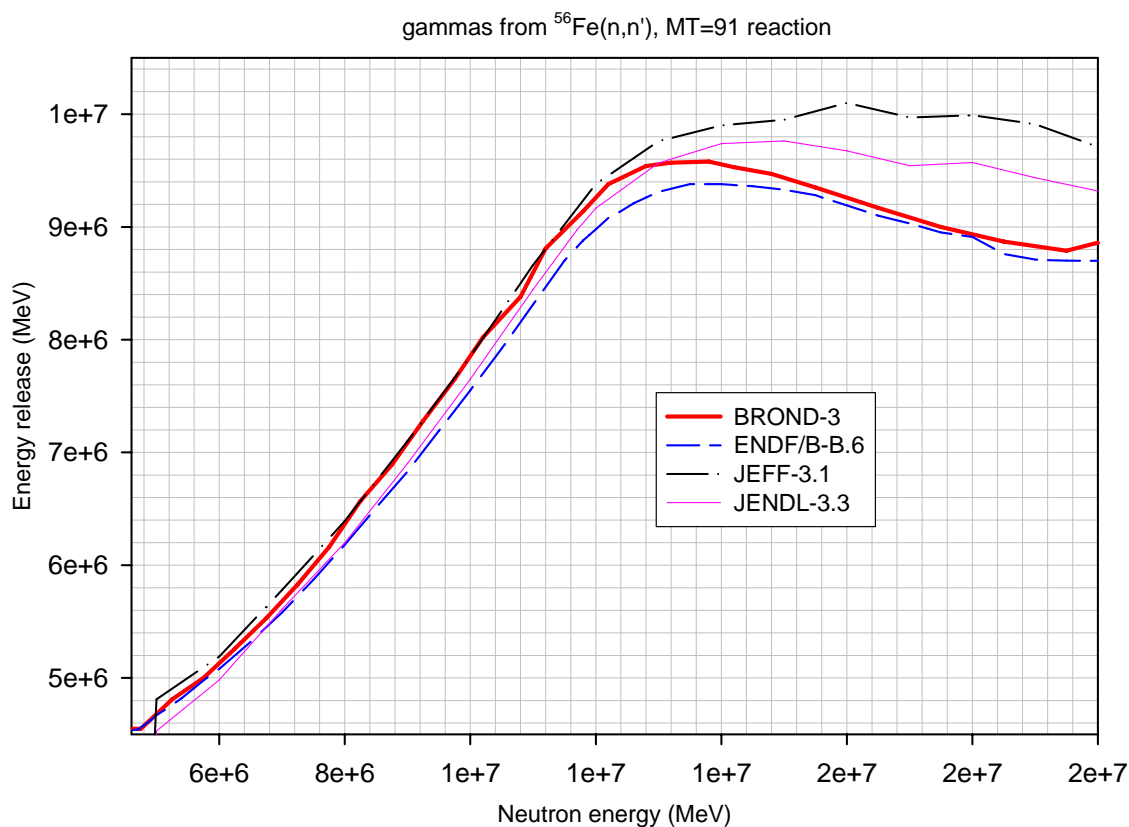


Рис. 48. Энерговыведение (произведение средней энергии по спектру на множественность) за счет вторичных гамма-квантов в реакции неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней в различных библиотеках.

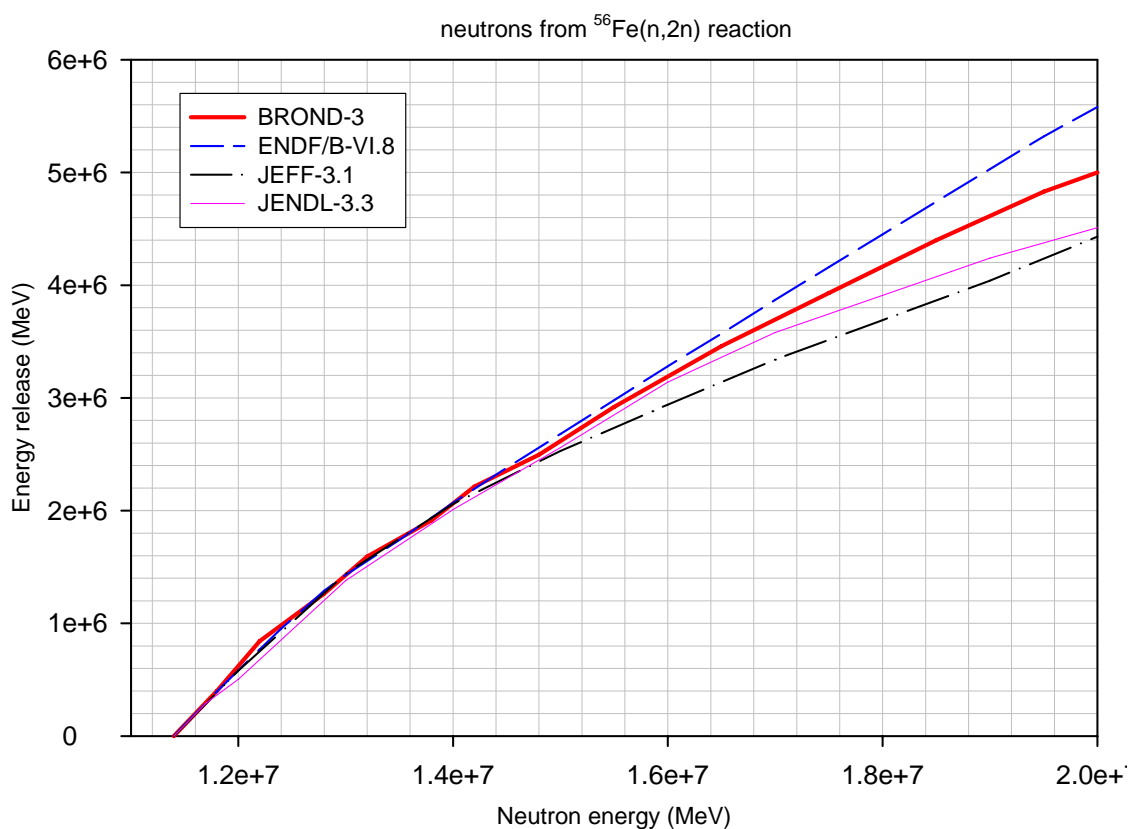


Рис. 49. Энерговыведение (произведение средней энергии по спектру на множественность) за счет вторичных нейтронов в реакции $(n,2n)$ в различных библиотеках.

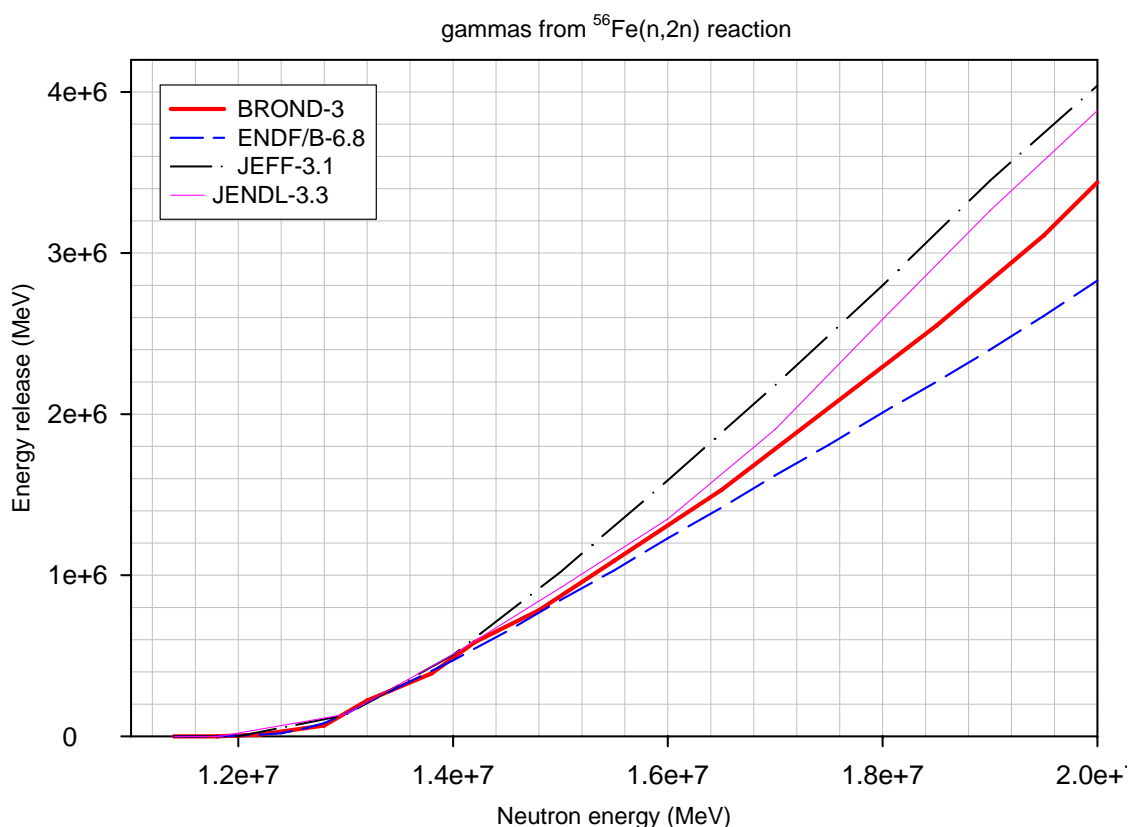


Рис. 50. Энерговыведение (произведение средней энергии по спектру на множественность) за счет вторичных гамма-квантов в реакции $(n,2n)$ в различных библиотеках.

7. Ковариационные матрицы погрешностей

Ковариационные матрицы погрешностей для всех сечений (MF=33, MT=1 – 853) получены в BROND-3 описанием методом наименьших квадратов [1, 2] всех доступных экспериментальных данных в Байесовском подходе с результатами модельных расчётов, взятыми в качестве априорных данных. Приведены ковариационные матрицы и для угловых распределений упругого рассеяния (MF=34, MT=2) оцененные из имеющихся экспериментальных данных.

Те же данные лежат и в основе оценки JEFF-3.1 за исключением матриц для MT=54 – 82 опущенных по неизвестной причине.

В библиотеке ENDF/B-VI.8 приведена грубая экспертная оценка ковариационных матриц.

В библиотеке JENDL-3.3 ковариационные матрицы ошибок были оценены или из описания экспериментальных данных методом наименьших квадратов или с помощью модельного описания экспериментальных данных (программа KALMAN).

Вывод: Погрешности JENDL-3.3 в целом сравнимы с погрешностями BROND-3 (JEFF-3.1). Погрешности ENDF/B-VI.8 представлены весьма грубой оценкой.

8. Валидация оценённых данных в интегральных и критических экспериментах

8.1. Сечение увода нейтронов спектра деления ^{235}U естественным железом под порог деления ^{238}U

Как видно из Таблицы 2 основной вклад в сечение увода вносит сечение неупругого рассеяния. Обращает внимание, что практически все результаты расчетов выполненные с данными из различных библиотек дают более низкие значения, чем полученные в эксперименте. В среднем, экспериментальные значения выше расчетных на 9%. Возможно это обусловлено или погрешностью в оценке сечения увода из данных получаемых непосредственно в эксперименте или неадекватностью модели используемой в расчетах сечения увода из оценённых сечений. Было бы полезным провести описание первичных данных получаемых в эксперименте методом Монте-Карло используя непрерывное представление по энергии нейтронов.

Таблица 2. Экспериментальные величины сечений увода в сравнении с результатами расчета для разных файлов и библиотек оценённых данных

| ЭКСПЕРИМЕНТ, барн | |
|-------------------|--------------|
| Bondarenko52 [3] | 0.72+-0.05 |
| Lovchikova61 [4] | 0.73+-0.04 |
| Bethe57 [5] | 0.689+-0.043 |
| Lityaev85 [6] | 0.67+-0.02 |
| Среднее значение | 0.7023 |

| РАСЧЁТ, барн | | | | |
|------------------------|--------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|
| Библиотека или файл | Захват | Вклад от реакции | | |
| | | Упругого рассеяния | Неупругого рассеяния | Полное сечение увода |
| ABBN78 | 0.0132 | 0.0472 | 0.5897 | 0.6500 |
| ABBN93.1 | 0.0147 | 0.0465 | 0.5828 | 0.6440 |
| ENDF/B-5 | 0.0136 | 0.0426 | 0.6267 | 0.6829 |
| ENDF/B-6 | 0.0140 | 0.0423 | 0.5738 | 0.6302 |
| JEFF-2.2 | 0.0155 | 0.0461 | 0.5942 | 0.6558 |
| JEFF-3 | 0.0131 | 0.0440 | 0.5685 | 0.6256 |
| JENDL-3.2 | 0.0146 | 0.0447 | 0.5966 | 0.6559 |
| JENDL-3.3 | 0.0147 | 0.0455 | 0.6005 | 0.6607 |
| BROND-3* | 0.0141 | 0.0438 | 0.5555 | 0.6133 |
| Среднее значение | | | | 0.6465 |

* - Все сечения кроме ^{56}Fe взяты из библиотеки ENDF/B-6.8

Сечение деления ^{238}U нейтронами приведённое на рисунке 55 для двух библиотек показывает, что вклад в неопределенность в расчетах сечения увода обусловленный разными оценками сечения деления не может превышать 1 – 2%. Эффективный порог сечения деления ^{238}U лежит при энергии примерно 1,4 МэВ, что позволяет считать сечение увода нечувствительным к сечению неупругого рассеяния на ^{56}Fe при энергии нейтронов ниже 1,4 МэВ.

Сравнение оценённых интегральных сечений неупругого рассеяния с экспериментальными данными опубликованными после 1990 года показано на рисунках 51 - 53. Данные Коржа не являются абсолютными, они нормированы на данные Лискина при энергии 1,4 МэВ. Все другие данные полученные при регистрации гамма переходов в естественном железе приведены к сечению неупругого рассеяния нейтронов в ^{56}Fe с учетом его содержания и с учётом, что при достаточно высоких энергиях 95% всех гамма-переходов при неупругом рассеянии дают вклад в гамма-линию с энергией 0,847 МэВ.

Сравнение произведения сечения неупругого рассеяния на спектр нейтронов деления ^{235}U тепловыми нейтронами являющегося величиной, лучше представляющей сечение увода показано на рисунке 54. Из рисунка видно, что превышение сечения неупругого рассеяния в библиотеке JENDL-3.3 в области энергий 3 – 4 МэВ над данными других библиотек не подтверждается последними экспериментальными данными (см. рисунки 51 – 53). Кроме этого, маловероятно, что 9% разница в сечении увода между JENDL-3.3 и BROND-3 может быть объяснена только разностью сечений неупругого рассеяния.

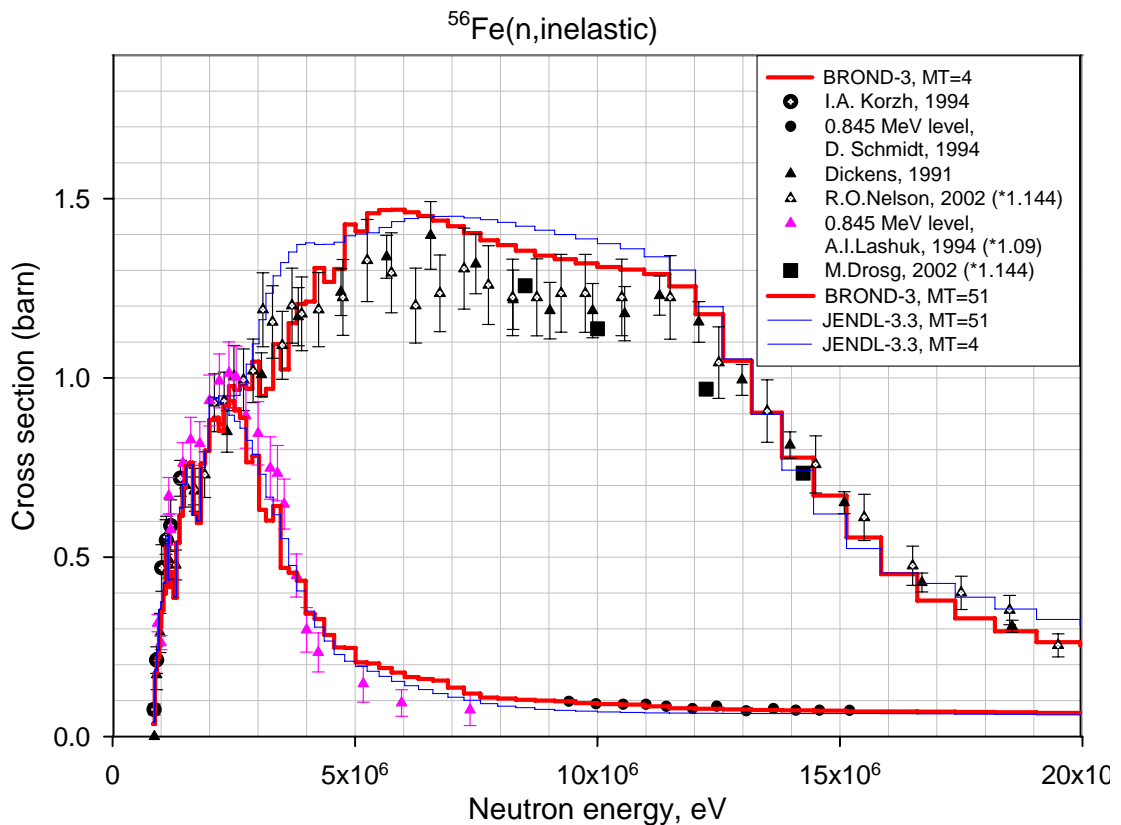


Рис. 51. Сравнение полного сечения неупругого рассеяния и сечения неупругого рассеяния с возбуждением первого уровня (нижние кривые).

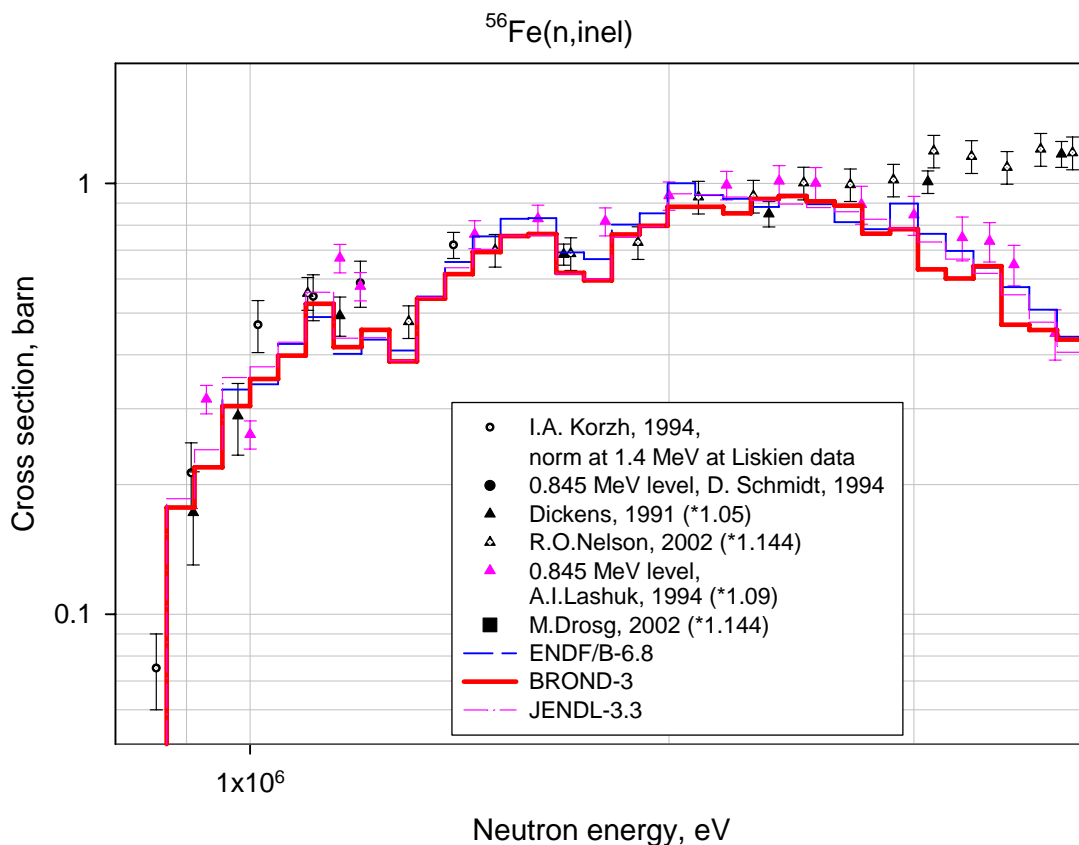


Рис. 52. Сравнение сечения неупругого рассеяния с возбуждением первого уровня из разных библиотек с последними экспериментальными данными. Данные Дикенса и Нельсона (для энергии выше 2,1 МэВ) - для полного сечения неупругого рассеяния.

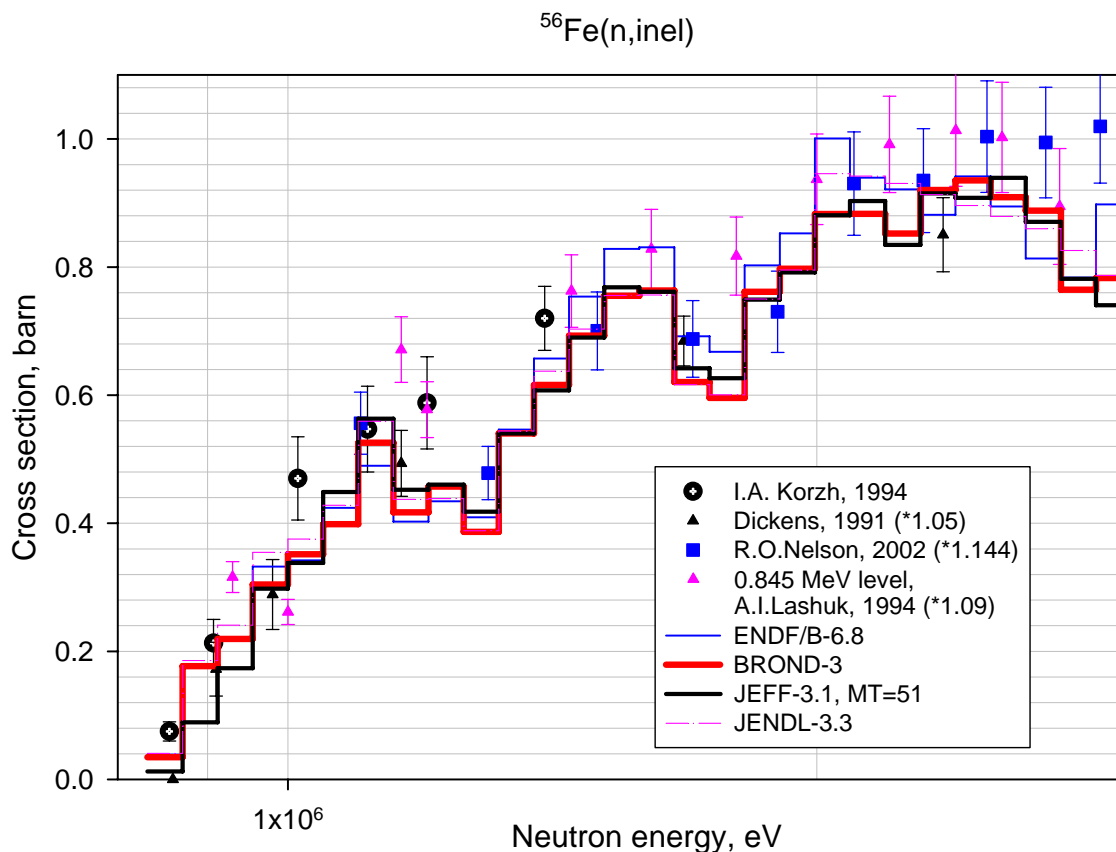


Рис. 53. То же, что на рисунке 47, но в логарифмической шкале по энергии.

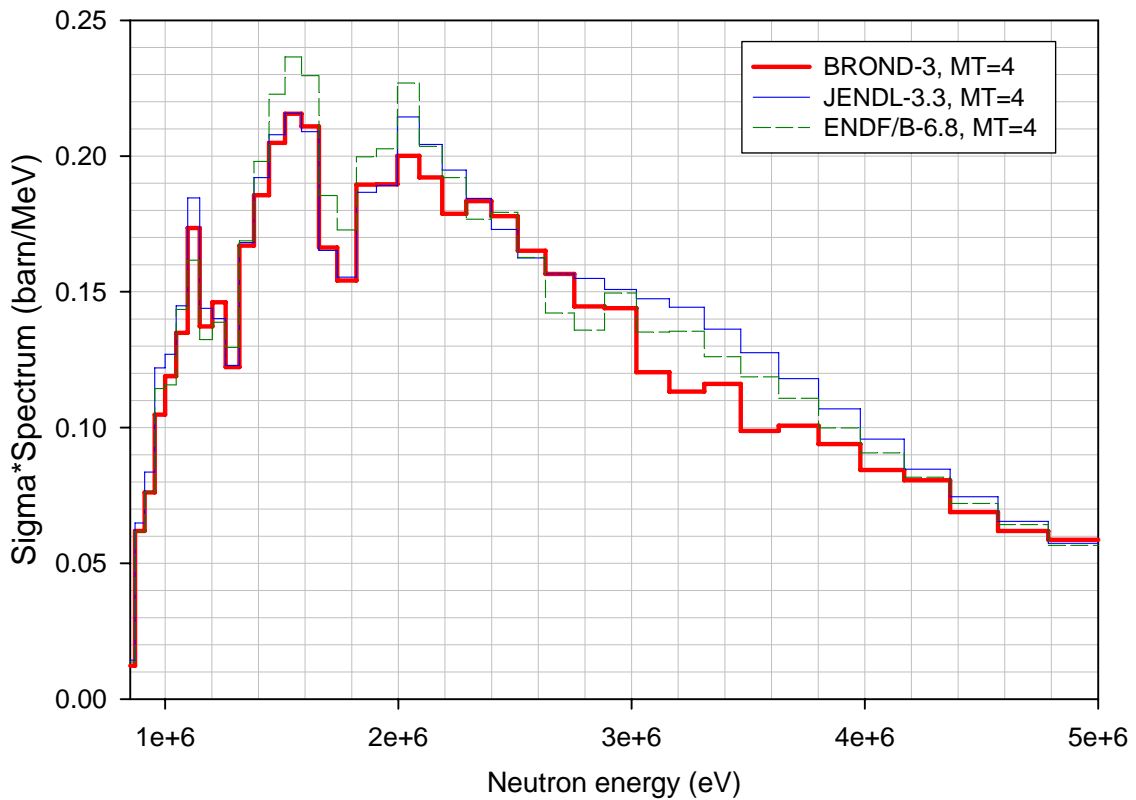


Рис. 54. Произведение нормированного на 1 спектра деления ^{235}U тепловыми нейтронами из библиотеки ENDF/B-VI.8 на полное сечение неупругого рассеяния из разных библиотек.

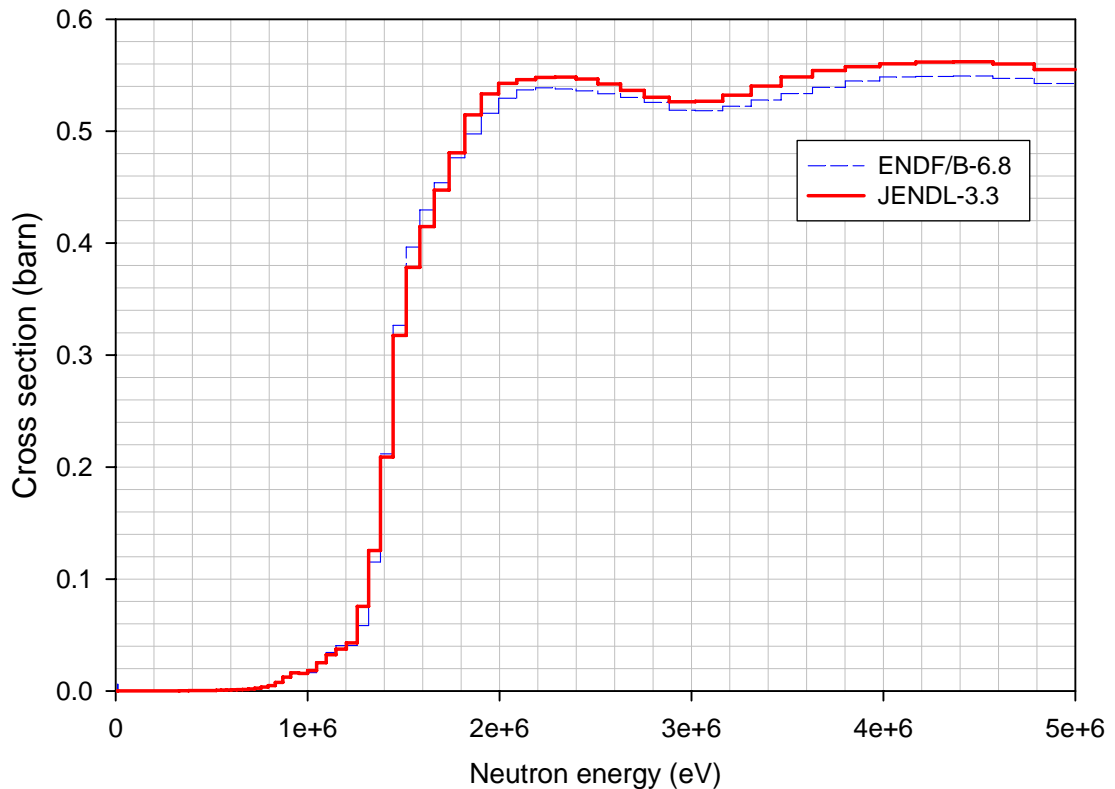


Рис. 55. Сечение деления ^{238}U нейтронами в библиотеках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI.8.

Вывод:

Наличие систематического расхождения между результатами оценки сечения увода и его определения в экспериментах по сферическому пропусканию нейтронов деления очевидно. Для разрешения этого противоречия необходим тщательный анализ экспериментов по пропусканию с использованием современных вычислительных методик. Наиболее вероятной причиной расхождения представляется занижение среднего пути быстрых нейтронов деления, проходимых ими в сферической оболочке. *Желательно проведение прямого сравнения измеряемых на эксперименте величин с результатами их детального расчёта методом Монте-Карло.*

Литература

1. H. Vonach et al., Evaluation of the Fast Neutron Cross Sections of ^{56}Fe Including Complete Covariance Information, *Physics Data*, 13-7, 1992.
2. V. Pronyaev et al., Evaluation of the fast neutron cross sections of ^{52}Cr and ^{56}Fe including complete covariance information, *Physics Data*, 13-8, 1995.
3. Бондаренко И.И., Ковалев В.Л., Физические измерения на нейтронах деления с конвекторами, IAEA Seminar Physics of Fast and Intermediate Reactors, Vienna, 1961, v. 2, p.159.
4. Ловчикова Г.Н., Сальников О.А., Сечение увода под порог деления U-238 нейтронов спектра деления на элементах Na, K, Sr, Ba, Mo, Nb, Fe. *Атомная Энергия*, т.11, 1961, с.442.
5. Bethe N.A., Beyster J.R., Carter R.E. Inelastic Cross section for Fission-Spectrum neutrons, *J. of Nucl. Energy*, v. 4, 1957, p.147.
6. Дулин В.А., Коробейников В.В., Литяев В.М., Цибуля А.М. Определение сечения увода под порог деления U-238 из экспериментов по пропусканию нейтронов деления, *Атомная Энергия*. т. 59 (2), 1985, с.116

8.2. Бенчмарк эксперимент на быстрой критической сборке КБР-09 с большим содержанием железа

Результаты для k_{∞} полученные из анализа экспериментальных данных на сборке КБР-09 для железа приведены в таблице 1. Приведено экспериментальное значение и 5 расчётных значений для разных вариантов библиотек.

| | Эксп Бенч | ABBN- 93 | JEFF-3.1 | ENDF/B- 6.7 | BROND-3* |
|---|--------------|-------------|----------|----------------|----------|
| k_{∞} | 1.050±0.008 | 1.0676 | 1.0824 | 1.0793 | 1.0720 |
| Отличие (расчет – эксп. Дулин)*100% | ±0. 8% | +1.7% | +3.0% | +2.8% | +2.1% |

* Все данные, кроме данных для ^{56}Fe , взяты из ENDF/B-6.7

Коэффициенты чувствительности дающие наибольший вклад в k_{∞}
 ^{235}U :

(n,g) -0.1633
(n,f) 0.5556
 ν 0.9987
содерж. 0.3937

$^{\text{nat}}\text{Fe}$:

(n,g) -0.1818
(n,el) 0.03034
содерж. -0.1121

Зная групповые коэффициенты чувствительности и сечения можно оценить вклад в различие k_{∞} между ENDF/B-6.7 и BROND-3 обусловленное разными файлами ^{56}Fe . Изменения в k_{∞} при переходе от ENDF/B-6.7 к BROND-3 составляют -0.00786 от захвата и +0.000036 от упругого рассеяния, что в целом хорошо согласуется с наблюдаемым различием. Из рисунке 52 видно, что различие в k_{∞} между BROND-3 и другими библиотеками почти полностью объясняется различием в фоновом сечении захвата, добавленным в резонансную область.

Вывод: Повышение сечения захвата ^{56}Fe в библиотеке BROND-3 по сравнению с данными ENDF/B-6.7 ведет к некоторому снижению расчетно-экспериментального расхождения для сборки КБР-09 содержащей большое количество железа. Однако расхождение продолжает оставаться существенно превосходящим экспериментальную погрешность

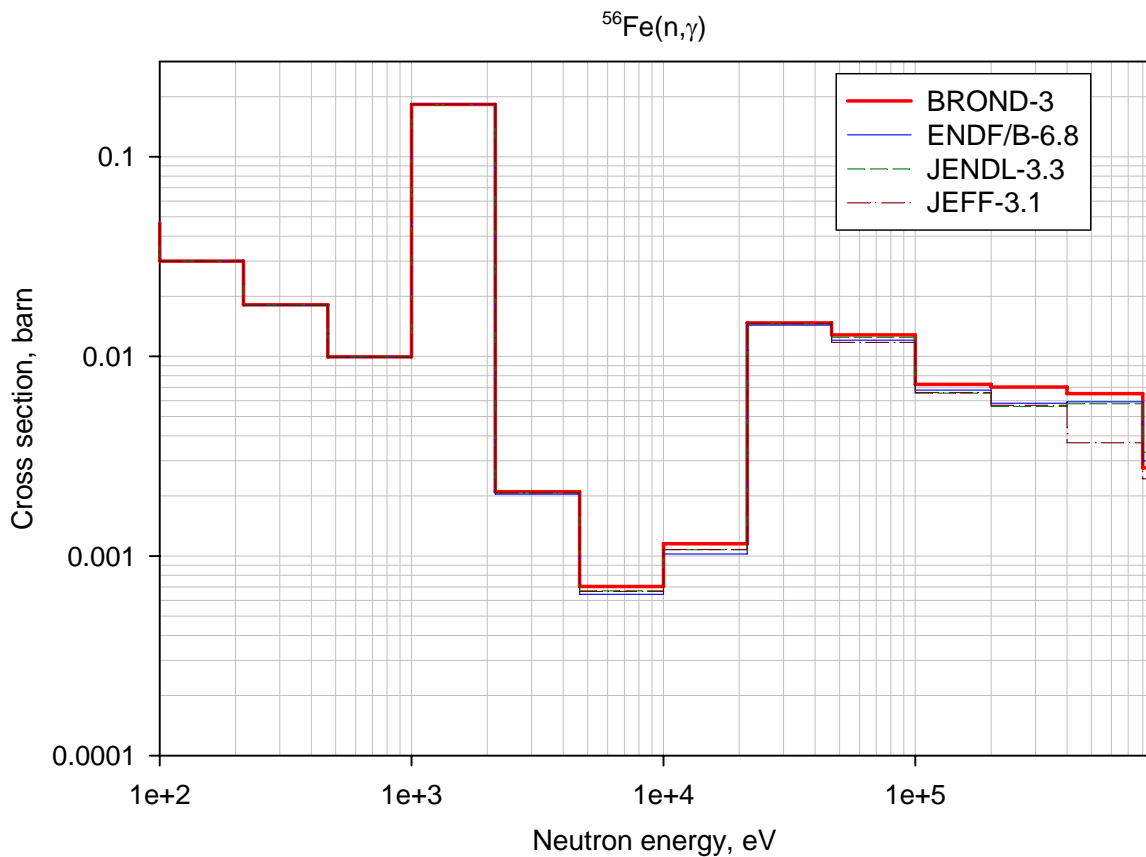


Рис. 56. Сечение захвата нейтронов ^{56}Fe из разных библиотек в 26-и групповом разбиении.

8.3. Бенчмарк-эксперименты на сборках, содержащих железо в качестве отражателя и эксперименты по глубокому проникновению нейтронов в железе

Библиотека ENDF/B-VII(beta1 версия) была протестирована на большом количестве интегральных экспериментов по глубокому проникновению нейтронов в моноэлементных средах и в критических экспериментах на сборка с железом в качестве отражателя. Так как различия в в разных библиотеках сечениях железа, определяющие исследуемые величины, редко превышает несколько процентов, анализ результатов этих тестов может позволить сделать вывод и о данных из других библиотек. Общим выводом является, что нейтронные данные для железа из библиотек ENDF/B-VI и ENDF/B-VII заметно уменьшают утечку нейтронов из компактных металлическихборок, окружённых железом, для нейтронов с энергией менее 1 МэВ, а также выход быстрых нейтронов с энергией менее 1 МэВ при их прохождении через большие толщи железа. Этот эффект также заметен для моноизотопных сред в интегральных экспериментах по пропусканию сферических (OKTAVIAN) и плоских (FNS) слоёв.

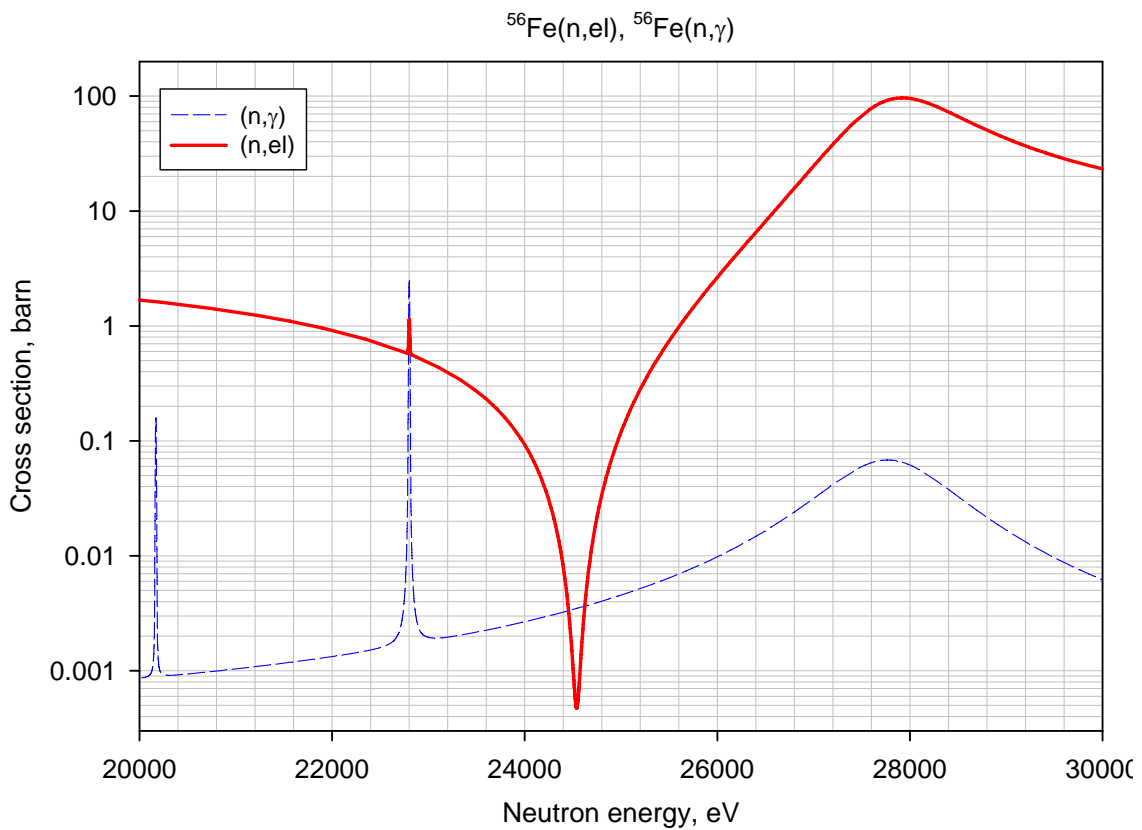


Рис. 57. Сечение захвата и упругого рассеяния нейтронов ^{56}Fe из библиотеки BROND-3 вблизи широкого s-резонанса при 26 кэВ.

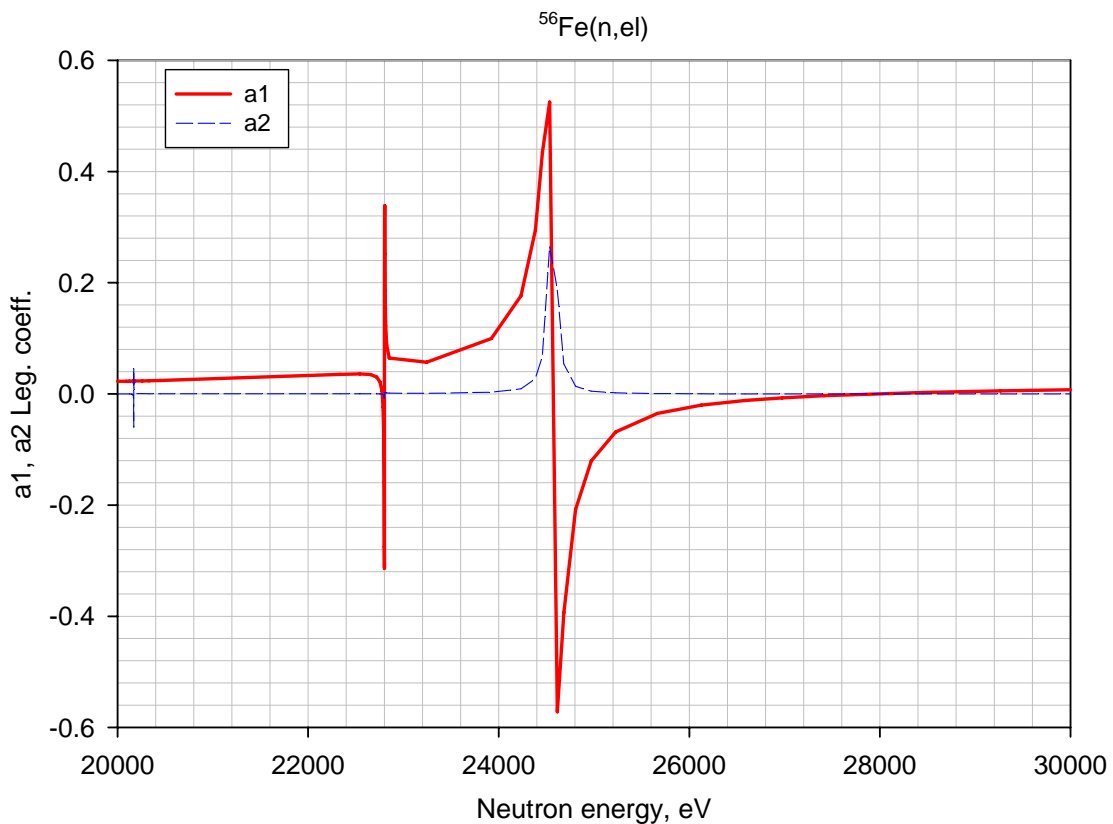


Рис. 58. Коэффициенты Лежандра a_1 и a_2 угловых распределений упругого рассеяния нейтронов ^{56}Fe из библиотеки BROND-3 вблизи широкого s-резонанса при 26 кэВ.

Рассчитанные выходы вторичных гамма-квантов в этих средах как правило заметно ниже наблюдаемых на эксперименте. Объяснение этому, вероятнее всего, – слишком грубый

учёт угловой зависимости упругого рассеяния от энергии нейтронов в резонансной области энергий (ниже 1 МэВ по энергии). Для более точного расчёта глубокого проникновения, утечки и отражения нейтронов в моноизотопных средах необходимо учитывать не только детальную зависимость хода сечений и спектра нейтронов в резонансной области, как показано на рисунке 57, но и угловые распределения, коррелированные с сечением упругого рассеяния как показано на рисунке 58.

9. Заключение

9.1 Вывод

В РОСФОНД рекомендуется включить оценку, выполненную для BROND-3 (Проняев, 2005). В дальнейшем целесообразно её дальнейшее улучшения, в частности, в связи с более углубленной валидацией по результатам интегральных экспериментов.

9.2. Автор обоснования оцененных данных

Проняев В.Г.

26.4. Железо-57

Содержание в естественной смеси 2. 2%

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 26$ (заряд)
- 1.2. $A = 57$ (атомный номер)
- 1.3. $A_w = 56.446$ (отношение массы ядра к массе нейтрона)
- 1.4. Содержание в естественной смеси 2.119 ± 0.010 (атомарные проценты)
- 1.5. Спин основного состояния $1/2^-$

Оценка ENDF/B-VI.8 (ENDF/B-VII.b1) была выполнена в 1989 году и не подвергалась существенной ревизии за исключением расширения верхнего предела по энергии с 20 до 150 МэВ в 1996 году. Оценка JENDL-3.3 представляет собой выполненную в 2000 году существенную ревизию оценки JENDL-3.2. В области разрешённых резонансов в оценке JEFF-3.1 использованы параметры из файла JENDL-3.3, а для более высоких энергий оценка основывается на модельных расчётах. Оценка для библиотеки BROND-2 была выполнена в 1985 году и оценка CENDL-2 – ревизию 1991 года оценки JENDL-3.1 для библиотеки термоядерных данных.

2. Область разрешённых резонансов и тепловые сечения

Значения сечений в тепловой точке, резонансных интегралов захвата, радиуса потенциального рассеяния, а также области неразрешённых резонансов приведены в таблице 1. Особенностью ^{57}Fe является низкий порог неупругого рассеяния (14.248 кэВ) приводящий к тому, что вклад сечения неупругого рассеяния в область разрешённых резонансов является резонансным и большим. По требованию формата резонансное сечение неупругого рассеяния в области разрешённых резонансов должно быть задано в качестве подложки в этом сечении и через конкурирующую ширину в параметрах резонансов. Все файлы содержат подложку в сечении неупругого рассеяния в области разрешённых резонансов, но ни один из файлов – конкурирующие ширины в области разрешённых резонансов. Для BROND-2 конкурирующие ширины в области разрешённых резонансов первоначально вводились в файл, но затем были исключены. Отсутствие конкуренции может приводить к завышению сечений реакций упругого рассеяния и захвата. Для примера, на рисунке 1 показаны результаты расчёта средних сечений захвата в области разрешённых резонансов без учёта (BROND-2) и с учётом (BROND-2.1) конкурирующих ширин канала неупругого рассеяния. Так как нейтронные ширины канала упругого рассеяния и гамма-ширины также изменялись в оценке, разброс оценок является заметным.

Таблица 1. Характеристики оценок в тепловой точке и резонансной области.

| Библиотека | σ_{el}^{therm} барн | $\sigma_{n,\gamma}^{therm}$ барн | RI барн | RRR формализм | R ₀ фм | E _{min} (URR) эВ | E _{max} (URR) кэВ |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------|------------------|----------------------|------------------------------|-------------------------------|
| ENDF/B-VI.8 | 2.5961 | 2.4258 | 1.4402 | R-M | 5.9 | - | - |
| BROND-2 | 2.1262 | 2.4411 | 1.4564 | B-W | 5.9 | 200 | 500 |
| JEFF-3.1 | 0.2021 | 2.4623 | 1.4188 | R-M | 6.5 | - | - |
| JENDL-3.3 | 0.2021 | 2.4623 | 1.4188 | R-M | 6.5 | - | - |
| CENDL-2 | 0.2021 | 2.4623 | 1.4188 | B-W | 6.5 | - | - |
| Mu03 | | 2.48±0.30 | 1.6±0.2 | | | | |

Сравнения групповых сечений полученных из оценённых резонансных параметров и гладких сечений приведённых в разных библиотеках показаны на рисунках 2 – 7. Расхождения в оценках обусловлены противоречивостью экспериментальных данных. Так различия в полных сечениях для нейтронов с энергией ниже нескольких кэВ объясняются в первую очередь различиями в радиусах потенциального рассеяния и параметров отрицательных резонансов заложенных в области разрешённых резонансов в разных библиотеках. Оценки ENDF/B-VI.8 и BROND-2, где выбор радиуса потенциального рассеяния основан на измерениях полного сечения в области 10 – 100 эВ, где оно существенно определяется радиусом потенциального рассеяния, является предпочтительным по сравнению с оценками JENDL-3.3 и JEFF-3.1. Сечение захвата в резонансной области, по-видимому, наилучшим образом представлено в библиотеке ENDF/B-VI.8, так как в ней резонансные ширины захвата, определённые в экспериментах с высоким разрешением были поправлены, чтобы добиться описания наблюдаемого среднего сечения захвата. Сечение неупругого рассеяния в резонансной области энергий оценивалось в основе имеющихся экспериментальных данных[1], в BROND-2 и JENDL-3.3 – рассчитывалось из резонансных параметров основанных на разных экспериментальных результатах, а в JEFF-3.1 – рассчитывалось в оптико-статистической модели. Различия в сечении достаточно заметны и вероятно прямое использование последних экспериментальных данных в оценке ENDF/B-VI.8 является наилучшим подходом.

Вывод: Оценка ENDF/B-VI.8 может быть рекомендована для файла библиотеки РОСФОНД в области разрешённых резонансов. В то же время очевидна желательность пресмотра данных о резонансных параметрах с тем, чтобы конкурирующий процесс – неупругое рассеяние – нашел в них адекватное отражение и конкуренция этого процесса с захватом и упругим рассеянием учитывалась бы корректно.

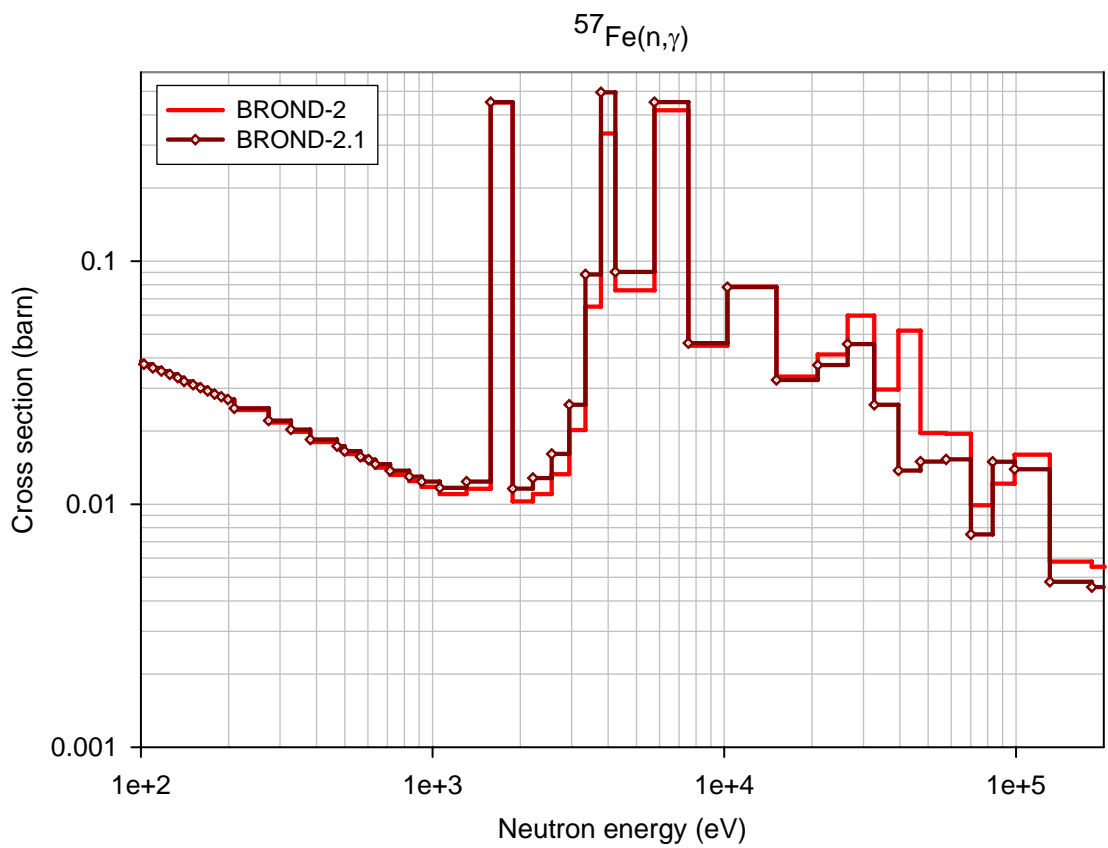


Рис. 1. Сечение захвата в резонансной области рассчитанное из резонансных параметров с учётом (BROND-2.1) и без учёта (BROND-2) конкуренции со стороны канала неупругого рассеяния.

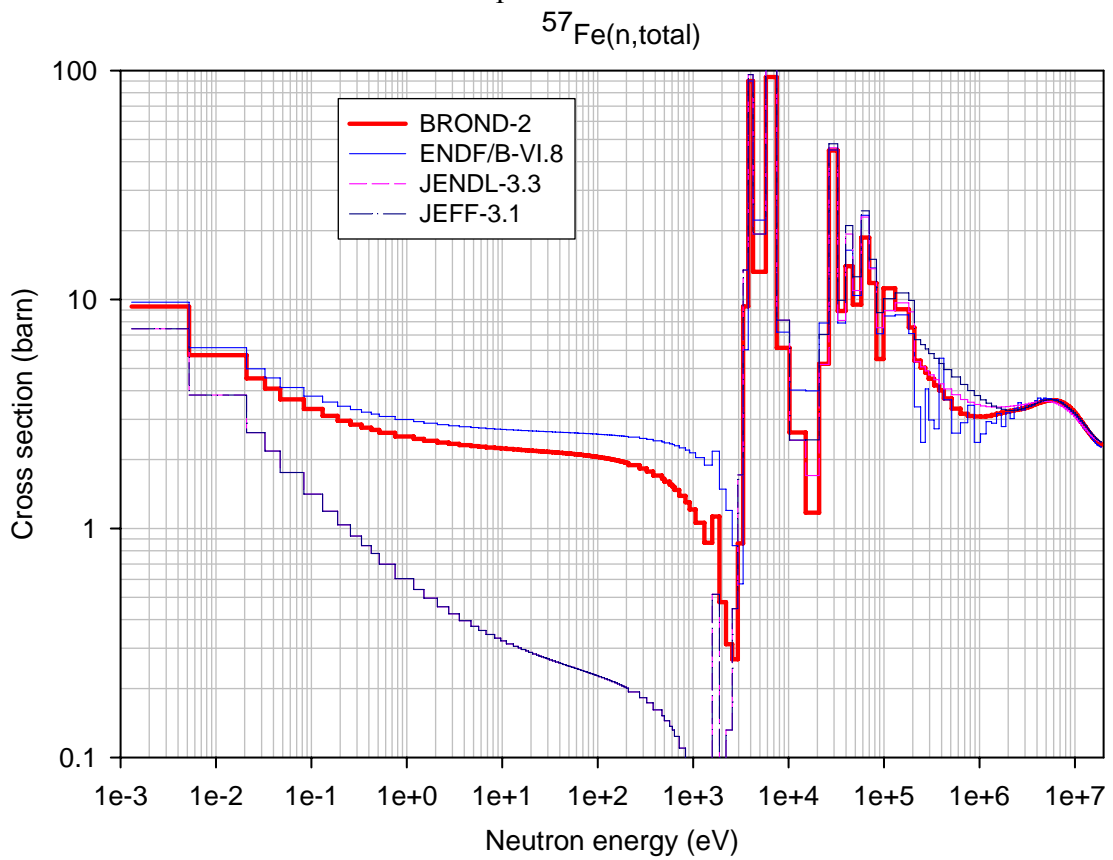


Рис. 2. Сравнение полного сечения в групповом представлении из разных библиотек.

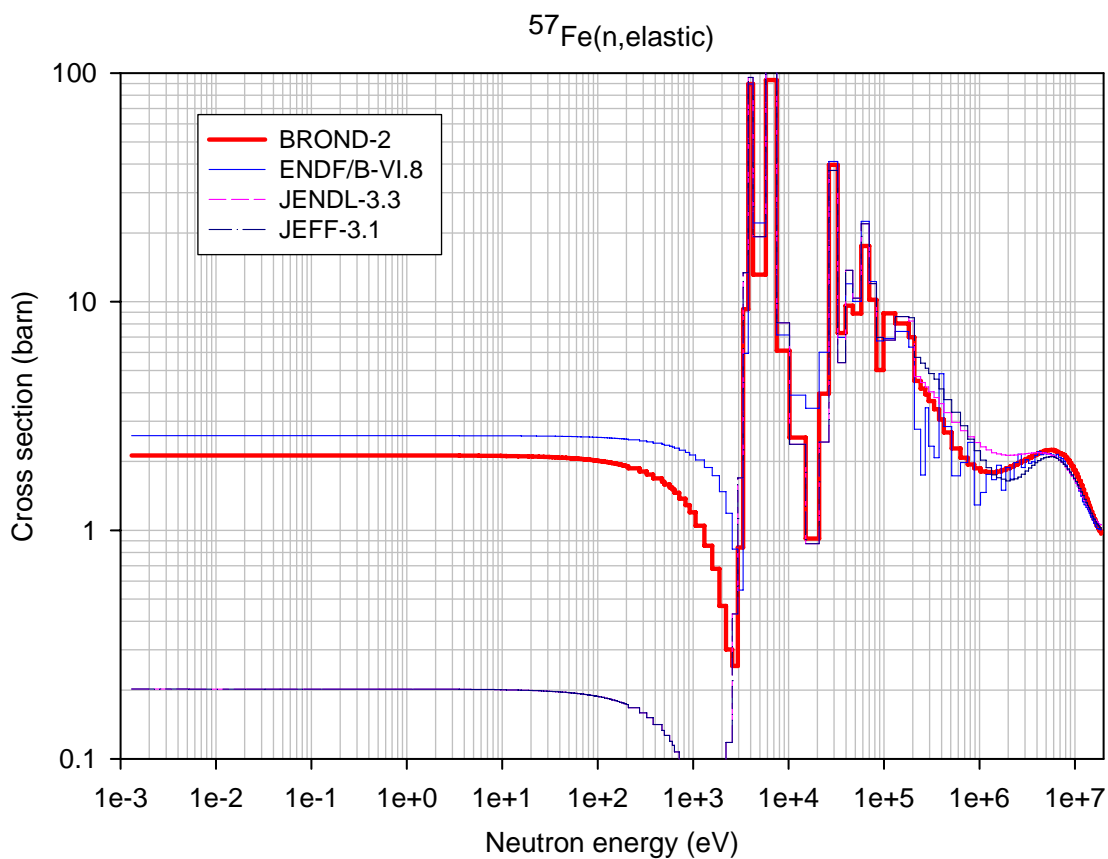


Рис. 3. Сравнение сечения упругого рассеяния в групповом представлении из разных библиотек.

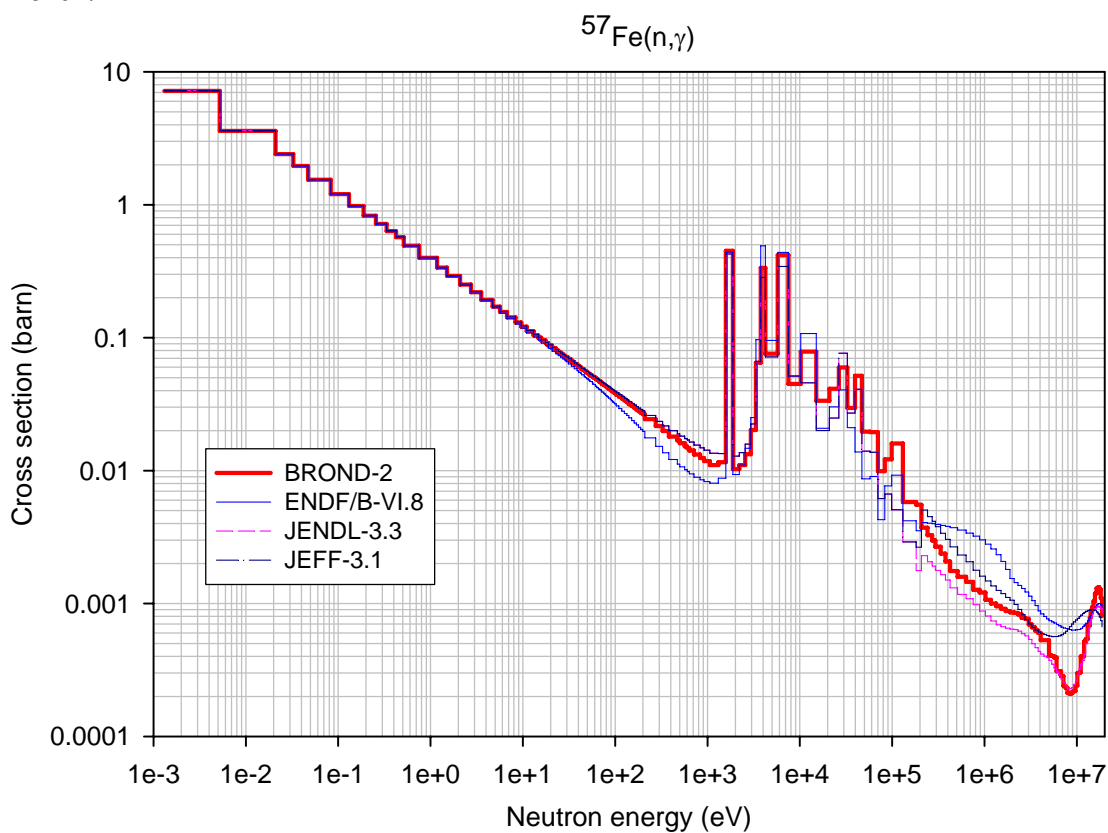


Рис. 4. Сравнение сечения захвата в групповом представлении из разных библиотек.

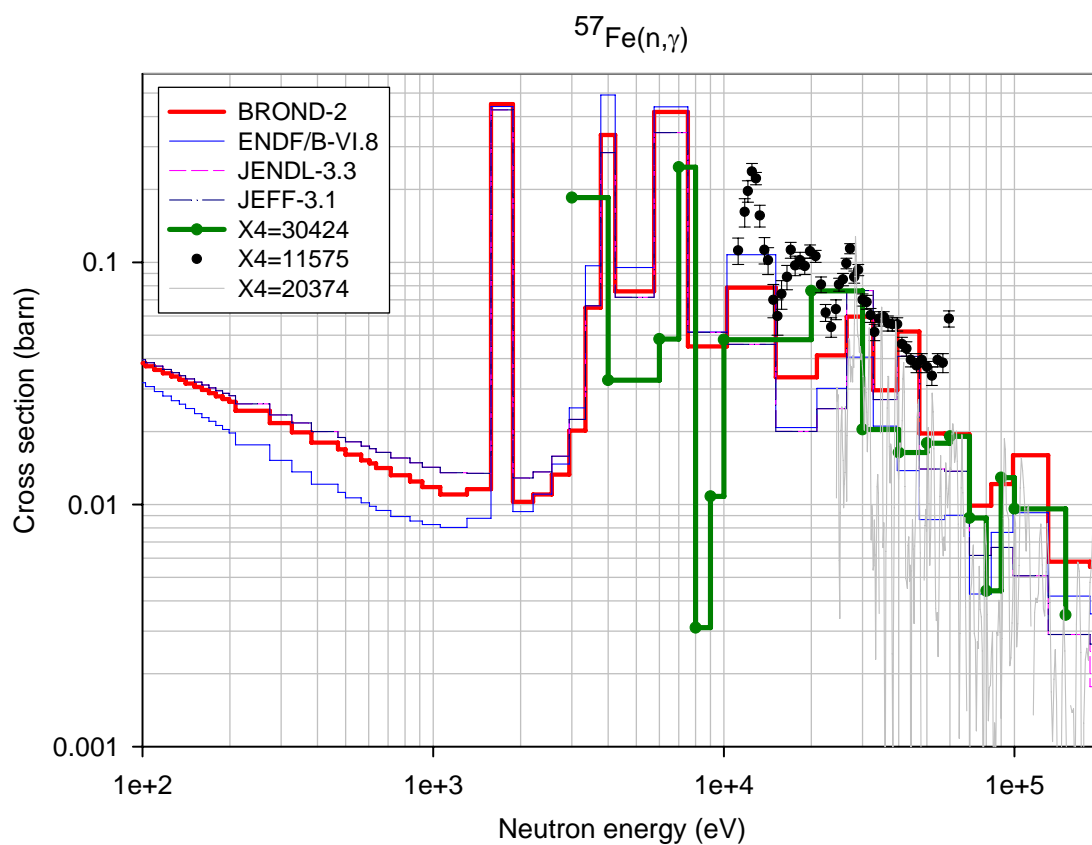


Рис. 5. Сравнение сечения захвата в групповом представлении из разных библиотек и имеющихся экспериментальных данных.

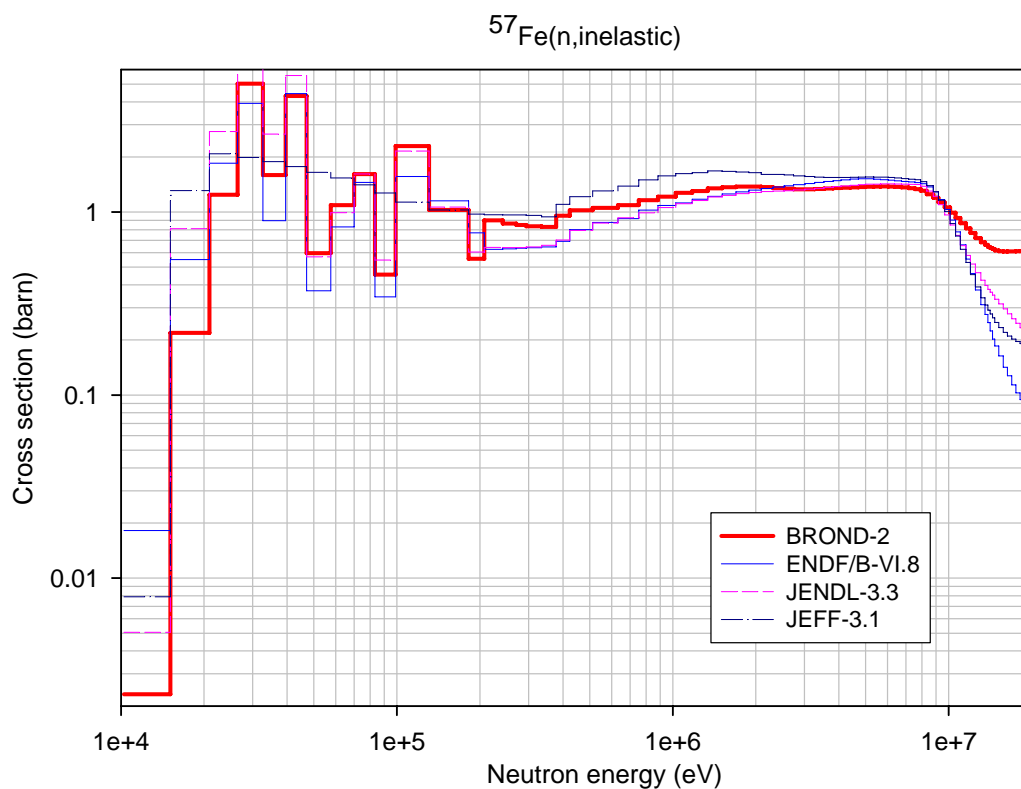


Рис. 6. Сравнение сечения неупругого рассеяния в групповом представлении из разных библиотек.

$^{57}\text{Fe}(n,\text{inelastic})$

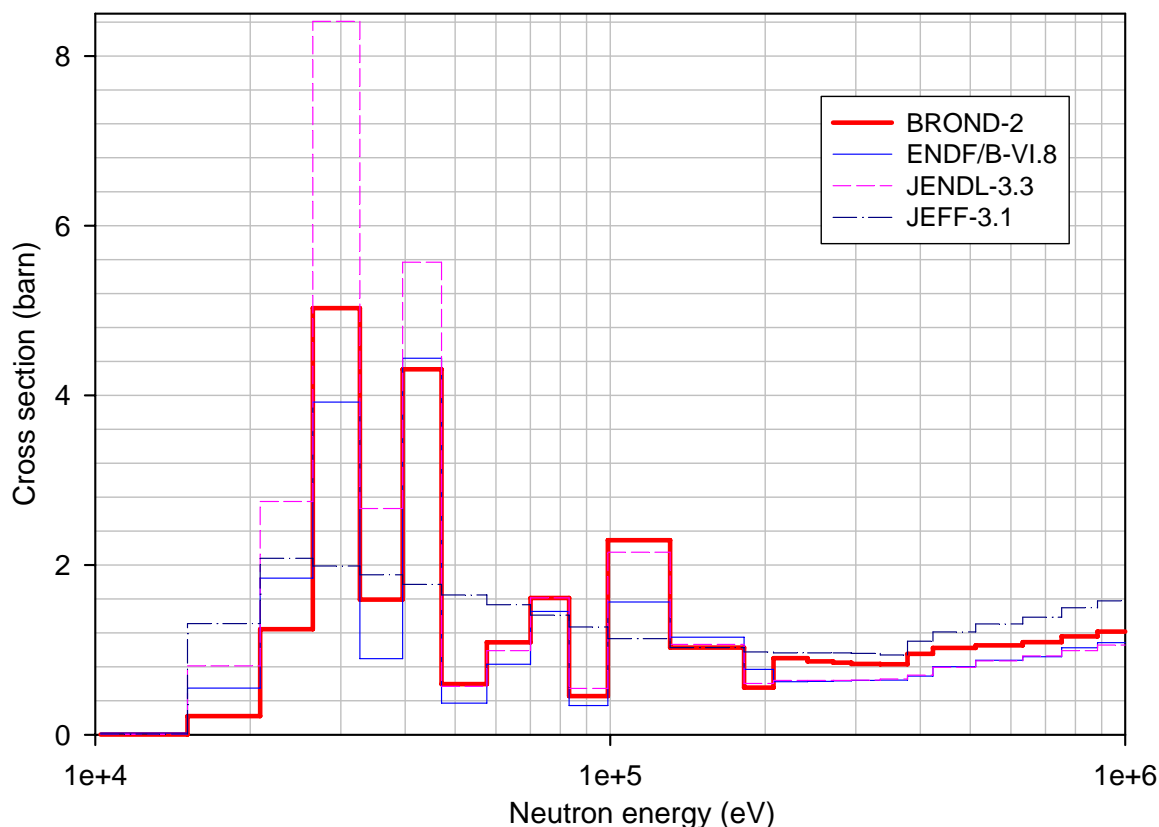


Рис. 7. Сравнение сечения неупругого рассеяния в групповом представлении из разных библиотек.

3. Область энергий выше 200 кэВ

Библиотека ENDF/B-VI.8 содержит в качестве оценки полного сечения, - сечение на естественном железе измеренное с высоким разрешением, в то время как другие библиотеки – результаты расчётов по оптической модели. В BROND-2 для энергии от 200 до 500 кэВ введена область неразрешённых резонансов. Как видно из рисунков 8 и 9 различие в оценках для энергии менее 2 МэВ большое и экспериментальные данные полученные с высоким разрешением Харвеем[2] и Пандеем[3] и усреднённые в таком же групповом разбиении как и оценённые данные отличаются на 10 – 20%. Такие же различия между оценками наблюдаются и для сечения упругого рассеяния (рисунок 10), где экспериментальные данные отсутствуют. Сечение в BROND-2 рассчитанное из средних резонансных параметров полученных в области разрешённых резонансов является, по-видимому, наиболее достоверным. Рассчитанные для JENDL-3.3 в оптико-статистическом подходе сечения близки к оценке БРОНД-2. В целом, оценка JENDL-3.3 является вероятно наилучшей для сечений в высокой области энергий, включая и сечения неупругого рассеяния и захвата показанные на рисунках 11 и 12. Экспериментальные данные для всех сечений, кроме полного сечения, отсутствуют.

Сравнение сечений для других реакций, экспериментальные данные для которых отсутствуют или они малы, показаны на рисунках с 13 по 17. Оценка JENDL-3.3 может быть рекомендована, так как она не противоречит имеющимся экспериментальным данным и согласуется с результатами большинства других оценок, полученных независимо в модельных расчётах.

Вывод: Оценка JENDL-3.3 может быть рекомендована для файла MF=3 (сечения) библиотеки РОСФОНД.

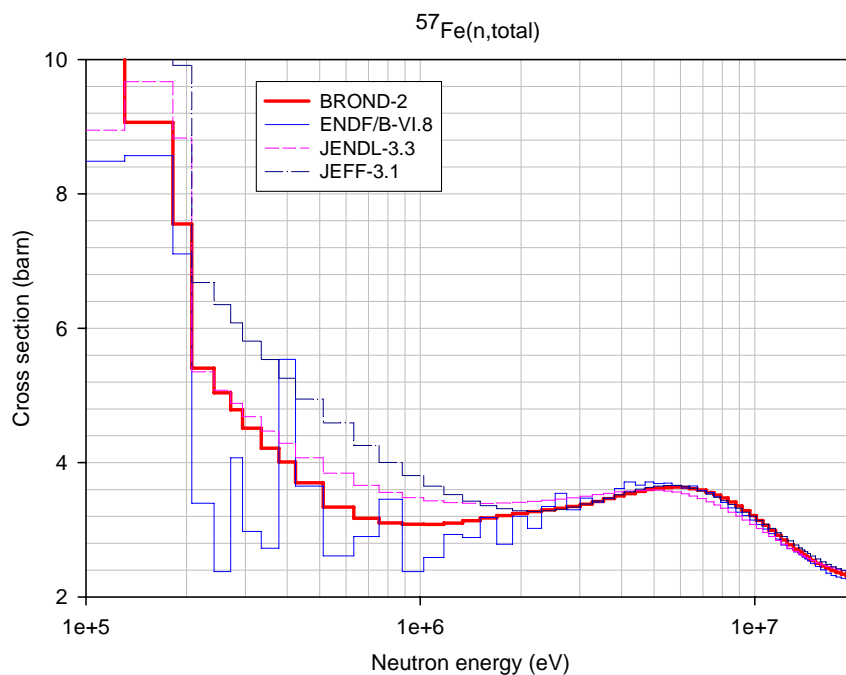


Рис. 8. Сравнение полного сечения в групповом представлении из разных библиотек.

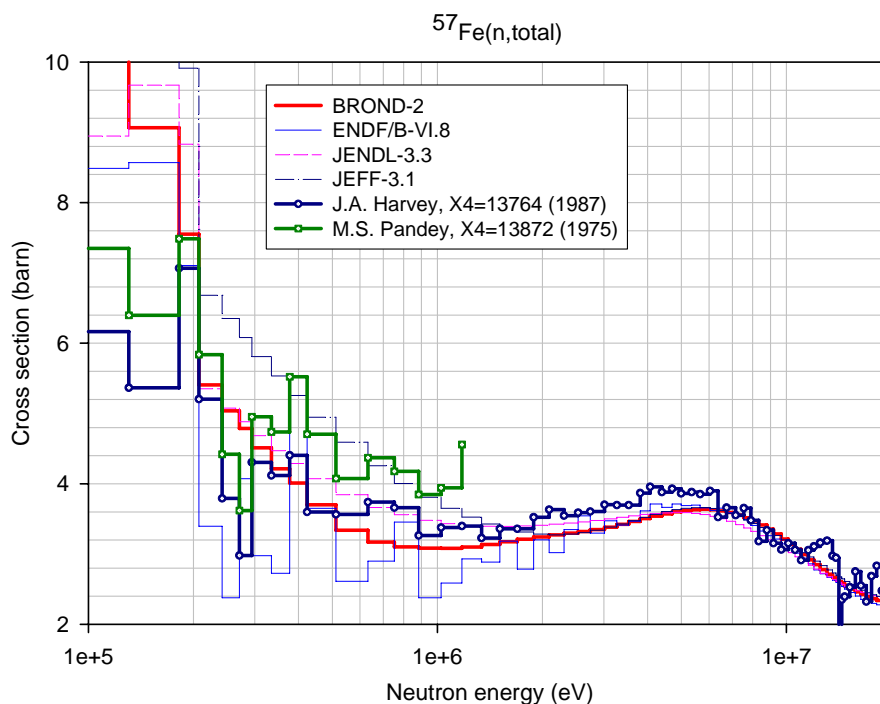


Рис. 9. Сравнение полного сечения в групповом представлении из разных библиотек с экспериментальными данными.

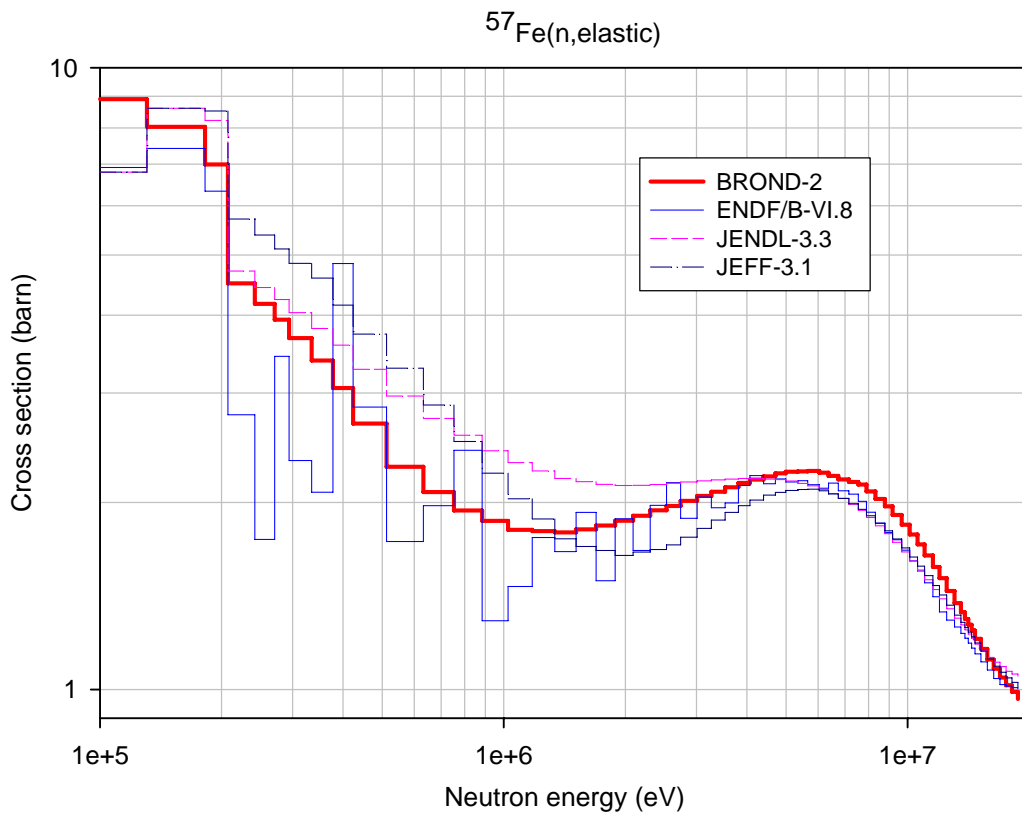


Рис. 10. Сравнение сечения упругого рассеяния в групповом представлении из разных библиотек.

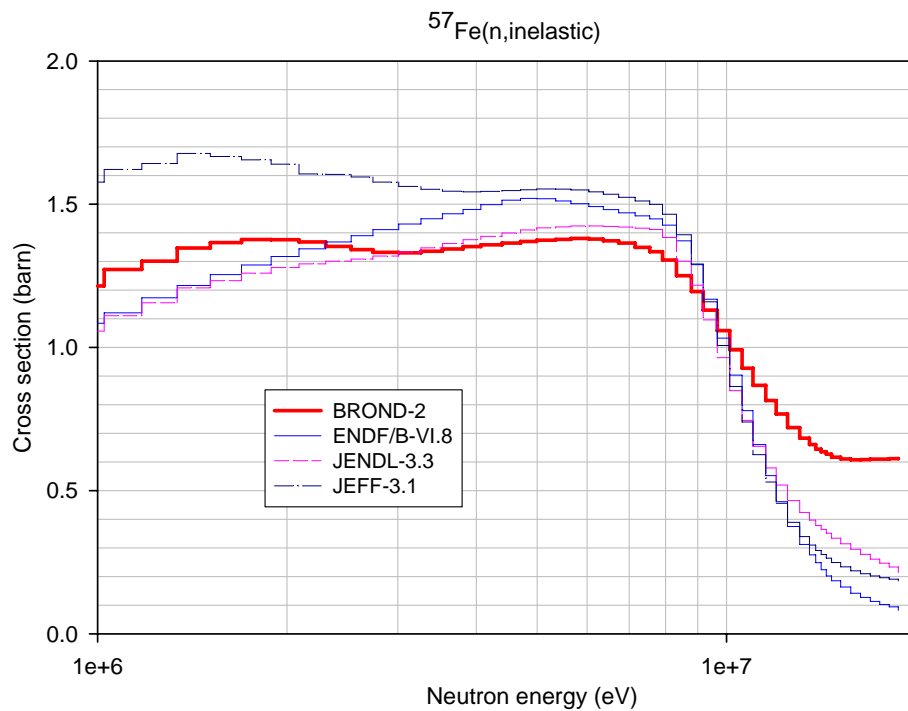


Рис. 11. Сравнение сечения неупругого рассеяния в групповом представлении из разных библиотек.

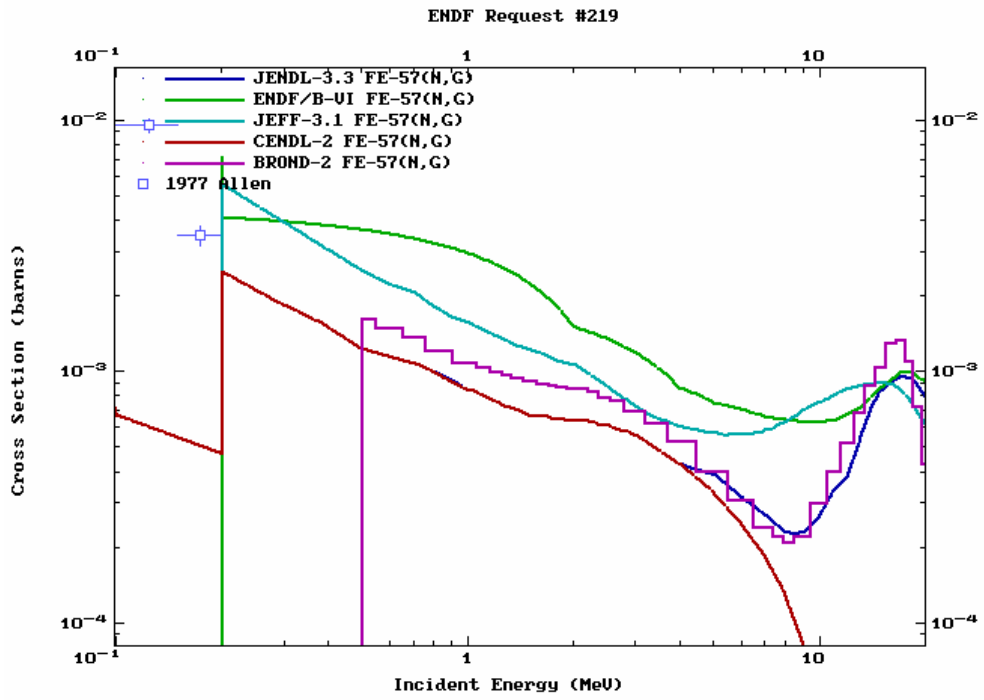


Рис. 12. Сравнение сечения захвата в групповом представлении из разных библиотек.

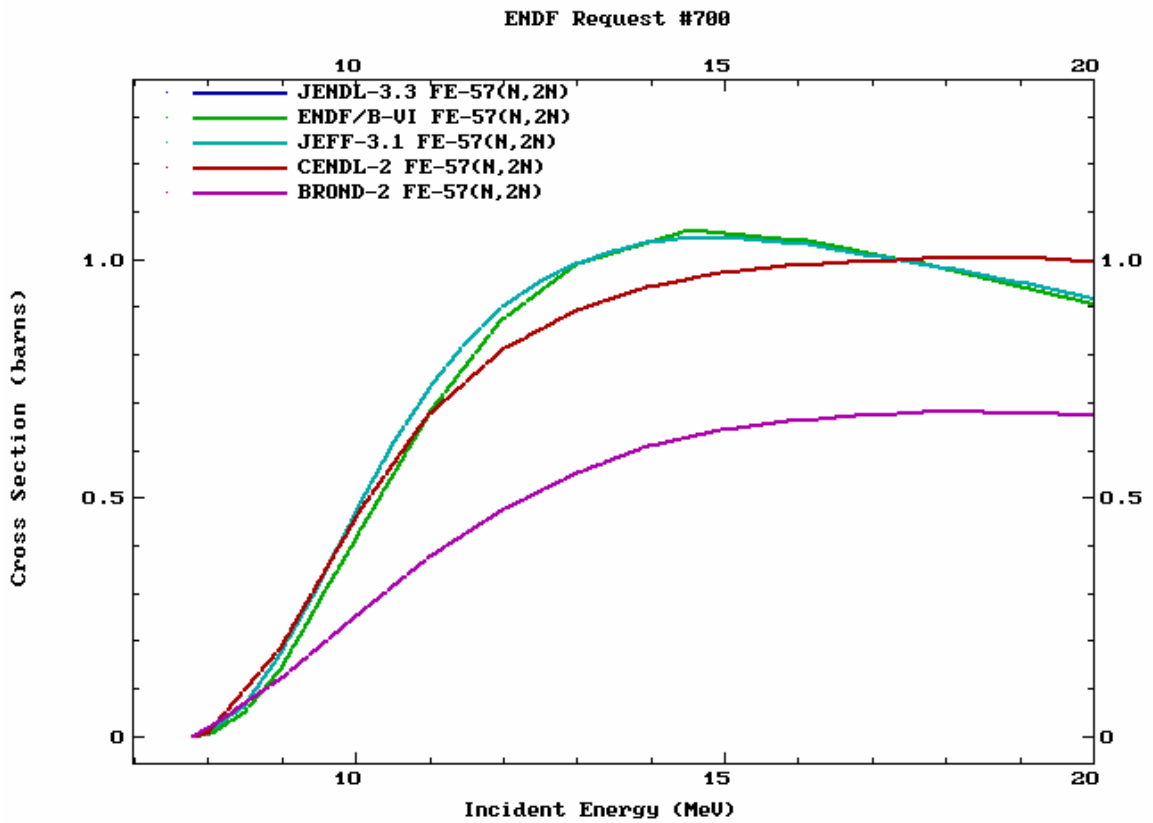


Рис. 13. Сравнение сечения (n,2n) из разных библиотек.

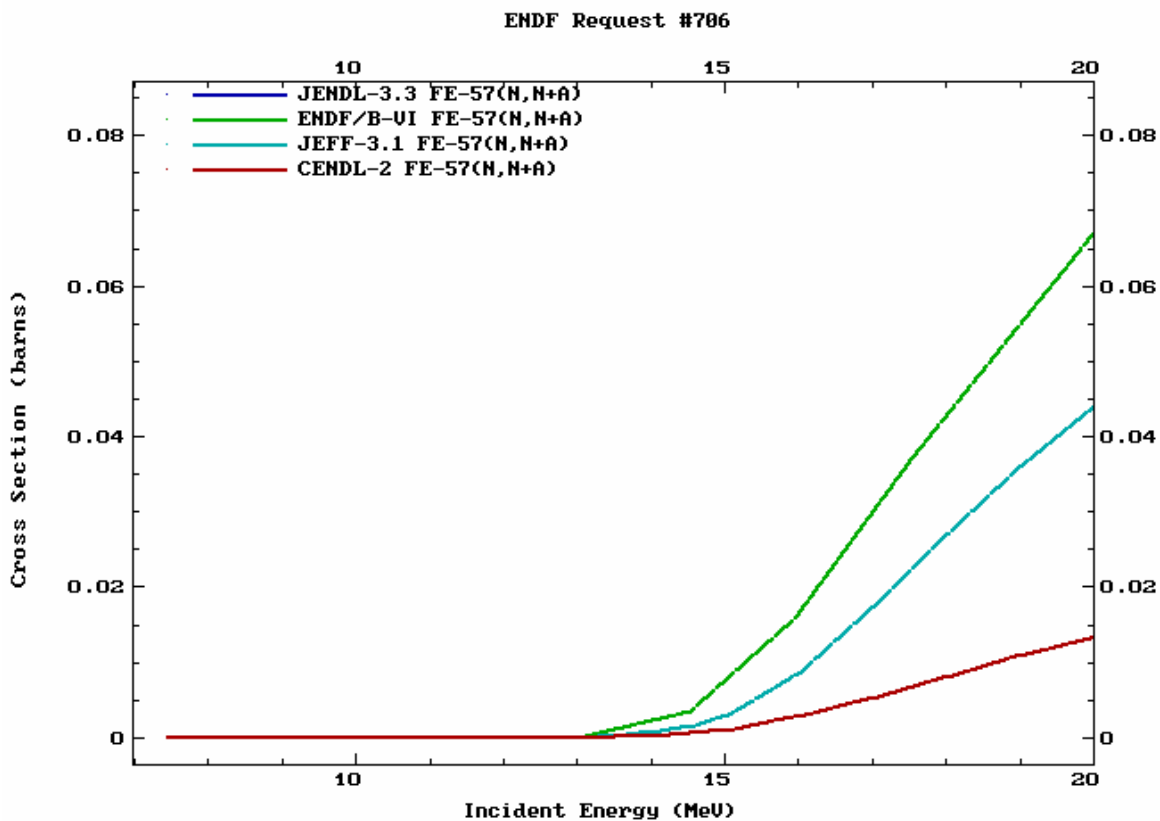


Рис. 14. Сравнение сечения (n,n α) из разных библиотек.

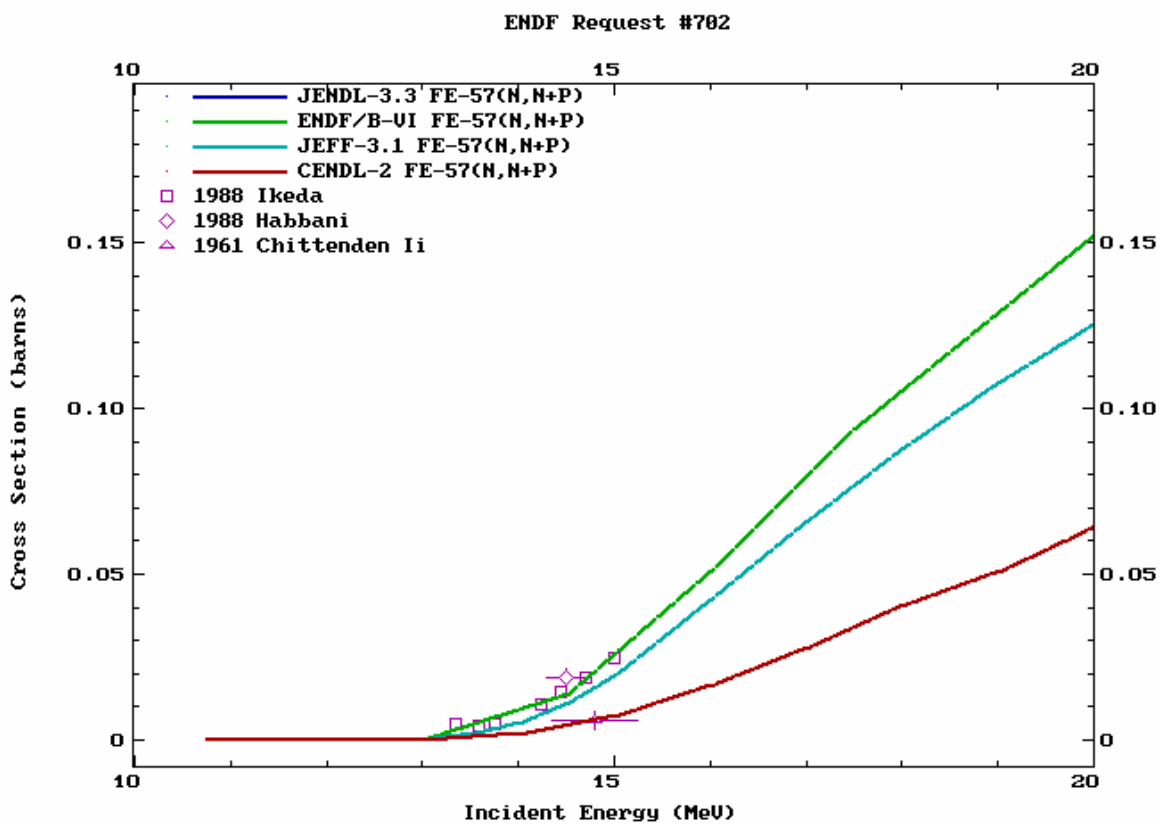


Рис. 15. Сравнение сечения (n,np) из разных библиотек.

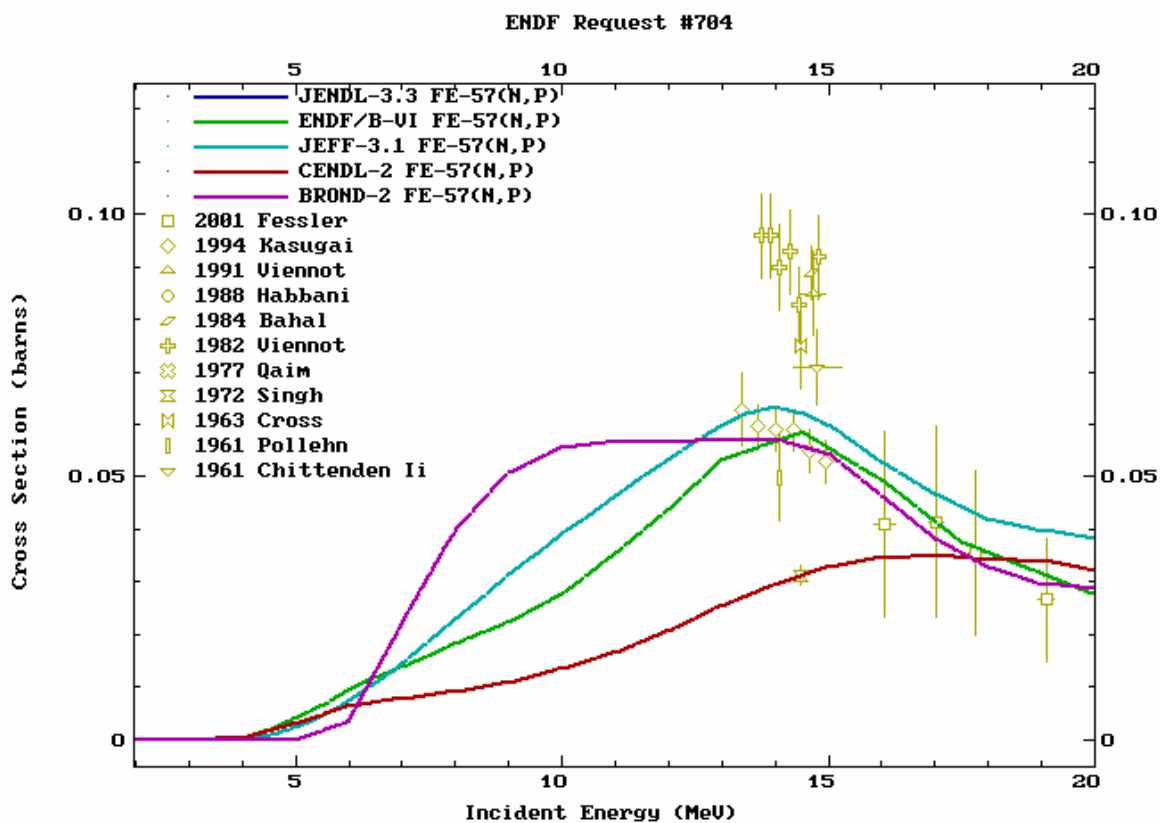


Рис. 16. Сравнение сечения (n,p) из разных библиотек.

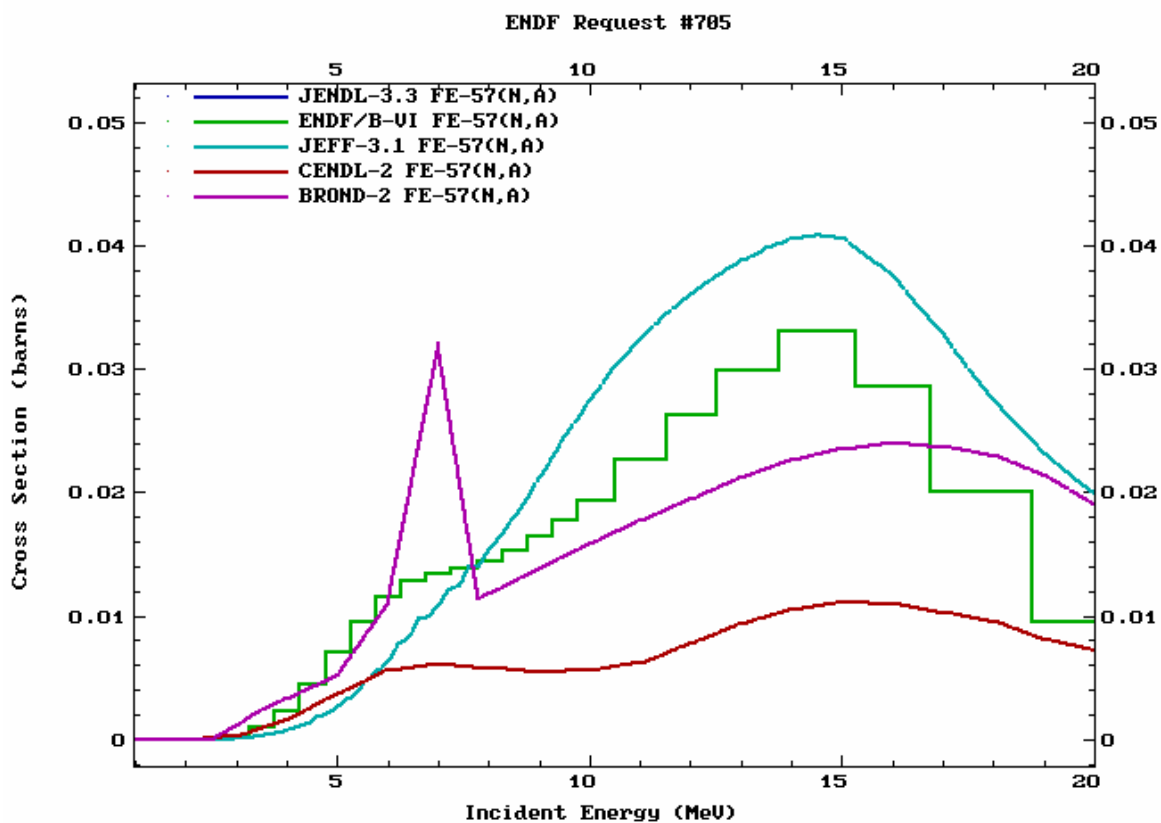


Рис. 17. Сравнение сечения (n,α) из разных библиотек.

4. Энергоугловые распределения вторичных частиц

Оценка энергоугловых распределений вторичных частиц получена во всех библиотеках в рамках модельных расчётах (программы GNASH, TNG, TALLYS). Средние энергосредних вторичных частиц для каналов реакции (n,2n) и неупругого рассеяния близки в библиотеках ENDF/B-6.8, JENDL-3.3 и JEFF-3.1.

Вывод: Любая из оценок (ENDF/B-VI.8, JENDL-3.3 или JEFF-3.1) может быть рекомендована для файлов MF=4 и MF=6 библиотеки РОСФОНД.

5. Перечень цитированных работ

1. G. Rohr et al., Conf. on Nucl. Data for Sci. and Technol., Antwerp (1982) p.139, EXFOR 20159.
2. J.A.Harvey, Private communication (1987), EXFOR 13764.
3. M.S.Pandey, Report ORNL-5025, p.125 (1975), EXFOR 13872.

6. Ковариационные матрицы погрешностей

Ковариационные матрицы погрешностей сечений оценены для ENDF/B-6.8 с использованием программы TNG и взяты такими же в JEFF-3.1.

7. Заключение

7.1 Вывод. Несмотря на отмеченные недостатки, учитывая важность области разрешённых резонансов, полноту представления данных и их непротиворечивость имеющимся экспериментальным данным, файл библиотеки ENDF/B-6.8 может быть рекомендован для библиотеки РОСФОНД.

7.2. Автор отбора файла оцененных данных

В.Г.Проняев

26.5. Железо-58

Содержание в естественной смеси 0.28%.

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 26$ (заряд)
- 1.2. $A = 58$ (атомный номер)
- 1.3. $A_w = 57.436$ (отношение массы ядра к массе нейтрона)
- 1.4. Содержание в естественной смеси 0.282 ± 0.004 (атомарные проценты)
- 1.5. Спин основного состояния 0^+

Оценка ENDF/B-VI.8 (ENDF/B-VII.b1) была выполнена в 1989 году и не подвергалась существенной ревизии за исключением гамма-спектров сечения захвата (2000 год). Оценка JENDL-3.3 представляет собой выполненную в 2000 году существенную ревизию оценки JENDL-3.2 (1987 - 1993 годы). Оценка JEFF-3.1 выполнена в 2004 году и основывается (кроме области разрешённых резонансов) на модельных расчётах (программа TALYS). Максимальная энергия нейтронов в файле – 200 МэВ. Оценка для библиотеки BROND-2 была выполнена в 1985 году и оценка CENDL-2 – ревизию 1991 года оценки JENDL-3.1 для библиотеки термоядерных данных.

2. Область разрешённых резонансов и тепловые сечения

Значения сечений в тепловой точке, резонансных интегралов захвата, радиуса потенциального рассеяния, а также области неразрешённых резонансов приведены в таблице 1. Необходимо отметить существенные различия в упругом (и полном) сечениях при малой энергии нейтронов данные в разных оценках (рисунки 1 и 2). Это объясняется отсутствием и ненадёжностью экспериментальных данных при тепловой и малой энергии нейтронов. Так данные Гарга по полым сечения приведённые на рисунках 1 и 2 являются необработанными результатами измерений на образце содержащем другие изотопы железа. Как видно из рисунка 2, несмотря на высокое разрешение экспериментальные данные не воспроизводят минимумы в сечении обусловленные интерференцией резонансного и потенциального рассеяния для широких s- резонансов. Возникает ощущение, что представленные данные не поправлены даже на фон, потому что примесь в образце других изотопов не может заполнить минимумы в сечении до такой величины.

Таблица 1. Характеристики оценок в тепловой точке и резонансной области.

| Библиотека | σ_{el}^{therm} барн | $\sigma_{n,\gamma}^{therm}$ барн | RI барн | RRR формализм | R_0 фм | Подложка в захвате в RRR | Область неразреш. резонансов |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------|------------------|-------------|--------------------------------|------------------------------------|
| ENDF/B-VI.8 | 3.0989 | 1.1491 | 1.4923 | R-M | 7.2 | 0 – 1 мб | - |
| BROND-2 | 3.191 | 1.270 | 1.553 | MLBW | 5.0 | - | 200-500 кэВ |
| JEFF-3.1 | 7.4763 | 1.3143 | 1.2715 | R-M | 5.226 | - | - |
| JENDL-3.3 | 6.470 | 1.300 | 1.355 | R-M | 5.9 | - | - |
| CENDL-2 | 4.4327 | 1.2718 | 1.5600 | MLBW | 5.9 | - | - |
| Mughabghab03 | | 1.3±0.3 | 1.7±0.1 | | | | |

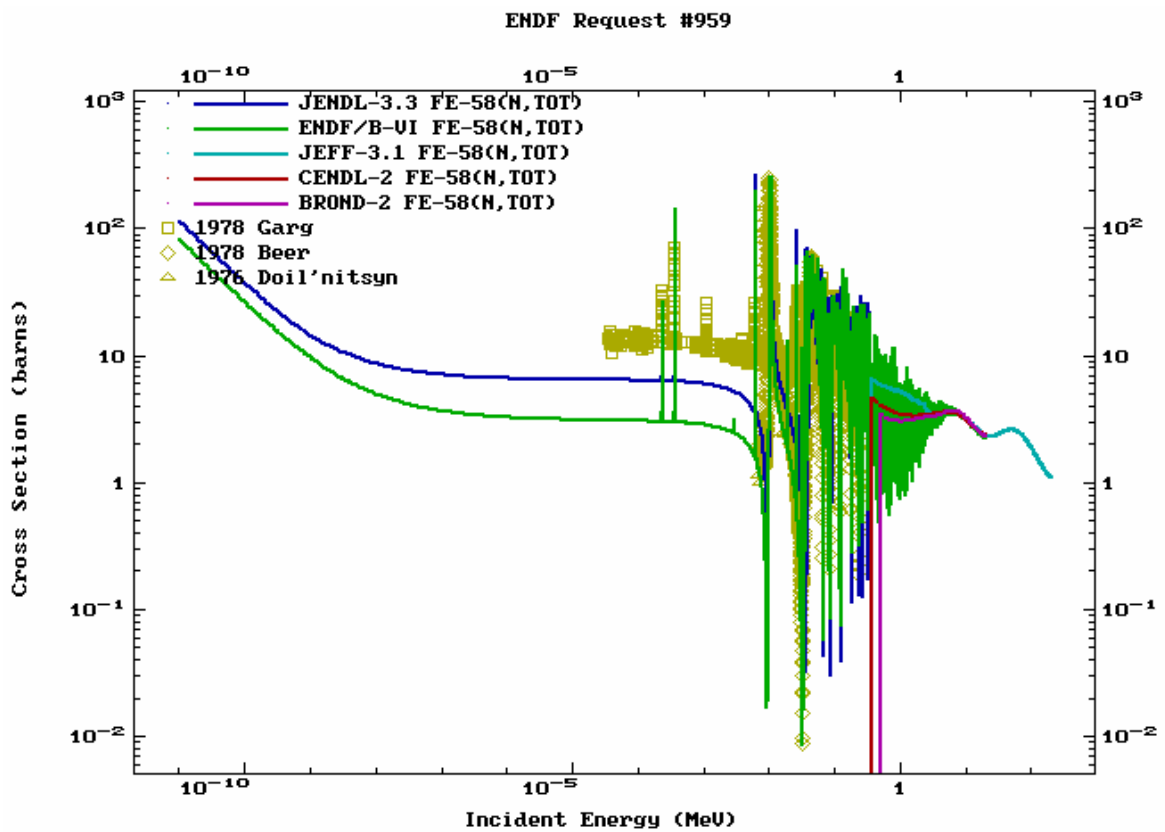


Рис. 1. Сравнение полных сечений из разных библиотек. Сечения для JENDL-3.3 и ENDF/B-VI.8 восстановлены из резонансных параметров в области разрешённых резонансов.

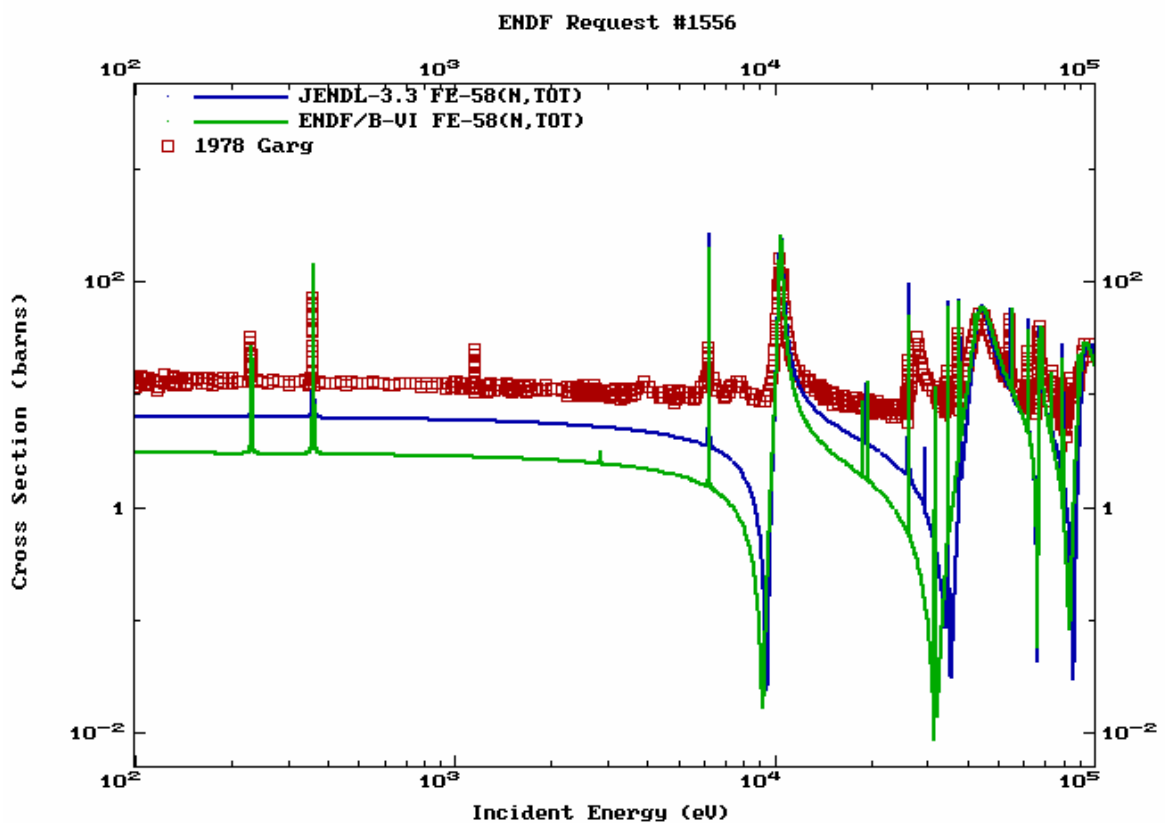


Рис. 2. Сравнение полных сечений из разных библиотек с экспериментальными данными.

3. Сечения вне резонансной области

Наиболее важные сечения в быстрой области энергии нейтронов показаны на рисунках 3-8. Экспериментальные данные малочисленны и результаты расчётов, взятые в качестве оценок в значительной степени зависят от выбранных параметров. В этой ситуации прагматичный подход использованный в ENDF/B-VI.8, при котором как малочисленные экспериментальные данные для ^{58}Fe , так и использование хорошо известных сечений на естественном железе влияли на оценку сечения ^{58}Fe , является предпочтительным.

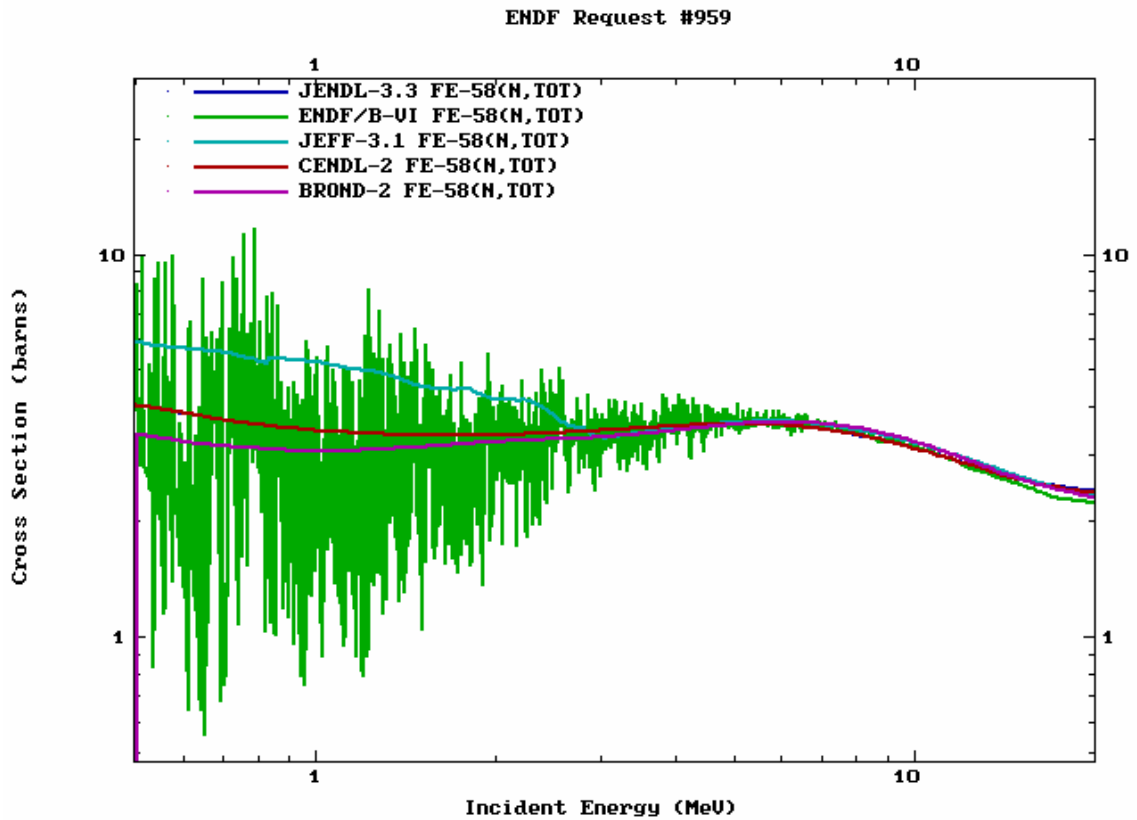


Рис. 3. Сравнение полных сечений из разных библиотек в быстрой области энергии нейтронов.

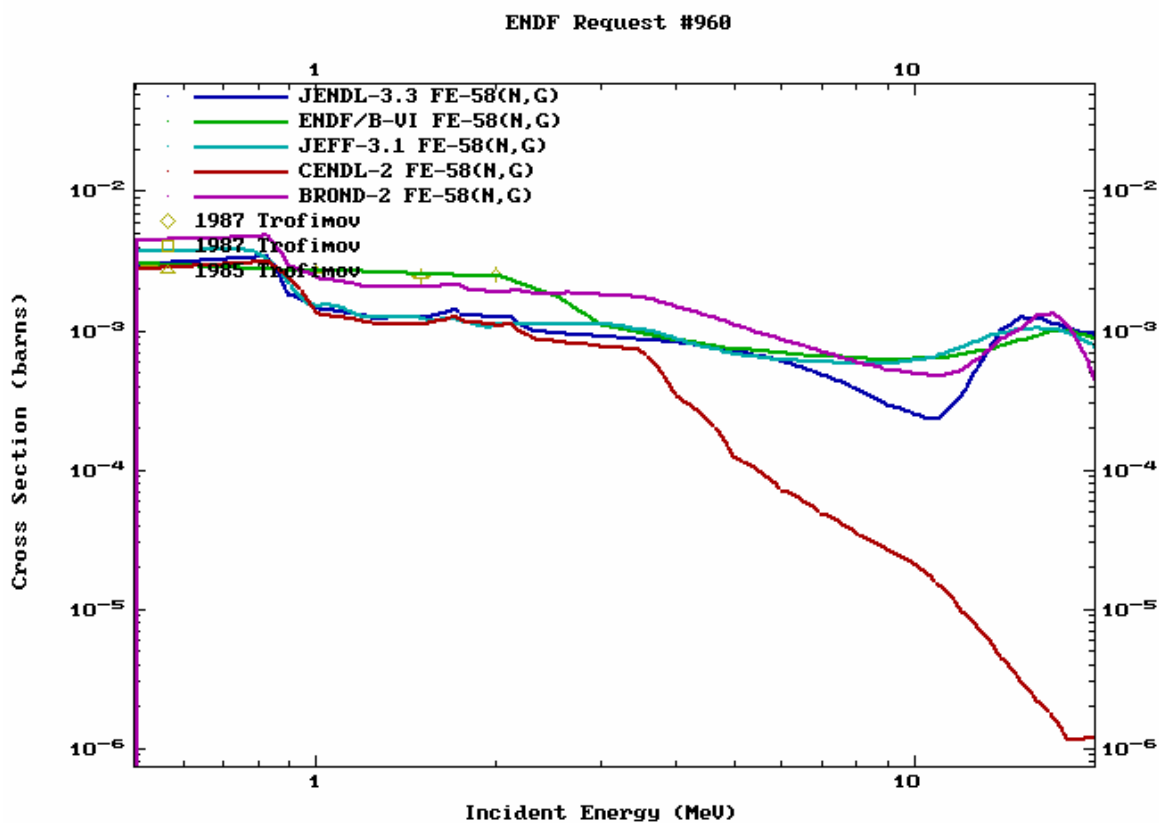


Рис. 4. Сравнение сечения захвата из разных библиотек в быстрой области энергии нейтронов.

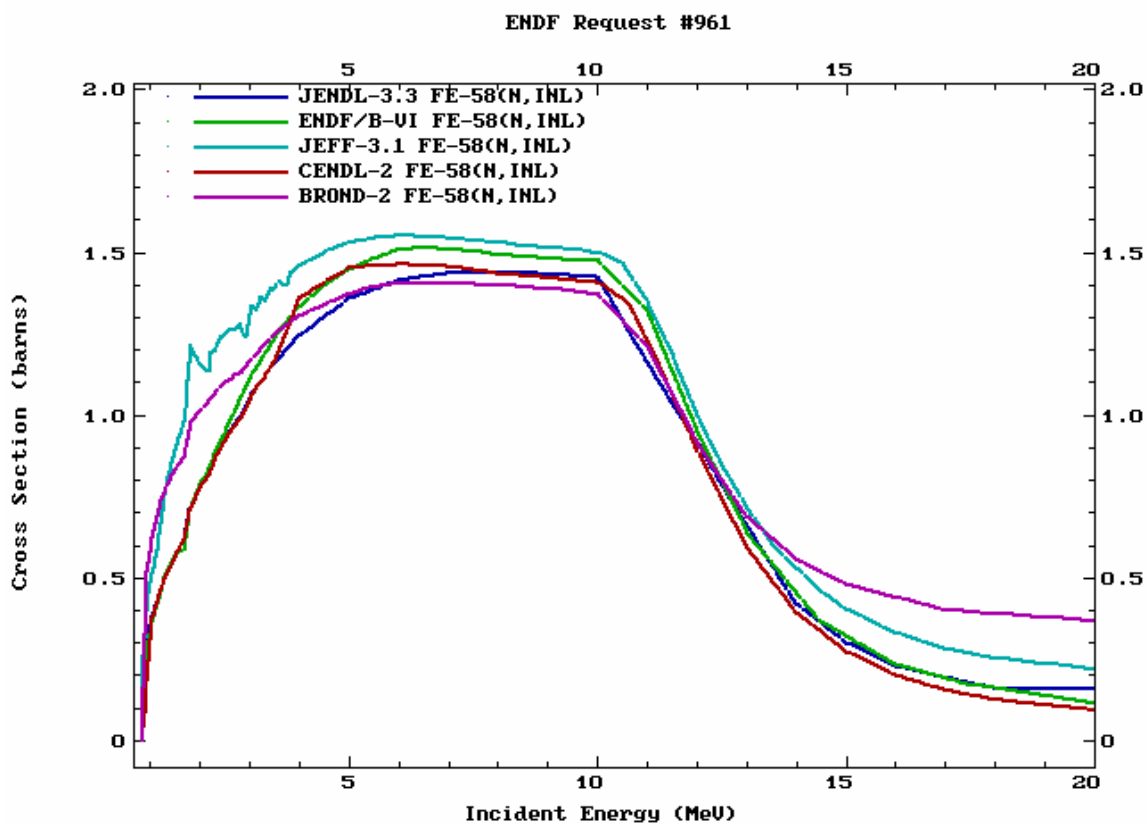


Рис. 5. Сравнение интегрального сечения неупругого рассеяния из разных библиотек.

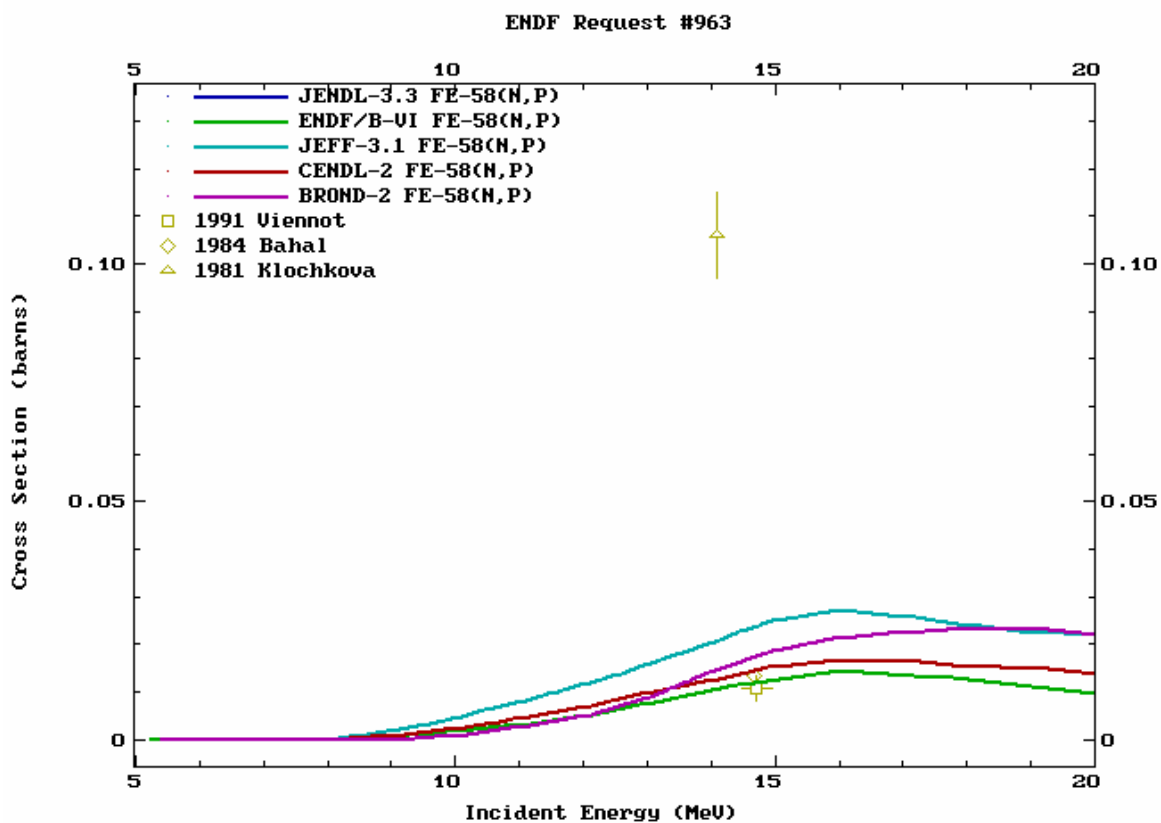


Рис. 6. Сравнение сечения (n,p) из разных библиотек с экспериментальными данными.

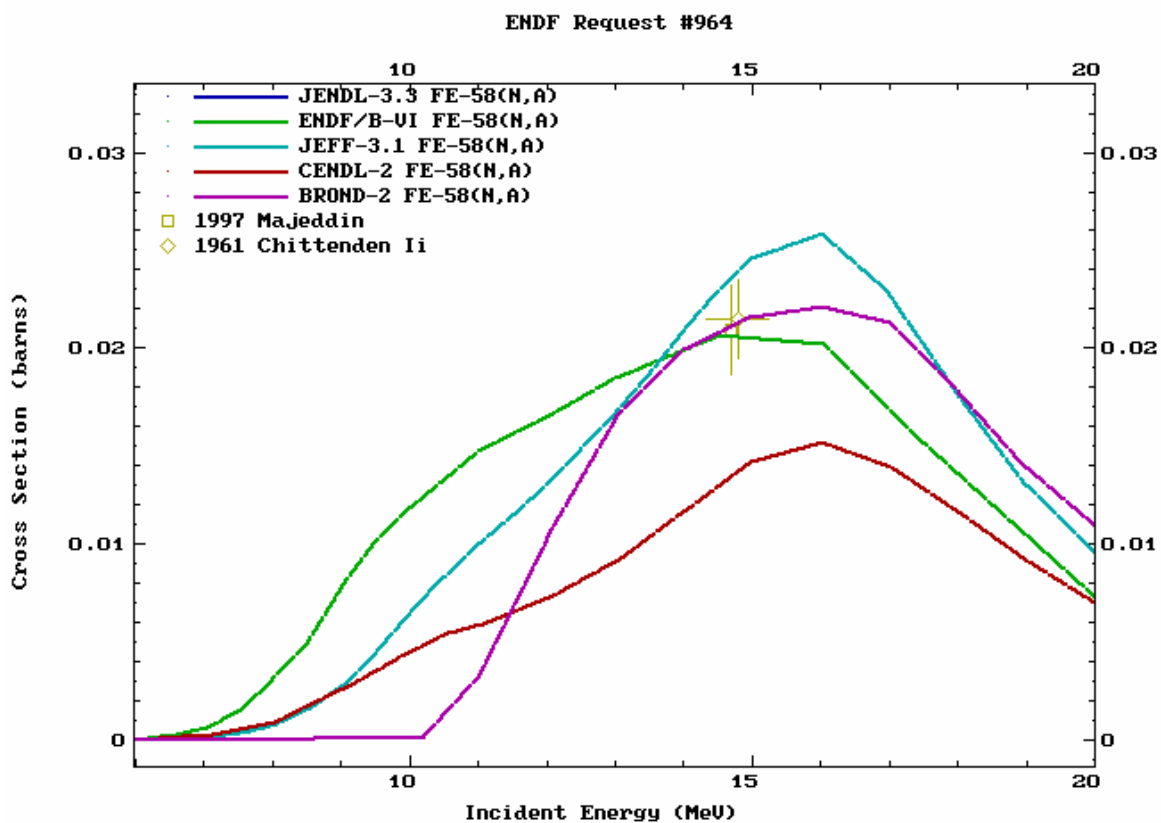


Рис. 7. Сравнение сечения (n,α) из разных библиотек с экспериментальными данными.

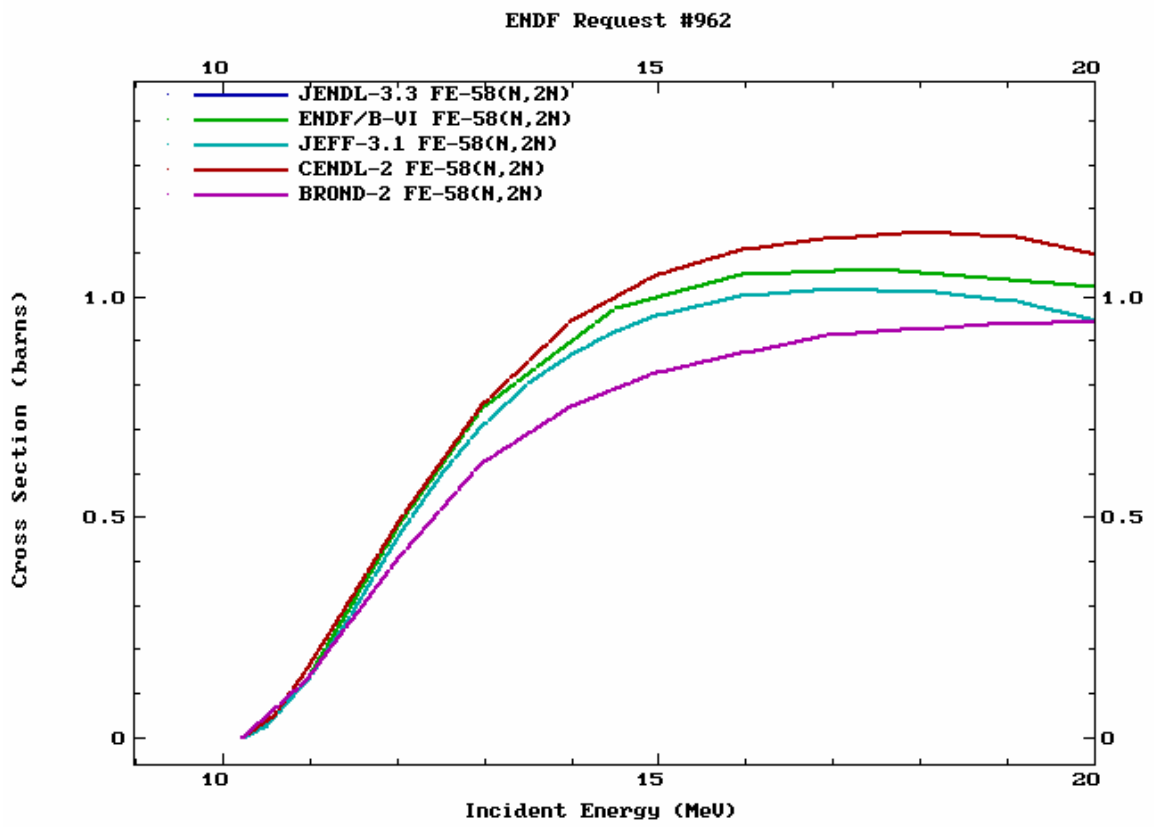


Рис. 8. Сравнение сечения $(n,2n)$ из разных библиотек.

4. Заключение

4.1 Вывод: Файл железа из библиотеки ENDF/B-7.b1 может быть рекомендован для библиотеки РОСФОНД.

4.2. Автор отбора оцененных данных

Проняев В.Г.

26.6. Железо-59

Радиоактивно. ($T_{1/2}=44.53$ дня) распадается β^- распад в кобальт-59.

Заключение

В РОСФОНД принята оценка из EAF-2003. Поскольку долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на железе-59 не образуется, подсекции файла MF=10 просуммировать, суммы записать в соответствующие секции файла MF=3, а файлы MF=8 и MF=10 опустить.

26.7. Железо-60

Радиоактивно. ($T_{1/2}=1.E5$ лет) распадается β^- распад в кобальт-60.

Заключение

В РОСФОНД принята оценка из EAF-2003. Поскольку долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на железе-60 не образуется, подсекции файла MF=10 просуммировать, суммы записать в соответствующие секции файла MF=3, а файлы MF=8 и MF=10 опустить

27. КОБАЛЬТ

В ФОНД-2.2 помещена оценка Т.Аоки, Т.Асами,1982. Для радионуклидов принята оценка EAF-3.

В ENDF/B-VII принята оценка A.Smith, G. DeSaussure, 1989.

В JENDL-3.3 содержится оценка Т.Watanabe, 1994 г.

В JEFF-3.1 для стабильного кобальта принята оценка из ENDF/B-VII. Кроме этой оценки, в JEFF содержится, также, полная оценка данных для радиоактивных ^{58}Co и $^{58}\text{Co}^m$. Она основана на данных Копецкого и Ниропа, дополненных Группелааром. Данных для других радиоизотопов кобальта нет

27.1. Кобальт-56

Радиоактивен. ($T_{1/2}=77.25$ д). Испытывает позитронный распад или захват орбитального электрона с переходом в железо-56

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка EAF-2003.

27.2. Кобальт-57

Радиоактивен. ($T_{1/2}=271.8$ д) Испытывает захват орбитального электрона с переходом в железо-57

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка EAF-2003.

27.3. Кобальт-58

Радиоактивен. ($T_{1/2}=70.82$ д). Испытывает позитронный распад или захват орбитального электрона с переходом в железо-58. Целесообразность замены данными из JEFF-3.1 не очевидна. Например, сравнение оцененных значений сечения захвата, представленных на рисунке 1, указывает на присутствие ошибки в оценке JEFF при наведении баланса сечений в области 10 эВ-ного резонанса.

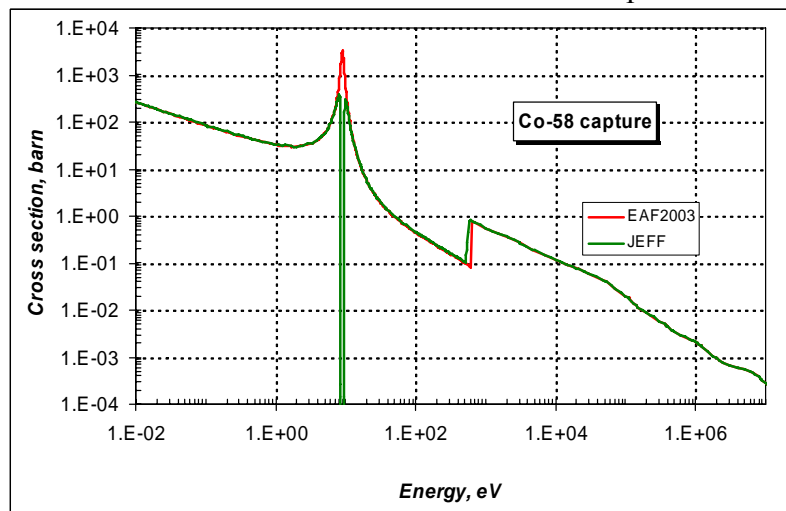


Рисунок 1 – Сравнение оцененных сечений захвата на Co-58.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка EAF-2003.

27.4. Кобальт-59

Содержание в естественной смеси -100%.

Фактически на сегодняшний день имеется две независимые оценки для Co-59: оценка группы Смита и Десасюра (ENDF/B-VII) и оценка Ватанабе (JENDL-3.3).

27.4.1. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 7/2^-$;

2.2. Радиус рассеяния: $R = 0.667 * 10^{-12}$ см.

2.3. Область разрешенных резонансов.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 1. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 1. Резонансные свойства Co-59.

| Табл ица 1. Резонансны | Граница области RRR, keV | σ_γ (2200), барн | G-factor | I_γ , барн |
|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------|-------------------|
| ENDF/B | 100 | 37.17 | 1.00024 | 75.76 |
| JENDL | 100 | 37.20 | 1.00024 | 75.81 |
| Mughabghab | | 37.18 ± 0.06 | 1.0004 | 75.9 ± 2.0 |

Из приведенной в таблице 1 информации видно, что обе оценки согласуются с рекомендациями Мухабхаба. На рисунке 2 приводится сравнение нарастающих сумм S- и P-резонансов для области разрешенных резонансов.

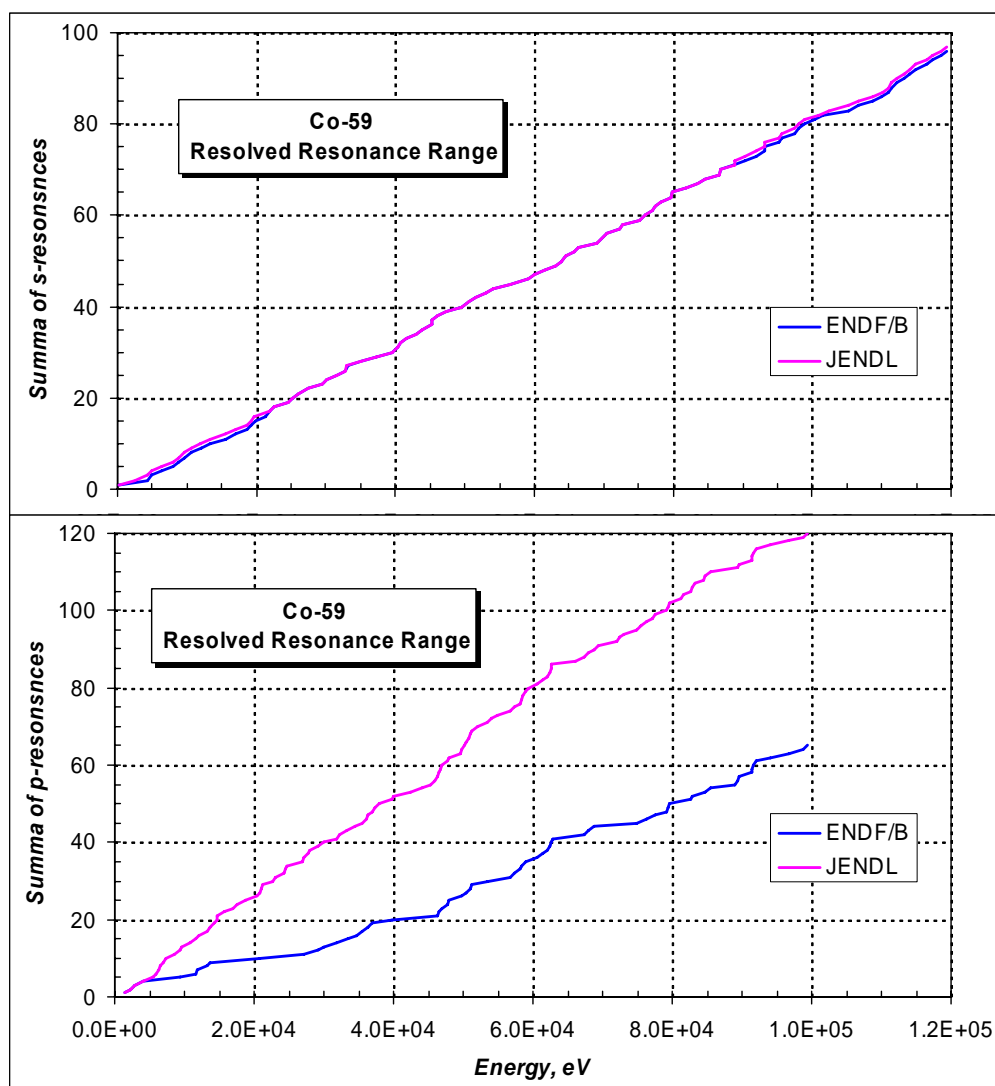


Рисунок 2 – Сравнение числа резонансов.

Из приведенного на рисунке 2 сравнения следует, что число S-резонансов в обеих оценках практически одинаково, в то время, как число P-резонансов в оценке ENDF/B в два раза меньше чем в JENDL. Из описаний выполненных оценок следует, что для получения резонансных параметров в обеих оценках были использованы одни и те же источники данных. Отсутствие недостающих P-резонансов в ENDF/B было скомпенсировано введением подложки в файле гладких сечений.

ВЫВОДЫ:

Из проведенного сравнения следует, что для РОСФОНДА предпочтительнее использовать оценку параметров разрешенных резонансов из JENDL.

27.4.2. Сечения нейтронных реакций

Полное сечение.

Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия на основе 28-групповых сечений, полученных с помощью программы NJOY, приведено на рисунке 1.

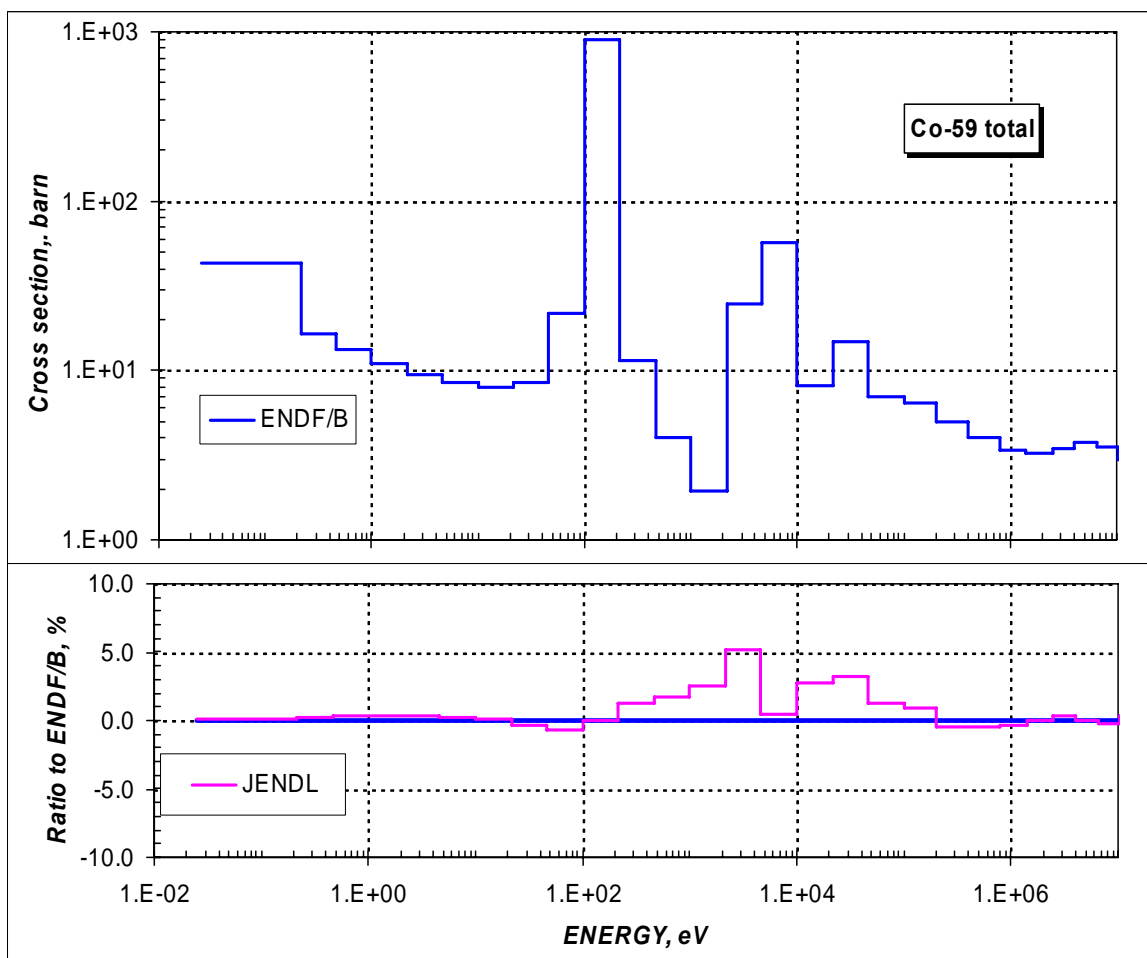


Рисунок 3 – Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия для Co-59.

Из приведенного на рисунке 1 сравнения видно, что отличия оценки JENDL от оценки ENDF/B достигает максимума в области энергий 1 кэВ и составляет ~ 5%, что является очень хорошим согласием.

В этой области энергий имеется несколько наборов экспериментальных данных. Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия с наиболее свежими экспериментальными данными в области энергий выше 100 кэВ показано на рисунке 4.

Из приведенного на рисунках 3 и 4 сравнения видно, что оценки ENDF/B являются практически равнозначными и согласуются с последними экспериментальными данными.

Выводы:

Оценка сечения полного взаимодействия из JENDL выглядит предпочтительнее с учетом того факта, что набор резонансных параметров в ней сделан более качественным.

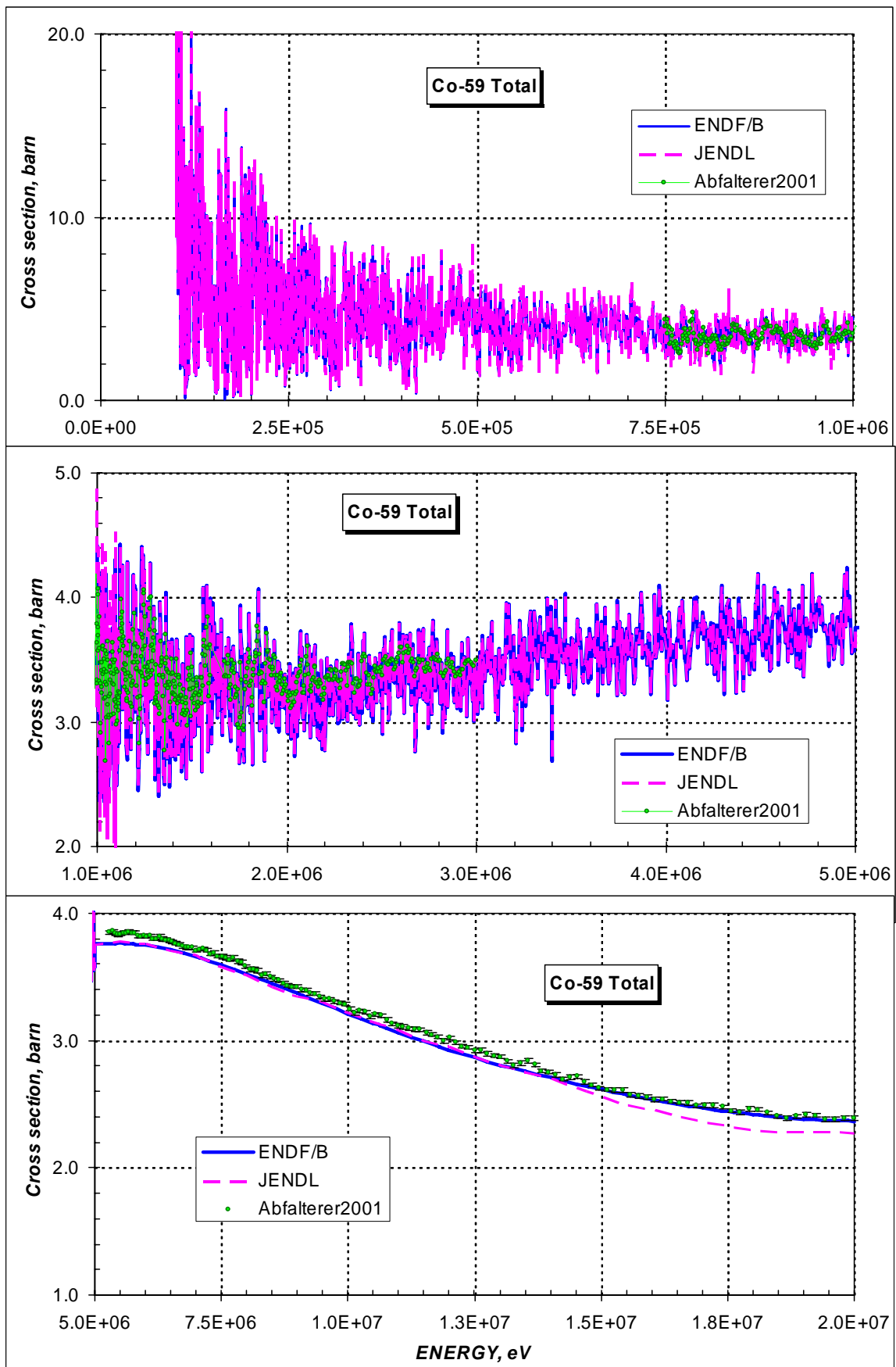


Рисунок 4 – Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия для Co-59 с экспериментальными данными в области энергий выше 100 кэВ.

Сечение захвата нейтронов

Сравнение оцененных сечений захвата нейтронов на основе 28-групповых сечений, полученных с помощью программы NJOY, приведено на рисунке 5.

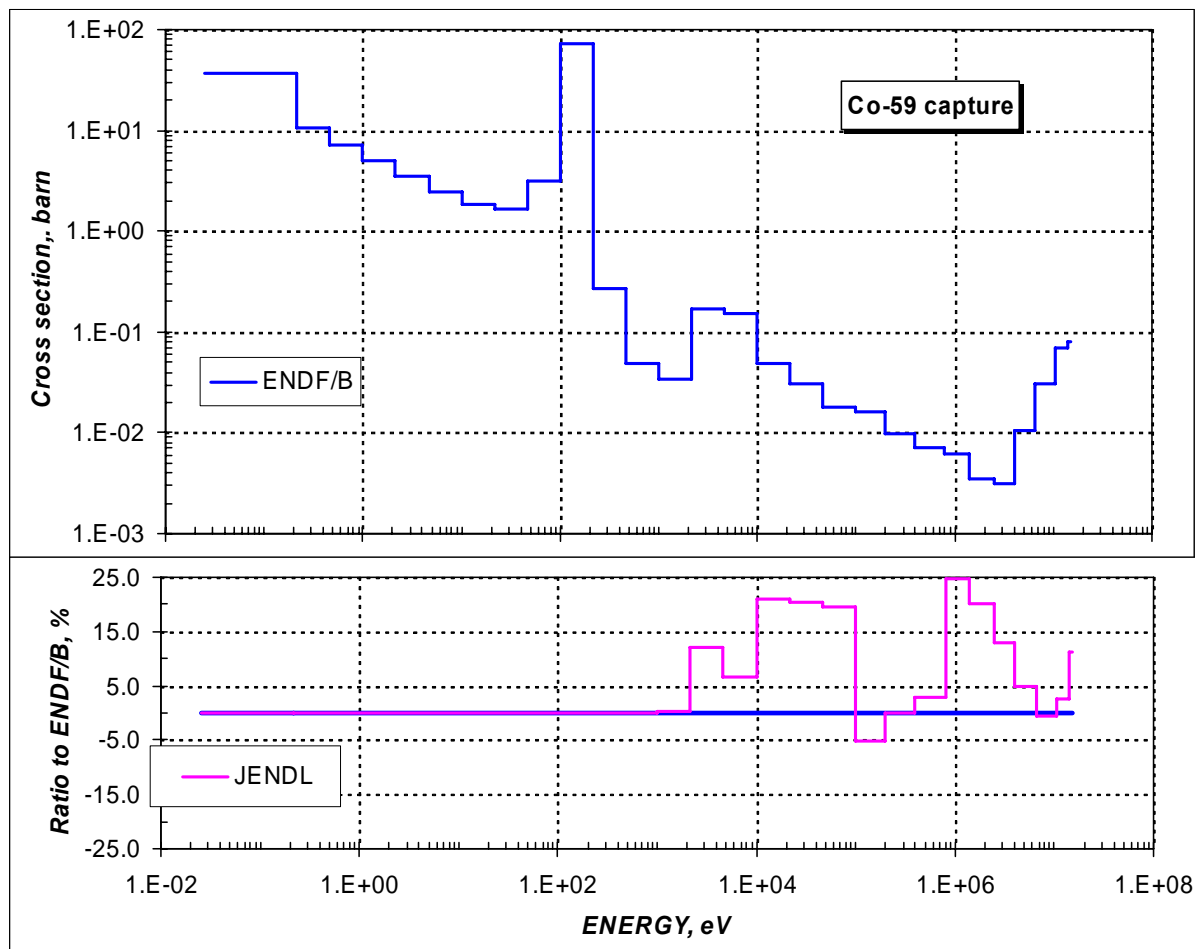


Рисунок 5 – Сравнение оцененных сечений захвата нейтронов на Co-59 в области энергий 0.01 эВ – 20 МэВ.

Из приведенного на рисунке 5 сравнения видно, что до 1 кэВ оценки хорошо согласуются между собой. Выше 1 кэВ и до границы области разрешенных резонансов 100 кэВ оценка JENDL в среднем на 15% выше, чем оценка ENDF/B. Это различие может быть вызвано неполной компенсацией пропущенных Р-резонансов, которое наблюдается в оценке ENDF/B.

В области энергий выше 100 кэВ имеется несколько наборов экспериментальных данных. Сравнение оцененных сечений захвата с экспериментальными данными в области энергий выше 100 кэВ показано на рисунке 6.

Из приведенного на рисунке 6 сравнения оцененных сечений и экспериментальных данных видно, что

- имеющиеся экспериментальные данные вследствие их плохого разрешения не позволяют оценить надежность той или иной оценки;

- оценка ENDF/B по сравнению с оценкой JENDL имеет иной характер учета конкуренции процесса неупругого рассеяния нейтронов в области энергии ~ 1 МэВ. В целом, оценка JENDL более согласована с немногочисленными экспериментальными данными.

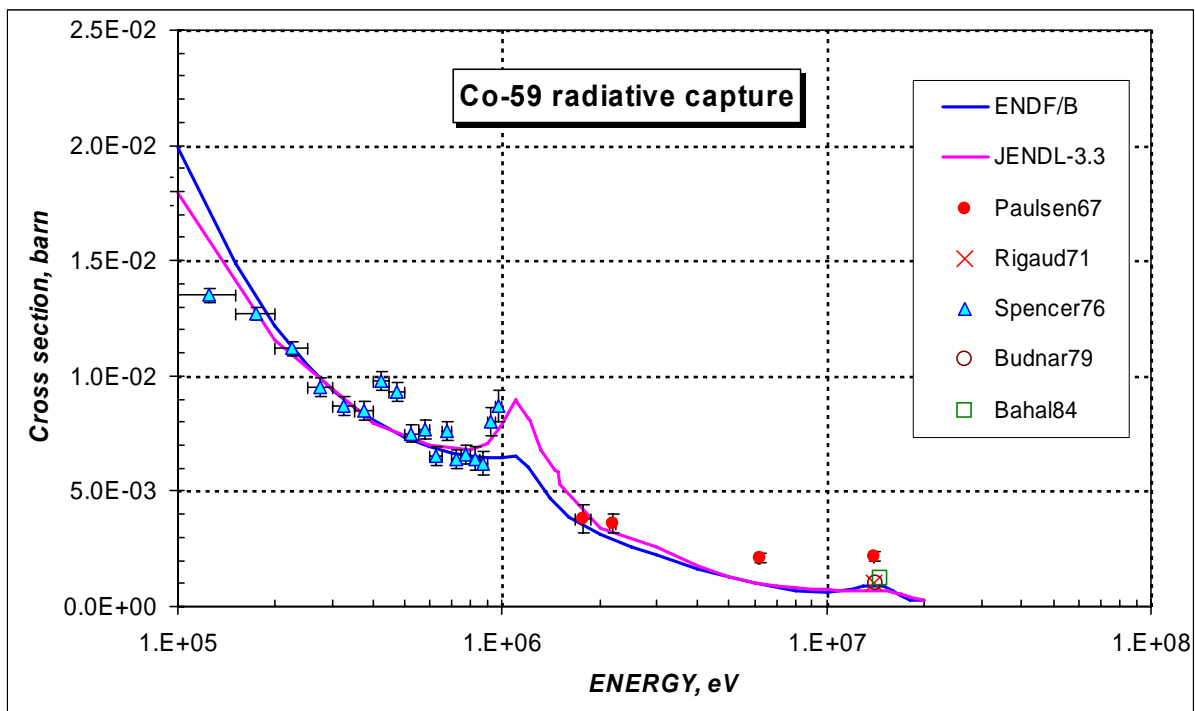


Рисунок 6 – Сравнение оцененных сечений захвата нейтронов на Co-59 в области энергий выше 100 кэВ.

Выводы:

Оценка сечения радиационного захвата нейтронов из JENDL выглядит предпочтительнее других.

Сечение неупругого рассеяния нейтронов

Сравнение оцененных сечений упругого рассеяния нейтронов с имеющимися экспериментальными данными приводится на рисунке 7.

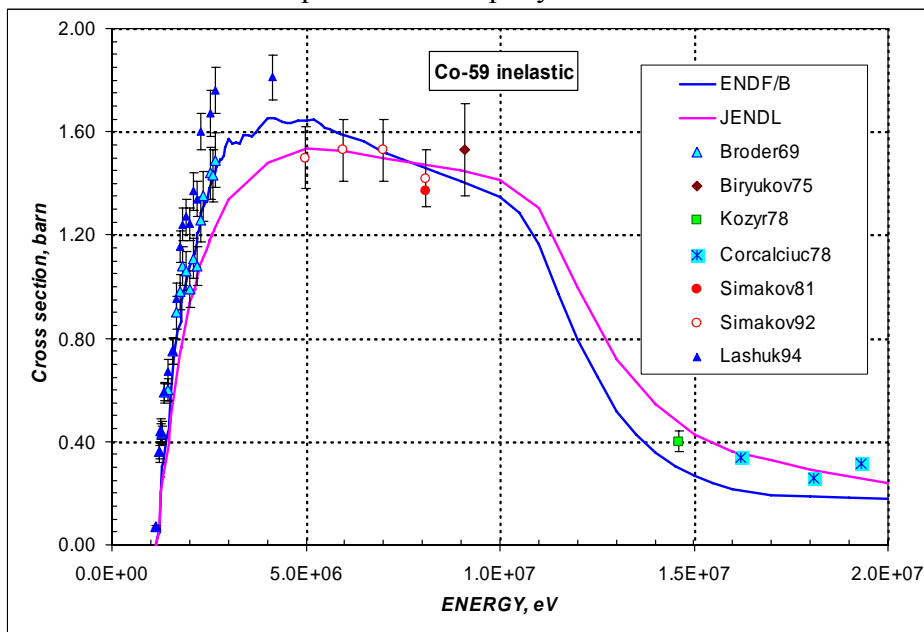


Рисунок 7 – Сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния нейтронов с экспериментальными данными на Co-59.

Из приведенного на рисунке 7 сравнения видно, что оценка ENDF/B лучше чем JENDL согласуется с экспериментальными данными, за исключением области энергий выше 15 МэВ.

Следует отметить здесь, что результаты Бродера (1970) практически совпадают с данными Лашука(1994) и потому они на рисунке не приводятся. Это значит, что все работы по измерению сечения неупругого рассеяния ниже 5 МэВ практически выполнены одной и той же группой в ФЭИ в конце 60-годов. Измерения Симакова, как ранние, так и поздние, выполненные так же в ФЭИ, не подтверждают высокие значения сечения в области энергий 5 МэВ. Эксперименты, выполненные в области энергий от 3 до 5 МэВ, могли бы разрешить возникшую ситуацию.

Выводы:

В целом, оценка ENDF/B лучшим образом согласуется с имеющимися экспериментальными данными.

Заключение

На основе проведенного сравнения основных нейтронных сечений для Co-59 в РОСФОНД рекомендуется взять оцененные нейтронные данные из JENDL-3.3 (T.Watanabe, 1988-1993). Ковариационные данные исключить. Их анализ следует выполнить на следующем этапе.

Автор отбора данных

Кощеев В.Н.

27.5. Кобальт-60

Радиоактивен ($T_{1/2}=5.271$ д), испытывает бета-распад в никель-60.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка EAF-2003.

28. НИКЕЛЬ

Природный никель содержит четыре стабильных изотопа:

^{58}Ni - 68.077 %,

^{60}Ni - 26.223 %,

^{61}Ni - 1.140 %,

^{62}Ni - 3.634 %

и ^{64}Ni - 0.926 %.

Существует также ряд долгоживущих изотопов ^{56}Ni ($T_{1/2}=6.075$ д), ^{57}Ni ($T_{1/2}=35.6$ ч), ^{59}Ni ($T_{1/2}=7.6 \cdot 10^4$ лет), ^{63}Ni ($T_{1/2}=100.1$ лет) и ^{66}Ni ($T_{1/2}=54.6$ ч), данные для которых также представлены в библиотеке РОСФОНД.

28.1. Никель-56

Радиоактивен. ($T_{1/2}=6.075$ д),.

Способ радиоактивного распада – $\epsilon + \beta$ распад в кобальт-56, который, в свою очередь испытывает такой же распад в железо-56 ($T_{1/2}=77.26$ д).

Заключение

В РОСФОНД принять нейтронные данные из EAF-2003A (Forrest, Korecky, Sublet, Koning, 2003 г.) со следующими изменениями:

1. материалу присвоен номер МАТ=2856;
2. удален файл MF=8;
3. Сечения образования отдельных состояний ядер-продуктов, содержащиеся в файле MF=10, сложены по подсекциям и суммы занесены в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 удален, поскольку долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на никеле не образуется.

28.2. Никель-57

Радиоактивен. $T_{1/2}=35.6$ часов.

Способ радиоактивного распада – $\epsilon + \beta$ распад в кобальт-57, который, в свою очередь, захватом орбитального электрона распадается в железо-57 ($T_{1/2}=77.26$ д).

Заключение

В РОСФОНД принять нейтронные данные из EAF-2003A (Forrest, Korecky, Sublet, Koning, 2003 г.) со следующими изменениями:

1. материалу присвоен номер МАТ=2857;
2. удален файл MF=8;
3. Сечения образования отдельных состояний ядер-продуктов, содержащиеся в файле MF=10, сложены по подсекциям и суммы занесены в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 удален, поскольку долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на никеле не образуется.

28.3. Никель-58

Оцененные данные рассматриваются в диапазоне энергий до 20 МэВ. Различные модификации, выполненные выше 20 МэВ, не комментируются.

Экспериментальные данные, используемые при сравнении с оцененными кривыми, взяты из интерактивной библиотеки EXFOR-CINDA (Database and Retrieval System, version 1.80, June 2005).

1. Общие характеристики

$Z=28$

$A=57.935\ 342\ 9 \pm 0.000\ 000\ 7$

$A_{wr}=57.437\ 650\ 5 \pm 0.000\ 000\ 7$

Содержание в естественной смеси: - 68.077%

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|----------------|----------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | (n,n') | -1.4540 | 1.4793 | Ni-58 |
| 16 | (n,2n) | -12.2000 | 12.4124 | Ni-57(35.6h) |
| 22 | (n,na) | -6.3980 | 6.5094 | Fe-54 |
| 28 | (n,np) | -8.1710 | 8.3134 | Co-57(271.8d) |
| 102 | (n, γ) | 9.0000 | 0.0000 | Ni-59(7.6E4y) |
| 103 | (n,p) | 0.4008 | 0.0000 | Co-58(70.82d) |
| 104 | (n,d) | -5.9463 | 6.0498 | Co-57(271.8d) |
| 105 | (n,t) | -11.0620 | 11.2550 | Co-56(77.27d) |
| 106 | (n,He3) | -6.4779 | 6.5907 | Fe-56 |
| 107 | (n,a) | 2.9010 | 0.0000 | Fe-55(2.73y) |
| 112 | (n,pa) | -6.3134 | 6.4227 | Mn-54(312.11d) |

Схема уровней: (согласно оценке JEFF-3.1)

| MT | LEVEL | ENERGY (MEV) | SPIN-PARITY |
|-----------|--------|--------------|-------------|
| | 0.0 | | 0+ |
| 51 | 1.4793 | | 2+ |
| 52 | 2.5018 | | 4+ |
| 53 | 2.8243 | | 2+ |
| 54 | 2.9535 | | 1+ |
| 55 | 2.9942 | | 0+ |
| 56 | 3.0909 | | 2+ |
| 57 | 3.3216 | | 2+ |
| 58 | 3.4805 | | 3+ |
| 91 (cont) | 3.5813 | | |

Радиоактивность: не радиоактивен.

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 0^+$;

2.2. Радиус рассеяния: $R = 0.640 \cdot 10^{-12}$ см.

2.3. Область разрешенных резонансов.

Ниже рассматриваются пять оценок нейтронных данных, а именно – ENDF/B-VII betha1 version, BROND-2.2, FOND-2.2, JEFF-3.1 и JENDL-3.3. Короткая информация по каждой оценке представлена в **таблице 1**. По каждой оценке приводятся краткие пояснения.

ENDF/B

Последняя версия (ENDF/B-VIIb1) содержит оценку ORNL, выполненную в 1989 году авторским коллективом: D.Larson, C.Perey, D.Hetrick, C.Fu.

Основные моменты:

Используются программы DWUCK, в которой ядерная модель описывается THE DISTORTED WAVE BORN APPROXIMATION (DWBA) и программа TNG, в которой используется формализм THE HAUSER-FESHBACH.

С помощью TNG получены угловые и энергетические распределения частиц, испускаемых в реакциях по модели компаунд ядра и предравновесного процесса. При этом обеспечивается согласованность между всеми реакциями и обеспечивается энергетический баланс оцененных данных.

Область резонансных энергий от 1.E-5 эВ до 815 кэВ. Резонансные параметры для формализма Райха-Мура получены с помощью программы SAMMY при анализе данных экспериментов по пропусканию. В области энергий 450 – 812 кэВ в захват добавляется подложки (MF3, MT102) для согласования с усредненными экспериментальными данными команды S.M.Perey и др.

Полное сечение выше 812 кэВ получено при анализе нескольких наборов измерений с высоким разрешением, которые также использовались и при получении резонансных параметров.

Сечения первых восьми уровней получены при помощи программы TNG, в которой учитывается вклад прямых процессов. Остальные уровни описаны с помощью программы DWUCK. Сечение континуума уровней получено при помощи TNG.

Сечение радиационного захвата выше 812 кэВ получено на основе расчетов по TNG программе.

Сечение реакции (n,2n) взято из оценки Павлика и Винклера. Сечение было слегка увеличено согласно расчетам по TNG.

Сечения реакций с вылетом заряженных частиц получены при помощи TNG расчетов. При этом учитывались немногочисленные экспериментальные данные.

В оценке используется оценка сечения неизвестной реакции (MT=5), которую надо добавлять к сумме парциальных сечений, чтобы получить полное сечение взаимодействия.

JEFF-3.1

Главными исполнителями оценки являются S.Tagesen, H.Vonach and A.Wallner (IRK) и A.Trkov (IJS).

Основные моменты оценки состоят в следующем:

В качестве стартовой версии оцененных данных взята оценка Ларсона и др. из Oak Ridge (ENDF/B-VI Revision 1)

Все нейтронные сечения выше резонансной области (812 кэВ) были переоценены и пополнены ковариационными матрицами. В качестве “priority” были отобраны следующие наборы данных:

| | |
|---------|---------------------------------|
| MT1 | EFF-2 |
| MT16 | IRDF-90 (evaluation Pavlik)(11) |
| MT22 | ENDF-B/VI |
| MT28 | EFF-2 |
| MT51 | EFF-2 |
| MT52 | EFF-2 |
| MT53 | EFF-2 |
| MT54-58 | EFF-2 |
| MT91 | ENDF/B-VI |
| MT102 | EFF-2 |
| MT103 | evaluation Badikov (12) |
| MT104 | ENDF-B/VI |
| MT105 | JENDL-3 |
| MT106 | EFF-2 |
| MT107 | EFF-2 |
| MT112 | EFF-2 |

В дальнейшем оценка проводилась в три этапа:

На первом этапе были модифицированы все функции возбуждения на основе всей совокупности экспериментальных данных, имеющихся в библиотеке EXFOR.

На втором этапе была выполнена совместная оценка сечений, в результате которых получают альфа-частицы и дейтоны.

На третьем этапе проводилась оценка всех сечений от излишней информации.

В разделе ковариационных данных присутствует ковариационная матрица для процесса MT=854, до чего никто из других оценщиков не додумался.

JENDL-3.3

В основе лежит оценка, выполненная для JENDL-3 в 1987 году. В 1990 году проведена модификация данных, а именно

- изменены энергии порогов в разделе mf=5 для реакций mt=16, 22 и 28;
- небольшая модификация данных проведена в разделе mf=12, mt=16, 91 и 102.

В 1993 году для версии JENDL-3.2 часть данных была переоценена. Изменения коснулись данных в следующих разделах

- (4,16-28), (4,91) – данные взяты из JENDL fusion file;
- (5,16-91) – данные взяты из JENDL fusion file;
- (12,102) – ниже 500 кэВ пересмотрено S.Igasasi;
- (15,102) – ниже 500 кэВ пересмотрено S.Igasasi.

В 2000 году данные переоценены N.Yamamuro (TIT) и скомпилированы K.Shibata (JAERI) для последующей версии библиотеки JENDL-3.3. Изменения коснулись данных в следующих разделах

| | |
|-----------------------|---|
| MF1 | |
| MT1 | сечение переоценено выше 557 кэВ; |
| MT2 | переоценено с учетом баланса сечений; |
| MT16, 22, 28, | сечения вычислено с помощью SINCROS-II; |
| 103, 104, 105, | сечения вычислено с помощью SINCROS-II; |
| 106, 107, 111, | сечения вычислено с помощью SINCROS-II; |
| 203, 204, 205, | сечения вычислено с помощью SINCROS-II; |
| 206, 207 | сечения вычислено с помощью SINCROS-II. |
| MF4, MT16, 22, 28, 91 | исключены. |
| MF5, MT16, 22, 28, 91 | исключены. |

MF6

MT16, 22, 28, 91, взяты из JENDL fusion file;

203, 204, 205, взяты из JENDL fusion file;

206, 207 взяты из JENDL fusion file.

MF12, MT102 и MF15, MT102 пересмотрены.

В 2001 году были пересмотрены данные в области резонансных энергий. Параметры резонансных уровней для формализма Райха-Мура взяты из работы Perey (ORNL), т.е. те же, что и в оценке ENDF/B-VI.

В 2002 году для ковариационных матриц использованы результаты работы Shibata и Oh.

ФОНД-2.2

Для Ni-58 после анализа имевшихся в то время (~2000 г) оцененных нейтронных данных в библиотеку ФОНД-2.2 включена оценка ORNL, выполненная в 1989 году авторским коллективом: D.Larson, C.Perey, D.Hetrick, C.Fu. Таким образом, нейтронные данные из ФОНД-2.2 совпадают с оценкой из библиотеки EMDF/B-VI ниже 20 МэВ.

БРОНД-2.2

В основе лежит оценка для N-58, выполненная в 1985 году Блохиным А., Игнатюком А. и др.

Основные моменты оценки:

В области резонансных энергий (от 1.Е-5 эВ до 690 кэВ) сечения восстанавливаются с помощью двух псевдоизотопов, имеющих разные границы области разрешенных и неразрешенных резонансов. Первый псевдоизотоп содержит информацию о резонансных параметрах S-волны. Область разрешенных резонансов до 600 кэВ, выше – область неразрешенных резонансов. Второй – содержит данные о резонансных параметрах Р- и D-волны. Область разрешенных резонансов до 200 кэВ, выше – область неразрешенных резонансов.

В области разрешенных резонансов рекомендован формализм Брейта-Вигнера.

В области высоких энергий сечения и угловые распределения вычислены по оптической модели.

Сечения пороговых реакций рассчитывались с учетом предравновесного процесса.

ВЫВОДЫ:

В области резонансных энергий имеется только одна современная оценка резонансных параметров, которая присутствует в четырех из пяти рассмотренных библиотек.

Различия библиотечных данных находятся в области энергий выше 1 МэВ, и главным образом, в оценке пороговых реакций.

В подтверждение этого в **таблице 2** приводятся некоторые интегральные характеристики, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY (version 6.13)

Таблица 1 – Общая информация об оцененных нейтронных данных для 28-Ni-58 из различных библиотек.

| | ENDF/B-VIIIb1 | JENDL-3.3 | BROND-2.2 | FOND-2.2 | JEFF-3.1 |
|--------|---|--|--|---|---|
| Оценка | EVAL-OCT89 D.C. Larson, C.M. Perey, D.M. Hetrick, and C.Y. Fu (ORNL) | EVAL-MAR87 S.Iijima, REV4-MAY00 | EVAL-MAY85 A.I.BLOKNIN, A.V.IGNATYUK | EVAL-OCT89 D.C. Larson, C.M. Perey, D.M. Hetrick, and C.Y. Fu (ORNL) | EVAL-AUG99 S.Tagesen, H.Vonach and A.Wallner (EJC) |
| MF=2 | RRR 0-812 keV (RM) | RRR 0-812 keV (RM) | RRR 0-600 keV (MLBW) URR 600-690 keV | RRR 0-812 keV (RM) | RRR 0-812 keV (RM) |
| MF=3 | MT=1,2,4,5,16,22,28, 51-58,91, 102,103,104,107 | MT=1,2,4,16,22,28, 51- 65,91, 102,103,104,105,106, 107, 111 ,203,204,205 | MT=1,2,4,16,22,28, 51-72,91, 102,103,107,251 | MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-58,91, 102,103,104,107 | MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-58,91, 102,103,104,105, 106,107, 112 |
| MF=4 | MT=2 | MT=2,51-65 | MT=2, 16,22,28, 51-72,91 | MT=2 | MT=2 |
| MF=5 | | | MT=16,22,28, 51-72,91 | | |
| MF=6 | MT=5,16,22,28, 51-58,91,103,107 | MT=16,22,28,91, 203,204,205,206,207 | | MT=16,22,28, 51-58,91,103,107 | MT=16,22,28, 51-58,91,103,107 |
| MF=12 | MT=51-58,102 | MT=16,22,28, 51-65,91,102,103,107 | | MT=51-58,102 | MT=51-58,102 |
| MF=14 | MT=51-58,102 | MT=16,22,28, 51-65,102,103,107 | | MT=51-58,102 | MT=51-58,102 |
| MF=15 | MT=102 | MT=16,22,28,91, 102,103,107 | | MT=102 | MT=102 |
| MF=33 | MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-58,91, 102,103,104,107 | MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-65, 102,103,104,105,107 | | MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-58,91, 102,103,104,107 | MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-58,91,102,103, 104,105,106,107, 112,854 |
| MF=34 | | MT=2 | | | MT=2 |

Таблица 2 – Некоторые характеристики оцененных нейтронных данных для 28-Ni-58 из различных библиотек.

| LIB | MT | Reaction | Sig(2200) | Sig(Ezero) | Avg-Sigma | G-fact | Res Integ | Sig(Fiss) | Sig(E14) |
|-----------|-----|----------|-------------|-------------|------------|---------|-------------|-------------|-------------|
| ENDF/BVII | 1 | Total | 2.96462E+01 | 2.95921E+01 | 3.2802E+01 | 1.11928 | 2.67529E+02 | 3.63862E+00 | 2.69053E+00 |
| BROND-2 | 1 | Total | 3.31142E+01 | 3.30603E+01 | 3.6726E+01 | 1.12192 | 3.29069E+02 | 4.47848E+00 | 2.66202E+00 |
| FOND-2.2 | 1 | Total | 2.96462E+01 | 2.95921E+01 | 3.2802E+01 | 1.11928 | 2.67551E+02 | 3.76791E+00 | 2.69053E+00 |
| JEFF-3.1 | 1 | Total | 2.96462E+01 | 2.95921E+01 | 3.2802E+01 | 1.11928 | 2.67530E+02 | 3.65187E+00 | 2.71483E+00 |
| JENDL-3.3 | 1 | Total | 2.96462E+01 | 2.95921E+01 | 3.2802E+01 | 1.11928 | 2.67528E+02 | 3.68488E+00 | 2.76128E+00 |
| ENDF/BVII | 2 | Elastic | 2.50228E+01 | 2.50182E+01 | 2.8229E+01 | 1.14121 | 2.65359E+02 | 3.12274E+00 | 1.26674E+00 |
| BROND-2 | 2 | Elastic | 2.85724E+01 | 2.85672E+01 | 3.2233E+01 | 1.14121 | 3.26923E+02 | 3.97032E+00 | 1.32190E+00 |
| FOND-2.2 | 2 | Elastic | 2.50228E+01 | 2.50182E+01 | 2.8229E+01 | 1.14121 | 2.65382E+02 | 3.25203E+00 | 1.26674E+00 |
| JEFF-3.1 | 2 | Elastic | 2.50228E+01 | 2.50182E+01 | 2.8229E+01 | 1.14121 | 2.65360E+02 | 3.16236E+00 | 1.29648E+00 |
| JENDL-3.3 | 2 | Elastic | 2.50228E+01 | 2.50182E+01 | 2.8229E+01 | 1.14121 | 2.65358E+02 | 3.24328E+00 | 1.33921E+00 |
| ENDF/BVII | 4 | Inelas | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 3.92440E-01 | 3.18626E-01 |
| BROND-2 | 4 | Inelas | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 3.88971E-01 | 2.76578E-01 |
| FOND-2.2 | 4 | Inelas | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 3.92440E-01 | 3.18626E-01 |
| JEFF-3.1 | 4 | Inelas | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 3.66864E-01 | 3.22280E-01 |
| JENDL-3.3 | 4 | Inelas | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 3.18321E-01 | 2.96603E-01 |
| ENDF/BVII | 16 | n,2n | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 6.98002E-06 | 2.28810E-02 |
| BROND-2 | 16 | n,2n | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 6.14006E-06 | 2.25000E-02 |
| FOND-2.2 | 16 | n,2n | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 6.98002E-06 | 2.28810E-02 |
| JEFF-3.1 | 16 | n,2n | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 6.97460E-06 | 2.31210E-02 |
| JENDL-3.3 | 16 | n,2n | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 8.15035E-06 | 3.06470E-02 |
| ENDF/BVII | 102 | n,gamma | 4.62345E+00 | 4.57393E+00 | 4.5732E+00 | 1.00060 | 2.16967E+00 | 6.59060E-03 | 4.79200E-04 |
| BROND-2 | 102 | n,gamma | 4.54172E+00 | 4.49308E+00 | 4.4923E+00 | 1.00060 | 2.14605E+00 | 8.91404E-03 | 1.04686E-03 |
| FOND-2.2 | 102 | n,gamma | 4.62345E+00 | 4.57393E+00 | 4.5732E+00 | 1.00060 | 2.16962E+00 | 6.59138E-03 | 4.79200E-04 |
| JEFF-3.1 | 102 | n,gamma | 4.62345E+00 | 4.57393E+00 | 4.5732E+00 | 1.00059 | 2.16968E+00 | 7.84684E-03 | 4.99540E-04 |
| JENDL-3.3 | 102 | n,gamma | 4.62345E+00 | 4.57393E+00 | 4.5732E+00 | 1.00060 | 2.16965E+00 | 8.82602E-03 | 5.39772E-05 |
| ENDF/BVII | 103 | n,p | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.06535E-01 | 3.74070E-01 |
| BROND-2 | 103 | n,p | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.06580E-01 | 4.12000E-01 |
| FOND-2.2 | 103 | n,p | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.06535E-01 | 3.74070E-01 |
| JEFF-3.1 | 103 | n,p | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.08217E-01 | 3.93140E-01 |
| JENDL-3.3 | 103 | n,p | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.06908E-01 | 3.29787E-01 |

Таблица 2 (продолжение) – Некоторые характеристики оцененных нейтронных данных для 28-Ni-58 из различных библиотек.

| LIB | MT | Reaction | Sig(2200) | Sig(Ezero) | Avg-Sigma | G-fact | Res Integ | Sig(Fiss) | Sig(E14) |
|-----------|-----|----------|-------------|-------------|------------|---------|-------------|-------------|-------------|
| ENDF/BVII | 104 | n,d | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.64616E-05 | 1.58610E-02 |
| FOND-2.2 | 104 | n,d | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.64616E-05 | 1.58610E-02 |
| JEFF-3.1 | 104 | n,d | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.56464E-05 | 1.56725E-02 |
| JENDL-3.3 | 104 | n,d | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 6.84089E-06 | 8.18091E-03 |
| JEFF-3.1 | 105 | n,t | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.58636E-07 | 7.10900E-06 |
| JENDL-3.3 | 105 | n,t | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 7.20047E-09 | 1.63456E-06 |
| JEFF-3.1 | 106 | n,He3 | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 5.10608E-10 | 0.00000E+00 |
| JENDL-3.3 | 106 | n,He3 | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.30443E-08 | 2.50179E-05 |
| ENDF/BVII | 107 | n,alpha | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 9.94403E-03 | 1.12677E-01 |
| BROND-2 | 107 | n,alpha | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 3.48729E-03 | 1.18000E-01 |
| FOND-2.2 | 107 | n,alpha | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 9.94403E-03 | 1.12677E-01 |
| JEFF-3.1 | 107 | n,alpha | 7.03139E-15 | 7.18713E-15 | 1.5815E-14 | 2.27532 | 2.63879E-08 | 6.24124E-03 | 9.52400E-02 |
| JENDL-3.3 | 107 | n,alpha | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 6.81305E-10 | 7.16269E-03 | 1.05847E-01 |

3. Сечения нейтронных реакций

3.1. Полное сечение

На рисунке 1 представлены энергетический ход сечения полного взаимодействия из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1), переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотек JEFF-3.1 и JENDL-3.3. в области энергий 10 эВ - 10 МэВ

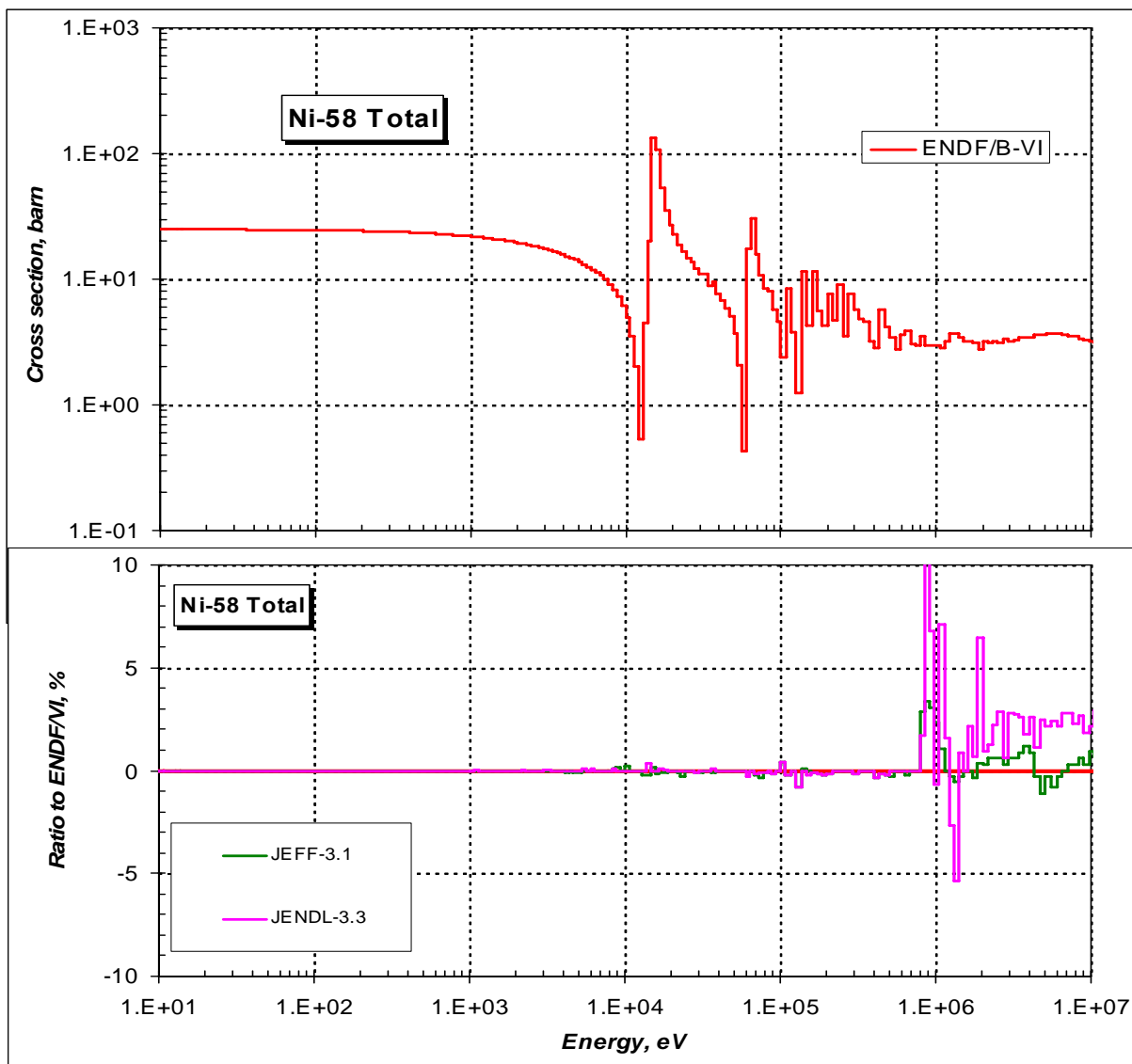


Рисунок 1 – Ход полного сечения Ni-58 в области энергий 10 эВ – 10 МэВ.

Из рисунка 1 видно, что в резонансной области энергий ~ до 800 кэВ различий в сечениях нет. Они появляются выше 800 кэВ.

Ниже, на рисунке 2 показан аналогичный ход полного сечения в области энергии 100 кэВ - 10 МэВ.

Отметим, что сечения из библиотеки БРОНД-2 не рассматривались, поскольку при ее компиляции не учитывались экспериментальные данные, выполненные с высоким разрешением в последующие после оценки годы.

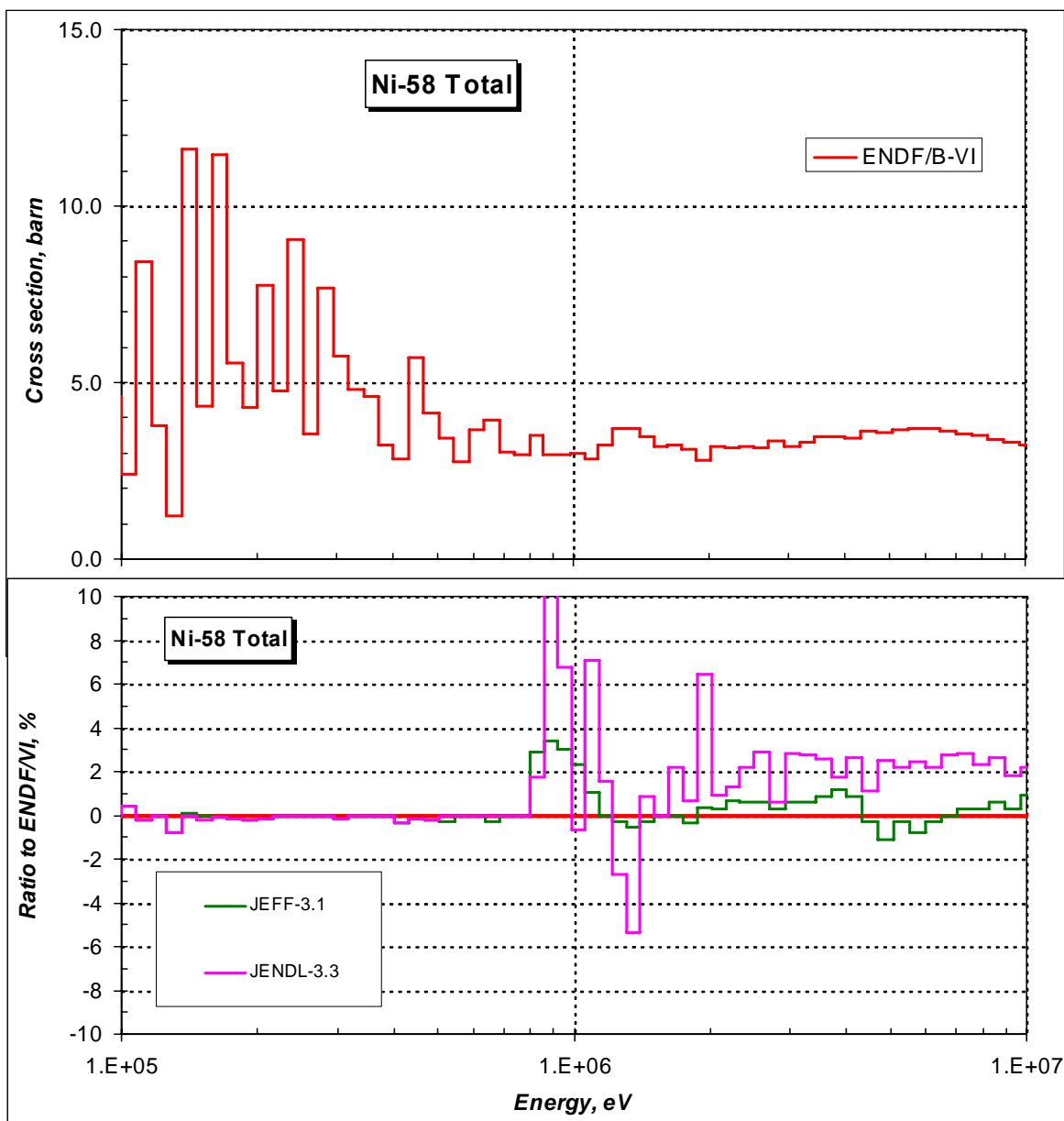


Рисунок 2 – Ход полного сечения Ni-58 в области энергий 100 кэВ – 10 МэВ.

Из представленной на рисунке 2 информации видно, что различия между JEFF-3.1 и ENDF/B-VI носят не принципиальный характер. В тоже время, различия между JENDL-3.3 и ENDF/B-VI систематически различаются на ~ 2 %.

На рисунках 3-4 сравнивается ход сечения из ENDF/B-VI и JENDL-3.3 с имеющимися в этой области энергий экспериментальными данными. Видно, что оценка ENDF/B-VI лучше согласуется с экспериментальными данными, чем оценка JENDL-3.3.

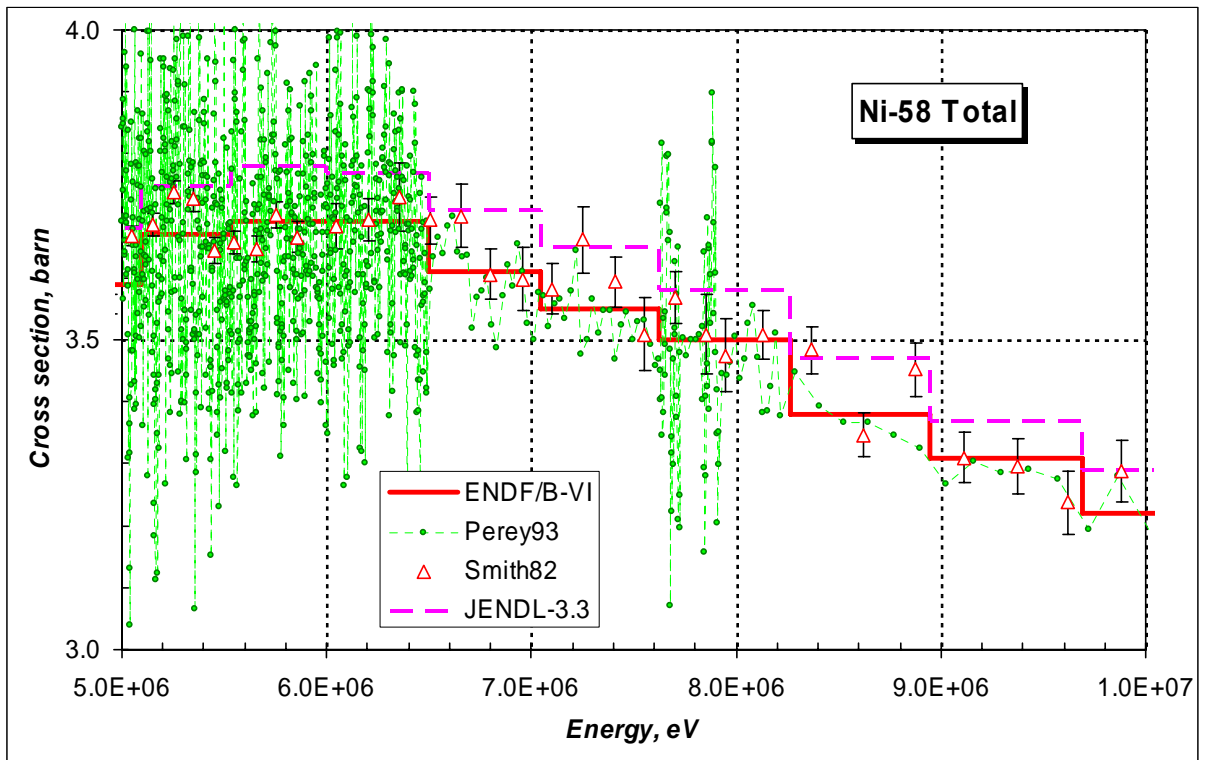


Рисунок 3 – Сравнение полного сечения Ni-58 в области энергий 5 – 10 МэВ.

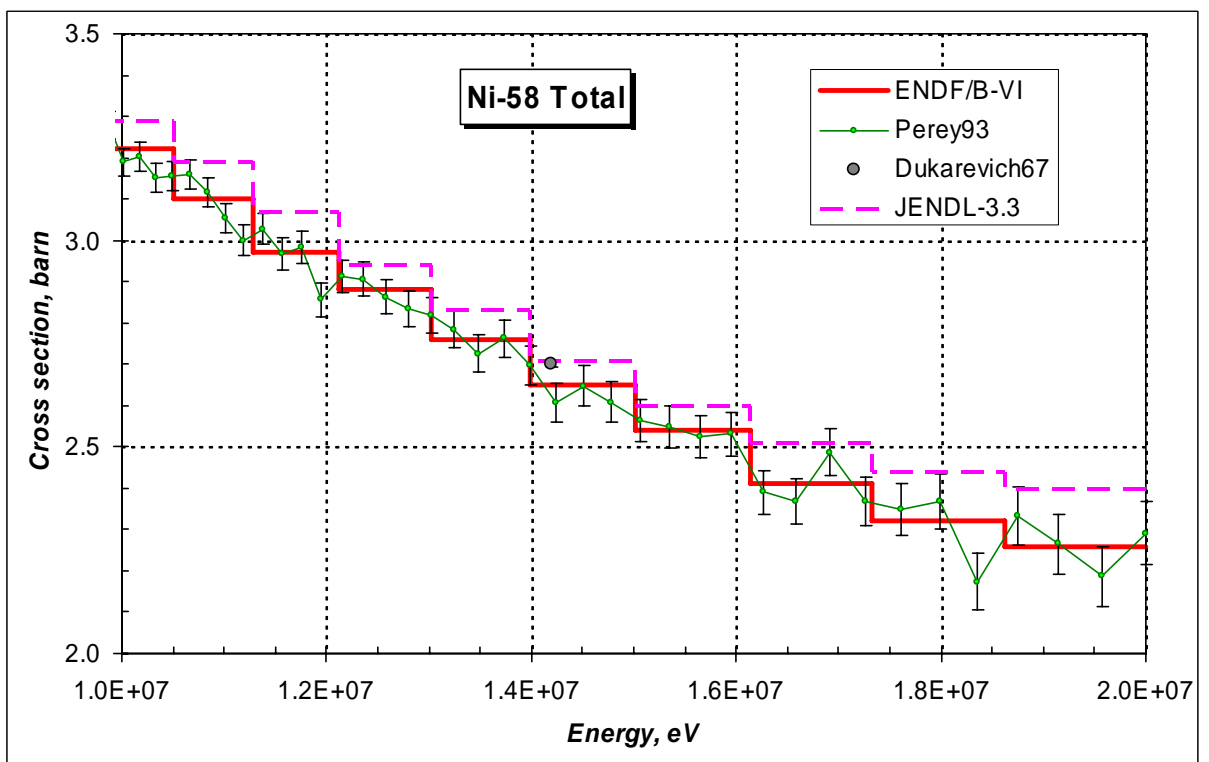


Рисунок 4 – Сравнение полного сечения Ni-58 в области энергий 10 – 20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния

На рисунке 5 показан энергетический ход сечения упругого рассеяния нейтронов из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1), переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотек JEFF-3.1 и JENDL-3.3. в области энергий 100 кэВ -10 МэВ, где, как было видно выше, различия в оценках максимальны.

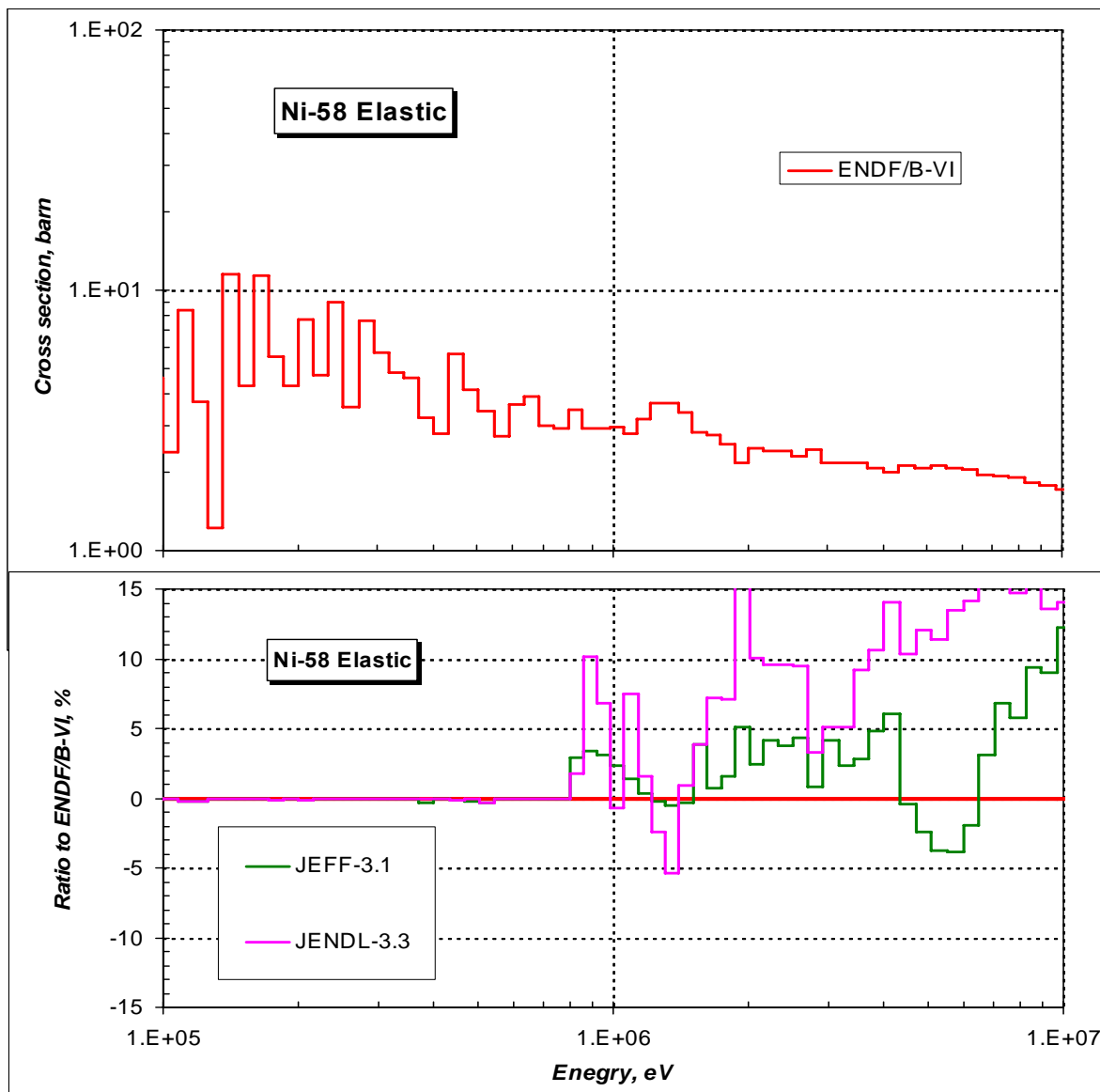


Рисунок 5 – Ход сечения упругого рассеяния области энергий 100 кэВ – 10 МэВ.

Из рисунка видно, что различия между оценками ENDF/B-VI и JEFF-3.1 составляют ~ 5%, а между ENDF/B-VI и JENDL-3.3 ~ 10-15 %. Различия в оценке сечения возрастают с ростом энергии.

На рисунках 6-7 показано сравнение рассматриваемых оценок с имеющимися в нашем распоряжении экспериментальными данными из библиотеки EXFOR. На рисунке 6 сравнение дано в области энергий 1-15 МэВ, а на рисунке 7 – в более узкой энергетической области 1 – 5 МэВ.

Из представленного сравнения видно, что наилучшее согласие с экспериментальными данными имеет оценка ENDF/B-VI, но и она выше 7 МэВ лежит несколько выше экспериментальных данных Guss(1985).

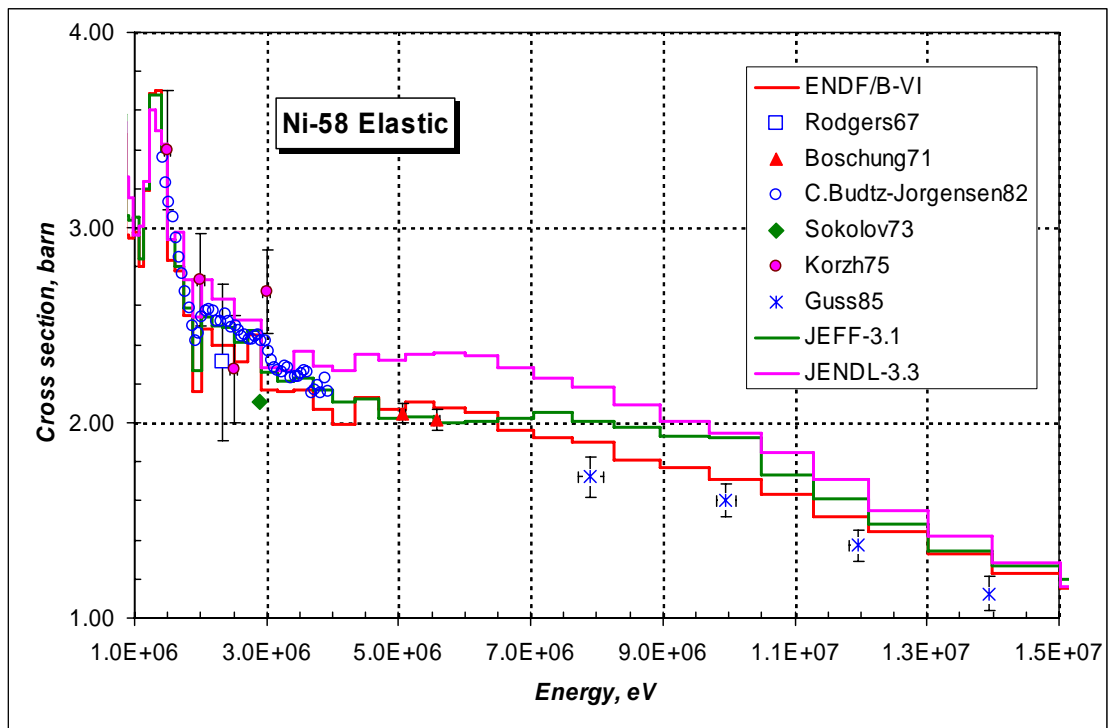


Рисунок 6 – Сравнение сечения упругого рассеяния в области энергий 1 – 15 МэВ.

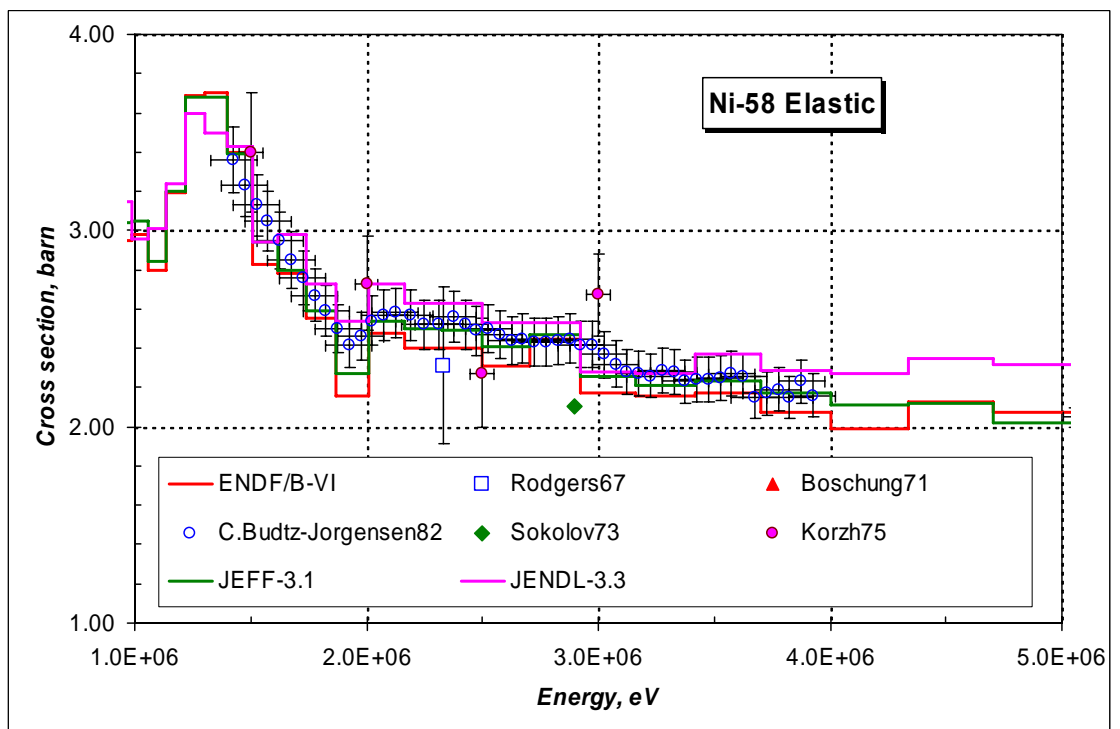


Рисунок 7 – Сравнение сечения упругого рассеяния в области энергий 1 – 5 МэВ.

3.3. Сечение радиационного захвата

Сечение радиационного захвата, как и полное сечение, различается в области энергий выше 800 кэВ. Сравнение сечения радиационного захвата с экспериментальными данными показано на рисунке 8.

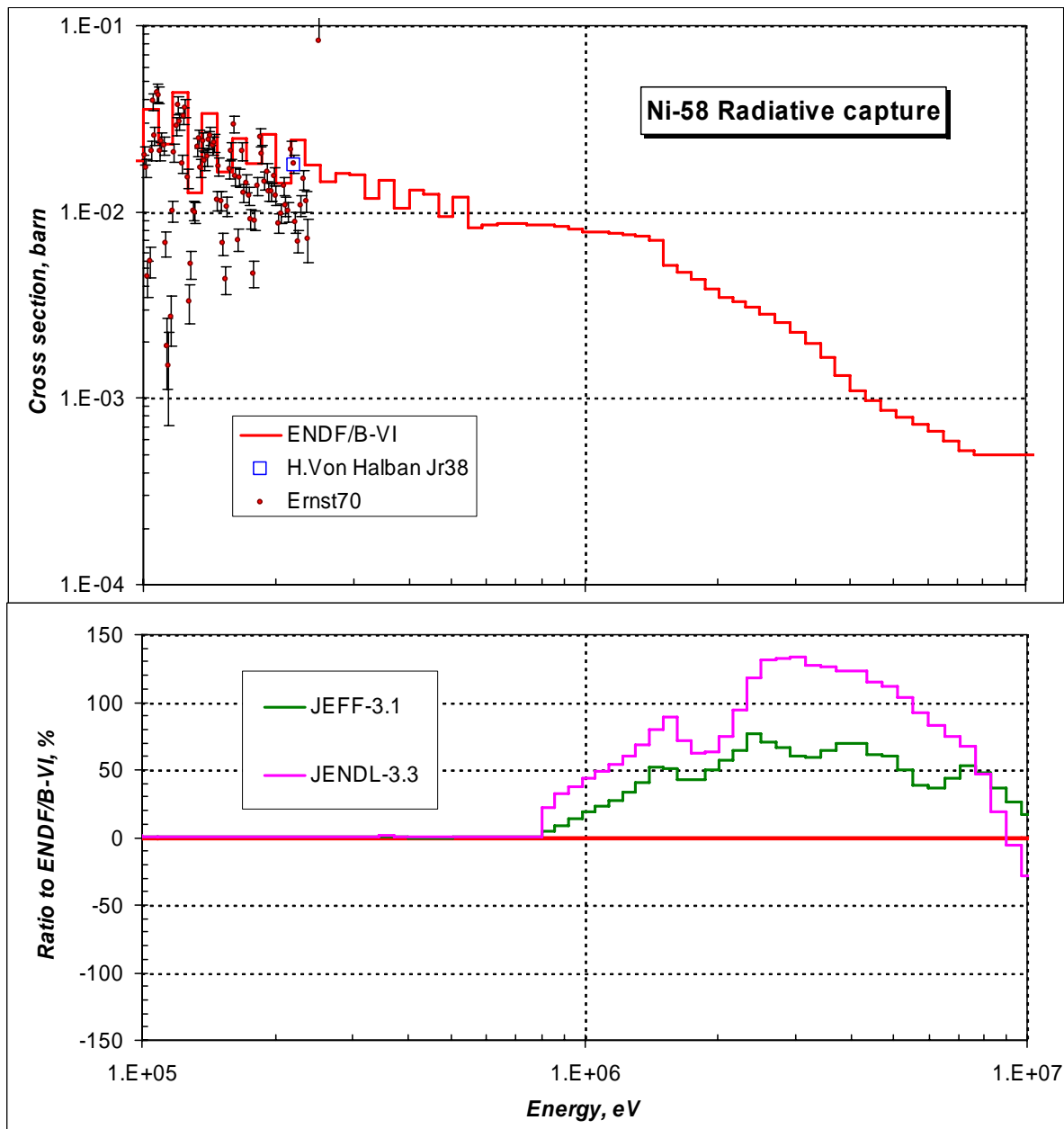


Рисунок 8 – Ход сечения захвата в области энергий 100 кэВ – 10 МэВ.

Из рисунка видно, что различие в сечениях между оценками находится в области энергий, где экспериментальные данные отсутствуют. Т.е. различия в сечениях обусловлены результатами расчетов. При этом сами сечения на порядок уменьшаются.

3.4. Сечение неупругого рассеяния

Сравнение различных оценок приведено на рисунке 9. Видно, что в отличие от ENDF/B-VI и JENDL-3.3, сечение неупругого рассеяния в JEFF-3.1 носит ярко выраженный резонансный характер. Соответствие резонансной структуры, наблюдаемой в полном сечений и в сечении неупругого рассеяния для оценки JEFF-3.1, показано на рисунке 10.

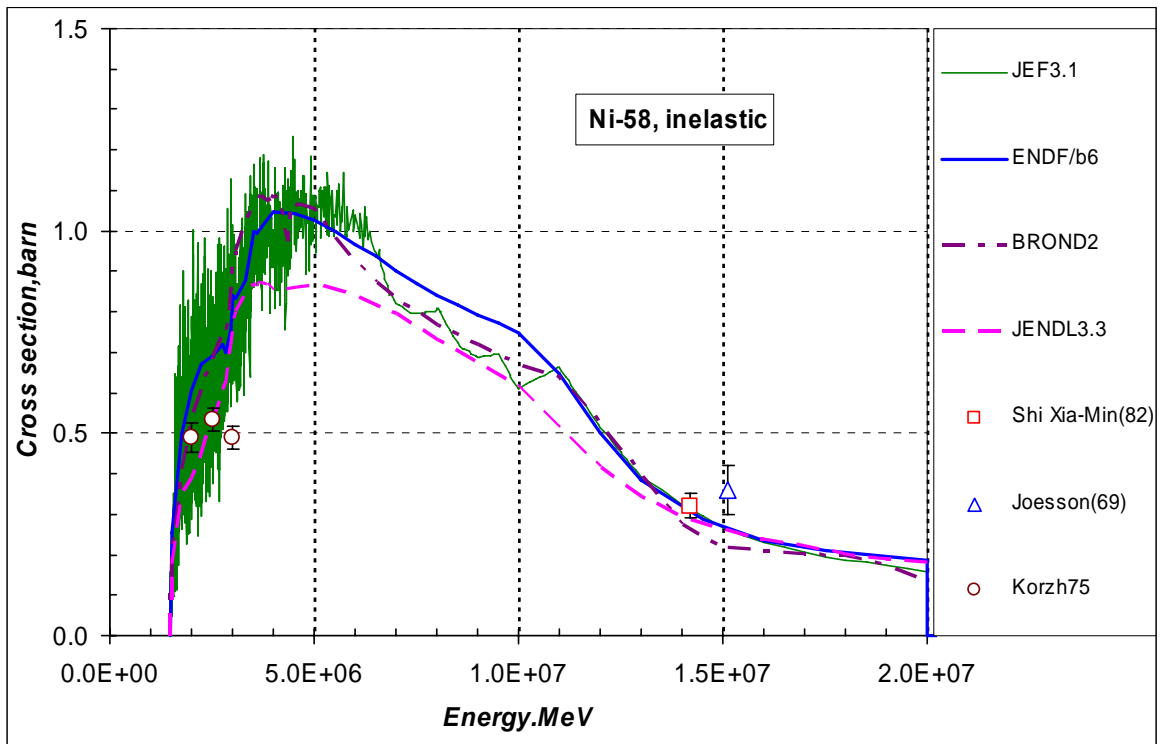


Рисунок 9 – Сечение неупругого рассеяния на Ni-58.

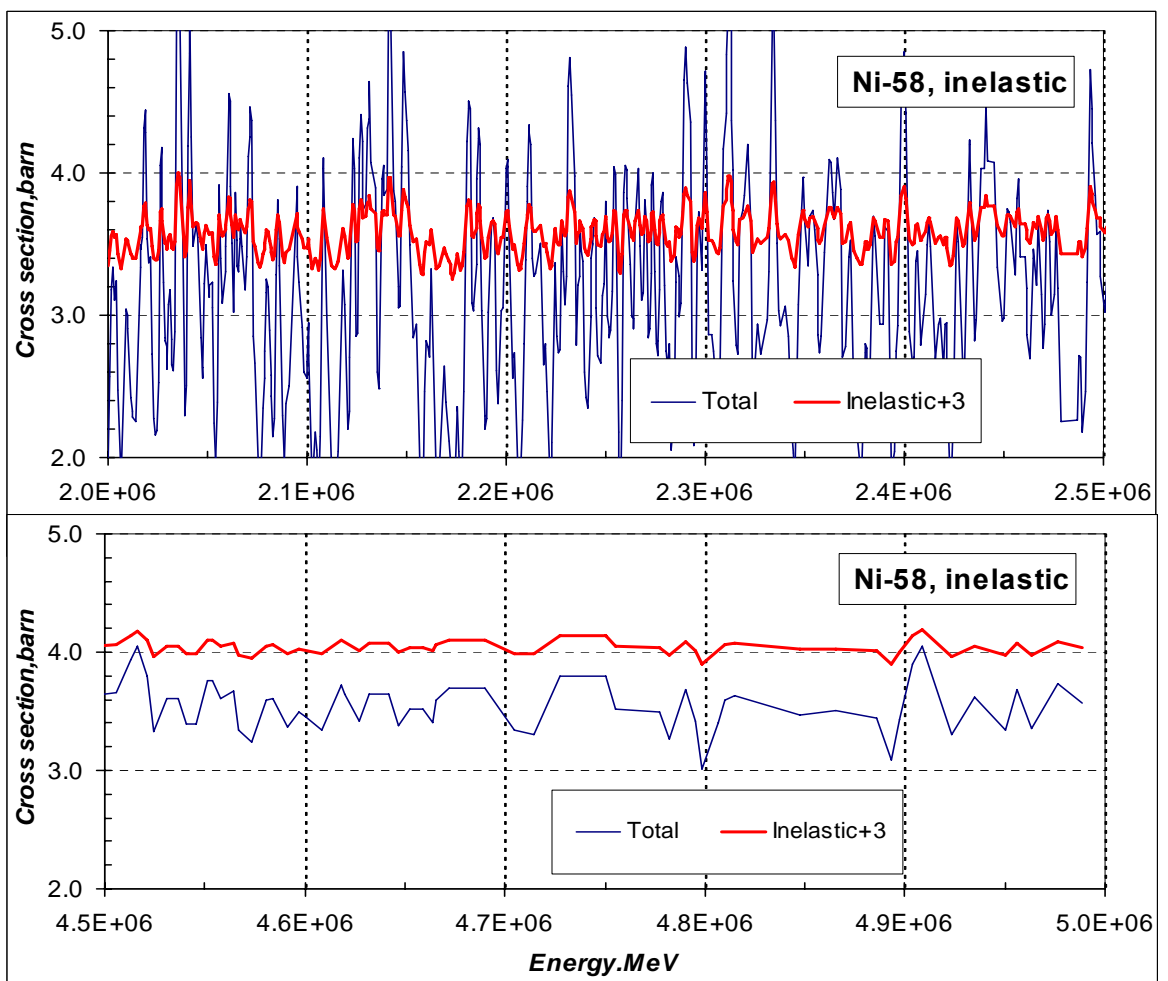


Рисунок 10 – Структура полного сечения и сечения неупругого рассеяния.

Из рисунка 10 видно, что структура неупругого рассеяния в JEFF-3.1 коррелирует со структурой полного сечения. Следует отметить, что оценка JENDL-3.3 имеет наиболее низкие значения сечения неупругого рассеяния в области энергий до 10 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n)

На рисунке 11 показано сравнение реакции (n,2n) оцененных и экспериментальных данных.

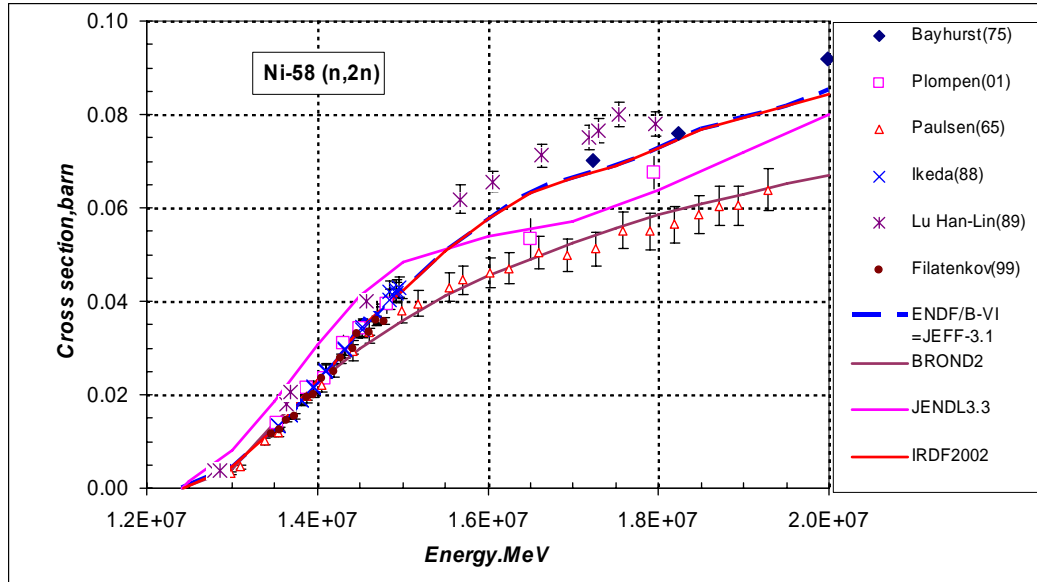


Рисунок 11 – Сечение реакции (n,2n) на Ni-58.

Из представленного на рисунке 11 сравнения видно, что связка ENDF/B-VI – JEFF-3.3 – IRDF-2002 наиболее согласована с совокупным набором экспериментальных микроданных.

3.6. Сечения реакций образования протонов (n,p) и (n,np)

На рисунках 12 – 13 показано сравнение сечений реакций с образованием протонов.

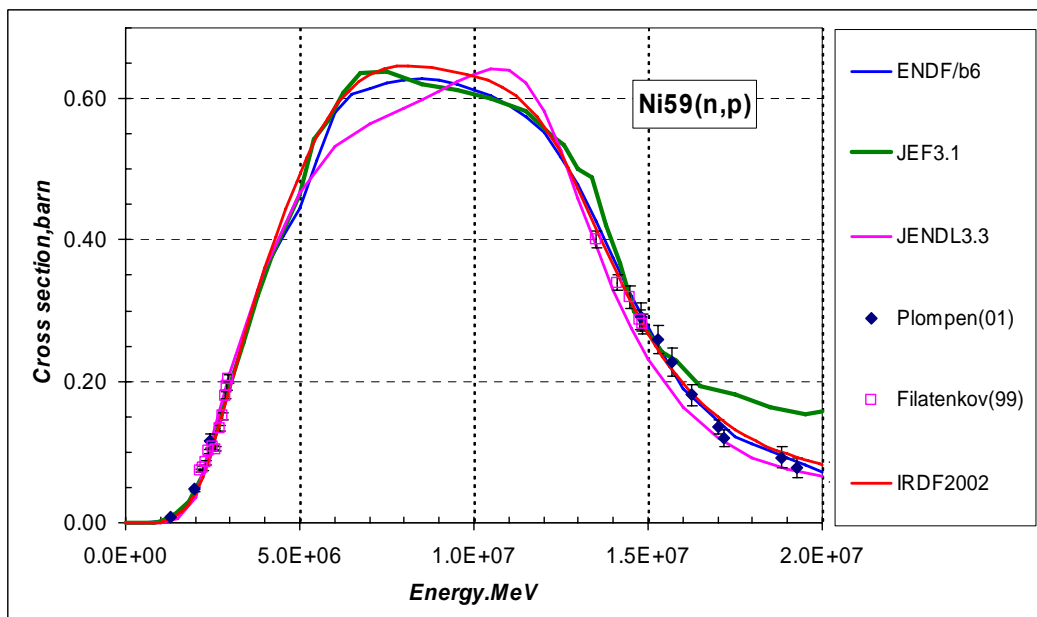


Рисунок 12 – Сечение реакции (n,p) на Ni-58.

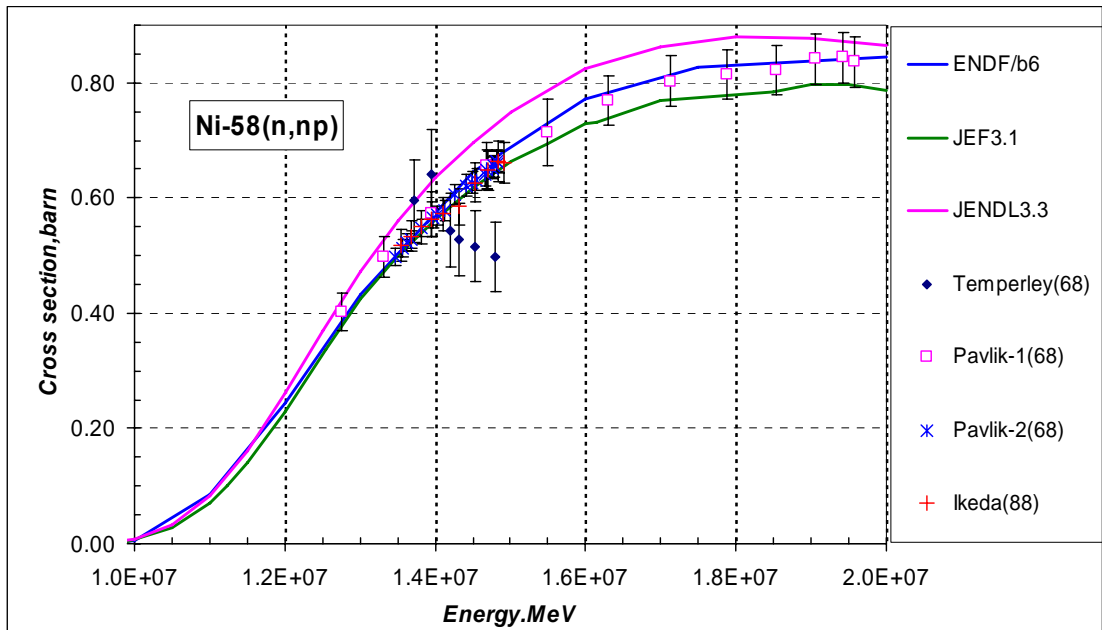


Рисунок 13 – Сечение реакции (n,np) на Ni-58.

Из приведенного сравнения на рисунке 12 видно, что до 15 МэВ все оценки реакции (n,p), за исключением JENDL-3.3 хорошо согласуются с последними экспериментальными данными. Выше 15 МэВ оценка из JEFF-3.1 не оправдано высока.

Сечение реакции (n,np) из ENDF/B-VI и JEFF-3.1 наилучшим образом согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

3.7. Сечения реакции образования альфа частиц (n,a) и (n,na)

На рисунках 14 – 15 показано сравнение сечений реакции (n,a) в области порога реакции и в области энергий до 20 МэВ.

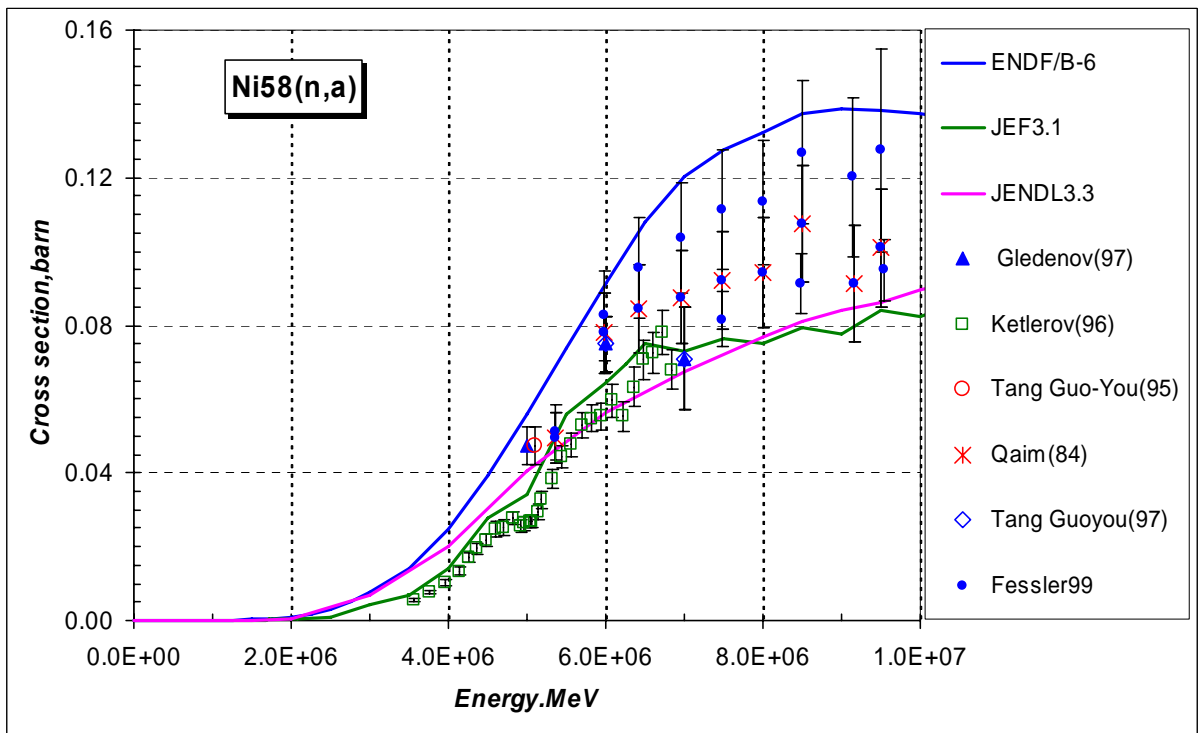


Рисунок 14 – Сечение реакции (n,a) на Ni-58 в области порога.

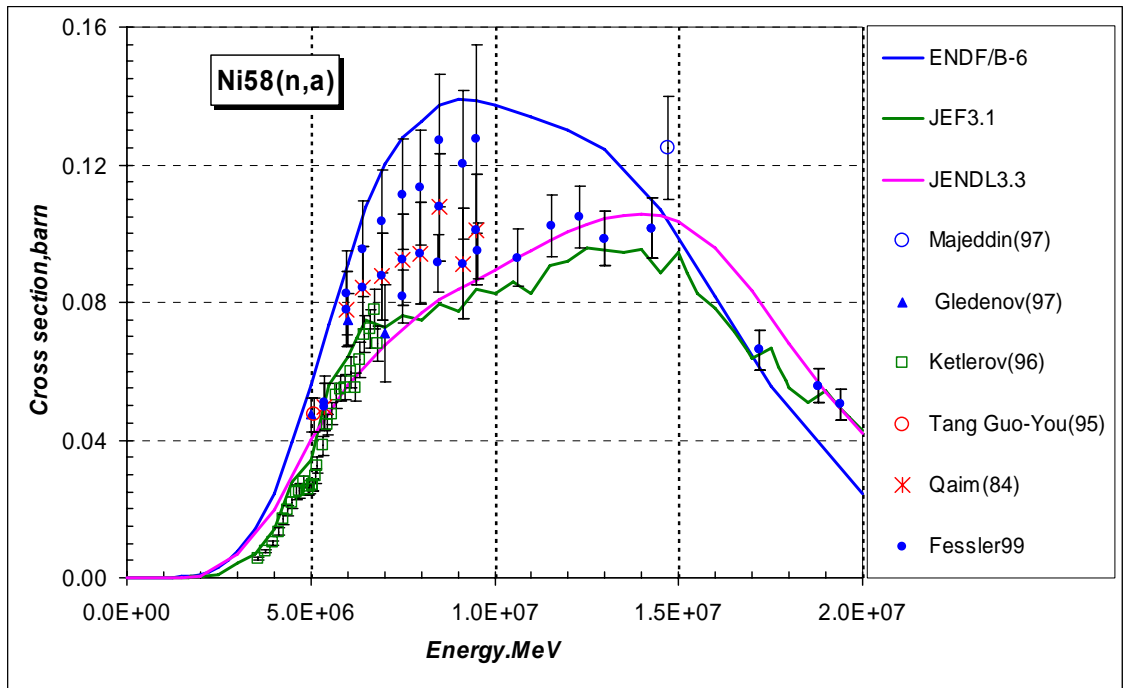


Рисунок 15 – Сечение реакции (n,a) на Ni-58 в области энергий до 20 МэВ.

На рисунке 16 показано сравнение оцененных сечений реакции (n,np) с имеющимися экспериментальными данными.

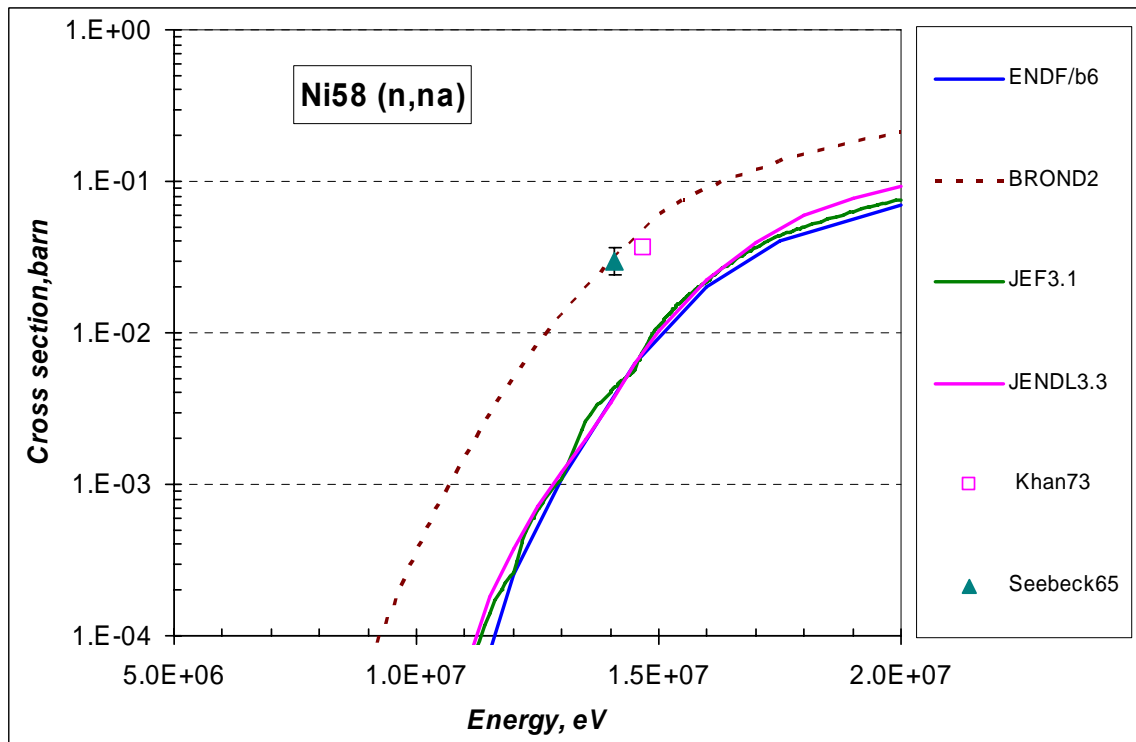


Рисунок 16 – Сечение реакции (n,np) на Ni-58 в области энергий до 20 МэВ.

Из рисунка видно, что все оценки, за исключением БРОНД-2, дружно не вписываются в эксперимент. Вероятно, имеет смысл незначительно поправить современные оценки по аналогии с поведением оценки из БРОНД-2.

3.7. Сечение реакции с образованием дейтонов (n,d).

На рисунке 17 показано сравнение оцененных сечений реакции (n,d) с имеющимися экспериментальными данными. Как правило, в библиотеке экспериментальных данных EXFOR для этой реакции приводится суммарное сечение реакций (n,p) + (n,d). Прямых измерений немного, и они показаны на рисунке 17.

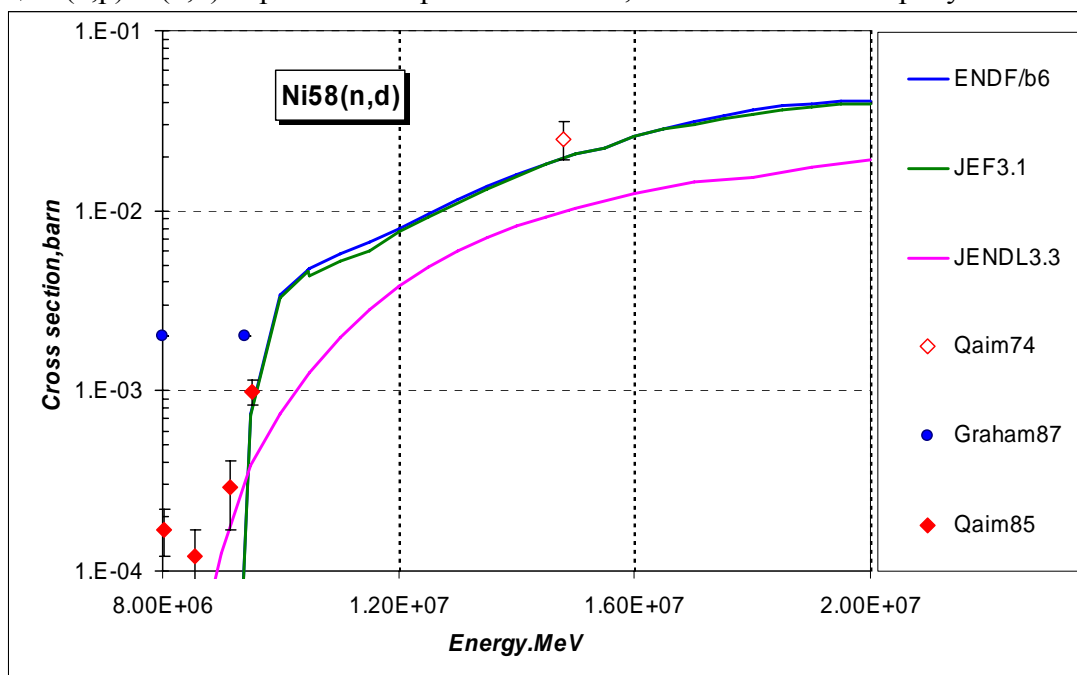


Рисунок 17 – Сечение реакции (n,d) на Ni-58 в области энергий до 20 МэВ.

Из рисунка видно, что наилучшим образом с экспериментом согласуются оценки из ENDF/B-VI и JEFF-3.1. Но и для них желательно поправить порог реакции согласно эксперименту Qaim85.

3.8 Сечение реакции с образованием трития (n,t) и гелия -3 (n,He-3).

Сечения указанных реакций имеют величины порядка микробарн и высокий порог реакции, поэтому в оценках ENDF/B-VI и JEFF-3.1 они не приводятся. Тем не менее, информация по таким реакциям имеется, и они без особых проблем могут быть добавлены в оценки JEFF-3.1 и ENDF/B-VI.

Выводы

Оцененные сечения нейтронных реакций в области энергий от $10E-5$ эВ до 20 МэВ предпочтительно взять из библиотеки JEFF-3.1, которые представляют собой европейскую ревизию данных из библиотеки ENDF/B-VII.

4. Угловые распределения нейтронов

4.1. Угловые распределения при упругом рассеянии нейтронов

Экспериментальных данных по угловому распределению нейтронов при упругом рассеянии нейтронов не много. Из них наиболее современных данных это:

- детальные по энергии (вплоть до 813 кэВ) данные угловых распределений нейтронов для углов рассеяния 39° , 55° , 90° , 120° , 140° и 160° группы Perey et al, выполненные в 1993 на ORELA;

- данные Smith et al, выполненные в 1992 году в области более высоких энергий от 4.5 МэВ до 9.99 МэВ на установке DINAM (Tandem Dinamitron);

- данные группы Guss et al, выполненные в 1985 году в области высоких энергий от 7.9 МэВ до 13.94 МэВ на установке VDGT.

Отметим, что в JEFF-3.1 данные по угловому распределению нейтронов при упругом рассеянии нейтронов взяты из оценки ENDF/B без изменений.

На рисунке 18 приведено сравнение оцененных угловых распределений при упругом рассеянии с экспериментальными данными группы Guss et al (1985).

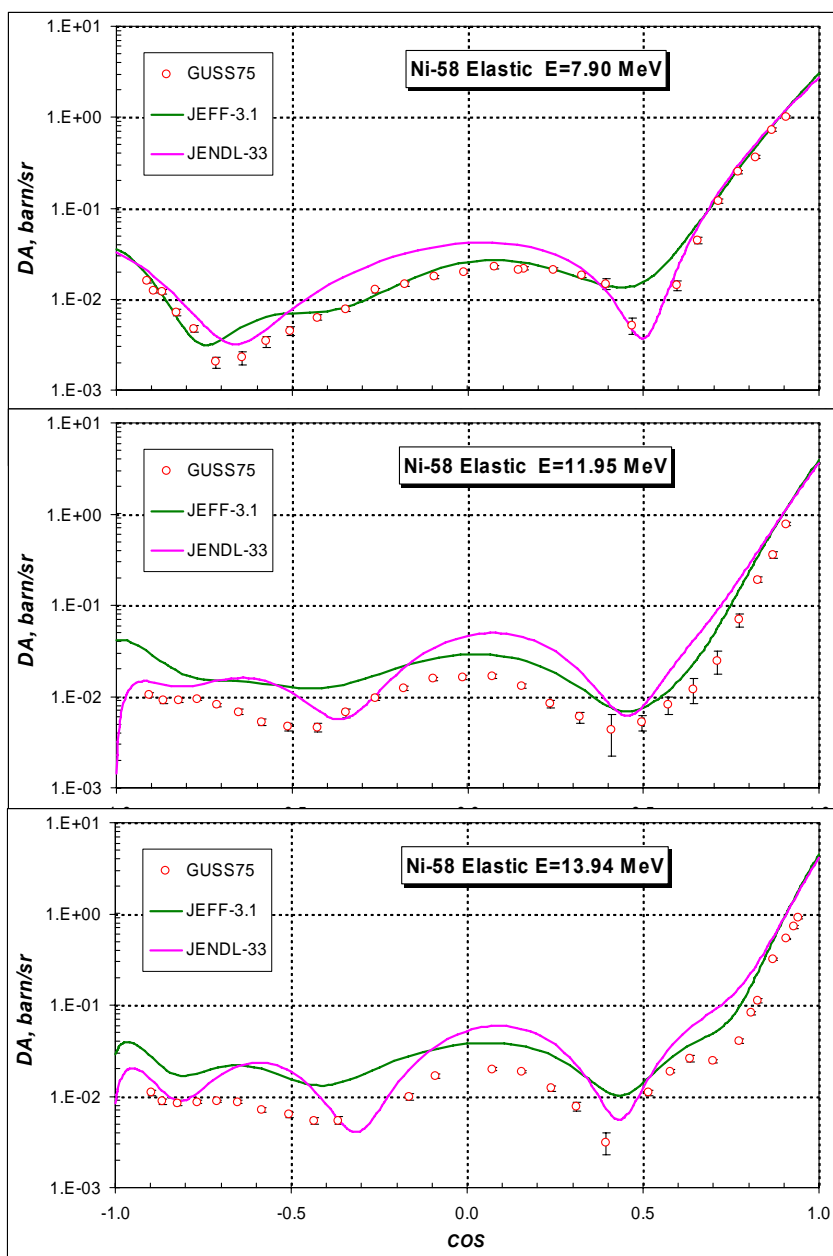


Рисунок 18 - Сравнение оцененных и экспериментальных угловых распределений.

Ниже на рисунке 19 показано аналогичное сравнение с экспериментальными данными группы Smith et al (1992).

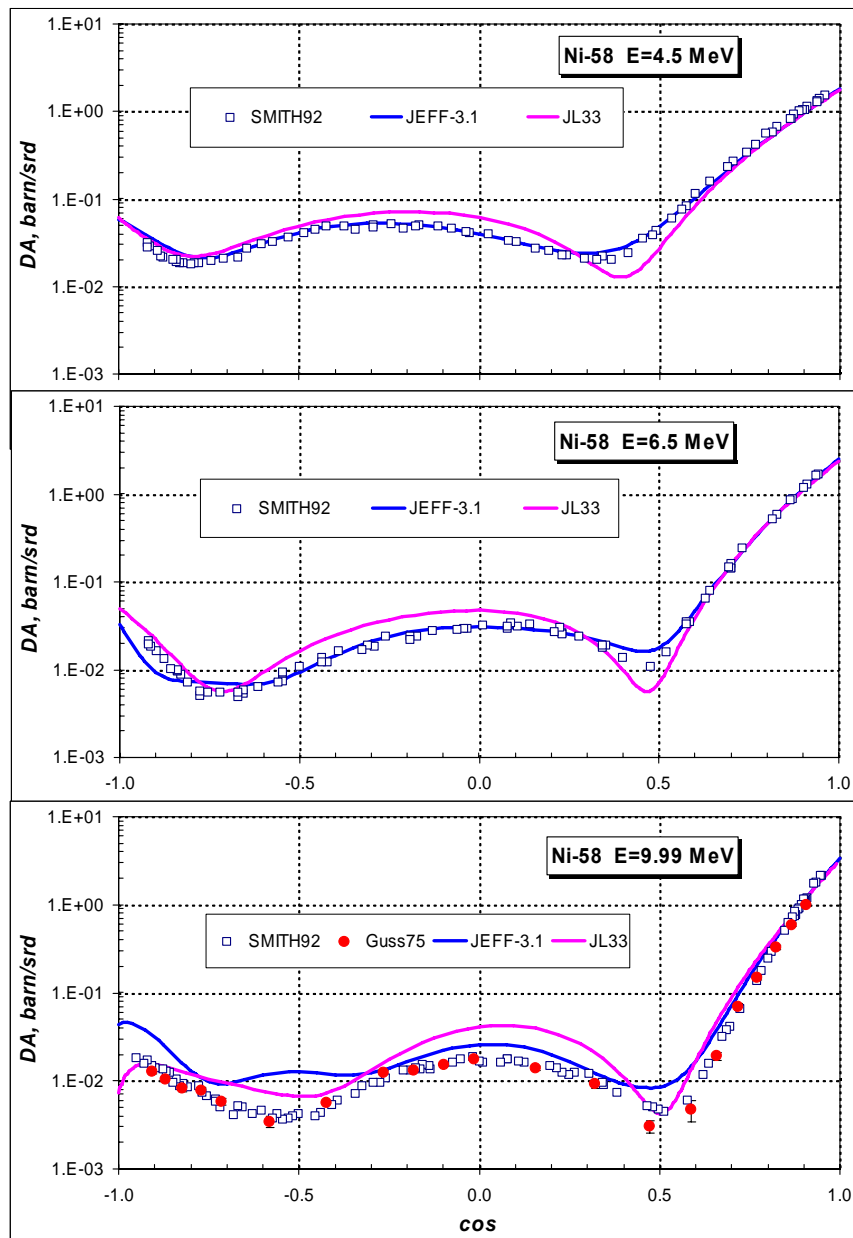


Рисунок 19 - Сравнение оцененных и экспериментальных угловых распределений.

На рисунке 19 для энергетической точке 9.99 МэВ помимо данных группы Smith et al приводятся данные группы Guss et al (полученные при энергии 9.958 МэВ) без перепривязки к энергии 9.99 МэВ.

Из приведенного на рисунках 18-19 сравнения видно, что приблизительно до 8 МэВ угловые распределения из JEFF-3.1 (=ENDF/B-VII) лучше согласуются с экспериментальными данными, чем оценка из JENDL-3.3. При более высоких энергиях обе оценки согласовано хорошо описывают рассеяние вперед, рассеяние под углом 90^0 лучше описывается оценкой из JEFF-3.1, и, наконец, рассеяние назад обе оценки описывают по-разному, но одинаково плохо.

Интерес представляют экспериментальные данные Perey et al (1993), выполненные с высокой точностью на ORELA в области энергий разрешенных резонансов. На основе этих экспериментов были определены параметры разрешенных резонансов во всех рассматриваемых оценках. На рисунке 20 приведено сравнение

оцененных и экспериментальных угловых распределений для угла рассеяния 39° . На рисунке 21 приведено аналогичное сравнение для угла рассеяния 160° .

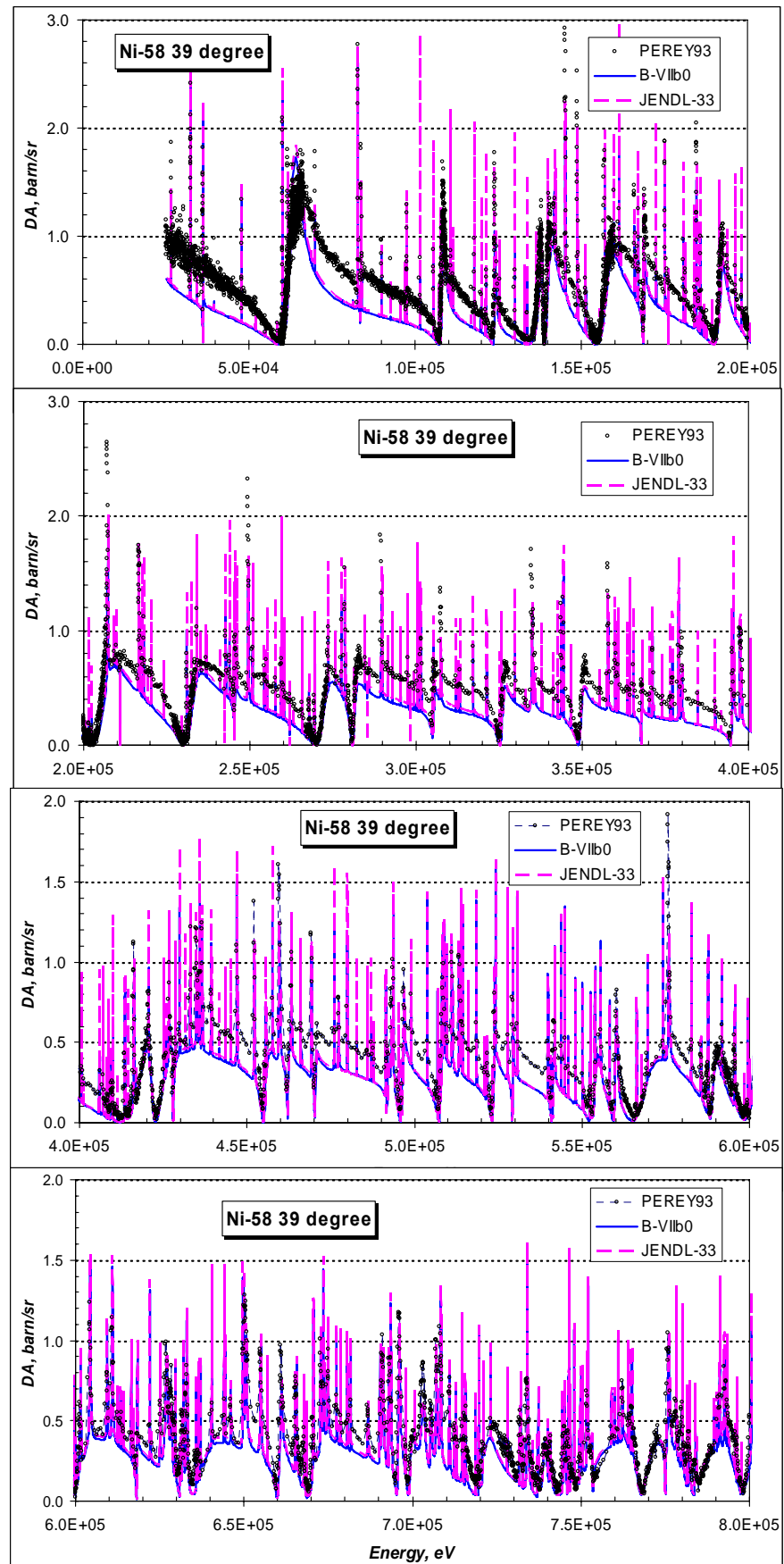


Рисунок 20 - Сравнение оцененных и экспериментальных угловых распределений.

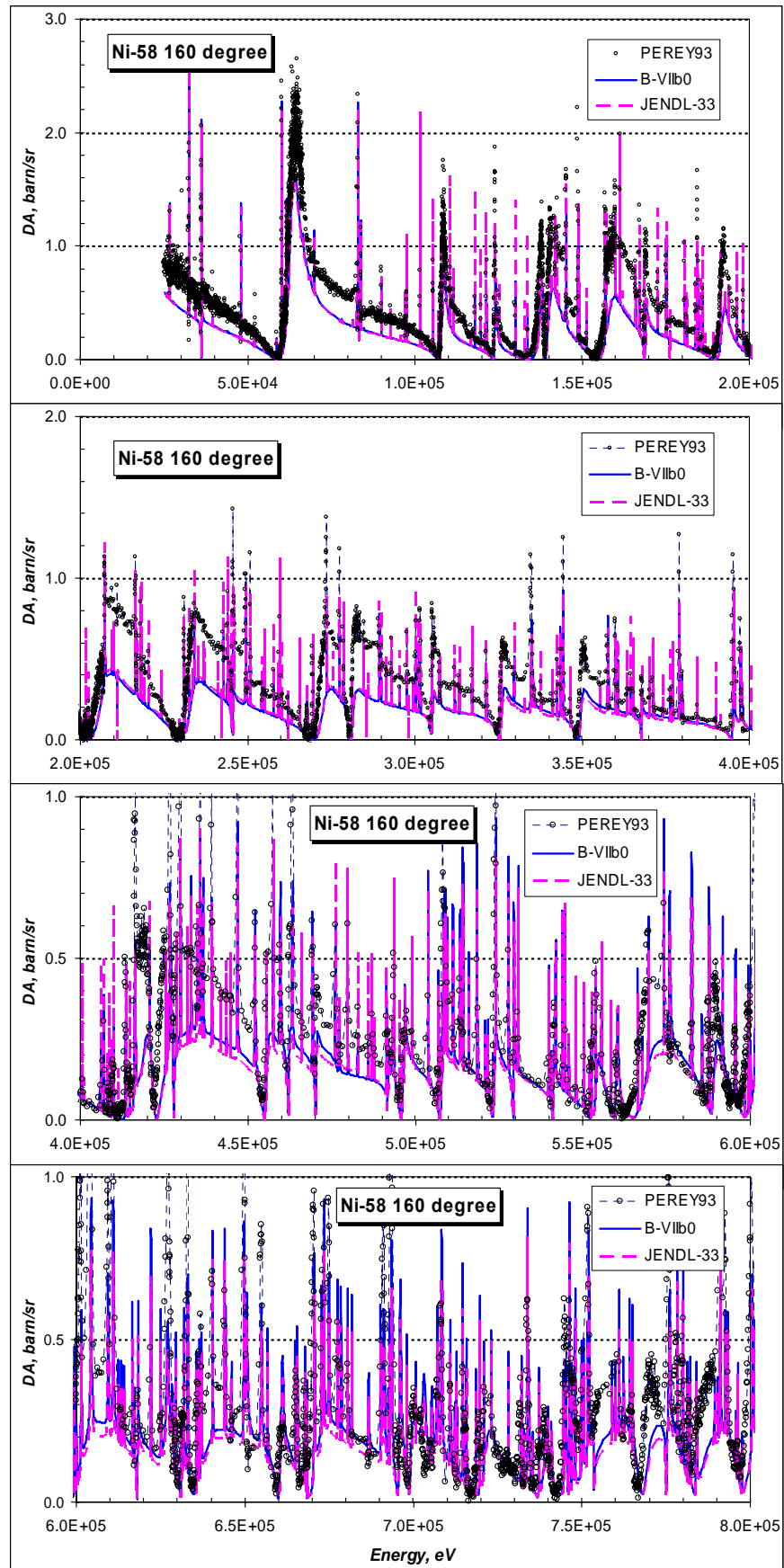


Рисунок 21 - Сравнение оцененных и экспериментальных угловых распределений.

Из приведенного на рисунках 20 - 21 сравнения видно, что оцененные кривые хорошо согласуются друг с другом. В области энергий до 600 кэВ обе оценки значительно различаются от экспериментальных значений угловых распределений, выше 600 кэВ экспериментальные данные и оцененные кривые приемлемо согласуются друг с другом. Отметим, что обработка экспериментальных данных группы Perey et al носит предварительный характер.

5. Энергетические распределения нейтронов

5.1. Энергетические распределения при неупругом рассеянии нейтронов

В оценке ENDF/B-VIIb энерго-угловые распределения приводятся для реакций с $MT=16, 22, 28, 51, 91, 103, 107$. Для всех перечисленных реакций данные представляют собой энерго-угловые распределения для вылетающих частиц, остаточного ядра и фотонов, образующихся в процессе реакции. Угловые распределения учитываются с помощью полиномов Лежандра.

В оценке JEFF-3.1, в которой оценка ENDF/B использовалась как стартовая, корректировка коснулась закона интерполяции данных для налетающих частиц. INT-12 заменен на INT=2. Кроме этого, величину нейтронного спектра неупруго рассеянных нейтронов слегка уменьшили выше 7ю5 МэВ для лучшего согласования со спектром испускаемых нейтронов при 14 МэВ , промеренных группой Vonach et al.

В оценке JENDL-3.3 энерго-угловые распределения приводятся для следующих типов реакций $MT=16, 22, 28, 91, 203, 204, 205, 206, 207$, данные для которых взяты из JENDL Fusion files.

Для реакций с $MT=16, 22, 28, 91$ данные представляют собой энерго-угловые распределения только для вылетающих нейтронов.

Для реакций с $MT=203, 204, 205, 206, 207$ энерго-угловые распределения приводятся для совокупных вылетающих заряженных частиц.

Выводы

Представление энерго-угловых распределений в оценке JEFF-3.1 (как откорректированной версии оценки ENDF/B), по-видимому, предпочтительнее оценки JENDL-3.3. Наряду с описанием вылетающих частиц и спектров образующихся фотонов дополнительно приводится информация об остаточных ядрах, т.е. описание процессов является более общим.

6. Образование фотонов

Для Ni58 представлены две оценки фотонных данных в библиотеках ENDF/B-VIIb (~JEF3.1) и JENDL3.3.

В оценке ENDF/B фотонные данные представлены непосредственно для следующих реакций $MT=51-58, 102$. Для реакций $MT=16, 22, 28, 91, 103$ и 107 спектры фотонов задаются в секции MF=6 с помощью данных по энерго-угловым распределениям.

В JENDL фотонные данные представлены для реакций $MT=16, 22, 28, 51-65, 91, 102, 103, 107$.

6.1. Множественности образования фотонов и вероятности переходов

Множественности фотонов в нейтронных реакциях $MT=16, 22, 28, 91, 103, 107$ в JENDL были получены по программе GNASH. Фотоны неупругого рассеяния в представлены с помощью 15-ти уровней и континуумом с энергией 3.932 MeV ,

В оценке ENDF/B данные представлены для 8 уровней, которые, как видно из таблицы 3, практически совпадают. Область континуума уровней начинается ниже по энергии, чем в JENDL - при 3.52 MeV .

Таблица 3- Энергии уровней неупругого рассеяния

| N | JENDL3.3. | ENDF/B-VII |
|----|-----------|------------|
| 51 | 1.454E+06 | 1.454E+06 |
| 52 | 2.459E+06 | 2.459E+06 |
| 53 | 2.776E+06 | 2.776E+06 |
| 54 | 2.902E+06 | 2.903E+06 |
| 55 | 2.942E+06 | 2.943E+06 |
| 56 | 3.038E+06 | 3.038E+06 |
| 57 | 3.263E+06 | 3.265E+06 |
| 58 | 3.420E+06 | 3.421E+06 |
| 59 | 3.524E+06 | |
| 60 | 3.531E+06 | |
| 61 | 3.593E+06 | |
| 62 | 3.620E+06 | |
| 63 | 3.774E+06 | |
| 64 | 3.898E+06 | |
| 65 | 4.475E+06 | |
| 91 | 3.932E+06 | 3.520E+06 |

В оценке ENDF/B для 8 уровней заданы вероятности переходов, взятые из работы D.M. Hetric, C.Y. Fu, and D.C. Larcon, "Calculated neutron-induced cross sections for 58,60Ni from 1 TO 20 MEV and comparison with experiment," ORNL/TM-10219, ENDF-344 (1987).

В оценке JENDL для неупругого рассеяния также даны вероятности переходов, которые до 58-го уровня такие же, как и в ENDF/B.

Фотоны радиационного захвата в JENDL получены из энергетического баланса. В ENDF/B данные получены по программе TNG.

6.2. Угловое распределение фотонов.

В обеих оценках для всех фотонов в нейтронных реакциях определено изотропное угловое распределение.

6.3 Непрерывные энергетические спектры фотонов.

В оценке JENDL энергетические спектры для фотонов нейтронных реакций MT=16,22,28,91,103,107 были посчитаны по программе GNASH. Спектры фотонов радиационного захвата были получены по программе Casthy с учетом экспериментальных данных.

В ENDF/B непосредственно в секции MF=15 есть только спектры радиационного захвата, которые посчитаны по программе TNG. Спектры для реакций MT=16, 22, 28, 91, 103, 107 приведены в секции MF=6.

Выводы:

Описание фотонных данных в оценке JENDL-3.3 охватывает больше нейтронных реакций. Для тех реакций, где оценки пересекаются, нельзя отдать предпочтение какой-то оценки.

7. Заключение

7.1. Выводы Для Ni-58 в РОСФОНД следует принять нейтронные данные, находящиеся в библиотеке JEFF-3.1. Данные о ковариациях удалить, поскольку они не верифицированы.

Материалу присвоить номер МАТ=2858.

Желательно, в дальнейшем, устранить все отмеченные в ходе анализа данных замечания и неточности в принятой оценке.

7.2. Автор обоснования файла оцененных данных

Кощев В.Н.

28.4. Никель-59

Долгоживущий, радиоактивный изотоп с периодом полураспада $T_{1/2}=7.6E+4$ лет.
Способ радиоактивного распада – $\epsilon + \beta$ распад.

1. Общие характеристики

$Z=28$

$A=58.934\ 346\ 7 \pm 0.000\ 000\ 7$

$A_{wr}=58.428\ 072\ 1 \pm 0.000\ 000\ 7$

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|----------------|----------|---------------------------|----------------------------|
| 16 | (n,2n) | -8.9972 | 9.1512 | Ni-58 |
| 22 | (n,na) | -6.0974 | 6.2018 | Fe-55(2.73y) |
| 28 | (n,np) | -8.5950 | 8.7421 | Co-58(70.88d) |
| 32 | (n,nd) | -14.9410 | 15.1967 | Co-57(271.8d) |
| 34 | (n,nHe3) | -15.4750 | 15.7399 | Fe-56 |
| 102 | (n, γ) | 11.2400 | 0.0000 | Ni-60 |
| 103 | (n,p) | 1.5840 | 0.0000 | Co-59 |
| 104 | (n,d) | -6.3709 | 6.4799 | Co-58(70.88d) |
| 105 | (n,t) | -8.6856 | 8.8343 | Co-57(271.8d) |
| 106 | (n,He3) | -7.8311 | 7.9651 | Fe-57 |
| 107 | (n,a) | 4.8780 | 0.0000 | Fe-56 |
| 111 | (n,2p) | -5.5056 | 5.5998 | Fe-58 |

Схема уровней: оценка неупругого рассеяния отсутствует

Радиоактивность: период полураспада $T_{1/2}=7.6E+4$ лет

Для общего представления на Рисунке 1 представлен энергетический ход сечений полного взаимодействия и его составляющих (упругого рассеяния и неупругих взаимодействий) в области энергий от 1 кэВ до 10 МэВ.

На Рисунке 2 аналогичное представление энергетической зависимости приводится для основных составляющих сечения неупругих взаимодействий (сечение радиационного захвата, сечения реакции (n,p) и сечение реакции (n,a)).

На Рисунке 3 приводится энергетическая зависимость сечений пороговых реакций.

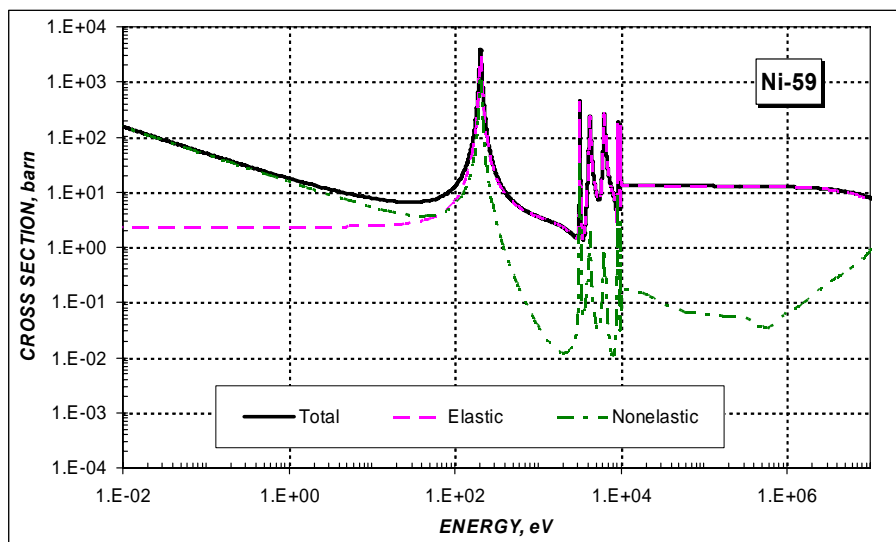


Рисунок 1 – Зависимость полного сечения и его составляющие на Ni-59.

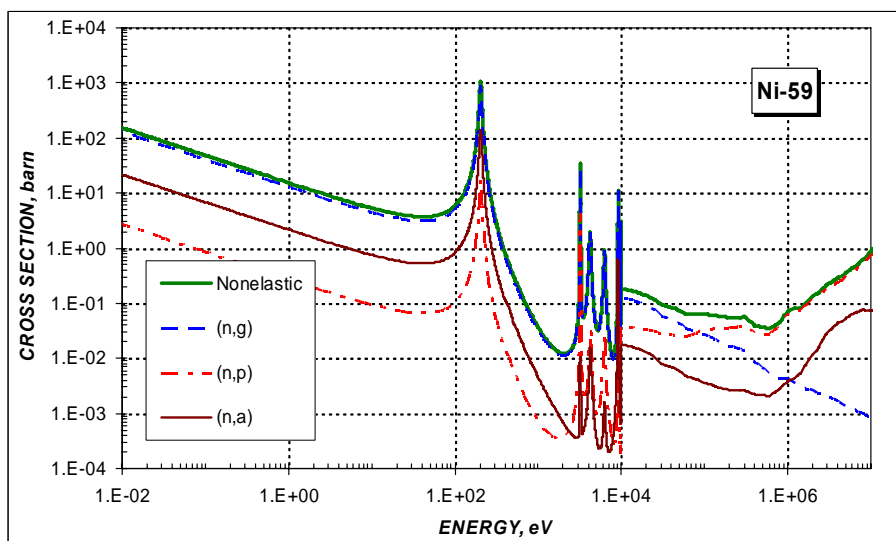


Рисунок 2 – Сечения неупругих взаимодействий и его составляющие на Ni-59.

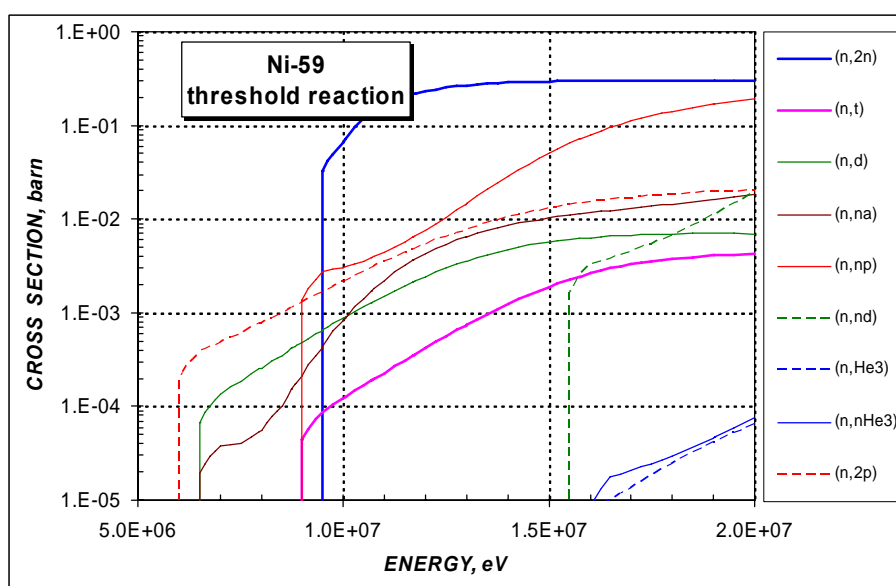


Рисунок 3 – Энергетическая зависимость пороговых сечений на Ni-59.

2. Резонансная область нейтронных реакций

Спин и четность $J^\pi = 3/2^-$;

Радиус рассеяния: $R = 0.650 \cdot 10^{-12}$ см.

Область разрешенных резонансов.

Набор резонансных параметров сделан на основе сборника резонансных параметров под редакцией Мухабхаба (BNL-235, 4-е издание 1981) и содержит 9 S-резонансов.

Область разрешенных резонансов от 1E-5 эВ до 10.0 кэВ.

В резонансной области в подложку полного сечения включена сумма сечений реакций (n,p) + (n,a).

3. Сечения нейтронных реакций

3.1. Полное сечение

В резонансной области полное сечение получено по резонансным параметрам, выше – как сумма парциальных сечений. На рисунке 4 показано сравнение оцененного сечения с последними экспериментальными данными.

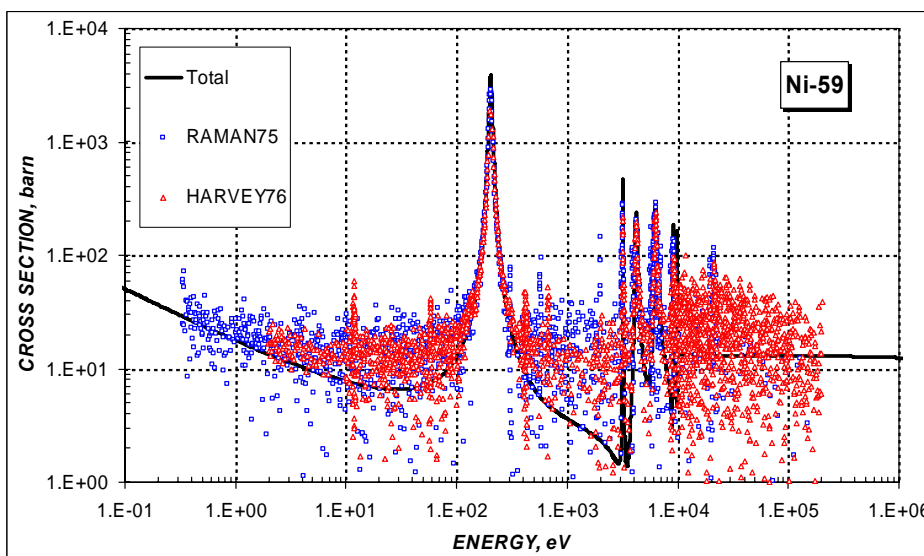


Рисунок 4 – Сравнение оцененного полного сечения с экспериментальными данными.

Из рисунка 5 видно, что, в целом, резонансная структура полного сечения отражена правильно. В эксперименте наблюдаются резонансы, не присутствующие в оценке. Использование имеющихся детальных экспериментальных данных для обновления набора резонансных параметров – задача будущего.

3.2. Сечения парциальных реакций

Для парциальных реакций экспериментальные данные в библиотеке EXFOR практически отсутствуют. Исключение составляют измерения сечений в тепловой точке для реакций радиационного захвата, (n,p), (n,a). Имеется, также, измерение сечения реакции (n,2n) в точке 14.1 МэВ.

Ниже в таблице 1 приводится сравнение имеющейся экспериментальной информации с оцененными значениями для перечисленных выше реакций.

Таблица 1 – Сравнение оцененных и экспериментальных сечений.

| | | |
|---|------------|--------------------------------|
| | | <i>(n,g), барн (0.0253 эВ)</i> |
| 1 | Harvey76 | 78. ± 8. |
| 2 | Jurney75-1 | 53. ± 4. |
| 3 | Raman2004 | 73.7 ± 1.8 |
| 4 | Jurney75-2 | 51. ± 8. |
| | Оценка | 80.4 |
| | | |
| | | <i>(n,p), барн (0.0253 эВ)</i> |
| 1 | Harvey76 | 1.43 ± 0.13 |
| 2 | Donald76 | 4.0 ± 1.0 |
| | Оценка | 1.69 |
| | | |
| | | <i>(n,a), барн (0.0253 эВ)</i> |
| 1 | Eiland74 | 13.7 ± 1.2 |
| 2 | Werner75-1 | 18.0 ± 1.6 |
| 3 | Werner75-2 | 11.4 ± 0.8 |
| 4 | Harvey76 | 22.3 ± 1.6 |
| | Оценка | 13.6 |
| | | |
| | | <i>(n,2n), мбрн (14.1 МэВ)</i> |
| 1 | Kimura90 | 25.3 ± 0.8 |
| | Оценка | 286. |

Из приведенного в таблице 1 сравнения видно, что оцененные значения находятся в хорошем согласии с экспериментом Harvey76, за исключением реакции (n,a), где оценка отличается от эксперимента Harvey76 ~ в 2 раза, но согласуется с другими экспериментальными данными.

Имеется значительное расхождение в значениях сечений для реакции (n,2n) в энергетической точке 14.1 МэВ.

4. Угловые распределения нейтронов

Угловые распределения для упругого рассеяния взяты из оценки JENDL-2 для Ni-61. Для остальных реакций угловые распределения предполагаются изотропными.

4. Образование фотонов в нейтронных реакциях

Множественности фотонов при неупругих взаимодействиях (MT=3) приводятся выше 1.0 МэВ, они рассчитаны по программе MAVRINA. Множественности фотонов при радиационном захвате нейтронов (MT=102) приводятся ниже 1.0 МэВ, они рассчитаны по программе GNASH.

Угловые распределения фотонов приняты изотропными.

Энергетические спектры представляют собой нормированные распределения для суммарных неупругих процессов взаимодействия (MT=3) выше 1.0 МэВ, при радиационном захвате нейтрона (MT=102) ниже 1.0 МэВ.

6. Заключение

Оцененные данные, принятые в РОСФОНД.

В РОСФОНД принять нейтронные данные из JEFF-3.1 (Gruppelaar, Vd.Kamp, Кореску et al., 1987 г. rev. 2005), поскольку это единственная оценка, содержащая полный набор данных для задач расчета переноса нейтронов.

Материалу присвоить номер МАТ=2859.

Автор обоснования отбора оцененных данных

Кощев В.Н.

Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle\sigma\rangle$ на спектре Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$ |
|------------------------|-----------------------------|----|--|
| Упругое рассеяние | | | |
| Рад. захват | | | |
| Реакция (n,p) | - | - | |
| Реакция (n,d) | - | - | |
| Реакция (n,t) | - | - | |
| Реакция (n, α) | - | - | |
| Реакция (n,2n) | - | - | |

28.5. Никель-60

Оцененные данные рассматриваются в диапазоне энергий до 20 МэВ. Различные модификации, выполненные выше 20 МэВ, не комментируются.

Экспериментальные данные, используемые при сравнении с оцененными кривыми, взяты из интерактивной библиотеки EXFOR-CINDA (Database and Retrieval System, version 1.80, June 2005).

1. Общие характеристики

$Z=28$

$A=59.930\ 786\ 4 \pm 0.000\ 000\ 7$

$A_{wr}=59.415\ 952\ 2 \pm 0.000\ 000\ 7$

Содержание в естественной смеси: - 26.223%

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|----------------|----------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | (n,n') | -1.3300 | 1.3524 | Ni-60 |
| 16 | (n,2n) | -11.3850 | 11.5766 | Ni-59(7.6E4y) |
| 22 | (n,na) | -6.2910 | 6.3969 | Fe-56 |
| 28 | (n,np) | -9.5296 | 9.6900 | Co-59 |
| 102 | (n, γ) | 7.8200 | 0.0000 | Ni-61 |
| 103 | (n,p) | -2.0415 | 2.0759 | Co-60(5.272y) |
| 104 | (n,d) | -7.3083 | 7.4313 | Co-59 |
| 105 | (n,t) | -11.5010 | 11.6940 | Co-58(70.82d) |
| 106 | (n,He3) | -9.1742 | 9.3286 | Fe-58 |
| 107 | (n,a) | 1.3553 | 0.0000 | Fe-57 |

Схема уровней: (согласно оценке JEFF-3.1)

| MT | LEVEL ENERGY (MEV) | SPIN-PARITY |
|----------|--------------------|-------------|
| | 0.0 | 0+ |
| 51 | 1.3300 | 2+ |
| 52 | 2.1600 | 2+ |
| 53 | 2.2900 | 0+ |
| 54 | 2.5100 | 4+ |
| 55 | 2.6300 | 3+ |
| 56 | 3.1200 | 4+ |
| 57 | 3.1240 | 2+ |
| 58 | 3.1860 | 1+ |
| 59 | 3.1940 | 2+ |
| 60 | 3.2700 | 2+ |
| 61 | 3.3180 | 0+ |
| 91(cont) | 3.3390 | |

Радиоактивность: не радиоактивен.

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^{\pi} = 0^{+}$;

2.2. Радиус рассеяния: $R = 0.600 \cdot 10^{-12}$ см.

2.3. Область разрешенных резонансов.

Ниже рассматриваются пять оценок нейтронных данных, а именно – ENDF/B-VII betha1 version, BROND-2.2, FOND-2.2, JEFF-3.1 и JENDL-3.3. Короткая информация по каждой оценке представлена в **таблице 1**. По каждой оценке приводятся краткие пояснения.

ENDF/B

Последняя версия (ENDF/B-VIIb1) в области энергий ниже 20 МэВ содержит оценку ORNL, выполненную в 1991 году авторским коллективом: D.Larson, C.Perey, D.Hetrick, C.Fu.

Основные моменты:

По сравнению со стартовой версией (1989) изменены параметры резонансных уровней в области энергий $1.E-5$ – 450 кэВ на основе анализа с помощью SAMMY экспериментальных данных Perey et al.(ORRLA).

Кроме того удалена матрица переводов при упругом рассеянии нейтронов.

В стартовой версии используются программы DWUCK, в которой ядерная модель описывается THE DISTORTED WAVE BORN APPROXIMATION (DWBA) и программа TNG, в которой используется формализм THE HAUSER-FESHBACH.

С помощью TNG получены угловые и энергетические распределения частиц, испускаемых в реакциях по модели компаунд ядра и предравновесного процесса. При этом обеспечивается согласованность между всеми реакциями и обеспечивается энергетический баланс оцененных данных.

Область резонансных энергий от $1.E-5$ эВ до 450 кэВ. Резонансные параметры для формализма Райха-Мура получены с помощью программы SAMMY при анализе данных экспериментов по пропусканию. В области энергий 450 – 812 кэВ в захват добавляется подложки (MF3, MT102) для согласования с усредненными экспериментальными данными команды S.M.Perey и др.

Полное сечение выше 450 кэВ получено при анализе нескольких наборов измерений с высоким разрешением, которые также использовались и при получении резонансных параметров.

Сечение радиационного захвата выше 450 кэВ получено на основе расчетов по TNG программе.

Сечения реакций с вылетом заряженных частиц получены при помощи TNG расчетов. При этом учитывались немногочисленные экспериментальные данные.

JEFF-3.1

Главными исполнителями оценки являются S.Tagesen, H.Vonach and A.Wallner (IRK) и A.Trkov (IJS). Основные моменты оценки состоят в следующем:

В качестве стартовой версии оцененных данных взята оценка Ларсона и др. из Oak Ridge (ENDF/B-VI Revision 1)

Все нейтронные сечения выше резонансной области (450 кэВ) были переоценены и пополнены ковариационными матрицами.

Оценка проводилась в три этапа:

На первом этапе были модифицированы все функции возбуждения на основе всей совокупности экспериментальных данных, имеющихся в библиотеке EXFOR.

На втором этапе была выполнена совместная оценка сечений, в результате которых получают альфа-частицы и дейтоны.

На третьем этапе проводилась оценка всех сечений от излишней информации.

JENDL-3.3

В основе лежит оценка, выполненная для JENDL-3 в 1987 году. В 1990 году проведена модификация данных, а именно

- изменены энергии порогов в разделе mf=5 для реакций mt=16, 22 и 28;
- небольшая модификация данных проведена в разделе mf=12, mt=16, 91 и 102.

В 1993 году для версии JENDL-3.2 часть данных была переоценена.

- (4,16-28), (4,91) – данные взяты из JENDL fusion file;
- (5,16-91) – данные взяты из JENDL fusion file;
- (12,102) – ниже 500 кэВ пересмотрено S.Igasasi;
- (15,102) – ниже 500 кэВ пересмотрено S.Igasasi.

В 2000 году данные переоценены N.Yamaturo (TIT) и скомпилированы K.Shibata (JAERI) для последующей версии библиотеки JENDL-3.3. Изменения коснулись данных в следующих разделах

MF3

- MT1 сечение переоценено выше 557 кэВ;
- MT2 переоценено с учетом баланса сечений;
- MT16, 22, 28, 103, 104, 105, 106, 107, 111, 203, 204, 205, 206, 207 сечения вычислено с помощью SINCROS-II.

MF6

- MT16, 22, 28, 91, 203, 204, 205, 206, 207 взяты из JENDL fusion file.
- MF12, MT102 и MF15, MT102 пересмотрены.

В 2002 году для ковариационных матриц использованы результаты работы Shibata и Oh.

ФОНД-2.2

Для Ni-60 после анализа имевшихся в то время (~2000 г) оцененных нейтронных данных в библиотеку ФОНД-2.2 включена оценка ORNL, выполненная в 1989 году авторским коллективом: D.Larson, C.Perey, D.Hetrick, C.Fu. Таким образом, нейтронные данные из ФОНД-2.2 совпадают с оценкой из библиотеки EMDF/B-VI ниже 20 МэВ.

БРОНД-2.2

В основе лежит оценка для N-60, выполненная в 1985 году Блохиным А., Игнатьюком А. и др.

Основные моменты оценки:

В области резонансных энергий (от $1.E-5$ эВ до 690 кэВ) сечения восстанавливаются с помощью двух псевдоизотопов, имеющих разные границы области разрешенных и неразрешенных резонансов. Первый псевдоизотоп содержит информацию о резонансных параметрах S-волны. Область разрешенных резонансов до 590 кэВ, выше – область неразрешенных резонансов. Второй – содержит данные о резонансных параметрах P- и D-волны. Область разрешенных резонансов до 150 кэВ, выше – область неразрешенных резонансов.

В области разрешенных резонансов рекомендован формализм Брейта-Вигнера.

В области высоких энергий сечения и угловые распределения вычислены по оптической модели.

Сечения пороговых реакций рассчитывались с учетом предравновесного процесса.

ВЫВОДЫ:

В области резонансных энергий имеется три оценки резонансных параметров, а именно JENDL-3.3, ENDF/B-VI и БРОНД-2.2.

В **таблице 2** приводятся некоторые интегральные характеристики, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY (version 6.13)

Таблица 1 – Общая информация об оцененных нейтронных данных для 28-Ni-60 из различных библиотек.

| | ENDF/B-VIIb1 | JENDL-3.3 | BROND-2.2 | FOND-2.2 | JEFF-3.1 |
|--------|---|--|--|---|---|
| Оценка | EVAL-SEP97 S.CHIBA, M.CHADWICK, D.LARSON Rev.3 | EVAL-MAR87 S.Iijima, REV4-MAY00 | EVAL-MAY85 A.I.BLOKNIN, A.V.IGNATYUK | EVAL-OCT89 D.Larson, C.Perey, D. Hetrick, and C.Y. Fu (ORNL) Rev.1. | EVAL-JAN00 S.Tagesen, H.Vonach and A.Wallner (EJC) |
| MF=2 | RRR 0-450 keV (RM) | RRR 0-456 keV (MLBW) | RRR 0-490 keV (MLBW) URR 490-590 keV | RRR 0-450 keV (RM) | RRR 0-450 keV (RM) |
| MF=3 | MT=1,2,3,4, 5 ,16,22,28, 51-59,60,61,91, 102,103,104,107 | MT=1,2,4,16,22,28, 51-61,91,102,103, 104,105,106,107,111, 203,204,205,206,207 | MT=1,2,4,16,22,28, 51-72,91, 102,103,107,251 | MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-61,91, 102,103,104,107 | MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-61,91,102,103, 104,105,106,107 |
| MF=4 | MT=2 | MT=2,51-61 | MT=2, 16,22,28, 51-72,91 | MT=2 | MT=2 |
| MF=5 | | | MT=16,28,91 | | |
| MF=6 | MT= 5 ,16,22,28, 51-61,91,103,107 | MT=16,22,28,91, 203,204,205,206,207 | | MT=16,22,28, 51-61,91,103,107 | MT=16,22,28, 51-61,91,103,107 |
| MF=12 | MT=51-61,102 | MT=16,22,28, 51-61,91,102,103,107 | | MT=51-61,102 | MT=51-61,102 |
| MF=14 | MT=51-61,102 | MT=16,22,28, 51-61,102,103,107 | | MT=51-61,102 | MT=51-61,102 |
| MF=15 | MT=102 | MT=16,22,28,91, 102,103,107 | | MT=102 | MT=102 |
| MF=33 | MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-61,91, 102,103,104,107 | MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-61, 102,103,104,105,107 | | MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-61,91, 102,103,104,107 | MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-61,91,102,103, 104,105,106,107, 851,852,853 |
| MF=34 | | MT=2 | | | |

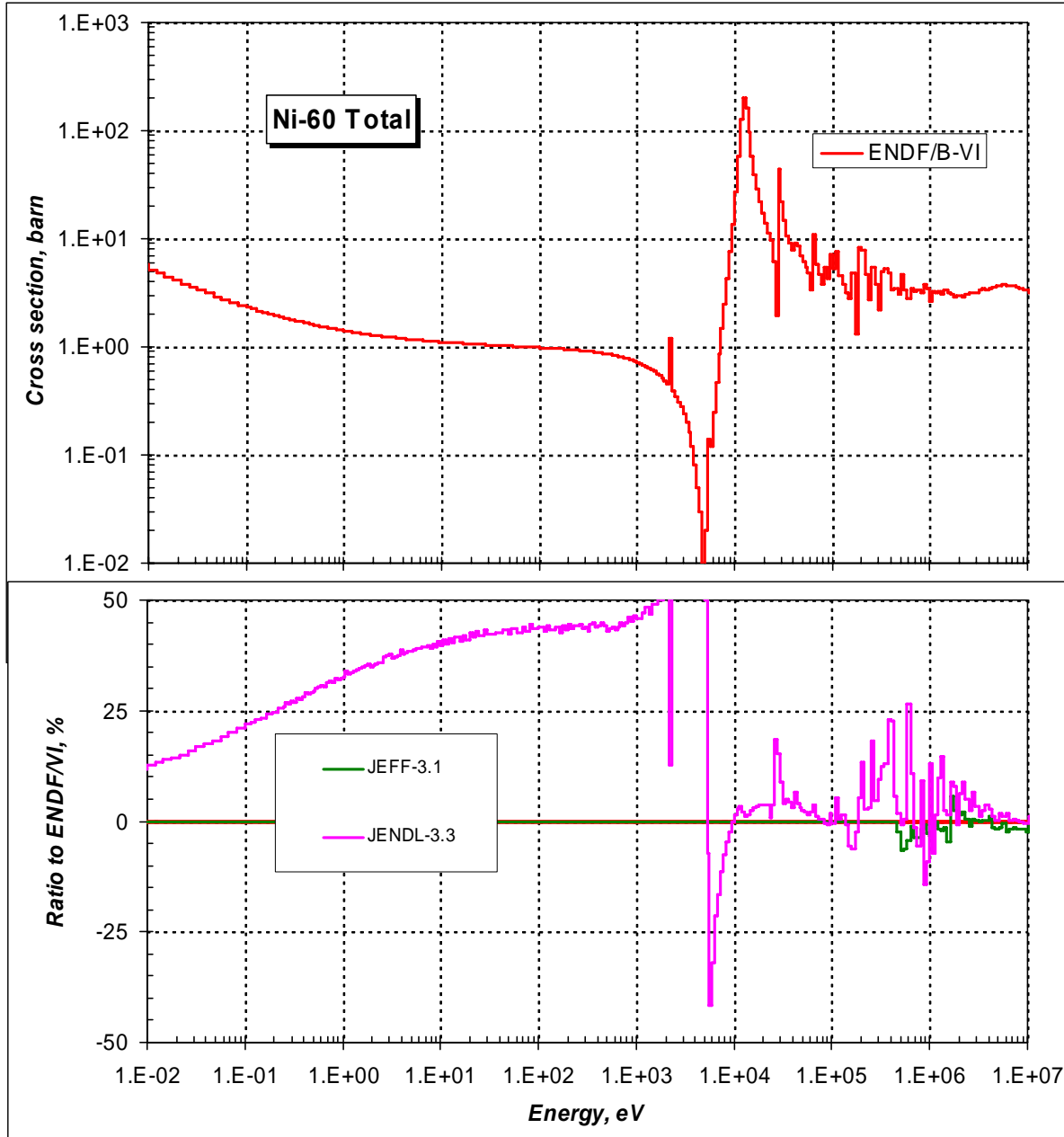
Таблица 2 – Некоторые характеристики оцененных нейтронных данных для 28-Ni-60 из различных библиотек.

| LIB | MT | Reaction | Sig(2200) | Sig(Ezero) | Avg-Sigma | G-fact | Res Integ | Sig(Fiss) | Sig(E14) |
|-----------------------|-----|----------|------------------|-------------|------------|------------------|-------------|-------------|-------------|
| ENDF/B70 | 1 | Total | 3.75079E+00 | 3.72098E+00 | 3.8467E+00 | 1.03747 | 8.01940E+01 | 3.48534E+00 | 2.77742E+00 |
| BROND-2 | 1 | Total | 3.43599E+00 | 3.40787E+00 | 3.5132E+00 | 1.03434 | 8.58375E+01 | 3.93423E+00 | 2.76050E+00 |
| FOND-2.2 | 1 | Total | 3.75079E+00 | 3.72098E+00 | 3.8467E+00 | 1.03747 | 8.24630E+01 | 3.48696E+00 | 2.77742E+00 |
| JEFF-3.1 | 1 | Total | 3.75079E+00 | 3.72098E+00 | 3.8468E+00 | 1.03749 | 8.01940E+01 | 3.46208E+00 | 2.72306E+00 |
| JENDL-3.3 | 1 | Total | 4.33047E+00 | 4.29914E+00 | 4.4819E+00 | 1.04697 | 8.58596E+01 | 3.63165E+00 | 2.76128E+00 |
| ENDF/B70 | 2 | Elastic | 9.84996E-01 | 9.84822E-01 | 1.1112E+00 | 1.14121 | 7.88195E+01 | 2.94225E+00 | 1.39076E+00 |
| BROND-2 | 2 | Elastic | 8.24811E-01 | 8.24665E-01 | 9.3049E-01 | 1.14121 | 8.44942E+01 | 3.42037E+00 | 1.45335E+00 |
| FOND-2.2 | 2 | Elastic | 9.84996E-01 | 9.84822E-01 | 1.1112E+00 | 1.14121 | 8.10878E+01 | 2.94387E+00 | 1.39076E+00 |
| JEFF-3.1 | 2 | Elastic | 9.84996E-01 | 9.84822E-01 | 1.1112E+00 | 1.14121 | 7.88195E+01 | 2.93546E+00 | 1.27690E+00 |
| JENDL-3.3 | 2 | Elastic | 1.42862E+00 | 1.42837E+00 | 1.6117E+00 | 1.14121 | 8.44251E+01 | 3.17719E+00 | 1.34178E+00 |
| ENDF/B70 | 4 | Inelas | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 5.34595E-01 | 7.21862E-01 |
| BROND-2 | 4 | Inelas | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 5.04600E-01 | 7.13160E-01 |
| FOND-2.2 | 4 | Inelas | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 5.34595E-01 | 7.21862E-01 |
| JEFF-3.1 | 4 | Inelas | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 5.16343E-01 | 7.15609E-01 |
| JENDL-3.3 | 4 | Inelas | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 4.43577E-01 | 6.57030E-01 |
| ENDF/B70 | 16 | n,2n | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.01001E-04 | 3.13587E-01 |
| BROND-2 | 16 | n,2n | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.12085E-04 | 3.24000E-01 |
| FOND-2.2 | 16 | n,2n | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.01001E-04 | 3.13587E-01 |
| JEFF-3.1 | 16 | n,2n | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.14155E-04 | 3.71960E-01 |
| JENDL-3.3 | 16 | n,2n | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.18693E-04 | 3.88097E-01 |
| ENDF/B70 | 102 | n,gamma | 2.76579E+00 | 2.73616E+00 | 2.7355E+00 | 1.00052 | 1.37446E+00 | 4.24937E-03 | 2.86000E-04 |
| BROND-2 | 102 | n,gamma | 2.61117E+00 | 2.58320E+00 | 2.5827E+00 | 1.00058 | 1.34325E+00 | 5.10214E-03 | 9.85616E-04 |
| FOND-2.2 | 102 | n,gamma | 2.76579E+00 | 2.73616E+00 | 2.7355E+00 | 1.00052 | 1.37520E+00 | 4.24953E-03 | 2.86000E-04 |
| JEFF-3.1 | 102 | n,gamma | 2.76579E+00 | 2.73616E+00 | 2.7356E+00 | 1.00056 | 1.37446E+00 | 6.30046E-03 | 7.59600E-04 |
| JENDL-3.3 | 102 | n,gamma | 2.90186E+00 | 2.87077E+00 | 2.8702E+00 | 1.00058 | 1.43459E+00 | 6.43941E-03 | 6.96522E-05 |
| Mughabghab2003 | | | 2.9 ± 0.2 | | | 1.5 ± 0.2 | | | |
| ENDF/B70 | 103 | n,p | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 2.20864E-03 | 1.46500E-01 |
| BROND-2 | 103 | n,p | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 3.03955E-03 | 1.46000E-01 |
| FOND-2.2 | 103 | n,p | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 2.20864E-03 | 1.46500E-01 |
| JEFF-3.1 | 103 | n,p | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 2.47964E-03 | 1.50200E-01 |
| JENDL-3.3 | 103 | n,p | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 2.48703E-03 | 1.57690E-01 |
| ENDF/B70 | 104 | n,d | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 9.21753E-06 | 8.88220E-03 |
| FOND-2.2 | 104 | n,d | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 9.21753E-06 | 8.88220E-03 |
| JEFF-3.1 | 104 | n,d | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 9.33770E-06 | 8.94700E-03 |
| JENDL-3.3 | 104 | n,d | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.83501E-06 | 3.87760E-03 |
| JEFF-3.1 | 105 | n,t | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.79870E-07 | 1.18230E-07 |
| JENDL-3.3 | 105 | n,t | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 6.55911E-09 | 6.46683E-07 |
| JEFF-3.1 | 106 | n,He3 | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.49975E-09 | 3.00000E-07 |
| JENDL-3.3 | 106 | n,He3 | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 5.10772E-10 | 8.91274E-08 |
| ENDF/B70 | 107 | n,alpha | 1.23838E-15 | 1.26585E-15 | 3.2525E-15 | 2.65690 | 4.65538E-09 | 1.87374E-03 | 5.87340E-02 |
| BROND-2 | 107 | n,alpha | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 2.1514E-15 | 0.00000 | 2.49999E-09 | 9.92639E-04 | 6.30000E-02 |
| FOND-2.2 | 107 | n,alpha | 1.23838E-15 | 1.26585E-15 | 3.2525E-15 | 2.65690 | 4.65538E-09 | 1.87374E-03 | 5.87340E-02 |
| JEFF-3.1 | 107 | n,alpha | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.31698E-03 | 5.93330E-02 |
| JENDL-3.3 | 107 | n,alpha | 0.00000E+00 | 0.00000E+00 | 0.0000E+00 | 0.00000 | 0.00000E+00 | 1.78311E-03 | 6.82563E-02 |

3. Сечения нейтронных реакций

3.1. Полное сечение

На рисунке 1 представлены энергетический ход сечения полного взаимодействия из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1), переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотек JEFF-3.1 и JENDL-3.3. в области энергий 0.01 эВ -10 МэВ



Из рисунка 1 видно, что поведение кривых от тепловой точки до первого резонанса (~12.5 кэВ) в оценках ENDF/B и JENDL носит разный характер. Различия достигают более 50% в описании интерференционного минимума S-резонанса. В области резонансных энергий от 10 кэВ до ~ 1 МэВ различия достигают 25%, а выше 1.0 МэВ различия составляют ~10% и исчезают к 10 МэВ. Такое различие объясняется использованием различных формализмов для описания резонансного взаимодействия. В оценке ENDF/B используется формализм Райха-Мура, в оценке JENDL для восстановления резонансных сечений применяется многоуровневый формализм Брейта-Вигнера.

Ниже, на рисунке 2 показано сравнение экспериментальных данных с хорошим разрешением Perey91 и Harvey91 с оцененными кривыми в области энергии 100 эВ 10 кэВ.

Отметим, что сечения из библиотеки БРОНД-2 не рассматривалось, поскольку при ее компиляции не учитывались экспериментальные данные, выполненные с высоким разрешением в последующие после оценки годы.

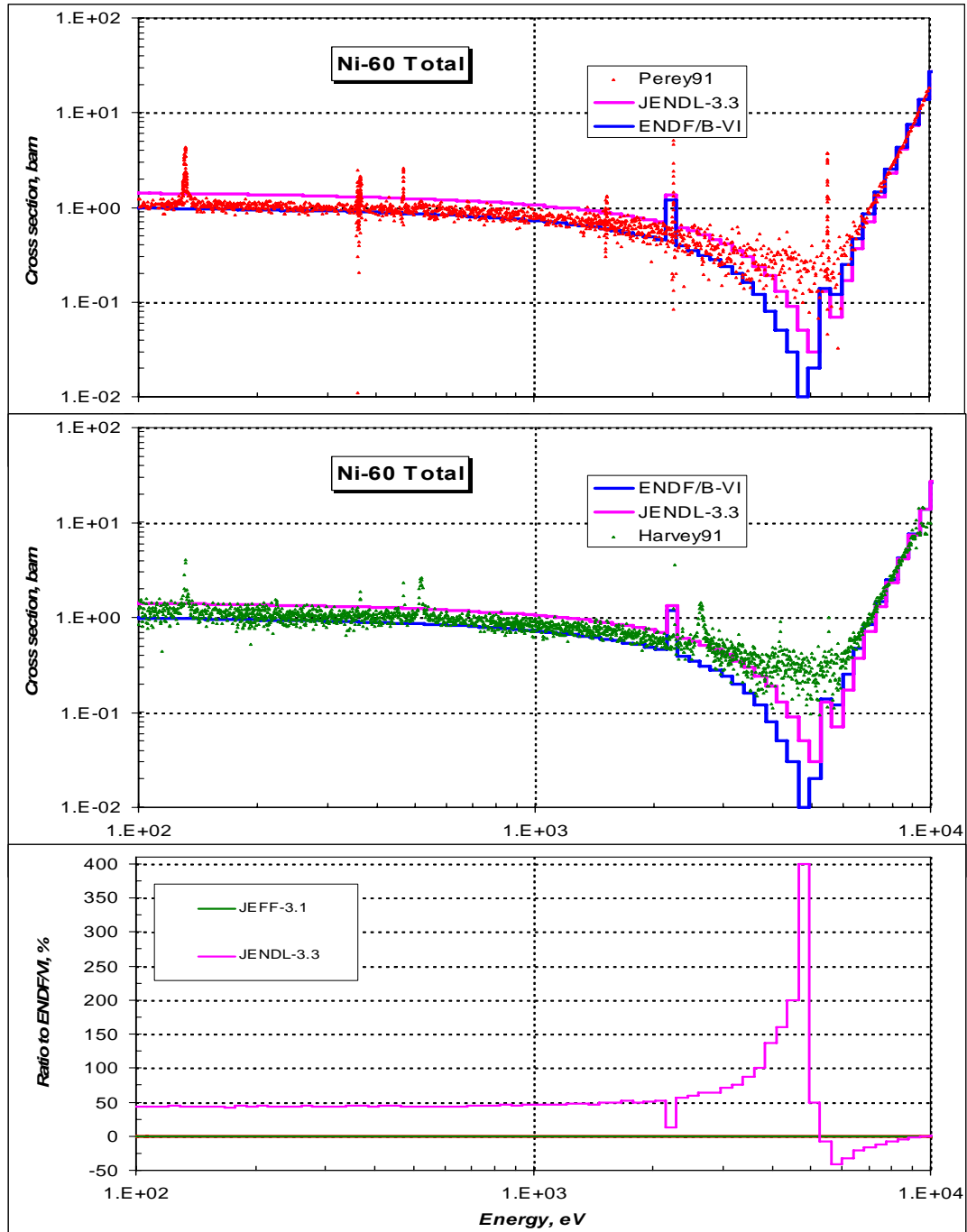


Рисунок 2 – Ход полного сечения Ni-58 в области энергий 100 эВ – 10 кэВ.

Из представленной на рисунке 2 информации видно, что различий между JEFF-3.1 и ENDF/B-VI нет. В тоже время, различия между JENDL-3.3 и ENDF/B-VI систематически различаются на $\sim 50\%$ до первого резонанса. Форма описания хода сечений одинакова, однако в JENDL ход сечения систематически выше совокупности

экспериментальных данных. Интерференционный минимум в этой оценке завышен. Максимум резонанса обе оценки описывают хорошо.

На рисунке 3 сравнивается ход сечения из ENDF/B-VI и JENDL-3.3 в области энергий от 1.0 - 2.0 МэВ с имеющимися детальными экспериментальными данными Brusegan94 (0.5 – 20 МэВ). Видно, что экспериментальные данные Brusegan'a представляют собой более подробную резонансную структуру сечения, которые принимались во внимание для оценки JEFF-3.1, но не учитывались при оценке JENDL-3.3.

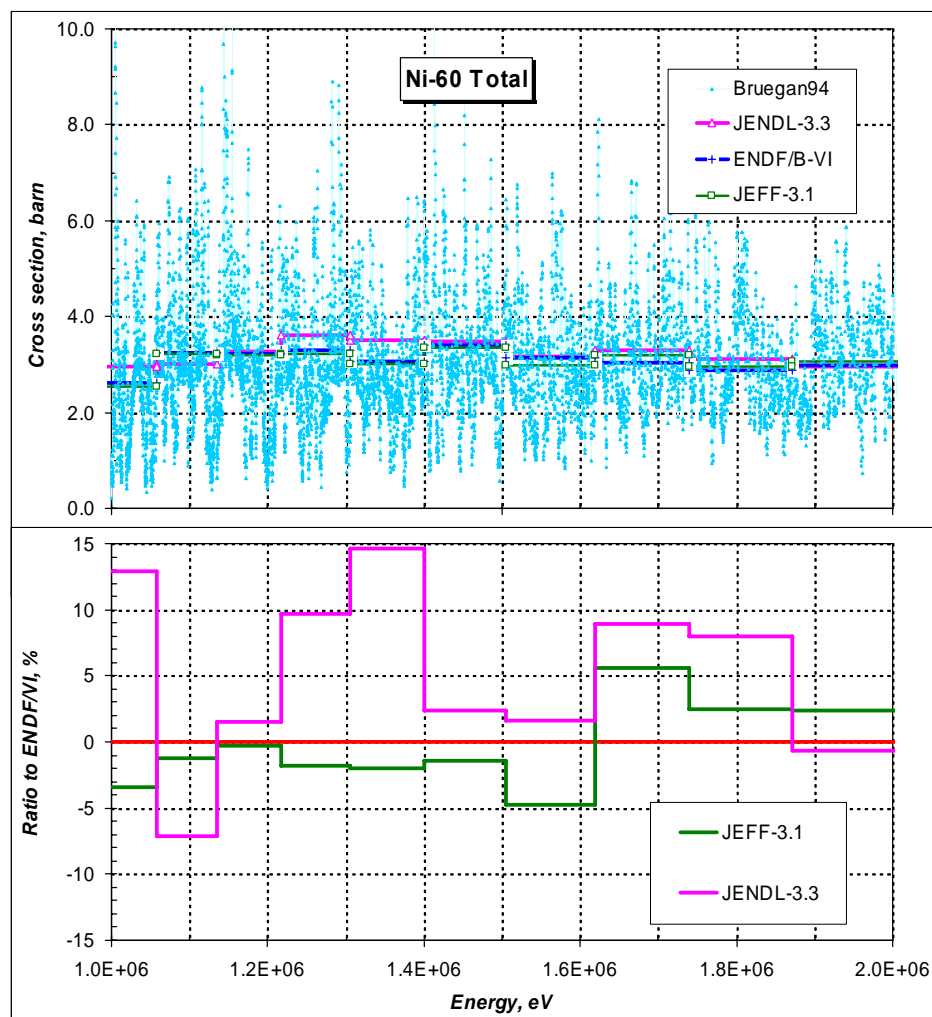


Рисунок 3 – Сравнение полного сечения Ni-60 в области энергий 1 – 10 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния

На рисунке 4 показан энергетический ход сечения упругого рассеяния нейтронов из библиотеки ENDF/B-VII, переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотек JEFF-3.1 и JENDL-3.3. в области энергий 10 эВ -10 МэВ, где, как было видно выше, различия в оценках максимальны.

Как и для полного сечения различия, в основном, возникают между оценками ENDF/B и JENDL. Они носят характер аналогичный расхождением между оценками в полном сечении.

Имеющиеся немногочисленные экспериментальные данные по сечению упругого рассеяния нейтронов находятся в области энергий выше 1 МэВ. Сравнение сечений в этой области показано на рисунке 5. Оценки JEFF и ENDF/B находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

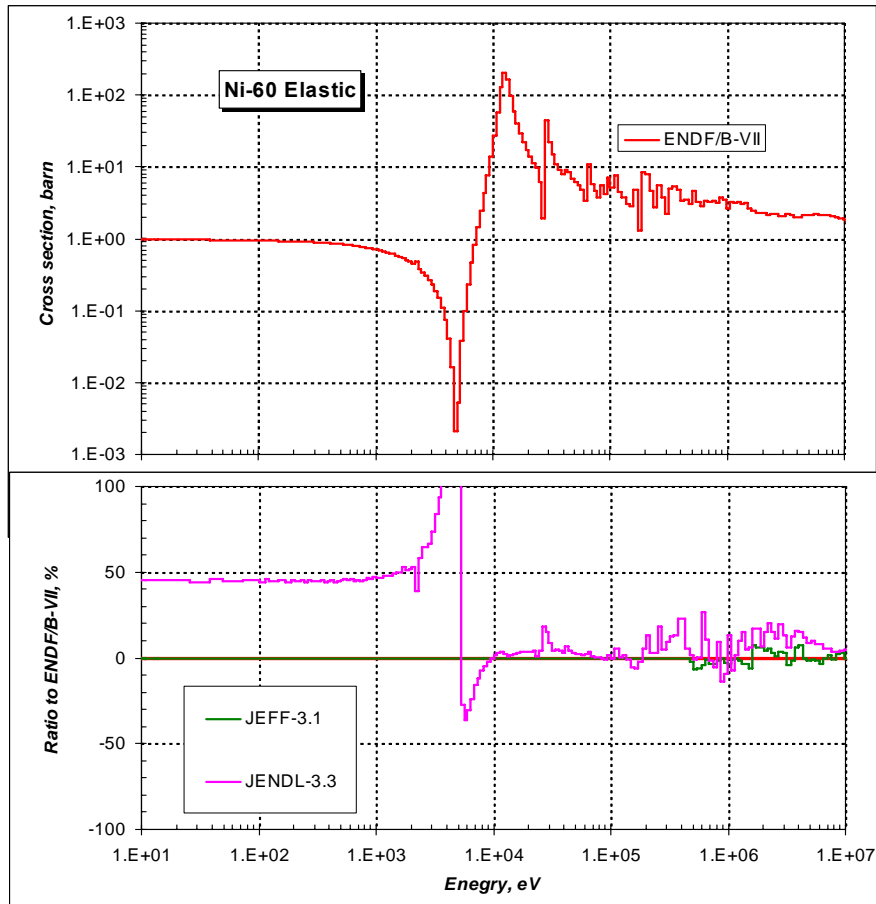


Рисунок 4 – Ход сечения упругого рассеяния области энергий 10 кэВ – 10 МэВ.

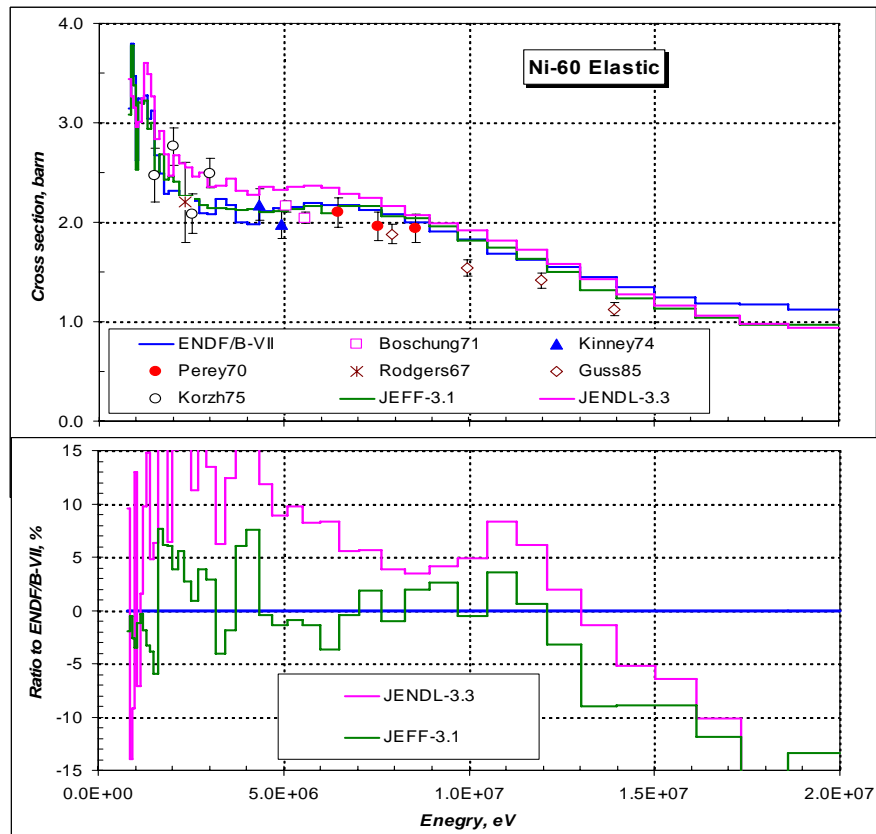


Рисунок 5 – Ход сечения упругого рассеяния области энергий 1МэВ – 20 МэВ.

3.3. Сечение радиационного захвата

Сечение радиационного захвата, как и полное сечение, различается в области энергий выше 500 кэВ. Сравнение сечения радиационного захвата с экспериментальными данными показано на рисунке 6.

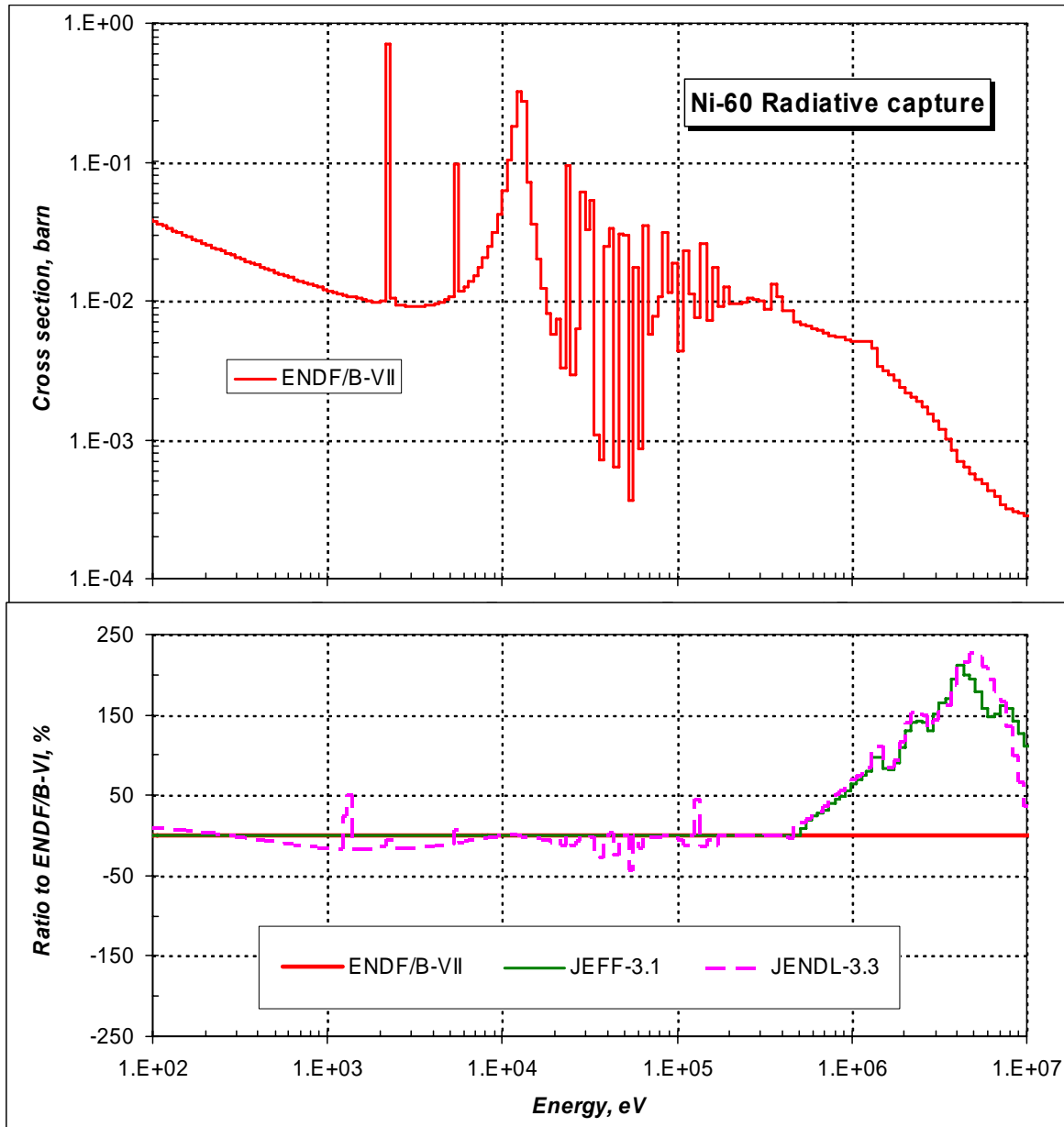


Рисунок 6 – Ход сечения захвата в области энергий 10 кэВ – 10 МэВ.

Из рисунка видно, что различие в сечениях между оценками находится в области энергий ~ 5 МэВ.

Сравнение оцененных и экспериментальных данных в этой области энергий показано на рисунке 7.

Из представленного на рисунке 7 сравнения видно, что оценки JEFF-3.1 и JENDL-3.3 в этой области ориентируются на эксперимент Perey et al, выполненный в 1982 году. В оценке ENDF/B результаты этого эксперимента не учитывались.

Следовательно, более корректной оценкой сечения радиационного захвата нейтронов является JEFF-3.1.

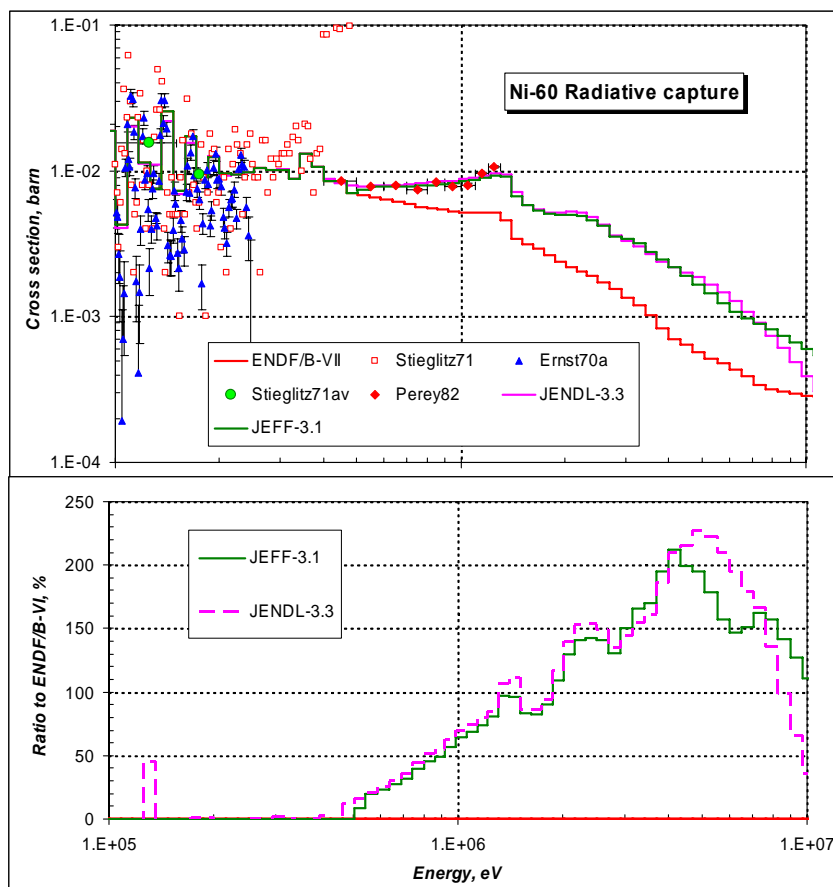


Рисунок 7 – Ход сечения захвата в области энергий 100 кэВ – 10 МэВ.

3.4. Сечение неупругого рассеяния

Сравнение различных оценок приведено на рисунке 8. Видно, что в отличие от ENDF/B-VI и JENDL-3.3, сечение неупругого рассеяния в JEFF-3.1 носит ярко выраженный резонансный характер. Причем, как и для Ni-58, имеется соответствие между резонансной структурой, наблюдаемой в полном сечений и в сечении неупругого рассеяния.

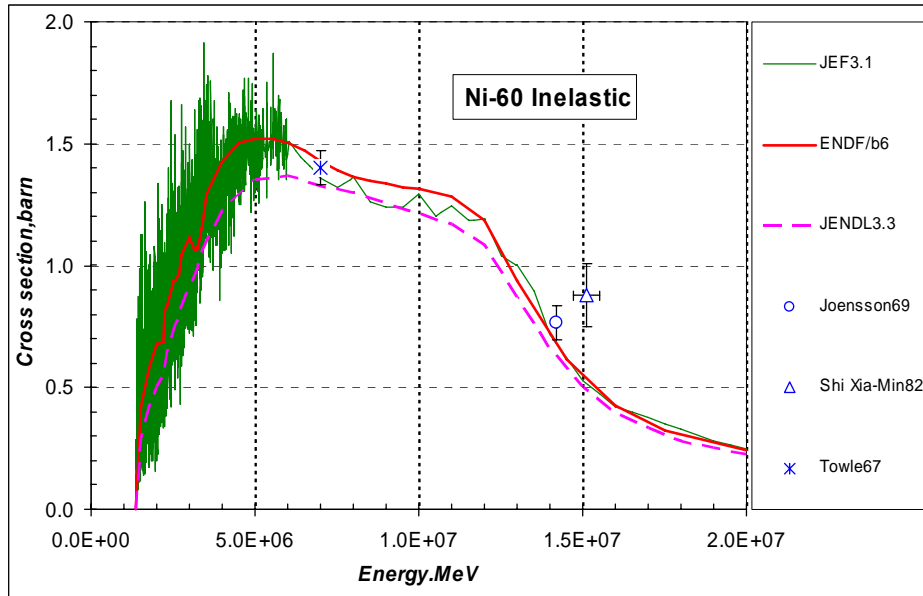


Рисунок 8 – Сечение неупругого рассеяния на Ni-58.

3.5. Сечение реакции образования нейтронов (n,2n)

На рисунке 9 показано сравнение реакции (n,2n) оцененных и экспериментальных данных.

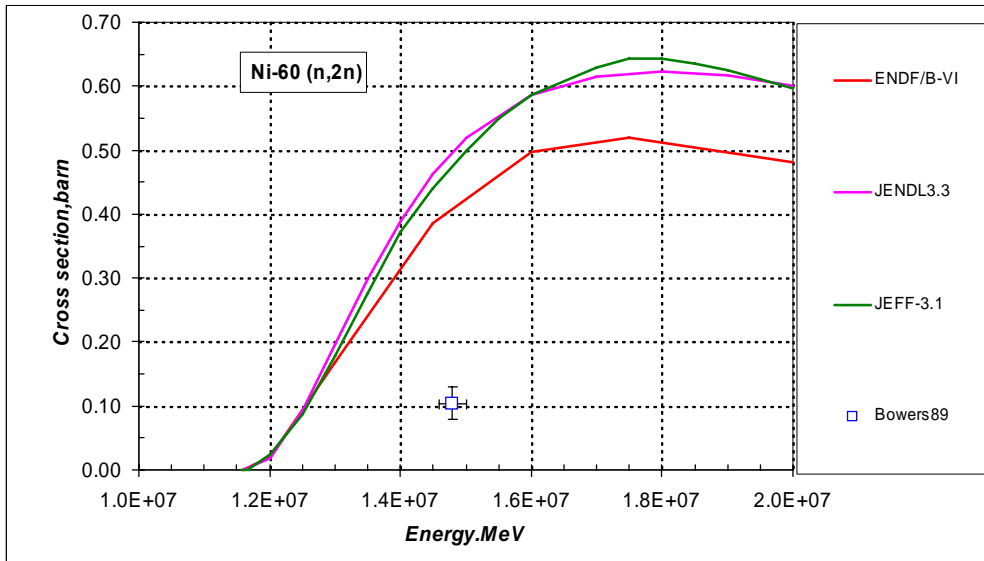


Рисунок 9 – Сечение реакции (n,2n) на Ni-60.

Из представленного на рисунке 9 сравнения видно, что связка JENDL – JEFF согласована друг с другом и отличается от оценки ENDF/B. Единственный доступный набор экспериментальных данных находится в противоречии с оцененными кривыми.

3.6. Сечения реакции образования протонов (n,p) и (n,np)

На рисунках 10 – 11 показано сравнение сечений реакций с образованием протонов.

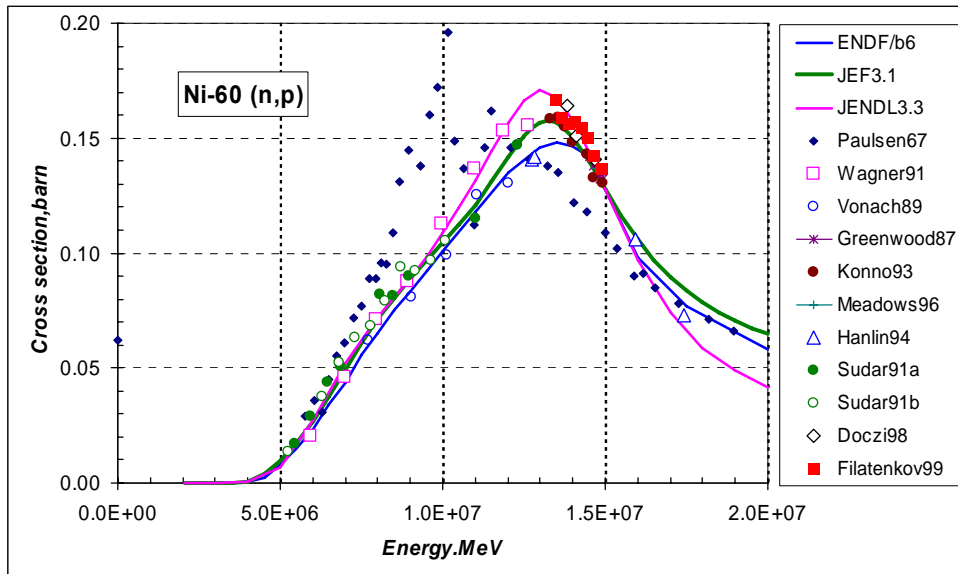


Рисунок 10 – Сечение реакции (n,p) на Ni-60.

Из представленного на рисунке 10 сравнения видно, что последние экспериментальные данные подтверждают оценку JENDL-3.3. Оценка JEFF хорошо согласуется с экспериментальными данными до 10 МэВ, далее она, опираясь на эксперимент Sudar et al(1991), довольно неплохо согласуется с экспериментами Филатенкова и др. (1999) и Doczi et al (1998).

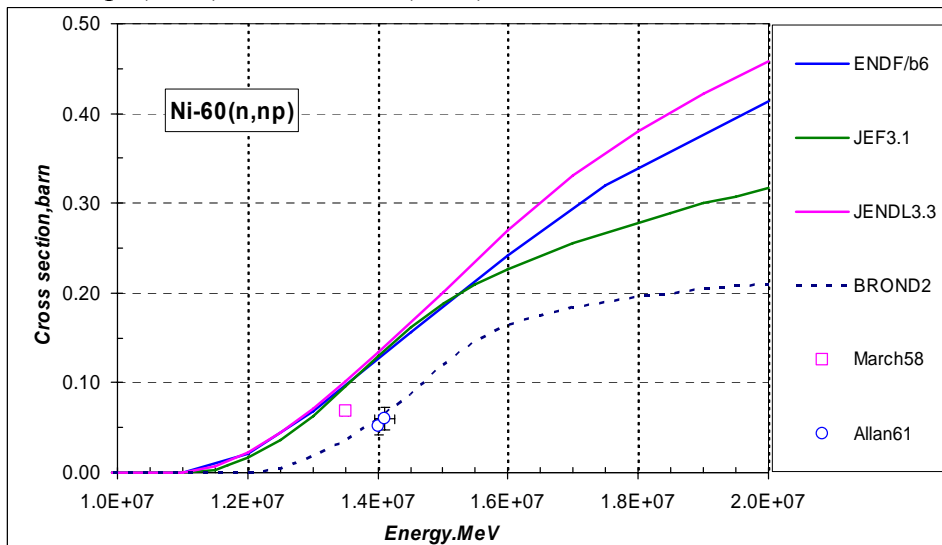


Рисунок 11 – Сечение реакции (n,np) на Ni-60.

Из приведенного на рисунке 11 сравнения видно, что до 15 МэВ все оценки реакции (n,np) согласуются друг с другом. Выше 15 МэВ оценки начинают расходиться. При энергии 14.8 МэВ имеется эксперимент Grimes et al, в котором измерен суммарный выход протонов. Этот эксперимент и согласует все оценки в точке 15 МэВ. Выше этой энергии расхождения в описании поведения сечения объясняются использованием различных теоретических моделей.

3.7. Сечения реакции образования альфа частиц (n,a) и (n,na)

На рисунках 12 - 13 показано сравнение сечений реакции (n,a) и (n,na) в области энергий до 20 МэВ.

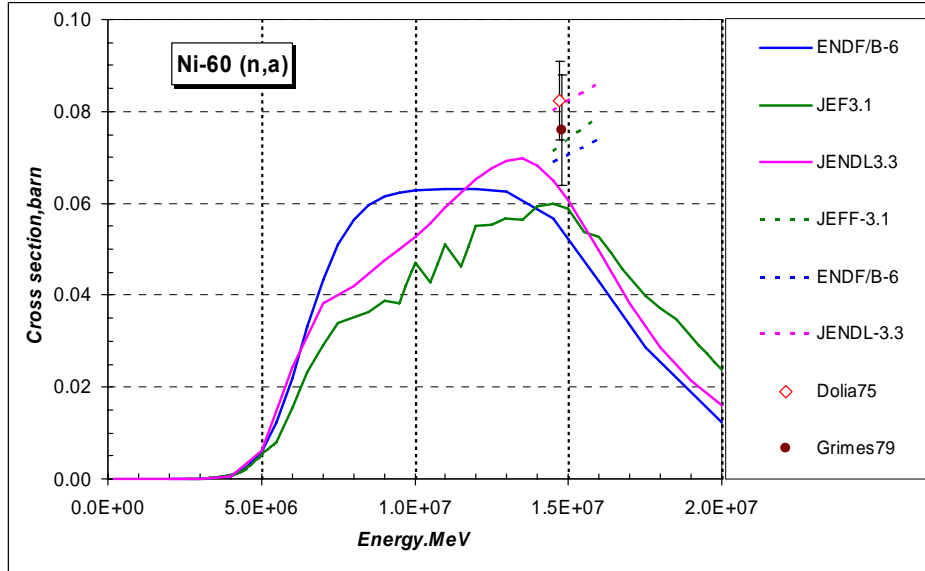


Рисунок 12 – Сечение реакции (n,a) на Ni-60.

Из приведенного на рисунке 12 сравнения видно, что все оценки по-разному описывают процесс (n,a). Прямые экспериментальные данные здесь отсутствуют. Имеются немногочисленные эксперименты по суммарному выходу альфа частиц при взаимодействии нейтронов с Ni-60. Они приведены на рисунке 12. Штрих пунктиром показаны суммарные сечения выхода альфа частиц для каждой оценки. Видно, что в пределах имеющихся экспериментальных погрешностей оценка ENDF/B занижена, остальные оценки согласуются с экспериментом.

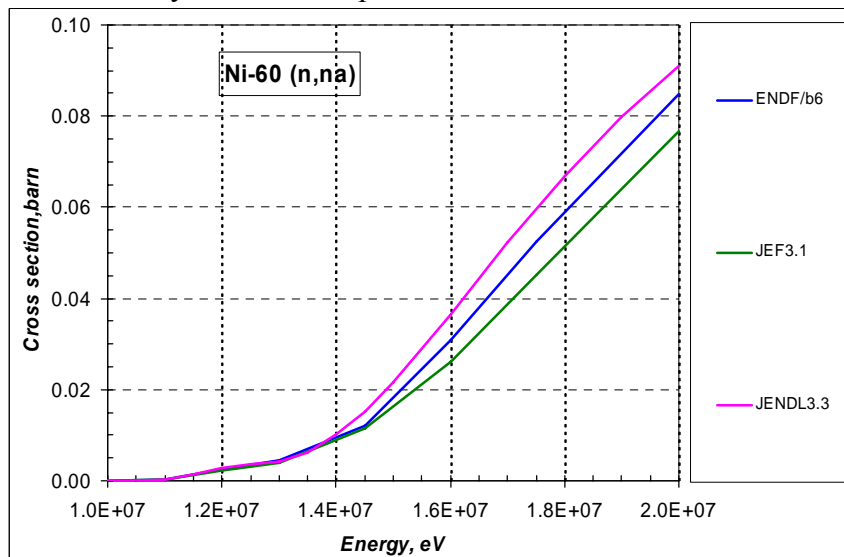


Рисунок 13 – Сечение реакции (n,a) на Ni-58 в области энергий до 20 МэВ.

Из приведенного на рисунке 13 сравнения видно, что все оценки согласовано описывают процесс (n,na).

3.8. Сечение реакции с образованием дейтонов (n,d).

На рисунке 14 показано сравнение оцененных сечений реакции (n,d) с имеющимися экспериментальными данными.

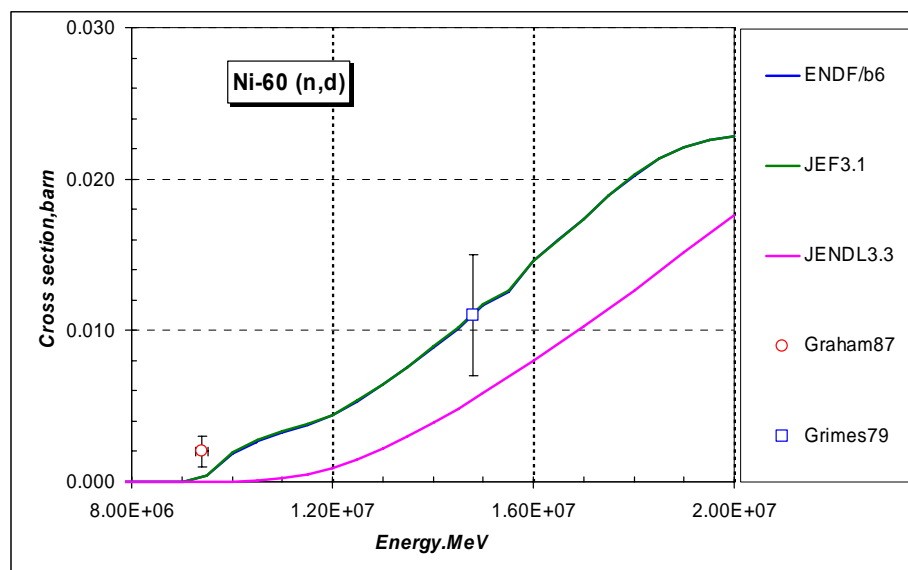


Рисунок 14 – Сечение реакции (n,d) на Ni-60 в области энергий до 20 МэВ.

Из рисунка 14 видно, что наилучшим образом с экспериментом согласуются оценки из ENDF/B-VI и JEFF-3.1.

3.9. Сечение реакции с образованием трития (n,t) и гелия -3 (n,He-3).

Сечения указанных реакций имеют величины порядка микробарн и высокий порог реакции, поэтому в оценках ENDF/B-VI и JEFF-3.1 они не приводятся. Тем не менее, информация по таким реакциям имеется, и они без особых проблем могут быть добавлены в оценки JEFF-3.1 и ENDF/B-VI.

Выводы

На основании проведенного анализа следует, что сечения взаимодействия нейтронов с Ni-60 наилучшим образом оценены в библиотеке JEFF-3.1.

Имеется возможность дополнить эту оценку включением в нее сечения образования трития и He-3, несмотря на то, что сечения этих реакций малы по величине.

4. Угловые распределения нейтронов

4.1. Угловые распределения при упругом рассеянии нейтронов

Экспериментальных данных по угловому распределению нейтронов при упругом рассеянии нейтронов не много. Из них наиболее современных данных это:

- детальные по энергии (вплоть до 813 кэВ) данные угловых распределений нейтронов для углов рассеяния 39° , 55° , 90° , 120° , 140° и 160° группы Perey et al, выполненные в 1993 на ORELA;

- данные Smith et al, выполненные в 1992 году в области более высоких энергий от 4.5 МэВ до 9.99 МэВ на установке DINAM (Tandem Dinamitron);

- данные группы Guss et al, выполненные в 1985 году в области высоких энергий от 7.9 МэВ до 13.94 МэВ на установке VDGТ.

Отметим, что в JEFF-3.1 данные по угловому распределению нейтронов при упругом рассеянии нейтронов взяты из оценки ENDF/B без изменений.

На рисунке 18 приведено сравнение оцененных угловых распределений при упругом рассеянии с экспериментальными данными группы Guss et al (1985).

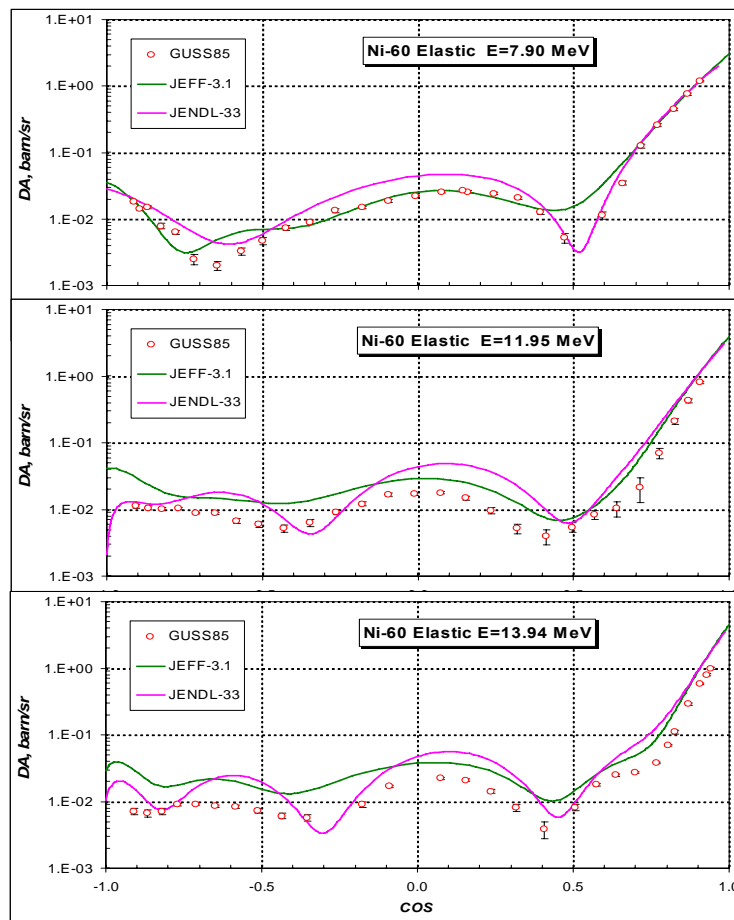


Рисунок 18 - Сравнение оцененных и экспериментальных угловых распределений.

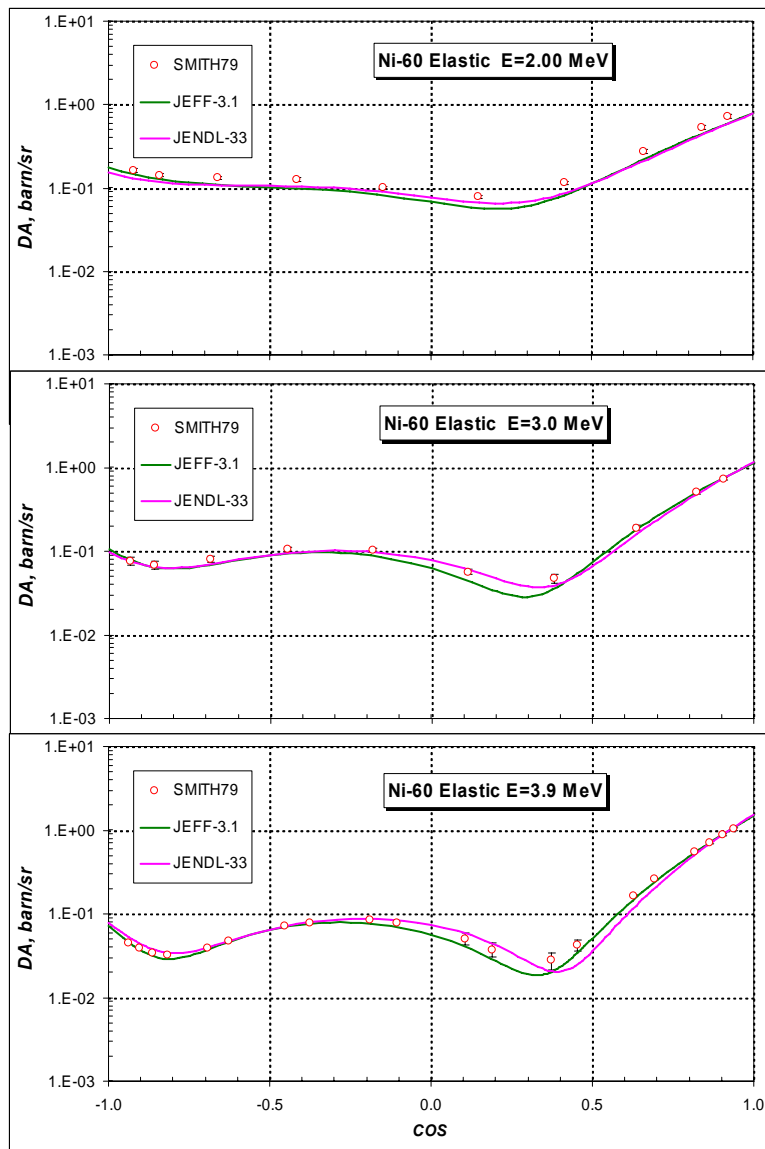


Рисунок 19 - Сравнение оцененных и экспериментальных угловых распределений.

Ниже на рисунке 19 показано аналогичное сравнение с экспериментальными данными группы Smith et al (1979).

Из приведенного на рисунках 18-19 сравнения видно, что при низких значениях энергии угловые распределения из JEFF-3.1 (=ENDF/B-VII) из JENDL-3.3 одинаково хорошо лучше согласуются с экспериментальными данными.

При более высоких энергиях обе оценки согласовано хорошо описывают рассеяние вперед, рассеяние под углом 90^0 лучше описывается оценкой из JEFF-3.1, и, наконец, рассеяние назад обе оценки описывают по-разному, но одинаково плохо.

5. Энергетические распределения нейтронов

5.1. Энергетические распределения при неупругом рассеянии нейтронов

В оценке ENDF/B-VIIb энерго - угловые распределения приводятся для реакций с $MT=16, 22, 28, 51, 91, 103, 107$. Для всех перечисленных реакций данные представляют собой энерго-угловые распределения для вылетающих частиц, остаточного ядра и фотонов, образующихся в процессе реакции. Угловые распределения учитываются с помощью полиномов Лежандра.

В оценке JEFF-3.1, в которой оценка ENDF/B использовалась как стартовая, корректировка коснулась закона интерполяции данных для налетающих частиц. INT-12 заменен на INT=2. Кроме этого, величину нейтронного спектра неупруго рассеянных нейтронов слегка уменьшили выше 7.5 МэВ для лучшего согласования со спектром испускаемых нейтронов при 14 МэВ, промеренных группой Vonach et al.

В оценке JENDL-3.3 энерго-угловые распределения приводятся для следующих типов реакций MT=16, 22, 28, 91, 203, 204, 205, 206, 207, данные для которых взяты из JENDL Fusion files.

Для реакций с MT=16, 22, 28, 91 данные представляют собой энерго-угловые распределения только для вылетающих нейтронов.

Для реакций с MT=203, 204, 205, 206, 207 энерго-угловые распределения приводятся для совокупных вылетающих заряженных частиц.

Выводы

Представление энерго-угловых распределений в оценке JEFF-3.1 (как откорректированной версии оценки ENDF/B), по-видимому, предпочтительнее оценки JENDL-3.3. Наряду с описанием вылетающих частиц и спектров образующихся фотонов дополнительно приводится информация об остаточных ядрах, т.е. описание процессов является более общим.

6. Образование и взаимодействие фотонов

Для Ni-60 представлены две оценки фотонных данных в библиотеках ENDF/B-VIIb (~JEFF-3.1) и JENDL3.3.

В оценке ENDF/B фотонные данные представлены непосредственно для следующих реакций MT=51-58,102. Для реакций MT=16, 22, 28, 91, 103 и 107 спектры фотонов задаются в секции MF=6 с помощью данных по энерго-угловым распределениям.

В JENDL фотонные данные представлены для реакций MT=16, 22, 28, 51-65, 91, 102, 103, 107.

6.1. Множественности образования фотонов и вероятности переходов

Множественности фотонов в нейтронных реакциях MT=16, 22, 28, 91, 103, 107 в JENDL были получены по программе GNASH. Фотоны неупругого рассеяния в представлены с помощью 11-ти уровней и континуумом уровней (3.3738 MeV). Заметим, что в оценке JENDL последний уровень (61-й) имеет порог выше, чем начинается континуум уровней.

В оценке ENDF/B данные представлены также для 11 уровней, которые, как видно из таблицы 3, практически совпадают с оценкой JENDL. Область континуума уровней начинается ниже по энергии, чем в JENDL - при 3.3952 MeV.

В оценке ENDF/B для 11 уровней заданы вероятности переходов, взятые из работы D.M. Hetric, C.Y. Fu, and D.C. Larcon, "Calculated neutron-induced cross sections for 58,60Ni from 1 TO 20 MEV and comparison with experiment," ORNL/TM-10219, ENDF-344 (1987).

В оценке JENDL для неупругого рассеяния также даны вероятности переходов, которые до 61-го уровня такие же, как и в ENDF/B.

Фотоны радиационного захвата в JENDL получены из энергетического баланса. В ENDF/B данные получены по программе TNG.

Таблица 3- Энергии уровней неупругого рассеяния

| N | JENDL3.3. | ENDF/B-VII |
|----|------------|------------|
| 51 | 1.3549E+06 | 1.3524E+06 |
| 52 | 2.1951E+06 | 2.1964E+06 |
| 53 | 2.3234E+06 | 2.3285E+06 |
| 54 | 2.5480E+06 | 2.5522E+06 |
| 55 | 2.6702E+06 | 2.6743E+06 |
| 56 | 3.1723E+06 | 3.1725E+06 |
| 57 | 3.1766E+06 | 3.1766E+06 |
| 58 | 3.2397E+06 | 3.2396E+06 |
| 59 | 3.2479E+06 | 3.2478E+06 |
| 60 | 3.3246E+06 | 3.3250E+06 |
| 61 | 4.1077E+06 | 3.3738E+06 |
| 91 | 3.3738E+06 | 3.3952E+06 |

6.2. Угловое распределение фотонов.

В обеих оценках для всех фотонов в нейтронных реакциях определено изотропное угловое распределение.

6.3. Непрерывные энергетические спектры.

В оценке JENDL энергетические спектры для фотонов нейтронных реакций MT=16,22,28,91,103,107 были посчитаны по программе GNASH. Спектры фотонов радиационного захвата были получены по программе Casthy с учетом экспериментальных данных.

В ENDF/B непосредственно в секции MF=15 есть только спектры радиационного захвата, которые посчитаны по программе TNG. Спектры для реакций MT=16, 22, 28, 91, 103, 107 приведены в секции MF=6.

Выводы:

Описание фотонных данных в оценке JENDL-3.3 охватывает больше нейтронных реакций. Для тех реакций, где оценки пересекаются, нельзя отдать предпочтение какой-то оценки.

7. Заключение

Для Ni-60 в РОСФОНД следует принять нейтронные данные, находящиеся в библиотеке JEFF-3.1.

Материалу присвоить номер MAT=2858.

Желательно, в дальнейшем, устранить все отмеченные в ходе анализа данных замечания и неточности в принятой оценке.

Автор обоснования отбора оцененных данных

Кощев В.Н.

Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle\sigma\rangle$ на спектре Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$ |
|------------------------|-----------------------------|-----------|--|
| Упругое рассеяние | 0.985 барн | 78.8 барн | 2.935 барн |
| Рад. захват | 2.766 барн | 1.37 барн | 6.30 мбарн |
| Реакция (n,p) | - | - | 2.48 мбарн |
| Реакция (n,d) | - | - | 9.33 мкбарн |
| Реакция (n, α) | - | - | 1.32 мбарн |
| Реакция (n,2n) | - | - | 0.114 мбарн |

28.6. Никель-61

Оцененные данные рассматриваются в диапазоне энергий до 20 МэВ.

Тот факт, что для основных стабильных изотопов Ni-58 и Ni-60, составляющих естественную смесь в РОСФОНД рекомендованы оцененные нейтронные данные из библиотеки JEFF-3.1, является веским аргументом для отбора из JEFF-3.1 в РОСФОНД и других изотопов никеля, процентное содержание которых много меньше, чем Ni-58 и Ni-60 без подробного анализа имеющихся нейтронных данных.

В библиотеке JEFF-3.1 для Ni-61 содержится оценка из ENDF/B-VI.8, которая без каких либо ревизий принята в ENDF/B-VII b0 версии. Однако в последующую b1 версию включены нейтронные данные для Ni-61, в которых энерго-угловые распределения получены по откорректированной программе GNASH. Поэтому в РОСФОНД следует включить данные из ENDF/B-VII b1 версии.

1. Общие характеристики

$Z=28$

$A=60.931\ 056\ 0 \pm 0.000\ 000\ 7$

$A_{wr}=60.407\ 629\ 0 \pm 0.000\ 000\ 7$

Содержание в естественной смеси: - 1.1399%

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|----------------|---------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | (n,n') | -0.0670 | 0.0681 | Ni-61 |
| 16 | (n,2n) | -7.8203 | 7.9498 | Ni-60 |
| 28 | (n,np) | -9.8620 | 10.0250 | Co-60(5.272y) |
| 102 | (n, γ) | 10.5973 | 0.0000 | Ni-62 |
| 103 | (n,p) | -0.5397 | 0.5486 | Co-61(1.65h) |
| 107 | (n, α) | 3.5790 | 0.0000 | Fe-58 |
| 111 | (n,2p) | -9.2887 | 9.4425 | Fe-60(1.5E6y) |

Схема уровней: (согласно оценке ENDF/B-VII)

| MT | LEVEL ENERGY (MEV) | SPIN-PARITY |
|-----------|--------------------|-------------|
| | 0.0 | 3/2- |
| 51 | 0.0670 | 5/2- |
| 52 | 0.2830 | 1/2- |
| 53 | 0.6560 | 1/2- |
| 54 | 0.9090 | 5/2- |
| 55 | 1.0150 | 7/2- |
| 56 | 1.1000 | 3/2- |
| 57 | 1.1320 | 5/2- |
| 58 | 1.1850 | 3/2- |
| 91 (cont) | 1.4550 | |

2. Заключение

Для Ni-61 в РОСФОНД следует принять нейтронные данные, находящиеся в библиотеке ENDF/B-VII b1 версия.

Материалу присвоить номер МАТ=2861.

Автор обоснования отбора оцененных данных

Кощев В.Н.

Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle \sigma \rangle$ на спектре Максвелла с $T=1.35 \text{ МэВ}$ |
|------------------------|-----------------------------|-----------|---|
| Упругое рассеяние | 7.960 барн | 104. барн | 2.345 барн |
| Рад. захват | 2.498 барн | 1.52 барн | 4.92 мбарн |
| Реакция (n,p) | - | - | 3.29 мбарн |
| Реакция (n, α) | - | - | 2.63 мбарн |
| Реакция (n,2n) | - | - | 1.36 мбарн |

28.7. Никель-62

Оцененные данные рассматриваются в диапазоне энергий до 20 МэВ.

Тот факт, что для основных стабильных изотопов Ni-58 и Ni-60, составляющих естественную смесь в РОСФОНД рекомендованы оцененные нейтронные данные из библиотеки JEFF-3.1, является веским аргументом для отбора из JEFF-3.1 в РОСФОНД и других изотопов никеля, процентное содержание которых много меньше, чем Ni-58 и Ni-60 без подробного анализа имеющихся нейтронных данных.

В библиотеке JEFF-3.1 для Ni-62 содержится оценка из ENDF/B-VI.8, которая без каких либо ревизий принята в ENDF/B-VII b0 версии. Однако в последующую b1 версию включены нейтронные данные для Ni-62, в которых энерго угловые распределения получены по откорректированной программе GNASH. Поэтому в РОСФОНД следует включить данные из ENDF/B-VII b1 версии.

1. Общие характеристики

Z=28

A=61.928 345 1 ± 0.000 000 6

A_{wr}=61.396 350 9 ± 0.000 000 6

Содержание в естественной смеси: - 3.6345 %

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | E _{порог.} , МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|---------|----------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | (n,n') | -1.1730 | 1.1921 | Ni-62 |
| 16 | (n,2n) | -10.5980 | 10.7710 | Ni-61 |
| 22 | (n,na) | -7.0186 | 7.1329 | Fe-54 |
| 28 | (n,np) | -11.1380 | 11.3190 | Co-61(1.65h) |
| 102 | (n,γ) | 6.8379 | 0.0000 | Ni-63 |
| 103 | (n,p) | -4.4590 | 4.5316 | Co-62(1.50m) |
| 104 | (n,d) | -8.9129 | 9.0580 | Co-61(1.65h) |
| 107 | (n,a) | -0.4374 | 0.4445 | Fe-59(44.5d) |

Схема уровней: (согласно оценке ENDF/B-VII)

| MT | LEVEL ENERGY(MEV) | SPIN-PARITY |
|----------|-------------------|-------------|
| | 0.0 | 0+ |
| 51 | 1.1730 | 2+ |
| 52 | 2.0490 | 0+ |
| 53 | 2.3020 | 2+ |
| 54 | 2.3360 | 4+ |
| 91(cont) | 2.8910 | |

2. Заключение

Для Ni-62 в РОСФОНД следует принять нейтронные данные, находящиеся в библиотеке ENDF/B-VII b2 версия.

Материалу присвоить номер МАТ=2862.

Автор обоснования отбора оцененных данных

Кощев В.Н.

Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle\sigma\rangle$ на спектре Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$ |
|------------------------|-----------------------------|-----------|--|
| Упругое рассеяние | 9.974 барн | 456. барн | 2.07 барн |
| Рад. захват | 14.41 барн | 5.96 барн | 6.70 мбарн |
| Реакция (n,p) | - | - | 0.047 мбарн |
| Реакция (n,d) | - | - | 3.0 мкбарн |
| Реакция (n, α) | - | - | 0.065 мбарн |
| Реакция (n,2n) | - | - | 0.35 мбарн |

28.8. Никель-63

Радиоактивен. $T_{1/2}=101.1$ год.

Способ радиоактивного распада – $\epsilon + \beta$ распад.

Заключение

В РОСФОНД приняты нейтронные данные из JEFF-3.1/A (Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 г.) со следующими изменениями:

1. материалу присвоен номер МАТ=2863;

2. удален файл MF=8;

2. Сечения образования отдельных состояний ядер-продуктов, содержащиеся в файле MF=10, сложены по подсекциям и суммы занесены в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 удален, поскольку долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на никеле не образуется.

Автор обоснования отбора оцененных данных

Кощев В.Н.

28.9. Никель-64

Оцененные данные рассматриваются в диапазоне энергий до 20 МэВ.

Тот факт, что для основных стабильных изотопов Ni-58 и Ni-60, составляющих естественную смесь в РОСФОНД рекомендованы оцененные нейтронные данные из библиотеки JEFF-3.1, является веским аргументом для отбора из JEFF-3.1 в РОСФОНД и других изотопов никеля, процентное содержание которых много меньше, чем Ni-58 и Ni-60 без подробного анализа имеющихся нейтронных данных.

В библиотеке JEFF-3.1 для Ni-64 содержится оценка из ENDF/B-VI.8, которая без каких либо ревизий принята в ENDF/B-VII b0 версии. Однако в последующую b1 версию включены нейтронные данные для Ni-64, в которых энерго угловые распределения получены по откорректированной программе GNASH. Поэтому в РОСФОНД следует включить данные из ENDF/B-VII b1 версии.

1. Общие характеристики

Z=28

A=63.927 966 0 ± 0.000 000 6

A_{wr}=63.378 794 1 ± 0.000 000 6

Содержание в естественной смеси: - 0.9256 %

Перечень нейтронных реакций

| MT | Реакция | Q, МэВ | E _{порог.} , МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|---------|----------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | (n,n') | -1.3460 | 1.3672 | Ni-64 |
| 16 | (n,2n) | -9.6570 | 9.8094 | Ni-63(101.1y) |
| 22 | (n,na) | -8.0826 | 8.2095 | Fe-56 |
| 28 | (n,np) | -12.5360 | 12.7340 | Co-63(27.4s) |
| 102 | (n,γ) | 6.0981 | 0.0000 | Ni-65(2.52h) |
| 103 | (n,p) | -6.5240 | 6.6269 | Co-64(0.30s) |
| 104 | (n,d) | -10.3114 | 10.4740 | Co-63(27.4s) |
| 107 | (n,a) | -2.4420 | 2.4805 | Fe-61(5.98m) |

Схема уровней: (согласно оценке ENDF/B-VII)

| MT | LEVEL ENERGY(MEV) | SPIN-PARITY |
|----------|-------------------|-------------|
| | 0.0 | 0+ |
| 51 | 1.3460 | 2+ |
| 52 | 2.2770 | 2+ |
| 91(cont) | 2.6080 | |

2. Заключение

Для Ni-64 в РОСФОНД следует принять нейтронные данные, находящиеся в библиотеке ENDF/B-VII b1 версия.

Материалу присвоить номер MAT=2864

Автор обоснования отбора оцененных данных

Кощев В.Н.

Тепловые и интегральные сечения

| Реакция | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | RI | $\langle\sigma\rangle$ на спектре Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$ |
|------------------------|-----------------------------|-----------|--|
| Упругое рассеяние | 0.016 барн | 84.9барн | 3.57 барн |
| Рад. захват | 1.52 барн | 0.75 барн | 4.68 мбарн |
| Реакция (n,p) | - | - | 1.74 мкбарн |
| Реакция (n,d) | - | - | 1.89 мкбарн |
| Реакция (n, α) | - | - | 13.3 мкбарн |
| Реакция (n,2n) | - | - | 0.82 мбарн |

28.10. Никель-66

Радиоактивен. $T_{1/2}=54.6$ часов.

Способ радиоактивного распада – $\epsilon + \beta$ распад.

Заключение

В РОСФОНД принять нейтронные данные из JEFF-3.1/A (Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 г.) со следующими изменениями:

1. материалу присвоен номер МАТ=2866;
2. удален файл MF=8;

Автор обоснования отбора оцененных данных

Кощев В.Н.

29-МЕДЬ

В РОСФОНД включены данные для обоих стабильных изотопов меди и для меди-67 ($T_{1/2}=2.58$ д).

В ФОНД-2.2 для стабильных изотопов включены оценки Hetrick, Fu, Larson, 1989, для радиоактивных Cu-66 и Cu-67 оценки Грудзевича, Зеленецкого, Пашенко из ADL-3.

В ENDF/B-VII для стабильных изотопов содержатся более поздние оценки Koning, Chadwick, Hetrick, 1998 .

В JENDL-3.3 содержатся довольно старые оценки N.Yamamuro, T. Kawakito (1987).

В JEFF-3.1 – те же оценки, что и в ENDF/B-VII

29.1. Медь-63

Содержание в естественной смеси 69.17%.

Согласно описанию проведенной оценки ENDF/B-VII, в области энергий до 20 МэВ имеются следующие различия по сравнению с оценкой 1989 года (ФОНД-2.2):

проведена корректировка энерго-угловых данных для 15-уровня неупругого рассеяния ($MT=65$) при 17.0 МэВ;

проведена корректировка спектра γ -кватов при радиационном захвате нейтронов.

Таким образом, откорректированная версия оценки Koning, Chadwick, Hetrick (1998) является предпочтительной.

Область разрешенных резонансов простирается до 99.5 кэВ. Приводятся параметры 216 s-резонансов (до 150 кэВ) и 38 p-резонансов (до 100 кэВ).

Тепловые сечения и резонансный интеграл:

$\sigma_c=4.47$ барна; $\sigma_i=9.61$ барна; $RI=4.92$ барна.

Это премлемосогласуется с рекомендацией Мухабхаба 2004 г.:

$\sigma_c=4.52\pm 0.02$ барна; $RI=4.97\pm 0.08$ барна.

На рис.1 оцененное полное сечение сравнивается с экспериментальными данными. При энергиях ниже 1 МэВ приведены данные только одной работы - с высоким разрешением – чтобы не засорять рисунок излишком данных. Видно, что оценка опирается на результаты эксперимента. Выше 1 МэВ экспериментальные данные весьма скудны. Однако здесь полное сечение слабо меняется от ядра к ядру и расчеты по оптической модели, описывающие даже один эксперимент, достаточно надежны.

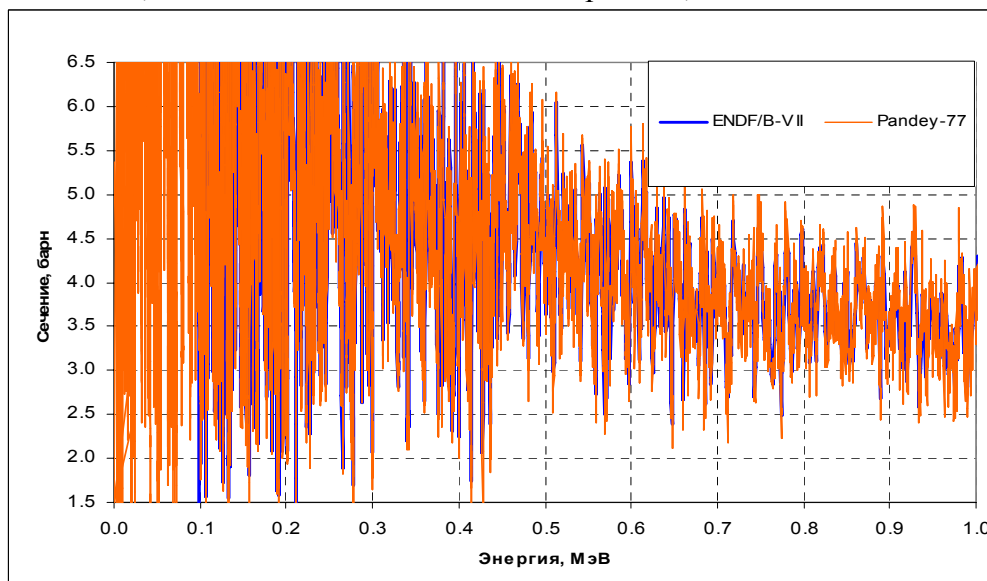


Рис.1 а. Полное сечение меди-63.

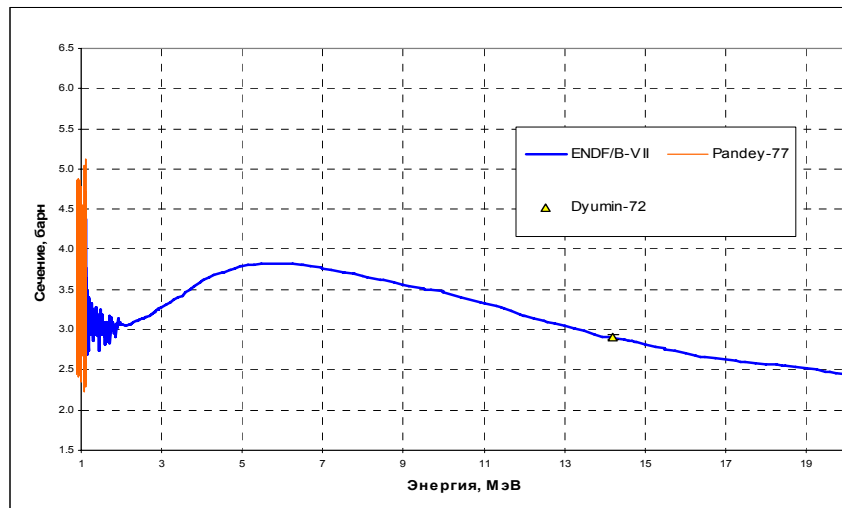


Рис.16. Полное сечение меди-63.

На рис.2. оцененное сечение захвата сравнивается с данными экспериментов. Как видно, наблюдается приемлемое согласие.

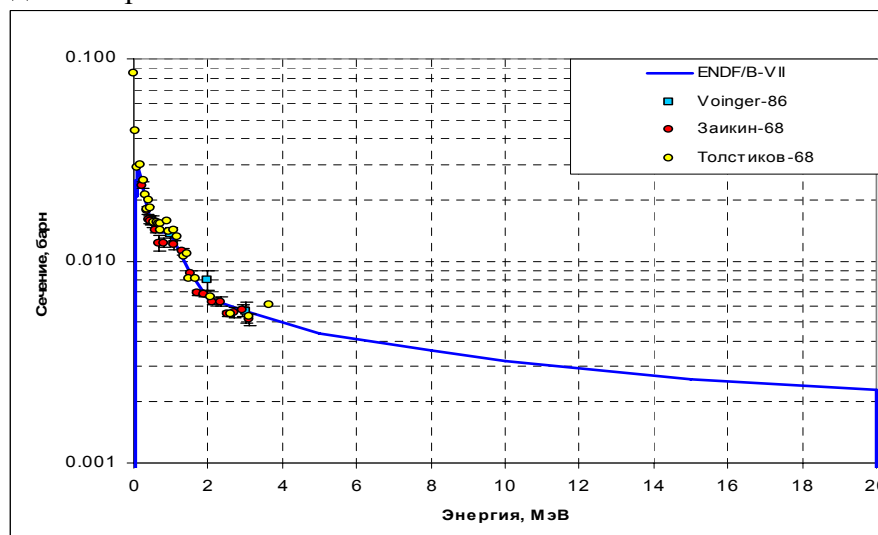


Рис.2. Сечение захвата меди-63.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Koning, Chadwick, Hetrik, 1998 из ENDF/B-VII.

Автор рекомендации

Кощев В.Н.

29.2. Медь-65

Содержание в естественной смеси 30.83%.

Согласно описанию проведенной оценки ENDF/B-VII, в области энергий до 20 МэВ имеются следующие различия по сравнению с оценкой 1989 года (ФОНД-2.2):

проведена корректировка энерго-угловых данных для 15-уровня неупругого рассеяния (MT=63) при 17.5 МэВ;

проведена корректировка спектра γ -кватов при радиационном захвате нейтронов.

Таким образом, откорректированная версия оценки Koning, Chadwick, Hetrik (1998) является предпочтительной.

Область разрешенных резонансов простирается до 99.5 кэВ. Приводятся параметры 152 s-резонансов (до 149 кэВ) и 26 p-резонансов (до 97 кэВ).

Тепловые сечения и резонансный интеграл:

$\sigma_c=2.15$ барна; $\sigma_r=16.04$ барна; $RI=2.18$ барна.

Это прекрасно согласуется с рекомендацией Мухабхаба 2004 г.:

$\sigma_c=2.17\pm 0.02$ барна; $RI=2.19\pm 0.08$ барна.

На рис.1 оцененное полное сечение сравнивается с экспериментальными данными. При энергиях ниже 1 МэВ приведены данные только одной работы - с высоким разрешением – чтобы не засорять рисунок излишком данных. Видно, что оценка опирается на результаты эксперимента. Выше 1 МэВ экспериментальные данные весьма скудны. Однако здесь полное сечение слабо меняется от ядра к ядру, что можно видеть из сравнения данных по полному сечению для меди 63 и меди-65. В этих условиях расчеты по оптической модели, описывающие даже один эксперимент, достаточно надежны.

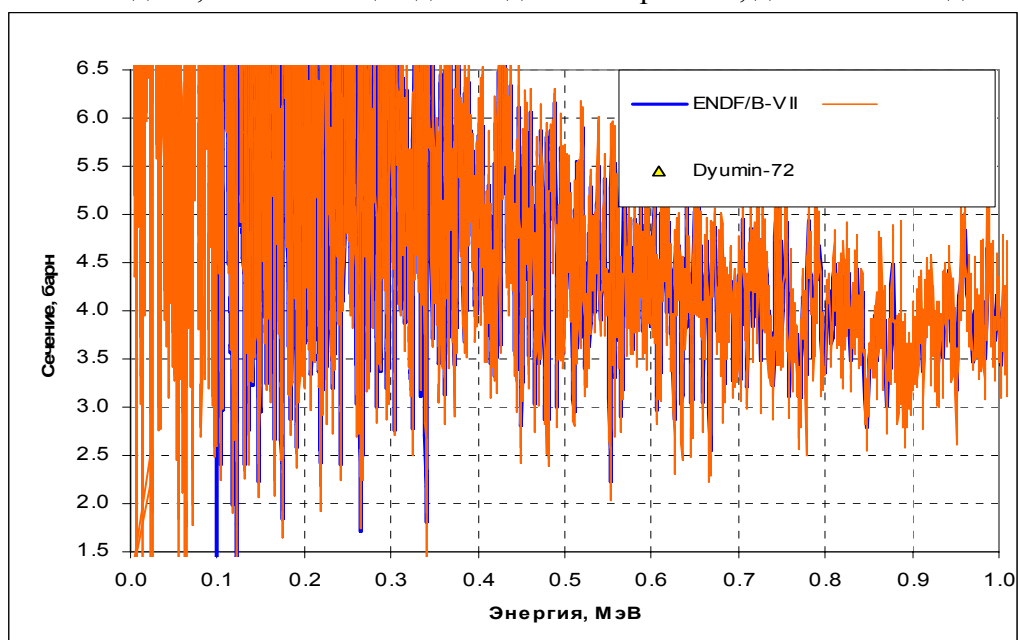


Рис.1 а. Полное сечение меди-65.

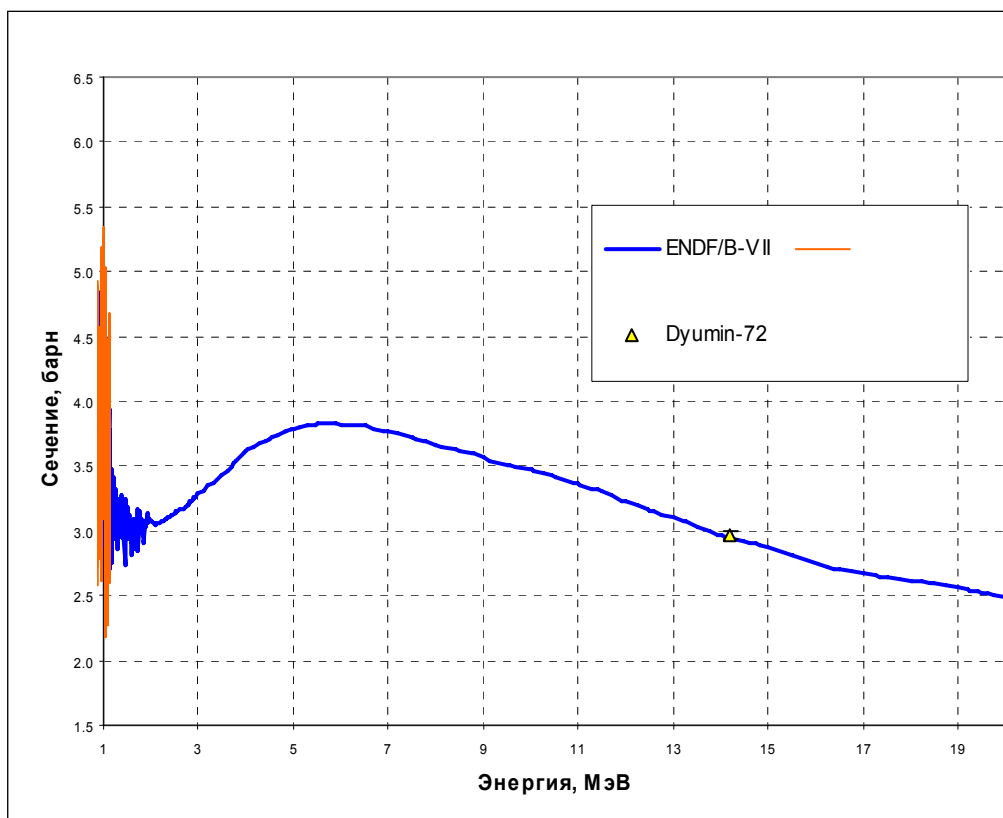


Рис.16. Полное сечение меди-65.

На рис.2. оцененное сечение захвата сравнивается с данными экспериментов. Как видно, наблюдается приемлемое согласие.

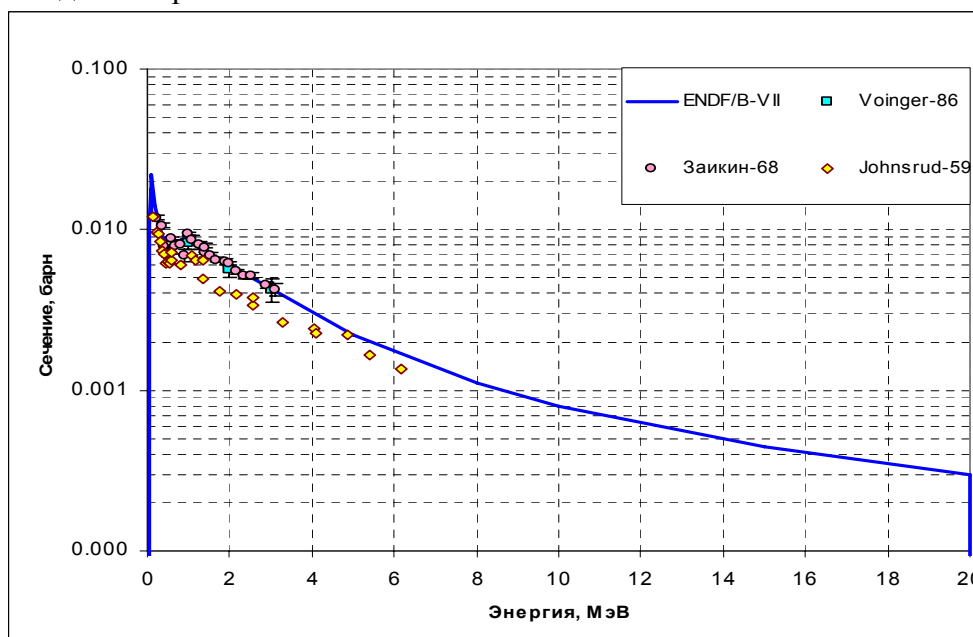


Рис.2. Сечение захвата меди-65.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Koning, Chadwick, Hetrik, 1998 из ENDF/B-VII.

Автор рекомендации
Кошечев В.Н.

29.3. Медь-67

Радиоактивна. ($T_{1/2}=2.58$ д). Испытывает бета-распад в цинк-67.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка EAF-2003 за неимением более полной оценки. Следующие из оценки тепловое сечение захвата и резонансный интеграл равны:
 $\sigma_c=8.96$ барна; $RI=20.24$ барна.
Экспериментальных данных для проверки оцененных сечений не имеется.

Автор рекомендации

Кошеев В.Н.

30. ЦИНК

ФОНД-2.2 содержит файл данных для природного цинка (Николаев, Забродская, 1989) для задач расчета переноса нейтронов. Данные для всех стабильных изотопов (Николаев, 1989г) и данные Грудзевича, Зеленецкого, Пащенко (ADL-3) для радиоактивных $Zn-65$, $Zn-71m$ и $Zn-72$, находящиеся в ФОНД-2.2 приводятся для использования в активационном анализе.

В библиотеках ENDF/B-VII, ENDF/B-VI, ENDF/B-V и различных версиях JENDL данные для стабильных нуклидов цинка и природной смеси отсутствуют.

В библиотеке JEFF-3.1 используется оценка Николаева и Забродской для природного цинка. Для изотопов цинка приняты оценки из библиотеки EAF-2003.

30.1. Цинк- природный

Заключение

За неимением выбора в РОСФОНД принимается оценка Николаева и Забродской(1989) из ФОНД-2.2. Из файла РОСФОНД следует удалить секции, соответствующие производным величинам – MT=251, 252 и 253, а также файлы MF=12, 14 и 15, описывающие выход вторичных фотонов, поскольку основная информация, содержащаяся в файле MF=12, в библиотеке ФОНД-2.2 представлена в формате, отличном от современного стандарта. Резонансная структура сечений в принятом файле описана до 100 кэВ, тогда как резонансные параметры для основных изотопов цинка известны до 350 кэВ и выше. На рис.1. принятое в ней полное сечение сравнивается с экспериментальными данными. Видно, что выше 13 МэВ оцененное сечение несколько занижено. Имеются расхождения с накопленными к настоящему времени экспериментальными данными и по парциальным сечениям. Необходимость основательного пересмотра принятой оценки очевидна.

Несомненно, что файл данных для природного цинка должен быть заменен полными файлами данных для всех стабильных изотопов. В наиболее сложной области разрешенных резонансов для каждого из стабильных изотопов могут быть использованы данные, рекомендованные в атласе Мухабхаба 2005 г. Вне резонансной области для сечений и энерго-угловых распределений могут быть использованы результаты оптико-статистических расчетов с корректировкой по имеющимся экспериментальным данным. Требуется проверить степень соответствия суммы сечений изотопов сечениям природного цинка, разрешить противоречия, если таковые обнаружатся и уточнить данные для изотопов с учетом новых экспериментов и теоретических моделей.

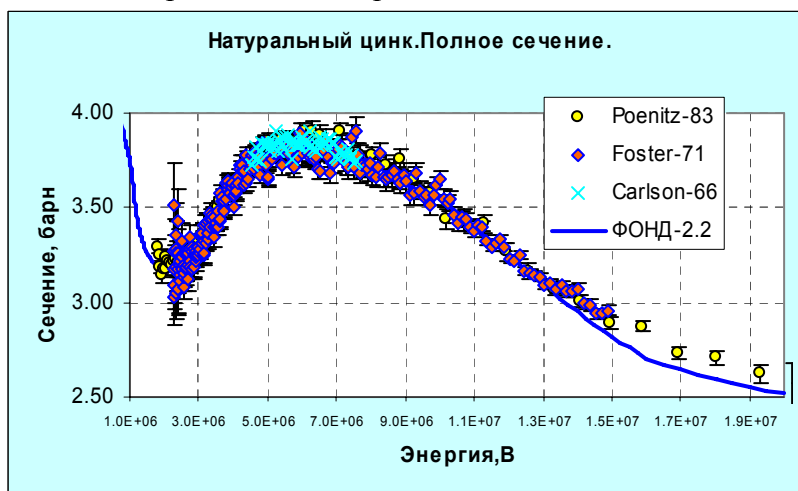


Рис.1.

Автор рекомендации
Николаев М.Н.

30.2. Цинк-64

Содержание в естественной смеси 48.6%.

Тепловое сечение захвата и резонансный интеграл:

EAF-2003: 0.764 барн и 1.348 барн

Мухабхаб¹: 0.79±0.02 и 1.37±0.06

Область разрешенных резонансов в оценке простирается лишь до 70 кэВ (см. рис.2а), тогда как у Мухабхаба резонансные параметры приводятся вплоть до 370 кэВ.

На рис. 2б сечение захвата вне резонансной области сравнивается с имеющимися экспериментальными данными. Согласие во всех случаях, как видим, удовлетворительно.

На рис. 3 оцененное сечение реакции (n,2n) сравнивается с экспериментальными данными. Видно, что оценка опирается на довольно старые данные Паулсена (идущие значительно выше результатов Габбарда, полученных в том же году). Результаты всех измерений последних лет лежат между полученными этими авторами, т.е. заметно ниже оценки.

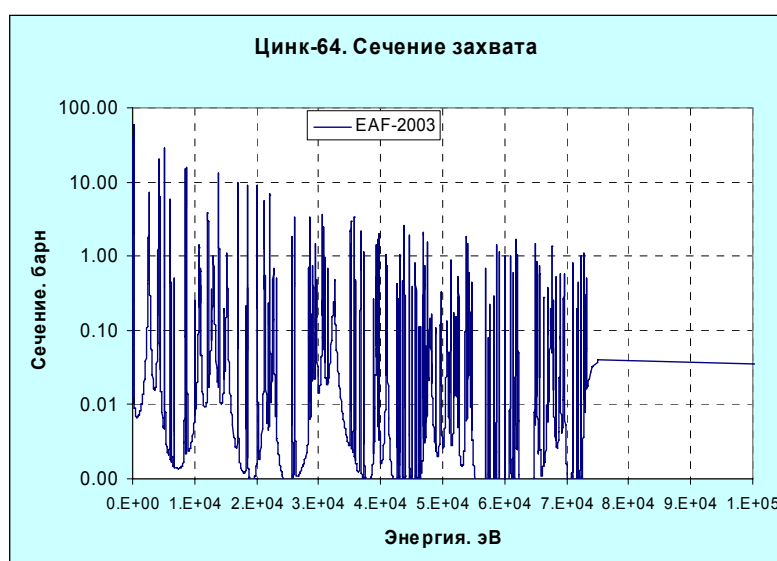


Рис.2а

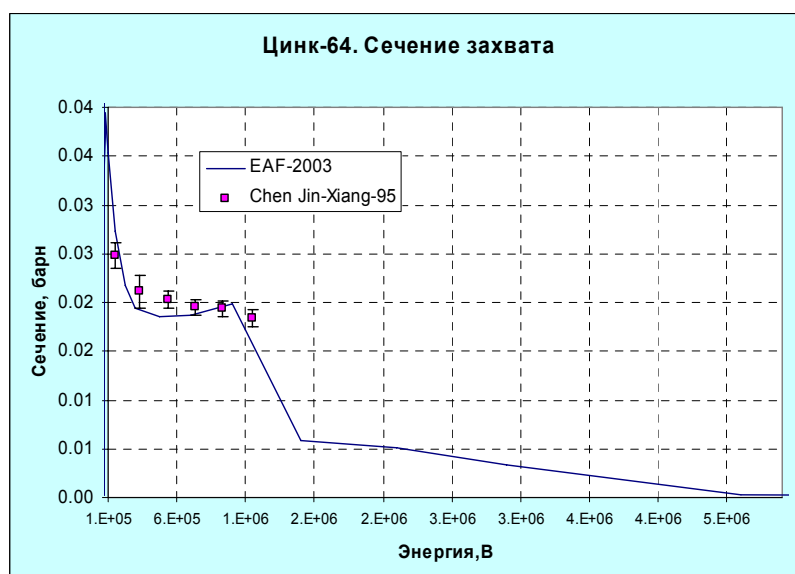


Рис.2б

¹ Mughabghab S.F. Atlas of Neutron Resonances. Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. ELSEVIER. 2005.

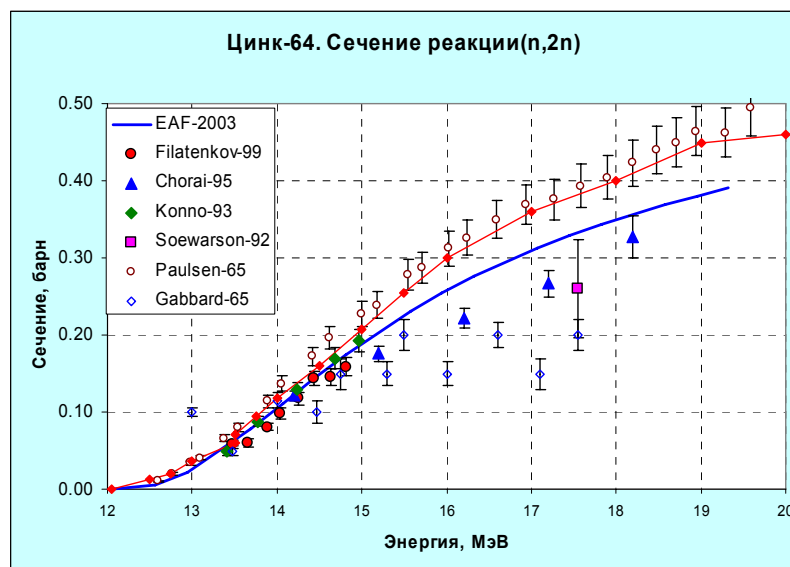


Рис. 3.

Заключение

В РОСФОНД следует принять оценку EAF-2003, устранив аномалию при 13.7 МэВ, обусловленную ошибкой в порядке. При просмотре файла обеспечить согласие с данными последних лет.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

30.2. Цинк-65

Радиоактивен. ($T_{1/2}=244.3$ д). Испытывает позитронный распад или захват орбитального электрона с переходом в медь-65.

Тепловое сечение и резонансный интеграл, следующие из файла, довольно велики- 60 барн и 141 барн. Мухабхаб приводит тепловое значение захвата равное 66 ± 8 барн и сечение реакции (n, α) – 2 барна. В оценке сечение реакции (n, α) принято ровно на пять порядков ниже.

Заключение

В РОСФОНД принимаются нейтронные сечения из EAF-2003

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

30.3. Цинк-66

Содержание в естественной смеси 27.9%. Тепловое сечение захвата и резонансный интеграл:

EAF-2003: 0.855 барн и 0.996 барн

Мухабхаб¹: 0.62 ± 0.06 и 1.1

Область разрешенных резонансов в оценке простирается лишь до 98 кэВ (см. рис.4), тогда как у Мухабхаба резонансные параметры приводятся до 370 кэВ.

Данных по радиационному захвату вне резонансной области не имеется.

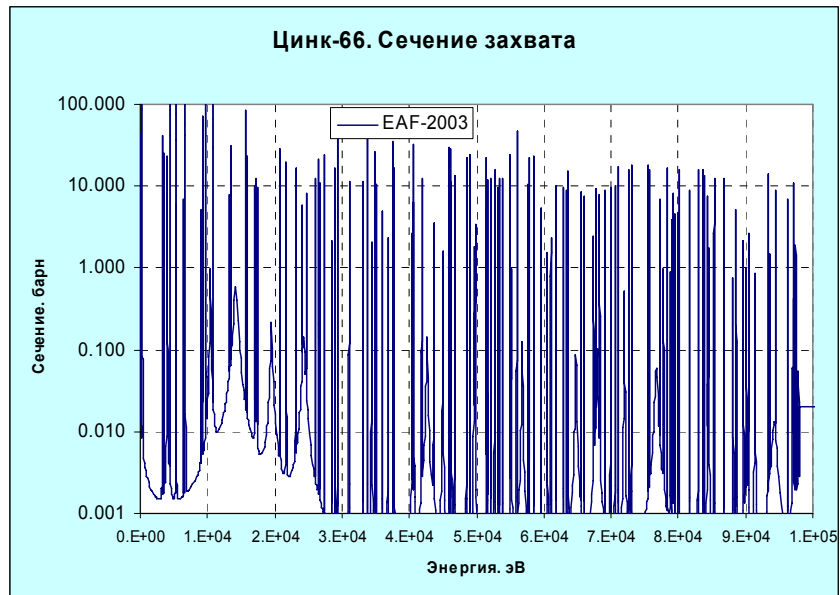


Рис.4

Заключение

В РОСФОНД принимаются нейтронные сечения из EAF-2003. Целесообразность пересмотра оценки очевидна.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

30.4. Цинк-67

Содержание в естественной смеси 4.1%. Тепловое сечение захвата и резонансный интеграл:

EAF-2003: 6.82 барн и 24.22 барн

Мухабхаб¹: 7.5±1.0 и 24.0±2.4

Область разрешенных резонансов в оценке простирается лишь до 150 кэВ (см. рис.5). У Мухабхаба резонансные параметры приводятся до 185 кэВ.

Данных по радиационному захвату вне резонансной области не имеется.

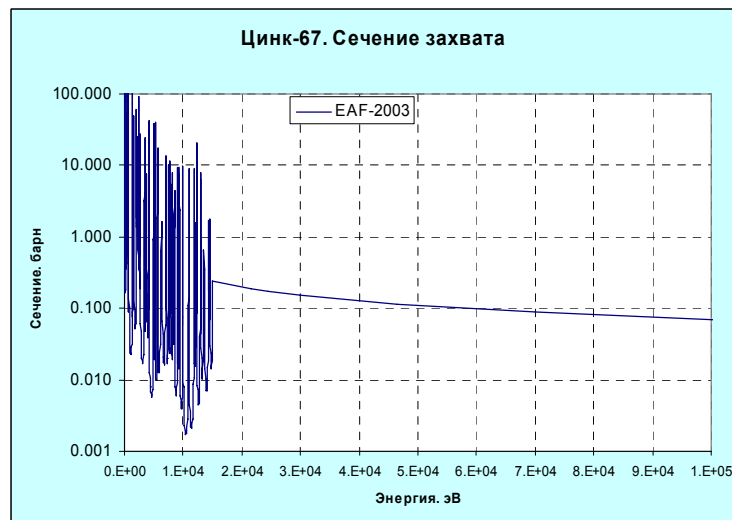


Рис.5

Заключение

В РОСФОНД принимаются нейтронные сечения из EAF-2003. Целесообразность пересмотра оценки очевидна.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

30.5. Цинк-68

Содержание в естественной смеси 18.8%. Тепловое сечение захвата и резонансный интеграл:

EAF-2003: 1.001 барн и 2.961 барн

Мухабхаб¹: 1.07±0.10 и 3.5±0.15

Область разрешенных резонансов простирается до 100 кэВ (см. рис.6а), тогда как у Мухабхаба резонансные параметры приводятся вплоть до 380 кэВ.

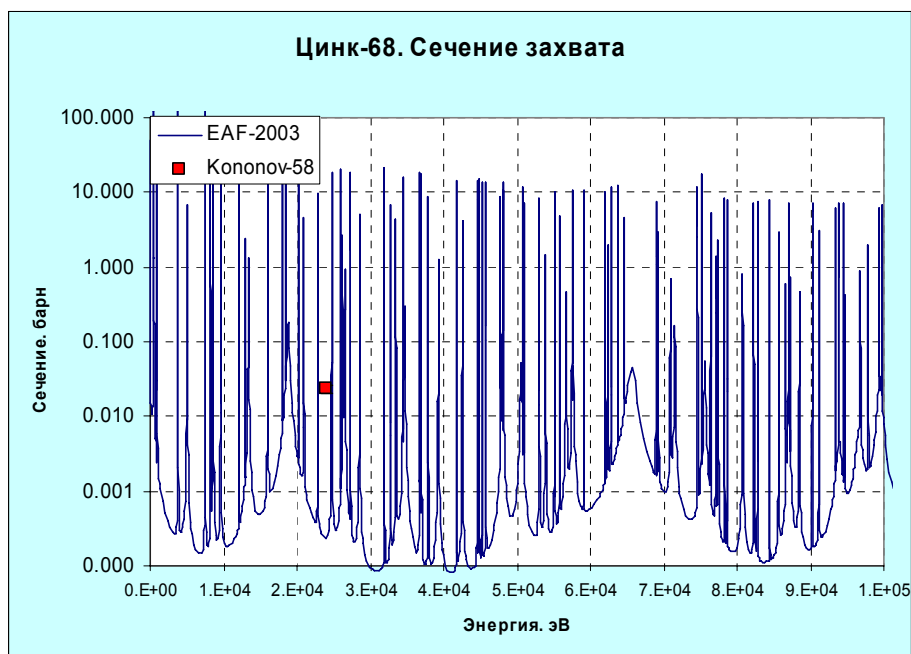


Рис.6а

Вне резонансной области сечение захвата представляется несколько заниженным (см. рис. 6б) даже несмотря на то, что результаты ранней работы Лейпунского и др. , очевидно, завышены. Следует обратить внимание на то, что на рис.6б синими точками изображены результаты измерения сечения захвата с образованием ядра-продукта –цинка-69 – непосредственно в основном состоянии, а коричневыми точками – сечение образования этого ядра в долгоживущем изомерном состоянии. Красными и малиновыми точками изображены результаты измерений полного сечения захвата.

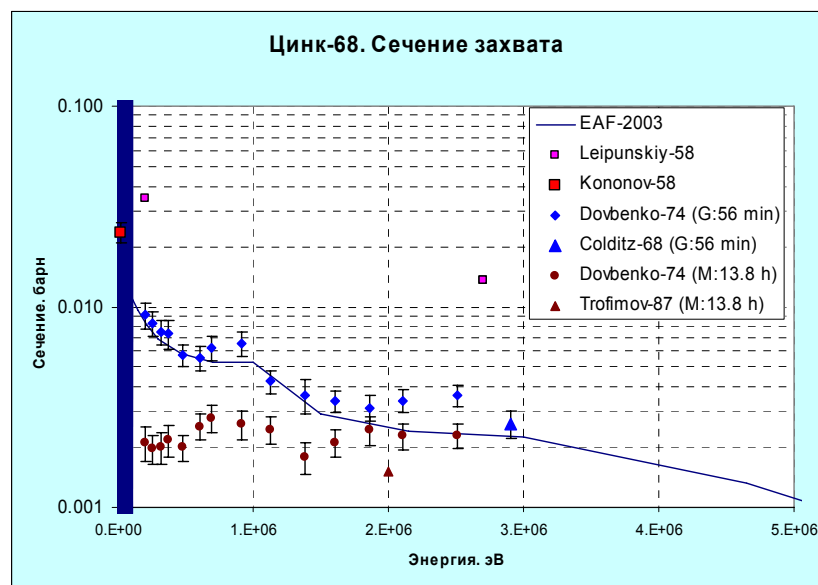


Рис.6б

Заключение

В РОСФОНД принимаются нейтронные сечения из EAF-2003. Парциальные сечения образования различных состояний ядер-продуктов, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 удалить, поскольку долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на этом изотопе не образуется.

Целесообразность пересмотра оценки несомненна.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

30.6. Цинк-70

Содержание в естественной смеси 18.8%. Тепловое сечение захвата и резонансный интеграл:

EAF-2003: 0.092 барн и 0.113 барн

Мухабхаб¹: 0.092±0.005 и 0.86±0.06.

Область разрешенных резонансов простирается до 330 кэВ (см. рис.6а), тогда как у Мухабхаба резонансные параметры приводятся только до 220 кэВ.

Данных о сечении захвата вне тепловой области в EXFOR не содержится.

Заключение

В РОСФОНД принимаются нейтронные сечения из EAF-2003. Парциальные сечения образования различных состояний ядер-продуктов, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 удалить, поскольку долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на этом изотопе не образуется.

Целесообразность пересмотра оценки несомненна.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

30.7. Цинк-72

Радиоактивен. ($T_{1/2}=46.5\text{ч}$). Испытывает бета- распад в галлий-72, который, в свою очередь, распадается в германий-72($T_{1/2}=14.1\text{ч}$).

Заключение

В РОСФОНД принимаются нейтронные сечения из EAF-2003. Парциальные сечения образования различных состояний ядер-продуктов, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 удалить, поскольку долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на этом изотопе не образуется.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

31.ГАЛЛИЙ

31.1. Галлий-67

Радиоактивен ($T_{1/2}=78.3$ ч.). Захватывая орбитальный электрон превращается в стабильный цинк=83.

Возможные источники: реакции $69\text{Ga}(n,3n)$, $70\text{Ge}(n,t)$, $(n,n'd)$. Выход при делении $^{235}\text{U} - 3.7 \cdot 10^{-9}$; $^{239}\text{Pu} - 6.6 \cdot 10^{-13}$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных нет ни в одной из современных библиотек. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений, основанная на теоретических расчетах. Согласно этой оценке сечение захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл равны соответственно

$$\sigma_c = 10.8 \text{ барн}$$

$$RI = 44.5 \text{ барн.}$$

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Файл MF=8 опустить.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

31.2. Галлий-69

Содержание в природной смеси изотопов 60.108%.

Выход при делении $^{235}\text{U} - 3.7 \cdot 10^{-9}$; $^{239}\text{Pu} - 6.6 \cdot 10^{-6}$.

В современных библиотеках оцененных данных содержится оценка Ватанабе (T.Watanabe, 1994 для JENDL-3.2). В ENDF/B-VIb2 эта оценка пересмотрена в резонансной области: число рассматриваемых резонансов сокращено: учтены лишь резонансы, лежащие ниже 3.9 кэВ; резонансу при 3078 эВ приписана вчетверо меньшая нейтронная ширина и он переведен в разряд р-резонансов. Ширины остальных резонансов изменены незначительно.

Из нарастающей суммы числа резонансов (рис.1) не следует наличие значительного пропуска этих резонансов выше 4.6 кэВ. Тем более это не следует из нарастающей суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов (рис.2).

Согласно рассматриваемым оценкам сечения для тепловых нейтронов и резонансный интеграл захвата равны соответственно

JENDL-3.3

ENDF/B-VIIb2

$$\sigma_t = 10.36 \text{ барн}$$

$$\sigma_t = 8.80 \text{ барн}$$

$$\sigma_{el} = 8.16 \text{ барн}$$

$$\sigma_{el} = 8.06 \text{ барн}$$

$$\sigma_c = 2.20 \text{ барн}$$

$$\sigma_c = 1.73 \text{ барн}$$

$$RI = 18.23 \text{ барн}$$

$$RI = 16.2 \text{ барн.}$$

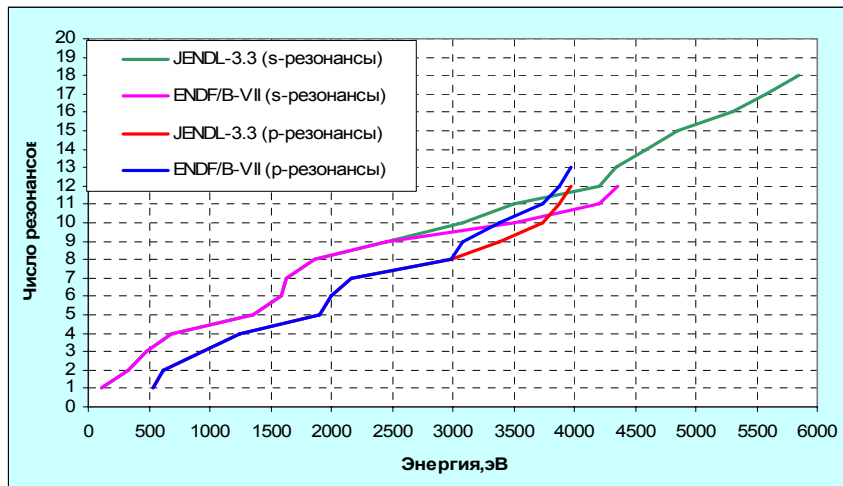


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

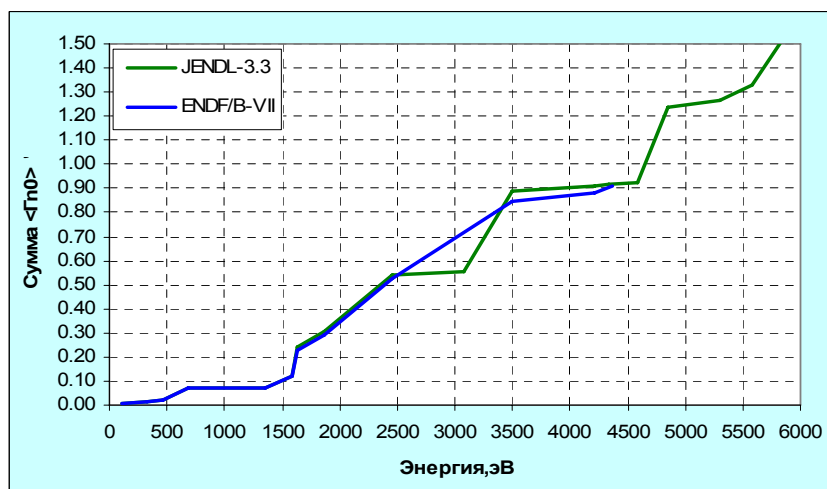


Рис.2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин

Вне резонансной области в ENDF/B-VIIb2 сохранена оценка Ватанабе. Рис. 3 демонстрирует степень согласия оцененного сечения захвата с экспериментальными данными.

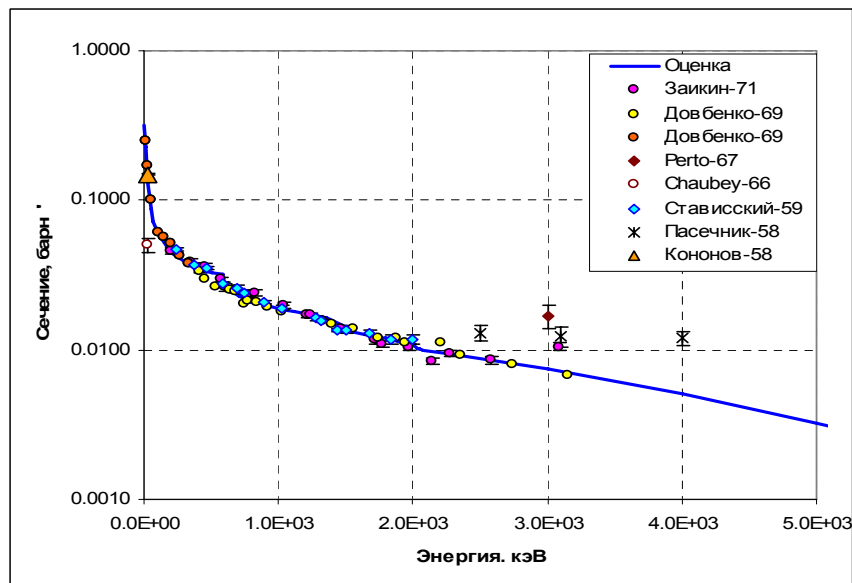


Рис.3. Сечение захвата.

Заключение

Учитывая высокую компетенцию группы специалистов, пересматривавших резонансные параметры, принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из ENDF/B-VIIb2.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

31.3. Галлий-71

Содержание в природной смеси изотопов 39.892%.

Выход при делении $^{235}\text{U} - 2.0 \cdot 10^{-5}$; $^{239}\text{Pu} - 3.7 \cdot 10^{-6}$.

В JENDL-3.3 содержится оценка Ватанабе (T.Watanabe, 1994 для JENDL-3.2). В ENDF/B-VIIb2 эта оценка пересмотрена и резонансной области и, частично, вне ее, так что, по существу, это новая оценка 2005 г. выполненная группой китайских специалистов под руководством С.Мухабхаба. Однако, резонансные параметры почти не изменены (слегка подправлена лишь нейтронная ширина связанного состояния).

Из нарастающей суммы числа резонансов (рис.1) не следует наличие значительного пропуска s-резонансов. Тем более это не следует из нарастающей суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов (рис.2). p-резонансы выше 3.8 кэВ, несомненно пропущены.

Согласно рассматриваемым оценкам сечения для тепловых нейтронов и резонансный интеграл захвата равны соответственно

| JENDL-3.3 | ENDF/B-VIIb2 |
|---------------------------|---------------------------|
| $\sigma_t = 8.95$ барн | $\sigma_t = 9.97$ барн |
| $\sigma_{el} = 5.34$ барн | $\sigma_{el} = 5.24$ барн |
| $\sigma_c = 3.71$ барн | $\sigma_c = 4.73$ барн |
| RI=32.19 барн | RI=32.48 барн. |

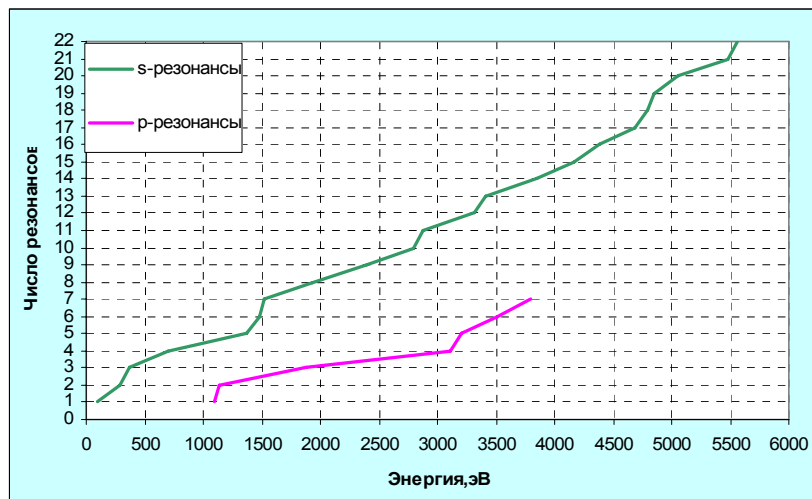


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

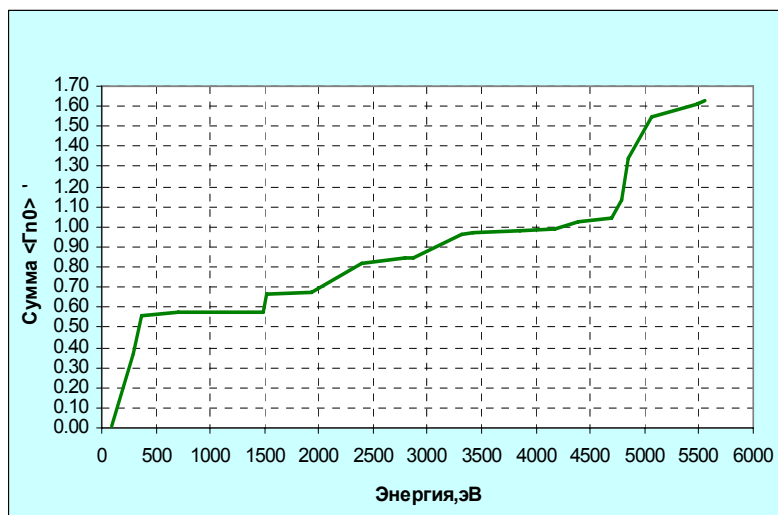


Рис.2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин

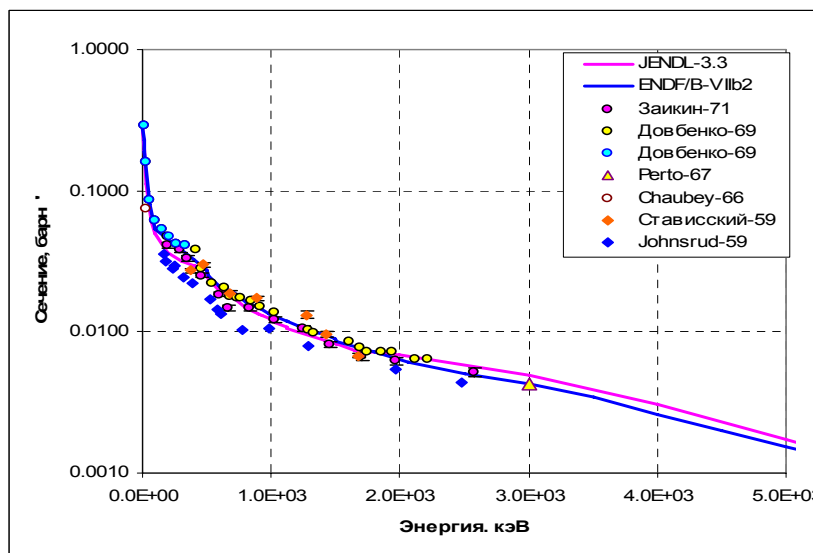


Рис.3. Сечение захвата.

Рис. 3 демонстрирует степень согласия оценок сечений захвата с экспериментальными данными. Можно усмотреть некоторое преимущество новой оценки.

Заключение

Учитывая высокую компетенцию группы специалистов, пересматривавших резонансные параметры, принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из ENDF/B-VIIb2.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

32. ГЕРМАНИЙ

Природный германий содержит 5 изотопов: ^{70}Ge , ^{72}Ge , ^{73}Ge , ^{74}Ge и ^{76}Ge (последний слабо радиоактивен). Кроме того имеется еще три долгоживущих радиоизотопа: ^{78}Ge , ^{79}Ge и ^{81}Ge .

Для стабильных изотопов германия используются следующие оценки:

JENDL-3.3 – оценка Ватанабе (T.Watanabe) 1994 г.;

JEFF-3.1 – оценка Кёнинга (A.J.Koning) 2004 г.;

ENDF/B-VIIb2 – оценка Яوامото, Хермана, Мухабхаба и др. (Iwamoto, Herman, Mughabghab et al) также 2004 г.

Для остальных изотопов имеются лишь оценки нейтронных сечений в EAF-2003.

Ниже будут рассматриваться данные из этих источников и, если будет возможно, будет проводиться сравнение с экспериментальными данными по сечению радиационного захвата.

32.1. Германий-68

Радиоактивен ($T_{1/2}=270.82\text{дн.}$). Распадается путем захвата орбитального электрона в галлий-68, а тот тем же путем – в цинк-68. В реакторах может образовываться в малых количествах путем реакции $^{70}\text{Ge}(n,3n)$ или цепочки реакций $^{70}\text{Ge}(n,2n)^{69}\text{Ge}_{(T_{1/2}=39\text{ч.})}(n,2n)$

Тепловое сечение и резонансный интеграл захвата, следующие из оценки EAF-2003, равны, соответственно, 5.5 барна и 2.9 барна.

Единственный экспериментальный результат – измерение теплового сечения захвата Крейном (Krane-99): 1 ± 0.5 барна.

На рис. 1 показана оцененная энергетическая зависимость сечения захвата. В РОСФОНД рекомендуется включить оценку, перенормированную в области энергий ниже 1 кэВ на экспериментальный результат. При этом сечение захвата и резонансный интеграл принимают значения 1.0 барн и 0.95 барна.

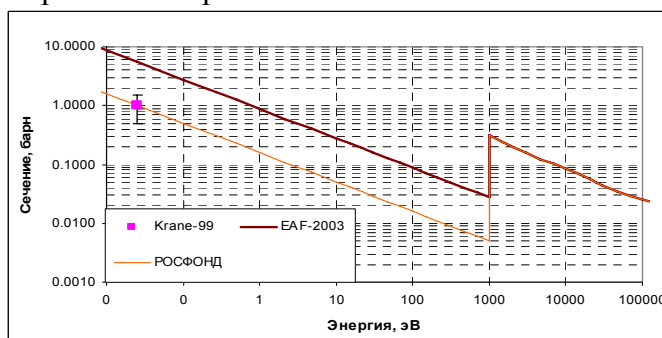


Рис.1. Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку EAF-2003 с измененным сечением захвата.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

32.2. Германий-69

Радиоактивен ($T_{1/2}=39.05$ ч.). Распадается путем захвата орбитального электрона в галлий-69. В реакторах может образовываться путем реакции $^{70}\text{Ge}(n,2n)$.

Тепловое сечение и резонансный интеграл захвата, следующие из оценки EAF-2003, равны, соответственно, 14 барн и 49 барн.

Экспериментальных данных для их проверки нет

На рис. 1 показана оцененная энергетическая зависимость сечения захвата.

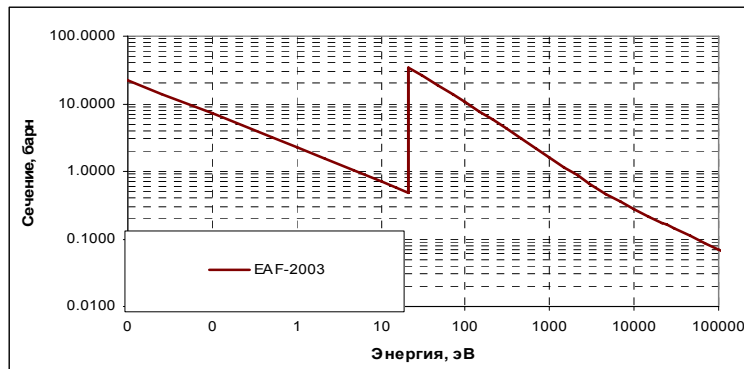


Рис.1. Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

32.3. Германий-70

Содержание в естественной смеси – 20.37%.

Оценка Ватанабе является первой полной оценкой. Она содержит область разрешенных резонансов с параметрами, рекомендованными Мухабхабом в 1981 г. (23 резонанса¹ с максимальной энергией 38.4 кэВ описывают сечения до 15 кэВ). Область неразрешенных резонансов отсутствует. Данных об образовании фотонов нет.

Оценка Кёнинга содержит то же самое описание резонансной области. В пороговых реакциях детально описано возбуждение нескольких состояний ядер-продуктов. Энерго-угловые распределения всех континуальных реакций заданы секциями файла MF=6, содержащих данные об образовании фотонов.

В оценке ENDF/B-VIIb2 область разрешенных резонансов простирается до 14 кэВ и содержит параметры 18 s-резонансов¹ с максимальной энергией 40.3 кэВ и 3 p-резонансов с максимальной энергией 42.3 эВ.

Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата, следующие из оценок ENDF/B-VIIb2, JENDL-3.3 и EAF-2003, равны:

| ENDF/B-VII | JENDL-3.3 | EAF-2003 |
|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| $\sigma_t=16.9$ барн | $\sigma_t=15.5$ барн | |
| $\sigma_{el}=13.9$ барн | $\sigma_{el}=12.6$ барн | |
| $\sigma_c=3.0$ барн | $\sigma_c=2.9$ барн | $\sigma_c=3.2$ барн |
| RI=2.5 барн | RI=2.4 барн. | RI=2.3 барн |

¹ Включая связанное состояние

Экспериментальные данные по сечению захвата:

Mannhart-68: $\sigma_c=3.15\pm0.16$ барн;

Alexander-63: $\sigma_c=2.8\pm0.07$ барн;

Brooksbank-55: $\sigma_c=3.9\pm1.2$;

Pomerance-52: $\sigma_c=3.28\pm0.25$

не противоречат ни одной оценке.

На рис.1 показаны нарастающие суммы числа резонансов. Различие обусловлено не только выделением в новой оценке р-резонансов, но и отказом от трех слабых уровней.

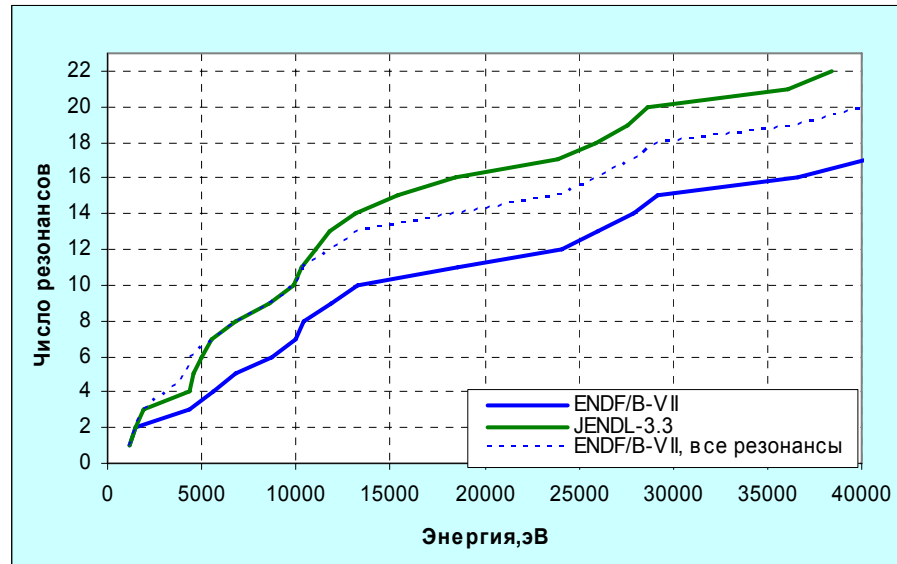


Рис.1. Нарастающая сумма числа резонансов.

Последнее видно из рис.2, где сравниваются суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов (в случае JENDL-3.3 – все резонансы – s).

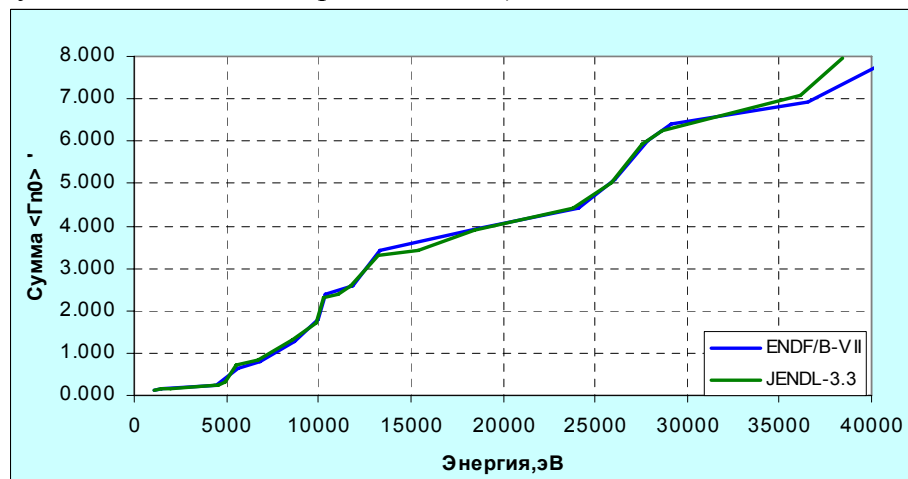


Рис.2. Сумма приведенных нейтронных ширин s-резонансов.

На рис. 3 показана оцененная энергетическая зависимость сечения захвата. Различие выше 3 кэВ обусловлено тем, что в ENDF/B-VII учтен пропуск уровней путем введения плавной подложки в файл MF=3. Экспериментальные данные Уолтера подтверждают необходимость этой подложки.

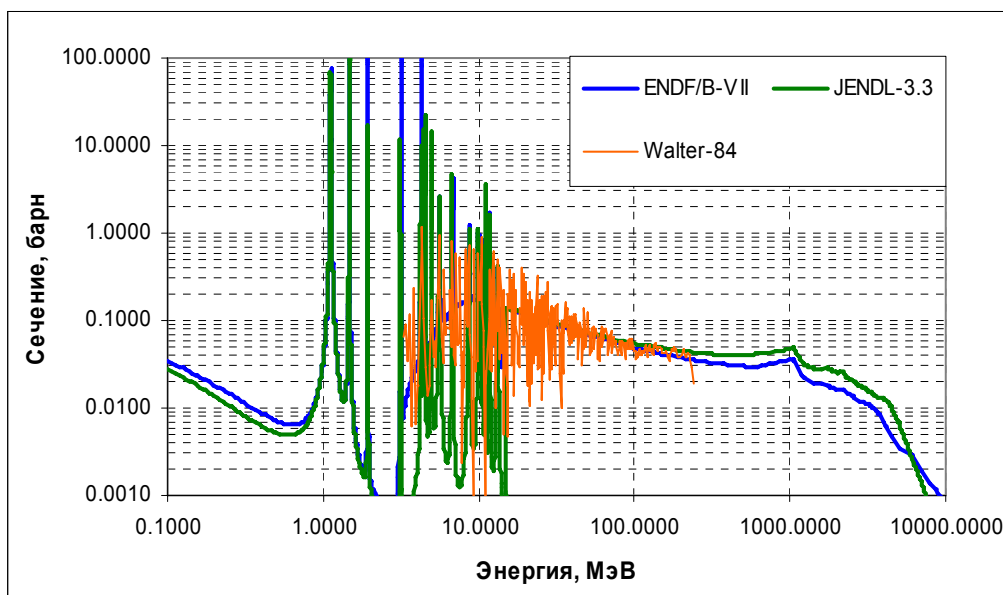


Рис.3а Сечение захвата

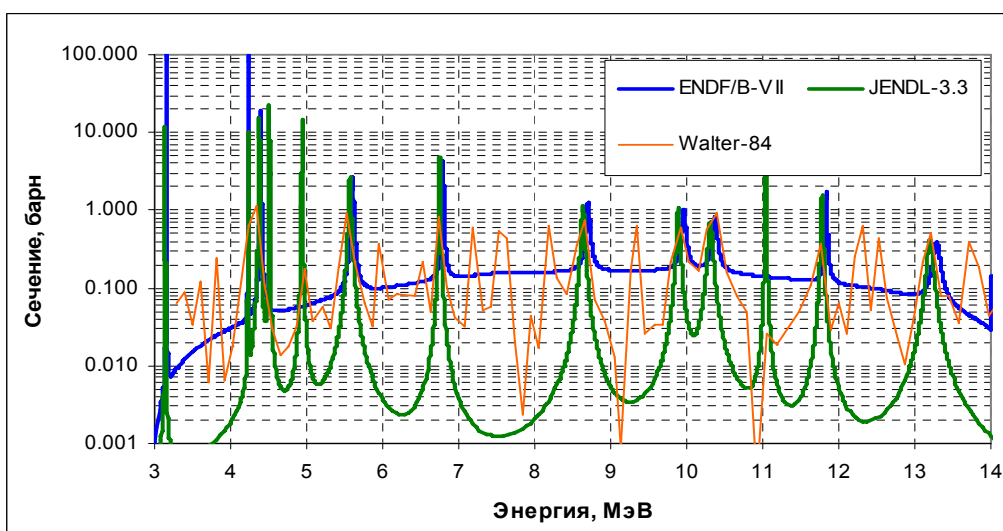


Рис.3б. Сечение захвата

Отметим, что в EXFORе имеются данные по полному сечению, сечениям реакций $(n,2n)$, (n,p) и (n,α) , а также по упругому рассеянию тепловых нейтронов. Сечение упругого рассеяния измерялось лишь Вертебным и др (1970) в тепловой точке. Полученный результат 8.8 ± 0.8 барна существенно ниже оценки.

Данные по пороговым реакциям согласуются с оцененными.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

32.4. Германий-71

Радиоактивен ($T_{1/2}=11.43$ дн.). Распадается путем захвата орбитального электрона в галлий-71. В реакторах может образовываться, главным образом, путем реакции $^{70}\text{Ge}(n,\gamma)$.

Тепловое сечение и резонансный интеграл захвата, следующие из оценки EAF-2003, равны, соответственно, 13 барн и 20 барн.

Экспериментальных данных для их проверки нет

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку EAF-2003. Сечения образования ядра-продукта в различных состояниях, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и сумму записать в соответствующую секцию файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 удалить.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

32.5. Германий-72

Содержание в естественной смеси – 27.31%.

Во всех современных оценках используется формально одинаковое описание области разрешенных резонансов: она содержит параметры 14 s-резонансов (включая связанное состояние) с максимальной энергией 39.5 кэВ) и трех p-резонансов с максимальной энергией 218 эВ. Однако границы области различны: в ENDF/B-VIIb2 она распространена только до 12 кэВ. Тогда как в двух других оценках – до 40 кэВ. Область неразрешенных резонансов присутствует только в оценке ENDF/B-VIIb2 и распространена до порога неупругого рассеяния – т.е. до 701.096 кэВ. Учтены вклады s-, p- и d-волн.

Данных об образовании фотонов содержатся только в ENDF/B-VIIb2 и в JEFF-3.1. В последнем случае они включены в секции файла MF=6.

Файл данных JEFF-3.1 описывает область энергий до 200 МэВ4 остальные – до 20 МэВ. В JEFF-3.1 содержатся данные о таких экзотических реакциях, как (n,2p), (n,2 α), и (n,p α), первая из которых обладает максимальным сечением, составляющим при 20 МэВ 5 микробарн.

Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата, следующие из оценок ENDF/B-VIIb2, JENDL-3.3 и JEFF-3.1, естественно, весьма близки:

| ENDF/B-VIIb2 | JENDL-3.3 |
|--------------------------|--------------------------|
| $\sigma_t=9.814$ барн | $\sigma_t=9.975$ барн |
| $\sigma_{el}=8.928$ барн | $\sigma_{el}=9.165$ барн |
| $\sigma_c=0.886$ барн | $\sigma_c=0.810$ барн |
| RI=0.828 барн | RI=0.746 барн |

Экспериментальные данные по сечению захвата:

Koester-87: $\sigma_c=0.8\pm 0.02$ барн;

Pomerance-52: $\sigma_c=0.94\pm 0.09$

не противоречат оценкам.

На рис.1 показана нарастающая сумма числа резонансов. Очевидно наличие пропуска уровней при энергиях выше 12 кэВ. Судя по рис. 2, на котором изображена

нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин,, пропущенные резонансы имеют малые ширины; однако поскольку нейтронные ширины в среднем много больше радиационных, резонансы с малыми нейтронными ширинами должны давать большой вклад в резонансный интеграл захвата. Это объясняет и обосновывает снижение границы области разрешенных резонансов в ENDF/B-VII и введение в этой оценке области неразрешенных резонансов.

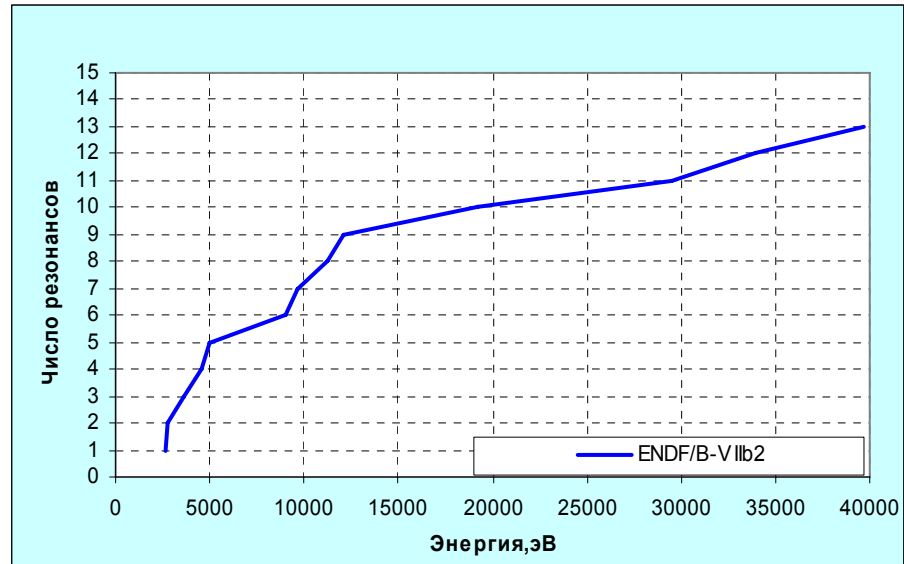


Рис.1. Нарастающая сумма числа s-резонансов.

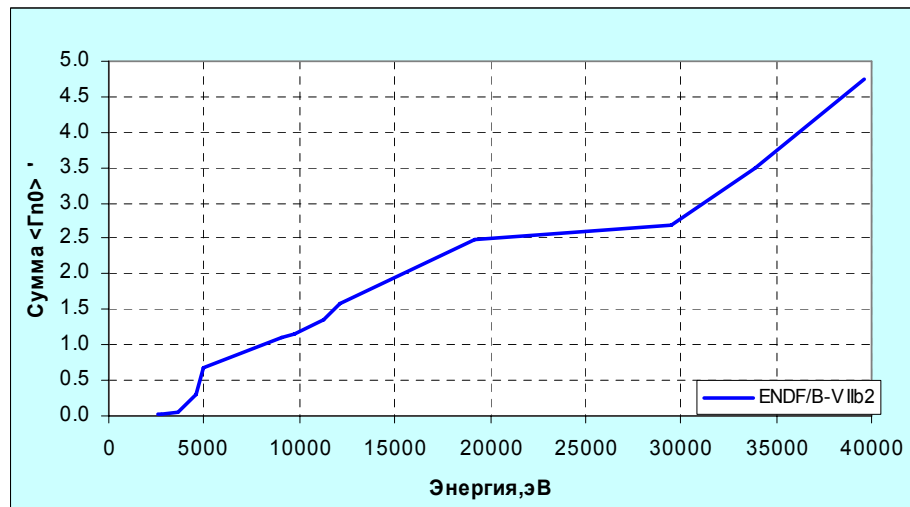


Рис.2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин s-резонансов

На рис. 3 показаны оцененные энергетические зависимости сечения захвата. Экспериментальные данные отсутствуют.

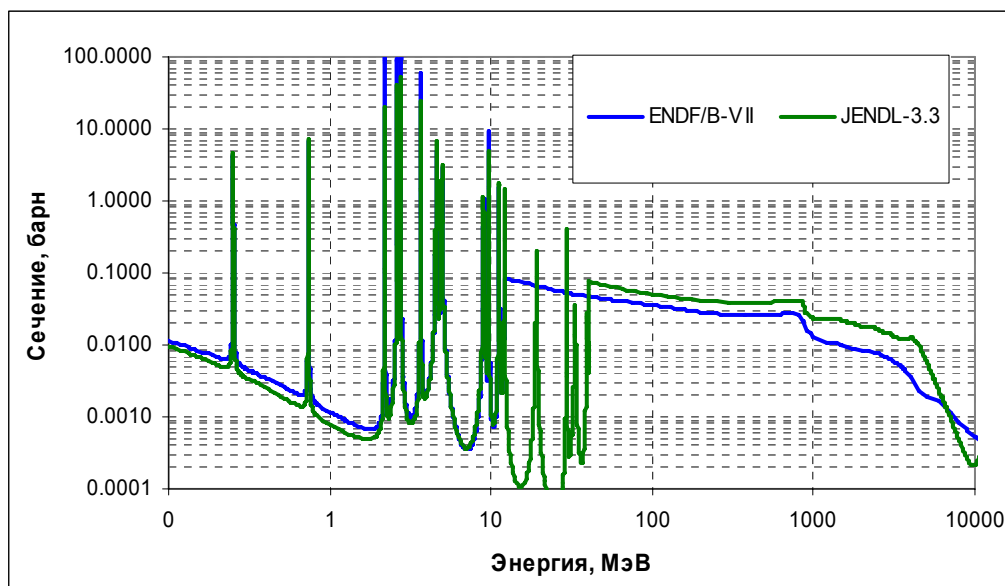


Рис.3 Сечение захвата

Отметим, что в EXFORе имеются данные по полному сечению, сечениям (n,p) и (n,a), а также по упругому рассеянию тепловых нейтронов. Сечение упругого рассеяния измерялось лишь Вертебным и др (1970) в тепловой точке. Полученный результат 7.5 ± 0.8 барна заметно ниже оценки.

Данные по пороговым реакциям не противоречат оцененным.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

32.6. Германий-73

Содержание в естественной смеси – 7.76%.

Во всех современных оценках используется формально одинаковое описание области разрешенных резонансов: везде содержатся параметры 49 резонансов. В JEFF-3.1 и в JENDL-3.3 все эти резонансы считаются s-резонансами, два из них являются связанными состояниями. В ENDF/B-VII всего 46 s- резонансов (из них одно связанное состояние) и 3 p-резонанса. Границы области несколько различны: в ENDF/B-VIIb2 она распространена до 8630 эВ, тогда как в двух других оценках – до 8530 эВ. Область неразрешенных резонансов присутствует только в оценке ENDF/B-VIIb2 и распространена до порога неупругого рассеяния – т.е. до 13.468 кэВ. Учтены вклады s-, p- и d-волн.

Данных об образовании фотонов содержатся только в ENDF/B-VIIb2 и в JEFF-3.1. В последнем случае они включены в секции файла MF=6.

Файл данных JEFF-3.1 описывает область энергий до 200 МэВ, остальные – до 20 МэВ. В JEFF-3.1 содержатся данные о таких экзотических реакциях, как (n,2p), (n,2α), и (n,ра), первая из которых обладает максимальным сечением, составляющим при 20 МэВ 1 микробарн.

Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата, следующие из оценок ENDF/B-VIIb2, JENDL-3.3 и JEFF-3.1, естественно, весьма близки:

ENDF/B-VIIb2

$\sigma_t=19.5$ барн

$\sigma_{el}=4.8$ барн

$\sigma_c=14.7$ барн

RI=62.8 барн

JENDL-3.3

$\sigma_t=19.2$ барн

$\sigma_{el}=4.8$ барн

$\sigma_c=14.4$ барн

RI=62.2 барн

Экспериментальные данные по сечению захвата:

Koester-87: $\sigma_c=14.4\pm 0.4$ барн;

Pomerance-52: $\sigma_c=13.8\pm 1.1$

не противоречат оценкам.

На рис.1 показана нарастающая сумма числа резонансов. Очевидно наличие пропуска уровней при энергиях выше 3 кэВ. Судя по рис. 2, на котором изображена нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин, пропущенные резонансы имеют малые ширины; однако поскольку нейтронные ширины в среднем много больше радиационных, резонансы с малыми нейтронными ширинами должны давать большой вклад в резонансный интеграл захвата. Это заставляет усомниться в обоснованности распространения области разрешенных резонансов до 8.5 - 8.6 кэВ без какой-либо компенсации вклада пропущенных резонансов в сечение захвата.

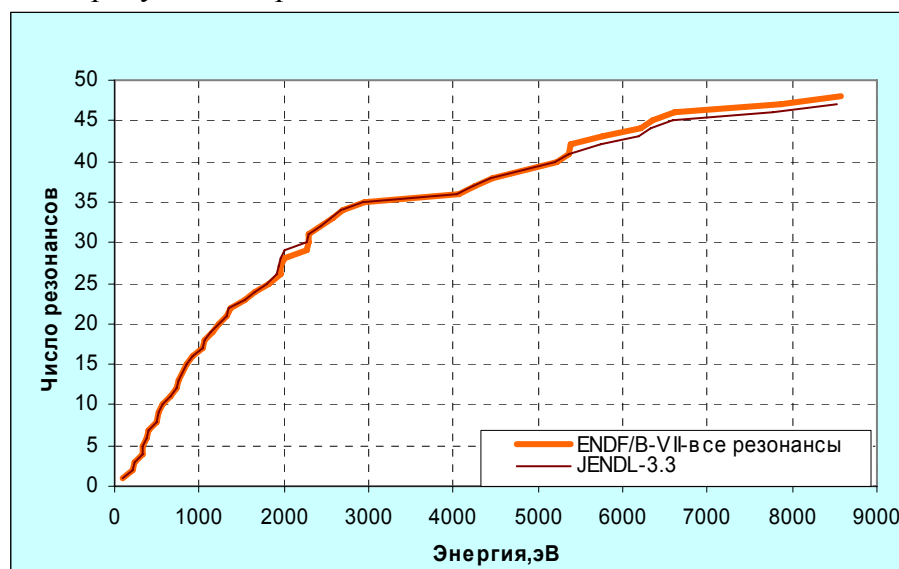


Рис.1. Нарастающая сумма числа s-резонансов.

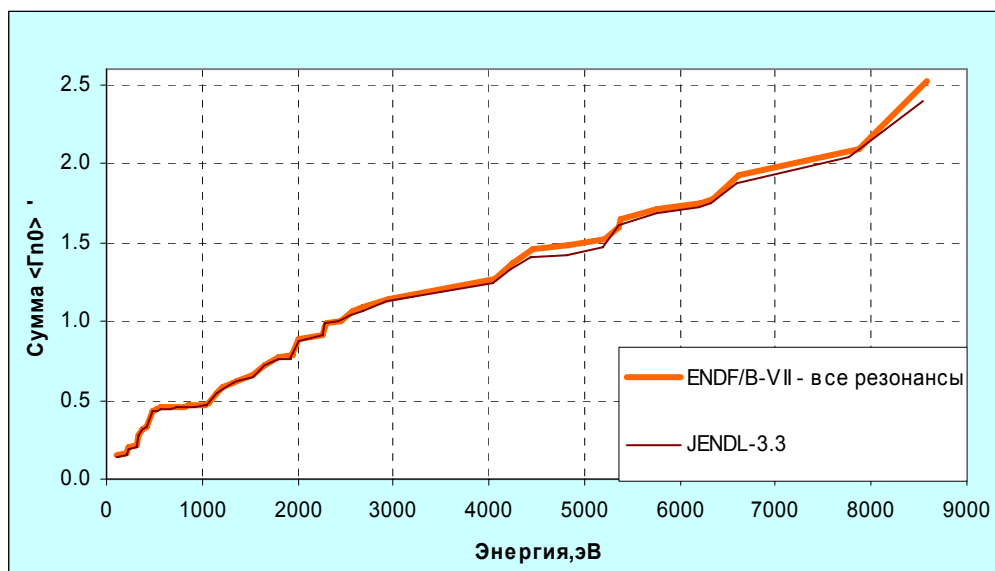


Рис.2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин s-резонансов

На рис. 3 сравниваются оцененные энергетические зависимости сечения захвата ENDF/B-VII и JENDL-3.3. Приведена также оценка, в которой область разрешенных резонансов ограничена 3 кэВ, а выше начинается область неразрешенных резонансов. И там и там использованы параметры ENDF/B-VII. Жирными отрезками показаны результаты усреднения сечений ENDF/B-VII по интервалам 1 - 3 кэВ и 3 - 8.6 кэВ. Видно, что во втором из них сечение явно занижено и этого удастся избежать, описав поведение сечений в этой области средними резонансными параметрами. В интервале 1 – 3 кэВ среднее сечение, рассчитанное по параметрам разрешенных резонансов удовлетворительно «стыкуется» с данными при более высоких энергиях.

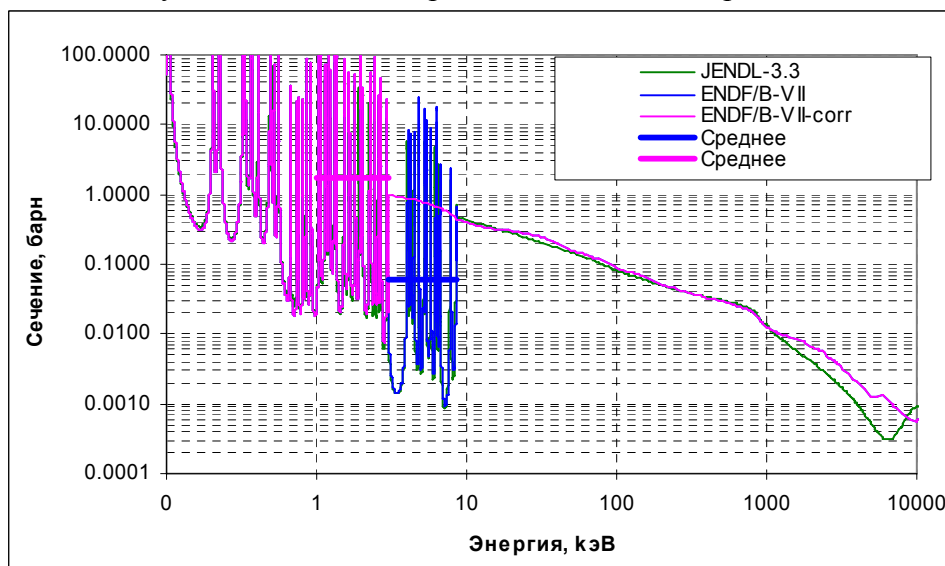


Рис.3 Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2, ограничив область разрешенных резонансов 3 кэВ и снизив до этой энергии нижнюю границу области неразрешенных резонансов.

Автор рекомендации
Николаев М.Н.

32.7. Германий-74

Содержание в естественной смеси –36.73% .

Область разрешенных резонансов в JEFF-3.1 и в JENDL-3.3 содержит параметры 10 s-резонансов (в том числе одно связанное состояние), тогда как в ENDF/B-VII описано на один резонанс больше: присутствует очень слабый резонанс при 4.17 кэВ. В предыдущих оценках этот резонанс рассматривается как р-резонанс. Параметры s-резонансов в этих оценках слегка различаются. Главное различие в том, что область разрешенных резонансов в JENDL-3.3 распространена до 62 кэВ, т.е. включает даже последний – сильный – резонанс при 61 кэВ; в ENDF/B-VII эта область ограничена 6.0 кэВ и включает только пять резонансов (в том числе связанное состояние).

В отличие от предыдущих оценок, в ENDF/B-VII введена область неразрешенных резонансов, простирающаяся до порога неупругого рассеяния -60.4 кэВ.

Данных об образовании фотонов содержатся только в ENDF/B-VIIb2 и в JEFF-3.1. В последнем случае они включены в секции файла MF=6.

Файл данных JEFF-3.1 описывает область энергий до 200 МэВ4 остальные – до 20 МэВ. В JEFF-3.1 содержатся данные о таких экзотических реакциях, как (n,2p), (n,2 α), и (n,p α), первая из которых обладает максимальным сечением, составляющим при 20 МэВ 1 микробарн.

Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата, следующие из оценок ENDF/B-VIIb2, JENDL-3.3 и JEFF-3.1, таковы:

| ENDF/B-VIIb2 | JENDL-3.3 |
|--------------------------|--------------------------|
| $\sigma_t=7.74$ барна | $\sigma_t=7.27$ барна |
| $\sigma_{el}=7.22$ барна | $\sigma_{el}=6.85$ барна |
| $\sigma_c=0.52$ барна | $\sigma_c=0.42$ барна |
| RI=0.61 барна | RI=0.42 барна |

Экспериментальные данные по сечению захвата:

Koester-87: $\sigma_c=0.4\pm 0.2$ барн;

Brooksbank-55 $\sigma_c=0.53\pm 0.1$ барн;

Pomerance-52: $\sigma_c=0.6\pm 0.06$

в пределах немалых погрешностей согласуются друг с другом и не противоречат оценкам

На рис.1 показана нарастающая сумма числа резонансов. Очевидно наличие пропуска уровней при энергиях выше 3 кэВ. Судя по рис. 2, на котором изображена нарастающая сумма приведенных нейтроновых ширин, пропущенные резонансы имеют малые ширины; однако поскольку нейтронные ширины в среднем много больше радиационных, резонансы с малыми нейтронными ширинами должны давать большой вклад в резонансный интеграл захвата. Это заставляет усомниться в обоснованности распространения области разрешенных резонансов до 8.5 - 8.6 кэВ без какой-либо компенсации вклада пропущенных резонансов в сечение захвата.

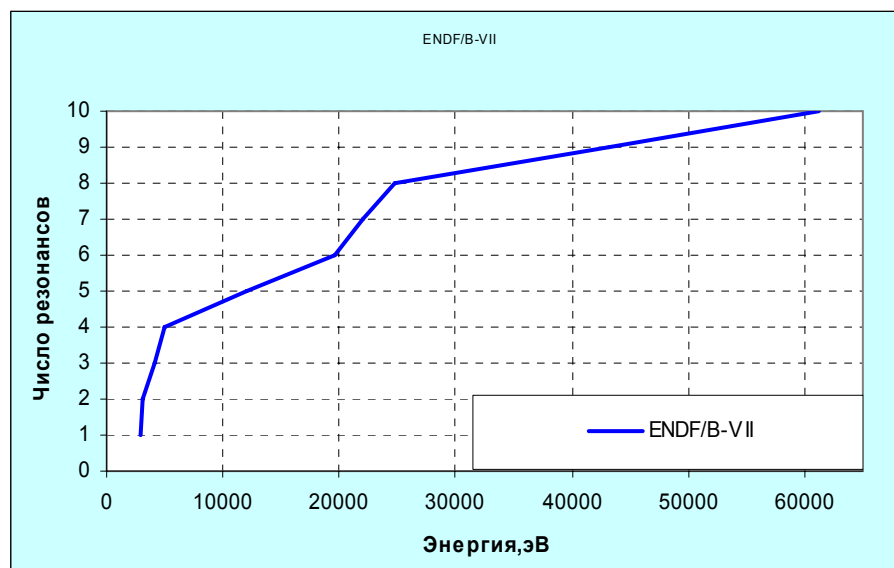


Рис.1. Нарастающая сумма числа s-резонансов.

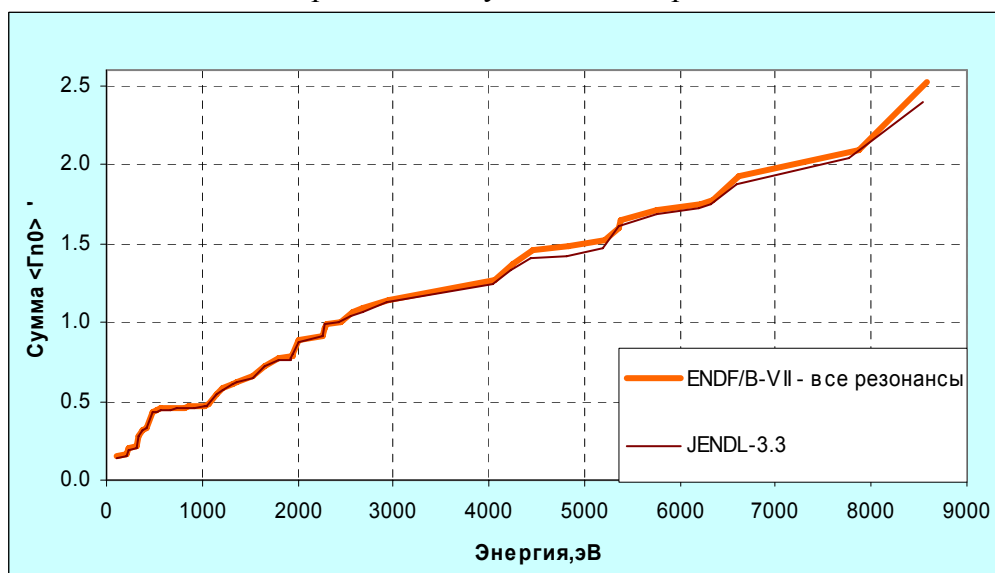


Рис.2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин s-резонансов

На рис. 3 сравниваются оцененные энергетические зависимости сечения захвата ENDF/B-VII и JENDL-3.3 друг с другом и с экспериментальными данными. Рисунок показывает, что несмотря на кажущееся из рис.2 отсутствие пропуска сильных уровней, влияние э того пропуска на сечение захвата весьма велико. Снижение границы области разрешенных резонансов, предпринятое в оценке ENDF/B-VII, представляется вполне оправданным, хотя более корректным было бы учесть через средние резонансные параметры вклад только неразрешенных р-резонансов а структуру, обусловленную разрешенными s-резонансами. К сожалению, современный формат ENDF/B не позволяет этого сделать.

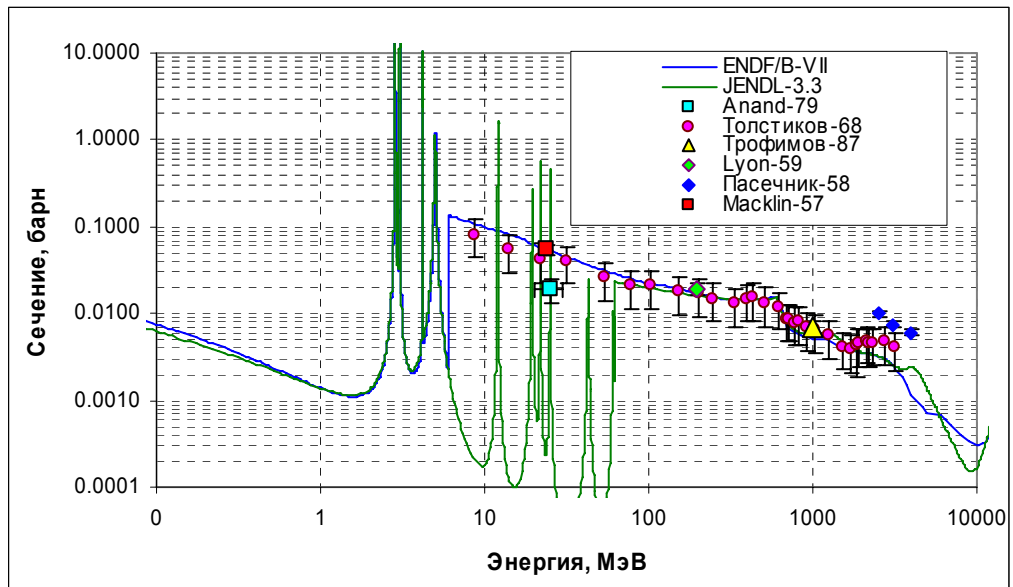


Рис.3 Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

32.8. Германий-76

Содержание в естественной смеси –7.44%. Очень слабо радиоактивен ($T_{1/2}=1.53 \cdot 10^{21}$ лет). Испытывает бета-распад в мышьяк-76, а тот- в селен-76.

Область разрешенных резонансов в JEFF-3.1 и в JENDL-3.3 содержит параметры 10 s-резонансов (в том числе одно связанное состояние), тогда как в ENDF/B-VII описано на один резонанс больше: дополнительно присутствует сравнительно узкий резонанс при 6.177 кэВ. Параметры s-резонансов в сравниваемых оценках слегка различаются. Главное различие в том, что область разрешенных резонансов в JENDL-3.3 распространена до 50 кэВ, т.е. включает даже последний – сильный – резонанс при 47.7 кэВ; в ENDF/B-VII эта область ограничена 3.0 кэВ и включает все резонансы, кроме последнего резонансов.

В отличие от предыдущих оцене, в ENDF/B-VII введена область неразрешенных резонансов, простирающаяся до порога неупругого рассеяния – 570.4 кэВ.

Данных об образовании фотонов содержатся только в ENDF/B-VIIb2 и в JEFF-3.1. В последнем случае они включены в секции файла MF=6.

Файл данных JEFF-3.1 описывает область энергий до 200 МэВ; остальные – до 20 МэВ.

Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата, следующие из оценок ENDF/B-VIIb2, JENDL-3.3 и JEFF-3.1, таковы:

ENDF/B-VIIb2

$\sigma_t=8.57$ барна

$\sigma_{el}=8.42$ барна

$\sigma_c=0.15$ барна

RI=1.33 барна

JENDL-3.3

$\sigma_t=7.91$ барна

$\sigma_{el}=7.76$ барна

$\sigma_c=0.15$ барна

RI=1.30 барна

Экспериментальные данные по сечению захвата сильно разбросаны. Ниже приводятся как данные по полному сечению захвата, так и по захвату с образованием ^{77}Ge в основном ($T_{1/2}=11.3$ ч.) и в изомерном ($T_{1/2}=53$ сек) состояниях.

Brooksbank-55 $\sigma_c=0.30\pm 0.06$ барн;
Pomerance-52: $\sigma_c=0.35\pm 0.07$ барн;
Seren-47: $\sigma_c=0.085\pm 0.017$ барн;
Heft-78: $\sigma_c=0.055\pm 0.001$ барн (G);
Heft-78: $\sigma_c=0.038\pm 0.001$ барн (M);
Der Mateosian-62: $\sigma_c=0.076\pm 0.015$ барн (G);
Der Mateosian-62: $\sigma_c=0.087\pm 0.015$ барн (M);
Mannhart-68: $\sigma_c=0.086\pm 0.009$ барн (M);

При столь большом разбросе результатов принятая оценка представляется приемлемой.

На рис. 1 сравниваются оцененные энергетические зависимости сечения захвата ENDF/B-VII и JENDL-3.3 друг с другом и с экспериментальными данными. Ясно виден дополнительный резонанс. Судя по экспериментальным данным, полученным при 25 кэВ, сечение захвата в верхней части области разрешенных резонансов несколько недооценивается.

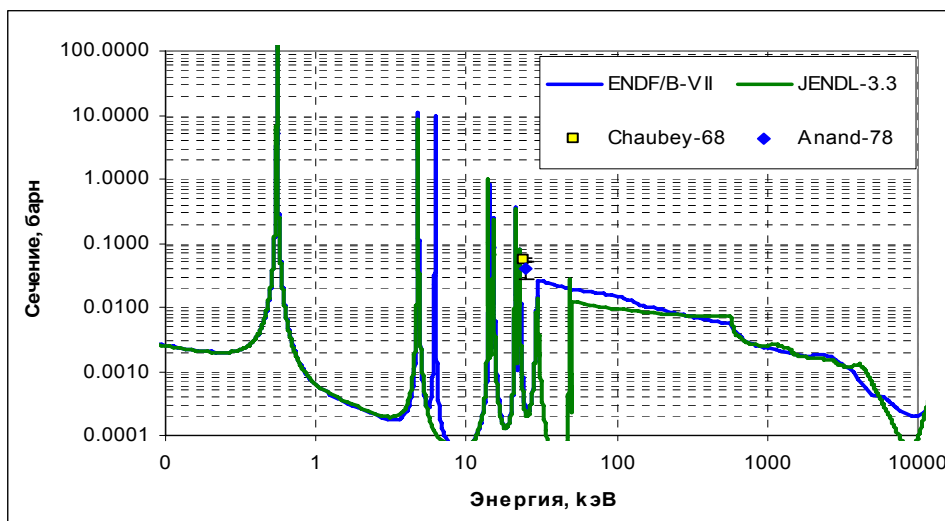


Рис.1 Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2

Автор рекомендации
Николаев М.Н.

33. МЫШЬЯК

33.1. Мышьяк-71

Радиоактивен ($T_{1/2}=65.28$ ч.). Захватывая орбитальный электрон, превращается в германий-71, который тем же путем распадается ($T_{1/2}=11.43$ дн.) в стабильный галлий-71.

В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакций $^{73}\text{As}_{(80.3 \text{ дн.})}(n,3n)$ и $^{74}\text{Se}_{(0.89\%)}(n,n't)$. Выход при делении $^{235}\text{U} - 2.9 \cdot 10^{-10}$; при делении $^{239}\text{Pu} -$ нет.

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. Теоретически оцененные сечения нейтронных реакций приводятся в EAF-2003 (последняя на данный момент оценка).

Экспериментальных данных для непосредственной проверки оцененных данных не имеется. Согласно оценке, сечение захвата тепловых нейтронов равно 23 барна; $RI=367$ барн. Сечение реакции (n,α) для тепловых нейтронов ничтожно мало.

Заключение

Включить в библиотеку РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

33.2. Мышьяк-72

Радиоактивен ($T_{1/2}=26.0$ ч.). Захватывая орбитальный электрон, превращается в стабильный германий-72.

В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакций $^{73}\text{As}_{(80.3 \text{ дн.})}(n,2n)$ и $^{74}\text{Se}_{(0.89\%)}(n,n'd)$. Выход при делении $^{235}\text{U} - 2.5 \cdot 10^{-9}$; при делении $^{239}\text{Pu} - 1.4 \cdot 10^{-14}$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. Теоретически оцененные сечения нейтронных реакций приводятся в EAF-2003 (последняя на данный момент оценка).

Экспериментальных данных для непосредственной проверки оцененных данных не имеется. Согласно оценке, сечение захвата тепловых нейтронов равно 14.2 барна; $RI=102$ барна. Сечение реакции (n,α) для тепловых нейтронов ничтожно мало.

Заключение

Включить в библиотеку РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Файлы MF=10 и MF=8 опустить.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

33.3. Мышьяк-73

Радиоактивен ($T_{1/2}=80.30$ дн.). Захватывая орбитальный электрон, превращается в стабильный германий-73.

В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакций ^{75}As ($n,3n$), цепочки реакций ^{75}As ($n,2n$) ^{74}As ($n,2n$) и $^{74}\text{Se}_{(0.89\%)}(n, d)$, (n,p). Выход при делении $^{235}\text{U} - 5.6 \cdot 10^{-8}$; при делении $^{239}\text{Pu} - 9.1 \cdot 10^{-13}$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. Теоретически оцененные сечения нейтронных реакций приводятся в EAF-2003 (последняя на данный момент оценка).

Экспериментальных данных для непосредственной проверки оцененных данных не имеется. Согласно оценке, сечение захвата тепловых нейтронов равно 14.7 барна; $RI=83.6$ барна. Сечение реакции (n,α) для тепловых нейтронов ничтожно мало.

Заключение

Включить в библиотеку РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в секцию MT=103 файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

33.4. Мышьяк-74

Радиоактивен ($T_{1/2}=17.77$ дн.). Захватывая орбитальный электрон, превращается в стабильный германий-73 (66%); в остальных случаях испытывает бета-распад в селен-74.

В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакций ^{75}As ($n,2n$) и $^{74}\text{Se}_{(0.89\%)}(n, p)$. Выход при делении $^{235}\text{U} - 4.1 \cdot 10^{-7}$; при делении $^{239}\text{Pu} - 5.6 \cdot 10^{-11}$.

В ENDF/B-VII содержится полный набор нейтронных данных для этого изотопа, полученный путем теоретических расчетов Прютом, МакНаббом и Ормандом (J. Pruet, D. McNabb & E. Ormand (UCRL-TR-210452)).

Теоретически оцененные сечения нейтронных реакций приводятся в также и в EAF-2003, на которую ссылаются и авторы вышеупомянутой оценки. Несмотря на ссылку результаты оценки сечения радиационного захвата кардинально различаются: согласно ENDF/B-VII: $\sigma_c=26\ 117$ барн; $RI=172423$ барн. Между 10^{-5} эВ и 1кэВ сечение захвата, меняющееся на 4 порядка, интерполируется по линейному закону. Между тем и при 10^{-5} эВ сечение захвата в EAF-2003 меньше, чем в ENDF/B-VII почти в 100 раз. Сечение при 0.0253 эВ и резонансный интеграл в EAF-2003 равны, соответственно, 19 барн и 212 барн.

Экспериментальных данных для непосредственной проверки оцененных данных не имеется. Никаких оснований для того, чтобы приписать сечению захвата столь высокое значение в комментариях к файлу не содержится. Принятое грубое поточечное представление не выдерживает критики.

Заключение

Включить в библиотеку РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

33.5. Мышьяк-75

Единственный стабильный изотоп

Выход при делении $^{235}\text{U} - 3.0 \cdot 10^{-4}$; $^{239}\text{Pu} - 2.5 \cdot 10^{-5}$.

В JEFF-3.1 содержится оценка Шентера и Шмиттроса (R. Schenter, F.Schmittroth), слегка уточненная в 1982 г. рабочей группой оценщиков. В области разрешенных резонансов содержатся параметры 32 резонансов до 3.365 кэВ. Области неразрешенных резонансов нет.

В JENDL-3.3 и в ФОНД-2.2 содержится оценка, выполненная в 1990 г. японской рабочей группой по продуктам деления. Область разрешенных резонансов распространяется до 9.7 кэВ, содержит выше энергии связи нейтрона параметры 243 s- и 5 p-резонансов с максимальной энергией около 12 кэВ; кроме того, определены 2 связанных состояния. Область неразрешенных резонансов распространена до 100 кэВ; все сечения в этой области полностью описываются заданными средними резонансными параметрами.

В ENDF/B-VII содержится полный набор нейтронных данных для этого изотопа, полученный выше 100 кэВ путем теоретических расчетов Прютом, МакНаббом и Ормандом (J. Pruet, D. McNabb & E. Ormand (UCRL-TR-210452)). Ниже 100 кэВ – резонансная область, заимствованная из JENDL-3.3

Сечения взаимодействия тепловых нейтронов и резонансные интегралы захвата из сравниваемых оценок приведены в нижеследующей таблице.

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|--------------|-----------------------------|---------|--------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | | | 4.3 | 71.75 |
| JENDL-3.3 | 9.93 | 5.43 | 4.5 | 63.9 |
| ENDF/B-VIIb2 | 9.93 | 5.43 | 4.5 | 63.9 |

На рис. 1. приведена нарастающая сумма s-резонансов. По характеру кривой видно, что пропуск резонансов не существен. Более того, вероятно, часть p-резонансов выше 5 кэВ идентифицирована как s- резонансы (о чем можно судить по возросшей крутизне кривой).

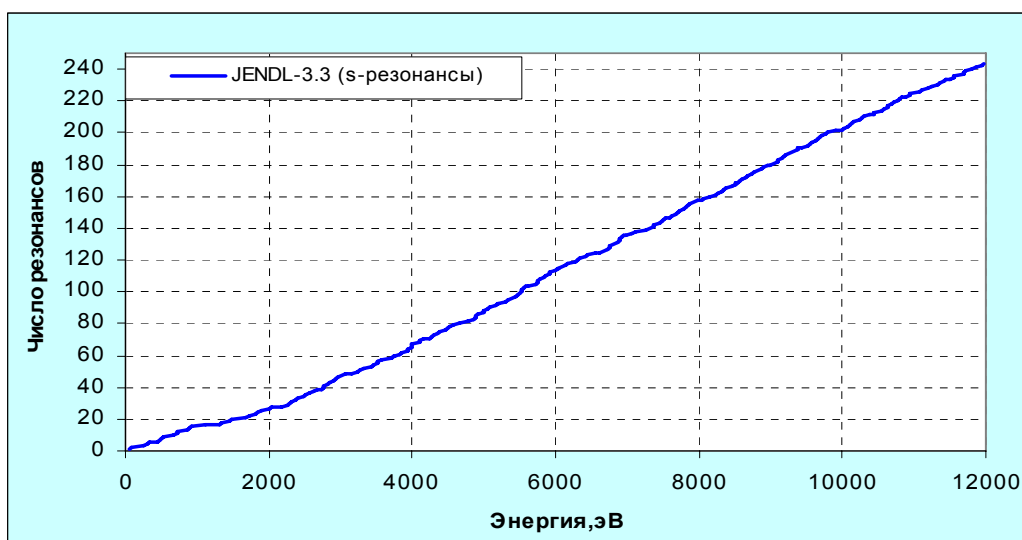
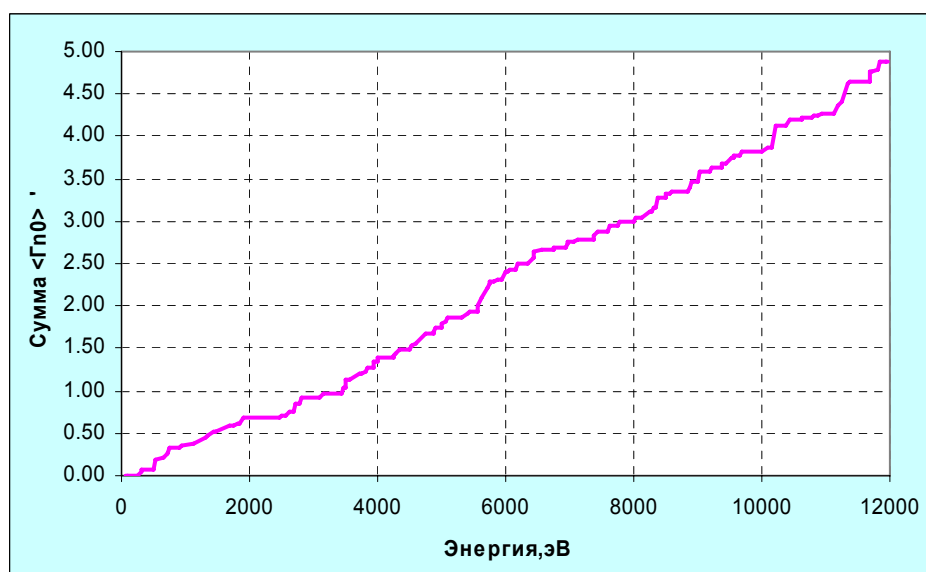


Рис.1. Нарастающие суммы числа s-резонансов

На рис.2. изображены нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов. Линейный характер этой кривой также свидетельствует о несущественности пропуска, по крайней мере, более или менее сильных резонансов. Таким образом, единственной причиной, побудившей ограничить область разрешенных резонансов 9.7 кэВ является недостаточность числа идентифицированных р-резонансов: большая их часть, несомненно пропущена.



Область неразрешенных резонансов простирается до 100 кэВ. В этой области на мышьяке существенны только два процесса – упругое рассеяние и радиационный захват. Реакция (n, α), имеет исчезающее малое сечение.

На рис. 3 оцененные сечения захвата сравниваются с экспериментальными данными. Из рис. 3б видно, что оценка, принятая в JEFF-3.1, неприемлема не только в резонансной области, но и в области высоких энергий.

В области ниже 1 МэВ, сечение, принятое в ENDF/B-VIIb2, очевидно, завышено. Единственным (и сомнительным) преимуществом оценки, принятой в этой библиотеке является представление данных о реакциях(n,p) и (n, α) по составляющим с возбуждением дискретных состояний ядер продуктов. Отметим, что сечения этих реакций даже пр 20 МэВ измеряются несколькими миллибарнами.

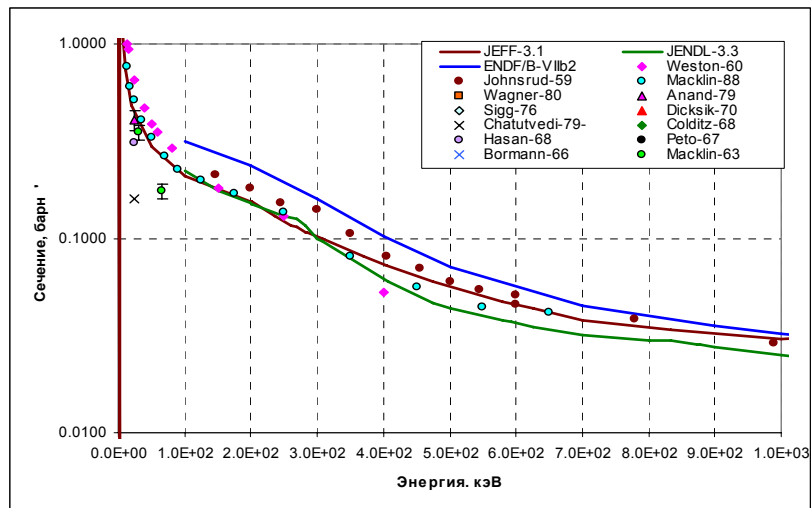


Рис.3а. Сечение захвата

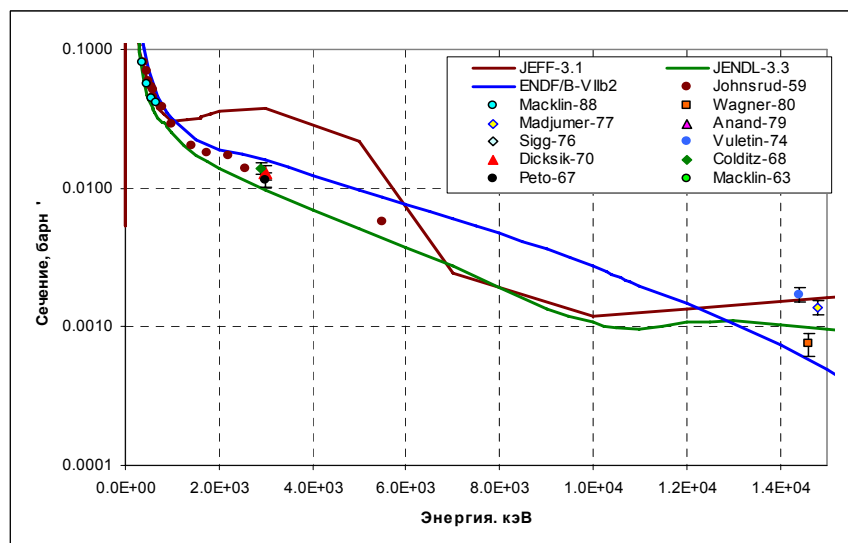


Рис.3б. Сечение захвата.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из JENDL-3.3 Секции MT=203, 204, 207 удалить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

33.6. Мышьяк-76

Радиоактивен ($T_{1/2}=26.4$ ч.). Испытывает бета-распад в стабильный селен-76.

В реакторах может образовываться за счет реакции $^{75}\text{As}(n,\gamma)$. Выход при делении $^{235}\text{U} - 1.5 \cdot 10^{-5}$; при делении $^{239}\text{Pu} - 4.8 \cdot 10^{-8}$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных для этого изотопа не имеется. Теоретически оцененные сечения нейтронных реакций приводятся в EAF-2003.

Экспериментальных данных для непосредственной проверки оцененных данных нет. Согласно оценке, сечение захвата тепловых нейтронов равно 23 барна; $RI=367$ барн. Сечение реакции (n,α) для тепловых нейтронов ничтожно мало.

Заключение

Включить в библиотеку РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

33.7. Мышьяк-77

Радиоактивен ($T_{1/2}=38.8$ ч.). Испытывает бета-распад в стабильный селен-77.

Выход при делении ^{235}U – $6.8 \cdot 10^{-4}$; при делении ^{239}Pu – $1.3 \cdot 10^{-4}$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных для этого изотопа не имеется. Теоретически оцененные сечения нейтронных реакций приводятся в EAF-2003.

Экспериментальных данных для непосредственной проверки оцененных данных нет. Согласно оценке, сечение захвата тепловых нейтронов равно 10.9 барна; $RI=44.1$ барн.

Заключение

Включить в библиотеку РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

34. СЕЛЕН

34.1. Селен-72

Радиоактивен ($T_{1/2}=8.4$ дн.) Испытывая захват орбитального электрона превращается в мышьяк-72, а тот испуская позитрон ($T_{1/2}=26$ ч.) – в германий-72. В ничтожных колчествах может образовываться в реакторах за счет реакции $^{74}\text{Se}_{(0.89\%)}(n,3n)$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных ни в одной библиотеке нет. Последняя оценка нейтронных сечений содержится в EAF-2003. Из нее следуют следующие значения теплового сечения захвата и резонансного интеграла:

$$\sigma_c=7.29 \text{ барн}$$

$$RI=4.26 \text{ барн}$$

Экспериментальных данных для проверки оцененных сечений не имеется.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку сечений из EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М. Н.

34.2. Селен-74

Содержание в естественной смеси 0.89%.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки:

JEFF-3.1 – оценка 1982 г. выполненная группой специалистов для ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка 1990г. японской группы специалистов по оценке данных для продуктов деления.

ENDF/B-VIIb2 – оценка WPEC SG23(рабочей группы по кооперации работ по оценке для международной библиотеки данных о продуктах деления), 1990 г. По существу, совпадает с предыдущей.

Все оценки содержат область разрешенных резонансов. В JEFF-3.1 она простирается до 2400 эВ и содержит 7 s-резонансов с максимальной энергией 2303 эВ. В JENDL-3.3 и ENDF/B-VII граница RRR- 2600 эВ, область содержит 8 s- резонансов (включая связанное состояние) с максимальной энергией 7328 эВ и один p-резонанс.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже в сравнении с экспериментальными данными

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|-------------------------|-----------------------------|---------|----------|---------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 51.7 | 0.01 | 51.7 | 579.3 |
| JENDL-3.3= ENDF/B-VIIb2 | 59.1 | 7.3 | 51.8 | 579.5 |
| Heft-78 | | | 46±1 | 600±50 |
| Van Der Linded-72 | | | | 475±19 |
| Ricabarra-68 | | | | 456±64 |
| Sims-67 | | | 66.8±2.1 | 589±120 |
| Steinnes-67 | | | 51.8±1.2 | |
| Pomerance-52 | | | 48±7 | |

Как видим, две последние совпадающие оценки находятся «в центре тяжести» доаольно разбросанных экспериментальных данных. Ничтожное сечение упругого

рассеяния в JEFF-3.1 – следствие интерференции резонансного и потенциального рассеяния, не компенсированного влиянием связанного состояния.

На рис.1. оцененные сечения захвата сравниваются друг с другом и немногими имеющимися экспериментальными данными.

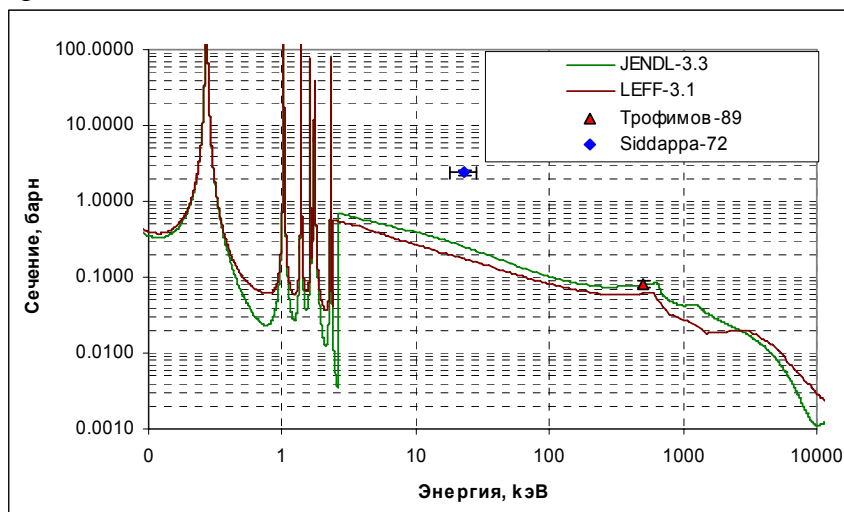


Рис.1. Сечение захвата.

Налицо резкое противоречие с результатом измерения сечения при энергии 23 кэВ. Создается подозрение, что экспериментальный результат завышен ровно на порядок. Необходимость дополнительных измерений очевидна.

Следует отметить, что оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII содержат область неразрешенных резонансов (до 100 кэВ); в них детальнее описывается неупругое рассеяние. Данные об образовании фотонов отсутствуют во всех оценках.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2. Отметить расхождение с результатом эксперимента при 23 кэВ.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

34.3. Селен-75

Радиоактивен ($T_{1/2}=119.64$ дн.) Испытывая захват орбитального электрона превращается в мышьяк-75. Может образовываться в реакторах за счет реакции $^{74}\text{Se}_{(0.89\%)}(n,\gamma)$ и $^{76}\text{Se}_{(9.39\%)}(n,2n)$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных ни в одной библиотеке нет. Последняя оценка нейтронных сечений содержится в EAF-2003. Из нее следуют следующие значения теплового сечения захвата и резонансного интеграла:

$\sigma_c=330$ барн

RI=386 барн

Экспериментальных данных для проверки оцененных сечений не имеется.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку сечений из EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М. Н.

34.4. Селен-76

Содержание в естественной смеси 9.36%.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки:

JEFF-3.1 – оценка 1982 г. выполненная группой специалистов для ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка 1990г. японской группы специалистов по оценке данных для продуктов деления.

ENDF/B-VIIb2 – оценка WPEC SG23 (рабочей группы по кооперации работ по оценке для международной библиотеки данных о продуктах деления), 1990 г. По существу, совпадает с предыдущей.

Все оценки содержат область разрешенных резонансов. В JEFF-3.1 она простирается до 7488.203 эВ и содержит 11 s-резонансов с максимальной энергией 7148 эВ и 6 p-резонансов с максимальной энергией 3170 эВ. В JENDL-3.3 и ENDF/B-VII граница RRR- 9000 эВ, область содержит 16 s- резонансов (включая связанное состояние) с максимальной энергией 13281 эВ и те же 6 p-резонансов.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже в сравнении с экспериментальными данными

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|-------------------------|-----------------------------|---------|--------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 86.9 | 1.92 | 85.0 | 44.3 |
| JENDL-3.3= ENDF/B-VIIb2 | 103.5 | 18.5 | 85.0 | 40.9 |
| Pomerance-52 | | | 82±8 | |

Кроме приведенного единственного измерения Померанцем полного сечения захвата имеется 4 измерения сечения с образованием $^{77}\text{Se}^m$ (15.5 сек.), которые в среднем дают примерно 22 барна, т.е. вероятность образования изомера составляет 26%. Van Der Linden в 1974 г. измерил резонансный интеграл захвата с образованием изомера и получил 16.0 ± 0.2 барна. Если считать, что вероятность образования изомера в резонансной и в тепловой области совпадают, то из измерения Ван Дер Линдена следует, что резонансный интеграл равен 61 барн, что существенно выше оцененного. Принятые в оценках значения резонансного интеграла основаны на расчетных оценках Мухабхаба 1981 г. На рис.1. оцененные сечения захвата сравниваются друг с другом и немногими имеющимися экспериментальными данными.

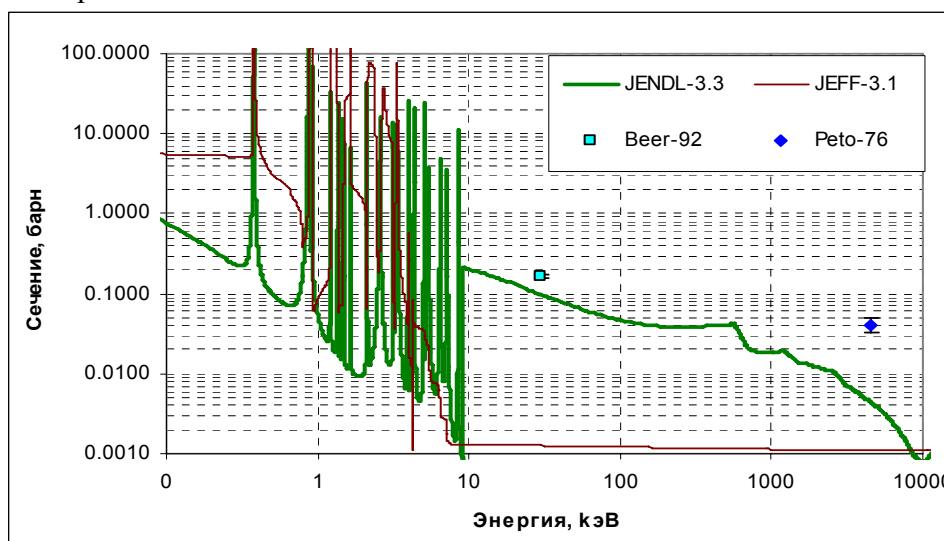


Рис.1. Сечение захвата.

Создается впечатление, что оцененное сечение захвата вне резонансной области занижено, по крайней мере вдвое. Необходимость дополнительных измерений очевидна.

Следует отметить, что оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII содержат область неразрешенных резонансов (до 100 кэВ); в них детальнее описывается неупругое рассеяние. Данные об образовании фотонов отсутствуют во всех оценках.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2. Отметить систематическое занижение сечение захвата относительно экспериментальных данных.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

34.5. Селен-77

Содержание в естественной смеси 7.63%. Является продуктом деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $8.49 \cdot 10^{-5}$.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки:

JEFF-3.1 – оценка 1982 г. выполненная группой специалистов для ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка 1990г. японской группы специалистов по оценке данных для продуктов деления.

ENDF/B-VIIb2 – оценка WPEC SG23 (рабочей группы по кооперации работ по оценке для международной библиотеки данных о продуктах деления), 1990 г. По существу, совпадает с предыдущей.

Все оценки содержат область разрешенных резонансов. В JEFF-3.1 она простирается до 2723.7 эВ и содержит 22 s-резонанса с максимальной энергией 2664 эВ и 9 p-резонансов с максимальной энергией 1880 эВ. В файле MF=3 присутствует нерезонансная подложка к сечениям захвата и рассеяния.

В JENDL-3.3 и ENDF/B-VII граница RRR- 2700 эВ, область содержит 28 s-резонансов (включая связанное состояние) с максимальной энергией 3919 эВ и 10 p-резонансов (максимальная энергия та же – 1880 эВ). Введена область неразрешенных резонансов, простирающаяся до 100 кэВ.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже в сравнении с экспериментальными данными

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|-------------------------|-----------------------------|---------|--------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 44.4 | 2.4 | 42.0 | 35.9 |
| JENDL-3.3= ENDF/B-VIIb2 | 50.5 | 8.5 | 42.0 | 31.8 |
| Pomerance-52 | | | 40±4 | |

На рис.1. оцененные сечения захвата сравниваются друг с другом и единственным содержащимся в EXFORе усредненным результатом измерений, выполненным с высоким разрешением на реакторе ИБР и учтенных при оценке резонансных параметров. Хорошо виден эффект введения нерезонансной подложки в JEFF-3.1.

Результат усреднения сечения захвата, оцененного в JENDL-3.3 (=ENDF/B-VII), по интервалу от 112 эВ до 4 кэВ превышает экспериментальное значение почти на порядок. Однако если предположить ошибку в указании нижней границы интервала, т.е. отнести результат к области от 1.12 кэВ до 3.92 кэВ (что представляется более естественным), то усреднение оцененного сечения точно совпадет с измеренным!

Значения сечений вне резонансной области представляются существенно завышенными.

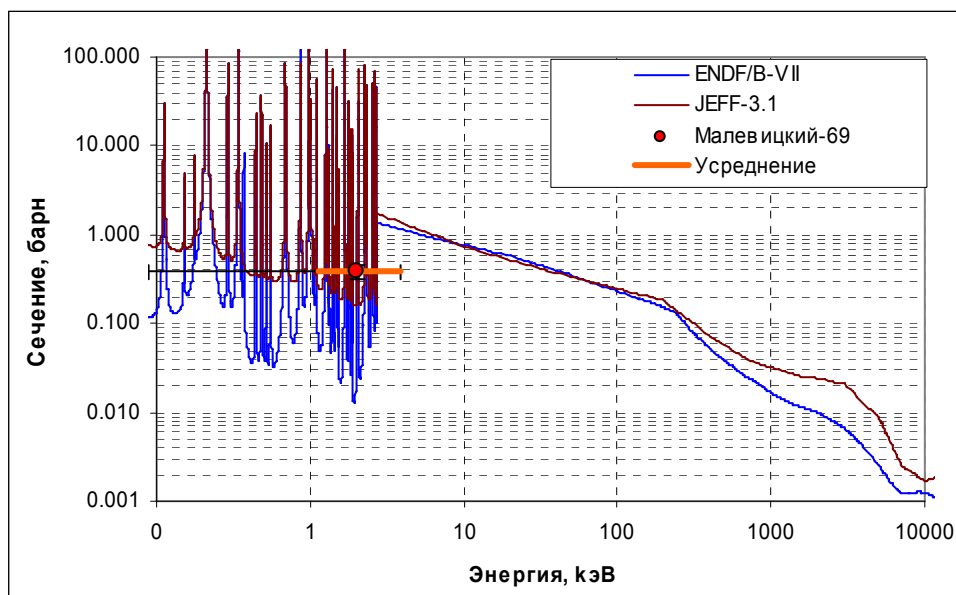


Рис.1. Сечение захвата.

Данные об образовании фотонов отсутствуют во всех оценках.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2. Отметить сомнение в оценке сечения захвата вне резонансной области, которое, возможно, существенно завышено.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

34.6. Селен-78

Содержание в естественной смеси 23.77%. Является продуктом деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $2.04 \cdot 10^{-4}$.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки:

JEFF-3.1 – оценка 1982 г. выполненная группой специалистов для ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка 1990г. японской группы специалистов по оценке данных для продуктов деления.

ENDF/B-VIIb2 – оценка WPEC SG23 (рабочей группы по кооперации работ по оценке для международной библиотеки данных о продуктах деления), 1990 г. По существу, совпадает с предыдущей.

Все оценки содержат область разрешенных резонансов. В JEFF-3.1 она простирается до 12108 эВ и содержит 6 s-резонанса с максимальной энергией 11060 эВ и 6 p-резонансов с максимальной энергией 5637 эВ. В файле MF=3 присутствует нерезонансная подложка, главным образом, к сечению захвата.

В JENDL-3.3 и ENDF/B-VII граница RRR- 12000 эВ ровно, область содержит 16 s-резонансов (включая связанное состояние) с максимальной энергией 40500 эВ и 5 p-резонансов (максимальная энергия– 3852 эВ; резонанс с энергией 5673 эВ

идентифицирован как s-резонанс). Введена область неразрешенных резонансов, простирающаяся до 100 кэВ.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже.

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|-------------------------|-----------------------------|---------|--------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 2.95 | 2.55 | 0.40 | 4.51 |
| JENDL-3.3= ENDF/B-VIIb2 | 8.88 | 8.46 | 0.43 | 4.63 |
| Koester-80 | | 8.4±1 | | |

Экспериментальные данные по полному сечению захвата отсутствуют. Имеются лишь активационные измерения сечения образования $^{79}\text{Se}^m$ (3.9 мин.). При 0.0253 эВ получено:

Mannhart-68: $\sigma_c=0.25\pm0.025$ барн;

Kramer-65: $\sigma_c=0.36\pm0.04$ барн;

Weigmann-62: $\sigma_c=0.4\pm0.04$ барн;

Hans-60: $\sigma_c=0.12\pm0.04$ барн;

Согласно оценке EAF-2003, вероятность образования изомера составляет при низких энергиях 88.4%. Если принять эту оценку, то и с принимаемыми оценками полного сечения захвата можно согласиться.

На рис. 1. оцененные сечения захвата сравниваются друг с другом

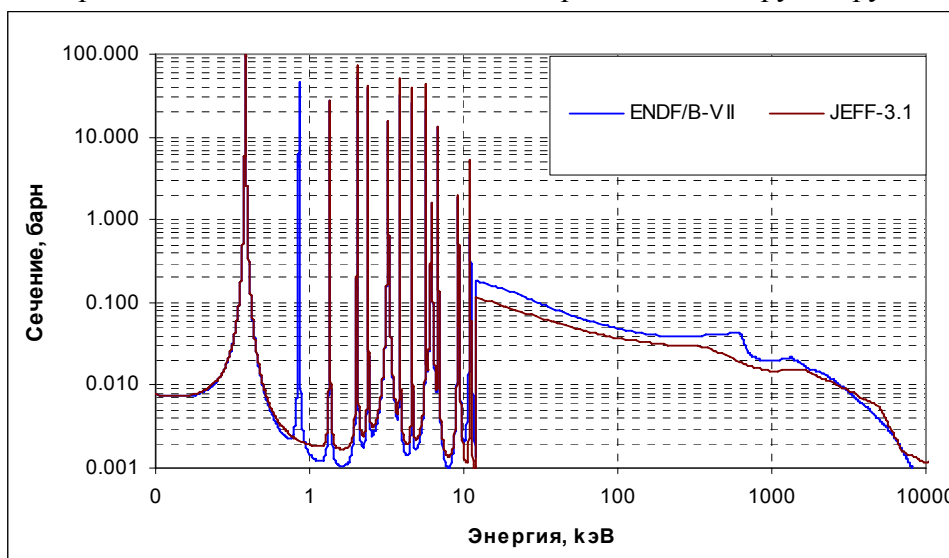


Рис. 1. Сечение захвата.

Данные об образовании фотонов отсутствуют во всех оценках.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

34.7. Селен-79

Радиоактивен ($T_{1/2}=2.95\cdot 10^5$ лет). Является продуктом деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $4.87\cdot 10^{-4}$.

Во всех современных полных библиотеках содержится одна и та же оценка JENDL-3.

В ней содержится область неразрешенных резонансов, простирающаяся от 38 эВ до 100 кэВ. Оценка целиком основана на результатах расчетов и полуэмпирических систематик.

Аналогична методология и оценки, принятой в EAF-2003.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже.

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|----------|-----------------------------|---------|--------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JENDL-3 | 56.3 | 6.3 | 50 | 60.9 |
| EAF-2003 | | | 10.95 | 29.76 |

Экспериментальные данные отсутствуют.

На рис.1. оцененные сечения захвата сравниваются друг с другом. Как и в случае селена-77 сечение захвата в кэВ-ной области представляется завышенным.

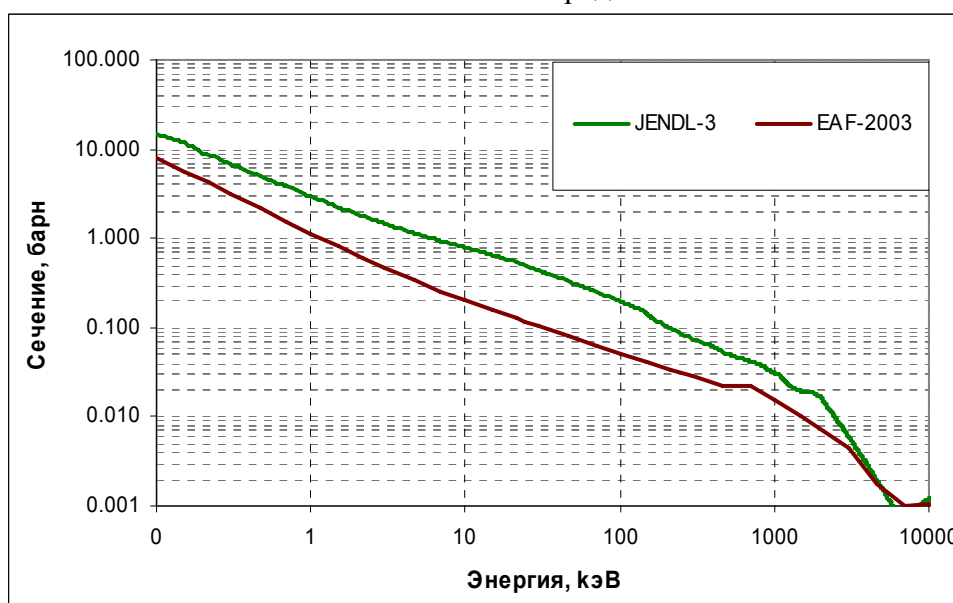


Рис.1. Сечение захвата.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2, отметив ненадежность оценки и вероятную завышенность сечения захвата.

Автор рекомендации
Николаев М.Н.

34.8. Селен-80

Содержание в естественной смеси максимально - 49.61%. Является продуктом деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $1.28 \cdot 10^{-3}$.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки:

JEFF-3.1 – оценка 1982 г. выполненная группой специалистов для ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка 1990г. японской группы специалистов по оценке данных для продуктов деления.

ENDF/B-VIIb2 – оценка WPEC SG23 (рабочей группы по кооперации работ по оценке для международной библиотеки данных о продуктах деления), 1990 г. По существу, совпадает с предыдущей.

Все оценки содержат область разрешенных резонансов. В JEFF-3.1 она простирается до 6707 эВ и содержит 5 s-резонансов с максимальной энергией 5660 эВ и 2 р-резонанса с максимальной энергией 5240 эВ. В файле MF=3 присутствует нерезонансная подложка, главным образом, к сечению захвата.

В JENDL-3.3 и ENDF/B-VII граница RRR- 10000 эВ ровно, область содержит 12 s-резонансов (включая связанное состояние) с максимальной энергией 39900 эВ и 4 р-резонанса с максимальной энергией 8150 эВ. Введена область неразрешенных резонансов, простирающаяся до 100 кэВ.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже.

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|-------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 1.68 | 1.07 | 0.61 | 1.00 |
| JENDL-3.3= ENDF/B-VIIb2 | 7.60 | 6.99 | 0.61 | 0.93 |
| Koester-80 | | 6.95±0.06 | | |
| Heft-78 | | | 0.53±0.05 | |
| Pomerance-52 | | | 0.59±0.06 | |
| Ricabarra-68 | | | | 1.42±0.16 |

Имеется также несколько результатов измерения изомерного отношения и измерения сечения образования изомера, которые, разумеется, тоже использовались при оценке. Т.о. оцененные в ENDF/B-VII тепловые сечения и резонансный интеграл имеют надежное экспериментальное обоснование.

На рис.1. оцененные сечения захвата сравниваются друг с другом и с экспериментальными данными. Последние подтверждают оценку, принятую в ENDF/B-VII.

Данные об образовании фотонов отсутствуют во всех оценках.

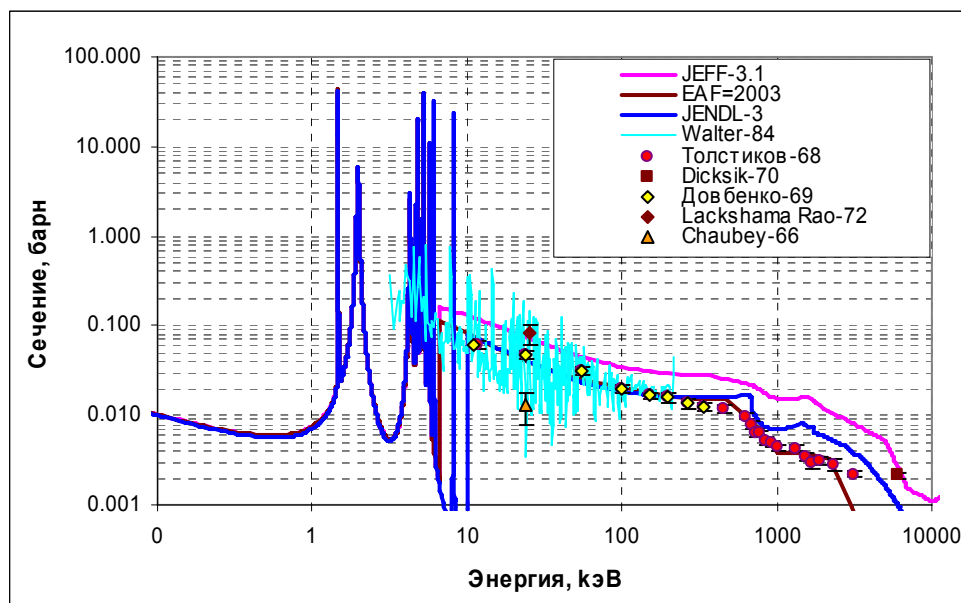


Рис.1. Сечение захвата.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

34.9. Селен-82

Содержание в естественной смеси 8.73%. Является продуктом деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $3.28 \cdot 10^{-3}$.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки:

JEFF-3.1 – оценка 1982 г. выполненная группой специалистов для ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка 1990г. японской группы специалистов по оценке данных для продуктов деления.

ENDF/B-VIIb2 – оценка WPEC SG23 (рабочей группы по кооперации работ по оценке для международной библиотеки данных о продуктах деления), 1990 г. Отличается от предыдущей включением новой (2006 г) оценкой резонансных параметров С. Мухабхабом.

Все оценки содержат область разрешенных резонансов. В JEFF-3.1 она простирается до 31118 эВ и содержит 4 s-резонанса с максимальной энергией 26550 эВ. В файле MF=3 присутствует нерезонансная подложка, главным образом, к сечению захвата.

В JENDL-3.3 граница RRR- 18000 эВ ровно, область содержит 6 s- резонансов (включая связанное состояние) с максимальной энергией 16500 эВ. Плавной подложки нет. Введена область неразрешенных резонансов, простирающаяся до 100 кэВ.

В ENDF/B-VIIb2 граница RRR- 30000 эВ ровно, область содержит 5 s- резонансов (включая связанное состояние) с максимальной энергией 26550 эВ и 2 p-резонанса с максимальной энергией 9508 эВ. Плавной подложки нет. Введена область неразрешенных резонансов, простирающаяся до 100 кэВ.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже.

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|-------------------------|-----------------------------|---------|-------------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 1.68 | 1.07 | 0.61 | 1.00 |
| JENDL-3.3= ENDF/B-VIIb2 | 7.60 | 6.99 | 0.61 | 0.93 |
| Koester-80 | | 5.0±0.2 | | |
| Mannhart-68 | | | 0.045±0.003 | |
| Pomerance-52 | | | 2±1.4 | |
| Seren-47 | | | 0.06±0.01 | |

Таким образом, оценка тепловых сечений ENDF/B-VII вполне обоснована экспериментально. Результаты измерений резонансного интеграла в EXFORe не содержится.

На рис.1. оцененные сечения захвата сравниваются друг с другом и с экспериментальными данными. Последние подтверждают оценку, принятую в EAF-2003 и указывают на то, что оценка, принятая в ENDF/B-VII и в JENDL-3.3 вне резонансной области существенно завышена. Правда, результаты Хермана и Перкина считаются относящимися к сечению образования ^{83}Se в основном состоянии (22.3 мин). Однако оба результата получены активационной методикой и для отделения сечения прямого образования изомера от его образования после изомерного перехода (период полураспада изомера 70.1 сек) требовалось применение специальных сложных методик, о которых не упоминается. Видимо при оценке данных для ENDF/B-VII и в JENDL-3.3 принималось, что вероятность образования ядра-продукта в основном состоянии такова, как она измерена в тепловой области (0.07±0.01 согласно Iyer-67; 0.12 согласно Mannhart-68).

Как бы то ни было, обоснованность оценки ENDF/B-VII внушает большие сомнения.

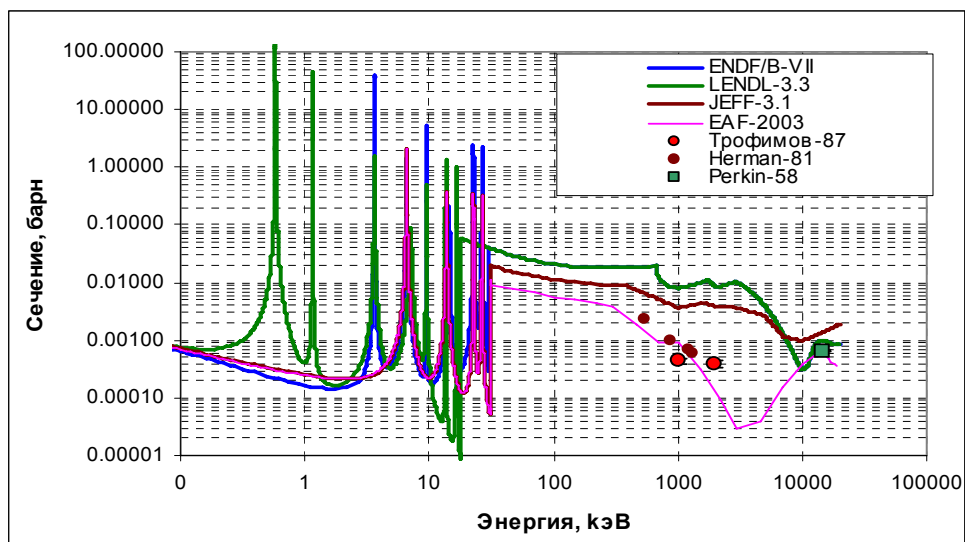


Рис.1. Сечение захвата.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2. Отметить вероятное сильное завышение сечения захвата вне резонансной области. Разрешение сомнения требует дополнительного изучения условий выполнения экспериментов.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

35. БРОМ

35.1. Бром-79

Содержание в естественной смеси 50.69%. Выход при делении $^{235}\text{U} - 2.5 \cdot 10^{-7}$; при делении $^{239}\text{Pu} - 8.6 \cdot 10^{-4}$.

В современных библиотеках оцененных данных используются две оценки:

JEFF-3.1: оценка Шентера и Шмиттроза (R. Schenter, F. Schmittroth, 1974) для ENDF/B-V, слегка откорректированная координационной рабочей группой.

JENDL-3.3 (=JENDL-3.2=ФОНД-2=ENDF/B-VIIb2) – оценка японской рабочей группы по продуктам деления, 1990 г.

Сечения взаимодействия тепловых нейтронов и резонансные интегралы захвата из сравниваемых оценок приведены в нижеследующей таблице.

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|---------------|-----------------------------|---------|------------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | | | 11.1 | 136.6 |
| JENDL-3.3 | 14.3 | 3.3 | 11.0 | 129 |
| Мухабхаб-2003 | | | 10.32±0.13 | 127±14 |

Оценка JENDL-3.3 соответствует предыдущей рекомендации Мухабхаба (1984 г.) для $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$: 11 ± 0.7 барна. Эта оценка соответствует небогатой совокупности данных, содержащихся в EXFORe.

Если резонансная область в оценке JEFF-3.1 простиралась до 412 эВ и содержала параметры 13 резонансов, то в оценке JENDL-3.3 приводятся параметры 342 резонансов (включая связанное состояние) с максимальной энергией 9920 эВ, а граница RRR установлена при 5500 эВ. В отличие от JEFF-3.1, в JENDL-3.3 присутствует область неразрешенных резонансов, простирающаяся до 100 кэВ.

На рис.1 приведена энергетическая зависимость нарастающей сумм резонансов. Из характера кривой следует, что до 9 кэВ существенного пропуска резонансов нет. Это подтверждает и рис. 2, на котором изображена нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин и аппроксимирующая ее прямая. Из рисунков следует, что область разрешенных резонансов вполне может быть распространена до 9 кэВ.

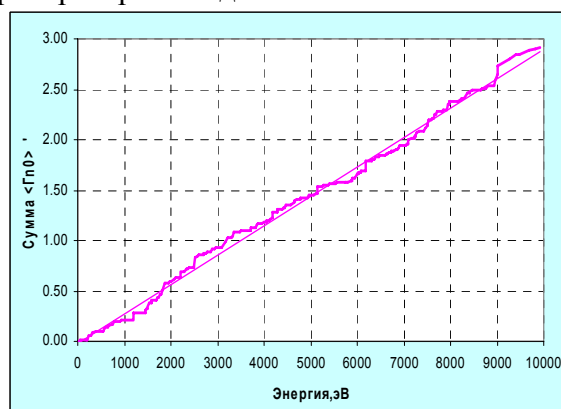
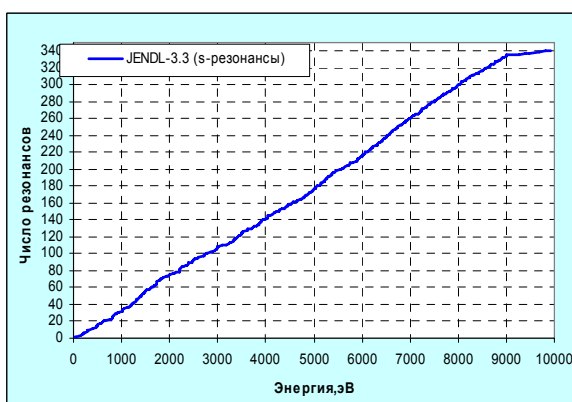


Рис.1. Нарастающая сумма числа резонансов Рис.2. Сумма приведенных нейтронных ширин

На рис. 3 оценки сечения захвата сравниваются с экспериментальными данными. Преимущество JENDL-3.3 не нуждается в комментариях. Заметим, что в отличие от JEFF-3.1 в JENDL-3.3 описываются сечения всех нейтронных реакций, возможных до 20 МэВ, и

энерго-угловые распределения испускаемых в них вторичных нейтронов. Данные об образовании фотонов в нейтронных реакциях ни в одной оценке не приводятся.

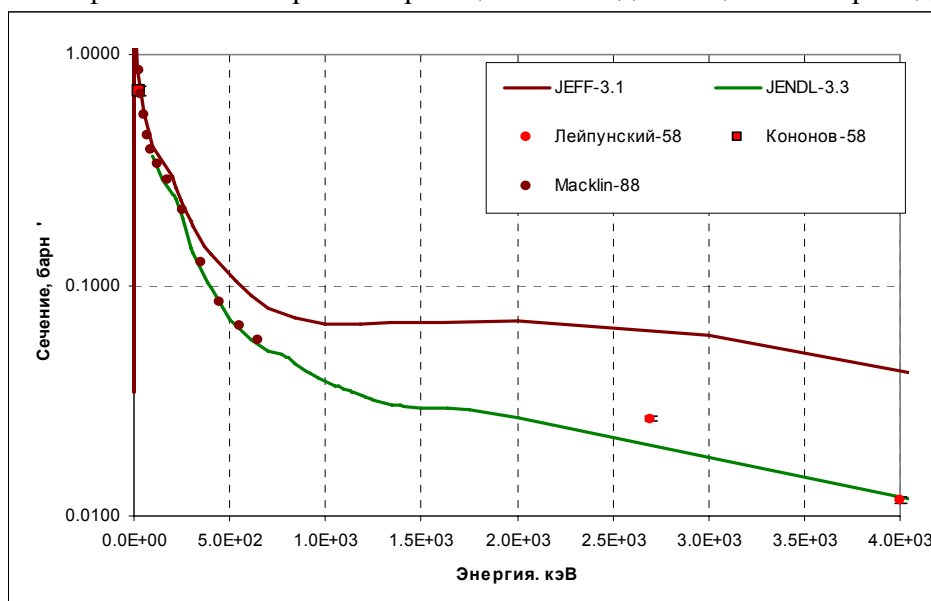


Рис.3. Сечение захвата

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из библиотеки JENDL-3.3

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

35.2. Бром-81

Содержание в естественной смеси 49.31%. Выход при делении ^{235}U – $2.0 \cdot 10^{-3}$; при делении ^{239}Pu – $2.7 \cdot 10^{-3}$.

В современных библиотеках оцененных данных используются три оценки:

JEFF-3.1: оценка Шентера и Шмиттроса (R. Schenter, F.Schmittroth, 1974) для ENDF/B-V, слегка откорректированная координационной рабочей группой.

JENDL-3.3 (=JENDL-3.2=ФОНД-2) – оценка японской рабочей группы по продуктам деления, 1990 г.

ENDF/B-VIIb2 – та же оценка с пересмотренной областью разрешенных резонансов (ниже 16 кэВ) – на основе новой компиляции Мухабхаба 2006 г.

Сечения взаимодействия тепловых нейтронов и резонансные интегралы захвата из сравниваемых оценок приведены в нижеследующей таблице.

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|---------------|-----------------------------|---------|-----------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 6.92 | 4.14 | 2.78 | 54.13 |
| JENDL-3.3 | 6.31 | 3.62 | 2.69 | 46.7 |
| ENDF/B-VIIb2 | 8.11 | 5.75 | 2.36 | 46.4 |
| Мухабхаб-2003 | | | 2.36±0.05 | 50±5 |

Если резонансная область в оценке JEFF-3.1 простиралась до 3.63 эВ и содержала параметры 40 резонансов, в оценке JENDL-3.3 приводятся параметры 308 резонансов (включая связанное состояние) с максимальной энергией 20.93 кэВ, а граница RRR установлена при 13 кэВ, то в ENDF/B-VIIb2 приводятся параметры 78 s-резонансов и 131 р-резонанса с максимальными энергиями, соответственно, 16.4 и 20.9 кэВ), а граница RRR сдвинута до 16 кэВ. Выше этой энергии оценки ENDF/B-VIIb2 и JENDL-3.3 совпадают.

Изложенное показывает, что параметры разрешенных резонансов были существенно пересмотрены. На треть сократилось общее число резонансов и существенно изменилось соотношение между s- и р-уровнями. На рис. 1 сравниваются нарастающие суммы резонансов в двух последних оценках.

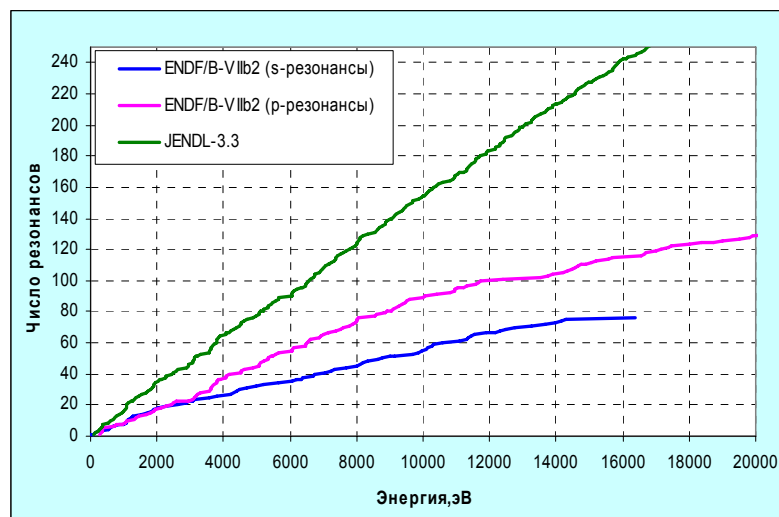


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

Как видно, полнота разрешения s-резонансов и отсутствие p-резонансов, следовавшие из оценки JENDL-3.3 сменились более реалистичным соотношением между плотностями s- и р-резонансов, причем в каждой из этих популяций проявляется пропуск уровней.

Не располагая исходной экспериментальной информацией нельзя сделать вывод об обоснованности отмеченной переоценки. Поскольку обе оценки были выполнены С.Мухабхабом, надо полагать, что он обладал достаточными основаниями для столь кардинального пересмотра и это является достаточным основанием для того, чтобы отдать предпочтение его последней оценке.

На рис. 3 оценки сечения захвата сравниваются с экспериментальными данными. Преимущество JENDL-3.3 и ENDF/B-VII не нуждается в комментариях. Заметим, что в отличие от JEFF-3.1 в JENDL-3.3 описываются сечения всех нейтронных реакций, возможных до 20 МэВ, и энерго-угловые распределения испускаемых в них вторичных нейтронов. Данные об образовании фотонов в нейтронных реакциях ни в одной оценке не приводятся.

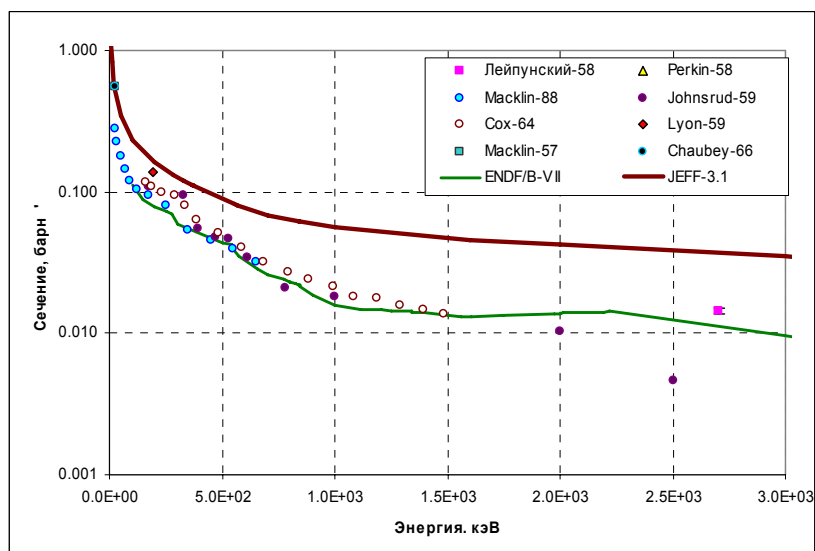


Рис.3а. Сечение захвата

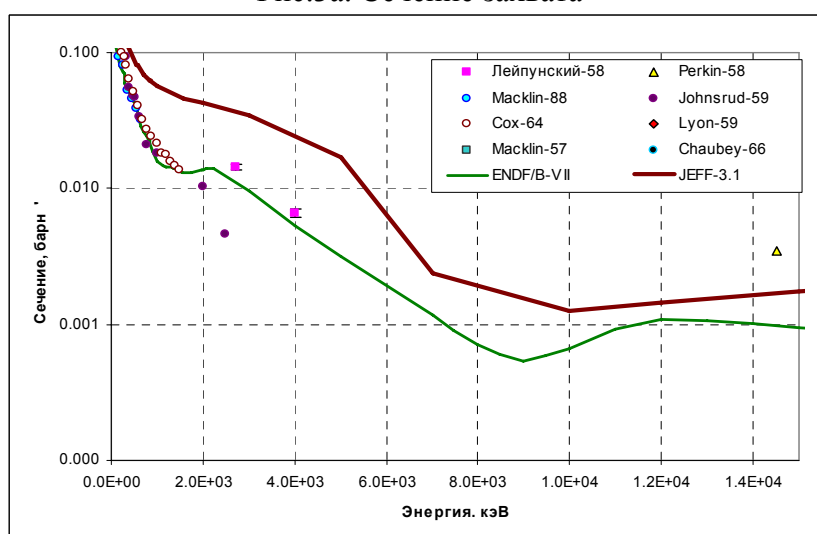


Рис.3б. Сечение захвата

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из библиотеки ENDF/B-VIIb2

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

35.3. Бром-82

Радиоактивен ($T_{1/2}=35.34$ ч.). Испытывает бета-распад в криптон-82. В реакторе образуется в результате реакции $81\text{Br}(n,\gamma)$, а также как продукт деления. Выход при делении $^{235}\text{U} - 4.3 \cdot 10^{-6}$; при делении $^{239}\text{Pu} - 4.3 \cdot 10^{-5}$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. Теоретически оцененные сечения нейтронных реакций приводятся в EAF-2003 (последняя на данный момент оценка).

Экспериментальных данных для непосредственной проверки оцененных данных не имеется. Согласно оценке, сечение захвата тепловых нейтронов равно 16.6 барна; $RI=140$ барн. Сечение реакции (n,α) для тепловых нейтронов ничтожно мало.

Заключение

Включить в библиотеку РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

36.КРИПТОН

36.1. Криптон-78

Содержание в естественной смеси 0.35%.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки:

JEFF-3.1 – оценка 1982 г. выполненная группой специалистов для ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка 1990г. японской группы специалистов по оценке данных для продуктов деления.

ENDF/B-VIIb2 – оценка WPEC SG23(рабочей группы по кооперации работ по оценке для международной библиотеки данных о продуктах деления), 1990 г. Отличие от предыдущей состоит в пересмотре параметров разрешенных резонансов в соответствии с атласом С.Мухабхаба 2006 г. Пересмотр состоял в небольшой коррекции нейтронных ширин. Две последние оценки содержат область неразрешенных резонансов, простирающуюся до 100 кэВ.

Все оценки содержат область разрешенных резонансов. Во всех оценках эта область содержит 4 s-резонанса включая связанное состояние. Максимальная энергия – 640 эВ. В JEFF-3.1 RRR простирается до 865эВ, в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII - до 800 эВ.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже в сравнении с экспериментальными данными

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|-----------------------------|-----------------------------|---------|-----------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 13.6 | 8.8 | 4.8 | 23.3 |
| JENDL-3.3 | 14.1 | 7.9 | 6.2 | 25.4 |
| ENDF/B-VIIb2 | 12.5 | 7.8 | 4.7 | 24.8 |
| Kondaiah-68 | | | 4.71±0.68 | |

Сечение захвата, принятое в JENDL-3.3, превышает результат единственного измерения на два стандартных отклонения, что и послужило, вероятно, основанием для пересмотра ширин.

На рис.1. оцененные сечения захвата сравниваются друг с другом и немногими имеющимися экспериментальными данными.

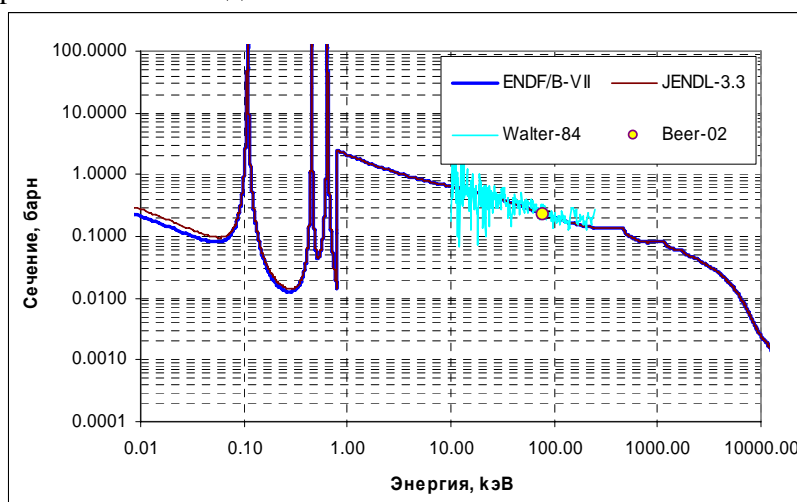


Рис.1. Сечение захвата.

Согласие с экспериментами вне резонансной области прекрасное. Данные об образовании фотонов отсутствуют во всех оценках.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

36.2. Криптон-79

Радиоактивен ($T_{1/2}=35.04$ ч). Захватывая орбитальный электрон превращается в бром-79. В реакторах может образовываться за счет реакции $^{78}\text{Kr}_{(0.35\%)}(n,\gamma)$ или $^{80}\text{Kr}_{(2.25\%)}(n,2n)$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных ни в одной библиотеке нет. Последняя оценка нейтронных сечений содержится в EAF-2003. Из нее следуют следующие значения теплового сечения захвата и резонансного интеграла:

$\sigma_c=26.4$ барн

$RI=109$ барн

Экспериментальных данных для проверки оцененных сечений не имеется.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку сечений из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в секцию MT=103 файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор рекомендации

Николаев М. Н.

36.3. Криптон-80

Содержание в естественной смеси 2.28%. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами – $2.23 \cdot 10^{-9}$.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки:

JEFF-3.1 – оценка 1982 г., выполненная группой специалистов для ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка 1990г. японской группы специалистов по оценке данных для продуктов деления.

ENDF/B-VIIb2 – оценка WPEC SG23(рабочей группы по кооперации работ по оценке для международной библиотеки данных о продуктах деления), 1990 г. Отличие от предыдущей состоит в том, что параметры разрешенных резонансов приняты в соответствии с атласом С.Мухабхаба 2006 г. Параметры, однако, пересмотрены не были. Две последние оценки содержат область неразрешенных резонансов, простирающуюся до 100 кэВ.

Все оценки содержат область разрешенных резонансов, простирающуюся до 1000 эВ. В JEFF-3.1 эта область содержит 5 s-резонансов, включая связанное состояние. Максимальная энергия – 927 эВ. В JEFF-3.1 и ENDF/B-VII в RRR содержится 11 резонансов (включая связанное состояние) с максимальной энергией 2045 эВ. Введена также область неразрешенных резонансов, простирающаяся до 100 кэВ, но

рекомендуемая только для учета резонансной самоэкранировки сечений, заданных в файле MF=3 начиная с 1 кэВ.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже в сравнении с экспериментальными данными

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|-------------------------|-----------------------------|---------|----------|----------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 20.7 | 8.9 | 11.7 | 68.3 |
| JENDL-3.3= ENDF/B-VIIb2 | 18.8 | 7.3 | 11.5 | 59.8 |
| Barabandv-72 | | | 15.6±1.9 | |
| Bradly-71 | | | 11.4±0.4 | 56.1±2.8 |
| Fastwood-63 | | | 15.5±1.6 | |
| Reynolds-60 | | | 12.5±1.5 | |

Согласие оценок с экспериментальными данными удовлетворительно

На рис.1. оцененные сечения захвата сравниваются друг с другом и немногими имеющимися экспериментальными данными.

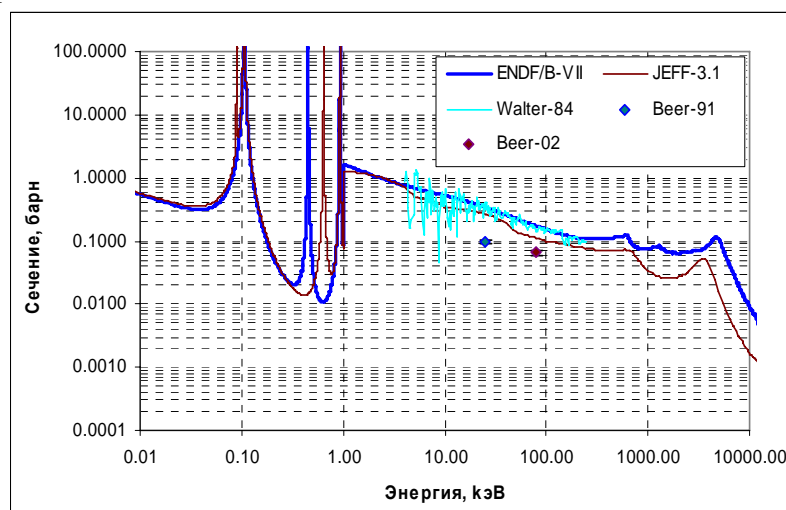


Рис.1. Сечение захвата.

Обращает внимание существенное различие в оценках резонансной структуры.

В новой оценке отсутствуют резонансы при 89.2 эВ и 640 эВ, но появился сильный резонанс при 450 эВ. Странно, что несмотря на то, что число резонансов в интервале от 1 до 2 кэВ - их 6 - вдвое превышает число резонансов от 0 до 1 кэВ, граница RRR сохранена прежней - 1 кэВ.

Вне резонансной области наблюдается существенное расхождение в экспериментальных данных - недавние результаты Бира лежат втрое ниже данных Уолтера, на которые опирается оценка.

Данные об образовании фотонов отсутствуют во всех оценках.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2. Желательна переоценка сечений в области разрешенных и неразрешенных резонансов с учетом всей совокупности экспериментальных данных.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

36.4. Криптон-81

Радиоактивен ($T_{1/2}=2.29 \cdot 10^5$ лет). Захватывая орбитальный электрон превращается в бром-81. В реакторах может образовываться за счет реакции $^{80}\text{Kr}_{(0.35\%)}(n,\gamma)$ или $^{82}\text{Kr}_{(2.25\%)}(n,2n)$. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами – $1.81 \cdot 10^{-11}$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных ни в одной библиотеке нет. Последняя оценка нейтронных сечений содержится в EAF-2003. Из нее следуют следующие значения теплового сечения захвата и резонансного интеграла:

$$\sigma_c=20 \text{ барн} \quad \text{RI}=78 \text{ барн}$$

Экспериментальных данных для проверки оцененных сечений не имеется.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку сечений из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в секцию MT=103 файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор рекомендации

Николаев М. Н.

36.5. Криптон-82

Содержание в естественной смеси 11.58%. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами – $2.85 \cdot 10^{-6}$.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки:

JEFF-3.1 – оценка 1982 г., выполненная группой специалистов для ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка 1990г. японской группы специалистов по оценке данных для продуктов деления.

ENDF/B-VIIb2 – оценка WPEC SG23(рабочей группы по кооперации работ по оценке для международной библиотеки данных о продуктах деления), 1990 г. Отличие от предыдущей состоит в том, что параметры разрешенных резонансов приняты в соответствии с атласом С.Мухабхаба 2006 г. Параметры, однако, пересмотрены не были.

Все оценки содержат область разрешенных резонансов. В JEFF-3.1 эта область простирается до 100 эВ и содержит 2 s-резонанса, включая связанное состояние. Максимальная энергия – 39.8 эВ.

В JENDL-3.3 RRR распространена до 400 эВ и содержит 6 резонансов (включая связанное состояние) с максимальной энергией 1659 эВ. Положения резонансов соответствуют указанным в Справочнике Мухабхаба-81. Исключен лишь резонанс при 1.55 кэВ, который, вероятно, принадлежит ^{83}Kr . Всем резонансам приписан спин $\frac{1}{2}$ и положительная четность. Всем им приписана та же средняя нейтронная ширина, что и первому резонансу (единственного, для которого она была известна). Радиационные

ширины одинаковы для всех резонансов, их значение обеспечивает тепловое сечение захвата.

В ENDF/B-VII также, как и в JEFF-3.1, описано 2 резонанса, но область разрешенных резонансов ограничена 40 эВ.

Две последние оценки содержат область неразрешенных резонансов, простирающуюся до 100 кэВ.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже в сравнении с экспериментальными данными

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|--------------------|-----------------------------|---------|---------------|------------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1=JENDL-3.3 | 33.95 | 9.77 | 30.17 | 183.1 |
| ENDF/B-VIIb2 | 33.95 | 14.78 | 19.16 | 165.3 |
| Macnamara-50 | | | 45±15 | |
| Lucar-77 | | | 18±4 (ground) | 120±40 (g) |
| Kondaiah-68 | | | 20±3.5 (meta) | |
| Rubi-65 | | | 3±1 | |

Сумма результатов Лукара и Кондайя - 38 ± 5 - согласуется с результатом Макнамары. Однако можно сомневаться, что Лукар измерял только сечение образования ^{83}Kr только в основном состоянии. Это сомнение, очевидно, и побудило оценщиков ENDF/B-VII понизить тепловое сечение захвата. С другой стороны, Руби получил намного меньшее сечение образования изомера с периодом полураспада 1.86 ч. и это говорит в пользу снижения оцененного сечения. Тем не менее, представляется, что оценка JENDL-3.3 является более взвешенной.

На рис.1. оцененные сечения захвата сравниваются друг с другом и немногими имеющимися экспериментальными данными.

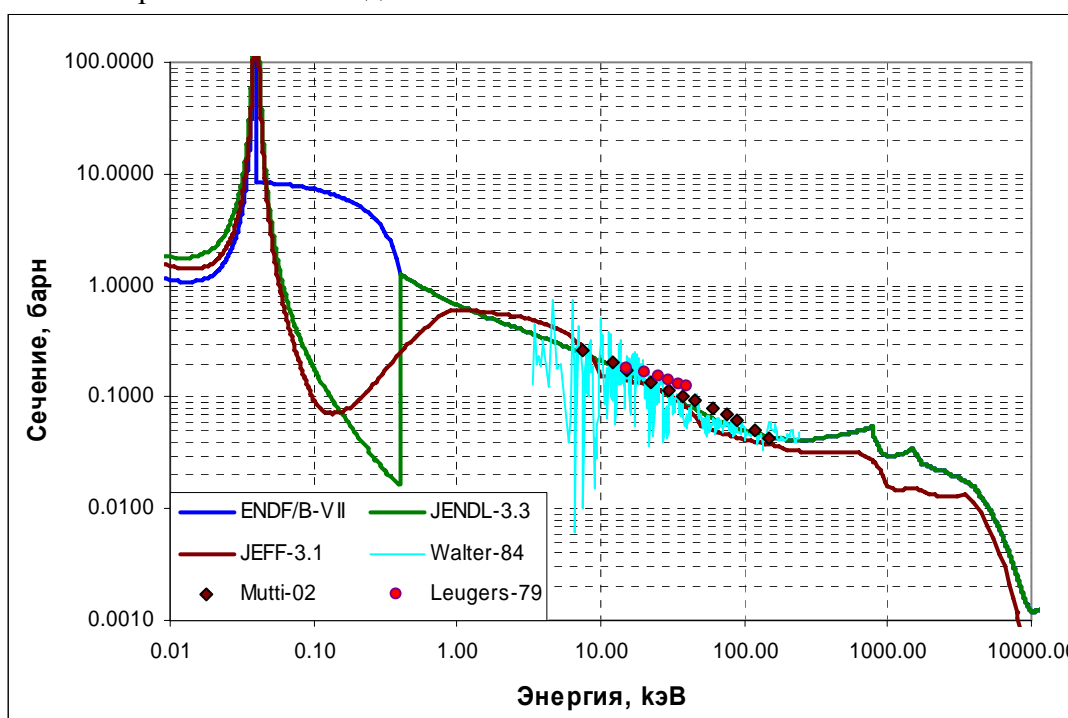


Рис.1. Сечение захвата.

Минимум при 120 эВ в оценке JEFF-3.1 обусловлен интерференционным минимумом от резонансов, лежащих за пределами RRR. В оценке JENDL-3.3 этот минимум искажен резким переходом от одного представления к другому. Аномальное

поведение сечения захвата в ENDF/B-VII выше 40 эВ свидетельствует о весьма неудачном подборе средних резонансных параметров.

Вне резонансной области все оценки близки друг к другу и обоснованы экспериментальными данными.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку JEFF-3.1.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

36.6. Криптон-83

Содержание в естественной смеси 11.49%. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами – $5.58 \cdot 10^{-3}$.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки:

JEFF-3.1 – оценка 1982 г., выполненная Группелааром и Менапасом (H.Gruppelaar, E. Menapase).

JENDL-3.3 – оценка 1990г. японской группы специалистов по оценке данных для продуктов деления.

ENDF/B-VIIb2 – оценка WPEC SG23(рабочей группы по кооперации работ по оценке для международной библиотеки данных о продуктах деления), 1990 г., принявшей оценку Ю-Ксианг Жуанга и Чонг-ха Кай (You-Xiang Zhuang, Chong-hai Cai) из CENDL-3. Все оценки содержат область неразрешенных резонансов, содержащую 3 резонанса (из них одно связанное состояние) с максимальной энергией 233 эВ, но простирающиеся по-разному: JEFF-3.1 – до 529.63 эВ, две остальные – до 272 эВ.

Две последние оценки содержат область неразрешенных резонансов.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже в сравнении с экспериментальными данными

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|---------------------|-----------------------------|---------|---------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1= JENDL-3.3 | 188.9 | 9.1 | 179.8 | 147.6 |
| ENDF/B-VIIb2 | 211.6 | 13.5 | 198.1 | 188.4 |
| Lucas-77 | | | 215±1.9 | |
| Kennet-58 | | | 216±43 | |
| Macnamara-50 | | | 205±110 | |

Согласие оценок с экспериментальными данными удовлетворительно

На рис.1. оцененные сечения захвата сравниваются друг с другом и немногими имеющимися экспериментальными данными.

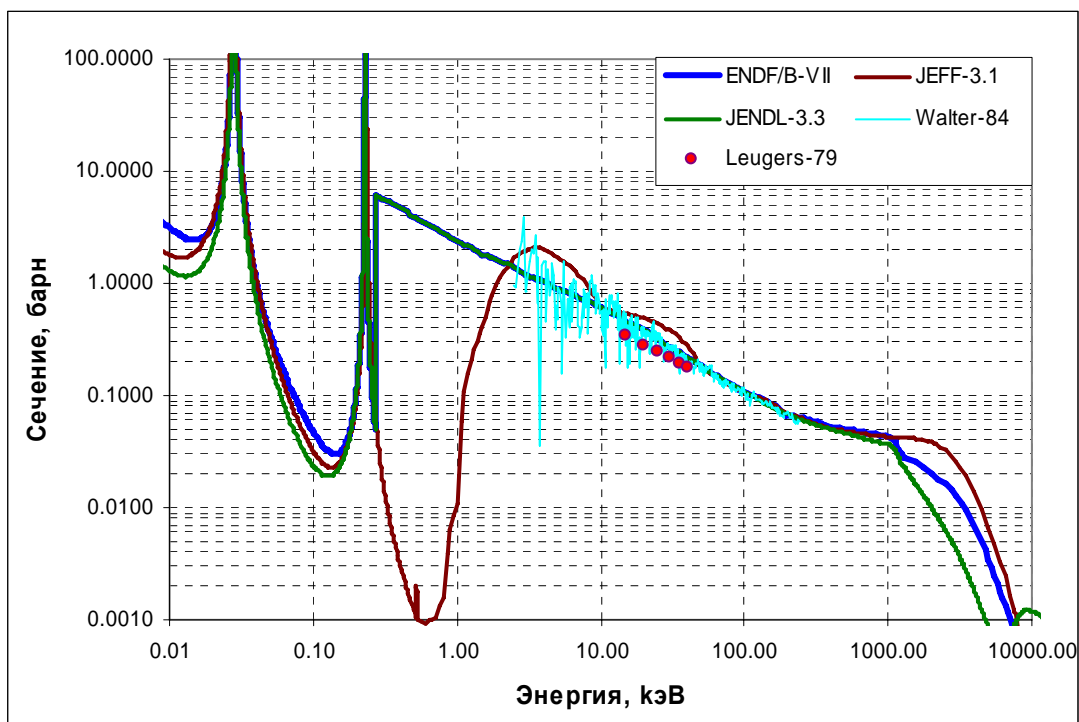


Рис.1. Сечение захвата.

Трудно отдать предпочтение какой-либо из оценок. Боле поздняя китайская оценка практически копирует японскую, обеспечивая чуть большее значение теплового сечения, но так же неестественно переходящая к описанию сечений средними резонансными параметрами. Провал в оценке JEFF-3.1 слишком глубок и нет согласия с результатами уолтера, появившимися позже.

Данные об образовании фотонов отсутствуют во всех оценках.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2, в которой сечение захвата тепловых нейтронов ближе к экспериментальным данным

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

36.7. Криптон-84

Содержание в естественной смеси 57.00%. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами – $1.03 \cdot 10^{-2}$.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки:

JEFF-3.1 – оценка 1982 г., выполненная группой специалистов для ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка 1990г. японской группы специалистов по оценке данных для продуктов деления.

ENDF/B-VIIb2 – оценка WPEC SG23(рабочей группы по кооперации работ по оценке для международной библиотеки данных о продуктах деления), 1990 г. Отличие от предыдущей состоит в том, что параметры разрешенных резонансов приняты в соответствии с атласом С.Мухабхаба 2006 г. (ниже 90 кэВ).

Все оценки содержат область разрешенных резонансов, содержащую 3 резонанса (из них одно связанное состояние) с максимальной энергией 233 эВ, но простирающиеся по-разному: JEFF-3.1 – до 529.63 эВ, две остальные – до 272 эВ.

Две последние оценки содержат область неразрешенных резонансов.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже в сравнении с экспериментальными данными

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|--------------|-----------------------------|---------|-----------------------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 6.834 | 6.751 | 0.083 | 3.45 |
| JENDL-3.3 | 6.307 | 6.197 | 0.110 | 2.37 |
| ENDF/B-VIIb2 | 3.85 | 3.74 | 0.11 | 2.12 |
| Eastwood-63 | | | 0.042±0.004 | |
| Macnamara-50 | | | от 0.1 до 2 | |
| Penzhorb-83 | | | 0.085±0.006 (meta) | |
| Kondaiah-68 | | | 0.090±0.013 (meta) | |

Подтверждающие друг друга результаты измерения сечения образования изомера ($T_{1/2}=4.48 \text{ ч}$) показывают ошибочность результата Иствуда, использовавшего в измерениях масс-спектрометрическую методику.

На рис.1. оцененные сечения захвата сравниваются друг с другом и немногими имеющимися экспериментальными данными.

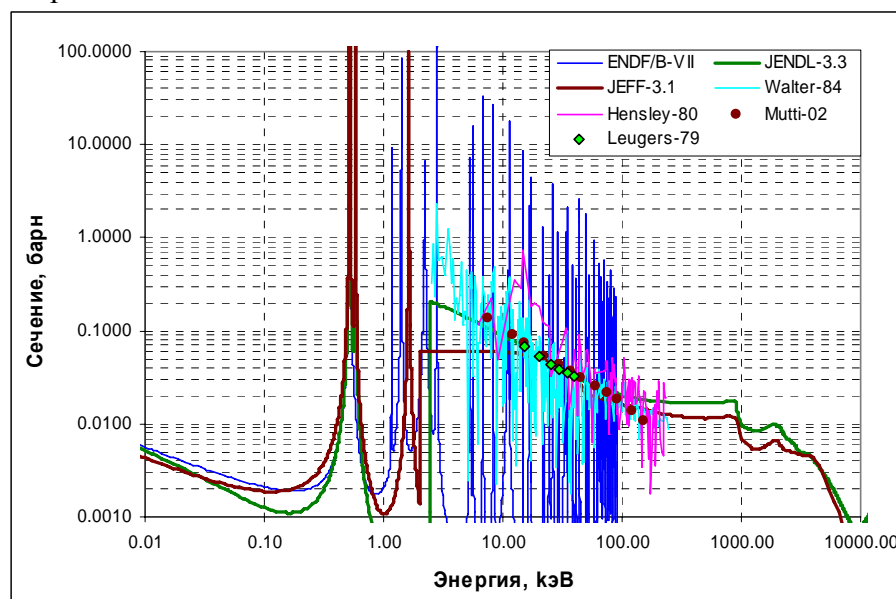


Рис.1. Сечение захвата.

Преимущество оценки ENDF/B-VIIb2, учитывающей какие-то новые данные, полученные с высоким разрешением, и подтверждаемой результатами измерений с низким разрешением, не вызывает сомнений.

Данные об образовании фотонов отсутствуют во всех оценках.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

36.8. Криптон-85

Содержание в естественной смеси 57.00%. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами – $2.86 \cdot 10^{-3}$.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки:

JEFF-3.1 – оценка 1982 г., выполненная группой специалистов для ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка 1990г. японской группы специалистов по оценке данных для продуктов деления. В области от 1 до 100 кэВ структура сечений описывается с помощью средних резонансных параметров. Ниже 1 кэВ сечения задано плавными кривыми.

ENDF/B-VIIb2 –Новая оценка Хермана, Обложинского, Сарера и Мухабхаба (Herman, Oblozinsky, Sayer, Mughabgh). Область разрешенных резонансов наполнена фиктивными резонансами, параметры которых сочинены Мухабхабом. Область неразрешенных резонансов отсутствует. Вне резонансной области оценка основана на современных теоретических моделях в возможной степени опирающихся на экспериментальные данные для соседних ядер.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже в сравнении с экспериментальными данными

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|---------------------|-----------------------------|--------------|------------------|----------------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 5.19 | 3.53 | 1.66 | 1.69 |
| JENDL-3.3 | 7.95 | 6.29 | 1.66 | 1.77 |
| ENDF/B-VIIb2 | 222243 | 1291 | 220952 | 268 |
| ENDF/B-VII.0 | 8.015 | 6.353 | 1.662 | 2.713 |
| Bemis-72 | | | 1.66±0.20 | 1.8±1.0 |
| Macnamara-50 | | | 15 | |

Противоречие между результатами измерений сечении захвата тепловых нейтронов Макнамарой и Бемисом велико, но не идет ни в какое сравнение с противоречием в оценках.

После завершения настоящей работы стала доступна окончательная версия библиотеки ENDF/B-VII (версия 0), в которой отмеченная ошибка устранена. Тепловые сечения и резонансный интеграл, рассчитанные с помощью программы NJOY, также включены в вышеприведенную таблицу. Они слегка отличаются от указанных в заголовочной секции файла.

На рис.1. оцененные сечения захвата сравниваются друг с другом и немногими имеющимися экспериментальными данными. *Пересмотренная оценка, принятая в ENDF/B-VII представляется предпочтительнее всех остальных.*

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку из ENDF/B-VII.0.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

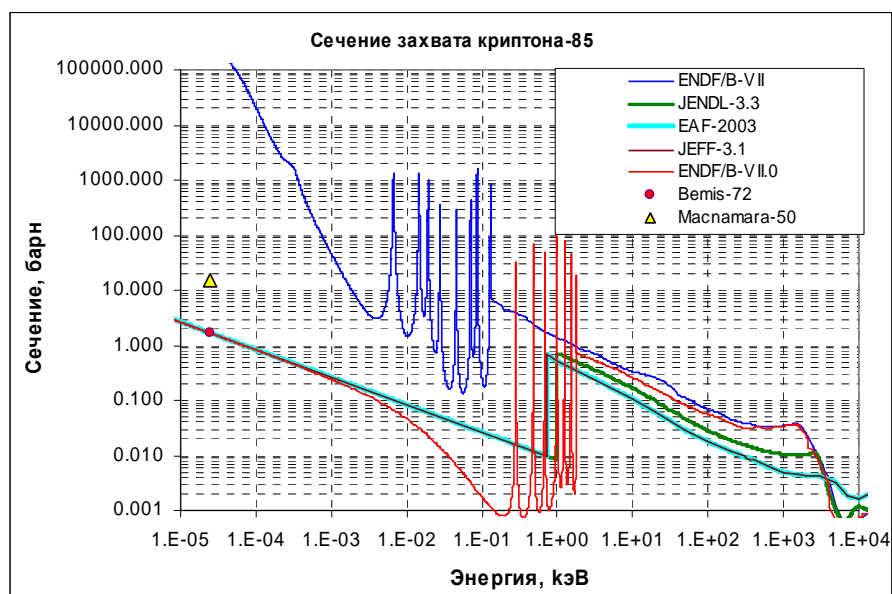


Рис.1. Сечение захвата.

36.9. Криптон-86

Содержание в естественной смеси 17.30%. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами – $2.00 \cdot 10^{-2}$.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки:

JEFF-3.1 – оценка 1982 г., выполненная группой специалистов для ENDF/B-V.

Область разрешенных резонансов содержит один резонанс.

JENDL-3.3 – оценка 1990г. японской группы специалистов по оценке данных для продуктов деления. Область разрешенных резонансов распространена до 640 кэВ. Она содержит параметры 33 s-резонансов (одно связанное состояние), 113 р-резонансов и 59 d-резонансов.

ENDF/B-VIIb2 – оценка WPEC SG23(рабочей группы по кооперации работ по оценке для международной библиотеки данных о продуктах деления), 1990 г. Отличие от предыдущей состоит в том, что параметры разрешенных резонансов приняты в соответствии с атласом С.Мухабхаба 2006 г. Связанное состояние отсутствует, а числа s-, р-и d-резонансов те же. RRR распространена до 950 кэВ.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже в сравнении с экспериментальными данными

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|--------------|-----------------------------|---------|-------------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 6.105 | 6.048 | 0.061 | 0.135 |
| JENDL-3.3 | 6.189 | 6.186 | 0.003 | 0.016 |
| ENDF/B-VIIb2 | 5.474 | 5.473 | 0.0009 | 0.015 |
| Macnamara-50 | | | менее 2 | |
| Hoagland-51 | | | 0.061 | |
| Jensen-77 | | | 0.003±0.001 | |

Не ясно, что побудило оценщиков ENDF/B-VII понизить оценку сечения захвата в три раза ниже и так низкого экспериментального результата. Это было достигнуто путем снижения радиационных ширин с 0.5 эВ до 0.153 эВ. Это привело к заметному занижению сечения захвата и в области сотен кэВ.

На рис.1. оцененные сечения захвата сравниваются друг с другом и немногими имеющимися экспериментальными данными.

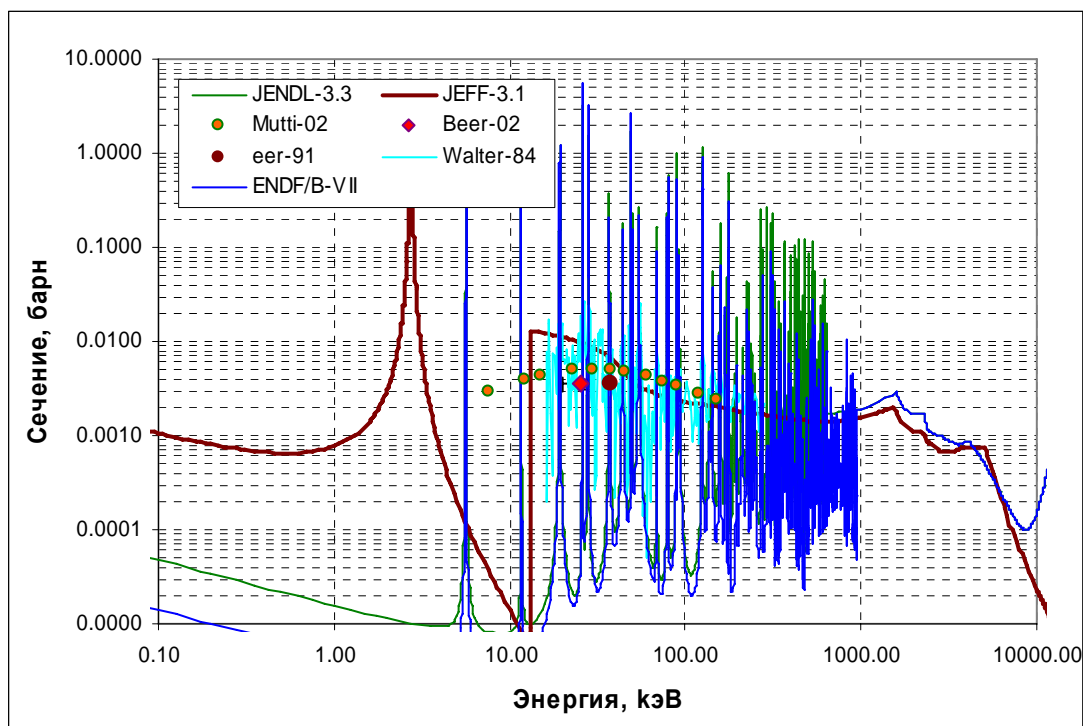


Рис.1. Сечение захвата.

Преимущество оценки ENDF/B-VIIb2, учитывающей какие-то новые данные, полученные с высоким разрешением, и подтверждаемой результатами измерений с низким разрешением, не вызывает сомнений.

Данные об образовании фотонов отсутствуют во всех оценках.

Заключение

Включить в РОСФОНД оценку JENDL-3.3.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

37.РУБИДИЙ

37.1. Рубидий-83

Радиоактивен ($T_{1/2}=86.2$ дн.). Захватывая орбитальный электрон превращается в стабильный криптон-83.

Возможные реакции образования $^{85}\text{Rb}(n,3n)$; $^{85}\text{Rb}(n,2n)$; $^{84}\text{Rb}(n,2n)$; $^{84}\text{Sr}(n,d)$, (n,np) .

Выход при делении $^{235}\text{U} - 1.7 \cdot 10^{-7}$; $^{239}\text{Pu} - 7.8 \cdot 10^{-9}$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных нет ни в одной из современных библиотек. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений, основанная на теоретических расчетах. Согласно этой оценке сечение захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл равны, соответственно:

$\sigma_c=24.6$ барн

$RI=40.8$ барн.

Экспериментальных данных для проверки оцененных сечений не имеется.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=10 и MF=8 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

37.2. Рубидий-84

Радиоактивен ($T_{1/2}=32.8$ дн.). Захватывая орбитальный электрон превращается в стабильный криптон-84.

Возможные реакции образования $^{85}\text{Rb}(n,2n)$; $^{84}\text{Sr}(n,p)$, $^{86}\text{Sr}(n,t)$, (n,nd) .

Выход при делении $^{235}\text{U} - 1.7 \cdot 10^{-6}$; $^{239}\text{Pu} - 2.2 \cdot 10^{-7}$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных нет ни в одной из современных библиотек. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений, основанная на теоретических расчетах. Согласно этой оценке сечения реакций для тепловых нейтронов и резонансные интегралы равны, соответственно:

$\sigma_\alpha=10^{-10}$ барн

$\sigma_p=14.0$ барн

$\sigma_c=23.8$ барн

$RI_\alpha=1.2 \cdot 10^{-9}$ барн.

$RI_p=6.28$ барн.

$RI_c=389$ барн.

В EXFOR содержатся следующие данные:

Hagberg-76: $\sigma_\alpha=0.06$ барн,

$\sigma_p=12 \pm 2$ барн;

Anderson-76: $\sigma_p=12 \pm 2$ барн.

Неясно, из каких соображений сечение реакции (n,α) было столь занижено по сравнению с результатом единственного эксперимента, и почему сечение реакции (n,p) не совпадает с совпавшими результатами двух экспериментов.

Экспериментальных данных о сечении радиационного захвата в EXFORe не содержится.

Энергетическое поведение сечений поглощения нейтронов показано на рис.1

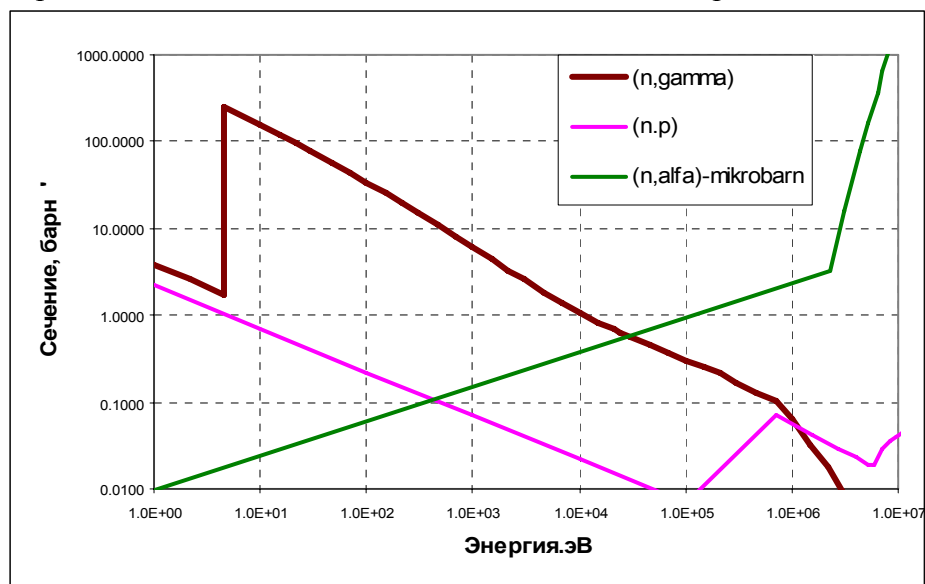


Рис.1. Сечения радиационного захвата, реакций (n,p) и (n,α)

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=10 и MF=8 опустить.

При возможности следовало бы детально рассмотреть экспериментальную и расчетно-теоретическую ситуацию о сечениях реакций с вылетом заряженных частиц.

Автор заключения

Николаев М.Н.

37.3. Рубидий-85

Содержание в естественной смеси 72.17%

Возможные реакции образования $^{87}\text{Rb}(n,3n)$; $^{85}\text{Sr}(n,p)$, $^{86}\text{Sr}(n,d)$, (n,np) .

Выход при делении $^{235}\text{U} - 1.8 \cdot 10^{-2}$; $^{239}\text{Pu} - 9.7 \cdot 10^{-3}$.

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных используются две JEFF-3.1 оценка Группелаара и Менапаса (Y. Gruppelaar, E. Menapace, 1982).

JENDL-3.3 и ФОНД-2.2 – оценка японской группы по оценке продуктов деления, 1990.

ENDF/B-VIIb2 – та же оценка с полностью пересмотренной областью разрешенных резонансов, существенно расширенной за счет учета результатов дополнительных экспериментов.

В этих условиях целесообразность выбора ENDF/B-VIIb2 для РОСФОНДА представляется очевидной.

Сечения взаимодействия тепловых нейтронов и резонансные интегралы захвата из сравниваемых оценок приведены в нижеследующей таблице.

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|--------------|-----------------------------|---------|--------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 6.78 | 6.30 | 0.48 | 6.37 |
| JENDL-3.3 | 6.33 | 5.85 | 0.48 | 8.73 |
| ENDF/B-VIIb2 | 6.74 | 6.25 | 0.49 | 7.61 |

Пересмотр области разрешенных резонансов оказался весьма существенным. Полное число резонансов в интервале до 19 кэВ возросло с 138 до 290 (не считая связанных состояний). Резко изменилась идентификация четности: число s-резонансов не только не возросло, но даже сократилось; р-резонансы идентифицированы во всей области разрешенных резонансов, а не только в ее нижней части (см. рис.1). В результате среднее расстояние между р-резонансам стало существенно меньше, чем между s- резонансами, что и должно быть из статистических соображений.

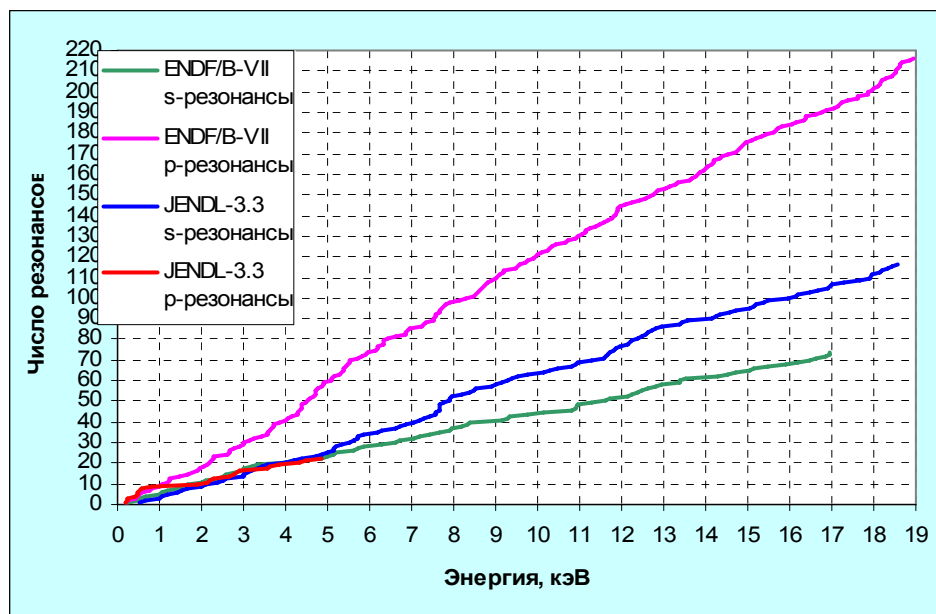
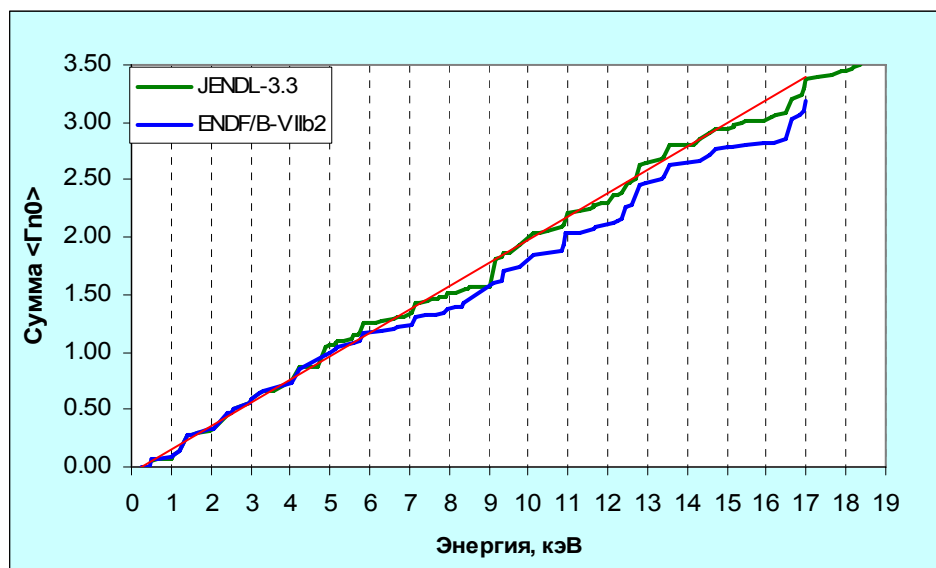


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

На рис.2. изображены нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов. Видно, что в категорию р-уровней переведены резонансы с малыми нейтронными ширинами: сильное сокращение числа s-резонансов слабо сказалось на сумме приведенных нейтронных ширин. Похоже, однако, что с переводом s-резонансов в р- несколько перестарались: нарастающая сумма отклоняется вниз от прямой, проведенной через начальный участок (до 6 кэВ). Это, видимо, и побудило сохранить в ENDF/B-VIIb2 ту же границу области разрешенных резонансов, что и в JENDL-3.3 – до 8.468 кэВ.



Что касается области неразрешенных резонансов и области более высоких энергий, то тут оценка, как уже говорилось, сохранена прежней – она простирается до 100 кэВ. Пример согласия между оцененными данными и результатами измерений приведен на рис.3 для сечения захвата.

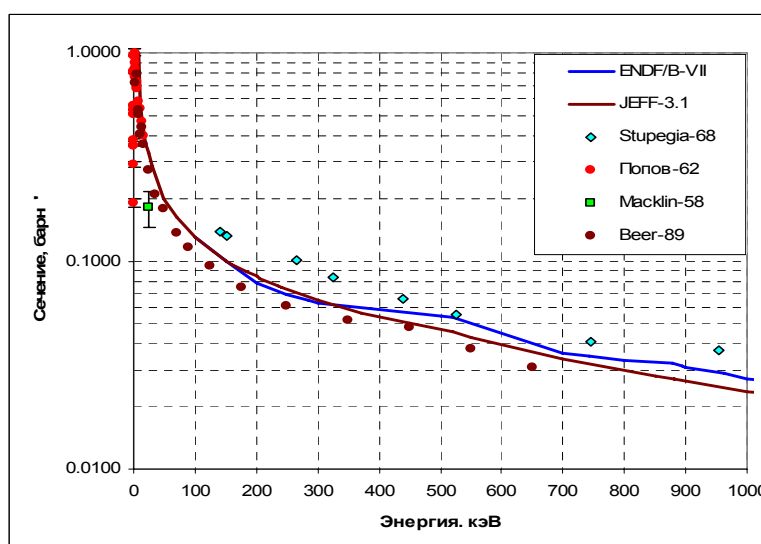


Рис.3. Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из ENDF/B-VIIb2. При возможности следовало бы переоценить область разрешенных резонансов расширив ее границы и, если потребуется, учесть вклад пропущенных резонансов либо плавной подложкой, либо путем введения фиктивных резонансов.

Автор заключения

Николаев М.Н.

37.4. Рубидий-86

Радиоактивен ($T_{1/2}=18.7$ дн.). испытывая бета-распад превращается в стабильный стронций-84.

Возможные реакции образования $^{85}\text{Rb}(n,\gamma)$; $^{86}\text{Sr}(n,2n)$, $^{86}\text{Sr}(n,p)$.

Выход при делении $^{235}\text{U} - 1.25 \cdot 10^{-4}$; $^{239}\text{Pu} - 3.8 \cdot 10^{-5}$.

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных используются две оценки:

JEFF-3.1 оценка Шентера, Шмиттроса и Рейча (R.Schenter, F.Schmittroth, C.Reich, 1979), выполненная для ENDF/B-V и слегка ревизованная в 1982 г. международной группой по оценке продуктов деления;

ENDF/B-VIIb2 – Оценка Хермана, Обложинского, Сарера и Мухабхаба (M.Herman, P. Oblozinsky, V.Sarar, C. Mughabghab, 2005). Введена область разрешенных резонансов - 10 резонансов до 129 эВ. Энергия 1-го резонанса принята равной 0.0297 эВ, что явилось причиной аномально высокого сечения захвата (основания для этого не сообщаются).

Выполнены полные теоретические расчеты, позволившие получить коррелированные энерго-угловые распределения и данные об образовании фотонов в нейтронных реакциях.

В JENDL-3.3 данных для рубидия-86 не содержится.

В ФОНД-2.2 приведены лишь сечения реакций из EAF-3.

В EXFOR экспериментальных данных для ^{86}Rb нет.

В связи с аномально низким положением первого резонанса из оценки ENDF/B-VIIb2 следует аномально высокое сечение захвата тепловых нейтронов ^{86}Rb : $\sigma_c=223103$ барн. Для сравнения: в JEFF-3.1 $\sigma_c=4.9$ барн, в ФОНД-2.2 – 3.56 барн, EAF-2003 – 20 барн. Естественно, резонансный интеграл также аномально высок – он превосходит 280 килобарн. Возможно, группа оценки ENDF/B-VII располагала некоей дополнительной экспериментальной информацией, побудившей их столь резко увеличить сечение захвата, однако, в доступной документации по этой оценке¹ ничего по этому поводу не говорится. В текстовой части файла сказано:

RESONANCE REGION FAKE!

Authors: S. Mughabghab

- Resolved Resonances (MLBW) <0.1293 keV

- Unresolved Resonances none

После завершения настоящей работы выяснилось, что в окончательной версии библиотеки ENDF/B-VII.0 эта явная ошибка устранена. Первый резонанс имеет энергию 112 эВ. Тепловое сечение захвата 1ю562 барна, резонансный интеграл -36ю5 барна.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из ENDF/B-VII.

Автор заключения

Николаев М.Н.

¹ <http://www.nndc.bnl.gov/sg21/rev/37-rb86.doc> (Pavel Oblozinsky, BNL, March 17, 2004)

37.5. Рубидий-87

Содержание в естественной смеси 27.83%.

Слабо радиоактивен ($T_{1/2}=2.97 \cdot 10^{10}$ лет).

Возможные реакции образования $^{87}\text{Sr}(n,p)$, $^{89}\text{Sr}(n,d)$, (n,np) .

Выход при делении $^{235}\text{U} - 2.7 \cdot 10^{-2}$; $^{239}\text{Pu} - 1.3 \cdot 10^{-2}$.

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных используются три оценки:

JEFF-3.1 оценка Шентера, Рейча и Принца (Shenter, Reich, Prince, 1984), выполнявшаяся для ENDF/B-V, пересмотренная рабочей группой. В результате пересмотра число резонансов сократилось с 15 до 8. Тепловые сечения и резонансный интеграл не указываются.

JENDL-3.3, ФОНД-2.2 и ENDF/B-VIIb2 – оценка японской группы по оценке продуктов деления, 1990. Согласно этой оценке

$\sigma_t=4.48$ барна

$\sigma_{ef}=4.36$ барна

$\sigma_c=0.12$ барна

$RI=2.72$ барна.

Область разрешенных резонансов содержит 28 s- и 2 p-резонанса. Судя по нарастающей сумме числа резонансов (см. рис.1) существенного пропуска уровней нет. Между тем область разрешенных резонансов ограничена 12.46 кэВ. Область неразрешенных резонансов простирается от этой границы до 100 кэВ

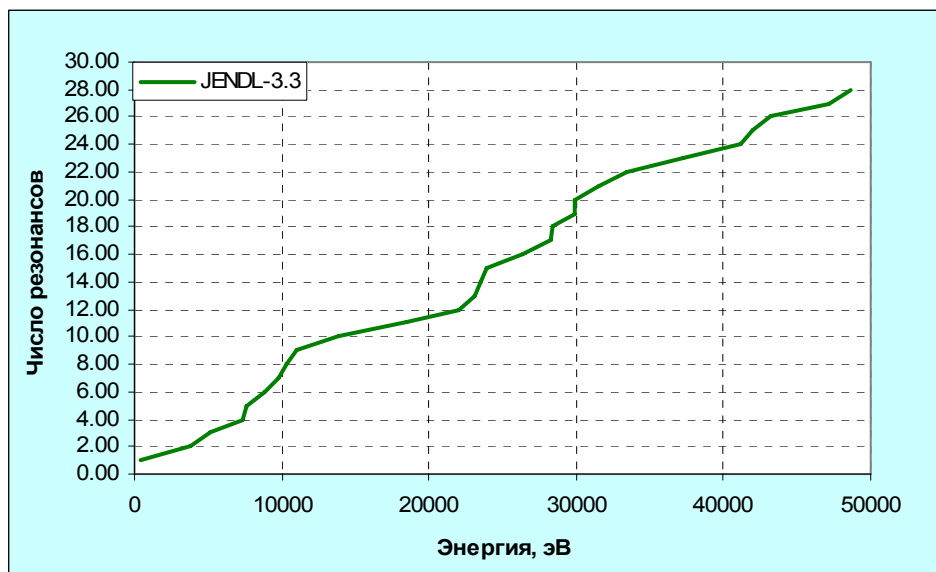


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

В EXFORe экспериментальных данных по нейтронным сечениям рубидия-87 не содержится.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003.

При возможности следовало бы переоценить область разрешенных резонансов расширив ее границы и, если потребуются, учесть вклад пропущенных резонансов либо плавной подложкой, либо путем введения фиктивных резонансов.

Автор заключения

Николаев М.Н.

38.СТРОНЦИЙ

38.1. Стронций-82

Радиоактивен ($T_{1/2}=25.34$ дн.). захватывая орбитальный электрон превращается в рубидий-82, а тот тем же путем – в криптон-82.

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений. Из нее получены следующие значения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла:

$$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=15.06 \text{ барна}$$

$$RI_c=17.53 \text{ барна.}$$

Экспериментальные данные для проверки оценки отсутствуют

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить. Файлу присвоить МАТ=3882

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

38.2. Стронций-83

Радиоактивен ($T_{1/2}=32.4$ ч.). захватывая орбитальный электрон превращается в рубидий-83, а тот тем же путем – в криптон-83.

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений. Из нее получены следующие значения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла:

$$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=29.4 \text{ барна}$$

$$RI_c=273.9 \text{ барна.}$$

Экспериментальные данные для проверки оценки отсутствуют

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить. Файлу присвоить МАТ=3883

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

38.3. Стронций-84

Содержание в естественной смеси 0.56%

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $6.7 \cdot 10^{-12}$.

Имеется два полных набора оцененных нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка координационной группы 1982 г., заимствованная из ENDF/B-V.
 ENDF/B-VIIb2 – оценка Хермана, Обложинского, Сарера и Мухабхаба (Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabghab), 2005 г.

Обе оценки содержат область разрешенных резонансов, содержащую 10 резонансов (из них согласно JEFF-3.1 1 р-резонанс, а согласно ENDF/B-VIIb2- 2). Связанных состояний не описано. Параметры резонансов несколько отличны, что отразилось на тепловых сечениях и резонансном интеграле:

| | |
|--|--|
| JEFF-3.1 | ENDF/B-VIIb2 |
| $\sigma_t(0.0253 \text{ eV})=4.74$ барна | $\sigma_t(0.0253 \text{ eV})=5.78$ барна |
| $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=0.81$ барна | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=0.63$ барна |
| $RI_c=10.2$ барна. | $RI_c=11.7$ барна. |

Экспериментальные данные разбросаны довольно сильно, но всё же указывают на заниженность оцененных сечений захвата. Ниже приводятся результаты измерений сечения захвата с образованием основного и изомерного состояния и дана их сумма.

| | M | G | T (получено сложением) |
|-----------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| Neft-78: | 0.625 ± 0.030 ; | 0.199 ± 0.010 ; | 0.82 ± 0.03 . |
| Foglio Para-67: | 0.735 ± 0.017 ; | 0.24 | 0.98 ± 0.03 . |
| Hans-60: | 0.40 ± 0.2 ; | 0.60 ± 0.2 | 1.0 ± 0.3 |
| Lyon-53 | | | 1.46 ± 0.15 |

Результаты измерения резонансного интеграла также весьма разбросаны, но также превышают результаты оценки:

| | |
|--------------------|------------------|
| Ricabarra-72: | 6.7 ± 1.3 ; |
| Van Der Linden-72: | 23 ± 2.9 ; |
| Steinnes-72 | 10.6 ± 1.1 . |

На рис.1 сравниваются результаты оценки сечения захвата в резонансной области и выше с имеющимися экспериментальными данными. Последние различаются почти на порядок и не позволяют отдать предпочтение какой-либо из оценок.

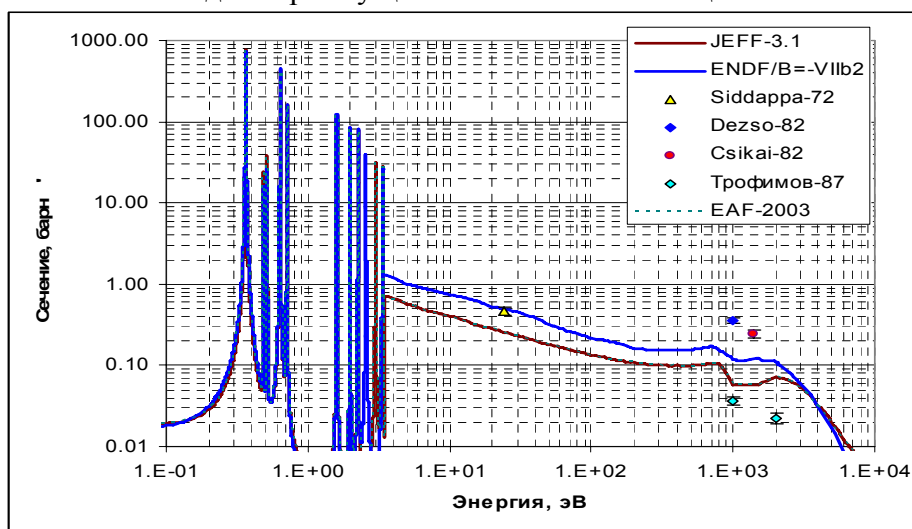


Рис.1. Сечение захвата
Заключение

В РОСФОНД, видимо, целесообразно принять файл данных из ENDF/B-VIIb2, отметив противоречивость оцененных и экспериментальных данных и ненадежность последних. Файлу присвоить МАТ=3884

Автор рекомендации
 Николаев М.Н.

38.4. Стронций-85

Радиоактивен ($T_{1/2}=64.9$ дн.). захватывая орбитальный электрон превращается в рубидий-85.

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений. Из нее получены следующие значения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла:

$$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=21.8 \text{ барна}$$

$$RI_c=166.2 \text{ барна.}$$

Экспериментальные данные для проверки оценки отсутствуют

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить. Файлу присвоить MAT=3885

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

38.5. Стронций-86

Содержание в естественной смеси 9.86%

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $7.6 \cdot 10^{-7}$.

Имеется три полных набора оцененных нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка координационной группы 1982 г., заимствованная из ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка Японской группы по оценке данных для продуктов деления 1984 г., перешедшая из JENDL-2 с несущественными изменениями

ENDF/B-VIIb2 – оценка международной рабочей группы по продуктам деления и Мухабхаба, 2005 г.

Все оценки содержат область разрешенных резонансов: в JENDL-3.3 простирающуюся до 37120 эВ и содержащую 74 резонансов; в JEFF-3.1 – до 19940 эВ и содержащую 7 s- и 17 p-резонансов, а в ENDF/B-VIIb2- до 30 кэВ и содержит 11 s и 21 p-резонанс.

На рис.1 приведены нарастающие суммы числа резонансов в сравниваемых оценках. Видно, что до 5 кэВ числа резонансов совпадают, до 15 кэВ совпадают числа резонансов в оценках ENDF/B-VII и JENDL-3.3, а выше этой энергии плотность резонансов в ENDF/B-VII резко падает и оснований для продления области разрешенных резонансов до 30 кэВ нет.

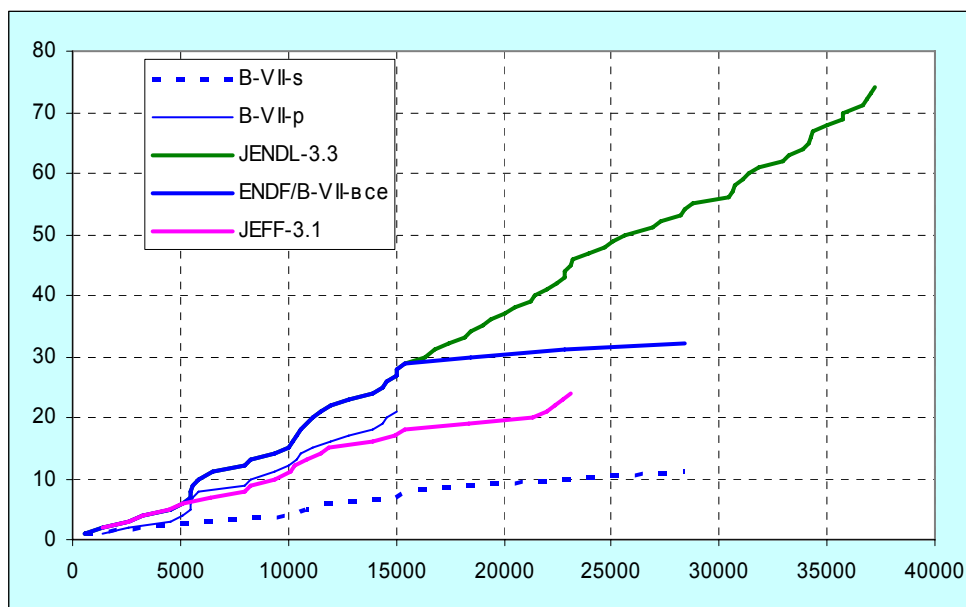


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|--------------|-----------------------------|---------|--------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 5.08 | 2.24 | 2.84 | 5.09 |
| JENDL-3.3 | 5.20 | 4.16 | 1.04 | 4.71 |
| ENDF/B-VIIb2 | 3.80 | 2.80 | 1.01 | 4.76 |

Экспериментальные данные имеются только по сечению образования изомера $^{87}\text{Sr}^m$ ($T_{1/2}=2.81 \text{ ч.}$). Согласно EAF=2003 вероятность образования этого изомера при захвате тепловых нейтронов составляет 80%. Наиболее точные измерения сечения $^{86}\text{Sr}(n,\gamma)^{87}\text{Sr}^m$ таковы:

- Mannhart-68: 0.81 ± 0.02 ;
- Foglio Para-67: 0.92 ± 0.05 ;
- Gulyas-60: 0.769 ± 0.048 ;
- Heft-72: 0.816 ± 0.025 .

Отсюда следует, что оценка полного сечения захвата порядка 1 барна реалистична, а 2.8 барна- завышена.

Известны результаты двух измерений резонансного интеграла захвата с образованием изомера:

- Heft-78: 4.08 ± 0.40 ;
- Van Der Linden: 4.79 ± 0.24 .

Очевидно, оценка ENDF/B-VIIb2 согласуется с результатом Хефта. Данные Ван дер Линдена на 15% выше.

На рис.2 сравниваются результаты оценки сечения захвата в резонансной области и выше с имеющимися экспериментальными данными. На их основе трудно отдать предпочтение какой-либо из оценок. Всё же данные Уолтера ближе к оценке JENDL-3.3

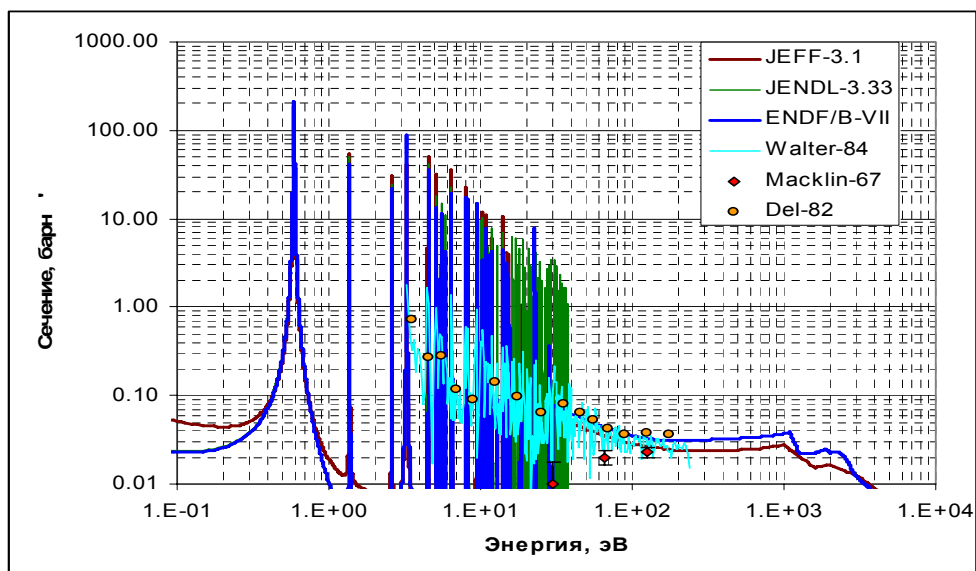


Рис.2. Сечение захвата

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять файл данных из JENDL-3.3. Файлу присвоить МАТ=3886

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

38.6. Стронций-87

Содержание в естественной смеси 7.00%

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $3.4 \cdot 10^{-9}$.

Имеется две полных набора оцененных нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка координационной группы 1982 г., заимствованная из ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка Японской группы по оценке данных для продуктов деления 1984 г., перешедшая из JENDL-2 с несущественными изменениями. Эта оценка принята и в ENDF/B-VIIb2.

Все оценки содержат область разрешенных резонансов: в JENDL-3.3 и ENDF/B-VIIb2 простирающуюся до 14129 эВ и содержащую 115 s-резонансов и 1 р-резонанс; в JEFF-3.1 – до 1890 эВ и содержащую 10 s- и 12 р-резонансов. Недобор резонансов в этой старой оценке очевиден.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|-------------------------|-----------------------------|---------|--------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 19.25 | 3.25 | 16.00 | 118 |
| JENDL-3.3= ENDF/B-VIIb2 | 29.94 | 6.94 | 16.00 | 121 |

Экспериментальные данные по тепловому сечению захвата и резонансному интегралу отсутствуют, так что согласие оценок не следует рассматривать как свидетельство их надежности.

На рис.1 сравниваются результаты оценки сечения захвата в резонансной области и выше с имеющимися экспериментальными данными. Последние подтверждают оценку JENDL-3.3.

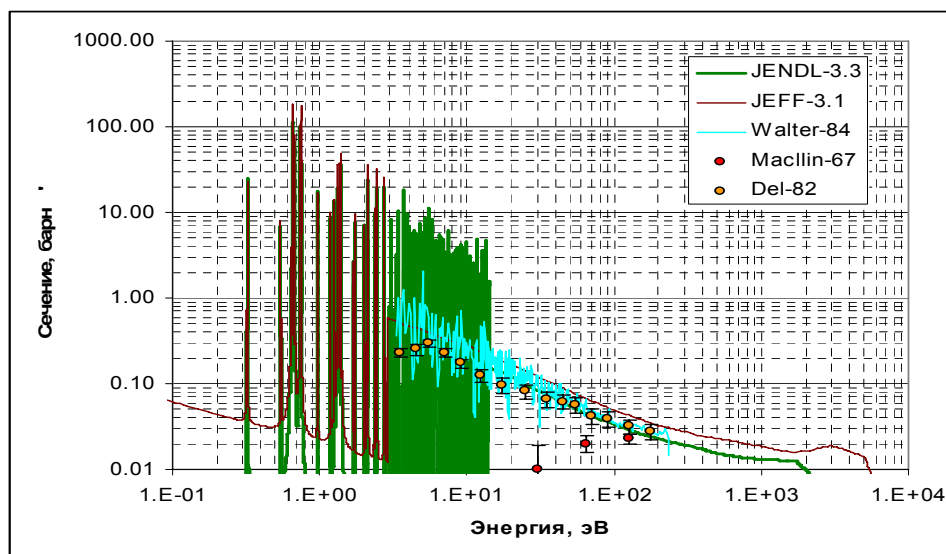


Рис.1. Сечение захвата

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять файл данных из JENDL-3.3. Отметить, что в области тепловых нейтронов данные экспериментально плохо обоснованы. Файлу присвоить МАТ=3887

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

38.7. Стронций-88

Содержание в естественной смеси 82.58%

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $3.75 \cdot 10^{-2}$.

Имеется три полных набора оцененных нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка координационной группы 1982 г., заимствованная из ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка японской группы по оценке данных для продуктов деления 1990 г.

ENDF/B-VIIb2 – оценка Жуанга, Каи и Мухабхаба (Zhuang, Cai, Mughabghab) 2005 г..

В JEFF-3.1 область разрешенных резонансов простирается до 165.5 кэВ и содержит 4 s и 12 p-резонансов с максимальной энергией 153.5 кэВ.

В JENDL-3.3 эта область простирается до 300 кэВ и содержит 13 s-, 133p- и 12 d-резонансов с максимальной энергией 845кэВ.

В ENDF/B-VII эта область простирается также до 300 кэВ и содержит 12 s- и 76 p-резонансов с максимальной энергией 29.8 кэВ.

На рис.1 сравниваются нарастающие суммы резонансов в двух последних оценках. Создается впечатление, что в ENDF/B-VII до границы области разрешенных резонансов нет существенного пропуска уровней, тогда как в JENDL-3.3 к 30 кэВ этот пропуск наблюдается (и хотя, вероятно, пропущены только уровни с низкими нейтронными

ширинами их вклад в радиационный захват может быть существенен поскольку $\Gamma_n \gg \Gamma_\gamma$). Существенно различается и деление уровней по спинам и четностям.

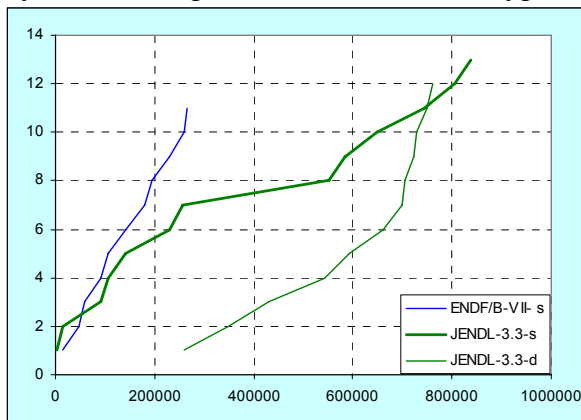


Рис.1а

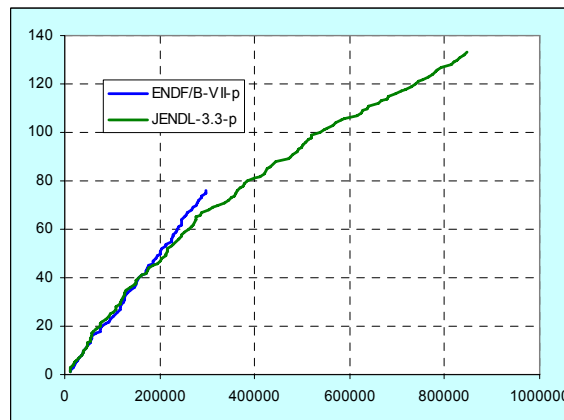


Рис.1б

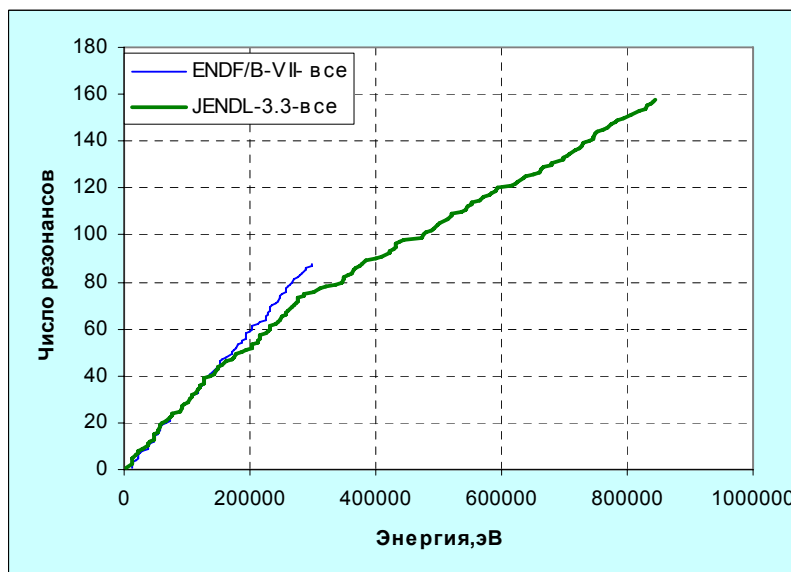


Рис.1в.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок приведены ниже

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|--------------------------|-----------------------------|---------|--------------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 3.643 | 3.637 | 0.006 | 0.006 |
| JENDL-3.3 | 5.468 | 5.463 | 0.006 | 0.053 |
| ENDF/B-VIIb2 | 7.308 | 7.299 | 0.009 | 0.025 |
| Seren-47 | | | 0.005±0.001 | |
| Roy-58 ^{*)} | | | 0.0058±0.004 | |
| Asdente-56 ^{®)} | | | 0.0025±0.003 | |

^{*)} В EXFORe приводится значение в 1000 раз большее – по видимому ошибочно.

^{®)} Измерено отношение сечений ^{84}Sr и ^{88}Sr ; здесь первое принято равным 0.8 барна.

Измерения резонансного интеграла, видимо, не проводились.

На рис.2 сравниваются результаты оценки сечения захвата в резонансной области и выше с имеющимися экспериментальными данными. Различие резонансных структур, как видим, весьма велико. Учитывая участие Мухабхаба в последней оценке, следует отдать ей предпочтение.

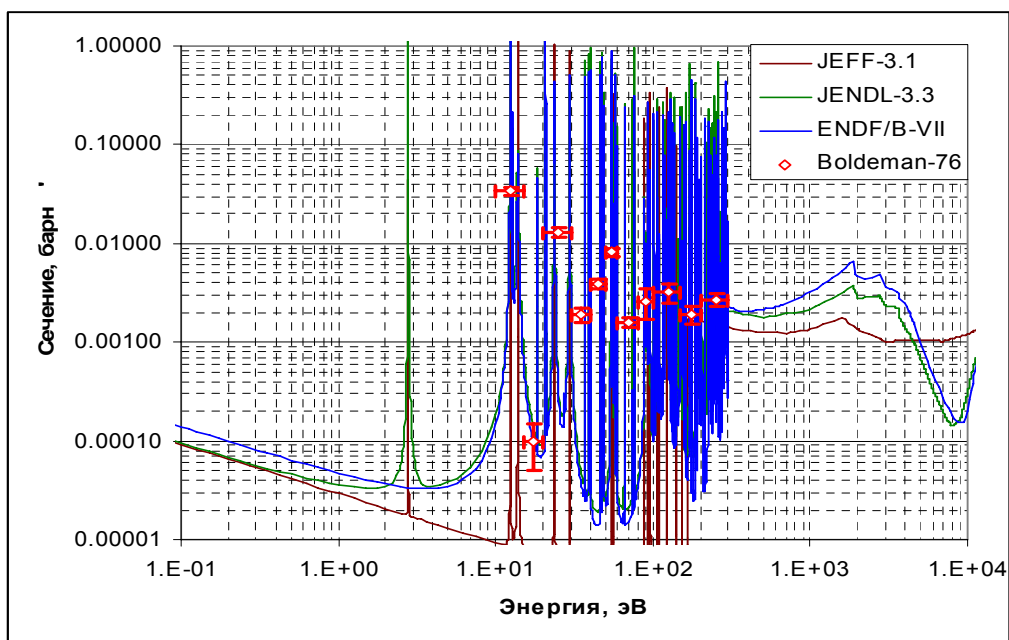


Рис.2. Сечение захвата

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять файл данных из ENDF/B-VII. Файлу присвоить МАТ=3888

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

38.8. Стронций-89

Радиоактивен ($T_{1/2}=50.5$ дн.). Испытывает бета-распад в иттрий-89.

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $4.38 \cdot 10^{-2}$.

Имеется три полных набора оцененных нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка координационной группы 1982 г., заимствованная из ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка Японской группы по оценке данных для продуктов деления 1990 г.

ENDF/B-VIIb2 – оценка Жуанга и Мухабхаба (Имеется три полных набора оцененных нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка координационной группы 1982 г., заимствованная из ENDF/B-V.

JENDL-3.3 – оценка Японской группы по оценке данных для продуктов деления 1990 г.

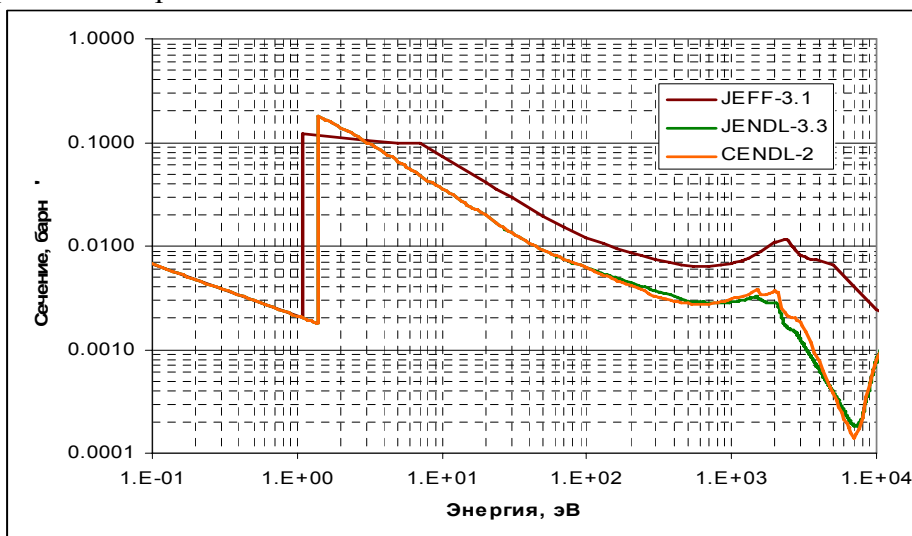
ENDF/B-VIIb2 – оценка Джин-лу Хана, Каи и Жуанга (Yin-lu Han, C.H.Cai, Y.X.Zhuang) из CENDL-2, 2005 г..

JEFF-3.1 не содержит резонансной области. В JENDL-3.3 и ENDF/B-VII введена область неразрешенных резонансов, простирающаяся до 100 кэВ и содержащая параметры s- и -p- резонансов. Тепловые сечения резонансные интегралы, следующие из оценок, приведены ниже вместе с единственным экспериментальным результатом.

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|--------|-----------------------------|---------|--------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| | | | | |

| | | | | |
|-------------------------|------|------|----------|------|
| JEFF-3.1 | 4.06 | 3.64 | 0.42 | 0.50 |
| JENDL-3.3= ENDF/B-VIIb2 | 6.15 | 5.73 | 0.42 | 0.40 |
| Roy-57 | | | 0.49±0.1 | |

На рис.1. Проводится сравнение оцененных сечений захвата



Существенной разницы нет

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять оценку из CENDL-3, для согласования с JENDL-3.3 и ENDF/B-VII. Файлу присвоить МАТ=3889.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

38.9. Стронций-90

Радиоактивен ($T_{1/2}=28.64$ г.). Испытывает бета-распад в иттрий-90, а тот тем же путем – в цирконий-90.

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $1.83 \cdot 10^{-3}$.

Имеется два полных набора оцененных нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка Группелаара и Менапаса 1982 г.

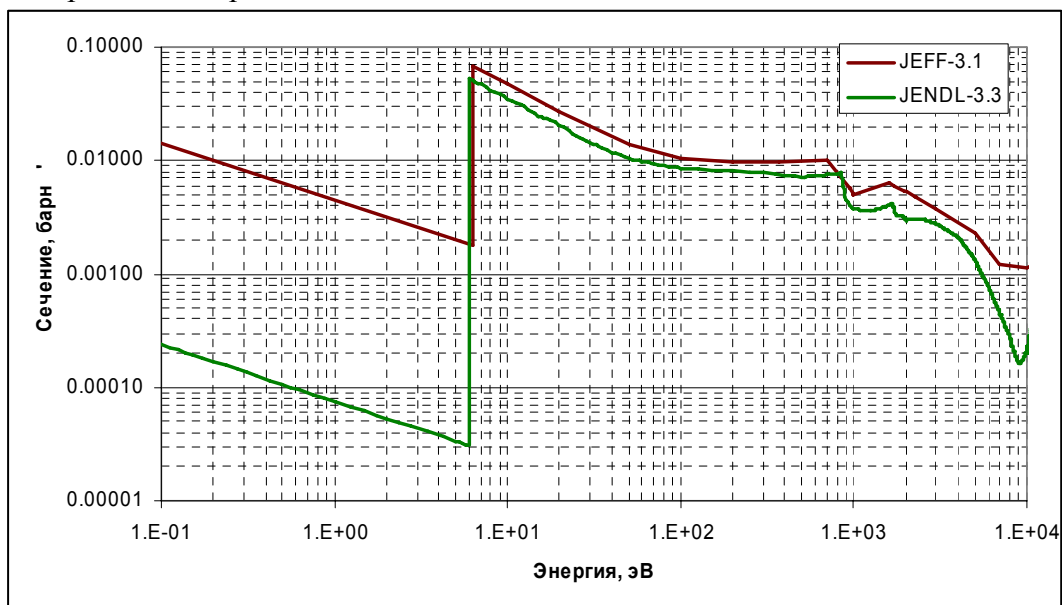
JENDL-3.3 и ENDF/B-VIIb2 – оценка японской группы по оценке данных для продуктов деления 1990 г.

JEFF-3.1 не содержит резонансной области. В JENDL-3.3 и ENDF/B-VII введена область неразрешенных резонансов, простирающаяся от 3 кэВ до 100 кэВ и содержащая параметры s-, p- и d- резонансов. До 3 кэВ сечения заданы поточечно.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из оценок, приведены ниже вместе с экспериментальными данными. Видно, что оценка JEFF-3.1 опиралась на раннее измерение Цейзеля, давшее явно сильно завышенный результат. Даже сечение, принятое в более современной оценке, видимо, завышено раза в полтора.

| Оценка | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | | RI |
|-------------------------|-----------------------------|---------|---------------------|--------|
| | Полное | Упругое | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 4.57 | 3.67 | 0.90 | 0.49 |
| JENDL-3.3= ENDF/B-VIIb2 | 5.85 | 5.83 | 0.015 | 0.067 |
| Nakamura-02 | | | 0.010 ± 0.0013 | |
| Lone-93 | | | 0.0097 ± 0.0007 | |
| Harada-92 | | | 0.0153 ± 0.0013 | |
| Mc Vey-83 | | | 0.014 ± 0.0024 | |
| Zeisel-66 | | | 0.8 ± 0.5 | |

На рис.1. Проводится сравнение оцененных сечений захвата



Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять оценку из JENDL-3.3. Сечение захвата в области до 3 кэВ понизить в 1.5 раза, увеличив соответственно сечение упругого рассеяния. Файлу присвоить МАТ=3890.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

39.ИТТРИЙ

39.1. Иттрий-87

Радиоактивен ($T_{1/2}=80.3$ ч.). Захватывая орбитальный электрон или испуская позитрон превращается в стронций-87. Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $4.8 \cdot 10^{-9}$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений. Из нее получены следующие значения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла:

$$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=15.06 \text{ барна}$$

$$RI_c=17.53 \text{ барна.}$$

Экспериментальные данные для проверки оценки отсутствуют

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить. Файлу присвоить MAT=3887

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

39.2. Иттрий-88

Радиоактивен ($T_{1/2}=106.6$ дн.). Захватывая орбитальный электрон или испуская позитрон превращается в стронций-88. Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $9.0 \cdot 10^{-8}$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений. Из нее получены следующие значения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла:

$$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=12.5 \text{ барна}$$

$$RI_c=51.7 \text{ барна.}$$

Экспериментальные данные для проверки этих данных отсутствуют.

При более высоких энергиях имеется измерение сечения образования изомера иттрия-89 при захвате нейтрона с энергией 1 МэВ (0.7 миллибарна) и сечения реакции (n,2n) при 14.5 МэВ.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить. Файлу присвоить MAT=3888

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

39.3. Иттрий-89

Содержание в природной смеси -100%. Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $4.03 \cdot 10^{-2}$.

Имеется два полных набора оцененных нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка координационной группы 1982 г., перешедшая из JEF-2.

JENDL-3.3 – оценка японской группы по оценке данных для продуктов деления 1984 г., перешедшая в 1990 г. из JENDL-2 с несущественными изменениями. Эта оценка принята и в ENDF/B-VIIb2.

Область разрешенных резонансов простирается:

в JEFF-3.1 до 150 кэВ и содержит 34 s- и 99 p-резонансов с максимальной энергией 148.5 кэВ;

в JENDL-3.3 – до 48 кэВ и содержит 49 s- и 154 p-резонанса с максимальной энергией 240 кэВ.

В JENDL-3.3 включена также область неразрешенных резонансов, простирающаяся до 100 кэВ. На рис. 1 показаны энергетические зависимости нарастающих чисел s- и p-резонансов из последней оценки, преимущество которой очевидно. Видно, что после 48 кэВ имеет место пропуск части резонансов, что и послужило причиной ограничения области разрешенных резонансов этой энергией. С другой стороны, пропущенные резонансы имеют, разумеется, малые нейтронные ширины и, вероятно, достаточно слабо влияют на рассчитываемые сечения. На рис. 2. показанв нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин s- резонансов. Видно, что, по крайней мере, вклады s-резонансов в сечения могут быть корректно учтены до 100 кэВ. Более того, ограничение RRR 48 кэВ привело к тому, что чрезвычайно сильный резонанс при 52.9 кэВ оказался за пределами RRR.

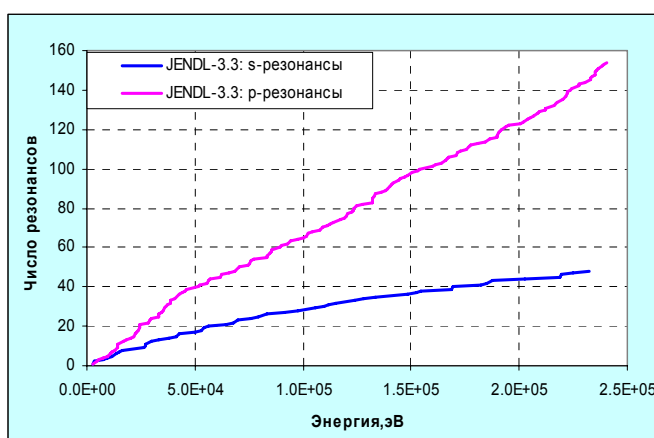


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов.

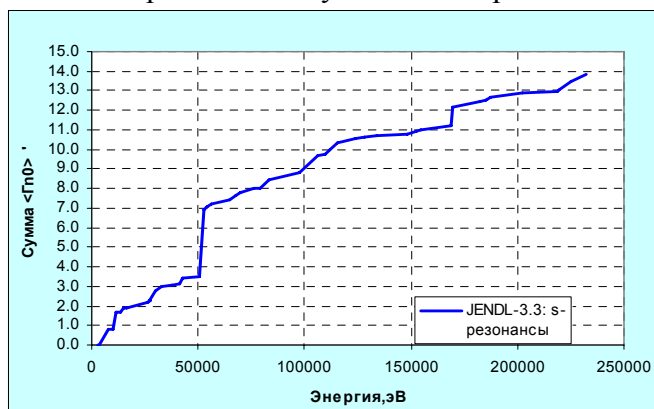


Рис.2. Сумма приведенных нейтронных ширин s- резонансов.

Полученные на основе оценок сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы захвата приведены ниже

| | |
|--|--|
| JEFF-3.1 | JENDL-3.3 |
| $\sigma_t(0.0253 \text{ eV})=9.02 \text{ барна}$ | $\sigma_t(0.0253 \text{ eV})=9.03 \text{ барна}$ |
| $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=1.29 \text{ барна}$ | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=1.28 \text{ барна}$ |
| $RI_c=0.90 \text{ барна}$ | $RI_c=0.84 \text{ барна}$ |

Заметим, что оцененное тепловое сечение сечения захвата подтверждено целым рядом измерений, чего не скажешь о резонансном интеграле. Harris-50 получил $RI=0.72$ барна; Ryves-71 – 0.44 ± 0.06 барна, а Van Der Linden-61, измерявший по активации только часть поглощения, ведущую к образованию изомера ^{90}Y с периодом полураспада 3.19 ч. для этой части получил 0.88 ± 0.08 барна. Это при том, что сечение образования этого изомера при 0.0253 эВ, измеренное Heath-61 и использованное Ван дер Линденом, равно 1 миллибарну. Остается предположить, что в EXFORе допущена ошибка и измерявшийся резонансный интеграл в действительности равен 0.88 миллибарна. Как бы то ни было, резонансный интеграл иттрия оказывается неважно обоснованным экспериментально.

На рис.3 приведены оцененные сечения захвата и экспериментальные данные вне резонансной области. Видно, что в JEFF-3.1 в резонансной области введена большая плавная подложка.

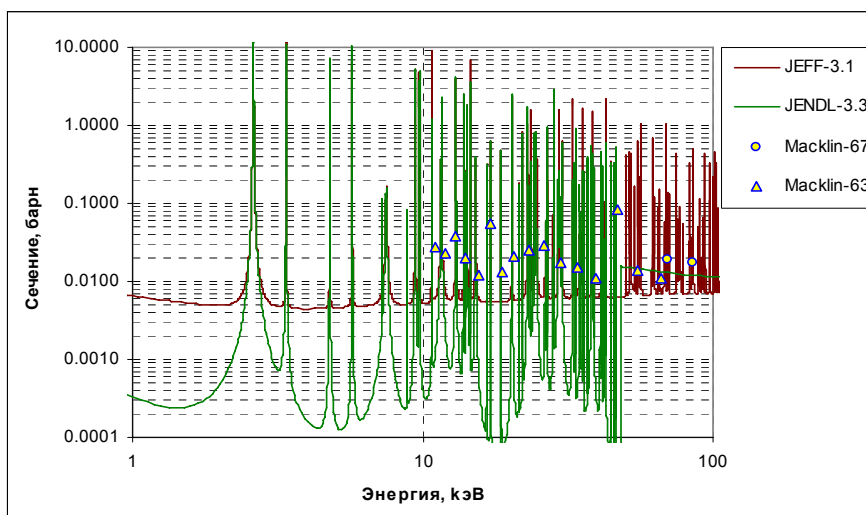


Рис.3а. сечение захвата

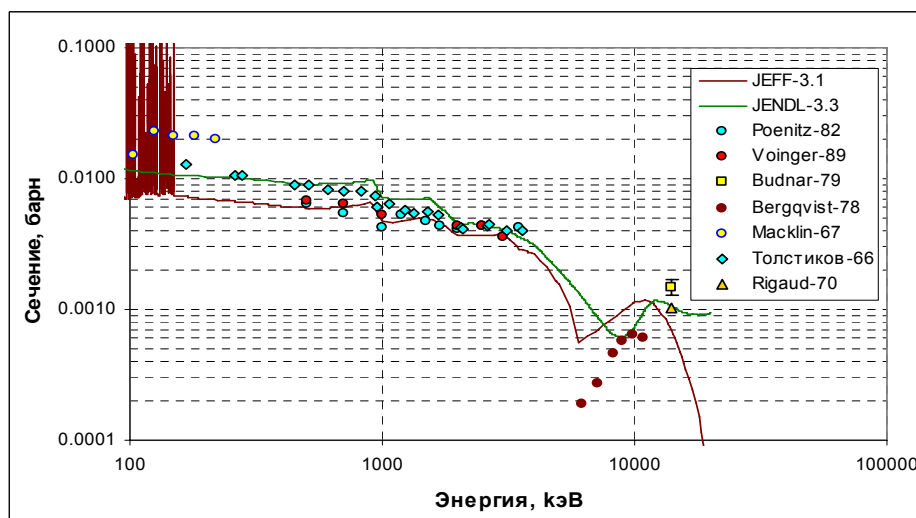


Рис.3б. Сечение захвата.

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из JENDL-3.3

Автор рекомендации
Никлоаев М.Н.

39.5. Иттрий-90

Радиоактивен ($T_{1/2}=64.1$ ч.). Путем бета-распада превращается в цирконий-90. Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $4.41 \cdot 10^{-2}$.

Имеется два полных набора оцененных нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка координационной группы 1982 г., заимствованная из ENDF/B-V.

ENDF/B-VIIb2 – оценка Хермана, Обложинского, Сарера и Мухабхаба (Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabghab), 2005 г.

В JENDL-3.3 файла данных для этого изотопа нет.

В JEFF-3.1 область разрешенных резонансов отсутствует. В ENDF/B-VIIb2 введены фиктивные резонансы, обеспечивающие аномально высокое значение сечения поглощения тепловых нейтронов:

| JEFF-3.1 | ENDF/B-VIIb2 |
|--|---|
| $\sigma_t(0.0253 \text{ eV})=7.17$ барна | $\sigma_t(0.0253 \text{ eV})=222077$ барн |
| $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=3.67$ барна | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=220788$ барн |
| $RI_c=91.7$ барна. | $RI_c=266$ барн. |

Заметим, что согласно оценке EAF-2003 тепловое сечение захвата равно 7 барн, а резонансный интеграл -6 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из JEFF-3.1. Файлу присвоить МАТ=3890

Автор рекомендации
Николаев М.Н.

39.6. Иттрий-91

Радиоактивен ($T_{1/2}=58.5$ дн.). Путем бета-распада превращается в цирконий-90. Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $4.59 \cdot 10^{-2}$.

Имеется два полных набора оцененных нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка координационной группы 1982 г., заимствованная из JEF-2.

JENDL-3.3 – оценка японской рабочей группы по продуктам деления 1990 г., принятая и в ENDF/B-VIIb2.

Область разрешенных резонансов в обеих оценках отсутствует. В JENDL-3.3 введена область неразрешенных резонансов, простирающаяся от 380 эВ до 100 кэВ.

Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата. Следующие из названных оценок таковы:

| JEFF-3.1 | JENDL-3.3 |
|---|---|
| $\sigma_t(0.0253 \text{ eV})=5.1$ барна | $\sigma_t(0.0253 \text{ eV})=7.1$ барна |
| $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=1.4$ барна | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=1.4$ барна |
| $RI_c=1.7$ барна. | $RI_c=2.8$ барна. |

Единственным измерением сечений иттрия-91 является эксперимент Milton-91, в котором получено $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=1.4 \pm 0.3$ барна.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять оценку JENDL-3.3. Файлу присвоить МАТ=3891.

Автор рекомендации
Николаев М.Н.

40.ЦИРКОНИЙ

40.1. Цирконий-88

Радиоактивен ($T_{1/2}=83.4$ дн.). Распадается путем захвата орбитального электрона в Y-88, который, в свою очередь, с периодом 106.6 дн. распадается в стабильный Sr-88. В реакторах может образовываться в малых количествах в результате реакций $^{90}\text{Zr}(n,3n)$ и $^{90}\text{Zr}(n,2n)$ $^{89}\text{Zr}(n,2n)$. Полные наборы оцененных нейтронных данных для этого изотопа отсутствуют. Оцененные нейтронные сечения содержатся в библиотеке EAF. Оценка выполнена на основе теоретических расчетов и полуэмпирических систематик. Экспериментальные данные отсутствуют.

Сечение захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл ^{88}Zr согласно оценке EAF-2003 равны , соответственно, 8.44 барн и 5.75 барн.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять файл данных из EAF-2003. Поскольку нейтронные реакции на ^{88}Zr ведут к образованию лишь короткоживущих изомеров, сечения образования ядер-продуктов в основном и изомерном состояниях, представленные в EAF-2003 в подсекциях соответствующих секций файла MF=10, следует просуммировать по подсекциям и суммы записать в соответствующих секциях файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

40.2. Цирконий-89

Радиоактивен ($T_{1/2}=78.4$ ч.). Распадается путем захвата орбитального электрона в стабильный Y-89. В реакторах может образовываться в малых количествах в результате реакции $^{90}\text{Zr}(n,2n)$. Полные наборы оцененных нейтронных данных для этого изотопа отсутствуют. Оцененные нейтронные сечения содержатся в библиотеке EAF. Оценка выполнена на основе теоретических расчетов и полуэмпирических систематик. Экспериментальные данные отсутствуют.

Сечение захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл ^{89}Zr согласно оценке EAF-2003 равны, соответственно, 8.44 барн и 5.75 барн.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять файл данных из EAF-2003. Поскольку нейтронные реакции на ^{89}Zr ведут к образованию лишь короткоживущих изомеров, сечения образования ядер-продуктов в основном и изомерном состояниях, представленные в EAF-2003 в подсекциях соответствующих секций файла MF=10, следует просуммировать по подсекциям и суммы записать в соответствующих секциях файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

40.3. Цирконий-90

1. Общие характеристики

1.1. $Z=40$

1.2. $A=90$

1.3. $A_w=89.13237$

1.4. Стабильный, содержание в естественной смеси 51.45 %

1.5. Перечень нейтронных реакций с порогом ниже 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | Епор, МэВ | Ядро-продукт |
|-----|-----------------|----------|-----------|--------------|
| 51 | (n,n') | -1.7607 | 1.7845 | Zr-90 |
| 16 | (n,2n) | -11.9709 | 12.1052 | Zr-89 |
| 22 | (n,n α) | -6.6766 | 6.7515 | Sr-86 |
| 28 | (n,np) | -8.3565 | 8.4503 | Y-89 |
| 102 | (n, γ) | 7.1940 | | Zr-91 |
| 103 | (n,p) | -1.4992 | 1.5160 | Y-90 |
| 104 | (n,d) | -6.1319 | 6.2007 | Y-89 |
| 105 | (n,t) | -11.3500 | 11.4761 | Y-88 |
| 107 | (n, α) | 1.7515 | | Sr-87 |

2 Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.1 Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов были измерены в работах [75B, 77M] в диапазоне энергий до 300 кэВ, и на их основе были определены резонансные параметры, представленные в компиляции [81M]. Однако, надежная идентификация угловых моментов имеется примерно лишь для половины резонансов, вследствие чего границы области разрешенных резонансов в различных оценках, сильно различаются. В БРОНД-2 принята верхняя граница разрешенных резонансов 60 кэВ, и большинство резонансов с неизвестными орбитальными моментами были отнесены к s-волне. В JENDL-3.3 верхняя граница резонансов принята более высокой - 171 кэВ, и более корректно учтено разделение p- и d-резонансов. Оценка JENDL-3.3 была включена без изменений в CENDL-3, тогда как в ENDF/B-VII была принята оценка БРОНД-2 с добавлением отрицательного резонанса, обеспечивающего описание уточненного сечения захвата тепловых нейтронов [06M]. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров во всех оценках используется приближение MLBW, и радиус потенциального рассеяния принят равным 7.2 ферми [81M].

Следует отметить, что в новом атласе резонансных параметров нейтронные и радиационные ширины многих резонансов были несколько пересмотрены Мухабхабом [06M] на основе уточнения эффективности нейтронного спектрометра, использовавшегося в измерениях. Радиационные ширины резонансов, принятые в БРОНД-2 и JENDL-3.3, показаны на рис. 1 в сравнении с пересмотренными значениями. В результате уточнений изменились не только ширины многих s- и p-резонансов, но и средние значения радиационных ширин. В новую оценку БРОНД-3 был включен полный набор уточненных параметров нейтронных резонансов [06M]; верхняя граница разрешенных резонансов была принята равной 200 кэВ в соответствии с результатами представленного ниже анализа пропуска резонансов.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице (в барнах):

| Оценка | БРОНД-2 | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | БРОНД-3 | Экспер.[06M] |
|---------|---------|-----------|------------|---------|---------------|
| полное | 5.41 | 5.38 | 5.56 | 5.54 | |
| упругое | 5.40 | 5.37 | 5.48 | 5.46 | 5.3 \pm 0.3 |

| | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|-------------|
| захвата | 0.0116 | 0.0112 | 0.0779 | 0.0771 | 0.077±0.016 |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | 0.140 | 0.169 | 0.186 | 0.191 | 0.17±0.02 |

Следует отметить, что оценки БРОНД-2 и JENDL-3.3 ориентировались на прежние значения сечения захвата тепловых нейтронов 0.011 ± 0.005 барна и резонансного интеграла захвата 0.14 барна [81M], тогда как ENDF/B-VII и БРОНД-3 опираются на уточненные значения [06M].

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки БРОНД-2, JENDL-3.3 и БРОНД-3, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Очевидно, что в БРОНД-2 ряд p-резонансов неоправданно отнесен к s-резонансам. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов в JENDL-3.3 и БРОНД-3 соответствует среднее расстояние между резонансами $D_{\text{obs}}=7.4$ кэВ и для p-резонансов – 2.8 кэВ. Слабые резонансы сравнительно малое влияние на анализ нейтронных силовых функций, значения которых не сильно отличаются в различных оценках (рис. 2).

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов ENDF/B-VII в диапазоне энергий до 200 кэВ пропущено от 10 до 12 резонансов и в наборе p-резонансов наряду с пропущенными имеются также «лишние» резонансы, которые, по-видимому, следовало бы отнести к d-резонансам. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, соответственно равны $D_0=6.0 \pm 0.6$ кэВ и $D_1=3.7 \pm 0.4$ кэВ. Для нейтронных силовых функций с учетом пропуска резонансов получены значения $S_0=(.59 \pm .10) 10^{-4}$ и $S_1=(3.7 \pm 0.4) 10^{-4}$, которые хорошо согласуются с анализом кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин (рис. 2). В аналогичном анализе, представленном в последнем издании атласа нейтронных резонансов [06M], были получены значения средних расстояний между резонансами $D_0=6.89 \pm 0.53$ кэВ и $D_1=3.55 \pm 0.20$ кэВ и нейтронных силовых функций $S_0=(.61 \pm .13) 10^{-4}$ и $S_1=(4.79 \pm 0.75) 10^{-4}$, которые в пределах погрешности согласуются с результатами настоящего анализа (отличия могут быть связаны с другим выбором энергетического интервала рассмотренных резонансов). Отношение $D_0/D_1=1.62 \pm 0.30$ заметно отличается от общей статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, и это может указывать на достаточно сильную зависимость плотности нейтронных резонансов от четности, но также может оказаться следствием более значительного пропуска резонансов, чем полученного в рамках представленного выше анализа.

На рис. 4 и 5 оценки JENDL-3.3, ENDF/B-VII (\approx БРОНД-2) и БРОНД-3 для полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Различия между резонансными параметрами, использованными в оценках, сравнительно невелики, и главные отличия оценок связаны с выбором верхней границы разрешенных резонансов. **Параметры, принятые в БРОНД-3 на основе последней компиляции резонансных параметров, также как и выбранную верхнюю границу резонансов на сегодняшний день можно рассматривать как оптимальное описание имеющейся совокупности экспериментальных данных во всей резонансной области.**

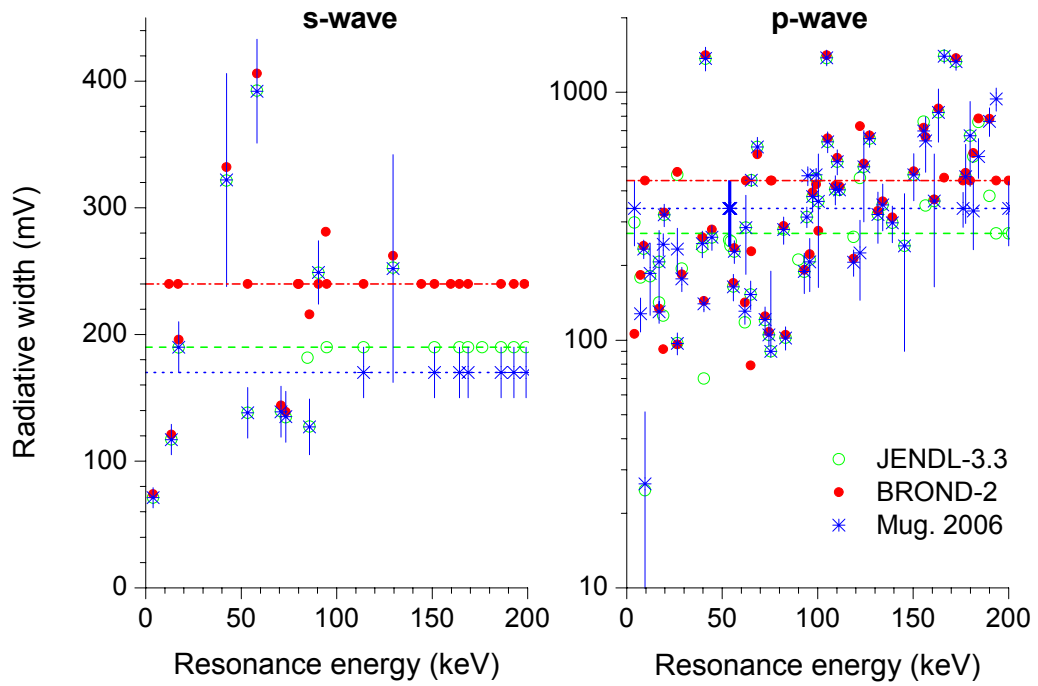


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках, пунктиром показаны принятые средние значения ширин

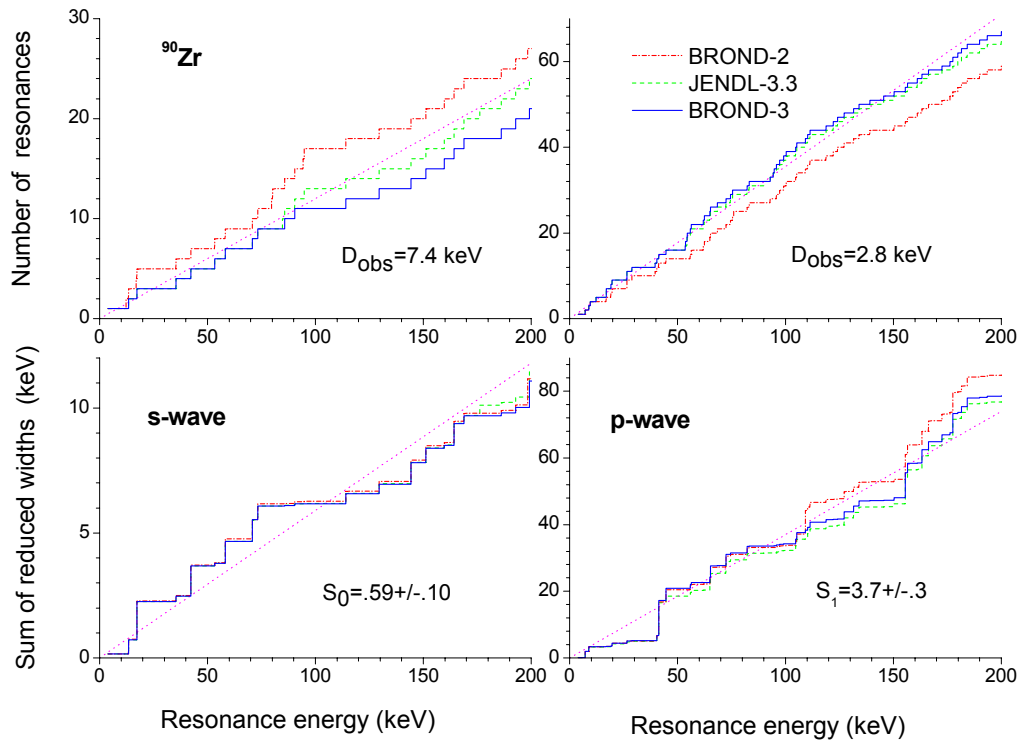


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках БРОНД-2, JENDL-3.3 и БРОНД-3

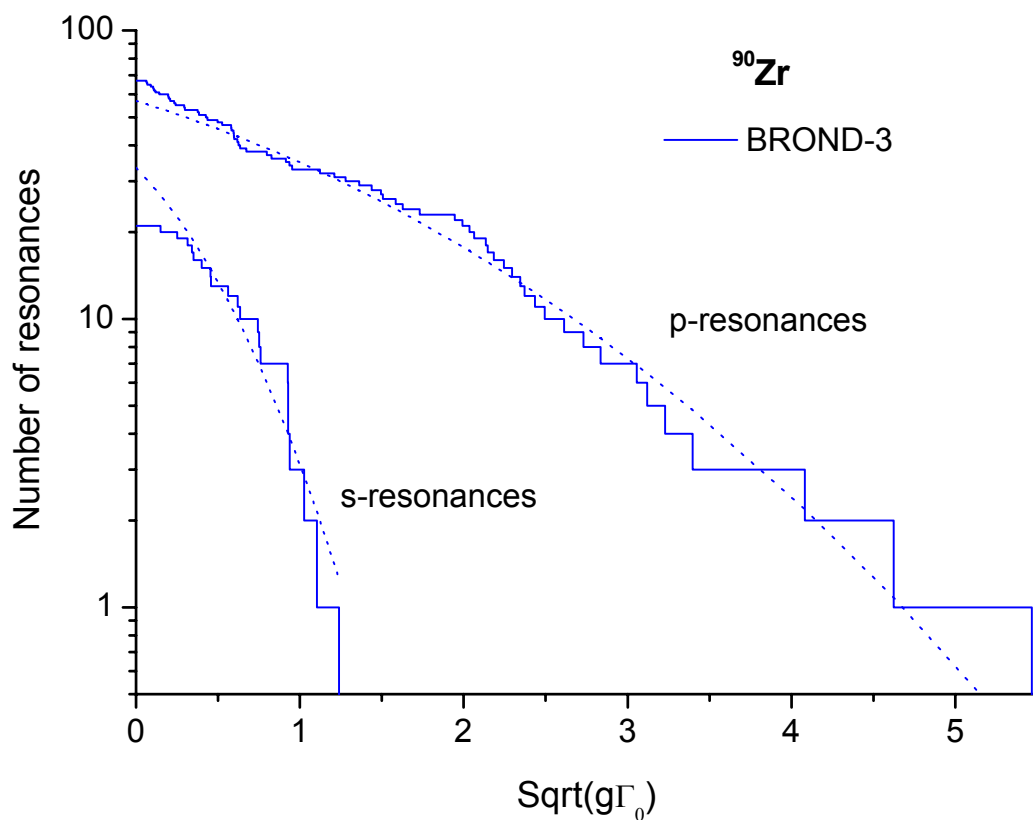


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов в наборе ENDF/B-VII. Пунктиром показано статистически ожидаемое распределение.

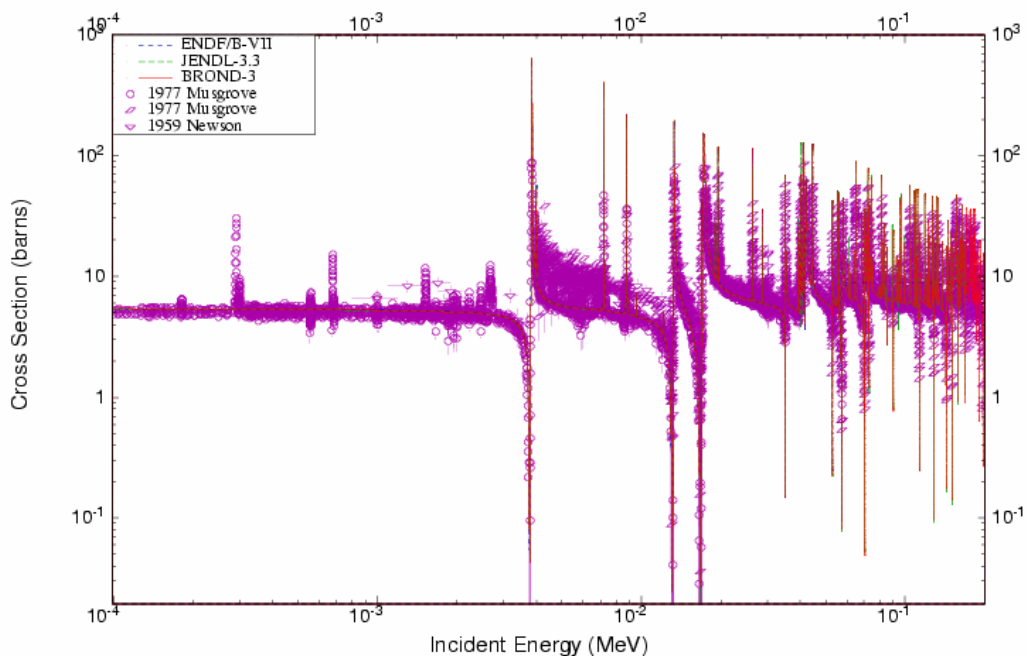


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов

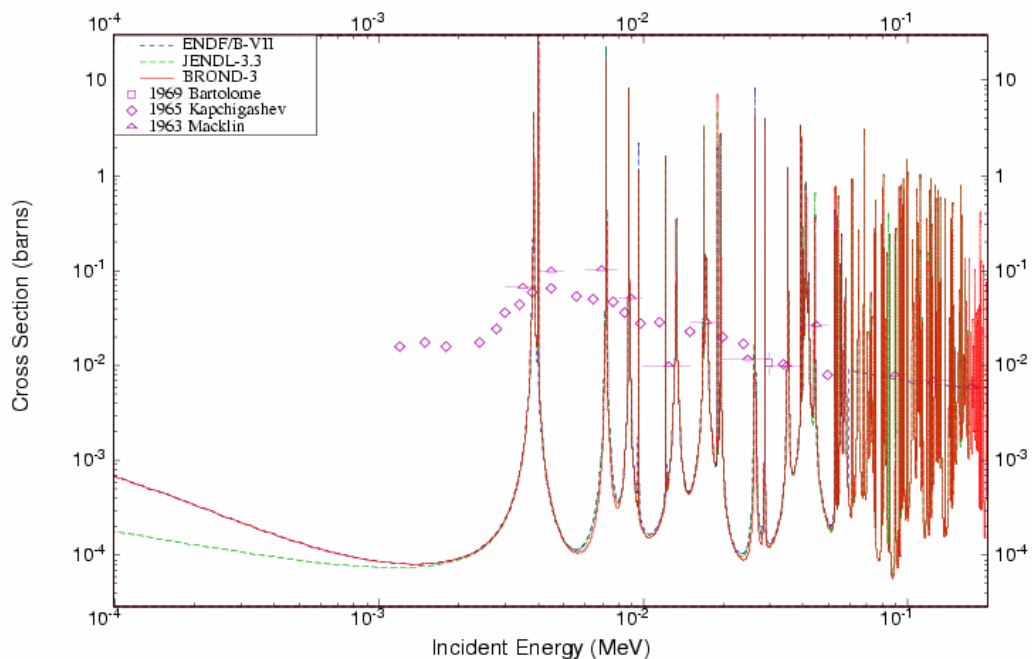


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области.

В данном разделе проведено сравнение оцененных данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII, и JENDL-3.3 вне резонансной области (0.01-20 МэВ). Сравнение с данными библиотеки JEFF-3.1 не проводилось, поскольку для изотопов циркония приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Ниже следует описание оценки БРОНД-3 в сравнении с оценками указанных библиотек.

Ниже дано сравнение указанных библиотек совместно с кратким описанием оценки БРОНД-3. Это связано с тем, что авторы оценки БРОНД-3 по сравнению с оценками других авторов применили дополнительные эмпирические систематики и более корректные теоретические расчеты. Оценка всех сечений изотопов циркония выполнена в едином согласованном подходе. В частности, был оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния, использовались систематические тенденции в поведении функций возбуждения пороговых реакций в зависимости массового числа, применена несферическая оптическая модель.

Нейтронные сечения в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH /96Yo/, модифицированной для учета флюктуации нейтронных ширин на основе подхода, развитого в работе /80Ho/. Для нейтронов была использована модель сильной связи каналов (программа ECIS /70Ra/). В расчетах в качестве исходного был выбран сферический оптический потенциал из работы /80Ar/, но параметры поверхностной мнимой части потенциала были модифицированы, чтобы воспроизвести прямое возбуждение сильных коллективных уровней 2+ и 3- в рассеянии нейтронов. Кроме того, для увеличения сечения реакции в области выше 10 МэВ был добавлен объемный компонент мнимой части потенциала.

Оптические параметры для нейтронов:

| Глубина потенциала (МэВ) | Диапазон энергии (МэВ) | Геометрия(фм) |
|--------------------------|------------------------|-------------------------|
| $V_r=49.0-0.28E$ | $0 < E < 20$ | $R_r=1.24 \quad A=0.62$ |
| $W_d=2.38+0.21E$ | $0 < E < 10$ | $R_d=1.26 \quad A=0.58$ |
| $W_d=5.39-0.091E$ | $10 < E < 20$ | |

$$\begin{array}{lll}
W_v=0.0 & 0<E<10.9 & \\
W_v=-0.0994+0.091E & 0.9<E<20 & R_v=1.24 \quad A=0.62 \\
V_{s0}=6.2 & 0<E<20 & R_{s0}=1.12 \quad A=0.47
\end{array}$$

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /01Ko/, /74Lo/ и /94Av/, соответственно.

Гамма-переходы рассчитывались для E1, M2 и E2 -силовых функций. Параметры гигантского резонанса E1 были взяты из работы /88Di/. Полная силовая функция была нормализована к имеющимся экспериментальным данным по средней радиационной ширине и среднему расстоянию между нейтронными резонансами. Параметры дискретных уровней взяты из работы /95Fi/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 6 дано полное сечение Zr-90 вне резонансной области энергий нейтронов. В области до 4 МэВ оценка БРОНД-3 лежит существенно ниже оценки JENDL-3.3, но хорошо согласуется с оценкой ENDF/B-VII. Экспериментальные данные в этой области чрезвычайно разбросаны и не позволяют уверенно обосновать оцененные данные той или иной библиотеки. Однако данные БРОНД-3 и ENDF/B-VII, полученные с помощью разных параметров оптического потенциала, практически совпадают за исключением области до 200 кэВ, поэтому следует отдать им предпочтение. Небольшое различие в указанной области на фоне сильно разбросанных экспериментальных данных представляется не очень существенным.

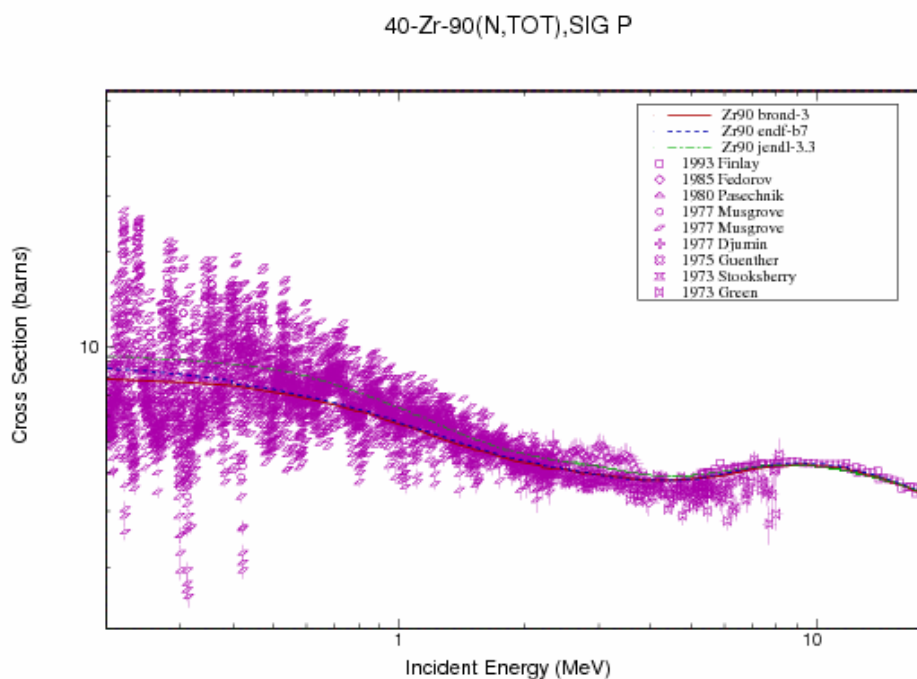


Рис.6. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния обычно определяется как разность полного сечения и суммы всех парциальных сечений. На рис. 7 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния на изотопе Zr-90 с экспериментальными данными. Как видно, сечения упругого рассеяния в области энергий выше 2 МэВ, где есть экспериментальные данные, в библиотеках ENDF/B-VII и JENDL-3.3 практически совпадают. Оценка BROND-3 в области энергий ниже 2 МэВ лежит несколько ниже

данных ENDF/B-VII и JENDL-3.3, но из-за отсутствия экспериментальных данных в этой области трудно обосновать достоверность той или иной оценки.

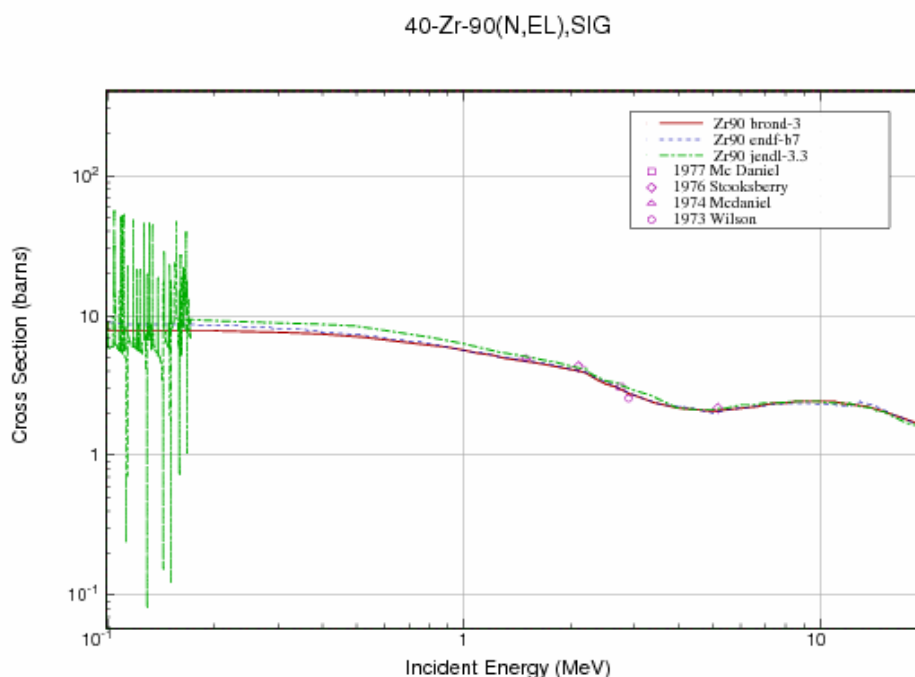


Рис.7. Сечение упругого рассеяния в области 0.1-20 МэВ.

3.3.Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-64).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты, и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 4.1300 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней, возбуждаемых при неупругом рассеянии:

| N Уровн я | Энергия уровня, МэВ Спин уровня | Переход | Энергия гамма- кванта, МэВ | Вероятность перехода, % |
|-----------------|------------------------------------|------------|-------------------------------|----------------------------|
| 0 | 0.00000 | | | |
| 51 | 1.76070 0+ | 1→0 | 1.76070 | 100 |
| 52 | 2.18630 2+ | 2→0 | 2.18624 | 100 |
| 53 | 2.31900 5- | 3→0 3→2 | 2.31897 0.13276 | 95 5 |
| 54 | 2.73930 4- | 4→3 | 0.42028 | 100 |
| 55 | 2.74790 3- | 5→2 5→0 | 0.56160 2.74780 | 96 4 |
| 56 | 3.07690 4+ | 6→2 6→5 | 0.89064 0.32906 | 93 7 |
| 57 | 3.30880 2+ | 7→0 7→2 | 3.30910 | 74 26 |
| 58 | 3.44820 6+ | 8→3 | 1.1220 | 100 |
| 59 | 3.55700 | | | |

| | | | | | |
|----|---------|----|------|---------|-----|
| 60 | 3.58940 | 8+ | 10→8 | 0.14118 | 100 |
| 61 | 3.84220 | 2+ | 11→0 | 3.84490 | 100 |
| 62 | 3.95900 | 5- | | | |
| 63 | 4.06200 | 4+ | | | |
| 64 | 4.12600 | 0+ | | | |
| 91 | 4.13000 | | | | |

Экспериментальных данных по интегральному сечению неупругого рассеяния нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния библиотек JENDL-3.3 и БРОНД-3 в области до 15 МэВ близки, оценка ENDF/B-VII лежит заметно выше. При энергии выше 15 МэВ оценка БРОНД-3 лежит ниже оценок ENDF/B-VII и JENDL-3.3, которые в данной области практически совпадают. Данные БРОНД-3 получены с помощью модифицированной программы GNASH и параметров несферической оптической модели, обеспечивает более корректный подход в расчетах интегрального сечения неупругого рассеяния файла из библиотеки БРОНД-3. На рис. 8-10 показаны функции возбуждения неупругого рассеяния на первых двух уровнях, где имеются экспериментальные данные. Для обоих уровней оцененные функции библиотек БРОНД-3 и ENDF/B-VII примерно равнозначны, а оценки JENDL-3.3 по форме функций возбуждения выглядят менее привлекательными.

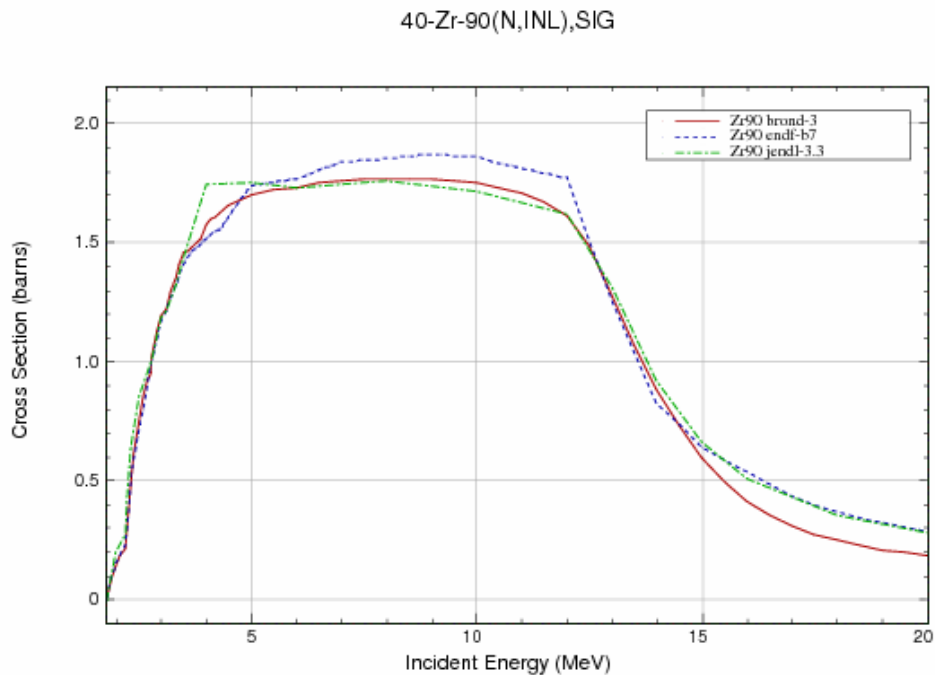


Рис.8. Интегральное сечение неупругого рассеяния Zr-90.

40-Zr-90(n,n'),SIG E11.76E+6

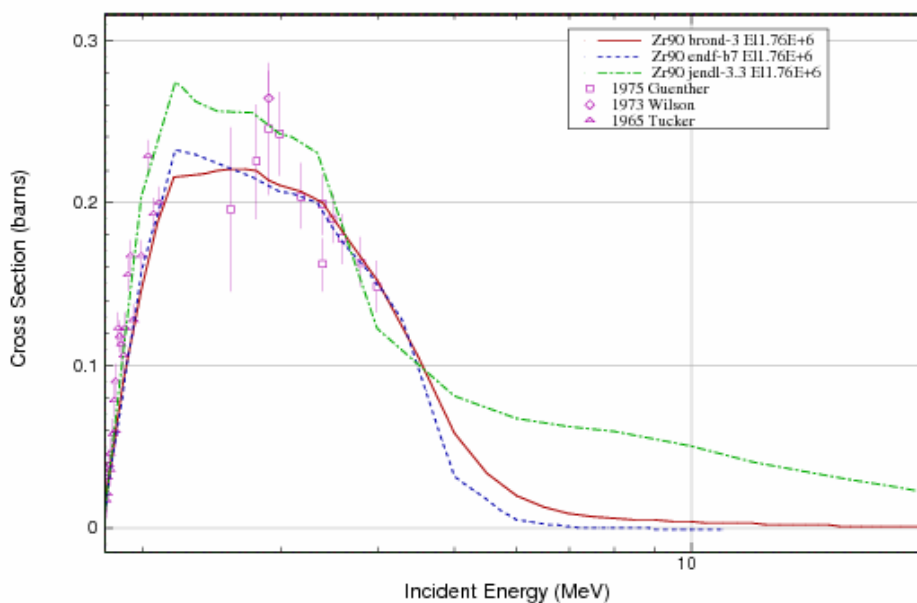


Рис.9. Функция возбуждения первого уровня Zr-90 с энергией 1.7607эВ.

40-Zr-90(n,n'),SIG E12.19E+6

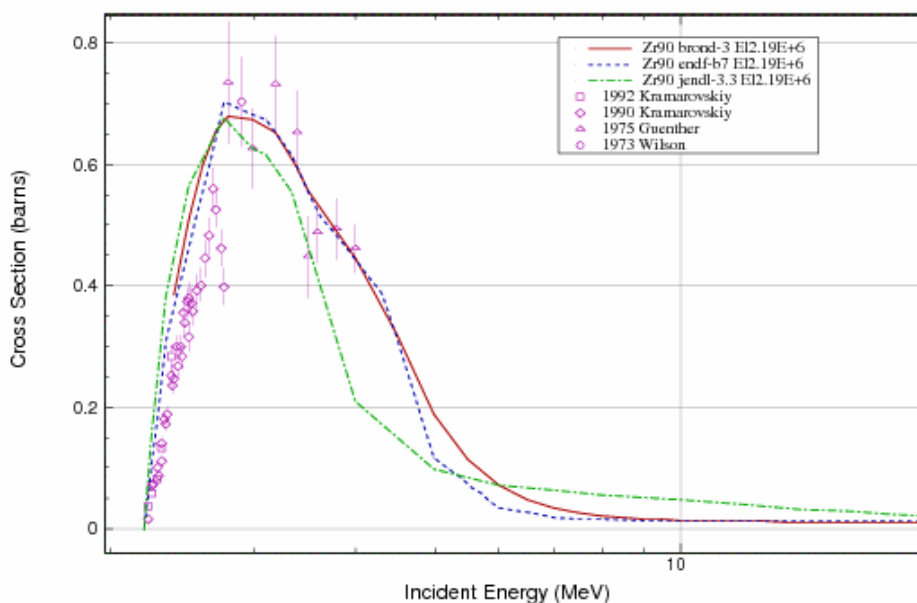


Рис.10. Функция возбуждения второго уровня с энергией 2.1863 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.01-20 МэВ экспериментальные данные по сечению радиационного захвата отсутствуют. Оцененные данные библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII и JENDL-3.3 существенно различаются, но оценка БРОНД-3 по форме зависимости сечения выглядит предпочтительнее.

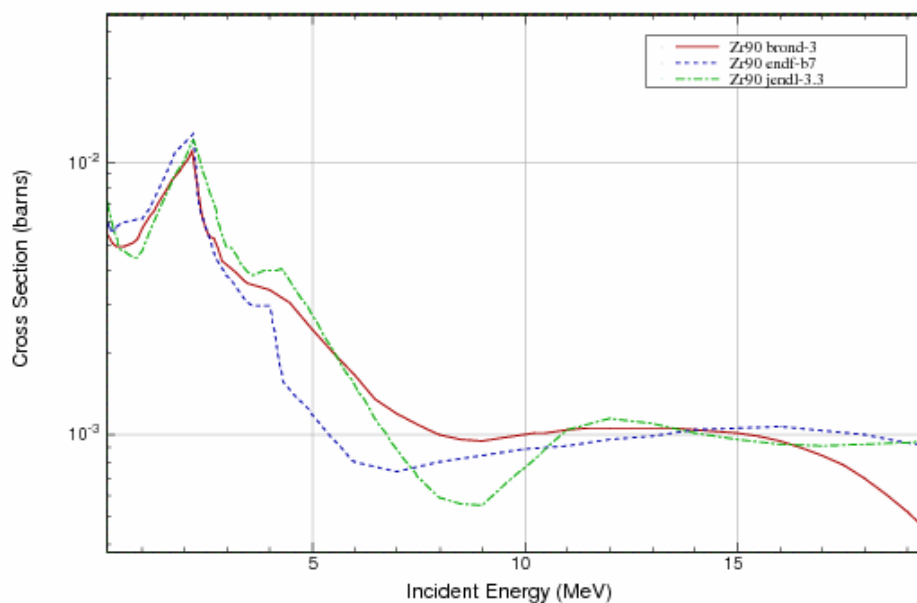


Рис. 11. Сечение радиационного захвата в области 0.01-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

На рис. 12 представлено сечение реакции (n,2n) библиотек ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и BROND-3 в сравнении с экспериментальными данными. Как видно, все три оценки близки, однако оценка БРОНД-3 лучше согласуется с эмпирической систематикой функций возбуждения указанной реакции [97Ma].

Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6 и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

Zr-90 (n,2n)

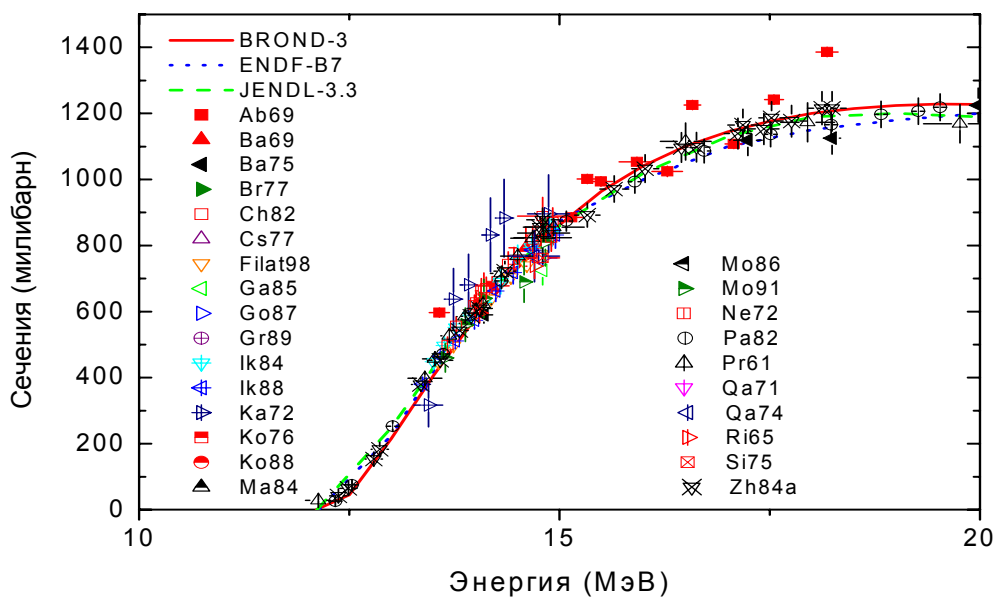


Рис. 12. Сечение реакции (n,2n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n, α) (MT=103, 104, 107):

На рис. 13 показано сечение реакции $^{90}\text{Zr}(n,p)$. Данные трех библиотек заметно различаются, однако предпочтение следует отдать оценке БРОНД-3, поскольку она лучше соответствует систематике сечений реакции (n,p) и, кроме того, анализ показывает, что данные работы Байхурста сильно завышены, их перенормировка на принятый в настоящее время время квантовый выход понижает эти данные до уровня оценки БРОНД-3.

На рис. 14 дано сечение реакции $^{90}\text{Zr}(n,d)$. Данные библиотеки ENDF/B-VII противоречат физическим представлениям. Оценки BROND-3 и JENDL-3.3 реакции (n,d), полученные расчетным путем, существенно не согласуются с единственной экспериментальной точкой работы /Naight81/. Это связано с недостаточным учетом вклада прямого процесса. Однако оценка БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лежит ближе к указанной экспериментальной точке. На рис.15 представлено сечение реакции $^{90}\text{Zr}(n,\alpha)$. Рекомендуется оценка из БРОНД-3, поскольку она лучше согласуется с единственной экспериментальной точкой и систематикой работы /97Ma/.

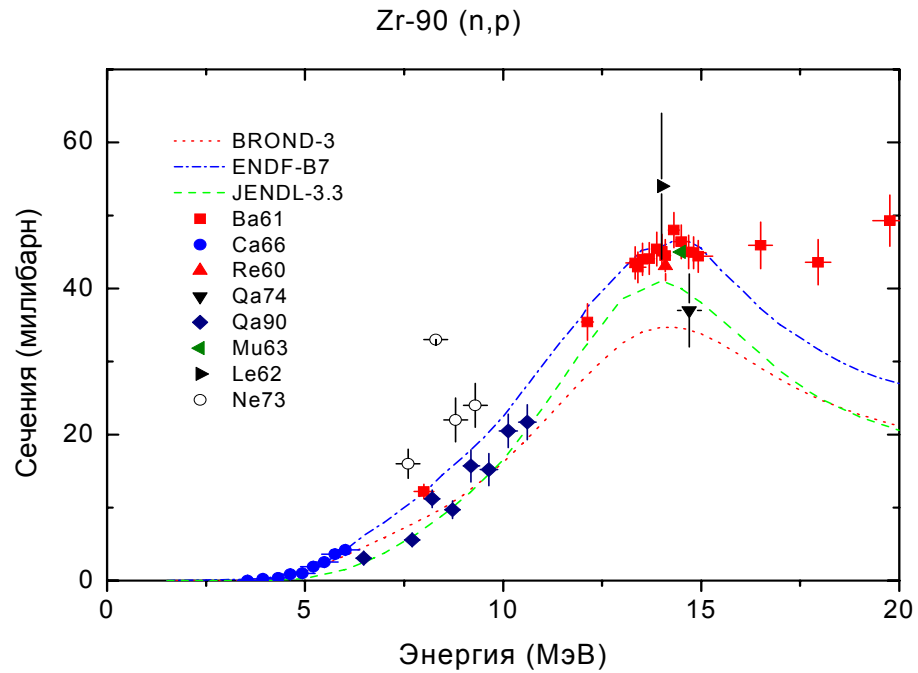


Рис. 13. Сечение реакции (n,p)

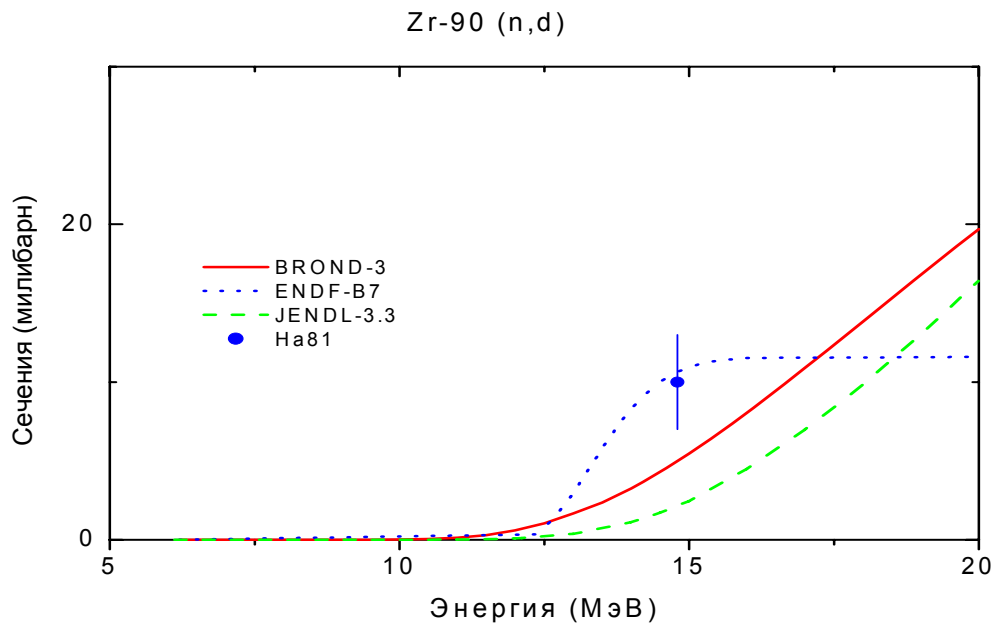


Рис.14. Сечение реакции (n,d).

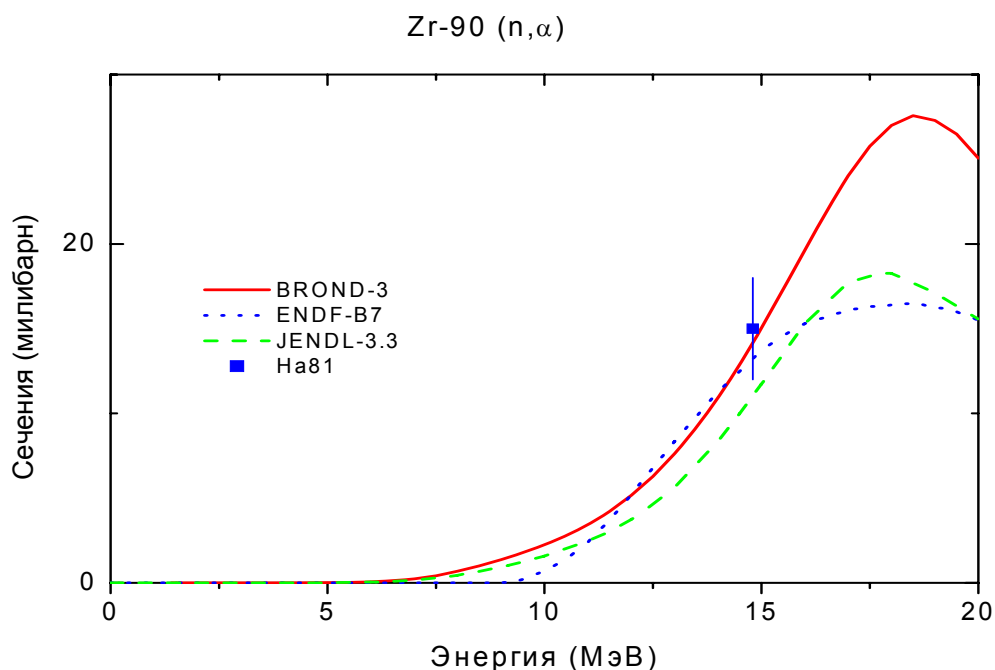


Рис. 15. Сечение реакции (n,α)

3.7. Реакции (n,nα), (n,np) (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. Оценка реакции (n,np) в файле ^{90}Zr в БРОНД-3 основана на расчетах по модифицированной программе GNASH. Разногласия оценок БРОНД-3, ENDF-BVII и JENDL-3.3 (рис.16) обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

Однако зависимость из БРОНД-3 предпочтительнее с физической точки зрения, поскольку она имеет более плавный ход. Сечение из ENDF/B-VII противоречит систематикам сечений реакции как по форме так и абсолютной величине.

На рис.17 дано сечение реакции $\text{Zr}(n,n\alpha)$. Рекомендуется функция возбуждения из библиотеки БРОНД-3, так как она согласуется с сечением реакции (n,α) и с систематикой реакции (n,na).

Спектры и угловые распределения нейтронов для рассматриваемых реакций представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6, и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

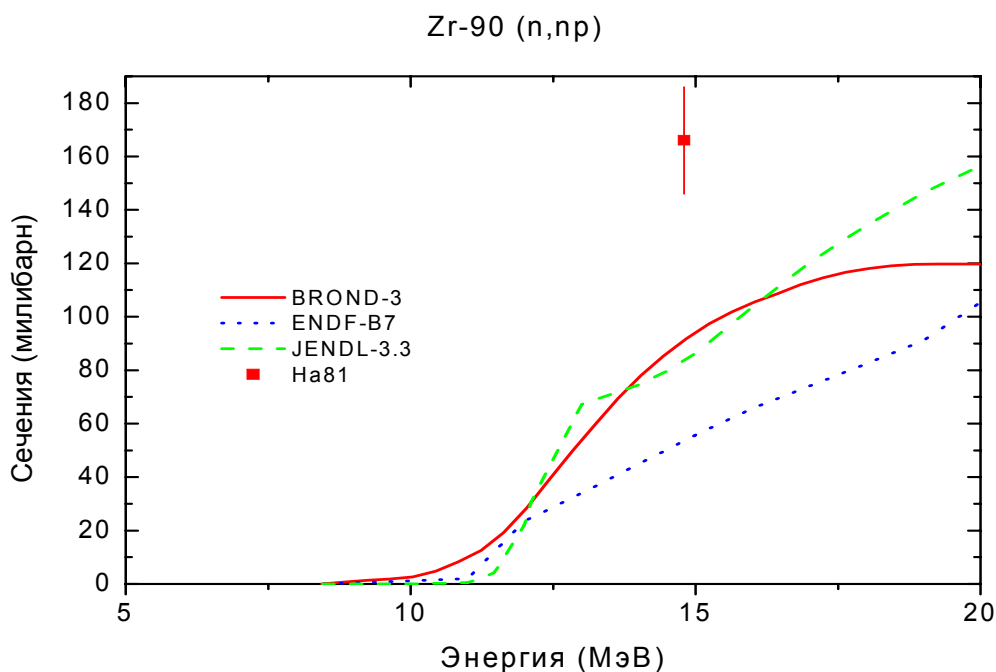


Рис. 16. Сечение реакции (n,np).

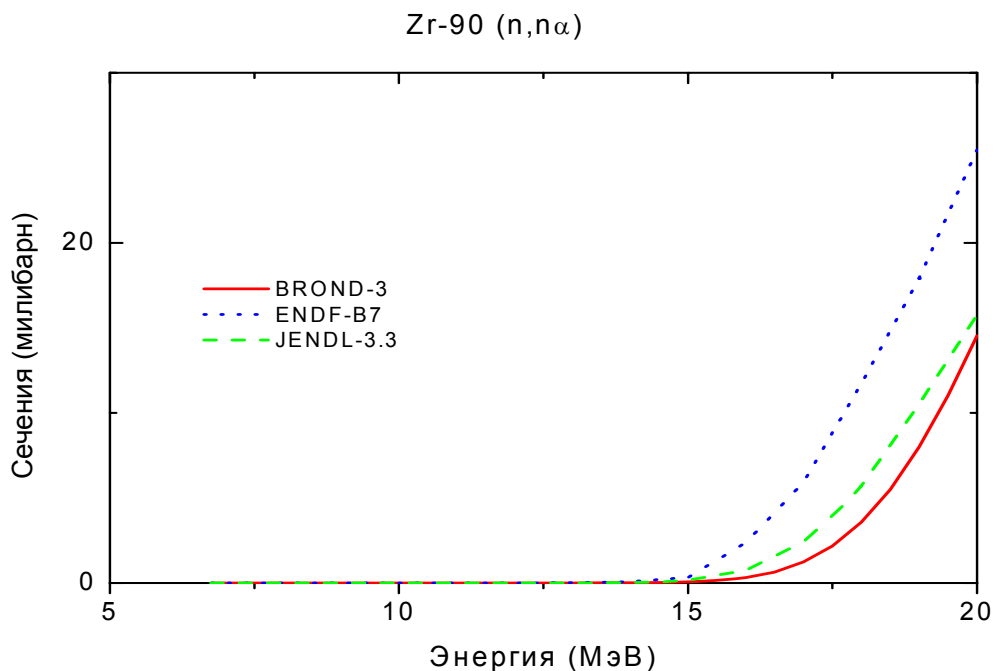


Рис. 17. Сечение реакции (n,nα).

Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4)

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/ 91Ig/. На рис.18 показаны угловые распределения из библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 в сравнении с экспериментальными данными.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов обе оценки учитывают вклад прямых и предравновесных процессов, которые приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов.

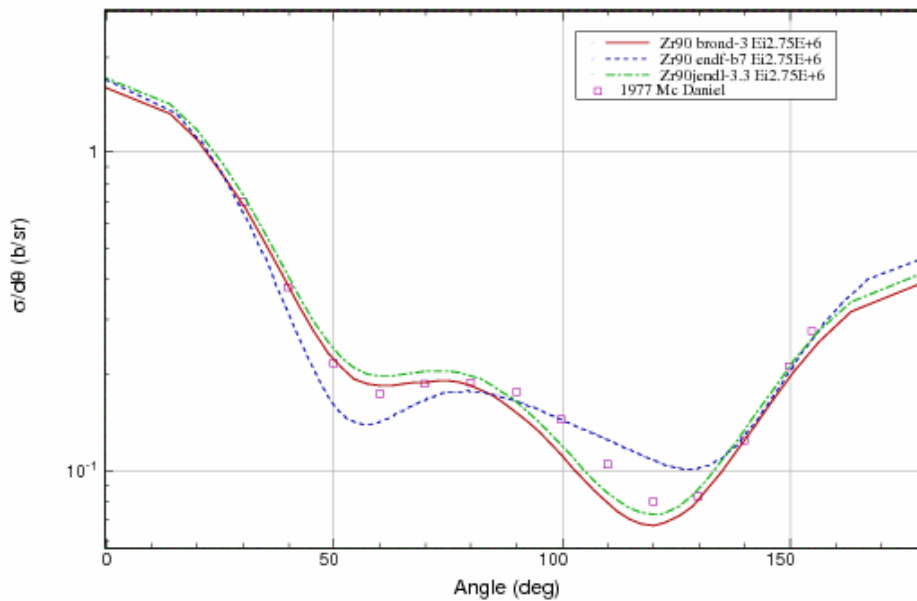


Рис. 18. Угловое распределение упруго рассеянных нейтронов с энергией 2.75 МэВ

MT=51-64 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gashy /91Ig/ и Dwuck.

Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6).

MT=16,22, 28,91 **Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /90Ku/**

Множественность образования гамма-лучей (MF=12).

MT=16,22,28, 51-64,91,102,103,107 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH /96Yo/.

Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

MT=16,22,28,51-64,91,102,103,107 Угловые распределения гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=16,22,28,51-64,91,103,107 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, рассчитаны по программе EGNASH /90Ya/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/91Ig/

Заклучение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка БРОНД-3 является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить в РОСФОНД файл оцененных данных для Zr-90 из БРОНД-3.

Авторы заклчения

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

References

- 06M S.Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY,2006.
- 01Ko Koning,A.J., Dalaroche,J.P. Contribution to 3_th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
- 98Ri RIPLE-2. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
- 97Ma Manokhin,V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin,V.N., Blokhin,A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
- 96Yo Young,P.G., Arthur,E.D., Chadwick,M.B.: In "Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors" (Triest,1996). Eds. A.Gordini, G.Reffo., World Science, Singapore, 1988,V.1,p.206.
- 95Fi Firestone,R.B. Table of Isotopes, Eight Edition,V.2, New York,1995.
- 94Av Avrigeanu,V., Hodgson,P., Avrigeanu,M. Phys.Rev.C49(1994)2136
- 91Ig Igarasi, S. and Fukahori, T.: JAERI 1321 (1991).
- 90Ku Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
- 90Ya Yamamuro, N.: JAERI-M 90-006 (1990).
- 88Di Dietrich,S.S., Berman,B.L. Atomic data and Nuclear data Tables 38(1988)199.
- 86Ki Kikuchi, Y. et al.: JAERI-M 86-030 (1986).
- 82Al Allen, B.J., et al.: Nucl. Sci. Eng., 82, 230 (1982).
- 81Lo Lone, M.A. and Bartholomew, G.A.: Proc. 4th Int. Conf. on Neutron-Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, Grenoble, Sept.1981, p.383 (1981).
- 81Mu Mughabghab, S.F. et al.: "Neutron Cross Sections, Vol. I, Part A", Academic Press (1981).
- 80Ar Arthur E.D. Nucl.Sci.Eng. 76(1980)137.
- 77Mu Musgrove, A.R. de L. et al.: Aust. J. Phys., 30, 379 (1977).
- 76Bo Boldeman, J.W., et al.: AAEC/E367 (1976).
- 75B J.W.Boldeman et al., Nucl. Phys., **A246** (1975) 1.
- 75Ho Hofman, H. et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
- 74Lo Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
- 70Ra Raynal,J.: Report IAEA SMR-9/8(1970),p.281.

40.4. Цирконий-91

1. Общие характеристики

1.1. $Z=40$ 1.2. $A=91$ 1.3. $A_w=90.012471$

1.4. Содержание в естественной смеси: 11.22

1.5. Перечень нейтронных реакций:

| MT | Реакция | Q, МэВ | Епор, МэВ | Ядро-продукт |
|-----|--------------|----------|-----------|--------------|
| 51 | (n,n') | -1.2048 | 1.2182 | Zr-91 |
| 16 | n,2n | -7.1946 | 7.2744 | Zr-90 |
| 17 | n,3n | -19.1660 | 19.3653 | Zr-89 |
| 22 | n,n α | -5.4431 | 5.5035 | Sr-87 |
| 28 | n,np | -8.6938 | 8.7903 | Y-90 |
| 102 | n, γ | 8.6350 | | Zr-91 |
| 103 | n,p | -0.7617 | 0.7700 | Y-91 |
| 104 | n,d | -6.4692 | 6.5410 | Y-90 |
| 105 | n,t | -7.0680 | 7.1457 | Y-89 |
| 107 | n, α | 5.6696 | | Sr-88 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.2 Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках БРОНД-2 и JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мухабхабом и др. [81Mu] на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию и радиационному захвату нейтронов [77Mu, 78Br]. Верхняя граница резонансной области принята равной 30 кэВ в БРОНД-2 и 30.16 кэВ в JENDL-3.3, и радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 7.2$ фм [81Mu] в обеих оценках. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами приняты средние значения ширин: 140 мэВ для s-резонансов и 240 мэВ для p-резонансов [81Mu]. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближение MLBW. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в CENDL-3 и JEFF-3.1.

В новом издании атласа параметров нейтронных резонансов [06M] нейтронные и радиационные ширины многих резонансов были несколько изменены Мухабхабом на основе уточненного анализа прежних экспериментальных данных и более поздних измерений нейтронных сечений для естественной смеси изотопов циркония [85Sa]. Пересмотренные параметры резонансов включены в оценку ENDF/B-VII. Верхняя граница области разрешенных резонансов была уменьшена до 20 кэВ. Радиационные ширины резонансов, использованные в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, показаны на рис. 1. Ширины многих s- и p-резонансов отличаются весьма существенно, и измененные значения получены также для средних ширин: 134 мэВ для s-резонансов и 220 мэВ для p-резонансов.

Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| | | | | |
|--------|---------|-----------|------------|--------------------|
| Оценка | БРОНД-2 | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Эксперимент [06Mu] |
| полное | 11.75 | 11.83 | 10.57 | |

| | | | | |
|------------------------------|-------|-------|------|-----------|
| упругое | 10.54 | 10.59 | 9.74 | 10.7±0.6 |
| захвата | 1.21 | 1.25 | .832 | 0.83±0.08 |
| резонансный интеграл захвата | | | | |
| выше 0.5 эВ: | 5.01 | 6.94 | 5.89 | 5.76±0.40 |

Следует отметить, что оценки БРОНД-2 и JENDL-3.3 ориентировались на прежние значения сечения захвата тепловых нейтронов 1.24 ± 0.25 барна и резонансного интеграла захвата 5.2 ± 0.7 [81M, 03Mu], тогда как в ENDF/B-VII использованы уточненные значения [06M]. Резонансный интеграл захвата нейтронов в JENDL-3.3 оказывается существенно выше экспериментального. До 50% вклада в резонансный интеграл вносит первый s-резонанс с энергией 292.4 эВ, радиационная ширина которого существенно занижена в БРОНД-2 и завышена в JENDL-3.3 по отношению к экспериментальным данным [85Sa]. Следует заметить, что нейтронная ширина p-резонанса с энергией 7.754 кэВ как в старом [81Mu], так и в новом атласе резонансных параметров [06Mu] на порядок превышает значение, приведенное в первоначальной публикации [78Br]. Эта ошибка была исправлена в JENDL-3.3, но сохранилась, к сожалению, в файлах БРОНД-2 и ENDF/B-VII. Она практически не влияет на рассмотренные выше тепловые сечения и резонансный интеграл, но может существенно исказить оценку нейтронной силовой функции p-волны. Для пересмотренной оценки БРОНД-3 было решено принять за основу резонансные параметры ENDF/B-VII, но исправить в них нейтронную ширину резонанса 7.754 кэВ (уменьшить в 10 раз). С учетом внесенных изменений оценке БРОНД-3 соответствуют те же значения тепловых сечений, что и ENDF/B-VII, но несколько измененное значение резонансного интеграла захвата: 6.041 барна.

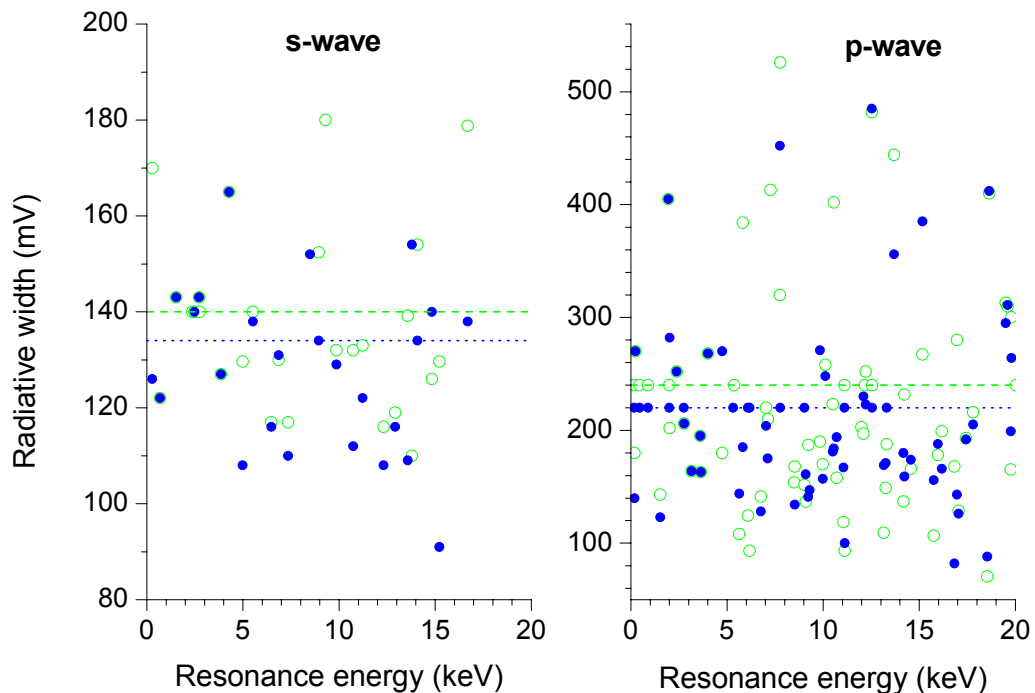


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3 (кружки) и ENDF/B-VII (сплошные точки), пунктиром показаны средние значения ширин, которые приняты для резонансов с неизвестными ширинами

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 (=БРОНД-2) и ENDF/B-VII, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0=(650 \pm 50)$ эВ, а для p-резонансов – $D_1=(280 \pm 30)$ эВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (.48 \pm 0.10) 10^{-4}$ и $S_1 = (7.2 \pm 0.8) 10^{-4}$ для JENDL-3.3. По данным ENDF/B-VII силовая функция p-резонансов оказывается заметно большей, но это обусловлено очень большой нейтронной шириной резонанса с энергией 7.754 кэВ, которая завышена на порядок.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов пропущено от 8 до 10 резонансов и в наборе p-резонансов пропущено около 16 слабых резонансов в обеих оценках. Такие слабые резонансы не искажают приведенный выше анализ нейтронных силовых функций, но они заметно изменяют оценки среднего расстояния между резонансами. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, для обеих наборов резонансных параметров равны $D_0=(482 \pm 30)$ эВ и $D_1=(237 \pm 30)$ эВ. Отношение $D_0/ D_1=2.03 \pm 0.30$ заметно отличается от общей статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, и это может указывать на достаточно сильную зависимость плотности нейтронных резонансов от четности, но также может оказаться следствием более значительного пропуска резонансов, чем полученного в рамках представленного выше анализа.

На рис. 4 и 5 оценки JENDL-3.3, ENDF/B-VII и БРОНД-3, для области разрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Различия между оценками проявляются, главным образом, лишь в окрестностях межрезонансных минимумов и области энергий ниже первого резонанса. При имеющихся погрешностях экспериментальных данных все оценки выглядят равноправными, критерием предпочтения БРОНД-3 перед другими оценками является более согласованное описание тепловых сечений.

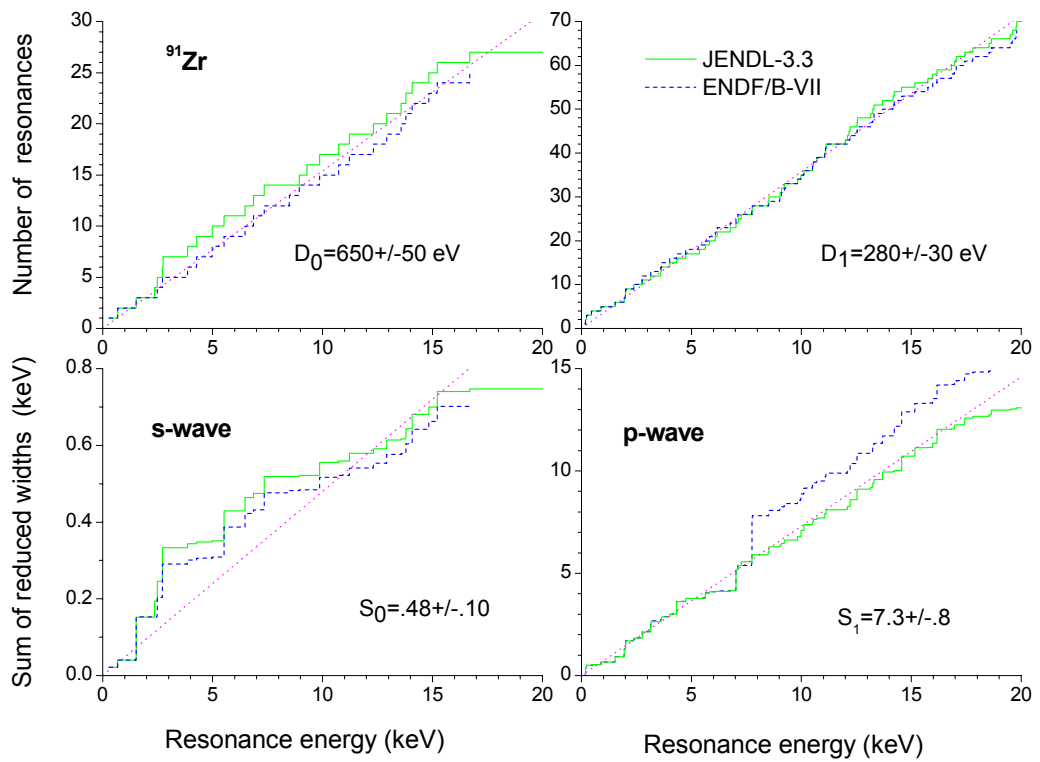


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII

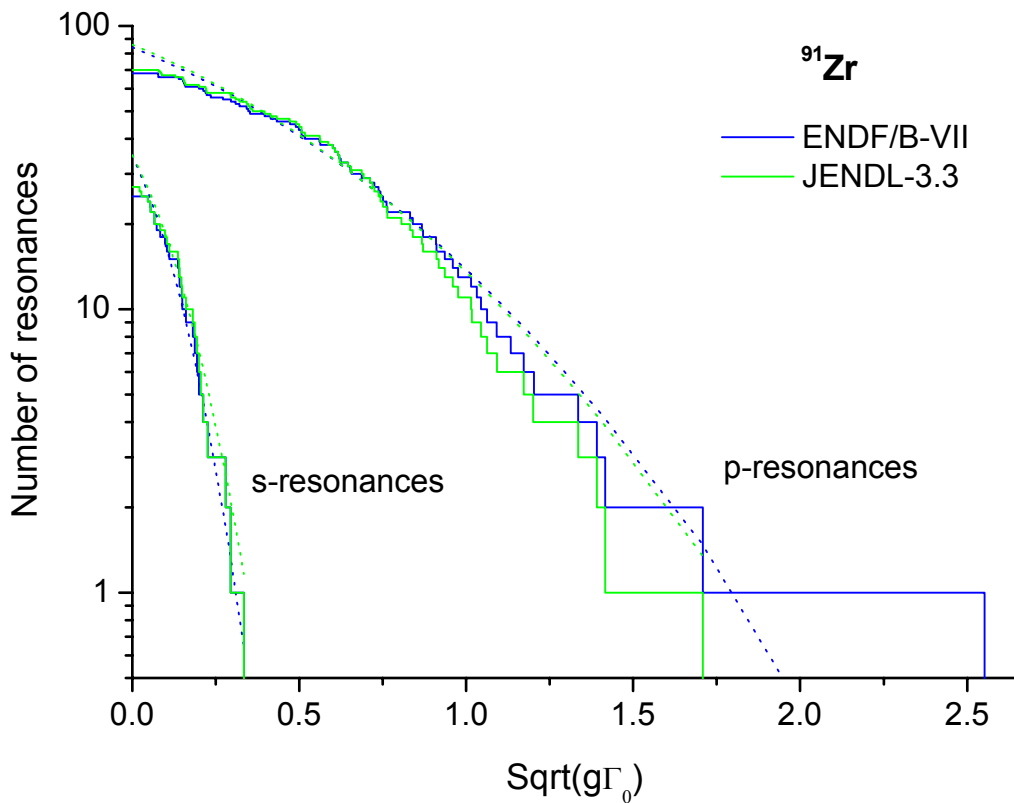


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов. Пунктиром показано теоретически ожидаемые распределения.

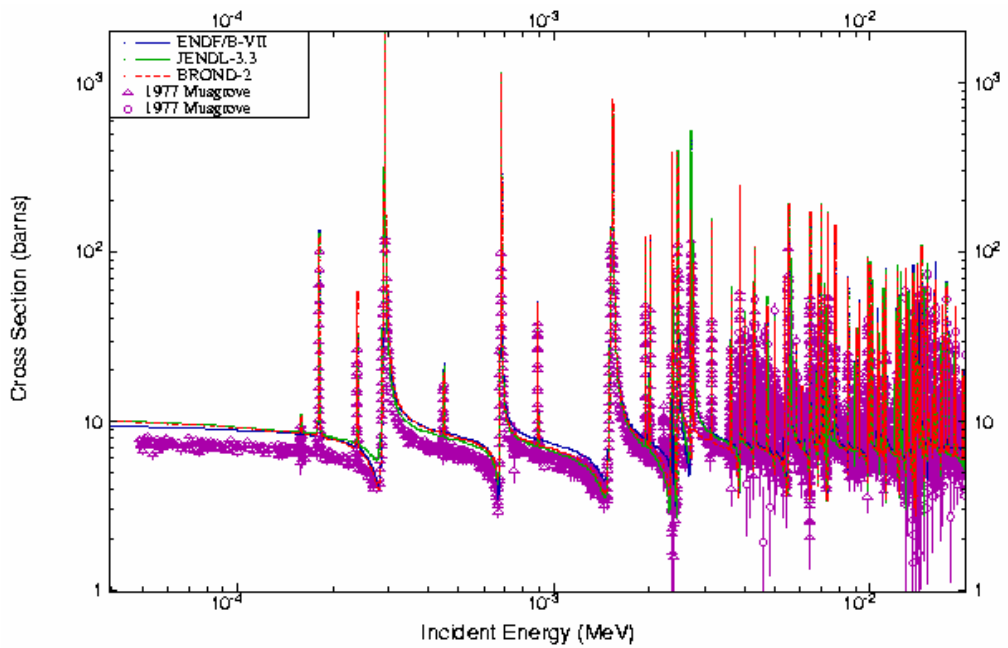


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

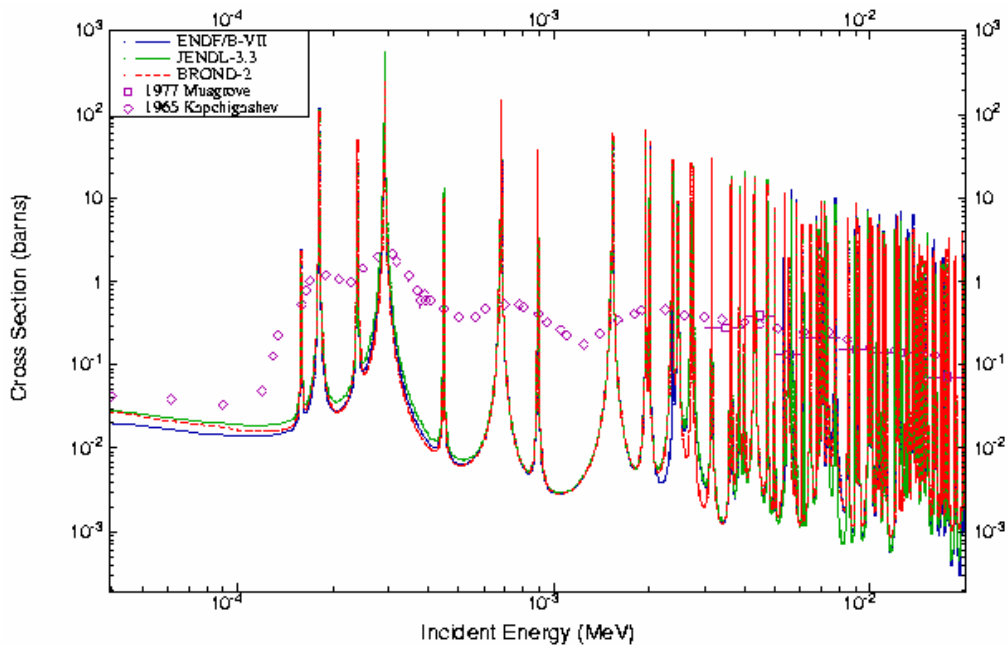


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в БРОНД-2 принята равной 200 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В JENDL-3.3 использован аналогичный подход, но принята более низкая верхняя граница неразрешенных резонансов 100 кэВ. В ENDF/B-VII, также как в CENDL-3 и JEFF-3.1, для неразрешенных резонансов принята оценка JENDL-3.3 без каких-либо изменений. В соответствии с форматом ENDF/V для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели по программе [91]. Средняя радиационная ширина принята не зависящей от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов [65Ka, 77Mu]. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.420E-4$, $S_1 = 5.700E-4$, $S_2 = 0.360E-4$, $G_g = 0.205$ эВ, $D_0 = 660.4$ эВ, $R = 6.621$ ферми.

В БРОНД-2 было использовано аналогичное приближение, но средние радиационные ширины были приняты на основе статистического анализа параметров разрешенных резонансов и средние расстояния между резонансами было выбрано из условий оптимального описания наблюдаемых сечений радиационного захвата нейтронов. Для энергии нейтронов 70 кэВ приняты следующие значения параметров:

$S_0 = 0.40E-4$, $S_1 = 4.31E-4$, $S_2 = 1.10E-4$, $D_0 = 597$ эВ, $R = 6.72$ ферми.

Различия в выборе радиационных ширин и значений D_0 в значительной степени компенсируются при подгонке расчетных сечений к одним и тем же экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов [65Ka, 77Mu]. В то же время, различия в нейтронных силовых функциях непосредственно проявляется в полных нейтронных сечениях. Резонансная структура полных сечений сохраняется в экспериментальных данных во всей области неразрешенных резонансов, но полное сечение, усредненное по такой структуре, лучше согласуется с оценкой JENDL-3.3, чем с БРОНД-2. Этот результат является прямым следствием заниженного значения силовой функции S_1 в БРОНД-2.

В новой оценке БРОНД-3 было решено сохранить в области неразрешенных резонансов значения нейтронных силовых функций и радиационных ширин, полученных при анализе параметров разрешенных резонансов и ограничиться выбором параметра D_0 из условий оптимального описания экспериментальных данных по радиационному захвату нейтронов. Верхняя граница области неразрешенных резонансов принята равной 100 кэВ. На рис. 6 и 7 показано сравнение оценок полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов с имеющимися экспериментальными данными. В оценках БРОНД-2 и JENDL-3.3 участок энергий от 20 до 30 кэВ включен в область разрешенных резонансов. Однако, анализ резонансных параметров демонстрирует пропуск более половины резонансов на этом участке, и в этих условиях включение этого участка в область неразрешенных резонансов представляется более оправданным. Оценка БРОНД-3 выше 30 кэВ практически совпадает с JENDL-3.3 для полных нейтронных сечений, и различия в сечениях захвата возникают лишь при энергиях выше 70 кэВ (рис.7).

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, в области неразрешенных резонансов нет существенных расхождений между оценками JENDL-3.3 (=ENDF/B-VII) и БРОНД-3, но последняя оценка является более согласованной в определении средних параметров неразрешенных резонансов, уточнение которых может быть важным для расчетов блокировки нейтронных сечений в рассматриваемой области.

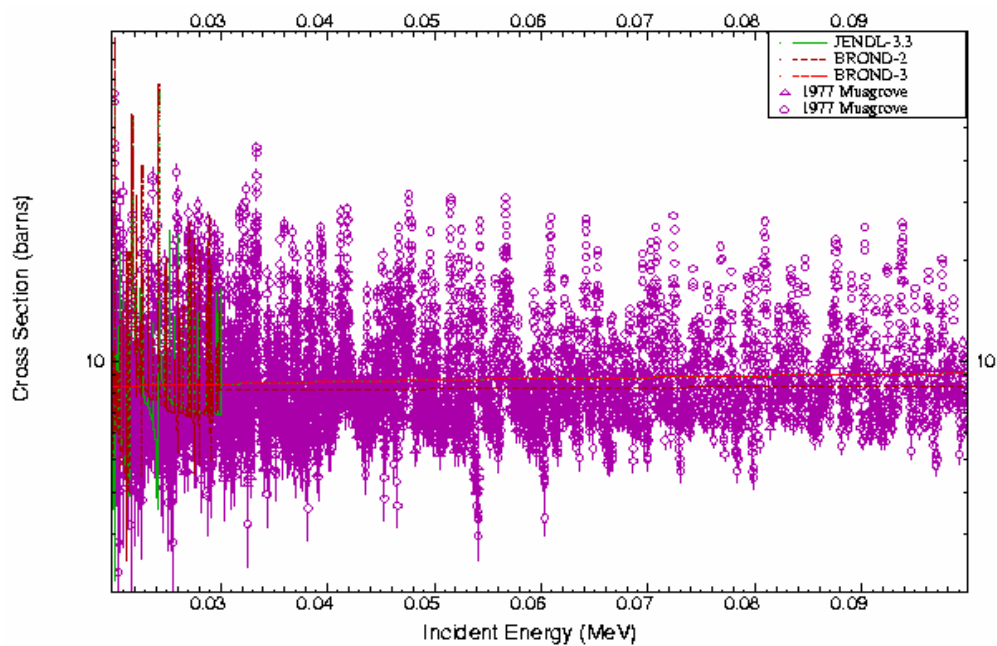


Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений в области неразрешенных резонансов (20-100 кэВ) в сравнении с экспериментальными данными

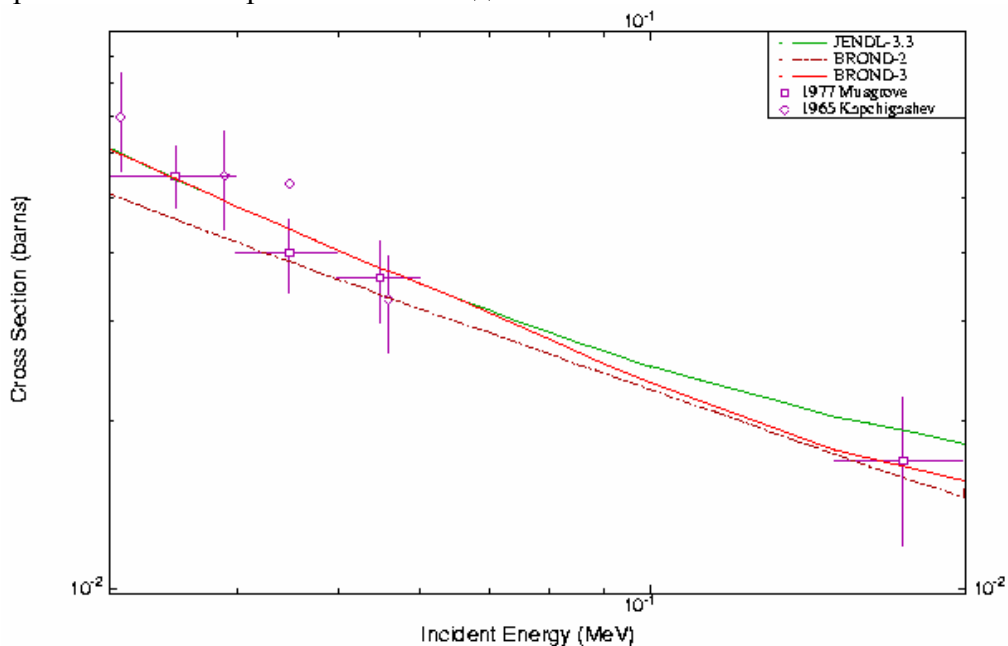


Рис. 7. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области неразрешенных резонансов (30-200 кэВ) в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области.

В данном разделе проведено сравнение оцененных данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII, и JENDL-3.3 вне резонансной области (0.01-20 МэВ). Сравнение с данными библиотеки JEFF-3.1 не проводилось, поскольку для изотопов циркония приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Ниже дано сравнение указанных библиотек совместно с кратким описанием оценки БРОНД-3. Это связано с тем, что авторы оценки БРОНД-3 по сравнению с оценками других авторов применили дополнительные эмпирические систематики и более корректные теоретические расчеты. Оценка всех сечений изотопов циркония выполнена в едином согласованном подходе. В частности, был оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния, использовались систематические

тенденции в поведении функций возбуждения пороговых реакций в зависимости массового числа, применена несферическая оптическая модель.

Нейтронные сечения в диапазоне 0.1 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью модифицированной программы GNASH /96Yo/ с учетом флуктуации нейтронных ширин. Для нейтронов была использована модель сильной связи каналов (программа ECIS /91Ig/). Для оптического потенциала /80Ar/ мнимая часть была модифицирована, чтобы учесть прямое возбуждение низколежащих мультиплетов уровней (5/2+ ⊗ 2+) и (5/2+ ⊗ 3-).

Оптические параметры для нейтронов:

| Глубина потенциала (МэВ) | Диапазон энергии (МэВ) | Геометрия(фм) |
|--------------------------|------------------------|----------------------------|
| $V_r=49.0-0.28E$ | $0<E<20$ | $R_r=1.24 \quad a=0.62$ |
| $W_d=2.38+0.21E$ | $0<E<10$ | $R_d=1.26 \quad a=0.58$ |
| $W_d=5.39-0.091E$ | $10<E<20$ | |
| $W_v=0.0$ | $0<E<10.9$ | |
| $W_v=-0.0994+0.091E$ | $0.9<E<20$ | $R_v=1.24 \quad a=0.62$ |
| $V_{so}=6.2$ | $0<E<20$ | $R_{s0}=1.12 \quad a=0.47$ |

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /01Ko/, /74Lo/ и /94Av/, соответственно.

Были рассмотрены гамма переходы E1, M2 и E2. Силовые функции для переходов M1 и E2 были рассчитаны в соответствии с параметризацией программы GNASH. Полная радиационная силовая функция была нормирована к величине, оцененной для радиационной ширины и расстояния между уровнями для S-волны нейтронных резонансов. Параметры гигантского резонанса E1 были взяты из работы /88Di/. Параметры дискретных уровней взяты из работы /95Fi/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 4 дано полное сечение Zr-91 вне резонансной области энергий нейтронов. В области 2-7 МэВ оценка БРОНД-3 лежит ниже оценки JENDL-3.3, а выше они практически совпадают. Экспериментальные данные в области 2-4 МэВ чрезвычайно разбросаны, трудно отдать предпочтение какой-либо одной оценке. Оценка ENDF/B-VII в области 1-4 МэВ близка оценке БРОНД-3, но в области 5-20 МэВ лежит существенно выше оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 и представляется менее предпочтительной.

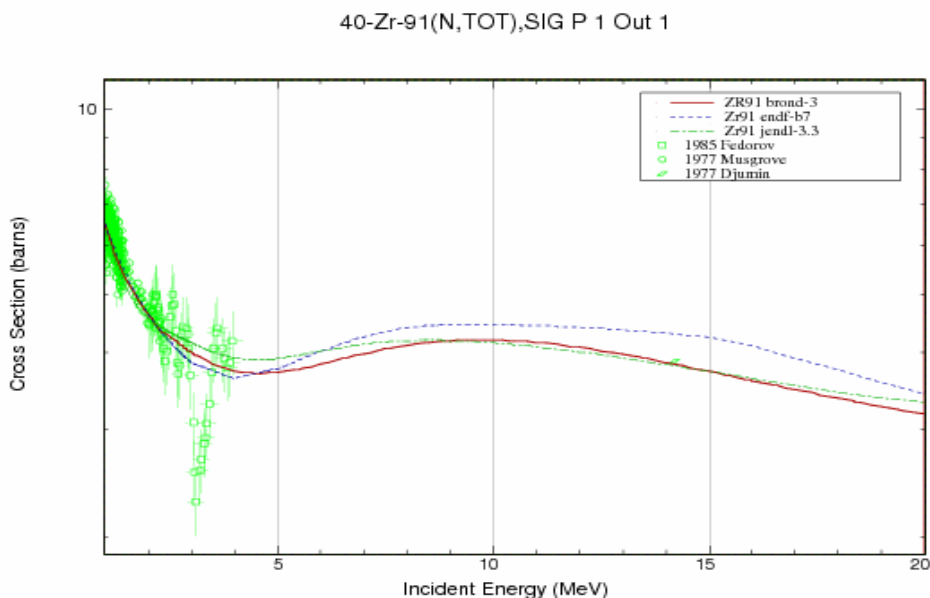


Рис. 4. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. Экспериментальных данных нет. На рис. 5 показано сравнение оценок упругого рассеяния БРОНД-3 и JENDL-3.3 на изотопе Zr-91. Они весьма близки и в отсутствии экспериментальных данных примерно равноценны.

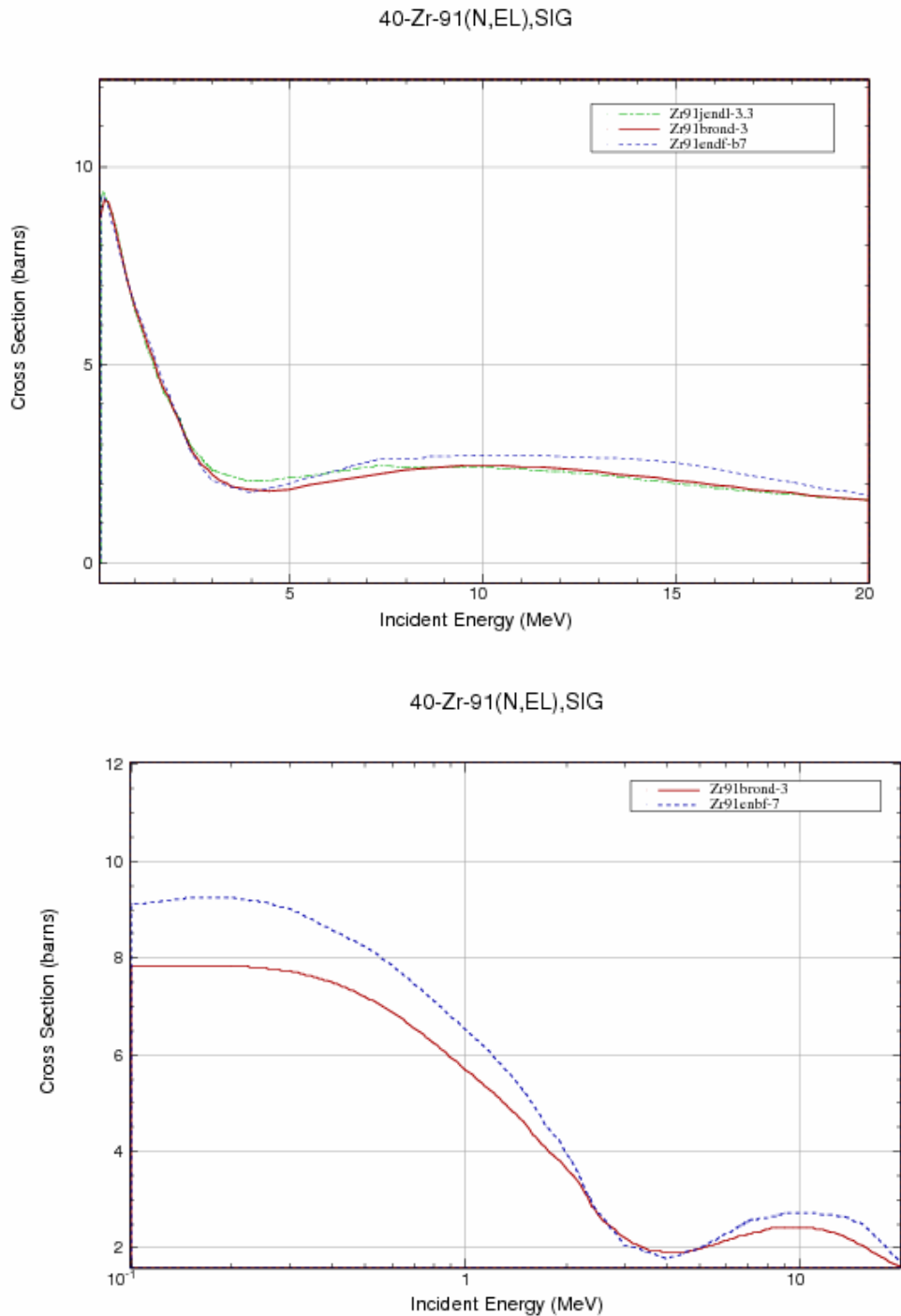


Рис.5. Сечение упругого рассеяния в области 0.01-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-87).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты, и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 3.1000 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

| N | Энергия уровня, МэВ | Спин | Переход | Энергия гамма-кванта, МэВ | Вероятность перехода, % |
|----|---------------------|-------|--|--|-----------------------------|
| 0 | 0.00000 | 5/2+ | | | |
| 1 | 1.20480 | 1/2+ | 1 → 0 | 1.20477 | 100 |
| 2 | 1.46640 | 5/2+ | 2 → 0 | 1.46620 | 100 |
| 3 | 1.88220 | 7/2+ | 3 → 0 | 1.88218 | 100 |
| 4 | 2.04230 | 3/2+ | 4 → 0 | 2.04233 | 100 |
| 5 | 2.13150 | 9/2+ | 5 → 0 | 2.13154 | 100 |
| 6 | 2.17020 | 11/2+ | 6 → 0 6 → 5 | 2.17004 0.03870 | 94.5 5.5 |
| 7 | 2.18950 | 5/2- | 7 → 0 | 2.18907 | 100 |
| 8 | 2.20050 | 7/2+ | 8 → 0 | 2.20050 | 100 |
| 9 | 2.25990 | 13/2- | 9 → 6 | 0.08955 | 100 |
| 10 | 2.28790 | 15/2- | 10 → 9 | 0.02800 | 100 |
| 11 | 2.32050 | 11/2- | 11 → 6 11 → 9 | 0.15110 0.06033 | 50 50 |
| 12 | 2.35690 | 1/2- | 12 → 1 | 1.15210 | 100 |
| 13 | 2.36660 | 5/2+ | 13 → 0 | 2.36653 | 100 |
| 14 | 2.39520 | 9/2- | 14 → 6 | 0.22487 | 100 |
| 15 | 2.53460 | 3/2+ | 15 → 0 15 → 2 15 → 3 | 2.53466 1.06800 0.065249 | 44.5 21.3 34.2 |
| 16 | 2.55780 | 1/2+ | 16 → 0 | 2.55780 | 100 |
| 17 | 2.57760 | 5/2- | 17 → 0 | 2.57760 | 100 |
| 18 | 2.63990 | 3/2- | 18 → 0 | 2.63990 | 100 |
| 19 | 2.69370 | 7/2- | 19 → 0 | 2.69370 | 100 |
| 20 | 2.76460 | 13/2- | 20 → 10 20 → 11 | 0.47726 0.44385 | 75.2 24.8 |
| 21 | 2.77500 | 5/2- | 21 → 0 21 → 4 | 2.77525 0.73245 | 53.8 46.2 |
| 22 | 2.79150 | 7/2- | 22 → 5 | 0.65997 | 100 |
| 23 | 2.81140 | 5/2- | 23 → 0 23 → 4 | 2.81097 0.7705 | 84.0 16.0 |
| 24 | 2.82600 | 3/2+ | 24 → 0 | 2.82620 | 100 |
| 25 | 2.83560 | 3/2- | 25 → 2 | 1.36923 | 100 |
| 26 | 2.85710 | 13/2+ | 26 → 5 26 → 9 26 → 10 26 → 11 | 0.72573 0.59693 0.57000 0.53700 | 48.0 29.3 9.7 13.0 |

| | | | | | |
|----|---------|------|------------------|--------------------|--------------|
| 27 | 2.87100 | 3/2+ | 27 → 0 | 2.87108 | 100 |
| 28 | 2.89600 | 5/2+ | 28 → 6 | 0.72585 | 100 |
| 29 | 2.90230 | 7/2+ | 29 → 0 29 → 7 | 2.90230 0.71265 | 45.7 54.3 |
| 30 | 2.91420 | 9/2+ | 30 → 5 | 0.78270 | 100 |
| 31 | 2.91840 | 3/2+ | 31 → 0 | 2.92831 | 100 |
| 32 | 2.99210 | 3/2- | 32 → 8 | 0.79166 | 100 |
| 33 | 3.00770 | 5/2- | 33 → 0 | 3.00768 | 100 |
| 34 | 3.01700 | 7/2- | 34 → 0 | 3.01720 | 100 |
| 35 | 3.03400 | 1/2- | | | |
| 36 | 3.05300 | 3/2- | | | |
| 37 | 3.08270 | 3/2+ | 37 → 0 | 3.08266 | 100 |
| 38 | 3.1000 | | | | |

Экспериментальных данных по интегральному сечению неупругого рассеяния нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния в библиотеке JENDL-3.3 рассчитаны на основе сферической оптической моделей ядерных реакций и практически совпадают с данными BROND-3, которые рассчитаны с помощью другой программы для расчета (модифицированной программы GNASH) и параметров несферической оптической модели. На рис. 4 показаны функции возбуждения неупругого рассеяния на первом уровне. Экспериментальных также данных нет. Оцененные функции возбуждения библиотек JENDL-3.3 и БРОНД-3 близки.

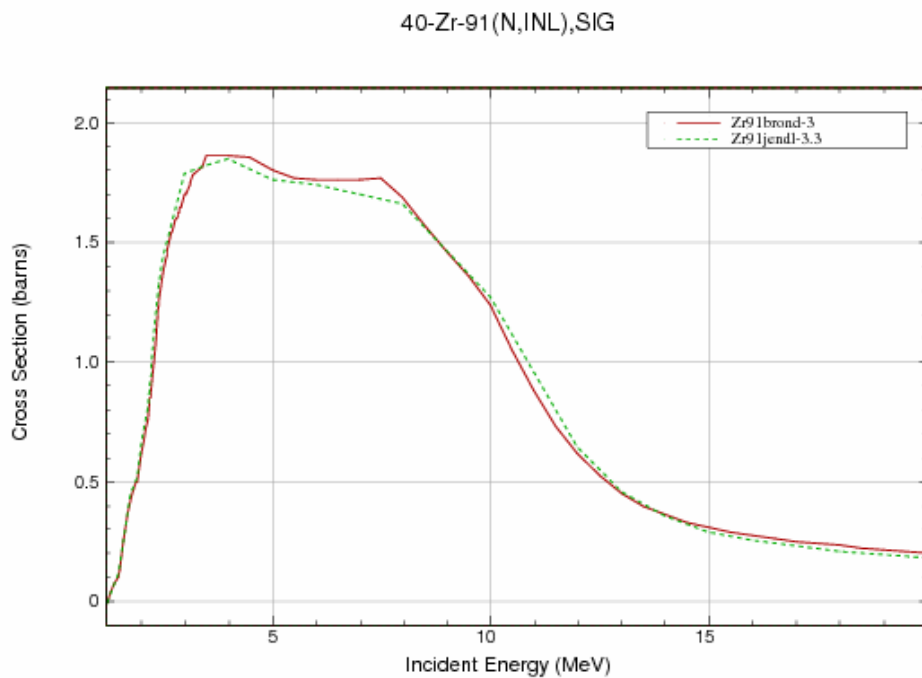


Рис.6. Интегральное сечение неупругого рассеяния Zr-91.

40-Zr-91(N,INL),SIG E1 1.205+6

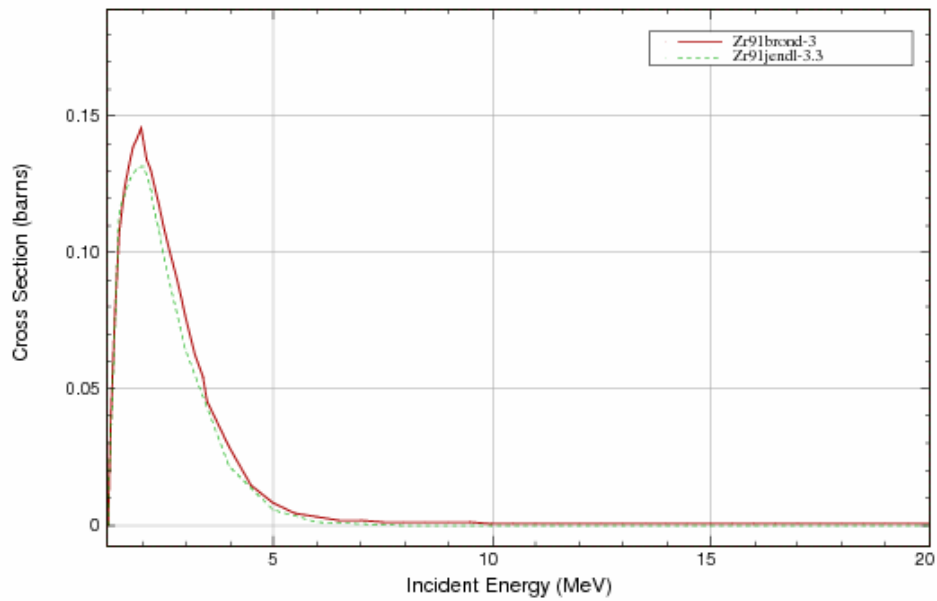


Рис.7. Сечение неупругого рассеяния Zr-91 на первом уровне с энергией 1.205 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.2-2 МэВ сечение радиационного захвата в файле Zr-91 библиотеках БРОНД-3 и JENDL-3.3 различаются, Но из-за отсутствия экспериментальных данных обосновать выбор одной из них трудно.

40-Zr-91(N,G),SIG

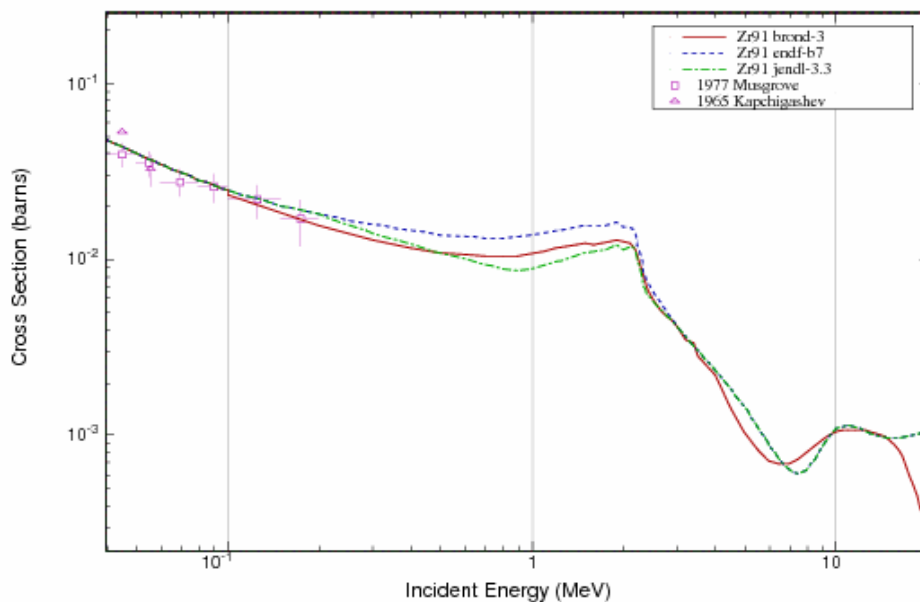


Рис. 9. Сечение радиационного захвата в области 0.1-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

На рис. 10 представлено сечение реакции (n,2n) библиотек JENDL-3.3 и BROND-3. Экспериментальных данных нет. В области до 12 МэВ обе оценки близки, выше оценки заметно различаются, однако оценка БРОНД-3 согласуется с эмпирической систематикой функций возбуждения указанной реакции [97Ma].

Сечение реакции (n,3n) (рис.11) библиотеки БРОНД-3 лучше согласуется с систематикой сечений реакций (n,3n) и (n,2n).

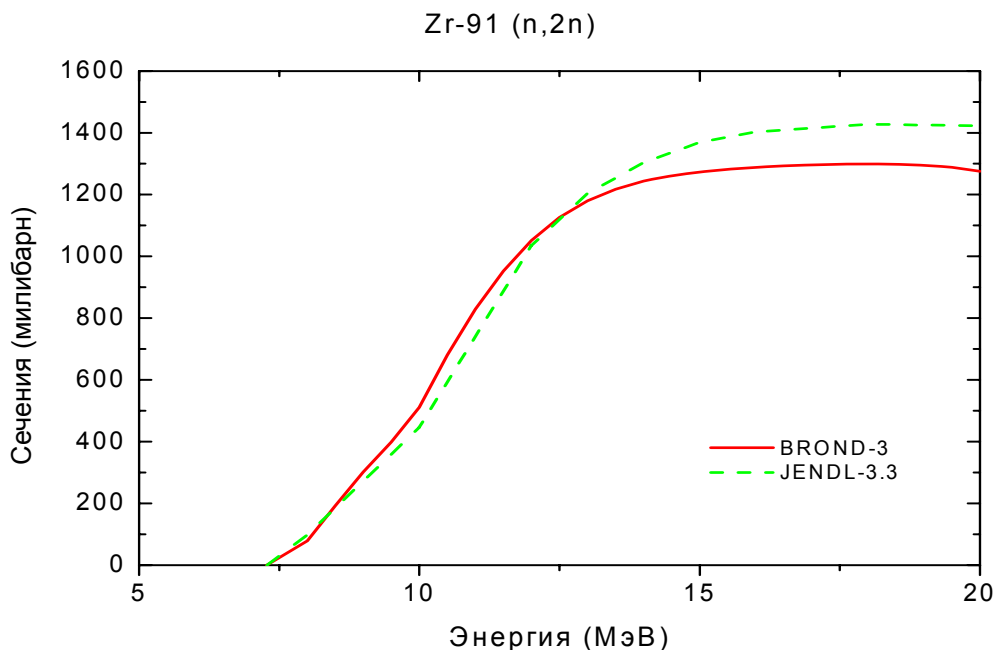


Рис. 10. Сечение реакции (n,2n). JENDL-3.3

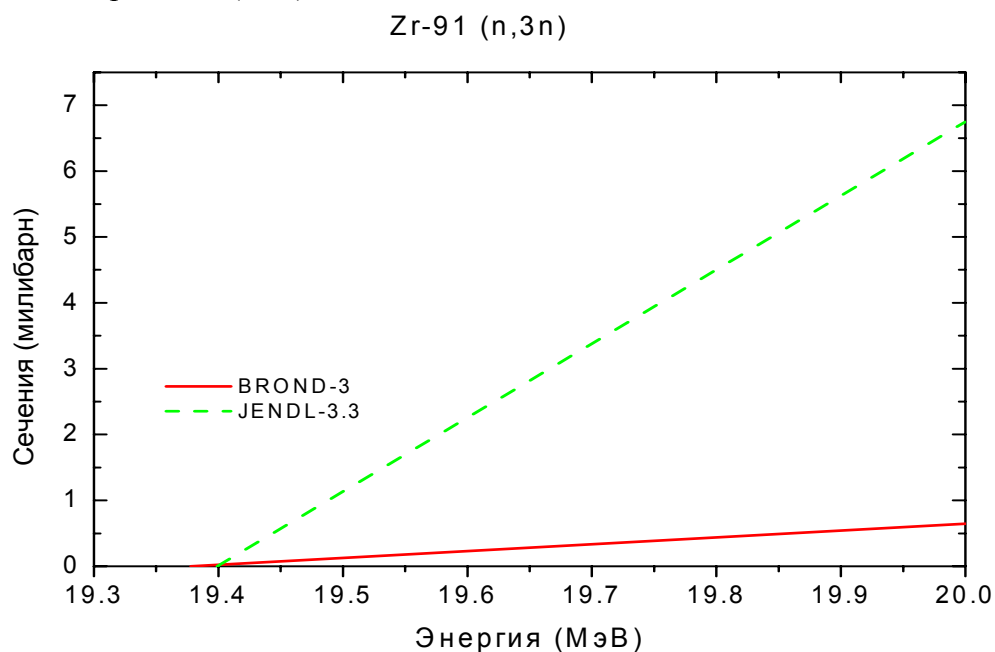


Рис. 11. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104 и 107):

На рис. 12 показано сечение реакции $^{91}\text{Zr}(n,p)$. Оцененные данные библиотеки БРОНД-3 лучше согласуются с систематикой сечений этой реакции и с экспериментальными данными Кайма.

На рис. 13 дано сечение реакции $^{91}\text{Zr}(n,d)$. Данные библиотеки ENDF/B-VII приняты из библиотеки JENDL-3.3. Оценка БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лежит ближе к систематической тенденции поведения этой реакции, основанной на экспериментальных данных Хайта. Эта тенденция требует более высоких сечений реакции (n,d). На рис.14 представлено сечение реакции $^{91}\text{Zr}(n,a)$. Рекомендуется оценка из БРОНД-3, поскольку она также лучше согласуется с эмпирической систематикой.

Zr-91 (n,p)

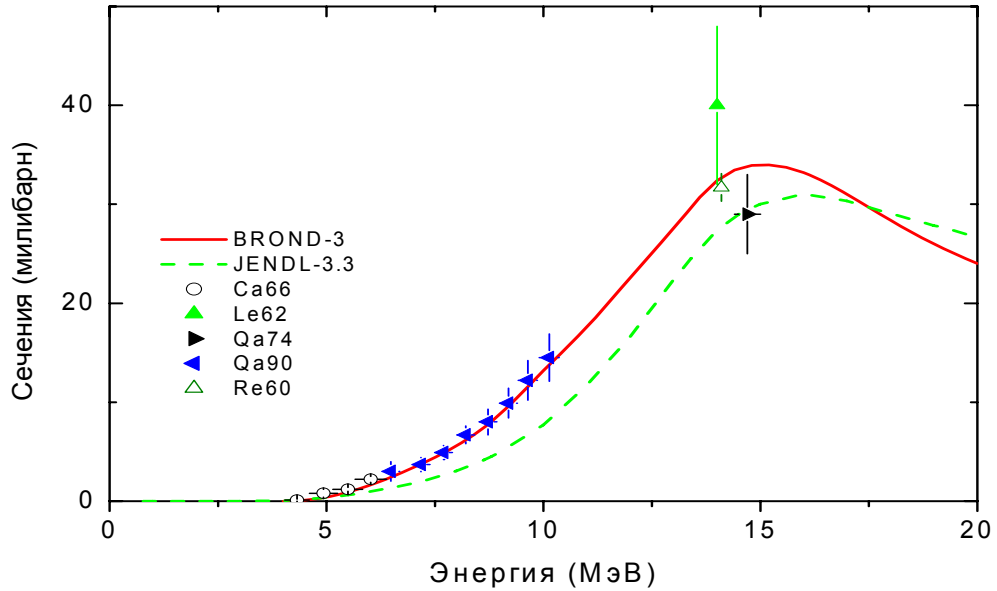


Рис. 11. Сечение реакции (n,p)

Zr-91 (n,d)

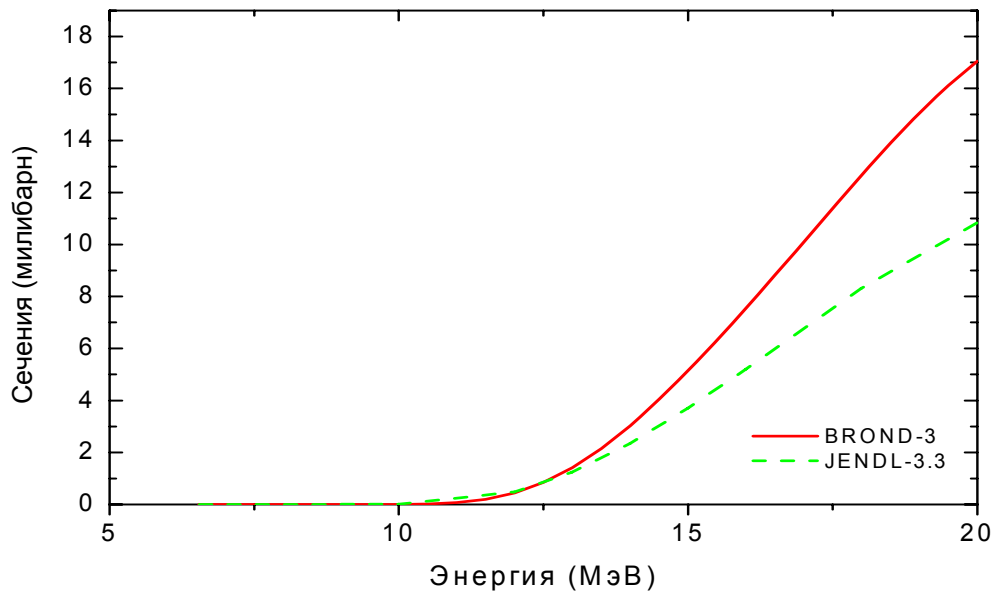


Рис.13. Сечение реакции (n,d).

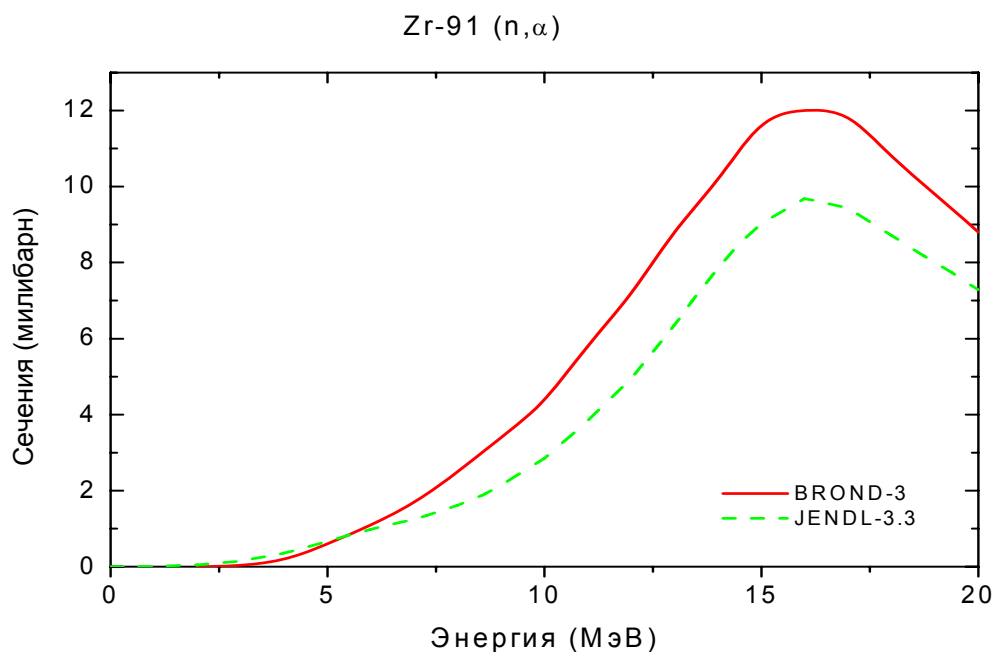


Рис. 14. Сечение реакции (n,α)

3.7. Реакции (n,na), (n,np) (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. Оценки реакций (n,na) и (n,np) в файле Zr-91 в БРОНД-3 основаны на расчетах по программе GNASH. Разногласия оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

На рис. 15 дано сечение реакции $^{91}\text{Zr}(n,np)$. Оцененные данные библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 примерно равноценны, однако зависимость из БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она несколько лучше согласуется с систематикой функций возбуждения реакции (n,2n).

На рис. 16 дано сечение реакции $^{91}\text{Zr}(n,na)$. Рекомендуется функция возбуждения из библиотеки БРОНД-3, так как она согласуется с сечением реакции (n,α) и с систематикой реакции (n,na).

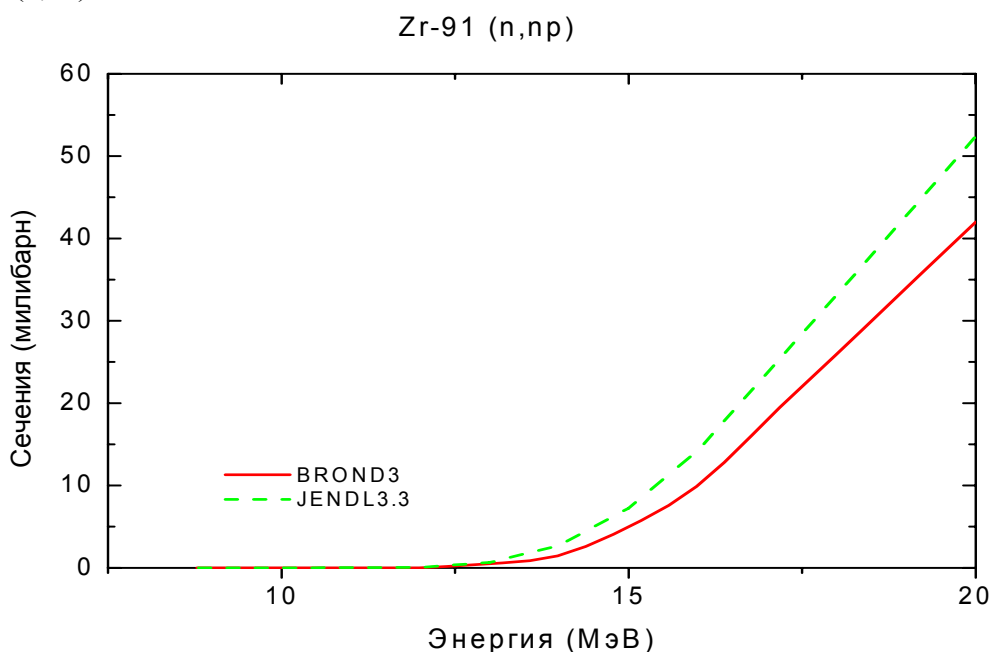


Рис. 15. Сечение реакции (n,np).

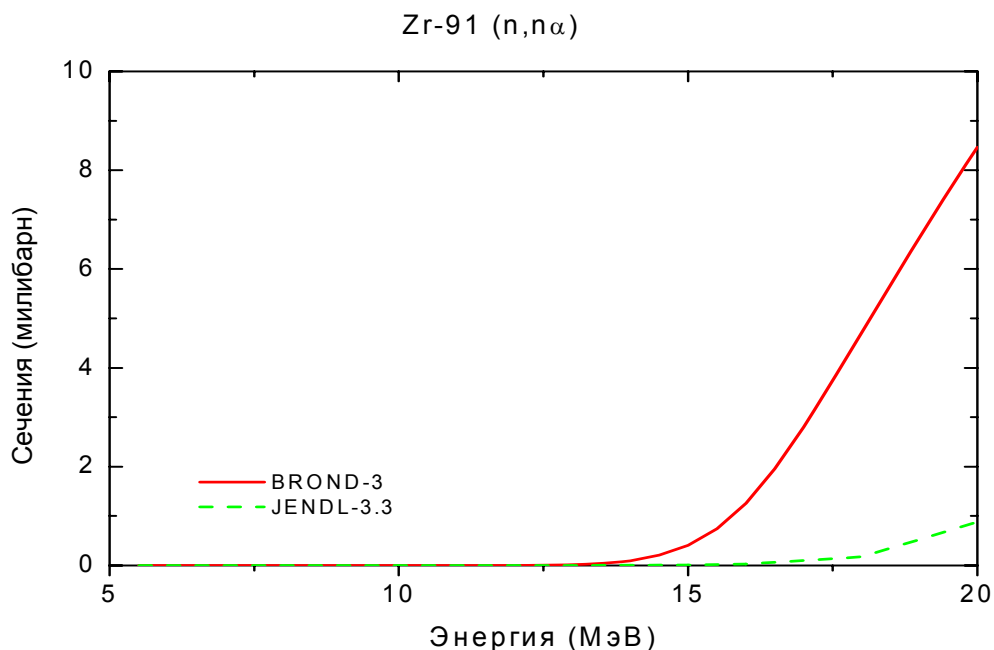


Рис. 16. Сечение реакции (n,n α).

MF=4. Угловые распределения вторичных нейтронов.

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/91Ig/.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов обе оценки учитывают вклад прямых и предравновесных процессов, которые приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов.

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gashy/91Ig/ и Dwuck.

MF=6 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

MT=16,17,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /90Ku/.

MF=12 Множественность образования гамма-лучей

MT=16,17,22, 28, 51-87,91,102,103,107. Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH /96Yo/.

MF=14 Угловые распределения гамма-лучей

MT=16,17,22, 28, 51-87,91,103,102 107 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

MF=15 Непрерывные спектры гамма-лучей

MT=16,17,22,28,91,103,107 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, рассчитаны по программе EGNASH /90Ya/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/91Ig/

Закключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка БРОНД-3 является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить в РОСФОНД файл оцененных данных для Zr-91 из БРОНД-3.

Авторы отбора файла

Игнатьюк А.В., Манохин В.Н.

References

- 06Mu Mughabghab S.F.: Atlas of Neutron Resonances, Academic Press, NY, 2006 (5-th edition of BNL-325)
- 03M.. S.Mughabghab, Report INDC(NDS)-440, 2003.
- 01Ko Koning,A.J., Dalaroche,J.P. Contribution to 3_th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
- 98Ri RIPPLE-2. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
- 97Ma Manokhin,V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin,V.N., Blokhin,A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
- 96Yo Young,P.G., Arthur,E.D., Chadwick,M.B.: In "Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors" (Triest,1996). Eds. A.Gordini, G.Reffo., World Science, Singapore, 1988,V.1,p.206.
- 95Fi Firestone,R.B. Table of Isotopes, Eight Edition,V.2, New York,1995
- 91Ig Igarasi, S. and Fukahori, T.: JAERI 1321 (1991).
- 90Ku Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
- 90Ya Yamamuro, N.: JAERI-M 90-006 (1990).
- 88Di Dietrich,S.S., Berman,B.L. Atomic data and Nuclear data Tables 38(1988)199.
- 86Ki Kikuchi, Y. et al.: JAERI-M 86-030 (1986).
- 85Sa M.M.Salah et al., EXFOR-12940, 1985
- 80Ar Arthur E.D. Nucl.Sci.Eng. 76(1980)137.
- 78Br Brusegan, A., et al.: "Proc. Int. Conf. on Neutron Physics and Nucl. Data for Reactors, Harwell 1978", 706.
- 74Lo Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
- 70Ra Raynal,J.: Report IAEA SMR-9/8(1970),p.281.
- 69Ba .Bartolome,Z.M. et al., Nucl. Sci. Eng., v. 37, 137 (1969).**
- 65Ka Капчигашев,С.П., Ю.П.Попов. АЕ, т. 19, 294 (1965).**

40.5. Цирконий-92

1. Общие характеристики

1.1. $Z=40$

1.2. $A=92$

1.3. $A_w=91.11552$

1.4. Содержание в естественной смеси: 17.15

1.5. Перечень нейтронных реакций:

| MT | Реакция | Q, МэВ | Епор, МэВ | Ядро-продукт |
|-----|--------------|----------|-----------|--------------|
| 51 | (n,n') | -0.9345 | 0.9448 | Zr-92 |
| 16 | n,2n | -8.6351 | 8.7299 | Zr-91 |
| 17 | n,3n | -15.8293 | 15.9939 | Zr-90 |
| 22 | n,n α | -2.9655 | 2.9981 | Sr-88 |
| 28 | n,np | -9.3974 | 9.5005 | Y-91 |
| 102 | n, γ | 6.7330 | | Zr-92 |
| 103 | n,p | -2.8420 | 2.8732 | Y-92 |
| 104 | n,d | -7.1728 | 7.2508 | Y-91 |
| 105 | n,t | -8.8460 | 8.9422 | Y-90 |
| 107 | n, α | 3.4001 | | Sr-89 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.3 Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках БРОНД-2 и JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мухабхабом и др. [81M] на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию и радиационному захвату нейтронов [69Ba, 76Bo]. Верхняя граница резонансной области принята равной 40 кэВ в БРОНД-2 и 71 кэВ в JENDL-3.3, и радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 7.2$ фм [81M] в обеих оценках. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами приняты средние значения ширин: 180 мэВ для s-резонансов и 270 мэВ для p-резонансов [81M]. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в CENDL-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII. Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| Оценка | БРОНД-2(=БРОНД-3) | JENDL-3.3 | Эксперимент [81Mu, 03Mu] |
|--|-------------------|-----------|--------------------------|
| полное | 5.074 | 7.339 | |
| упругое | 4.855 | 7.110 | |
| захвата | .219 | .229 | .220±0.060 |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | .634 | .699 | .63±.02 |

В пределах погрешности оценки БРОНД-2 и JENDL-3.3 согласуются с измеренными сечениями радиационного захвата тепловых нейтронов, но существенно расходятся в оценке полных сечений, для которых нет каких-либо экспериментальных данных. Резонансный интеграл захвата нейтронов в JENDL-3.3 оказывается заметно выше экспериментального.

Для пересмотренной оценки БРОНД-3 было решено сохранить резонансные параметры БРОНД-2, но в соответствии с приведенными ниже результатами статистического анализа параметров резонансов увеличить до 60 кэВ верхнюю границу области разрешенных резонансов. Сечения для тепловых нейтронов и резонансный интеграл захвата при этом практически не изменились.

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 1 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки БРОНД-2 и JENDL-3.3, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа представлены на рис. 1. Данный анализ показывает, что в диапазоне энергий до 60 кэВ в наборе s-резонансов пропущено от 4-5 резонансов в JENDL-3.3 и в наборе p-резонансов пропущено 5-7 слабых резонансов в JENDL-3.3 и до 10 резонансов в БРОНД-2. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, для обеих наборов резонансных параметров равны $D_0=(3500 \pm 500)$ эВ и $D_1=(1140 \pm 60)$ эВ. Отношение $D_0/D_1=3.07 \pm 0.45$ согласуется со статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, и это свидетельствует об общей согласованности анализа пропуска резонансов и погрешностей определения средних расстояний между резонансами. Для нейтронных

силовых функций в рамках данного анализа получены значения $S_0=(0.75 \pm 0.10) 10^{-4}$ и $S_1=(7.5 \pm 1.0) 10^{-4}$ для s- и p-резонансов, соответственно.

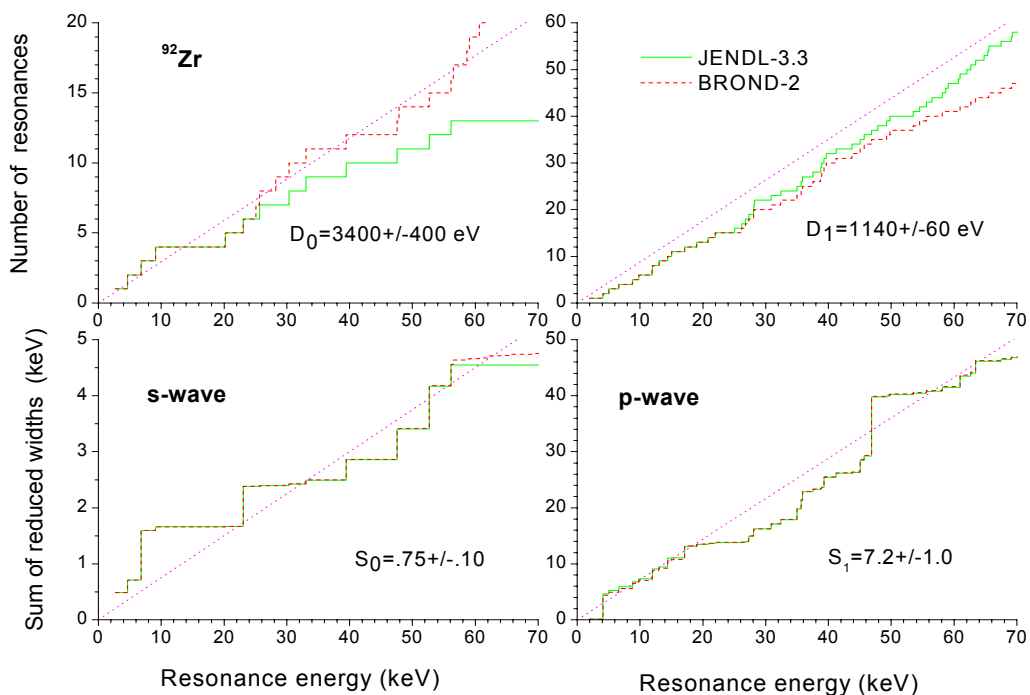


Рис. 1. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтральных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII

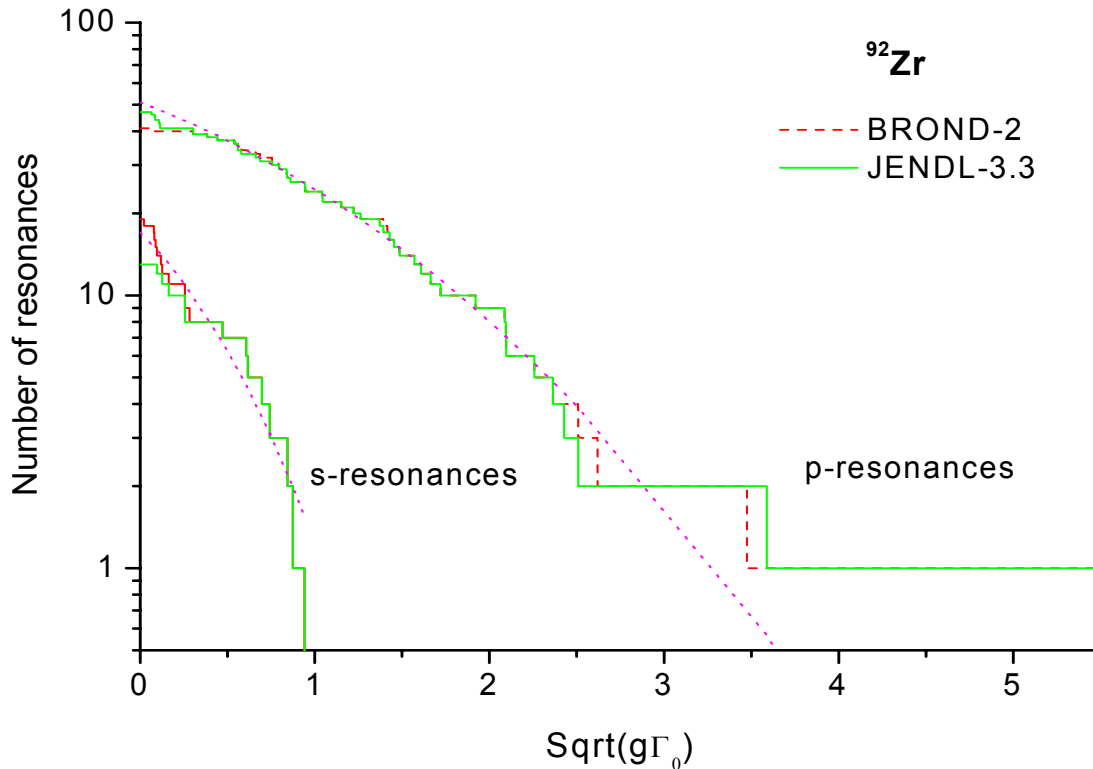


Рис. 2. Анализ пропуска s- и p-резонансов. Пунктиром показано теоретически ожидаемое распределение.

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в БРОНД-2 принята равной 200 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В JENDL-3.3 использован аналогичный подход, но принята более низкая верхняя граница неразрешенных резонансов 100 кэВ. Оценка JENDL-3.3 для неразрешенных резонансов принята без каких-либо изменений в CENDL-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S0, S1 и S2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [911]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов [76Bo]. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.500E-4$, $S_1 = 7.00E-4$, $S_2 = 0.380E-4$, $G_g = 0.140$ эВ для s- и 0.36 эВ для p-волны, $D_0 = 3233$ эВ, $R = 5.964$ ферми.

В БРОНД-2 было использовано аналогичное приближение, но средние радиационные ширины были приняты на основе статистического анализа параметров разрешенных резонансов и средние расстояния между резонансами было выбрано из условий оптимального описания наблюдаемых сечений радиационного захвата нейтронов. Для энергии нейтронов 70 кэВ приняты следующие значения параметров:

$S_0 = 0.40E-4$, $S_1 = 5.00E-4$, $S_2 = 0.88E-4$, $G_g = 0.196$ эВ для s- и 0.244 эВ для p-волны, $D_0 = 2575$ эВ, $R = 6.68$ ферми.

Различия в выборе радиационных ширин и значений D_0 в значительной степени компенсируются при подгонке расчетных сечений к одним и тем же экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов [76B].

В новой оценке БРОНД-3 было решено сохранить в области неразрешенных резонансов значения нейтронных силовых функций и радиационных ширин, полученных при анализе параметров разрешенных резонансов и ограничиться выбором параметра D_0 из условий оптимального описания экспериментальных данных по радиационному захвату нейтронов. Верхняя граница области неразрешенных резонансов принята равной 200 кэВ. На рис. 3 и 4 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Существенные отличия между оценками проявляются лишь ниже первого резонанса. Эти отличия обусловлены различиями нейтронных сечений для тепловых нейтронов и выбором соответствующих параметров отрицательного резонанса. В области неразрешенных резонансов все оценки практически совпадают.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что основные отличия между оценками JENDL-3.3 (=ENDF/B-VII) и БРОНД-3 (~БРОНД-2) относятся к описанию тепловых сечений. БРОНД-3 лучше согласуется с имеющимися экспериментальными данными [03M, 06M], а также является более согласованной в определении средних параметров неразрешенных резонансов, уточнение которых может быть важным для расчетов блокировки нейтронных сечений в рассматриваемой области.

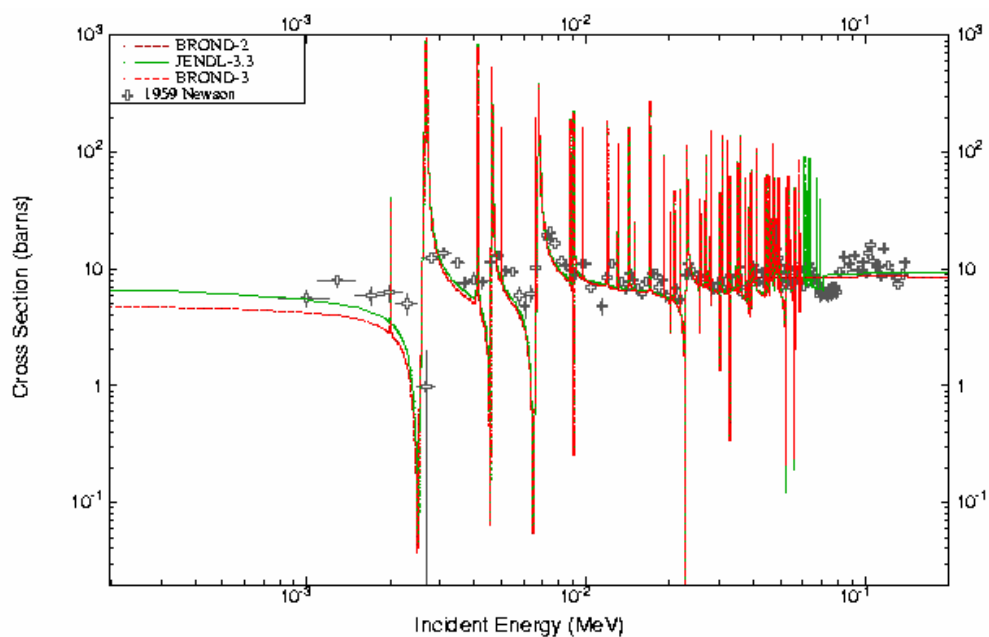


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

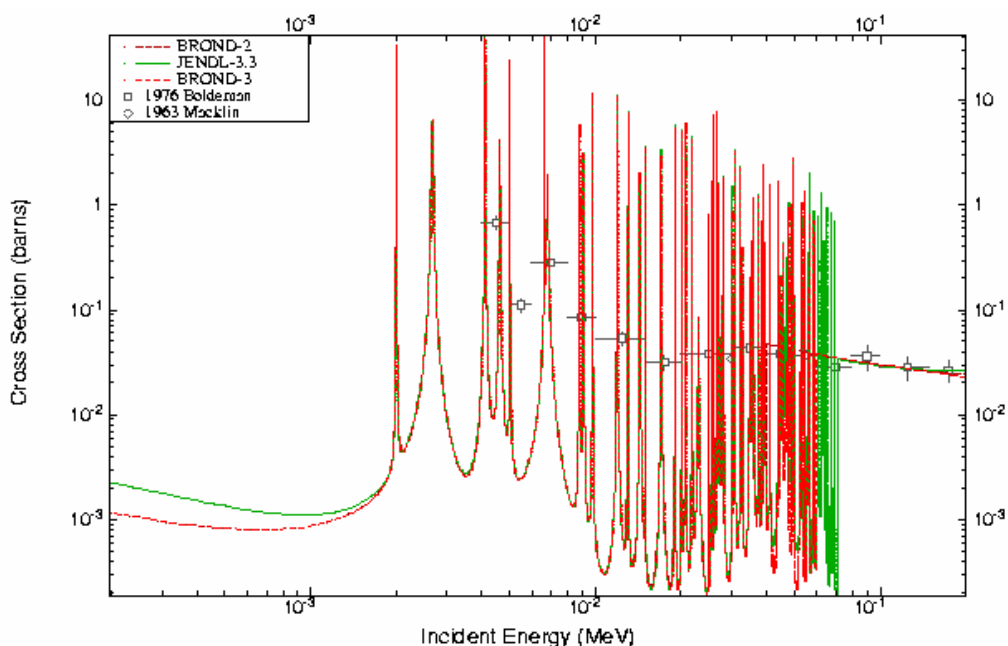


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области.

В данном разделе проведено сравнение оцененных данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII и JENDL-3.3 вне резонансной области (0.02-20 МэВ). Сравнение с данными библиотеки JEFF-3.1 не проводилось, поскольку для изотопов циркония приняты данные библиотеки JENDL-3.3. В последней версии ENDF/B-VII приняты также данные JENDL-3.3. Поэтому ниже следует сравнение только оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3, также дано краткое описание оценки БРОНД-3. Это связано с тем, что авторы оценки БРОНД-3 по сравнению с оценками других авторов применили дополнительные эмпирические систематики и более корректные теоретические расчеты. Оценка всех сечений изотопов

циркация выполнена в едином согласованном подходе. В частности, был оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния, использовались систематические тенденции в поведении функций возбуждения пороговых реакций в зависимости массового числа, применена несферическая оптическая модель.

Нейтронные сечения в БРОНД-3 в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью модифицированной программы GNASH /96Yo/ с учетом флуктуации нейтронных ширин. Для нейтронов была использована модель сильной связи каналов (программа ECIS /91Ig/) с прямым возбуждением низколежащих уровней 2+ и 3-.

Оптические параметры для нейтронов:

| Глубина потенциала (МэВ) | Диапазон энергии (МэВ) | Геометрия(фм) |
|--------------------------|------------------------|----------------------------|
| $V_r=49.0-0.28E$ | $0<E<20$ | $R_r=1.24 \quad a=0.62$ |
| $W_d=2.38+0.21E$ | $0<E<10$ | $R_d=1.26 \quad a=0.58$ |
| $W_d=5.39-0.091E$ | $10<E<20$ | |
| $W_v=0.0$ | $0<E<10.9$ | |
| $W_v=-0.0994+0.091E$ | $0.9<E<20$ | $R_v=1.24 \quad a=0.62$ |
| $V_{so}=6.2$ | $0<E<20$ | $R_{so}=1.12 \quad a=0.47$ |

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /01Ko/, /74Lo/ и /94Av/, соответственно.

Гамма-переходы рассчитывались для E1, M2 и E2 -силовых функций. Параметры гигантского резонанса E1 были взяты из работы /88Di/. Полная силовая функция была нормализована к имеющимся экспериментальным данным по радиационной ширине и D0 для нейтронного резонанса. Параметры дискретных уровней взяты из работы /95Fi/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 4 дано полное сечение Zr-92 вне резонансной области энергий нейтронов. В области 3-8 МэВ оценка БРОНД-3 лежит несколько ниже оценки JENDL-3.3 и при сравнении с экспериментальными данными выглядит предпочтительнее. В более высокой области обе оценки практически совпадают.

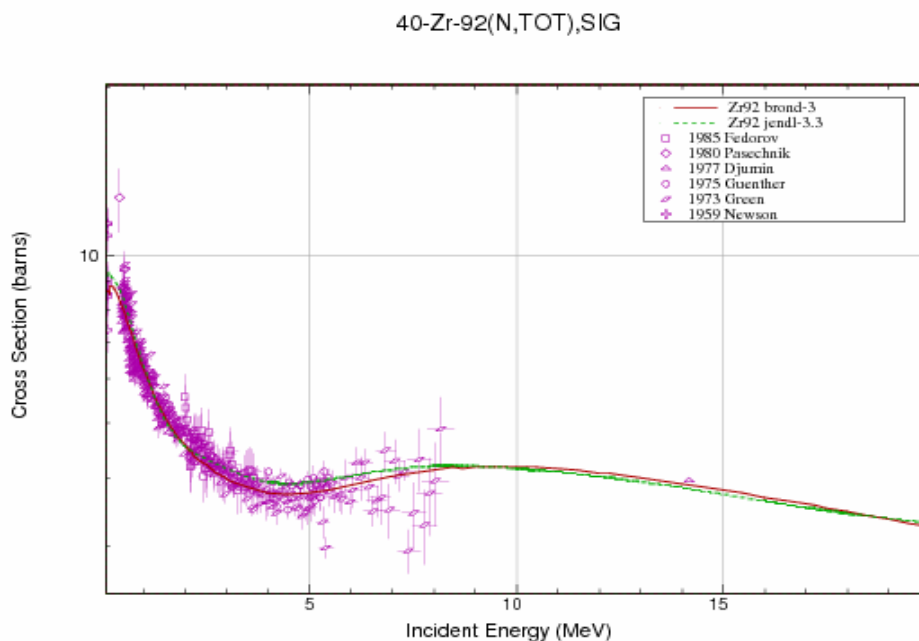


Рис. 4. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.2 -20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 5 показано сравнение оценки упругого рассеяния на изотопе Zr-92 с данными файла библиотеки JENDL-3.3. Как видно, сечение упругого рассеяния в области энергий 3-8 МэВ в библиотеке BROND-3 лежат также несколько ниже данных JENDL-3.3, что связано с более низким сечением в этой области полного сечения (см. рис.4).

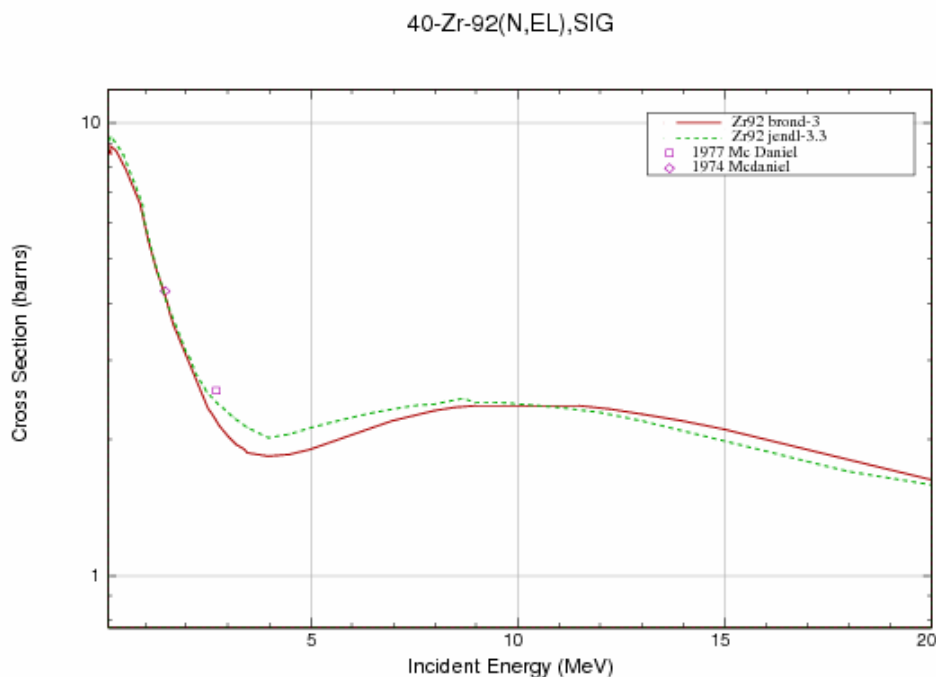


Рис.5. Сечение упругого рассеяния в области 0.01-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-70).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты, и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 3.1000 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

| N | Энергия уровня, МэВ | Спин | Переход | Энергия гамма-кванта, МэВ | Вероятность перехода, % |
|---|---------------------|------|----------------|---------------------------|-------------------------|
| 0 | 0.00000 | | | | |
| 1 | 0.93450 | 2+ | 1 → 0 | 0.9345 | 100 |
| 2 | 1.38280 | 0+ | 2 → 0 2 → 1 | 1.3830 0.4483 | 0.02 99.8 |
| 3 | 1.49550 | 4+ | 3 → 1 | 0.5610 | 100 |
| 4 | 1.84730 | 2+ | 4 → 0 4 → 1 | 1.8473 0.9127 | 33 67 |
| 5 | 2.06670 | 2+ | 5 → 1 5 → 3 | 1.1322 0.5714 | 98.6 0.06 |

| | | | | | |
|----|---------|----|---|---|------------------------------------|
| | | | 5 → 4 | 0.2192 | 0.08 |
| 6 | 2.18200 | 2+ | 6 → 0 6 → 2 6 → 4 | 2.1820 0.7000 0.3347 | 44 20 36 |
| 7 | 2.33980 | 3- | 7 → 0 7 → 1 7 → 3 7 → 4 7 → 5 | 2.3399 1.4053 0.8442 0.4925 0.2729 | 0.2 72.9 19.2 7.6 0.1 |
| 8 | 2.39840 | 4+ | 8 → 1 8 → 3 | 1.4838 0.9029 | 25.9 74.1 |
| 9 | 2.47340 | | 9 → 0 | 2.4734 | 100 |
| 10 | 2.48600 | 5- | 10 → 3 | 0.9905 | 100 |
| 11 | 2.66600 | 2+ | 11 → 1 11 → 2 | 1.7315 1.3840 | 95 5 |
| 12 | 2.74360 | 4- | 12 → 3 12 → 5 12 → 7 12 → 8 12 → 10 | 1.2481 0.6775 0.4038 0.3448 0.2576 | 40.9 3.4 23.3 2.1 30.3 |
| 12 | 2.74360 | 4- | 12 → 3 12 → 5 12 → 7 12 → 8 12 → 10 | 1.2481 0.6775 0.4038 0.3448 0.2576 | 40.9 3.4 23.3 2.1 30.3 |
| 13 | 2.75200 | 3- | 13 → 0 13 → 1 13 → 5 | 2.7520 1.8285 0.6853 | 65 25 10 |
| 14 | 2.81973 | 2+ | 14 → 0 14 → 1 14 → 2 14 → 4 14 → 10 | 2.81980 1.8850 1.4362 0.9723 0.3390 | 3.7 24.5 3.1 61.4 7.3 |
| 15 | 2.86340 | 4+ | 15 → 1 15 → 3 | 1.9287 1.3693 | 21.9 78.1 |
| 16 | 2.90350 | 0+ | 16 → 1 16 → 5 | 1.9702 0.8372 | 46.8 53.2 |
| 17 | 2.90946 | 2+ | 17 → 1 17 → 3 17 → 5 17 → 7 | 1.97488 1.41406 0.84269 0.56946 | 47.8 33.5 16.7 2.0 |
| 18 | 2.95780 | 6+ | 18 → 3 | 1.4623 | 100 |
| 19 | 3.03970 | 2+ | 19 → 1 19 → 4 19 → 7 19 → 12 | 2.1052 1.1925 0.7001 0.2958 | 76.5 3.2 17.4 2.9 |
| 20 | 3.05780 | 2+ | 20 → 1 20 → 5 | 2.1224 0.9904 0.7189 | 21.9 56.2 21.9 |

| | | | | | |
|----|---------|--|--------|--|--|
| | | | 20 → 7 | | |
| 21 | 3.1000- | | | | |

Экспериментальных данных по интегральному сечению неупругого рассеяния нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния библиотек JENDL-3.3 рассчитаны на основе сферической оптической моделей ядерных реакций. Данные BROND-3 в области до 9 МэВ лежат несколько выше оценки JENDL-3.3, но при более высоких энергиях практически совпадают. Учитывая более корректный подход в расчетах по программе GNASH интегральное сечение неупругого рассеяния из библиотеки BROND-3 предпочтительнее. На рис. 4-5 показаны функции возбуждения неупругого рассеяния на первых двух уровнях, где имеются экспериментальные данные. Для первого уровня оцененные функции примерно равнозначны, а для второго уровня функция BROND-3 лежит ниже экспериментальных данных и оценки JENDL-3.3.

40-Zr-92(N,INL),SIG

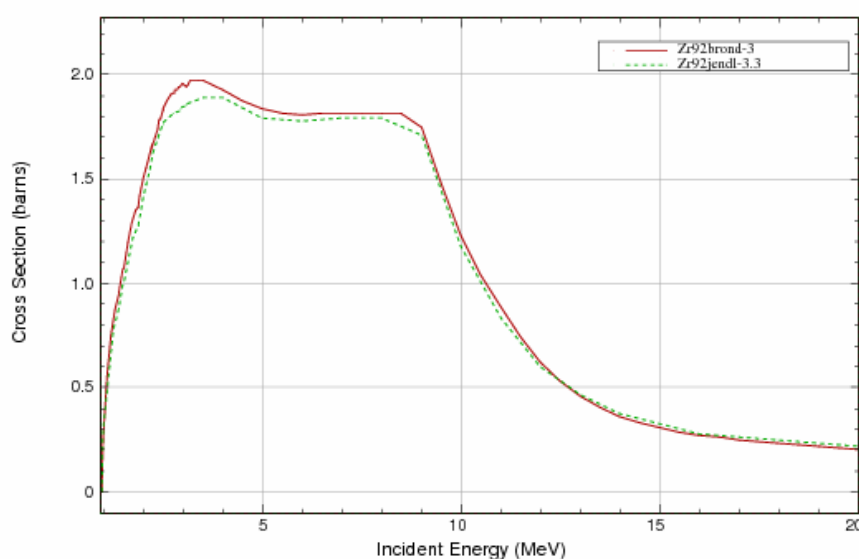


Рис.6. Интегральное сечение неупругого рассеяния Zr-92.

40-Zr-92(n,n'),SIG E19.34E+5

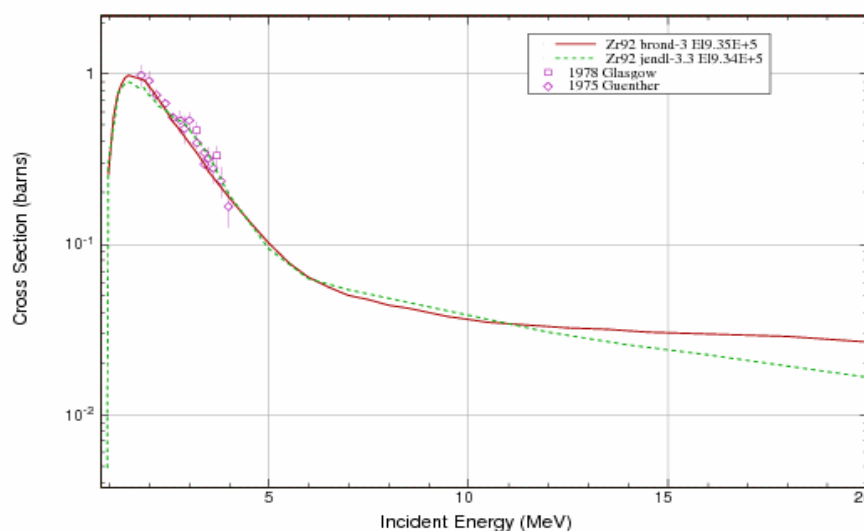


Рис. 7. Функция возбуждения первого уровня Zr-92 с энергией 0.9345 МэВ.

40-Zr-92(n,n'),SIG E11.38E+6

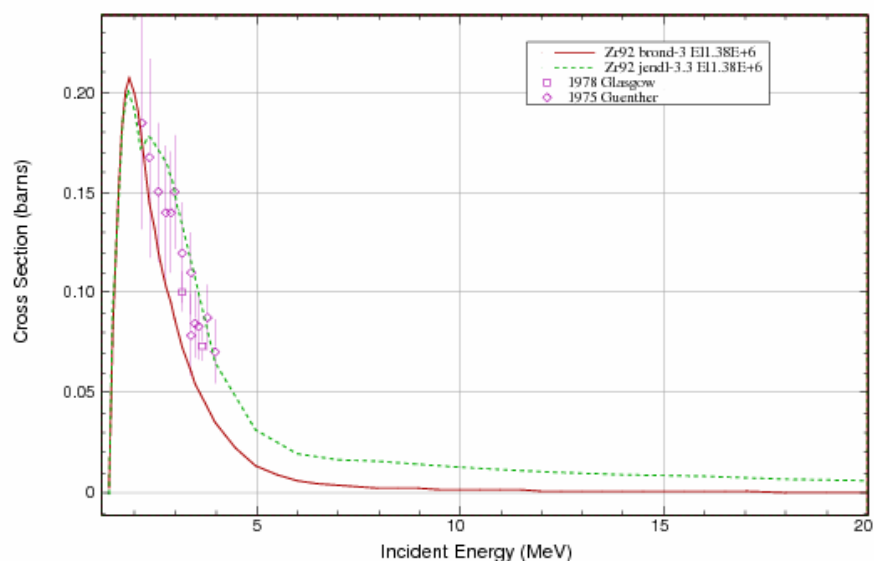


Рис. 8. Функция возбуждения второго уровня ZR-92 с энергией 1.3828 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.1-20 МэВ сечение радиационного захвата в файле Zr-92 библиотеки БРОНД-3 рассчитано с учетом полупрямого механизма в области гигантского резонанса. Как видно, данные БРОНД-3 и JENDL-3.3 заметно различаются, но кривая БРОНД-3 выглядит предпочтительнее.

40-Zr-92(N,G),SIG

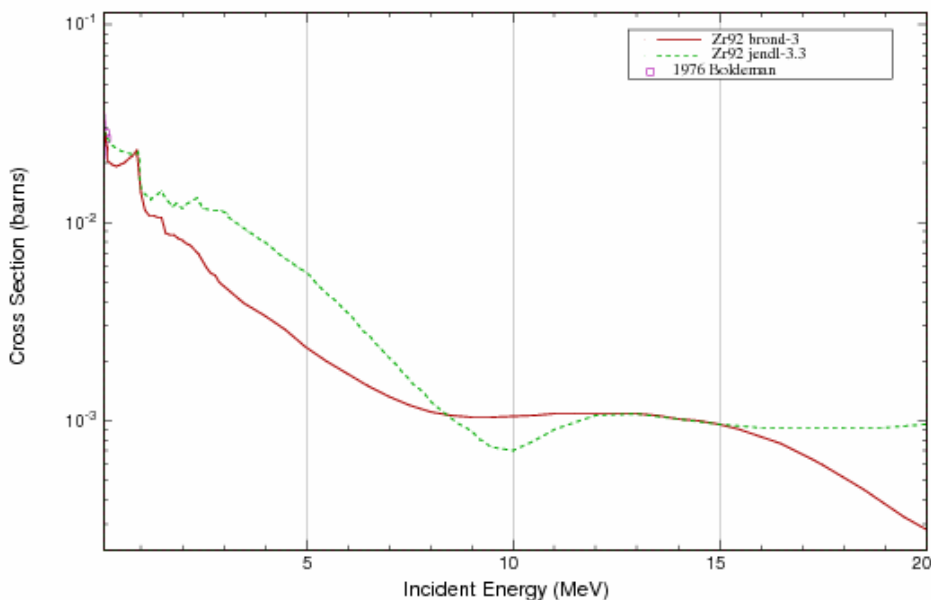


Рис. 9. Сечение радиационного захвата в области 0.1-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

Экспериментальных данных по сечениям реакции (n,2n) нет. На рис. 10 представлены оценки сечений реакции (n,2n) библиотек JENDL-3.3 и БРОНД-3. Как видно, обе оценки

близки и согласуются с эмпирической систематикой функций возбуждения указанной реакции [15]. Могут быть рекомендованы данные обеих библиотек. На рис.10 показана также оценка предыдущей версии ENDF-BVII, принятая до замены на данные JENDL-3.3. На рис. 11 показаны данные реакции (n,3n) JENDL-3.3 и БРОНД-3. Различия не очень велики, однако форма кривой оценки БРОНД-3 предпочтительнее. На рис. показана также оценка предыдущей версии ENDF-BVII, принятая до замены на данные JENDL-3.3. Очевидно, что данные ENDF-BVII ошибочны.

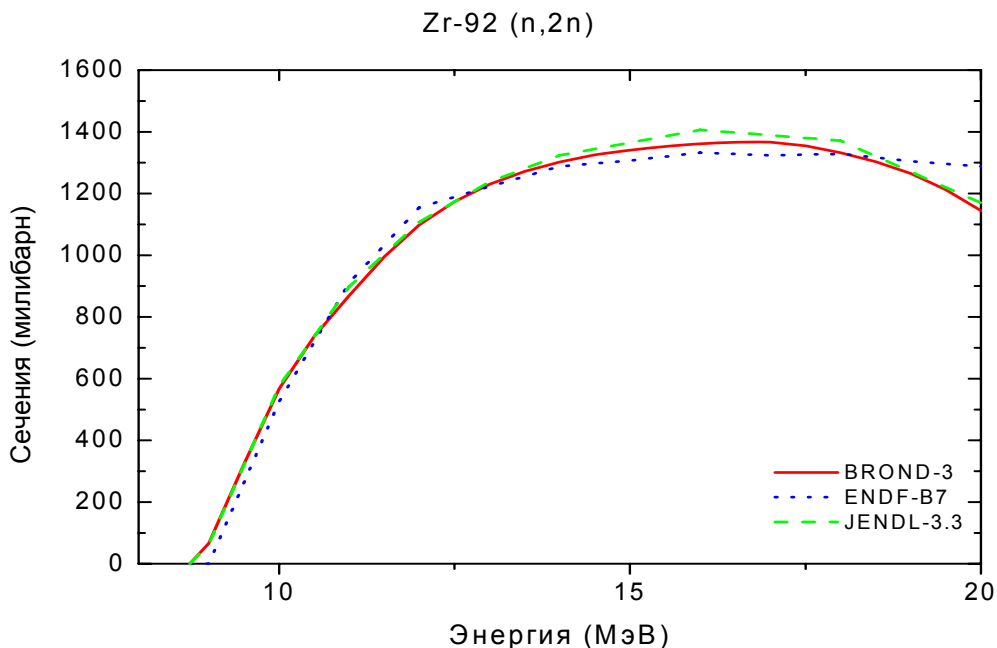


Рис. 10. Сечение реакции (n,2n).

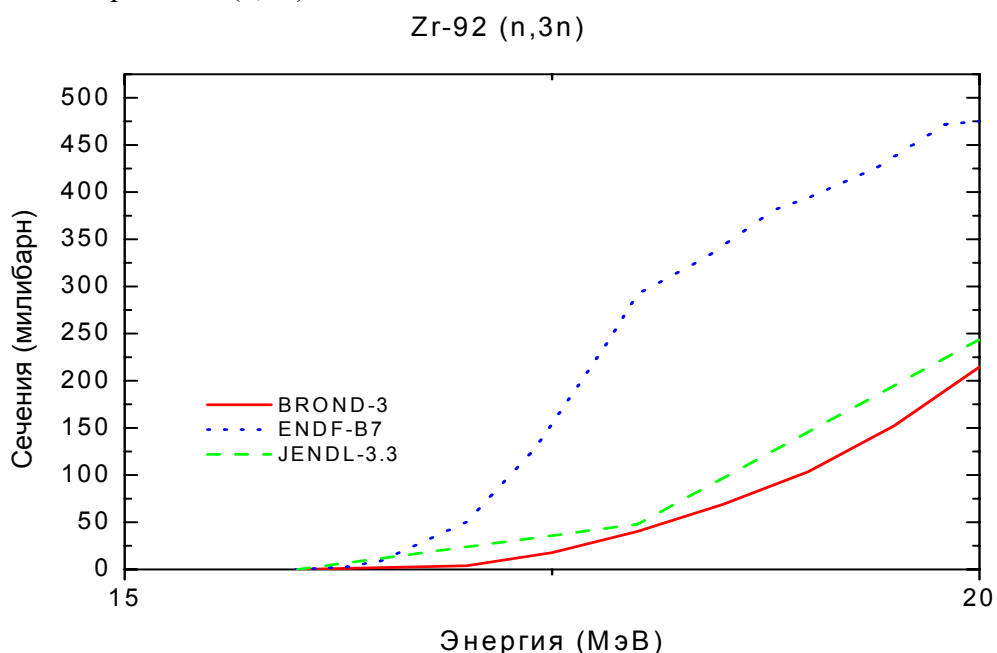


Рис. 11. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104,105 и 107):

На рис. 12 показано сечение реакции $^{92}\text{Zr}(n,p)$. Имеется достаточно много экспериментальных данных. Оценке функции возбуждения из БРОНД-3 следует отдать предпочтение, она лучше согласуется с систематикой сечений реакции (n,p) /97Ma/.

На рис. 13 дано сечение реакции $^{92}\text{Zr}(n,d)$. Оценки BROND-3 и JENDL-3.3 реакции (n,d), полученные расчетным путем, примерно равноценны. Оценка ENDF-BVII лежит очень низко. На рис.14 представлено сечение реакции $^{92}\text{Zr}(n,a)$. Рекомендуется оценка из БРОНД-3, поскольку она лучше согласуется с экспериментальными данными. Оценка сечения реакции (n,t) принята из JENDL-3.3

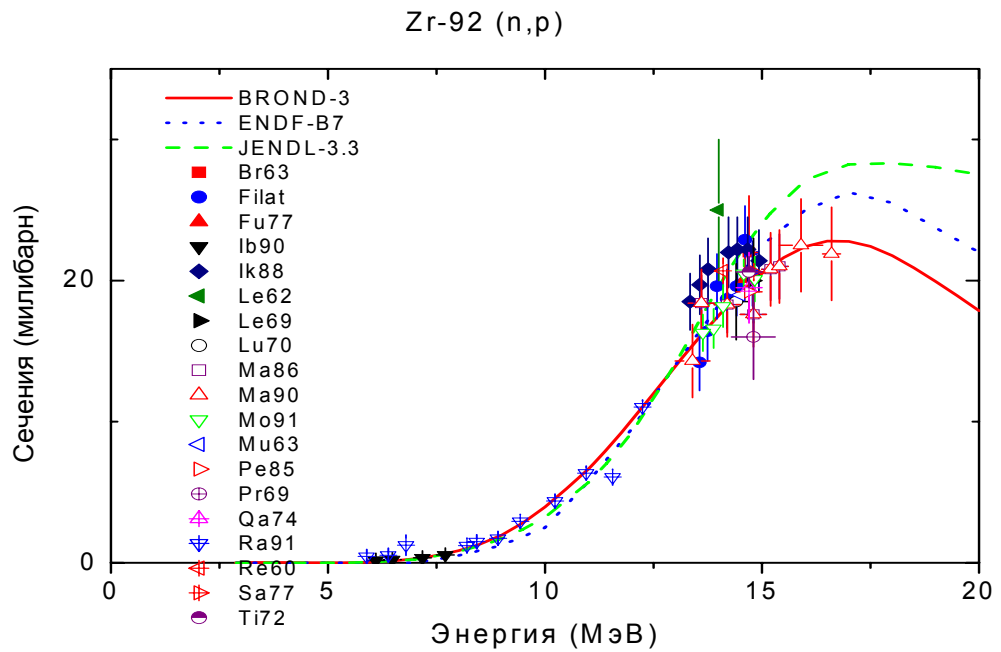


Рис. 12. Сечение реакции (n,p)

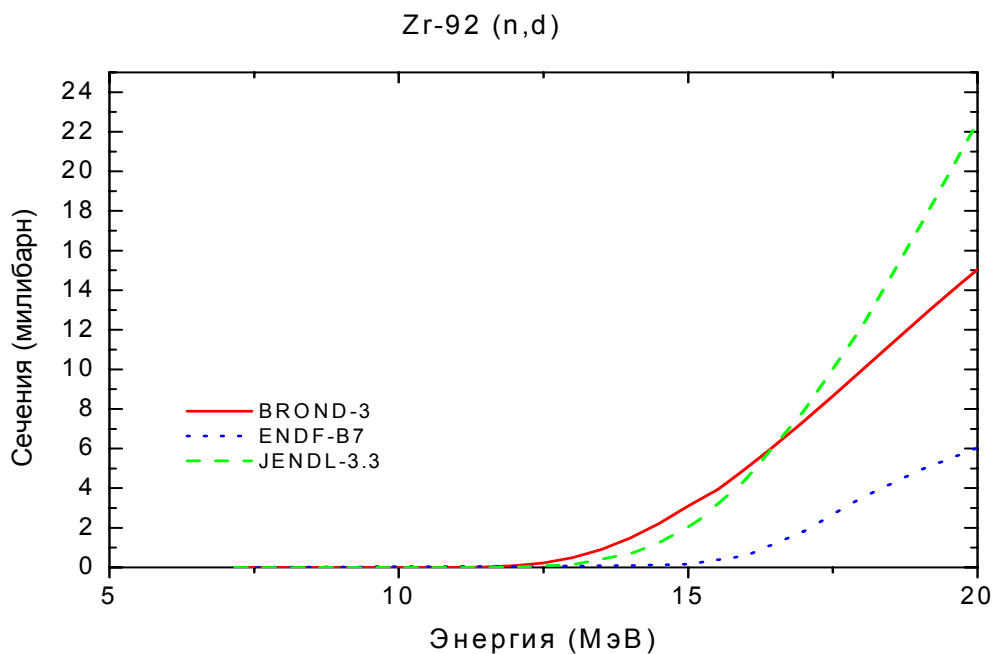


Рис.13. Сечение реакции (n,d).

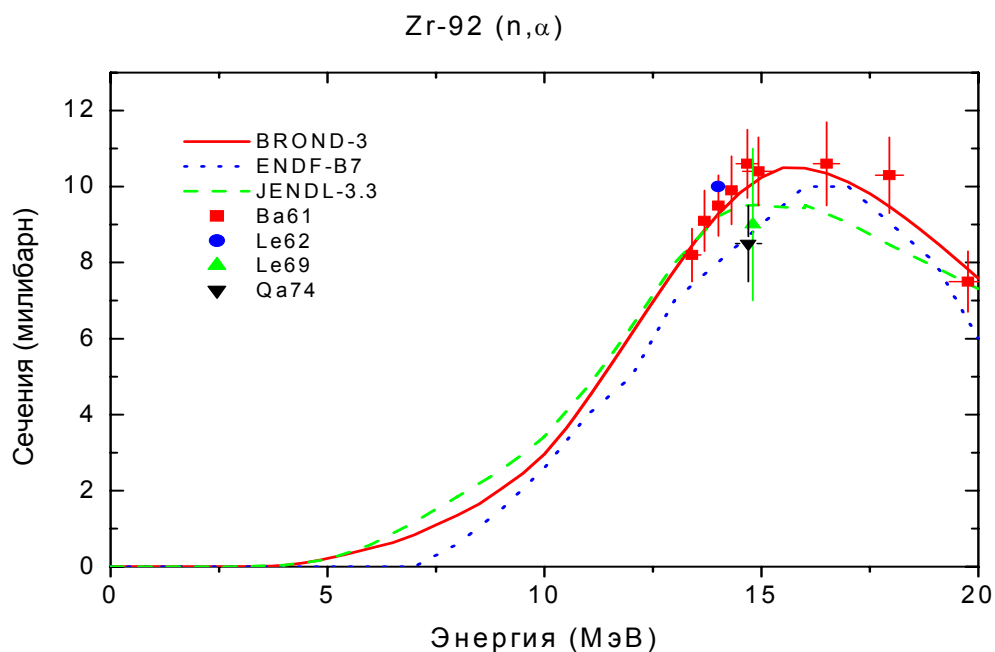


Рис. 14. Сечение реакции (n,α)

3.7. Реакции (n,nα), (n,np) (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. Оценки реакций (n,nα) и (n,np) в файле Zr-92 в БРОНД-3 основаны на расчетах по программе GNASH.

На рис. 15 дано сечение реакции $^{92}\text{Zr}(n,np)$. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 равноценны. На рисунке показана также оценка предыдущей версии ENDF-BVII, принятая до замены на данные JENDL-3.3. Она представляется ошибочной.

На рис.16 дано сечение реакции $^{92}\text{Zr}(n,n\alpha)$. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 равноценны. На рисунке показана также оценка предыдущей версии ENDF-BVII, принятая до замены на данные JENDL-3.3. Она резко не соответствует систематикам и явно ошибочна.

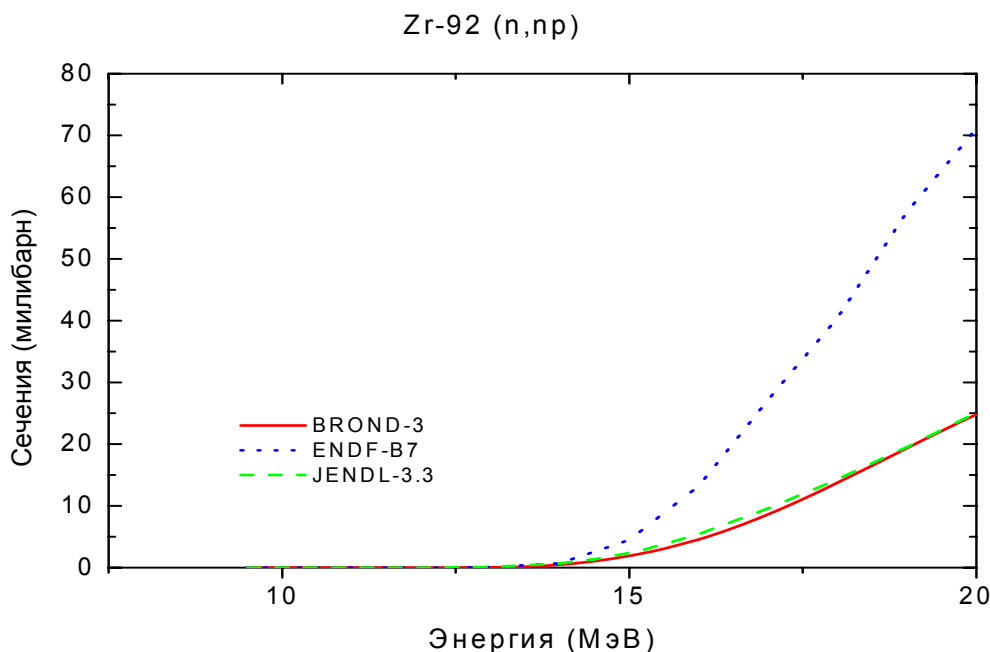


Рис. 15. Сечение реакции (n,np).

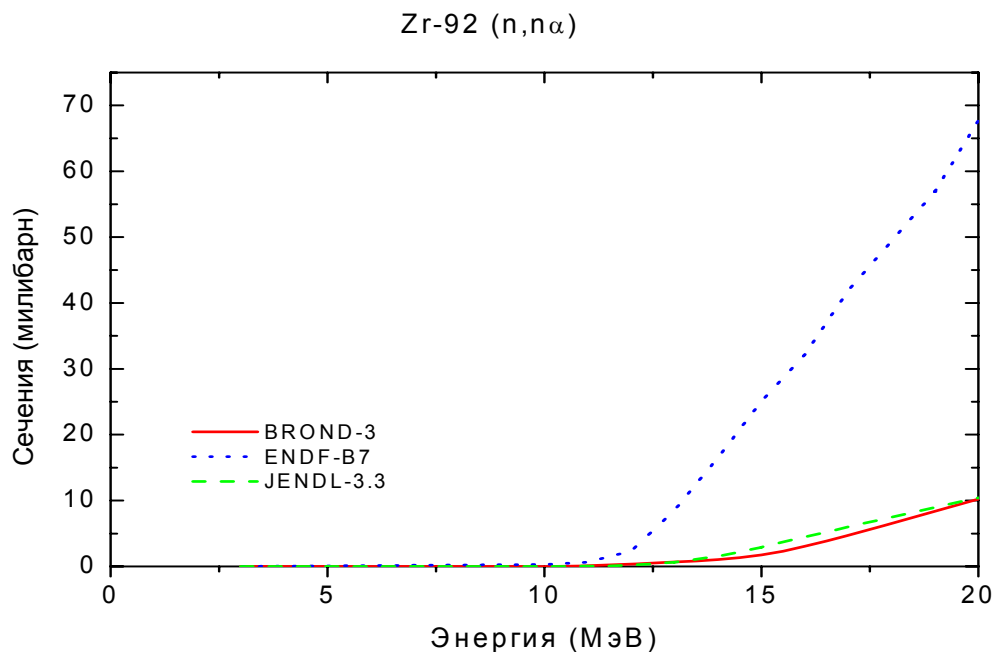


Рис. 16. Сечение реакции (n,n α).

MF=4. Угловые распределения вторичных нейтронов.

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/ 6/. На рис.17-18 показаны угловые распределения из библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 в сравнении с экспериментальными данными.

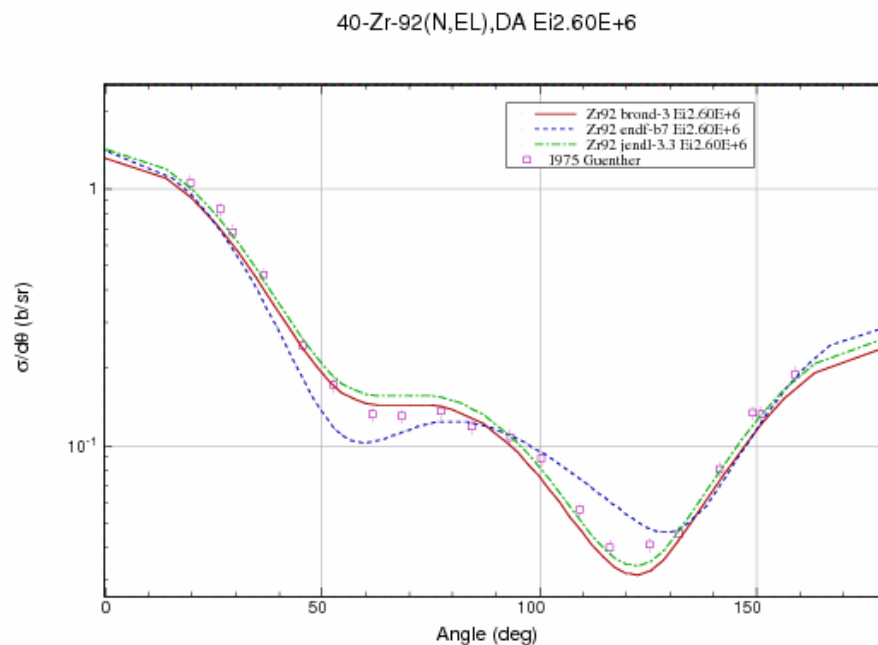


Рис. 17. Угловое распределение упруго рассеянных нейтронов с энергией 2.6 МэВ

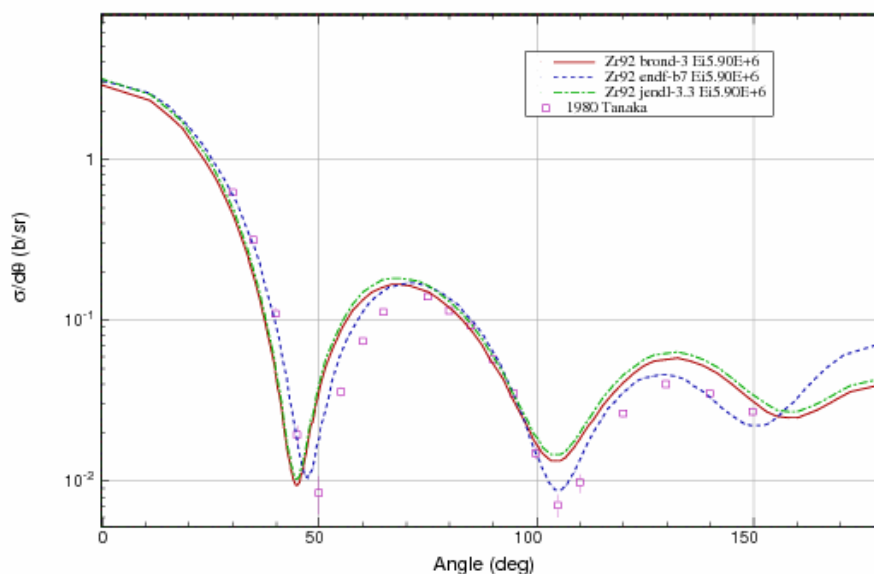


Рис. 18. Угловое распределение упруго рассеянных нейтронов с энергией 5.9 МэВ.

MT=51-70 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gasthy /91Ig/ и Dwuck.

MF=6 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

MT=16,17,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /90Ku/

MF=12 Множественность образования гамма-лучей

MT=16,17,22,28,51-70,102,103,107 рассчитаны по программе GNASH /96Yo/

MF=14 Угловые распределения гамма-лучей

MT=16,17,22,28, 51-70, 91, 102,103, 107 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

MF=15 Непрерывные спектры гамма-лучей

MT=16,17,22,28,91,103,107 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, рассчитаны по программе EGNASH /90Ya/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/91Ig/

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка БРОНД-3 является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых

экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить в РОСФОНД файл оцененных данных для Zr-92 из БРОНД-3.

Авторы отбора файла:

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

References

- 06M Mughabghab, S. Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY, 2006.
- 03M.. Mughabghab, S. Report INDC(NDS)-440, 2003.
- 01Ko Koning, A.J., Dalaroche, J.P. Contribution to 3_{rd} RCM of RIPL-2, Vienna, 2001.
- 98Ri RIPL-2. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
- 97Ma Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
- 96Yo Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: In "Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors" (Triest, 1996). Eds. A. Gordini, G. Reffo., World Science, Singapore, 1988, V.1, p.206.
- 95Fi Firestone, R.B. Table of Isotopes, Eight Edition, V.2, New York, 1995.
- 94Av Avrigeanu, V., Hodgson, P., Avrigeanu, M. Phys.Rev.C49(1994)2136
- 91Ig Igarasi, S. and Fukahori, T.: JAERI 1321 (1991).
- 90Ku Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
- 90Ya Yamamuro, N.: JAERI-M 90-006 (1990).
- 88Di Dietrich, S.S., Berman, B.L. Atomic data and Nuclear data Tables 38(1988)199.
- 86Ki Kikuchi, Y. et al.: JAERI-M 86-030 (1986).
- 81Mu Mughabghab, S.F. et al.: "Neutron Cross Sections, Vol. I, Part A", Academic Press (1981).
- 80Ar Arthur E.D. Nucl.Sci.Eng. 76(1980)137.
- 78Br A.Brusegan et al. In: Nucl. Data for Reactors, Harwell, 1978, 706.
- 76Bo J.W.Boldeman et al., Nucl. Phys. V. A269, 31 (1976).
- 75Ho Hofman, H. et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
- 74Lo Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
- 70Ra Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8(1970), p.281.
- 69Ba Bartolome, Z.M. et al., Nucl. Sci. Eng., v. 37, 137 (1969).

40.6. Цирконий-93

1. Общие характеристики

1.1. $Z=40$

1.2. $A=93$

1.3. $A_w= 92.10835$

1.4. Радиоактивен ($T_{1/2}=1.5 \cdot 10^6$ лет). Испытывает бета-распад в стабильный ^{93}Nb .

В реакторах образуется как продукт деления и в результате радиационного захвата нейтронов в цирконии-92.

1.5. Перечень нейтронных реакций:

| MT | Реакция | Q, МэВ | Епор, МэВ | Ядро-продукт |
|-----|--------------|----------|-----------|--------------|
| 51 | (n,n') | -0.2669 | 0.2698 | Zr-93 |
| 16 | n,2n | -6.7342 | 6.8073 | Zr-92 |
| 17 | n,3n | -15.3689 | 15.5287 | Zr-91 |
| 22 | n,n α | -3.3341 | 3.3703 | Sr-89 |
| 28 | n,np | -9.5762 | 9.6802 | Y-92 |
| 102 | n, γ | 8.2200 | | Zr-93 |
| 103 | n,p | -2.0928 | 2.1155 | Y-93 |
| 104 | n,d | -7.6417 | 7.7246 | Y-92 |
| 105 | n,t | -7.6500 | 7.7323 | Y-91 |
| 107 | n, α | 4.46910 | | Sr-90 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.4 Область разрешенных резонансов.

Параметры нейтронных резонансов были определены Маклином [85M, 86M] в диапазоне энергий до 30 кэВ. Однако, надежная идентификация угловых моментов имеется лишь для небольшого числа нижайших резонансов, вследствие чего границы области разрешенных резонансов сильно различаются в имеющихся оценках. В БРОНД-2 принята верхняя граница разрешенных резонансов 20 кэВ, и большинство резонансов с неизвестными орбитальными моментами были отнесены к s-волне, тогда как число оставшихся p-резонансов оказалось чрезвычайно низким. В JENDL-3.3 в файл включены практически все известные резонансы, но верхняя граница разрешенных резонансов 1.7 кэВ принята столь низкой, что в описании нейтронных сечений сохраняются лишь три первых s-резонанса. В JEEF-3.1 рассмотрение ограничивается лишь одним первым s-резонансом, тогда как в CENFL-3 для разрешенных и неразрешенных резонансов принята оценка JENDL-3.3. В недавней оценке ENDF/B-VII принята верхняя граница резонансов 6.8 кэВ, и угловые моменты резонансов распределены между s- и p-волнами в общем соответствии с ожидаемым статистическим распределением числа резонансов. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров во всех оценках используется приближение MLBW. Радиусы потенциального рассеяния приняты 6.8 ферми в БРОНД-2, 7.1 ферми в JEEF-3.1 и 7.2 ферми в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII.

Радиационные ширины резонансов, использованные в БРОНД-2, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, показаны на рис. 1. Ширины многих s- и p-резонансов отличаются весьма существенно, и столь же значительными являются различия числа резонансов, отнесенных к s- и p-волнам.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице (в барнах):

| Оценка | БРОНД-2 | JEFF-3.1 | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Экспер.[06M] |
|--|---------|----------|-----------|------------|--------------|
| полное | 5.06 | 5.87 | 7.89 | 6.46 | |
| упругое | 4.43 | 4.09 | 5.65 | 5.76 | |
| захвата | 0.636 | 1.78 | 2.24 | 0.695 | < 4 |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | 15.3 | 32.96 | 18.2 | 18.4 | 17±5 |

Так как измерена только верхняя граница сечения захвата тепловых нейтронов, то разногласия в оценках тепловых сечений оказываются значительными, но для резонансного интеграла захвата оценки согласуются с экспериментом в пределах существующей погрешности (исключая JEFF-3.1).

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки БРОНД-2, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Очевидно, что в БРОНД-2 многие p-резонансы неоправданно отнесены к s-резонансам. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов в JENDL-3.3 соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0=270$ эВ и для p-резонансов – $D_1=222$ эВ. Отношение D_0/D_1 при этом сильно отличается от статистической оценки отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, что свидетельствует о больших погрешностях идентификации угловых моментов резонансов. Более достоверным с этой точки зрения представляется разделение s- и p-резонансов в ENDF/B-VII.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов ENDF/B-VII в диапазоне энергий до 6.8 кэВ пропущено от 7-9 резонансов и в наборе p-резонансов пропущено около 14 резонансов. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, соответственно равны $D_0=(300 \pm 40)$ эВ и $D_1=(130 \pm 10)$ эВ. Отношение $D_0/D_1=2.31 \pm 0.35$ не отличается сильно от статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов. Для нейтронных силовых функций с учетом пропуска резонансов получены значения $S_0=(.40 \pm .10) 10^{-4}$ и $S_0=(9.8 \pm 1.5) 10^{-4}$, которые согласуются с анализом кумулятивной сумм приведенных нейтронных ширин (рис. 2). В аналогичном анализе, представленном в последнем издании атласа нейтронных резонансов [06M], были получены значения средних расстояний между резонансами $D_0=(302 \pm 75)$ эВ и $D_1=(149 \pm 15)$ эВ и нейтронных силовых функций $S_0=(.43 \pm .18) 10^{-4}$ и $S_0=(11.4 \pm 2.0) 10^{-4}$, которые отличаются от результатов настоящего анализа, главным образом, несколько большими значениями погрешностей.

На рис. 4 и 5 оценки показано сравнение оценок БРОНД-2, JENDL-3.3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII для полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов. приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Так как все оценки основаны на единственном имеющемся наборе резонансных параметров [85M, 86M], то разногласия между ними обусловлены лишь выбором границ резонансной области. Согласно проведенному выше анализу, верхнюю границу разрешенных резонансов, принятую в ENDF/B-VII, следует признать оптимальной при имеющихся неопределенностях идентификации угловых моментов резонансов, и она была включена без изменений в новую оценку БРОНД-3.

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в JEFF-3.1 принята равной 50 кэВ, и в рассмотрение включены независимые от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В БРОНД-2 принята верхняя граница 160 кэВ и зависящие от энергии средние параметры резонансов. В JENDL-3.3 использован аналогичный подход, но принята более низкая верхняя граница - 100 кэВ. В ENDF/B-VII, также как в CENDL-3, для неразрешенных резонансов принята оценка JENDL-3.3 без каких-либо изменений. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений во всех оценках использована одноуровневая формула Брейта-Вигнера.

Нейтронные силовые функции S_0 , S_1 , S_2 и радиусы потенциального рассеяния во всех оценках были выбраны на основе расчетов по оптической модели, средние радиационные ширины приняты в соответствии с результатами анализа разрешенных резонансов и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов [86M]. Для энергии нейтронов 50 кэВ приняты следующие значения параметров:

| Оценка | R_s фм | D_0 эВ | S_0 10^{-4} | S_1 10^{-4} | S_2 10^{-4} | $\Gamma_\gamma(s\&d)$ мэВ | $\Gamma_\gamma(p)$ мэВ |
|-----------|-------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|---------------------------|
| JEFF-3.1 | 7.100 | 317.0 | .750 | 4.60 | .750 | 179 | 216 |
| БРОНД-2 | 6.720 | 313.1 | .440 | 4.45 | 1.10 | 90.3 | 196 |
| JENDL-3.3 | 6.734 | 376.6 | .370 | 5.48 | .360 | 200 | 200 |

Различия в выборе радиационных ширин и значений D_0 в значительной степени компенсируются при подгонке расчетных сечений к одним и тем же экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов [85M]. В то же время, различия в нейтронных силовых функциях непосредственно проявляется в полных нейтронных сечениях.

На рис. 4 и 5 показано сравнение оценок полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов. Все оценки в пределах погрешности описывают имеющиеся экспериментальные данные по радиационному захвату нейтронов [85M]. Разногласия между оценками также невелики для полных нейтронных сечений, исключая, возможно, JEFF-3.1, которая кажется несколько завышенной. Однако при отсутствии экспериментальных данных по полным нейтронным сечениям трудно обосновать предпочтение какой-либо из имеющихся оценок.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что оптимальный выбор верхней границы разрешенных резонансов сделан в ENDF/B-VII. Полученные при этом средние параметры резонансов с учетом погрешностей не расходятся существенно с параметрами, принятыми в JENDL-3.3 для области неразрешенных резонансов. Поэтому оценку ENDF/B-VII, включающую JENDL-3.3 для неразрешенных резонансов, можно рассматривать как оптимальное описание имеющейся совокупности экспериментальных данных во всей резонансной области, и она принята без изменений в новую оценку БРОНД-3.

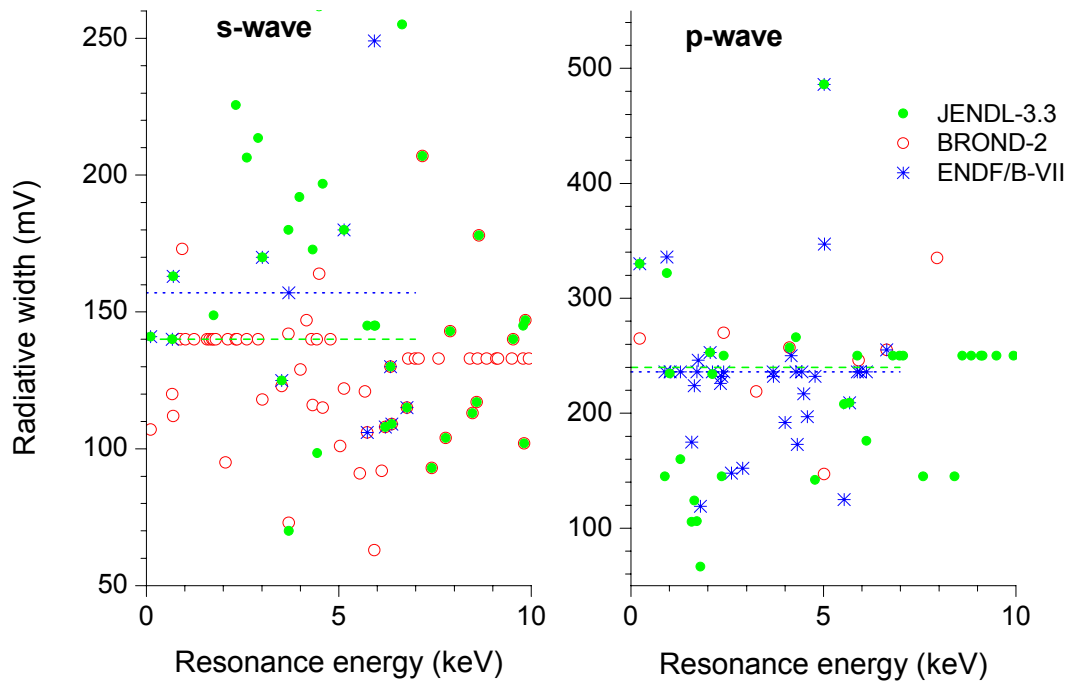


Рис. 1. Нейтронные ширины разрешенных резонансов в различных оценках, пунктиром показаны принятые средние значения ширин

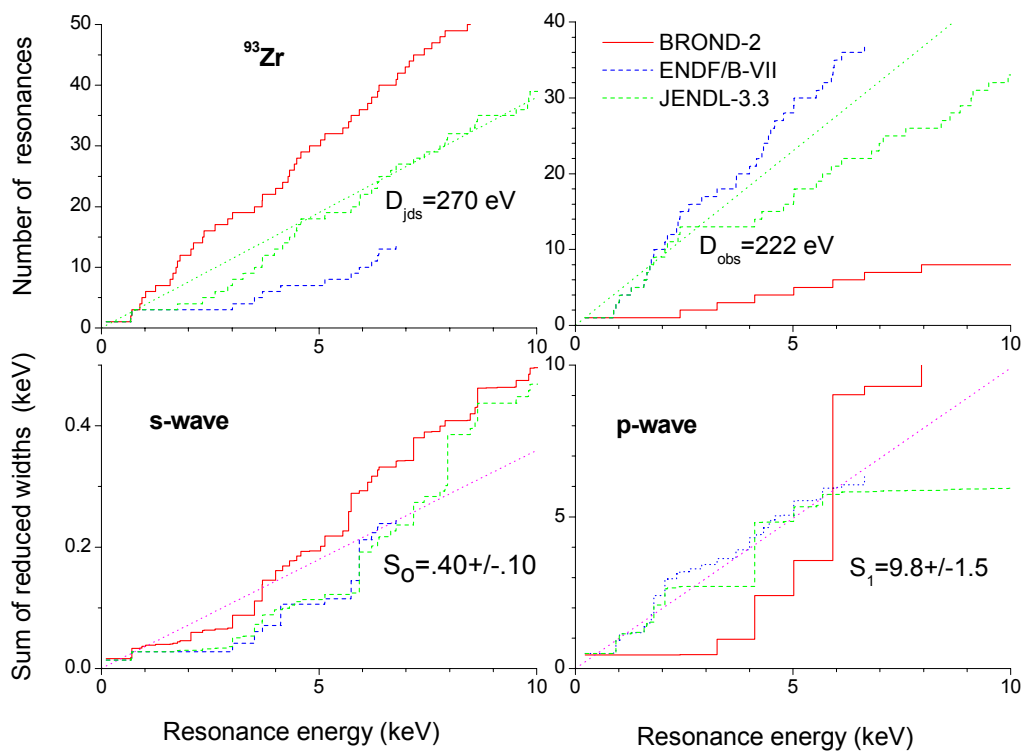


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII

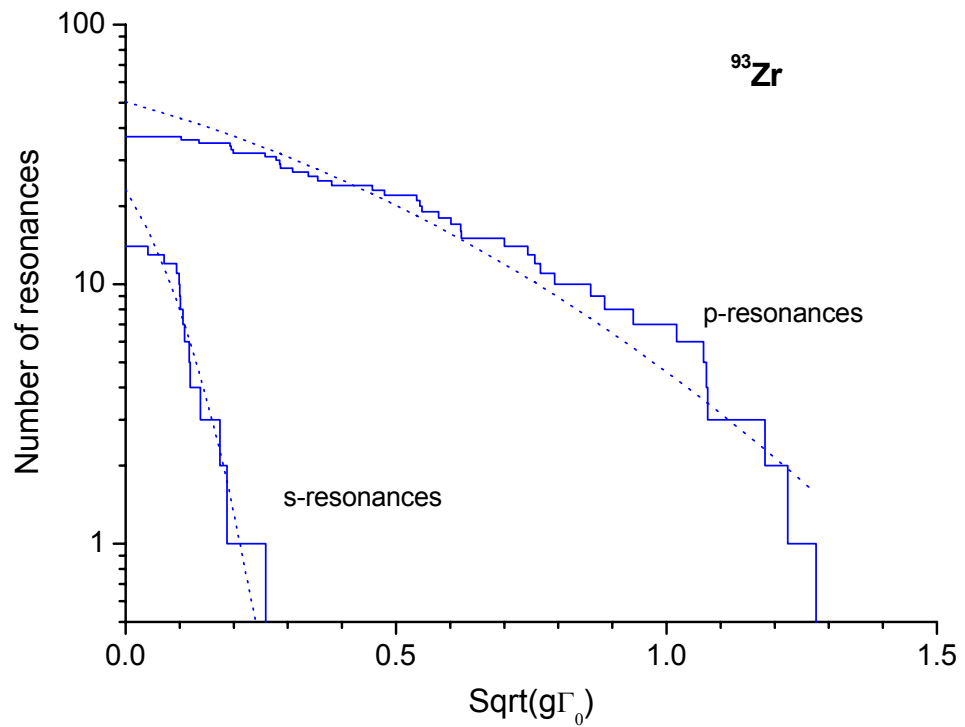


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов в наборе ENDF/B-VII. Пунктиром показаны теоретически ожидаемые распределения.

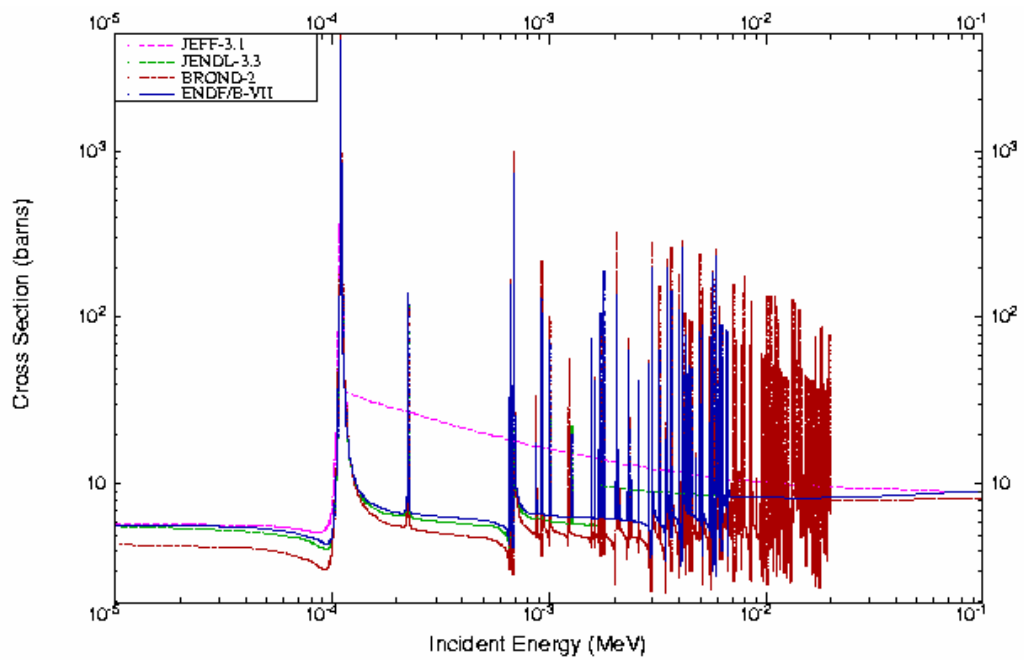


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов

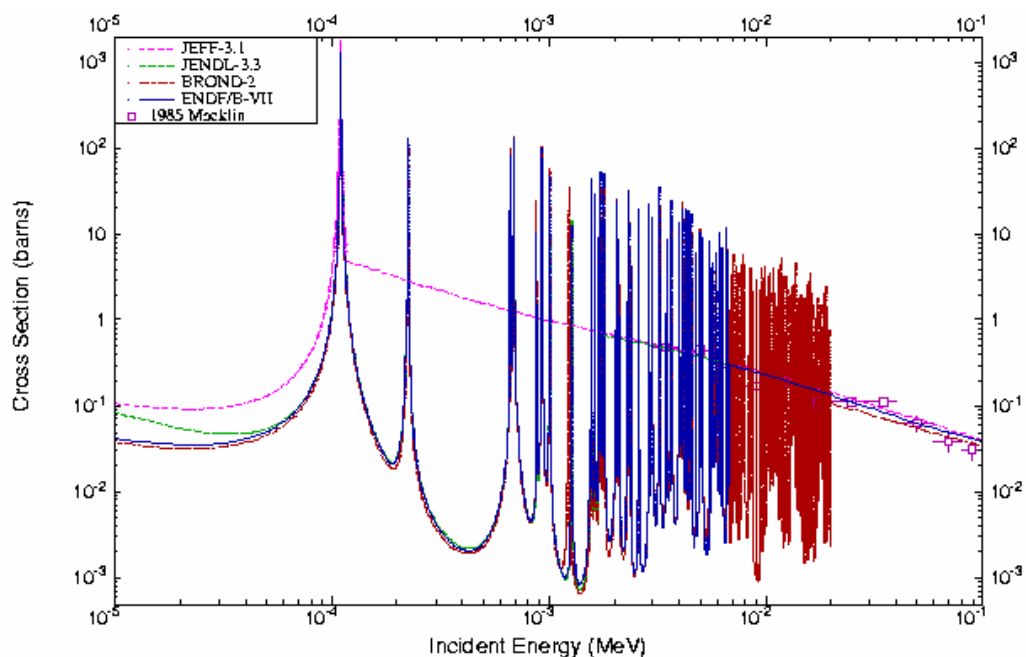


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области.

В данном разделе проведено сравнение оцененных данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII, и JENDL-3.3 вне резонансной области (0.01-20 МэВ). Сравнение с данными библиотеки JEFF-3.1 не проводилось. Для изотопов циркония в эту библиотеку приняты данные библиотеки JEFF-3.0, которые в свою очередь приняты из JEF2.2 (1992). Ниже дано сравнение данных ENDF/B-VII и JENDL-3.3 с оценкой БРОНД-3 совместно с кратким описанием оценки БРОНД-3. Это связано с тем, что авторы оценки БРОНД-3 по сравнению с оценками других авторов применили дополнительные эмпирические систематики и более корректные теоретические расчеты. Оценка всех сечений изотопов циркония выполнена в едином согласованном подходе. В частности, был оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния, использовались систематические тенденции в поведении функций возбуждения пороговых реакций в зависимости массового числа, применена несферическая оптическая модель.

Нейтронные сечения в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью модифицированной программы GNASH /96Yo/ с учетом флуктуации нейтронных ширин. Для нейтронов была использована модель сильной связи каналов (программа ECIS /91Ig/) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней, соответствующих мультиплетам $(3/2+\otimes 2+)$ и $(3/2+\otimes 3-)$.

Оптические параметры для нейтронов:

| Глубина потенциала (МэВ) | Диапазон энергии (МэВ) | Геометрия(фм) |
|--------------------------|------------------------|----------------------------|
| $V_r=49.0-0.28E$ | $0<E<20$ | $R_r=1.24 \quad a=0.62$ |
| $W_d=2.38+0.21E$ | $0<E<10$ | $R_d=1.26 \quad a=0.58$ |
| $W_d=5.39-0.091E$ | $10<E<20$ | |
| $W_v=0.0$ | $0<E<10.9$ | |
| $W_v=-0.0994+0.091E$ | $0.9<E<20$ | $R_v=1.24 \quad a=0.62$ |
| $V_{s0}=6.2$ | $0<E<20$ | $R_{s0}=1.12 \quad a=0.47$ |

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /01Ko/, /74Lo/ и /94Av/, соответственно.

Гамма-переходы рассчитывались для E1, M2 и E2 -силовых функций. Параметры гигантского резонанса E1 были взяты из работы /88Di/. Полная силовая функция была нормализована к имеющимся экспериментальным данным по радиационной ширине и D0 для нейтронного резонанса. Параметры дискретных уровней взяты из работы /95Fi/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 6 дано полное сечение Zr-93 вне резонансной области энергий нейтронов.

В области до 5 МэВ оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 практически совпадают. Выше оценка БРОНД-3 лежит ниже, но экспериментальных данных во всей области 1-20 МэВ нет, оцененные данные получены с помощью разных параметров оптического потенциала, поэтому трудно отдать предпочтение какой-либо из упомянутых оценок.

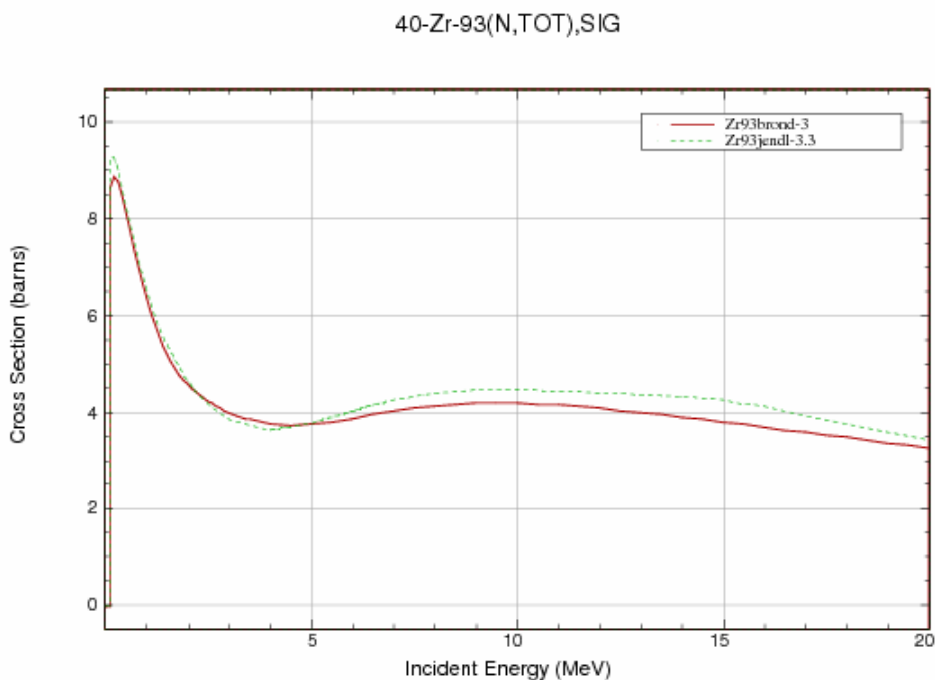


Рис. 6. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 7 показано сравнение оценок упругого рассеяния на изотопе Zr-93 библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3. Как видно, сечение упругого рассеяния в всей области энергий до 20 МэВ существенно различаются. Экспериментальных данных нет.

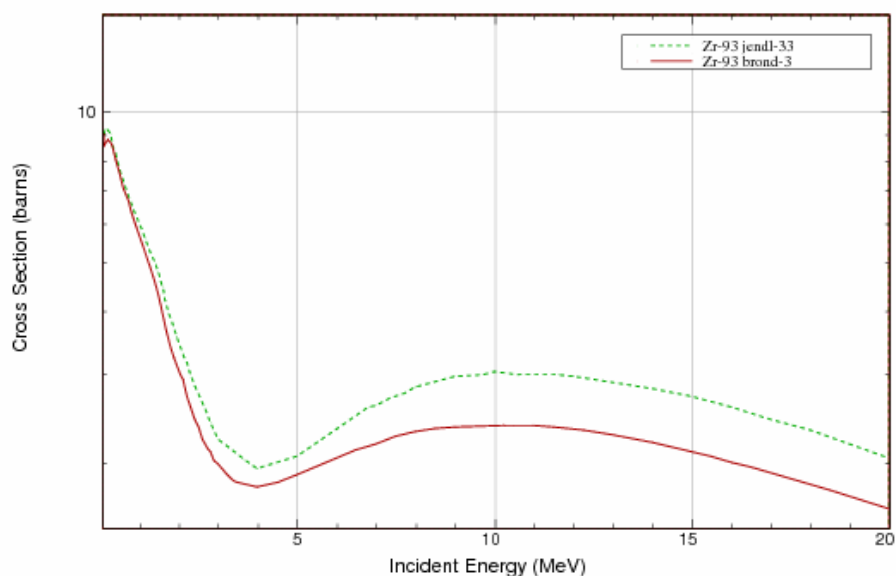


Рис.7. Сечение упругого рассеяния в области 0.01-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-71).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты, и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 2.200 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

| | Энергия уровня, МэВ | Спин | Переход | Энергия гамма-кванта, МэВ | Вероятность перехода, % |
|----|---------------------|------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 0 | 0.00000 | | | | |
| 1 | 0.26690 | 3/2+ | 1 → 0 | 0.26690 | 100 |
| 2 | 0.94710 | 1/2+ | 2 → 0 2 → 1 | 0.94710 0.68020 | 76.1 23.9 |
| 3 | 1.01800 | 1/2+ | 3 → 0 3 → 1 | 1.01800 0.75110 | 80 20 |
| 4 | 1.16860 | 1/2+ | 4 → 0 | 1.16860 | 100 |
| 5 | 1.22200 | 1/2+ | 5 → 0 5 → 1 | 1.22200 0.95510 | 80 20 |
| 6 | 1.42540 | 3/2+ | 6 → 0 6 → 1 | 1.42540 1.15850 | 89.05 10.95 |
| 7 | 1.45040 | 1/2+ | 7 → 0 7 → 1 | 1.45051 1.18350 | 87.2 12.8 |
| 8 | 1.46300 | 7/2+ | 8 → 0 8 → 1 8 → 2 | 1.46300 1.19610 0.51590 | 20.0 30.0 50.0 |
| 9 | 1.47010 | 1/2+ | 9 → 0 9 → 1 | 1.47010 1.2033 | 37.9 62.1 |
| 10 | 1.59800 | 7/2+ | 10 → 0 10 → 1 | 1.598000 1.33110 | 20.0 40.0 |

| | | | | | |
|----|---------|------|--------------------------------------|--|---------------------------|
| | | | 10 → 2 | | 40.0 |
| 11 | 1.64200 | 1/2+ | 11 → 0 11 → 1 | 1.64200 0.65090 | 40.0 60.0 |
| 12 | 1.73500 | 5/2+ | 12 → 0 12 → 1 | 1.73500 1.46810 | 50.0 50.0 |
| 13 | 1.90960 | 1/2+ | 13 → 1 13 → 2 | 1.64271 0.96232 | 81.3 18.7 |
| 14 | 1.91860 | 1/2+ | 14 → 1 14 → 2 | 1.65172 0.97100 | 77.5 22.5 |
| 15 | 2.02588 | 9/2- | 15 → 1 15 → 9 | 2.02500 0.55490 | 30.0 70.0 |
| 16 | 2.04000 | 7/2+ | 16 → 2 16 → 7 | 1.09290 0.58960 | 30.0 70.0 |
| 17 | 2.04700 | 9/2+ | 17 → 0 17 → 2 17 → 6 | 2.04700 1.09990 0.6216 | 10.0 20.0 70.0 |
| 18 | 2.07500 | 9/2+ | 18 → 0 18 → 2 18 → 8 | 2.07500 1.12790 0.62200 | 20.0 20.0 60.0 |
| 19 | 2.07800 | 7/2+ | 19 → 0 19 → 1 19 → 9 | 2.07800 1.81110 0.60790 | 10.0 50.0 40.0 |
| 20 | 2.09470 | 1/2+ | 20 → 1 | 1.82780 | 100 |
| 21 | 2.18460 | 1/2+ | 21 → 0 21 → 1 21 → 2 21 → 9 | 2.18460 1.91780 1.23740 0.71440 | 8.9 88.4 1.7 1.0 |
| 22 | 2.20000 | | | | |

Экспериментальных данных по интегральному сечению неупругого рассеяния нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII рассчитаны на основе сферической оптической моделей ядерных реакций и практически совпадают. Данные BROND-3 лежат существенно выше, что объясняется использованием другой программы для расчета (модифицированной программы GNASH) и параметров несферической оптической модели. Учитывая более корректный подход в расчетах по программе GNASH интегральное сечение неупругого рассеяния из библиотеки BROND-3 предпочтительнее. Оценка BROND-3 согласована с более приемлемой функцией возбуждения реакции (n,2n)(см. рис. 12) и с величиной вклада прямых процессов при энергии 20 МэВ (200-300 мб). На рисунке приведена также зависимость сечения из CENDL-3, которая существенно лучше согласуется с оценкой БРОНД-3.

На рис. 8-10 показаны функции возбуждения неупругого рассеяния на первых двух уровнях, экспериментальных данных нет.

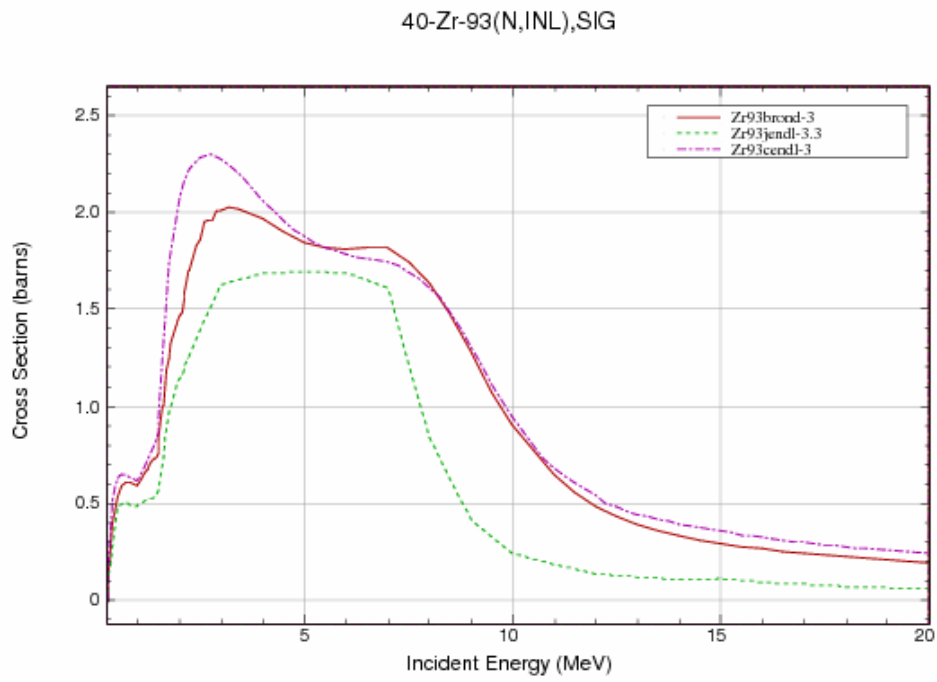


Рис.8. Интегральное сечение неупругого рассеяния Zr-93.

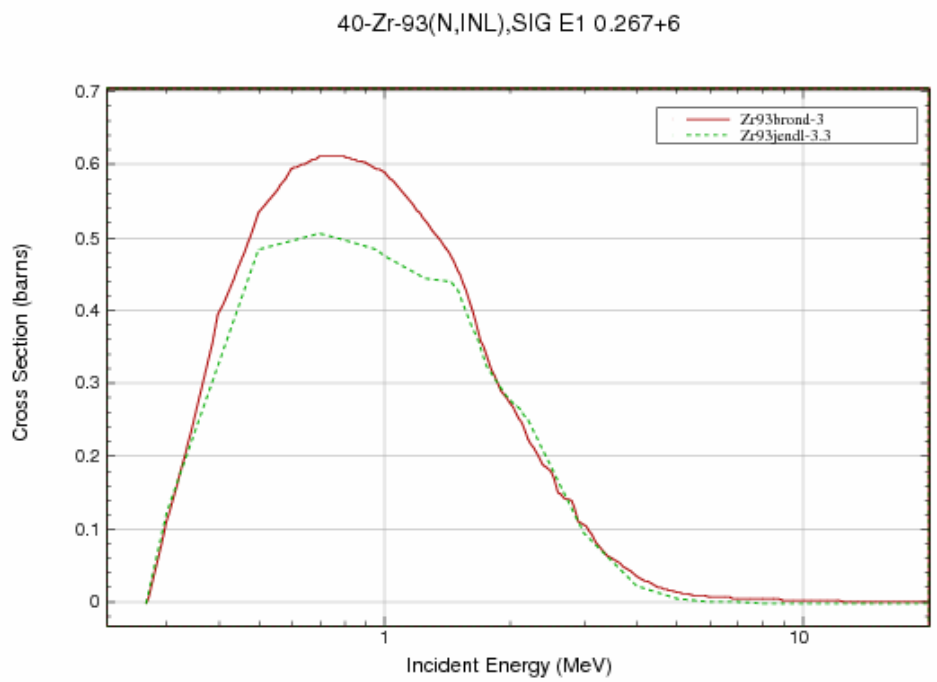


Рис.9. Функция возбуждения первого уровня с энергией 0.2670 МэВ.

40-Zr-93(N,INL),SIG E1 0.947+6

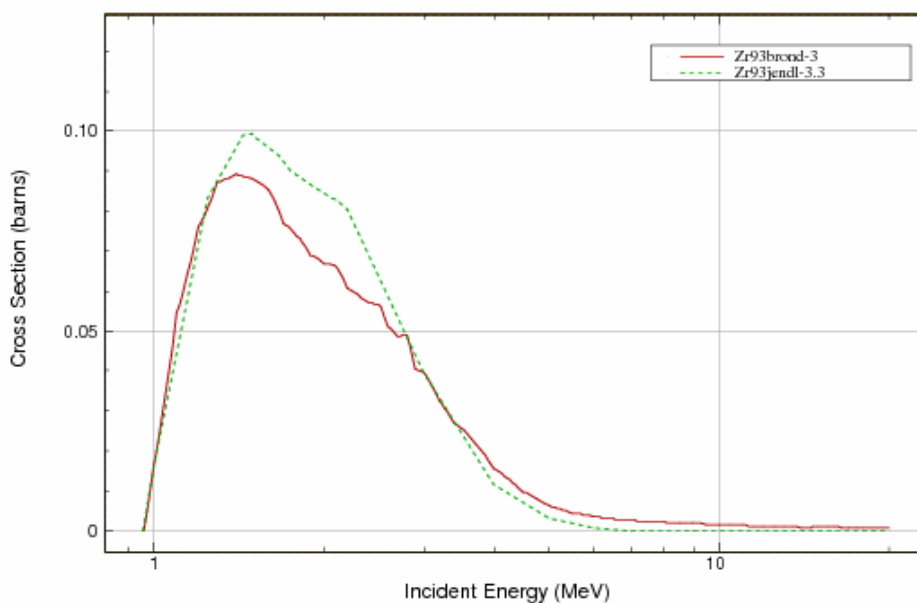


Рис.10. Функция возбуждения второго уровня с энергией 0.9471 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.1-20 МэВ сечение радиационного захвата в файле Zr-93 библиотеки БРОНД-3 рассчитано с учетом полупрямого механизма в области гигантского резонанса. Расчеты согласованы с экспериментальными данными работы /4/. Во всей области выше 0.01 МэВ данные BROND-3 и JENDL-3.3 близки, однако в оценке JENDL-3.3 пр энергии 6-9 МэВ в сечении имеется необъяснимый провал, поэтому рекомендуется сечение BROND-3.

40-Zr-93(N,G),SIG

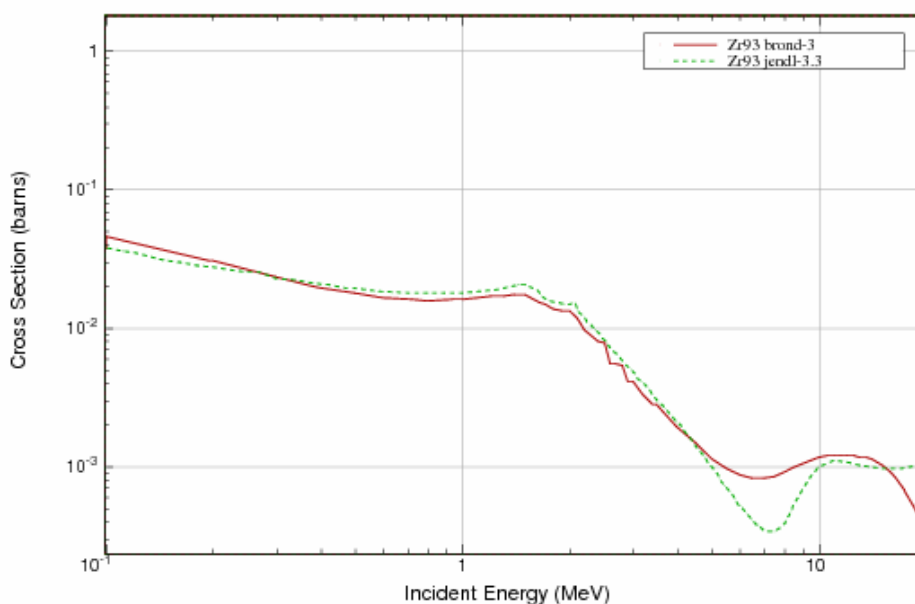


Рис. 11. Сечение радиационного захвата в области 0.1-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

На рис. 12 представлено сечение реакции (n,2n) библиотек JENDL-3.3 и BROND-3. Оценка JENDL-3.3 существенно не согласуется по форме зависимости с эмпирической систематикой функций возбуждения указанной реакции [97Ma]. Рекомендуется оценка БРОНД-3, согласованная с систематикой и с другими рекомендованными сечениями также из БРОНД-3. Сечение реакции (n,3n) (рис. 13) в библиотеке JENDL-3.3 неоправданно завышено. Следует принять сечение из БРОНД-3.

Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6 и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

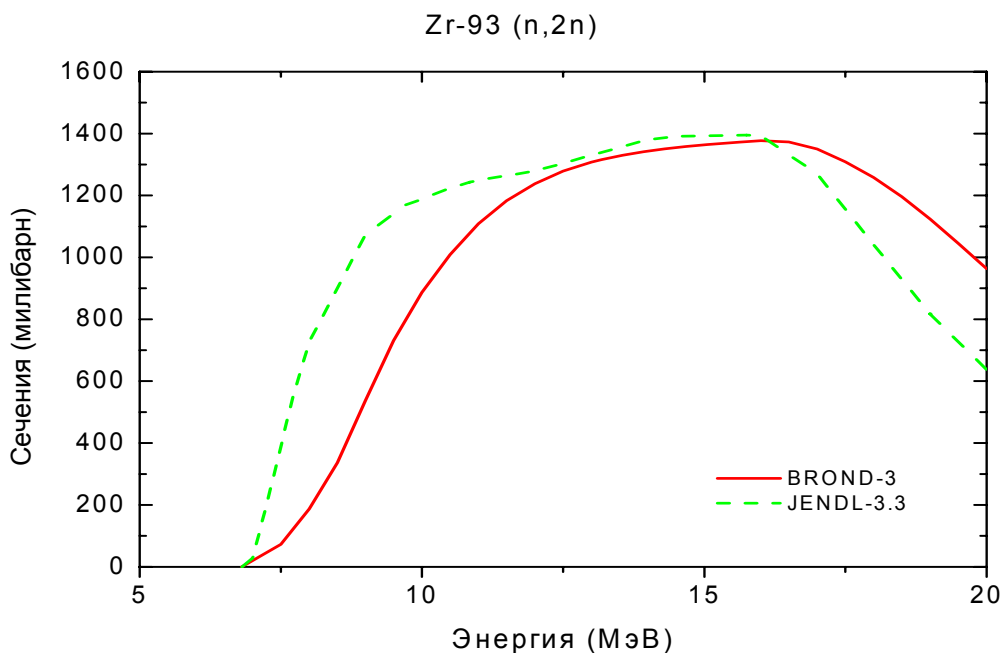


Рис. 12. Сечение реакции (n,2n).

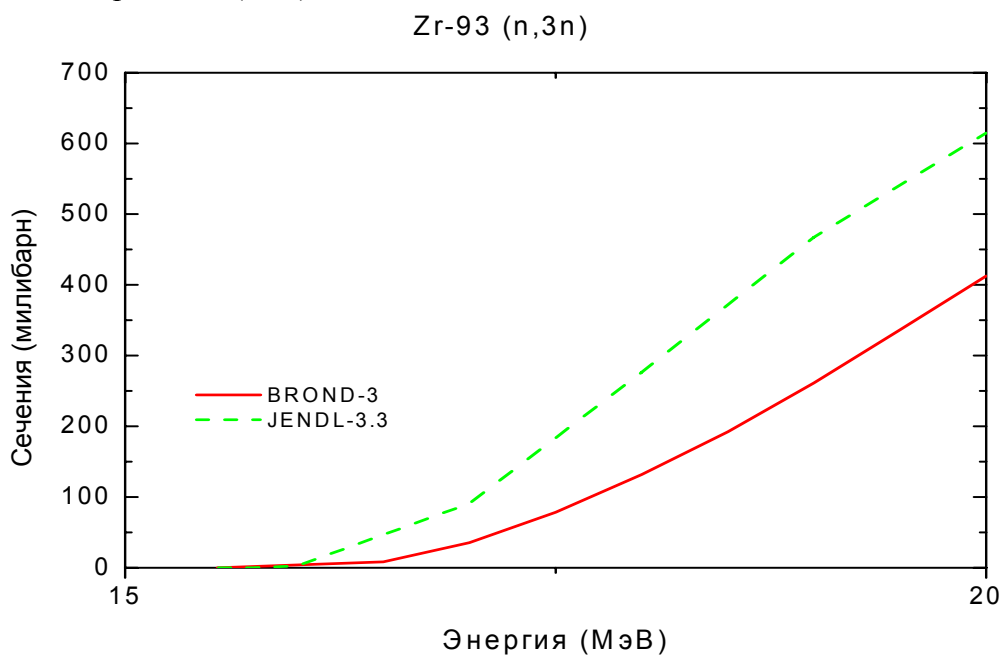


Рис. 13. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104,105 и 107):

На рис. 14 показано сечение реакции $^{92}\text{Zr}(n,p)$. Экспериментальных данных нет. Оцененные данные библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII примерно равноценны.

На рис. 15 дано сечение реакции $^{93}\text{Zr}(n,d)$. Оценка БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лучше соответствует эмпирической тенденции поведения этой реакции.

Сечение реакции $^{93}\text{Zr}(n,t)$ библиотеках BROND-3 и ENDF/B-VII принято из JENDL-3.3.

На рис.16 представлено сечение реакции $^{93}\text{Zr}(n,a)$. Рекомендуется оценка из БРОНД-3, поскольку она лучше согласуется с эмпирическими систематиками.

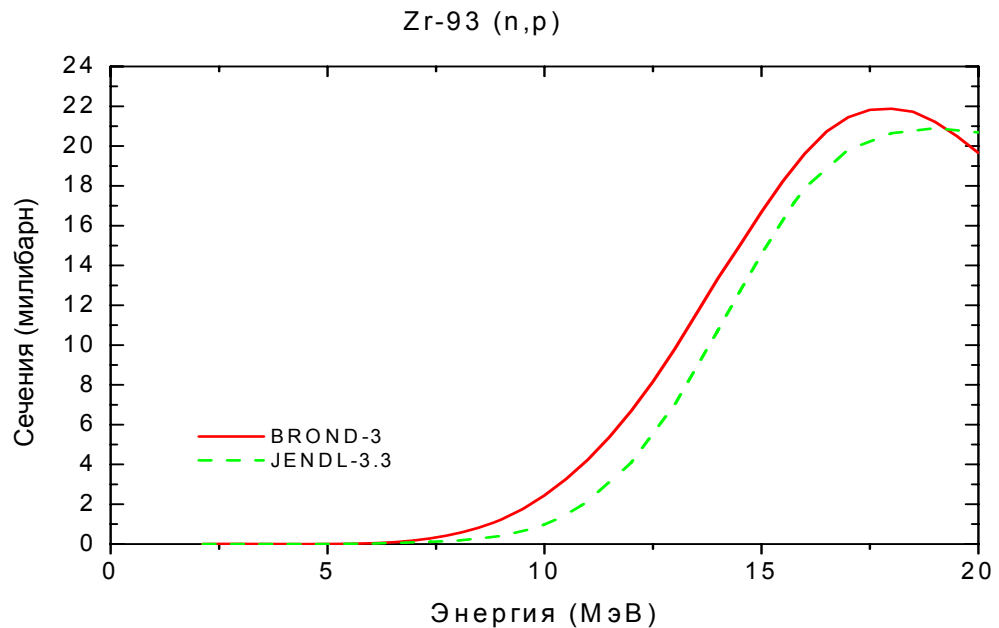


Рис. 14. Сечение реакции (n,p)

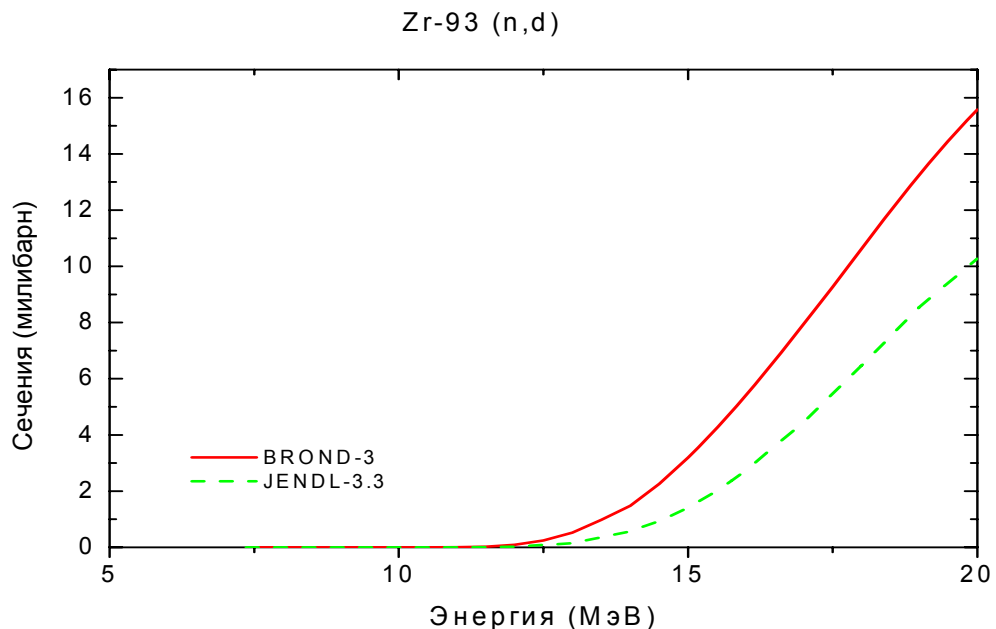


Рис.15. Сечение реакции (n,d).

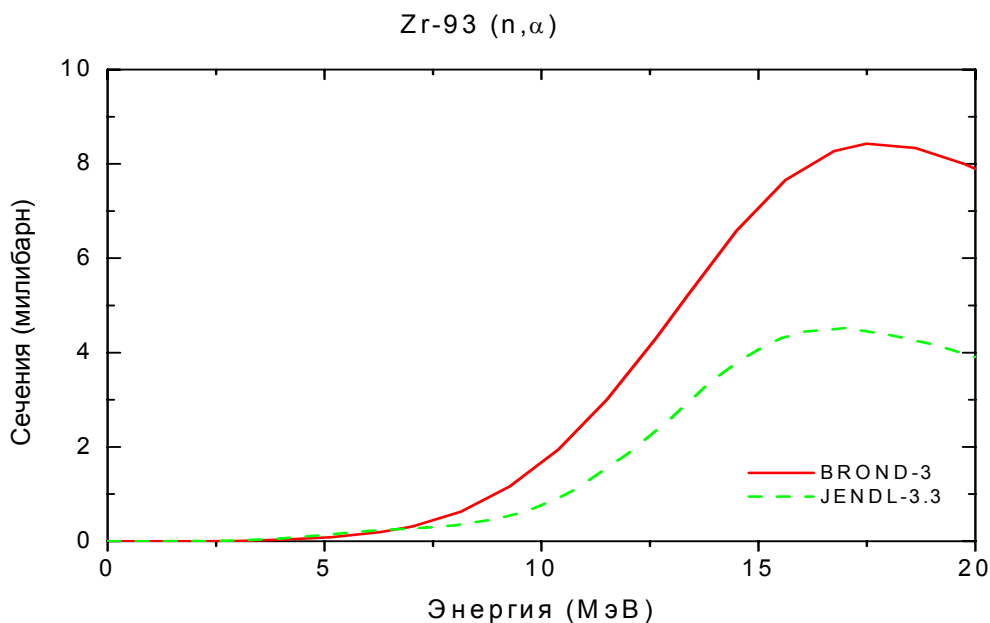


Рис. 16. Сечение реакции (n,α)

3.7. Реакции (n,nα), (n,np) (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. Оценки реакций (n,nα) и (n,np) в файле Zr-93НД-3 основаны на расчетах по программе GNASH. Разногласия оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

На рис. 17 дано сечение реакции $^{93}\text{Zr}(n,np)$. Оцененные данные библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 примерно равноценны. На рис.18 дано сечение реакции $^{93}\text{Zr}(n,na)$. Рекомендуется функция возбуждения из библиотеки БРОНД-3, так как она согласуется с сечением реакции (n,α) и с систематикой реакции (n,na).

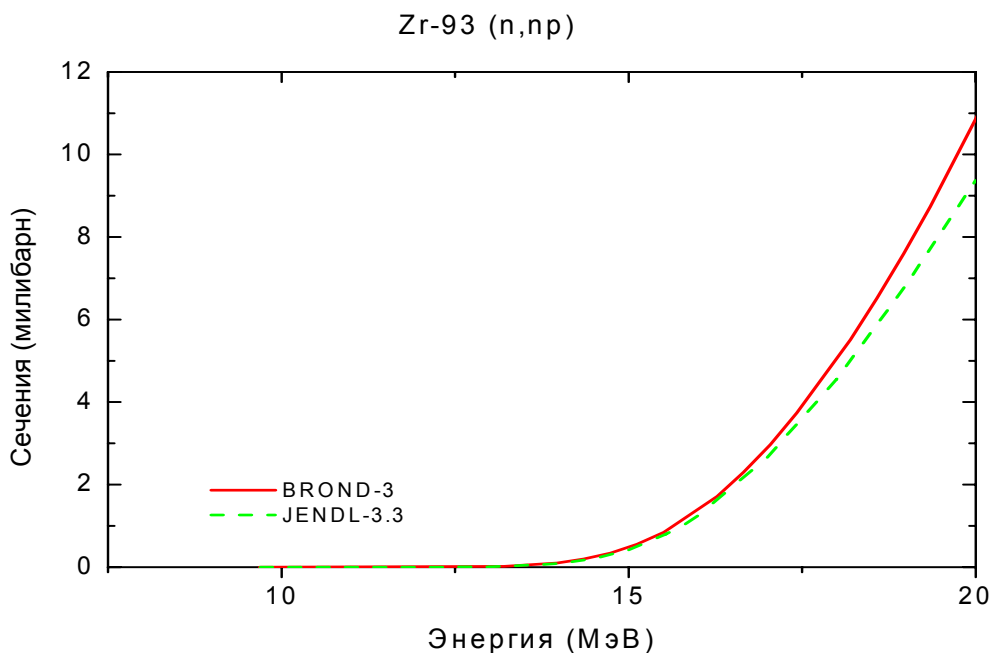


Рис. 17. Сечение реакции (n,np).

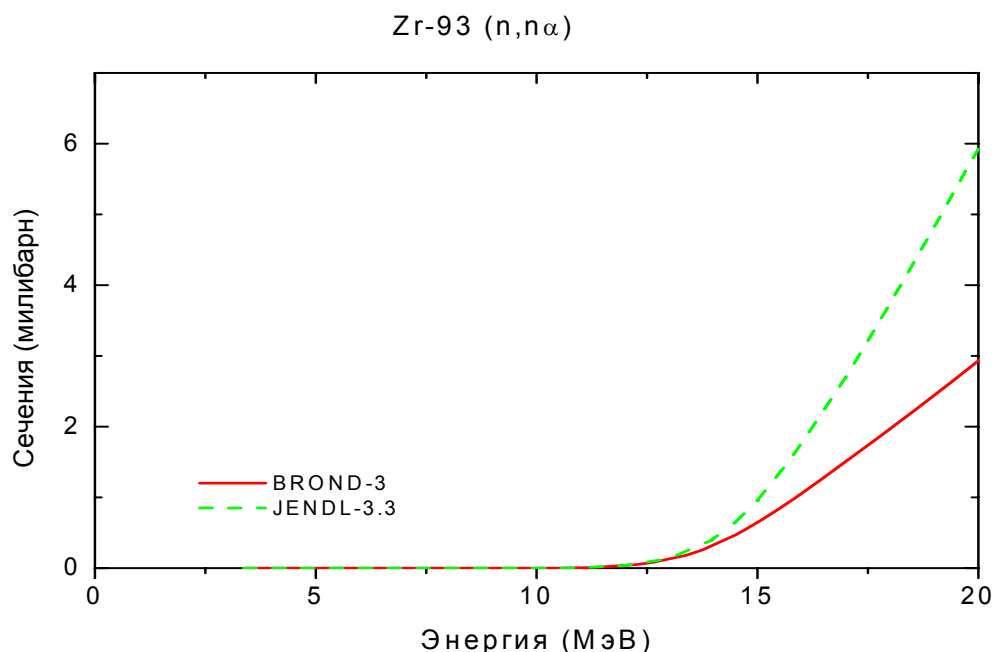


Рис. 18. Сечение реакции (n,n α).

MF=4. Угловые распределения вторичных нейтронов.

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/91Ig/.

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gashy /91Ig/ и Dwuck.

MF=5 Энергетические распределения вторичных нейтронов

MT=16,17,22, 28,91 Энергетические распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3.

Они основаны на систематике работы /90Ku/

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка БРОНД-3 является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить в РОСФОНД файл оцененных данных для Zr-93 из БРОНД-3.

Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

References

06Mu Mughabghab S.F.: Atlas of Neutron Resonances, Academic Press, NY,

- 2006 (5-th edition of BNL-325).
- 01Ko Koning,A.J., Dalaroche,J.P. Contribution to 3_th RCM of
RIPPLE-2, Vienna, 2001.
- 98Ri RIPPLE-2. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034,
Vienna, 1998.
- 97Ma Manokhin,V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin,V.N., Blokhin,A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear
Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
- 96Yo Young,P.G., Arthur,E.D., Chadwick,M.B.: In "Nuclear Reaction
Data and Nuclear Reactors" (Triest,1996). Eds. A.Gordini,
G.Reffo., World Science, Singapore, 1988,V.1,p.206.
- 95Fi Firestone,R.B. Table of Isotopes, Eight Edition,V.2, New York,1995.
- 94Av Avrigeanu,V., Hodgson,P., Avrigeanu,M. Phys.Rev.C49(1994)2136
- 91Ig Igarasi, S. and Fukahori, T.: JAERI 1321 (1991).
- 90Ku Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
- 90Ya Yamamuro, N.: JAERI-M 90-006 (1990).
- 88Di Dietrich,S.S., Berman,B.L. Atomic data and Nuclear data
Tables 38(1988)199.
- 86Ki Kikuchi, Y. et al.: JAERI-M 86-030 (1986).
- 86Ma Macklin, R.L. et al.: Nucl. Sci. Eng., 92, 525 (1986).
- 85Ma Macklin, R.L. : Astrophys. Space Sci., 115, 71 (1985).
- 81Mu Mughabghab, S.F. et al.: "Neutron Cross Sections, Vol. I,
Part A", Academic Press (1981).
- 80Ar Arthur E.D. Nucl.Sci.Eng. 76(1980)137.
- 75Ho Hofman, H. et alL., Ann. Phys. 90(1975)403.
- 74Lo Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
- 70Ra Raynal,J.: Report IAEA SMR-9/8(1970),p.281.
- 68Bo Bollinger, L.M. and Thomas, G.E.:Phys. Rev., 171,1293(1968).

40.7. Цирконий-94

1. Общие характеристики

1.1. $Z=40$

1.2. $A=94$

1.3. $A_w=93.09961$

1.4. Содержание в естественной смеси: 17.38

1.5. Перечень нейтронных реакций:

| MT | Реакция | Q, МэВ | Епор, МэВ | Ядро-продукт |
|-----|--------------|----------|-----------|--------------|
| 51 | (n,n') | -0.9187 | 0.9286 | Zr-94 |
| 16 | n,2n | -8.2195 | 8.3078 | Zr-93, |
| 17 | n,3n | -14.9542 | 15.1097 | Zr-92 |
| 22 | n,n α | -3.7504 | 3.7907 | Sr-90 |
| 28 | n,np | -10.3123 | 10.4230 | Y-93 |
| 102 | n, γ | 6.4630 | | Zr-94 |
| 103 | n,p | -4.1380 | 4.1824 | Y-94 |
| 104 | n,d | -8.0877 | 8.1746 | Y-93 |
| 105 | n,t | -9.3300 | 9.4293 | Y-92 |
| 107 | n, α | 2.0302 | | Sr-91 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.5 Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках БРОНД-2 и JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мухабхабом и др. [81M] на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию и радиационному захвату нейтронов [69B, 76B]. Верхняя граница резонансной области принята равной 30 кэВ в БРОНД-2 и 53.5 кэВ в JENDL-3.3, и радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 7.1$ фм и 7.2 фм, соответственно. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в CENDL-3, JEFF-3.1. В недавней оценке ENDF/B-VII параметры резонансов были взяты теми же, что в JENDL-3.3, но верхняя граница была увеличена до 90 кэВ и параметры отрицательного резонанса были изменены, чтобы получить более высокое значение сечения рассеяния тепловых нейтронов [06M].

Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| Оценка | БРОНД-2 | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Эксперимент [03Mu] |
|--|---------|-----------|------------|--------------------|
| полное | 5.877 | 6.202 | 8.662 | |
| упругое | 5.827 | 6.152 | 8.612 | |
| захвата | .050 | .050 | .050 | .0499 \pm 0.0024 |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | .324 | 0.311 | .309 | .27 \pm .03 |

В пределах погрешности все оценки согласуются с измеренными сечениями радиационного захвата тепловых нейтронов, но существенно расходятся в оценке полных сечений и сечений упругого рассеяния, для которых нет каких-либо экспериментальных данных. Причины увеличения этих сечений в ENDF/B-VII не ясны. Резонансный интеграл захвата нейтронов в БРОНД-2 кажется несколько завышенным по сравнению с экспериментальным значением и остальными оценками.

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 1 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки БРОНД-2 и JENDL-3.3 (=ENDF/B-VII), а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Обращает на себя внимание резкое увеличение при энергии 43.68 кэВ суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов в БРОНД-2, которое является следствием ошибки на порядок в ширине резонанса с указанной энергией.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа представлены на рис. 1. Данный анализ показывает, что в диапазоне энергий до 60 кэВ в наборе s-резонансов в JENDL-3.3, возможно, пропущено 1-2 резонанса и в наборе p-резонансов пропущено 5-7 слабых резонансов. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, равны $D_0=(4240 \pm 800)$ эВ и $D_1=(1190 \pm 80)$ эВ. Отношение $D_0/D_1=3.56 \pm 0.68$ не противоречит статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, но погрешность определения D_0 достаточно велика ввиду малого числа резонансов. Для нейтронных силовых функций в рамках данного анализа получены значения $S_0=(0.60 \pm 0.15) 10^{-4}$ и $S_1=(9.0 \pm 1.0) 10^{-4}$ для s- и p-резонансов, соответственно.

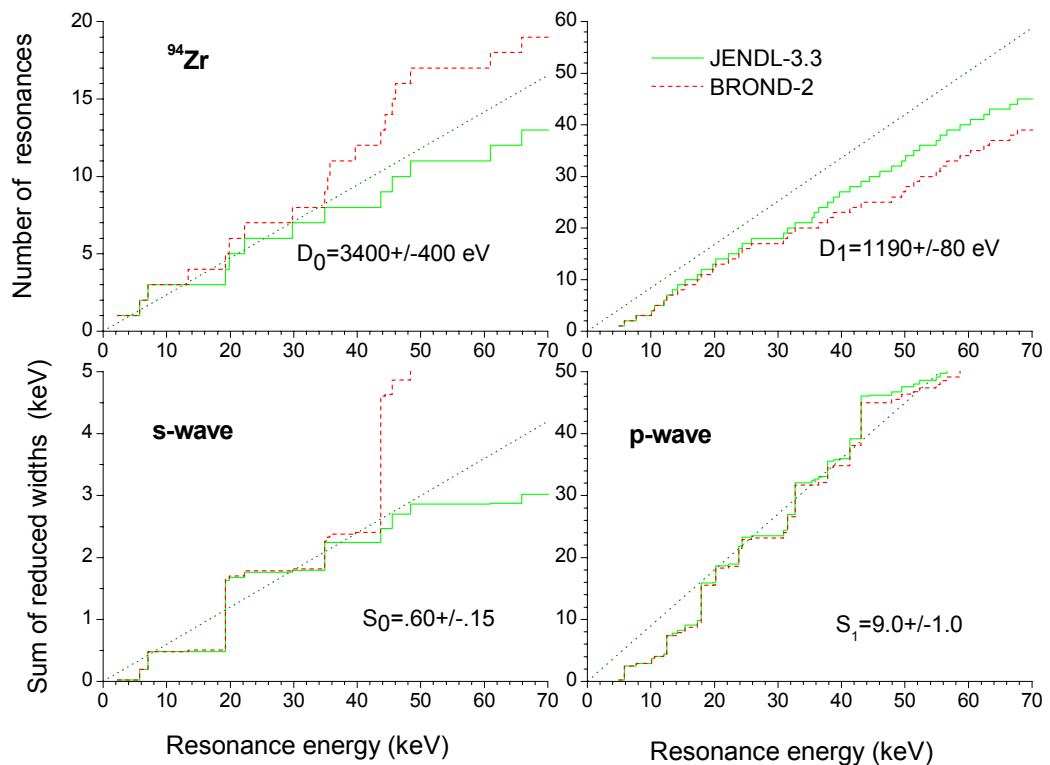


Рис. 1. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках БРОНД-2 и JENDL-3.3

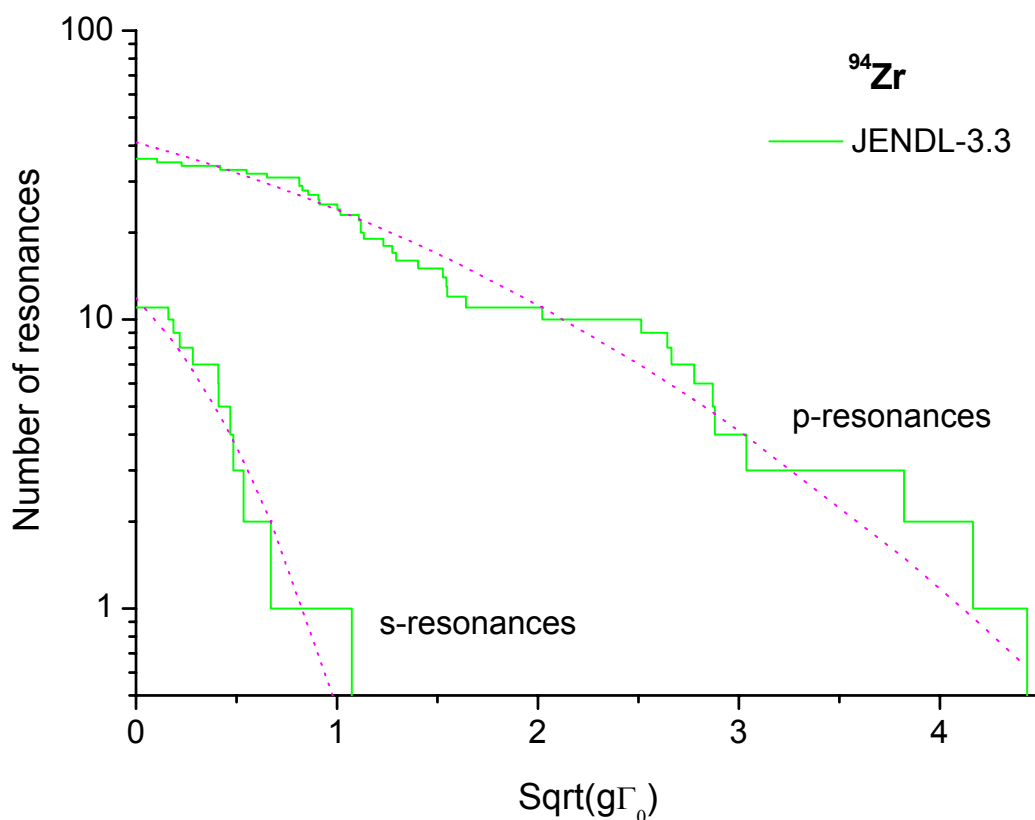


Рис. 2. Анализ пропуска s- и p-резонансов. Теоретически ожидаемые распределения показаны пунктиром.

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в БРОНД-2 принята равной 200 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В JENDL-3.3 использован аналогичный подход, но принята более низкая верхняя граница неразрешенных резонансов 100 кэВ. Оценка JENDL-3.3 для неразрешенных резонансов принята без каких-либо изменений в CENDL-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована одноуровневая формула Брейта-Вигнера.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [91]. Средняя радиационная ширина взята не зависящей от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов [^{76}Bo]. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.370\text{E-}4$, $S_1 = 5.50\text{E-}4$, $S_2 = 0.360\text{E-}4$, $Gg = 0.190$ эВ, $D_0 = 3558$ эВ, $R = 6.704$ ферми.

В БРОНД-2 было использовано аналогичное приближение, но средние радиационные ширины были приняты на основе статистического анализа параметров разрешенных резонансов и средние расстояния между резонансами было выбрано из условий оптимального описания наблюдаемых сечений радиационного захвата нейтронов. Для энергии нейтронов 70 кэВ приняты следующие значения параметров:

$S_0 = 0.49\text{E-}4$, $S_1 = 7.15\text{E-}4$, $S_2 = 0.80\text{E-}4$, $Gg = 0.135$ эВ для s- и 0.208 эВ для p-волны, $D_0 = 3642$ эВ, $R = 6.61$ ферми.

Различия в выборе радиационных ширин и значений $D0$ в значительной степени компенсируются при подгонке расчетных сечений к одним и тем же экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов [65Ka, 76B0].

На рис. 3 и 4 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Существенные отличия между оценками проявляются лишь ниже первого резонанса. Эти отличия обусловлены различиями нейтронных сечений для тепловых нейтронов и выбором соответствующих параметров отрицательного резонанса. В области неразрешенных резонансов все оценки практически совпадают. Учитывая значительный пропуск резонансов выше 60 кэВ, вряд ли можно признать оправданным расширение верхней границы разрешенных до 90 кэВ в ENDF/B-VII.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что основные отличия между оценками БРОНД-2, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII относятся к описанию сечений рассеяния тепловых нейтронов, для которых нет каких-либо экспериментальных данных. Учитывая отмеченные выше недостатки БРОНД-2 и ENDF/B-VII для разрешенных резонансов, в новой оценке БРОНД-3 была принята оценка JENDL-3.3 как для разрешенных, так и для неразрешенных резонансов. Без дополнительных экспериментальных данных в настоящее время не видно возможностей для уточнения этой оценки.

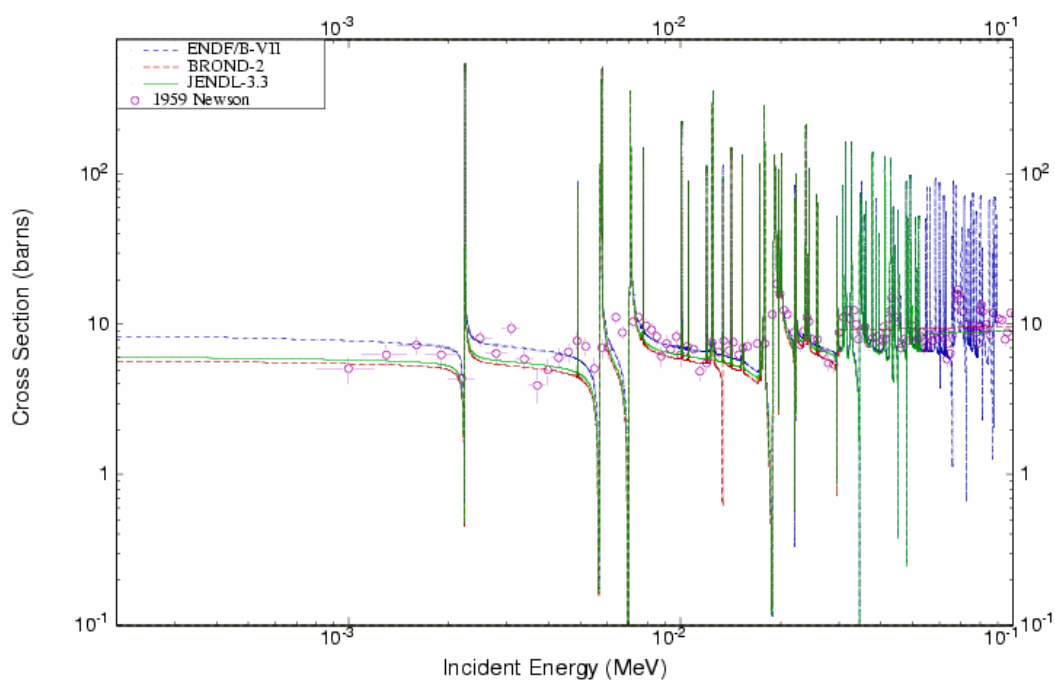


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

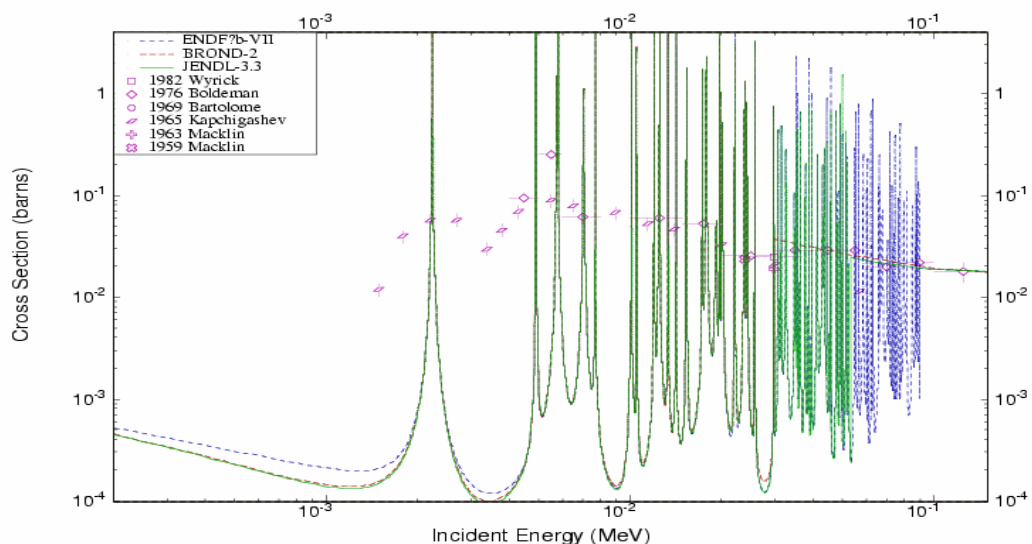


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области.

В данном разделе проведено сравнение оцененных данных библиотек БРОНД-3, ENDF/V-VII, и JENDL-3.3 вне резонансной области (0.01-20 МэВ). Сравнение с данными библиотеки JEFF-3.1 не проводилось, поскольку для изотопов циркония приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Ниже дано сравнение указанных библиотек совместно с кратким описанием оценки БРОНД-3. Это связано с тем, что авторы оценки БРОНД-3 по сравнению с оценками других авторов применили дополнительные эмпирические систематики и более корректные теоретические расчеты. Оценка всех сечений изотопов циркония выполнена в едином согласованном подходе. В частности, был оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния, использовались систематические тенденции в поведении функций возбуждения пороговых реакций в зависимости массового числа, применена несферическая оптическая модель.

Нейтронные сечения в диапазоне 0.1 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью модифицированной программы GNASH /96Yo/ с учетом флуктуации нейтронных ширин. Для нейтронов была использована модель сильной связи каналов (программа ECIS /70Ra/) с прямым возбуждением низколежащих уровней 2+ и 3-.

Оптические параметры для нейтронов:

| Глубина потенциала (МэВ) | Диапазон энергии (МэВ) | Геометрия(фм) |
|--------------------------|------------------------|----------------------------|
| $V_r=49.0-0.28E$ | $0<E<20$ | $R_r=1.24 \quad a=0.62$ |
| $W_d=2.38+0.21E$ | $0<E<10$ | $R_d=1.26 \quad a=0.58$ |
| $W_d=5.39-0.091E$ | $10<E<20$ | |
| $W_v=0.0$ | $0<E<10.9$ | |
| $W_v=-0.0994+0.091E$ | $0.9<E<20$ | $R_v=1.24 \quad a=0.62$ |
| $V_{so}=6.2$ | $0<E<20$ | $R_{so}=1.12 \quad a=0.47$ |

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /01Ko/, /74Lo/ и /94Av/, соответственно.

Гамма-переходы рассчитывались для E1, M2 и E2 -силовых функций. Параметры гигантского резонанса E1 были взяты из работы /88Di/. Полная силовая функция была нормализована к имеющимся экспериментальным данным по радиационной ширине и D0 для нейтронного резонанса. Параметры дискретных уровней взяты из работы /95Fi/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 6 дано полное сечение Zr-94 вне резонансной области энергий нейтронов. Оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают. Экспериментальные данные в области до 5 МэВ выглядят странно, а выше имеется только одна точка при 14 МэВ, поэтому трудно отдать предпочтение какой-либо из упомянутых оценок.

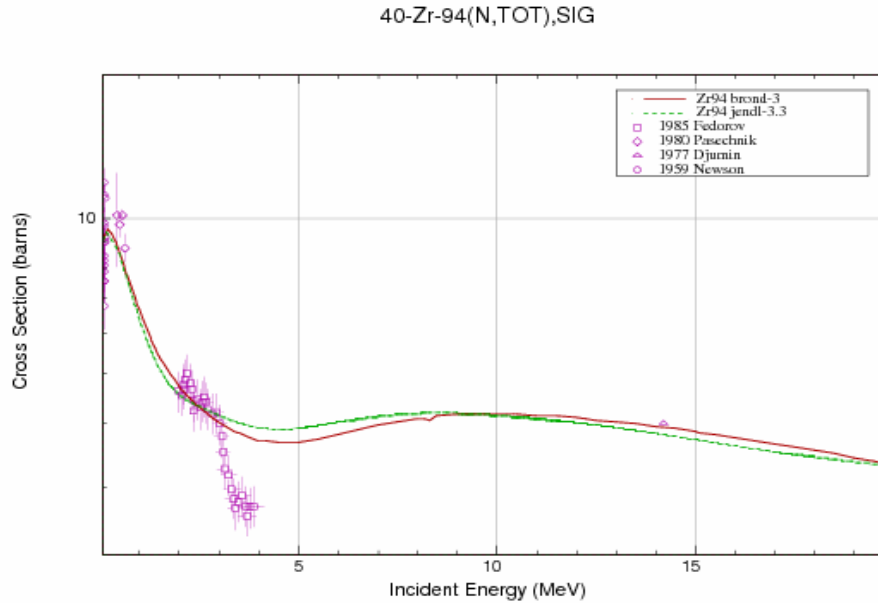


Рис. 6. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.01-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 7 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния на изотопе Zr-94. Сечение упругого рассеяния в области энергий до 1 МэВ в библиотеках ENDF/B-VII и JENDL-3.3 совпадают. В области энергий 2-10 МэВ данные BROND-3 лежат ниже, что связано с более низким сечением в этой области полного сечения (см. рис.4). По единственной экспериментальной точке достоверность любой из указанных оценок оценить трудно.

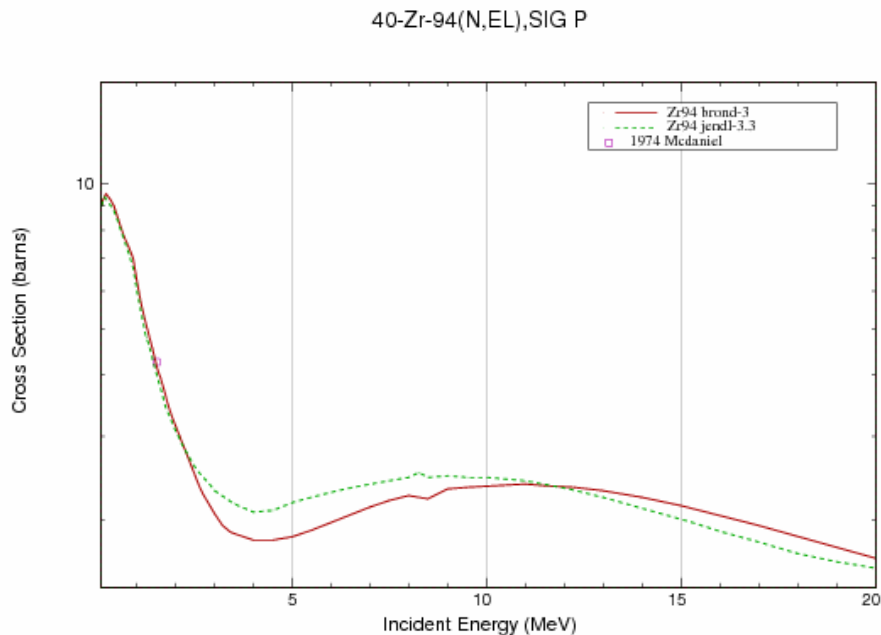


Рис.7. Сечение упругого рассеяния в области 0.1-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-69).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты, и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 2.9100 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

| N | Энергия уровня, МэВ | Спин | Переход | Энергия гамма-кванта, МэВ | Вероятность перехода, % |
|----|---------------------|------|----------------------------------|--|------------------------------|
| 0 | 0.00000 | | | | |
| 1 | 0.91870 | 2+ | 1 → 0 | 0.91874 | 100 |
| 2 | 1.30020 | 0+ | 2 → 0 2 → 1 | 1.30018 0.38157 | 0.4 99.6 |
| 3 | 1.46960 | 4+ | 3 → 1 | 0.55088 | 100 |
| 4 | 1.67140 | 2+ | 4 → 0 4 → 1 | 1.67141 0.75260 | 58.5 41.5 |
| 5 | 2.05760 | 3- | 5 → 1 5 → 3 | 1.13888 0.58800 | 97.3 2.7 |
| 6 | 2.15130 | 2+ | 6 → 1 | 1.23255 | 100 |
| 7 | 2.33020 | 4+ | 7 → 1 | 1.41146 | 100 |
| 8 | 2.36610 | 2+ | 8 → 1 8 → 2 8 → 4 8 → 5 | 1.44741 1.06634 0.69466 0.30822 | 33.3 9.5 51.9 5.3 |
| 9 | 2.40100 | 2+ | 9 → 0 9 → 4 9 → 5 9 → 6 | 2.40100 0.72960 0.34340 0.2497 | 35.5 12.0 25.0 27.5 |
| 10 | 2.50770 | 3+ | 10 → 1 10 → 4 | 1.58959 0.83607 | 87.0 13.0 |
| 11 | 2.60450 | 5- | 11 → 3 | 1.13498 | 100 |
| 12 | 2.69850 | 3- | 12 → 1 | 1.77970 | 100 |
| 13 | 2.71900 | 2+ | 13 → 0 13 → 8 | 2.71900 0.35290 | 43.0 57.0 |
| 14 | 2.76900 | 0+ | 14 → 0 14 → 2 | 2.76900 1.46880 | 50 50 |
| 15 | 2.82600 | 2+ | 15 → 4 | 1.15466 | 100 |
| 16 | 2.84630 | 1- | 16 → 0 16 → 1 | 2.84633 1.92756 | 90.1 9.9 |
| 17 | 2.86060 | 4+ | 17 → 3 | 1.39100 | 100 |
| 18 | 2.88820 | 4+ | 18 → 1 | 1.96942 | 100 |
| 19 | 2.90800 | 2+ | 19 → 0 19 → 1 | 2.90848 1.98937 | 21.2 18.2 |

| | | | | | |
|----|---------|--|--------|---------|------|
| | | | 19 → 4 | 1.23660 | 60.6 |
| 20 | 2.91000 | | | | |

Экспериментальных данных по интегральному сечению неупругого рассеяния нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII рассчитаны на основе сферической оптической моделей ядерных реакций и совпадают. Данные BROND-3 лежат существенно выше, что объясняется использованием другой программы для расчета (модифицированной программы GNASH) и параметров несферической оптической модели. Учитывая более корректный подход в расчетах по программе GNASH интегральное сечение неупругого рассеяния из библиотеки BROND-3 предпочтительнее. На рис. 9 показана функция возбуждения неупругого рассеяния на первом уровне. Экспериментальных данных также нет.

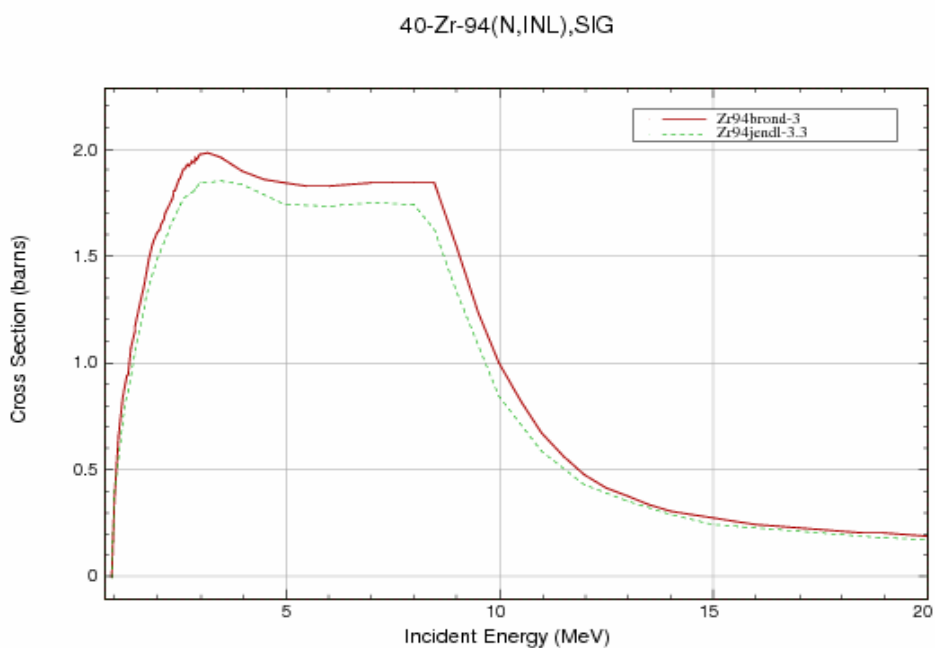


Рис.8. Полное сечение неупругого рассеяния Zr-94.

40-Zr-94(N,INL),SIG E1 0.919E+6

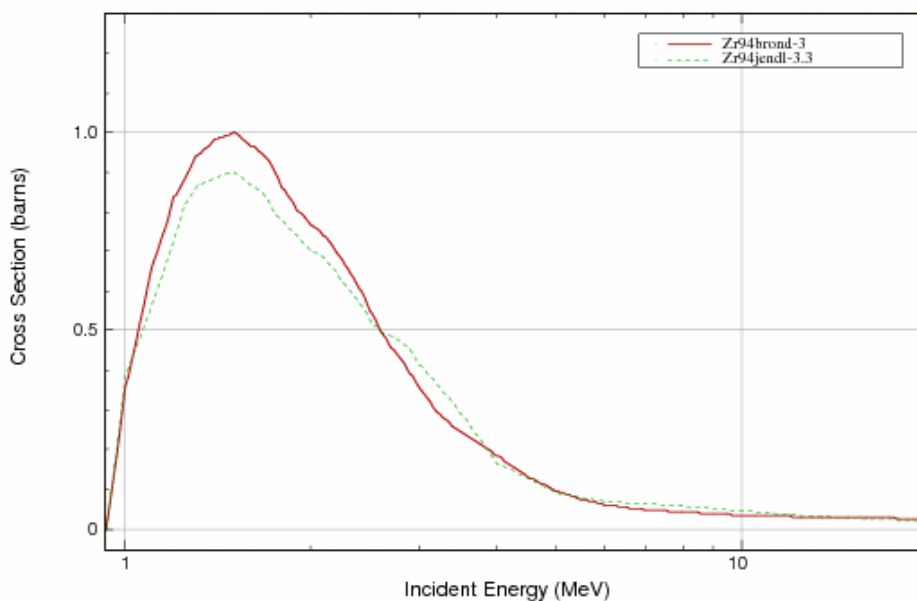


Рис. 9. Функция возбуждения первого уровня Zr-94c энергией 0.9187 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.1-20 МэВ сечение радиационного захвата в файле Zr-94 библиотеки БРОНД-3 рассчитано с учетом полупрямого механизма в области гигантского резонанса. В области выше 1 МэВ экспериментальных данных нет. В области выше 1 МэВ данные BROND-3 и JENDL-3.3 сильно различаются, но кривая БРОНД-3 выглядит предпочтительнее. Данные ENDF/B-VII взяты из JENDL-3.3.

40-Zr-94(N,G),SIG

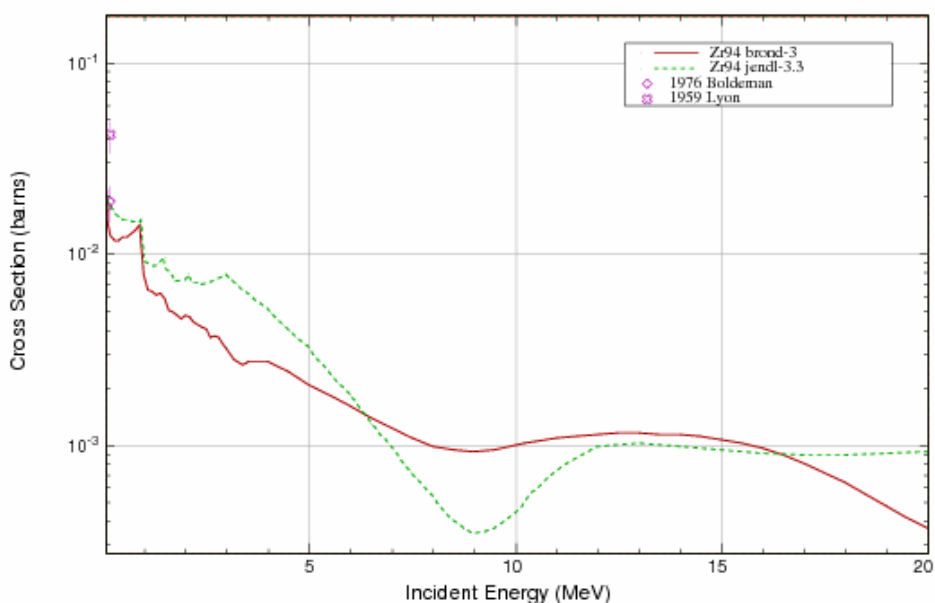


Рис. 10. Сечение радиационного захвата в области 0.1-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

На рис. 11 представлено сечение реакции (n,2n) библиотек JENDL-3.3 и BROND-3. Как видно, обе оценки близки и согласуются с эмпирической систематикой функций возбуждения указанной реакции [97Ma]. Могут быть рекомендованы данные обеих библиотек. На рис.11 даны оцененные сечения реакции (n,3n) из указанных библиотек. Оценки заметно различаются по абсолютной величине. Зависимость из БРОНД-3 лучше согласуется с систематикой сечений реакций (n,2n) и (n,3n).

Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6 и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

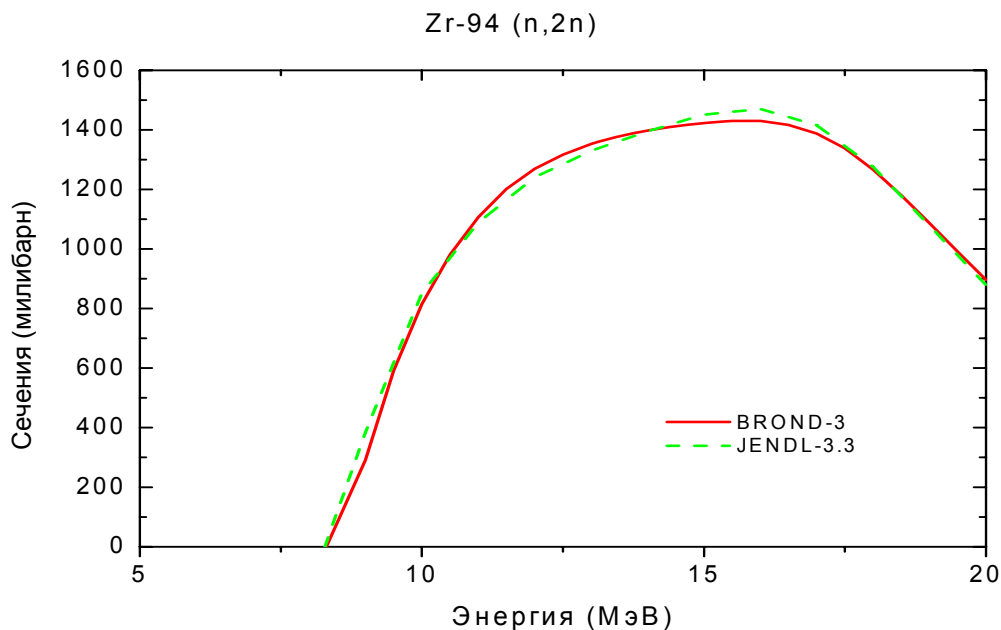


Рис. 11. Сечение реакции (n,2n). JENDL-3.3

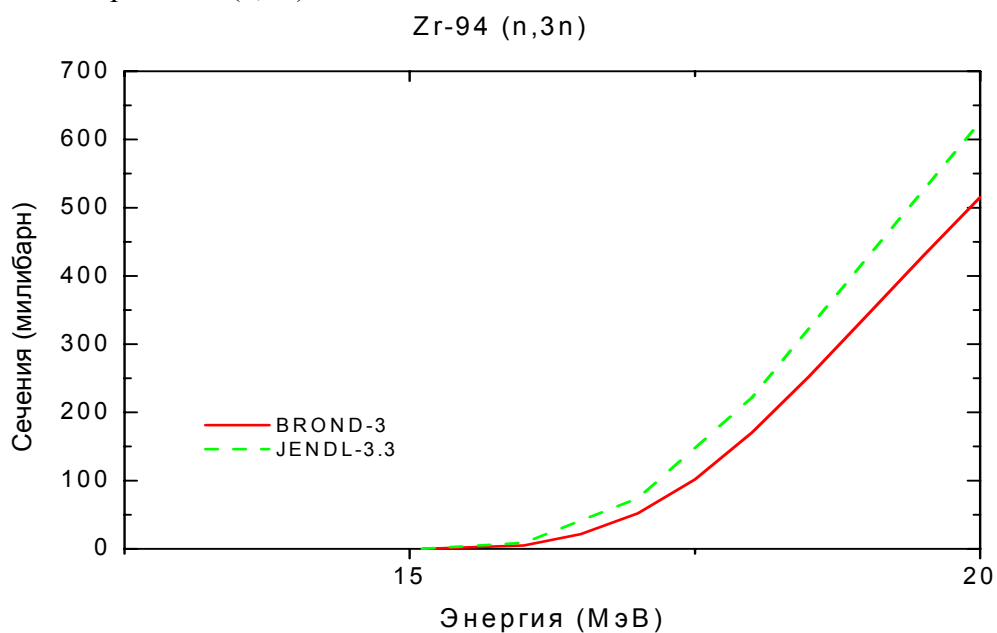


Рис. 11. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104,105 и 107):

На рис. 12 показано сечение реакции $^{94}\text{Zr}(n,p)$. Оцененные данные библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают. Оценке функции возбуждения из БРОНД-3 следует отдать предпочтение, она согласуется с систематикой сечений реакции (n,p) /15,16/ и с экспериментальными данными Икеды.

На рис. 13 дано сечение реакции $^{94}\text{Zr}(n,d)$. Данные библиотеки ENDF/B-VII приняты из библиотеки JENDL-3.3. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 реакции (n,d), получены расчетным путем. Оценка БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лежит выше, что лучше соответствует систематическим тенденциям в зависимости этой реакции.

Сечение реакции (n,t) принято в БРОНД-3 из JENDL-3.3.

На рис.14 представлено сечение реакции $^{94}\text{Zr}(n,\alpha)$. Оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают. Оценки JENDL-3.3 и БРОНД-3 близки и практически равнозначны.

Zr-94 (n,p)

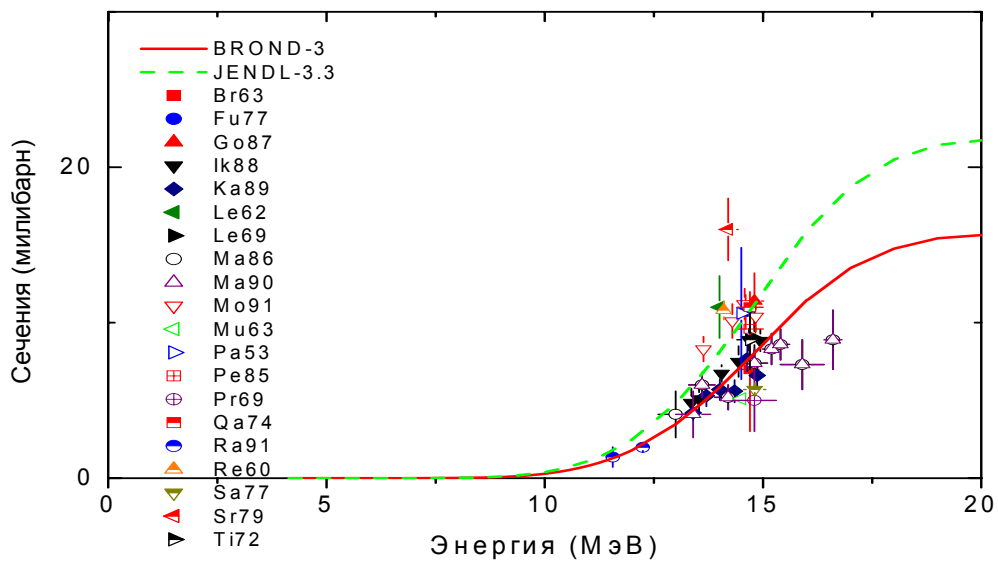


Рис. 12. Сечение реакции (n,p)

Zr-94 (n,d)

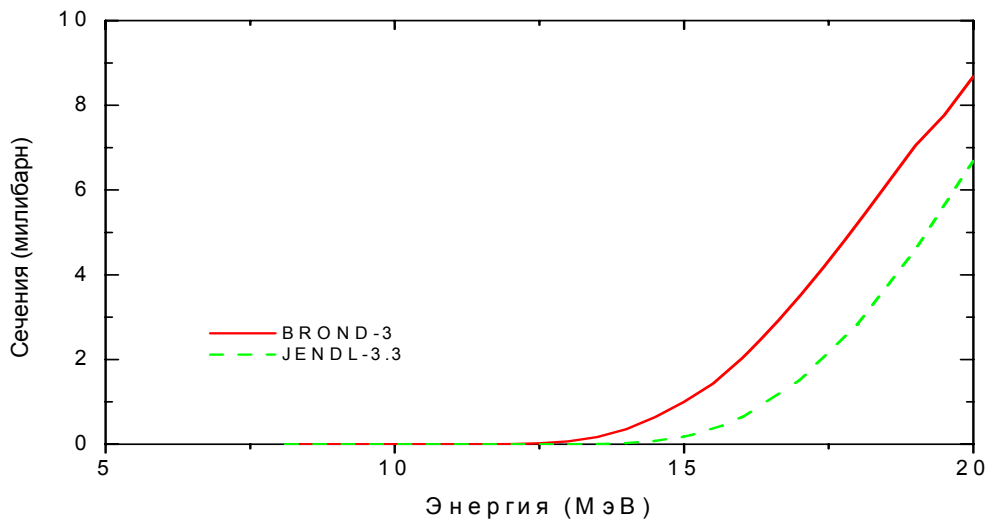


Рис.13. Сечение реакции (n,d).

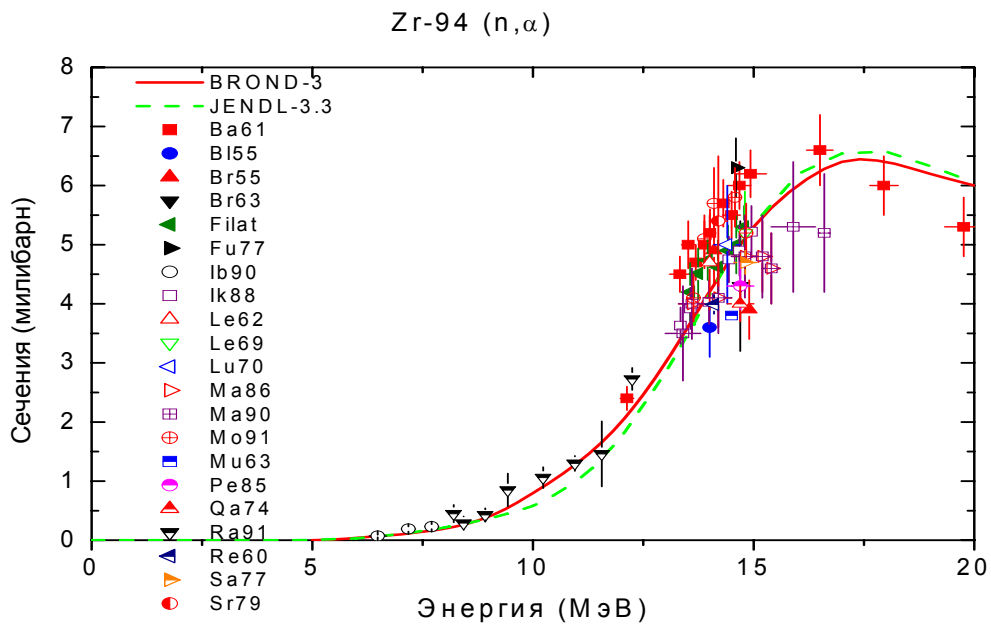


Рис. 14. Сечение реакции (n,α)

3.7. Реакции (n,nα), (n,np) (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет надежных экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. Оценки реакций (n,nα) и (n,np) в файле Zr-94 в БРОНД-3 основаны на расчетах по программе GNASH. Разногласия оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

На рис. 15 дано сечение реакции $^{94}\text{Zr}(n,np)$. Оцененные данные библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 примерно равноценны. На рис. 16 дано сечение реакции $^{94}\text{Zr}(n,na)$. В БРОНД-3 и JENDL-3.3. оценки близки, может быть рекомендована любая из них.

Спектры и угловые распределения нейтронов для рассматриваемых реакций представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6, и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

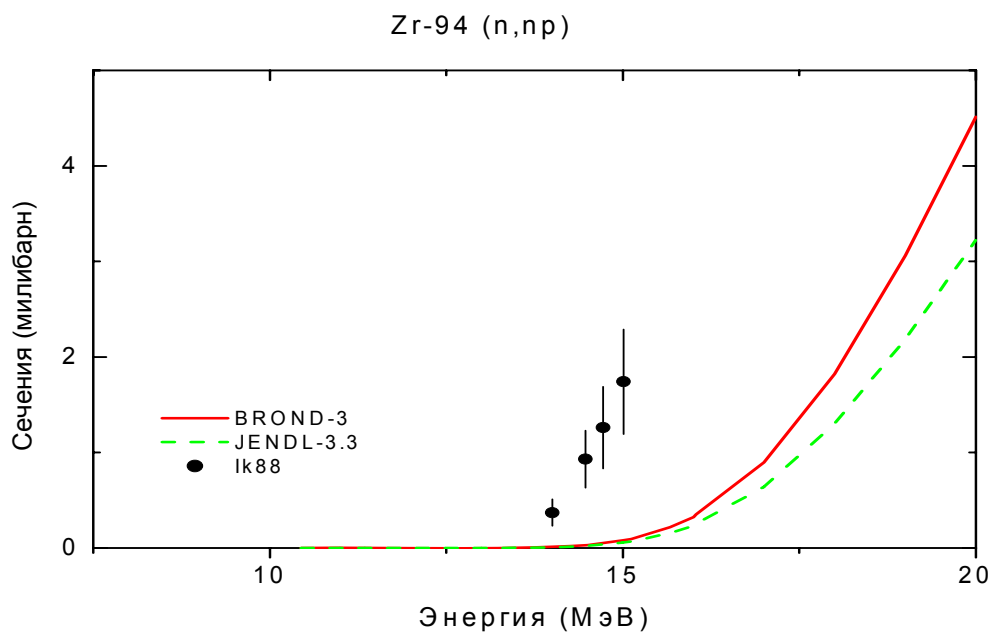


Рис. 15. Сечение реакции (n,np).

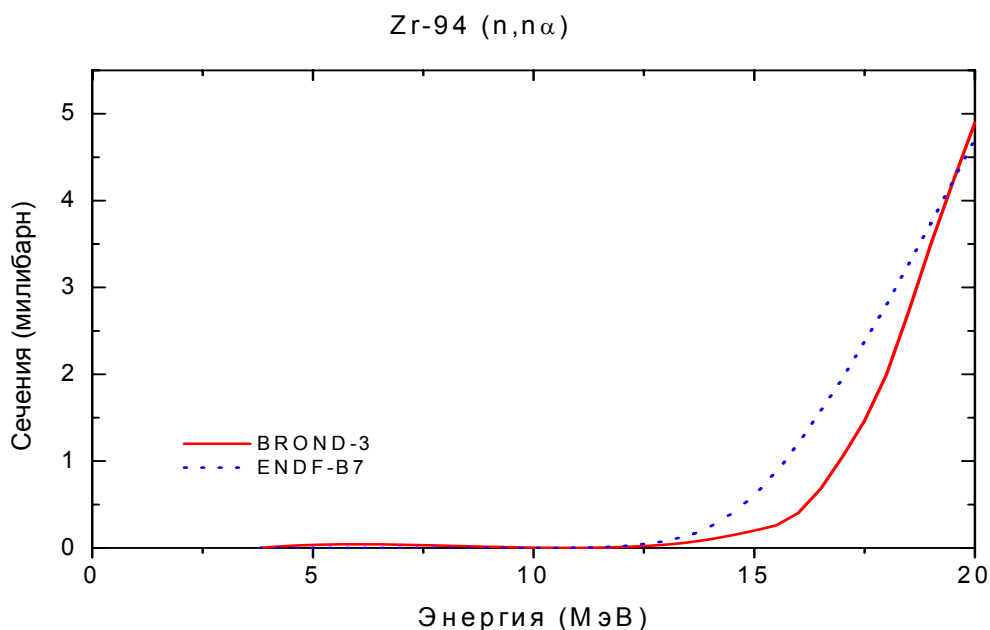


Рис. 16. Сечение реакции (n,n α).

MF=4. Угловые распределения вторичных нейтронов.

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/91Ig/.

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gashy/91Ig/ и Dwuck.

MF=6 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

MT=16,17,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /90Ku/

MF=12 Множественность образования гамма-лучей

MT=16,17,22, 28, 51-69,91,102,103,107 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH /96Yo/

MF=14 Угловые распределения гамма-лучей

MT=16,17,22, 28, 51-87,91,103,102,107, 102 Угловые распределения фотонов неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

MF=15 Непрерывные спектры гамма-лучей

MT= 16,17,22, 28, 91,103, 107 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, рассчитаны по программе EGNASH /90Ya/

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/91Ig/

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка БРОНД-3 является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. Уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить в РОСФОНД файл оцененных данных для Zr-94 из БРОНД-3.

Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

References

- 06M Mughabghab, S. Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY, 2006.
 03M. Mughabghab, S. Report INDC(NDS)-440, 2003.
 01Ko Koning, A.J., Dalaroche, J.P. Contribution to 3_{rd} RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
 98Ri RIPLE-2. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
 97Ma Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
 Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
 96Yo Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: In "Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors" (Trieste, 1996). Eds. A. Gordini, G. Reffo., World Science, Singapore, 1988, V.1, p.206.
 95Fi Firestone, R.B. Table of Isotopes, Eight Edition, V.2, New York, 1995.
 94Av Avrigeanu, V., Hodgson, P., Avrigeanu, M. Phys.Rev.C49(1994)2136
 91Ig Igarasi, S. and Fukahori, T.: JAERI 1321 (1991).
 90Ku Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
 90Ya Yamamuro, N.: JAERI-M 90-006 (1990).
 88Di Dietrich, S.S., Berman, B.L. Atomic data and Nuclear data Tables 38(1988)199.
 86Ki Kikuchi, Y. et al.: JAERI-M 86-030 (1986).
 81Mu Mughabghab, S.F. et al.: "Neutron Cross Sections, Vol. I, Part A", Academic Press (1981).
 80Ar Arthur E.D. Nucl.Sci.Eng. 76(1980)137.
 76Bo Boldeman, J.W. et al., Nucl. Phys. V. A269, 31 (1976).
 75Ho Hofman, H. et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
 74Lo Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
 70Ra Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8(1970), p.281.
 69Ba Bartolome, Z.M. et al., Nucl. Sci. Eng., v. 37, 137 (1969).
 65Ka Капчигашев, С.П., Ю.П.Попов. АЕ, т. 19, 294 (1965).

Сечение реакции N,D

| | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|----------|------------|------------------------|---------|----------------------|--|-------------|
| Haight81 | R.C.Haight | J, PR/C, 23, 700, 1981 | 10960 | 1.48+07 | | 1 |

Сечение неупругого рассеяния

| | | | | | | |
|----------|----------------|------------------------|-------|---------|---------|---|
| Filat99 | А.А.Филатенков | R, RI-252, 1999 | 41240 | 1.30+07 | 1.50+07 | 8 |
| Haight81 | R.C.Haight | J, PR/C, 23, 700, 1981 | 10960 | 1.48+07 | | 1 |

40.8. Цирконий-95

1. Общие характеристики

1.1. $Z=40$

1.2. $A=95$

1.3. $A_w=94.09273$

1.4. Радиоактивен ($T_{1/2}=64$ дн.). Испытывает бета-распад в ^{95}Nb , который, в свою очередь, распадается ($T_{1/2}=34.97$ дн.) в стабильный ^{95}Mo .

В реакторах образуется как продукт деления и в результате радиационного захвата нейтронов в цирконии-94.

1.5. Перечень нейтронных реакций:

| MT | Реакция | Q, МэВ | Епор, МэВ | Ядро-продукт |
|-----|--------------|----------|-----------|--------------|
| 51 | (n,n') | -0.9539 | 0.9640 | Zr-95 |
| 16 | n,2n | -6.4627 | 6.5314 | Zr-94 |
| 17 | n,3n | -14.6827 | 14.8354 | Zr-93 |
| 22 | n,n α | -4.4325 | 4.4796 | Sr-91 |
| 28 | n,np | -10.6006 | 10.7133 | Y-94 |
| 102 | n, γ | 7.8540 | | Zr-95 |
| 103 | n,p | -3.6633 | 3.7022 | Y-95 |
| 104 | n,d | -8.3760 | 8.4650 | Y-94 |
| 105 | n,t | -8.3130 | 8.4014 | Y-93 |
| 107 | n, α | 2.9099 | | Sr-92 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Для данного изотопа нет каких-либо экспериментальных данных о нейтронных сечениях, поэтому все оценки основаны на систематиках или теоретических расчетах тепловых сечений, плотности нейтронных резонансов или непосредственно самих сечений. В частности, в БРОНД-2 в резонансной области приведен только радиус потенциального рассеяния $R_0 = 5.5035$ фм, тогда как все сечения представлены в секции MF=3. В JENDL-3.3 принят радиус потенциального рассеяния 6.737 фм, и диапазон энергий 125 эВ – 100 кэВ представлен параметрами неразрешенных резонансов. В JEFF-3.1 принят радиус потенциального рассеяния 7.10 фм, и резонансные параметры искусственно смоделированы в области энергий до 3 кэВ, и диапазон энергий от 3 кэВ до 50 кэВ представлен параметрами неразрешенных резонансов. Оценка JENDL-3.3 включена без изменений в CENDL-3 и ENDF/B-VII.

Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| Оценка | БРОНД-2 | JENDL-3.3 | JEFF-3.1 |
|--|---------|-----------|----------|
| полное | 4.296 | 6.904 | 5.615 |
| упругое | 3.806 | 5.704 | 5.390 |
| захвата | .490 | 1.200 | .225 |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | 4.14 | 7.79 | 5.80 |

Можно видеть существенные различия всех сечений, но без экспериментальных данных нет оснований отдать предпочтение какой-либо из оценок.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели, и для энергии нейтронов 70 кэВ приняты следующие значения параметров: $S_0 = 0.370E-4$, $S_1 = 5.420E-4$, $S_2 = 0.360E-4$, $S_g = 8.03E-4$, $G_g = 0.200$ эВ, $R = 6.737$ ферми. На рис. 3 и 4 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для диапазона энергий до 100 кэВ. В области энергий выше 300 эВ оценки БРОНД-2 и JENDL-3.3 дают достаточно близкие значения как полных нейтронных сечений, так и сечений радиационного захвата нейтронов. Учитывая удовлетворительное согласие оценок БРОНД-2 и ENDF/B-VII в области неразрешенных резонансов и отсутствие каких-либо экспериментальных данных о нейтронных сечениях, в новую оценку БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3 для всего диапазона энергий до 100 кэВ. Введение неразрешенных резонансов обусловлено необходимостью анализа блокировки нейтронных сечений в резонансной области. Без дополнительных экспериментальных данных в настоящее время не видно возможностей для уточнения принятой оценки.

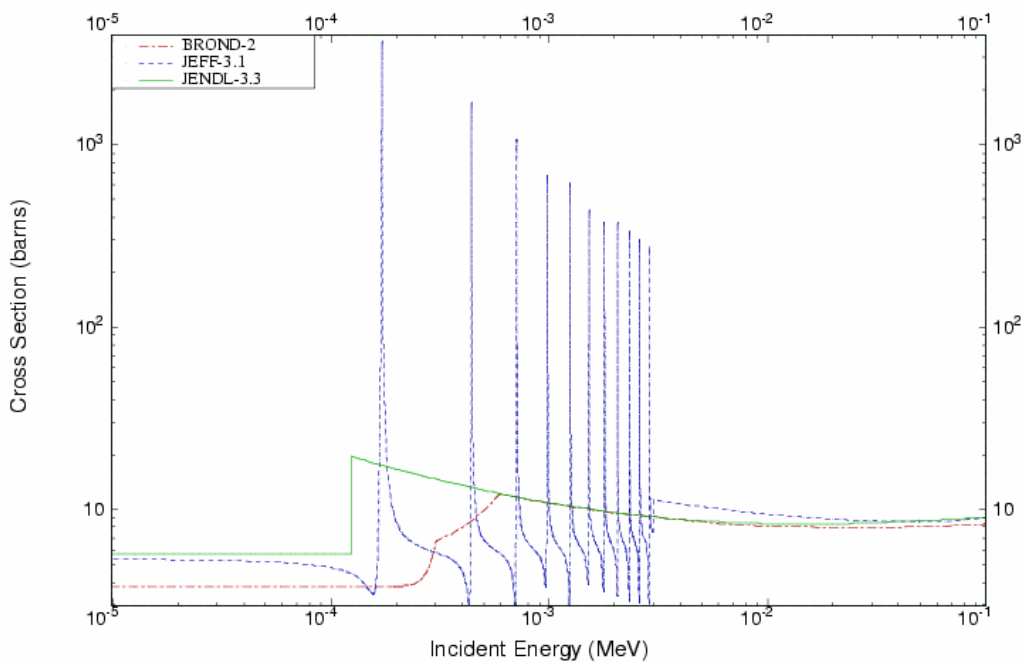


Рис. 1. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов

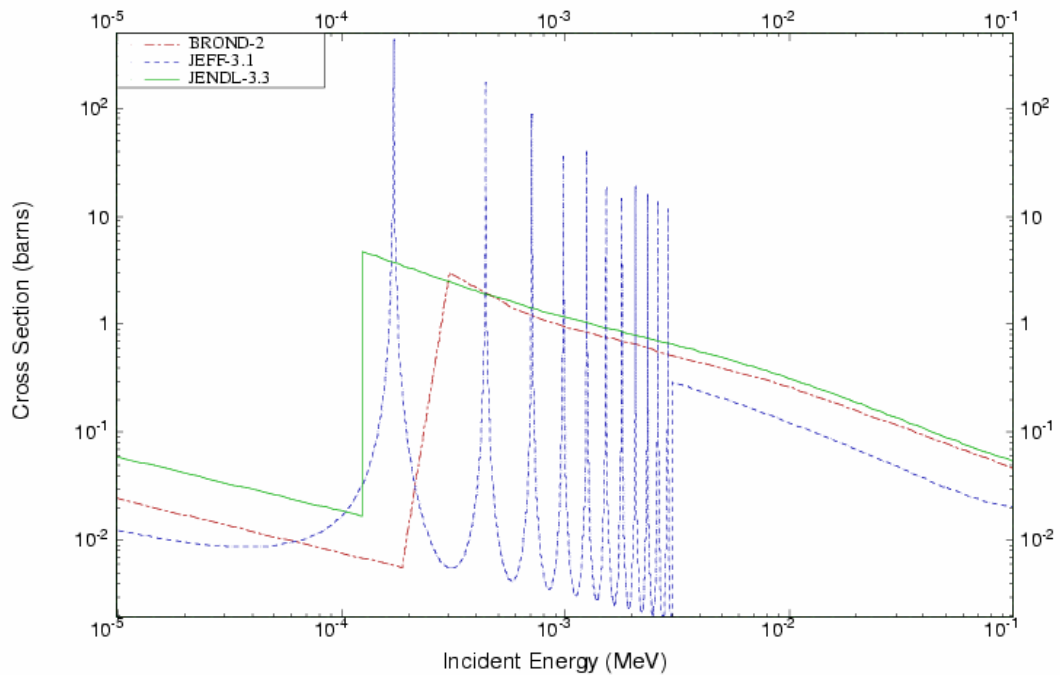


Рис. 2. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов

3. Нейтронные сечения вне резонансной области.

В данном разделе проведено сравнение оцененных данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII, и JENDL-3.3 вне резонансной области (0.01-20 МэВ). Сравнение с данными библиотеки JEFF-3.1 не проводилось. Для изотопов циркония в эту библиотеку приняты данные библиотеки JEFF-3.0, которые в свою очередь приняты из JEF2.2 (1992). В последней версии ENDF/B-VII приняты также данные JENDL-3.3. Поэтому ниже следует сравнение только оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3. Дано также краткое описание оценки БРОНД-3. Это связано с тем, что авторы оценки БРОНД-3 по сравнению с оценками других авторов применили дополнительные эмпирические систематики и более корректные теоретические расчеты. Оценка всех сечений изотопов циркония выполнена в едином согласованном подходе. В частности, был оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния, использовались систематические тенденции в поведении функций возбуждения пороговых реакций в зависимости массового числа, применена несферическая оптическая модель.

Нейтронные сечения в диапазоне 0.1 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью модифицированной программы GNASH /96Yo/ с учетом флуктуации нейтронных ширин. Для нейтронов была использована модель сильной связи каналов (программа ECIS /91lg/). Для оптического потенциала /80Ar/ мнимая часть была модифицирована, чтобы учесть прямое возбуждение низколежащих мультиплетов уровней ($5/2+ \otimes 2+$) и ($5/2+ \otimes 3-$).

Оптические параметры для нейтронов:

| Глубина потенциала (МэВ) | Диапазон энергии (МэВ) | Геометрия(фм) |
|--------------------------|------------------------|----------------------------|
| $V_r=49.0-0.28E$ | $0<E<20$ | $R_r=1.24 \quad a=0.62$ |
| $W_d=2.38+0.21E$ | $0<E<10$ | $R_d=1.26 \quad a=0.58$ |
| $W_d=5.39-0.091E$ | $10<E<20$ | |
| $W_v=0.0$ | $0<E<10.9$ | |
| $W_v=-0.0994+0.091E$ | $0.9<E<20$ | $R_v=1.24 \quad a=0.62$ |
| $V_{so}=6.2$ | $0<E<20$ | $R_{s0}=1.12 \quad a=0.47$ |

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /01Ko/, /74Lo/ и /94Av/, соответственно.

Гамма-переходы рассчитывались для E1, M2 и E2 -силовых функций. Параметры гигантского резонанса E1 были взяты из работы /88Di/. Полная силовая функция была нормализована к имеющимся экспериментальным данным по радиационной ширине и D0 для нейтронного резонанса. Параметры дискретных уровней взяты из работы /95Fi/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 3 дано полное сечение ZR-95 вне резонансной области энергий нейтронов. В области до 5 МэВ оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 практически совпадают, в области 5-20 МэВ оценка БРОНД-3 лежит заметно ниже. Из-за отсутствия экспериментальных данных трудно отдать предпочтение какой-либо из упомянутых оценок. Однако более корректный теоретический расчет для оценки БРОНД-3 позволяет отдать этой оценке некоторое предпочтение

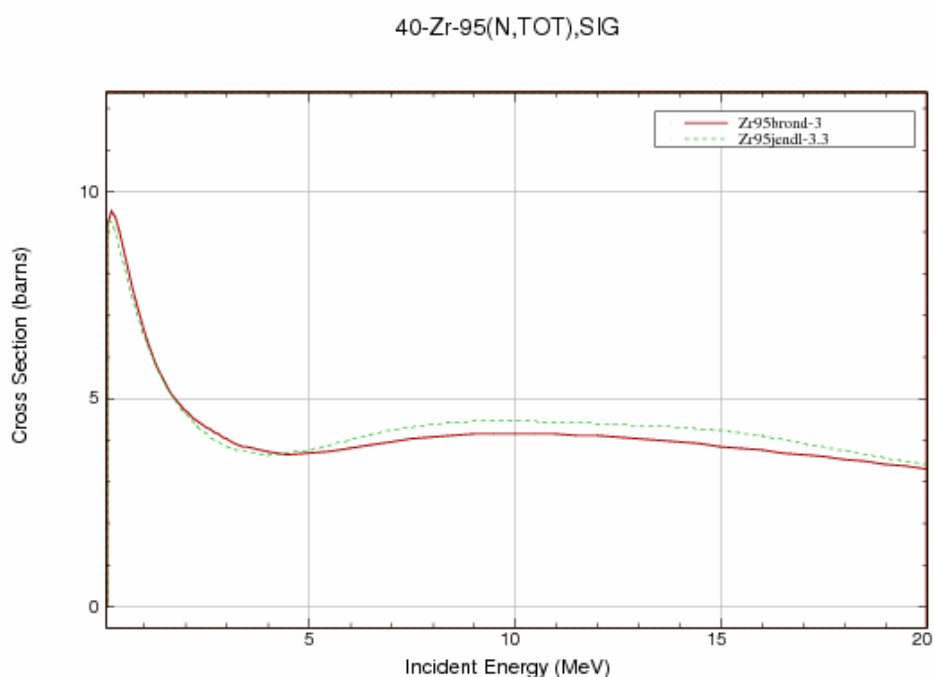


Рис.3. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 4 показано сравнение оценок упругого рассеяния БРОНД-3 и JENDL-3.3. Экспериментальных данных нет. Как видно, сечение упругого рассеяния в области энергий выше 2 МэВ в библиотеке ROND-3 лежит существенно ниже, в что связано с более низким сечением в этой области полного сечения (см. рис.4). Поскольку энергии экспериментальных данных нет, достоверность любой из указанных оценок оценить трудно.

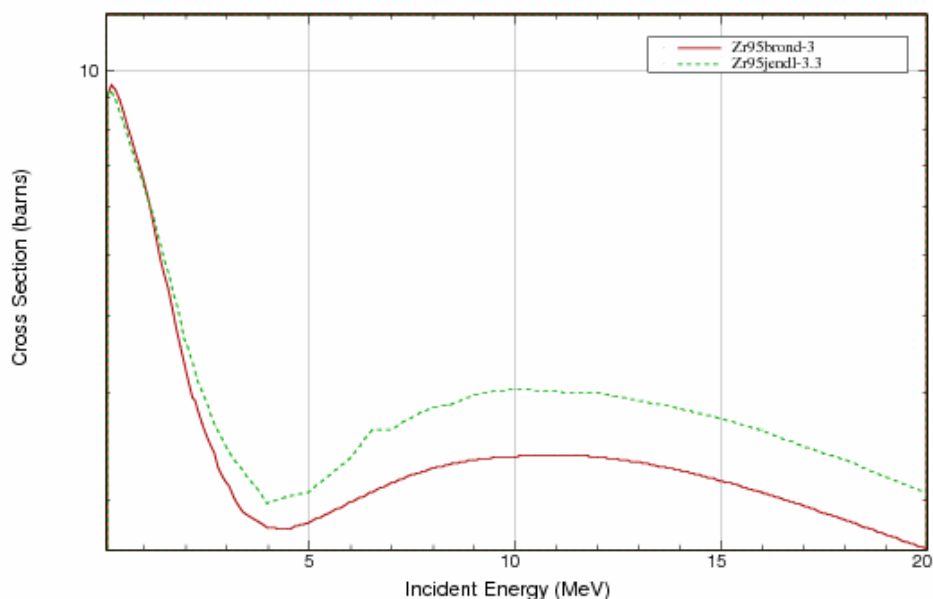


Рис.4. Сечение упругого рассеяния в области 0.1-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-68).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты, и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 2.3800 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

| N | Энергия уровня, МэВ | Спин | Переход | Энергия гамма-кванта, МэВ | Вероятность перехода, % |
|----|---------------------|------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 0 | 0.00000 | | | | |
| 1 | 0.95390 | 1/2+ | 1 → 0 | 0.95400 | 100 |
| 2 | 1.14000 | 5/2+ | 2 → 0 | 1.14000 | 100 |
| 3 | 1.32380 | 3/2+ | 3 → 0 | 1.32403 | 100 |
| 4 | 1.61800 | 9/2+ | 4 → 1 | 0.66410 | 100 |
| 5 | 1.61830 | 3/2+ | 5 → 0 | 1.61854 | 100 |
| 6 | 1.72170 | 5/2+ | 6 → 0 6 → 3 | 1.72140 0.39626 | 52.4 47.6 |
| 7 | 1.78800 | 3/2+ | 7 → 0 | 1.78800 | 100 |
| 8 | 1.89270 | 5/2+ | 8 → 0 8 → 3 | 1.89253 0.56907 | 76.3 23.7 |
| 9 | 1.90390 | 3/2+ | 9 → 0 9 → 3 | 1.90400 0.58025 | 59.2 40.8 |
| 10 | 1.94030 | 1/2+ | 10 → 0 | 1.94030 | 100 |
| 11 | 1.95590 | 5/2+ | 11 → 0 11 → 1 11 → 3 | 1.95583 1.00213 0.63230 | 46.7 23.8 29.5 |
| 12 | 2.02500 | 9/2- | 12 → 0 | 2.02500 | 100 |

| | | | | | |
|----|---------|------|---------|---------|------|
| 13 | 2.12000 | 5/2- | 13 → 0 | 2.12000 | 100 |
| 14 | 2.25000 | 7/2+ | 14 → 1 | 1.29600 | 100 |
| 15 | 2.25410 | 1/2+ | 15 → 0 | 2.25410 | 100 |
| 16 | 2.28500 | 5/2+ | 16 → 2 | 1.14500 | 100 |
| 17 | 2.31700 | 3/2+ | 17 → 1 | 1.17700 | 100 |
| 18 | 2.37220 | 3/2+ | 18 → 0 | 2.37258 | 21.1 |
| | | | 18 → 1 | 1.41844 | 11.7 |
| | | | 18 → 3 | 1.04831 | 24.1 |
| | | | 18 → 10 | 0.43200 | 43.1 |
| 19 | 2.38000 | | | | |

Экспериментальных данных по сечению неупругого рассеяния нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 существенно различаются, однако данные BROND-3 согласованы с более приемлемой функцией возбуждения реакции (n,2n)(см. рис. 10) и с величиной вклада прямых процессов при энергии 20 МэВ (200-300 мб). На рисунке приведена также зависимость сечения из CENDL-3, которая существенно лучше согласуется с оценкой БРОНД-3. На рис. 5-7 показаны функции возбуждения неупругого рассеяния на первых двух уровнях, где также нет экспериментальных данных.

40-Zr-95(N,INL),SIG

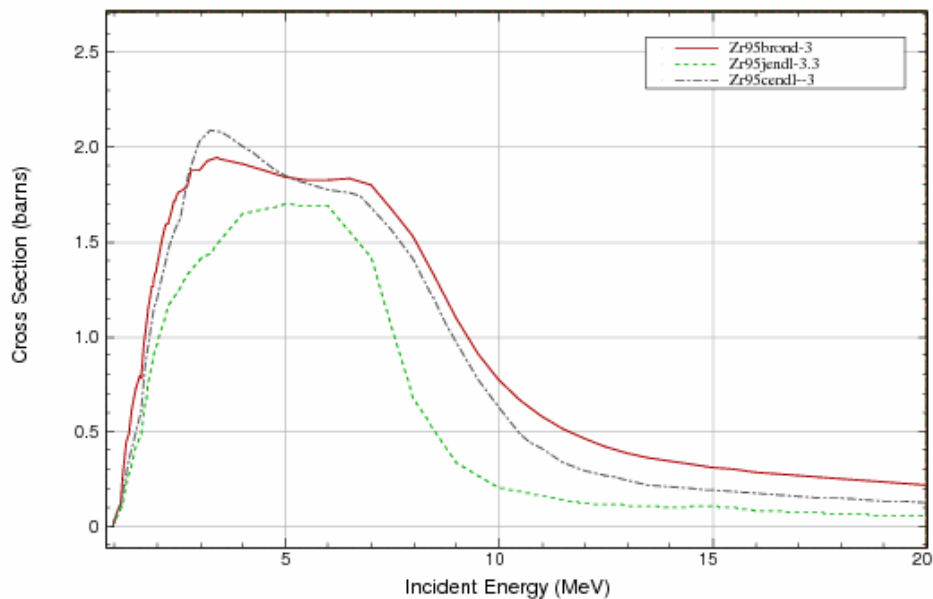


Рис.5. Интегральное сечение неупругого рассеяния Zr-95.

40-Zr-95(N,INL),SIG E1 0.954+06

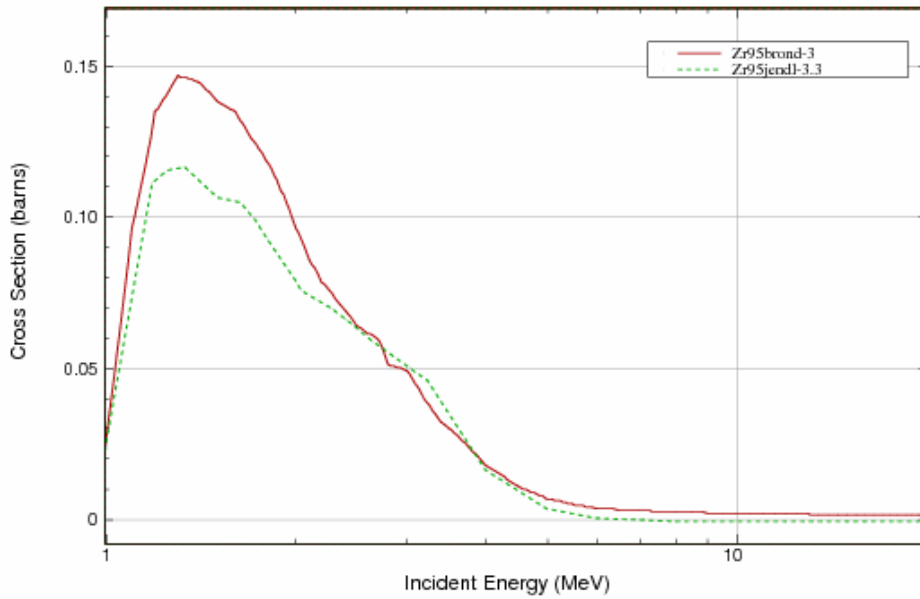


Рис.6. Функция возбуждения первого уровня Zr-95 с энергией 0.954 МэВ.

40-Zr-95(MT=52),SIG E1 1.14+6

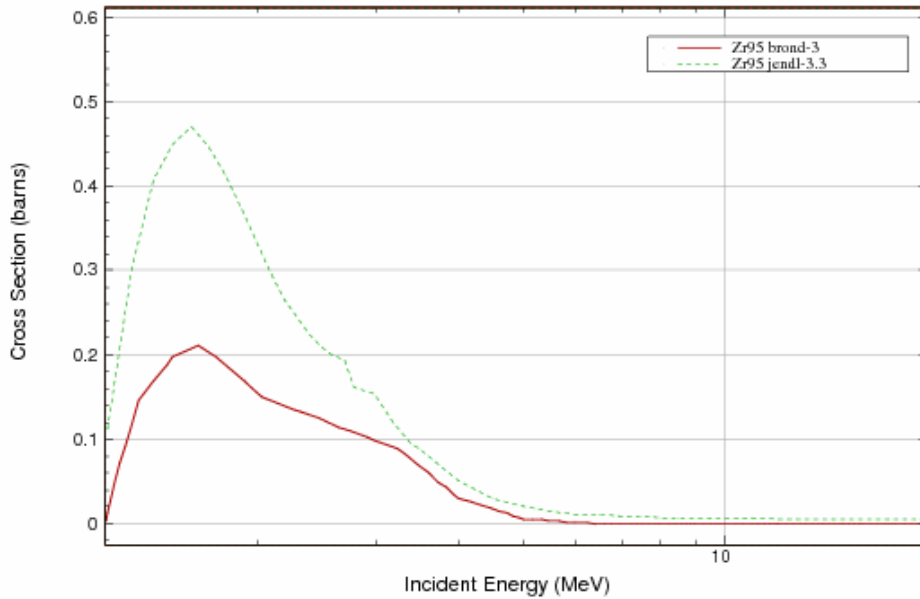


Рис.7. Функция возбуждения второго уровня Zr-95 с энергией 1.140 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.1-20 МэВ сечение радиационного захвата в файле Zr-95 библиотеки БРОНД-3 рассчитано с учетом полупрямого механизма в области гигантского резонанса. В области выше 5-10 МэВ данные BROND-3 и JENDL-3.3 сильно различаются, но кривая с физической точки зрения выглядит явно предпочтительнее.

40-Zr-95(N,G),SIG

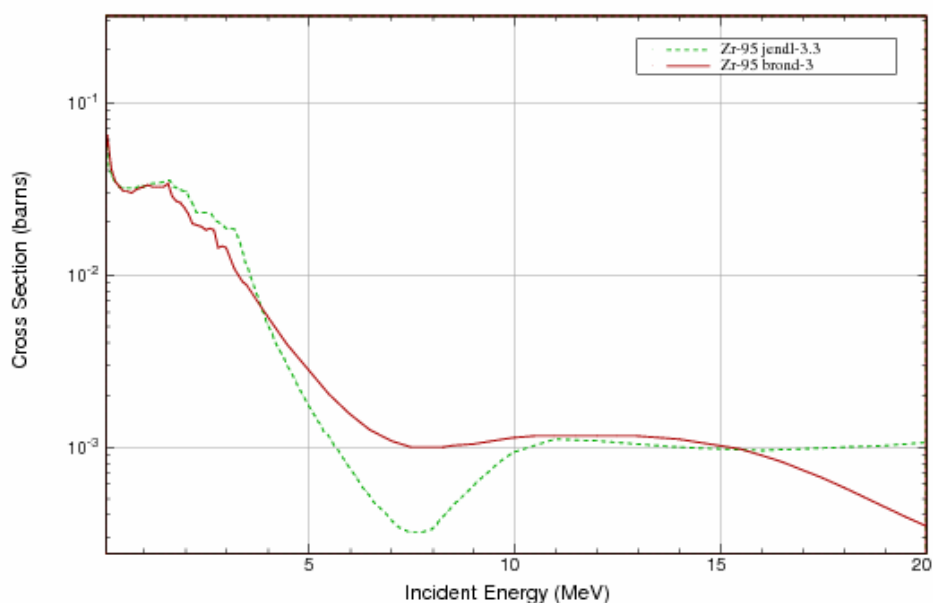


Рис.8. Сечение радиационного захвата в области 0.01-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

На рис. 9и 10 представлены сечения реакции (n,2n) и (n,3n) библиотек JENDL-3.3 и BROND-3. Экспериментальных данных нет. Данные БРОНД-3 хорошо согласуются с эмпирическими систематиками функций возбуждения указанных реакций [97Ma], Форма функций возбуждения реакций (n,2n) и (n,3n) вызывает сомнения.

Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6 и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

Zr-95 (n,2n)

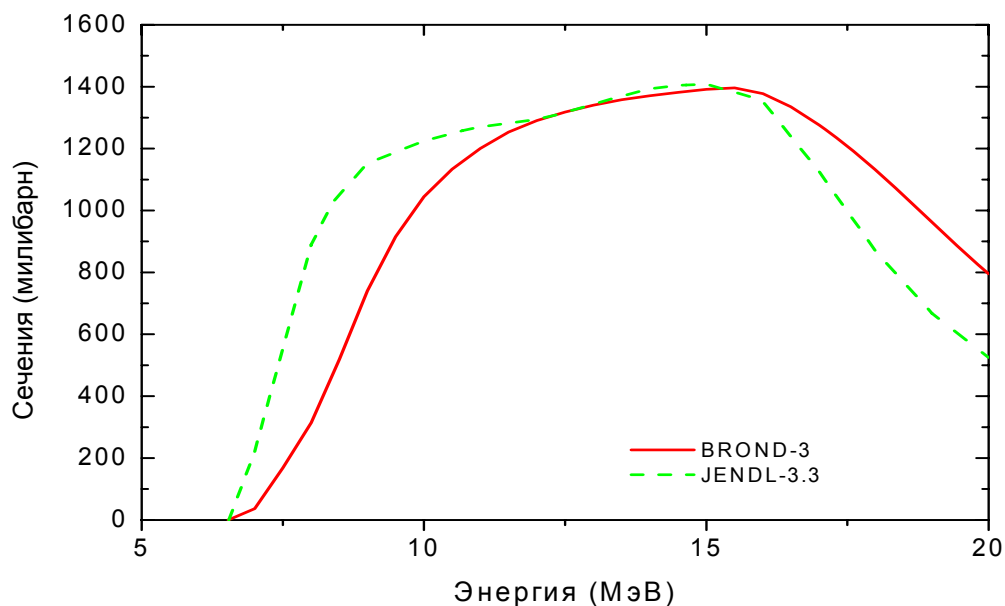


Рис.9. Сечение реакции (n,2n). JENDL-3.3

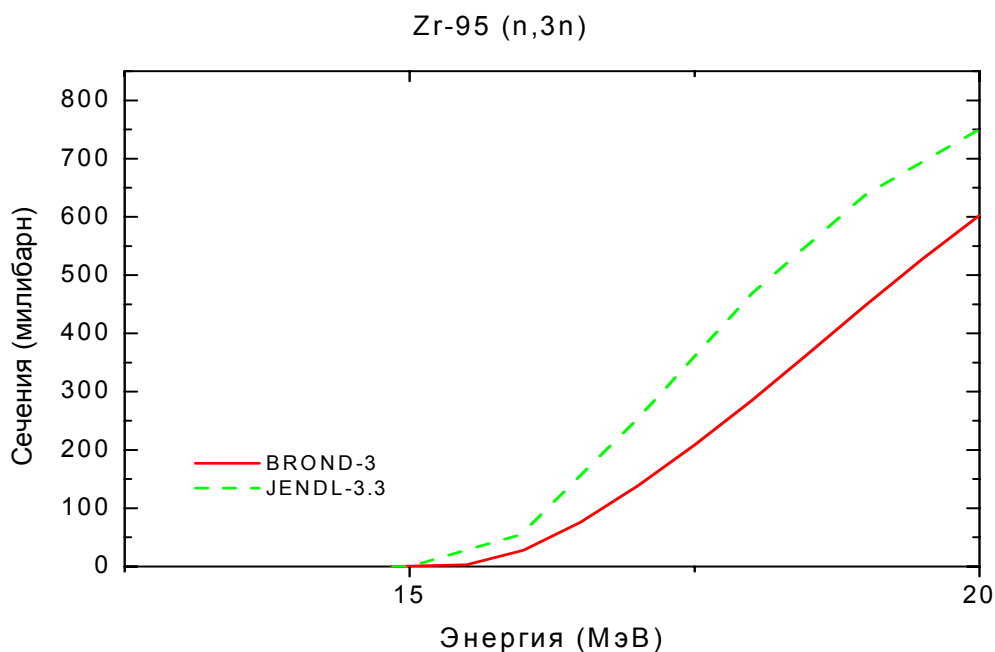


Рис. 10. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104,105 и 107):

На рис. 11 показано сечение реакции $^{95}\text{Zr}(n,p)$. Экспериментальных данных нет. Оцененные данные библиотеки БРОНД-3 лучше согласуются с эмпирической систематикой /97Ma/. Поэтому оценке функции возбуждения из БРОНД-3 следует отдать предпочтение. На рис. 12 дано сечение реакции $^{95}\text{Zr}(n,d)$. Оценки BROND-3 и JENDL-3.3 реакции (n,d), полученные расчетным путем, существенно не согласуются, однако оценка БРОНД-3 лежит выше и лучше согласуется с эмпирической систематикой, основанной на экспериментальных данных Хайта.

Сечение реакции $^{95}\text{Zr}(n,t)$ в БРОНД-3 принято из из JENDL-3.3.

На рис.13 представлено сечение реакции $^{95}\text{Zr}(n,\alpha)$. Рекомендуется оценка из БРОНД-3, поскольку она лучше согласуется с эмпирической систематикой.

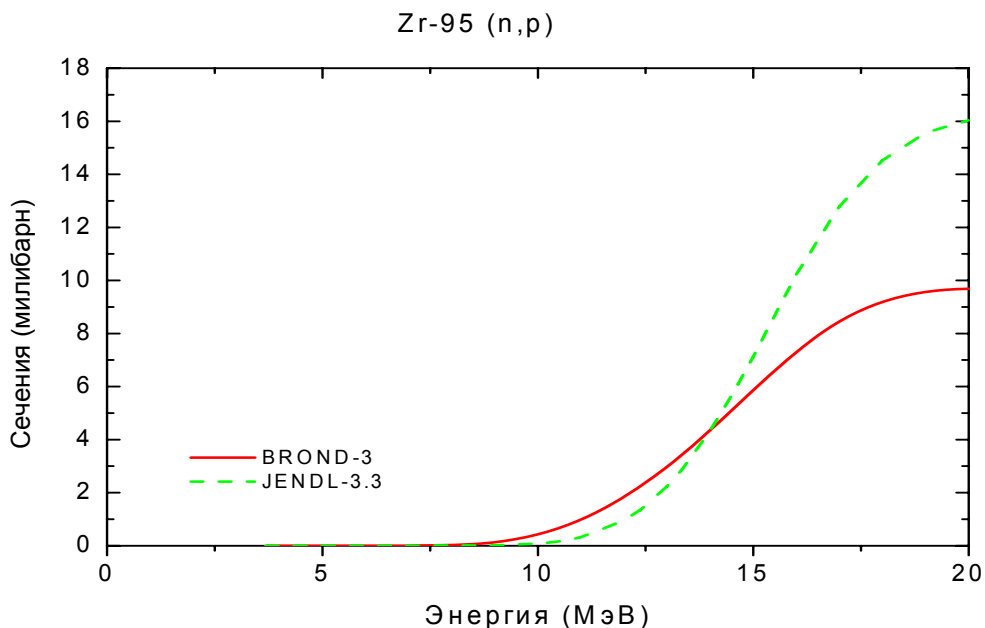


Рис. 11. Сечение реакции (n,p)

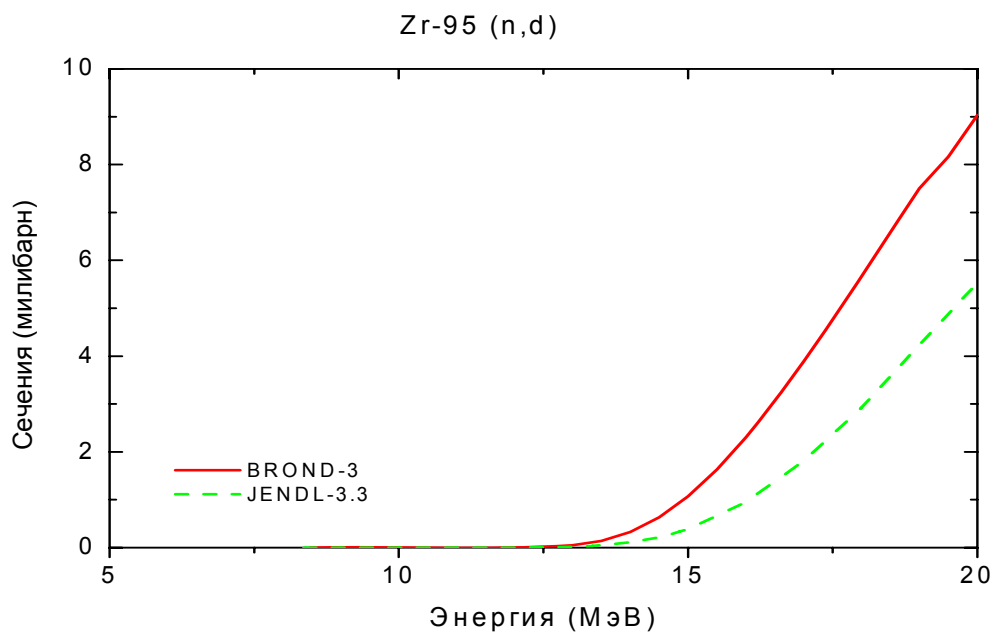


Рис.12. Сечение реакции (n,d).

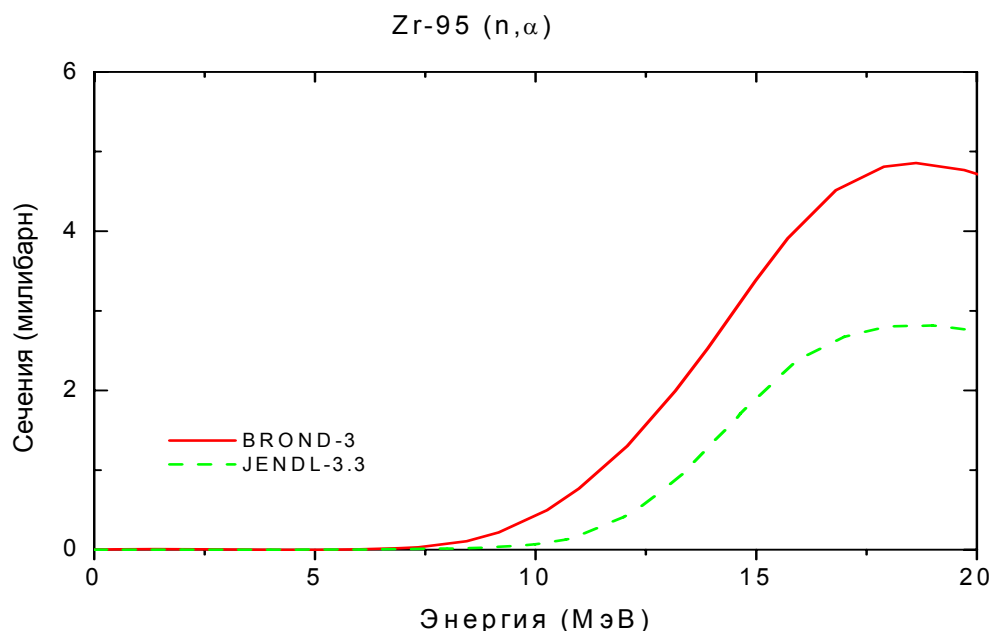


Рис. 13. Сечение реакции (n,α)

3.7. Реакции (n,nα), (n,np) (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет надежных экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. Оценки реакций (n,nα) и (n,np) в файле Zr-95 в БРОНД-3 основаны на расчетах по программе GNASH. Разногласия оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

На рис. 14 дано сечение реакции $^{95}\text{Zr}(n,np)$. Оцененные данные библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 примерно равноценны, однако зависимость из БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она несколько лучше согласуется с систематикой функций возбуждения реакции (n,np) с функциями возбуждения реакции (n,p).

На рис.15 дано сечение реакции $^{95}\text{Zr}(n,\alpha)$. В этом случае функция возбуждения из библиотеки БРОНД-3 предпочтительнее, так как она согласуется с сечением реакции (n,α) и с систематикой реакции (n,α) .

Спектры и угловые распределения нейтронов для рассматриваемых реакций представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6, и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

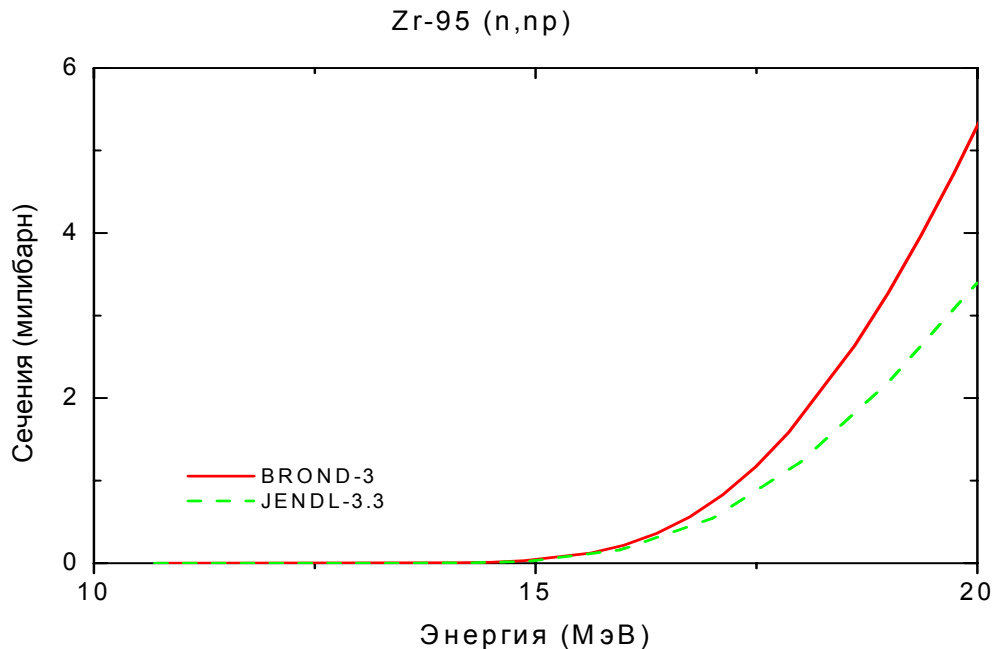


Рис. 14. Сечение реакции (n,np) .

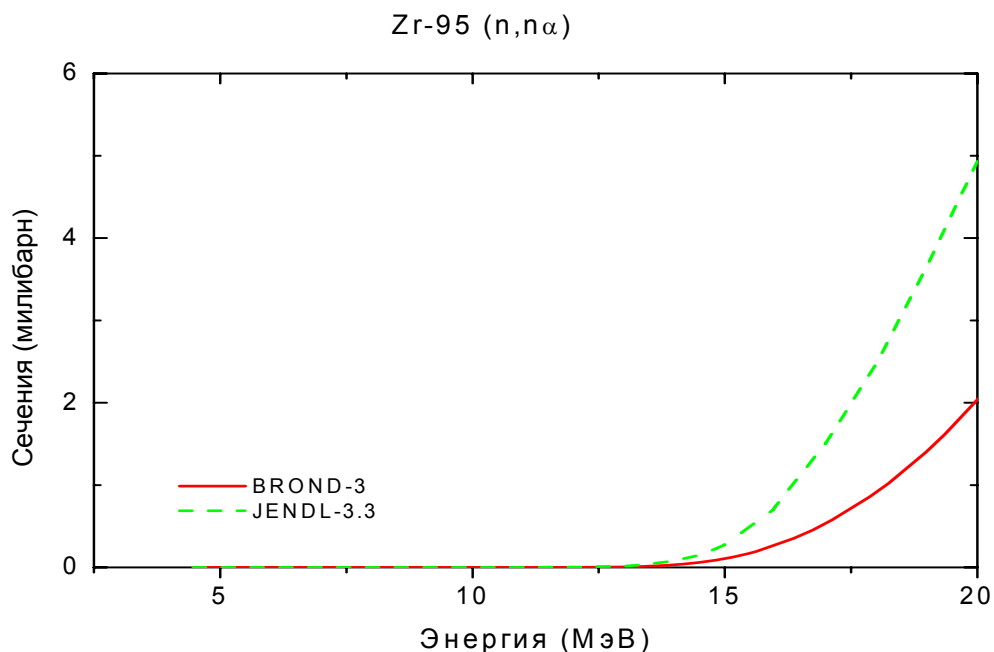


Рис. 15. Сечение реакции $(n,n\alpha)$.

MF=4. Угловые распределения вторичных нейтронов.

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/91Ig/.

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gashy /91Ig/ и Dwuck.

MF=5 Энергетические распределения вторичных нейтронов

MT=16,17,22, 28,91 Энергетические распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3.

Они основаны на систематике работы /90Ku/

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка БРОНД-3 является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для резонансной области энергий в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить в РОСФОНД файл оцененных данных для Zr-95 из БРОНД-3.

Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

References

- 01Ko Koning,A.J., Dalaroche,J.P. Contribution to 3_th RCM of RIPPLE-2, Vienna, 2001.
- 98Ri RIPPLE-2. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
- 97Ma Manokhin,V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin,V.N., Blokhin,A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
- 96Yo Young,P.G., Arthur,E.D., Chadwick,M.B.: In "Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors" (Triest,1996). Eds. A.Gordini, G.Reffo., World Science, Singapore, 1988,V.1,p.206.
- 95Fi Firestone,R.B. Table of Isotopes, Eight Edition,V.2, New York,1995.
- 94Av Avrigeanu,V., Hodgson,P., Avrigeanu,M. Phys.Rev.C49(1994)2136
- 91Ig Igarasi, S. and Fukahori, T.: JAERI 1321 (1991).
- 90Ku Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
- 90Ya Yamamuro, N.: JAERI-M 90-006 (1990).
- 88Di Dietrich,S.S., Berman,B.L. Atomic data and Nuclear data Tables 38(1988)199.
- 86Ki Kikuchi, Y. et al.: JAERI-M 86-030 (1986).
- 81Mu Mughabghab, S.F. et al.: "Neutron Cross Sections, Vol. I, Part A", Academic Press (1981).
- 80Ar Arthur E.D. Nucl.Sci.Eng. 76(1980)137.
- 75Ho Hofman, H. et all., Ann. Phys. 90(1975)403.
- 74Lo Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
- 70Ra Raynal,J.: Report IAEA SMR-9/8(1970),p.281.

40.9. Цирконий-96

1. Общие характеристики

1.1. $Z=40$

1.2. $A=96$

1.3. $A_w=95.08436$

1.4. Содержание в естественной смеси: 2.80

1.5. Перечень нейтронных реакций:

| MT | Реакция | Q, МэВ | Епор, МэВ | Ядро-продукт |
|-----|--------------|----------|-----------|--------------|
| 51 | (n,n') | -1.5816 | 1.5982 | Zr-96 |
| 16 | n,2n | -7.8538 | 7.9364 | Zr-95 |
| 17 | n3n | -14.3166 | 14.4654 | Zr-94 |
| 22 | n,n α | -4.9439 | 4.9959 | Sr-92 |
| 28 | n,np | -11.5170 | 11.6381 | Y-95 |
| 102 | n, γ | 5.5780 | | Zr-96 |
| 103 | n,p | -6.3596 | 6.4265 | Y-96 |
| 104 | n,d | -9.2924 | 9.3901 | Y-95 |
| 105 | n,t | -9.9700 | 10.0739 | Y-94 |
| 107 | n, α | 0.3645 | | Sr-93 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.6 Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках БРОНД-2 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мухабхабом и др. [81Mu] на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию [77Mu, 80Co]. Верхняя граница резонансной области принята равной 30 кэВ и радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 6.85$ фм.

В оценке JENDL-3.3 граница области разрешенных резонансов расширена до 100 кэВ и принят радиус потенциального рассеяния $R_0 = 7.2$ фм [81Mu]. Нейтронные ширины резонансов до энергии 41.5 кэВ взяты такими же как в [81Mu], но выше этой энергии ширины увеличены в 1.79 раза, чтобы согласовать с данными [80C]. При этом радиационные ширины были приняты согласно данным [81Br]. Параметры р-резонанса с энергией 301 эВ взяты в соответствии с данными [86Sa]. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в CENDL-3 и JEFF-3.1.

В недавней оценке ENDF/B-VII Мухабхаб пересмотрел параметры отрицательного резонанса и резонанса 301 эВ, но сохранил прежние значения параметров остальных резонансов [06Mu]. Верхняя граница области разрешенных резонансов была взята 100 кэВ и принят радиус потенциального рассеяния 6.8 фм. Радиационные ширины резонансов, использованные в различных оценках, показаны на рис. 1. Ширины многих s- и р-резонансов отличаются весьма существенно, также как средних ширин резонансов.

Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров во всех оценках рекомендовано приближении MLBW. Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| Оценка | БРОНД-2 | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Эксперимент [06Mu] |
|---------|---------|-----------|------------|--------------------|
| полное | 5.855 | 6.154 | 5.729 | |
| упругое | 5.833 | 6.131 | 5.706 | |

| | | | | |
|--|-------|-------|-------|-----------|
| захвата | .0229 | .0228 | .0228 | .022±.001 |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | 5.51 | 5.86 | 5.32 | 5.6±0.3 |

В пределах погрешности все оценки согласуются с измеренными сечениями радиационного захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла захвата, но расходятся в оценке полных сечений и сечений упругого рассеяния, для которых нет каких-либо экспериментальных данных.

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Обращает на себя внимание резкое увеличение при энергии 95.93 кэВ суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов, которое в JENDL-3.3 почти в два раза больше, чем в ENDF/B-VII. Это различие является следствием отмеченного выше увеличения в JENDL-3.3 нейтронных ширин резонансов выше 41.5 кэВ, и на основе систематики силовых функций S_0 для близлежащих изотопов циркония подобное увеличение силовой функции не кажется оправданным.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в диапазоне энергий до 100 кэВ в наборах s- и p-резонансов в каждой из оценок, возможно, пропущено 1-2 резонанса. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, равны $D_0=(11 \pm 3)$ кэВ и $D_1=(4.1 \pm .8)$ кэВ. Отношение $D_0/ D_1=2.44 \pm 0.65$ не противоречит статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, но погрешность определения D_0 достаточно велика ввиду малого числа резонансов. Для нейтронных силовых функций в рамках данного анализа получены значения $S_0=(0.40 \pm 0.12) 10^{-4}$ и $S_1=(10 \pm 2) 10^{-4}$ для s- и p-резонансов, соответственно.

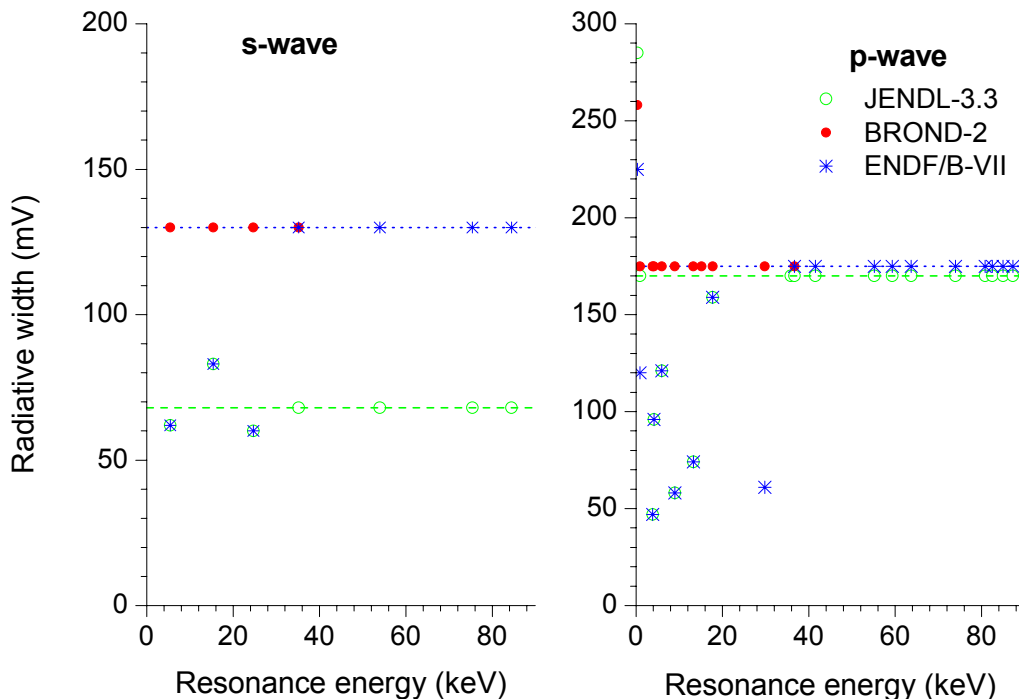


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках, пунктиром показаны средние значения ширины, принятые для резонансов с неизвестными ширинами

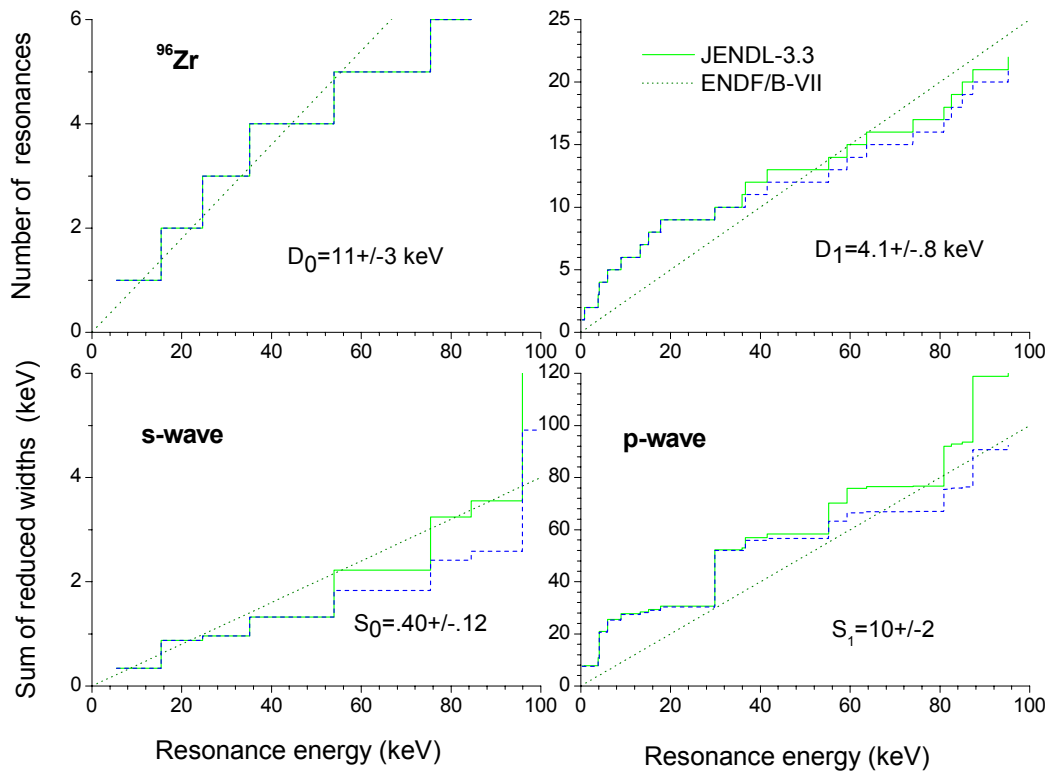


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширины в оценках БРОНД-2 и JENDL-3.3

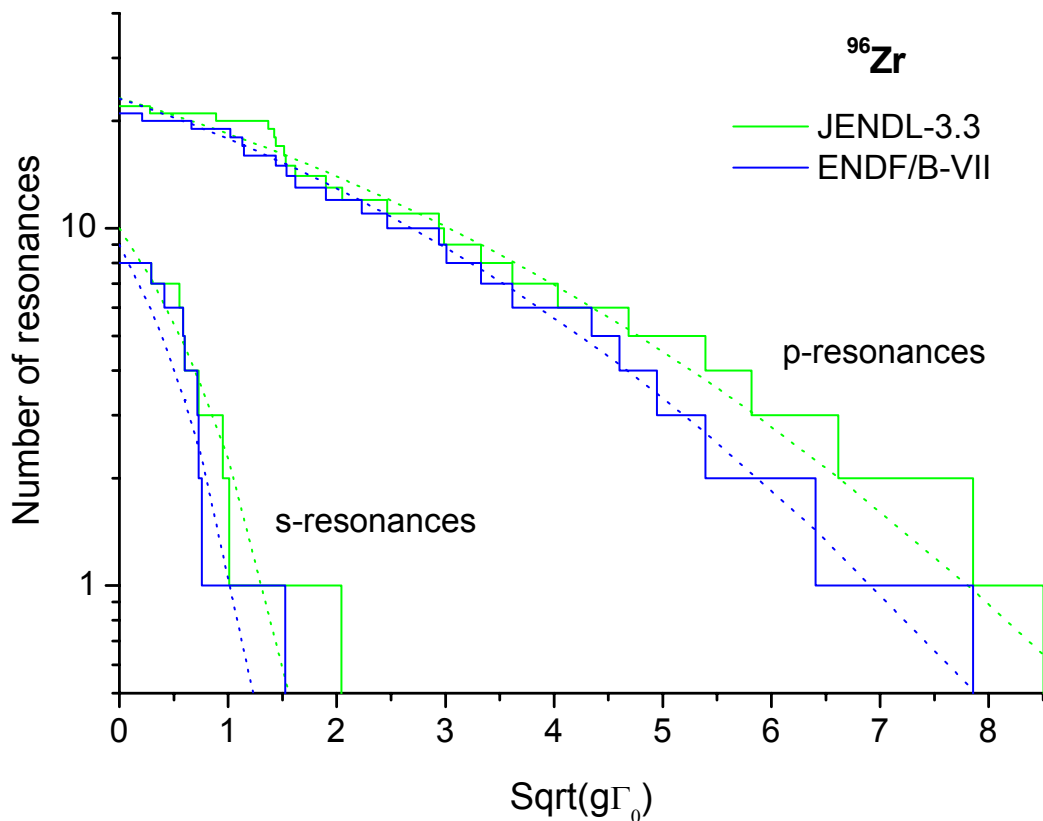


Рис. 2. Анализ пропуска s- и p-резонансов. Теоретически ожидаемые распределения показаны пунктиром.

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в БРОНД-2 принята равной 200 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. При этом нейтронные силовые функции получены на основе расчетов в рамках оптической модели, и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов [63Ma]. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована одноуровневая формула Брейта-Вигнера.

В JENDL-3.3 и ENDF/B-VII нет области неразрешенных резонансов.

На рис. 4 и 5 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Существенные отличия между оценками проявляются лишь в межрезонансных минимумах, а описании среднего сечения радиационного захвата нейтронов при энергиях выше 50-100 МэВ. Последнее различие обусловлено нормировкой оценки БРОНД-2 на экспериментальные данные [63Ma], тогда как JENDL-3.3 и ENDF/B-VII ориентированы на более поздние данные [82Wy], которые соответствуют более низким сечениям захвата нейтронов.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что основные отличия между оценками БРОНД-2, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII относятся к описанию сечений рассеяния тепловых нейтронов, для которых нет каких-либо экспериментальных данных, а также области энергий 30-200 кэВ, для которой в БРОНД-2, по-видимому, завышено сечение захвата нейтронов.

Учитывая отмеченные выше недостатки оценок БРОНД-2 и JENDL-3.3 для разрешенных резонансов, в новой оценке БРОНД-3 была принята оценка ENDF/B-VII во всем диапазоне энергий нейтронов до 100 кэВ. Без дополнительных экспериментальных данных в настоящее время не видно возможностей для уточнения этой оценки.

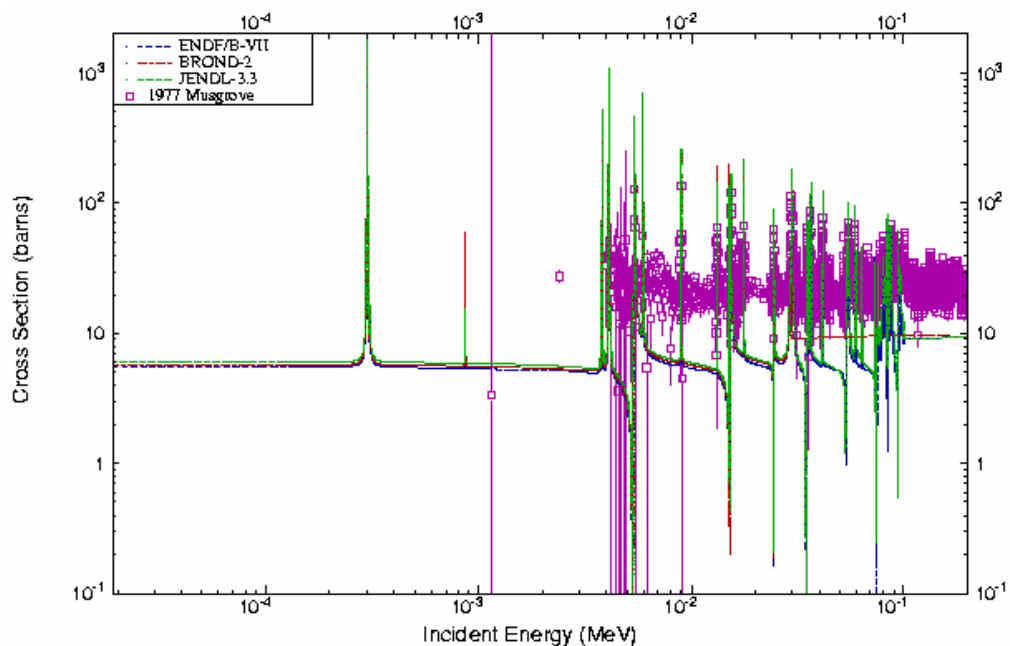


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

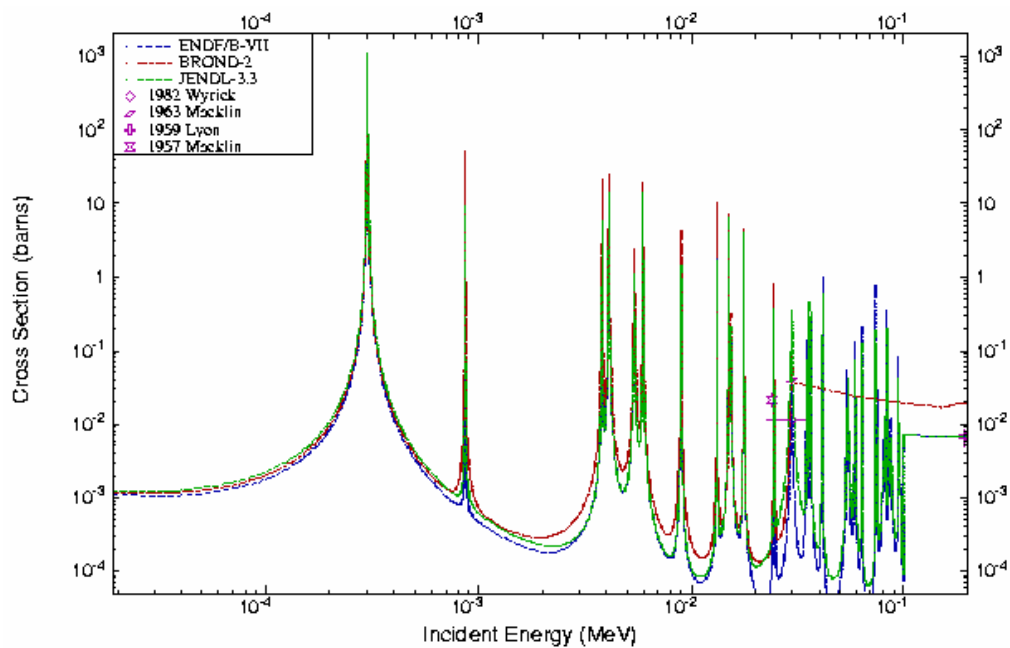


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области.

В данном разделе проведено сравнение оцененных данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII, и JENDL-3.3 вне резонансной области (0.01-20 МэВ). Сравнение с данными библиотеки JEFF-3.1 не проводилось, поскольку для изотопов циркония приняты данные библиотеки JENDL-3.3.

Ниже дано сравнение указанных библиотек совместно с кратким описанием оценки БРОНД-3. Это связано с тем, что авторы оценки БРОНД-3 по сравнению с оценками других авторов применили дополнительные эмпирические систематики и более корректные теоретические расчеты. Оценка всех сечений изотопов циркония выполнена в едином согласованном подходе. В частности, был оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния, использовались систематические тенденции в поведении функций возбуждения пороговых реакций в зависимости массового числа, применена несферическая оптическая модель.

Нейтронные сечения в БРОНД-3 в диапазоне 0.1 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью модифицированной программы GNASH /96Yo/ с учетом флуктуации нейтронных ширин. Для нейтронов была использована модель сильной связи каналов (программа ECIS /70Ra/) с прямым возбуждением низколежащих уровней 2+ и 3-.

Оптические параметры для нейтронов:

| Глубина потенциала (МэВ) | Диапазон энергии (МэВ) | Геометрия(фм) |
|--------------------------|------------------------|----------------------------|
| $V_r=49.0-0.28E$ | $0<E<20$ | $R_r=1.24 \quad a=0.62$ |
| $W_d=2.38+0.21E$ | $0<E<10$ | $R_d=1.26 \quad a=0.58$ |
| $W_d=5.39-0.091E$ | $10<E<20$ | |
| $W_v=0.0$ | $0<E<10.9$ | |
| $W_v=-0.0994+0.091E$ | $0.9<E<20$ | $R_v=1.24 \quad a=0.62$ |
| $V_{so}=6.2$ | $0<E<20$ | $R_{s0}=1.12 \quad a=0.47$ |

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /01Ko/, /74Lo/ и /94Av/, соответственно.

Гамма-переходы рассчитывались для E1, M2 и E2 -силовых функций. Параметры гигантского резонанса E1 были взяты из работы /88Di/. Полная силовая функция была

нормализована к имеющимся экспериментальным данным по радиационной ширине и D0 для нейтронного резонанса. Параметры дискретных уровней взяты из работы /95Fi/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 4 дано полное сечение Zr-96 вне резонансной области энергий нейтронов. В области до 0.5 МэВ имеются экспериментальные данные, но они лежат очень высоко, при более высоких энергиях экспериментальных данных нет, оценки БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII близки, и нет оснований отдать предпочтение какой-либо одной из них.

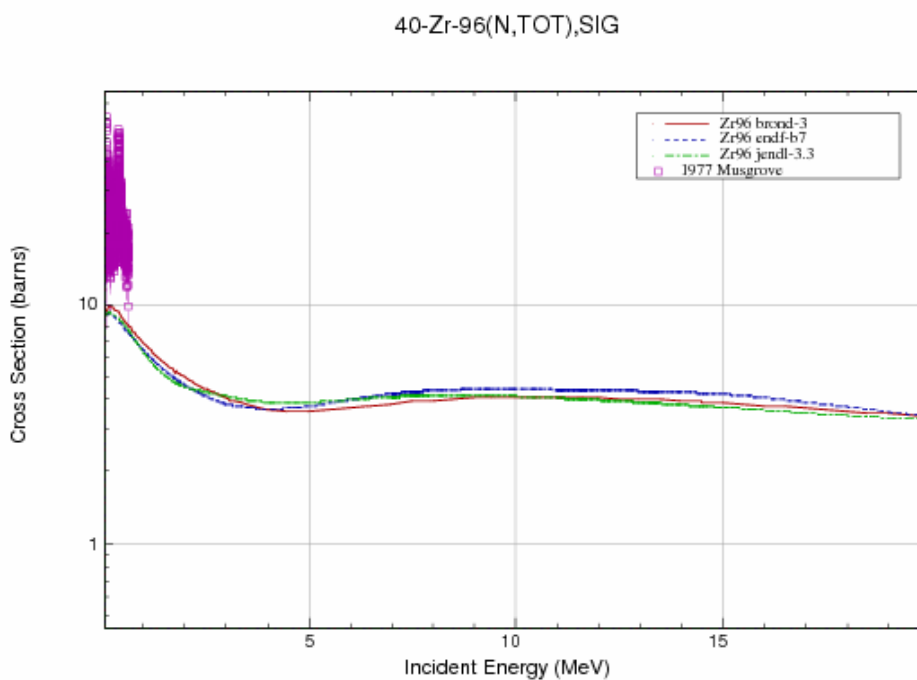


Рис. 4. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 5 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния на изотопе Zr-96. Экспериментальных данных нет. Может быть рекомендована оценка BROND-3.

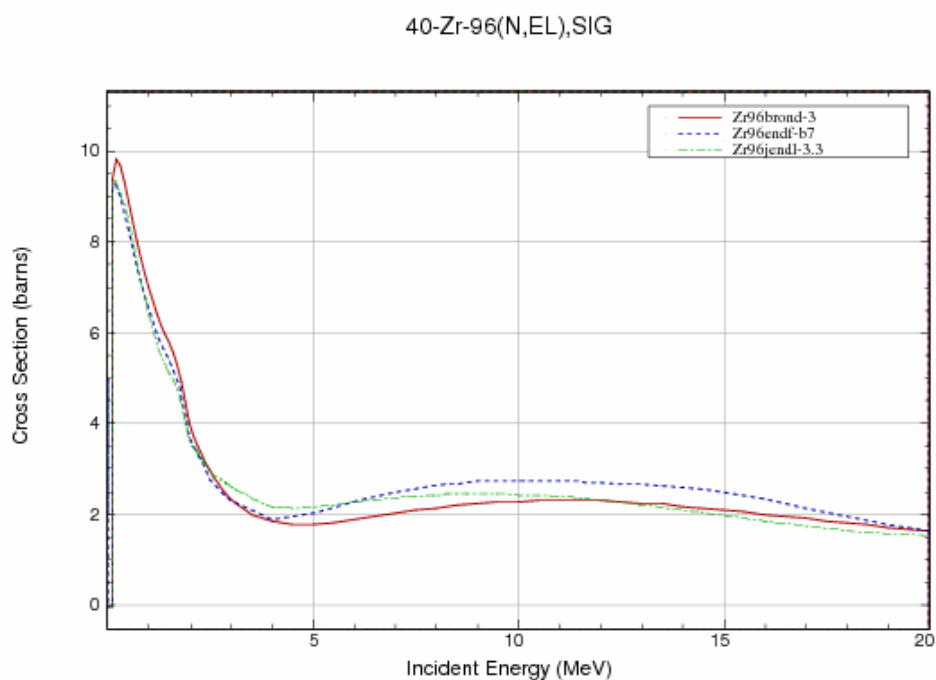


Рис.5. Сечение упругого рассеяния в области 0.01-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-63).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты, и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 3.0900 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

| N | Энергия уровня, МэВ | Спин | Переход | Энергия гамма-кванта, МэВ | Вероятность перехода, % |
|---|---------------------|------|----------------------------------|--|---------------------------------|
| 0 | 0.00000 | | | | |
| 1 | 1.58160 | 0+ | 1 → 0 | 1.58160 | 100 |
| 2 | 1.75050 | 2+ | 2 → 0 | 1.75050 | 100 |
| 3 | 1.89720 | 3- | 3 → 0 3 → 2 | 1.89720 | 15.25 84.75 |
| 4 | 2.22580 | 2+ | 4 → 0 4 → 1 4 → 2 4 → 3 | 2.22590 0.64418 0.47533 0.32875 | 50.25 14.10 28.60 7.05 |
| 5 | 2.43880 | 3+ | 5 → 2 | 0.68825 | 100 |
| 6 | 2.66880 | 2+ | 6 → 2 6 → 3 6 → 4 | 0.91861 0.77160 0.44293 | 70.7 24.8 4.5 |
| 7 | 2.69520 | 0+ | 7 → 0 | 2.69400 | 1.0 |

| | | | | | |
|----|---------|----|---------|---------|------|
| | | | 7 → 1 | 1.11370 | 1.0 |
| | | | 7 → 4 | 0.46933 | 98.0 |
| 8 | 2.75000 | 4+ | 8 → 2 | 0.99950 | 100 |
| 9 | 2.78160 | 3+ | 9 → 3 | 0.88400 | 100 |
| 10 | 2.85740 | 4+ | 10 → 2 | 1.10688 | 73.5 |
| | | | 10 → 3 | 0.96150 | 10.9 |
| | | | 10 → 4 | 0.63163 | 15.6 |
| 11 | 2.92460 | 0+ | 11 → 2 | 1.17404 | 71.4 |
| | | | 11 → 4 | 0.69972 | 28.6 |
| 12 | 3.03900 | 3- | 12 → 0 | 3.03900 | 100 |
| 13 | 3.08240 | 4+ | 13 → 2 | 1.33180 | 7.6 |
| | | | 13 → 3 | 1.18519 | 74.7 |
| | | | 13 → 4 | 0.85662 | 4.7 |
| | | | 13 → 5 | 0.64392 | 5.3 |
| | | | 13 → 10 | 0.22440 | 7.7 |
| 14 | 3.09000 | | | | |

Экспериментальных данных по интегральному сечению неупругого рассеяния нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII рассчитаны на основе сферической оптической моделей ядерных реакций и совпадают. Данные BROND-3 лежат существенно выше, что объясняется использованием другой программы для расчета (модифицированной программы GNASH) и параметров несферической оптической модели. Учитывая более корректный подход в расчетах по программе GNASH интегральное сечение неупругого рассеяния из библиотеки BROND-3 предпочтительнее. На рис. 4 показана функция возбуждения неупругого рассеяния на первом уровне. Экспериментальных данных нет.

40-Zr-96(N,INL),SIG

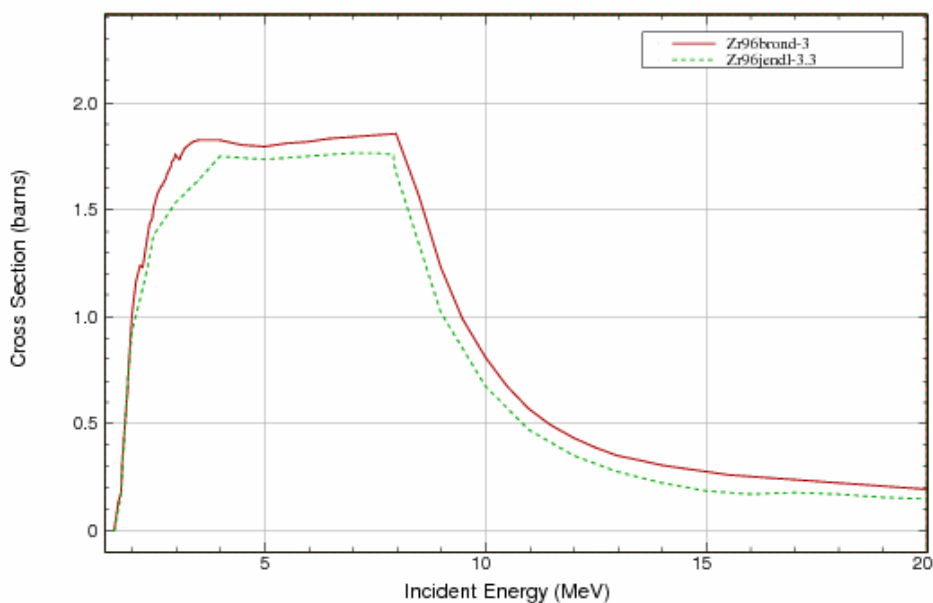


Рис.6. Интегральное сечение неупругого рассеяния Zr-96.

40-Zr-96(N,INL),SIG E1 1.58+6

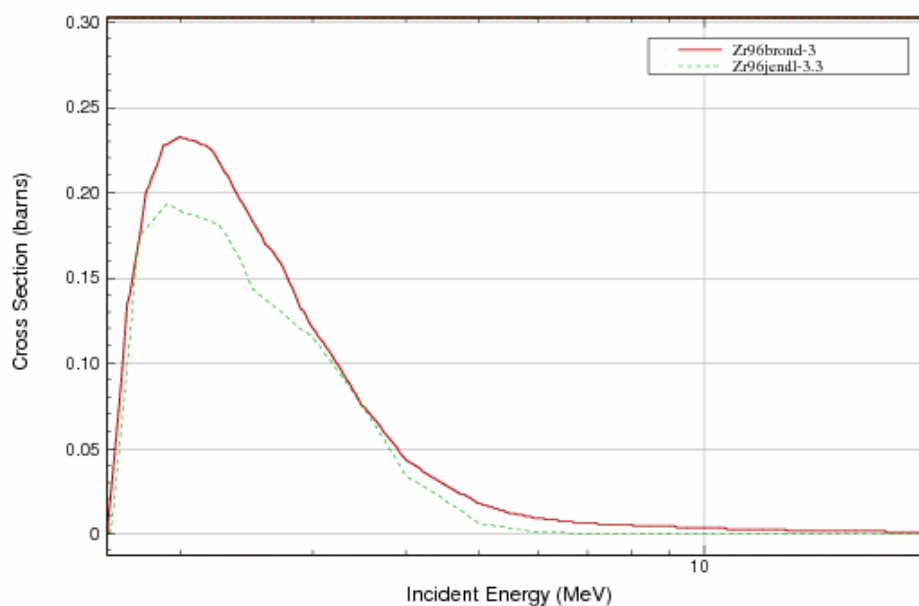


Рис. 7. Функция возбуждения первого уровня Zr-96 с энергией 1.5816 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.1-20 МэВ сечение радиационного захвата в файле Zr-96 библиотеки БРОНД-3 рассчитано с учетом полупрямого механизма в области гигантского резонанса. Расчеты согласованы с экспериментальными данными работы /4/. В области выше 5-8 МэВ данные BROND-3 и JENDL-3.3 различаются, однако кривая БРОНД-3 выглядит предпочтительнее. Данные ENDF/B-VII и JENDL-3.3 при энергиях выше 3 МэВ совпадают. Рекомендуется сечение BROND-3, поскольку оно получено согласовано с рекомендованными выше сечениями для полного, упругого и неупругого рассеяния.

40-Zr-96(N,G),SIG

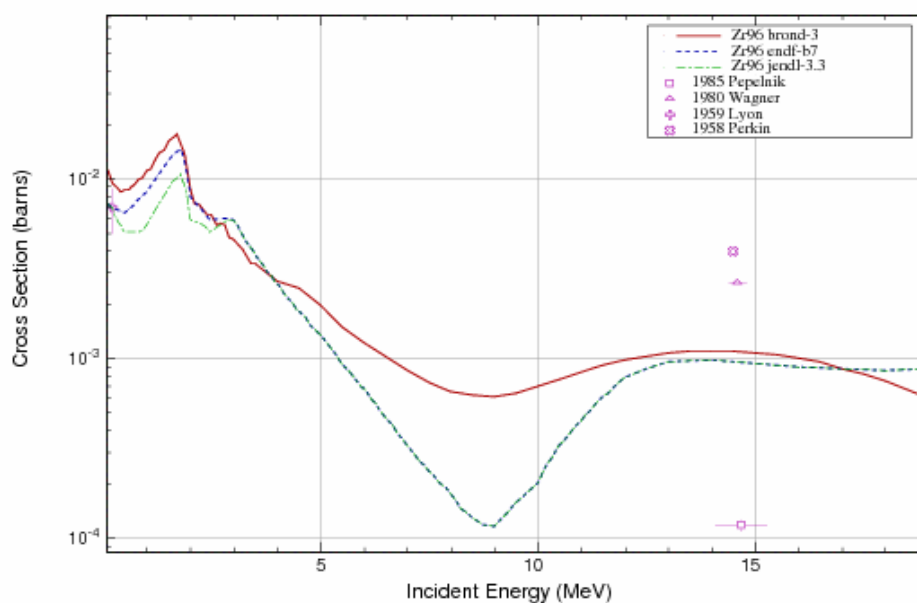


Рис. 8. Сечение радиационного захвата в области 0.1-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

На рис. 9 представлено сечение реакции (n,2n) библиотек JENDL-3.3 и BROND-3 в сравнении с экспериментальными данными. Как видно, обе оценки близки и согласуются с эмпирической систематикой функций возбуждения указанной реакции [97Ma]. Могут быть рекомендованы данные обеих библиотек. Оценки ENDF/B-VII и JENDL-3.3 совпадают. Однако рекомендуется оценка БРОНД-3, поскольку в области максимума она лучше согласуется с систематикой сечений. Функции возбуждения реакции (n,3n) библиотек JENDL-3.3 и БРОНД-3 равноценны. Оценки ENDF/B-VII и JENDL-3.3 совпадают.

Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6 и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

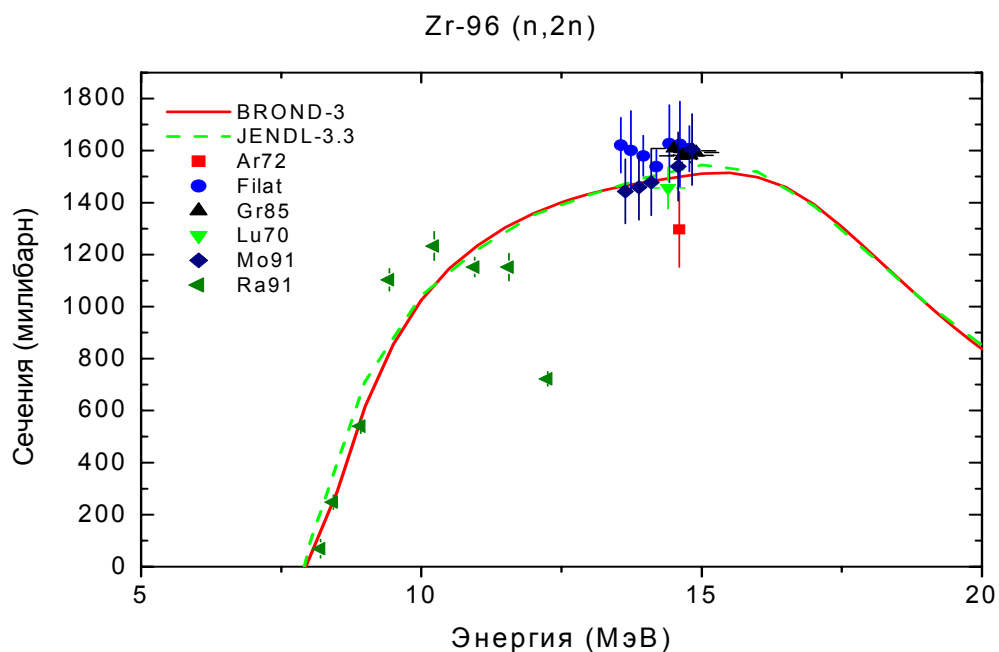


Рис. 9. Сечение реакции (n,2n).

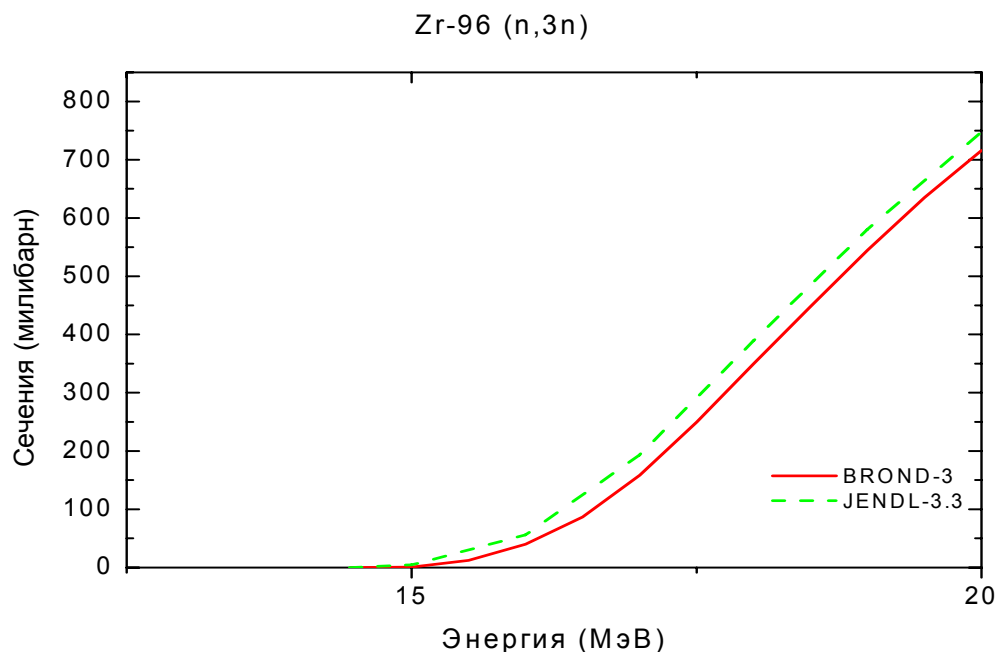


Рис.10. Сечение реакции (n,3 n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104,105 и 107):

На рис. 11 показано сечение реакции $^{96}\text{Zr}(n,p)$. Имеется только одна экспериментальная точка для реакции (n,xp). Оцененные данные библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают. Оценке функции возбуждения из БРОНД-3 следует отдать предпочтение, она согласуется с систематикой сечений реакции (n,p) $^{97}\text{Ma}/$.

На рис. 12 дано сечение реакции $^{96}\text{Zr}(n,d)$. Данные библиотеки ENDF/B-VII приняты из библиотеки JENDL-3.3. Оценки BROND-3 и JENDL-3.3 реакции (n,d), полученные расчетным путем, существенно не согласуются между собой. Оценка БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лежит выше и лучше соответствует систематическому поведению этой реакции.

Сечение реакции $^{96}\text{Zr}(n,t)$ в библиотеках BROND-3 и ENDF/B-VII принято из JENDL-3.3.

На рис.14 представлено сечение реакции $^{96}\text{Zr}(n,a)$. Рекомендуется оценка из БРОНД-3, поскольку она лучше согласуется с экспериментальными данными и с систематикой сечений.

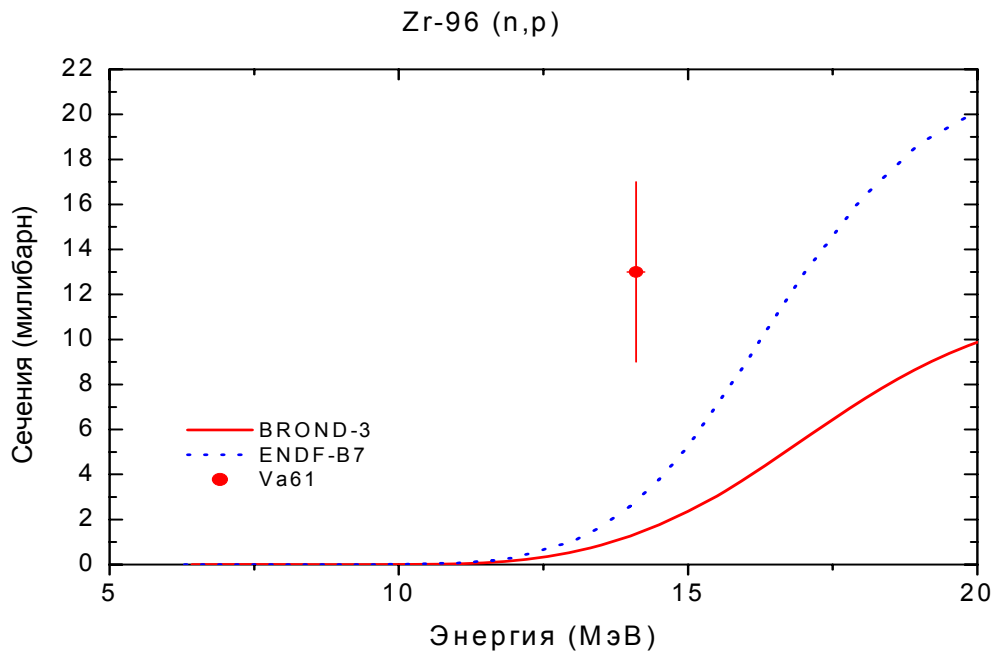


Рис. 11. Сечение реакции (n,p)

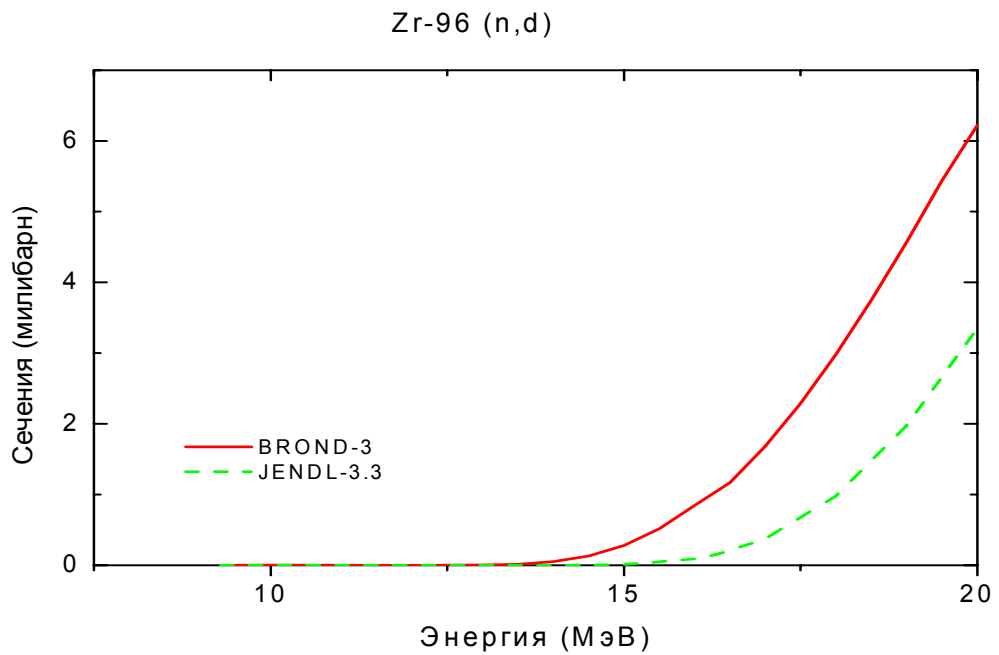


Рис.12. Сечение реакции (n,d).

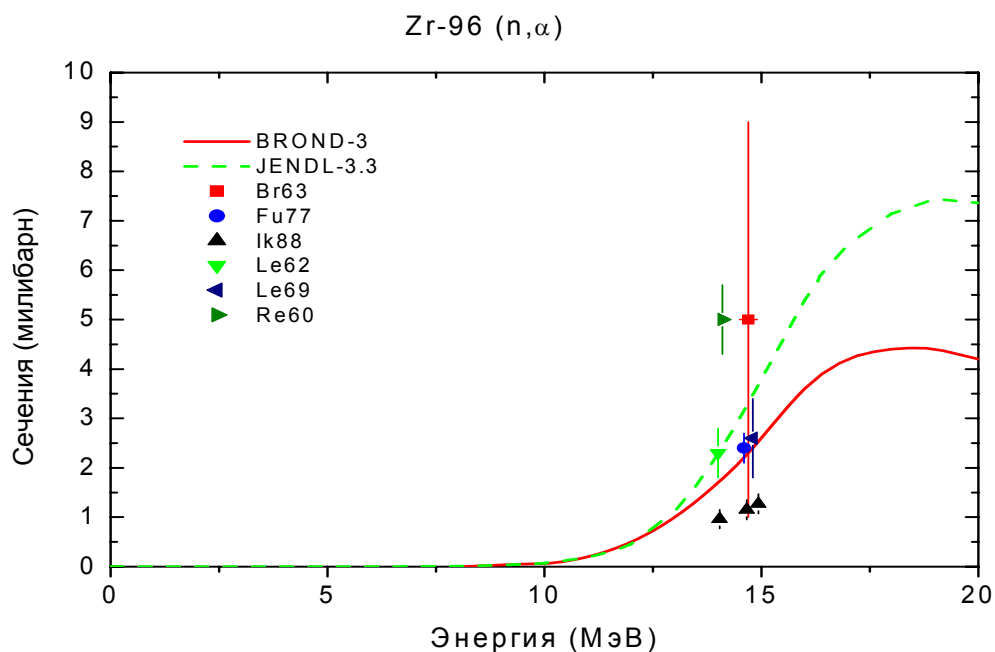


Рис. 14. Сечение реакции (n,α)

3.7. Реакции $(n,n\alpha)$, (n,np) (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет надежных экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. Оценки реакций $(n,n\alpha)$ и (n,np) в файле Zr-96 в БРОНД-3 основаны на расчетах по программе GNASH. Разногласия оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

На рис. 15 дано сечение реакции $^{92}\text{Zr-96}(n,np)$. Оцененные данные библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 примерно равноценны, однако зависимость из БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лучше согласуется с систематикой функций возбуждения реакции $(n,2n)$.

На рис. 16 дано сечение реакции $^{92}\text{Zr-96}(n,na)$. Рекомендуется функция возбуждения из библиотеки БРОНД-3, так как она согласуется с сечением реакции (n,α) и с систематикой реакции (n,na) .

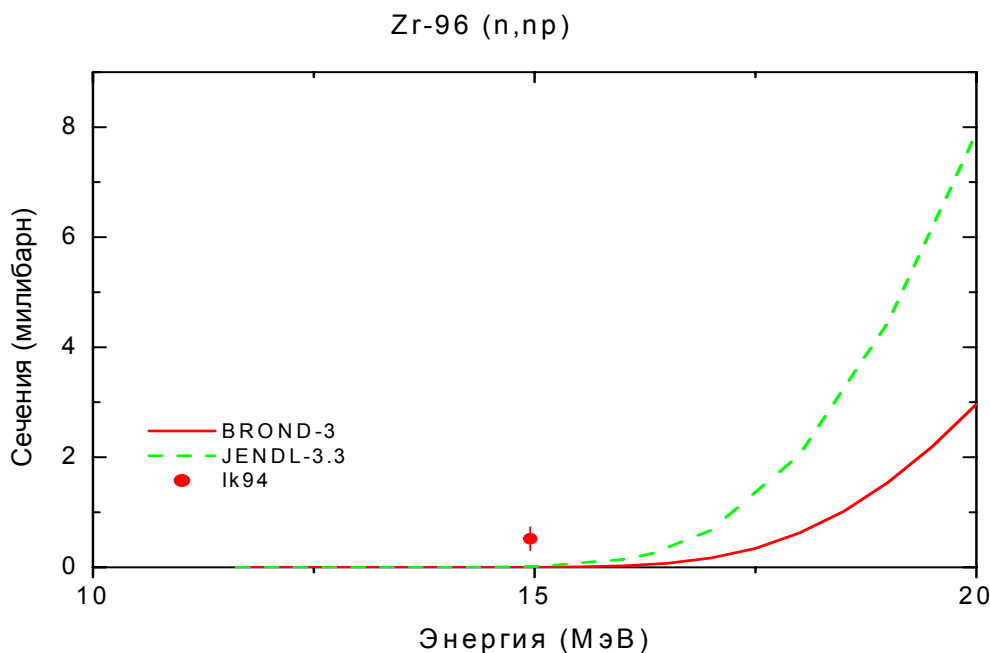


Рис. 15. Сечение реакции (n,np).

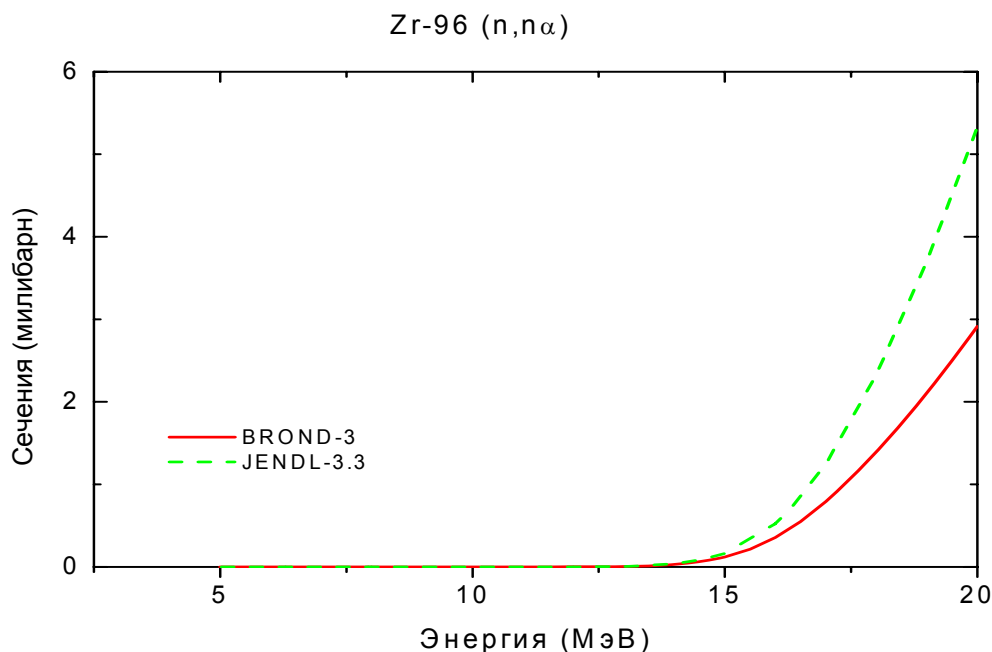


Рис. 16. Сечение реакции (n,n α).

MF=4. Угловые распределения вторичных нейтронов.

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/91Ig/.

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gashy/91Ig/ и Dwuck.

MF=6 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

MT=16,17,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /90Ku/.

MF=12 Множественность образования гамма-лучей

MT=16,17,22, 28, 51-63,91,103,102 107 . Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH /96Yo/

MF=14 Угловые распределения гамма-лучей

MT=16,17,22, 28, 51-63,91,103, 107 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия

MT=102 Угловые распределения гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

MF=15 Непрерывные спектры гамма-лучей

MT=16,17,22, 28, ,91,103, 107 Непрерывные спектры фотонов неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, рассчитаны по программе EGNASH /90Ya/.

MT=102 Непрерывные спектры фотонов радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/91Ig/

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка БРОНД-3 является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn)

реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить в РОСФОНД файл оцененных данных для Zr-96 из БРОНД-3.

Авторы отбора файла

Игнатьюк А.В., Манохин В.Н.

References

- 06Mu Mughabghab, S. Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY, 2006.
- 03Mu.. Mughabghab, S. Report INDC(NDS)-440, 2003.
- 01Ko Koning, A.J., Dalaroche, J.P. Contribution to 3_{rd} RCM of RIPL-2, Vienna, 2001.
- 98Ri RIPPLE-2. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
- 97Ma Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
- 96Yo Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: In "Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors" (Trieste, 1996). Eds. A. Gordini, G. Reffo., World Science, Singapore, 1988, V.1, p.206.
- 95Fi Firestone, R.B. Table of Isotopes, Eight Edition, V.2, New York, 1995.
- 94Av Avrigeanu, V., Hodgson, P., Avrigeanu, M. Phys.Rev.C49(1994)2136
- 91Ig Igarasi, S. and Fukahori, T.: JAERI 1321 (1991).
- 90Ku Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
- 90Ya Yamamuro, N.: JAERI-M 90-006 (1990).
- 88Di Dietrich, S.S., Berman, B.L. Atomic data and Nuclear Data Tables 38(1988)199.
- 86Ki Kikuchi, Y. et al.: JAERI-M 86-030 (1986).
- 86Sa Salah, M.M, et al.: "Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Basic and Applied Science, Santa Fe 1985", Vol. 1, 593 (1986).
- 82Wy Wyrick, J.M., Poenitz, W.P., Report ANL-83-4, p. 196 (1982).
- 81Br Brusegan, A., et al.: "Proc. 4th Int. Symp. on Neutron-Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, Grenoble 1981", 406, the Institute of Physics, London (1982).
- 81Mu Mughabghab, S.F. et al.: "Neutron Cross Sections, Vol. I, Part A", Academic Press (1981).
- 80Ar Arthur E.D. Nucl.Sci.Eng. 76(1980)137.
- 80Co Coceva, C., et al.: "Proc. Int. Conf. on Neutron Cross Sections for Technology, Knoxville 1979", 319 (1980).
- 77Mu Musgrove, A.R. de L., et al.: AAEC/E-415 (1977).
- 75Ho Hofman, H. et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
- 74Lo Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
- 70Ra Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8(1970), p.281.
- 63Ma Macklin, R.L., Inada, T., Gibbons, J.H, Bull. APS, v. 8, p. 81(1963).

41. НИОБИЙ

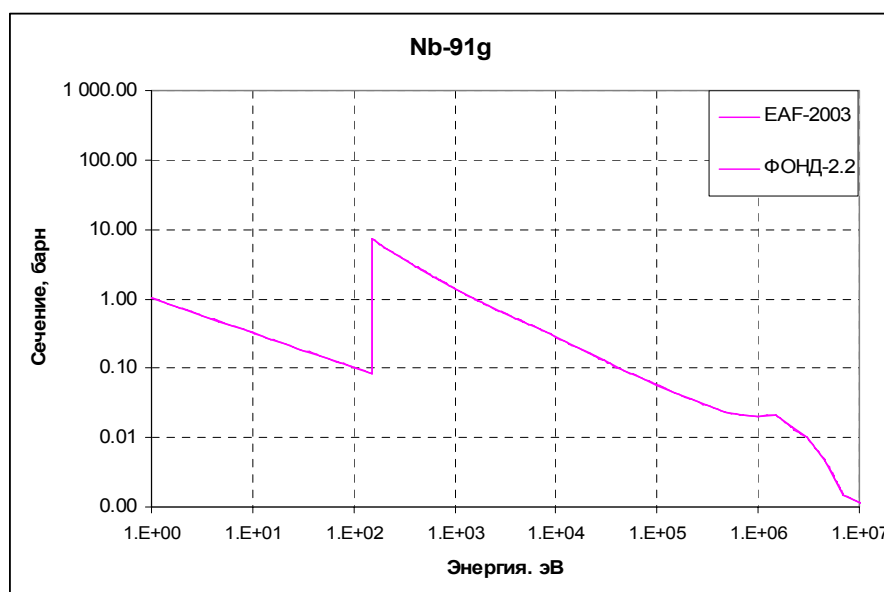
Природный ниобий содержит всего один изотоп ^{93}Nb , однако в библиотеку РОСФОНД должны быть включены нейтронные данные еще для 9 долгоживущих изотопов и изомеров ниобия.

41.1. Ниобий-91^g

Радиоактивен. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=680$ г.) в стабильный ^{91}Zr .

В ФОНД-2.2 содержится оценка Дж. Копецкого и Д. Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) эта оценка не пересмотрена, но сечения реакций, в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=10.

На рисунке приведена энергетическая зависимость сечения захвата.



Сечение захвата Nb-91g

В нижеследующей таблице приведены (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

| | σ_c (0.0253 эВ) | RI_c | Средние сечения реакций на спектре деления | | | |
|----------|---------------------------|--------|--|----------|----------|----------|
| | | | n,gamma | n,2n | n,p | n,alpha |
| EAF-2003 | 6.45 | 11.2 | 0.0181 | 2.73E-04 | 2.19E-03 | 1.01E-04 |

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003, сохранив в файле MF=10 лишь данные об образовании долгоживущего изомера в реакции (n,n') - MT=4. Данные об образовании Nb-92m в реакции (n,γ) - MT=102 – уже содержатся в файле MF=9. Включить в файл MF=3 секции сечений всех реакций (кроме MT=4), парциальные сечения которых содержатся в файле MF=10 библиотеки EAF-2003 (MT=16, 22, 28, 32, 104, 105, 106, 111).

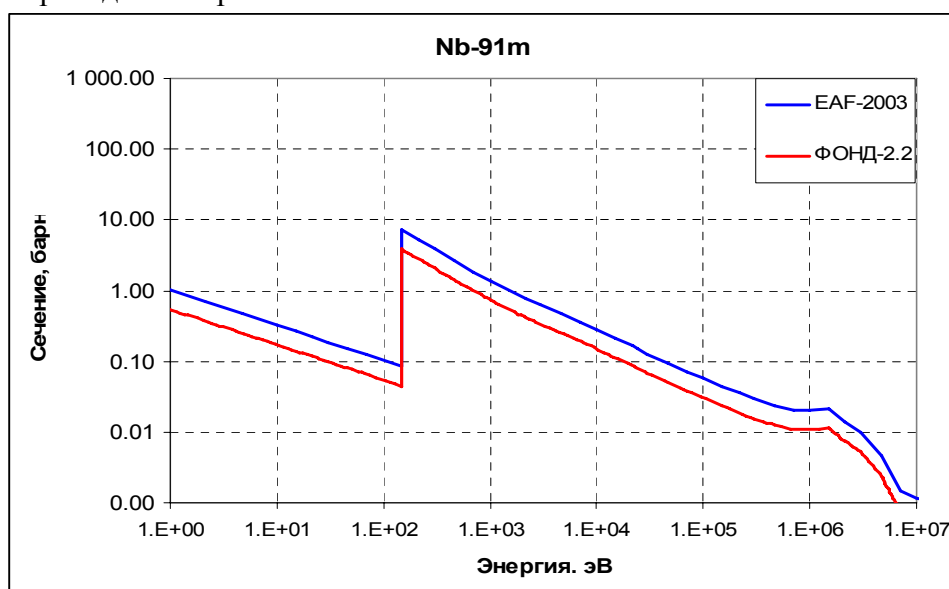
Автор отбора данных
Николаев М.Н.

41.2. Ниобий-91^m

Долгоживущий изомер. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=60.9$ дн.) в стабильный ^{91}Zr .

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) эта оценка пересмотрена. Сечения реакций, в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=10.

На рисунке приведена энергетическая зависимость сечения захвата.



Сечение захвата Nb-91m

Как видно, сечение захвата при пересмотре везде одинаково повышено (в 1.89 раза). В таблице сравниваются средние значения сечений разных реакций.

| | σ_c (0.0253 эВ) | RI_c | Средние сечения реакций на спектре деления | | | |
|----------|---------------------------|--------|--|-----------|----------|----------|
| | | | n,gamma | n,2n | n,p | n,alpha |
| ФОНД-2.2 | 3.42 | 6.0 | 0.0096 | 1.22E-04 | 2.19E-03 | 1.01E-04 |
| EAF-2003 | 6.45 | 11.2 | 0.0181 | Добавить! | 1.05E-02 | 2.35E-05 |

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003. Включить в файл MF=3 секции сечений реакций, которые содержатся в файле MF=10 библиотеки EAF-2003 (MT=16, 22, 28, 32, 104, 105,106, 111). Данные об образовании Nb-92m в реакции (n, γ) - MT=102 - в файле MF=9 уже содержатся. Файл MF=10 исключить.

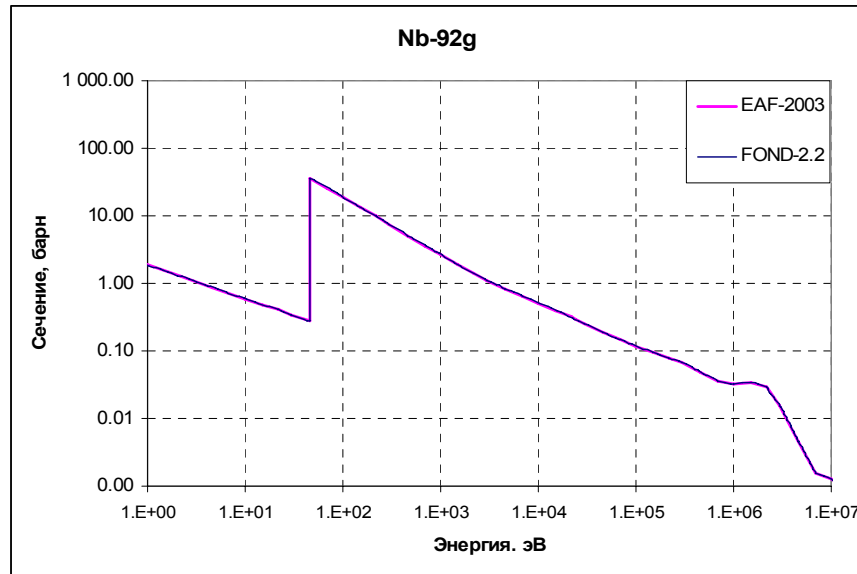
Автор отбора данных

Николаев М.Н.

41.3. Ниобий-92^g

Радиоактивен. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=3.6 \cdot 10^7$ г.) в стабильный ^{92}Zr .
 В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) эта оценка пересмотрена. Сечения реакций, в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=10.

На рисунке приведена энергетическая зависимость сечения захвата.



Сечение захвата Nb-92g

Как видно, сечение захвата сохранено прежним.

В нижеследующей таблице приведены (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER. Как видно, сечения пороговых реакций существенно пересмотрены.

| | σ_c (0.0253 эВ) | RI_c | Средние сечения реакций на спектре деления | | | |
|----------|---------------------------|--------|--|----------|----------|----------|
| | | | n,gamma | n,2n | n,p | n,alpha |
| ФОНД-2.2 | 11.79 | 48.1 | 0.0330 | 5.95E-03 | 2.55E-03 | 2.17E-04 |
| РОСФОНД | 11.79 | 48.1 | 0.0330 | 2.78E-03 | 8.26E-04 | 1.18E-2 |

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003, сохранив в файле MF=10 лишь данные об образовании долгоживущего изомера в реакции (n,n') - MT=4. Включить в файл MF=3 сечения остальных реакций, которые содержатся в файле MF=10 библиотеки EAF-2003(MT=22, 32, 33, 34, 105, 106, 107, 111). Включить в файл MF=9 данные об образовании Nb-91m в реакции (n,2n); данные об образовании Nb-92m в реакции (n,γ) - MT=102 – в этом файле уже содержатся.

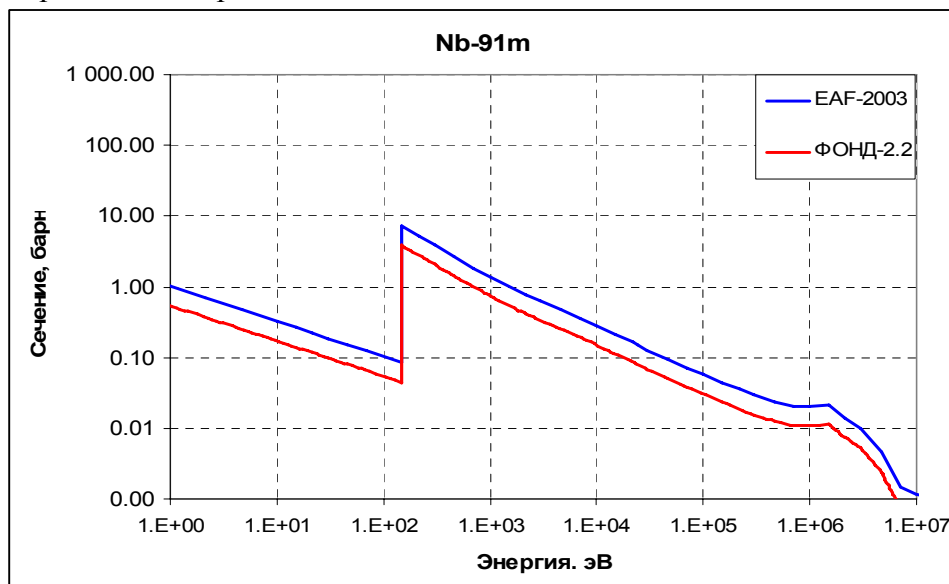
Автор отбора данных
 Николаев М.Н.

41.4. Ниобий-92^m

Долгоживущий изомер. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=10.15$ дн.) в стабильный ^{92}Zr .

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) эта оценка пересмотрена. Сечения реакций, в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=10.

На рисунке приведена энергетическая зависимость сечения захвата.



Сечение захвата Nb-91m

В таблице сравниваются средние значения сечений разных реакций.

| | σ_c (0.0253 эВ) | RI_c | Средние сечения реакций на спектре деления | | | |
|----------|---------------------------|--------|--|----------|----------|----------|
| | | | n,gamma | n,2n | n,p | n,alpha |
| ФОНД-2.2 | 3.42 | 6.0 | 0.0096 | 1.22E-04 | 2.19E-03 | 1.01E-04 |
| EAF-2003 | 6.45 | 11.2 | 0.0181 | 4.505E-3 | 1.05E-02 | 2.35E-05 |

Ясно, что надежность оцененных данных для рассматриваемых нейтрон-дефицитных нуклидов невысока.

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003. Включить в файл MF=3 секции сечений остальных реакций, которые содержатся в файле MF=10 библиотеки EAF-2003 (MT=16, 32, 33, 34, 105, 106, 107, 111). Включить файл MF=9 с данными о вероятностях образования долгоживущих изомеров в реакциях (n,2n) – MT=16 и (n, γ) – MT=102 взяв информацию из файла MF=10 библиотеки EAF-2003. Файл MF=10 исключить.

Автор отбора данных
Николаев М.Н.

41.5. Ниобий-93⁹

Содержание в природной смеси -100%.

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных фигурируют три различных оценки:

- 1) В.Г.Проняев, 1988 г. – в библиотеках БРОНД-2 и ФОНД-2.2.
- 2) M.Chadwick,P.Young,D.L.Smith, 1997 г. Выполнена для ENDF/B-VI, mod.3; содержится также в ENDF/B-VII и JEFF-3.1.
- 3) M.Kawai, N.Yamaturo, 1988 с пересмотром резонансных параметров и добавлением данных об образовании фотонов в нейтронных реакциях в 1994 г. Содержится в JENDL-3.3 и CENDL-2.

1. Резонансная область

1.1. Область разрешенных резонансов.

Область разрешенных резонансов описывается во всех трех оценках. В таблице 1. приведены характеристики этой области.

Таблица 1. Область разрешенных резонансов.

| Оценка | E гран., эВ | Число s-рез.-ов. | | E _{max} , эВ | Число p-рез.-ов. | | | | E _{max} , эВ | Полное число рез.- ов |
|---------------|----------------|------------------|-----|--------------------------|------------------|-----|-----|-----|--------------------------|-----------------------------|
| | | J=4 | J=5 | | J=3 | J=4 | J=5 | J=6 | | |
| Проняев и др. | 7000 | 99 | | 7306 | 100 | | | | 7331 | 199 |
| | | J=4 | J=5 | | J=3 | J=4 | J=5 | J=6 | | |
| | | 52 | 47 | | 5 | 47 | 34 | 13 | | |
| Каваи и др. | 7000 | 139 | | 7306 | 62 | | | | 7331 | 201 |
| | | J=4 | J=5 | | J=3 | J=4 | J=5 | J=6 | | |
| | | 68 | 70 | | 16 | 17 | 17 | 12 | | |
| Чедвик и др. | 7350 | 148 | | 7306 | 46 | | | | 7331 | 194 |
| | | J=4 | J=5 | | J=3 | J=4 | J=5 | J=6 | | |
| | | 66 | 81 | | 8 | 10 | 12 | 15 | | |

Как видно из таблицы, числа рассмотренных в оценках резонансов близки, однако, в определении четностей и спинов резонансов имеются существенные различия. Заметим, что в оценке Чедвика распределение резонансов по спинам максимально строго соответствует предположению, что плотность резонансов пропорциональна 2J+1. В оценке Каваи плотность резонансов с малым спином завышается относительно этой закономерности, а в оценке Проняева вовсе ей не соответствует.

Имеются различия и принимаемых нейтронных и радиационных ширинах резонансов. Параметры Каваи и др. сильнее отличаются от оценки, принятой Проняевым, чем параметры, принятые Чедвиком. Мерой различий может служить сумма резонансных интегралов, рассчитанная по приводимым параметрам в одноуровневом приближении Брайта-Вигнера:

$$RI = \frac{\pi}{2} 2.608 * 10^6 \left(\frac{AWR + 1}{AWR} \right)^2 \frac{(2J + 1) \Gamma_n \Gamma_\gamma}{2 * (2I + 1) E_r^2 (\Gamma_n + \Gamma_\gamma)}$$

Для ниобия со спином 9/2 величина 2I+1=10, AWR=92.108, а остальные параметры определяются из файла. Сумма вычисленных таким образом резонансных интегралов

(обозначим ее SRI), разумеется, не учитывает вклад низких энергий. Различия в этой величине таковы:

БРОНД-2 : SRI=8.412 барн;

LENDL-3.3:SRI=7.972 барн;

ENDF/B-7: SRI=8.207 барн.

Различия не превышают погрешности, приписанной полному резонансному интегралу Мухабхабом (8.5 ± 0.5 барн). Однако вклады отдельных резонансов в суммарный интеграл сплошь и рядом различаются на $\pm 10 - 20\%$, а для слабых резонансов и на $30 - 4\%$ и более.

Заметим, что в описаниях оценок их авторы не ссылаются на какие-либо экспериментальные работы, дополняющие информацию, принятую во внимание в справочнике Мухабхаба¹. Рекомендованные там тепловое сечение и резонансный интеграл были им подтверждены и в оценке 2003 г.².

В наборе резонансов Каваи и др. присутствует один “лишний” слабый резонанс при 184.3 эВ ($\Gamma_n = 2.364 \cdot 10^{-4}$ эВ). Р-резонанс при 6796 эВ ($\Gamma_n = 0.742$ эВ), присутствующий в двух других оценках, заменен s- резонансом при 6802 эВ ($\Gamma_n = 0.6467$ эВ).

В оценке Чедвика отсутствует целых 7 резонансов, наличествующих в двух других оценках и в справочнике Мухабхаба 1984 г. – все в интервале от 5 до 7 кэВ.

Последнее обстоятельство, неоправданное распространение области разрешенных резонансов за энергию последнего приводимого резонанса и отсутствие в оценке области неразрешенных резонансов побуждают не принимать ее во внимание при отборе данных для РОСФОНДа. Что касается двух других оценок, то трудно обосновать весомое предпочтение одной из них.

Сравним теперь энергетические зависимости плотностей уровней, следующие из рассматриваемых оценок. Разделим интервал от 0 до 7 кэВ на две равные части и сравним числа s- и р-резонансов в каждой из них.

Таблица 2. Сравнение чисел резонансов в равных соседних интервалах энергии

| Оценка | Число s- резонансов. | | Число р- резонансов | |
|---------------|----------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| | От 0 до 3.5 кэВ | От 3.5 до 7 кэВ | От 0 3.5 кэВ | От 3.5 до 7 кэВ |
| Проняев и др. | 44 | 51 | 55 | 43 |
| Каваи и др | 56 | 77 | 43 | 18 |
| Чедвик и др. | 63 | 81 | 35 | 9 |

Как видим, во всех оценках число р-резонансов во втором интервале оказывается меньшим, чем в первом, что представляется довольно странным, если учесть, что в рассматриваемом диапазоне энергий средняя нейтронная ширина р-резонансов меняется пропорционально $E^{3/2}$ и в первом из рассматриваемых резонансов можно было бы ожидать большего пропуска слабых р-резонансов, чем во втором.

В то же время число s- резонансов во втором интервале во всех оценках оказывается заметно больше, чем в первом. Есть основания полагать, что избыток s-резонансов во втором интервале обусловлен неправильной идентификацией их четности. Так, если предположить, что 21 “лишний” s-резонанс в оценке Каваи являются на самом деле р-резонансами, то число этих резонансов во втором интервале достигнет $18 + 21 = 39$ и станет достаточно близким к числу р-резонансов в первом интервале. В этом случае не потребуется никаких предположений о пропуске слабых резонансов. Полное число s-резонансов до 7 кэВ станет равным 112 ($\langle D_s \rangle = 62.5$ эВ), а р-резонансов – 82 ($\langle D_p \rangle = 85.4$ эВ).

Если предположить, что в первом интервале s-резонансы более корректно идентифицированы в оценке Проняева, то число “лишних” s-резонансов во втором

¹ S.F.Mughabghab et. al. Neutron Cross Sections. Vol.1. Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. Academic Press. 1981.

² Mughabghab S.F. INDC(NDS)-440, Feb.2003.

интервале оказывается равным всего 7. Если эти 7 резонансов на самом деле являются р-резонансами, то числа р-резонансов в первом и во втором интервалах станут близки друг к другу (55 и 50). При этом соотношение между s- и р-резонансами оказывается более естественным: полное число s-резонансов станет равным 88 ($\langle D_s \rangle = 79.5 \text{ эВ}$), а р-резонансов – 105 ($\langle D_p \rangle = 66.6 \text{ эВ}$). Примем, что плотность уровней пропорциональна $2J+1$ и не зависит от четности (а именно так и принимается при оценке сечений в области неразрешенных резонансов); тогда число р-резонансов (могущих иметь спины 3, 4, 5 и 6) должно превосходить число s-резонансов (могущих иметь спины 4 и 5) ровно в два раза. Если принять, что все s-резонансы разрешены и их число равно 88, то ожидаемое число р-резонансов составляет 176, из которых примерно 70 наиболее слабых пропущены. Поскольку для р-резонансов нейтронные ширины в рассматриваемом энергетическом интервале в среднем много меньше радиационных, вклад в резонансный интеграл пропущенных р-резонансов с очень малыми нейтронными ширинами должен быть весьма мал.

В оценке Чедвика число резонансов, идентифицированных как s-резонансы, столь велико, а число р-резонансов во втором интервале столь мало, что для устранения явного противоречия приходится предположить, что часть s-резонансов и в первом интервале идентифицирована ошибочно. В этом еще один минус этой оценки.

На рис. 1 и 2 сравниваются оцененные сечения в области разрешенных резонансов, представленные в мультигрупповой форме. Расхождения невелики за исключением интервалов, содержащих последние резонансы в рассматриваемой области. Расхождения в мультигрупповых сечениях отражают погрешности, с которыми известны сечения.

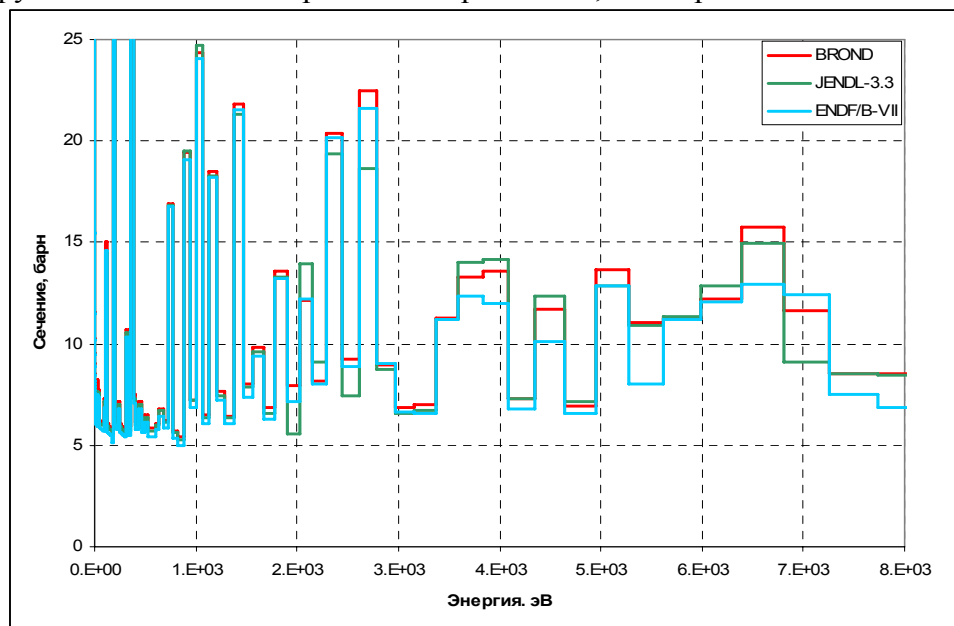


Рис. 1 Мультигрупповые полные сечения в области разрешенных резонансов

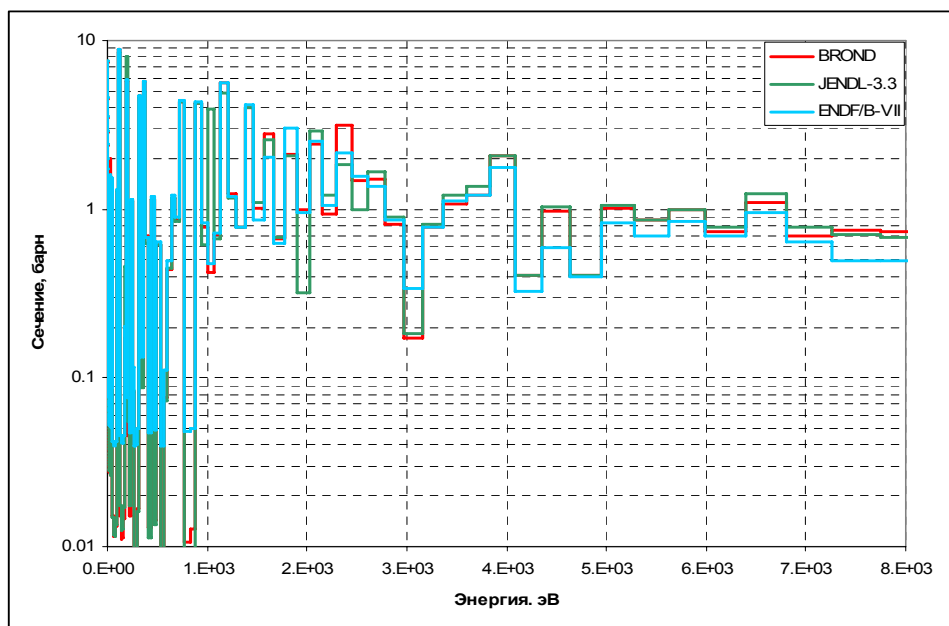


Рис.2. Мультигрупповые сечения радиационного захвата в области разрешенных резонансов.

1.2. Область неразрешенных резонансов

В оценке Проняева эта область простирается от 7 до 50 кэВ, т.е. превосходит порог неупругого рассеяния с возбуждением первого уровня (30.4 кэВ), но не захватывает область, где возможно возбуждение 2-го уровня (686 кэВ).

В оценке Каваи область неразрешенных резонансов распространена до 100 кэВ, т.е. в ней также возможно неупругое рассеяние с возбуждением только первого уровня. Заметим, что в случае ниобия неупругое рассеяние даже при 100 кэВ в сто с лишним раз меньше сечения радиационного захвата, так что распространение области неразрешенных резонансов до этой энергии вполне оправдано (нерезонансная «подложка» за счет неупругого рассеяния не исказит факторов резонансной самоэкранировки).

В обеих оценках сечения в области неразрешенных резонансов рассчитываются по заданным средним резонансным параметрам; в файле MF=3 задаются лишь нерезонансные «подложки». В оценке Проняева эта подложка обусловлена почти исключительно неупругим рассеянием (вклады реакций (n,p) и (n,α) чрезвычайно малы). В оценке Каваи введена подложка, корректирующая сечение захвата, рассчитанное по средним резонансным параметрам, которая при энергиях ниже 30 кэВ отрицательна, а выше – положительна и при 100 кэВ достигает 10% от вклада, рассчитанного по резонансным параметрам.

В обеих оценках средние резонансные параметры приводятся для s- и p-волн и не зависят от энергии, но заданы в формате, предусматривающем описание энергетической зависимости.

В табл.3 приводятся значения средних резонансных параметров в сравниваемых оценках. Приведены также следующие из них нейтронные силовые функции.

Таблица 3. Средние резонансные параметры.

| J^π | Оценка Проняева и др. (R=0.67025) | | | | Оценка Каваи и др. (R=0.64765) | | | |
|---------|-----------------------------------|--------------|-------|-----------------|--------------------------------|--------------|-------|-----------------|
| | D | Γ_n^0 | S_n | Γ_γ | D | Γ_n^0 | S_n | Γ_γ |
| 4^+ | 178.92 | 0.00716 | 0.40 | 0.165 | 213.31 | 0.0085323 | 0.40 | 0.172 |
| 5^+ | 146.39 | 0.00586 | 0.40 | 0.165 | 174.52 | 0.006981 | 0.40 | 0.172 |
| 3^- | 230.04 | 0.118 | 5.13 | 0.19 | 274.25 | 0.1832 | 6.68 | 0.172 |
| 4^- | 178.92 | 0.0912 | 5.10 | 0.19 | 213.31 | 0.14249 | 6.68 | 0.172 |
| 5^- | 146.39 | 0.0747 | 5.10 | 0.19 | 174.52 | 0.11658 | 6.68 | 0.172 |
| 6^- | 123.87 | 0.0632 | 5.10 | 0.19 | 147.67 | 0.098646 | 6.68 | 0.172 |

Среднее расстояние между s-резонансами в оценке Проняева равно 80.5 эВ, что почти совпадает с оценкой по области разрешенных резонансов в интервале до 3.5 кэВ (79.5 эВ). Среднее расстояние между p-резонансами равно 40.25 эВ, вместо 66.6 эВ, ожидаемых из области разрешенных резонансов после коррекции на погрешность оценки четности. Это подтверждает вывод о пропуске примерно 40% слабых p-резонансов в области ниже 7 кэВ, сделанный для оценки Проняева в разделе 1.1.

Среднее расстояние между s-резонансами в оценке Каваи равно 96 эВ, что намного превышает величину, следующую из этой же оценки в области разрешенных резонансов (даже если в нее ввести коррекцию на погрешность в определении четности резонансов). Среднее расстояние между p-резонансами равно 48 эВ, что также трудно согласовать с данными, следующими из области разрешенных резонансов.

Для s-волны эти расхождения, однако, компенсируются различием в приведенных нейтронных ширинах так что силовые функции s-волны в точности совпадают. Для p-волны приведенные нейтронные ширины в оценке Каваи настолько превышают принятые Проняевым, что силовые функции для p-волны оказываются больше несмотря на меньшую плотность уровней.

Чтобы сделать заключение о преимуществе той или иной оценки необходимо сравнить следующие из них сечения с имеющимися экспериментальными данными.

На рис. 3 и 4 оцененные полное сечение и сечение захвата (о области неразрешенных резонансов - в мультигрупповой форме) сравниваются с результатами экспериментов.

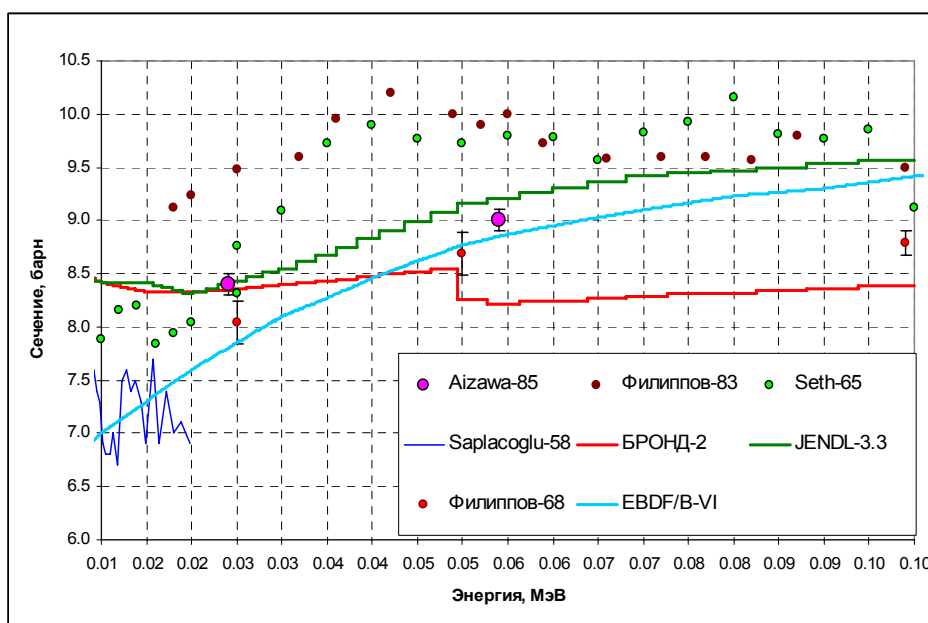


Рис.3. Полное сечение в области неразрешенных резонансов

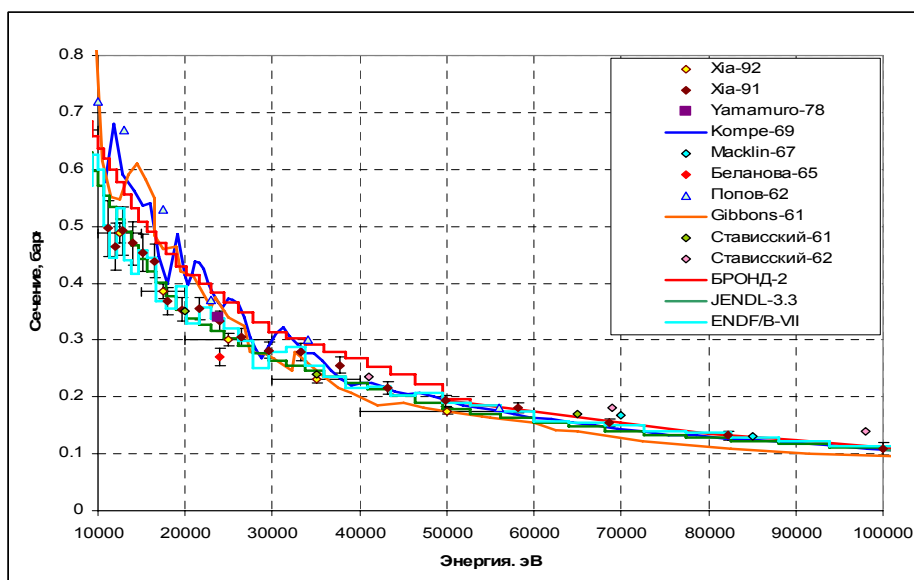


Рис.4. Сечение радиационного захвата в области неразрешенных резонансов.

В оценке Каваи к сечениям, рассчитанным по резонансным параметрам, добавляются плавные подложки, заданные поточечно в файле MF=3. Эти подложки приведены на рис. 5.

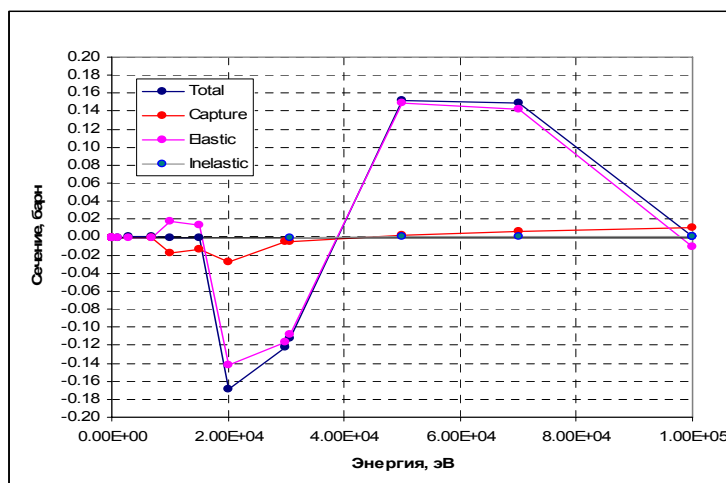


Рис. 5. Нерезонансные подложки к резонансным сечениям в оценке JENDL-3.3.

Как видно из рис. 2, сечения захвата в области неразрешенных резонансов в ENDF/B-VII и в JENDL-3.3 практически совпадают и опираются на новейшие данные Xia, проходящими между точками Ямамура и Белановой. Оценка Проняева, выполненная до появления данных Xia, естественно, опирается на результаты более ранних экспериментов по детальному измерению сечения захвата. Плавная подложка, введенная в сечение захвата, не превышает 0.02 барна и если ее убрать, то качество согласия оцененных и экспериментальных данных не ухудшится.

Что касается полного сечения, то оценка ENDF/B-VII, ориентированная при низких энергиях на данные Саплакоглу, представляется заниженной: на границе с областью разрешенных резонансов при этом получается резкий скачок полного сечения (см. рис.1). Подобные скачки обнаруживается и в двух других оценках, но он существенно меньше.

Оценки полного сечения Проняева и Каваи при энергии ниже 30 кэВ (порог неупругого рассеяния) практически совпадают и согласуются с совокупностью экспериментальных данных. При более высоких энергиях оценка Проняева явно занижена, а оценка Каваи представляется несколько завышенной. Причины расхождений в экспериментальных объяснить, разумеется, затруднительно. При наличии этих

расхождений введение нерезонансной подложки в сечение рассеяния и в полное сечение при энергиях ниже 70 кэВ, как это сделано в JENDL-3.3, не представляется оправданным.

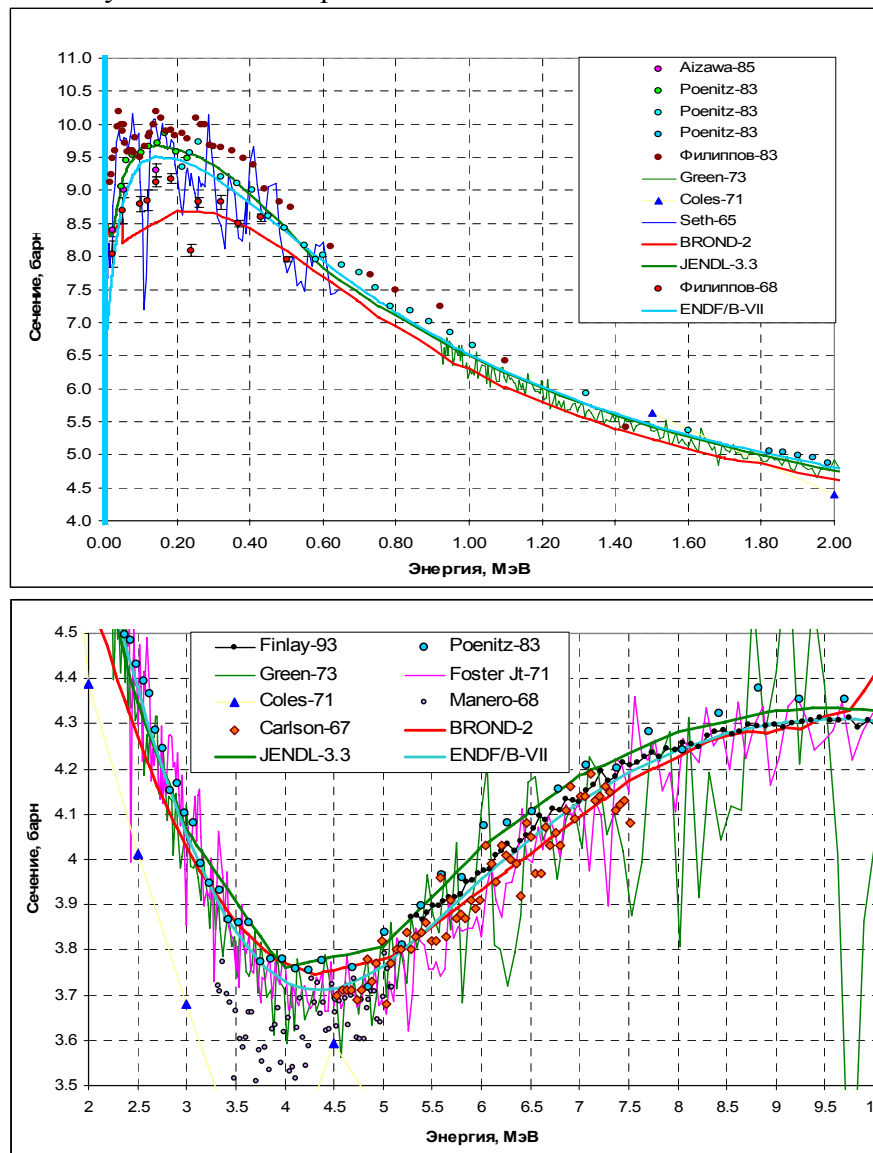
Подводя итог рассмотрению оцененных данных в резонансной области, приходим к заключению, что из трех сравниваемых оценок в области разрешенных резонансов целесообразно принять оценку Проняева, а в области неразрешенных резонансов – оценку Кавая, устранив в ней плавные подложки (кроме очень малой подложки за счет сечения неупругого рассеяния).

2. Сечения вне резонансной области.

2.1. Полное сечение.

Оценки полного сечения вне резонансной области сравниваются друг с другом и с экспериментальными данными на рис. 6.

Ниже 3 МэВ оценки ENDF/B-VII и JENDL-3.3 очень близки друг к другу и неплохо согласуются с совокупностью экспериментальных данных.



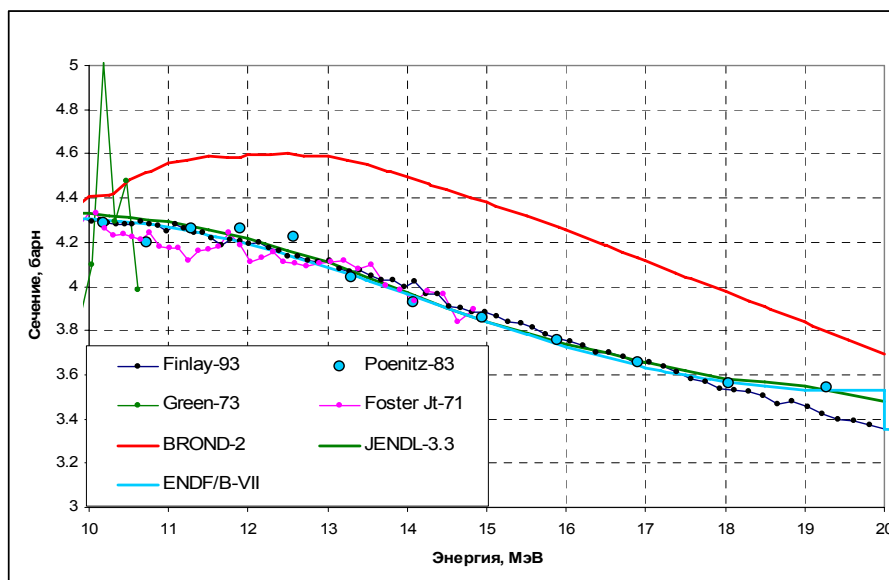


Рис. 6. Полное сечение вне резонансной области

При более высоких энергиях оценка ENDF/B-VII лучше согласуется с результатами Финляя (за исключением области выше 18 МэВ, где данные Финляя расходятся с результатами Пёнитца), а также с совокупностью более ранних измерений.

Представляется целесообразным до 3 МэВ принять в РОСФОНД оценку полного сечения из JENDL-3.3, а при более высоких энергиях – из ENDF/B-VII.

2.2. Сечение радиационного захвата

Сечение радиационного захвата вне резонансной области показано на рис. 7. Оценка Проняева представляется оптимальной и рекомендуется в РОСФОНД.

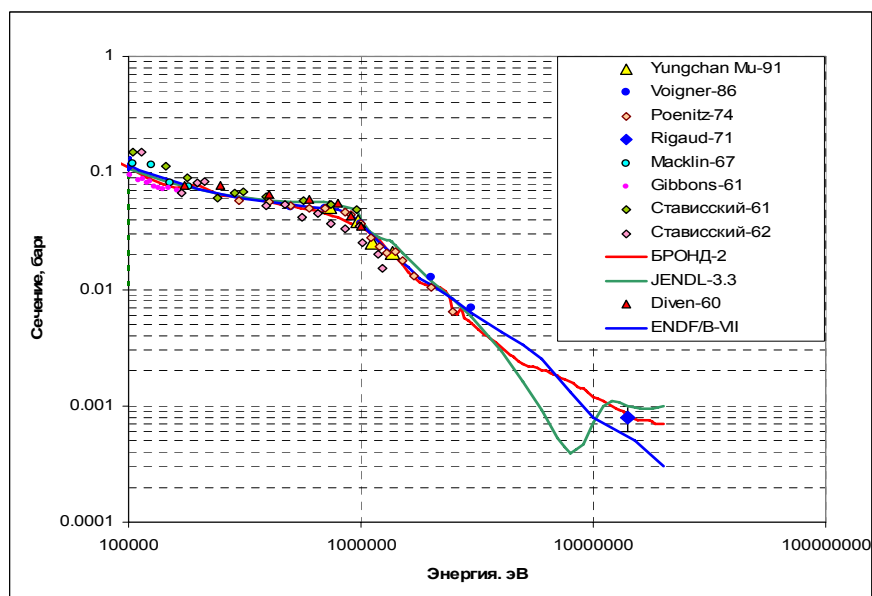


Рис. 7. Сечение радиационного захвата

2.3. Сечение неупругого рассеяния.

На рис. 8 оценки сечения неупругого рассеяния сравниваются с экспериментальными данными. Оценки хорошо согласуются друг с другом и более или менее согласуются с экспериментальными данными. Обращает на себя внимание

“завубрина” в оцененных сечениях неупругого рассеяния при 2 МэВ, проявившаяся в оценках Каваи и Чедвика. При 2 МэВ лежит порог реакции (n,n’α), но ее сечение столь мало (даже при 14 МэВ едва достигает до 2 – 3 миллибарн), что конкуренция с ней не может служить причиной “завубрины”. На рис. 8 показаны две составляющие сечения неупругого рассеяния – с возбуждением дискретных уровней и с возбуждением континуума по оценке JENDL-3.3. Ни в одной из этих составляющих никаких “завубрин” не наблюдается. Ясно, что ее причина кроется в ненадлежащей оценке сечений этих составляющих вблизи порога возбуждения континуума.

В оценке Проняева подобной аномалии не наблюдается и вообще до 4 МэВ эта оценка выглядит лучше других. При более высоких энергиях обоснованней представляется оценка Чедвика, учитывающая данные Симакова и Томпсона, которые в других оценках полностью игнорируются.

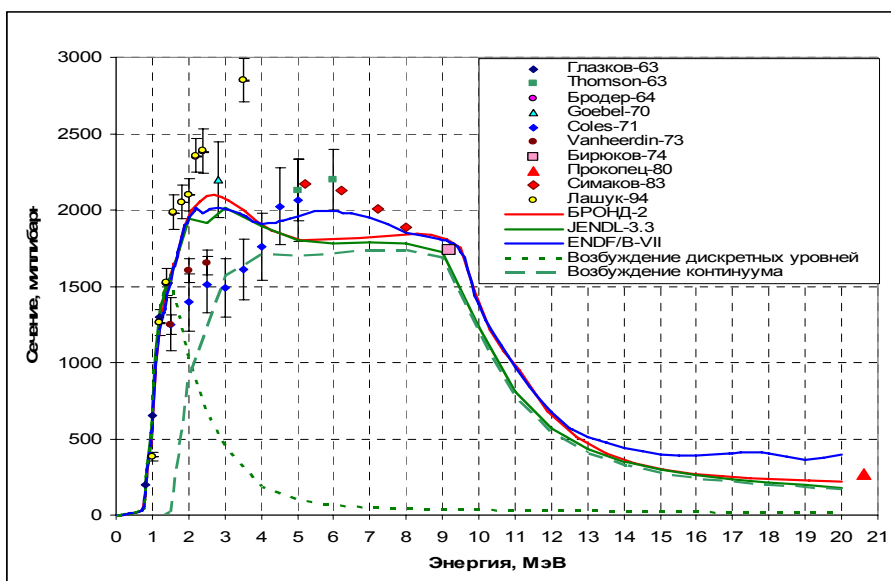


Рис. 8. Сечение неупругого рассеяния

В таблице 4 схемы уровней, принятые при расчете сечений и спектров неупругого рассеяния, сравниваются со схемой уровней из базы данных PCNUDAT (2002). Как видно, оценка Проняева удовлетворяет этой схеме наилучшим образом.

Представляется целесообразным принять в РОСФОНД для сечений неупругого рассеяния оценку Проняева, откорректировав сечение возбуждения континуума уровней так, чтобы в интервале 4-8 МэВ полное сечение неупругого рассеяния совпало с оценкой, принятой в ENDF/B-VII.

Таблица 4. Схемы уровней Nd-93

| № | PCNUDAT, E, кэВ | J π | № | БРОНД-2, E, кэВ | № | JENDL-3.3 E, кэВ | № | ENDF/B-VII. E, кэВ |
|----|--------------------|-----------|---|--------------------|---|---------------------|---|-----------------------|
| 0 | 0 | 9/1+ | | | | | | |
| 1 | 30.82 | 1/2- | 1 | 30.4 | 1 | 30.73 | 1 | 30.73 |
| 2 | 687.0 | 3/2- | 2 | 686 | 2 | 686 | 2 | 679.9 |
| 3 | 743.9 | 7/2+ | 3 | 744 | 3 | 744 | 3 | 744 |
| | | | | | | | 4 | 801 |
| 4 | 808.58 | 5/2+ | 4 | 808.7 | 4 | 808.7 | 5 | 808. |
| 5 | 810.4 | 5/2- | 5 | 810.1 | 5 | 810.1 | | |
| 6 | 949.83 | 13/2+ | 6 | 949.9 | 6 | 949.9 | 7 | 949.9 |
| 7 | 970 | 1/2-,3/2- | | | | | | |
| 8 | 978.94 | 11/2 | 7 | 979.1 | 7 | 979.1 | 8 | 979 |
| 9 | 1082.67 | 9/2+ | 8 | 1082.6 | 8 | 1082.6 | 9 | 1080 |
| 10 | 1126.9 | 5/2 | 9 | 1279 | | | | |
| 11 | 1284.4 | 1/2+ | | | | | | |
| 12 | 1290 | 1/2-,3/2- | | | 9 | 1290 | | |

| | | | | | | | | |
|----|---------|-------------|--------------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|--------------------------------------|-------------|
| 13 | 1297.2 | 9/2+ | 10 | 1297.4 | 10 | 1297.4 | | |
| 14 | 1315.1 | 5/2- | 11 | 1315.6 | 11 | 1315.6 | 10 | 1300 |
| 15 | 1330 | 3/2+,5/2+ | | | | | 11 | 1320 |
| 16 | 1335.2 | 17/2 | 12 | 1335.1 | 12 | 1335.1 | 12 | 1330 |
| 17 | 1364 | 5/2-,7/2- | 13 | 1364 | 1340 – граница континуума | | | |
| 18 | 1369.7 | 3/2+ | | | | | | 13 |
| 19 | 1395.1 | 5/2 | 14 | 1395.2 | | | 14 | 1390 |
| 20 | 1454.2 | 1/2+,3/2+ | | | | | 15 | 1480 |
| 21 | 1482.9 | 7/2+,9/2+ | 15 | 1484.7 | | | 16 | 1484 |
| 22 | 1491.05 | 15/2+ | 16 | 1491.2 | | | 17 | 1500 |
| | | | 17 | 1500.5 | | | | |
| 23 | 1571 | 1/2-,3/2- | 18 | 1570 | | | | |
| 24 | 1603.06 | 7/2-,9/2- | | | | | 18 | 1600 |
| 25 | 1603.7 | 11/2+,13/2+ | 19 | 1605.2 | | | | |
| 26 | 1665.2 | 5/2+ | 20 | 1664.9 | | | 19 | 1670 |
| 27 | 1679 | 9/2+ | 21 | 1670 | | | 20 | 1680 |
| 28 | 1682 | 9/2+ | 22 | 1682.8 | | | 21 | 1681 |
| 29 | 1686.1 | 13/2+ | | | | | | |
| 30 | 1693.2 | 3/2+,5/2+ | | | | | | 1690 |
| 31 | 1712.4 | 5/2+ | 1710 | | | | 22 | 1950 |
| | | | 1710 – граница континуума | | | | 23 | 2155 |
| | | | | | | | 2177 – граница континуума | |

Рассмотрим теперь неупругое рассеяние с образованием ниобия-93 в изомерном состоянии. Таковым является первое возбужденное состояние этого ядра, имеющее период полураспада 16.13 г. Данные о сечении образования этого состояния содержатся в оценке ENDF/B-VII и в библиотека EAF-2003. На рис.9 эти оценки сравниваются друг с другом и с экспериментальными данными. Приведено также сечение образования изомера, полученное на основе данных БРОНД-2 в предположении, что изомер со 100-процентной вероятностью образуется при возбуждении уровней 1, 2, 5, 9 и 14 и не образуется при возбуждении других уровней с энергиями возбуждения ниже порога континуума (что соответствует схеме распада, рекомендованной в PCNUDAT на основе ENSDF) и с вероятностью 14% при возбуждении континуума уровней. Последняя вероятность подобрана эмпирически.

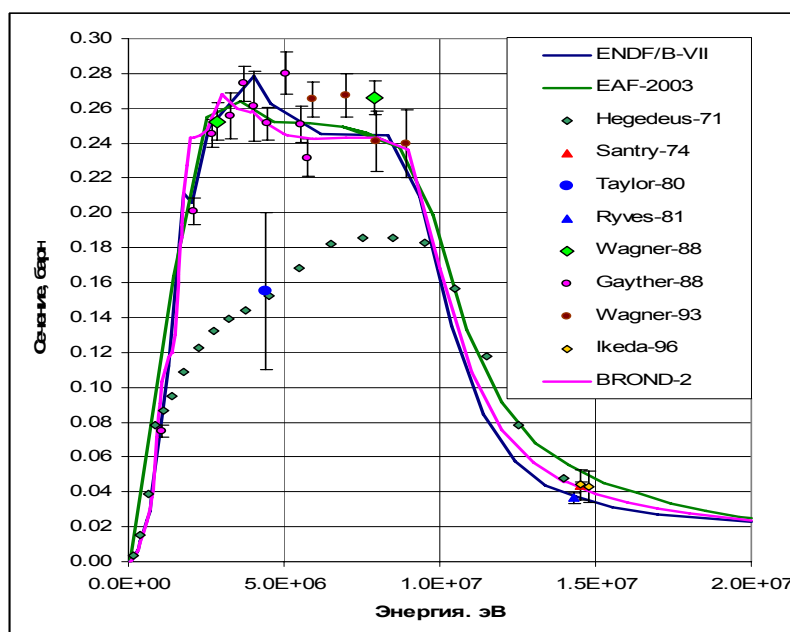


Рис. 9. Сечение образования долгоживущего изомера ниобия-93

Нерегулярное поведение сечения образования изомера в оценках ENDF/B-VII и БРОНД-2 обусловлено конкуренцией вклада различных уровней в сечение образования и не является чем-то неожиданным. Ясно, что “в чистом виде” оценка EAF-2003 не может быть рекомендована в РОСФОНД, поскольку ход сечения вблизи порога совершенно не соответствует ходу сечения возбуждения первого уровня – единственного при этих энергиях канала образования изомера. Вполне естественно рекомендовать **принять в РОСФОНД сечение образования изомера, следующее из данных БРОНД-2.**

2.4. Сечения реакций (n,xn)

2.4.1. Реакция (n,n'α) имеет порог 1.97 МэВ. Все оценки сечения этой реакции существенно расходятся с имеющимися экспериментальными данными (см. рис. 10).

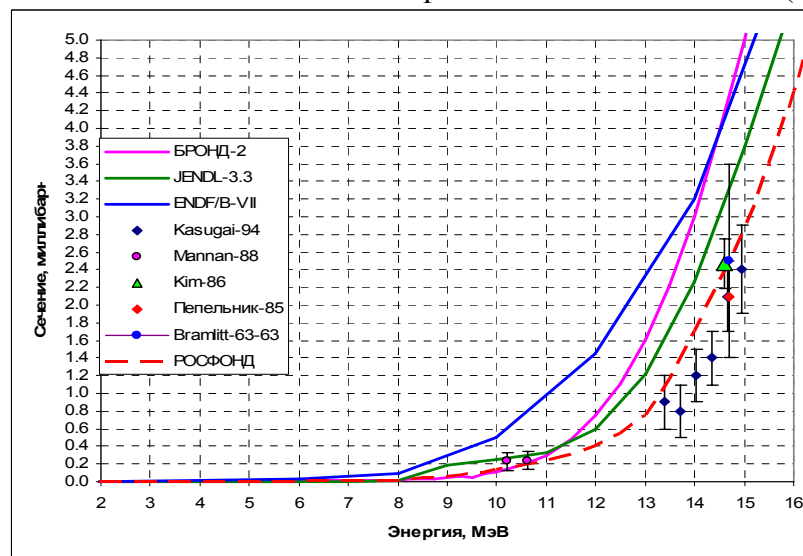


Рис.10. Сечение реакции (n,n'α)

Несмотря на то, что реакция (n,n'α) из-за низкого сечения не играет существенной роли в практических приложениях, **представляется целесообразным понизить сечение этой реакции в РОСФОНДе так, чтобы оцененная кривая проходила через согласующиеся друг с другом экспериментальные точки** (см. рис.9).

2.4.2. Реакция (n,n'p) имеет порог 6.1 МэВ. Оцененные сечения этой реакции показаны на рис. 11.

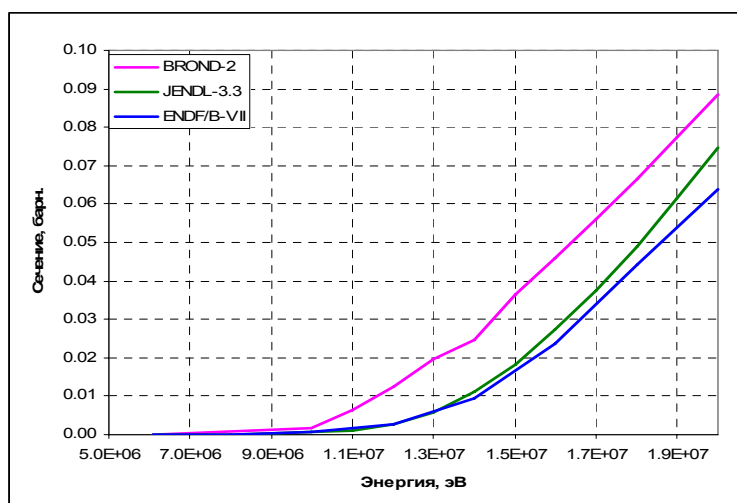


Рис. 10 сечение реакции (n,n'p)

Ход сечения, принятый в библиотеках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII представляется более естественным. **В РОСФОНД рекомендуется оценка JENDL-3.3.**

2.4.3. Реакция $(n,2n)$ имеет порог 8.9 МэВ. Оцененные сечения этой реакции показаны на рис. 11. Они близки друг к другу и подтверждаются экспериментальными данными в равной степени. В РОСФОНД рекомендуется оценка БРОНД-2.

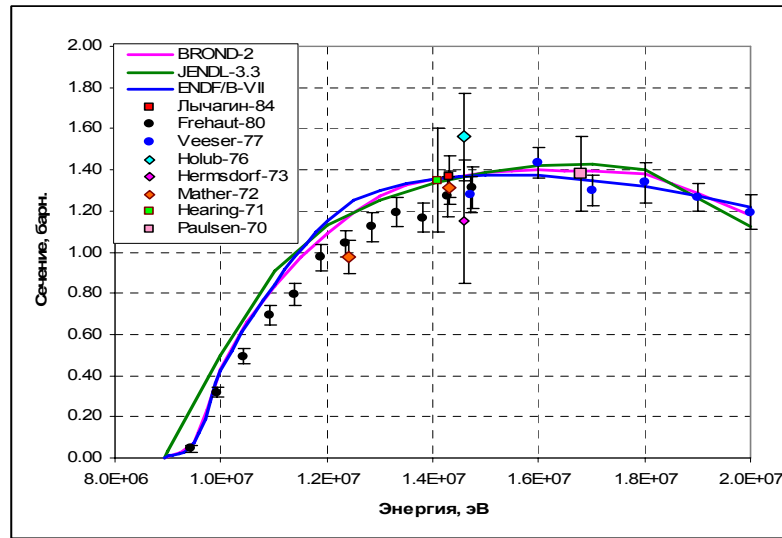


Рис.11. Сечение реакции $(n,2n)$.

2.4.4. Реакции $(n,n'd)$ и $(n,n't)$ имеют пороги 12.6 МэВ и 13.75 МэВ соответственно. Оцененные сечения этих реакций показаны на рис. 12. В JENDL-3.3 сечение этих реакций не приводится. Экспериментальные данные отсутствуют. В РОСФОНД рекомендуются оценки БРОНД-2.

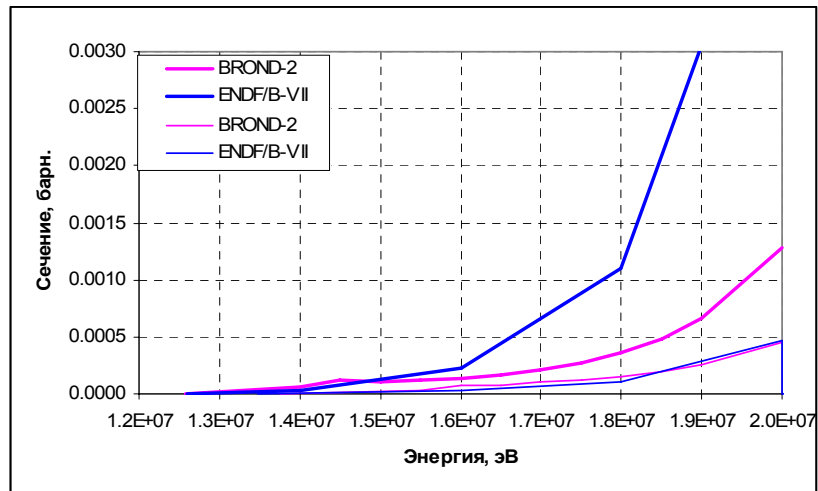


Рис.12. Сечение реакций $(n,n'd)$ (толстые линии) и $(n,n't)$ (тонкие линии).

2.4.5. Реакция $(n,3n)$ имеет порог 16.9 МэВ. Оцененные сечения этой реакции показаны на рис. 13. В РОСФОНД рекомендуется оценка ENDF/B-VII

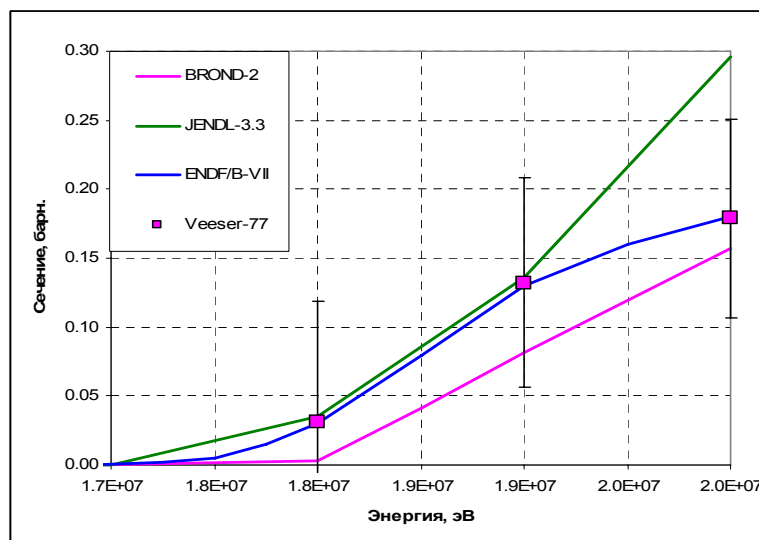


Рис.13. Сечение реакции $(n,3n)$

2.4.6. Реакция (n,n^3He) имеет порог 17.4 МэВ. Оцененные сечения этой реакции из библиотек общего пользования содержит только БРОНД-2. При 20 МэВ сечение составляет около 2.5 микробарн. В библиотеке EAF-2003 приводится сечение этой реакции меньше еще на три порядка. В РОСФОНД включать сечение этой реакции не целесообразно.

2.5. Сечение упругого рассеяния

Как и в других оценках, сечение упругого рассеяния в РОСФОНДе рекомендуется получить из условия баланса.

3. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

3.1. Угловые распределения упругого рассеяния

Во всех оценках угловые распределения упруго рассеянных нейтронов заданы в форме коэффициентов разложения по полиномам Лежандра в системе координат центра инерции.

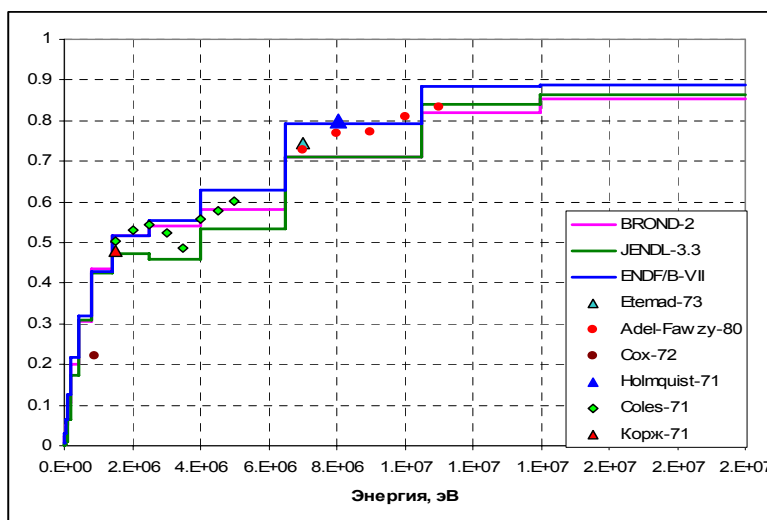


Рис.14. Энергетическая зависимость среднего косинуса угла упругого рассеяния по различным оценкам в сравнении с экспериментальными данными

Во всех библиотеках эти данные получены расчетным путем на основе оптической модели. На рис. 14 сравниваются средние косинусы угла рассеяния (в лабораторной

системе координат), представленные в групповой форме. Там же приведены имеющиеся экспериментальные данные (представленные в форме коэффициентов разложения по полиномам Лежандра самими авторами). **Как видно, оценка Проняева, согласуется с ними наилучшим образом. Эта оценка и рекомендуется в РОСФОНД**

3.2. Угловые распределения неупругого рассеяния с возбуждением дискретных уровней.

В оценке Проняева угловые распределения нейтронов, неупруго рассеянных с возбуждением дискретных уровней приняты изотропными за исключением уровней с энергиями 744, 808.7, 949.9, 979.1, 1279 и 1297 кэВ, характеризующихся высокими значениями спина. В оценке Каваи угловые распределения неупругого рассеяния на всех уровнях анизотропны и описываются 5 коэффициентами разложения по полиномам Лежандра. В оценке Чедвика в рассматриваемой энергетической области все угловые распределения изотропны.

Анизотропные угловые распределения и в оценке Проняева и в оценке Каваи получены, естественно, расчетным путем. Подход Каваи, описавшего анизотропию рассеяния на всех уровнях единообразно, представляется более последовательным. Поэтому для **первых 12-ти уровней угловые распределения в РОСФОНД целесообразно принять из оценки Каваи, а для остальных – изотропными – как в остальных оценках.**

3.3. Континуальные энерго-угловые распределения.

В оценках Каваи и Чедвика угловые и энергетические распределения всех реакций с непрерывным спектром вторичных нейтронов приняты независимыми и задаются в соответствующих секциях файлов MF=4 и MF=5. В оценке Проняева энерго-угловые распределения неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней и реакций (n,2n) и (n,n'p) представлены в файле MF=6 на основе расчетов по статистической модели с учетом предравновесных процессов³. Заметим, что для первого и второго нейтронов реакции (n,2n) приводятся разные распределения.

В РОСФОНД следует принять данные из БРОНД-2.

4. Образование фотонов в нейтронных реакциях.

Во всех оценках образование фотонов описывается для радиационного захвата и для суммарного неупругого взаимодействия (без учета вклада захвата). Образование фотонов в оценке Проняева приняты такими, как в ENDF/B-IV, где они построены, в основном, на основе экспериментальных данных. В двух других оценках приняты результаты модельных расчетов.

В РОСФОНД следует принять данные из БРОНД-2.

5. Заключение

Файл оцененных нейтронных данных для библиотеки РОСФОНД строится на основе файла из библиотеки БРОНД-2 (=ФОНД-2) со следующими изменениями

1. В области неразрешенных резонансов принять данные Каваи, устранив все нерезонансные подложки, кроме неупругого рассеяния (см. раздел 1.2).

³ Kalka H., Seeliger D., Zhivopistsev F.A. Z.Phys. A329,1988, P.331

2. Вне резонансной области полное сечение принять до 3 МэВ из JENDL-3.3, а выше – из ENDF/B-VII (см. раздел 2.1).
3. Слегка откорректировать сечение неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней (см. раздел 2.3).
4. Понизить сечение реакции $(n,n'\alpha)$ для согласия с экспериментальными данными (см. раздел 2.4.1).
5. Исключить данные о реакции $(n,n'\text{}^3\text{He})$ (см. Раздел 2.4.5)
6. Исключить данные об образовании изомера ниобия-92 в реакции $(n,2n)$ (MF=3, MT=26).
7. Внести данные о сечении образования изомера ниобия-93 в файл MF=10, MT=4 (см. раздел 9.3)
8. Ввести файл MF=9 с данными о сечениях образования долгоживущих изомеров в реакциях $(n,2n)$ и $(n,3n)$ взяв информацию из EAF-2003.
9. Угловые распределения неупругого рассеяния для MT=51 – 62 взять из JENDL-3.3 (см. раздел 3.2)

Автор отбора данных:

Николаев М.Н.

41.6. Ниобий-93^m

Долгоживущий изомер. Испытывает изомерный переход в основное состояние ($T_{1/2}=16.13\text{г.}$).

В библиотеке ФОНД-2.2 были включены оцененные данные из EAF-99 (J.Kopecky, D.Nierop, 1992). Указано, что сечение радиационного захвата принято в соответствии с ENDF/B-V.

В EAF-2003 (R.Forrest, J.Kopecky, J.-Ch. Sublet, 2003) сечение радиационного захвата принято в соответствии с ENDF/B-VI, и существенно отличается от предыдущей версии (см. рис.1).

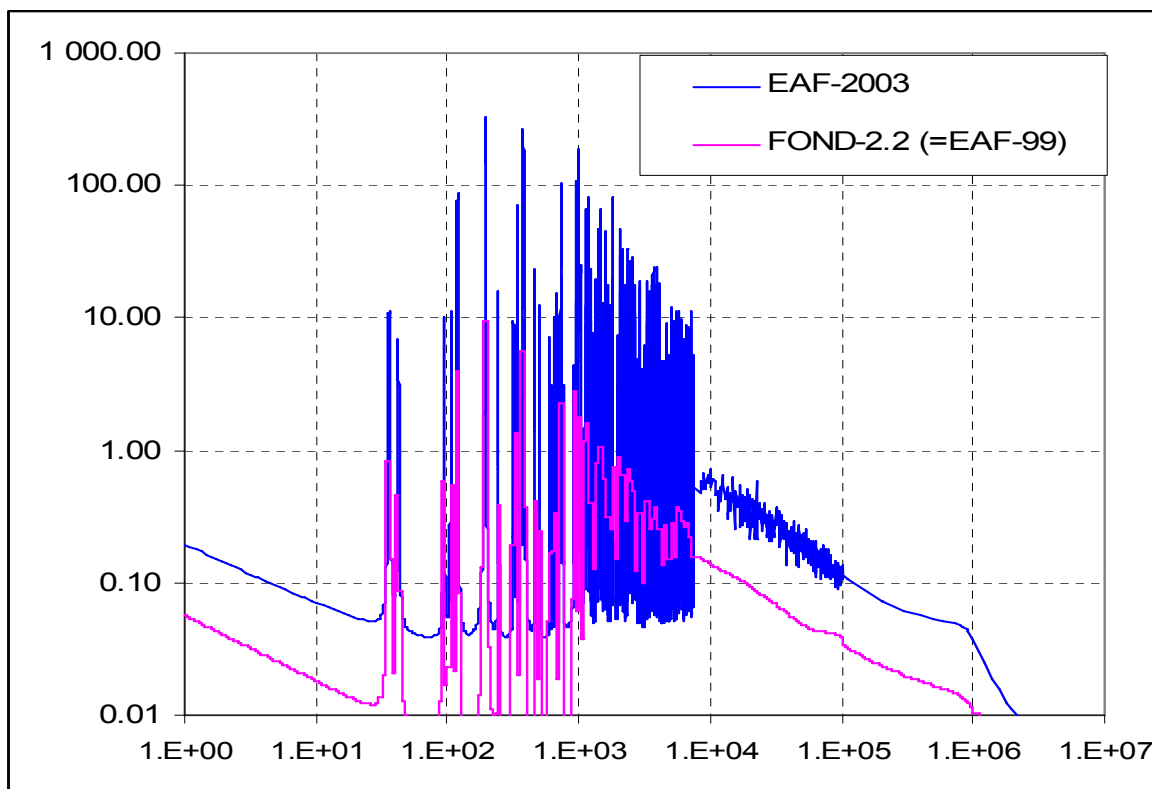


Рис. 1. Сечение захвата нейтронов в $^{93}\text{Nb}^m$

Файлы данных для изомера $^{93}\text{Nb}^m$ в доступных версиях этих библиотек отсутствуют. Ясно, однако, что в их основе лежит экспериментальная информация, поскольку сечения носят резонансный характер. Между тем в базе данных EXFOR никакой экспериментальной информации о нейтронных сечениях для изомерного состояния ниобия не содержится.

В таблице 1. приведены значения тепловых сечений и резонансных интегралов захвата в сравниваемых оценках.

Таблица 1. Характеристики захвата нейтронов в $^{93}\text{Nb}^m$

| Оценка | σ_c (0.0253 эВ) | RI_c |
|----------|------------------------|--------|
| EAF-99 | 0.36 | 2.84 |
| EAF-2003 | 1.16 | 9.74 |

Из таблицы следует, что и тепловое сечение и резонансный интеграл возросли примерно одинаково (в 3.2 и в 3.4 раза), что, вместе с данными рис. 1 указывает на то, что основной процедурой пересмотра сечений явилась перенормировка данных.

Заключение

Естественно, решено в РОСФОНД включить последнюю оценку. Сечения реакций с $MT=16, 17, 22, 33, 34, 106$ и 107 , данные для которых в EAF-2003 представлены в файле MF=10, просуммированы по подсекциям и суммы записаны в файл MF=3. Для реакций $MT=16$ и $MT=17$, в результате которых образуются долгоживущие изомеры, получены вероятности образования конечного ядра в основном и изомерном состояниях и занесены в файл MF=9.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

41.7. Ниобий-94

Радиоактивен. Испытывает бета-распад ($T_{1/2}=2 \cdot 10^4$ г.) в стабильный ^{94}Mo .

Во всех библиотеках общего пользования содержится одна и та же оценка, выполненная рабочей группой по оценке нейтронных данных для JENDL-3.3 в 1990 г.

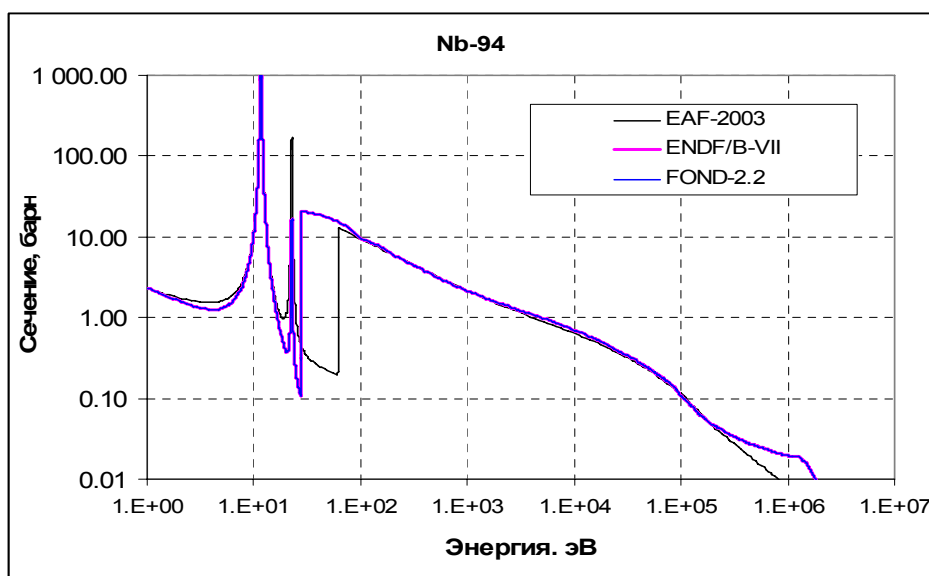
В EAF-2003 приведена иная оценка – для сечения радиационного захвата там приняты данные из JEF-2.2, позаимствованные, в свою очередь, из ENDF/B-V.

В нижеследующей таблице приведены (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

| | σ_c (0.0253 эВ) | RI _c | Средние сечения реакций на спектре деления | | | | |
|-----------|---------------------------|-----------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | n,gamma | n,2n | n,3n | n,p | n,alpha |
| JENDL-3.3 | 15.77 | 126 | 0.0143 | 6.92E-03 | 2.05E-06 | 3.75E-04 | 1.02E-04 |
| EAF-2003 | 13.61 | 117 | 0.0130 | 5.43E-03 | 1.85E-06 | 6.27E-04 | 7.78E-05 |

Как видно, разительных различий нет.

На рисунке сравниваются энергетические поведения сечения захвата из прежней и новой оценок.



Сечение захвата ниобия-94

Заключение

В РОСФОНД включить ту же оценку, что и во всех остальных библиотеках, дополнив ее файлом MF=9, в котором привести вероятности образования долгоживущих изомеров в реакциях (n,2n), (n,3n) и (n,γ), получив их из сечений, приведенных в файле MF=10 библиотеки EAF-2001.

Автор отбора данных
Николаев М.Н.

41.8. Ниобий-95^g

Радиоактивен. Испытывает бета-распад ($T_{1/2}=34.97$ дн.) в стабильный ⁹⁵Mo.

Во всех зарубежных библиотеках общего пользования содержится одна и та же оценка, выполненная рабочей группой по оценке нейтронных данных для JENDL-3.3 в 1990 г. от 25 эВ до 100 кэВ в этой оценке описана область неразрешенных резонансов; разрешенных резонансов нет. Тепловое сечение захвата опирается на единственное измерение Гальперина (1963 г.)

В библиотеке ФОНД-2.2 содержится та же оценка, в которой, однако, сечения реакций (n,2n) и (n,3n) уточнены на основе полуэмпирической систематики В.Н. Манохина.

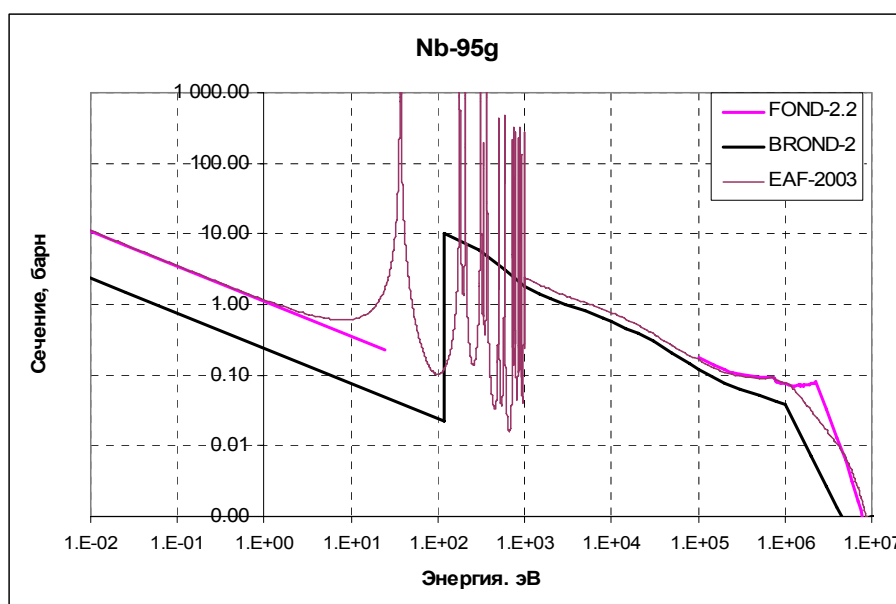
В библиотеку БРОНД включена оценка Грудзевича и Зеленецкого, выполненная в том же 1990 г. Резонансной области в ней нет.

В EAF-2003 приведена иная оценка – для сечения радиационного захвата там приняты данные из JEF-2.2, полученные путем случайного розыгрыша из принятого распределения средних параметров. В результате получена искусственно введенная резонансная структура.

В нижеследующей таблице приведены (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

| | σ_c (0.0253 эВ) | RI _c | Средние сечения реакций на спектре деления | | | | |
|-----------|---------------------------|-----------------|--|---------|---------|---------|---------|
| | | | n,gamma | n,2n | n,3n | n,p | n,alpha |
| JENDL-3.3 | 7.0 | 41.8 | 0.0637 | 2.90E-3 | 3.51E-6 | 6.65E-5 | 2.52E-5 |
| БРОНД-2 | 1.5 | 15.98 | 0.0257 | 2.80E-3 | 2.61E-6 | 3.07E-5 | 4.93E-5 |
| EAF-2003 | 7.0 | 256.16 | 0.0538 | 3.60E-3 | 2.60E-6 | 2.24E-4 | 1.74E-5 |

На рисунке сравниваются энергетические поведения сечения захвата из сравниваемых оценок. Разброс значений резонансных интегралов можно рассматривать в качестве меры погрешности, с которой известна эта величина.



Сечение захвата ниобия-95

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из JENDL-3.3, дополнив ее файлом MF=9, в котором привести вероятность образования долгоживущего изомера в реакции (n,3n), получив ее из сечений, приведенных в файле MF=10 библиотеки EAF-2001.

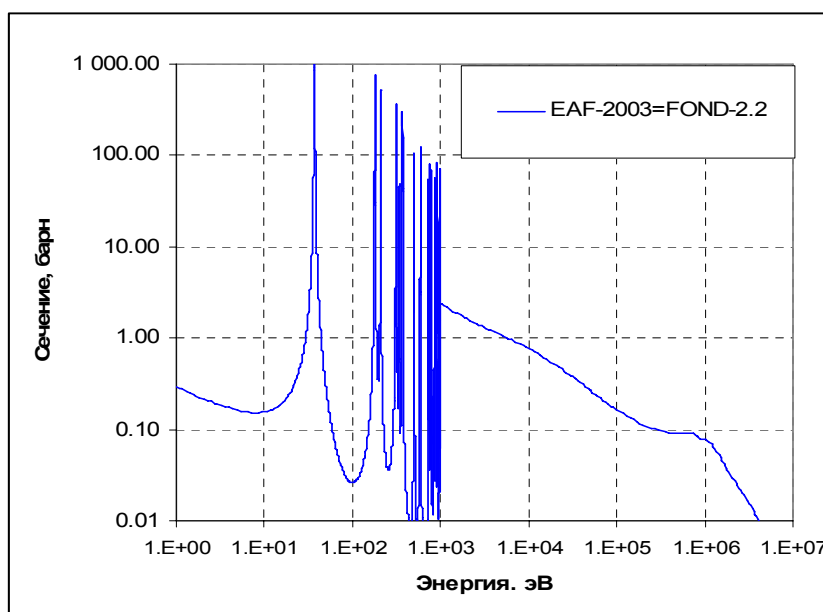
Автор отбора данных
Николаев М.Н.

41.9. Ниобий-95^m

Долгоживущий изомер. Испытывает изомерный переход в основное состояние и бета-распад в стабильный ⁹⁵Mo. (T_{1/2}=86.6 ч.).

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 включена слегка пересмотренная оценка с добавлением данных о сечениях образования изомерных состояний (файл 10).

На рисунке приведена энергетическая зависимость сечения захвата.



В нижеследующей таблице приведены (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

| | σ_c (0.0253 эВ) | RI _c | Средние сечения реакций на спектре деления | | | | |
|----------|---------------------------|-----------------|--|---------|---------|---------|---------|
| | | | n,gamma | n,2n | n,3n | n,p | n,alpha |
| FOND-2.2 | 1.77 | 69.76 | 0.0537 | 5.70E-4 | 3.28E-6 | 2.17E-5 | 1.74E-5 |
| EAF-2003 | 1.77 | 67.81 | 0.0538 | 3.55E-3 | 2.61E-6 | 1.52E-4 | 1.71E-5 |

Как видно, существенное изменение претерпело лишь сечение реакции (n,2n).

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003, заменив файл MF=10 файлом MF=9, в котором привести вероятность образования долгоживущего изомера в реакции (n,3n), и включить в файл MF=3 секции сечений тех реакций, которые содержатся в файле MF=10 библиотеки EAF-2001.

Автор отбора данных
Николаев М.Н.

41.10. Ниобий-96

Радиоактивен. Испытывает бета-распад ($T_{1/2}=23.4$ ч.) в стабильный ^{96}Mo .

В библиотеках данных для расчета переноса нейтронов данные для ниобия-96 отсутствуют. В активационных библиотеках содержатся:

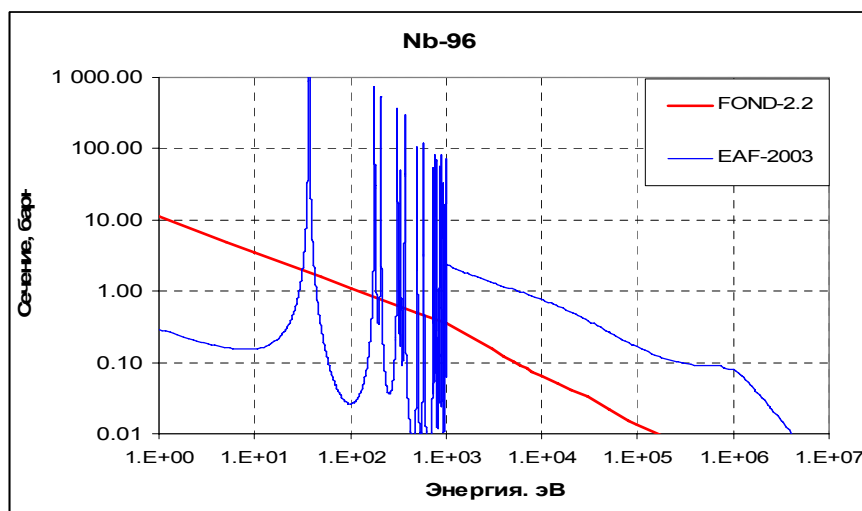
в EAF-3=ADL-3 – оценка Грудзевича и др. 1994 г. (принята в ФОНД-2.2).

в EAF-2003 – по существу новая оценка с существенной модификацией сечения захвата на основе программы MASGAM, с помощью которой путем случайной выборки из средних резонансных параметров получен детальный ход сечений.

В нижеследующей таблице приведены (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

| | σ_c (0.0253 эВ) | RI_c | Средние сечения реакций на спектре деления | | | | |
|----------|------------------------------|--------|--|----------|----------|----------|----------|
| | | | N_{γ} | n,2n | n,3n | n,p | n,alpha |
| ФОНД-2.2 | 69.87 | 34.36 | 0.0021 | 6.95E-03 | 4.14E-06 | 4.59E-05 | 8.09E-06 |
| EAF-2003 | 17.23 | 188.2 | 0.0203 | 5.48E-03 | 1.85E-06 | 4.59E-05 | 7.79E-05 |

Энергетический ход сечений захвата по разным оценкам показан на рисунке. Колоссальный разброс оценок сечения захвата очевиден. Он отражает уровень знаний о сечении захвата рассматриваемого сравнительно короткоживущего продукта деления. Что касается сечений иных, менее важных реакций, то столь большого разброса данных в них не наблюдается, поскольку все они основаны на сходных модельных расчетах и не зависят от случайного расположения уровней составного ядра в окрестности энергии связи.



Сечение радиационного захвата.

Заключение

Целесообразно включить в РОСФОНД оценку EAF-2003, включив в файл MF=3 секции сечений тех реакций, которые содержатся в файле MF=10 библиотеки EAF-2003, а сам файл MF=10 исключить, т.к. долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на ниобии-96 не образуется.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

42.МОЛИБДЕН

Молибден содержит 7 стабильных и два долгоживущих изотопа.

В ФОНД-2.2 для всех стабильных изотопов молибдена и для природного молибдена содержится оценка К.Кosako, S. Chiba. Для Mo93 содержится оценка из EAF-99, для Mo-99 - оценка Манохина 1999 для JENDL-3.3.

В ENDF/B-VII для всех стабильных изотопов содержатся оценки Shenter, Schmittroth, 1979, которые составили файл и для природного молибдена.

В JENDL-3.3 для всех стабильных изотопов приняты оценки К. Kosako, S.Chiba, 1993. Для Mo-99 принята оценка, составленная специальной группой оценщиков данных для продуктов деления.

В JEFF-3.1. приняты те же оценки, что и в JENDL-3.3.

Помимо оценок из названных выше библиотек авторами обоснований данных для молибдена рассматривалась их собственная оценка, выполненная для библиотеки БРОНД-3.

42.1. Молибден-92

Содержание в естественной смеси -14.84%

1. Общие характеристики

1.1. Z=42

1.2. A=92

1.3. Aw=91.11730

1.4. Перечень нейтронных реакций с порогом ниже 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | E _{порог.} , МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|--------------------|----------|---------------------------|----------------------------|
| 04 | n,n' | -1.5095 | 1.5260 | Mo-92 |
| 16 | n,2n | -12.6921 | 12.8314 | Mo-91 |
| 22 | n,nα | -5.6233 | 5.6851 | Sr-88 |
| 28 | n,np | -7.4656 | 7.5476 | Nb-91 |
| 102 | n,γ | 8.0700 | | Mo-92 |
| 103 | n,p | -0.4236 | 0.4282 | Nb-92 |
| 104 | n,d | -5.1536 | 5.2102 | Nb-91 |
| 105 | n,t | -11.0275 | 11.1485 | Nb-90 |
| 106 | n, ³ He | -4.8982 | 4.9520 | Zr-88 |
| 107 | n,α | 3.7067 | | Zr-89 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.1 Область разрешенных резонансов.

В настоящее время оценка JENDL-3.3 для разрешенных и неразрешенных резонансов включена в оценки JEFF-3.0(=JEFF-3.1), CENDL-3 и последнюю версию ENDF/B-VII. Так как нет экспериментальных данных, указывающих на недостатки этой оценки, то она включена также в оценку БРОНД-3.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Кикучи /1/ на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию /2/ и радиационному захвату нейтронов /2, 3, 4/. Эти параметры лишь незначительно отличаются от параметров, рекомендованных на Мугабгхабом и др. /5/. Верхняя граница резонансной области

принята равной 50 кэВ, радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 7.0$ фм /5/ и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближение MLBW.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) равны:

полное = 5.566 б, упругое = 5.545 б, захвата = 0.021 б,
резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: = 0.9428 б.

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 1 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0 = (60 \pm 7)$ кэВ, и для p-резонансов - $D_1 = (24 \pm 3)$ кэВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (2.4 \pm 0.4) 10^{-4}$ и $S_1 = (1.5 \pm 0.3) 10^{-4}$

Чтобы получить оптимальную оценку пропусков резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов часто привлекают анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа представлены на рис. 2. Данный анализ показывает, что в наблюдаемом наборе s-резонансов, по-видимому, пропущено 3 резонанса, тогда как в наборе p-резонансов имеется избыток примерно 5 «лишних» слабых резонансов, которые не соответствуют распределению Портера-Томаса в области малых ширин и которые следовало бы отнести к s- или d-резонансам. Такие слабые резонансы не искажают приведенный выше анализ нейтронных силовых функций, но они учтены в оценках погрешностей среднего расстояния между резонансами D_1 .

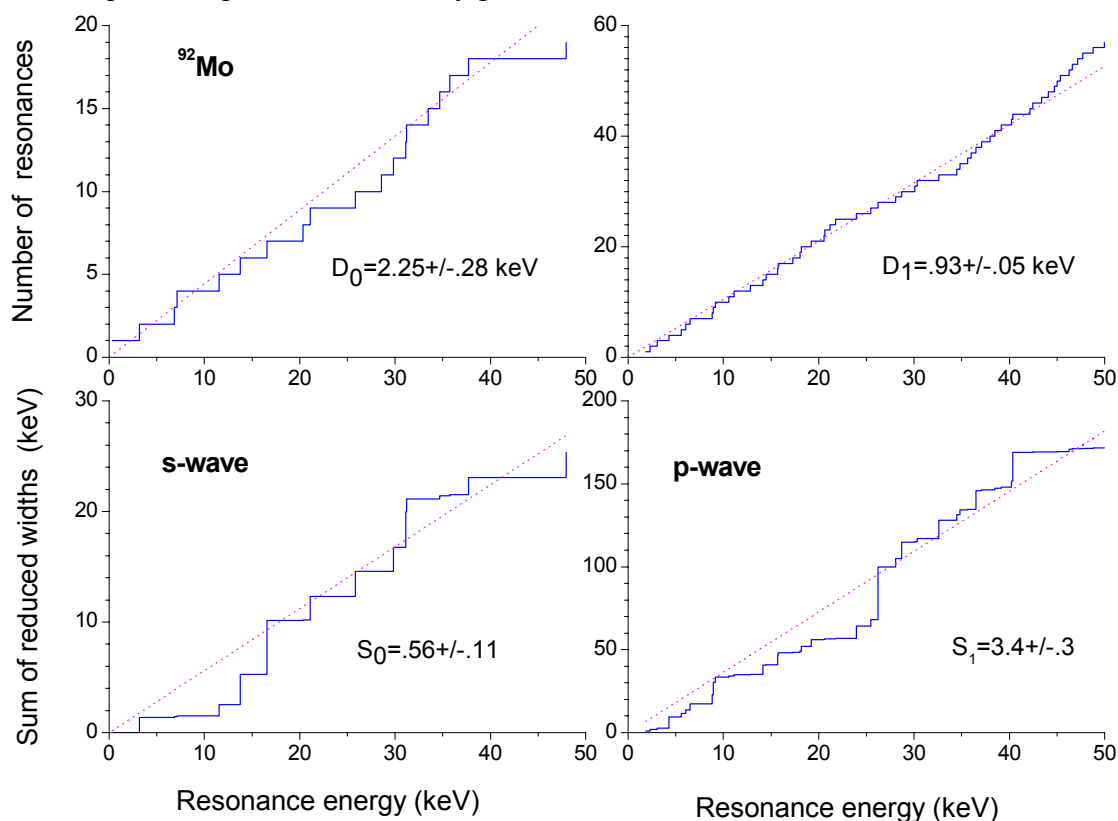


Рис. 1. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценке JENDL-3.3

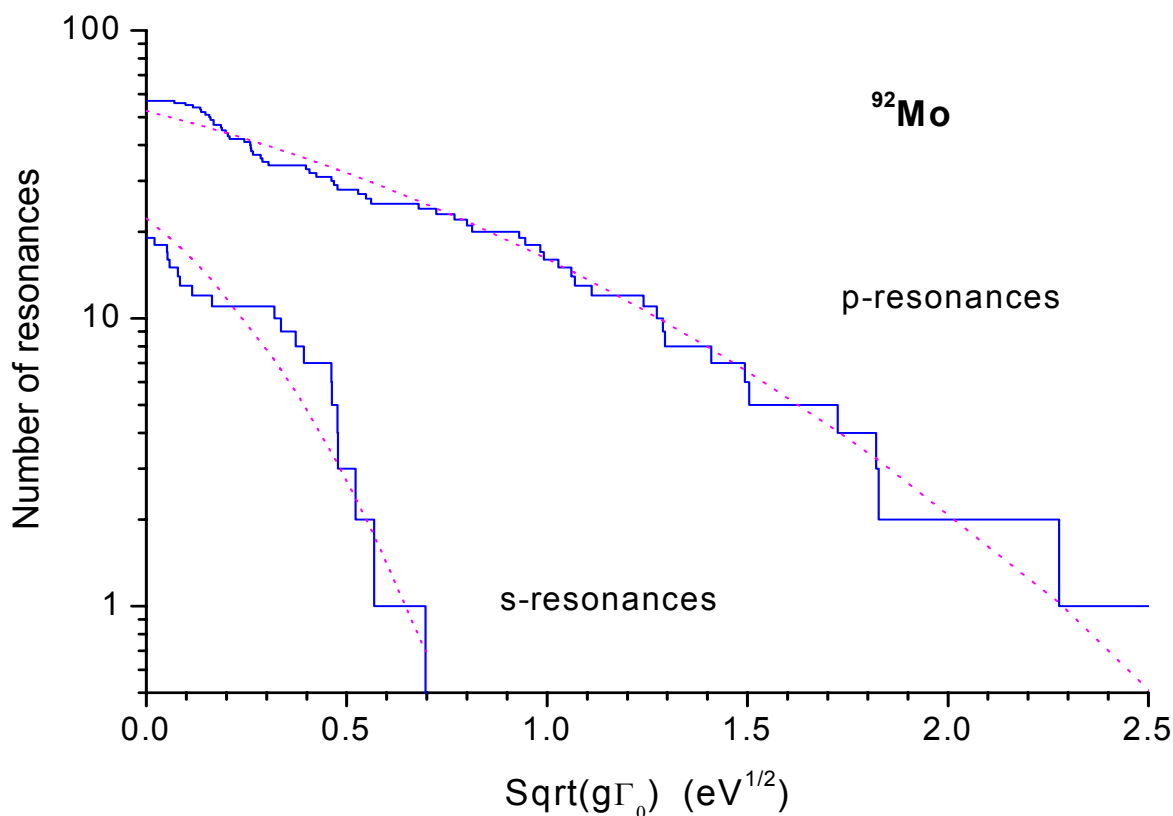


Рис. 2. Анализ пропуска s- и p-резонансов

Полные радиационные ширины определены для большинства резонансов, и средние значение ширины равны $\langle \Gamma_\gamma \rangle = 200$ мэВ для s-резонансов и $\langle \Gamma_\gamma \rangle = 425$ мэВ /1/.

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 принята равной 100 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В соответствии с форматом ENDF/B формула одноуровневого Брейта-Вигнера должна быть использована для расчета нейтронных сечений в области неразрешенных резонансов.

Нейтронные силовые функции S0, S1 и S2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [6]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ.

Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.369E-4$, $S_1 = 5.479E-4$, $S_2 = 0.364E-4$, $Gg = 0.226$ эВ, $D_0 = 2252$ эВ, $R = 6.746$ фм

На рис. 3 и 4 оценка JENDL-3.3 для области разрешенных и неразрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Экспериментальные данные по полным нейтронным сечениям имеются при энергиях выше 100 кэВ (см. следующий раздел), эти данные хорошо согласуются с энергетической зависимостью оценки JENDL-3.3. В диапазоне энергий от 5.7 до 40 кэВ данные по сечениям радиационного захвата нейтронов измерены в работе [4], и оценка воспроизводит эти данные.

Проведенный анализ показал, что для области разрешенных и неразрешенных резонансов оценка JENDL-3.3 является оптимальной, она включена в оценку для БРОНД-3 и рекомендуется для включения в РОСФОНД без каких либо изменений.

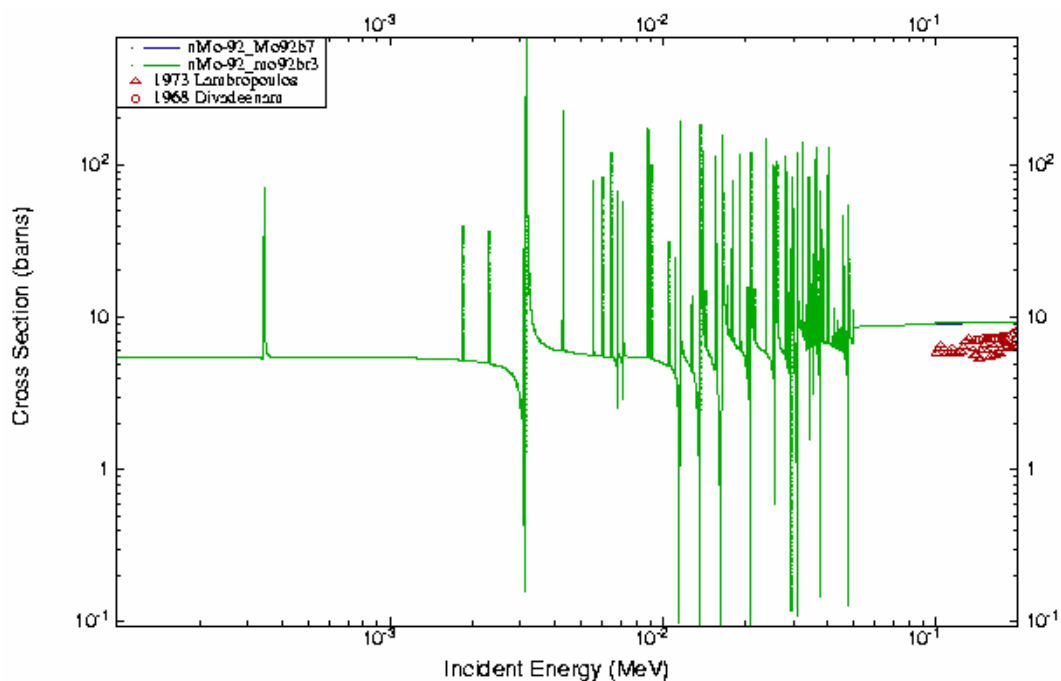


Рис. 3. Оценка полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными вне резонансной области

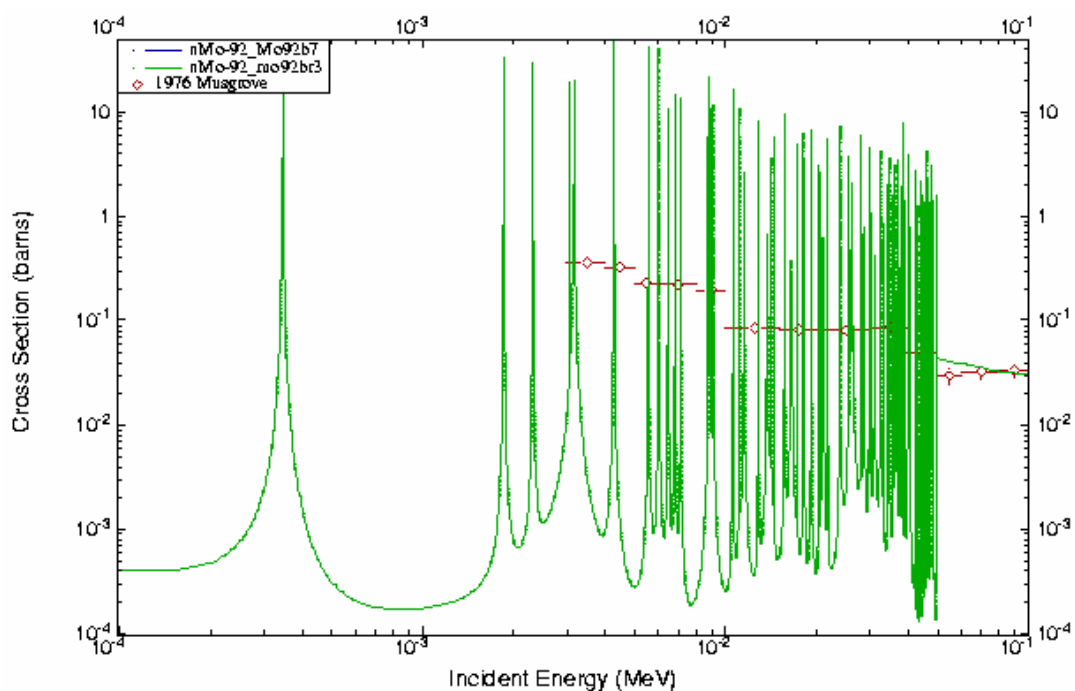


Рис. 4. Оценка сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области (MF=3).

Предварительно авторами оценки БРОНД-3 был исследован и оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния. Поскольку сечение реакции $(n,2n)$ достаточно хорошо известно из экспериментальных данных и основанной на них эмпирической систематики, теоретические расчеты сечений неупругого рассеяния проводились таким образом, чтобы получить согласованное описание функции возбуждения реакции $(n,2n)$ и оцененного вклада прямых процессов в области 20 МэВ. Полученные результаты по функциям возбуждения других пороговых реакций корректировались на основе предсказаний эмпирических систематик.

Оцененные данные функции возбуждения неупругого рассеяния для одного изотопа сравнивались с данными для других изотопов данного элемента и изотопов соседних ядер, чтобы получить согласованное описание сечений для всех изотопов молибдена с учетом эмпирической тенденции изменения максимального сечения реакции неупругого рассеяния в зависимости от атомного номера и атомного веса изотопа.

Полученные результаты сравнивались данными библиотек ENDF/B-VI, JENDL-3.3 и JEFF-3.1. Поскольку в библиотеке JEFF-3.1 для изотопов молибдена приняты данные библиотеки JENDL-3.3, сравнение производилось главным образом с данными библиотеки JENDL-3.3. В библиотеке ENDF-B7 в большинстве случаев также приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Поэтому сравнение с ENDF/B-VII проводилось только тех реакций, данные для которых отличаются от данных JENDL-3.3.

Нейтронные сечения в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH /7/, модифицированной с учетом флюктуаций нейтронных ширин на основе подхода работы /20/. Нейтронные коэффициенты проникаемости рассчитаны по модели сильной связи каналов (программа ECIS /8/) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней 2+ и 3-. Параметры оптического потенциала были взяты из работы /9/, но глубина мнимой части потенциала была несколько занижена, чтобы добиться оптимального описания полных нейтронных сечений при энергиях ниже 3 МэВ.

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /9/, /10/ и /11/, соответственно.

В расчетах радиационных ширин рассматривались E1, M2 и E2 –гамма-переходы. Для силовых функций гамма-переходов использованы параметры, рекомендованные в RIPL-2 /21/. Полная силовая функция нормировалась на величину, соответствующую рассмотренным выше данным о радиационной ширине и плотности нейтронных резонансов. Параметры дискретных уровней для различных каналов распада, обычно, принимались на основе таблиц /13/ и рекомендаций RIPL-2 /21/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 4 дано полное сечение Mo-92 вне резонансной области энергий нейтронов. В области 0.1-0.4 кэВ оценка БРОНД-3 лежит выше оценок JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, которые в этой области совпадают. Экспериментальные данные в этой области чрезвычайно разбросаны, оцененные данные получены с помощью разных параметров оптического потенциала, поэтому трудно отдать предпочтение какой-либо из упомянутых оценок. В области 2-6 МэВ данные БРОНД-3 и ENDF/B-VII лучше согласуются с экспериментальными данными по сравнению с оценкой библиотеки JENDL-3.3. Во всей области 0.1 – 20 МэВ рекомендуется оценка из БРОНД-3.

42-Mo-92(N,TOT),SIG

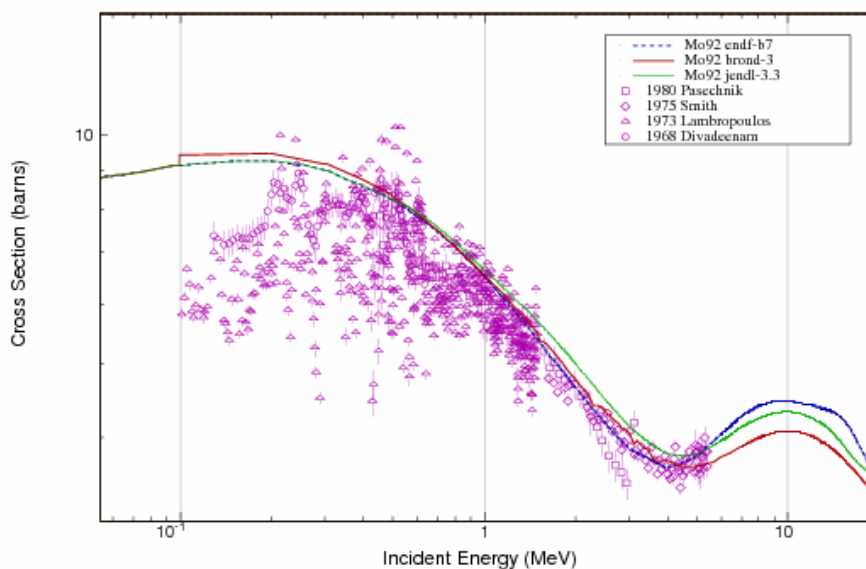


Рис. 4. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 5 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния на изотопе Мо-92 с экспериментальными данными. Как видно, сечение упругого рассеяния в области энергий до 1 МэВ в библиотеках ENDF/B-VII и JENDL-3.3 совпадают. Оценка BROND-3 в области энергий 100-300 кэВ данные BROND-3 лежат несколько выше, что связано с более высоким сечением в этой области полного сечения (см. рис.4). В диапазоне 1-3 МэВ оценки ENDF/B-VII и BROND-3 практически совпадают, оценка JENDL-3.3 лежит заметно выше. При более высокой энергии экспериментальных данных нет, достоверность любой из указанных оценок оценить трудно.

42-Mo-92(N,EL),SIG

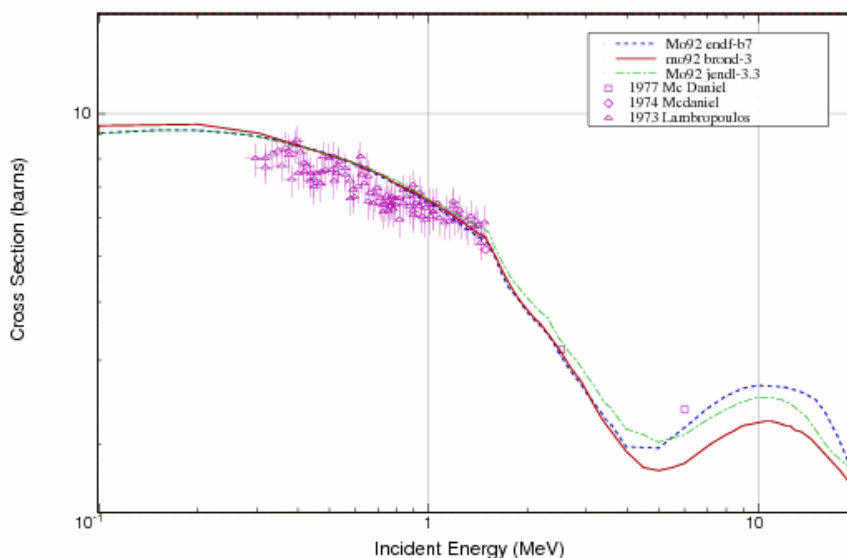


Рис.5. Сечение упругого рассеяния в области 0.1-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-66).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты, и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведены схемы низколежащих уровней Mo-92, используемые в оценках JENDL-3.3 и БРОНД-3.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 1.6666 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

| N | Энергия уровня, МэВ | Спин | Переход | Энергия гамма-кванта, МэВ | Вероятность перехода, % |
|----|---------------------|------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| 0 | 0.000000 | | | | |
| 1 | 1.50950 | 2+ | 1 → 0 | 1.50949 | 100 |
| 2 | 2.28260 | 4+ | 2 → 1 | 0.77304 | 100 |
| 3 | 2.51970 | 0+ | 3 → 1 | 1.01022 | 100 |
| 4 | 2.52710 | 5- | 4 → 2 | 0.24442 | 100 |
| 5 | 2.61240 | 6+ | 5 → 2 5 → 4 | 0.32971 0.0851 | 87.0 13.0 |
| 6 | 2.76040 | 8+ | 6 → 5 | 0.14780 | 100 |
| 7 | 2.84970 | 3- | 7 → 1 7 → 2 | 1.34025 0.56705 | 84.0 16.0 |
| 8 | 3.00700 | 5- | 8 → 4 | 0.48008 | 100 |
| 9 | 3.06410 | 4- | 9 → 4 | 0.53707 | 100 |
| 10 | 3.09130 | 2+ | 10 → 0 10 → 1 | 3.0912 1.5819 | 81.0 19.0 |
| 11 | 3.36910 | 4+ | 11 → 2 11 → 4 11 → 8 11 → 9 | 1.0864 0.8421 0.3623 0.3048 | 25.0 25.0 25.0 25.0 |
| 12 | 3.54199 | 2+ | 12 → 0 12 → 1 | 3.5414 2.0325 | 14.0 86.0 |
| 13 | 3.58029 | 3- | 13 → 2 13 → 4 | 1.2976 1.0534 | 43.0 57.0 |
| 14 | 3.62120 | 4+ | 14 → 1 | 2.1117 | 100 |
| 15 | 3.62480 | 7- | 15 → 4 | 1.0974 | 100 |
| 16 | 3.68800 | 4+ | 16 → 1 16 → 7 | 2.17848 0.8383 | 52.0 48.0 |
| 17 | 3.68801 | | | | |

Экспериментальных данных по интегральному сечению неупругого рассеяния (кроме одной точки при 15 МэВ) нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII рассчитаны на основе сферической оптической моделей ядерных реакций и практически совпадают. Данные BROND-3 лежат существенно выше, что объясняется использованием другой программы для расчета (модифицированной программы GNASH) и параметров несферической оптической модели. Учитывая более корректный подход в расчетах по программе GNASH интегральное сечение неупругого рассеяния из библиотеки BROND-3 предпочтительнее.

На рис. 4-5 показаны функции возбуждения неупругого рассеяния на первых двух уровнях, где имеются экспериментальные данные. Для первого уровня оцененные функции примерно равнозначны, а для второго уровня функция BROND-3 лежит выше и лучше описывает экспериментальные данные.

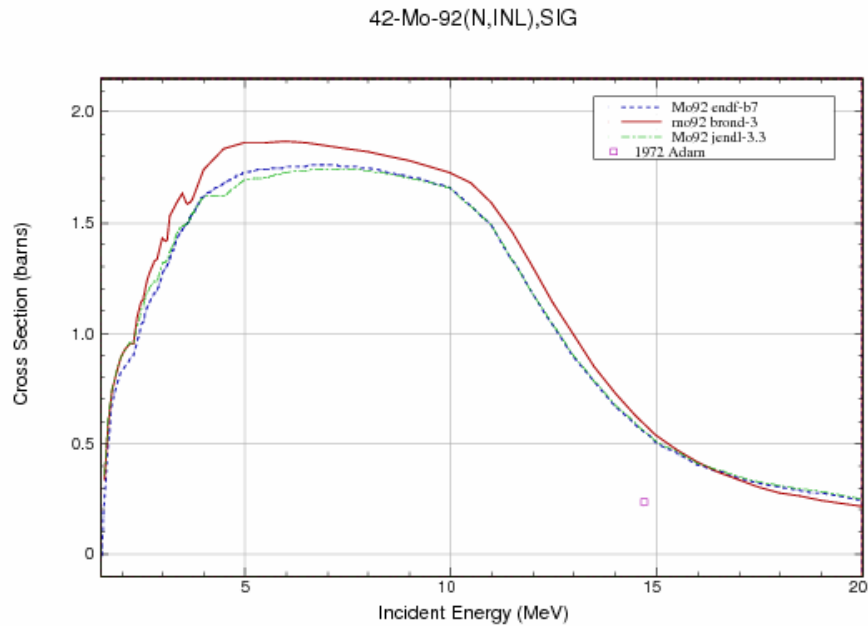


Рис.6. Полное сечение неупругого рассеяния Мо-92.

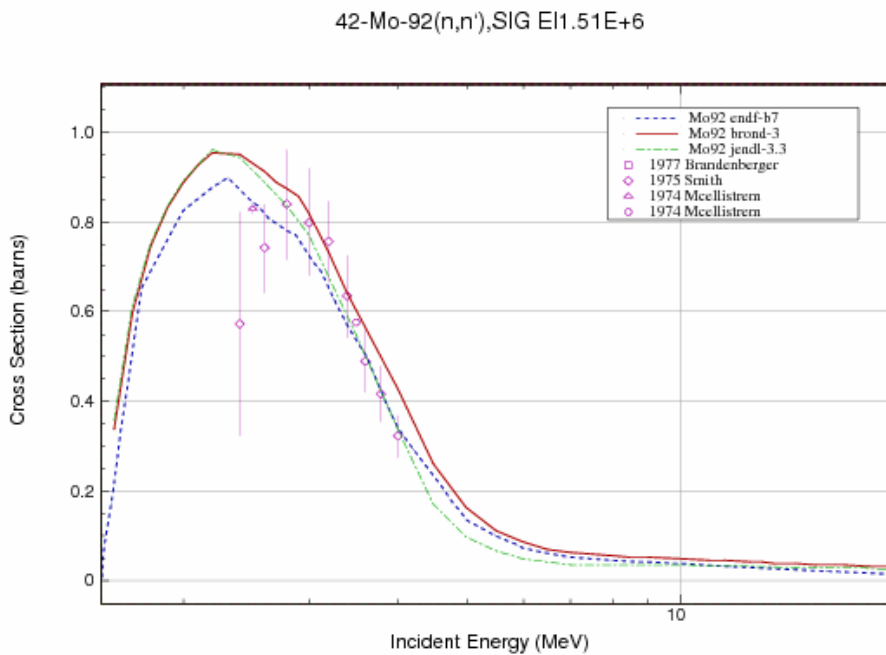


Рис. 7. Функция возбуждения первого уровня Мо-92 с энергией 1.5095 МэВ.

42-Mo-92(n,n'),SIG E12.28E+6

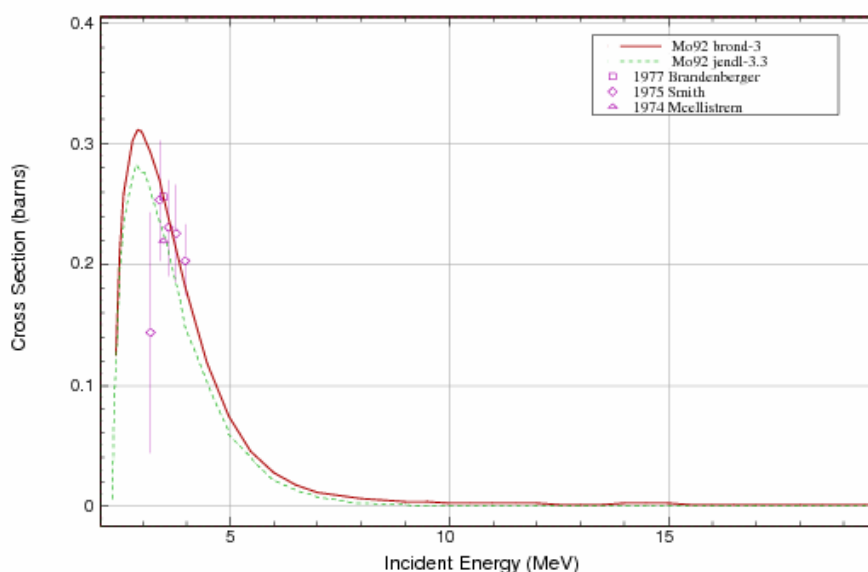


Рис. 8. Функция возбуждения второго уровня Мо-92 с энергией 2.2826 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.1-20 МэВ сечение радиационного захвата в файле Мо-92 библиотеки БРОНД-3 рассчитано с учетом полупрямого механизма в области гигантского резонанса. Расчеты согласованы с экспериментальными данными работы /4/. Однако в области выше 0.1 МэВ данные BROND-3 и JENDL-3.3 различаются, и кривая JENDL-3.3 выглядит предпочтительнее. Данные ENDF/B-VII взяты из JENDL-3.3. Желательно провести коррекцию сечения из БРОНД-3 с целью лучшего согласования с экспериментальными точками в области 100-200 кэВ. Однако рекомендуется сечение BROND-3, поскольку оно получено согласованно с рекомендованными выше сечениями для полного, упругого и неупругого рассеяния.

42-Mo-92(N,G),SIG

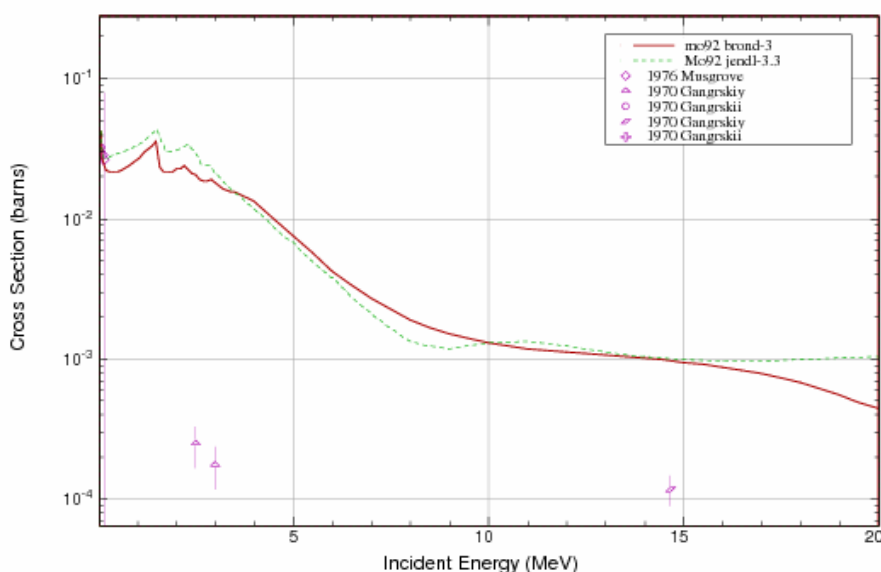


Рис. 9. Сечение радиационного захвата в области 0.1-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

На рис. 10 представлено сечение реакции (n,2n) библиотек JENDL-3.3 и BROND-3 в сравнении с экспериментальными данными. Как видно, обе оценки близки и согласуются с эмпирической систематикой функций возбуждения указанной реакции [15]. Могут быть рекомендованы данные обеих библиотек.

Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6 и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

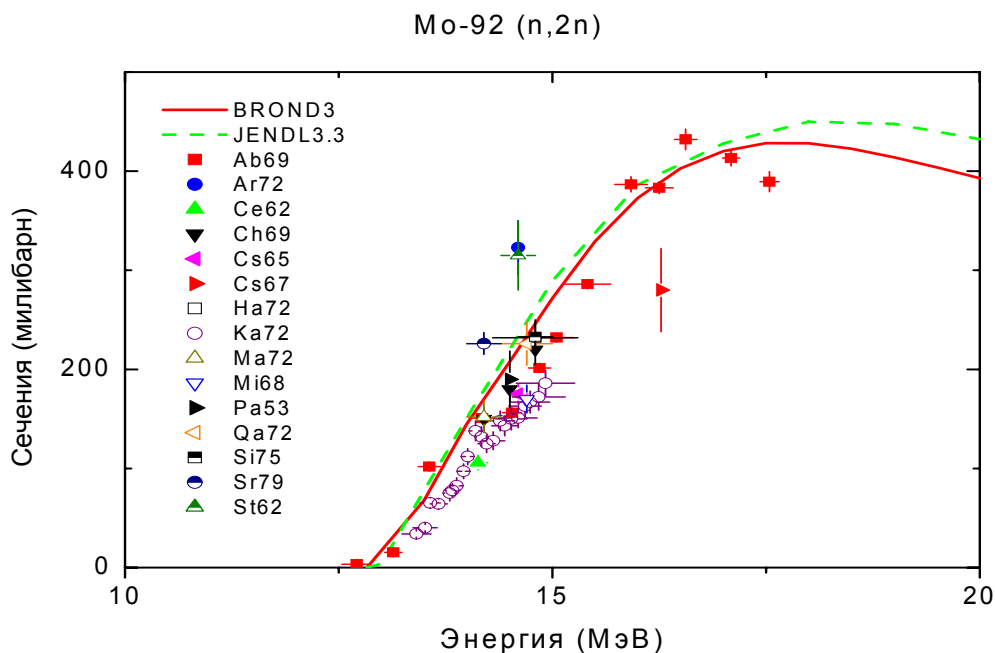


Рис. 10. Сечение реакции (n,2n). JENDL-3.3

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104,105 и 107):

На рис. 11 показано сечение реакции $^{92}\text{Mo}(n,p)$. Имеется только один набор противоречивых экспериментальных данных. Оцененные данные библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают. Форма функции возбуждения не соответствует физическим представлениям и эмпирическим систематикам [15,16]. Оценке функции возбуждения из БРОНД-3 следует отдать предпочтение, она согласуется с систематикой сечений реакции (n,p) [15,16], а ее форма согласована с формой кривой для изомера, где имеется достаточно много экспериментов и форма определена вполне четко.

На рис. 12 дано сечение реакции $^{92}\text{Mo}(n,d)$. Данные библиотеки ENDF/B-VII приняты из библиотеки JENDL-3.3. Оценки BROND-3 и JENDL-3.3 реакции (n,d), полученные расчетным путем, существенно не согласуются с единственной экспериментальной точкой работы Хайта. Это связано с недостаточным учетом вклада прямого процесса. Оценка БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лежит ближе к экспериментальной точке.

Сечение реакции $^{92}\text{Mo}(n,t)$ в библиотеках BROND-3 и ENDF/B-VII взято из JENDL-3.3.

На рис.13 представлено сечение реакции $^{92}\text{Mo}(n,\alpha)$. Рекомендуется оценка из БРОНД-3, поскольку она лучше согласуется с экспериментальными данными.

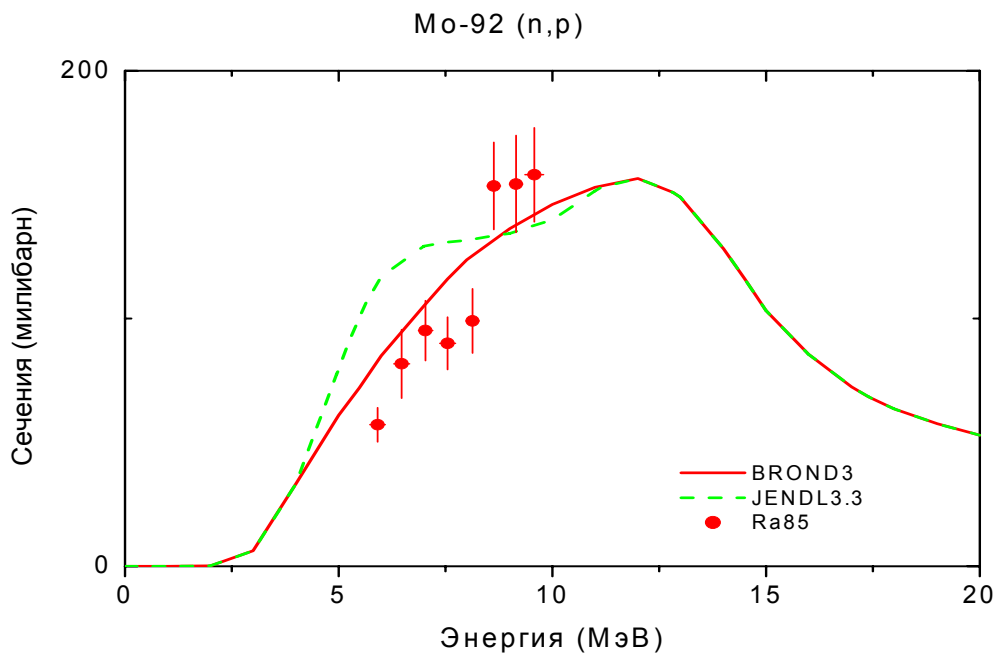


Рис. 11. Сечение реакции (n,p)

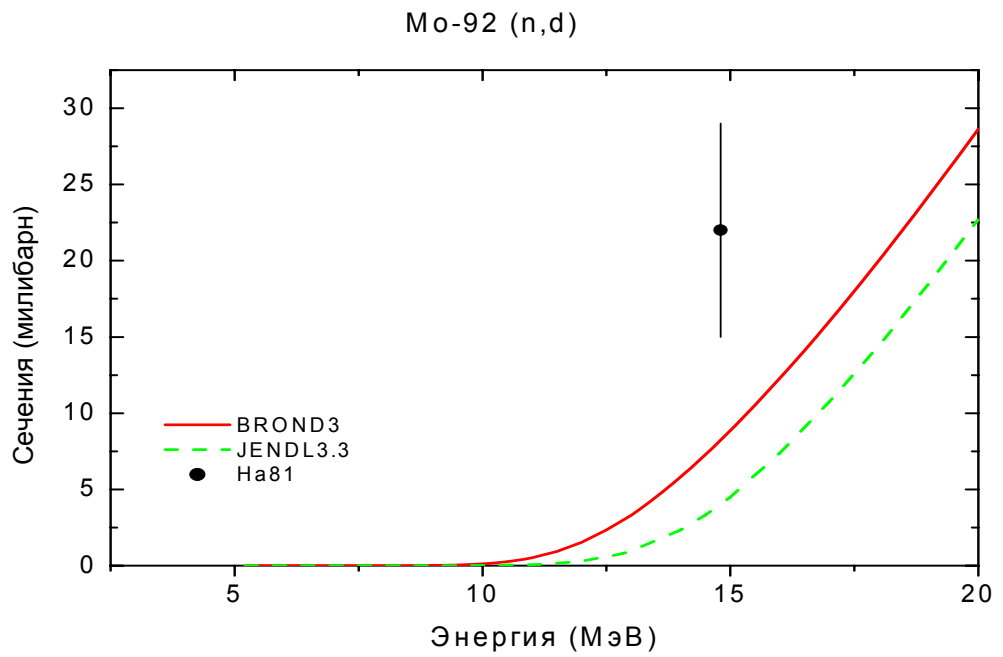


Рис.12. Сечение реакции (n,d).

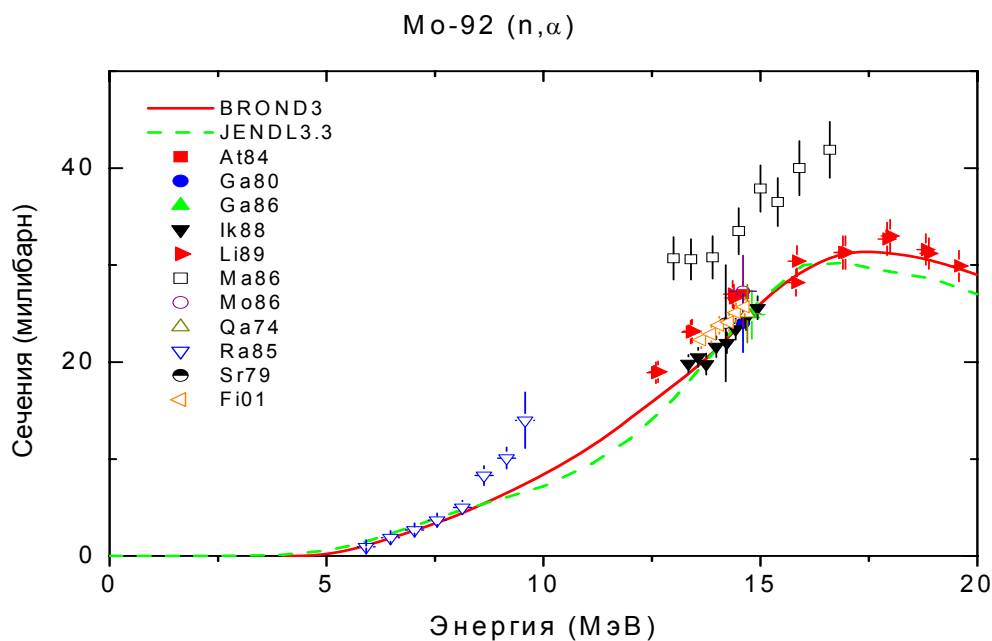


Рис. 13. Сечение реакции (n,α)

3.7. Реакции (n,nα), (n,np) (MT=22, 28):

Для этих реакций практически нет экспериментальных данных. Оценки реакций (n,nα) и (n,np) в БРОНД-3 основаны на расчетах по программе GNASH. Различия оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

На рис. 14 дано сечение реакции $^{92}\text{Mo}(n,np)$. Оцененные данные библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 примерно равноценны, однако зависимость из БРОНД-3 предпочтительнее, она несколько лучше согласуется с систематикой функций возбуждения реакции (n,2n)

На рис.15 дано сечение реакции $^{92}\text{Mo}(n,na)$. В БРОНД-3 принята и рекомендуется функция возбуждения из библиотеки JENDL-3.3, так как она согласуется с сечением реакции (n,α) и с систематикой реакции (n,na). Приведенные на рисунке экспериментальные точки относятся к реакции (n,ха).

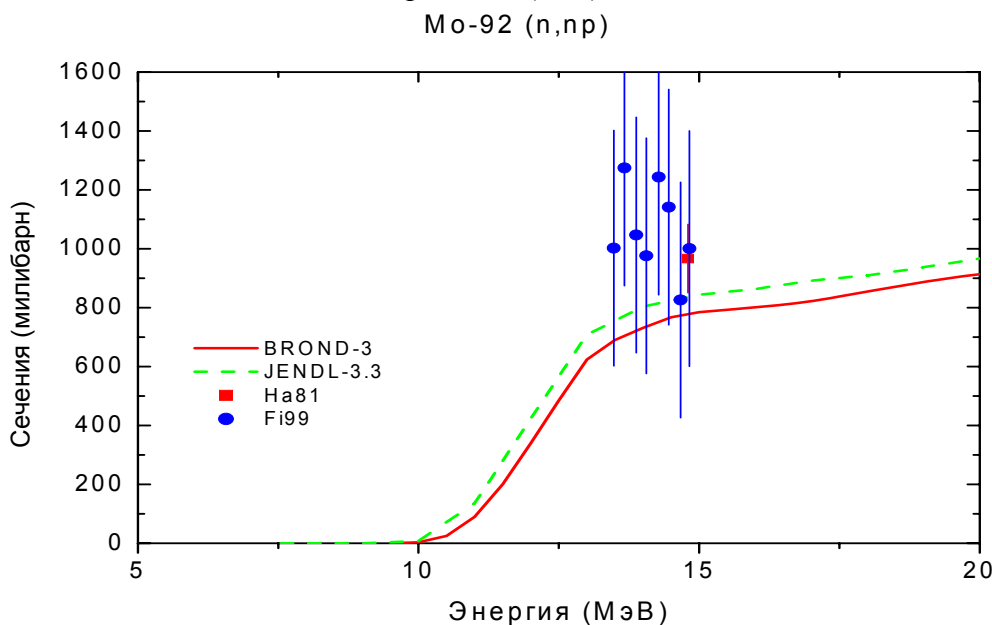


Рис. 14. Сечение реакции (n,np).

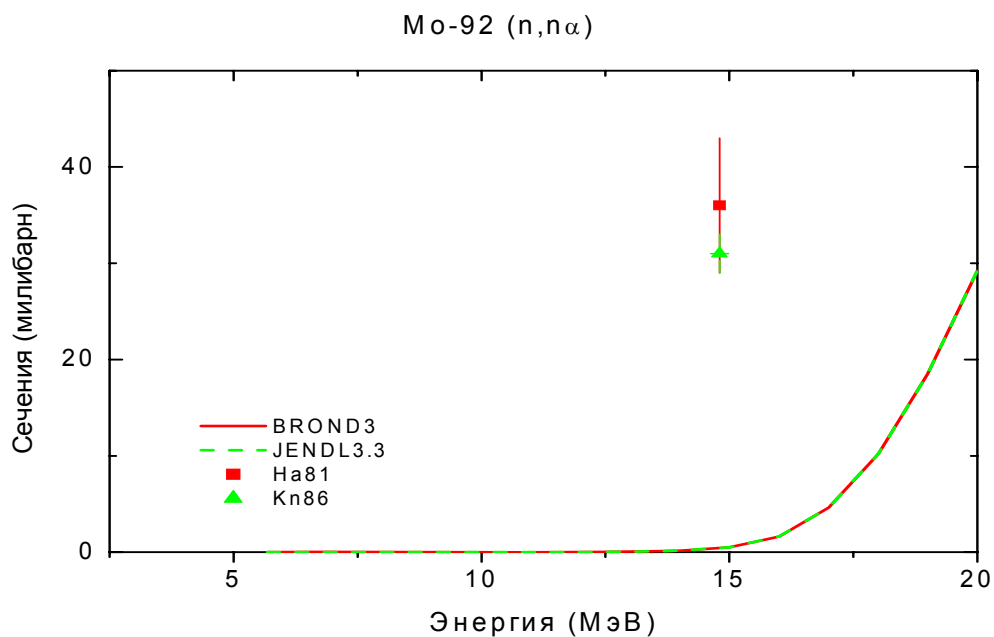


Рис. 15. Сечение реакции (n,n α).

4. Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4).

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/ 6/. На рис.16-17 показаны угловые распределения из БРОНД-3 и JENDL-3.3 с экспериментальными данными.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов обе оценки учитывают вклад прямых и предравновесных процессов, которые приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов.

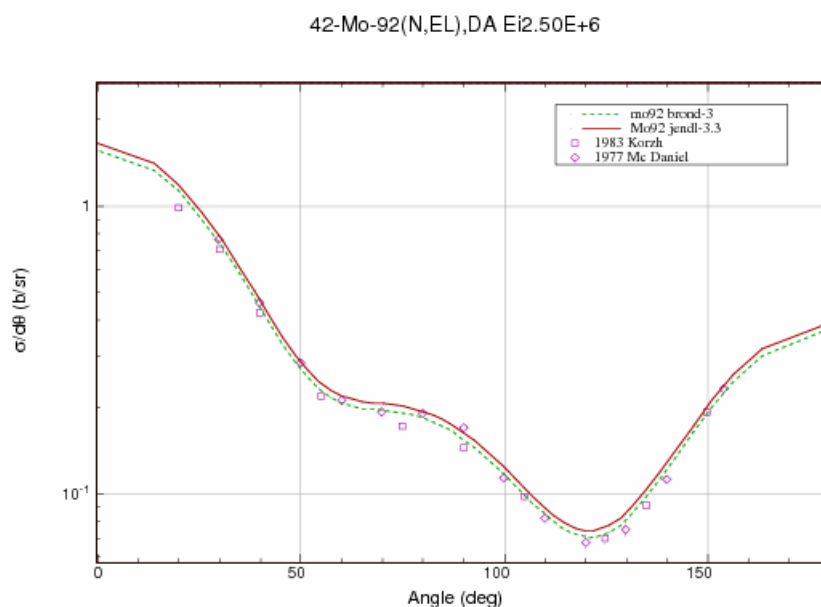


Рис. 17. Угловое распределение упруго рассеянных нейтронов с энергией 2.5 МэВ

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gashy /6/ и Dwuck.

5. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6)

MT=16,22,28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов взяты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /17/.

6. Множественность образования гамма-лучей (MF=12).

MT=102 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH.

7. Сечения образования гамма-лучей (MF=13)

MT=3 Сечения образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитаны по программе GNASH.

8. Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

MT=3, 102 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

9. Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=3 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, где они получены аппроксимацией с помощью эмпирической формулы работы /18/ экспериментальных данных работы /19/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/6/

Литература:

1. Kikuchi, Y. et. al.: Report JAERI-M 86-030 (1986).
2. Wasson, O.A. et. al.: Phys. Rev., c7, 1532(1973).
3. Weigmann, H. et. al.: 1971 Knoxville, 749(1971).
4. Musgrove, A.R.De L. et. al.: Nucl. Phys., A270, 108(1976).
5. Mughabghab, S.F. et. al.: "Neutron cross sections, vol.1, part A", Academic press(1981).
6. Igarasi, S. and Fukahori, T.: Report JAERI-1321(1991).
7. Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: in "Nuclear reaction data and nuclear reactors" (Triest, 1996). Eds.A.Gordini, G.Reffo., World science, Singapore, 1988, v.1, p.206.
8. Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8 (1970), p.281.
9. Koning, A.J., Dalaroche, J.P.: Contribution to 3-th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
10. Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl.Phys. A232, 381 (1974).
11. Avrigeanu, V., Hodgson, P.: Avrigeanu, M.: Phys. Rev. C49 (1994) 2136.
12. Dietrich. S.S., Berman, B.L.: Atomic Data and Nuclear Data tables.538 (1988) 199.
13. Firestone, R.B.: Table of isotopes, eight edition, v.2, New York, 1995.
14. Smith, A.B.: Nucl. Phys. 244, 213 (1975).
15. Manokhin, V.N.: Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
16. Manokhin, V.N., Blokhin, A.I.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, p.871 (1997).
17. Kumabe, I. et al. Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
18. Howerton, S.T. and Plechaty, E.F.: ucl.Sci.Eng., 32, 178(1968).
19. Morgan, G. and Newman, N.: ORNL-TM-5097 (1975).
20. Hofman, H. ET et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
21. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.

Перечень использованных экспериментальных работ

Полное сечение

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|-----------|----------------|---------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| | | | | | | |
| Pa80 | M.V.Pasechnik | C,80Kiev,1,304,1980 | 40617 | 4.58+05 | 3.12+06 | 54 |
| Sm75 | A.B.Smith | J,NP/A,244,213,1975 | 10524 | 1.64+06 | 5.51+06 | 88 |
| La73 | P.Lambropoulos | J,NP/A,201,1,1973 | 10277 | 1.01+05 | 1.50+06 | 594 |
| Di68 | M.Divadeenam | J,DA/B,28,3834,1968 | 10523 | 1.30+05 | 6.40+05 | 103 |

. Сечение радиационного захвата

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|-----------|------------------|----------------------|---------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | | | |
| GI89 | A.D.Gedeonov | J,IP,25,(7),294,1989 | 41059 | 2.53-02 | | 1 |
| Mu76 | A.R.Del.Musgrove | J,NP/A,270,108,1976 | 30357 | 3.0+03 | 2.0+05 | 15 |
| Ga70 | Yu.P.Gangrskiy | J,YF,12,1117,1970 | 41327 | 2.50+06 | 3.0+06 | 2 |
| Ga70 | Yu.P.Gangrskii | J,YF,12,1117,1970 | 88027 | 2.50+06 | 3.0+06 | 2 |
| Ga70 | Yu.P.Gangrskiy | J,YF,12,1117,1970 | 41327 | 1.47+07 | | 1 |
| Ga70 | Yu.P.Gangrskii | J,YF,12,1117,1970 | 88027 | 1.47+07 | | 1 |

. Сечение упругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|------------|----------------|----------------------|---------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | | | |
| McDaniel77 | F.D.McDaniel | P,A-KTY-74/77,3,1977 | 10770 | 2.52+06 | | 1 |
| | | | 12782 | 6.00+06 | | 1 |
| McDaniel74 | F.D.McDaniel | J,PR/C,10,1087,1974 | 10391 | 1.50+06 | | 1 |
| La73 | P.Lambropoulos | J,NP/A,201,1,1973 | 10277 | 3.0+05 | 1.5+06 | 130 |

Сечение неупругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|-----------|-----------|---------------------|---------|----------------------|--|-------------|
| | | | | | | |
| Ad72 | A.Adam | J,NP/A,180,587,1972 | 10237 | 1.47+07 | | 1 |

Сечение реакции (n,2n)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|-----------|---------------|------------------------|---------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | | | |
| Sr79 | R.Srinivasa | C,79Knoxvill,848 | 30576 | 1.4+07 | | 1 |
| Bo76 | M.Borrman | J,ZP,277,2(1976)203 | 20614 | 1.3+07 | 1.8+07 | 10 |
| Si75 | R.A.Sigg | J,JIN,37(1975)631 | 10477 | 1.5+07 | | 1 |
| Qa72 | S.Qaim | J,NP/A,185(1972)614 | 20536 | 1.5+07 | | 1 |
| Ha72 | S.S.Hasan | J,NP/A,181(1972)101 | 30041 | 1.5+07 | | 1 |
| Ma72 | Г.Н.Маслов | J,YK-9(1972)50 | 40136 | 1.4+07 | | 1 |
| Ka72 | Y.Kanda | J,NP/A,185(1972)177 | 20338 | 1.3+07 | 1.5+07 | |
| Ar72 | J.Araminowich | R, INR-1464(1972)14 | 30264 | 1.5+07 | | 1 |
| Ch69 | A.Chatterjee | C,69Roorke,2,117(1969) | 30612 | 1.4+07 | 1.5+07 | 3 |
| Ab69 | A.Abboud | J,NP,139(1969)42 | 30028 | 1.3+07 | 1.8+07 | 13 |
| Mi68 | B.Minetti | J,NP,118(1968)449 | 20891 | 1.5+07 | | 1 |
| Ch67 | J.Chikai | J,AHP,23(1967)87 | 30033 | 1.6+07 | | 1 |
| Ch65 | J.Chikai | C,EANDC-50,102(1965) | 30038 | 1.5+07 | | 1 |
| Ce62 | M.Cevolani | J,NC,26(1962)1328 | 21266 | 1.4+07 | | 1 |
| St62 | F.Strohal | J,NP,30(1962)49 | 30008 | 1.4+07 | | 1 |
| Pa53 | E.B.Paul | J,CJP,31(1953)267 | 11274 | 1.5+07 | | 1 |

Сечение реакции (n,a)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|------------|----------------|----------------------|---------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | | | |
| Fi01 | A.A.Filatenkov | J,YK-2(1998)10 | 41240 | 1.3+06 | 1.5+06 | 7 |
| Li90 | H.Liskien | J,ARI,41(1990)83 | 22125 | 1.3+07 | 2.0+07 | 15 |
| Ik88 | Y.Ikeda | R,,JAERI-1312(1988) | 22089 | 1.3+07 | 1.5+07 | 7 |
| Mo86 | N.I.Molla | | 30985 | 1.4+07 | 1.5+07 | 5 |
| Ma86 | A.Marcinkowski | | 30940 | 1.3+07 | 1.7+07 | 8 |
| Ga86 | I.Garlea | R,INDC(ROM)-17(1986) | 30749 | 1.5+07 | | 1 |
| Ra85 | M.Rahman | J,NP/A,435(1985)43 | 21990 | 5.9+06 | 9.6+06 | 8 |
| Atsumi84 | H.Atsumi | R,NEANDC(J)106 | 21935 | 1.5+07 | | 1 |
| Garuska80 | U.Garuska | R,INR-1871(1980)15 | 30553 | 1.5+07 | | 1 |
| Srinivas79 | R.Srinivasa | C,79Knoxvill,848 | 30576 | 1.4+07 | | 1 |
| Qaim 74 | S.Qaim | C,77Geel,327(1977) | 20513 | 1.5+07 | | 1 |
| Kanda72 | Y.Kanda | J,NP/A,185(1972)177 | 20338 | 1.3+07 | 1.5+07 | |

Сечение реакции N,P

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|-----------|-----------|--------------------|---------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | | | |
| Rahman85 | M.Rahman | J,NP/A,435(1985)43 | 21990 | 5.9+06 | 9.6+06 | 8 |
| Strohal62 | F.Strohal | J,NP,30(1962)49 | 30008 | 1.4+07 | | 1 |

Сечение реакции N,NP

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|-----------|----------------|------------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| | | | | | | |
| Filat99 | А.А.Филатенков | R, RI-252, 1999 | 41240 | 1.30+07 | 1.50+07 | 8 |
| Haight81 | R.C.Haight | J, PR/C, 23, 700, 1981 | 10960 | 1.48+07 | | 1 |

Сечение реакции N,D

| | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|----------|------------|------------------------|---------|----------------------|--|-------------|
| | | | | | | |
| Haight81 | R.C.Haight | J, PR/C, 23, 700, 1981 | 10960 | 1.48+07 | | 1 |

10. Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка **БРОНД-3** является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить файла БРОНД-3 для Мо-92 в библиотеку РОСФОНД.

Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

42.2. Молибден -93

Радиоактивен. ($T_{1/2}=4.0 \cdot 10^3$ лет) Испытывая захват орбитального электрона, распадается в изомер ниобия-93. Тот, в свою очередь испытывает изомерный переход в основное состояние ($T_{1/2}=16.13$ лет)

В библиотеках нейтронных данных для расчета переноса файлов для молибдена-93 не содержится несмотря на то, что этот долгоживущий изотоп может накапливаться в реакторах за счет радиационного захвата в ^{92}Mo (14.84%). Экспериментальная информация о сечениях взаимодействия нейтронов с ^{93}Mo отсутствует. Данные о сечениях, оцененные расчетным путем и на основе полуэмпирических систематик содержатся в библиотеке EAF.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять данные из последней версии библиотеки EAF-2003 (MAT=4228) со следующими изменениями:

1. Присвоить MAT=4293.
2. Файл MF=8 опустить.
3. Данные о нейтронных сечениях реакций с образованием конечного ядра в основном и изомерном состояниях, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы перенести в файл MF=3.
4. Ввести файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров ниобия ($^{91}\text{Nb}^m$, $^{92}\text{Nb}^m$ и $^{93}\text{Nb}^m$), получив их на основе информации, содержащейся в файле MF=10.

Автор отбора данных
Николаев М.Н.

42.3. Молибден-94

Содержание в естественной смеси: 9.25 %.

1. Общие характеристики

- 1.1. Z=42
- 1.2. A=94
- 1.3. Aw=93.09840
- 1.4. Перечень нейтронных реакций с порогом ниже 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|------------------|----------|---------------------------|----------------------------|
| 04 | n,n' | -0.8711 | 0.8805 | Mo-94 |
| 16 | n,2n | -9.6726 | 9.7765 | Mo-93 |
| 17 | n,3n | -17.7480 | 17.9255 | Mo-92 |
| 22 | n,n α | -2.0722 | 2.0945 | Zr-88 |
| 28 | n,np | -8.4920 | 8.5832 | Nb-93 |
| 102 | n, γ | 7.3690 | | Mo-94 |
| 103 | n,p | -1.2627 | 1.2763 | Nb-94 |
| 104 | n,d | -6.1868 | 6.2533 | Nb-93 |
| 105 | n,t | -8.8387 | 8.9336 | Nb-92 |
| 106 | n, ^3He | -6.8120 | 6.8852 | Zr-90 |
| 107 | n, α | 5.1344 | | Zr-91 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.2 Область разрешенных резонансов.

В настоящее время оценка JENDL-3.3 для разрешенных и неразрешенных резонансов включена в оценки JEFF-3.0(=JEFF-3.1), CENDL-3 и последнюю версию ENDF/B-VII. Так как нет экспериментальных данных, указывающих на недостатки этой оценки, то она включена также в оценку БРОНД-3.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Кикучи /1/ на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию /2/ и радиационному захвату нейтронов /2, 4/. Эти параметры лишь незначительно отличаются от параметров, рекомендованных Мугабгабом и др. /5/. Верхняя граница резонансной области принята равной 20 кэВ, радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 7.2$ фм /5/ и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближение MLBW. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами приняты средние значения ширин: 135 мэВ для s-резонансов и 175 мэВ для p- резонансов.

В 2004 г. Мугабгаб пересмотрел параметры разрешенных резонансов /17/. Наиболее существенным является уменьшение в 2 раза нейтронных ширины p-резонансов с энергией 4.368 и 10.225 кэВ, а также добавление отрицательного s-резонанса, связанное со значительным увеличением сечения радиационного захвата тепловых нейтронов. Были также несколько уменьшены радиационные ширины всех s-резонансов, и радиус потенциального рассеяния принят равным 6.9 фм. Пересмотренные параметры резонансов были включены в оценку ENDF/B-VII.

Радиационные ширины резонансов, использованные в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, показаны на рис. 1. Хорошо видны небольшие смещения ширин s-резонансов и различие средних ширин p-резонансов, которые приняты для резонансов, не имеющих прямой экспериментальной информации.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| оценка | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Эксперимент /17/. |
|---|-----------|------------|-------------------|
| полное | 6.011 б | 6.164 б | |
| упругое | 5.998 б | 5.824 б | |
| захвата | 0.0131 б | 0.340 б | |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | 1.400 б | 1.730 б | 0.82±0.12 |

Обращает на себя внимание большое различие сечений захвата тепловых нейтронов, и увеличение резонансного интеграла захвата в оценке ENDF/B-VII непосредственно обусловлено увеличением теплового сечения. Расхождение экспериментальных значений интеграла захвата /5/ с результатами измерений параметров разрешенных резонансов известно давно, но ему нет удовлетворительного объяснения. Экспериментальных данных по сечениям захвата тепловых нейтронов нет, и поэтому не ясно, чем руководствовался Мугабгаб при выборе параметров отрицательного резонанса, определяющего тепловые сечения.

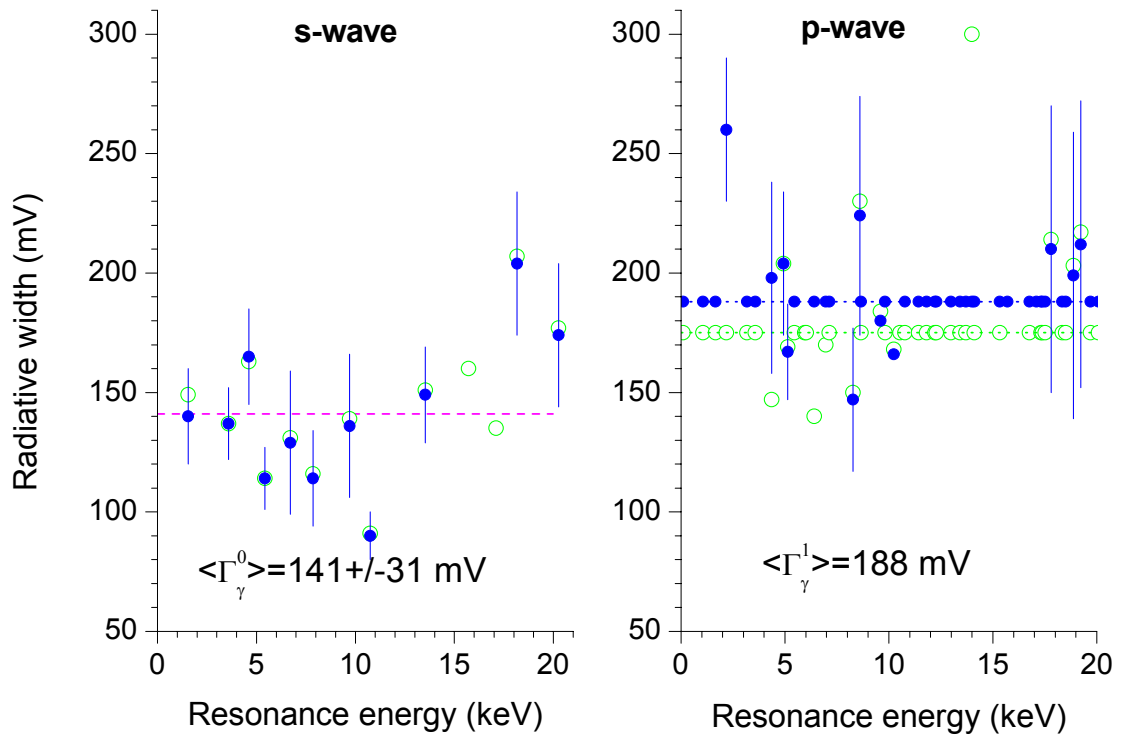


Рис. 1. Нейтронные ширины разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3 (кружки) и ENDF/B-VII (сплошные точки), пунктиром показаны средние значения ширин, которые приняты для р-резонансов с неизвестными ширинами

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и р-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0 = (1.50 \pm .22)$ кэВ, и для р-резонансов – $D_1 = (.52 \pm .03)$ кэВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (.45 \pm 0.05) 10^{-4}$ и большое расхождение силовых функций р-резонансов: $S_1 = (9.5 \pm 1.5) 10^{-4}$ для JENDL-3.3 и $S_1 = (6.1 \pm 1.2) 10^{-4}$ для ENDF/B-VII. Как отмечалось выше, это различие обусловлено двукратным изменением нейтронных ширин резонансов с энергией 4.368 и 10.225 кэВ в оценке ENDF/B-VII.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов часто привлекают анализ соответствия параметров резонансов распределению нейтронных ширин Портер-Томаса. Результаты такого анализа представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наблюдаемом наборе s-резонансов, по-видимому, пропущено около 5-6 резонансов и в наборе р-резонансов пропущено более 20 слабых резонансов в обеих оценках. Такие слабые резонансы не искажают приведенный выше анализ нейтронных силовых функций, но они заметно изменяют оценки среднего расстояния между резонансами.

2.3 Область неразрешенных резонансов

Для области неразрешенных резонансов все последние оценки, CENDL-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII, заимствуют оценку JENDL-3.3. Верхняя граница области неразрешенных резонансов в JENDL-3.3 принята равной 100 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, р- и d-волн. В соответствии

с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера.

Нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [6]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ.

Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.369E-4$, $S_1 = 5.479E-4$, $S_2 = 0.365E-4$, $Gg = 0.230$ эВ, $D_0 = 2252$ эВ, $R = 6.999$ фм

На рис. 4 и 5 оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для области разрешенных и неразрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Экспериментальные данные по полным нейтронным сечениям имеются при энергиях выше 100 кэВ (см. следующий раздел), эти данные хорошо согласуются с экстраполяцией энергетической зависимости оценки JENDL-3.3. В диапазоне энергий от 4 до 100 кэВ данные по сечениям радиационного захвата нейтронов измерены в работе [4], и при соответствующем усреднении резонансов оценка воспроизводит эти данные.

На основе проведенного анализа было принято решение, что, несмотря на отмеченный выше пропуск слабых резонансов, для области разрешенных резонансов целесообразно включить в БРОНД-3 оценку ENDF/B-VII, а для неразрешенных резонансов оценку JENDL-3.3. При отсутствии новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений в области резонансных нейтронов.

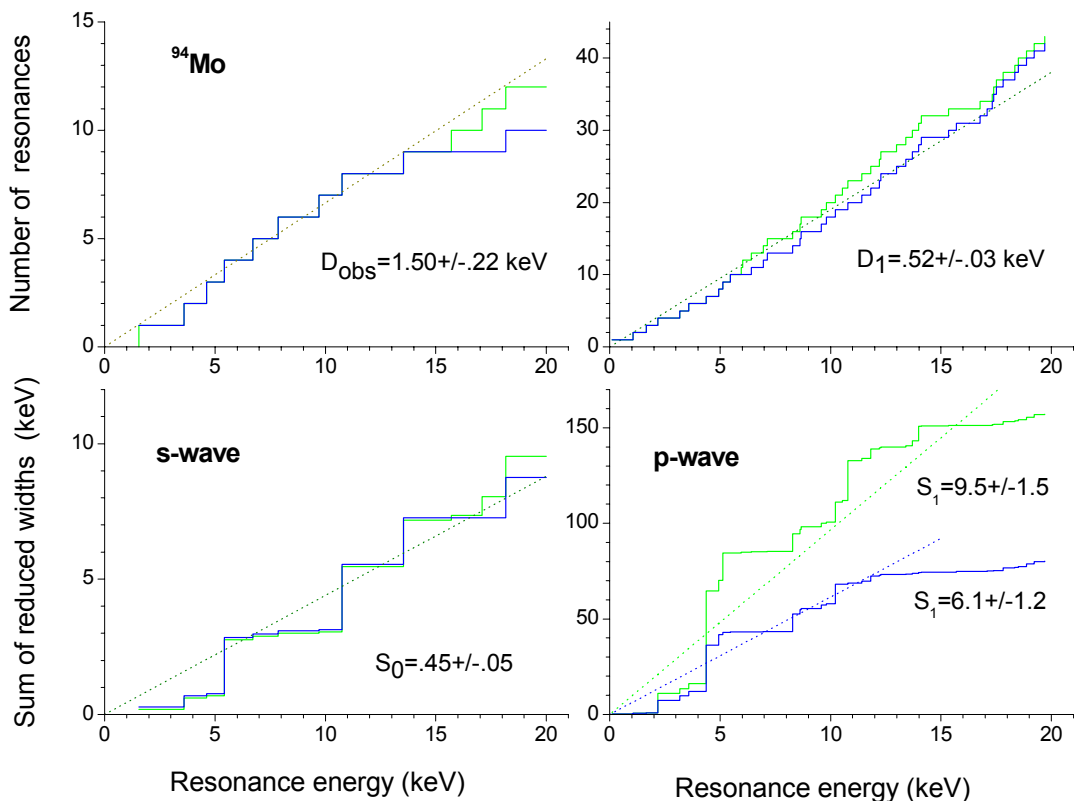


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII

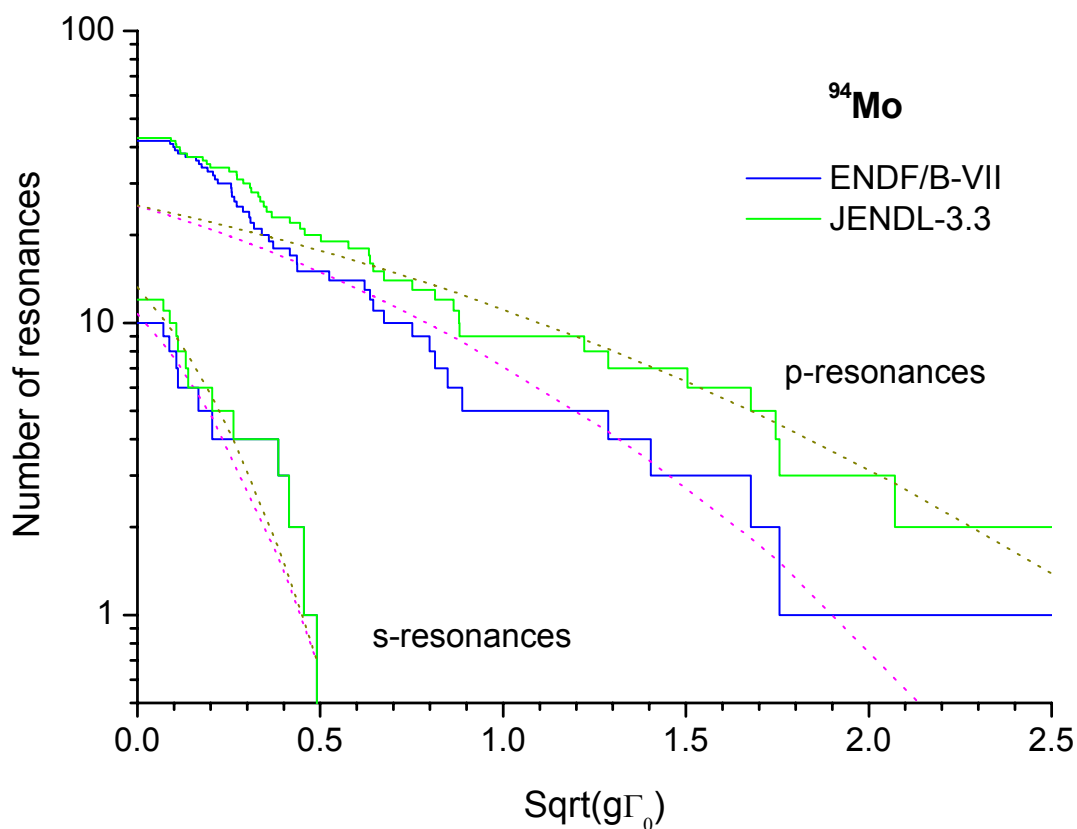


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов

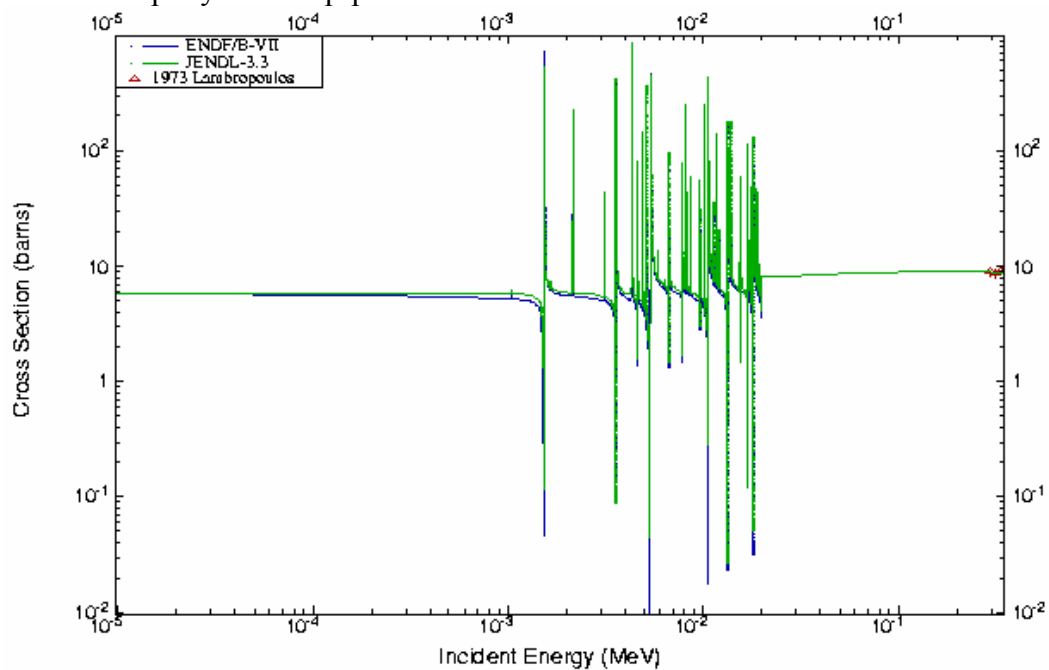


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными вне резонансной области

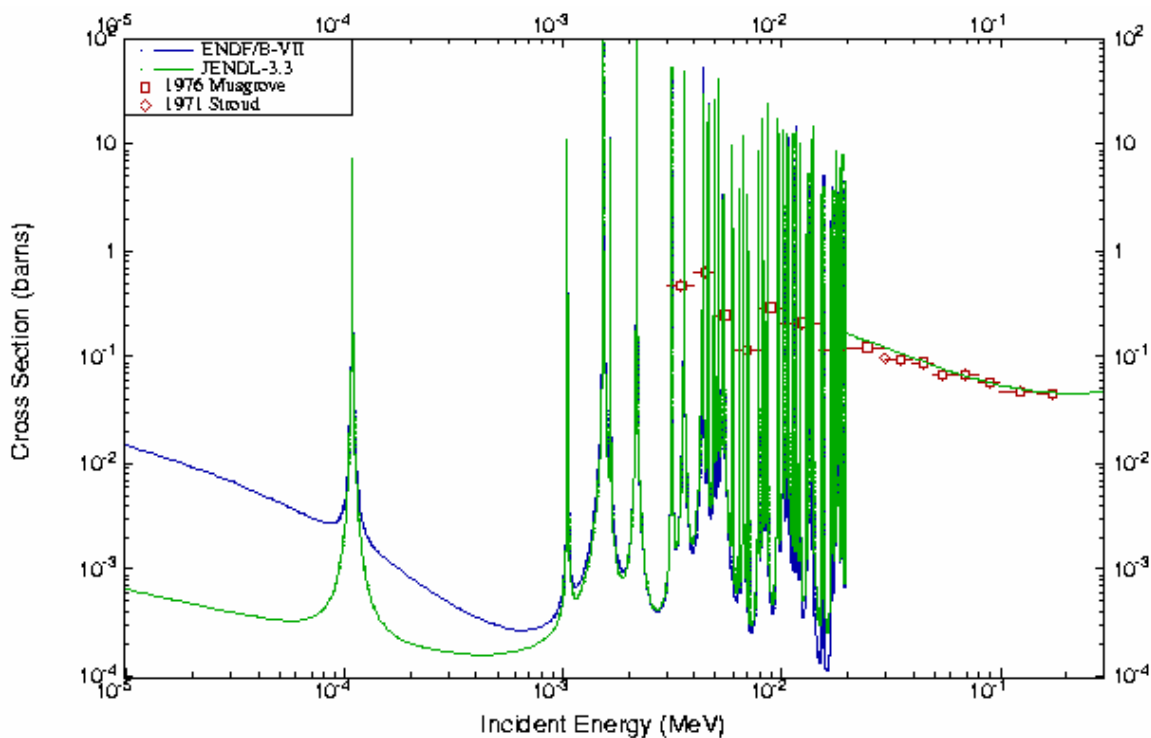


Рис. 5. Оценка сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области (MF=3).

Нейтронные сечения в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH /7/, модифицированной с учетом флуктуаций нейтронных ширин на основе подхода работы /21/. Нейтронные коэффициенты проникаемости рассчитаны по модели сильной связи каналов (программа ECIS /8/) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней 2+ и 3-. Параметры оптического потенциала были взяты из работы /9/, но глубина мнимой части потенциала была несколько занижена, чтобы добиться оптимального описания полных нейтронных сечений при энергиях ниже 3 МэВ.

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /9/, /10/ и /11/, соответственно.

В расчетах радиационных ширин рассматривались E1, M2 и E2 –гамма-переходы. Для силовых функций гамма-переходов использованы параметры, рекомендованные в RIPL-2 /22/. Полная силовая функция нормировалась на величину, соответствующую рассмотренным выше данным о радиационной ширине и плотности нейтронных резонансов. Параметры дискретных уровней для различных каналов распада, обычно, принимались на основе таблиц /13/ и рекомендаций RIPL-2 /22/.

3.1. Полные нейтронные сечения(MT=1).

На рис. 6 представлено полное сечение Mo-94 в сравнении с экспериментальными данными. Как видно, разброс экспериментальных данных очень велик, и они не могут быть критерием для надежного выбора той или иной оценки. В области энергий нейтронов до 1 МэВ оцененные данные библиотек BROND-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII мало различаются, однако при более высокой энергии это различие становится существенным, но отсутствие экспериментальных не позволяет дать преимущество одной из оценок.

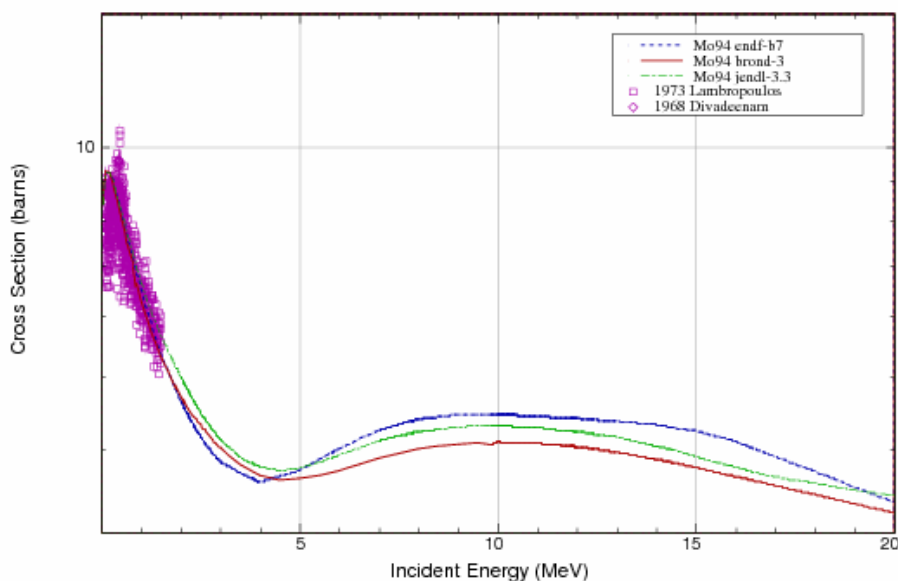


Рис. 6. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках интегральное сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 6 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния с экспериментальными данными. В целом, совокупность экспериментальных данных согласуется с оценками, но разброс экспериментальных данных столь значителен, что нет основания предпочесть какую-либо из оценок.

На рис. 7 и 8 показана часть имеющихся экспериментальных данных для наиболее характерных энергий налетающих нейтронов. Отобраны энергии, для которых имеются результаты нескольких независимых измерений. Оценки достаточно хорошо воспроизводят основные закономерности изменения угловых распределений при увеличении энергии нейтронов, и расхождения оценок с экспериментом оказываются примерно такими же, как разногласия экспериментальных данных.

42-Mo-94(N,EL),SIG

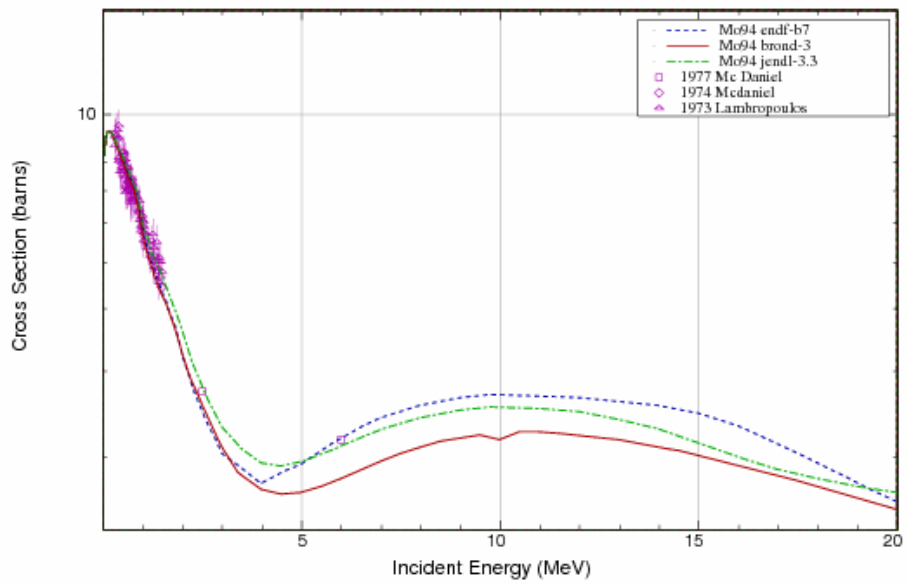


Рис. 6. Сечение упругого рассеяния в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

42-Mo-94(N,EL),DA Ei4.00E+5

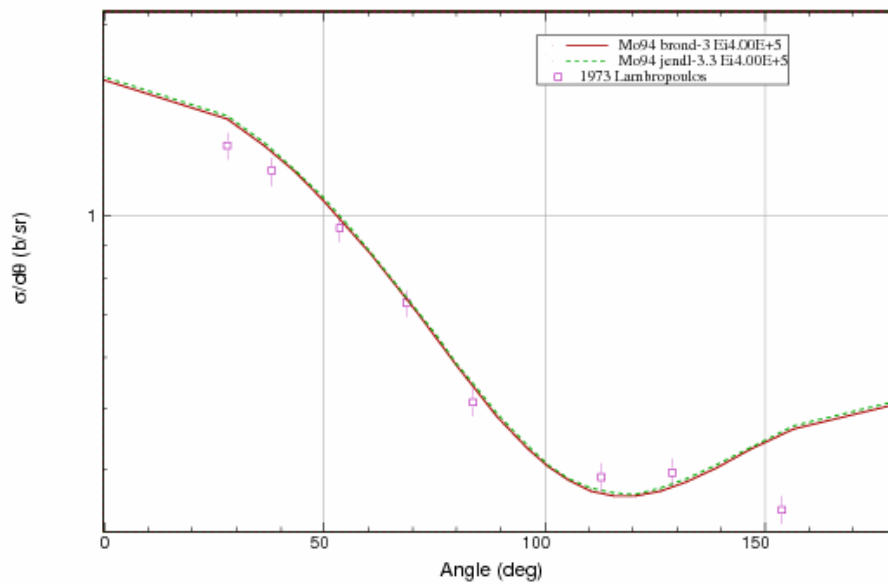


Рис. 7. Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов с энергией 400 кэВ.

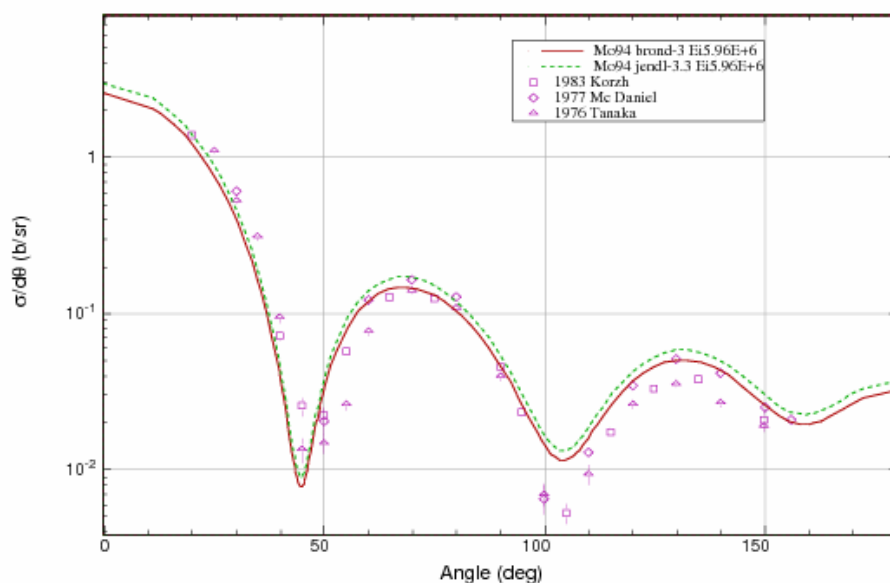


Рис. 8. Экспериментальные данные об угловом распределении упруго рассеянных нейтронов с энергией 5.96 МэВ в сравнении оценками.

3.3. Сечение радиационного захвата (MT=102).

Экспериментальные данные по сечению радиационного захвата нейтронов вне резонансной области измерены только в одной работе [4], и все оценки ориентируются на эти данные. Эти оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия в области энергий выше 3 МэВ обусловлено различными приближениями в описании конкуренции радиационных и нейтронных ширин на начальных этапах каскада гамма-переходов.

В оценке БРОНД-3 вероятности гамма-переходов рассчитывались с учетом E1, M2 и E2 – мультипольностей и параметрами гигантских резонансов, рекомендованными в работе [18]. Полная силовая функция гамма-переходов была нормирована к имеющимся экспериментальным данным по средним радиационным ширинам и плотности нейтронных резонансов.

Сравнение оценок сечений радиационного захвата нейтронов с экспериментальными данными показано на рис. 9. В области энергий выше 8-10 МэВ во всех оценках рассматривается механизм прямого коллективного захвата нейтронов, но приближения, привлекаемые для его описания, различаются весьма значительно. Следует, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 1 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не оказывает сколько-либо заметного влияния на расчеты характеристик ядерных реакторов.

42-Mo-94(N,G),SIG

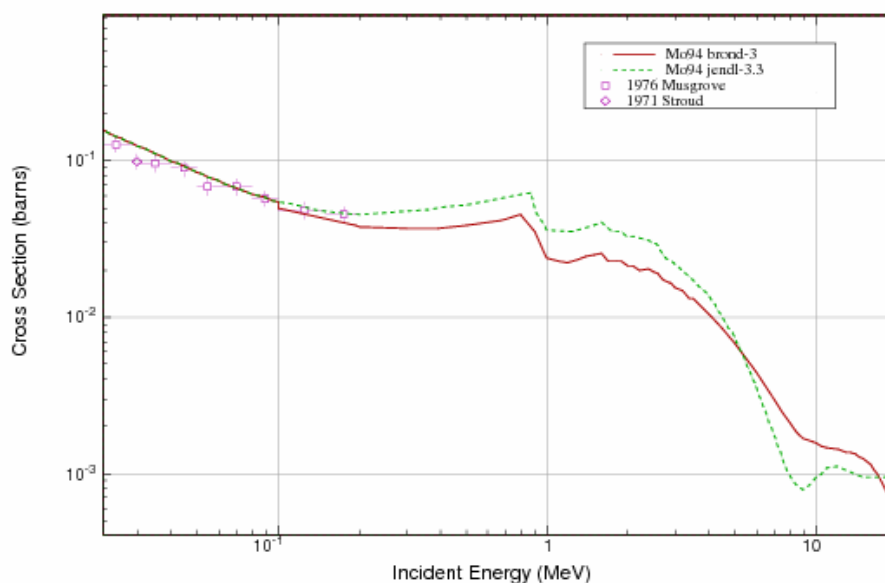


Рис. 9. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов на Мо-94 вне резонансной области в сравнении с экспериментальными данными

3.4. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-69).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 2.9652 МэВ моделируются непрерывным спектром..

Схема уровней:

| N | Энергия уровня, МэВ | Спин | Переход | Энергия гамма-кванта, МэВ | Вероятность перехода, % |
|----|---------------------|------|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| 0 | 0.00000 | | | | |
| 1 | 0.871100 | 2+ | 1 → 0 | 0.87108 | 100 |
| 2 | 1.57370 | 4+ | 2 → 1 | 0.70263 | 100 |
| 3 | 1.74250 | 0+ | 3 → 1 | 0.8714 | 100 |
| 4 | 1.86430 | 2+ | 4 → 1 4 → 0 | 0.99318 1.8641 | 0.92 0.08 |
| 5 | 2.06740 | 2+ | 5 → 1 5 → 0 | 1.19646 2.0674 | 90 10 |
| 6 | 2.29520 | 4+ | 6 → 2 | 0.7215 | 100 |
| 7 | 2.39320 | 2+ | 7 → 0 7 → 1 | 2.3932 1.5221 | 9 91 |
| 8 | 2.42350 | 6+ | 8 → 2 | 0.84974 | 100 |
| 9 | 2.53390 | 3- | 9 → 5 9 → 4 9 → 2 9 → 1 | 0.4666 0.6690 0.9600 1.6626 | 16 15 20 49 |
| 10 | 2.56680 | 4+ | 10 → 2 | 0.9931 | 100 |

| | | | | | |
|----|---------|----|-------------------|------------------|----------|
| 11 | 2.61150 | 5- | 11 → 2 | 1.0378 | 100 |
| 12 | 2.73980 | 1+ | 12 → 1 12 → 0 | 1.8687 2.7400 | 62 38 |
| 13 | 2.76810 | 4+ | 13 → 1 | 1.8970 | 100 |
| 14 | 2.80580 | 2+ | 14 → 2 14 → 1 | 1.2324 1.9343 | 50 50 |
| 15 | 2.83590 | 3+ | 15 → 2 | 1.2622 | 100 |
| 16 | 2.87020 | 2+ | 16 → 4 | 1.00593 | 100 |
| 17 | 2.87240 | 6+ | 17 → 11 17 → 8 | 0.2617 0.4492 | 4 96 |
| 18 | 2.95580 | 8+ | 18 → 17 18 → 8 | 0.0836 0.5321 | 8 92 |
| 19 | 2.96510 | 2+ | 19 → 4 19 → 2 | 1.1003 1.3914 | 60 40 |
| 20 | 2.96520 | | | | |

Экспериментальные данные по интегральному сечению неупругого рассеяния имеются только вблизи порога. Оцененные данные библиотеки ENDF/B-VII приняты из библиотеки JENDL-3.3. Оценка BROND-3 лежит выше. Это различие в оценках связано с различием в параметрах оптической модели. В расчетах БРОНД-3 была использована модель несферической оптики. Более высокое интегральное сечения неупругого рассеяния нейтронов для Mo-92 поддерживается анализом сечений интегрального неупругого рассеяния на других изотопах молибдена и на соседних ядрах. Этот анализ показывает плавную зависимость указанного сечения от атомного веса. Оценки китайской библиотеки CENDL-3 на других изотопах молибдена практически совпадает с оценками БРОНД-3.

На рис. 11 показана зависимость сечения неупругого рассеяния для первого уровня. Имеется значительный разброс экспериментальных данных, оценки JENDL-3.3 и BROND-3 практически совпадают. На рис. 12 представлены угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов 6 МэВ из JENDL-3.3 и BROND-3. Как видно, форма зависимости идентична и в основном следует экспериментальной зависимости.

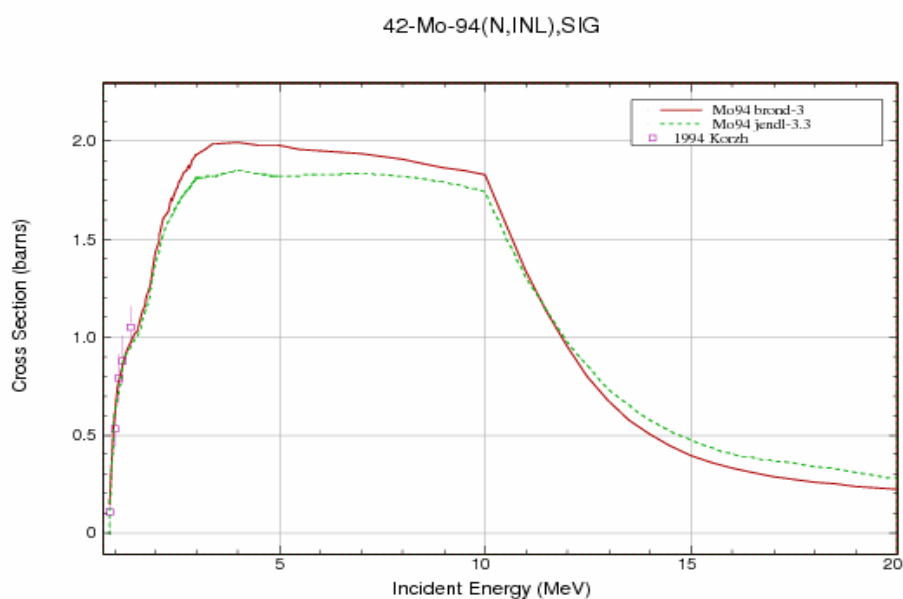


Рис. 10. Полное сечение неупругого рассеяния.

42-Mo-94(n,n'),SIG E18.71E+5

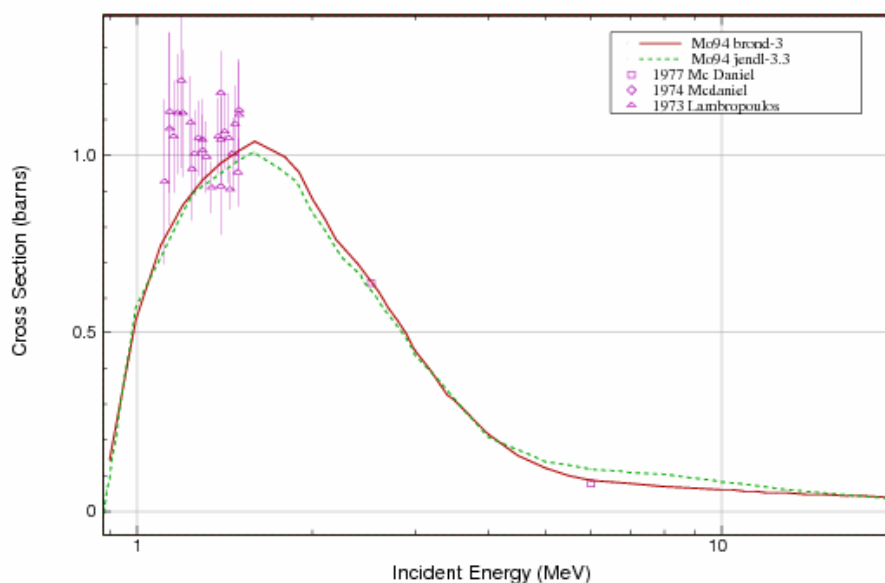


Рис. 11. Сечение неупругого рассеяния на первом уровне Mo-94 с энергией 0.871 МэВ.

42-Mo-94(n,n'),DA Ei6.00E+6 Ei8.71E+5

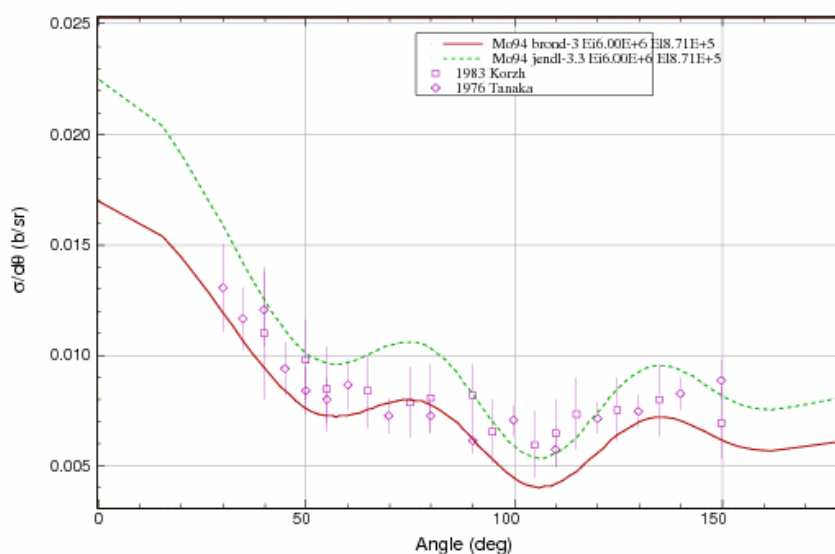


Рис. 12. Угловые распределения нейтронов с энергией 6 МэВ, неупруго рассеянных на уровне 0.871 МэВ.

3.5. Сечение реакций $(n,2n),(n,3n)$ (MT=16, 17).

На рис.13 показаны сечения реакции $^{94}\text{Mo}(n,2n)$. Экспериментальные данные отсутствуют. Оцененные сечения библиотек BROND-3 JENDL-3.3 примерно равноценны, однако оценка БРОНД-3 несколько лучше согласуется с эмпирической систематикой сечений реакции $(n,2n)$ /15/ и согласована с интегральным сечением неупругого рассеяния БРОНД-3. Оценка JENDL-3.3 совпадает с оценкой ENDF-B7. На рис. 14 показаны сечения реакции $^{94}\text{Mo}(n,3n)$. Оценки сечения реакции $(n,3n)$ из библиотек BROND-3 и JENDL-3.3 практически совпадают. Данные ENDF/B-VII приняты из JENDL-3.3. Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6, и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

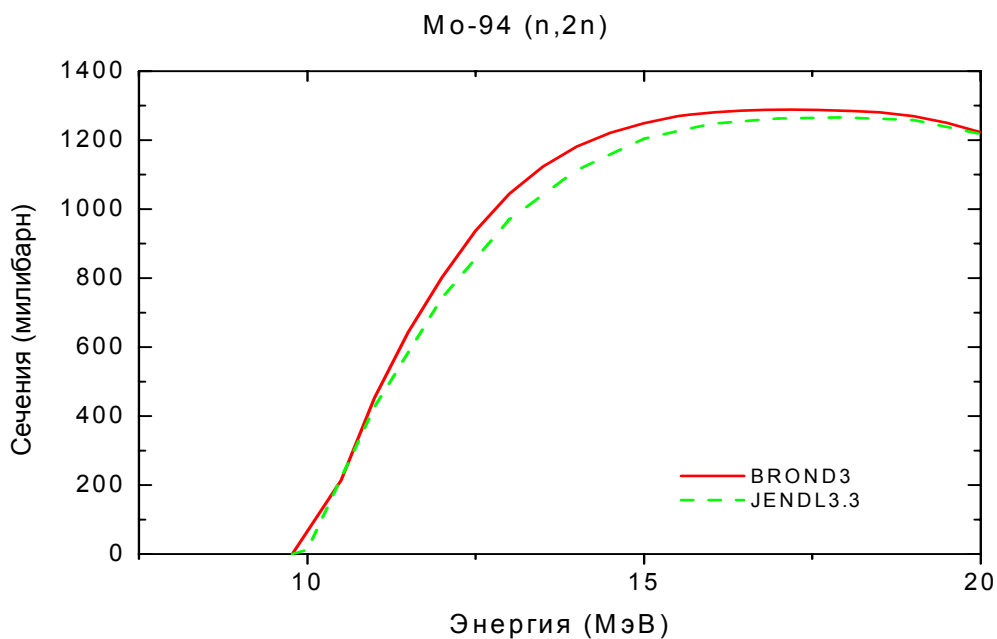


Рис. 13. Сечение реакции (n,2n).

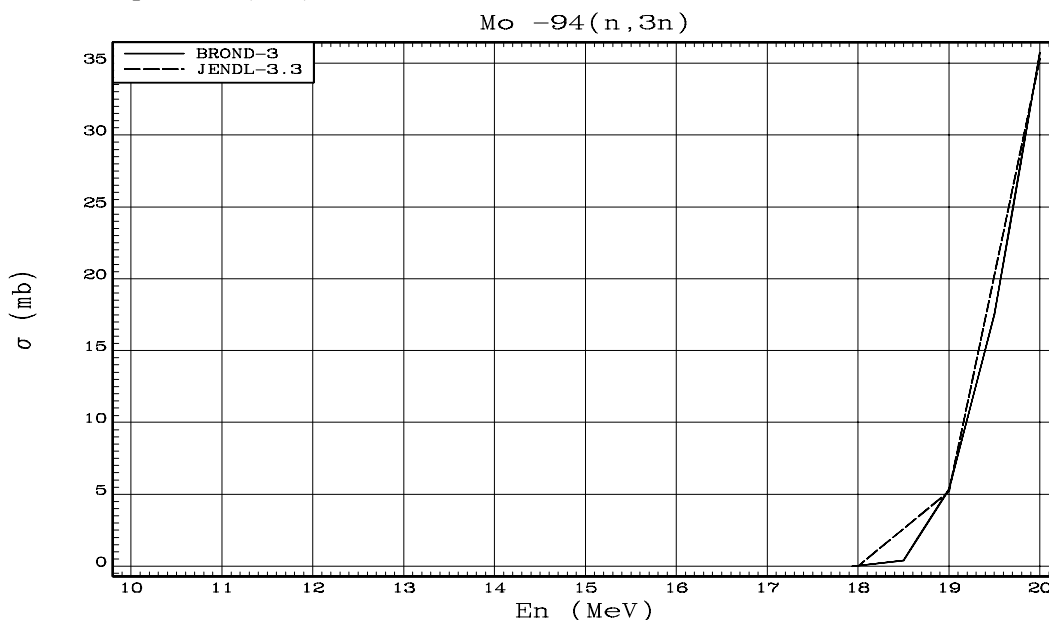


Рис. 14. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Сечение реакции (n,p),(n,d), (n,t),(n,α) (MT=103,104,105,107).

На рис. 15 показаны сечения реакции $^{94}\text{Mo}(n,p)$. Функции возбуждения реакции (n,p) из BROND-3, JENDL-3.3 близки, однако оценка БРОНД-3 предпочтительнее, она согласована с оценкой сечений реакции (n,np) (см. рис. 20) из библиотеки BROND-3 и сумма сечений обеих реакций лучше соответствует эмпирической систематике /15/.

На рис.16 показаны сечения реакции $^{94}\text{Mo}(n,d)$. Данные библиотеки ENDF-B7 приняты из библиотеки JENDL-3.3. Все известные функции возбуждения реакции (n,d), полученные расчетным путем, существенно не согласуются с экспериментальной точкой работы Хайта. Это связано с недостаточным учетом вклада прямого процесса. Оценка БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лежит ближе к экспериментальным данным (n,d).

Сечения реакции $^{94}\text{Mo}(n,t)$ в библиотеках BROND-3 и ENDF/B-VII взяты из JENDL-3.3.

На рис. 17 показаны сечения реакции $^{94}\text{Mo}(n,\alpha)$. Экспериментальных данных нет. Оценка BROND-3 лучше согласуется с систематикой функций возбуждения реакции (n,α) /15/ по форме функции и по максимальной величине сечения в максимуме функции возбуждения.

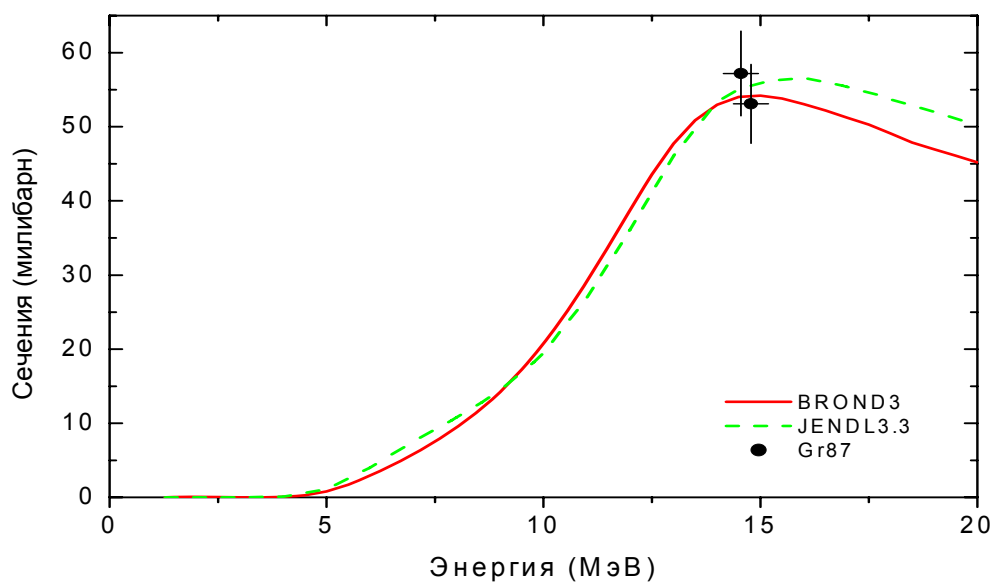


Рис. 15. Сечение реакции (n,p).

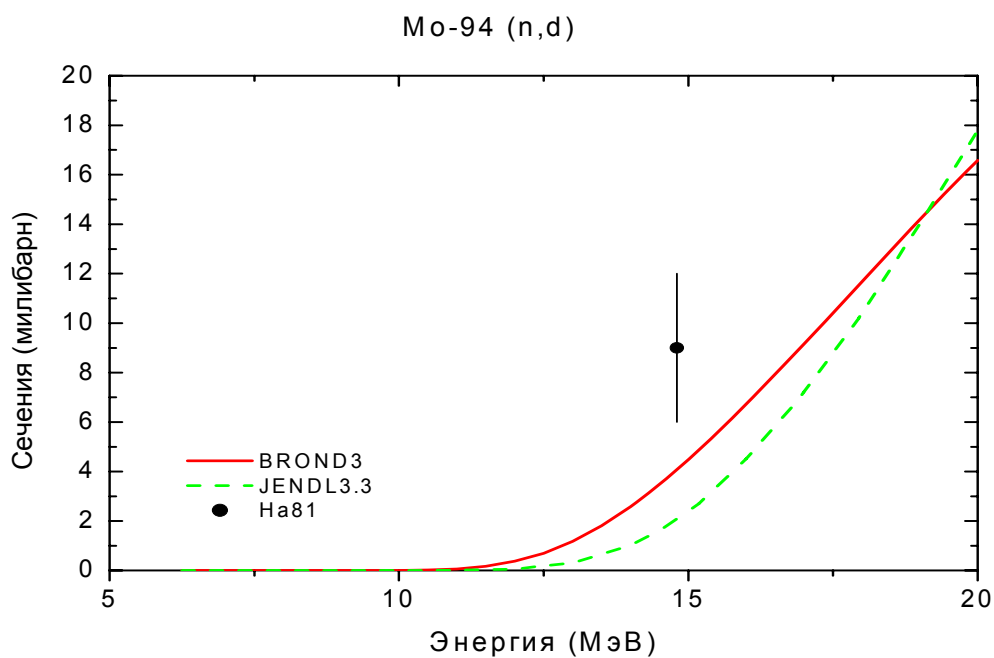


Рис. 16. Сечение реакции (n,d).

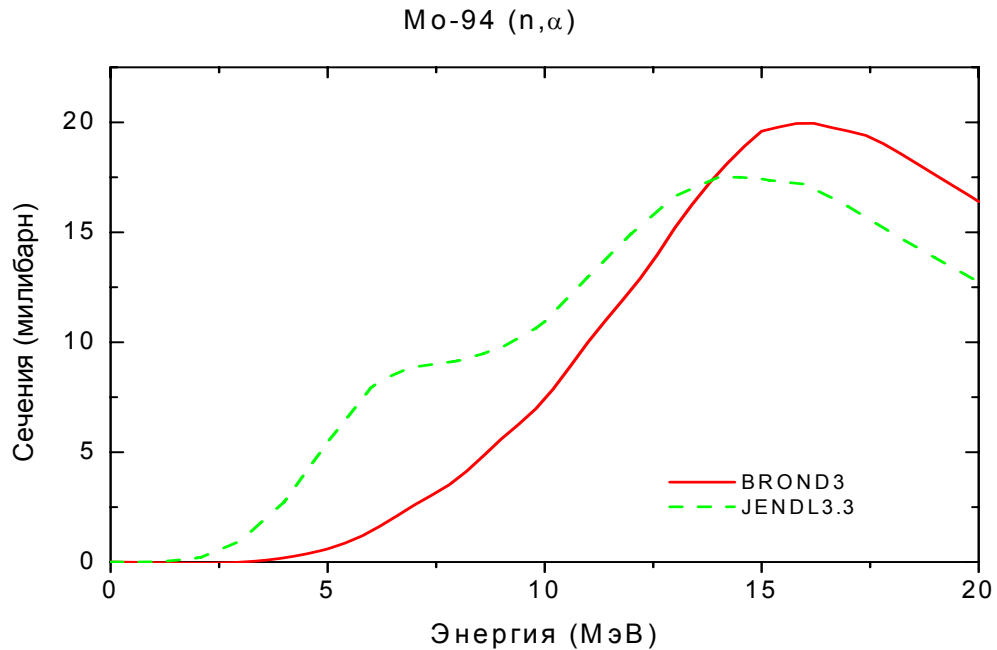


Рис. 17. Сечение реакции (n,α) .

3.7. Сечения реакций (n,np) , $(n,n\alpha)$ (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет надежных экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. В БРОНД-3 оценка основана на расчетах по программе GNASH [7], и разногласия оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

На рис.18 дано сечение реакции $^{94}\text{Mo}(n,np)$. Оцененные данные библиотек БРОНД-3 JENDL-3.3 примерно равноценны, однако зависимость из БРОНД-3 несколько лучше согласуется с систематикой функций возбуждения реакции $(n,2n)$ [15] и не противоречит экспериментальной величине сечения реакции (n,xp) .

На рис. 19 дано сечение реакции $^{94}\text{Mo}(n,n\alpha)$. Экспериментальных данных по реакции $(n,n\alpha)$ нет. На рис. 20 приведены экспериментальные точки только для суммы реакций (n,α) и $(n,n\alpha)$. Рекомендуется оценка БРОНД-3, она согласована с функцией возбуждения реакции (n,α) .

Спектры и угловые распределения нейтронов для рассматриваемых реакций представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6, и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

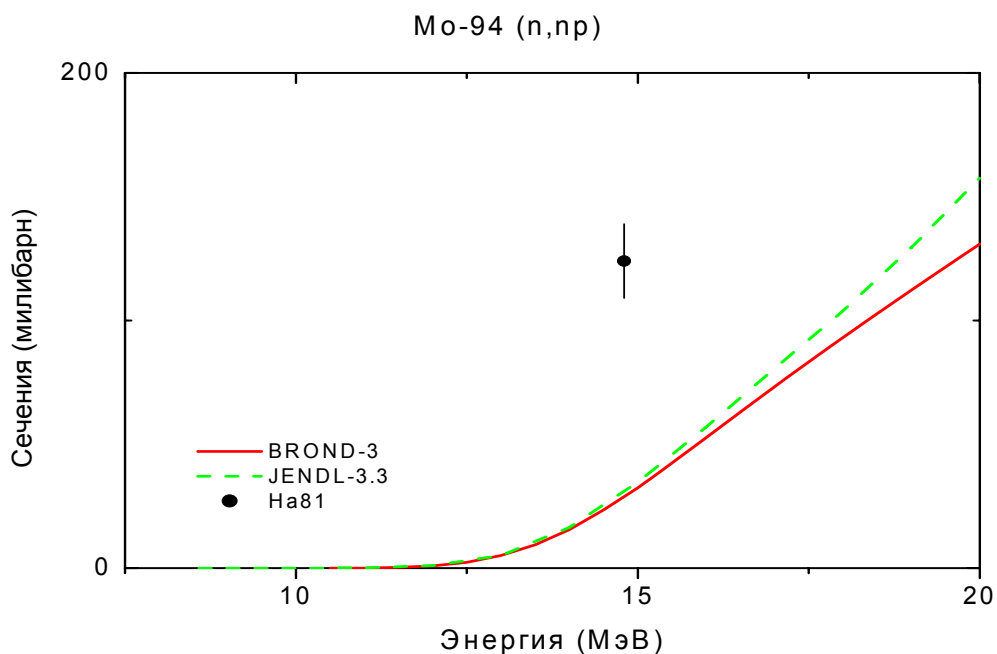


Рис. 18. Сечение реакции (n,np).

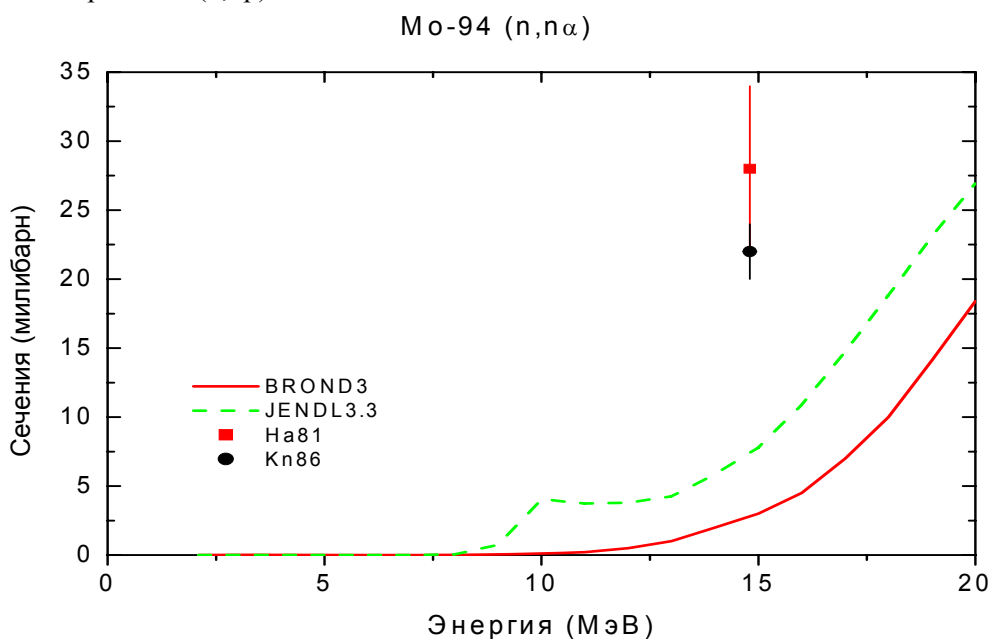


Рис.19. Сечение реакции (n,nα).

4. Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4).

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/6/

MT=51-69 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gashy /6/ и Dwuck.

5. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6).

MT=16,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /18/

6. Множественность образования гамма-лучей (MF=12).

MT=102 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH.

7. Сечения образования гамма-лучей (MF=13)

MT=3 Сечения образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитаны по программе GNASH.

8. Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

MT=3,102 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

9. Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=3 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, где они получены аппроксимацией с помощью эмпирической формулы работы /18/ экспериментальных данных работы /19/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy /6/.

Литература:

1. Kikuchi, Y. et. al.: Report JAERI-M 86-030 (1986).
2. Wasson, O.A. et. al.: Phys. Rev., c7, 1532(1973).
3. Weigmann, H. et. al.: 1971 Konoxville, 749(1971).
4. Musgrove, A.R.De L. et. al.: Nucl. Phys., A270, 108(1976).
5. Mughabghab, S.F. et. al.: "Neutron cross sections, vol.1, part A", Academic press(1981).
6. Igarasi, S. and Fukahori, T.: Report JAERI-1321(1991).
7. Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: in "Nuclear reaction data and nuclear reactors" (Triest, 1996). Eds.A.Gordini, G.Reffo., World science, Singapore, 1988, v.1, p.206.
8. Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8 (1970), p.281.
9. Konig, A.J., Dalaroche, J.P.: Contribution to 3-th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
10. Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl.Phys. A232, 381 (1974).
11. Avrigeanu, V., Hodgson, P.: Avrigeanu, M.: Phys. Rev. C49 (1994) 2136.
12. Dietrich. S.S., Berman, B.L.: Atomic Data and Nuclear Data tables.538 (1088) 199.
13. Firestone, R.B.: Table of isotopes, eight edition, v.2, New York, 1995.
14. Smith, A.B.: Nucl. Phys. 244, 213 (1975).
15. Manokhin, V.N.: Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
16. Manokhin, V.N., Blokhin, A.I.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, p.871 (1997).
17. S.F.Mughabghab: Atlas of Neutron Resonances, to published by Academic Press, 2005 (5-th edition of BNL-325).
18. Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
19. Howerton, S.T. and Plechaty, E.F.: Nucl. Sci. Eng., 32, 178 (1968).
20. Morgan, G. and Newman, N.: ORNL-TM-5097 (1975).
21. Hofman, H. ET et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
22. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.

8. Перечень использованных экспериментальных работ

1. Полное сечение

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|----------------|----------------|---------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| Lambropoulos73 | P.Lambropoulos | J,NP/A,201,1,1973 | 10277 | 1.01+05 | 1.50+06 | 594 |
| Divadeenam68 | M.Divadeenam | J,DA/B,28,3834,1968 | 10523 | 1.30+05 | 6.40+05 | 103 |

2. Сечение радиационного захвата

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|------------|------------------|------------------------|---------|----------------------|--------|-------------|
| Musgrove76 | A.R.Del.Musgrove | J,NP/A,270,108,1976 | 30357 | 3.0+03 | 2.0+05 | 15 |
| Stroud71 | D.B.Stroud | P, AAEC/PR-34P,9, 1971 | 30506 | 3.0+04 | | 1 |

3. Сечение упругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|--------|-------------|
| Mc Daniel77 | F.D.Mc. Daniel | P,A-KTY-74/77,3,1977 | 10770 12782 | 2.52+06 6.00+06 | | 1 1 |
| Mcdaniel74 | F.D.Mcdaniel | J,PR/C,10,1087,1974 | 10391 | 1.50+06 | | 1 |
| Lambropoulos73 | P.Lambropoulos | J,NP/A,201,1,1973 | 10277 | 3.0+05 | 1.5+06 | 130 |

3. Сечение неупругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|---------|-------------|
| Mc Daniel77 | F.D.Mc. Daniel | P,A-KTY-74/77,3,1977 | 10770 12782 | 2.52+06 6.00+06 | | 1 1 |
| Mcdaniel74 | F.D.Mcdaniel | J,PR/C,10,1087,1974 | 10391 | 1.50+06 | | 1 |
| Lambropoulos73 | P.Lambropoulos | J,NP/A,201,1,1973 | 10277 | 3.0+05 | 1.5+06 | 130 |
| Korzh94 | I.A.Korzh | J, UFZ,39, 785, 1994 | 32201 | 9.07+05 | 1.40+06 | 5 |

6. Сечение реакции N,P

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|------------|---------------|-----------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| Greenwo087 | L.R.Greenwood | J, PR/C, 35, 76, 1987 | 12976 | 1.46+07 | 1.48+07 | 2 |

7. Сечение реакции N,XP

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|-----------|------------|------------------------|---------|----------------------|--|-------------|
| Haight81 | R.C.Haight | J, PR/C, 23, 700, 1981 | 10960 | 1.49+07 | | 1 |

8. Сечение реакции N,ХА

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|-----------|------------|------------------------|---------|----------------------|--|-------------|
| Haight81 | R.C.Haight | J, PR/C, 23, 700, 1981 | 10960 | 1.49+07 | | 1 |
| Kneff86 | D.W.Kneff | J,NSE, 92, 491, 1986 | 10933 | 1.48+07 | | 1 |

9. Сечение реакции N,D

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|-----------|------------|------------------------|---------|----------------------|--|-------------|
| Haight81 | R.C.Haight | J, PR/C, 23, 700, 1981 | 10960 | 1.49+07 | | 1 |

9. Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка **БРОНД-3** является оптимальной для всей совокупности **нейтронных сечений**. Для области разрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка ENDF/B-VII, а для неразрешенных резонансов оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения **неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций.** Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в **БРОНД-3**.

Целесообразно включить файл **БРОНД-3** для **Mo-94** в библиотеку **РОСФОНД**.

Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

42.4. Молибден-95

Содержание в естественной смеси 15.92 %

1. Общие характеристики

1.1. $Z=42$

1.2. $A=95$

1.3. $A_w=94.09050$

1.4. Перечень нейтронных реакций с порогоми ниже 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт [*] |
|-----|--------------|----------|---------------------------|---------------------------|
| 04 | n,n' | -0.2041 | 0.2062 | Mo-95 |
| 16 | n,2n | -7.3751 | 7.4535 | Mo-94 |
| 17 | n,3n | -17.0470 | 17.2175 | Mo-93 |
| 22 | n,n α | -2.2447 | 2.2686 | Zr-91 |
| 28 | n,np | -8.6382 | 8.7300 | Nb-94 |
| 102 | n, γ | 9.1542 | 0 | Mo-96 |
| 103 | n,p | -0.1431 | 0.1446 | Nb-95 |
| 104 | n,d | -0.3285 | 6.3948 | Nb-94 |
| 105 | n,t | -7.3776 | 7.4560 | Nb-93 |
| 106 | n,He3 | | | |
| 107 | n, α | 6.3982 | | Zr-92 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.3 Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Кикучи [1] на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию [2] и радиационному захвату нейтронов [3]. Эти параметры для большинства резонансов близки к параметрам, рекомендованных Мугабгом и др. [5], но для s-резонансов с энергиями 1495 и 1766 эВ, а также p-резонанса с энергией 1371 эВ приняты столь большие значения нейтронных ширин, что площади резонансов примерно в два раза превышает экспериментальные

значения [5]. Создается впечатление, что для указанных резонансов в файле JENDL-3.3 допущена опечатка порядка нейтронных ширин, которая приводит к их завышению в 10 раз. Верхняя граница резонансной области принята равной 2 кэВ, радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 7.0$ фм [5] и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами приняты средние значения ширин: 150 мэВ для s-резонансов и 180 мэВ для p- резонансов. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в CENDL-3 и с небольшими изменениями p-резонансов также в JEFF-3.0.

В 2000 г. Мугабгаб и др. [17] пересмотрели параметры разрешенных резонансов. Наиболее существенными являются корректировка нейтронных ширины для указанных выше резонансов, а также некоторое уменьшение радиационных ширин некоторых s-резонансов. Верхняя граница области разрешенных резонансов была увеличена до 2.1412 кэВ. Пересмотренные параметры резонансов были включены в оценку ENDF/B-VI.7 и без изменений в ENDF/B-VII. Оценка ENDF/B-VII была включена в JEFF-3.1 вместо предыдущей оценки, основанной на JENDL-3.3.

Радиационные ширины резонансов, использованные в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, показаны на рис. 1. Хорошо видны небольшие различия ширин s-резонансов и первых p-резонансов. Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| оценка | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Эксперимент [5] |
|---|-----------|------------|-----------------|
| полное | 19.56 б | 19.99 б | |
| упругое | 5.57 б | 6.38 б | |
| захвата | 13.99 б | 13.61 б | 14.0±0.5 |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | 119 б | 111 б | |

В пределах погрешности обе оценки согласуются с измеренным сечением захвата тепловых нейтронов, но нет экспериментальных данных по другим типам сечений, а также резонансному интегралу захвата.

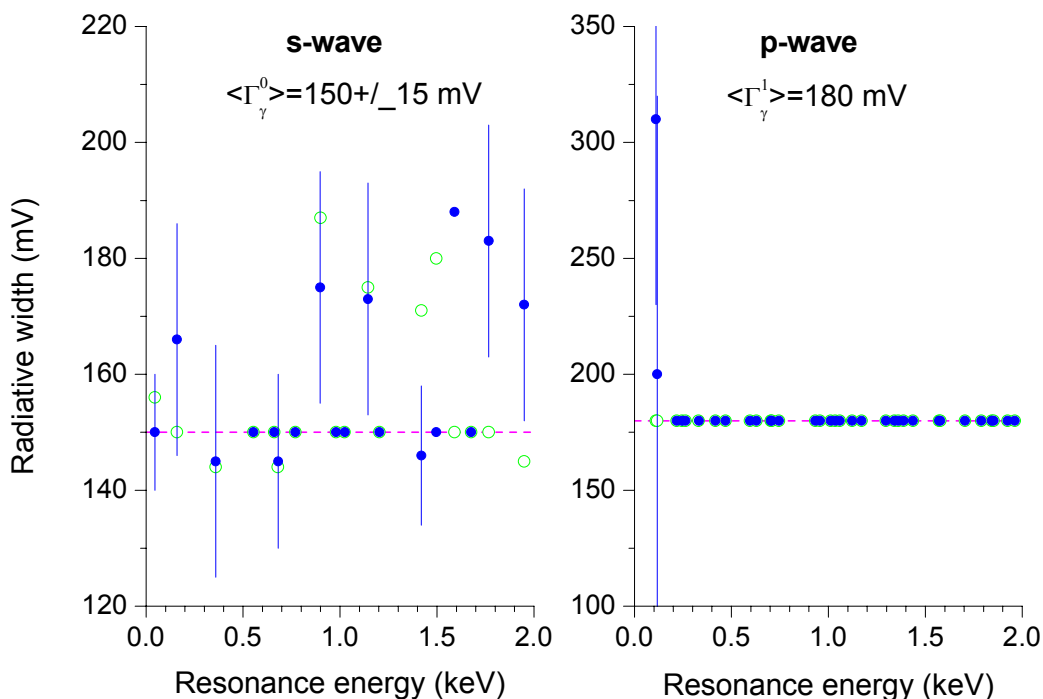


Рис. 1. Нейтронные ширины разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3 (кружки) и ENDF/B-VII (сплошные точки), пунктиром показаны средние значения ширин, которые приняты для p-резонансов с неизвестными ширинами

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0 = (110 \pm 10)$ эВ, и для p-резонансов – $D_1 = (61 \pm 5)$ эВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (.45 \pm 0.10) 10^{-4}$ и $S_1 = (5.2 \pm 0.6) 10^{-4}$ для ENDF/B-VII. Для JENDL-3.3 силовые функции оказываются несколько большими, но как отмечалось выше, это различие обусловлено существенно завышенными значениями нейтронных ширин ряда резонансов в оценке JENDL-3.3.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов, по-видимому, пропущено около 6-7 резонансов и в наборе p-резонансов пропущено около 20 слабых резонансов в обеих оценках. Такие слабые резонансы не искажают приведенный выше анализ нейтронных силовых функций, но они заметно изменяют оценки среднего расстояния между резонансами.

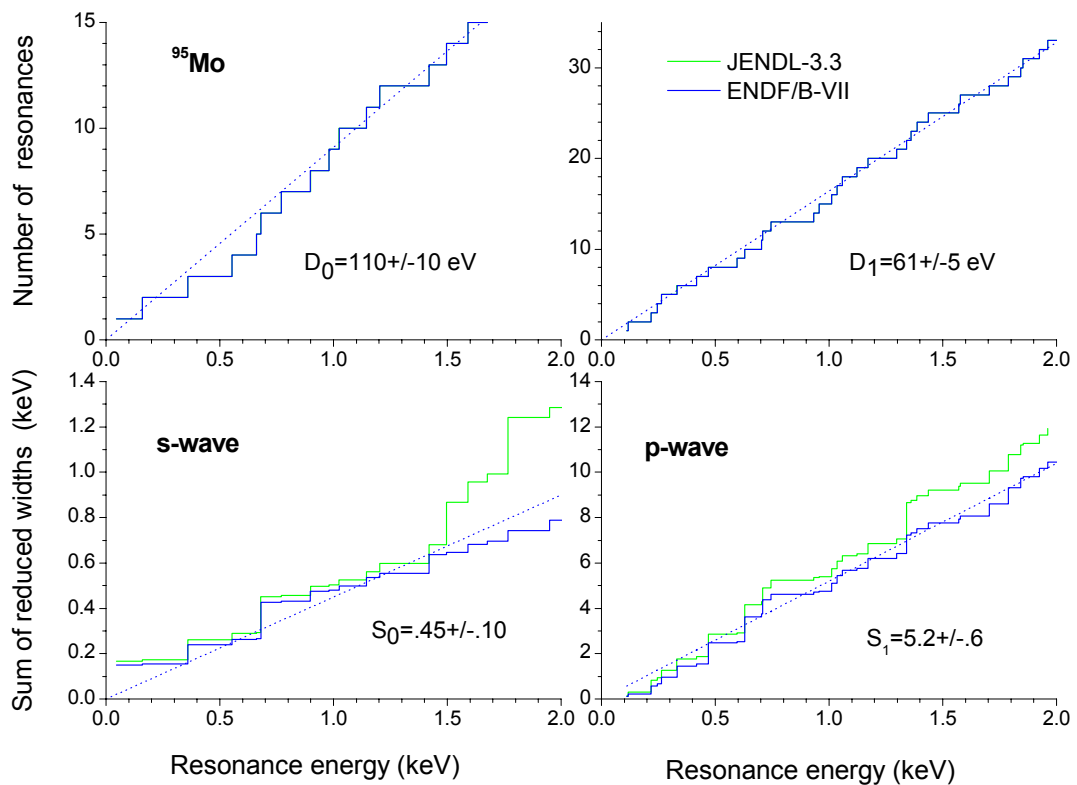


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII

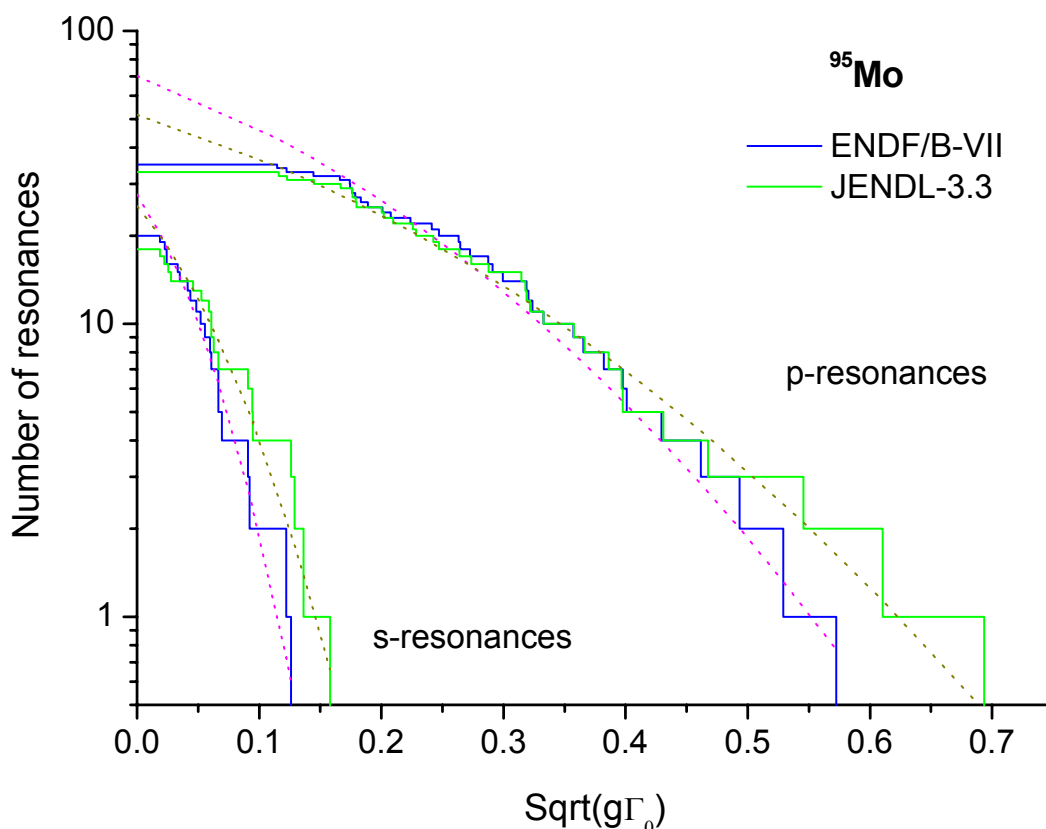


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов

Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, для набора ENDF/B-VII равны $D_0=(78 \pm 8)$ эВ и $D_1=(29.3 \pm 2.7)$ эВ. Отношение $D_0/D_1=2.66 \pm 0.53$ значительно лучше согласуется с общей статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, чем отношение расстояний между резонансами, определенных по наклону кумулятивного числа резонансов (рис. 2).

В анализе, выполненном Мугабгаб и др. [25], с учетом пропуска резонансов были получены средние расстояния $D_0=(80.73 \pm 13.1)$ эВ и $D_1=(34.7 \pm 4.3)$ эВ, которые достаточно близки к результатам нашего анализа.

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII принята равной 100 кэВ и 206 кэВ, соответственно, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [6]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов [20, 4]. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.369E-4$, $S_1 = 5.479E-4$, $S_2 = 0.365E-4$, $Gg = 0.232$ эВ, $D_0 = 76.12$ эВ, $R = 6.680$ фм.

В ENDF/B-VII было использовано аналогичное приближение, но нейтронные силовые функции, средние радиационные ширины и средние расстояния между резонансами были приняты на основе статистического анализа параметров разрешенных резонансов [24].

При этом для d-волны радиационная ширина взята такой же как для s-волны, силовая функция S2 определена на основе расчетов по оптической модели и среднее расстояние между d-резонансами принято равным $D2 = D0/5$ в соответствии со статистическим законом зависимости плотности резонансов от углового момента. Сечение захвата вычисленное при таком выборе параметров оказалось на 10-15 % выше экспериментального во всем диапазоне энергий. Чтобы устранить расхождение с экспериментом, значение D0 было выбрано из условий оптимального описания наблюдаемых сечений радиационного захвата нейтронов [20, 4]. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров: $S0 = 0.453E-4$, $S1 = 6.543E-4$, $S2 = 1.700E-4$, $Gg = 0.150$ эВ для s-, p-волн и 180 для d-волны, $D0 = 64.36$ эВ, $R = 7.00$ фм .

На рис. 4 и 5 оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для области разрешенных и неразрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Экспериментальные данные по полным нейтронным сечениям имеются при энергиях выше 100 кэВ (см. следующий раздел), эти данные хорошо согласуются с экстраполяцией энергетической зависимостью обеих оценок. При соответствующем усреднении резонансов оценки также хорошо согласуются с экспериментальными данными по сечениям радиационного захвата [20, 4]. Различия в выборе средних параметров нейтронных резонансов взаимно компенсируются при подгонки к одним и тем же экспериментальным данным.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что несмотря на достаточно хорошее согласие нейтронных сечений, вычисленных для обеих оценок параметров нейтронных резонансов, оценка **ENDF/B-VII является предпочтительной**, так как в ней устранен ряд противоречий JENDL-3.3 в параметрах разрешенных резонансов и параметры разрешенных и неразрешенных резонансов выбраны согласованным образом.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что несмотря на достаточно хорошее согласие нейтронных сечений, вычисленных для обеих оценок параметров нейтронных резонансов, оценка **ENDF/B-VII является предпочтительной**, так как в ней устранен ряд противоречий JENDL-3.3 в параметрах разрешенных резонансов и параметры разрешенных и неразрешенных резонансов выбраны согласованным образом.

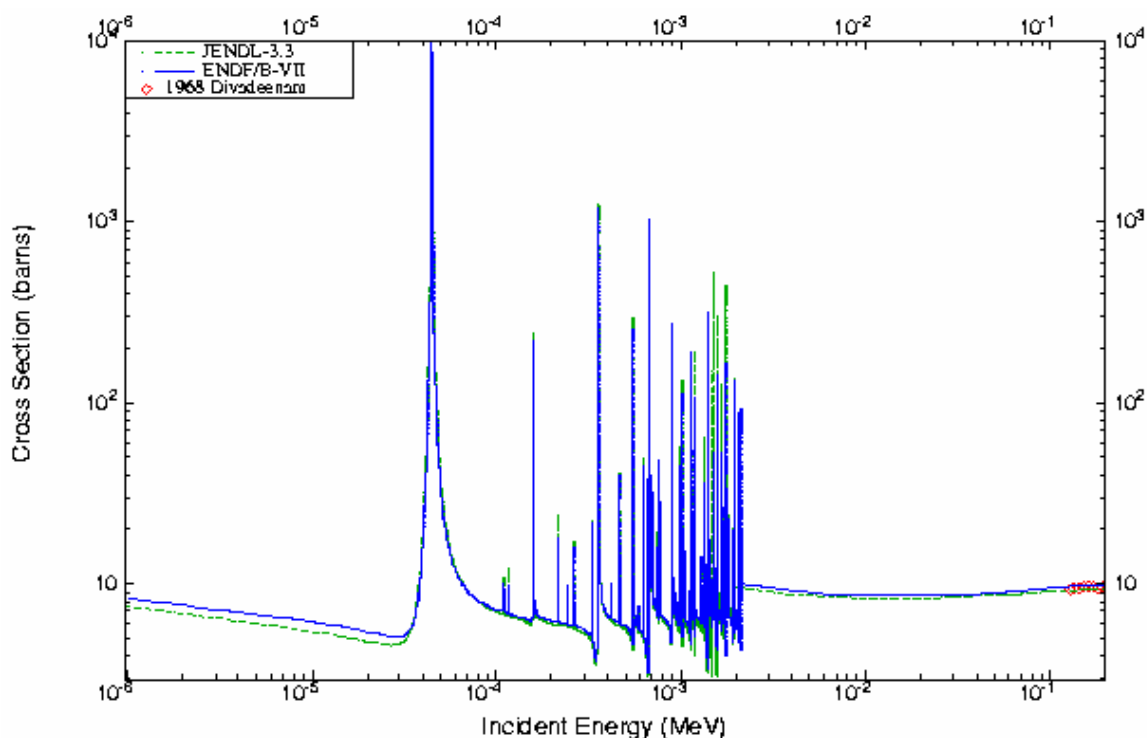


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными вне резонансной области

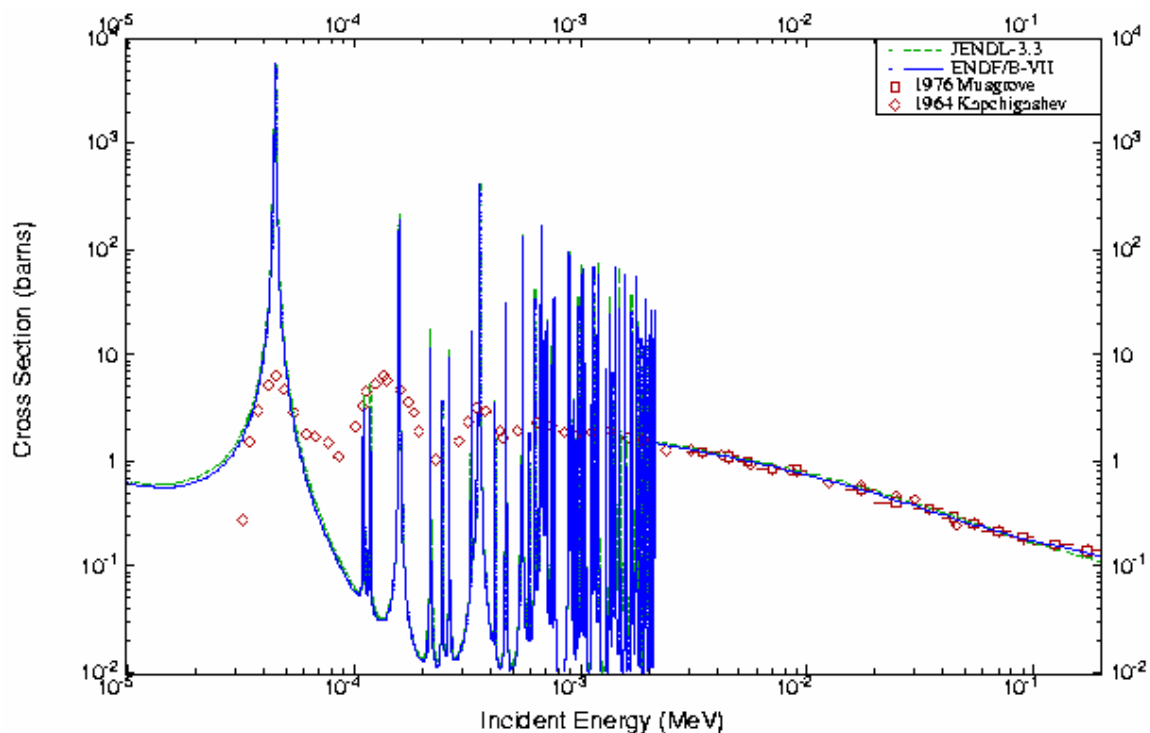


Рис. 5. Оценка сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными. При отсутствии новых экспериментальных данных нет возможности улучшить оценку ENDF/B-VII, и она включена в БРОНД-3 без каких-либо изменений резонансных параметров.

3. Нейтронные сечения вне резонансной области (MF=3).

Нейтронные сечения в БРОНД-3 в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH /7/, модифицированной с учетом флуктуаций нейтронных ширин работы /26/. Нейтронные коэффициенты проникаемости рассчитаны по модели сильной связи каналов (программа ECIS /8/) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней, соответствующих мультиплетам $(3/2+\otimes 2+)$ и $(3/2+\otimes 3-)$. Параметры оптического потенциала были взяты из работы /9/, но глубина мнимой части потенциала была несколько занижена, чтобы добиться оптимального описания полных нейтронных сечений при энергиях ниже 3 МэВ.

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /9/, /10/ и /11/, соответственно.

В расчетах радиационных ширин рассматривались E1, M2 и E2 –гамма-переходы. Для силовых функций гамма-переходов использованы параметры, рекомендованные в RIPL-2 /27/. Полная силовая функция нормировалась на величину, соответствующую рассмотренным выше данным о радиационной ширине и плотности нейтронных резонансов. Параметры дискретных уровней для различных каналов распада, обычно, принимались на основе таблиц /13/ и рекомендаций RIPL-2 /27/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

В области энергий выше 100 кэВ полные нейтронные сечения были получены расчетом с параметрами несферической оптической модели. Нерегулярное поведение экспериментальных данных делает затруднительным выбор наилучшей оценки.

42-Mo-95(N,TOT),SIG

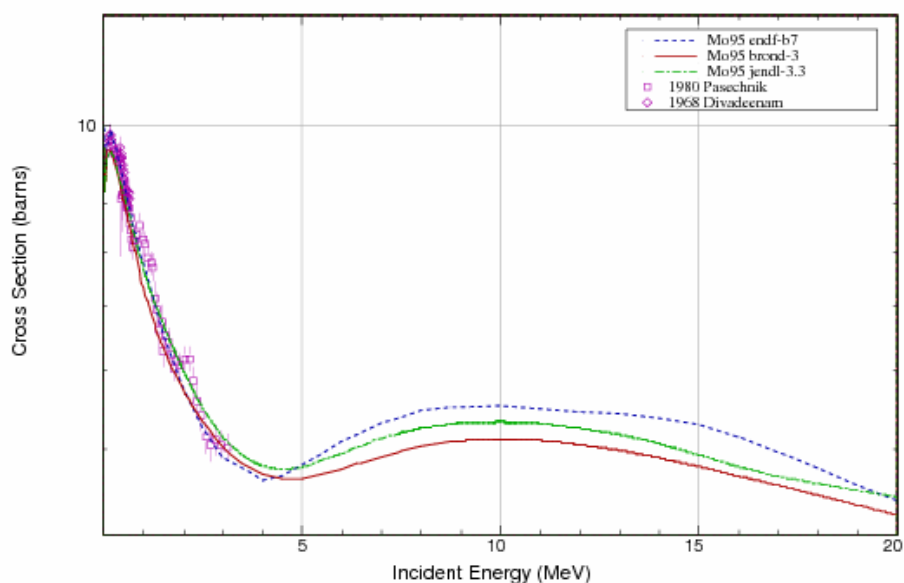


Рис. 6. Оценки полного нейтронного сечения в области нейтронов 0.1-20 МэВ..

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 7 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния. В области выше 3 МэВ оценки библиотек БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF-B7 заметно расходятся, но отсутствие экспериментальных данных не позволяет судить уверенно, какая оценка лучшая.

42-Mo-95(N,EL),SIG

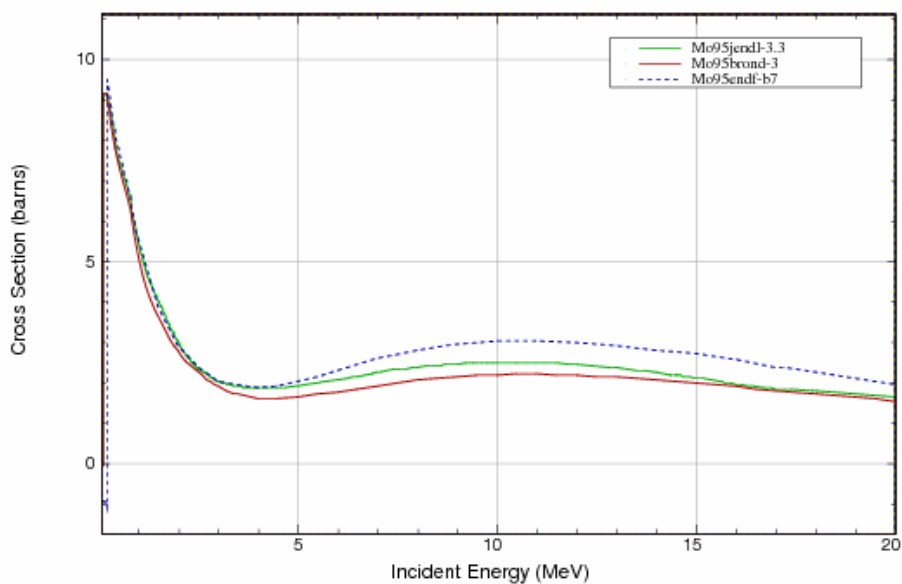


Рис. 7. Сечение упругого рассеяния на Мо-95.

3.3. Сечение неупругого рассеяния(МТ=4, 51-65).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция МТ=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 1.6666 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

| № | Энергия уровня, МэВ | Спин | Переход | Энергия гамма-кванта, МэВ | Вероятность перехода, % |
|----|---------------------|-------|---|--|-----------------------------------|
| 0 | 0.00000 | | | | |
| 1 | 0.20410 | 3/2+ | 1 → 0 | 0.204117 | 100 |
| 2 | 0.76580 | 7/2+ | 2 → 1 | 0.765794 | 100 |
| 3 | 0.78620 | 1/2+ | 3 → 1 3 → 0 | 0.58208 0.78620 | 77.6 22.4 |
| 4 | 0.82060 | 3/2+ | 4 → 1 4 → 0 | 0.61649 0.82062 | 21.4 78.6 |
| 5 | 0.94770 | 9/2+ | 5 → 0 5 → 2 | 0.94767 0.18188 | 99.9 0.1 |
| 6 | 1.03920 | 1/2+ | 6 → 4 6 → 3 6 → 1 6 → 0 | 0.21866 0.253068 0.835149 1.03926 | 0.1 2 88.7 9.2 |
| 7 | 1.05670 | 5/2+ | 7 → 1 7 → 0 | 0.8526 1.0568 | 70 30 |
| 8 | 1.07370 | 7/2+ | 8 → 5 8 → 2 8 → 1 8 → 0 | 0.1258 0.3079 0.8696 1.0737 | 1.0 0.8 7.7 90.5 |
| 9 | 1.30230 | 1/2+ | 9 → 7 9 → 3 | 0.2458 0.5156 | 84.7 15.3 |
| 10 | 1.36970 | 3/2+ | 10 → 1 10 → 0 | 1.1655 1.36975 | 41.5 58.5 |
| 11 | 1.42570 | 5/2+ | 11 → 1 11 → 0 | 1.2220 1.46261 | 99.7 0.3 |
| 12 | 1.54080 | 11/2+ | 12 → 8 12 → 5 12 → 3 | 0.4673 0.5932 0.7750 | 2.7 54.7 42.6 |
| 13 | 1.55170 | 9/2+ | 13 → 11 13 → 8 13 → 5 13 → 2 13 → 0 | 0.1260 0.4777 0.6040 0.7859 1.5517 | 2.1 2.6 61.4 29.4 4.5 |
| 14 | 1.62020 | 3/2+ | 14 → 7 14 → 14 → 4 14 → 1 | 0.56348 0.79960 1.41609 1.62020 | 18 3 4 73 |

| | | | | | |
|----|---------|------|------------------|------------------|----------|
| 15 | 1.64510 | 7/2+ | 15 → 1 15 → 0 | 1.4410 1.6450 | 54 46 |
| 16 | 1.66660 | | | | |

Экспериментальных данных по сечению неупругого рассеяния нейтронов нет. Имеющиеся оценки интегрального сечения неупругого рассеяния показаны на рис. 8. Все оценки хорошо согласуются в области ниже 2МэВ, но имеются существенные различия при более высоких энергиях. В диапазоне от 2 до 10 МэВ оценка БРОНД-3 близка к оценке CENDL-3. Обе эти оценки кажутся предпочтительными.

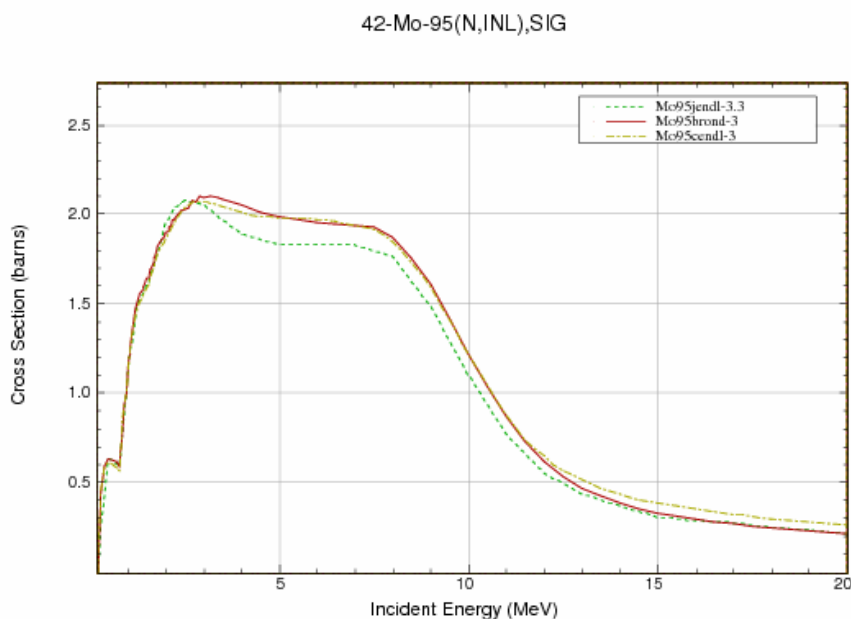


Рис.8. Полное сечение неупругого рассеяния на Мо-95.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

На рис. 9 представлено сечение радиационного захвата в области выше 100 кэВ. В области 2-100 кэВ оценки библиотек ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и BROND-3 совпадают.

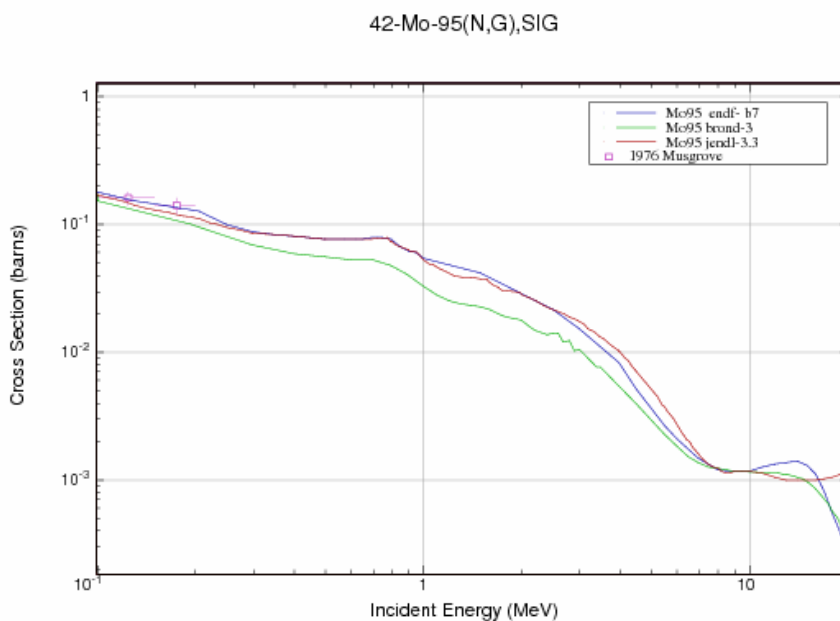


Рис. 9. Сечение радиационного захвата в области энергий 0.1-20 МэВ.

При энергиях нейтронов выше 100 кэВ данные библиотек ENDF-B7 и JENDL-3.3 близки, но оценка БРОНД-3 лежит заметно ниже. В области энергий выше 200 кэВ экспериментальных данных нет. Нет серьезных аргументов, чтобы отдать предпочтение какой-либо одной оценке.

3.5. Сечение реакции (n,2n), (n,3n)(MT=16, 17).

Оценки сечений реакции (n,2n) BROND-3 и JENDL-3.3 (рис. 10) различаются незначительно. Однако оценка БРОНД-3 предпочтительнее с точки зрения систематических тенденций в поведении функций возбуждения реакции (n,2n) /15/. Оценка ENDF-B7 противоречит систематике максимальных сечений указанной реакции и является ошибочной.

Сечение реакции (n,3n) показано на рис. 11. Оценка БРОНД-3 предпочтительнее, потому что она согласована с оценкой реакции (n,2n) из BROND-3. Сечение из ENDF-B7 лежит слишком низко.

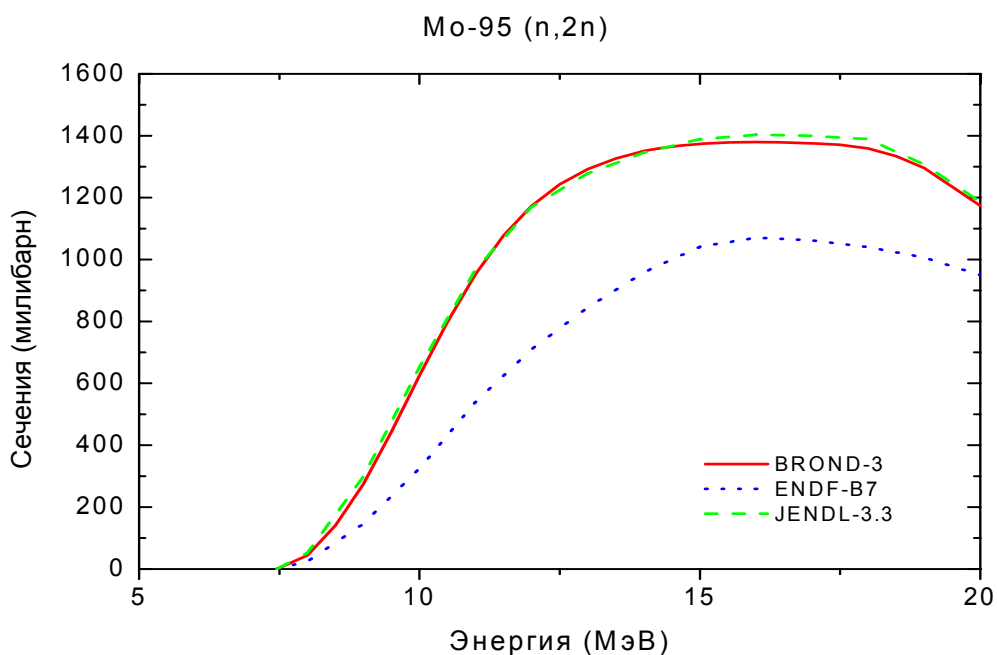


Рис. 10. Сечение реакции (n,2n).

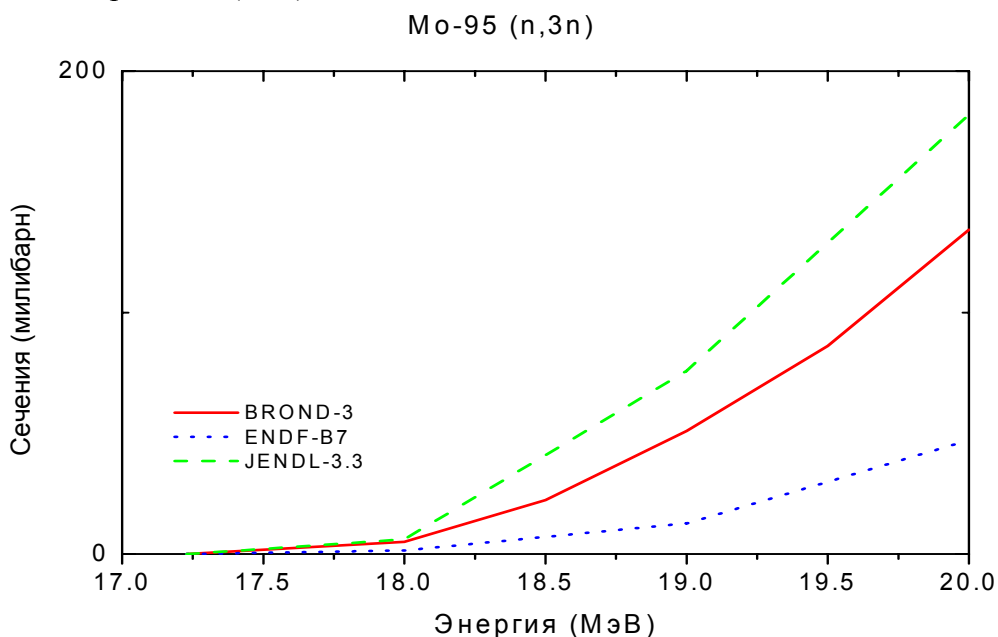


Рис. 11. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Сечение реакций (n,p),(n,d), (n,t), (n, α) (MT=103, 104,105,107).

На рис.12 представлены оценки сечений реакции $^{95}\text{Mo}(n,p)$ из БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII. Оценка BROND-3 лучше согласуется с экспериментальными данными и предсказаниями эмпирической систематики функций возбуждения указанной реакции. На рис. 13 представлено сечение реакции $^{95}\text{Mo}(n,d)$. Различия оценок сечений реакции (n,d) библиотек BROND-3 и JENDL-3.3 представляются не существенными. Оценка ENDF-B7 взята из библиотеки JENDL-3.3. Сечение реакции $^{95}\text{Mo}(n,t)$ в BROND-3 и ENDF-B7 взято из JENDL-3.3. По сечению реакции (n, α) (рис.14) экспериментальных данных нет. Однако с точки зрения эмпирической систематики функций возбуждения реакции (n, α) оценка BROND-3 предпочтительнее. Оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII не могут быть приняты из-за формы, противоречащей имеющимся теоретическим и эмпирическим представлениям.

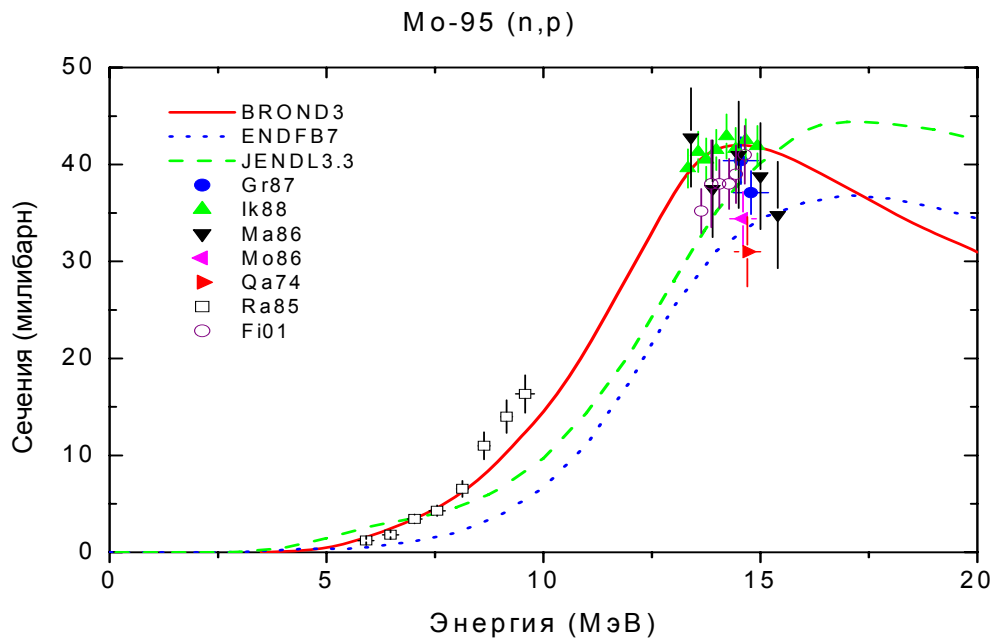


Рис. 12. Сечение реакции (n,p).

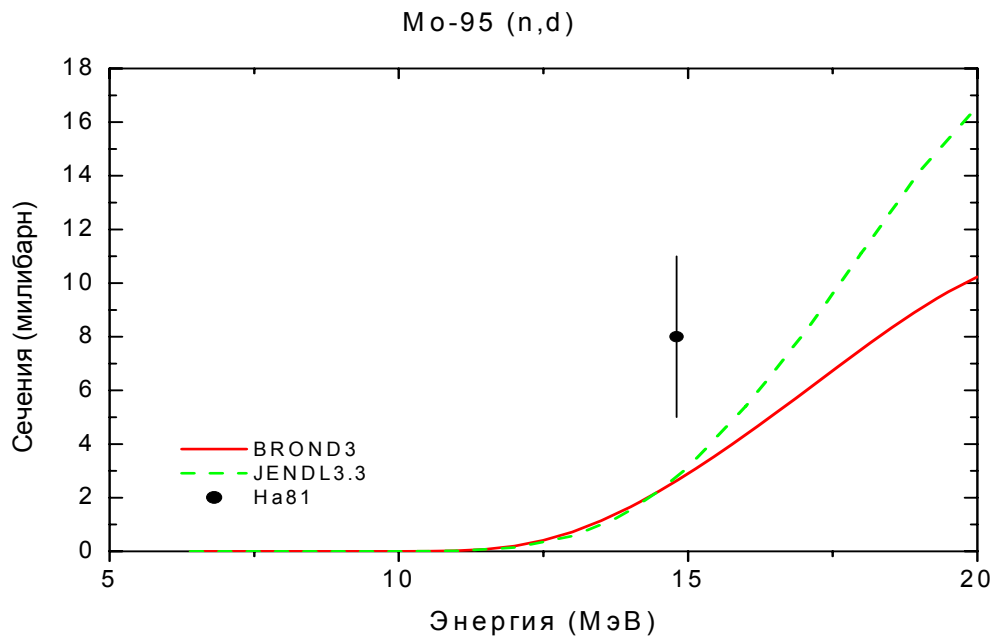


Рис. 13. Сечение реакции (n,d).

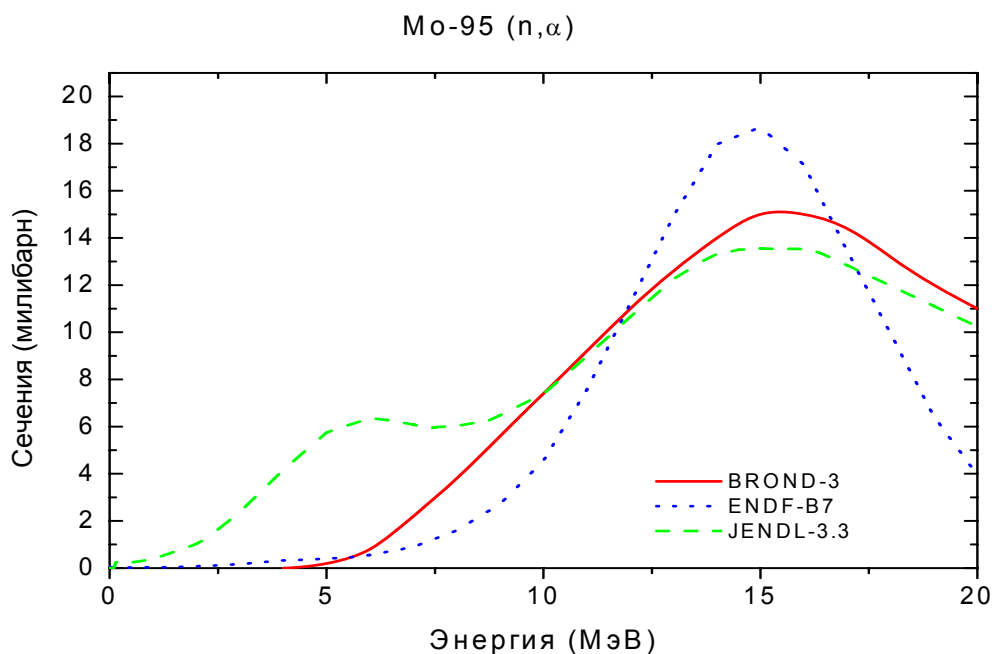


Рис. 14. Сечение реакции (n, α).

3.7. Сечение реакции (n,np), (n, $n\alpha$) (MT=28, 22).

На рис. 15 представлено сечение реакции $^{95}\text{Mo}(n,np)$. Зависимость из библиотеки BROND-3 лучше согласуется с эмпирической систематикой и с оценкой реакции (n,p) БРОНД-3. На рис. 16 представлено сечение реакции $^{95}\text{Mo}(n,n\alpha)$. Экспериментальных данных по реакции (n, $n\alpha$) нет. На рис. 8 приведены экспериментальные данные для реакции (n, α), которые являются суммой сечений реакций (n, α) и (n, $n\alpha$). Однако с точки зрения эмпирической систематики функций возбуждения реакции (n, $n\alpha$) лучше данные библиотеки BROND-3. Различия с оценкой JENDL-3.3 не являются существенными, но оценка ENDF-B7 лежит слишком высоко и не согласуется с оценкой реакции (n, α) из BROND-3, которая более предпочтительна (см. рис. 14).

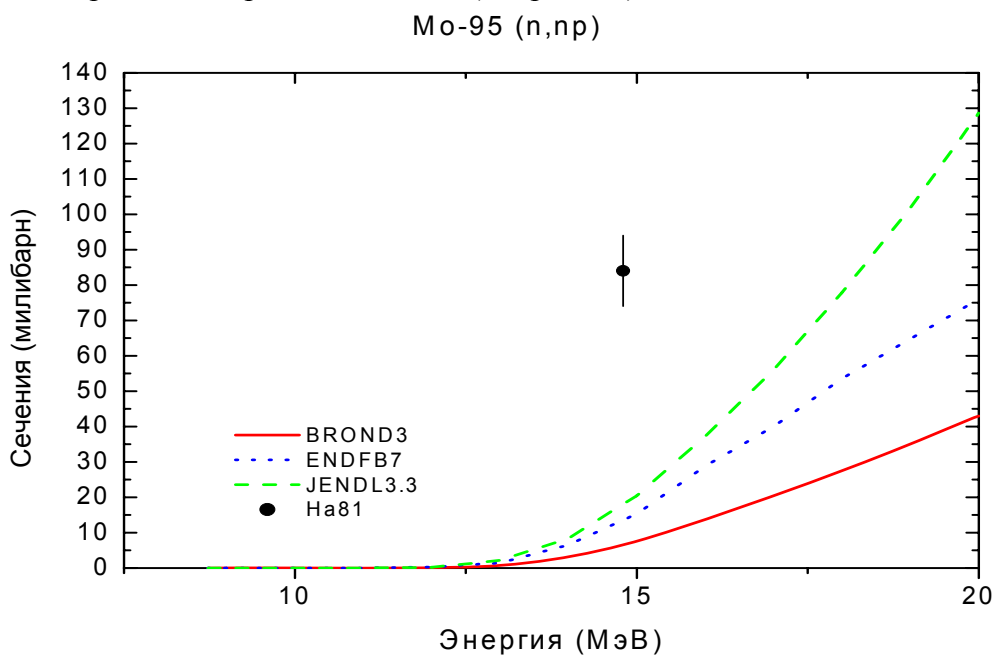


Рис. 15. Сечение реакции (n,np).

Mo-95 (n,n α)

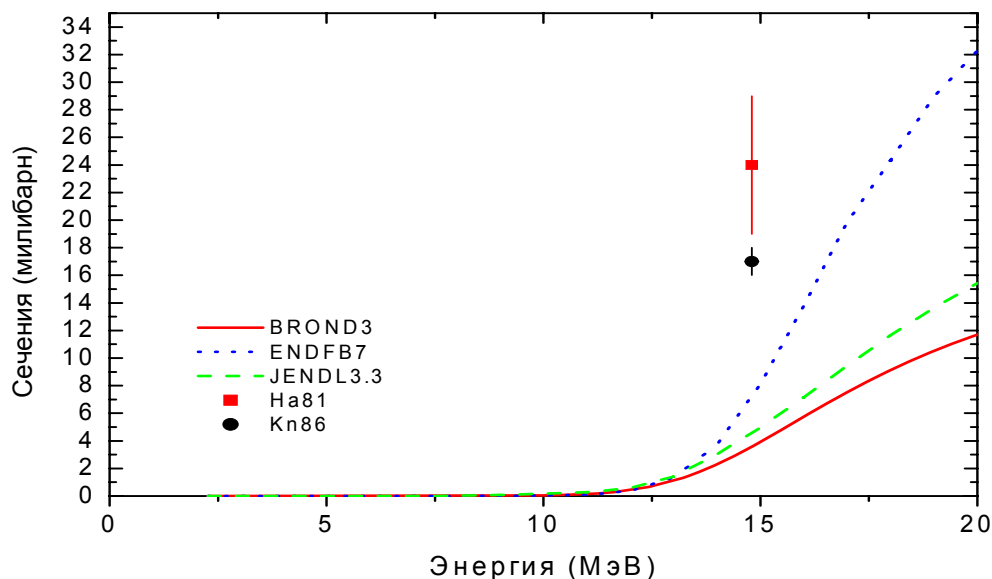


Рис. 16. Сечение реакции (n,n α).

4. Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4).

MF=4, MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе *Gasthy/6/*.

MT=51-65 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам *Gasthy /6/* и *Dwuck*.

5. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6).

6.

MT=16,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /18/.

7. Множественность образования гамма-лучей (MF=12).

8.

MT=51, 102 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH.

7. Сечения образования гамма-лучей (MF=13)

MT=3 Сечения образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитаны по программе GNASH.

8. Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

MT=3,51,102 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

9. Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=3 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, где они получены аппроксимацией с помощью эмпирической формулы работы /19/ экспериментальных данных работы /28/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе *Gasthy/6/*.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kikuchi, Y. et. al.: Report JAERI-M 86-030 (1986).
2. Shwe, H. and Cote, R.E. Phys. Rev., **179** (1969) 1148.
3. Weigmann, H. et. al.: Nuclear Data for Science and Technology (1971 Konoxville), 749(1971).
4. Musgrove, A.R. De L. et. al.: Nucl. Phys., A270, 108(1976).
5. Mughabghab, S.F. et. al.: "Neutron cross sections, vol.1, part A", Academic press(1981).
6. Igarasi, S. and Fukahori, T.: Report JAERI-1321(1991).
7. Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: in "Nuclear reaction data and nuclear reactors" (Triest, 1996). Eds. A. Gordini, G. Reffo., World science, Singapore, 1988, v.1, p.206.
8. Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8 (1970), p.281.
9. Konig, A.J., Dalaroche, J.P.: Contribution to 3-th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
10. Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
11. Avrigeanu, V., Hodgson, P.: Avrigeanu, M.: Phys. Rev. C49 (1994) 2136.
12. Dietrich, S.S., Berman, B.L.: Atomic Data and Nuclear Data tables. 538 (1988) 199.
13. Firestone, R.B.: Table of isotopes, eight edition, v.2, New York, 1995.
14. Smith, A.B.: Nucl. Phys. 244, 213 (1975).
15. Manokhin, V.N.: Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
16. Manokhin, V.N., Blokhin, A.I.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, p.871 (1997).
17. S.F. Mughabghab: Atlas of Neutron Resonances, to published by Academic Press, 2005 (5-th edition of BNL-325).
18. Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
19. Howerton, S.T. and Plechaty, E.F.: Nucl. Sci. Eng., 32, 178 (1968).
20. Kapchigashev, S.P. 64Dubna, 104, 1964.
21. A. Smith, A. J. Phys., G26 (2000) 1467.
22. Allen, B.J. et al. Nucl. Sci. Eng., 82, 230 (1982).
23. Wynchank, S. et al., Phys. Rev., **166** (1968) 1234
24. Soo-Youl Oh, J. Chang, S. Mughabghab, Report ENDF-362, 2000.
25. Mughabghab, S.F., Dunford, C.L., Proc. Int. Conf. on Nucl. Sci. and Techn., p.784, Long Island, (1998),
26. Hofman, H. ET et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
27. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
28. Morgan, G. and Newman, N.: ORNL-TM-5097 (1975).

8. Перечень использованных экспериментальных работ

Полное сечение

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|-----------|----------------|-------------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| Pa80 | M.V. Pasechnik | C, 80Kiev, 1,304, 1980 | 40617 | 4.58+05 | 3.12+06 | 54 |
| Di68 | M. Divadeenam | J, DA/B, 28, 3834, 1968 | 10523 | 1.30+05 | 6.40+05 | 103 |

Сечение радиационного захвата

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|-----------|-------------------|-------------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| Mu76 | A.R. Del Musgrove | J, NP/A, 270, 108, 1976 | 30357 | 3.0+03 | 2.0+05 | 15 |
| Ka64 | S.P. Kapchigashev | C, 64Dubna, 104, 1964 | 41233 | 3.25+01 | 4.60+04 | 47 |

Сечение реакции (n,p)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|------------|----------------|------------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| | | | | | | |
| Filat01 | A.A.Filatenkov | J,YK-2(1998)10 | 41240 | 1.3+06 | 1.5+06 | 7 |
| Ikeda88 | Y.Ikeda | R,JAERI-1312(1988) | 22089 | 1.3+07 | 1.5+07 | 7 |
| Gr87 | Greenwood | J, PR/A, 35, 76,1987 | 12976 | 1.46+07 | 1.48+07 | 2 |
| Molla86 | N.I.Molla | | 30825 | 1.4+07 | 1.5+07 | 5 |
| Marcinko86 | A.Marcinkowski | J, ZP/A, 223, 91, 1986 | 30809 | 1.3+07 | 1.7+07 | 8 |
| Rahman85 | M.Rahman | J,NP/A,435(1985)43 | 21990 | 5.9+06 | 9.6+06 | 8 |
| Qaim 74 | S.Qaim | C,77Geel,327(1977) | 20513 | 1.5+07 | | 1 |

Сечение реакции (n,np).

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|-----------|------------|------------------------|---------|----------------------|--|-------------|
| | | | | | | |
| Haight81 | R.C.Haight | J, PR/C, 23, 700, 1981 | 10960 | 1.48+07 | | 1 |

Сечение реакции (n,n α).

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|-----------|------------|------------------------|---------|----------------------|--|-------------|
| | | | | | | |
| Haight81 | R.C.Haight | J, PR/C, 23, 700, 1981 | 10960 | 1.48+07 | | 1 |
| Kneff86 | D.W.Kneff | J, NSE, 92, 491, 1986 | 10933 | 1.48+07 | | 1 |

Сечение реакции (n,d).

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|-----------|------------|------------------------|---------|----------------------|--|-------------|
| | | | | | | |
| Haight81 | R.C.Haight | J, PR/C, 23, 700, 1981 | 10960 | 1.48+07 | | 1 |

9. Заключение

7.1 Вывод На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка **БРОНД-3** является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка ENDF/B-VI. Оценка JENDL-3.3 принята для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3. Целесообразно включить файла БРОНД-3 для Мо-95 в библиотеку Росфонд-2005.

7.2. Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

42.5 Молибден-96

Содержание в естественной смеси 16.68%

1. Общие характеристики

1.1. $Z=42$

1.2. $A=96$

1.3. $A_w=95.08080$

1.4. Перечень нейтронных реакций с порогами ниже 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт |
|-----|--------------|----------|---------------------------|--------------|
| 04 | n, n' | -0.7782 | 0.7864 | Mo-96 |
| 16 | $n, 2n$ | -9.1543 | 9.2506 | Mo-95 |
| 17 | $n, 3n$ | -16.5233 | 16.6883 | Mo-94 |
| 22 | $n, n\alpha$ | -2.7639 | 2.7830 | Zr-92 |
| 28 | n, np | -9.2966 | 9.3944 | Nb-95 |
| 102 | n, γ | 6.8210 | | Mo-96 |
| 103 | n, p | -2.4044 | 2.4297 | Nb-96 |
| 104 | n, d | -6.9919 | 7.0655 | Nb-95 |
| 105 | n, t | -9.3023 | 9.4001 | Nb-94 |
| 107 | n, α | 3.9760 | | Zr-93 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.4 Область разрешенных резонансов.

В настоящее время оценка JENDL-3.3 для разрешенных и неразрешенных резонансов включена в оценки JEFF-3.0(=JEFF-3.1), CENDL-3 и последнюю версию ENDF/B-VII. Так как нет экспериментальных данных, указывающих на недостатки этой оценки, то она включена также в оценку БРОНД-3.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Кикучи /1/ на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию /2/ и радиационному захвату нейтронов /3, 4/. Эти параметры лишь незначительно отличаются от параметров, рекомендованных на Мугабгхабом и др. /5/. Были приняты средние радиационные ширины 0.114 эВ для s-резонансов и 0.136 для p-резонансов. Верхняя граница резонансной области принята равной 19 кэВ, радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 7.0$ фм /5/ и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближение MLBW.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) равны:

полное = 5.322 б, упругое = 4.727 б, захвата = 0.595 б,
резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: = 17.3 б.

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 1 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценку JENDL-3.3, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_{\text{OBS}} = (1.01 \pm .12)$ кэВ, и для p-резонансов - $D_1 = (.36 \pm .03)$ кэВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (.53 \pm 0.08) 10^{-4}$ и $S_1 = (7.1 \pm 1.0) 10^{-4}$.

Чтобы получить оптимальную оценку пропускания резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов часто привлекают анализ соответствия параметров резонансов распределению нейтронных ширин Портер-Томаса. Результаты такого анализа представлены на рис. 2. Данный анализ показывает, что в наблюдаемом наборе s-резонансов, по-видимому, пропущено около 3-4 резонанса и в наборе p-резонансов содержится 17-20 слабых резонансов, которые следовало бы отнести к d-волне. Такие слабые резонансы не искажают приведенный выше анализ нейтронных силовых функций, но их учет существенен для оценки среднего расстояния между резонансами.

2.3. Область неразрешенных резонансов.

Для области неразрешенных резонансов все последние оценки, CENDL-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII, заимствуют оценку JENDL-3.3. Верхняя граница области неразрешенных резонансов в JENDL-3.3 принята равной 100 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера.

Нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [91I]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ.

Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.370E-4$, $S_1 = 5.480E-4$, $S_2 = 0.364E-4$, $G_g = 0.162$ эВ, $D_0 = 93.33$ эВ, $R = 6.698$ фм.

На рис. 3 и 4 оценки JENDL-3.3 для области разрешенных и неразрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Экспериментальные данные по полным нейтронным сечениям имеются при энергиях выше 100 кэВ (см. следующий раздел), эти данные хорошо согласуются с экстраполяцией энергетической зависимости оценки JENDL-3.3. В диапазоне энергий от 100 эВ до 30 кэВ данные по сечениям радиационного захвата нейтронов измерены в работе [64K], а в диапазоне энергий от 4 до 100 кэВ также в работе [76M], и при соответствующем усреднении резонансов оценка воспроизводит эти данные.

На основе проведенного анализа было принято решение, что, несмотря на отмеченные выше погрешности анализа резонансов, **для области разрешенных и неразрешенных резонансов целесообразно включить в БРОНД-3 оценку JENDL-3.3.** При отсутствии новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений в области резонансных нейтронов.

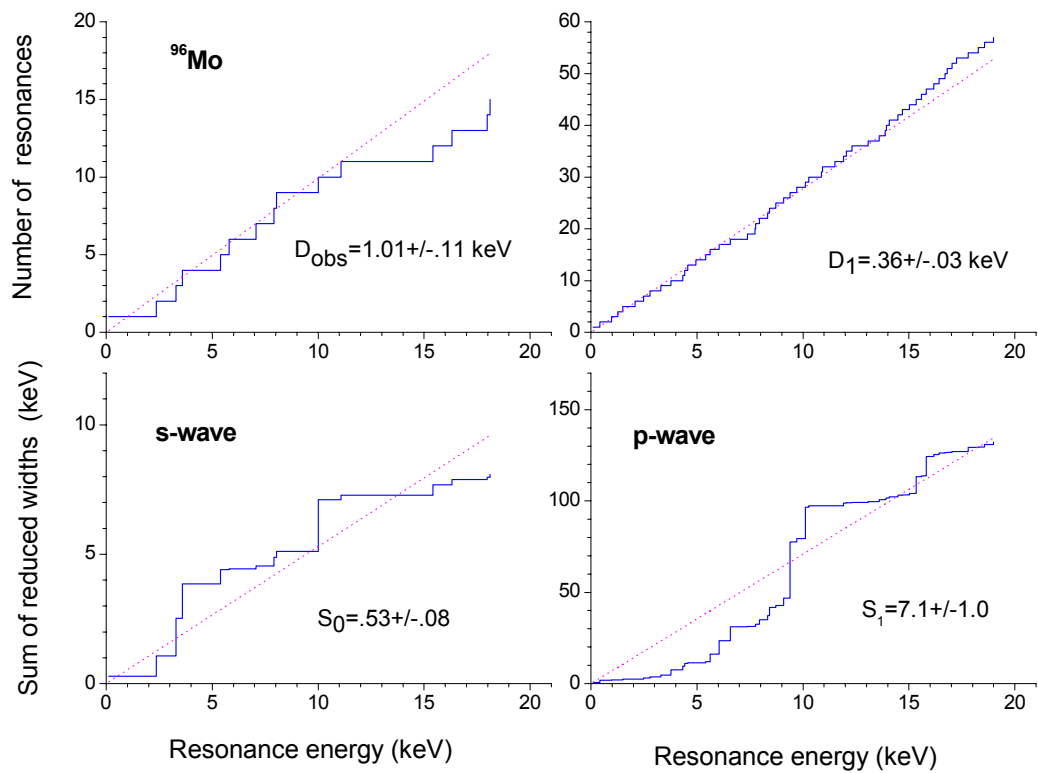


Рис. 1. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин s- и p-резонансов

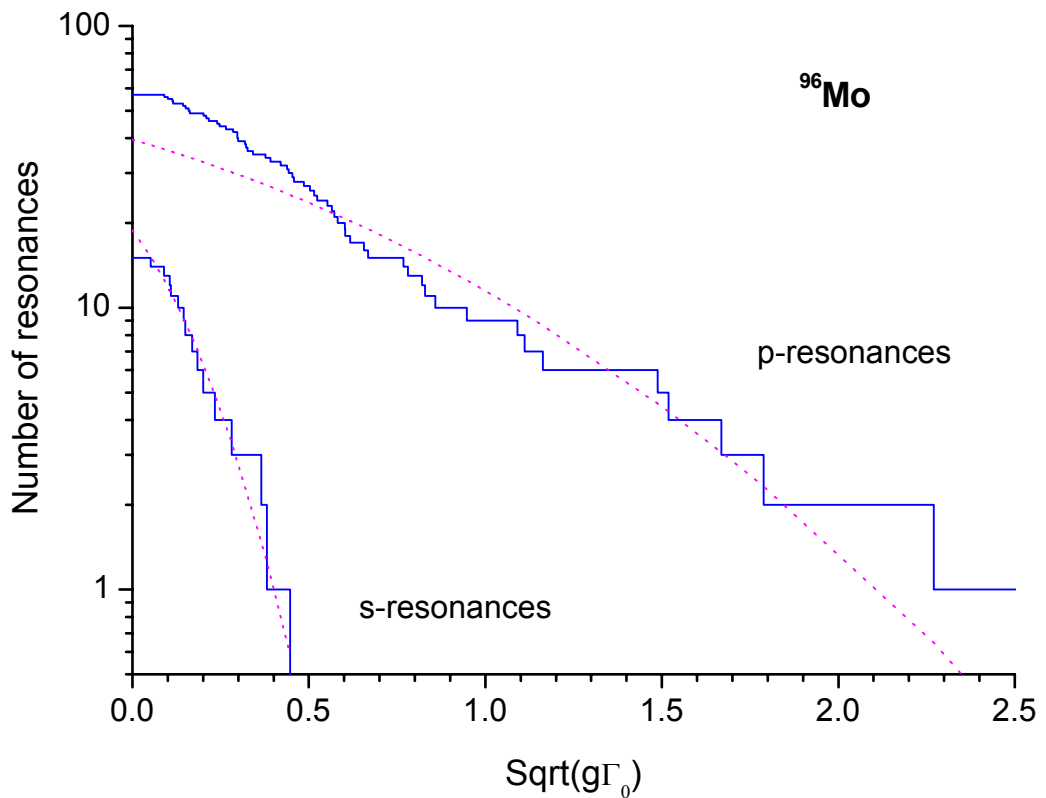


Рис. 2. Анализ пропуска s- и p-резонансов

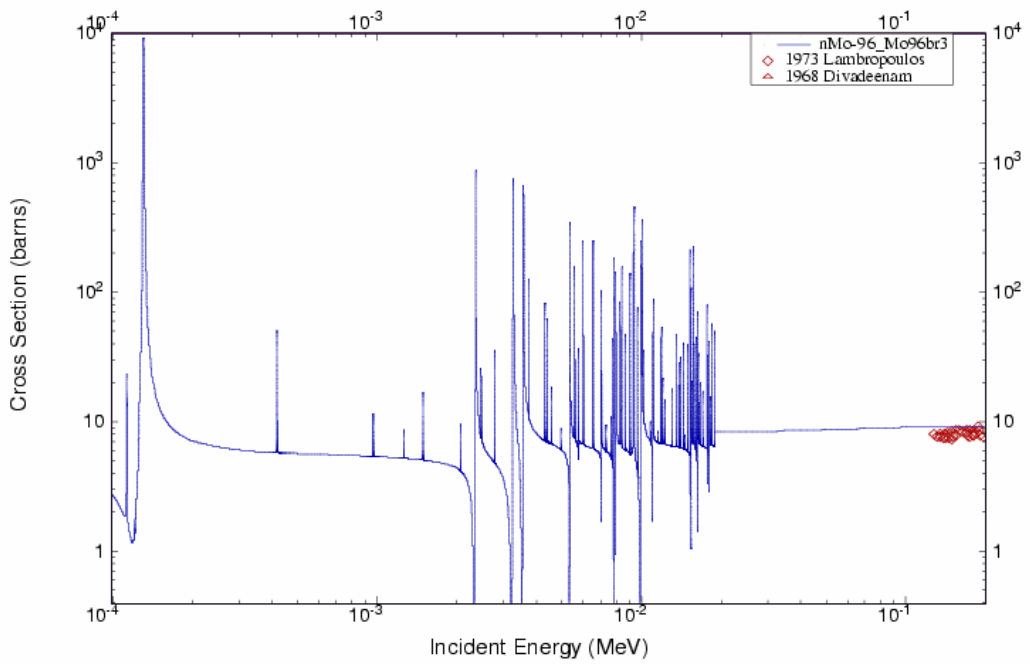


Рис. 3. Оценка полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными вне резонансной области

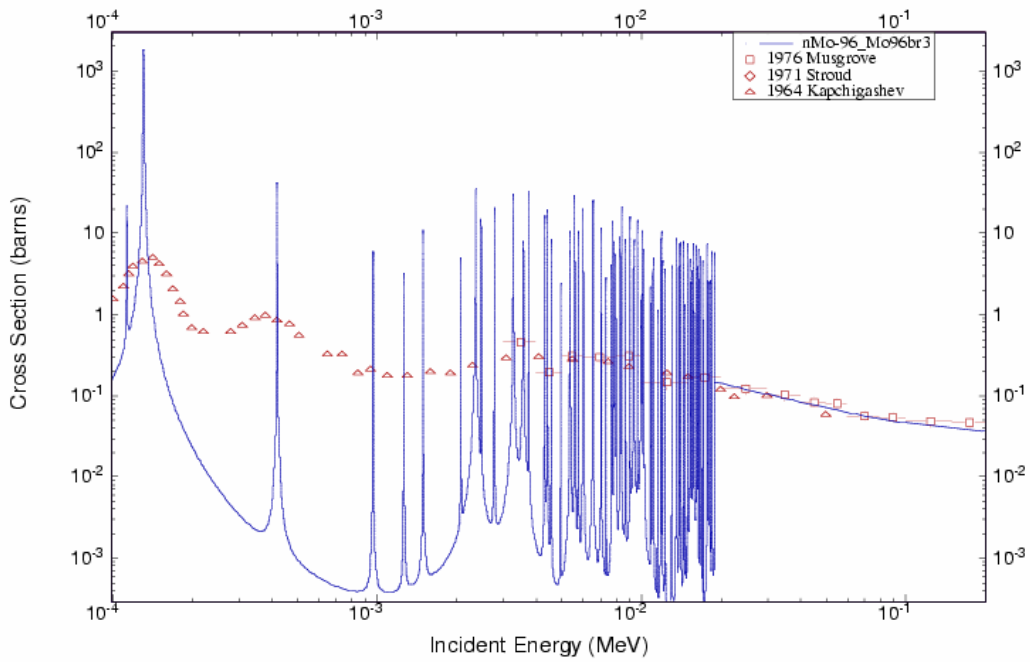


Рис. 4. Оценка сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области (MF=3).

Предварительно авторами оценки БРОНД-3 был исследован и оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния. Поскольку сечение реакции $(n,2n)$ достаточно хорошо известно из экспериментальных данных и основанной на них эмпирической систематики, теоретические расчеты сечений неупругого рассеяния проводились таким образом, чтобы получить согласованное описание функции возбуждения реакции $(n,2n)$ и оцененного вклада прямых процессов в области 20 МэВ. Полученные результаты по

функциям возбуждения других пороговых реакций корректировались на основе предсказаний эмпирических систематик.

Оцененные данные функции возбуждения неупругого рассеяния для одного изотопа сравнивались с данными для других изотопов данного элемента и изотопов соседних ядер, чтобы получить согласованное описание сечений для всех изотопов молибдена с учетом эмпирической тенденции изменения максимального сечения реакции неупругого рассеяния в зависимости от атомного номера и атомного веса изотопа.

Полученные результаты сравнивались данными библиотек ENDF/B-VI, JENDL-3.3 и JEFF-3.1. Поскольку в библиотеке JEFF-3.1 для изотопов молибдена приняты данные библиотеки JENDL-3.3, сравнение производилось главным образом с данными библиотеки JENDL-3.3. В библиотеке ENDF-B7 в большинстве случаев также приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Поэтому сравнение с ENDF/B-VII проводилось только тех реакций, данные для которых отличаются от данных JENDL-3.3.

Нейтронные сечения в БРОНД-3 в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH /7/, модифицированной с учетом флюктуаций нейтронных ширин на основе подхода работы /26/. Нейтронные коэффициенты проницаемости рассчитаны по модели сильной связи каналов (программа ECIS /8/) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней 2+ и 3-. Параметры оптического потенциала были взяты из работы /9/, но глубина мнимой части потенциала была несколько занижена, чтобы добиться оптимального описания полных нейтронных сечений при энергиях ниже 3 МэВ.

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /9/, /10/ и /11/, соответственно.

В расчетах радиационных ширин рассматривались E1, M2 и E2 –гамма-переходы. Для силовых функций гамма-переходов использованы параметры, рекомендованные в RIPL-2 /27/. Полная силовая функция нормировалась на величину, соответствующую рассмотренным выше данным о радиационной ширине и плотности нейтронных резонансов. Параметры дискретных уровней для различных каналов распада, обычно, принимались на основе таблиц /13/ и рекомендаций RIPL-2 /27/.

3.1. Полное нейтронное сечение ($MT=1$).

Полные нейтронные сечения в резонансной области энергий в библиотеках BROND-3, JENDL-3.3 и ENDF-B7 рассчитаны по одним и тем же резонансным параметрам /5/ и полностью совпадают. В области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ сечения были получены расчетом по оптической модели с учетом экспериментальных данных. Значительный разброс экспериментальных данных не позволяет отдать предпочтение какой-либо одной оценке.

42-Mo-96(N,TOT),SIG

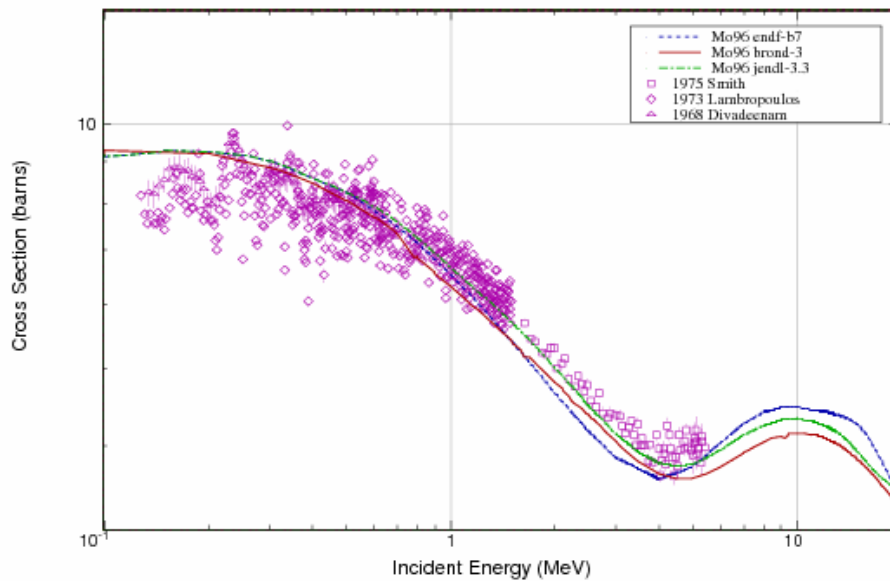


Рис.5. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис.6 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния с экспериментальными данными.

Сечение упругого рассеяния на изотопе Mo-96 в библиотеках ENDF-B7, JENDL-3.3 и BROND-3 близки, в области энергий 100-300 кэВ данные BROND-3 лежат несколько выше, что связано с более высоким сечением в этой области полного сечения (см. рис.5).

В области энергий 0.1-1 МэВ оценки практически совпадают. Заметные различия выше 1 МэВ не дают серьезных оснований отдать предпочтение какой-либо одной оценке.

42-Mo-96(N,EL),SIG

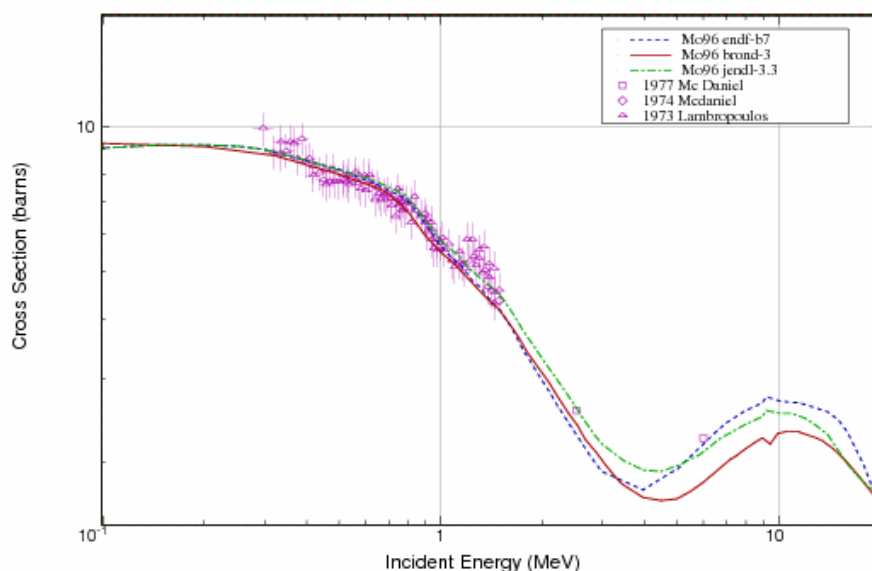


Рис. 6. Сечение упругого рассеяния в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-67).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 2.5945 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

| N | Энергия уровня, МэВ | Спин | Переход | Энергия гамма-кванта, МэВ | Вероятность перехода, % |
|----|---------------------|------|--|--|---|
| 0 | 0.00000 | | | | |
| 1 | 0.77820 | 2+ | 1 → 0 | 0.77822 | 100 |
| 2 | 1.14790 | 0+ | 2 → 1 | 0.36967 | 100 |
| 3 | 1.49770 | 2+ | 3 → 1 3 → 0 | 0.71956 1.49781 | 71.1 28.9 |
| 4 | 1.62590 | 2+ | 4 → 3 4 → 1 4 → 0 | 0.1280 0.84769 1.62590 | 10.0 91.6 7.4 |
| 5 | 1.62810 | 4+ | 5 → 1 | 0.84993 | 100 |
| 6 | 1.86950 | 4+ | 6 → 5 6 → 3 6 → 1 | 0.24138 0.37181 1.09135 | 7.3 4.9 87.8 |
| 7 | 1.97840 | 3+ | 7 → 6 7 → 5 7 → 4 7 → 3 7 → 1 | 0.10895 0.35005 0.35256 0.48071 1.20023 | 0.1 3.9 3.3 22.1 70.6 |
| 8 | 2.09560 | 2+ | 8 → 2 8 → 1 | 0.9478 1.31733 | 3.7 96.3 |
| 9 | 2.21930 | 4+ | 9 → 7 9 → 6 9 → 5 9 → 4 9 → 3 9 → 1 | 0.24120 0.35005 0.59124 0.59325 0.72163 1.44113 | 19.5 18.6 27.4 12.3 21.1 1.1 |
| 10 | 2.23450 | 3- | 10 → 6 10 → 4 10 → 3 10 → 1 | 0.36490 0.60867 0.73686 1.45620 | 4.4 46.1 44.7 4.7 |
| 11 | 2.42610 | 2+ | 11 → 4 11 → 3 11 → 1 | 0.80036 0.92840 1.64760 | 36.1 4.6 59.3 |
| 12 | 2.43840 | 5+ | 12 → 9 12 → 7 12 → 6 12 → 5 | 0.21898 0.45988 0.56880 0.81080 | 3.7 28.6 57.5 10.2 |
| 13 | 2.44060 | 6+ | 13 → 5 | 0.81258 | 100 |

| | | | | | |
|----|---------|----|--|---|------------------------------|
| 14 | 2.48100 | 2+ | 14 → 6 14 → 5 14 → 3 14 → 1 | 0.61140 0.85303 0.98310 1.70280 | 13.4 53.4 8.1 25.1 |
| 15 | 2.50150 | 1+ | 15 → 3 15 → 2 15 → 1 | 1.0036 1.3537 1.7237 | 15.9 53.9 30.2 |
| 16 | 2.54040 | 3+ | 16 → 4 16 → 3 16 → 1 | 0.9146 1.0427 1.7618 | 8.9 25.1 66.0 |
| 17 | 2.59430 | 3+ | 17 → 9 17 → 7 17 → 5 17 → 4 17 → 3 17 → 1 | 0.3749 0.61590 0.9664 0.9685 1.09658 1.81560 | 16.7 22.3 24.6 14.2 |
| 18 | 2.59450 | | | | |

На рис. 7 показаны функции возбуждения интегрального сечения неупругого рассеяния из библиотек BROND-3 и JENDL-3.3. Функция возбуждения в библиотеке ENDF-B7 взята из JENDL-3.3. Экспериментальные данные по интегральному сечению неупругого рассеяния нейтронов отсутствуют. Данные BROND-3 в области энергий нейтронов ниже 2 МэВ согласуются с данными указанных библиотек, но при более высоких энергиях они лежат выше. Учитывая, что при расчетах сечений в BROND-3 была применена несферическая оптическая модель и улучшенные параметры, зависимость из библиотеки BROND-3 предпочтительнее.

На рис. 8-9 показаны функции возбуждения неупругого рассеяния на первом уровне Mo-96 в сравнении с экспериментальными данными. Как видно, оценки JENDL-3.3 и BROND-3 практически совпадают. На Рис.9 представлено сечение неупругого рассеяния на втором уровне. В области до энергии 3 МэВ оценки также совпадают, выше энергии 3 МэВ оценка BROND-3 предпочтительнее. На Рис.10 показано сечение на третьем уровне.

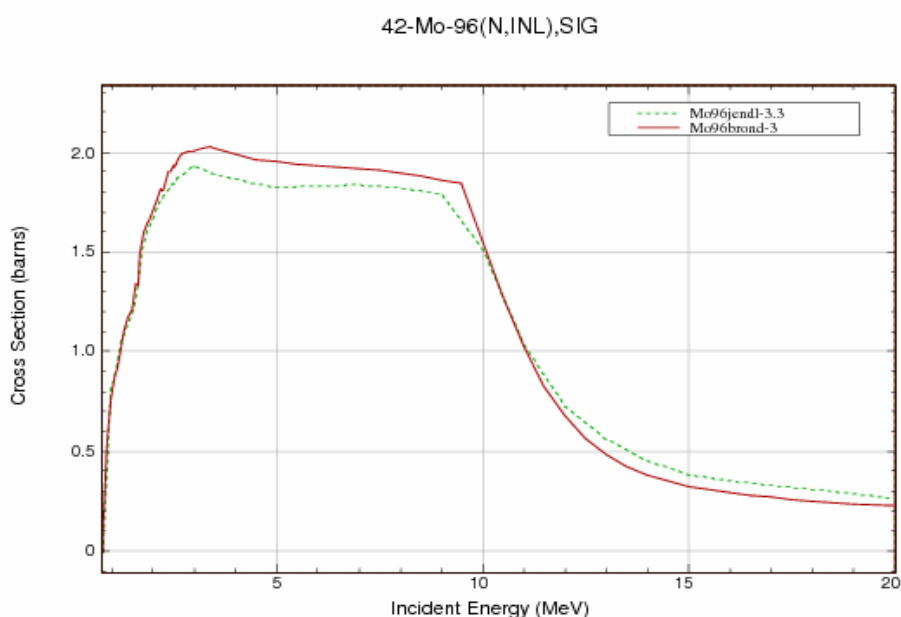


Рис. 7. Полное сечение неупругого рассеяния нейтронов.

42-Mo-96(n,n'),SIG E17.80E+5

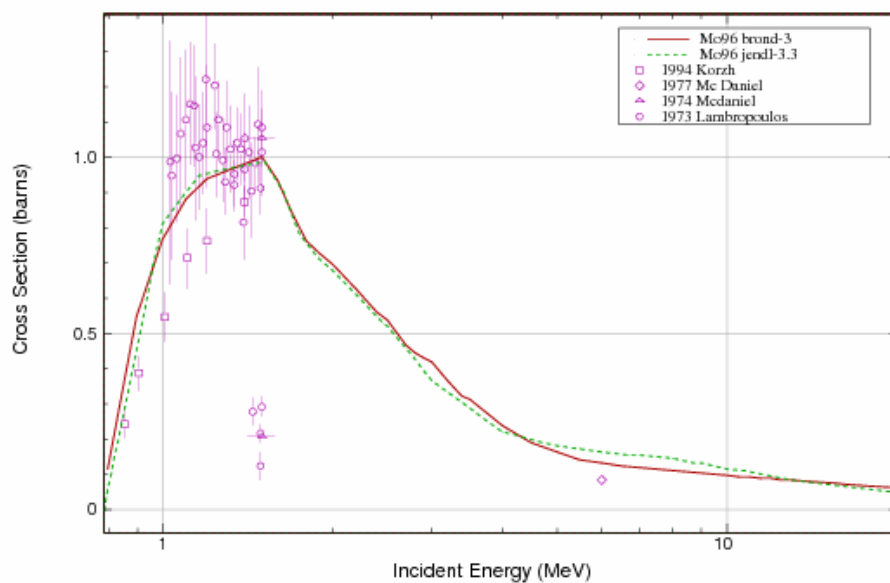


Рис.8. Сечение неупругого рассеяния нейтронов на первом уровне.

42-Mo-96(n,n'),SIG E17.80E+5

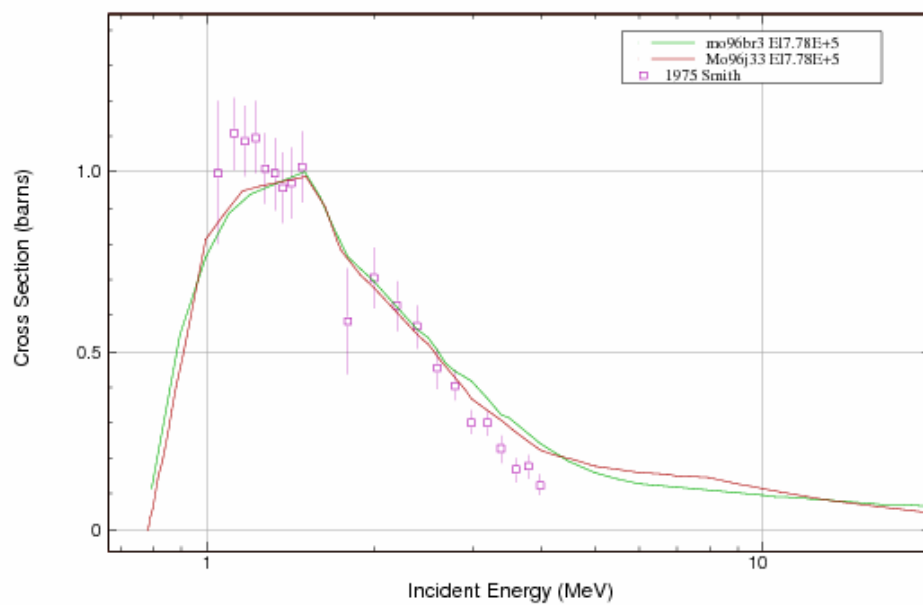


Рис.9. Сечение неупругого рассеяния нейтронов на первом уровне.

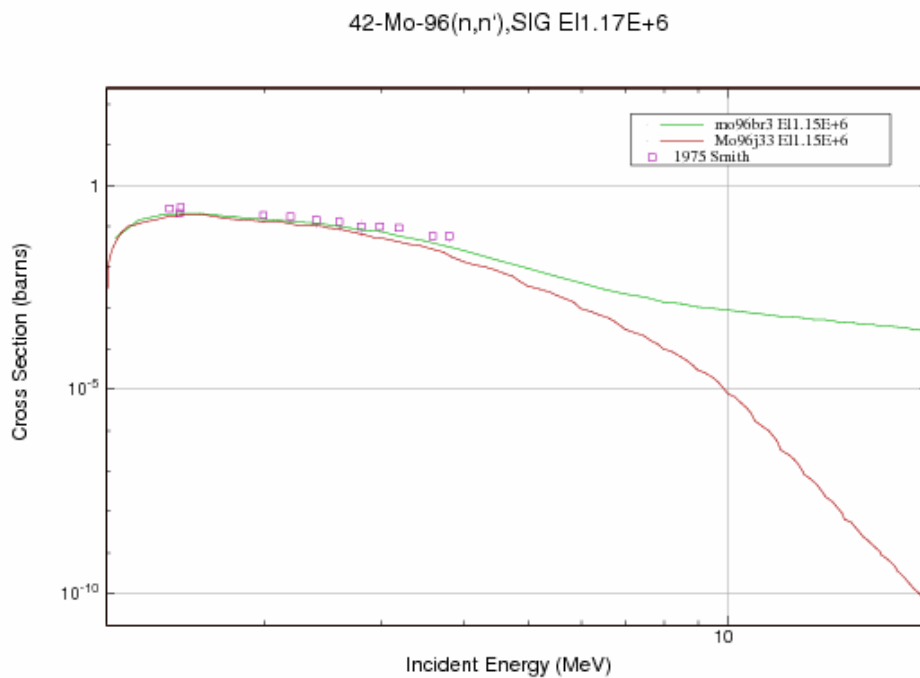


Рис. 10. Сечение неупругого рассеяния нейтронов на втором уровне.

3.4. Сечение реакции радиационного захвата (MT=102).

На Рис. 11 показано сечение радиационного захвата в нерезонансной области энергий нейтронов. В области до 200 кэВ оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 совпадают, но выше 200 кэВ имеются существенные различия, однако в отсутствии экспериментальных данных трудно отдать предпочтение какой-либо одной зависимости. Данные в ENDF-B7 взяты из JENDL-3.3.

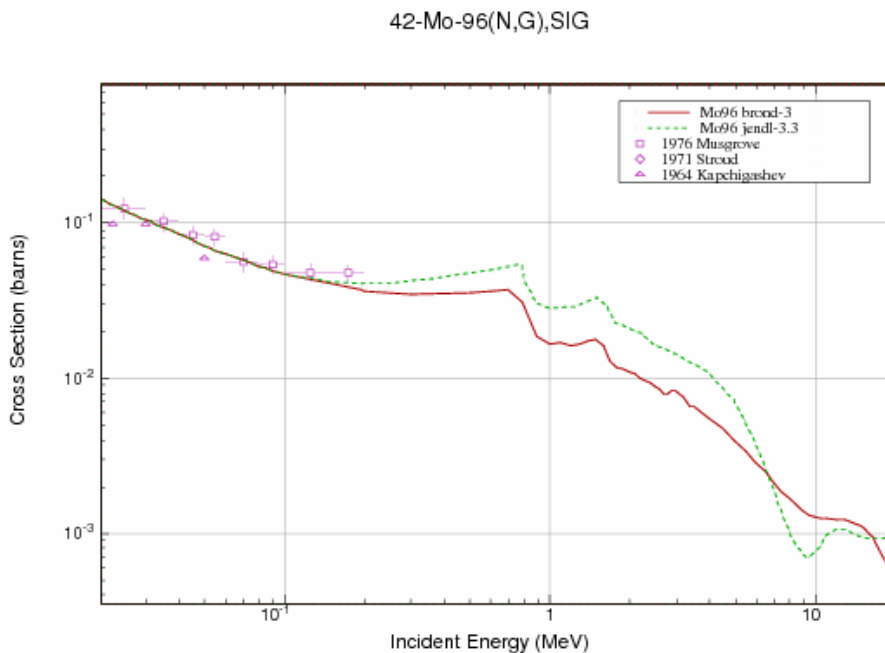


Рис. 11. Сечение радиационного захвата в области энергий нейтронов 0.019-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции $(n,2n)(n,3n)$ (MT=16, 17).

На рис. 12 показаны теоретические оценки сечений реакции $(n,2n)$ библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения этой реакции в ENDF-B7 взяты из JENDL-3.3. Данные BROND-3 и JENDL-3.3 различаются, но обе оценки по форме и абсолютной величине согласуются с эмпирической систематикой и выглядят равноценными.

Экспериментальных данных по сечению реакции $(n,3n)$ нет (рис. 13). Оценка библиотеки ENDF-B7 также принята из JENDL-3.3. Различия в данных BROND-3 и JENDL-3.3 не являются существенными, обе оценки равноценны.

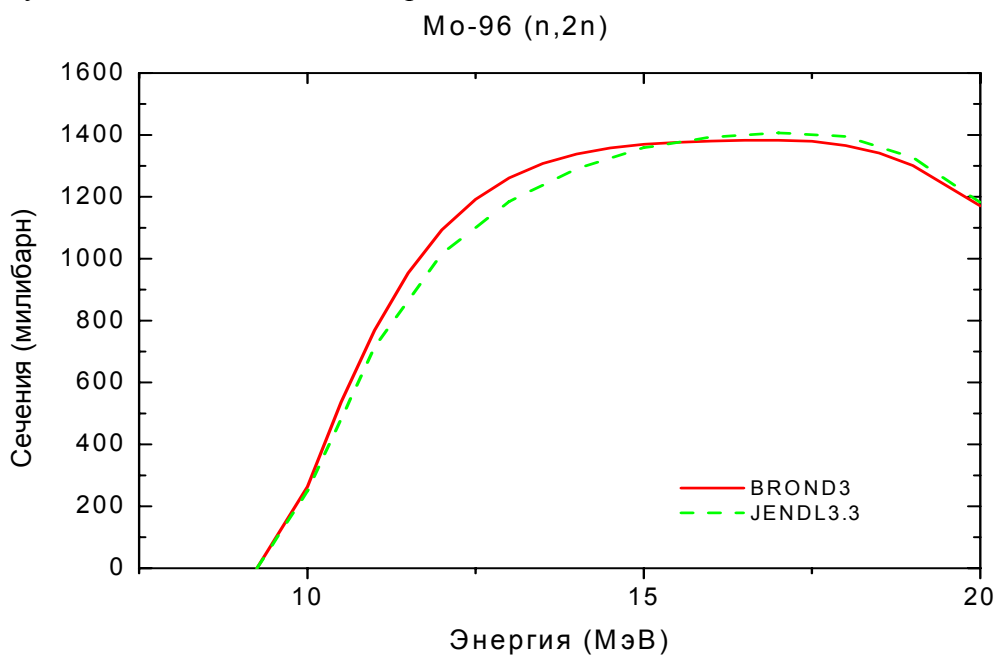


Рис. 12. Сечение реакции $(n,2n)$.

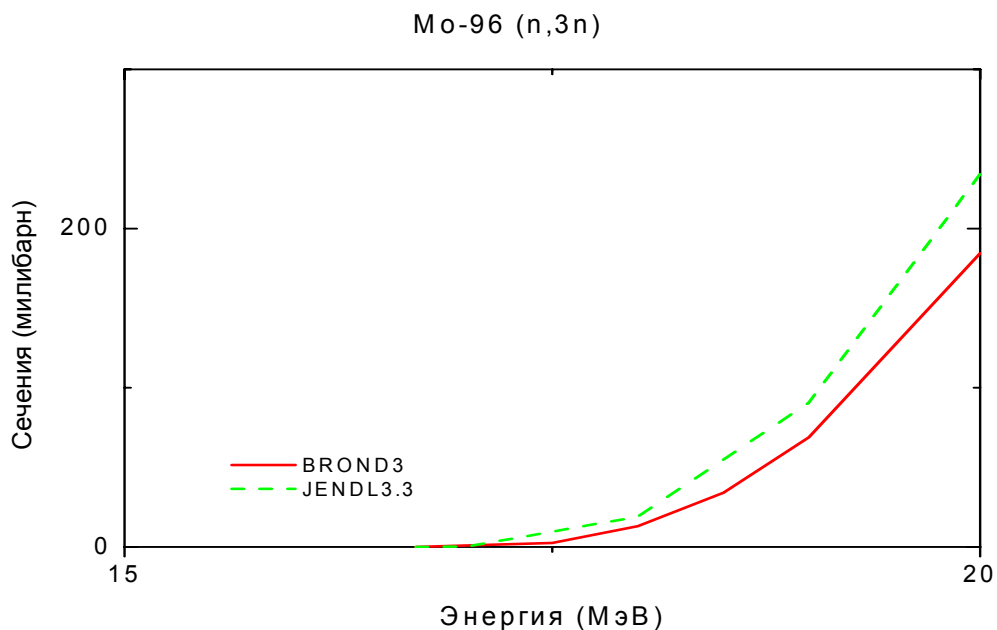


Рис. 13. Сечение реакции $(n,3n)$.

3.6. Сечение реакции (n,p),(n,d), (n,t), (n, α)(MT=103,104,105,107).

Сечение реакции (n,p) в ENDF-B7 принято из JENDL-3.3. Расхождения в сечениях реакции (n,p) библиотек BROND-3 и JENDL-3.3 незначительны (см. рис.14), сечение в обоих случаях соответствует экспериментальным данным.

На рис. 15 показано сечение реакции (n,d). Сечение реакции из библиотеки BROND-3 предпочтительнее, поскольку при его расчете более корректно учтен вклад прямых процессов.

Сечение реакции (n,t) в библиотеках БРОНД-3 и ENDF-B7 принято из JENDL-3.3

На рис. 16 представлено сечение реакции (n,a). Экспериментальных данных нет. Рассчитанная по теории ядерных реакций функция возбуждения реакции (n,a) из библиотек BROND-3 по форме и абсолютной величине в максимуме сечения лучше согласуется с эмпирической систематикой /15/.

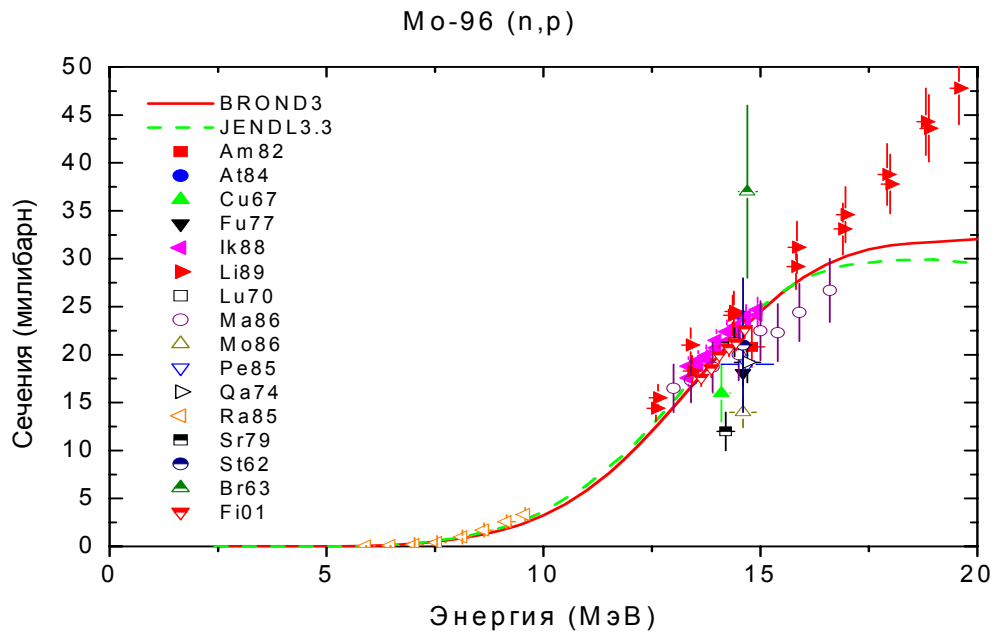


Рис. 14. Сечение реакции (n,p).

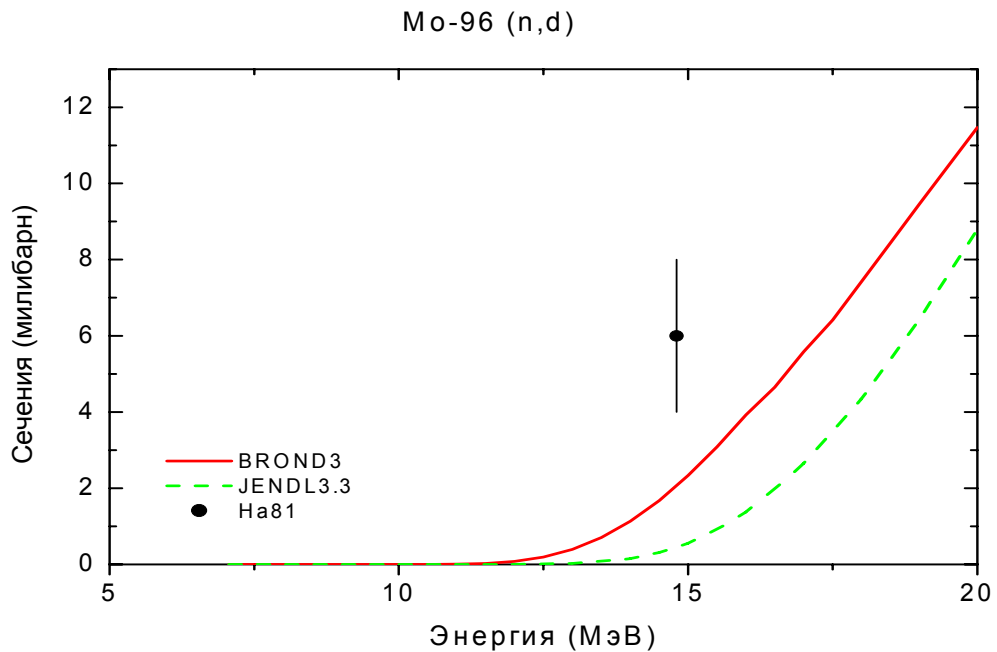


Рис.15. Сечение реакции (n,d).

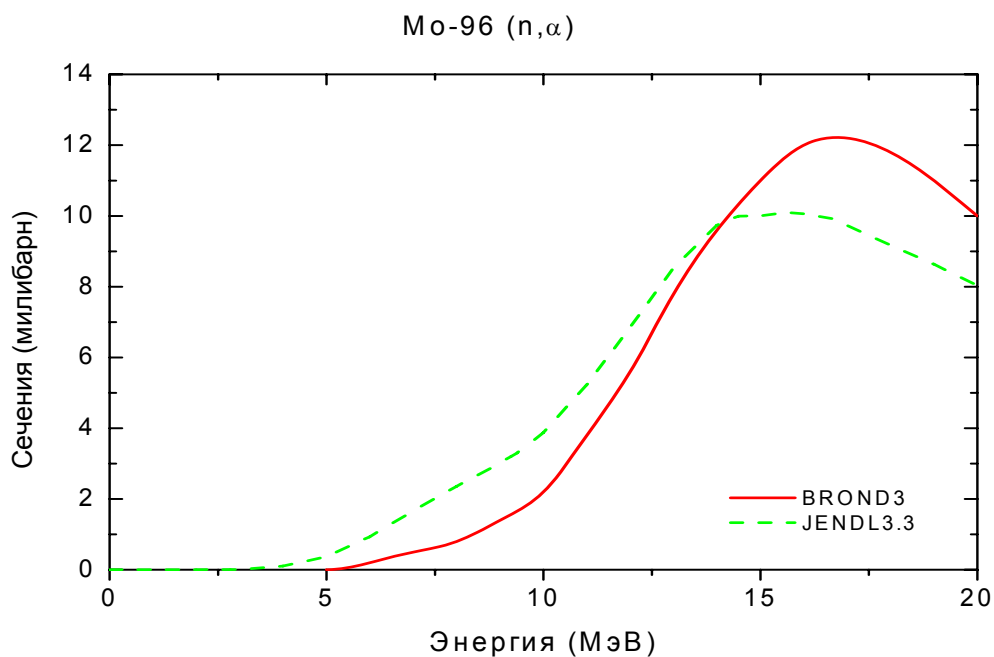


Рис.16. Сечение реакции (n, α).

3.7. Сечение реакции (n,np),(n, α) (MT=28, 22).

На рис. 17 и 18 показаны функции возбуждения реакций (n,np) и (n, α). Экспериментальных данных нет, поэтому критерием отбора является согласованность сечений этих с сечениями реакций (n,p) и (n, α),соответственно. Функция возбуждения реакции (n,np) из BROND-3 лучше согласуется с сечением реакции (n,p) и с систематикой сечений реакции (n,xp).

Сечения реакции (n, α) библиотеки ENDF-B7 взяты из JENDL-3.3. Данные BROND-3 отличаются незначительно, и поэтому может быть рекомендована любая из трех оценок. Экспериментальные точки на рис. 18 представляют собой сумму сечений реакций (n, α) и (n,np). Сумма оцененных сечений этих реакций из БРОНД-3 и JENDL-3.3 согласуется с нижней экспериментальной точкой.

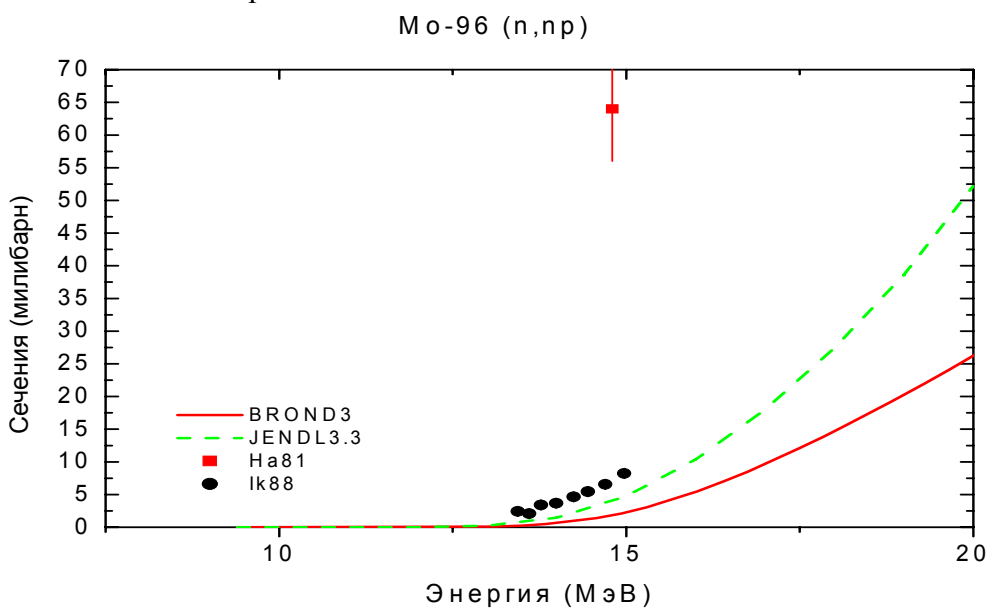


Рис. 17. Сечение реакции (n,np).

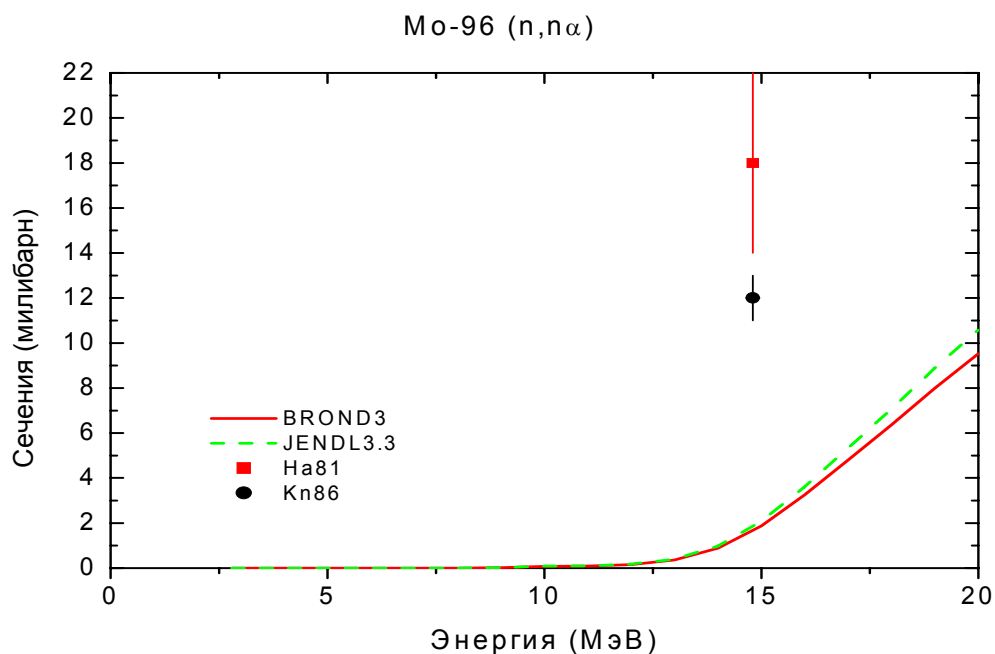


Рис. 18. Сечение реакции (n,na).

В результате выполненного сравнительного анализа предпочтительны сечения всех пороговых реакций из библиотеки BROND-3.

4. Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4).

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/6/. На Рис.17-18 показаны угловые распределения из библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 в сравнении с экспериментальными данными.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов обе оценки учитывают вклад прямых и предравновесных процессов, которые приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов.

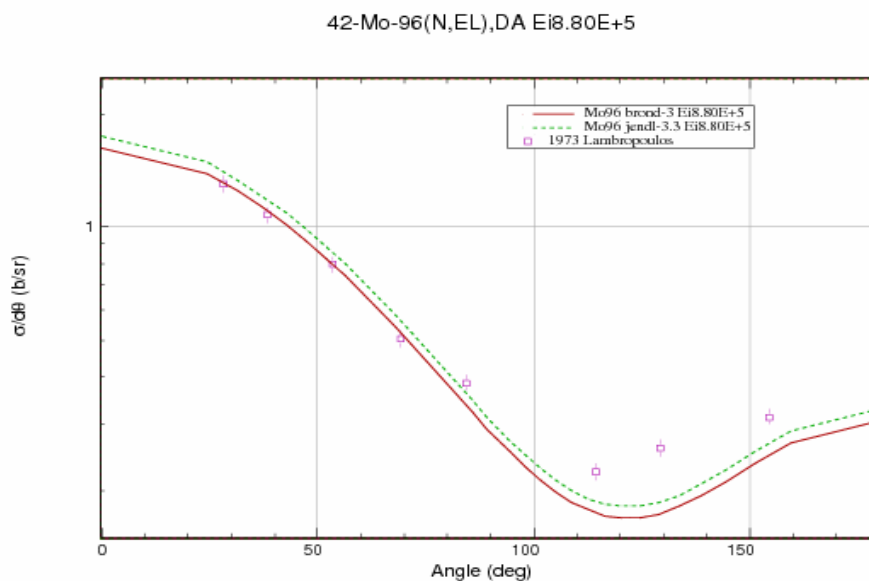


Рис.19. Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов.

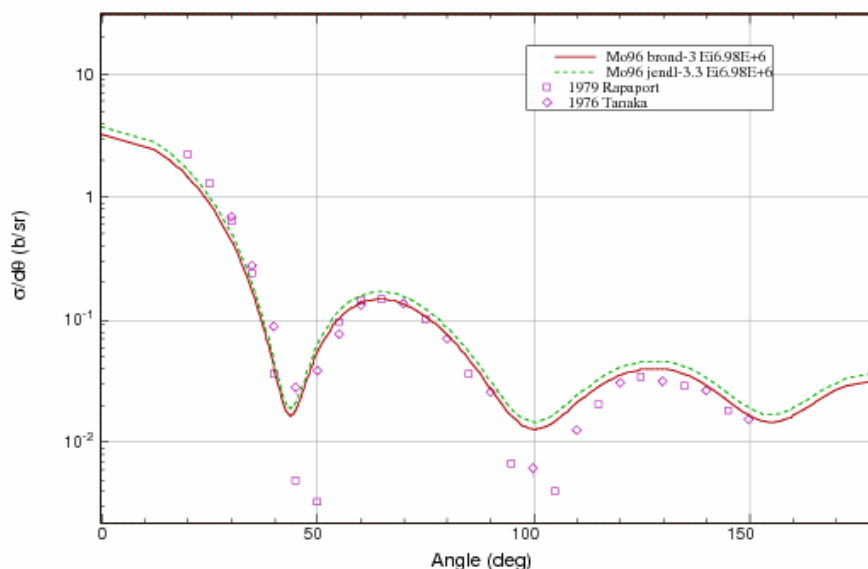


Рис. 20. Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов.

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеяных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gashy и Dwuck.

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6).

5.

MT=16,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /17/

6. Множественность образования гамма-лучей MF=12).

MT=102 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH.

7. Сечения образования гамма-лучей (MF=13)

8.

MT=3 Сечения образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитаны по программе GNASH.

9. Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

10.

MT=3,102 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

10. Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=3 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, где они получены аппроксимацией с помощью эмпирической формулы работы /18/ экспериментальных данных работы /19/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy /6/.

Литература

1. Kikuchi, Y. et. al.: Report JAERI-M 86-030 (1986).
2. Wasson, O.A. et. al.: Phys. Rev., с7, 1532(1973).
3. Weigmann, H. et. al.: 1971 Knoxville, 749(1971).
4. Musgrove, A.R.De L. et. al.: Nucl. Phys., A270, 108(1976).

5. Mughabghab, S.F. et. al.: "Neutron cross sections, vol.1, part A", Academic press(1981).
6. Igarasi, S. and Fukahori, T.: Report JAERI-1321(1991).
7. Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: in "Nuclear reaction data and nuclear reactors" (Triest, 1996). Eds.A.Gordini, G.Reffo., World science, Singapore, 1988, v.1, p.206.
8. Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8 (1970), p.281.
9. Koning, A.J., Dalaroche, J.P.: Contribution to 3-th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
10. Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl.Phys. A232, 381 (1974).
11. Avrigeanu, V., Hodgson, P.: Avrigeanu, M.: Phys. Rev. C49 (1994) 2136.
12. Dietrich. S.S., Berman, B.L.: Atomic Data and Nuclear Data tables.538 (1988) 199.
13. Firestone, R.B.: Table of isotopes, eight edition, v.2, New York, 1995.
14. Smith, A.B.: Nucl. Phys. 244, 213 (1975).
15. Manokhin, V.N.: Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
16. Manokhin, V.N., Blokhin, A.I.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, p.871 (1997).
17. Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
18. Howerton, S.T. and Plechaty, E.F.: Nucl. Sci. Eng., 32, 178 (1968).
19. Morgan, G. and Newman, N.: ORNL-TM-5097 (1975).
20. Hofman, H. ET et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
21. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.

Перечень использованных экспериментальных работ

1. Полное сечение

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|-----------|----------------|---------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| | | | | | | |
| Sm75 | A.B.Smith | J,NP/A,244,213,1975 | 10524 | 1.64+06 | 5.51+06 | 88 |
| La73 | P.Lambropoulos | J,NP/A,201,1,1973 | 10277 | 1.01+05 | 1.50+06 | 594 |
| Di68 | M.Divadeenam | J,DA/B,28,3834,1968 | 10523 | 1.30+05 | 6.40+05 | 103 |

2. Сечение радиационного захвата

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|-----------|------------------|-----------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| | | | | | | |
| Mu76 | A.R.Del.Musgrove | J,NP/A,270,108,1976 | 30357 | 3.0+03 | 2.0+05 | 15 |
| Ka64 | S.P.Kapchigashev | C, 64Dubna, 104, 1964 | 41233 | 3.25+01 | 4.60+04 | 47 |

3. Сечение упругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | | | |
| Mc Daniel77 | F.D.Mc. Daniel | P,A-KTY-74/77,3,1977 | 10770 12782 | 2.52+06 6.00+06 | | 1 1 |
| Mcdaniel74 | F.D.Mcdaniel | J,PR/C,10,1087,1974 | 10391 | 1.50+06 | | 1 |
| Lambropoulos73 | P.Lambropoulos | J,NP/A,201,1,1973 | 10277 | 3.0+05 | 1.5+06 | 130 |

4. Сечение неупругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|---------|-------------|
| | | | | | | |
| Mc Daniel77 | F.D.Mc. Daniel | P,A-KTY-74/77,3,1977 | 10770 12782 | 2.52+06 6.00+06 | | 1 1 |
| Mcdaniel74 | F.D.Mcdaniel | J,PR/C,10,1087,1974 | 10391 | 1.50+06 | | 1 |
| Lambropoulos73 | P.Lambropoulos | J,NP/A,201,1,1973 | 10277 | 3.0+05 | 1.5+06 | 130 |
| Korzh94 | I.A.Korzh | J, UFZ,39, 785, 1994 | 32201 | 9.07+05 | 1.40+06 | 5 |

5. Сечение реакции (n,p)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|------------|----------------|-----------------------------|---------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | | | |
| Filat01 | A.A.Filatenkov | R, RI-258, 2001 | 41424 | 1.3+06 | 1.5+06 | 6 |
| Liskien90 | H.Liskien | J, ARI,41(1990)83 | 22125 | 1.3+07 | 2.0+07 | 15 |
| Ikeda88 | Y.Ikeda | R, JAERI-1312(1988) | 22089 | 1.3+07 | 1.5+07 | 16 |
| Molla86 | N.I.Molla | R, INDC(BAN)-003, 1986 | 30985 | 1.4+07 | 1.5+07 | 5 |
| Marcinko86 | A.Marcinkowski | J, ZP/A, 223, 91, 1986 | 30809 | 1.3+07 | 1.7+07 | 8 |
| Rahman85 | M.Rahman | J, NP/A, U, 435(1985)43 | 21990 | 5.9+06 | 9.6+06 | 8 |
| Pepelnik85 | R.Pepelnik | P, NEANDC(E)-26U, 1985 | 21999 | 1.47+07 | | 1 |
| Atsumi84 | H.Atsumi | R, NEANDC(J)106U, 1984 | 21935 | 1.5+07 | | 1 |
| Anemiya82 | S.Anemiya | J, NST, 19, (10), 781, 1982 | 21840 | 1.48+07 | | 1 |
| Srinivas79 | R.Srinivasa | C,79Knoxvill, 848 | 30576 | 1.4+07 | | 1 |
| Fujino77 | Y.Fujino | R, NEANDC(J)-51, 1977 | 20850 | 1.46+07 | | 1 |
| Qaim 74 | S.Qaim | C, 77Geel, 327(1977) | 20513 | 1.5+07 | | 1 |
| Lu70 | W.D.Lu | J, PR/C, 1, 358, 1970 | 10145 | 1.44+07 | | 1 |
| Cu67 | P.Cuzzocrea | J, NP/A, 103, 616, 1967 | 21141 | 1.41+07 | | 1 |
| Br63 | E.T.Bramlitt | J, PR, 131, 2649, 1963 | 11590 | 1.47+07 | | 1 |
| St62 | F.Strohal | J, NP, 30,49, 1962 | 30008 | 1.46+07 | | 1 |

6. Сечение реакции (n,d)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|-----------|------------|------------------------|---------|----------------------|--|-------------|
| | | | | | | |
| Haight81 | R.C.Haight | J, PR/C, 23, 700, 1981 | 10960 | 1.48+07 | | 1 |

7 Сечение реакции (n,np)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|-----------|------------|------------------------|---------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | | | |
| Ikeda88 | Y.Ikeda | R, JAERI-1312(1988) | 22089 | 1.3+07 | 1.5+07 | 16 |
| Haight81 | R.C.Haight | J, PR/C, 23, 700, 1981 | 10960 | 1.48+07 | | 1 |

8. Сечение реакции (n,na)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|-----------|------------|------------------------|---------|----------------------|--|-------------|
| | | | | | | |
| Kneff86 | D.W.Kneff | J, NSE, 92, 491, 1986 | 10933 | 1.48+07 | | 1 |
| Haight81 | R.C.Haight | J, PR/C, 23, 700, 1981 | 10960 | 1.48+07 | | 1 |

9. Заключение

7.1 Выводы На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка **БРОНД-3** является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить файла **БРОНД-3** для **Mo-96** в библиотеку **Росфонд-2005**.

7.2. Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

42.6. Молибден-97

Содержание в естественной смеси: 9.55 %.

1. Общие характеристики

1.1. $Z=42$

1.2. $A=97$

1.3. $A_w=96.07350$

1.4. Перечень нейтронных реакций:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|--------------------|----------|---------------------------|----------------------------|
| 04 | n,n' | -0.4809 | 0.4859 | Mo-97 |
| 16 | n,2n | -6.8159 | 6.8869 | Mo-96 |
| 17 | n,3n | -15.9750 | 16.1348 | Mo-95 |
| 22 | n,n α | -2.8214 | 2.8508 | Zr-93 |
| 28 | n,np | -9.2204 | 9.3164 | Nb-96 |
| 102 | n, γ | 8.6420 | | Mo-97 |
| 103 | n,p | -1.1504 | 1.1624 | Nb-97 |
| 104 | n,d | -6.9200 | 6.9920 | Nb-96 |
| 105 | n,t | -7.6325 | 7.7119 | Nb-95 |
| 106 | n, ³ He | -8.7369 | 8.8279 | Zr-95 |
| 107 | n, α | 5.3736 | | Zr-94 |

2. Нейтронные сечения в резонансной области (MF=2).

2.1. Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Кикучи [1] на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию [2] и радиационному захвату нейтронов [3, 4]. Эти параметры для большинства резонансов близки к параметрам, рекомендованных Мугабгом и др. [5]. Верхняя граница резонансной области принята равной 1.8 кэВ, радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 6.9$ фм [5] и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами приняты средние значения ширин: 130 мэВ для s-резонансов и 150 мэВ для p- резонансов. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в CENDL-3 и также в JEFF-3.1. В 2005 г. Мугабг [17] пересмотрел параметры разрешенных резонансов. Наиболее существенными являются перенос резонанса с энергией 227.6 эВ из списка s-резонансов в список p-резонансов и, наоборот, перенос 5 резонансов в диапазоне энергий от 1133 до 1364 эВ списка p- в список s- резонансов. Были также увеличены до 162 мэВ средние значения радиационных ширин s-резонансов и до 210 мэВ средние радиационные ширины p-резонансов. Верхняя граница области разрешенных резонансов была увеличена до 2.0 кэВ. Пересмотренные параметры резонансов были включены в оценку ENDF/B-VII. Радиационных ширины резонансов, использованные в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, показаны на рис. 1. Хорошо видны существенные различия радиационных ширин большинства резонансов в обеих оценках. Так как не появилось каких-либо новых данных по параметрам нейтронных резонансов, то основания для пересмотра резонансов в оценке ENDF/B-VII в настоящее время не ясны. Ниже будет показано, что принятые в ENDF/B-VII изменения орбитальных моментов резонансов не приводит к сколь-либо заметному изменению оценок нейтронных силовых функций и средних расстояний между резонансами.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| оценка | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Эксперимент [23] |
|---|-----------|------------|------------------|
| полное | 7.957 б | 8.849 б | |
| упругое | 5.857 б | 6.653 б | |
| захвата | 2.100 б | 2.196 б | 2.5±0.2 б |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | 17.1 б | 21.72 б | 14±3 б |

Следует отметить, что в предыдущей компиляции параметров нейтронных резонансов [5] сечение захвата тепловых нейтронов принималось равным 2.1 ± 0.5 б и тот же резонансный интеграл захвата, что и приведенный выше [23]. Различие оценок полных сечений и сечений упругого рассеяния целиком обусловлены существенным отличием параметров отрицательного резонанса. Обе оценки дают заниженные значения сечения радиационного захвата нейтронов, но JENDL-3.3 в пределах погрешности согласуется с экспериментальным значением резонансного интеграла захвата нейтронов.

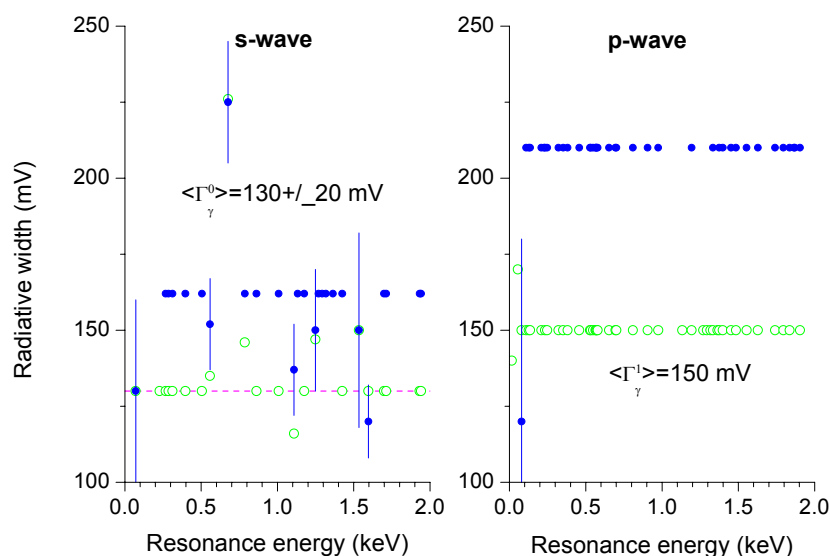


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3 (кружки) и ENDF/B-VII (сплошные точки), пунктиром показаны средние значения ширин, которые приняты для резонансов с неизвестными ширинами

2.2. Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0 = (90 \pm 10)$ эВ, и для p-резонансов – $D_1 = (35 \pm 5)$ эВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (.38 \pm 0.06) 10^{-4}$ и $S_1 = (9.0 \pm 1.0) 10^{-4}$. Перенос в ENDF/B-VII пяти резонансов из списка p- в набор s-резонансов не изменяет существенно оценки силовых функций, но приводит к заметному отклонению нарастающей суммы числа s-резонансов от линейной аппроксимации (см. рис. 2), и такое отклонение не кажется физически оправданным.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов обычно привлекается анализ

соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов обеих оценках в, по-видимому, пропущено 8 или 9 резонансов и в наборе p-резонансов пропущено более 30 слабых резонансов. Такие слабые резонансы не искажают приведенный выше анализ нейтронных силовых функций, но они заметно изменяют оценки среднего расстояния между резонансами.

Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, для набора JENDL-3.3 равны $D_0=(59 \pm 5)$ эВ и $D_1=(21.2 \pm 1.7)$ эВ и для ENDF/B-VII $D_0=(56 \pm 4)$ эВ и $D_1=(20.1 \pm 1.7)$ эВ. Отношение $D_0/ D_1=2.78 \pm 0.43$ хорошо согласуется с общей статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной ~ 3 .

2.3. Область неразрешенных резонансов.

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII принята равной 100 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S0, S1 и S2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [6]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов [20, 4]. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.369E-4$, $S_1 = 5.479E-4$, $S_2 = 0.364E-4$, $G_g = 0.180$ эВ, $D_0 = 58.76$ эВ, $R = 6.687$ фм

На рис. 4 и 5 оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для области разрешенных и неразрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для данного изотопа нет экспериментальных данных по полным нейтронным сечениям, имеются только данные по сечениям радиационного захвата нейтронов [20, 4]. При соответствующем усреднении резонансов оценки также достаточно хорошо согласуются с такими данными.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на достаточно хорошее согласие нейтронных сечений, вычисленных для обеих оценок параметров нейтронных резонансов, **оценка JENDL-3.3 является предпочтительной и она включена в БРОНД-3 как для разрешенных, так и для неразрешенных резонансов.** При отсутствии новых экспериментальных данных изменения параметров нейтронных резонансов, сделанные в ENDF/B-VII не кажутся оправданными.

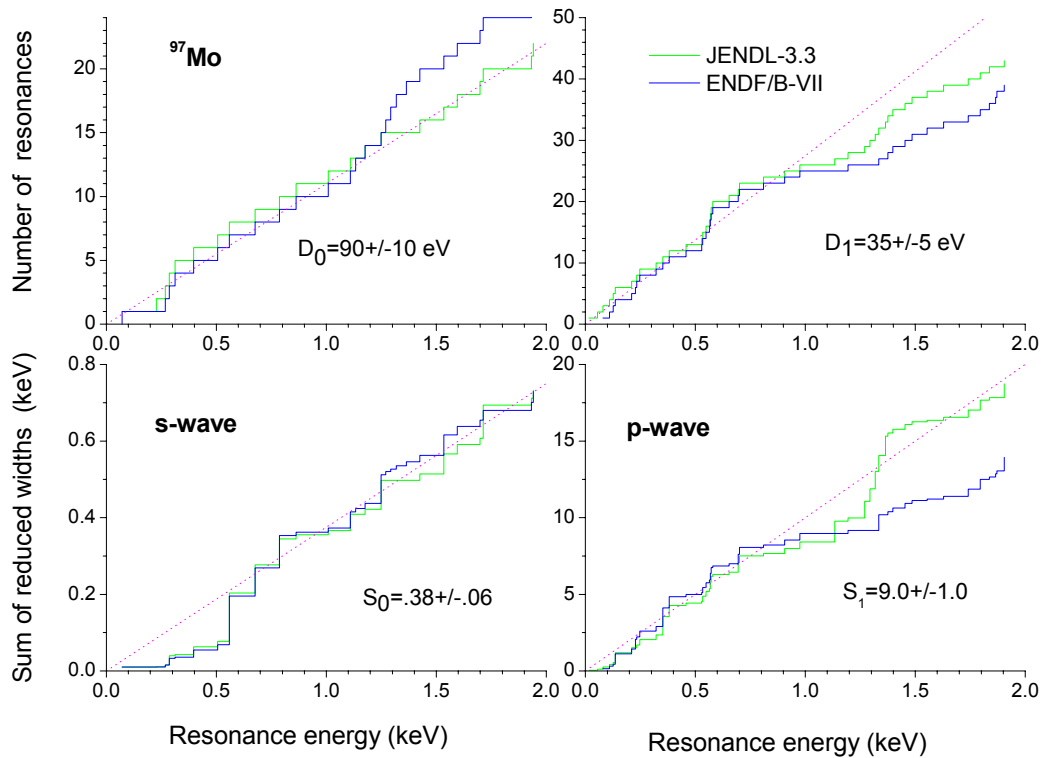


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII

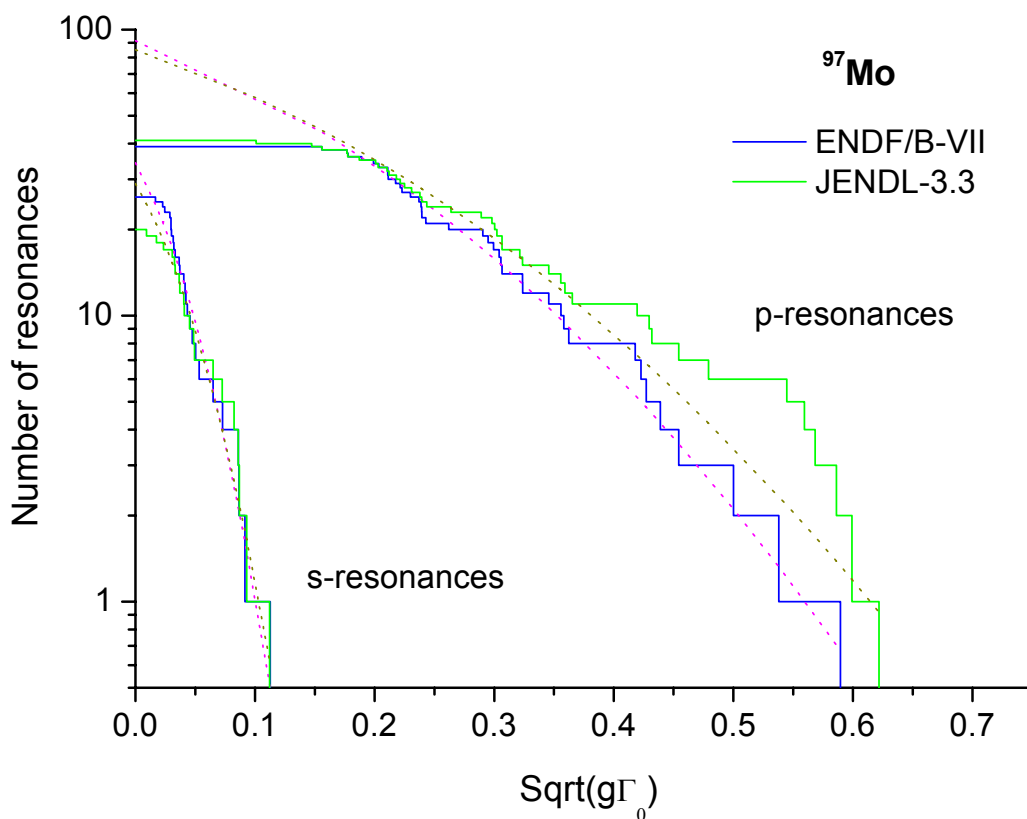


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов

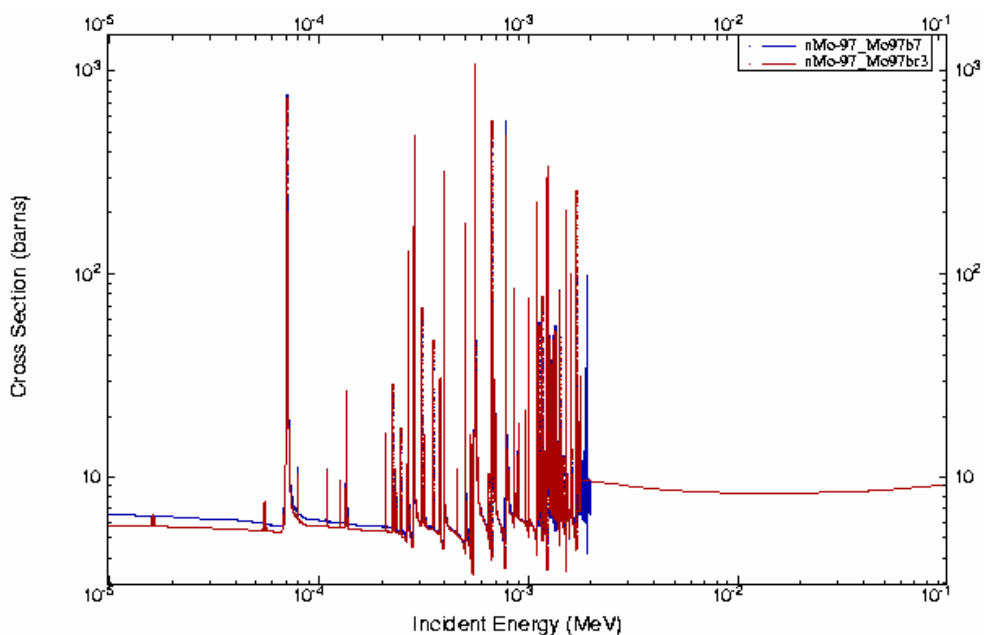


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов

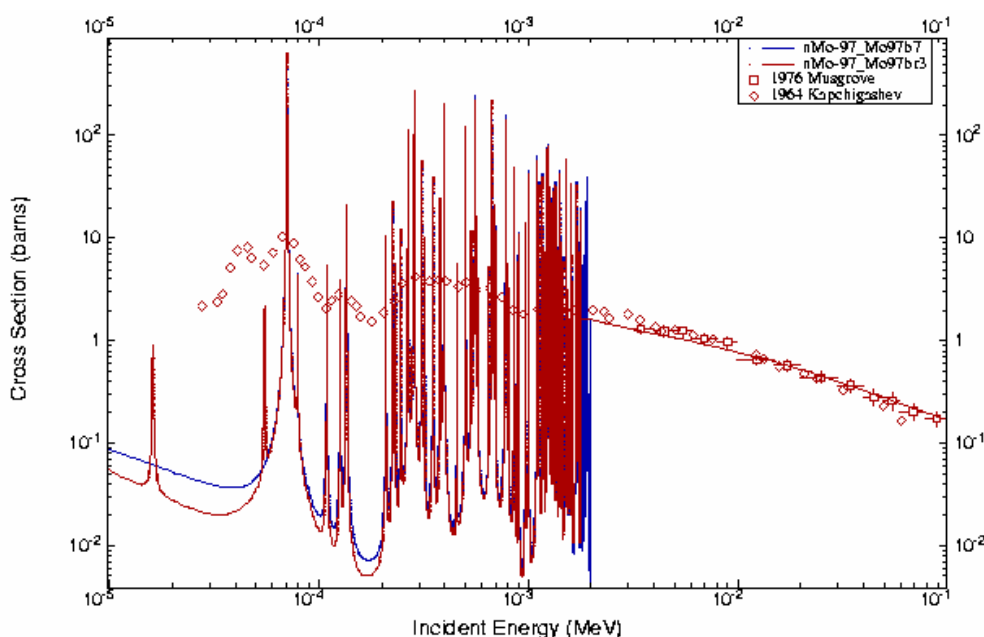


Рис. 5. Оценка сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области (MF=3).

В данном разделе проведено сравнение данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и JEFF-3.1 во вне резонансной области энергий нейтронов. Поскольку в библиотеке JEFF-3.1 для изотопов молибдена приняты данные библиотеки JENDL-3.3, сравнение производилось главным образом с данными библиотеки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII. В библиотеке ENDF/B-VII в большинстве случаев также приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Поэтому сравнение с ENDF/B-VII проводилось только тех реакций, данные для которых отличаются от данных JENDL-3.3.

Нейтронные сечения в БРОНД-3 в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH /7/, модифицированной с учетом флуктуаций нейтронных ширин работы /21/. Нейтронные коэффициенты проникаемости рассчитаны по модели сильной связи каналов (программа ECIS /8/) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней, соответствующих мультиплетам $(3/2+\otimes 2+)$ и $(3/2+\otimes 3-)$. Параметры оптического потенциала были взяты из работы /9/, но глубина мнимой части потенциала была несколько занижена, чтобы добиться оптимального описания полных нейтронных сечений при энергиях ниже 3 МэВ.

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /9/, /10/ и /11/, соответственно.

В расчетах радиационных ширин рассматривались E1, M2 и E2 –гамма-переходы. Для силовых функций гамма-переходов использованы параметры, рекомендованные в RIPL-2 /27/. Полная силовая функция нормировалась на величину, соответствующую рассмотренным выше данным о радиационной ширине и плотности нейтронных резонансов. Параметры дискретных уровней для различных каналов распада, обычно, принимались на основе таблиц /13/ и рекомендаций RIPL-2 /22/.

3.1. Полное сечение (MT=1).

В области энергий выше 100 кэВ экспериментальных данных нет. Полные нейтронные сечения в области 0.1-20 МэВ были получены расчетом по оптической модели. В отсутствие экспериментальных данных оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 выглядят равноценными.

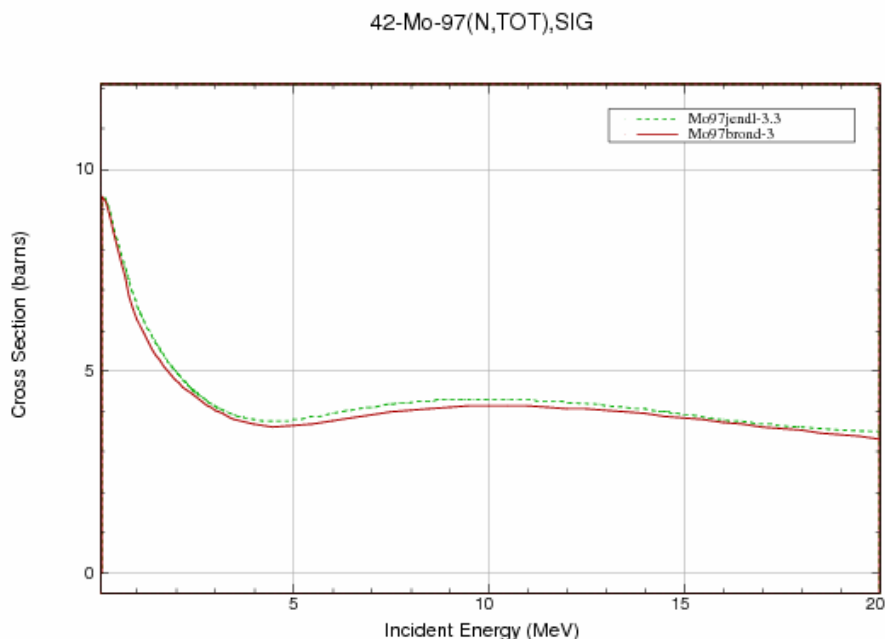


Рис. 6. Полное сечение в области 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. показано сравнение различных оценок упругого рассеяния. В области выше 3 МэВ оценки библиотек БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF-B7 заметно расходятся, но отсутствие экспериментальных данных не позволяет судить уверенно, какая оценка лучшая.

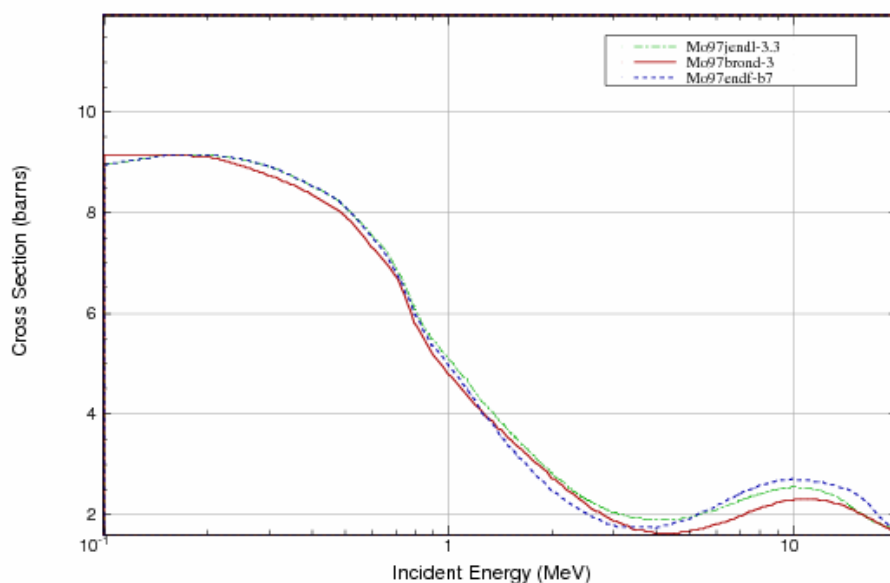


Рис.7. Сечение упругого рассеяния.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-73).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 1.5479 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

| N | Энергия уровня, МэВ | Спин | Переход | Энергия гамма-кванта, МэВ | Вероятность перехода, % |
|----|---------------------|------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 0 | 0.00000 | | | | |
| 1 | 0.48090 | 3/2+ | 1 → 0 | 0.48091 | 100 |
| 2 | 0.65790 | 7/2+ | 2 → 0 | 0.65813 | 100 |
| 3 | 0.67960 | 1/2+ | 3 → 0 | 0.67959 | 100 |
| 4 | 0.71920 | 5/2+ | 4 → 1 4 → 0 | 0.23830 0.71946 | 1 99 |
| 5 | 0.72080 | 3/2+ | 5 → 0 | 0.72092 | 100 |
| 6 | 0.75300 | 5/2+ | 6 → 0 | | 100 |
| 7 | 0.79500 | 1/2+ | 7 → 1 | | 100 |
| 8 | 0.84090 | 3/2+ | 8 → 0 | | 100 |
| 9 | 0.88810 | 1/2+ | 9 → 1 9 → 0 | 0.40706 0.88820 | 87 13 |
| 10 | 0.99300 | 5/2+ | 10 → 1 10 → 0 | | 50 50 |
| 11 | 1.02450 | 7/2+ | 11 → 2 11 → 1 11 → 0 | 0.36627 0.54380 1.02449 | 3.7 0.3 96 |

| | | | | | |
|----|---------|-------|----------------------------|-------------------------------|--------------------|
| 12 | 1.09280 | 3/2+ | 12 → 1 12 → 0 | 0.61190 1.09256 | |
| 13 | 1.11680 | 9/2+ | 13 → 4 13 → 2 13 → 0 | 0.39743 0.45857 1.11688 | 1.2 1.8 97.0 |
| 14 | 1.26500 | 5/2+ | 14 → 0 | 1.2649 | 100 |
| 15 | 1.26865 | 7/2+ | 15 → 0 | 1.26868 | 100 |
| 16 | 1.28462 | 3/2+ | 16 → 0 | 1.28464 | 100 |
| 17 | 1.32212 | 1/2+ | 17 → 1 | 0.80370 | 100 |
| 18 | 1.40983 | 11/2+ | 18 → 2 | 0.75141 | 100 |
| 19 | 1.43737 | 11/2- | 19 → 13 | 0.32031 | 100 |
| 20 | 1.51566 | 9/2+ | 20 → 1 | 1.51559 | 100 |
| 21 | 1.51600 | 3/2+ | 21 → 0 | 1.5160 | 100 |
| 22 | 1.54510 | 11/2+ | 22 → 13 | 0.42815 | 100 |
| 23 | 1.54770 | | 23 → 1 | 1.0667 | 100 |
| 24 | 1.54790 | | | | |

Экспериментальных данных для интегрального сечения неупругого рассеяния нет. На рис.8 представлены оценки библиотек JENDL-3.3, JENDL-3.3 и БРОНД-3. Функция возбуждения в библиотеке ENDF/B-VII принята из JENDL-3.3. При отсутствии экспериментальных данных трудно отдать предпочтение какой-либо одной из оценок. Однако, учитывая, что при расчетах сечений в БРОНД-3 была применена несферическая оптическая модель и улучшенные параметры, оценка из библиотеки BROND-3 предпочтительней.

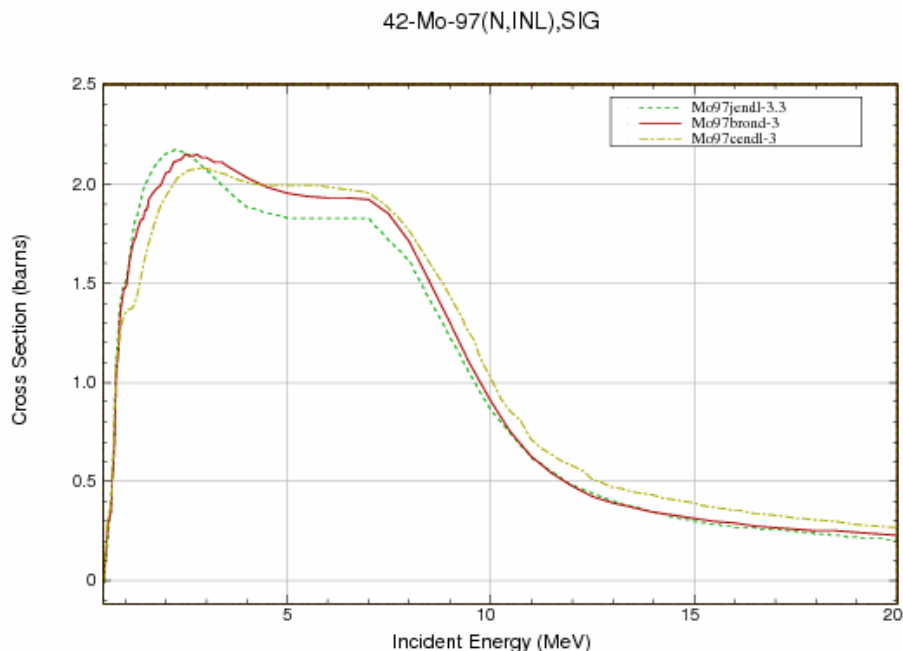


Рис.8. Оценки сечения неупругого рассеяния.

8.2. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области выше 200 кэВ экспериментальных данных нет и в этой области энергий трудно отдать предпочтение одной из оценок. Однако оценка БРОНД-3 выглядит несколько лучше и предпочтительнее с физической точки зрения.

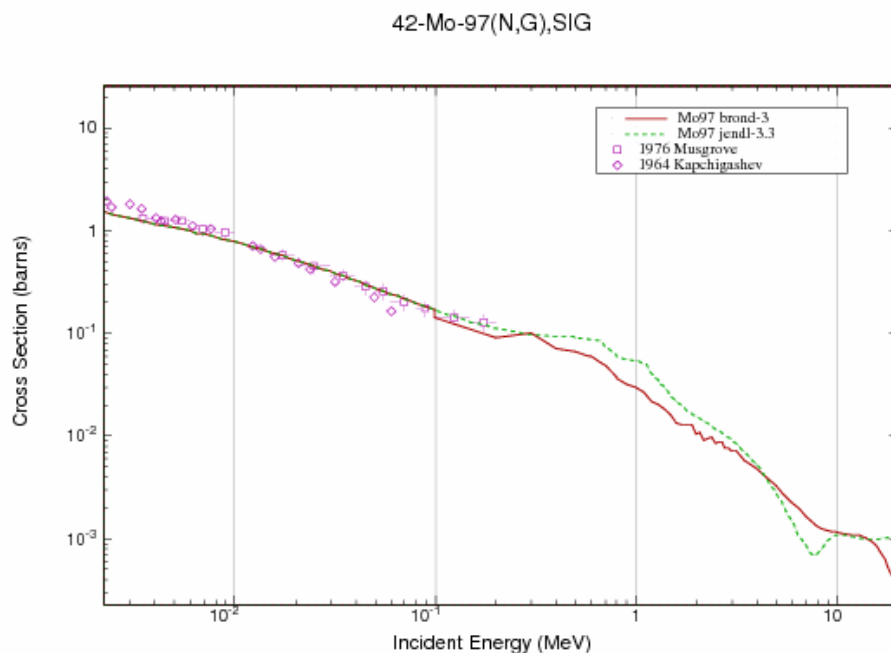


Рис.9. Сечение радиационного захвата в области энергий нейтронов 0.02-20 МэВ..

3.5. Сечение реакции (n,2n), (n,3n) (MT=16, 17).

Сечение реакции (n,2n) из библиотеки BROND-3 лучше согласуется с систематикой сечений этой реакции и более предпочтительно по сравнению с сечением JENDL-3.3. Оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают.

Сечение реакции (n,3n) в библиотеке ENDF/B-VII взято из JENDL-3.3. Следует отдать предпочтение сечению из BROND-3, поскольку оно согласовано с рекомендованным выше сечением для (n,2n).

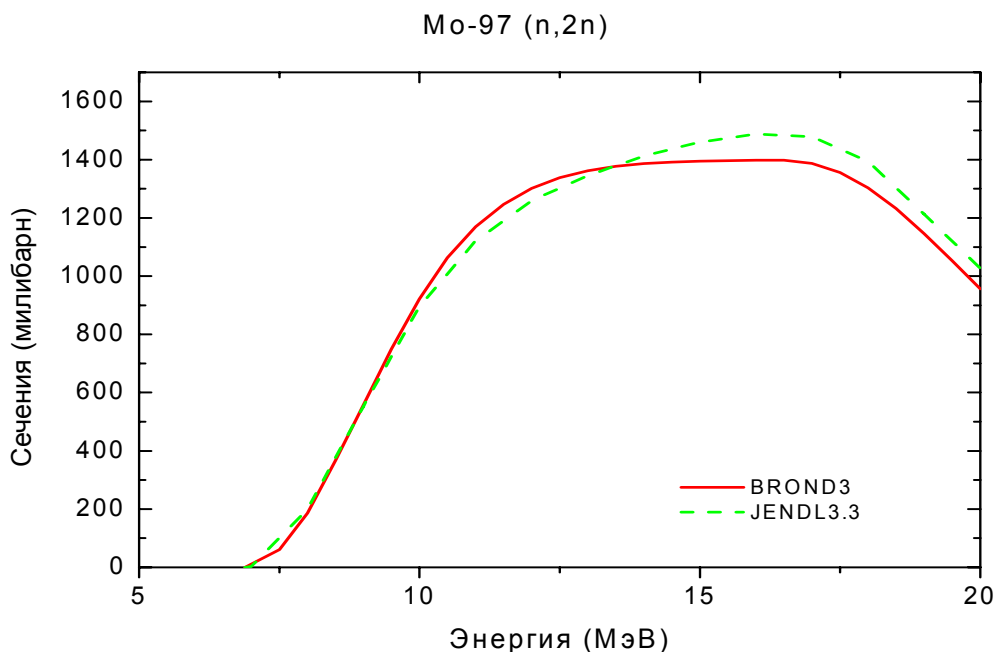


Рис. 10. Сечение реакции (n,2n).

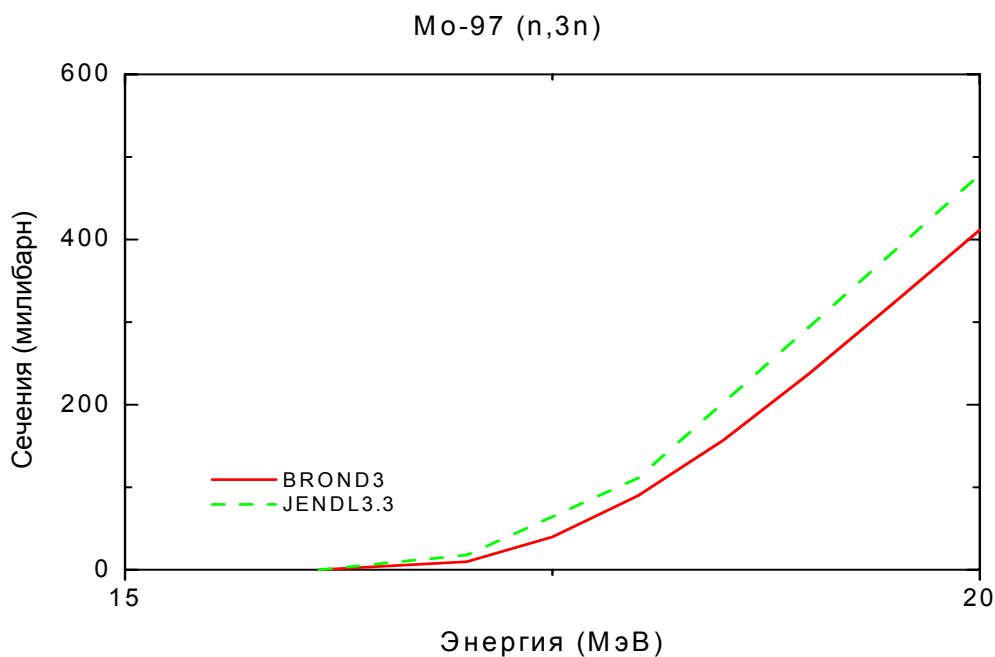


Рис. 11. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Сечение реакций (n,p),(n,d), (n,t), (n, α) (MT=103, 104,105,107).

На рис.12 даны сечения реакции (n,p). Сечение реакции (n,p) из BROND-3 лучше согласуется с экспериментальными данными. Сечения в библиотеке ENDF/B-VII взяты из JENDL-3.3.

Сечение реакции (n,d) (рис.13) в библиотеке ENDF/B-VII взято из JENDL-3.3. Оценки BROND-3 и JENDL-3.3 близки, может быть рекомендована любая из них.

Сечения реакции (n,t) в библиотеках BROND-3 и ENDF/B-VII взяты из JENDL-3.3.

На рис. 14 представлены сечения реакции(n, α). Экспериментальных данных нет. Рекомендуется сечение из библиотеки BROND-3, так как оно согласуется с систематикой /15-16/ сечений данной реакции.

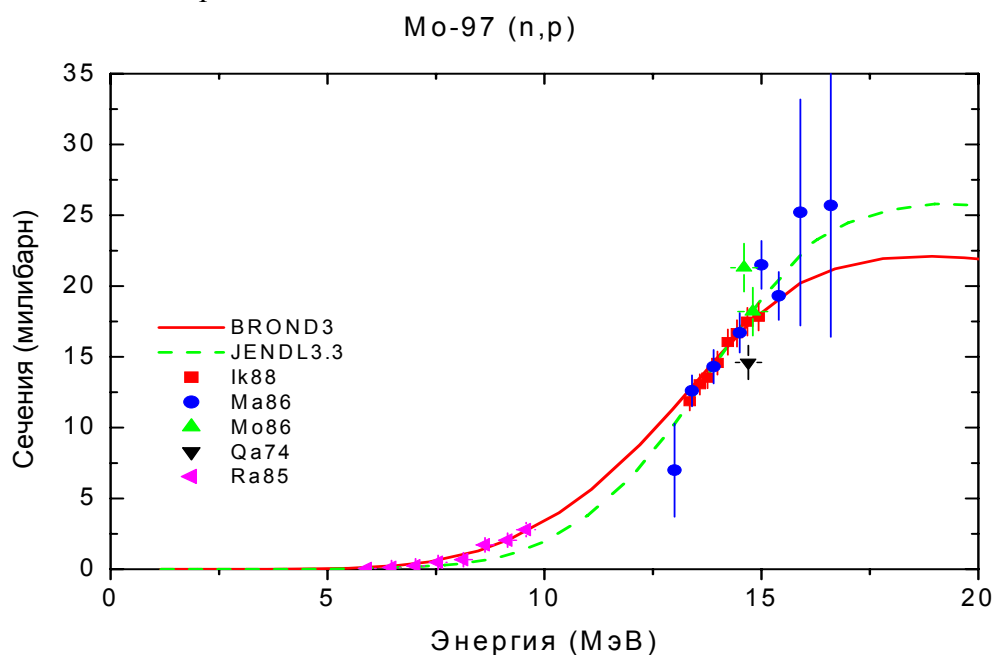


Рис. 12. Сечение реакции (n,p).

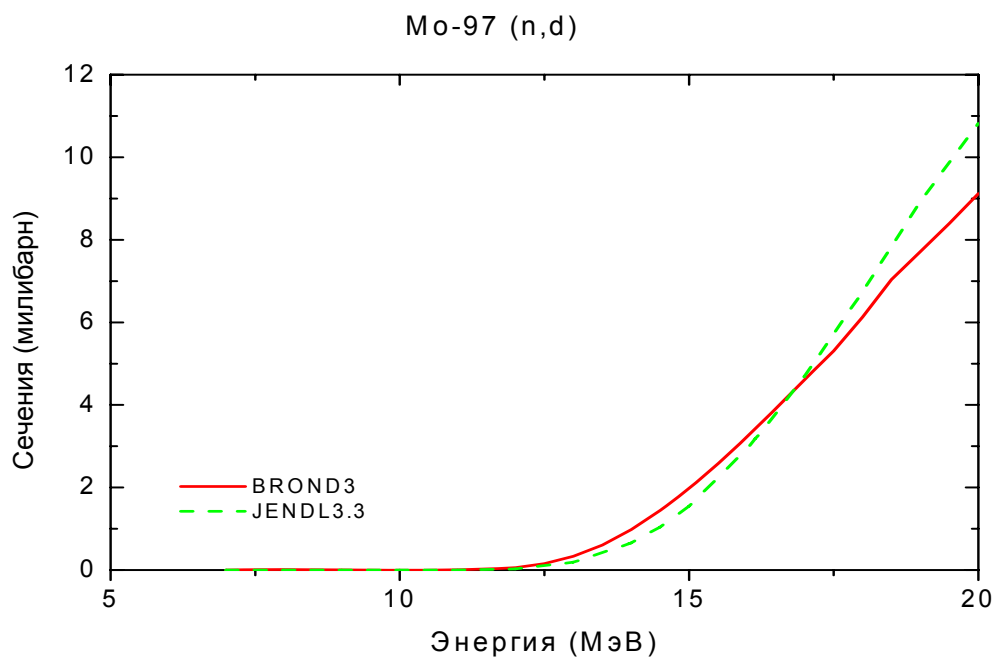


Рис. 13. Сечение реакции (n,d).

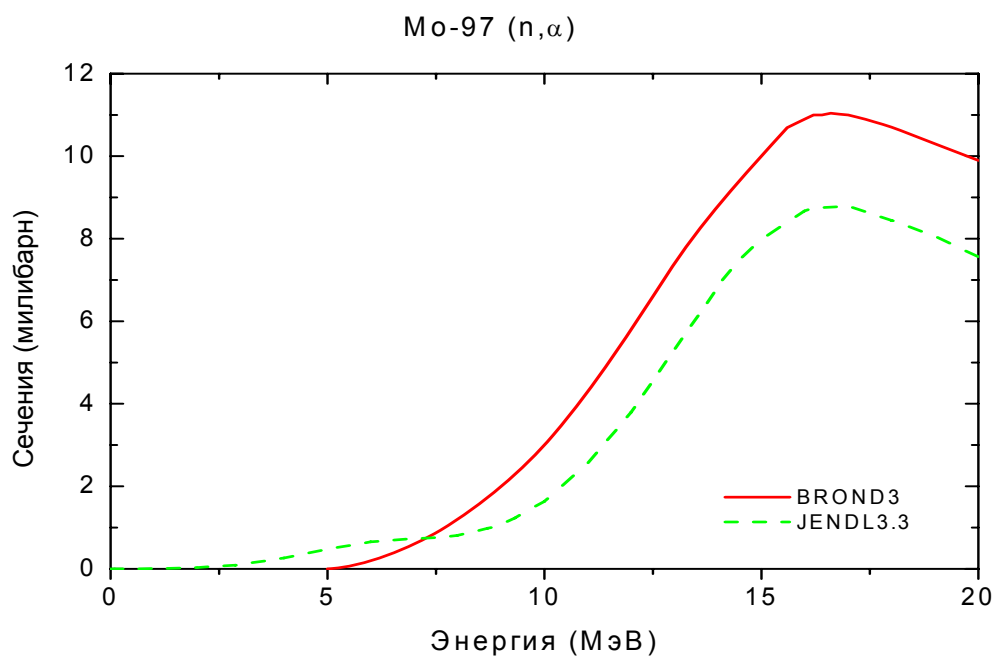


Рис. 14. Сечение реакции (n,α).

3.7. Сечение реакции (n,np), (n,nα).

Экспериментальных данных по реакции (n,p) нет. Сечение из библиотеки BROND-3 (рис.16) лучше согласуется с систематикой и с сечением реакции (n,p) (см. рис. 12). Сечения реакции (n,nα) (рис.16) в обеих библиотеках равноценны.

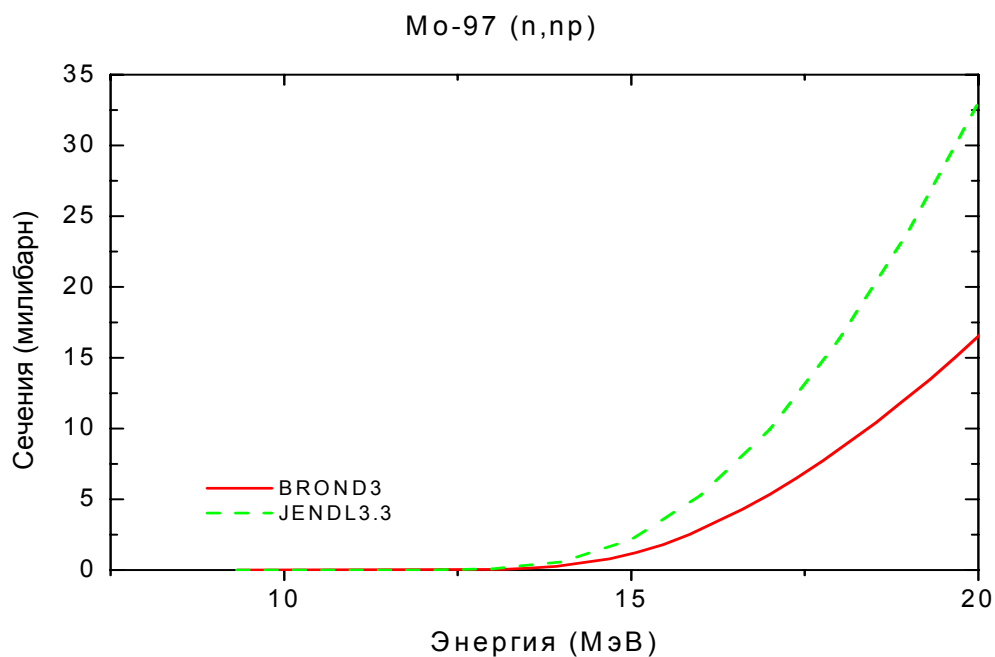


Рис. 15. Сечение реакции (n,np).

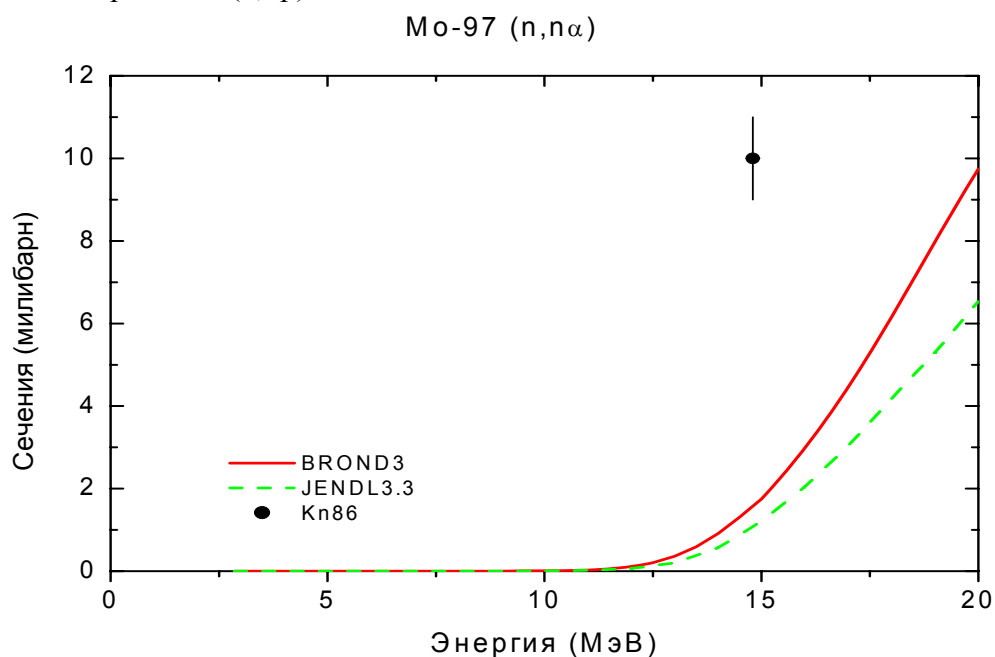


Рис. 16. Сечение реакции (n,na).

4. Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4).

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy / /

MT=51-73 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gasthy и Dwuck.

5. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6).

MT=16,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /5/.

6. Множественность образования гамма-лучей (MF=12).

MT=102 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH.

7. Сечения образования гамма-лучей (MF=13)

MT=3 Сечения образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитаны по программе GNASH.

9. Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

10.

MT=3,102 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

9. Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=3 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, где они получены аппроксимацией с помощью эмпирической формулы работы /18/ экспериментальных данных работы /19/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy /6/.

Литература:

17. Kikuchi, Y. et. al.: Report JAERI-M 86-030 (1986).
18. Shwe, H. Cote, R.E. Phys. Rev. 179, 1148 (1969).
19. Weigmann, H. et. al.: 1971 Konoxville, 749(1971).
20. Musgrove, A.R.De L. et. al.: Nucl. Phys., A270, 108(1976).
21. Mughabghab, S.F. et. al.: "Neutron cross sections, vol.1, part A", Academic press(1981).
22. Igarasi, S. and Fukahori, T.: Report JAERI-1321(1991).
23. Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: in "Nuclear reaction data and nuclear reactors" (Triest, 1996). Eds.A.Gordini, G.Reffo., World science, Singapore, 1988, v.1, p.206.
24. Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8 (1970), p.281.
25. Koning, A.J., Dalaroche, J.P.: Contribution to 3-th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
26. Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl.Phys. A232, 381 (1974).
27. Avrigeanu, V., Hodgson, P.: Avrigeanu, M.: Phys. Rev. C49 (1994) 2136.
28. Dietrich. S.S., Berman, B.L.: Atomic Data and Nuclear Data tables.538 (1988) 199.
29. Firestone, R.B.: Table of isotopes, eight edition, v.2, New York, 1995.
30. Smith, A.B.: Nucl. Phys. 244, 213 (1975).
31. Manokhin, V.N.: Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
32. Manokhin, V.N., Blokhin, A.I.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, p.871 (1997).
17. Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
18. Howerton, S.T. and Plechaty, E.F.: Nucl. Sci. Eng., 32, 178 (1968).
19. Morgan, G. and Newman, N.: ORNL-TM-5097 (1975).
20. Mughabghab, S.F. Atlas of Neutron Resonances, to published by Academic Press, 2005 (5-th edition of BNL-325).
21. Hofman, H. ET et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
22. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
23. Mughabghab, S.F., Report INDC(NDS)-440, Vienna, 2003.

Перечень использованных экспериментальных работ

Сечение радиационного захвата

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|-----------|------------------|-----------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| | | | | | | |
| Mu76 | A.R.Del.Musgrove | J,NP/A,270,108,1976 | 30357 | 3.0+03 | 2.0+05 | 15 |
| Ka64 | S.P.Карчигасhev | C, 64Dubna, 104, 1964 | 41233 | 3.25+01 | 4.60+04 | 47 |

Сечение реакции (n,p)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|------------|----------------|-------------------------|---------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | | | |
| Ikeda88 | Y.Ikeda | R, JAERI-1312(1988) | 22089 | 1.3+07 | 1.5+07 | 16 |
| Molla86 | N.I.Molla | R, INDC(BAN)-003, 1986 | 30985 | 1.4+07 | 1.5+07 | 5 |
| Marcinko86 | A.Marcinkowski | J, ZP/A, 223, 91, 1986 | 30809 | 1.3+07 | 1.7+07 | 8 |
| Rahman85 | M.Rahman | J, NP/A, U, 435(1985)43 | 21990 | 5.9+06 | 9.6+06 | 8 |
| Qaim 74 | S.Qaim | C, 77Geel, 327(1977) | 20513 | 1.5+07 | | 1 |

9. Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка **БРОНД-3** является **оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений**. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения **неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций**. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в **БРОНД-3**.

Целесообразно включить файла **БРОНД-3** для **Mo-97** в библиотеку **Росфонд-2005**.

Авторы обоснования файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

42.7 Молибден-98

Содержание в естественной смеси: 24.13 %.

1. Общие характеристики

1.1. $Z=42$

1.2. $A=98$

1.3. $A_w=97.06430$

1.4. Перечень нейтронных реакций с порогами ниже 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q , МэВ | $E_{\text{порог-}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|--------------|-----------|---------------------------|----------------------------|
| 04 | n, n' | -0.7348 | 0.7424 | Mo-98 |
| 16 | $n, 2n$ | -8.6424 | 8.7414 | Mo-97 |
| 17 | $n, 3n$ | -15.4636 | 15.1824 | Mo-96 |
| 22 | $n, n\alpha$ | -3.2727 | 3.3065 | Zr-94 |
| 28 | n, np | -9.7951 | 9.8960 | Nb-97 |
| 102 | n, γ | 5.9250 | | Mo-98 |
| 103 | n, p | -3.8029 | 3.8421 | Nb-98 |
| 104 | n, d | -7.4873 | 7.5645 | Nb-97 |
| 105 | n, t | -9.3819 | 9.4785 | Nb-96 |
| 107 | n, α | 3.2022 | | Zr-95 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.5 Область разрешенных резонансов.

В настоящее время оценка JENDL-3.3 для разрешенных и неразрешенных резонансов включена в оценки JEFF-3.0(=JEFF-3.1), CENDL-3 и последнюю версию ENDF/B-VII. Так как нет экспериментальных данных, указывающих на недостатки этой оценки, то она включена также в оценку БРОНД-3.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Кикучи /1/ на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию /2/ и радиационному захвату нейтронов /2, 3, 4/. Эти параметры лишь незначительно отличаются от параметров, рекомендованных на Мугабгхабом и др. /5/. Были приняты средние радиационные ширины 0.085 эВ для s-резонансов и 0.12 эВ для p-резонансов. Был добавлен отрицательный резонанс при энергии -980 эВ, чтобы воспроизвести сечение захвата при тепловой энергии /5/. Верхняя граница резонансной области принята равной 32 кэВ, радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 6.9$ фм /5/ и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| | | |
|---|-----------|------------------|
| оценка | JENDL-3.3 | Эксперимент [23] |
| полное | 5.772 б | |
| упругое | 5.642 б | |
| захвата | 0.130 б | 0.137±0.005 |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | 6.56 б | 6.9±0.3 б |

В пределах погрешности оценка согласуется с уточненным экспериментальным сечением захвата тепловых нейтронов ^{235}U , а также измеренным резонансным интегралом захвата нейтронов, но нет экспериментальных данных по другим типам сечений.

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 1 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценку JENDL-3.3, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_{\text{OBS}} = (1.10 \pm 0.11)$ кэВ, и для p-резонансов – $D_1 = (0.30 \pm 0.02)$ кэВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (0.45 \pm 0.07) 10^{-4}$ и $S_1 = (5.2 \pm 1.5) 10^{-4}$.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов часто привлекают анализ соответствия параметров резонансов распределению нейтронных ширин Портер-Томаса. Результаты такого анализа представлены на рис. 2. Данный анализ показывает, что в наблюдаемом наборе s-резонансов, по-видимому, пропущено около 3-4 резонанса и в наборе p-резонансов содержится 17-20 слабых резонансов, которые следовало бы отнести к d-волне. Такие слабые резонансы не искажают приведенный выше анализ нейтронных силовых функций, но их учет существенен для оценки среднего расстояния между резонансами.

2.3. Область неразрешенных резонансов.

Для области неразрешенных резонансов все последние оценки, CENDL-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII, заимствуют оценку JENDL-3.3. Верхняя граница области неразрешенных резонансов в JENDL-3.3 принята равной 100 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера.

Нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [6]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ.

Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$$S_0 = 0.369 \text{E-}4, S_1 = 5.479 \text{E-}4, S_2 = 0.364 \text{E-}4, S_g = 1.74 \text{E-}4, G_g = 0.133 \text{ эВ}, R = 6.631 \text{ фм.}$$

На рис. 3 и 4 оценки JENDL-3.3 для области разрешенных и неразрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Экспериментальные данные по полным нейтронным сечениям имеются при энергиях выше 100 кэВ (см. следующий раздел), эти данные хорошо согласуются с экстраполяцией энергетической зависимостью оценки JENDL-3.3. В диапазоне энергий от 10 эВ до 30 кэВ данные по сечениям радиационного захвата нейтронов измерены в работе [20], а при энергиях выше 4 эВ также в работах [4], и при соответствующем усреднении резонансов оценка воспроизводит имеющиеся экспериментальные данные.

На основе проведенного анализа было принято решение, что, несмотря на отмеченные выше погрешности анализа резонансов, **для области разрешенных и неразрешенных резонансов целесообразно включить в БРОНД-3 оценку JENDL-3.3.** При отсутствии новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений в области резонансных нейтронов.

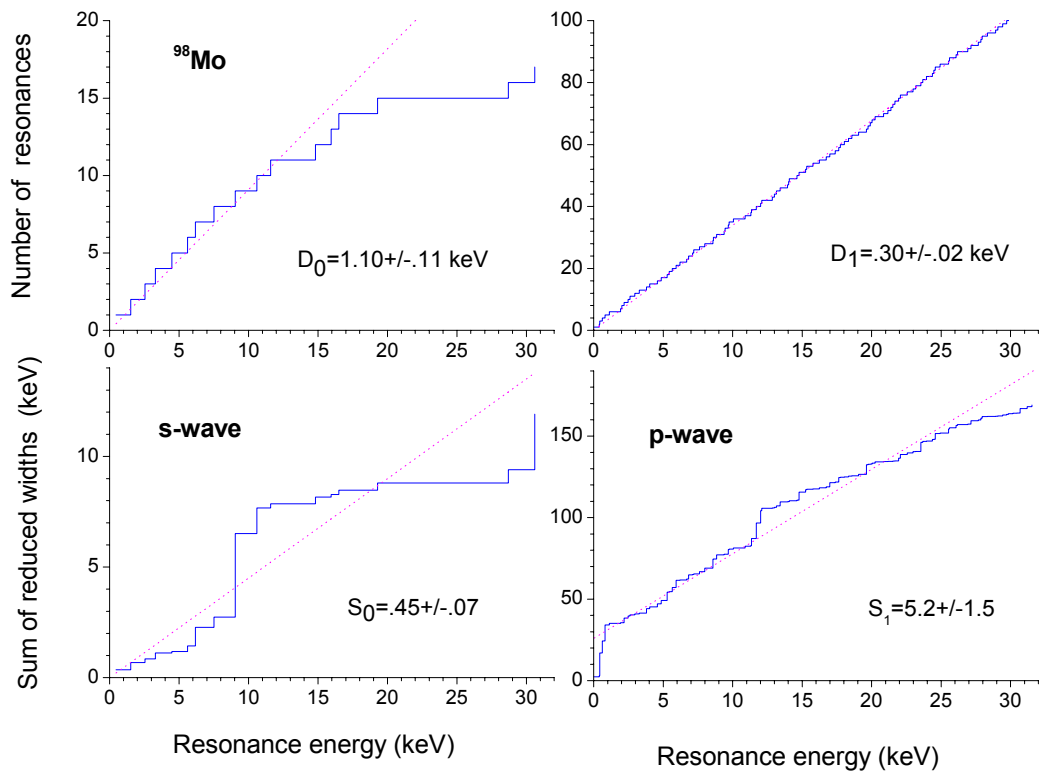


Рис. 1. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин s- и p-резонансов

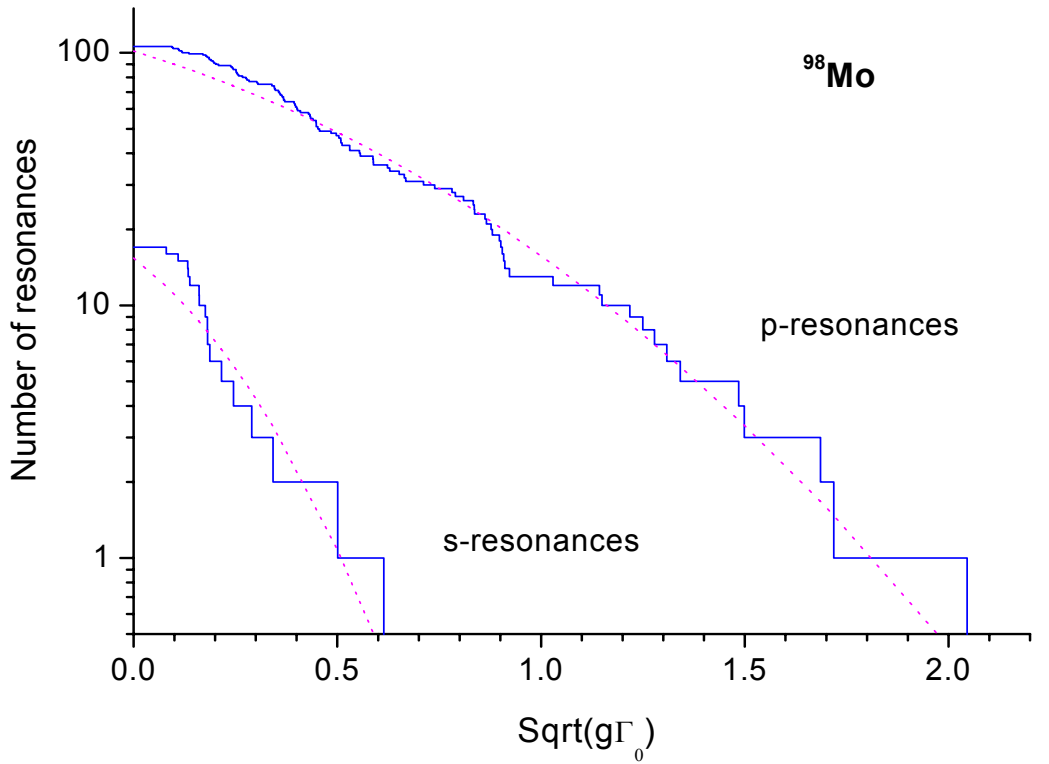


Рис. 2. Анализ пропуска s- и p-резонансов

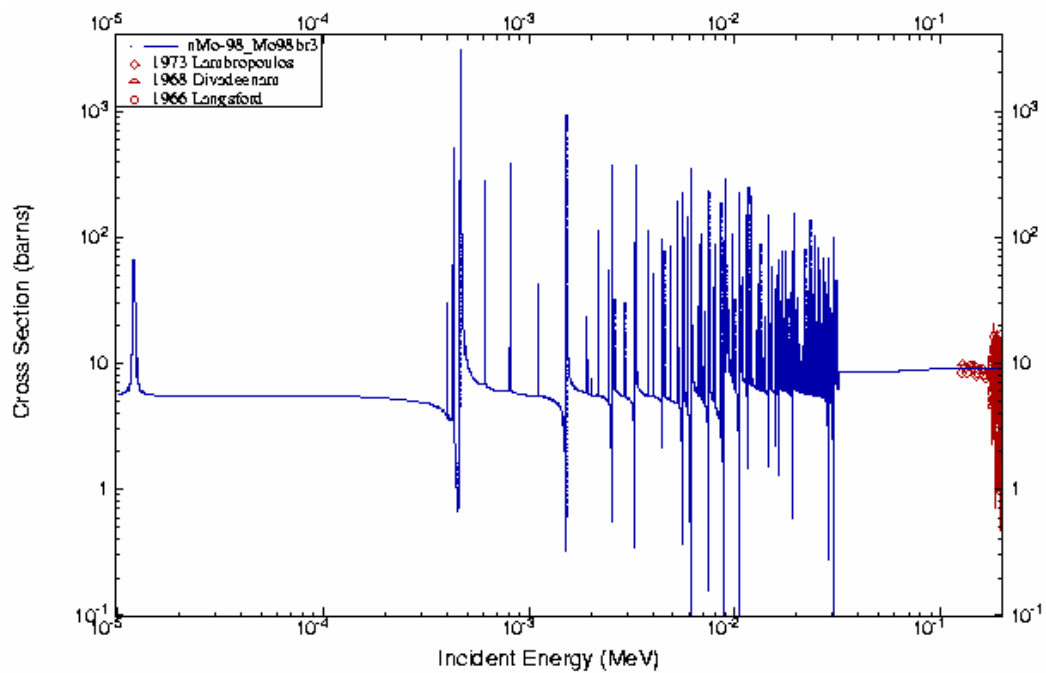


Рис. 3. Оценка полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными вне резонансной области

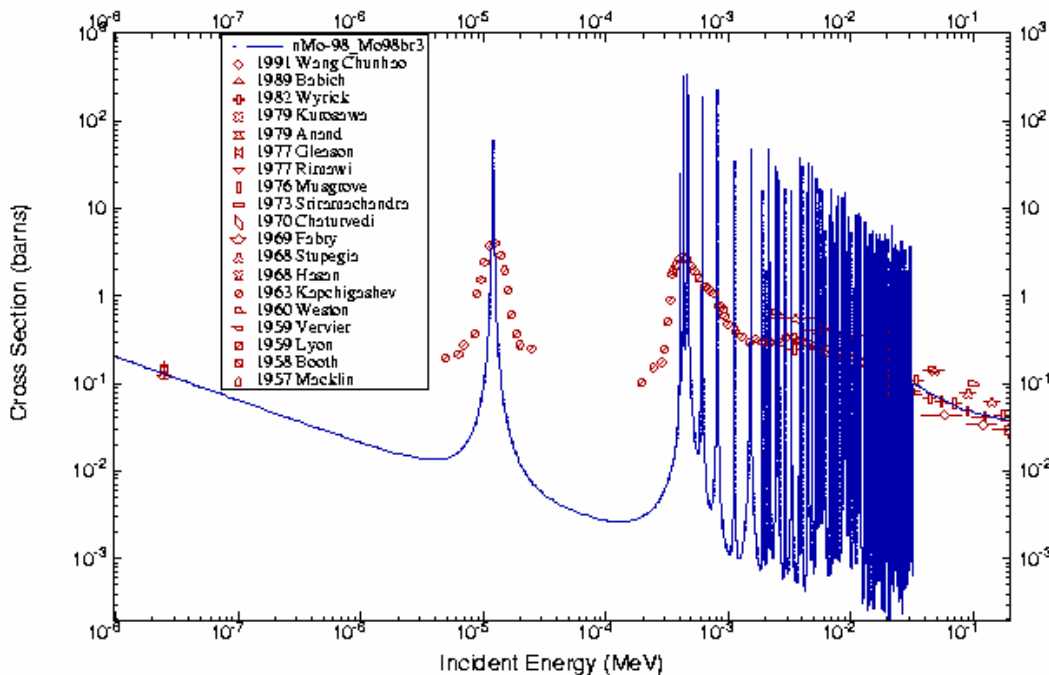


Рис. 4. Оценка сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными.

3. Нейтронные сечения вне резонансной области (MF=3).

Предварительно авторами оценки БРОНД-3 был исследован и оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния. Поскольку сечение реакции $(n,2n)$ достаточно хорошо известно из экспериментальных данных и основанной на них эмпирической

систематики, теоретические расчеты сечений неупругого рассеяния проводились таким образом, чтобы получить согласованное описание функции возбуждения реакции ($n, 2n$) и оцененного вклада прямых процессов в области 20 МэВ. Полученные результаты по функциям возбуждения других пороговых реакций корректировались на основе предсказаний эмпирических систематик.

Оцененные данные функции возбуждения неупругого рассеяния для одного изотопа сравнивались с данными для других изотопов данного элемента и изотопов соседних ядер, чтобы получить согласованное описание сечений для всех изотопов молибдена с учетом эмпирической тенденции изменения максимального сечения реакции неупругого рассеяния в зависимости от номера и атомного веса изотопа.

В данном разделе проведено сравнение данных данными библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и JEFF-3.1. Поскольку в библиотеке JEFF-3.1 для изотопов молибдена приняты данные библиотеки JENDL-3.3, сравнение производилось главным образом с данными библиотеки JENDL-3.3. В библиотеке ENDF/B-VII в большинстве случаев также приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Поэтому сравнение с ENDF/B-VII проводилось только тех реакций, данные для которых отличаются от данных JENDL-3.3.

Нейтронные сечения в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH /7/, модифицированной с учетом флуктуаций нейтронных ширин на основе подхода работы /26/. Нейтронные коэффициенты проницаемости рассчитаны по модели сильной связи каналов (программа ECIS /8/) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней $2+$ и $3-$. Параметры оптического потенциала были взяты из работы /9/, но глубина мнимой части потенциала была несколько занижена, чтобы добиться оптимального описания полных нейтронных сечений при энергиях ниже 3 МэВ.

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /9/, /10/ и /11/, соответственно.

В расчетах радиационных ширин рассматривались $E1$, $M2$ и $E2$ –гамма-переходы. Для силовых функций гамма-переходов использованы параметры, рекомендованные в RIPL-2 /27/. Полная силовая функция нормировалась на величину, соответствующую рассмотренным выше данным о радиационной ширинеи плотности нейтронных резонансов. Параметры дискретных уровней для различных каналов распада, обычно, принимались на основе таблиц /13/ и рекомендаций RIPL-2 /27/.

3.1. Полные сечения ($MT=1$)

Полные нейтронные сечения в области энергий нейтронов выше 100 кэВ были получены расчетом по оптической модели с учетом главным образом экспериментальных данных работы /14/. Существенных различий между данными указанных библиотек в этой области нет. Может быть рекомендована любая из них.

42-Mo-98(N,TOT),SIG

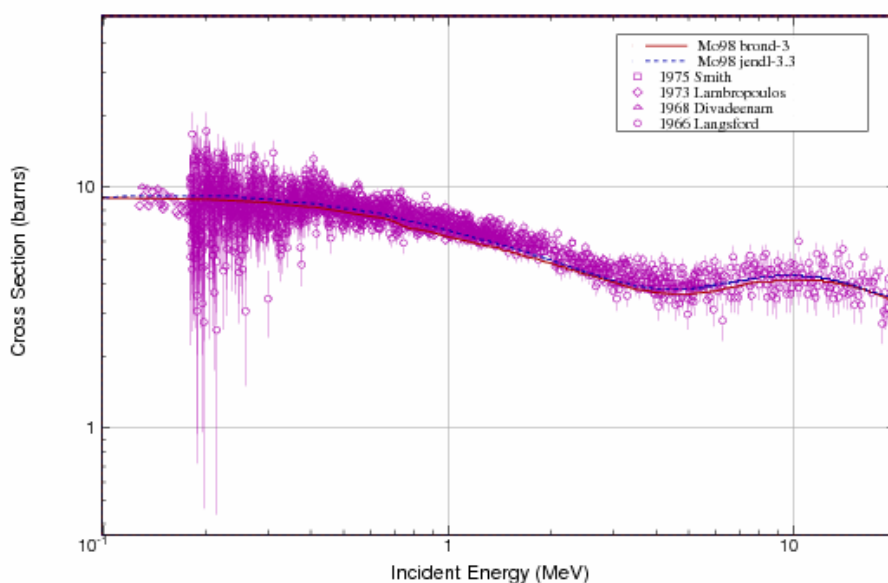


Рис.5. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20МэВ.

42-Mo-98(N,TOT),SIG

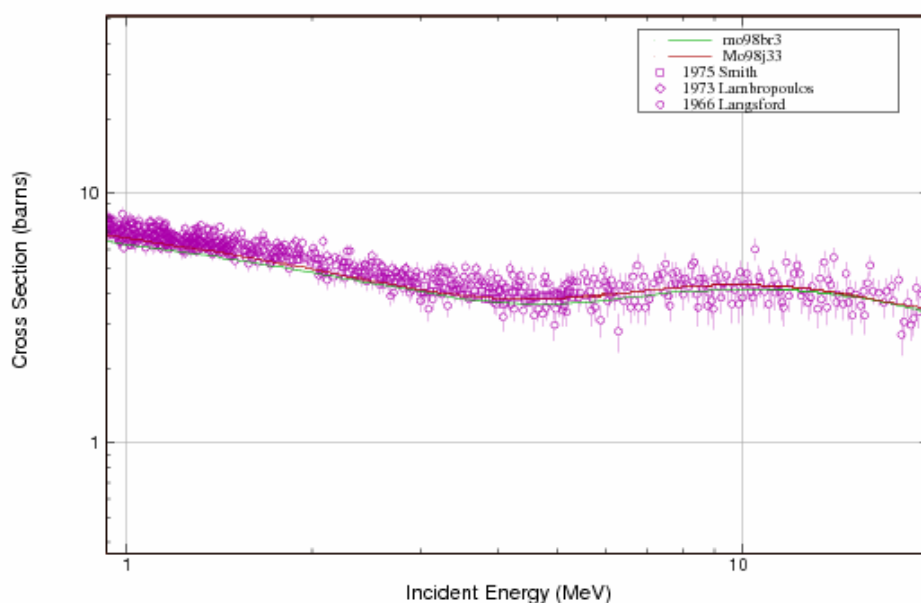


Рис.6. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. показано сравнение различных оценок упругого рассеяния. В области выше 3 МэВ оценки библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 заметно расходятся, но отсутствие экспериментальных данных не позволяет судить уверенно, какая оценка лучшая.

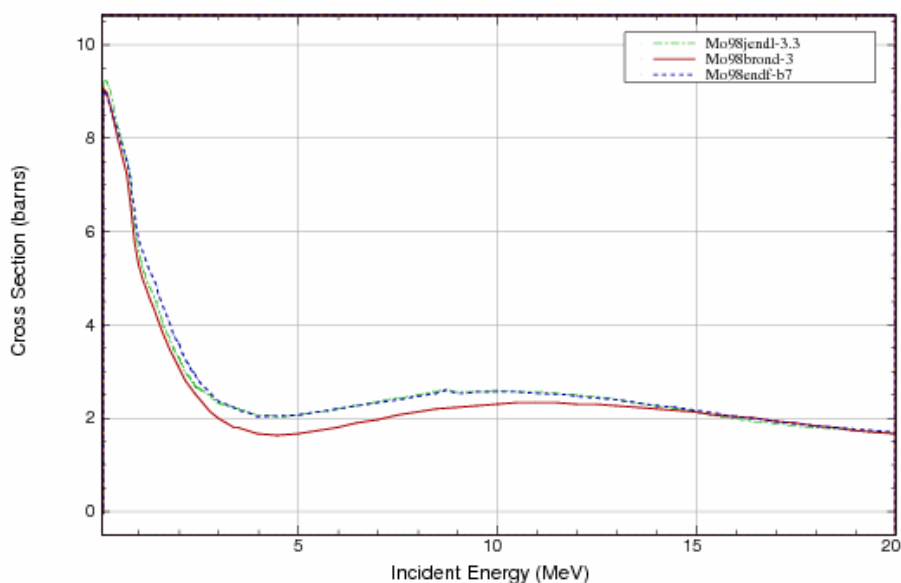


Рис.7. Сечение упругого рассеяния в области 0.1-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-64).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 2.3440 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром..

Схема уровней:

| N | Энергия уровня, МэВ | Спин | Переход | Энергия гамма-кванта, МэВ | Вероятность перехода, % |
|----|---------------------|------|---------|---------------------------|-------------------------|
| 0 | 0.00000 | | | | |
| 1 | 0.73480 | 0+ | 1 → 0 | 0.73475 | 100 |
| 2 | 0.78740 | 2+ | 2 → 0 | 0.78738 | 100 |
| 3 | 1.43230 | 2+ | 3 → 3 | 0.64483 | 51.5 |
| | | | 3 → 1 | 0.69743 | 2.7 |
| | | | 3 → 0 | 1.43222 | 45.8 |
| 4 | 1.51000 | 4+ | 4 → 0 | 0.722646 | 100 |
| 5 | 1.75850 | 2+ | | | |
| 6 | 1.88090 | 4+ | | | |
| 7 | 1.96500 | 0+ | | | |
| 8 | 2.01750 | 3- | 8 → 5 | 0.25899 | 13.6 |
| | | | 8 → 4 | 0.5078 | 65.3 |
| | | | 8 → 2 | 1.23016 | 2.7 |
| | | | 8 → 0 | 2.01745 | 18.4 |
| 9 | 2.03760 | 0+ | 9 → 0 | 1.25014 | 100 |
| 10 | 2.10480 | | 10 → 4 | 0.59465 | 8.9 |
| | | | 10 → 3 | 0.67252 | 34.4 |
| | | | 10 → 2 | 1.31738 | 44.6 |
| | | | | 1.3700 | 12.1 |

| | | | | | |
|----|---------|--|--------|----------|------|
| | | | 10 → 1 | | |
| 11 | 2.20630 | | 11 → 5 | 0.4482 | 42.0 |
| | | | 11 → 3 | 0.77430 | 21.7 |
| | | | 11 → 2 | 1.41935 | 36.2 |
| 12 | 2.22380 | | 12 → 4 | 0.713825 | 46.7 |
| | | | 12 → 3 | 0.791645 | 39.7 |
| | | | 12 → 2 | 1.43644 | 13.6 |
| 13 | 2.33340 | | 13 → 5 | 0.57506 | 3.7 |
| | | | 13 → 4 | 0.82338 | 27.8 |
| | | | 13 → 3 | 0.90094 | 10.4 |
| | | | 13 → 2 | 1.54603 | 58.1 |
| 14 | 2.34360 | | 14 → 4 | 0.83356 | 100 |
| 15 | 2.34400 | | | | |

Экспериментальные данные по интегральному сечению неупругого рассеяния нейтронов отсутствуют. Функция возбуждения в библиотеке ENDF/B-VII принята из JENDL-3.3. Данные BROND-3 в области энергий нейтронов ниже 2 МэВ согласуются с данными указанных библиотек, но при более высоких энергиях они лежат выше. Однако данные библиотеки CENDL-3 (Китай) лучше согласуются с данными оценки БРОНД-3. Учитывая, что при расчетах сечений была применена несферическая оптическая модель и улучшенные параметры, оценка из библиотеки BROND-3 кажется предпочтительной.

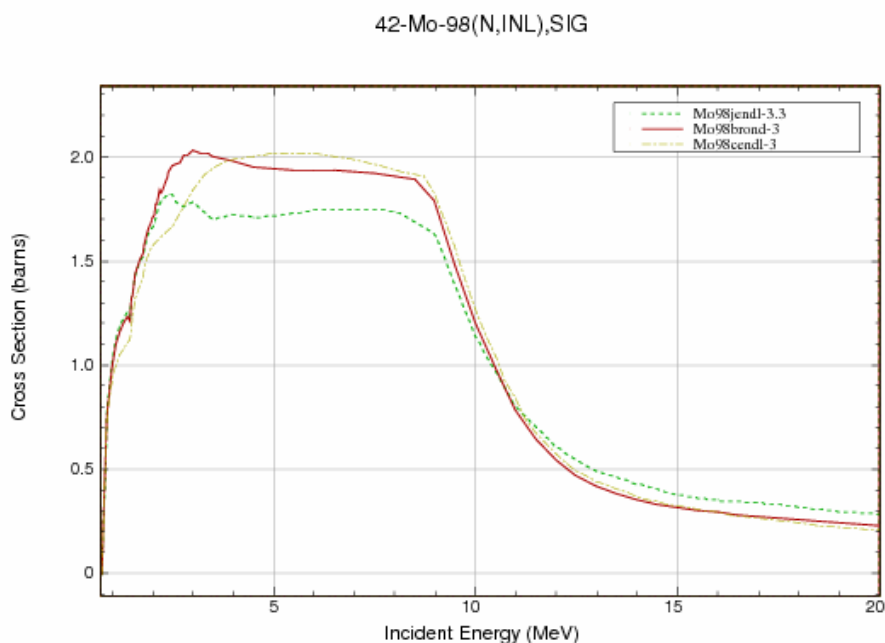


Рис. 8. Оценки сечений неупругого рассеяния.

3.4. Сечение реакции радиационного захвата (MT=102).

Сечение радиационного захвата библиотек BROND-3 заметно отличается от данных библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, однако из-за отсутствия экспериментальных данных трудно отдать предпочтение одной из них в области энергий до 4 МэВ, выше зависимость из BROND-3 предпочтительнее. Оценка ENDF/B-VII принята из JENDL-3.3.

42-Mo-98(N,G),SIG

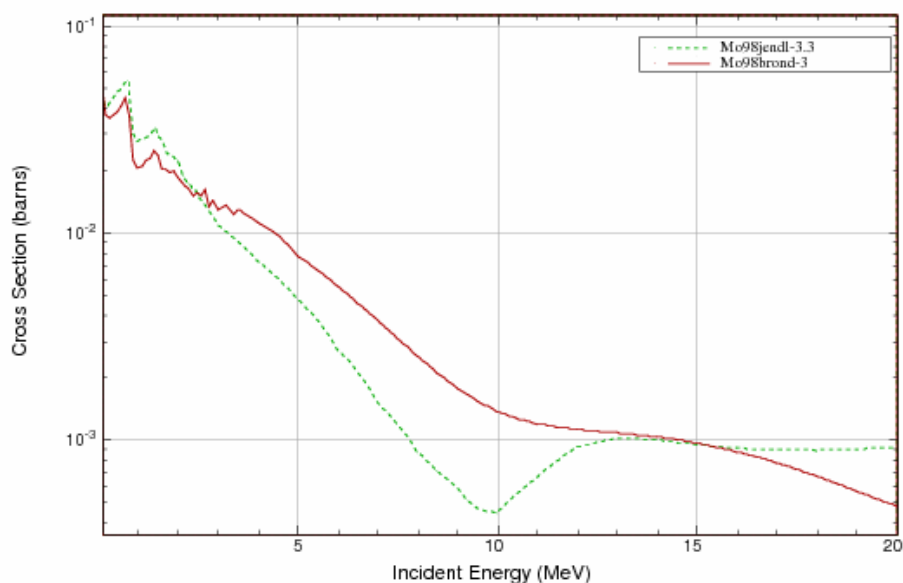


Рис. 9. Сечение реакции радиационного захвата.

3.5. Сечение реакции (n,2n), (n,3n) (MT=16, 18).

Экспериментальные данные по сечениям реакции $^{98}\text{Mo}(n,2n)$ отсутствуют (рис.10). Расхождения данных библиотек BROND-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII принципиального характера не носят. Выбор той или иной зависимости определяется выбором зависимости полного неупругого рассеяния. В данном случае предпочтительней оценка BROND-3.

. Сечение реакции $^{98}\text{Mo}(n,3n)$ показано на рис. 11. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 равноценны.

Mo-98 (n,2n)

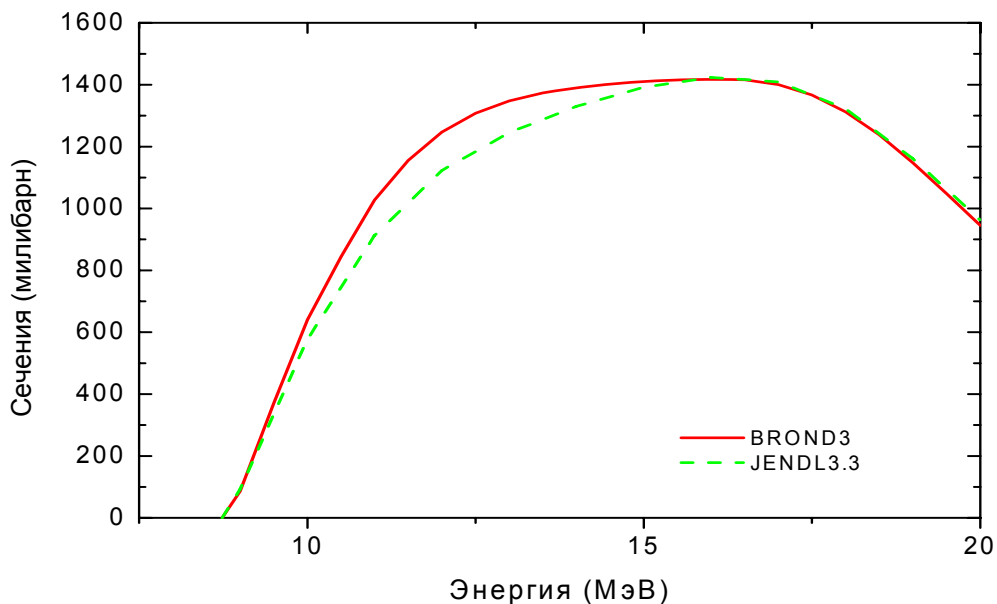


Рис. 10. Сечение реакции (n,2n).

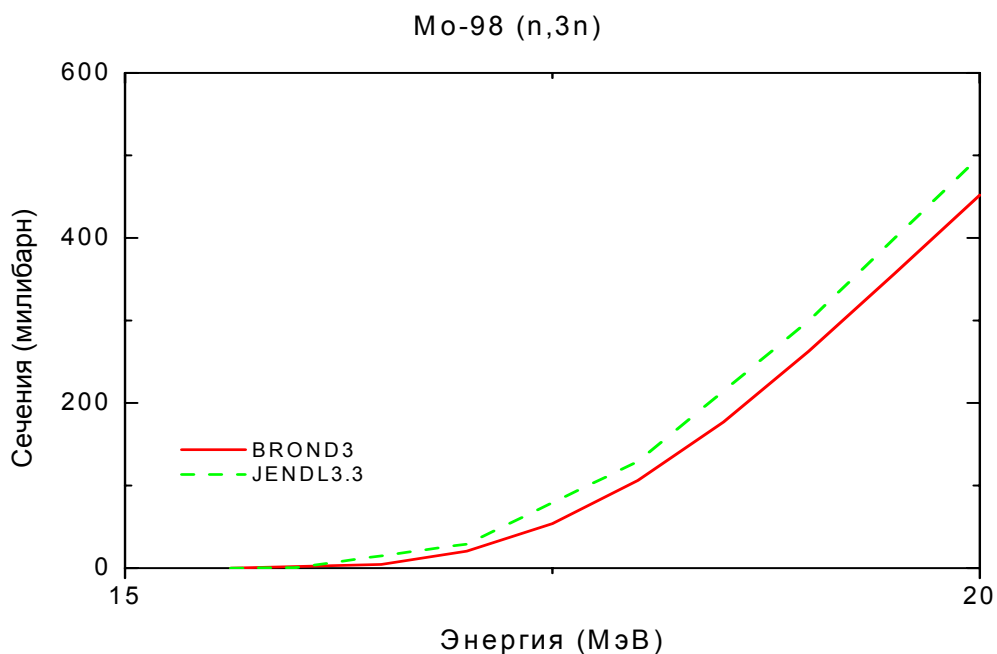


Рис. 11. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104,105 и 107):

Сечение реакции (n,p). Экспериментальных данных по реакции $^{98}\text{Mo}(n,p)$ нет. Оцененное сечение реакции (n,p) библиотеки BROND-3 (рис.12) лучше согласуется с систематикой сечений указанной реакции, однако наблюдаемое расхождение не носит принципиально характера из-за малости сечения. На рис.14 показано сечение реакции $^{98}\text{Mo}(n,\alpha)$. Рекомендуется функция возбуждения из библиотеки BROND-3, поскольку она точнее описывает экспериментальные данные в области 14 МэВ.

Сечение реакции $^{98}\text{Mo}(n,d)$ (рис. 13) рекомендуется сечение из библиотеки BROND-3, поскольку при расчете сечения по теории ядерных реакций более корректно учтен вклад прямых процессов, которые являются преобладающими для этой реакции.

Сечение реакции (n,t) в библиотеках в БРОНД-3 и ENDF/B-VII взяты из JENDL-3.3.

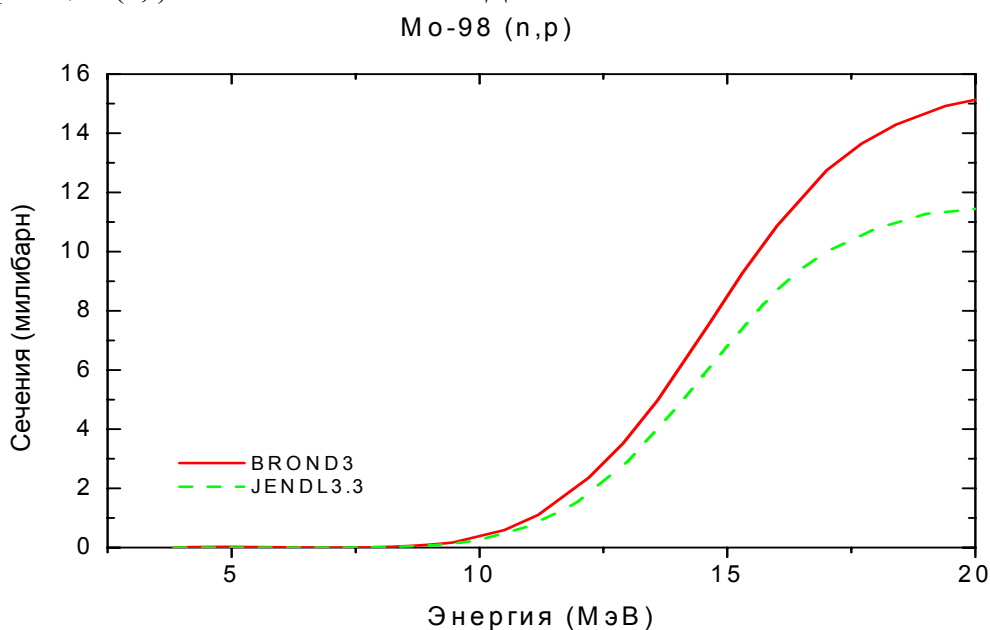


Рис. 12. Сечение реакции (n,p).

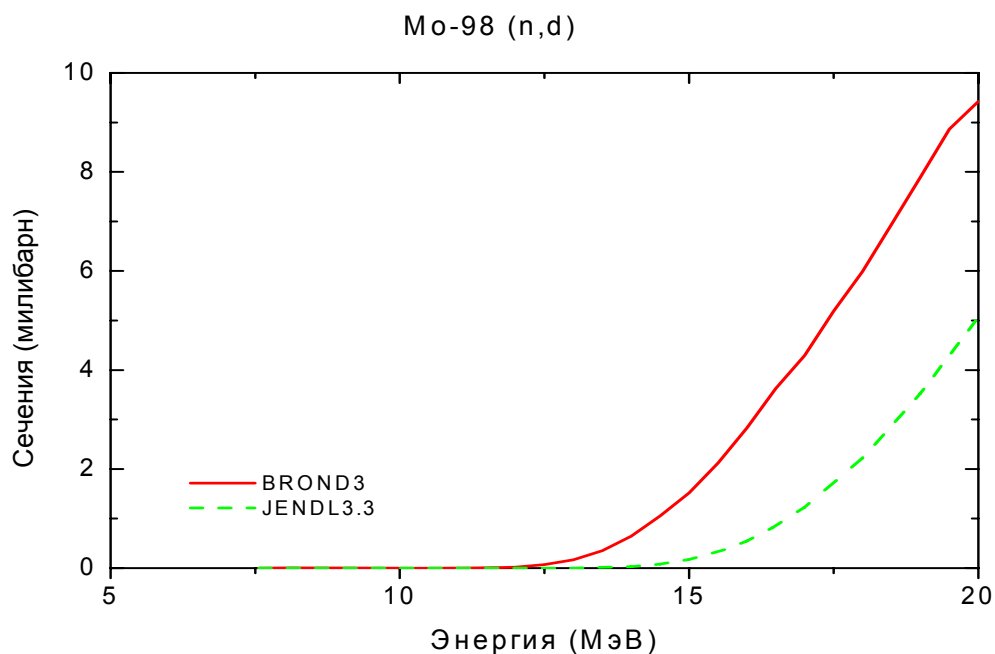


Рис. 13. Сечение реакции (n,d).

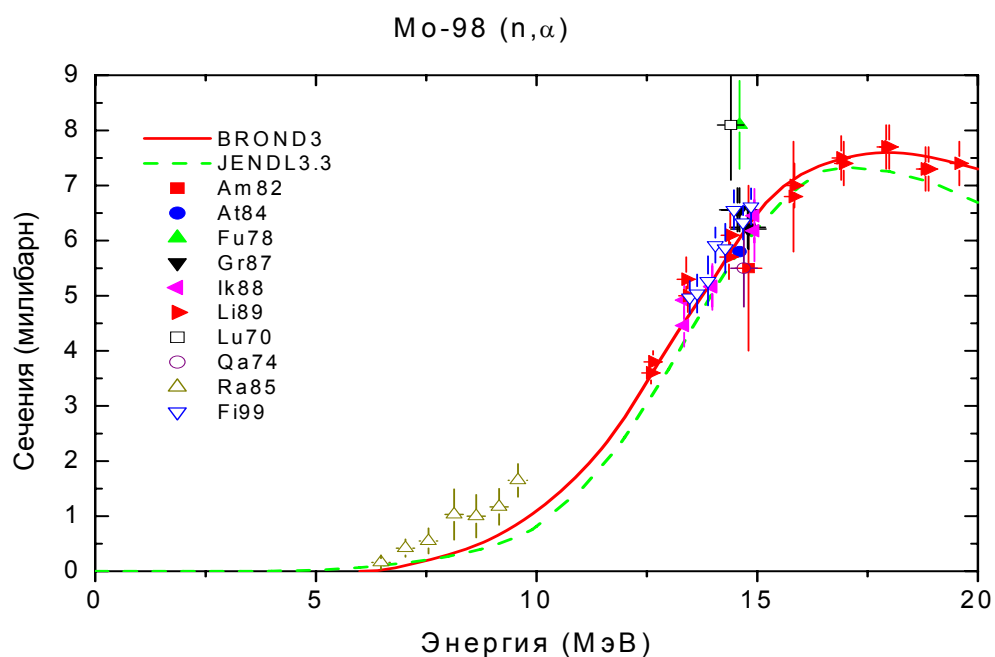


Рис.14. Сечение реакции (n,а).

3.7. Реакции (n,nα), (n,np) (MT=22, 28):

Сечение реакции $^{98}\text{Mo}(n,np)$ в библиотеках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают. Данные BROND-3 лежат существенно ниже и лучше согласуются с систематиками сечений реакций (n,p) и (n,np). (рис.15).

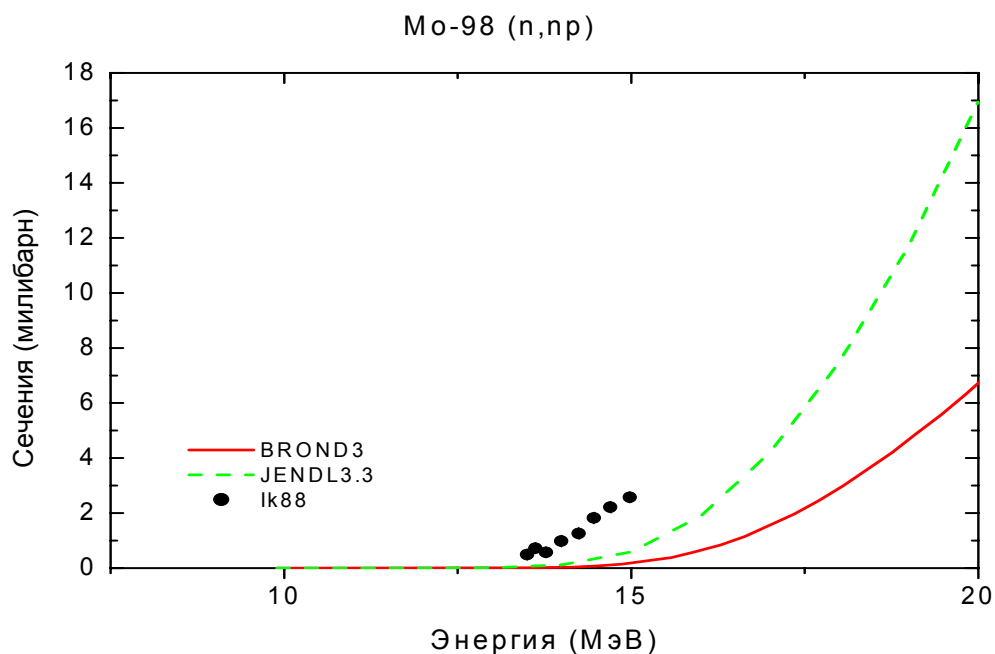


Рис. 15. Сечение реакции (n,np).

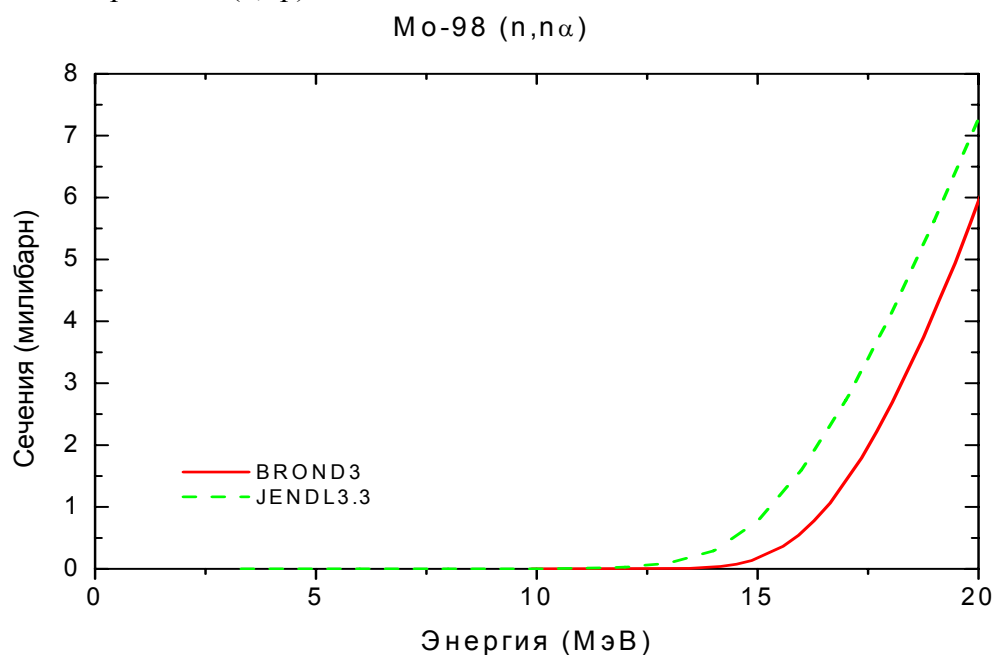


Рис. 16. Сечение реакции (n,nα).

4. Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4).

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/ /. На Рис.17-19 показаны угловые распределения из библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 в сравнении с экспериментальными данными.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов обе оценки учитывают вклад прямых и предравновесных процессов, которые приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов.

42-Mo-98(N,EL),DA Ei1.22E+6

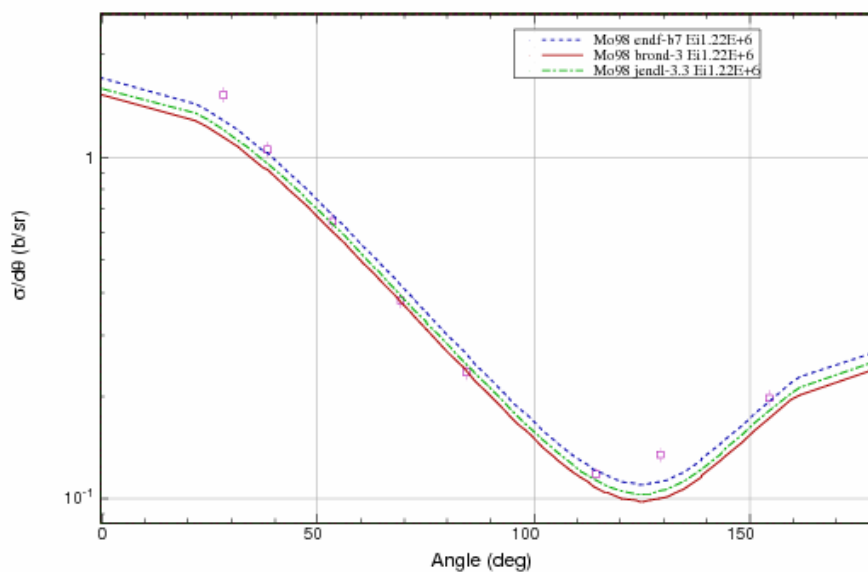


Рис.17. Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов

42-Mo-98(N,EL),DA Ei3.40E+6

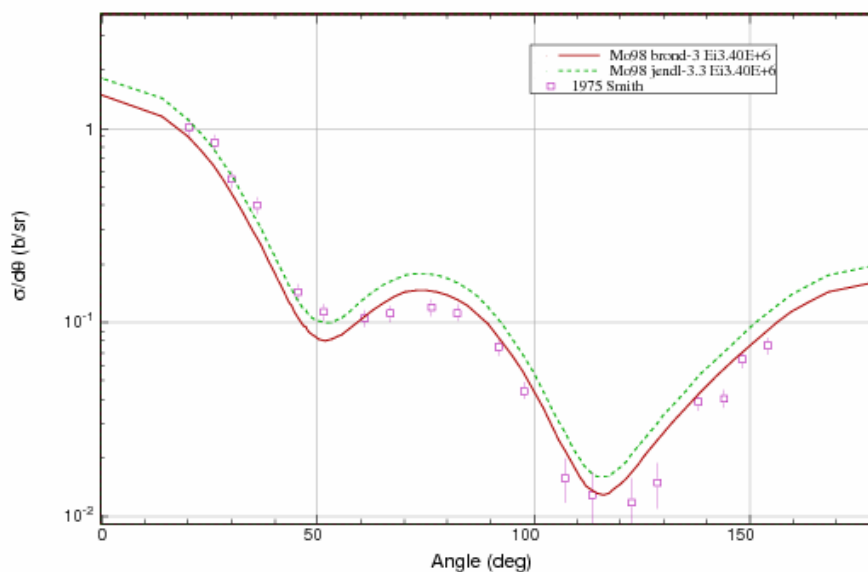


Рис.18. Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов

MT=51-64 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gashy и Dwuck.

5. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6).

MF=6. MT=16,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /5/

6. Множественность образования гамма-лучей (MF=12).

MT=102 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH.

7. Сечения образования гамма-лучей (MF=13)

MT=3 Сечения образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитаны по программе GNASH.

8. Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

MT=3,102 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

9. Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=3 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, где они получены аппроксимацией с помощью эмпирической формулы работы /18/ экспериментальных данных работы /19/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy /6/.

Литература:

1. Kikuchi, Y. et. al. Report JAERI-M 86-030 (1986).
2. CHRIEN, R.E. ET AL. PHYS. REV., C13, 578 (1976) .
3. Weigmann, H. et. al. 1971 Konoxville, 749(1971).
11. Musgrove, A.R.De L. et. al. Nucl. Phys., A270, 108(1976).
12. Mughabghab, S.F. et. al. "Neutron cross sections, vol.1, part A", Academic press(1981).
13. Igarasi, S. and Fukahori, T. Report JAERI-1321(1991).
14. Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B. in "Nuclear reaction data and nuclear reactors" (Triest, 1996). Eds.A.Gordini, G.Reffo., World science, Singapore, 1988, v.1, p.206.
15. Raynal, J. Report IAEA SMR-9/8 (1970), p.281.
16. Koning, A.J., Dalaroche, J.P. Contribution to 3-th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
17. Lohr, J.M. and Haerberli, W. Nucl.Phys. A232, 381 (1974).
18. Avrigeanu, V., Hodgson, P. Avrigeanu, M.: Phys. Rev. C49 (1994) 2136.
19. Dietrich. S.S., Berman, B.L. Atomic Data and Nuclear Data tables.538 (1088) 199.
20. Firestone, R.B. Table of isotopes, eight edition, v.2, New York, 1995.
21. Smith, A.B. Nucl. Phys. 244, 213 (1975).
15. Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
16. Manokhin, V.N., Blokhin, A.I.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, p.871 (1997).
17. Kumabe, I. et al. Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
18. Howerton, S.T. and Plechaty, E.F. Nucl. Sci. Eng., 32, 178 (1968).
19. Morgan, G. and Newman, N. ORNL-TM-5097 (1975).
20. Kapchigashev, S.P. 64Dubna, 104, 1964.
21. Hofman, H. ET et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
22. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
23. Mughabghab, S.F., Report INDC(NDS)-440, Vienna, 2003.

Перечень использованных экспериментальных работ

Полное сечение

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|-----------|----------------|--------------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| Pa80 | M.V.Pasechnik | C,80Kiev,1,304,1980 | 40617 | 4.58+05 | 3.12+06 | 54 |
| Sm75 | A.B.Smith | J,NP/A,244,213,1975 | 10524 | 1.64+06 | 5.51+06 | 88 |
| La73 | P.Lambropoulos | J,NP/A,201,1,1973 | 10277 | 1.01+05 | 1.50+06 | 594 |
| Di68 | M.Divadeenam | J,DA/B,28,3834,1968 | 10523 | 1.30+05 | 6.40+05 | 103 |
| La66 | A.Langsdorf | C, 66Paris, 1, 165, 1966 | 21088 | 1.00+01 | 1.00+07 | 1934 |

Сечение упругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|------------|----------------|-------------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| | | | | | | |
| McDaniel77 | F.D.McDaniel | P,A-KTY-74/77,3,1977 | 10770 | 2.52+06 | | 1 |
| McDaniel74 | F.D.McDaniel | J,PR/C,10,1087,1974 | 10391 | 1.50+06 | | 1 |
| La73 | P.Lambropoulos | J,NP/A,201,1,1973 | 10277 | 3.0+05 | 1.5+06 | 130 |
| Ka66 | S.Kapchigashev | J,YF, 4, (4), 686, 1966 | 40778 | | 5.00+04 | 1 |

Сечение реакции (n,a)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|-----------|----------------|-----------------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| | | | | | | |
| Filat99 | A.A.Filatenkov | R, RI-252, 1999 | 41240 | 1.3+06 | 1.5+06 | 8 |
| Liskien90 | H.Liskien | J, ARI, 41(1990)83 | 22125 | 1.3+07 | 2.0+07 | 15 |
| Ikeda88 | Y.Ikeda | R, JAERI-1312(1988) | 22089 | 1.3+07 | 1.5+07 | 7 |
| Gr87 | L.Greenwood | J, PR/C, 35, 76, 1987 | 12976 | 1.46+07 | 1.48+07 | 4 |
| Rahman85 | M.Rahman | J,NP/A,435(1985)43 | 21990 | 5.9+06 | 9.6+06 | 8 |
| Atsumi84 | H.Atsumi | R,NEANDC(J)106 | 21935 | 1.5+07 | | 1 |
| Am82 | S.Anemiya | J, NST, 19, (10), 781, 1982 | 21840 | 1.48+07 | | 1 |
| Fu78 | K.Fukuda | P, NEANDC(J)-56/U, 44, 1984 | 20841 | 1.46+07 | | 1 |
| Qaim 74 | S.Qaim | C,77Geel,327(1977) | 20513 | 1.5+07 | | 1 |
| Lu70 | W.D.Lu | J, PR/C, 1. 358, 1970 | 10145 | 1.44+07 | | 1 |

Сечение реакции (n,np).

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|-----------|-----------|---------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| | | | | | | |
| Ik88 | Y.Ikeda | R, JAERI-1312, 1988 | 22089 | 1.33+07 | 1.49+07 | 6 |

9. Заключение

7.1. Вывод. На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка **БРОНД-3** является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3. Целесообразно включить файла БРОНД-3 для Мо-98 в библиотеку Росфонд-2005.

7.2. Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

42.8 Молибден-99

Радиоактивен. ($T_{1/2}=66\text{ч}$). Испытывает бета-распад в технеций-99, который, в свою очередь, очень медленно распадается в рутений-99 ($T_{1/2}=2.1\cdot 10^5\text{лет}$).

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка В.Манохина из ФОНД-2.2, как единственная полная оценка, принятая не только в ФОНД-2.2, но и группой специалистов, занимавшихся данными для продуктов деления и включенная в JENDL-2.

В то же время целесообразно провести сравнительный анализ содержащихся в ней данных с данными EAF2003..

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

42.9. Молибден-100

Содержание в естественной смеси: 9.63%.

1. Общие характеристики

1.1. $Z=42$

1.2. $A=100$

1.3. $A_w=99.04920$

1.4. Перечень нейтронных реакций с порогами ниже 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|--------------|----------|---------------------------|----------------------------|
| 04 | n,n' | -0.5356 | 0.5410 | Mo-100 |
| 16 | n,2n | -8.3008 | 8.3846 | Mo-99 |
| 17 | n,3n | -14.2150 | 14.3585 | Mo-98 |
| 22 | n,n α | -3.1840 | 3.2162 | Zr-96 |
| 28 | n,np | -10.6143 | 10.7215 | Nb-99 |
| 102 | n, γ | 5.3990 | | Mo-100 |
| 103 | n,p | -5.4465 | 5.5015 | Nb-100 |
| 104 | n,d | -8.8265 | 8.9156 | Nb-99 |
| 105 | n,t | -9.5335 | 9.6297 | Nb-98 |
| 107 | n, α | 2.4194 | | Zr-97 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.6 Область разрешенных резонансов.

В настоящее время оценка JENDL-3.3 для разрешенных и неразрешенных резонансов включена в оценки JEFF-3.0(=JEFF-3.1), CENDL-3 и последнюю версию ENDF/B-VII. Так как нет экспериментальных данных, указывающих на недостатки этой оценки, то она включена также в оценку БРОНД-3.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценке JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Кикучи /1/ на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию /2/ и радиационному захвату нейтронов /3, 4/. Эти параметры лишь незначительно отличаются от параметров,

рекомендованных на Мугабгхабом и др. /5/. Были приняты средние радиационные ширины 0.065 эВ для s-резонансов и 0.08 для p-резонансов. Верхняя граница резонансной области принята равной 26 кэВ, радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 6.30$ фм /5/ и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) равны:

полное = 5.499 б, упругое = 5.300 б, захвата = 0.199 б,
резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: = 3.86 б.

2.3. Область неразрешенных резонансов.

Для области неразрешенных резонансов все последние оценки, CENDL-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII, заимствуют оценку JENDL-3.3. Верхняя граница области неразрешенных резонансов в JENDL-3.3 принята равной 100 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера. Нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [6]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ.

Для энергии нейтронов 50 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.370E-4$, $S_1 = 5.480E-4$, $S_2 = 0.364E-4$, $Gg = 0.085$ эВ, $R = 6.308$ фм.

На основе проведенного анализа было принято решение, что для области разрешенных и неразрешенных резонансов целесообразно включить в БРОНД-3 оценку JENDL-3.3. При отсутствии новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений в области резонансных нейтронов.

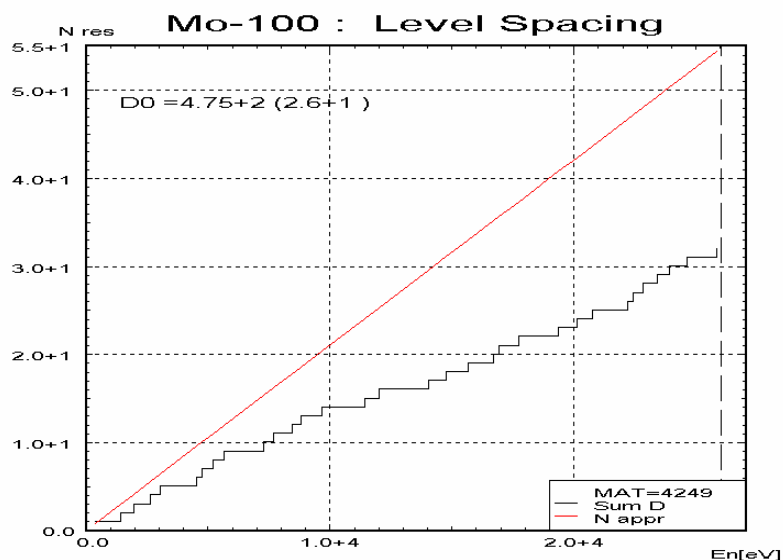


Рис.1. Расстояние между резонансами для S-волны.

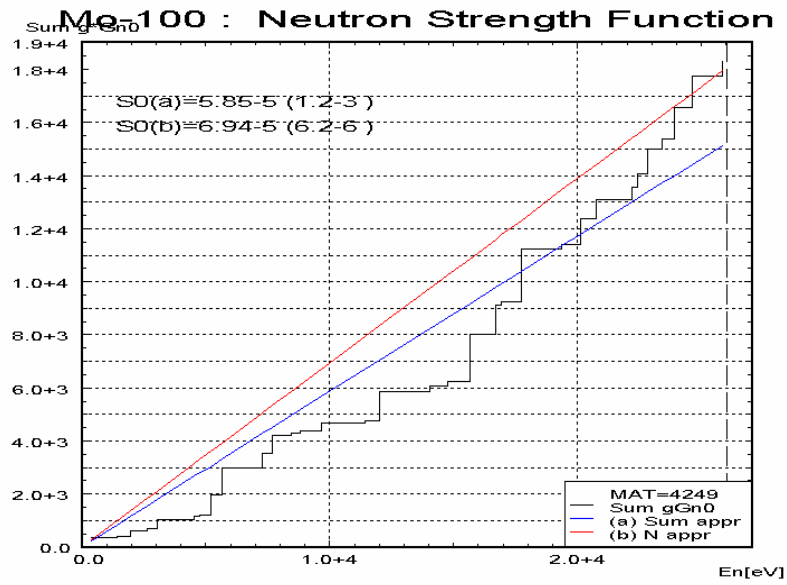


Рис. 1. Нейтронная силовая функция для S-волны.

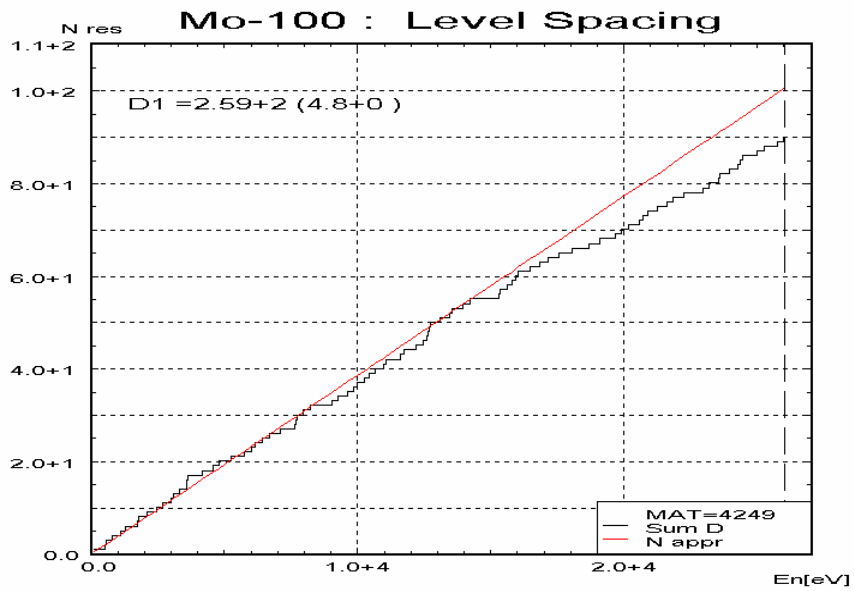


Рис. 3. Расстояние между резонансами для S-волны.

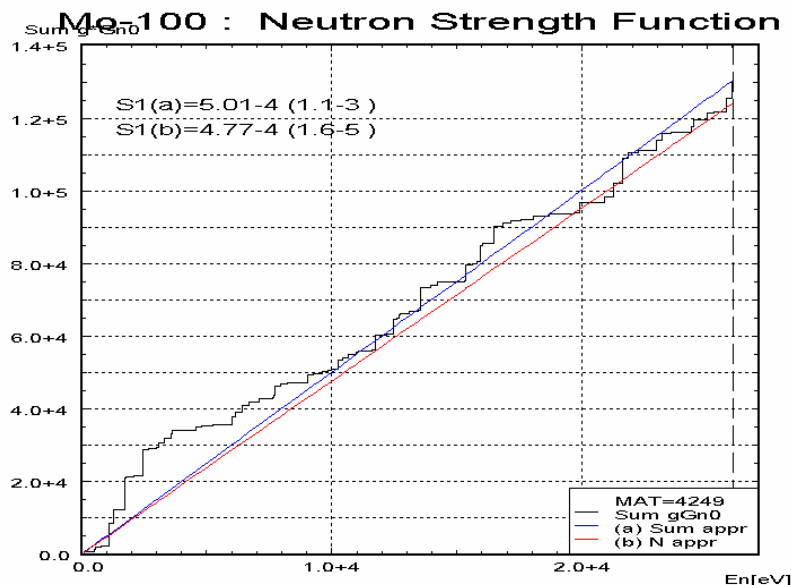


Рис.4. Нейтронная силовая функция для P- волны.

3. Нейтронные сечения вне резонансной области (MF=3).

В данном разделе проведено сравнение данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VI, JENDL-3.3 и JEFF-3.1. Поскольку в библиотеке JEFF-3.1 для изотопов молибдена приняты данные библиотеки JENDL-3.3, сравнение БРОНД-3 производилось с данными библиотеки JENDL-3.3 и ENDF-B7. В библиотеке ENDF-B7 в большинстве случаев также приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Поэтому сравнение с ENDF/B-VII проводилось только тех реакций, данные для которых отличаются от данных JENDL-3.3.

Нейтронные сечения в БРОНД-3 в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH /7/, модифицированной с учетом флуктуаций нейтронных ширин на основе подхода работы /26/. Нейтронные коэффициенты проницаемости рассчитаны по модели сильной связи каналов (программа ECIS /8/) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней 2+ и 3-. Параметры оптического потенциала были взяты из работы /9/, но глубина мнимой части потенциала была несколько занижена, чтобы добиться оптимального описания полных нейтронных сечений при энергиях ниже 3 МэВ.

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /9/, /10/ и /11/, соответственно.

В расчетах радиационных ширин рассматривались E1, M2 и E2 –гамма-переходы. Для силовых функций гамма-переходов использованы параметры, рекомендованные в RIPL-2 /27/. Полная силовая функция нормировалась на величину, соответствующую рассмотренным выше данным о радиационной ширине и плотности нейтронных резонансов. Параметры дискретных уровней для различных каналов распада, обычно, принимались на основе таблиц /13/ и рекомендаций RIPL-2 /27/.

3.1. Полное сечение (MT=1).

В полном сечении в области 0.1-20 МэВ имеются существенные различия между данными указанных библиотек. В этой области данным библиотеки ENDF/BVII следует отдать предпочтение, поскольку они существенно лучше согласуются с экспериментальными данными. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 требуют пересмотра и коррекции.

42-Mo-100(N,TOT),SIG

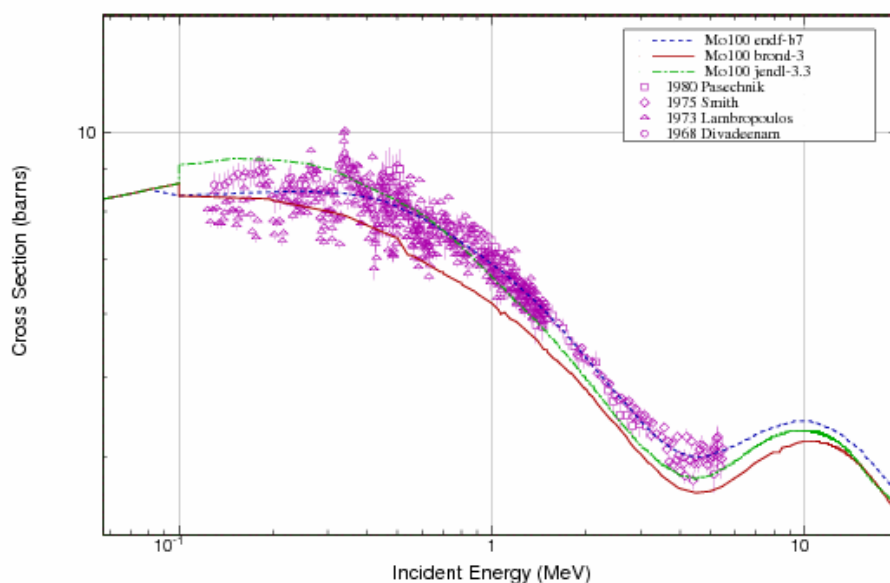


Рис. 5. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

В области энергий 0.1-20 МэВ имеются существенные различия. В этом случае оценки JENDL-3.3 и ENDF-B7 лучше согласуются с экспериментальными данными. Могут быть рекомендованы обе оценки, однако оценка JENDL-3.3 выглядит предпочтительней.

42-Mo-100(N,EL),SIG

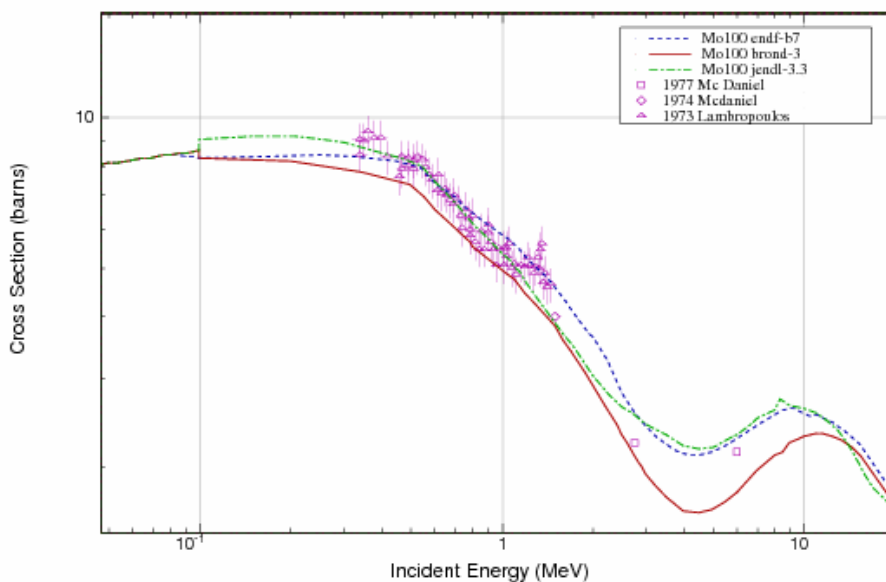


Рис.6. Сечение упругого рассеяния нейтронов в области 0.1-20 МэВ..

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-67).

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями в параметрах оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема уровней, для которых для которых в БРОНД-3 рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Следует отметить, что в JENDL-3.3 парциальные сечения рассчитаны только для уровней 51-54, а в ENDF/B-VII для уровней 51-57. В нижеследующей таблице уровню под номером 1 соответствует уровень неупругого рассеяния под номером 51 в формате ENDF-6.

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 2.5945 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

| N | Энергия уровня, МэВ | Спин | Переход | Энергия гамма-кванта, МэВ | Вероятность перехода, % |
|----|---------------------|------|--|---|-----------------------------------|
| 0 | 0.00000 | | | | |
| 1 | 0.53560 | 2+ | 1 → 0 | 0.53557 | 100 |
| 2 | 0.69440 | 0+ | 2 → 1 | 0.159547 | 100 |
| 3 | 1.06370 | 2+ | 3 → 1 3 → 0 | 0.52824 1.06376 | 75 25 |
| 4 | 1.13610 | 4+ | 4 → 1 | 0.6005 | 100 |
| 5 | 1.46391 | 2+ | 5 → 2 5 → 1 | 0.76877 0.92834 | 56.4 43.6 |
| 6 | 1.50464 | 0+ | 6 → 3 6 → 1 | 0.44084 0.96907 | 27.5 72.5 |
| 7 | 1.60737 | 3+ | 7 → 4 7 → 3 7 → 1 | 0.47139 0.54362 1.07177 | 8.9 52.4 38.7 |
| 8 | 1.76650 | 2+ | 8 → 0 | 1.76650 | 100 |
| 9 | 1.77146 | 4+ | 9 → 4 9 → 3 | 0.63531 0.70768 | 35.5 64.5 |
| 10 | 1.84690 | 6+ | 10 → 4 | 0.71080 | 100 |
| 11 | 1.90837 | 3- | 11 → 3 11 → 1 11 → 0 | 0.8444 1.37273 1.90820 | 66.4 30.5 3.1 |
| 12 | 1.97740 | 2+ | 12 → 5 12 → 3 12 → 2 12 → 1 | 0.51320 0.91372 1.2818 1.44169 | 24.3 25.9 17.0 32.8 |
| 13 | 2.03749 | 4+ | 13 → 13 → 1 | 0.5736 1.5019 | 6.2 93.8 |
| 14 | 2.04277 | 2+ | 14 → 7 14 → 5 14 → 3 14 → 1 14 → 0 | 0.43550 0.57880 0.97895 1.5075 2.0429 | 8.2 34.3 24.3 1.0 9.6 |
| 15 | 2.04300 | | | | |

Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния библиотек JENDL-3.3 и ENDF-B7 совпадают, поскольку в ENDF-B7 принята оценка JENDL-3.3. Оценка BROND-3 существенно лежит выше оценки JENDL-3.3. Это различие связано с тем, что при оценке БРОНД-3 использовалась несферическая оптическая модель и другие улучшенные входные параметры. Интегральное сечение неупругого рассеяния библиотеки CENDL-3 лежит ближе к оценке БРОНД-3 и хорошо согласуется с ней по форме. Оценки сечений неупругого рассеяния на первом уровне существенно различаются, но зависимости BROND-3 и JENDL-3.3 выглядят предпочтительнее.

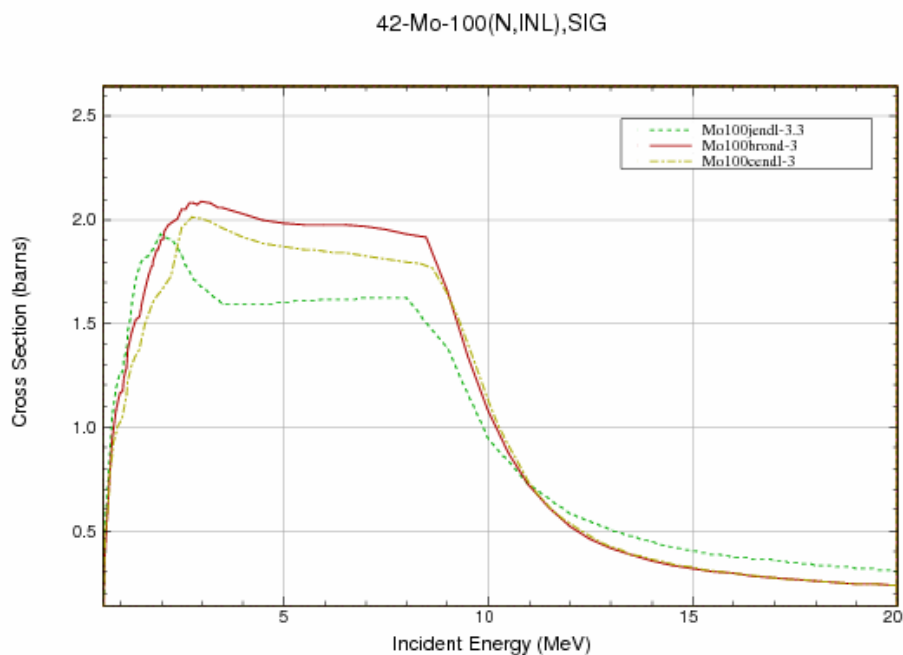


Рис. 7. Интегральное сечение неупругого рассеяния нейтронов.

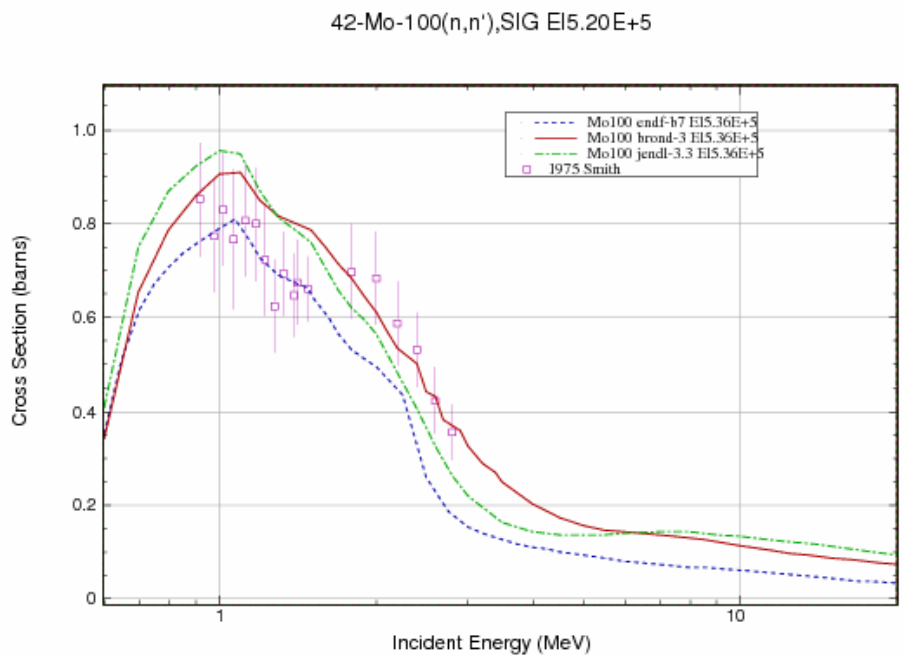


Рис.8. Неупругое рассеяние нейтронов на первом уровне.

3.4. Сечение реакции радиационного захвата (MT=102).

Оценки сечений БРОНД-3 и ENDF/B-VII примерно равноценны, оценка JENDL-3.3 требует существенной коррекции.

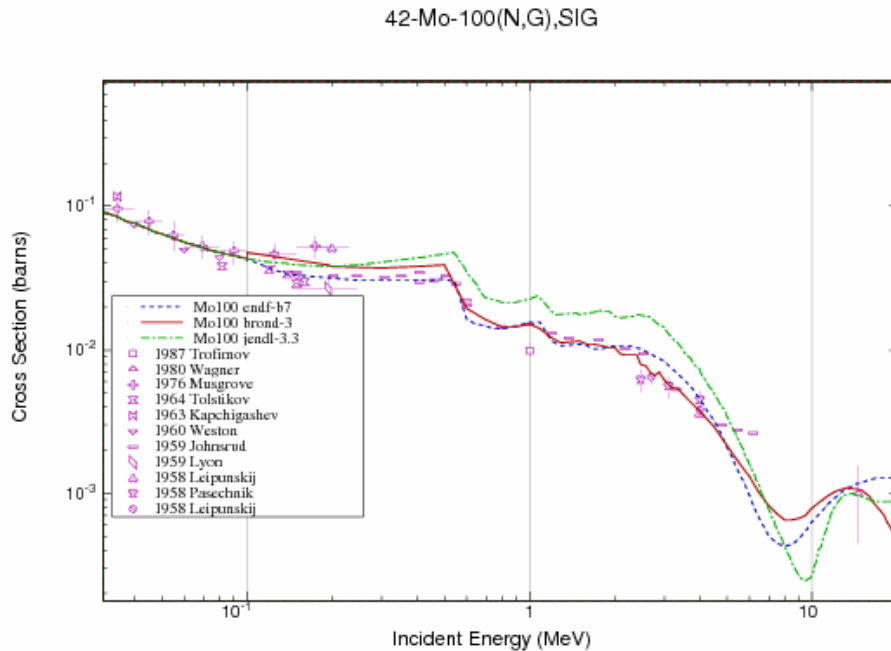


Рис. 9. Сечение реакции радиационного захвата в области 0.1-20 МэВ.

3.5. Сечение реакций (n,2n) и (n,3n) (MT=16, 17).

Сечение реакции (n,2n) из библиотеки BROND-3 лучше согласуется с систематикой функций возбуждения реакции (n,2n) и с экспериментальными данными. Оценка JENDL-3.3 завышена в области 14-18 МэВ, а оценка ENDF-B7 занижена при энергиях 10-14 МэВ.

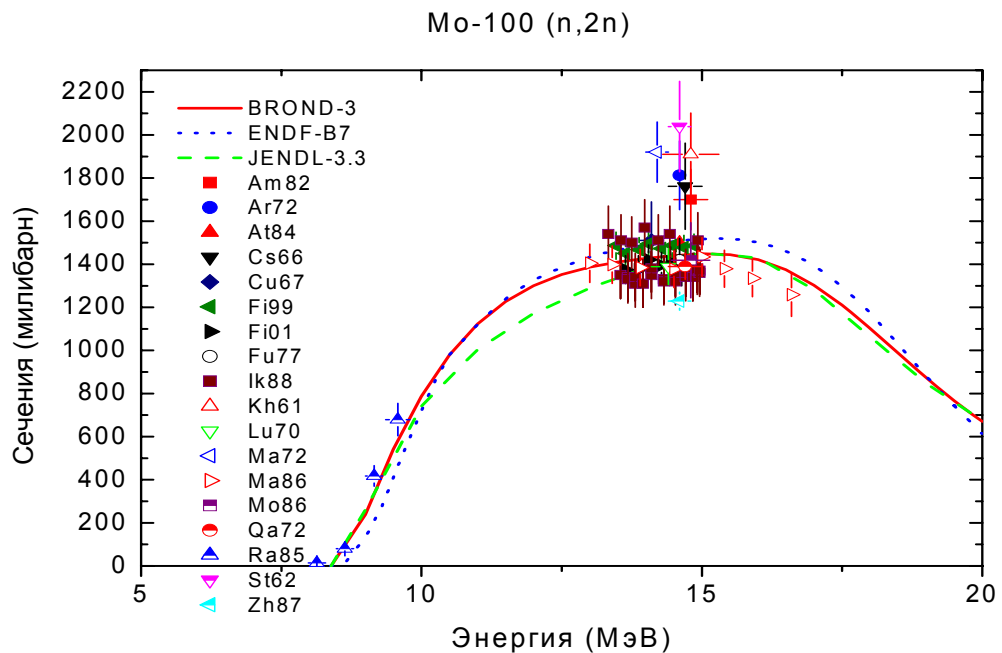


Рис.10. Сечение реакции (n,2n).

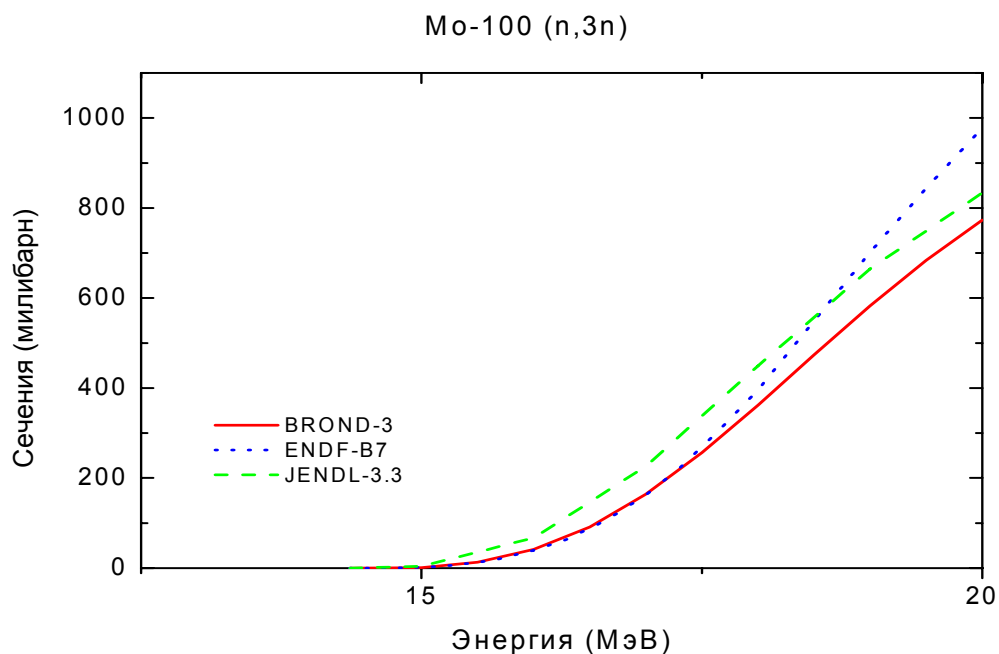


Рис. 11. Сечение реакции (n,3n).

3.5. Сечение реакций (n,p), (n,d),(n,t),(n,a) (MT=103,104,105,107).

Сечение реакции (n,a) (рис.12) в библиотеках BROND-3 и JENDL-3.3 близки и практически равноценны. Сечения реакции (n,a) (рис. 14) в библиотеках BROND-3 и JENDL-3.3 также близки и может быть рекомендовано любое из них. Однако сечение из библиотеки ENDF-B7 противоречит как экспериментальным данным так и эмпирическим систематикам. Сечения реакции (n,d) (рис.13) библиотеки БРОНД-3 более предпочтительны, поскольку лучше согласуются с тенденцией поведения функций возбуждения этой реакции, установленной на основе экспериментальных данных для других изотопов молибдена и циркония. Данные реакции (n,t) в библиотеках БРОНД-3 и ENDF-B7 приняты из JENDL-3.3.

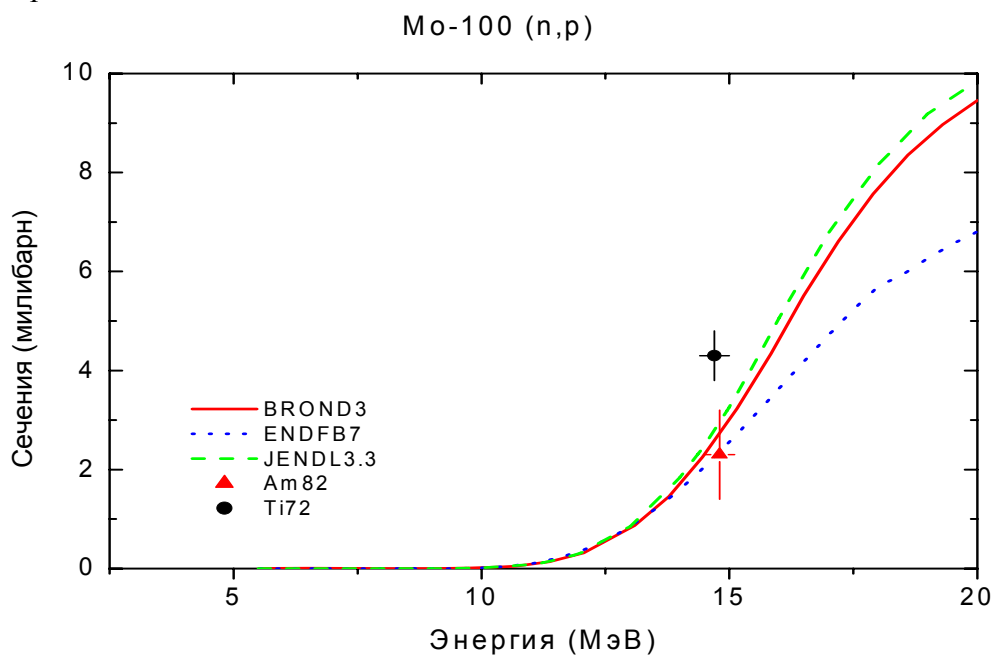


Рис. 12. Сечение реакции (n,p).

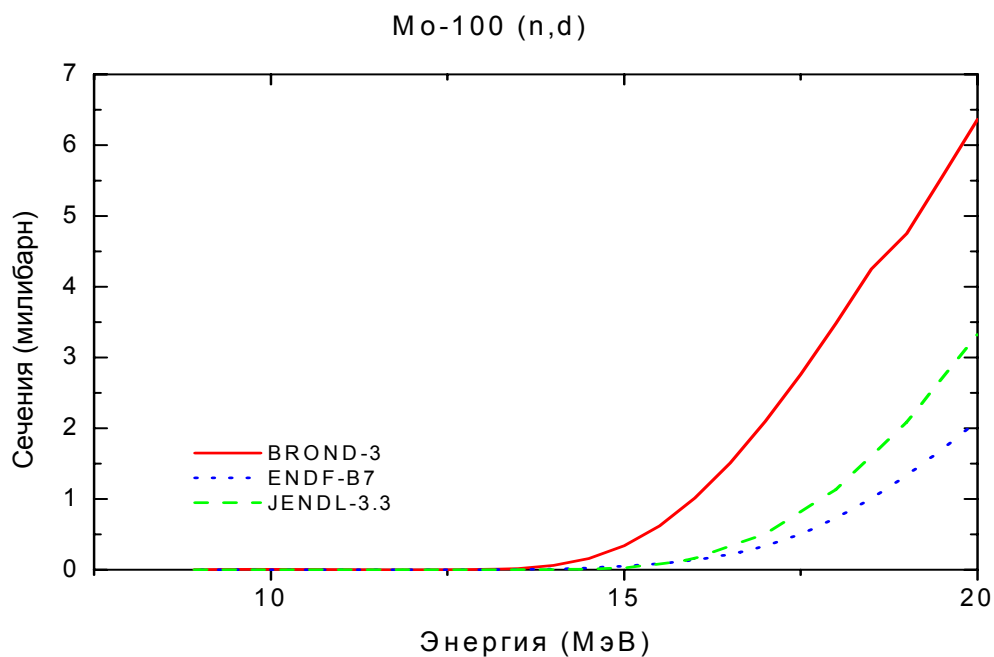


Рис. 13. Сечение реакции (n,d).

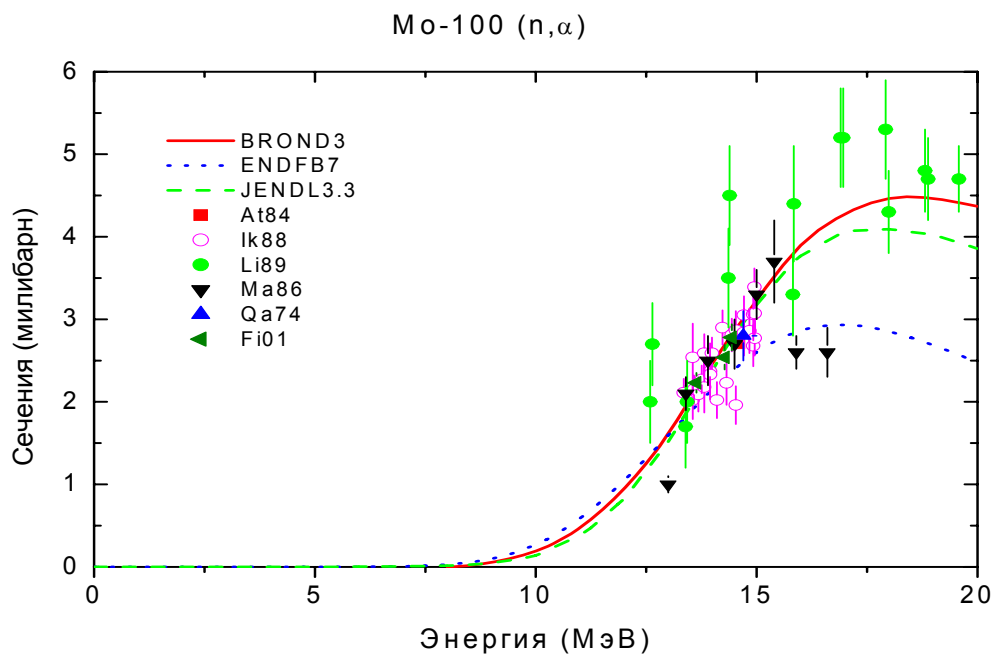


Рис. 14. Сечение реакции (n,α).

3.7. Сечение реакций (n,np) и (n,na) (MT=28,22).

Сечение реакции (n,np) (рис.15) в библиотеках БРОНД-3 и JENDL-3.3 заметно различаются, однако оценка БРОНД-3 лучше согласуется с эмпирической систематикой сечений реакций (n, p) и (n,np). Сечения реакции (n,na) малы и во всех библиотеках различаются несущественно.

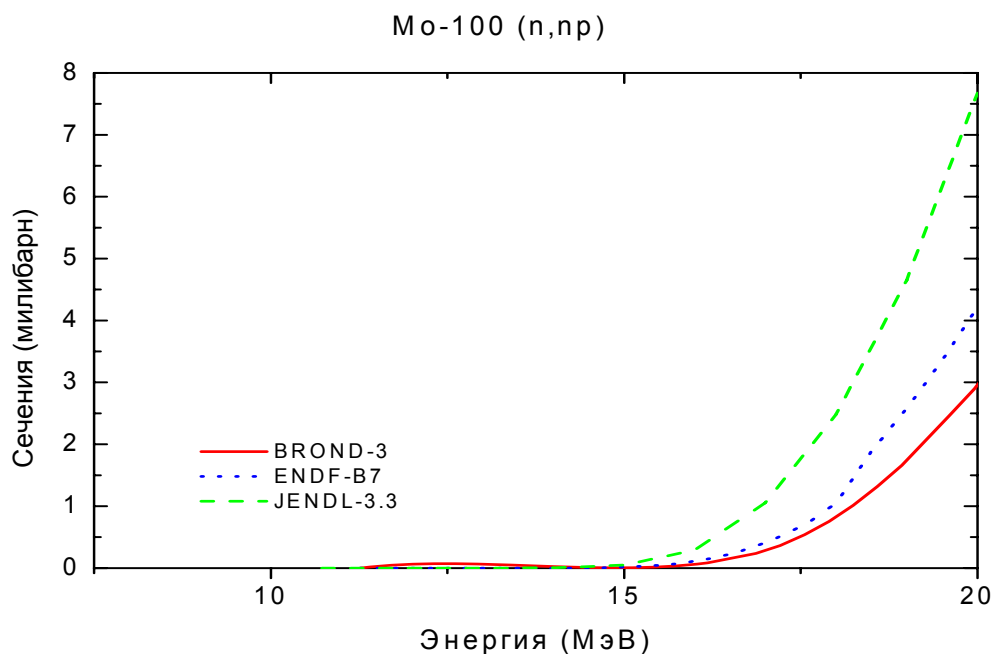


Рис. 15. Сечение реакции (n,np).

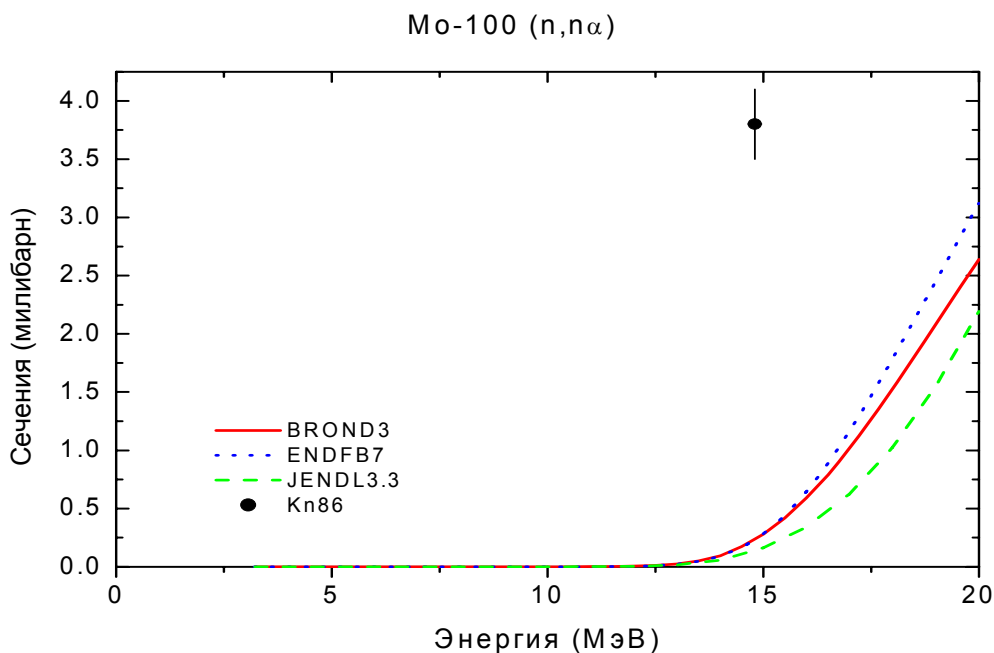


Рис. 16. Сечение реакции(n,nα).

4. Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4).

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/6/.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов обе оценки учитывают вклад прямых и предравновесных процессов, которые приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов.

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gashy и Dwuck.

5. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6).

MT=16,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /17/

6. Множественность образования гамма-лучей (MF=12).

MT=102 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH.

7. Сечения образования гамма-лучей (MF=13)

MT=3 Сечения образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитаны по программе GNASH.

8. Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

MT=3,102 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

9. Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=3 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, где они получены аппроксимацией с помощью эмпирической формулы работы /18/ экспериментальных данных работы /19/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy /6/.

ЛИТЕРАТУРА:

Kikuchi, Y. et. al.: Report JAERI-M 86-030 (1986).

1. Weigmann, H. et al. Phys. Rev., C20, 115 (1969).
2. Weigmann, H. et al.: 1971 Konoxville, 749(1971).
3. Musgrove, A.R.De L. et. al.: Nucl. Phys., A270, 108(1976).
4. Mughabghab, S.F. et. al.: "Neutron cross sections, vol.1, part A", Academic press(1981).
5. Igarasi, S. and Fukahori, T.: Report JAERI-1321(1991).
6. Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: in "Nuclear reaction data and nuclear reactors" (Triest, 1996). Eds.A.Gordini, G.Reffo., World science, Singapore, 1988, v.1, p.206.
7. Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8 (1970), p.281.
8. Koning, A.J., Dalaroche, J.P.: Contribution to 3-th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
9. Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl.Phys. A232, 381 (1974).
10. Avrigeanu, V., Hodgson, P.: Avrigeanu, M.: Phys. Rev. C49 (1994) 2136.
11. Dietrich, S.S., Berman, B.L.: Atomic Data and Nuclear Data tables.538 (1088) 199.
12. Firestone, R.B.: Table of isotopes, eight edition, v.2, New York, 1995.
13. Smith, A.B.: Nucl. Phys. 244, 213 (1975).
14. Manokhin, V.N.: Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
15. Manokhin, V.N., Blokhin, A.I.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, p.871 (1997).
17. Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
18. Howerton, S.T. and Plechaty, E.F.: Nucl. Sci. Eng., 32, 178 (1968).
19. Morgan, G. and Newman, N.: ORNL-TM-5097 (1975).
20. Hofman, H. ET et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
21. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.

Перечень использованных экспериментальных работ

Полное сечение

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|-----------|----------------|---------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| | | | | | | |
| Pa80 | M.V.Pasechnik | C,80Kiev,1,304,1980 | 40617 | 4.58+05 | 3.12+06 | 54 |
| Sm75 | A.B.Smith | J,NP/A,244,213,1975 | 10524 | 1.64+06 | 5.51+06 | 88 |
| La73 | P.Lambropoulos | J,NP/A,201,1,1973 | 10277 | 1.01+05 | 1.50+06 | 594 |
| Di68 | M.Divadeenam | J,DA/B,28,3834,1968 | 10523 | 1.30+05 | 6.40+05 | 103 |

Сечение радиационного захвата

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|------------|------------------|------------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| | | | | | | |
| Trofimov87 | Yu.N.Trofimov | C,87Kiev, 3, 331, 1987 | 41001 | 1.0+06 | | 1 |
| Wy82 | J.M.Wyrick | S,ANL-83-4,196,8204 | 12831 | 3.0+04 | | 1 |
| Wa80 | M.Wagner | J,APA,52,23,80 | 20718 | 1.46+07 | | 1 |
| An79 | R.P.Anand | J,NC/A,50,274,197903 | 30390 | 2.50+04 | | 1 |
| Gl77 | G.Gleason | W,GLEASON,770414 | 10662 | 2.53-02 | | 1 |
| Sr73 | M.Sriramachandra | J,JPI,35,8,7307 | 30503 | 2.40+04 | | 1 |
| To64 | V.A.Tolstikov | J,AE,17,(6),505,64 | 40689 | 5.00+03 | 1.60+05 | 8 |
| Ka63 | S.V.Kapchigashev | J,AE,15,120,63 | 40663 | 1.95+02 | 3.50+04 | 39 |
| We60 | L.W.Weston | J,AP,10,477,60 | 11818 | 4.00+03 | 1.50+05 | 9 |
| Ly59 | W.S.Lyon | J,PR,114,1619,59 | 11407 | 1.95+05 | | 1 |
| Jo59 | A.E.Johnsrud | J,PR,116,927,59 | 11675 | 1.50+05 | 6.20+06 | 24 |
| Ve59 | J.F.Vervier | J,NP,9,569,5901 | 20205 | 2.50+04 | | 1 |
| Le58 | A.I.Leipunskij | C,58Geneva,15,50(2219) | 40244 | 2.70+06 | 4.00+06 | 2 |
| Pa58 | M.V.Pasechnik | C,58Geneva,15,18(2030) | 40336 | 2.50+06 | 4.00+06 | 3 |
| Ko58 | V.N.Kononov | J,AE,5,564,58 | 40421 | 2.40+04 | | 1 |
| Ma57 | R.L.Macklin | J,PR,107,504,57 | 11399 | 2.40+04 | 2.40+04 | 2 |
| Hu51 | V.Hummel | J,PR,82,67,5104 | 11010 | 2.40+04 | | 1 |

Сечение упругого рассеяния

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|------------|----------------|----------------------|---------|----------------------|--------|-------------|
| | | | | | | |
| McDaniel77 | F.D.McDaniel | P,A-KTY-74/77,3,1977 | 10770 | 2.52+06 | | 1 |
| | | | 12782 | 6.00+06 | | 1 |
| McDaniel74 | F.D.McDaniel | J,PR/C,10,1087,1974 | 10391 | 1.50+06 | | 1 |
| La73 | P.Lambropoulos | J,NP/A,201,1,1973 | 10277 | 3.0+05 | 1.5+06 | 130 |

Сечение реакции (n,2n)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число точек |
|------------|----------------|----------------------------|---------|----------------------|---------|-------------|
| | | | | | | |
| Filat01 | A.A.Filatenkov | J,YK-2(1998)10 | 41240 | 1.3+06 | 1.5+06 | 7 |
| Filat99 | A.A.Filatenkov | R, RI-252, 1999 | 41240 | 1.35+07 | 1.49+07 | 8 |
| Ikeda88 | Y.Ikeda | R,JAERI-1312(1988) | 22089 | 1.3+07 | 1.5+07 | 7 |
| Zhou87 | Zhou Muyao | J, CNP, 9,34, 1987 | 30755 | 1.46+07 | | 1 |
| Molla86 | N.I.Molla | R, INDC(BAN)-003, 1986 | 30825 | 1.48+07 | | 1 |
| Marcinko86 | A.Marcinkowski | J, ZP/A,323,91, 1986 | 30809 | 1.3+07 | 1.7+07 | 8 |
| Rahman85 | M.Rahman | J,NP/A,435(1985)43 | 21990 | 5.9+06 | 9.6+06 | 8 |
| Atsumi84 | H.Atsumi | R,NEANDC(J)106 | 21935 | 1.5+07 | | 1 |
| Anemia82 | S.Anemiya | J, NST,19, (10), 781, 1982 | 21840 | 1.48+07 | | 1 |
| Fujino77 | Y.Fujino | R,NEANDC(J)-51U(1977) | 20850 | 1.5+07 | | 1 |
| Qaim72 | S.Qaim | J,NP/A,185(1972)614 | 20536 | 1.5+07 | | 1 |
| Маслов72 | Г.Н.Маслов | J,YK-9(1972)50 | 40136 | 1.4+07 | | 1 |

| | | | | | | |
|-------------|---------------|-------------------------|-------|---------|--|---|
| Araminow72 | J.Araminowich | R, INR-1464(1972)14 | 30264 | 1.5+07 | | 1 |
| Lu70 | W.D.Lu | J,PR,C1(1970)358 | 10145 | 1.4+07 | | 1 |
| Chikai67 | J.Chikai | J,AHP,23(1967)87 | 30033 | 1.6+07 | | 1 |
| Cuzzocrea67 | P. Cuzzocrea | J. NP/A, 103, 616, 1967 | 21141 | 1.41+07 | | 1 |
| Chikai65 | J.Chikai | C,EANDC-50,102(1965) | 30038 | 1.5+07 | | 1 |
| Strohal62 | F.Strohal | J,NP,30(1962)49 | 30008 | 1.4+07 | | 1 |
| Khurana61 | C.S.Khurana | J, NP, 28, 560, 1961 | 31247 | 1.48+07 | | 1 |

Сечение реакции (n,a)

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|-------------|----------------|-------------------------|---------|----------------------|--------|-------------|
| Filat01 | A.A.Filatenkov | J,YK-2(1998)10 | 41240 | 1.3+06 | 1.5+06 | 7 |
| Liskien90 | H.Liskien | J,ARI,41(1990)83 | 22125 | 1.3+07 | 2.0+07 | 15 |
| Ikeda88 | Y.Ikeda | R,JAERI-1312(1988) | 22089 | 1.3+07 | 1.5+07 | 7 |
| Marcinko86 | A.Marcinkowski | | 30940 | 1.3+07 | 1.7+07 | 8 |
| Atsumi84 | H.Atsumi | R,NEANDC(J)106 | 21935 | 1.5+07 | | 1 |
| Qaim 74 | S.Qaim | C,77Geel,327(1977) | 20513 | 1.5+07 | | 1 |
| Cuzzocrea67 | P. Cuzzocrea | J. NP/A, 103, 616, 1967 | 21141 | 1.41+07 | | 1 |

Сечение реакции (n,p)-

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, эВ | | Число Точек |
|-----------|-----------|----------------------------|---------|----------------------|--|-------------|
| Anemia82 | S.Anemiya | J, NST,19, (10), 781, 1982 | 21840 | 1.48+07 | | 1 |
| Tikku72 | V.K.Tikku | C,72 Chandigr,2,115 | 30394 | 1.5+07 | | 1 |

9. Заключение

7.1. Вывод. На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд недостатков, оценка БРОНД-3 может быть принята за основу для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций в БРОНД-3 уточнены на основе согласованных статистических расчетов, расширено существенно количество уровней неупругого рассеяния, для которых рассчитаны парциальные сечения, уточнены также сечения всех пороговых реакций. Возможно включить описанную версию файла **БРОНД-3 для Mo-100 в библиотеку Росфонд-2005**, если провести коррекцию полного сечения во вне резонансной области энергий. Однако в данном случае файл JENDL-3.3 имеет заметные преимущества и может быть включен в Росфонд-2005.

Авторы отбора данных

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

43. ТЕХНЕЦИЙ

Технеций не встречается в природе в чистом виде. Однако имеется шесть долгоживущих (период полураспада более суток) изотопов или изомеров технеция, для которых в библиотеку РОСФОНД должны быть включены нейтронные данные.

43.1. Технеций-95^m

Радиоактивен. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=61$ дн.) в стабильный ⁹⁵Mo.

В ФОНД-2.2 содержится оценка Дж. Копецкого и Д. Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) оценка существенно пересмотрена. Для сечения реакций (n,na), (n,nHe3), (n,He3) и (n,a) в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=9.

На рисунке 1 приведена энергетическая зависимость сечения захвата Tc-95m.

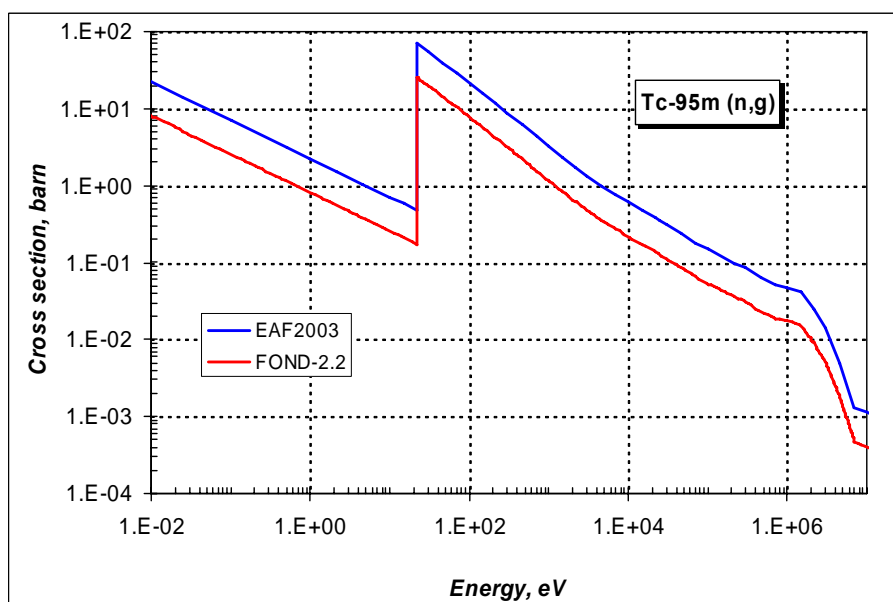


Рисунок 1. Сечение радиационного захвата Tc-95m.

В нижеследующей таблице 1 приведены: сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

Таблица 1 – Сравнение основных нейтронных сечений Tc-95m.

| | σ_c , барн (0.0253 эВ) | RI _c , барн | Средние сечения реакций на спектре деления, мбарн | | | |
|----------|----------------------------------|---------------------------|---|-------|------|---------|
| | | | n,gamma | n,2n | n,p | n,alpha |
| EAF-2003 | 14.1 | 96.9 | 40.4 | 0.791 | 18.1 | 0.636 |
| FOND-2.2 | 5.07 | 34.9 | 14.6 | 0.306 | 5.62 | 0.168 |

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003, сохранив в файле MF=9 данные об образовании долгоживущих изомеров в реакциях (n,a), (n,na), (n,He3), (n,nHe3). Сечение образования основного состояния перенести из файла MF=3 в файл MF=10.

Автор отбора данных
Кошечев В.Н.

43.2. Технеций-96

Долгоживущий изотоп. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=4.28$ дн.) в стабильный ^{96}Mo .

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) оценка существенно пересмотрена. Сечения реакций (n,2n), (n,a), (n,na), (n,g), (n,nHe3) и (n,2p), в которых образуются долгоживущие изомеры, представлены в файле MF=9.

На рисунке 2 приведена энергетическая зависимость сечения захвата Тс-96.

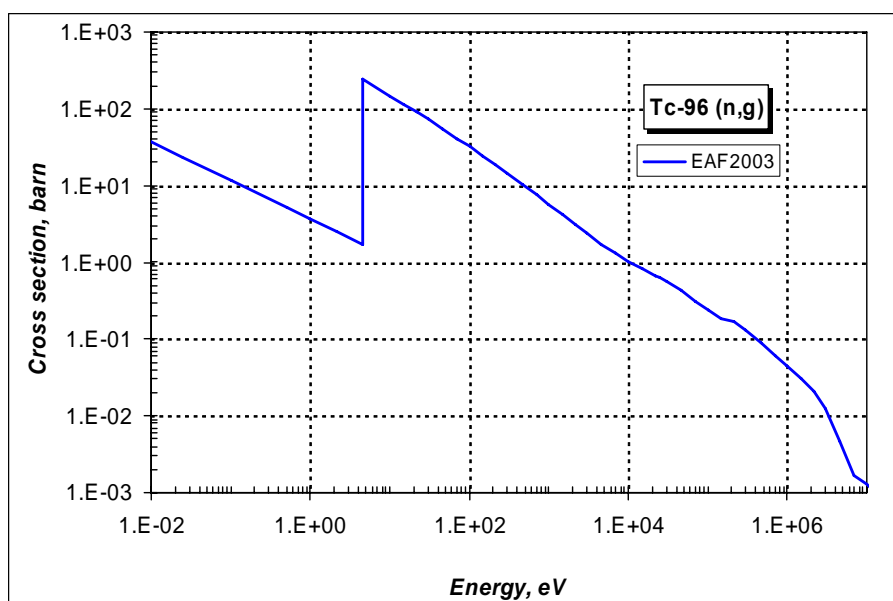


Рисунок 2. Сечение радиационного захвата Тс-96

В таблице 2 сравниваются сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

Таблица 2 – Сравнение основных нейтронных сечений Тс-96.

| | σ_c , барн (0.0253 эВ) | RI_c , барн | Средние сечения реакций на спектре деления, мбарн | | | |
|----------|----------------------------------|------------------|---|------|------|---------|
| | | | n,gamma | n,2n | n,p | n,alpha |
| EAF-2003 | 23.5 | 374.4 | 46.8 | 2.58 | 2.00 | 0.320 |
| FOND-2.2 | - | - | - | 3.62 | - | - |

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003, сохранив в файле MF=9 данные об образовании долгоживущих изомеров в реакциях (n,2n), (n,a), (n,na), (n,g), (n,nHe3) и (n,2p).

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

43.3. Технеций-97^g

Радиоактивен. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=4.21 \cdot 10^6$ г.) в стабильный ⁹⁷Mo.

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) эта оценка пересмотрена. Сечения реакций, в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=9.

На рисунке 3 приведена энергетическая зависимость сечения радиационного захвата.

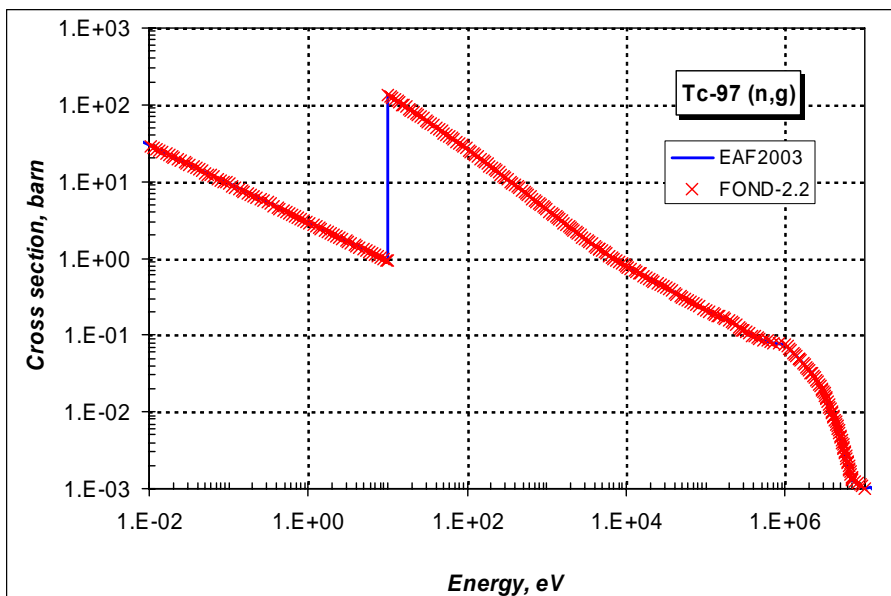


Рисунок 3. Сечение радиационного захвата Тс-97^g.

Как видно из рисунка 3, сечение захвата в новой оценке не изменилось.

В таблице 3 приведены (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER. Как видно, сечения пороговых реакций пересмотрены.

Таблица 3 – Сравнение основных нейтронных сечений Тс-97.

| | σ_c , барн (0.0253 эВ) | RI _c , барн | Средние сечения реакций на спектре деления, мбарн | | | |
|----------|----------------------------------|---------------------------|---|------|-------|---------|
| | | | n,gamma | n,2n | n,p | n,alpha |
| EAF-2003 | 18.47 | 194.5 | 55.5 | 1.22 | 0.548 | 0.068 |
| FOND-2.2 | 18.47 | 194.5 | 55.5 | 1.29 | 1.32 | 0.088 |

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003, сохранив в файле MF=9 данные об образовании долгоживущих изомеров в реакциях (n,3n), (n,a), (n,pa), (n,t) и (n,n').

Автор отбора данных
Кошечев В.Н.

43.4. Технеций-97^m

Долгоживущий изомер. Испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=91.4$ дн.) в стабильный ⁹⁷Mo.

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) эта оценка пересмотрена. Сечения реакций, в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=9.

На рисунке 4 приведена энергетическая зависимость сечения радиационного захвата.

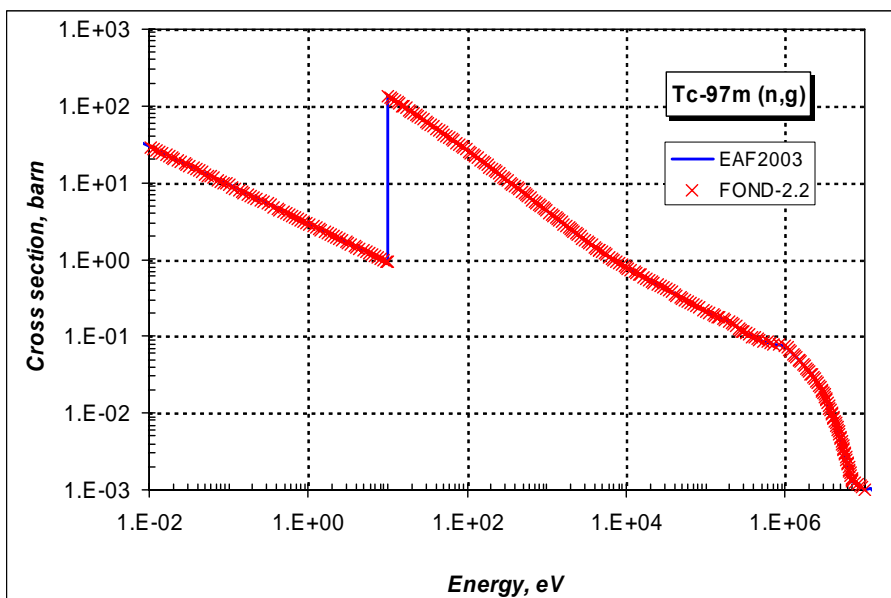


Рисунок 4. Сечение радиационного захвата Tc-97m.

Как видно из рисунка 4, сечение захвата в новой оценке не изменилось.

В таблице 4 приводятся (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

Таблица 4 – Сравнение основных нейтронных сечений Tc-97m.

| | σ_c , барн (0.0253 эВ) | RI_c , барн | Средние сечения реакций на спектре деления, мбарн | | | |
|----------|----------------------------------|------------------|---|------|------|---------|
| | | | n,gamma | n,2n | n,p | n,alpha |
| EAF-2003 | 18.47 | 194.5 | 55.5 | 1.38 | 0.98 | 0.080 |
| FOND-2.2 | 18.47 | 194.5 | 55.5 | 0.36 | 1.32 | 0.027 |

Как видно из таблицы 4, сечения пороговых реакций пересмотрены. Ясно, что надежность оцененных данных для рассматриваемых нейтронно-дефицитных нуклидов невысока.

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003, сохранив в файле MF=9 данные об образовании долгоживущих изомеров в реакциях (n,3n), (n,a), (n,t) и (n,na). Сечение образования основного состояния перенести из файла MF=3 в файл MF=10.

Автор отбора данных
Кошечев В.Н.

43.5. Технеций-98

Радиоактивен. Испытывает бета-распад ($T_{1/2}=4.2 \cdot 10^6$ г.) в стабильный ^{98}Ru .

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа 1992 г. В EAF-2003 (Форрест, Копецкий, Саблет) эта оценка пересмотрена. Сечения реакций, в которых образуются изомеры, представлены в файле MF=9.

На рисунке 5 приведена энергетическая зависимость сечения радиационного захвата.

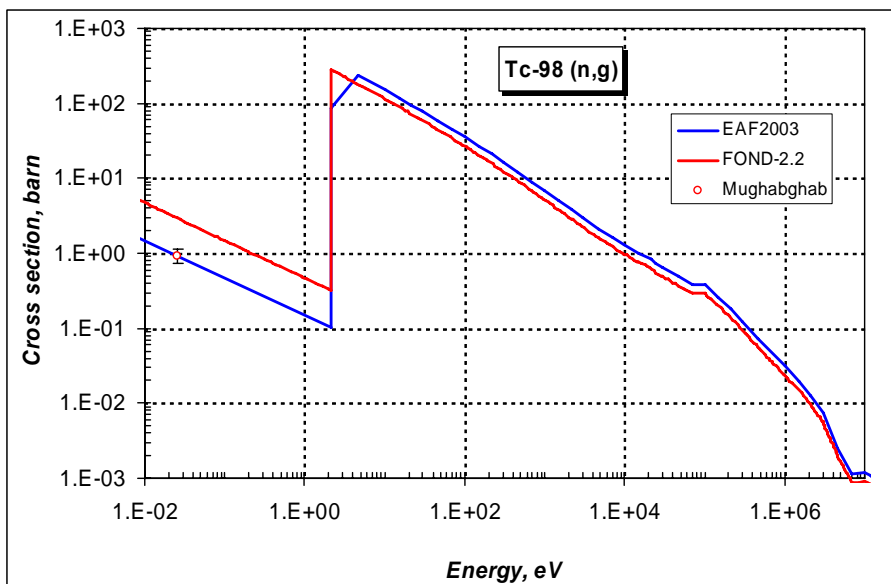


Рисунок 5. Сечение радиационного захвата Тс-98.

Как видно из рисунка 5, сечение захвата в новой оценке откорректировано на значение, рекомендованное в компиляции Мухабхаба.

В таблице 5 приводятся (в барнах): сечение захвата в тепловой точке, резонансный интеграл и сечения основных реакций, усредненные по спектру деления программой INTER.

Таблица 5 – Сравнение основных нейтронных сечений Тс-98.

| | σ_c , барн (0.0253 эВ) | RI_c , барн | Средние сечения реакций на спектре деления, мбарн | | | |
|----------|----------------------------------|------------------|---|------|-------|---------|
| | | | n,gamma | n,2n | n,p | n,alpha |
| EAF-2003 | 0.930 | 497.7 | 41.7 | 6.65 | 0.094 | 0.070 |
| FOND-2.2 | 2.95 | 465.2 | 31.7 | 5.31 | 1.95 | 0.091 |

Как видно из таблицы 5, сечения всех реакций пересмотрены значительно.

Заключение

В РОСФОНД включить оценку из EAF-2003, сохранив в файле MF=9 данные об образовании долгоживущих изомеров в реакциях (n,2n), (n,a) и (n,nHe3).

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

43.6. Технеций-99

Радиоактивен. Испытывает бета-распад ($T_{1/2}=2.111 \cdot 10^5$ г.) в стабильный ^{99}Ru .

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных фигурируют три различных оценки:

- 1) P. Oblozinsky et al, оценка выполнена в 2005 г. и содержится в библиотеке ENDF/B-VIIb2.
- 2) F. Gunsing, P. Serot, A. Koning, оценка выполнена в 2005 г для JEFF-3.1.
- 3) T.Nakagawa et al, 1990 с пересмотром резонансных параметров и добавлением данных об образовании фотонов в нейтронных реакциях в 2002 г. Содержится в JENDL-3.3.

1. Резонансная область

1.1. Область разрешенных резонансов.

Область разрешенных резонансов описывается во всех трех оценках. В таблице 6 приведены характеристики этой области.

Таблица 6 - Область разрешенных резонансов для Tc-99.

| Оценка | E гран., эВ | Число s-рез.-ов. | | Emax, эВ | Число p-рез.-ов. | | | | Emax, эВ | Сумма s + p |
|------------------|-------------|------------------|-----|----------|------------------|-----|-----|-----|----------|-------------|
| | | J=4 | J=5 | | J=3 | J=4 | J=5 | J=6 | | |
| Oblozinsky et al | 6370 | 276 | | 6337.4 | 262 | | | | 6366.5 | 538 |
| | | J=4 | J=5 | | J=3 | J=4 | J=5 | J=6 | | |
| | | 128 | 148 | | 43 | 58 | 84 | 77 | | |
| Gunsing et al. | 6000 | 539 | | 11017.3 | 142 | | | | 8266.1 | 681 |
| | | J=4 | J=5 | | J=3 | J=4 | J=5 | J=6 | | |
| | | 235 | 304 | | 29 | 31 | 41 | 41 | | |
| Nakagawa et al | 6000 | 518 | | 10018.7 | 142 | | | | 8266.1 | 660 |
| | | J=4 | J=5 | | J=3 | J=4 | J=5 | J=6 | | |
| | | 227 | 291 | | 27 | 33 | 44 | 38 | | |

Как видно из таблицы 6, числа рассмотренных в оценках резонансов близки, однако, в определении четностей и спинов резонансов имеются существенные различия. Имеются различия и в принимаемых нейтронных и радиационных ширинах

Сравним теперь энергетические зависимости плотностей уровней, следующие из рассматриваемых оценок. Разделим интервал от 0 до 6 кэВ на две равные части и сравним числа s- и p-резонансов в каждой из них (см. табл.7).

Таблица 7. Сравнение чисел резонансов в равных соседних интервалах энергии

| Оценка | Сумма (s- + p-) | Число s- резонансов. | | Число p- резонансов | |
|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| | | От 0 до 3.0 кэВ | От 3.0 до 6 кэВ | От 0 3.0 кэВ | От 3.0 до 6 кэВ |
| Oblozinsky et al. | 519 | 143 | 124 | 151 | 101 |
| Gunsing et al. | 486 | 185 | 171 | 104 | 26 |
| Nakagawa et al. | 485 | 190 | 168 | 98 | 29 |

Из приведенной в таблицах 6 и 7 информации следует, что более корректной в резонансной области энергий является оценка Облозинского и др.

Сравнение значений сечения в тепловой точке и резонансного интеграла, полученных с помощью программы INTER приводится в таблице 8.

Таблица 8 – Сравнение резонансных свойств сечения захвата Тс-99.

| | σ_c , барн (0.0253 эВ) | RI_c , барн |
|-------------------|----------------------------------|---------------|
| Oblozinsky et al. | 22.80 | 361.3 |
| Gunsing et al. | 22.82 | 322.6 |
| Nakagawa et al. | 22.77 | 323.0 |
| Мухабхаб | 20±1 | 320±20 |

Как видно из таблицы 8, сечение радиационного захвата во всех оценках согласуется между собой и ориентировано на последние измерения сечения в тепловой точке, выполненные группой K.Furutaka et al., доложенные на конференции в Санта Фе в 2004 г. (22.8±1.8 барн).

Отметим, что резонансный интеграл в оценке ENDF/B сильно завышен. Такое расхождение вызвано сильными различиями в оценке резонансных ширин для первого резонансного уровня и псевдоуровня при отрицательной энергии.

1.2. Область неразрешенных резонансов

Область неразрешенных резонансов простирается

в оценке ENDF/B-VII до 141.9 кэВ;

в оценке JEFF-3.1 и JENDL-3.3 – до 100 кэВ.

Чтобы сделать заключение о преимуществе той или иной оценки сравним сечения, полученные с помощью средних резонансных параметров с имеющимися экспериментальными данными.

На рисунках 6 и 7 в области энергий до 100 кэВ сравниваются оцененные полное сечение и сечение захвата с имеющимися экспериментальными данными.

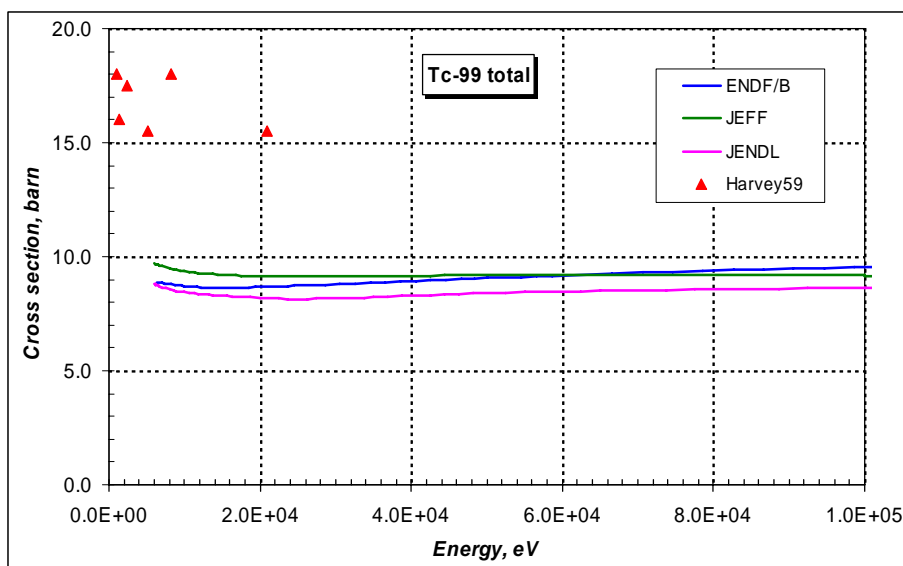


Рисунок 6. Полное сечение Тс-99 в области неразрешенных резонансов

Из приведенного на рисунке 6 сравнения полного сечения видно, что экспериментальные данные Харви не согласуются с оцененными значениями сечения. Из приведенного в информационной секции (MT=451) пояснения к оценке JEFF-3.1 следует, что в этой области авторы оценки ориентировались на свои экспериментальные данные по полному сечению, которые нам оказались недоступны. Информация в графическом виде об этом была опубликована в трудах конференции в Тсукобо (2001г).

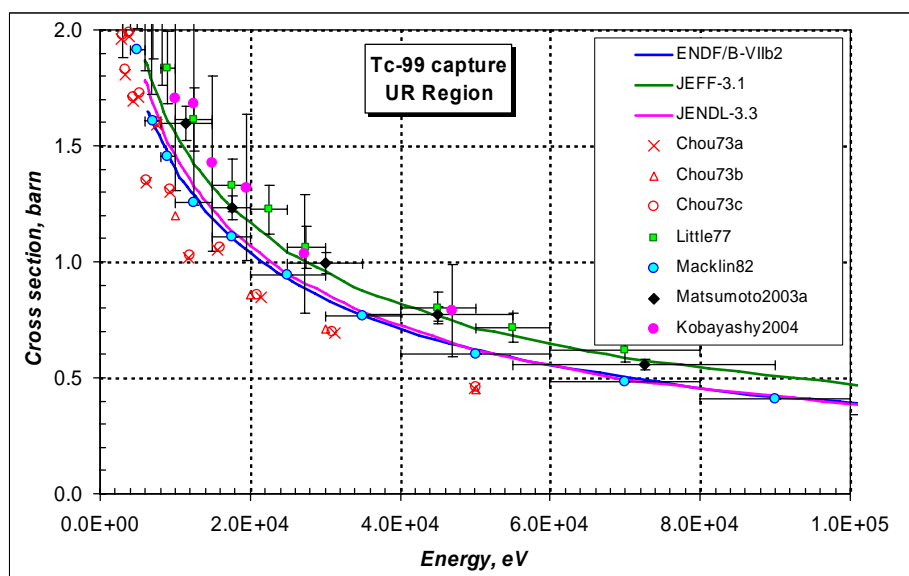


Рисунок 7. Сечение радиационного захвата Tc-99 в области неразрешенных резонансов.

Из приведенного на рисунке 7 сравнения сечения радиационного захвата видно, что в этой области существуют три совокупности экспериментальных данных. Первая из них – это эксперименты, выполненные группой Чо в 1973 году. Они являются самыми низкими по значениям. Во второй группе находится один эксперимент Маклина, выполненный в 1982 году. На эксперимент Маклина ориентированы оценки сечений в библиотеках ENDF/B-VII и JENDL-3.3. В третьей группе находится эксперимент Литтла (1972 г.). Значения его являются самыми высокими, однако в последние годы они получили подтверждение. Так появились экспериментальные данные группы Мацумото и др. (2002 г.), Кобаяши и др. (2004), которые хорошо согласуются с данными Литтла. На эту группу экспериментальных данных ориентирована оценка Гасинга и др. (JEFF-3.1). Отметим также, что в более высокой области энергий (выше 200 кэВ) экспериментальные данные Мацумото хорошо согласуются с данными Маклина.

Подводя итог рассмотрению оцененных данных в резонансной области, приходим к заключению, что из трех сравниваемых оценок в области разрешенных резонансов целесообразно принять оценку Облозинского (ENDF/B-VII), откорректировав резонансные параметры двух первых уровней для уменьшения резонансного интеграла. А в области неразрешенных резонансов следует принять оценку Гасинга (JEFF-3.1).

2. Сечения вне резонансной области.

2.1. Полное сечение.

Оценки полного сечения вне резонансной области сравниваются друг с другом и с экспериментальными данными на рисунке 8.

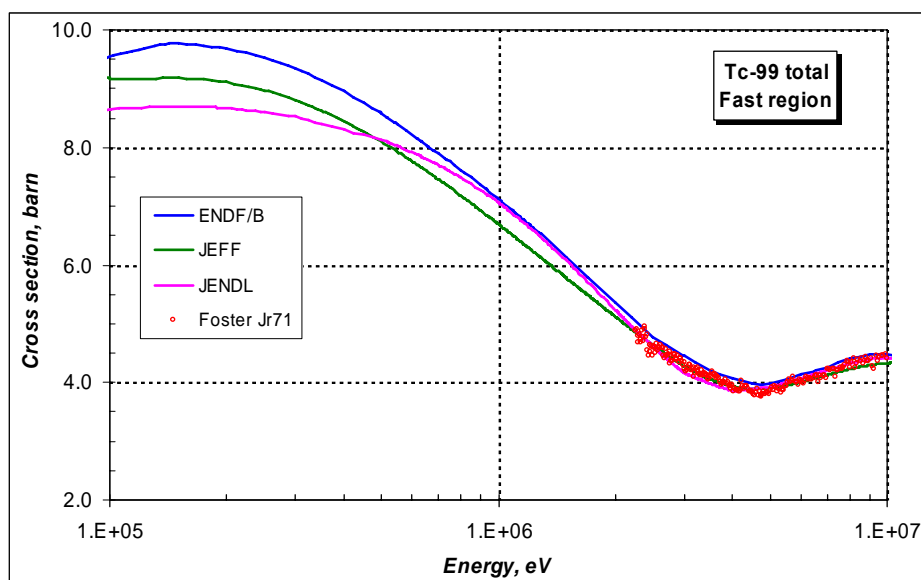


Рисунок 8. Полное сечение Tc-99 вне резонансной области

Из приведенного на рисунке 8 сравнения видно, что в области энергий выше 1 МэВ все оценки хорошо согласуются друг с другом, особенно там, где имеются экспериментальные данные Фостера (1971), выполненные с хорошим разрешением.

Представляется целесообразным принять в РОСФОНД оценку полного сечения из JEFF-3.1.

2.2. Сечение радиационного захвата

Сравнение оцененных сечений радиационного захвата Tc-99 вне резонансной области с экспериментальными данными показано на рисунке 9.

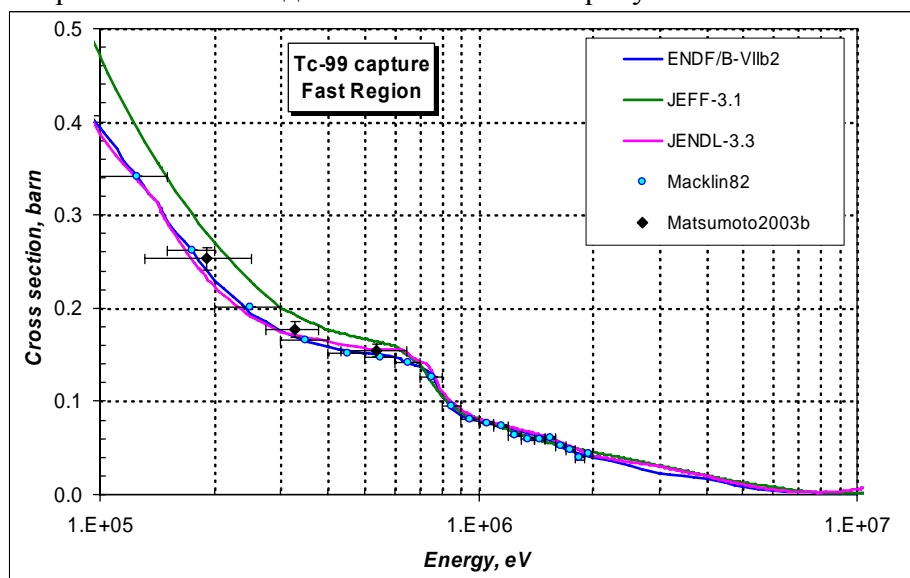


Рисунок 9. Сечение радиационного захвата Tc-99 в области энергий до 10 МэВ.

Из приведенного на рисунке 9 сравнения видно, что в области энергий выше 600 кэВ оцененные сечения согласуются между собой и экспериментальными данными Маклина (1972 г.) и Мацумото (2003 г.). В области энергий от 100 до 600 кэВ предпочтение следует отдать оценке Гансинга, поскольку форма кривой JEFF из высокой области энергий согласована с формой кривой в области неразрешенных резонансов.

Представляется целесообразным принять в РОСФОНД оценку сечения радиационного захвата из JEFF-3.1.

2.3. Сечение неупругого рассеяния.

На рисунке 10 оценки сечения суммарного неупругого рассеяния сравниваются с экспериментальными данными.

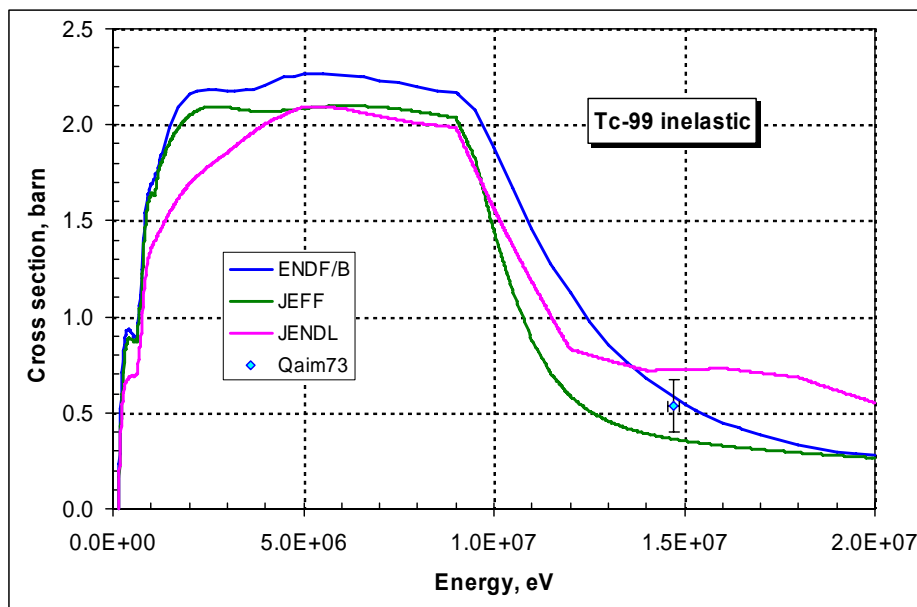


Рисунок 10. Сечение неупругого рассеяния нейтронов Тс-99.

Оценки хорошо согласуются друг с другом и более или менее согласуются с единственным экспериментом при 14.7 МэВ.

Число индивидуальных уровней, учитывающихся в теоретических расчетах неупругих процессов на Тс-99, примерно одинаково и составляет ~ 70.

Представляется целесообразным принять в РОСФОНД для сечений неупругого рассеяния оценку в ENDF/B-VII.

2.4. Сечения реакций (n,2n) и (n,3n)

Реакция (n,2n) имеет порог 9.06 МэВ. Оцененные сечения этой реакции показаны на рисунке 11. Они близки друг к другу и подтверждаются экспериментальными данными в равной степени.

На этом же рисунке приводится сравнение оцененных сечений реакции (n,3n). Они также близки друг к другу, согласуясь по значениям и форме с сечениями реакции (n,2n). Экспериментальные данные отсутствуют.

Поскольку в результате реакции (n,3n) образуется долгоживущий изотоп Тс-97m ($T_{1/2}=91.4$ д.) то целесообразно включить в файл данные о вероятности образования этого долгоживущего изомера. Их можно взять из библиотеки EAF-2003.

В РОСФОНД рекомендуется оценка ENDF/B-VII.

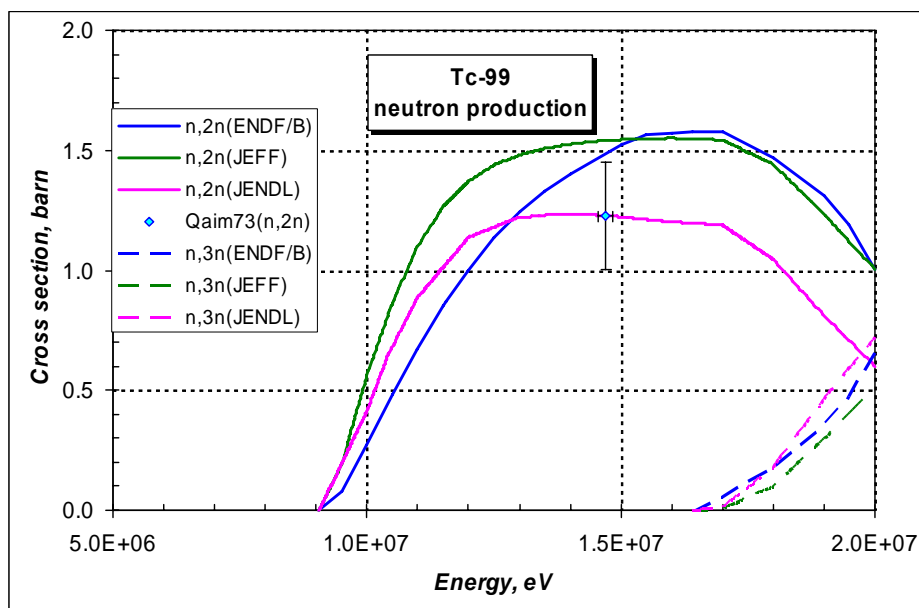


Рис.11. Сечение реакции (n,2n).

2.5. Сечения реакций (n,p).

Реакция (n,p) имеет порог 1.007 МэВ. Оцененные сечения этой реакцией показаны на рисунке 12. Там же приводятся и имеющиеся экспериментальные данные.

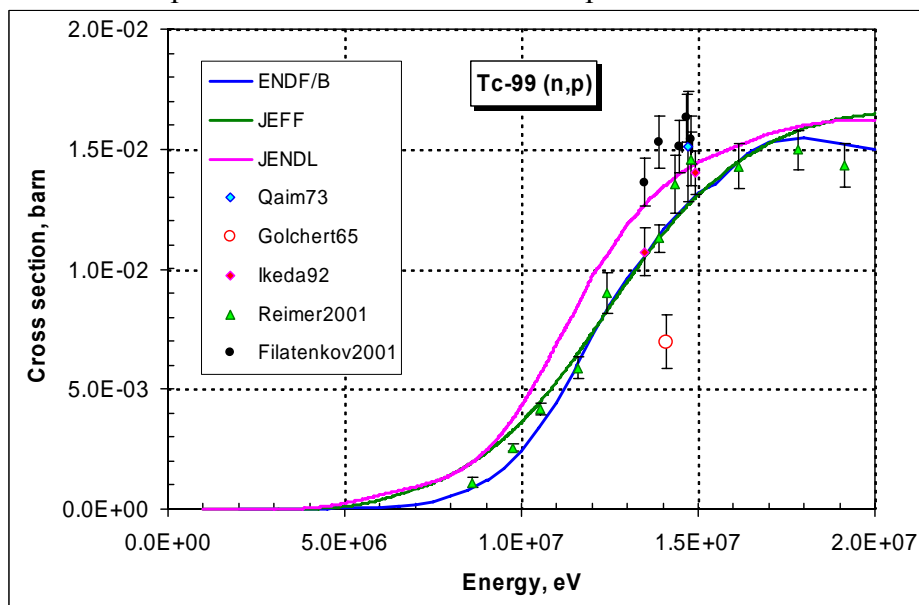


Рисунок 12. Сечение реакций (n,p) на Tc-99.

Из приведенного на рисунке 12 сравнения видно, что наилучшим образом с экспериментальными данными согласуется оценка ENDF/B-VII. Оценка JEF-3.1 так же неплохо описывает экспериментальные данные. Оценка JENDL-3.3 завышает сечение реакции ориентируясь на эксперимент Qaim (1973 г.).

В РОСФОНД рекомендуются оценки ENDF/B-VII.

2.6. Сечения реакций (n,a) и (n,na).

Реакция(n,a) теоретически не имеет порога реакции, однако заметной она становится при энергиях выше 5. МэВ. Оцененные сечения этой реакции показаны на рисунке 13 вместе с имеющимися экспериментальными данными. Здесь наблюдается ситуация аналогичная ситуации с сечением реакции (n,p).

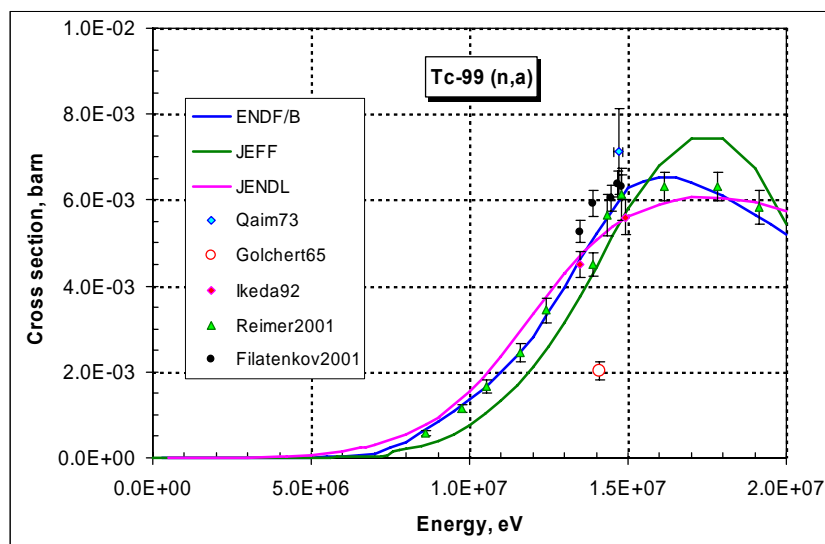


Рисунок 13. Сечение реакции (n,a) на Tc-99.

В РОСФОНД рекомендуется оценка ENDF/B-VII.

Реакция(n,na) имеет порог 2.996 МэВ, однако заметной она становится при энергии ~ 13 МэВ. В результате этой реакции может образовываться долгоживущий изотоп Nb-95m ($T_{1/2}=86.6$ ч.). Оцененные сечения этой реакции из библиотек общего пользования приведены на рисунке 14 вместе с экспериментальными данными.

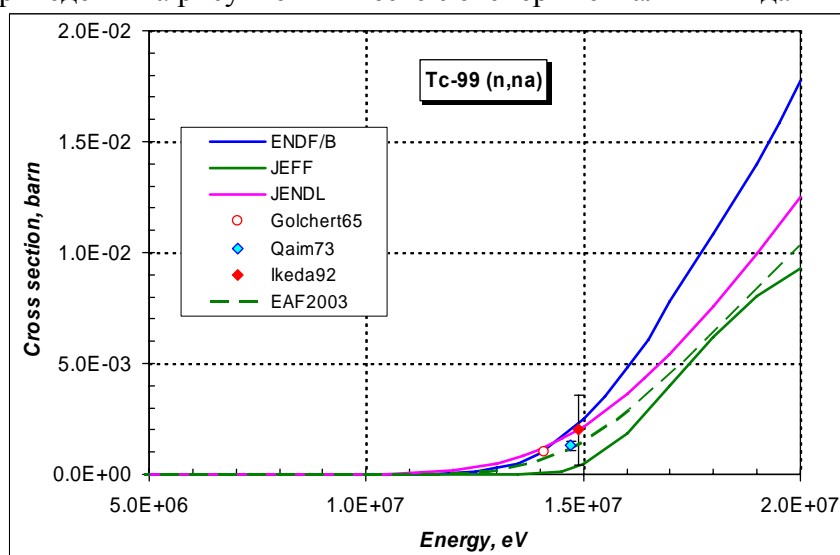


Рисунок 14. Сечение реакции (n,na) на Tc-99.

Из приведенного на рисунке 14 сравнения видно, что наиболее оптимальной является оценка JENDL и EAF. В то время, как оценка ENDF/B представляется завышенной в области энергий выше 15 МэВ, а в оценка JEFF явно занижена вблизи порога реакции. Для этой реакции следует добавить данные об вероятности образования долгоживущего изомера Nb95m.

В РОСФОНД следует включить оценку сечения реакции ($n, n\alpha$) из библиотеки EAF2003. Оттуда же целесообразно использовать данные о вероятности образования долгоживущего изомера $Nb95m$.

2.7. Сечение упругого рассеяния

Как и в других оценках, сечение упругого рассеяния в РОСФОНДе рекомендуется получить из условия баланса.

3. Данные об угловых распределениях

Поскольку, большая часть данных о сечениях нейтронных реакций для РОСФОНДА рекомендуется из оценки ENDF/B-VII, то целесообразно и данные об угловых распределениях использовать из тех же источников.

4. Данные об энерго-угловых распределениях

Поскольку, большая часть данных о сечениях нейтронных реакций для РОСФОНДА рекомендуется из оценки ENDF/B-VII, то целесообразно и данные об энерго-угловых распределениях использовать из тех же источников.

5. Данные о гамма-квантах, образующихся в нейтронных реакциях.

Поскольку, большая часть нейтронных данных для РОСФОНДА рекомендуется из оценки ENDF/B-VII, то целесообразно и данные о гамма-квантах, образующихся в нейтронных реакциях использовать из ENDF/B-VII.

6. Заключение

Файл оцененных нейтронных данных для библиотеки РОСФОНД строится на основе файла из библиотеки ENDF/B-VII со следующими изменениями

1. В области разрешенных резонансов устранить расхождение в резонансном интеграле за счет изменения значений резонансных параметров для первых резонансных уровней (см. раздел 1.1).
2. В области неразрешенных резонансов принять оценку Гансинга (см. раздел 1.2).
3. Вне резонансной области полное сечение и сечения радиационного захвата принять из JEF-3.1 (см. раздел 2.1 и 2.2).
4. Сечение реакции ($n, n'\alpha$) взять из EAF-2003 для согласия с данными о вероятности образования долгоживущего изомера $Nm95m$. (см. раздел 2.6).
5. Ввести файл MF=9 с данными о сечениях образования долгоживущих изомеров в реакциях ($n, 3n$) и ($n, n\alpha$) взяв информацию из EAF-2003.

Автор отбора данных:

Кощев В.Н.

44.РУТЕНИЙ

44.1. Рутений-96

Содержание в природной смеси изотопов 5.54%

В современных библиотеках содержатся две полных оценки нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка координационной группы 1982 г., перешедшая из JEF-2\$

JENDL-3.3 – оценка японской группы по продуктам деления 1990 г., принятая и в ENDF/B-VIIb2.

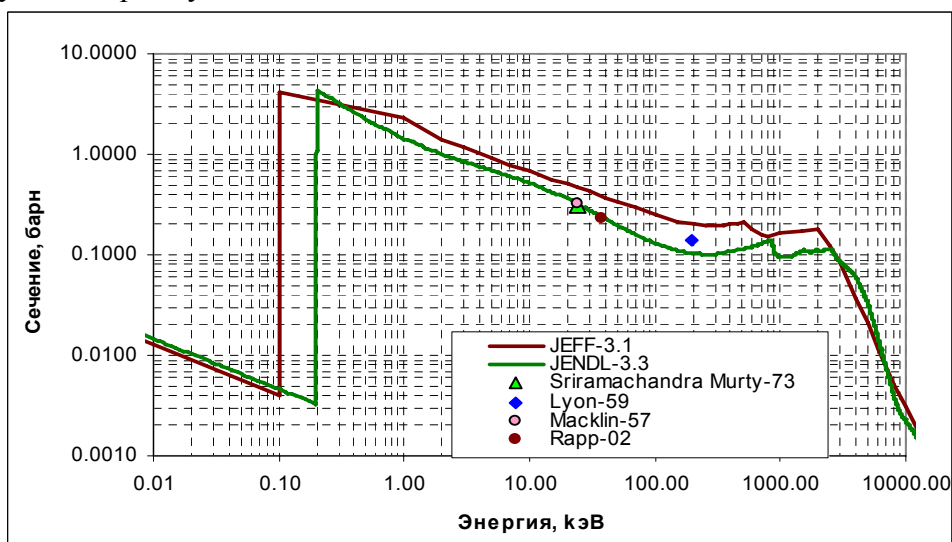
Область разрешенных резонансов в обеих оценках отсутствует.

В JENDL-3.3 введена область неразрешенных резонансов от 200 эВ до 100 кэВ.

Следующие из оценок тепловые сечения и резонансные интегралы захвата приводятся ниже вместе с экспериментальными данными. Резонансный интеграл в JEFF-3.1 завышен относительно эксперимента.

| Источник | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | RI |
|------------------|-----------------------------|-------------|--------------|
| | Полное | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 6.21 | 0.25 | 12.22 |
| JENDL-3.3 | 5.42 | 0.29 | 6.93 |
| Heft-78 | | 0.218±0.004 | 7.0±0.3 |
| Ricabarra-72 | | | 6.67±0.11 |
| Halperin-65 | | 0.271±0.027 | 5.51±0.04 |
| Bereznai-72 | | | 6.5±0.8 |
| Katcoff-58 | | 0.21 | |

На рис. 1 сравниваются оценки сечения захвата. Приведены и экспериментальные данные, демонстрирующие преимущество оценки JENDL-3.3.



Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из JENDL-3.3. Дополнить данные файлом MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера ⁹⁵Tc, используя информацию из EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

44.2. Рутений-97

Радиоактивен ($T_{1/2}=2.9$ дн.). Захватывая орбитальный электрон распадается в долгоживущий ($T_{1/2}=4.10^6$ лет.) технеций-97.

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. В УФА-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений из которой следуют следующие параметры радиационного захвата:

$$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=18.7 \text{ барна}$$

$$RI_c=78.7 \text{ барна.}$$

Экспериментальных данных для проверки оцененных данных нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Ввести файл MF=9 с секциями MT=32, 103, 105 с вероятностями образования долгоживущих изомеров технеция. Файлу присвоить MAT=3883

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

44.3. Рутений-98

Содержание в природной смеси изотопов 1.87%

В современных библиотеках содержатся две полные оценки нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка координационной группы 1982 г., перешедшая из JEF-2\$

JENDL-3.3 – оценка японской группы по продуктам деления 1990 г., принятая и в ENDF/B-VIIb2.

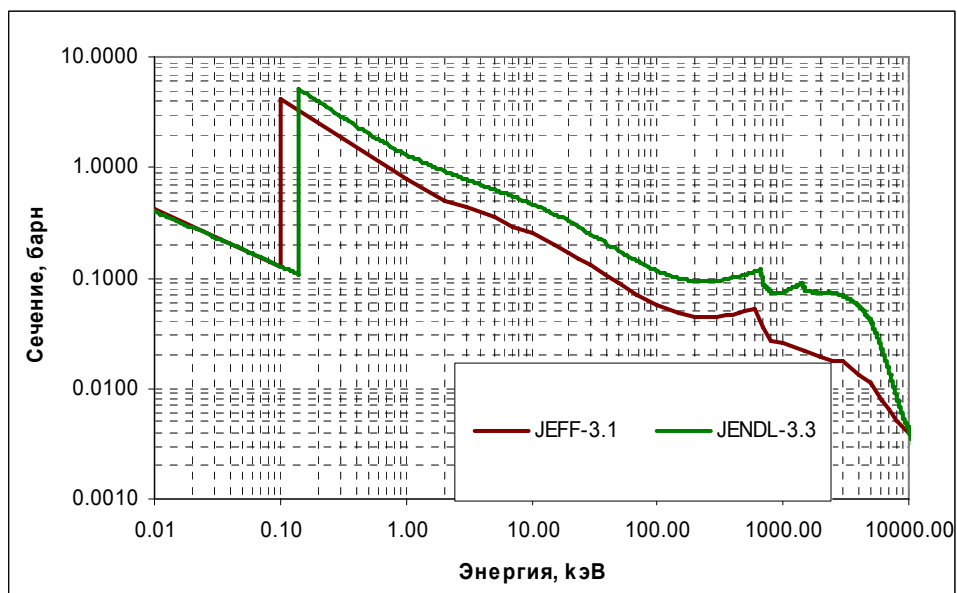
Область разрешенных резонансов в обеих оценках отсутствует.

В JENDL-3.3 введена область неразрешенных резонансов от 140 эВ до 100 кэВ.

Следующие из оценок тепловые сечения и резонансные интегралы захвата приводятся ниже вместе с экспериментальными данными.

| Источник | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | RI |
|--------------------|-----------------------------|-------------|--------------|
| | Полное | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 13.98 | 7.95 | 11.79 |
| JENDL-3.3 | 13.13 | 8.00 | 11.23 |
| Halperin-64 | | 8.0 | |

На рис. 1 сравниваются оценки сечения захвата. Экспериментальные данные в EXFORе отсутствуют. Выше 200эВ оцененная кривая JENDL-3.3 в точности совпадает с таковой для рутерия-96.



Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из JENDL-3.3. Дополнить данные файлом MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера ^{97}Tc , используя информацию из EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

44.4. Рутений-99

Содержание в природной смеси изотопов 12.76%

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $2.0 \cdot 10^{-6}$.

В современных библиотеках содержатся две полные оценки нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка координационной группы 1982 г., перешедшая из JEF-2\$

JENDL-3.3 – оценка японской группы по продуктам деления 1990 г., принятая и в ENDF/B-VIIb2.

Область разрешенных резонансов распространена:

В JEFF-3.1 до 1071 эВ и содержит 36 резонансов с $E_{\text{max}}=994.6$ эВ;

В JENDL-3.3 до 1000 эВ и содержит 40 резонансов с $E_{\text{max}}=994.6$ эВ;

На рис.1 сравниваются нарастающие суммы числа резонансов, а на рис 2 – нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин. Видно, что набор резонансов в JENDL-3.3 пополнен существенно и пропуск, по крайней мере, сильных s-резонансов не проявляется.

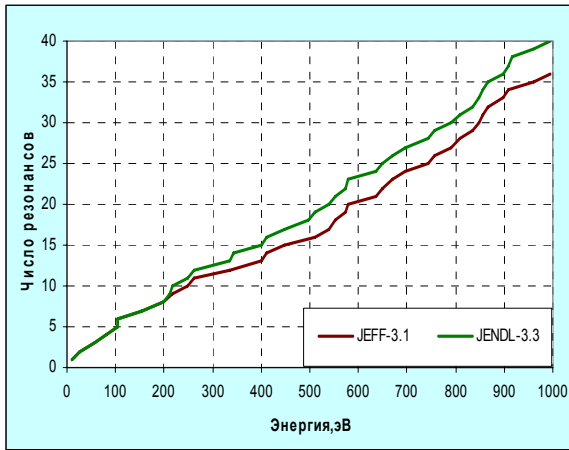


Рис.1

Нарастающие суммы числа резонансов

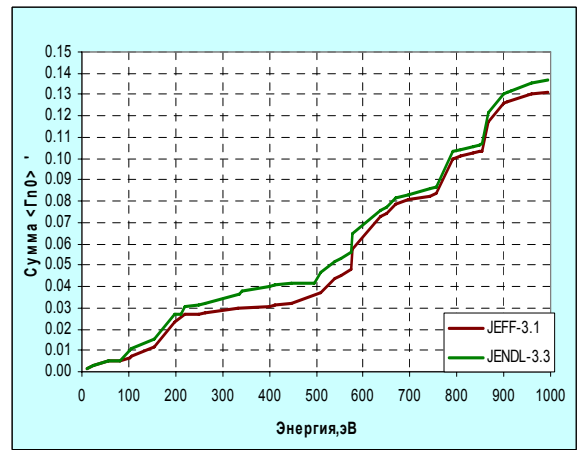


Рис.2

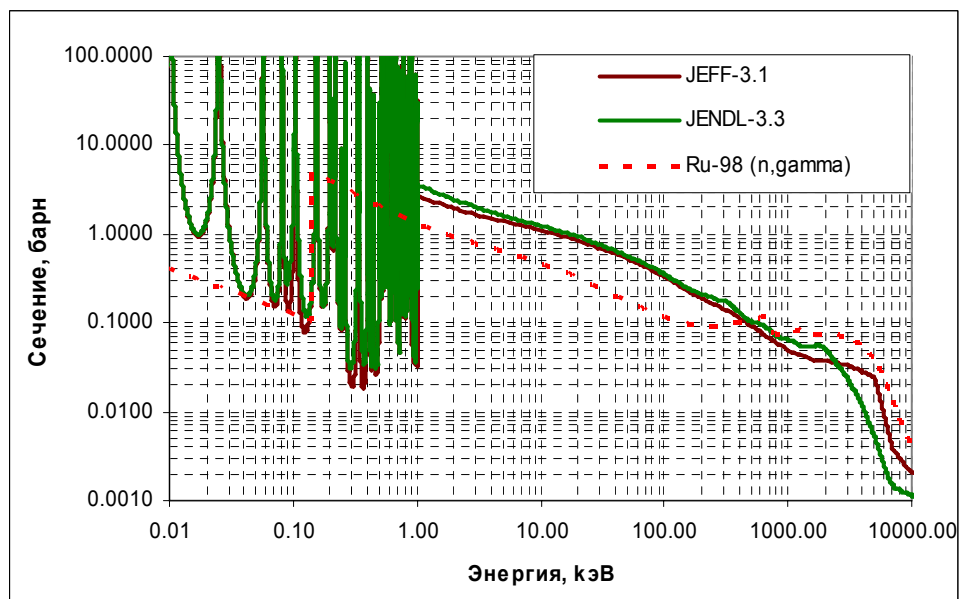
Нарастающие суммы приведенных ширин

В JENDL-3.3 введена область неразрешенных резонансов от 1000 эВ до 100 кэВ.

Следующие из оценок тепловые сечения и резонансные интегралы захвата приводятся ниже вместе с экспериментальными данными. Можно отметить несколько лучшее согласие с экспериментальными данными оценки JENDL-3.3.

| Источник | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | RI |
|------------------|-----------------------------|------------|--------------|
| | Полное | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 12.1 | 7.1 | 162.3 |
| JENDL-3.3 | 11.0 | 7.3 | 170.5 |
| Halperin-64 | | 10.6±0.6 | |
| Halperin-65 | | 4.17±1.04 | 195±20 |
| Halperin-65 | | 4.37±1.04 | |

На рис. 1 сравниваются оценки сечения захвата. Экспериментальные данные в EXFORе отсутствуют. Для сравнения приведено сечение захвата на рутении-98 в соответствии с оценкой JENDL-3.3.



Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из JENDL-3.3. Дополнить данные файлом MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера ^{97}Tc , используя информацию из EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

44.5. Рутений-100

Содержание в природной смеси изотопов 12.60%

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $1.3 \cdot 10^{-7}$.

В современных библиотеках содержатся три полных оценки нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка Группелаара и Менапаса (H.Gruppelaar, E.Menapace) 1982 г.;

JENDL-3.3 – оценка японской группы по продуктам деления 1990 г.

ENDF/B-VIIb2 – оценка международной рабочей группы по продуктам деления с привлечением С.Мухабхаба-2005г..

Область разрешенных резонансов распространена:

в JEFF-3.1 до 502.32эВ и содержит 1 резонанс с $E=230.5$ эВ;

в JENDL-3.3 – до 11890 эВ и содержит 20 резонансов с $E_{\text{max}}=11731$ эВ и 91 р-резонанс с $E_{\text{max}}=11901$ эВ;

в ENDF/B-VIb2 – до 12000 эВ и содержит 13 резонансов с $E_{\text{max}}=11730$ эВ и 75 р-резонанс с $E_{\text{max}}=11626$ эВ.

То, что оценка Группелаара и Менапаса устарела, очевидно, и ниже она не рассматривается. Обращает на себя внимание то, что более поздняя оценка ENDF/B-VIIb2 содержит в той же энергетической области меньшее число резонансов, чем оценка, принятая в JENDL-3.3

На рис. 1а сравниваются нарастающие суммы числа s- и р-резонансов. Видно, что после 2.7 кэВ кривые идут строго параллельно, а до этого в наборе ENDF/B-VII наблюдается явный дефицит резонансов. Этот дефицит еще более ярко проявляется при сравнении нарастающих сумм всех резонансов вместе (рис 1б). В Наборе ENDF/B-VII присутствует только один резонанс ниже 2.7 кэВ – это резонанс при 228.5 эВ, присутствующий во всех оценках. Чрезвычайно низкая плотность уровней ниже 2.7 кэВ в ENDF/B-VIIb2 является следствием какой-то грубой ошибки и предлагаемый в этой библиотеке набор резонансов неприемлем.

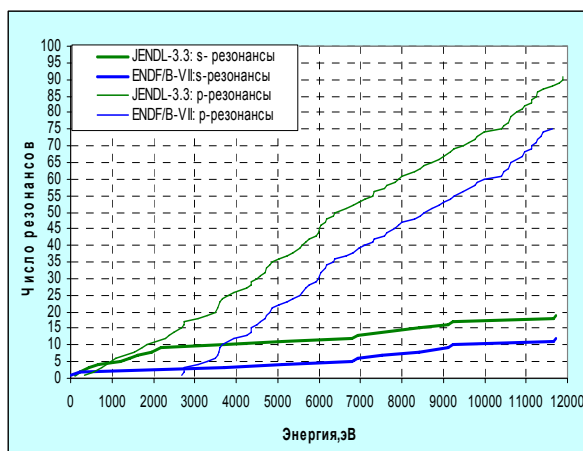


Рис. 1а

Нарастающие суммы числа s- и р-резонансов

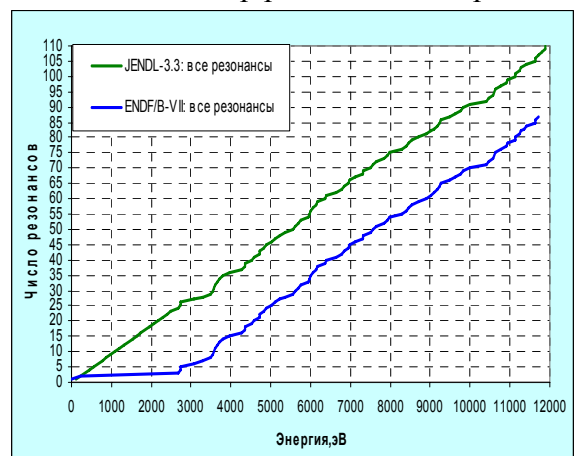


Рис. 1б

Нарастающие суммы числа всех резонансов

Из рис.1а можно заключить, что набор s-резонансов в JENDL-3.3 выше 2.2 кэВ неполон: наклон нарастающей суммы резко снижается. Однако нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин указывает на то, что если какие-то s- резонансы и пропущены, то их ширины весьма малы. Фактически часть s-резонансов с малыми ширинами, видимо, просто идентифицирована как р-резонансы. О чем можно судить и по несколько возросшему наклону нарастающей суммы р-резонансов выше 2.5 кэВ (см.рис.1а).

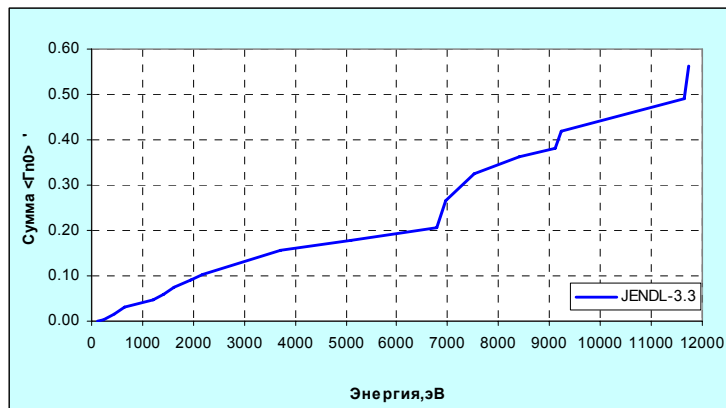


Рис.2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин s-резонансов.

И в JENDL-3.3 и в ENDF/B-VII введена область неразрешенных резонансов от 12000 эВ до 100 кэВ. Следующие из оценок тепловые сечения и резонансные интегралы захвата приводятся ниже вместе с экспериментальными данными. Можно отметить заметно лучшее согласие с экспериментальными данными оценки JENDL-3.3.

| Источник | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | RI |
|------------------|-----------------------------|------------|-------------|
| | Полное | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 11.5 | 5.0 | 10.9 |
| JENDL-3.3 | 15.2 | 5.8 | 11.2 |
| Halperin-64 | | 10.6±0.6 | |
| Halperin-65 | | 5.84±0.61 | 11.2±2.7 |
| Halperin-65 | | 6.12±0.7 | |

На рис. 3 сравниваются оценки сечения захвата. В резонансной области отчетливо виден эффект пропуска резонансов в ENDF/B-VII, частично скомпенсированный введенным, видимо, искусственно, резонансом при 1 эВ. Выше 10 кэВ оценки совпадают и основываются на результатах Маклина.

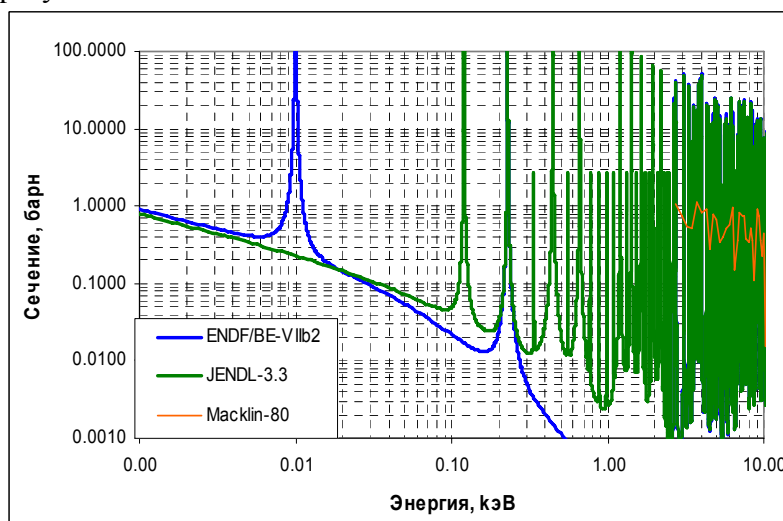


Рис.3а. Сечение захвата

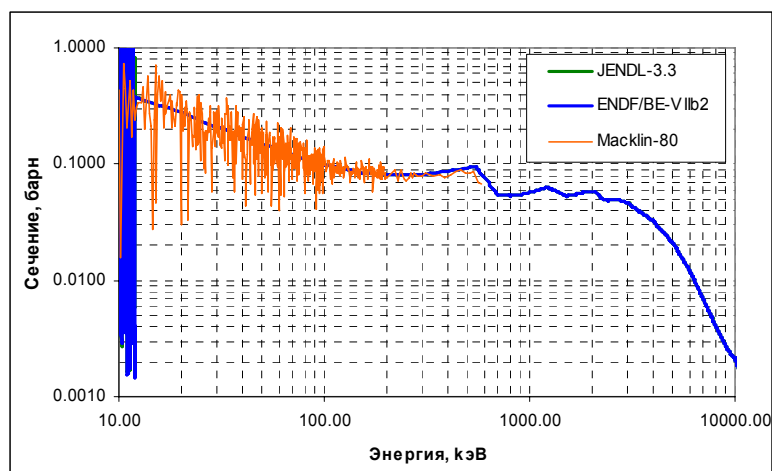


Рис.36. Сечение захвата.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из JENDL-3.3.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

44.6. Рутений-101

Содержание в природной смеси изотопов 17.06%

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $5.17 \cdot 10^{-2}$.

В современных библиотеках содержатся три полных оценки нейтронных данных:

JEFF-3.1 – Группелаара (H.Gruppelaar) 1986 г.;

JENDL-3.3 – оценка японской группы по продуктам деления 1990 г.;

ENDF/B-VIIb2 – оценка Кима, Хермана, оха и Мухабхаба (Kim, Herman, Oh, Mughabghab) 2005 г..

Область разрешенных резонансов распространена:

в JEFF-3.1 – до 1044.26 эВ и содержит 40 резонансов с $E_{\max}=1035$ эВ;

в JENDL-3.3 – до 1060 эВ и содержит 58 резонансов с $E_{\max}=1720$ эВ (из них 54 – s-резонансы);

в ENDF/B-VIIb2 – до 1035.4 эВ и содержит 48 резонансов (из них 41s-резонанс).

На рис.1 сравниваются нарастающие суммы числа резонансов (p-резонансы не выделены поскольку их число мало, а надежность отнесения их к популяции p-резонансов невелика), а на рис 2 – нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин. В последнем случае «примесь» p-резонансов вообще не могла проявиться сколько-нибудь существенно. Различия, как видим, не очень велики; Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин, следующая из оценки JENDL-3.3 наиболее близка к прямой, т.е. если в этой оценке и присутствуют «лишние» с точки зрения более поздней оценки ENDF/B0-VII резонансы, то их число и ширины статистически оправданы.

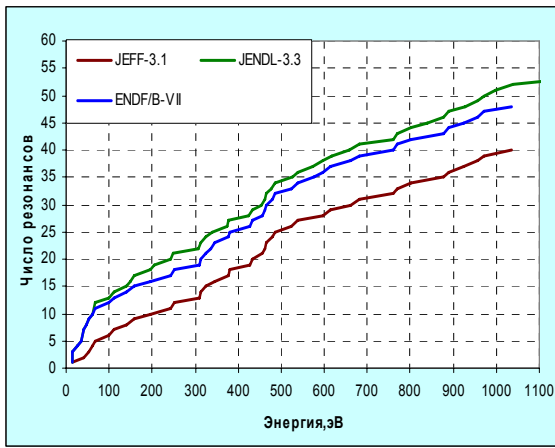


Рис.1

Нарастающие суммы числа резонансов

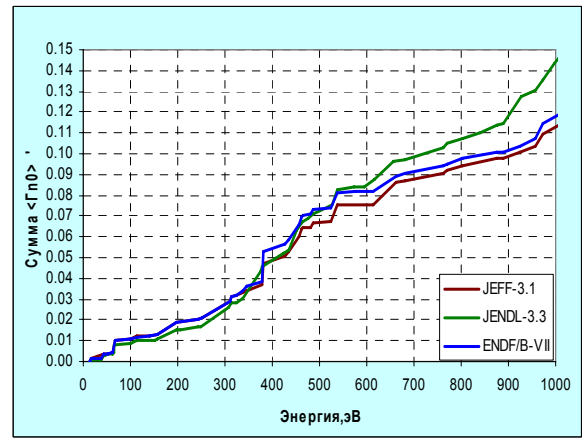


Рис.2

Нарастающие суммы приведенных ширин

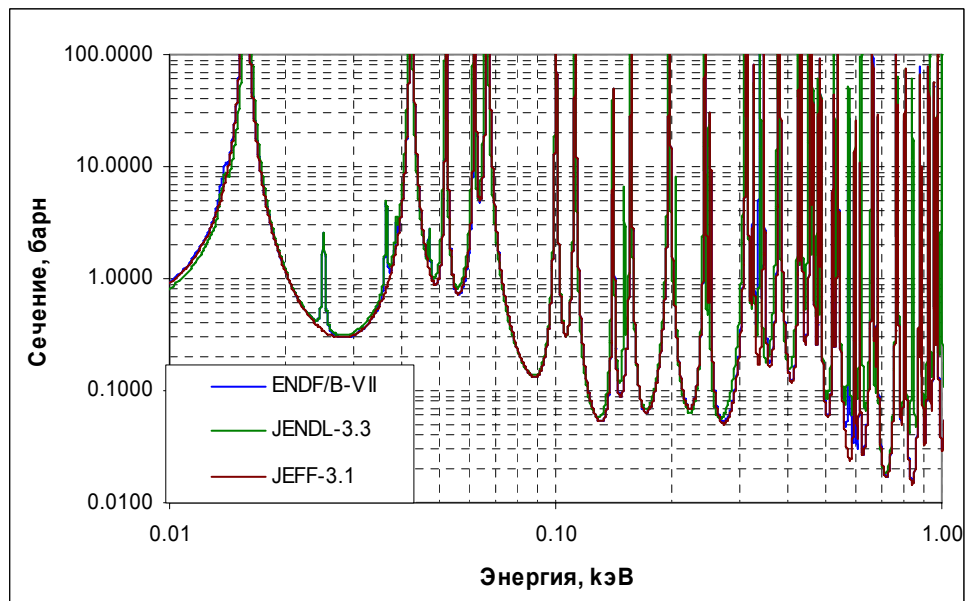
Во всех оценках введена область неразрешенных резонансов, простирающаяся до 25 (JEFF-3.1) или до 100 кэВ.

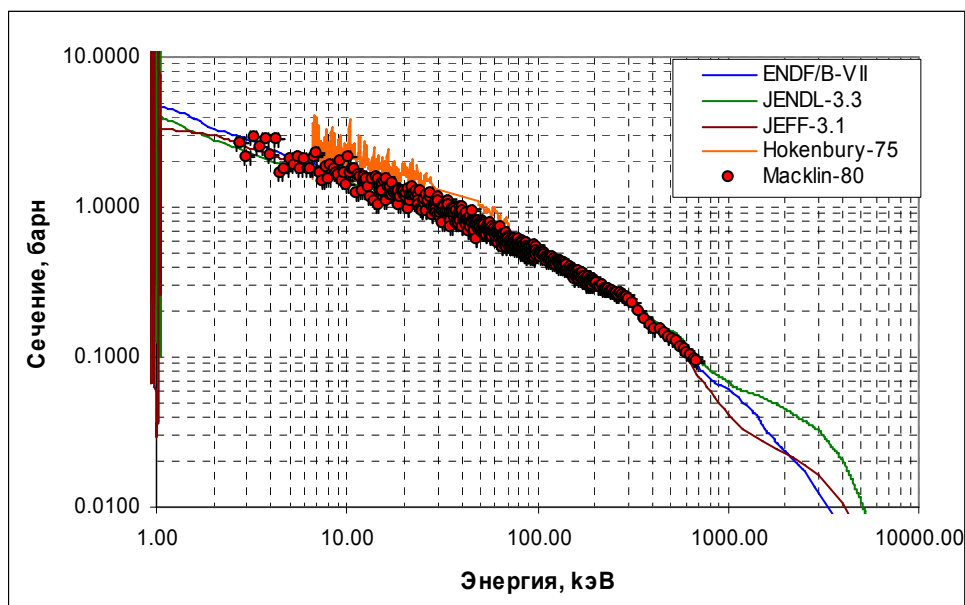
Следующие из оценок тепловые сечения и резонансные интегралы захвата приводятся ниже вместе с экспериментальными данными.

| Источник | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | RI |
|---------------------|-----------------------------|-------------|--------------|
| | Полное | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 8.49 | 3.41 | 110.5 |
| JENDL-3.3 | 7.12 | 3.36 | 99.6 |
| ENDF/B-VIIb2 | 7.95 | 3.45 | 111.1 |
| Halperin-65 | | 5.25±1.4 | |
| Halperin-65 | | 5.48±1.4 | 79.1±8 |
| Halperin-64 | | 3.1±0.6 | |

По сравнению с последними измерениями Гальперина оцененные сечения захвата представляются низковатыми. Оценки резонансного интеграла, напротив, завышены относительно результата измерения.

На рис. 1 сравниваются оценки сечения захвата. Вне резонансной области они близки друг к другу и проходят через экспериментальные данные Маклина.





Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из JENDL-3.3

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

44.7. Рутений-102

Содержание в природной смеси изотопов 17.06%

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $4.92 \cdot 10^{-2}$.

В современных библиотеках содержатся три полных оценки нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка Группелаара и Менапаса (H.Gruppelaar, E.Menapace) 1982 г.;

JENDL-3.3 – оценка японской группы по продуктам деления 1990 г.;

ENDF/B-VIIb2 – оценка Ки-Чанг Лианга и Мухабхаба (Qi-Chang Liang, Mughabghab) 2005 г..

Область разрешенных резонансов распространена:

в JEFF-3.1 – до 1610 эВ и содержит 1 s-резонанс с $E_{\max}=1035$ эВ и 2 p-резонанса;

в JENDL-3.3 – до 13440 эВ и содержит 27 s-резонансов с $E_{\max}=13179$ эВ (из них один – связанное состояние) и 120 p-резонансов с $E_{\max}=13347$ эВ;

в ENDF/B-VIIb2 – также до 13400 эВ и содержит содержит 25 s-резонансов с тем же $E_{\max}=13179$ эВ (из них один – связанное состояние) и 120 p-резонансов с $E_{\max}=13437$ эВ.

Различия между оценками резонансных параметров в последних двух библиотеках обусловлены, в основном, различием в разделении резонансов по четности (7 различий).

Кроме того, в каждой из оценок присутствует по одному s- и по 2 p-резонанса, отсутствующих в другой в области до 13347 эВ и, наконец, в JENDL-3.3 отмечен p-резонанс при $E_{\max}=13440$ эВ. Существенно различаются и связанные состояния.

На рис.1 сравниваются нарастающие суммы числа резонансов без различия четности. Пунктиром показана аппроксимирующая прямая, указывающая, что до 7 кэВ в популяции, вероятно, недостает небольшой части резонансов с малыми ширинами. Трудно отдать предпочтение какой-либо из двух последних оценок.

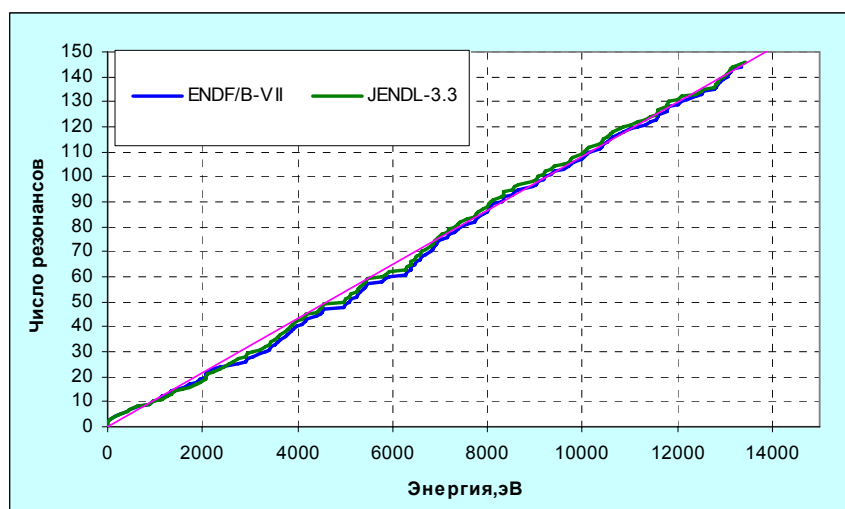


Рис.1. Нарастающая сумма числа всех резонансов

В оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII введен область неразрешенных резонансов, простирающиеся до 100 кэВ.

Следующие из оценок тепловые сечения и резонансные интегралы захвата приводятся ниже вместе с экспериментальными данными. Основания, по которым резонансный интеграл в ENDF/B-VII возрос по сравнению с JENDL-3.3, вероятно, связаны с учетом неких новых экспериментальных данных, о которых упоминается в кратком описании оценки в файле.

| Источник | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | RI |
|---------------------|-----------------------------|-------------|-------------|
| | Полное | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 5.26 | 1.30 | 2.95 |
| JENDL-3.3 | 6.82 | 1.23 | 4.10 |
| ENDF/B-VIIb2 | 9.82 | 1.27 | 5.23 |
| Heft-78 | | 1.31±0.03 | 4.67±0.75 |
| Van Der Linden-72 | | | 4.3±0.4 |
| Ishikawa-69 | | 1.37±0.14 | |
| Lantz-65 | | 1.23±0.12 | 4.14±0.4 |
| Katcoff-65 | | 1.50 | |

На рис. 2 сравниваются оценки сечения захвата. Вне резонансной области они близки друг к другу и проходят через экспериментальные Хокебури, Маклина-80 и ранний результат Трофимова. Разброс экспериментальных данных разных авторов довольно велик.

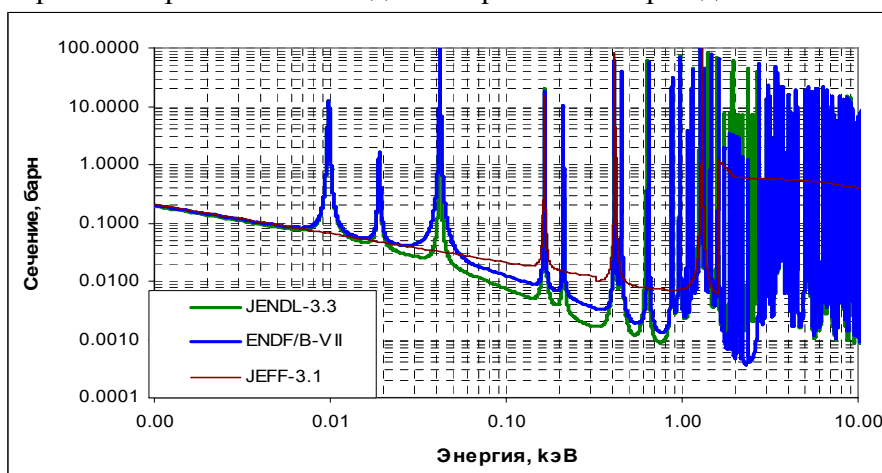


Рис.2.а Сечение захвата

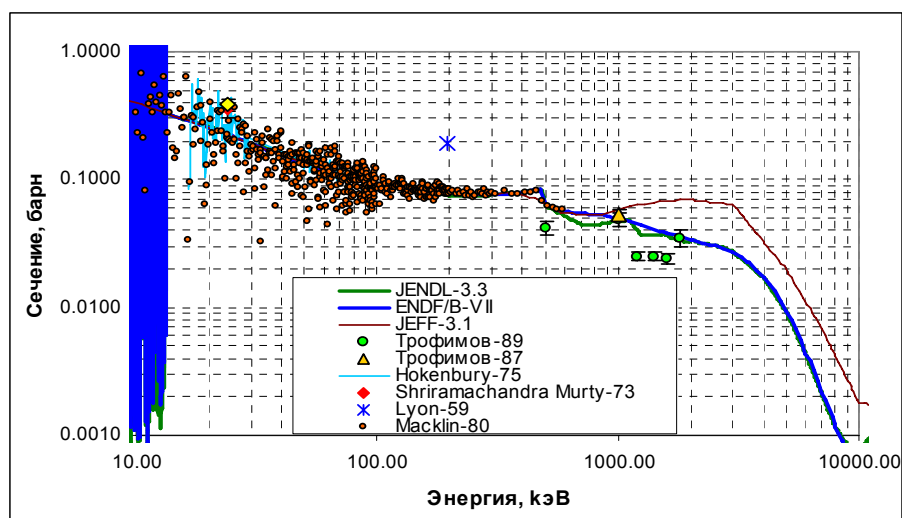


Рис.26. Сечение захвата

Закключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из ENDF/B-VIIb2.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

44.8. Рутений-103

Радиоактивен ($T_{1/2}=39.26$ дн.). Испытывает бета-распад в родий-103.

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $2.4 \cdot 10^{-7}$.

В современных библиотеках содержатся три полных оценки нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка Группелаара и Менапаса (H.Gruppelaar, E.Menapace) 1982 г.;

JENDL-3.3 – оценка японской группы по продуктам деления 1990 г.;

ENDF/B-VIIb2 – оценка Ге и Мухабхаба (Z.G.Ge, Mughabghab) 2005 г..

Область разрешенных резонансов распространена:

в JEFF-3.1 – до 46.92 эВ и содержит 9 s-резонансов с $E_{\max}=46.5$ эВ неизвестного происхождения;

в JENDL-3.3 – RRR отсутствует;

в ENDF/B-VIIb2 – до 350 эВ и содержит содержит 8 s-резонансов, параметры которых оценены на основе данных Ануфриева-80. При этом энергии резонансов сохранены, а нейтронные ширины увеличены в 5 – 10 раз, видимо, с целью согласования резонансного интеграла захвата с измеренным.

Следующие из оценок тепловые сечения и резонансные интегралы захвата приводятся ниже вместе с экспериментальными данными.

| Источник | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | RI |
|---------------------------|-----------------------------|-------------|--------------|
| | Полное | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 71.9 | 66.8 | 593.5 |
| JENDL-3.3 | 13.1 | 8.0 | 9.3 |
| ENDF/B-VIIb2 | 6.2 | 1.2 | 46.9 |
| Ануфриев-80 ^{*)} | | | 30 |

^{*)} от 1 до 50 эВ

На рис. 1 сравниваются оценки сечения захвата.

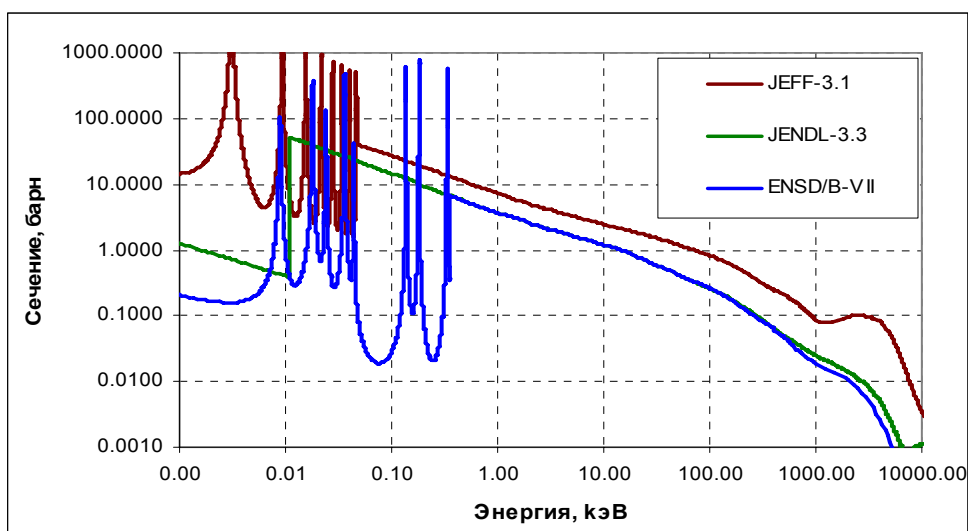


Рис.1. Сечение захвата

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из ENDF/B-VIIb2 – единственную оценку, учитывающую уникальные экспериментальные данные Ануфриева и др.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

44.9. Рутений-104

Содержание в природной смеси изотопов 18.62%

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $1.88 \cdot 10^{-2}$.

В современных библиотеках содержатся три полных оценки нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка Группелаара и Менапаса (H.Gruppelaar, E.Menapace) 1982 г.;

JENDL-3.3 – оценка японской группы по продуктам деления 1990 г.;

ENDF/B-VIIb2 – оценка Чанга, Лианга, Шена и Суна (Z.J.Zhang, Q.C.Liang, Q.Shen, X.Sun) 2005 г.

Области разрешенных резонансов в двух последних оценках совпадают Единственное, но достаточно существенное отличие состоит в радиационной ширине связанного состояния, которая в ENDF/B-VII принята большей, что отразилось на величинах теплового сечения захвата и резонансного интеграла.

Область разрешенных резонансов распространена:

в JEFF-3.1 – до 1511 эВ и содержит 8 s-резонансов с $E_{\max}=1441$ эВ;

в JENDL-3.3 и ENDF/B-VIIb2 – до 11120 эВ и содержит 52 s-резонансов с $E_{\max}=11864$ эВ (из них один – связанное состояние) и 62 p-резонансов с $E_{\max}=11711$ эВ;

На рис.1 показаны нарастающая сумма числа резонансов без различия четности и нарастающая сумма s- резонансов. Снижение наклона последней указывает на возможный их недостаток выше 7 кэВ (вероятно, за счет некорректного определения четности). На рис. 2. показана нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин. Её отличия от линейности хотя и велики, но не противоречат статистически ожидаемым.

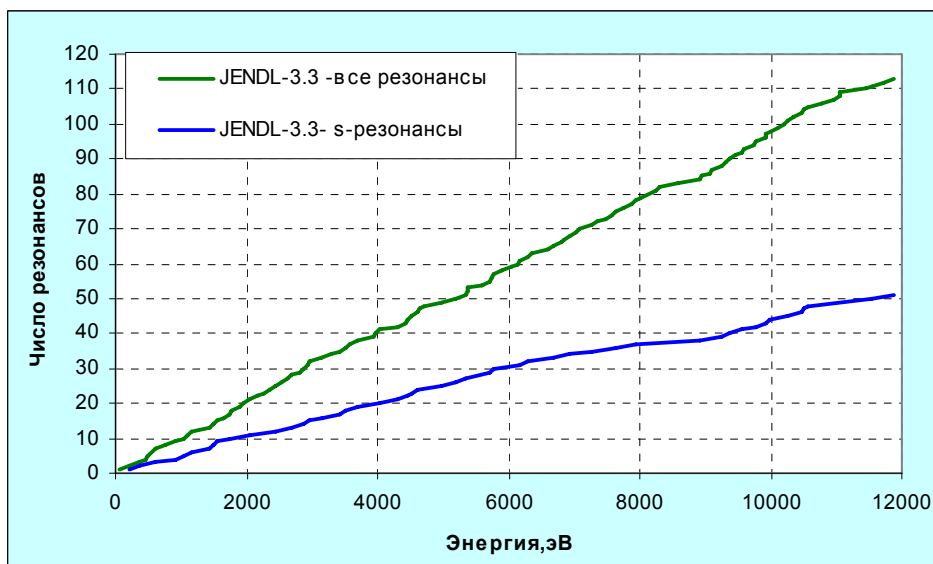


Рис.1. Нарастающая сумма числа резонансов

В оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII введен область неразрешенных резонансов, простирающиеся до 100 кэВ.

Следующие из оценок тепловые сечения и резонансные интегралы захвата приводятся ниже вместе с экспериментальными данными

| Источник | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | RI |
|--------------|-----------------------------|-------------|-----------|
| | Полное | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 8.42 | 0.30 | 5.64 |
| JENDL-3.3 | 5.58 | 0.32 | 6.39 |
| ENDF/B-VIIb2 | 5.73 | 0.47 | 6.45 |
| Heft-78 | | 0.466±0.015 | 7.70±0.65 |
| Ricabarra-72 | | | 4.36 |
| Lantz-64 | | 0.47 | 4.6 |

Причина корректировки данных по сечению захвата тепловых нейтронов ясна. На рис. 2 сравниваются оценки сечения захвата. Ясно виден эффект увеличения радиационной ширины связанного состояния.

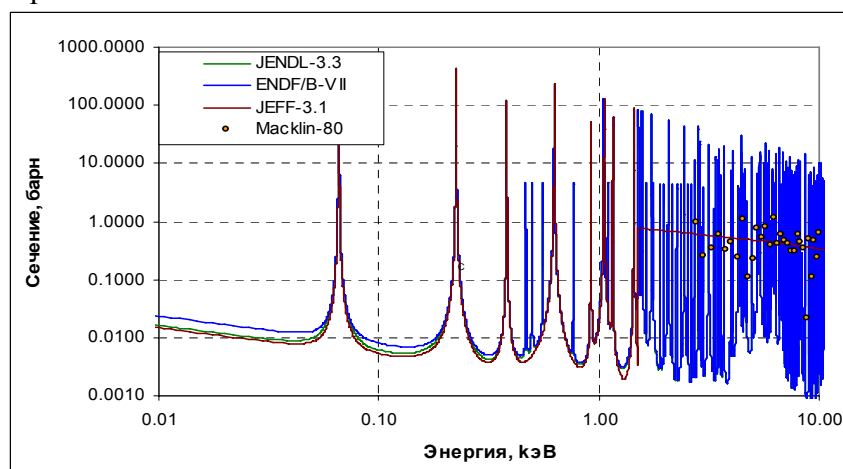


Рис.2.а Сечение захвата

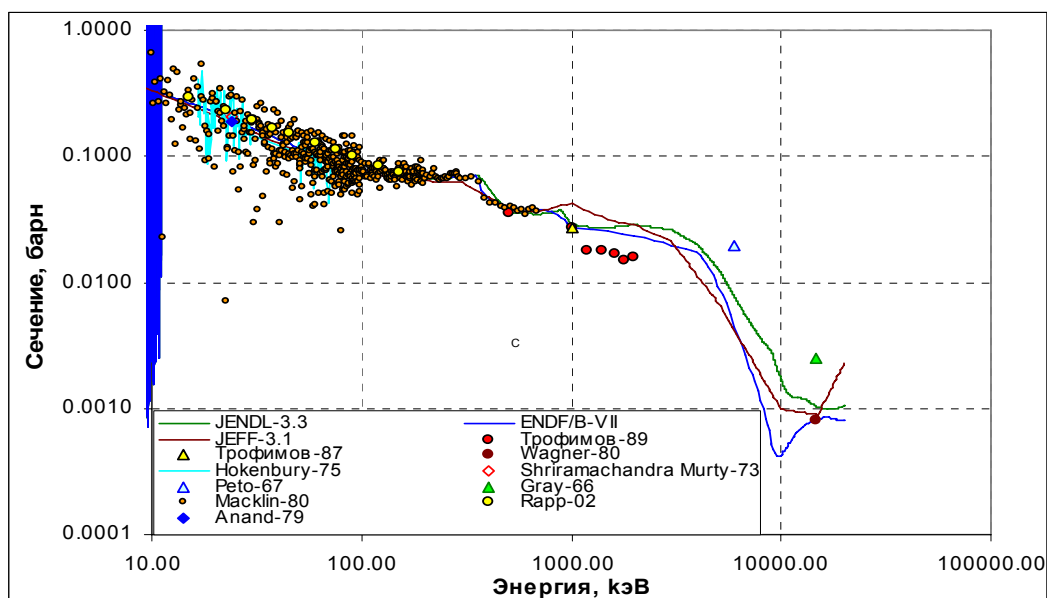


Рис.2б. Сечение захвата

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из ENDF/B-VIIb2.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

44.10. Рутений-106

Радиоактивен ($T_{1/2}=373.6$ дн.). Испытывает бета-распад в родий-106, а тот очень быстро – в палладий-106.

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $4.10 \cdot 10^{-3}$.

В современных библиотеках содержатся две полных оценки нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка Группелаара и Менапаса (H.Gruppelaar, E.Menapace) 1982 г.;

JENDL-3.3 – оценка японской группы по продуктам деления 1990 г., принятая и в ENDF/B-VIIb2.

Область разрешенных резонансов отсутствует в обеих оценках. В оценке JENDL-3.3 введена область неразрешенных резонансов от 500 эВ до 100 кэВ.

Следующие из оценок тепловые сечения и резонансные интегралы захвата приводятся ниже вместе с экспериментальными данными.

| Источник | $\sigma(0.0253 \text{ эВ})$ | | RI |
|------------------|-----------------------------|-------------------|---------------|
| | Полное | Захват | Захват |
| JEFF-3.1 | 4.21 | 0.146 | 2.039 |
| JENDL-3.3 | 3.50 | 0.146 | 1.93 |
| Werner-65 | | 0.146 ± 0.045 | 2.0 ± 0.6 |

На рис. 1 сравниваются оценки сечения захвата.

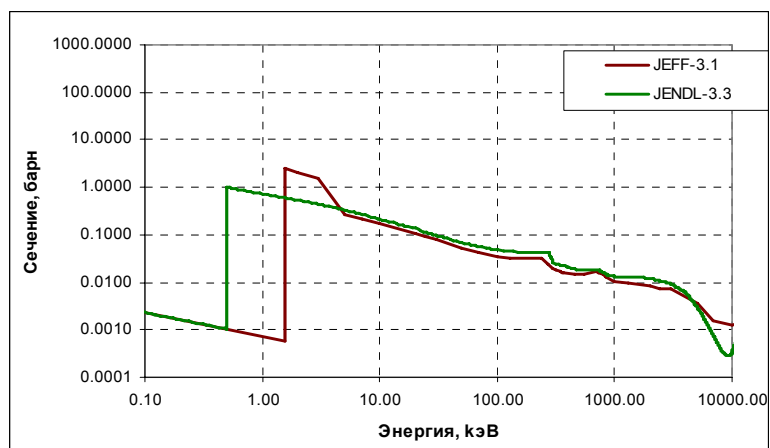


Рис.1. Сечение захвата

Заклучение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из JENDL-3.3

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

45.РОДИЙ

45.1. Родий-99

Радиоактивен ($T_{1/2}=16.1$ дн.). Захватывая орбитальный электрон превращается в стабильный рутений-99. В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакции $102\text{Pd}_{(1.02\%)}(n,nt)$. При делении ядер не образуется.

В библиотеке EAF-2003 содержатся оценки нейтронных сечений, полученные расчетным путем. Никаких экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 27.4 барн.

Резонансный интеграл захвата: 206 барн.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Включить файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{95}\text{Tc}^m$ и $^{97}\text{Tc}^m$. Файл MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

45.2. Родий-101

Радиоактивен ($T_{1/2}=3.3$ г.). Захватывая орбитальный электрон превращается в стабильный рутений-101. В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакции $102\text{Pd}_{(1.02\%)}(n,np)$, (n,d) . При делении ядер не образуется.

В библиотеке EAF-2003 содержатся оценки нейтронных сечений, полученные расчетным путем. Никаких экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 29.4 барн.

Резонансный интеграл захвата: 270 барн.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Включить файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущих изомеров $^{102}\text{Rh}^m$ и $^{97}\text{Tc}^m$. Сохранить файл MF=10 с секцией MT=4 с сечением образования изомера $^{101}\text{Rh}^m$.

Автор заключения

Николаев М.Н.

45.3. Родий-101-m

Долгоживущий изомер ($T_{1/2}=4.4$ дн.). Захватывая орбитальный электрон превращается в стабильный рутений-101 (9268%); в остальных случаях испытывает изомерный переход в основное состояние. В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакции $^{102}\text{Pd}_{(1.02\%)}(n,np)$, (n,d) ; $^{103}\text{Rh}(n,3n)$, $^{103}\text{Rh}(n,2n)$ $^{102}\text{Rh}(n,2n)$. При делении ядер не образуется.

В библиотеке EAF-2003 содержатся оценки нейтронных сечений, полученные расчетным путем. Никаких экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 29.4 барн.

Резонансный интеграл захвата: 270 барн.

В отличие от сечения захвата, оцененные сечения других реакций для изомера и основного состояния несколько различаются.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Включить файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущих изомеров $^{102}\text{Rh}^m$ и $^{97}\text{Tc}^m$. Перенести сечение образования основного состояния ^{101}Rh из файла MF=3 в файл MF=10.

Автор заключения

Николаев М.Н.

45.4. Родий-102

Радиоактивен ($T_{1/2}=207$ лет). Захватывая орбитальный электрон превращается в стабильный рутений-101(78%); в остальных случаях испытывает бета-распад в палладий-102. В реакторах может образовываться в малых количествах за счет реакции $^{103}\text{Rh}(n,2n)$ и $^{102}\text{Pd}_{(1.02\%)}(n,p)$. Выход при делении ничтожен ($\sim 10^{-12}$ для ^{235}U).

В библиотеке EAF-2003 содержатся оценки нейтронных сечений, полученные расчетным путем. Экспериментальных данных для их проверки в EXFORe не содержится.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 48.3 барн.

Резонансный интеграл захвата: 960 барн.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Включить файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{101}\text{Rh}^m$. Сохранить файл MF=10 с секцией MT=4 с сечением образования изомера $^{102}\text{Rh}^m$.

Автор заключения

Николаев М.Н.

45.5. Родий-102-m

Долгоживущий изомер ($T_{1/2}=2.9$ г.). Захватывая орбитальный электрон превращается в стабильный рутений-102 (99.77%); в остальных случаях испытывает изомерный переход в основное состояние. В реакторах может образовываться в малых количествах за счет реакции $^{103}\text{Rh}(n,2n)$ и $^{102}\text{Pd}_{(1.02\%)}(n, p)$. При делении ядер не образуется.

В библиотеке EAF-2003 содержатся оценки нейтронных сечений, полученные расчетным путем. Никаких экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 48.3 барн.

Резонансный интеграл захвата: 960 барн.

В отличие от сечения захвата, оцененные сечения других реакций для изомера и основного состояния несколько различаются.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Включить файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{101}\text{Rh}^m$. Перенести сечение образования основного состояния ^{102}Rh из файла MF=3 в файл MF=10.

Автор заключения

Николаев М.Н.

45.6. Родий-103

Единственный стабильный изотоп.

В современных библиотеках используются три оценки нейтронных данных:

JENDL-3.3 (=JENDL-3.2=FOND-2.2) – оценка японской рабочей группы по продуктам деления, выполненная в 1990 г.

ENDF/B-VIIb2 (=CENDL-2) – оценка Чанга и Мухабхаба (J.H. Chang, S.F. Mughabghab) в резонансной области и Кима и Обложинского (H.I. Kim, P. Oblozinsky) в области быстрых нейтронов. Ким и Чанг – сотрудники Китайского института ядерных исследований, датированная 2005 г.

JEFF-3.1 – оценка Дюпона, Буже (E.Dupont, E.Vauge) и др. выполненная в том же 2005 г.

Тепловая и резонансная области.

В таблице 1 сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы захвата, а в таблице 2 – характеристики области разрешенных резонансов

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы

| Оценка | $\sigma_t(0.0253 \text{ эВ})$ | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------|
| JENDL-3.3 | 149.8 | 3.26 | 146.6 | 1040 |
| ENDF/B-VIIb2 | 149.3 | 4.35 | 144.9 | 1034 |
| JEFF-3.1 | 146.63 | 3.88 | 142.75 | 968 |

Экспериментальные данные о сечениях для тепловых нейтронов скудны.

В EXFORe содержатся следующие данные о сечении захвата:

Fink-36: $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})=130\pm 5$;

Fuketa-60: $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})=164\pm 11$;

Данные о полном сечении показаны на рис.1.

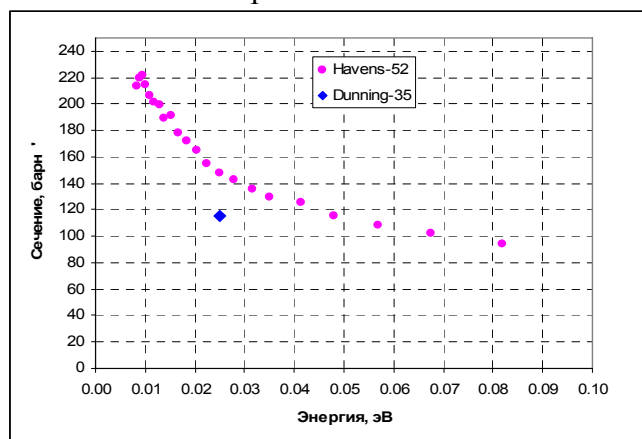


Рис.1. Полное сечение в тепловой области.

Оценка Мухабхаба (2003) для сечения захвата: 145 ± 2 , получена, вероятно, с учетом и данных по полному сечению. Для резонансного интеграла Мухабхаб приводит оценку 1100 ± 50 барн. Данные всех библиотек не противоречат этим оценкам, но, естественно, оценка ENDF/B-VII согласуется лучше всех.

Таблица 2. Характеристика резонансной области

| Оценка | s-резонансы | | p-резонансы | | Границы URR | |
|--------------|-------------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|--------------|
| | Число | E_{\max} ,кэВ | Число | E_{\max} ,кэВ | Нижняя, кэВ | Верхняя, кэВ |
| JENDL-3.3 | 164 | 4.276 | 120 | 4.288 | 3.58 | 100 |
| ENDF/B-VIIb2 | 102 ^{*)} | 4.1158 | 178 | 4.1032 | 4.1159 | 40.146 |
| JEFF-3.1 | 109 ^{*)} | 4.1158 | 176 | 4.1032 | 4.1159 | 40.146 |

^{*)}Включая связанное состояние

Преимущества двух последних оценок очевидны. На рис. 2 сравниваются нарастающие суммы s- и p-резонансов, а на рис. 2– нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов.

Различия между оценками невелики, касаются резонансов с очень малыми нейтронными ширинами состоят, в основном в том, какая четность этим резонансам приписана. В связи с этим нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов практически совпадают (рис.3).

В оценке ENDF/B-VII нарастающая сумма числа резонансов практически строго линейна, указывая на отсутствие пропуска этих уровней. В популяции p-резонансов проявляется небольшой пропуск выше 1500 эВ.

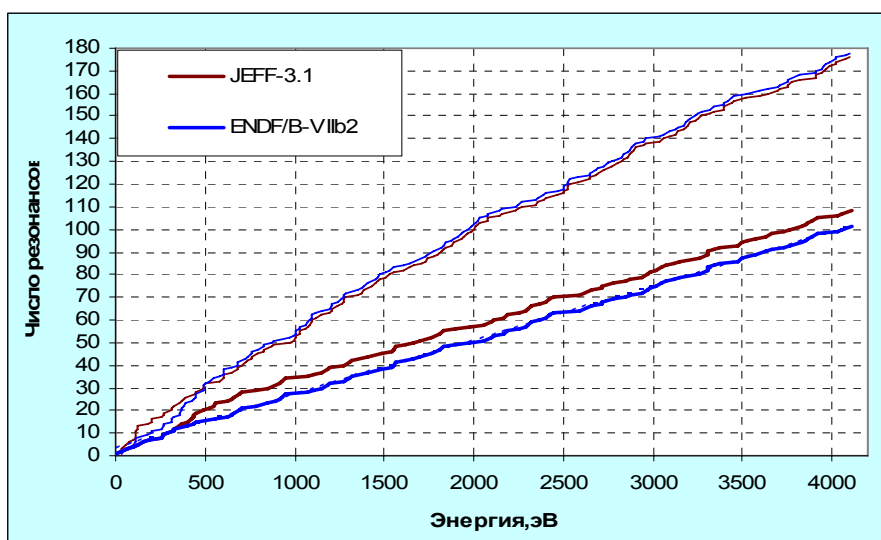


Рис.2. Нарастающие суммы числа s- (толстые линии) и p- резонансов (тонкие линии)

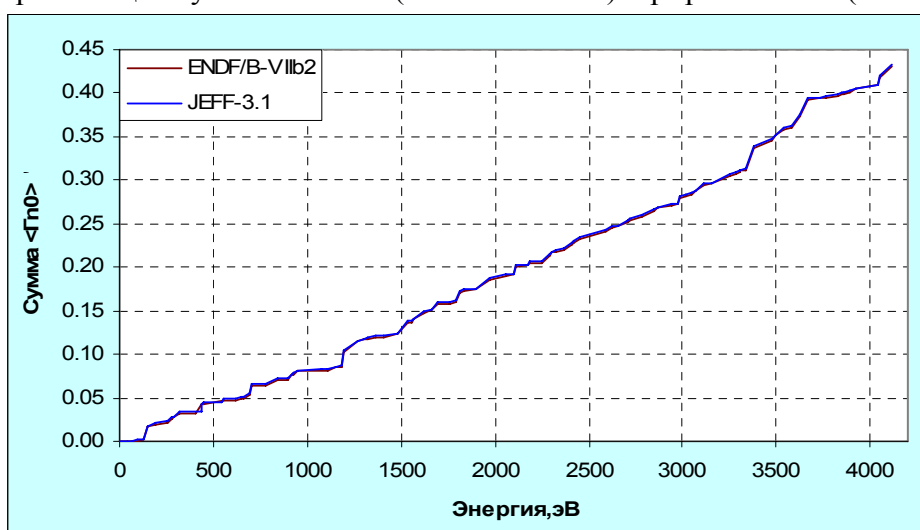


Рис.3. Нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин.

В целом, оценка резонансных параметров, выполненная с участием Мухабхаба, представляется предпочтительней.

Параметризация структуры сечений в области неразрешенных резонансов в сравниваемых оценках несколько различается, но и в той и в другой средними резонансными параметрами сечения описываются полностью, без добавления плавной подложки. В обеих оценках подгонка параметров проводилась с целью описания одних и тех же экспериментальных данных о сечении захвата, а также полного сечения в окрестности 100 кэВ. На рис. 4а показаны экспериментальные данные о сечении захвата в области неразрешенных резонансов и начальный участок выше границы этой области, где сечения заданы поточечно. Различие в оценках на этом участке составляет 10%, что лежит в пределах разброса экспериментальных данных.

Нейтронные сечения вне резонансной области

На рис.4. оцененные сечения захвата сравниваются с экспериментальными данными. Расхождение между оценками при высоких энергиях соответствует расхождению в экспериментальных данных.

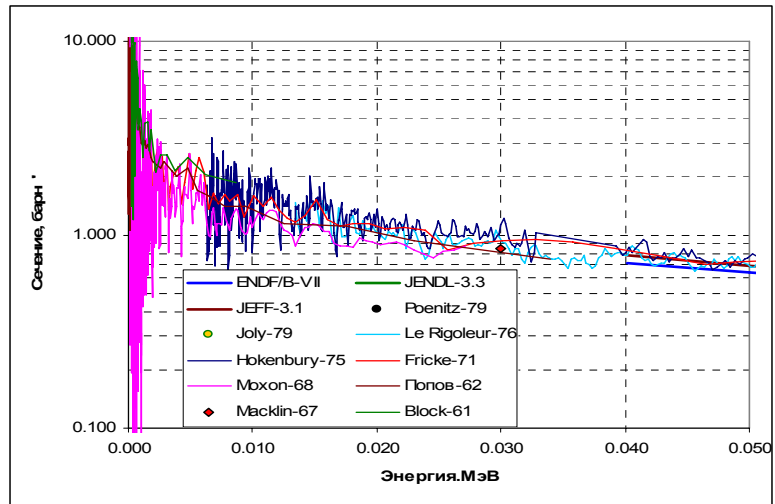


Рис.4а. Сечение захвата

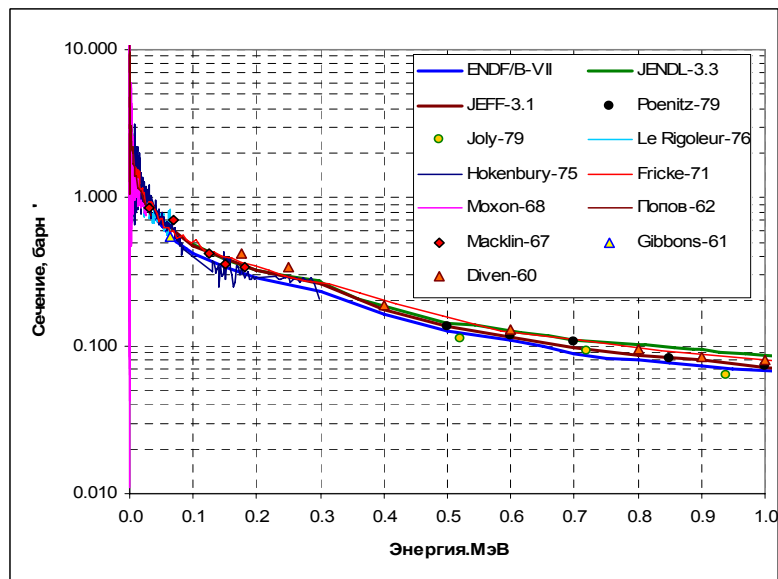


Рис.4б. Сечение захвата

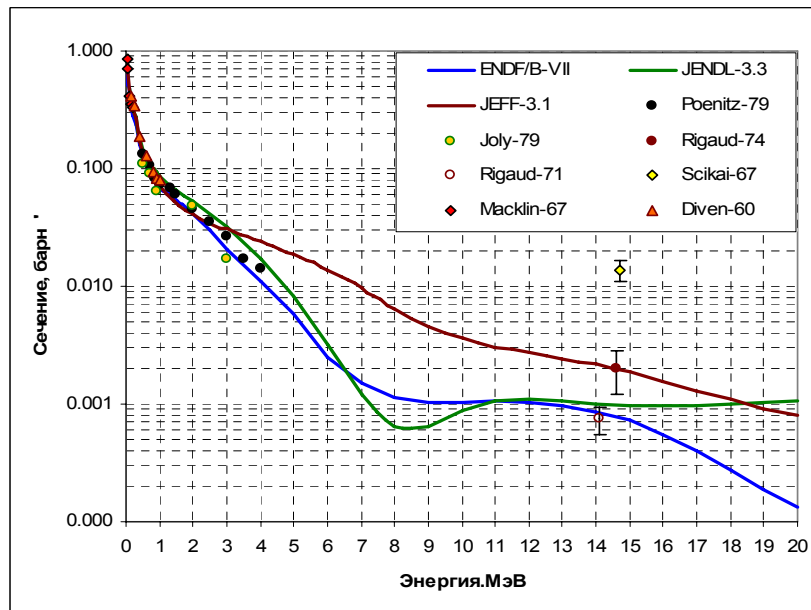


Рис.4в. Сечение захвата.

На рис.5 полное сечение сравнивается с результатами наиболее представительных экспериментов. Согласие, как и в случае сечения захвата, вполне приемлемое для всех оценок.

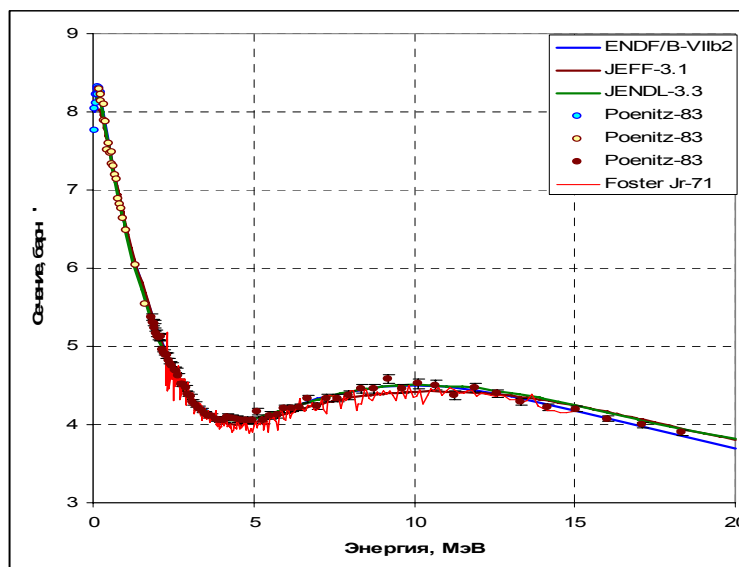


Рис.5. Полное сечение.

В EXFOR содержится немало экспериментальных данных о сечении неупругого рассеяния с возбуждением изомера $^{103}\text{Rh}^m$, о сечениях реакций $(n,2n)$, $(n,3n)$ и даже $(n,2p)$. Мы здесь не рассматриваем всю эту информацию, поскольку она не влияет на выбор файла оцененных данных.

Заключение

В РОСФОНД следует принять файл данных из ENDF/B-VIIb2. Включить в него файл MF=9 с данными об образовании долгоживущих изомеров $^{101}\text{Rh}^m$ и $^{102}\text{Rh}^m$ на основе данных из EAF-2003.

Автор заключения

Николаев М.Н.

45.7. Родий-105

Радиоактивен ($T_{1/2}=35.6$ ч.). Испытывает бета-распад в стабильный палладий-105. В реакторе образуется как продукт деления (при делении урана-235 выход 1.7%). Отличается аномально высоким сечением захвата тепловых нейтронов и резонансным интегралом.

В современных библиотеках используются три оценки нейтронных данных:

JENDL-3.3 (=JENDL-3.2=FOND-2.2) – оценка японской рабочей группы по продуктам деления, выполненная в 1990 г.

ENDF/B-VIIb2 (=CENDL-3) – оценка Сана, Цханга, Шена и др. (X.Sun, Z.Zhang, Q.Shen et al.) - сотрудников Китайского института ядерных исследований, датированная 2005 г.

JEFF-3.1 (=ENDF/B-V) – оценка Шентера, Шмиттрова и Рейча (R.E.Schenter, F.Schmitroth, C.Reich) выполненная в 1974 -79 г.г.

Тепловая и резонансная области.

В таблице 1 сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы захвата.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы

| Оценка | $\sigma_t(0.0253 \text{ эВ})$ | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|
| JENDL-3.3 | 24820 | 8991 | 15830 | 17000 |
| ENDF/B-VIIb2 | 24821 | 8991 | 15830 | 16937 |
| JEFF-3.1 | 16004 | 4 | 16000 | 15820 |

В EXFORe приведены следующие измерения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла.

Cunningham-62 (пересчитано с результата измерения на спектре реактора): 18000 барн.

Lantz-66: $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})=15800\pm 1500$ барн; $RI=17000\pm 3000$ барн.

Glendenin-67: $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})=13300\pm 1500$ $^{105}\text{Rh}(n,\gamma)^{106}\text{Rh}^g$ ($T_{1/2}=30$ сек..).

Glendenin-67: $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})=5000\pm 1000$ $^{105}\text{Rh}(n,\gamma)^{106}\text{Rh}^m$ ($T_{1/2}=2.2$ ч.).

Оценка Мухабхаба (1982 г.): $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})=11000\pm 3000$ $^{105}\text{Rh}(n,\gamma)^{106}\text{Rh}^g$ ($T_{1/2}=30$ сек..).

$\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})=5000\pm 1000$ $^{105}\text{Rh}(n,\gamma)^{106}\text{Rh}^m$ ($T_{1/2}=2.2$ ч.).

$RI=17000\pm 3000$ барн. (m+g)

Все оценки сечения захвата этим данным не противоречат. В JENDL-3.3 и ENDF/B-VIIb2 тепловая область (до 7.5 эВ) описывается парой фиктивных резонансов – при -5эВ и при 5 эВ, а при более высоких энергиях – до 100 кэВ сечения описываются средними резонансными параметрами.

В JEFF-3.1 резонансная область отсутствует – все сечения заданы поточечно.

Во всех оценках приводятся данные о неупругом рассеянии, в JENDL-3.3 и ENDF/B-VIIb2 и сечения всех других возможных реакций. В JENDL-3.3 учтено возбуждение наибольшего числа уровней при неупругом рассеянии.

Отмеченные различия практически не существенны.

Заключение

Включить в РОСФОНД тот же файл, что был включен в ФОНД-2.2, совпадающий с JENDL-3.3.

Автор заключения

Николаев М.Н.

46. ПАЛЛАДИЙ

46.1. Палладий-100

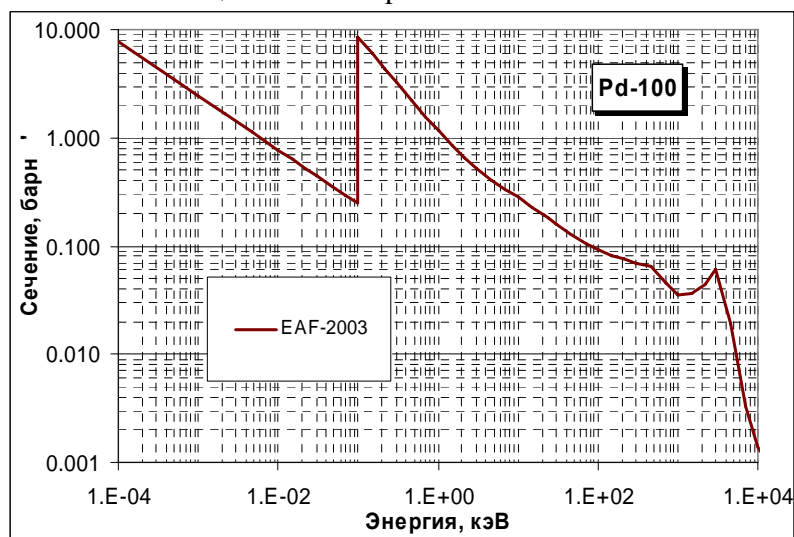
Радиоактивен ($T_{1/2}=3.7$ дн.). Захватывая орбитальный электрон, превращается в родий-100, а тот тем же путем – в рутений-100.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке активационных данных EAF-2003 содержится последняя по времени оценка нейтронных сечений. Экспериментальных данных для ее проверки нет. Из оценки следуют следующие значения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла:

$$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=15.5 \text{ барн}$$

$$RI_c=16.6 \text{ барна.}$$

На рисунке 1 показана оцененная энергетическая зависимость сечения захвата.



Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения реакций, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8, 9 и MF=10 удалить, поскольку в реакциях не образуется долгоживущих изомеров. Файлу присвоить MAT=4666.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

46.2. Палладий-102

Содержание в естественной смеси -1.02%

Имеется три полных набора оцененных нейтронных данных:

ENDF/B-VIIb2 оценка Янга и Мухабхаба (Yang, Muqhabghab) 2005 г. содержащая резонансные параметры из нового атласа Мухабхаба 2006г. и теоретическую оценку Янга 1996 г.;

JENDL-3.3 - оценка японской рабочей группой по продуктам деления, 1990 г. Резонансные параметры взяты из атласа Мухабхаба 1981г.

JEFF-3.1 - оценка Группелаара и Менапаса (H Gruppenlaar, E. Menapace), 1982 г.;

Кроме того, в EAF-2003 содержится оценка нейтронных сечений.

В ENDF/B-VII область разрешенных резонансов простирается до 820 эВ и содержит параметры 3 резонансов и связанное состояние; в остальных оценках – только один резонанс и связанное состояние; RRR ограничена 250 эВ.

В оценке JENDL-3.3 включена и область неразрешенных резонансов.

В таблице 1 приводятся сравнение значений оцененных сечений захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла с оценкой Мухабхаба 1981 г, подтвержденной в 2004 г., но, изменившейся в 2006 г. по в связи с появлением новой экспериментальной информации:

Таблица 1. Тепловое сечение захвата и резонансный интеграл Pd-102.

| | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI_c |
|---------------|---|------------------------------------|
| ENDF/B-VII-b2 | 1.82 барна | 16.5 барна |
| JENDL-3.3 | 3.36 барна | 19.0 барна |
| JEFF-3.1 | 3.36 барна | 12.95 барн |
| EAF-2003 | 3.36 барна | 12.5 барна |
| Мухабхаб-02 | 3.4 ± 0.3 барна | 10 ± 2 барна |
| Мухабхаб-05 | 1.82 ± 0.20 барна | 12 ± 2 барна |

На рисунке 2 сравниваются оцененные энергетические поведения сечения захвата. Экспериментальных данных (кроме эксперимента Мейнке) для их проверки на момент выполнения настоящей работы в нашем распоряжении не имелось¹.

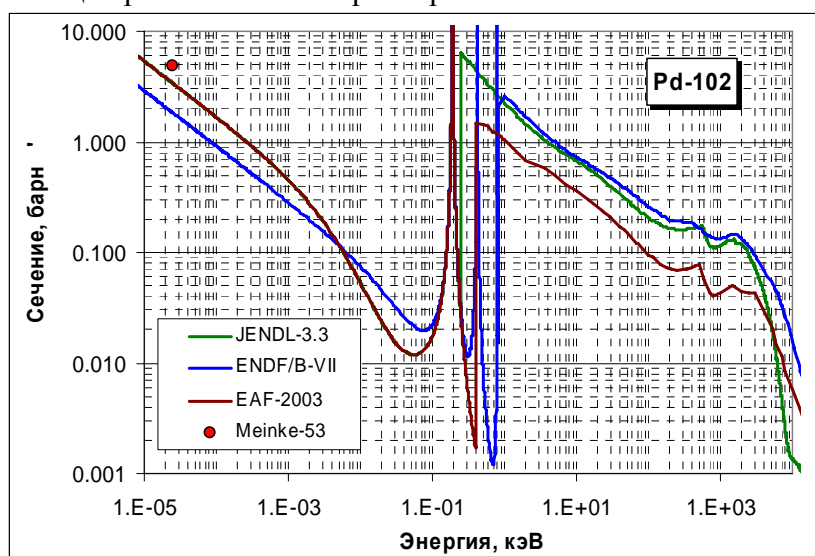


Рисунок 2. Сечение радиационного захвата Pd-102.

Заключение

На основе анализа наиболее важной величины – сечения радиационного захвата нейтронов – рекомендуется включить в РОСФОНД файл данных из ENDF/B-VII. Дополнить оценку файлом MF=9 с вероятностями образования изомеров Rh-101m и Rh-102m

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

¹ См., однако, Phys. Rev./C 48 p.22, 2005.

46.3. Палладий-103

Радиоактивен ($T_{1/2}=16.96$ дн.). Захватывая орбитальный электрон, превращается в родий-103.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя по времени оценка нейтронных сечений. Экспериментальных данных для ее проверки нет. Из оценки следуют следующие значения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла:

$$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=36 \text{ барн}$$

$$RI_c=305 \text{ барн.}$$

На рисунке 3 показана оцененная энергетическая зависимость сечения захвата.

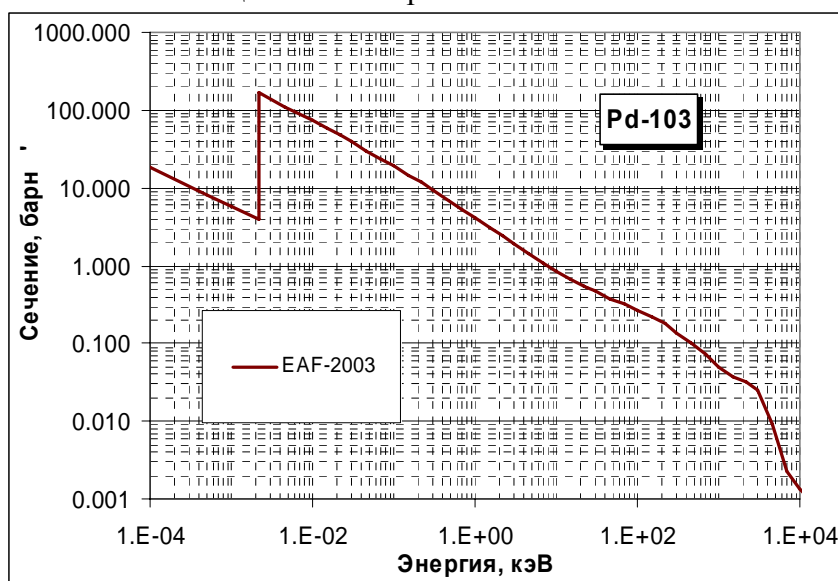


Рисунок 3. Сечение радиационного захвата Pd-103.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения реакций, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 удалить.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

46.4. Палладий-104

Содержание в естественной смеси -11.14%. Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами – $1.98 \cdot 10^{-9}$.

Имеется три полных набора оцененных нейтронных данных:

ENDF/B-VIIb2 оценка Янга и Мухабхаба (Yang, Muqhabghab) 2005 г., содержащая резонансные параметры из нового атласа Мухабхаба 2006г. (ниже 7.5 кэВ) и теоретическую оценку Янга 1996 г. (ENDF/B-VI) выше этой энергии. Области неразрешенных резонансов нет.

JENDL-3.3 - оценка японской рабочей группой по продуктам деления, 1990 г. Резонансная область (до 279 эВ) содержит единственный резонанс с параметрами из работы Попова и др. в атласе Мухабхаба 1981г. этот резонанс присутствует, но между ним

и 2.72 эВ резонансные параметры были не определены и потому в оценке JENDL-3.3 они учтены лишь приближенно – в области неразрешенных резонансов.

JEFF-3.1 - оценка Группелаара и Менапаса (H Gruppelaar, E. Menapace, 1982 г.), имеющая область 320 эВ без пропуска, а далее следует область неразрешенных резонансов.

Кроме того, в библиотеке активационных данных EAF-2003 содержится оценка нейтронных сечений.

В таблице 2 приводятся сравнение значений оцененных сечений захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла с единственным имеющимся в EXFORе экспериментальным результатом и оценкой Мухабхаба 2002 г. Экспериментальных данных для их проверки в EXFORе нет.

Таблица 2. Резонансные свойства Pd-104.

| | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI_c |
|---------------|-------------------------------|------------------|
| ENDF/B-VII-b2 | 0.65 барна | 20.8 барна |
| JENDL-3.3 | 0.52 барна | 21.5 барна |
| JEFF-3.1 | 0.315 барна | 1.38 барн |
| Мухабхаб-02 | 0.6 ± 0.3 барна | 16 ± 2 барна |

Как видно из таблицы 2, оценке резонансного интеграла Мухабхабом наилучшим образом соответствует оценка ENDF/B.

На рисунке 4 и 5 сравниваются оцененные энергетические поведения сечения захвата.

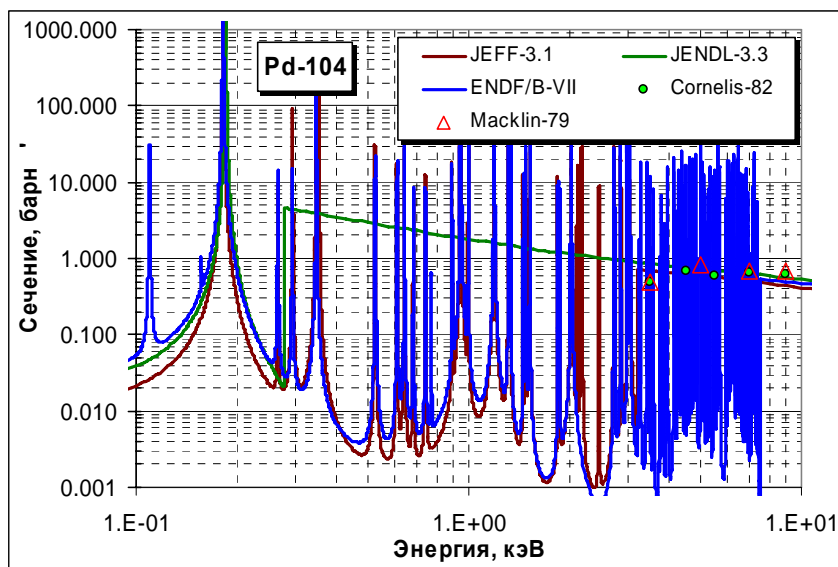


Рисунок 4. Сечение захвата Pd-104 в резонансной области

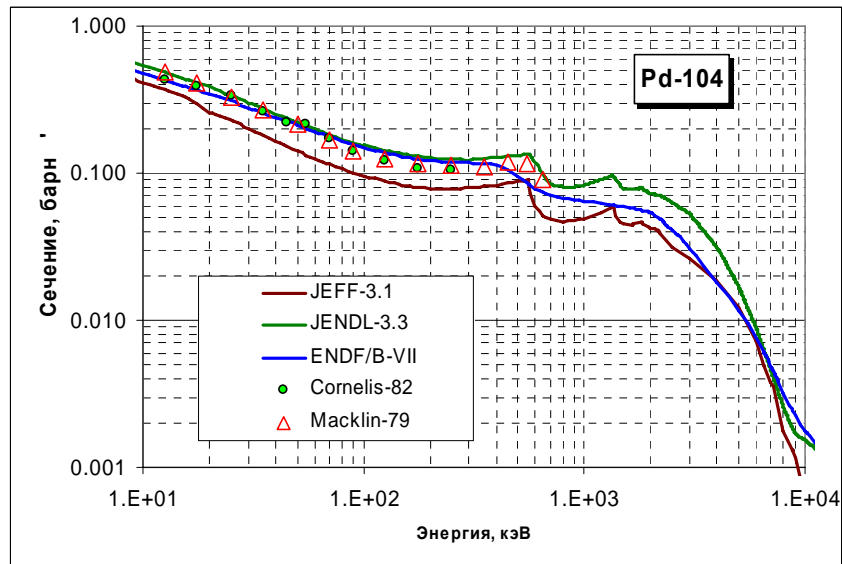


Рисунок 5. Сечение захвата Pd-104 вне резонансной области.

Из приведенного на рисунках 4 и 5 сравнения очевидны преимущества оценки, принятой в ENDF/B-VII.

Заключение

На основе анализа наиболее важной величины – сечения радиационного захвата нейтронов – рекомендуется включить в РОСФОНД файл данных из ENDF/B-VIIb2.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

46.5. Палладий-105

Содержание в естественной смеси -22.33% Продукт деления, входит в десятку наиболее важных продуктов деления. Его выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами – $1.73 \cdot 10^{-2}$.

Имеется три полных набора оцененных нейтронных данных:

ENDF/B-VIIb2 оценка Кима, Хермана, Обложинского, Оха и Мухабхаба (Kim, Herman, Oblozinsky, Oh, Mughabg) 2005 г.

JENDL-3.3 - оценка японской рабочей группой по продуктам деления, 1990 г.

JEFF-3.1 - оценка Группелаара и Менапаса (H Gruppelaar, E. Menapace, 1982г.).

Область разрешенных резонансов во всех оценках совпадает – она простирается до 2053.3 – 2060.0 эВ и содержит 198 резонансов с положительными энергиями и 1 (JEFF-3.1) или 2 связанных состояния. Различие состоит в определении спинов и четности резонансов и параметров низколежащих резонансов, определяющих тепловые сечения.

В таблице 3 приводятся сравнение значений оцененных сечений захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла с единственным имеющимся в EXFORe экспериментальным результатом и оценкой Мухабхаба 2002 г. Экспериментальных данных для их проверки в EXFORe нет.

Таблица 3. Резонансные свойства Pd-105.

| | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI_c |
|---------------|-------------------------------|------------|
| ENDF/B-VII-b2 | 20.9 барна | 95.3барна |
| JENDL-3.3 | 20.2 барна | 96.6 барна |
| JEFF-3.1 | 20.9 барна | 95.3 барн |
| Мухабхаб-02 | 21±1.5 барна | 98±5 барна |

На рисунке 6 сравниваются оцененные энергетические поведения сечения захвата вне резонансной области. Как видно, там, где имеются экспериментальные данные, оценки совпадают с ними и друг с другом.

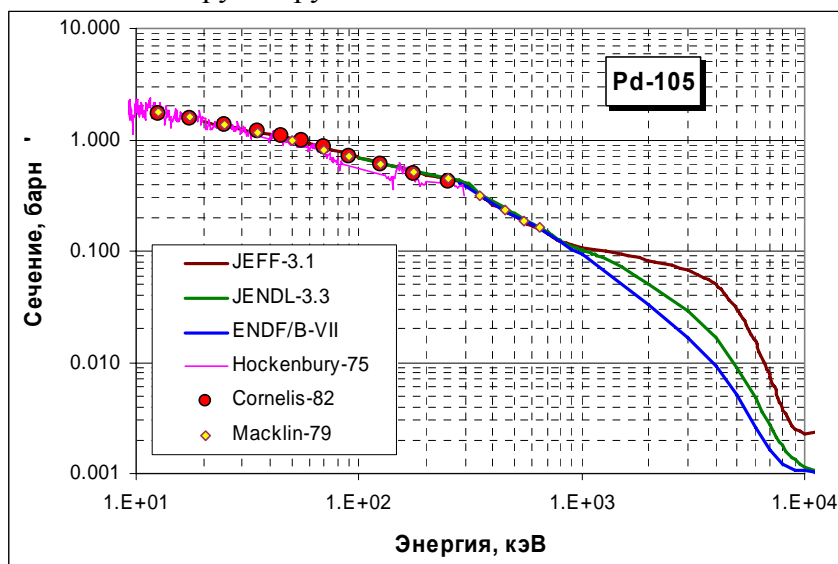


Рисунок 6. Сечение радиационного захвата Pd-105 вне резонансной области.

Заключение

На основе анализа наиболее важной величины – сечения радиационного захвата нейтронов – рекомендуется включить в РОСФОНД оценку нейтронных данных из ENDF/B-VIIb2, в которой учитываются новейшие экспериментальные данные.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

46.6. Палладий-106

Содержание в естественной смеси -27.33%. Продукт деления, входит в пятьдесят наиболее важных продуктов деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами – $2.15 \cdot 10^{-2}$.

Имеется три полных набора оцененных нейтронных данных:

ENDF/B-VIIb2 оценка Янга и Мухабхаба (Yang, Muqhabghab) 2005 г., содержащая резонансные параметры из нового атласа Мухабхаба 2006г. (ниже 6 кэВ) и теоретическую оценку Янга 1996 г. (ENDF/B-VI) выше этой энергии; Области неразрешенных резонансов нет.

JENDL-3.3 - оценка японской рабочей группой по продуктам деления, 1990 г.

JEFF-3.1 - оценка Группелаара и Менапаса (H Gruppelaar, E. Menapace, 1982 г.).

В таблице 4 приводятся сравнение значений оцененных сечений захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла с единственным имеющимся в EXFORe экспериментальным результатом и оценкой Мухабхаба 2002 г. Экспериментальных данных для их проверки в EXFORe нет.

Таблица 4. Резонансные свойства Pd-106.

| | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI_c |
|---------------|-------------------------------|---------------------|
| ENDF/B-VII-b2 | 0.308 барна | 7.45 барна |
| JENDL-3.3 | 0.303 барна | 8.96 барна |
| JEFF-3.1 | 0.300 барна | 5.93 барн |
| Мухабхаб-02 | 0.315 ± 0.029 барна | 5.7 ± 0.6 барна |

Из приведенного в таблице 4 сравнения видно, что ни одна из оценок не согласуется полностью с рекомендациями Мухабхаба.

На рисунке 7 сравниваются оцененные энергетические поведения сечения радиационного захвата в области разрешенных резонансов.

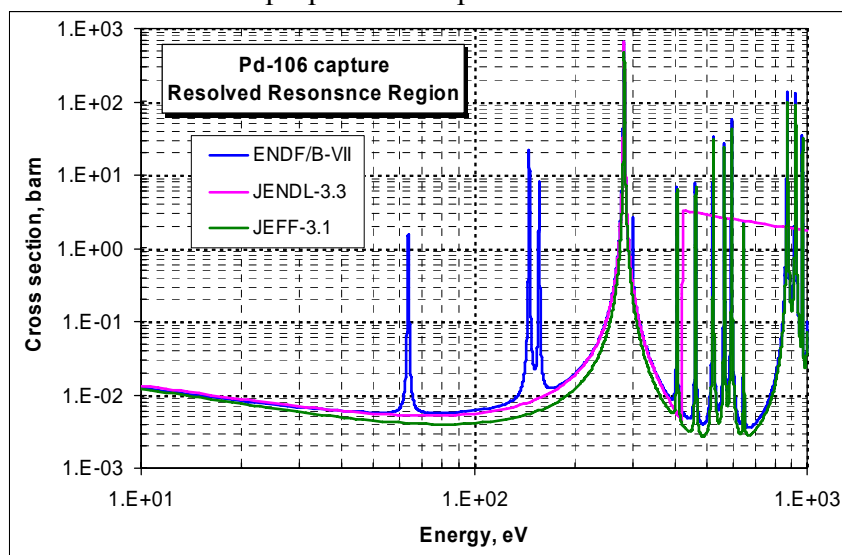


Рисунок 7. Сечение радиационного захвата Pd-106 в резонансной области

Из приведенного на рисунке 7 сравнения оцененных сечений видно, что в ENDF/B-VII появились дополнительные резонансные уровни.

Границы областей резонансного взаимодействия для Pd-106 показаны ниже в таблице 5.

Таблица 5. Границы резонансных областей Pd-106.

| Оценка | верхняя энергия разрешенных рез-сов | верхняя энергия неразрешенных рез-сов |
|------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| ENDF/B-VII | 6.0 кэВ | отсутствует |
| JENDL-3.3 | 0.423 кэВ | 100 кэВ |
| JEFF-3.1 | 3.2 кэВ | 100 кэВ |

На рисунке 8 сравниваются оцененные энергетические поведения сечения радиационного захвата в области неразрешенных резонансов и гладких сечений.

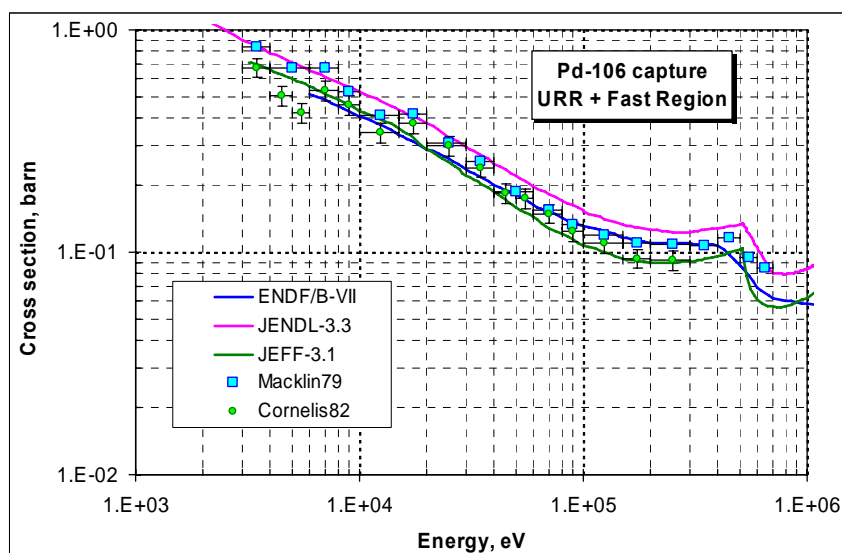


Рисунок 8. Сечение резонансного захвата Pd-106 вне резонансной области.

Преимущества оценки, принятой в ENDF/B-VII, в области разрешенных резонансов очевидны. Однако отсутствие области неразрешенных резонансов является серьезным недостатком оценки ENDF/B. В области энергий неразрешенных резонансов и выше оценка ENDF/B ориентирована на экспериментальные данные Маклина (1979 г.), а оценка JEFF – на более свежий эксперимент Корнелиса (1982) и имеет более низкие значения в области энергий ниже 30 кэВ. Поскольку процентное содержание данного изотопа наибольшее из всех стабильных изотопов палладия, то становится существенным и величина сечения радиационного захвата. Похоже, что оценка сечения радиационного захвата из JEFF является более привлекательной в этой области энергии.

Заключение

На основе анализа наиболее важной величины – сечения радиационного захвата нейтронов – рекомендуется включить в РОСФОНД файл данных из JEFF-3.1, заменив в ней нейтронные данные в области разрешенных резонансов из ENDF/B-VIIb2. Следует сюда добавить так же фотонные данные из ENDF/B-VII.

Автор рекомендации

Кощев В.Н.

46.7. Палладий-107

Радиоактивен ($T_{1/2}=6.5 \cdot 10^6$ лет). Продукт деления, входит в десятку наиболее важных продуктов деления. Его выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами – $1.82 \cdot 10^{-2}$.

Имеется три полных набора оцененных нейтронных данных:

ENDF/B-VIIb2 оценка Кима, Хермана, Обложинского, оха и Мухабхаба (Kim, Herman, Oblozinsky, Oh, Mughabg) 2005 г. По сути дела она представляет собой слегка откорректированную оценку JENDL-3.3.

JENDL-3.3 – оценка, выполненная японской рабочей группой по продуктам деления в 1990 году и пересмотренная в 2002 году.

JEFF-3.1 - оценка Группелаара и Менапаса (H Gruppelaar, E. Menapace, 1983г.).

Границы областей резонансного взаимодействия для Pd-107 показаны ниже в таблице 6.

Таблица 6. Границы резонансных областей Pd-107.

| Оценка | верхняя энергия разрешенных рез-сов | верхняя энергия неразрешенных рез-сов |
|------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| ENDF/B-VII | 1.0 кэВ | 100 кэВ |
| JENDL-3.3 | 1.0 кэВ | 100 кэВ |
| JEFF-3.1 | 0.66 кэВ | 50 кэВ |

В таблице 7 приводится сравнение значений оцененных сечений захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла с аналогичными величинами из рекомендации Мухабхаба 1981 г. Экспериментальных данных для их проверки в EXFORе нет.

Таблица 7. Резонансные свойства Pd-107.

| | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI_c |
|---------------|-------------------------------|-------------|
| ENDF/B-VII-b2 | 2.008 барна | 111.4 барна |
| JENDL-3.3 | 2.008 барна | 111.4 барна |
| JEFF-3.1 | 1.805 барна | 105.1 барн |
| Мухабхаб-81 | 1.8 ± 0.2 барна | 86.6 барна |

На рисунке 9 сравниваются оцененные энергетические поведения сечения захвата вне резонансной области. Как видно, там, где имеются экспериментальные данные, оцененные сечения согласуются с ними и друг с другом.

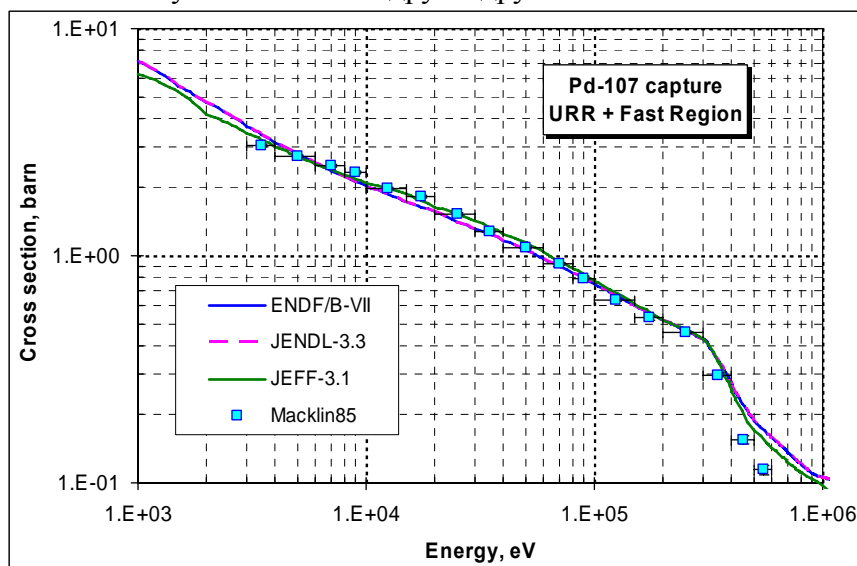


Рисунок 9. Сечение радиационного захвата Pd-105 вне резонансной области.

Заключение

На основе анализа наиболее важной величины – сечения радиационного захвата нейтронов – рекомендуется включить в РОСФОНД нейтронные данные из ENDF/B-VIIb2, которые косметически корректирует оценку JENDL-3.3.

Автор рекомендации
Кощеев В.Н.

46.8. Палладий-108

Содержание в естественной смеси -26.46%. Продукт деления, входит в тридцатку наиболее важных продуктов деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами – $1.58 \cdot 10^{-2}$.

Имеется три полных набора оцененных нейтронных данных:

ENDF/B-VIIb2 оценка Янга и Мухабхаба (Yang, Muqhabghab) 2005 г., содержащая резонансные параметры из нового атласа Мухабхаба 2006г. (ниже 5.5 кэВ) и теоретическую оценку Янга 1996 г. (ENDF/B-VI) выше этой энергии; Области неразрешенных резонансов нет.

JENDL-3.3 - оценка японской рабочей группой по продуктам деления, 1990 г., существенно пересмотренная в 2002 году.

JEFF-3.1 - оценка Группелаара и Менапаса (H Gruppelaar, E. Menapace, 1982 г.). По сути, это – оценка JEF-2.2.

Границы областей резонансного взаимодействия для Pd-108 показаны ниже в таблице 8.

Таблица 8. Границы резонансных областей Pd-108.

| Оценка | верхняя энергия | верхняя энергия |
|------------|---------------------|-----------------------|
| | разрешенных рез-сов | неразрешенных рез-сов |
| ENDF/B-VII | 5.5 кэВ | отсутствует |
| JENDL-3.3 | 9.0 кэВ | 100 кэВ |
| JEFF-3.1 | 3.2 кэВ | 100 кэВ |

В таблице 9 приводится сравнение оцененных значений сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла с аналогичными величинами из рекомендаций Мухабхаба 1981 г. и 2002 г.

Таблица 9. Резонансные свойства Pd-108.

| | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI_c |
|---------------|-------------------------------|-------------|
| ENDF/B-VII-b2 | 8.48 барна | 243.3 барна |
| JENDL-3.3 | 8.50 барна | 251.8 барна |
| JEFF-3.1 | 7.36 барна | 173.0 барн |
| Мухабхаб-81 | 7.6±0.4 барна | 244±4 барна |
| Мухабхаб-02 | 8.3±0.5 барна | 244±4 барна |

Из приведенного в таблице 9 сравнения видно, что в компиляции 2002 года Мухабхаб пересмотрел тепловое сечения в сторону его увеличения, а значение резонансного интеграла осталось прежним. Наилучшим образом с рекомендованными величинами согласуется оценка ENDF/B-VII. Оценка JENDL также хорошо согласуется с данными Мухабхаба. Оценка JEFF-3.1 заметно уступает современным требованиям в тепловой области.

На рисунке 10 сравниваются оцененные энергетические поведения сечения радиационного захвата Pd-108 в области разрешенных резонансов.

Из приведенного на рисунке 10 сравнения оцененных сечений радиационного захвата видно, что оценки ENDF/B-VII и JENDL-3.3 практически неразличимы в области энергий разрешенных резонансов, в то время, как оценка JEFF значительно от них отличается.

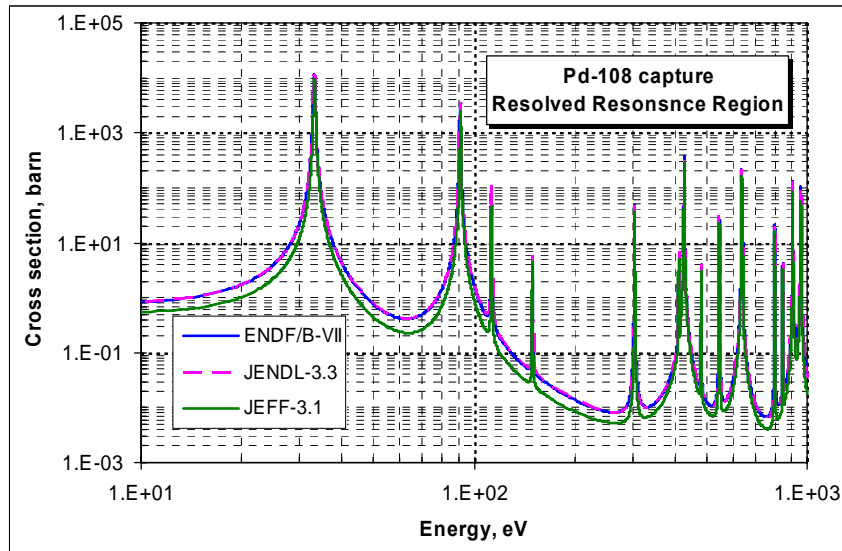


Рисунок 10. Сечение радиационного захвата Pd-108 в резонансной области

На рисунке 11 сравниваются оцененные энергетические поведения сечения радиационного захвата в области неразрешенных резонансов и гладких сечений.

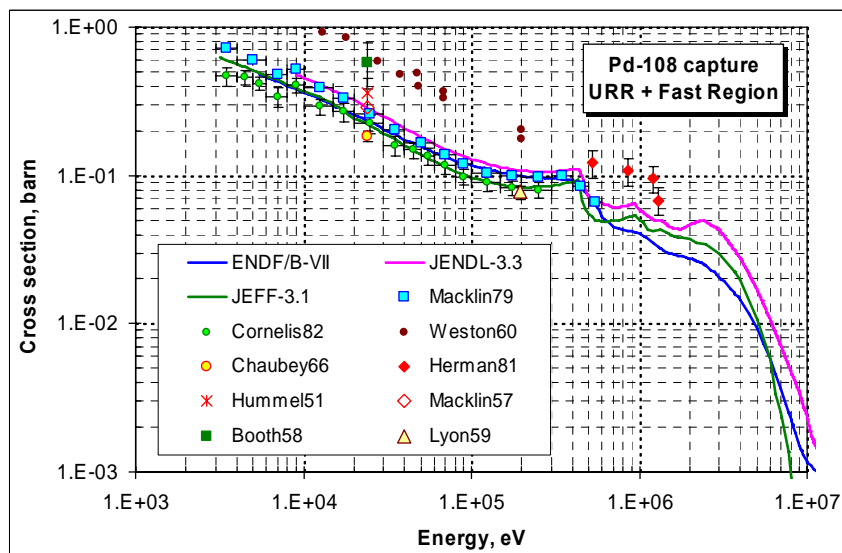


Рисунок 11. Сечение резонансного захвата Pd-108 вне резонансной области.

Из приведенного на рисунке 11 сравнения видно, что в области энергий неразрешенных резонансов и выше оценка ENDF/B ориентирована на экспериментальные данные Маклина (1979 г.), а оценка JEFF – на более свежий эксперимент Корнелиса (1982) и имеет более низкие значения в области энергий ниже 30 кэВ.

Преимущества оценки, принятой в ENDF/B-VII, в области разрешенных резонансов очевидны. Однако отсутствие области неразрешенных резонансов является серьезным недостатком оценки ENDF/B. Поскольку процентное содержание данного изотопа наибольшее из всех стабильных изотопов палладия, то становится существенным и величина сечения радиационного захвата. Оценка сечения радиационного захвата из JEFF является более привлекательной в этой области энергии.

Заключение

На основе анализа наиболее важной величины – сечения радиационного захвата нейтронов – рекомендуется включить в РОСФОНД файл данных из JEFF-3.1, заменив в ней нейтронные данные в области разрешенных резонансов из ENDF/B-VII. Следует сюда добавить так же фотонные данные из ENDF/B-VII.

Автор рекомендации

Кошечев В.Н.

46.9. Палладий-110

Содержание в естественной смеси -11.72%. Продукт деления, входит в пятьдесят наиболее важных продуктов деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами – $1.18 \cdot 10^{-2}$.

Имеется три полных набора оцененных нейтронных данных:

ENDF/B-VIIb2 оценка Янга и Мухабхаба (Yang, Muqhabghab) 2005 г., содержащая резонансные параметры из нового атласа Мухабхаба 2006г. (ниже 6.8 кэВ) и теоретическую оценку Янга 1996 г. (ENDF/B-VI) выше этой энергии; Области неразрешенных резонансов нет.

JENDL-3.3 - оценка японской рабочей группой по продуктам деления, 1990 г., существенно пересмотренная в 2002 году.

JEFF-3.1 - оценка Группелаара и Менапаса (H Gruppelaar, E. Menapasa, 1982 г.). По сути, это – оценка JEF-2.2.

Границы областей резонансного взаимодействия для Pd-110 показаны ниже в таблице 10.

Таблица 10. Границы резонансных областей Pd-110.

| Оценка | верхняя энергия разрешенных рез-сов | верхняя энергия неразрешенных рез-сов |
|------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| ENDF/B-VII | 6.8 кэВ | отсутствует |
| JENDL-3.3 | 8.0 кэВ | 100 кэВ |
| JEFF-3.1 | 2.9 кэВ | 100 кэВ |

В таблице 11 приводится сравнение оцененных значений сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла с аналогичными величинами из рекомендации Мухабхаба 1981 г.(= 2002 г.).

Таблица 9. Резонансные свойства Pd-108.

| | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI_c |
|---------------|-------------------------------|---------------------|
| ENDF/B-VII-b2 | 0.229 барна | 2.96 барна |
| JENDL-3.3 | 0.227 барна | 2.65 барна |
| JEFF-3.1 | 0.227 барна | 2.30 барн |
| Мухабхаб-81 | 0.227 ± 0.032 барна | 3.1 ± 0.4 барна |

Из приведенного в таблице 9 сравнения видно, что наилучшим образом с рекомендованными величинами согласуется оценка ENDF/B-VII. Оценка JENDL также хорошо согласуется с данными Мухабхаба. Оценка JEFF-3.1 не согласуется со значением резонансного интеграла.

На рисунке 12 сравниваются оцененные энергетические поведения сечения радиационного захвата Pd-108 в области разрешенных резонансов.

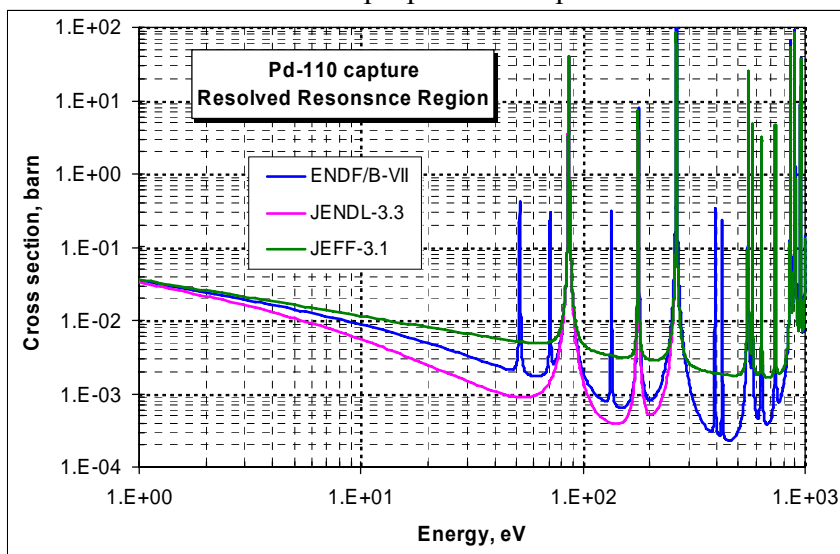


Рисунок 12. Сечение радиационного захвата Pd-108 в резонансной области

Из приведенного на рисунке 12 сравнения оцененных сечений радиационного захвата видно, что оценка ENDF/B-VII в области энергий разрешенных резонансов содержит большее число резонансных уровней и выгодно отличается от оценки JENDL-3.3 и JEFF-3.1.

На рисунке 13 сравниваются оцененные энергетические поведения сечения радиационного захвата в области неразрешенных резонансов и гладких сечений.

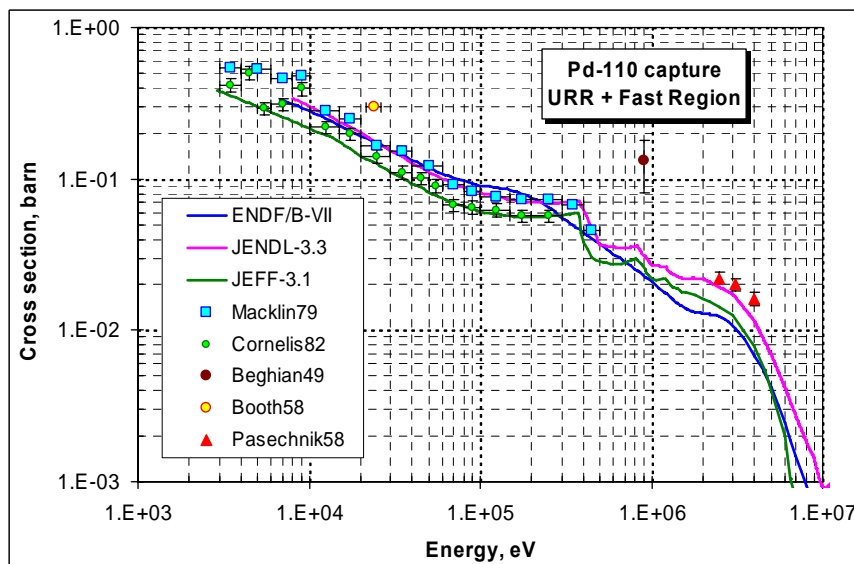


Рисунок 13. Сечение резонансного захвата Pd-110 вне резонансной области.

Из приведенного на рисунке 13 сравнения видно, что в области энергий неразрешенных резонансов и выше оценка ENDF/B ориентирована на экспериментальные данные Маклина (1979 г.), а оценка JEFF – на более свежий эксперимент Корнелиса (1982) и имеет более низкие значения до 300 кэВ. Далее они близки друг к другу. Оценка JENDL-3.3 так же, как и ENDF/B, ориентирована на эксперимент Маклина и выше 400 кэВ имеет наиболее высокие значения сечения захвата.

Преимущества оценки, принятой в ENDF/B-VII, в области разрешенных резонансов очевидны. Однако отсутствие области неразрешенных резонансов, как в случае Pd-106 и Pd-108, является серьезным недостатком оценки ENDF/B. Оценка сечения радиационного захвата из JEFF и для Pd-110 является более привлекательной в этой области энергии.

Заключение

На основе анализа наиболее важной величины – сечения радиационного захвата нейтронов – рекомендуется включить в РОСФОНД файл данных из JEFF-3.1, заменив в ней нейтронные данные в области разрешенных резонансов из ENDF/B-VII. Следует сюда добавить так же фотонные данные из ENDF/B-VII.

Автор рекомендации

Кощев В.Н.

47. СЕРЕБРО

47.1. Серебро-105

Радиоактивно ($T_{1/2}=49.29$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в стабильный палладий-105. В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакций $^{106}\text{Ag}(T_{1/2}=8.28 \text{ дн.})(n,2n)$, $^{106}\text{Cd}(n,np)$, $^{106}\text{Cd}(n,d)$.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Оцененные тепловое сечение и резонансный интеграл захвата:
 $\sigma_c=44.89$ барн; $RI=768.4$ барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Сформировать файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров в реакциях MT=22 и MT=107. Файлы MF=8 и 10 опустить.

Файлу присвоить MAT=4705.

Автор заключения

Забродская С.В.

47.2. Серебро-106m

Радиоактивно ($T_{1/2}=8.28$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в стабильный палладий-106. В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакции $^{107}\text{Ag}(n,2n)$ и неупругого рассеяния на $^{106}\text{Ag}^g$.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Оцененные тепловое сечение и резонансный интеграл захвата:
 $\sigma_c=57.09$ барн; $RI=1119.52$ барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Сформировать файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера в реакции MT=107. Секцию MT=4 перенести в файл MF=3 в MF=10; остальные секции в этом файле опустить. Файл MF=8 опустить.

Файлу присвоить MAT=4716.

Автор заключения

Забродская С.В.

47.3. Серебро-107

Содержание в естественной смеси 51.839%.

Имеется три оценки Ag-107:

ENDF/B-VIIb2 – файл получен международной группой WPEC Subgroup 23 в 2004-2005 с участием Мухабхаба,

JEFF-3.1 – файл создан координационной группой в 1982 и прошел ревизию в мае 2005.

JENDL3.3 – оценка LIU T.J., T.NAKAGAWA., K.SHIBATA 1987 года, которая дополнялась в 2002 году.

1. Тепловая и резонансная области

В табл. 1 приводятся тепловые сечения и резонансные интегралы по всем библиотекам.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

| | $\sigma(0.0253\text{эВ})$ | RI |
|--------------|---------------------------|--------|
| ENDF/B-VIIb2 | 37.63 | 110.19 |
| JEFF-3.1 | 37.63 | 106.98 |
| JENDL3.3 | 38.65 | 103.28 |

Граница области разрешенных резонансов в ENDF/B-VIIb2 (204 s-резонансов и 196 p-резонансов) – 6.5 кэВ, в JEFF-3.1 (57 резонансов) – 1 кэВ, в JENDL-3.3 (289 s-резонансов и 166 p-резонансов) – 7 кэВ. Параметры разрешенных резонансов в ENDF/B-VIIb2 приняты Мухабхабом, которые включены в атлас 2006г. В JEFF-3.1 также используются данные Мухабхаба только 1981г., а в JENDL3.3 - данные Y.Nakajima, которые в интервале от 1.25 до 2.6 кэВ дополнены искусственно введенными через каждые 20 (до 1.6 кэВ) или 40 кэВ одинаковыми p-резонансами. Эти искусственные резонансы были введены для получения данных по сечению захвата, согласующиеся с экспериментом Маклина¹. В тексте, сопровождающем файл ENDF/B-VII говорится об оценке Накаямы как об исходной. На основе каких экспериментов была проведена новая оценка резонансных параметров станет, по-видимому, известно после того, как новый атлас Мухабхаба станет доступен.

На рис.1а. сравниваются нарастающие суммы числа s- и p-резонансов в оценках ENDF/B-VII и JEFF-3.1. На рис.1б сравниваются нарастающие суммы всех резонансов вне зависимости от их спина и четности. Видно, что в интервале до 780 эВ число резонансов в ENDF/B-VII заметно выше. Это связано с учетом данных работы Лови и др.², появившейся в 1999 г. и, понятно, не учитывавшейся Накаямой. Далее с ростом энергии нарастающая сумма в JENDL-3.3 нарастает быстрее за счет искусственно введенных резонансов, о которых говорилось выше. Выше 2.6 кэВ, где искусственные резонансы не вводились, кривые нарастающих сумм идут параллельно: наборы резонансов здесь одинаковы, хотя разбивка по спином и четностям не совпадает.

Отсутствие p-резонансов до 1.25 кэВ в оценке JENDL-3.3 неестественно. Согласно оценке Лови и др. плотность p-резонансов на первых 780 эВ существенно выше, чем плотность s-резонансов и это согласуется с ожидаемым из статистических соображений. При более высоких энергиях плотность p-резонансов в оценке ENDF/B-VII резко снижается, указывая на значительный пропуск. Этот пропуск в оценке ENDF/B-VII ни дополнительно введенными фиктивными резонансами, ни плавной подложкой в файле MF=3. Можно поэтому полагать, что отмеченное выше расхождение в сечении захвата в

¹ Macklin, R.L., Nucl. Sci. Eng., 82, 400(1982).

² Lowie et al. Phys Rev./C, v.59,p.1119,1999.

этой оценке сохранилось. Неясна также причина, по которой не учитываются резонансы, лежащие в интервале от 6.5 кэВ до 7 кэВ.

Изложенное выше заставляет усомниться в качестве оценки ENDF/B-VII в области энергий выше 780 эВ. В то же время и методика Накаямы, принятая для подгонки под результаты эксперимента Маклина, отнюдь не безупречна: неясно почему решено, что выше 2.6 кэВ пропуск р-резонансов отсутствует; нарастающая сумма числа р-резонансов ведет себя весьма немонотонно. Очевидно, что переоценка сечений в области разрешенных резонансов с привлечением и результатов измерений с низким разрешением и статистических соображений была бы весьма желательна. Поскольку оценка, принятая в ENDF/B-VII ниже 780 эВ представляется безупречной, а выше не испорчена фиктивными резонансами принять ее в качестве исходной для будущей переоценки представляется целесообразным.

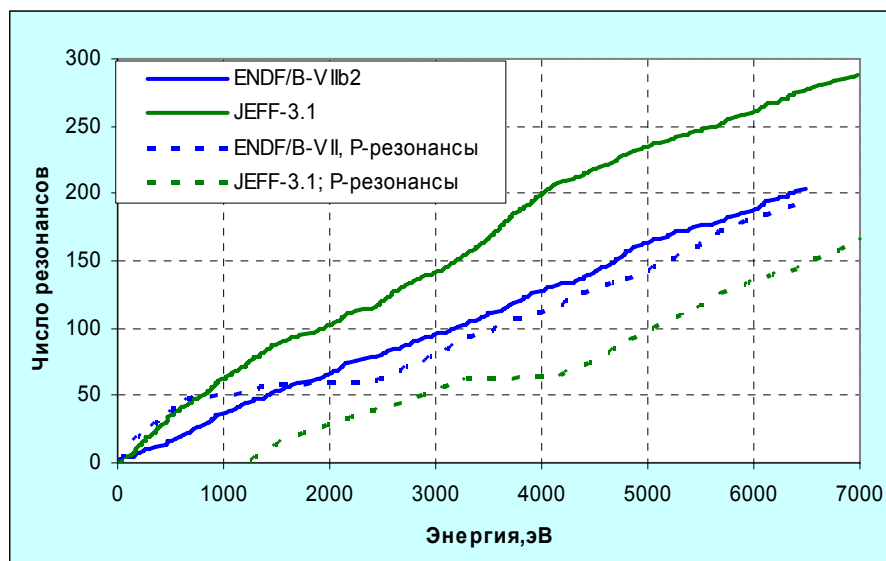


Рис.1а. Нарастающие суммы s- и p-резонансов

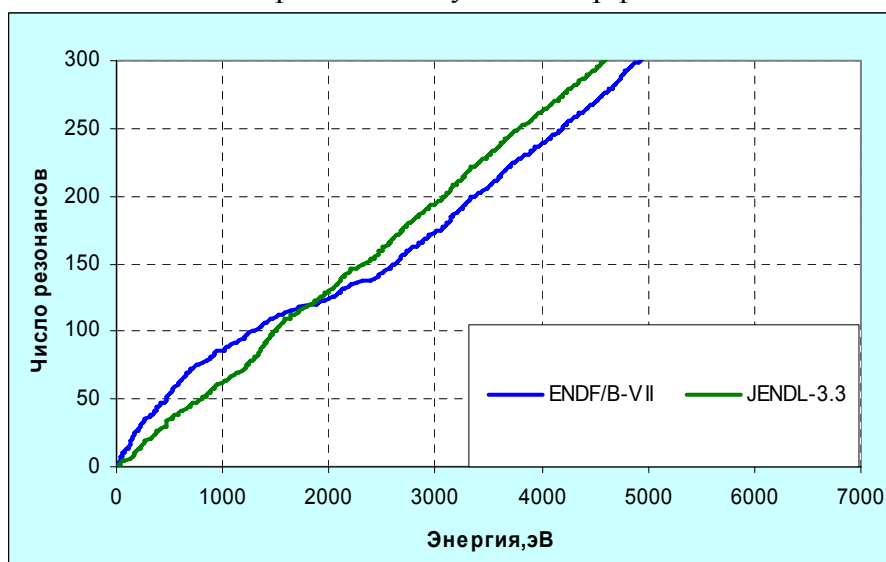


Рис.1б. Нарастающие суммы всех резонансов

На рис.2а показан оцененный ход сечения захвата в тепловой области и экспериментальные данные. Разброс экспериментальных данных, полученных в разные годы, велик. Оценки целиком или в основном опираются на данные Ривса.

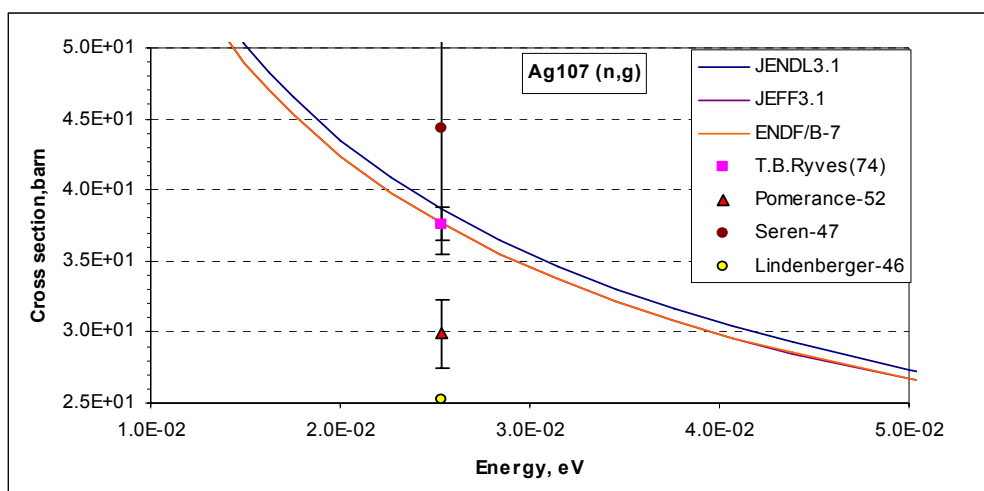


Рис.2а. Сечение захвата в области тепловых энергий

На рис.2б показан ход сечения захвата в низкоэнергетической части области разрешенных резонансов. Ясно видны резонансы, проявившиеся в экспериментах Лови, не учтенные Накаямой.

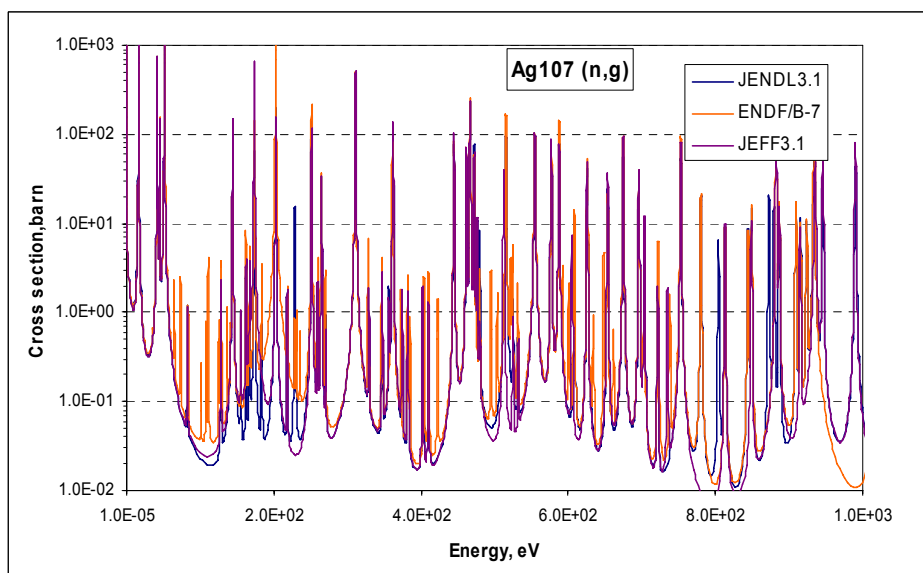


Рис.2б. Сечение захвата в области ниже 1 кэВ.

Рис.2в показывает, что при энергиях от 6.5 кэВ до 7 кэВ, относящейся в оценке ENDF/B-VII уже к области неразрешенных резонансов, сечение захвата согласуется с данными экспериментов, выполненных с низким разрешением. В интервале от 2.6 кэВ до 6.5 кэВ оценки ENDF/B-VII в JENDL-3.3 практически совпадают. Вне резонансной области сечение захвата удовлетворительно согласуется с совокупностью экспериментальных данных.

Экспериментальных данных по полному сечению неупругого рассеяния нет; имеются лишь результаты активационных измерений сечения образования 44-секундного изомера ^{107m}Ag .

Оцененное сечение реакции $(n,2n)$ удовлетворительно согласуется с совокупностью экспериментальных данных по сумме сечений образования ^{106}Ag в основном и изомерном состояниях.

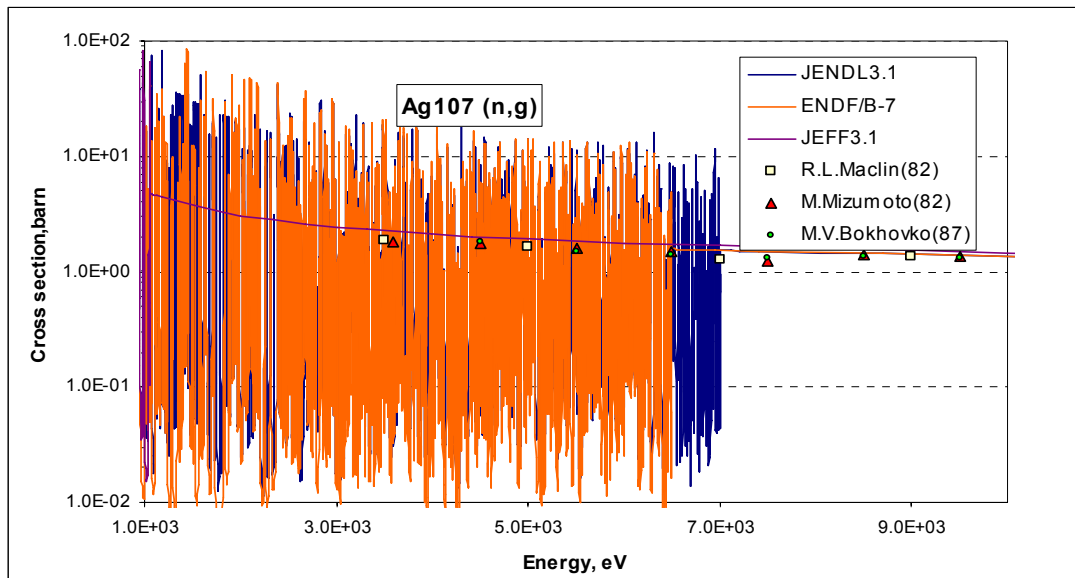


Рис.2в.

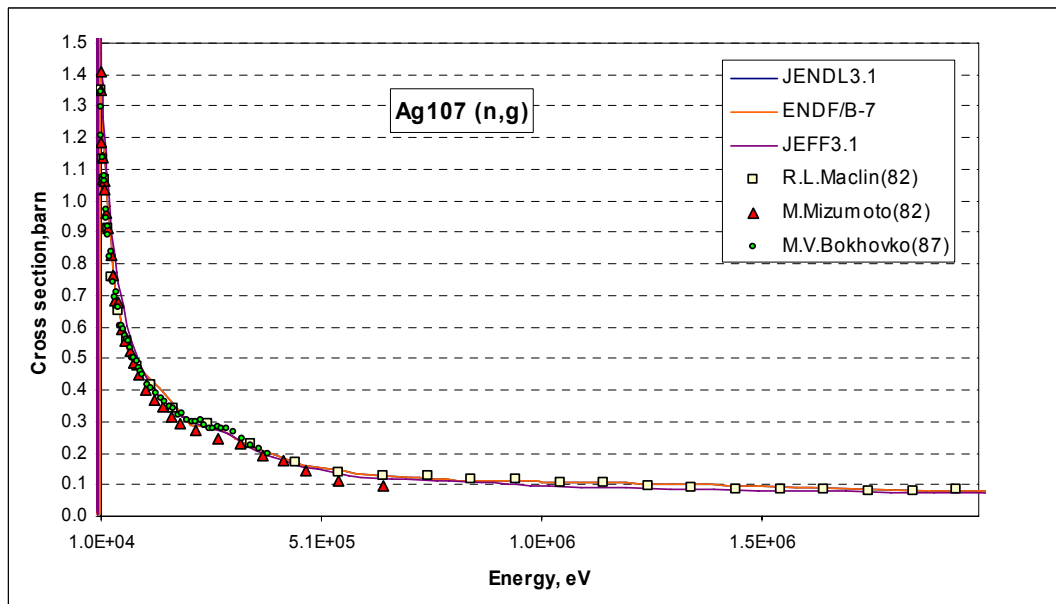


Рис.2г. сечение захвата при высоких энергиях

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2. Дополнить оценку файлом MF=9 с MT=102 и MT=16 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{108}\text{Ag}^m$ и $^{106}\text{Ag}^m$, используя данные EAF-2003. Целесообразна переоценка данных в области разрешенных резонансов выше 780 эВ с целью учета пропуска большей части р-резонансов.

Авторы заключения

Николаев М.Н., Забродская С.В.

47.4. Серебро-108m

Радиоактивно ($T_{1/2}=418$ лет). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в стабильный палладий-108. В реакторах может образовываться за счет реакций $^{107}\text{Ag}(n,\gamma)$ и $^{109}\text{Ag}(n,2n)$.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Оцененные тепловое сечение и резонансный интеграл захвата:

$\sigma_c=50.75$ барн; $RI=1157.71$ барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003.. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Сформировать файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера в реакции MT=17. Секцию MT=4 перенести и файла MF=3 в MF=10; остальные секции в этом файле опустить. Файл MF=8 опустить.

Файлу присвоить MAT=4718.

Автор заключения

Забродская С.В.

47.5. Серебро-109

Содержание в естественной смеси 48.161%. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $-4.57 \cdot 10^{-4}$.

Имеется три оценки данных для Ag107:

ENDF/B-VIIb2 – оценка сделана Kim, Herman, Oblozinsky, Oh, S.F. Mughabghab в 2005г, также как и для Ag107, в рамках международной рабочей группы WPEC (Subgroup 23).

JEFF-3.1 – оценка H.GRUPPELAAR, E.MENAPACE 1983г, дополненная 2005 году.

JENDL3.3 – оценка LIU T.J., T.NAKAGAWA., K.SHIBATA 1987 года, которая корректировалась в 2002 году.

2. Тепловая и резонансная области

В табл. 1 приводятся тепловые сечения и резонансные интегралы по всем библиотекам. Они практически совпадают как друг с другом, так и с рекомендацией Мухабхаба-2003 ($\sigma(0.0253\text{эВ})=91 \pm 1$ барн; $RI=1400 \pm 48$ барн).

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

| | $\sigma(0.0253\text{эВ})$ | RI |
|--------------|---------------------------|---------|
| ENDF/B-VIIb2 | 90.92 | 1478.20 |
| JEFF-3.1 | 90.79 | 1475.25 |
| JENDL3.3 | 90.62 | 1472.82 |

Граница области разрешенных резонансов в ENDF/B-VIIb2(236 s-резонансов и 71 p-резонанс с максимальными энергиями 4996 эВ и 4974 эВ) – 4.9 кэВ, в JEFF-3.1(57

s-резонансов с максимальной энергией 976 эВ) – 0.98 кэВ, в JENDL3.3 (289 s-резонансов и 185 z-резонансов с максимальными энергиями 7105 эВ и 7086 эВ) – 7 кэВ. Параметры разрешенных резонансов в ENDF/B-VIIb2, согласно примечаниям к файлу, ниже 2.5 кэВ основаны на компиляции Мухабхаба 1981. Фактически, видимо использованы также результаты работ Lowie-99 и Zanini-97. В JEFF-3.1 также используются данные Мухабхаба 1981г., а в JENDL3.3 – оценка Y.Nakajima тех работ, которые были выполнены до 1983 г. и, согласно комментарию, учтены и в оценке ENDF/B-VII.

На рис.1. показаны нарастающие суммы числа s- и p-резонансов в оценках ENDF/B-VIIb2 и JENDL-3.3 . Ситуация в точности такая же, как и в случае ^{107}Ag : в японской оценке введено немало фиктивных p-резонансов в интервале от 1.25кэВ до 2.6 кэВ для учета пропуска слабых уровней. В области ниже 1.25 кэВ в этой оценке p-резонансы вообще не выделены. В оценке ENDF/B-VII на основе работы Лови.

На рис. 1б. сравниваются нарастающие суммы всех резонансов. Видно, что в оценке ENDF/B-VII в нижней части области разрешенных резонансов описано большее их число (видимо, на основании работы Лови), тогда резонансы с энергиями выше 5000 эВ вообще не описываются.

Как и в случае ^{107}Ag , любая оценка в области разрешенных резонансов требует пересмотра и учета пропуска части уровней либо путем введения фиктивных резонансов, либо путем введения плавной подложки в файл MF=3 (что хуже, поскольку исключает возможность учета эффекта самоэкранировки пропущенных резонансов). В РОСФОНД целесообразно принять оценку из ENDF/B-VII в качестве стартовой для последующей доработки.

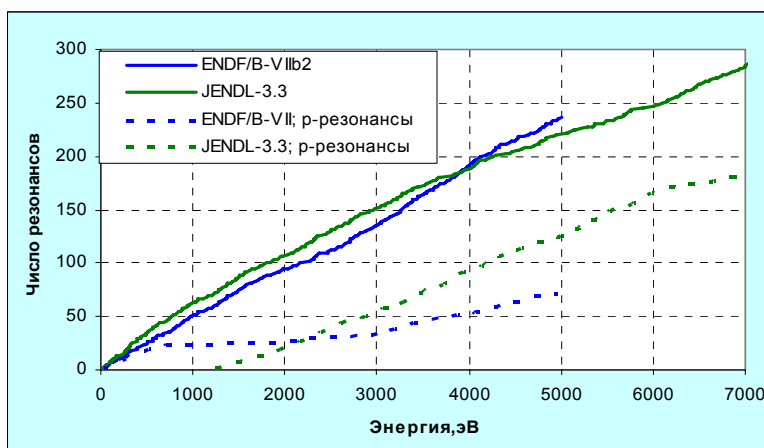


Рис. 1а. нарастающие суммы числа s- и p-резонансов.

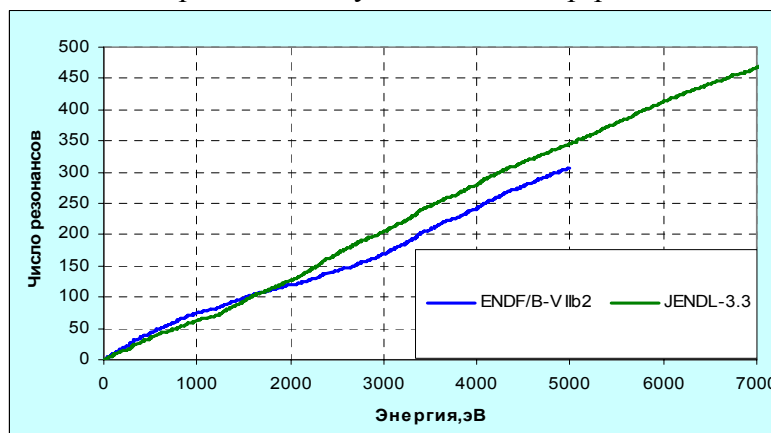


Рис.1б. Нарастающие суммы всех резонансов

На рис. 2 и 3 оцененные полное сечение и сечение захвата в нижеэнергетической части области разрешенных резонансов сравниваются с имеющимися экспериментальными данными. В сечении захвата в оценке ENDF/B-VIIb2 ясно видны

дополнительные слабые резонансы, не проявившиеся в эксперименте Чрина и почти не заметные в полном сечении.

На рис.4 показано сечение захвата в области, охватывающей и разрешенные резонансы и область неразрешенных резонансов. В последней имеет место приемлемое согласие с результатами экспериментов, выполненных с низким разрешением.

На рис. 5 и 6 оценки сечения захвата вне резонансной области сравнены с экспериментальными данными. Преимущество оценки ENDF/B-VII очевидно.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2. Дополнить оценку файлом MF=9 с MT=102 и MT=16 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{110}\text{Ag}^m$ и $^{108}\text{Ag}^m$, используя данные EAF-2003. Целесообразна переоценка данных в области разрешенных резонансов выше 780 эВ с целью учета пропуска большей части р-резонансов.

Авторы заключения

Николаев М.Н., Забродская С.В.

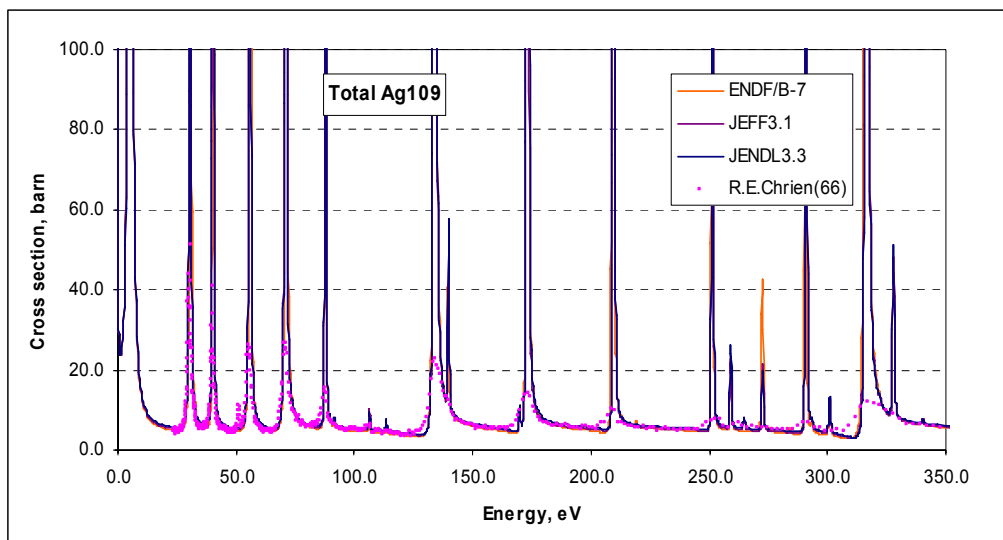


Рис.2. Полное сечение ниже 350 эВ

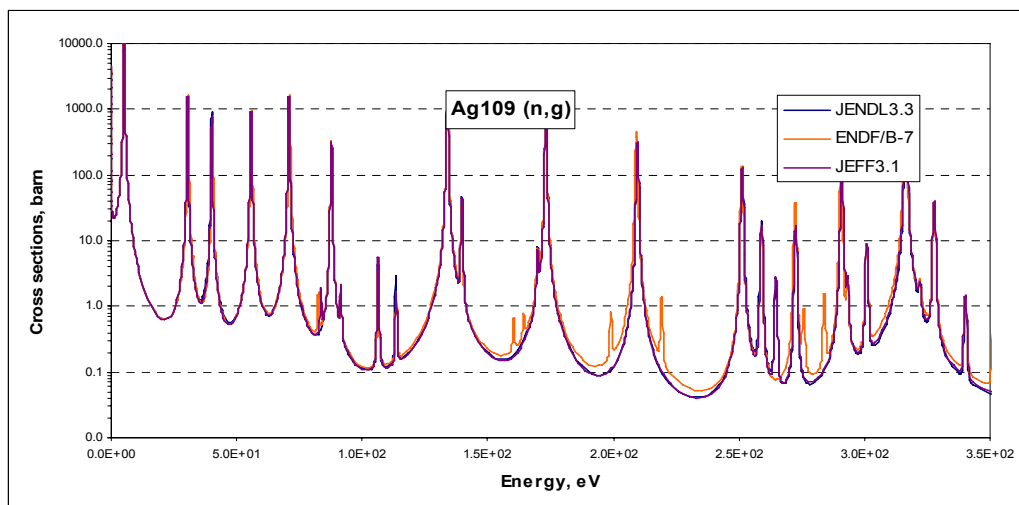


Рис.3. Сечение захвата ниже 350 эВ.

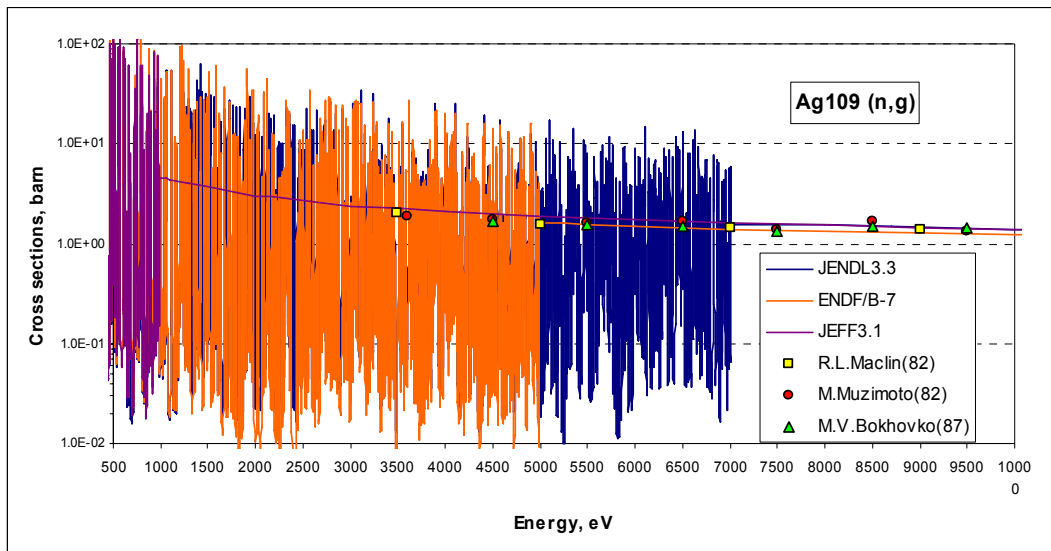


Рис.4 Сечение захвата

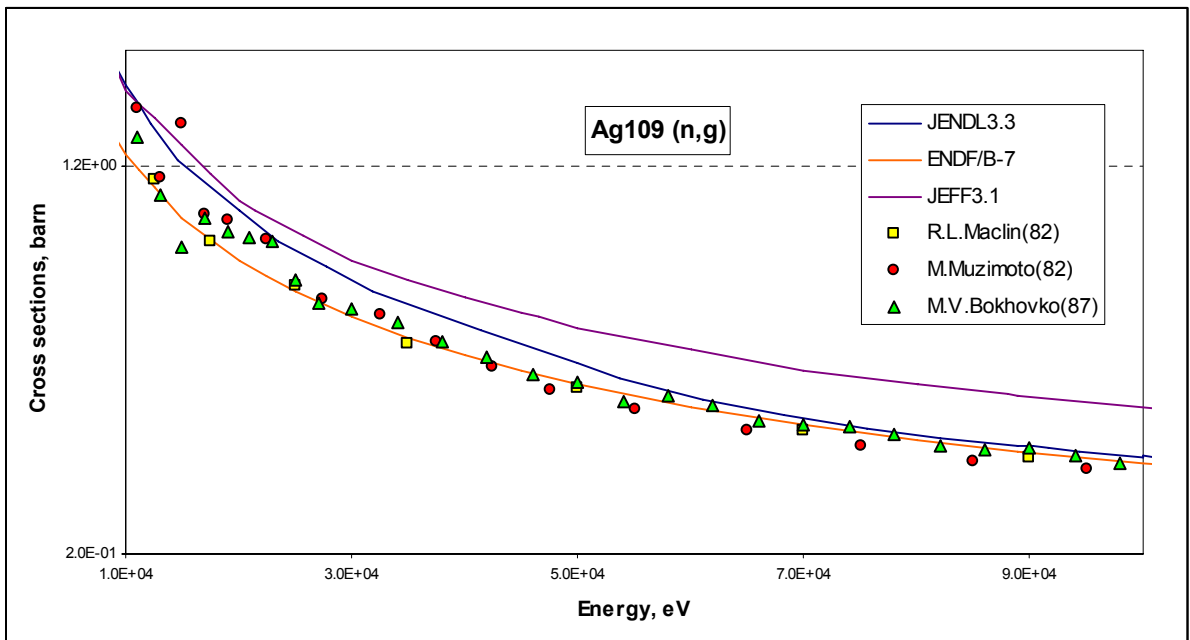


Рис5. Сечение захвата

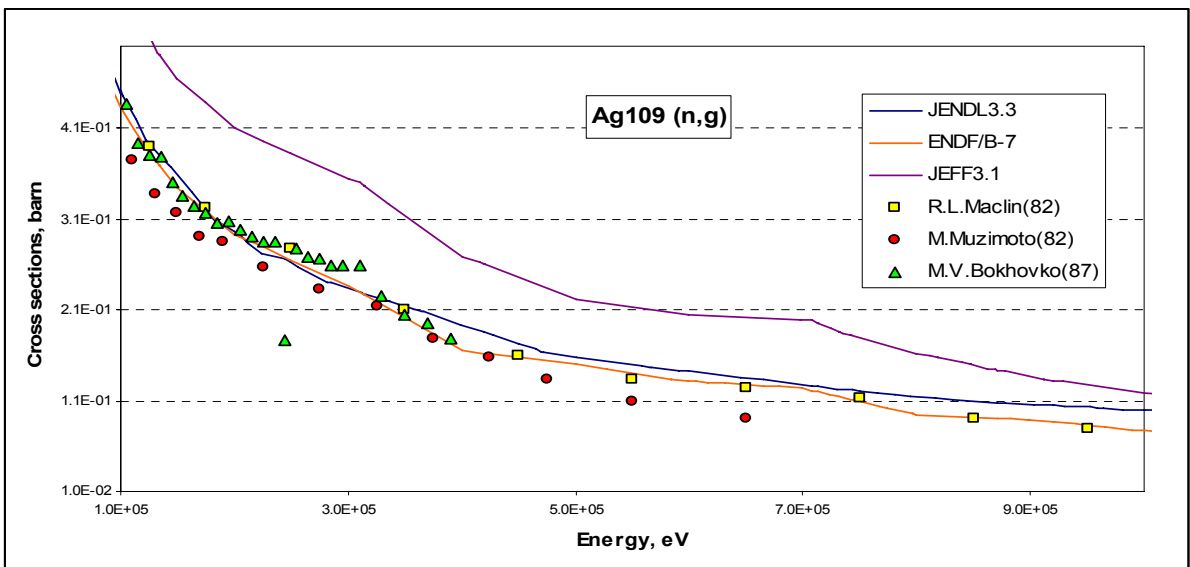


Рис.7. Сечение захвата

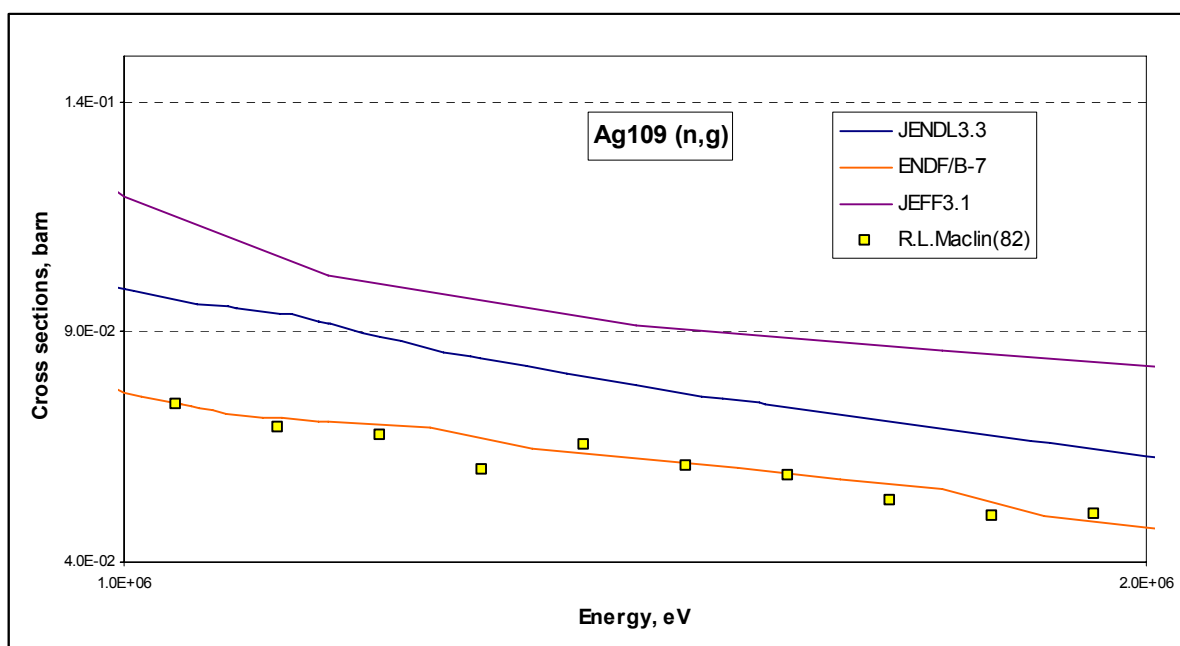


Рис.8. Сечение захвата

47.6. Серебро-110m

Радиоактивно ($T_{1/2}=249.79$ дн). Испытывая β^- -распад с вероятностью 98.6%, превращается в стабильный кадмий-110, остальное – это изомерный переход в основное состояние. В реакторах может образовываться за счет реакций $^{109}\text{Ag}(n,\gamma)$. Как продукт деления практически не образуется.

Имеется несколько наборов оцененных нейтронных для $^{110}\text{Ag}^m$: ENDF/B-VIIb2 – оценка сделана в рамках международной группой WPEC Subgroup 23 при участии Мухабхаба в 2005 г. Более детально оценка описана в пока недоступном атласе резонансных параметров Мухабхаба, вышедшем в 2003 г.

JENDL3.3 – оценка сделана рабочей группой по продуктам деления в 1990 году и дополнена в 2002.

EAF-2003 – оценка 2003 Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В табл. 1 приводятся тепловые сечения и резонансные интегралы по всем библиотекам.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

| | $\sigma(0.0253\text{эВ})$ | RI |
|--------------------|---------------------------|---------|
| ENDF/B-VIIb2 | 82.36 | 89.79 |
| JENDL3.3 | 82.04 | 90.75 |
| EAF3.0/A | 165.0 | 2480.45 |
| EXFOR(R.G.Hart-63) | 82.00 | |

Неприемлемость оценки EAF-2003 очевидна. На рис. 1 сравниваются оцененные сечения захвата. Преимущество ENDF/B-VIIb2 состоит, главным образом, в том, что эта оценка, выполненная позднее, вероятно. Более полно учитывает имеющуюся экспериментальную информацию.

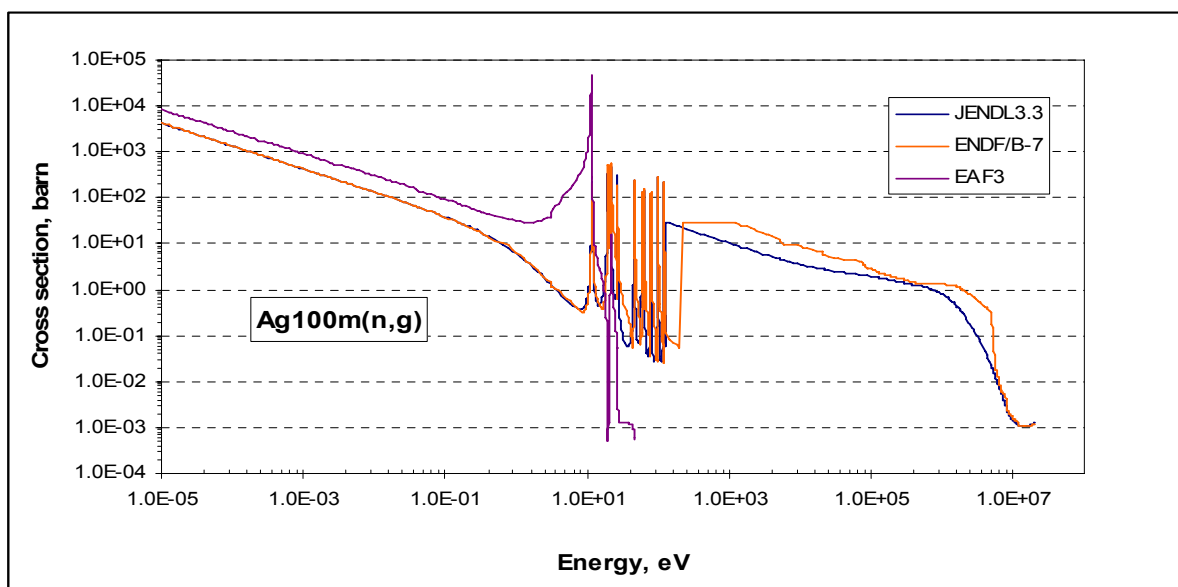


Рис.1. Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2. Дополнить оценку файлом MF=9 с MT=17 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{108}\text{Ag}^m$, и файл MF=10 с сечением перехода в основное состояние используя данные EAF-2003.

Файлу присвоить MAT=4730.

Автор заключения

Забродская С.В.

47.7. Серебро-111

Радиоактивен ($T_{1/2}=7.45$ дн). Испытывая β^- -распад, превращается в стабильный кадмий-111. В реакторах может образовываться за счет реакций $^{110}\text{Ag}(n,\gamma)$ и как продукт деления (выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами – $3.27 \cdot 10^{-4}$).

Имеется несколько наборов оцененных нейтронных Ag111:

ENDF/B-VIIb2 – оценка сделана Herman, Oblozinsky, Sarger в рамках международной группой WPEC Subgroup 23 при участии Мухабхаба в 2005г.

JEFF3.1 – оценка сделана рабочей группой в 1982 году и дополнена в 2005.

EAF3.0 – оценка 2003 Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В табл. 1 приводятся тепловые сечения и резонансные интегралы по всем библиотекам и результат единственного измерения, с которым все оценки, естественно, совпадают.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

| | $\sigma(0.0253\text{эВ})$ | RI |
|--------------|---------------------------|--------|
| ENDF/B-VIIb2 | 2.99 | 115.89 |
| JEFF3.1 | 3.00 | 103.97 |
| EAF3.0/A | 3.00 | 103.89 |
| Drushel-66 | 3.2 ± 2 | |

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку из ENDF/B-VII, как самую последнюю. Дополнить ее файлом MF=9 с MT=16 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{110}\text{Ag}^m$, используя данные EAF-2003.

Авторы рекомендации

Забродская С.В., Николаев М.Н.

48. КАДМИЙ

48.0. Общие замечания

Для библиотеки РОСФОНД требовалось отобрать нейтронные данные для 8-ми стабильных и 4-х долгоживущих изотопов кадмия. Рассмотрим результаты деятельности по переоценке данных для изотопов кадмия, проведенной в последние годы в сравнении с оценками, содержащимися в ФОНД-2.2. При этом главное внимание будем обращать на результаты оценки сечения захвата, поскольку почти все изотопы кадмия являются важными продуктами деления. Кроме этого, природный кадмий широко используется в экспериментальной физике, как материал для отсека тепловых нейтронов.

Все экспериментальные данные, используемые при сравнении с оцененными сечениями, были взяты из базы данных EXFOR-CINDA (версия 1.81, июнь 2005).

Радиоактивные изотопы.

Из 3-х долгоживущих изотопов диспрозия - ^{109}Cd ($T_{1/2}=461.4$ дн.), $^{113\text{m}}\text{Cd}$ ($T_{1/2}=14.1$ г.) и ^{115}Cd ($T_{1/2}=53.46$ ч.) - авторы библиотеки EAF-3 (=ФОНД-2.2) пересмотрели данные для ^{109}Cd , уменьшив сечение захвата тепловых нейтронов с 700 барн (EAF-3) до 182 барн (см. рисунок 1). Основанием явился пересчет сечения по программе MUSGAM. Данные для $^{113\text{m}}\text{Cd}$ претерпели незначительные изменения (см. рисунок 2), а данные для ^{115}Cd и вовсе не изменились (см. рисунок 3).

Особая ситуация наблюдается для радиоактивного изотопа $^{115\text{m}}\text{Cd}$ ($T_{1/2}=44.56$ д.). Для него международной рабочей группой по оценке нейтронных данных для продуктов деления (SWG-23) создан полный файл нейтронных данных на основе новой компиляции резонансных параметров Мухабхаба (2006 г.). И, конечно, сечение радиационного захвата в новом файле определяется по параметрам разрешенных резонансов, а не по параметрам оптической модели. В новом файле сечение захвата изменено с 31 барн до 5 барн (см. рисунок 4).

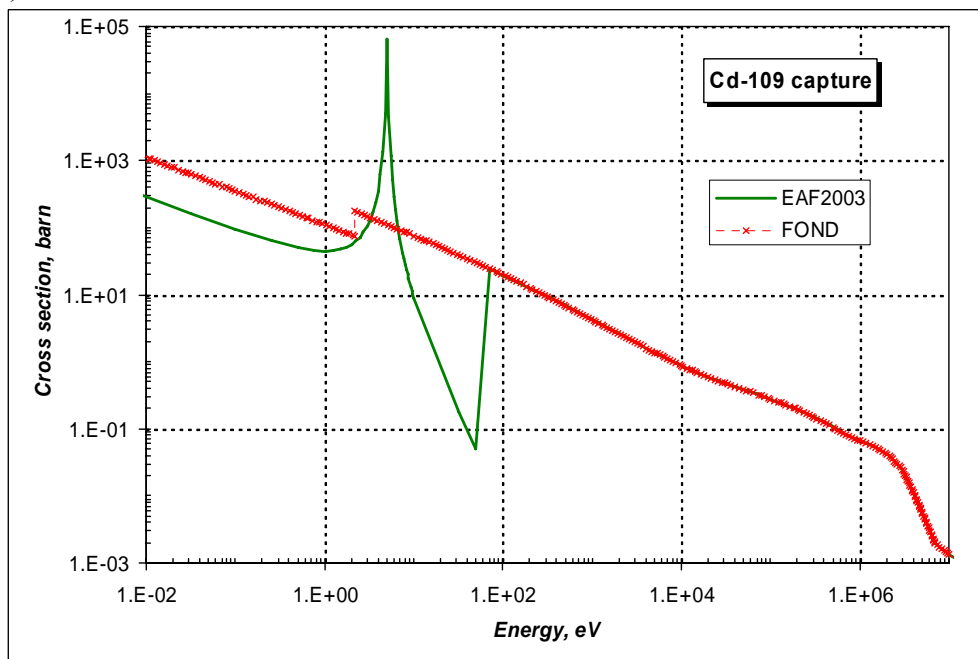


Рисунок 1 – Сравнение сечения радиационного захвата на Cd-109.

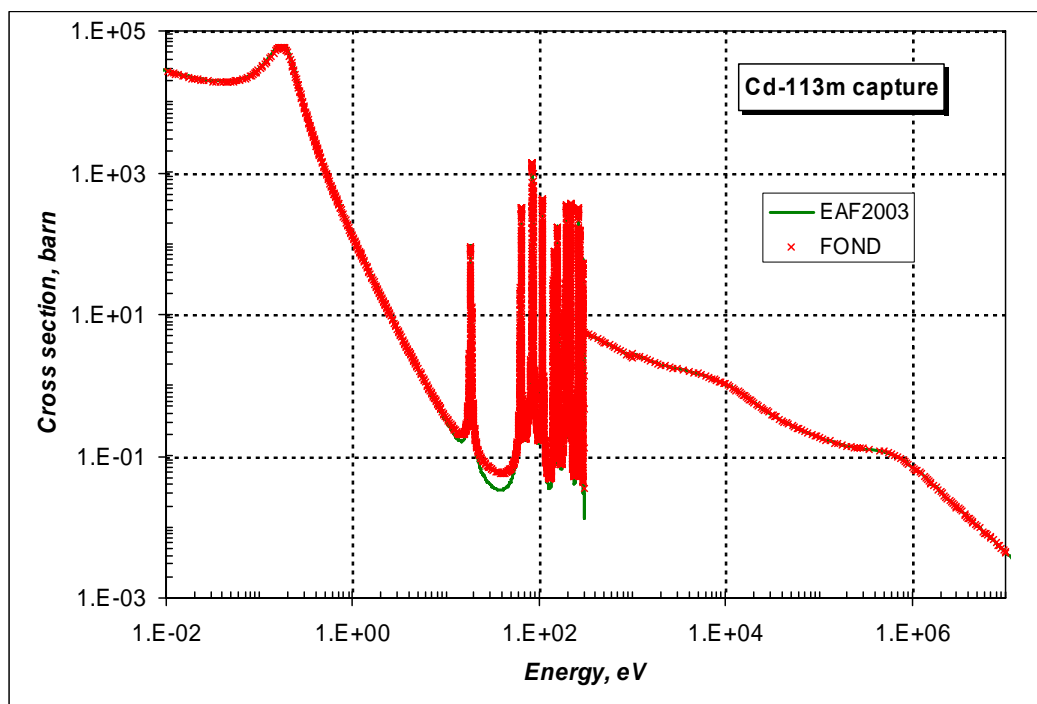


Рисунок 2 – Сравнение сечения радиационного захвата на Cd-113m.

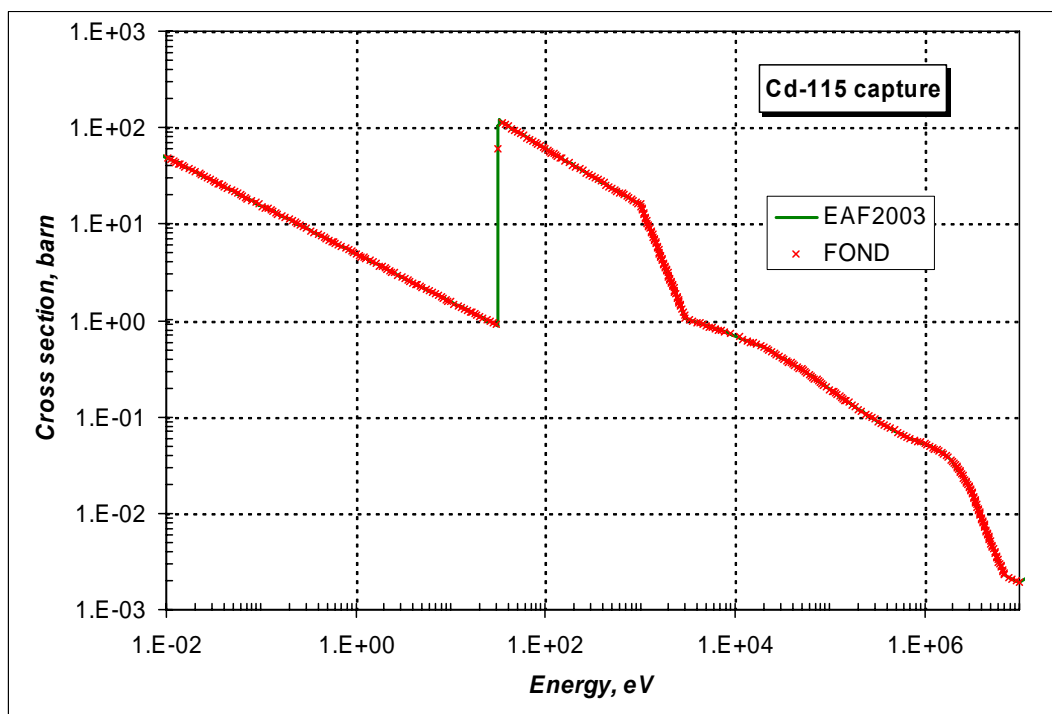


Рисунок 3 – Сравнение сечения радиационного захвата на Cd-115.

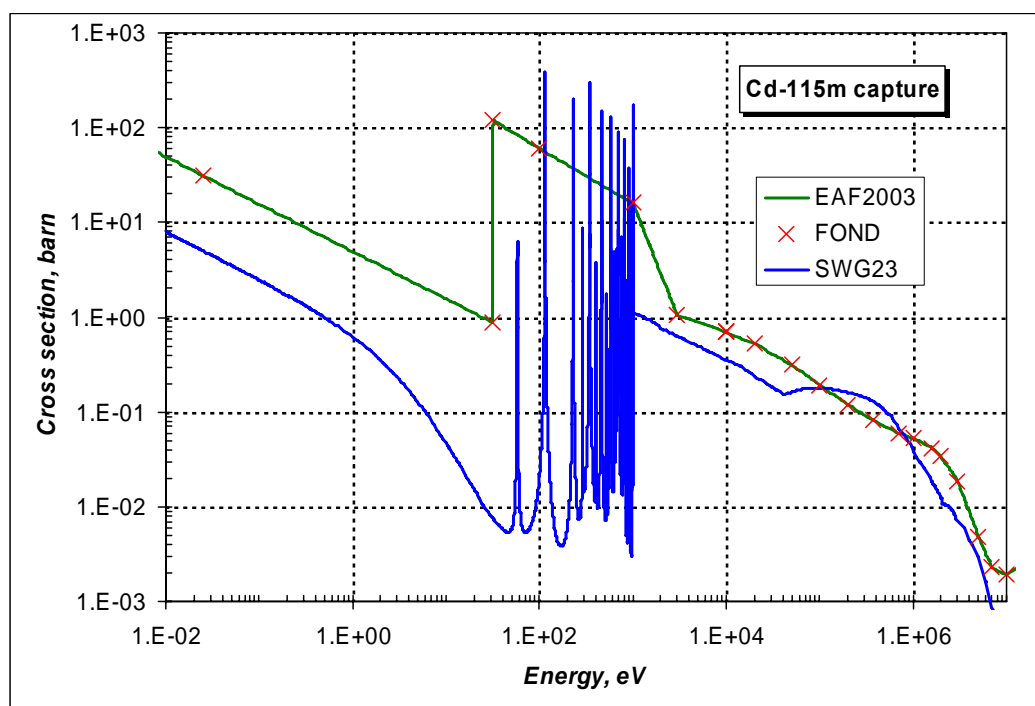


Рисунок 4 – Сравнение сечения радиационного захвата на Cd-115m.

Стабильные изотопы.

Данные для всех стабильных изотопов кадмия в библиотеке ФОНД-2.2 были взяты из библиотеки JENDL-3.2 после тщательного тестирования сечений радиационного захвата 162-х ядер продуктов деления в рамках работы рабочей группы SWG-17. В последние 4 года изучение сечений продуктов деления вышло на новый уровень международного сотрудничества. Так в рамках рабочей группы SWG-21 были проанализированы с точки зрения полноты и аргументированности нейтронные данные для более 200 ядер, образующихся при делении. Были намечены пути улучшения их надежности и достоверности. В рамках работы международной группы SWG-23 на основе рекомендаций группы SWG-21 были созданы полные файлы нейтронных данных для отмеченных ядер – продуктов деления. Далее, в рамках создания новой версии библиотеки ENDF/B-VII созданные файлы были протестированы ведущими специалистами в области нейтронной физики. В настоящее время, продолжается тестирование новых нейтронных данных в рамках версии betha2 библиотеки ENDF/B-VII. ***Эти данные, как результат международного сотрудничества, не без основания взяты нами за основу нейтронных данных для стабильных нуклидов кадмия в библиотеку РОСФОНД.***

Анализ нейтронных сечений проводится на двух уровнях.

На первом уровне проведено сравнение резонансных свойств нуклидов в области разрешенных резонансов. Здесь резонансная структура сечений может быть охарактеризована с помощью сечения реакции в тепловой точке $E=0.0253$ эВ и значения резонансного интеграла в области энергий от 0.5 эВ до 100 кэВ. Отметим, что основной вклад в резонансный интеграл дает резонансное поглощение на первых резонансах. Все характеристики сечения в области разрешенных резонансов получены с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY, распространяемые секцией ядерных данных при МАГАТЭ.

На втором уровне проведено сравнение энергетической зависимости сечения радиационного захвата с имеющимися экспериментальными данными в области неразрешенных резонансов и в области энергий выше 100 кэВ.

Ниже, в таблице 1 приводится сравнение резонансных свойств стабильных нуклидов кадмия с данными из последней компиляции Мухабхаба (2006 г.).

Таблица 1 – Сравнение резонансных свойств стабильных изотопов кадмия.

| Нуклид | Источник данных | Граница области | | E=0.0253 эВ | | I_γ , барн |
|--------|-----------------|-----------------|----------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| | | RRR, кэВ | URR, кэВ | σ_{tot} , барн | σ_γ , барн | |
| Cd-106 | SWG23 | 6.0 | 100. | 5.56 | 1.004 | 6.16 |
| | Mughabghab04 | - | - | - | ~ 1 | 4 ± 1 |
| Cd-108 | SWG23 | 6.0 | 100. | 4.38 | 0.797 | 12.1 |
| | Mughabghab04 | - | - | - | 0.72±0.13 | 11 ± 3 |
| Cd-110 | SWG23 | 7.0 | 100. | 15.3 | 11.0 | 39.2 |
| | Mughabghab04 | - | - | - | 11±1 | 41±3 |
| Cd-111 | SWG23 | 2.3 | 100. | 12.5 | 6.89 | 46.8 |
| | Mughabghab04 | - | - | - | 24±3 | 50±5 |
| Cd-112 | SWG23 | 11.5 | 100. | 7.28 | 2.20 | 13.0 |
| | Mughabghab04 | - | - | - | 2.2±0.5 | 12±2 |
| Cd-113 | SWG23 | 11.0 | 100. | 20.7e3 | 20.7e3 | 392. |
| | Mughabghab04 | - | - | - | (20.6±0.4)e3 | 390±40 |
| Cd-114 | SWG23 | 8.0 | 100. | 4.82 | 0.336 | 12.98 |
| | Mughabghab04 | - | - | - | 0.34±0.02 | 14.1±0.7 |
| Cd-116 | SWG23 | 9.5 | 100. | 6.09 | 0.075 | 1.71 |
| | Mughabghab04 | - | - | - | 0.075±0.020 | 1.6±0.3 |

Из приведенной в таблице 1 информации видно, что наблюдается хорошее согласие между оцененными интегральными характеристиками сечения в области разрешенных резонансов и данными из компиляции Мухабхаба (2004 г.).

Отметим, что для Cd-111 наблюдается большое различие в тепловом сечении, полученном по программе INTER и взятом из компиляции Мухабхаба. Похоже, что в компиляции допущена просто ошибка, поскольку в эксперименте Васильевой и др. (Дубна, 1994 г) получено значение 7.7 ± 0.8 барн.

Ниже для каждого изотопа приводятся графики сечения радиационного захвата в двух энергетических областях: в области разрешенных резонансов - для наглядности имеющейся резонансной структуры сечения и в области энергий неразрешенных резонансов и гладких сечений - для сравнения с имеющимися экспериментальными данными.

48.1. Кадмий-106

Содержание в естественной смеси 1.25%.

В ФОНД-2.2 находится оценка JNDC FP NUCLEAR DATA W.G. (JENDL-3.2);

В JEFF-3.1 – оценка, J. McCabe, A.B. Smith, 1994, на основании данных из ENDF/B-VI rev.4.;

В ENDF/B-VII b2 – оценка международной рабочей группы SWG-23, 2005:

В JENDL-3.3 – модификация оценки JNDC FP NUCLEAR DATA W.G., для версии 3.3, выполненная в 2001 г.

На рисунке 5 сравнивается сечение радиационного захвата из оценки SWG-23 с имеющимися экспериментальными данными.

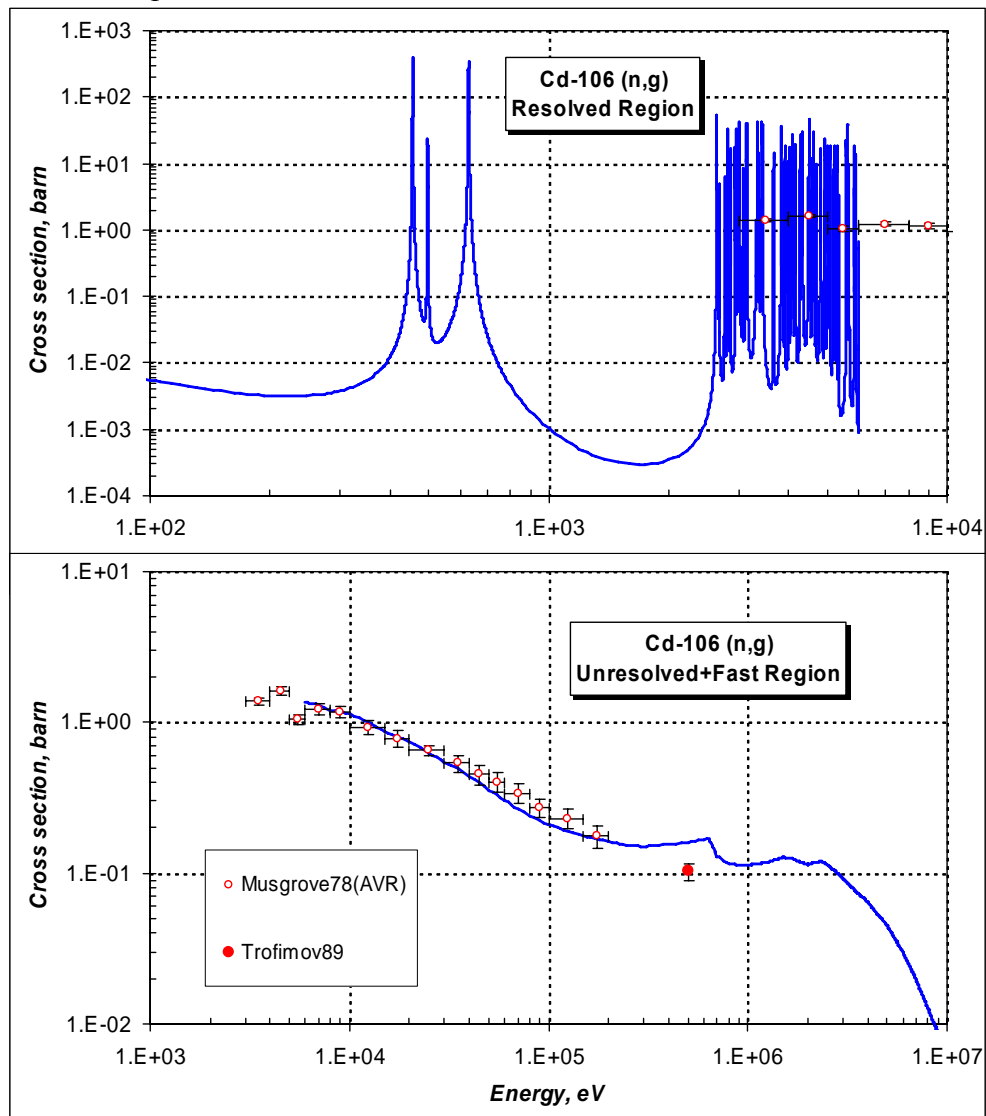


Рисунок 5 - Сравнение оцененного сечения радиационного захвата нейтронов на Cd-106 с экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 5 сравнения видно, что оцененная кривая хорошо согласуется с экспериментом Масгроува (1978) в области энергий до 200 кэВ и проходит выше экспериментальной точки Трофимова (1989 г.) при E=500 кэВ.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку международной рабочей группы SWG-23 из ENDF/B-VII b2. Включить дополнительно файл MF=9 с секцией MT=103 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{106}\text{Ag}^m$, используя информацию из файла MF=10 EAF-2003.

Автор рекомендации

Кошечев В.Г.

48.2. Кадмий-108

Содержание в естественной смеси 0.89%.

В ФОНД-2.2 находится оценка JNDC FP NUCLEAR DATA W.G. (JENDL-3.2);

В JEFF-3.1 – оценка, J.McCabe, A.B. Smith, 1994, на основании данных из ENDF/B-VI rev.4.;

В ENDF/B-VII b2 – оценка международной рабочей группы SWG-23, 2005:

В JENDL-3.3 – модификация оценки JNDC FP NUCLEAR DATA W.G., для версии 3.3, выполненная в 2001 г.

На рисунке 6 сравнивается сечение радиационного захвата из оценки SWG-23 с имеющимися экспериментальными данными.

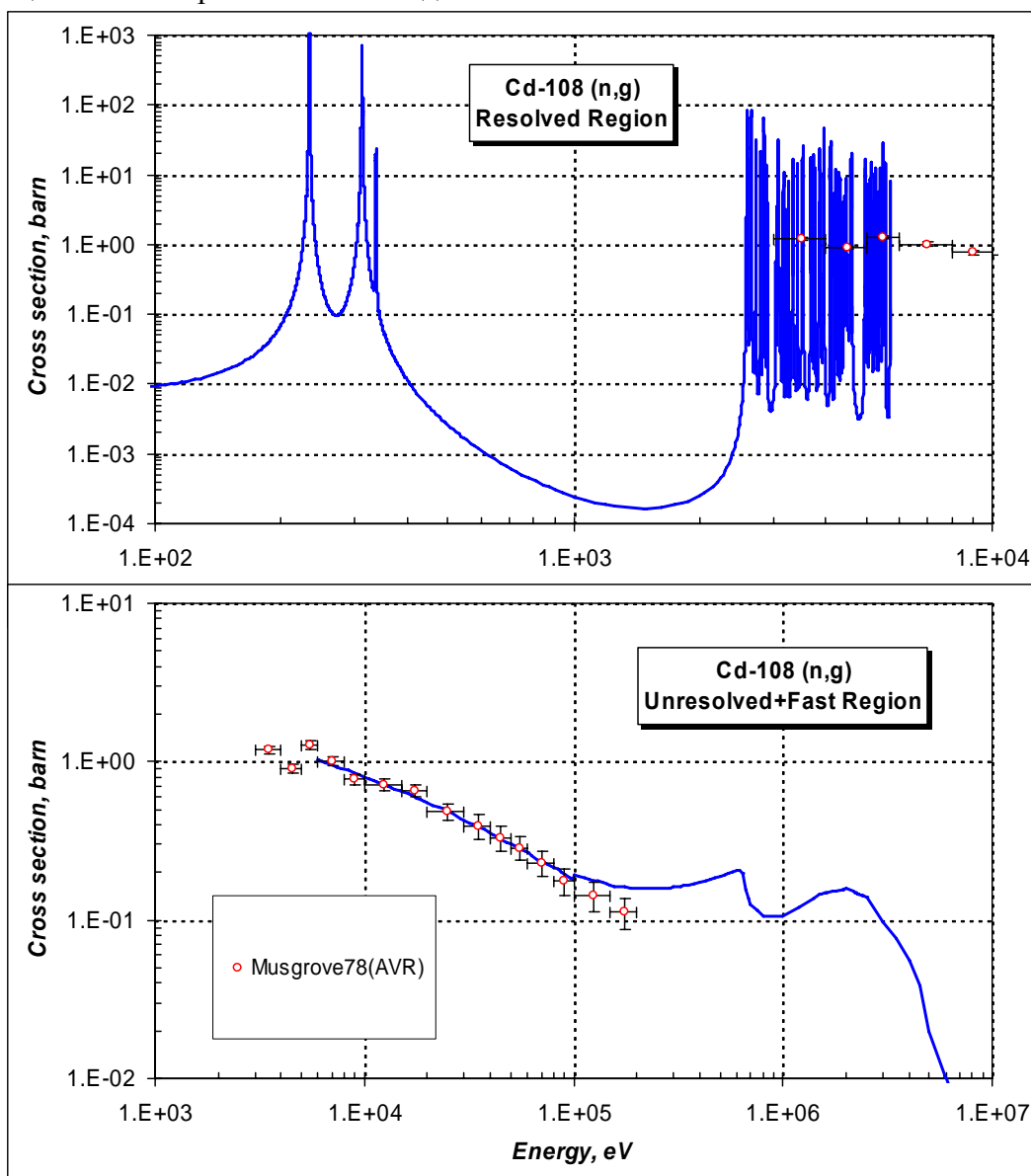


Рисунок 6 - Сравнение оцененного сечения радиационного захвата нейтронов на Cd-108 с экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 6 сравнения видно, что оцененная кривая хорошо согласуется с экспериментом Масгроува (1978) в области энергий до 100 кэВ и проходит выше экспериментальных данных выше 100 кэВ.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку международной рабочей группы SWG-23 из ENDF/B-VII b2. Включить дополнительно файл MF=9 с секциями MT=32,103 и 105 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{106}\text{Ag}^m$ и $^{108}\text{Ag}^m$, используя информацию из файла MF=10 EAF-2003.

Автор рекомендации

Кощев В.Г.

48.3. Кадмий-109

Радиоактивен ($T_{1/2}=462.6$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона превращается в стабильное серебро-109.

Заключение

Как следует из раздела 48.1, в РОСФОНД следует принять файл данных из EAF-2003. Сечения образования изомеров, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Включить файл MF=9 с секциями MT=32, 103 и 105 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{106}\text{Ag}^m$ и $^{108}\text{Ag}^m$, используя информацию из файла MF=10 EAF-2003. Файл MF=10 исключить.

Автор рекомендации

Кощев В.Н.

48.4. Кадмий-110

Содержание в естественной смеси 12.49%.

В ФОНД-2.2 находится оценка JNDC FP NUCLEAR DATA W.G. (JENDL-3.2);

В JEFF-3.1 – оценка, J.McCabe, A.B. Smith, 1994, на основании данных из ENDF/B-VI rev.4.;

В ENDF/B-VII b2 – оценка международной рабочей группы SWG-23, 2005:

В JENDL-3.3 – модификация оценки JNDC FP NUCLEAR DATA W.G., для версии 3.3, выполненная в 2001 г.

На рисунке 7 сравнивается сечение радиационного захвата из оценки SWG-23 с имеющимися экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 7 сравнения видно, что оцененная кривая хорошо согласуется с экспериментом Масгроува (1978) и Висхака (2002 г) в области энергий до 100 кэВ проходит выше экспериментальных данных выше энергии 100 кэВ. Причем экспериментальные данные Висхака приблизительно на 10% ниже данных Масгроува в области энергий выше 100 кэВ.

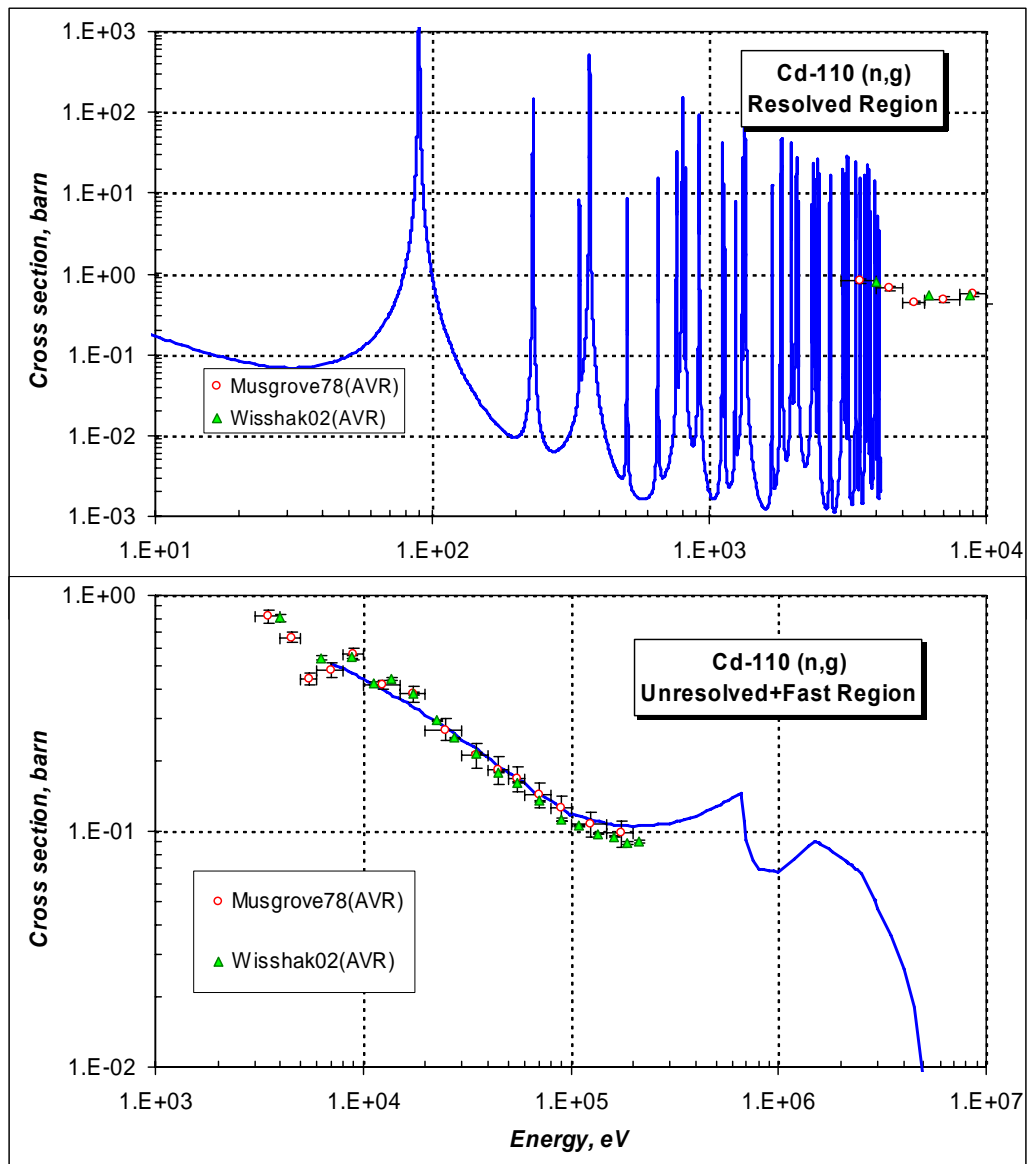


Рисунок 7 - Сравнение оцененного сечения радиационного захвата нейтронов на Cd-110 с экспериментальными данными.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку международной рабочей группы SWG-23 из ENDF/B-VII b2. Включить дополнительно файл MF=9 с секциями MT=32,103 и 105 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{108}\text{Ag}^m$ и $^{110}\text{Ag}^m$, используя информацию из файла MF=10 EAF-2003.

Автор рекомендации

Кошечев В.Г.

48.5. Кадмий-111

Содержание в естественной смеси 12.80%.

В ФОНД-2.2 находится оценка JNDC FP NUCLEAR DATA W.G. (JENDL-3.2);

В JEFF-3.1 – оценка, J. McCabe, A.B. Smith, 1994, на основании данных из ENDF/B-VI rev.4.;

В ENDF/B-VII b2 – оценка международной рабочей группы SWG-23, 2005:

В JENDL-3.3 – модификация оценки JNDC FP NUCLEAR DATA W.G., для версии 3.3, выполненная в 2001 г.

На рисунке 8 сравнивается сечение радиационного захвата из оценки SWG-23 с имеющимися экспериментальными данными.

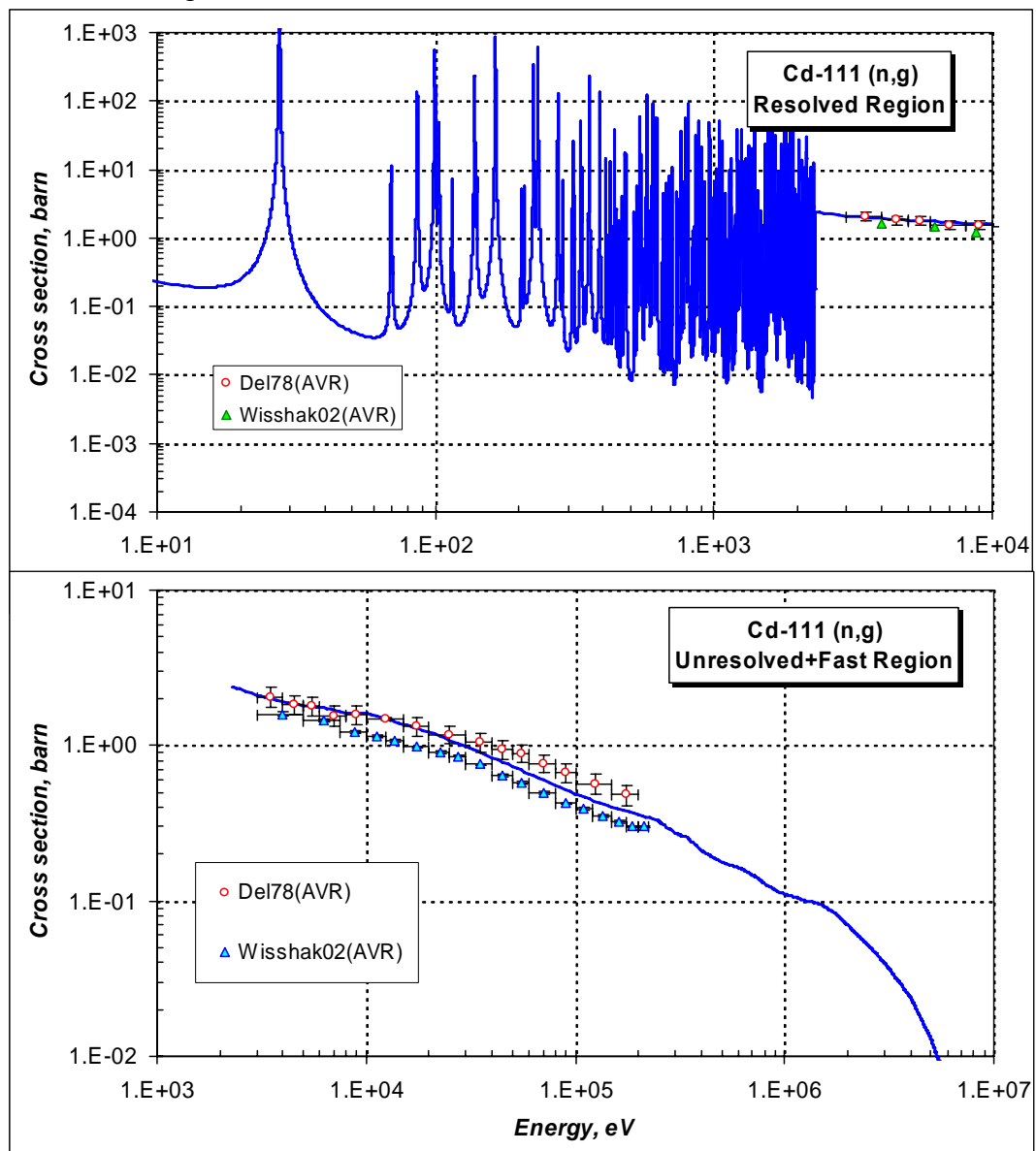


Рисунок 8 - Сравнение оцененного сечения радиационного захвата нейтронов на Cd-111 с экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 8 сравнения видно, что оцененная кривая хорошо согласуется с экспериментом Масгроува (1978) в области энергий до 10 кэВ, проходит ниже экспериментальных данных выше энергии 10 кэВ. При этом экспериментальные

данные Висхака (2002 г.) приблизительно на 10-20% ниже данных Масгроува во всей области энергий. Оцененная кривая лежит выше экспериментальных данных Висхака во всем энергетическом интервале.

На рисунке 9 приводится сравнение экспериментальных данных и оцененной кривой сечения радиационного захвата в области тепловых сечений.

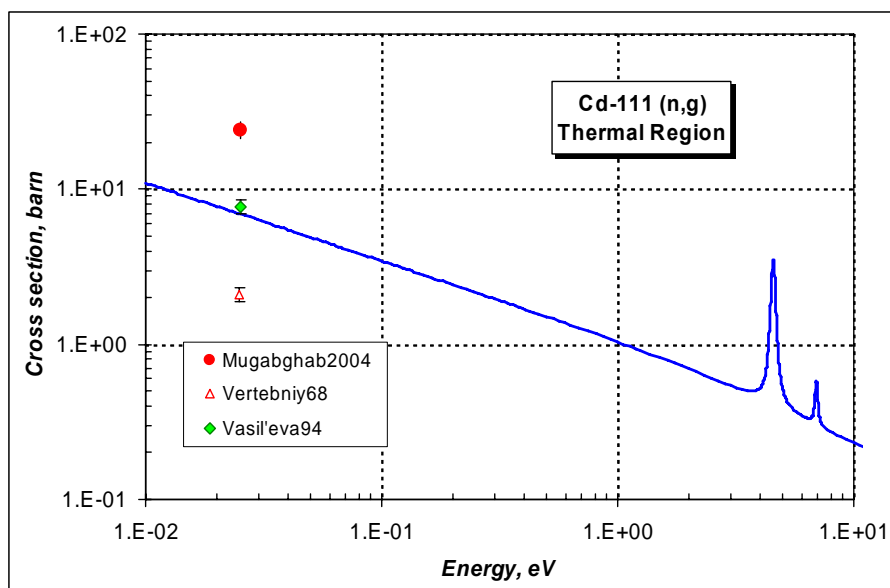


Рисунок 9 - Сравнение оцененного сечения радиационного захвата нейтронов на Cd-111 с экспериментальными данными в тепловой области.

Из приведенного на рисунке 9 сравнения видно, что оцененное сечение радиационного захвата согласуется с экспериментом группы Васильевой (1994 г.) и расходится с экспериментом Вертебного (1968 г.) и оцененным значением Мухабхаба (2004 г.)

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку международной рабочей группы SWG-23 из ENDF/B-VII b2. Включить дополнительно файл MF=9 с секциями MT=28 и 104 с вероятностями образования долгоживущего изомера $^{110}\text{Ag}^m$, используя информацию из файла MF=10 EAF-2003.

Автор рекомендации

Кощев В.Г.

48.6. Кадмий-112

Содержание в естественной смеси 24.13%.

В ФОНД-2.2 находится оценка JNDC FP NUCLEAR DATA W.G. (JENDL-3.2);

В JEFF-3.1 – оценка, J. McCabe, A.V. Smith, 1994, на основании данных из ENDF/B-VI rev.4.;

В ENDF/B-VII b2 – оценка международной рабочей группы SWG-23, 2005:

В JENDL-3.3 – модификация оценки JNDC FP NUCLEAR DATA W.G., для версии 3.3, выполненная в 2001 г.

На рисунке 10 сравнивается сечение радиационного захвата из оценки SWG-23 с имеющимися экспериментальными данными.

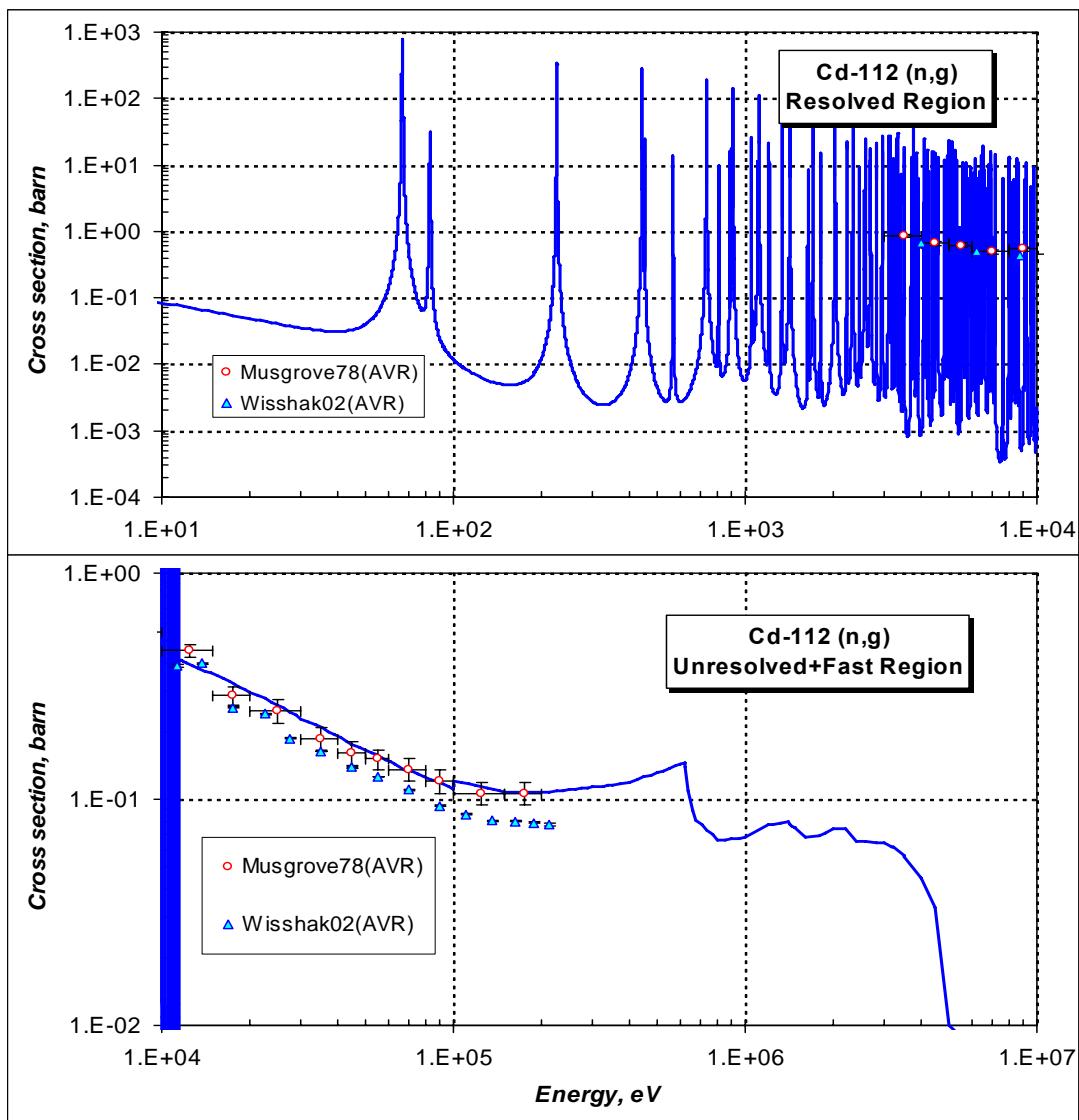


Рисунок 10 - Сравнение оцененного сечения радиационного захвата нейтронов на Cd-112 с экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 10 сравнения видно, что оцененная кривая хорошо согласуется с экспериментом Масгроува (1978) во всей области энергий и проходит выше экспериментальных данных Висхака (2002 г.) приблизительно на 20-30% .

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку международной рабочей группы SWG-23 из ENDF/B-VII b2. Включить дополнительно файл MF=9 с секциями MT=32, 102 и 105 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{110}\text{Ag}^m$ и $^{113}\text{Cd}^m$, используя информацию из файла MF=10 EAF-2003.

Автор рекомендации

Кошечев В.Г.

48.7. Кадмий-113

Содержание в естественной смеси 12.22%.

В ФОНД-2.2 находится оценка JNDC FP NUCLEAR DATA W.G. (JENDL-3.2);

В JEFF-3.1 – оценка, J.McCabe, A.B. Smith, 1994, на основании данных из ENDF/B-VI rev.4.;

В ENDF/B-VII b2 – оценка международной рабочей группы SWG-23, 2005:

В JENDL-3.3 – модификация оценки JNDC FP NUCLEAR DATA W.G., для версии 3.3, выполненная в 2001 г.

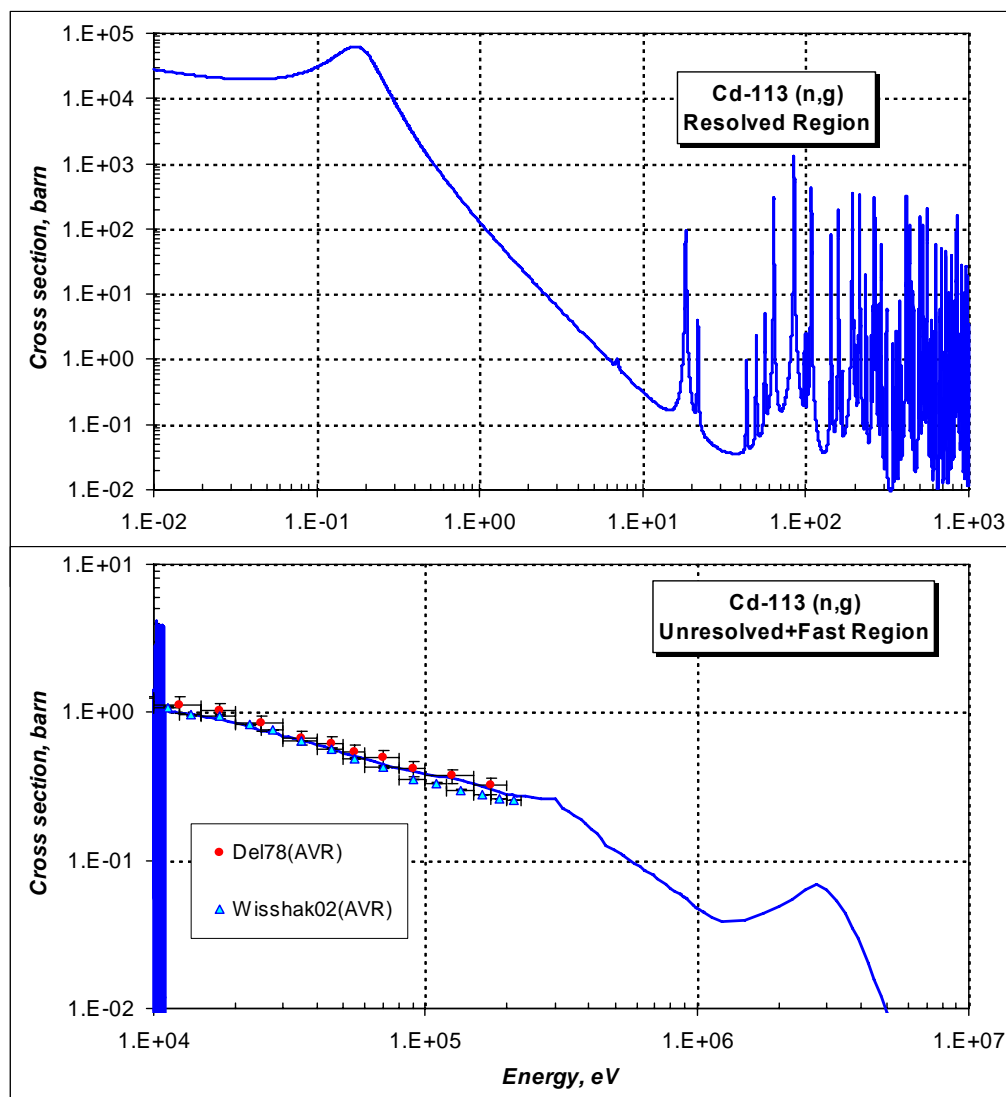


Рисунок 11 - Сравнение оцененного сечения радиационного захвата нейтронов на Cd-113с экспериментальными данными.

На рисунке 11 сравнивается сечение радиационного захвата из оценки SWG-23 с имеющимися экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 11 сравнения видно, что оцененная кривая хорошо согласуется с экспериментом Масгроува (1978) во всей области энергий и проходит выше экспериментальных данных Висхака (2002 г.) приблизительно на 10-15%.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку международной рабочей группы SWG-23 из ENDF/B-VII b2. Включить дополнительно файл MF=10 с секцией MT=4 102 и 105 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{113}\text{Cd}^m$, используя данные EAF-2003.

Автор рекомендации

Кощев В.Г.

48.8. Кадмий-113-м

Долгоживущий изомер ($T_{1/2}=14.1$ г.). Испытывая бета-распад превращается в стабильный индий-113.

Заключение

Как следует из раздела 48.1, в РОСФОНД следует принять файл данных из EAF-2003. Сечения образования изомеров, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Включить файл MF=9 с секцией MT=33 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{110}\text{Ag}^m$, используя информацию из файла MF=10 EAF-2003. В файл MF=10 перенести секцию MT=4 из файла MF=3.

Автор рекомендации

Кощев В.Н.

48.9. Кадмий-114

Содержание в естественной смеси 28.73%.

В ФОНД-2.2 находится оценка JNDC FP NUCLEAR DATA W.G. (JENDL-3.2);

В JEFF-3.1 – оценка, J. McCabe, A.B. Smith, 1994, на основании данных из ENDF/B-VI rev.4.;

В ENDF/B-VII b2 – оценка международной рабочей группы SWG-23, 2005:

В JENDL-3.3 – модификация оценки JNDC FP NUCLEAR DATA W.G., для версии 3.3, выполненная в 2001 г.

На рисунке 12 сравнивается сечение радиационного захвата из оценки SWG-23 с имеющимися экспериментальными данными.

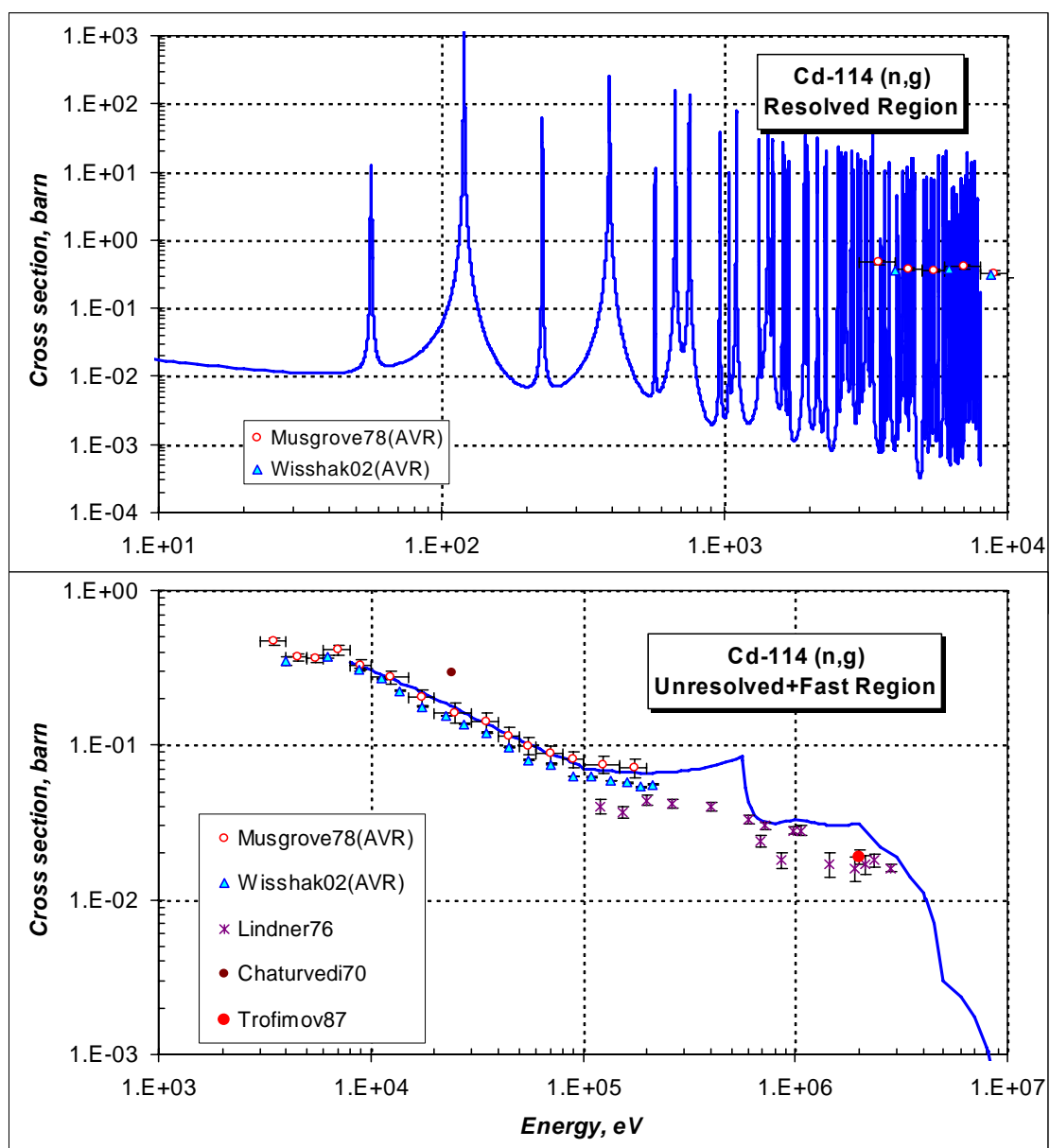


Рисунок 12 - Сравнение оцененного сечения радиационного захвата нейтронов на Cd-114 с экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 12 сравнения видно, что оцененная кривая хорошо согласуется с экспериментом Масгроува (1978) во всей области энергий и проходит приблизительно на 20-30% выше экспериментальных данных Висхака (2002 г.). Экспериментальные данные Чатурвенди (1970 г.) и Трофимова (1987 г.) лежат ниже оцененной кривой. В целом, совокупность экспериментальных данных указывает на возможное понижение сечения радиационного захвата в области энергий выше 100 кэВ.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку международной рабочей группы SWG-23 из ENDF/B-VII b2. Включить дополнительно файл MF=9 с секцией MT=102 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{115}\text{Cd}^m$, используя данные EAF-2003.

Автор рекомендации

Кощев В.Г.

48.10. Кадмий-115

Радиоактивен ($T_{1/2}=53.38$ ч.). Испытывая бета-распад превращается в стабильный индий-115.

Заклучение

Как следует из раздела 48.1, в РОСФОНД следует принять файл данных из EAF-2003. Сечения образования изомеров, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Включить файл MF=9 с секцией MT=17 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{113}\text{Cd}^m$, используя информацию из файла MF=10 EAF-2003. Файл MF=10 исключить.

Автор рекомендации

Кощев В.Н.

48.11. Кадмий-115-m

Долгоживущий изомер ($T_{1/2}=44.8$ дн.). Испытывая бета-распад превращается в стабильный индий-115.

Заклучение

Как следует из раздела 48.1, в РОСФОНД следует принять файл данных из EAF-2003. Сечения образования изомеров, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Включить файл MF=9 с секцией MT=17 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{113}\text{Cd}^m$, используя информацию из файла MF=10 EAF-2003. В файл MF=10 включить сечение перехода в основное состояние на основе данных EAF-2003.

Автор рекомендации

Кощев В.Н.

48.12. Кадмий-116

Содержание в естественной смеси 7.49%.

В ФОНД-2.2 находится оценка JNDC FP NUCLEAR DATA W.G. (JENDL-3.2);

В JEFF-3.1 – оценка, J.McCabe, A.B. Smith, 1994, на основании данных из ENDF/B-VI rev.4.;

В ENDF/B-VII b2 – оценка международной рабочей группы SWG-23, 2005:

В JENDL-3.3 – модификация оценки JNDC FP NUCLEAR DATA W.G., для версии 3.3, выполненная в 2001 г.

На рисунке 13 сравнивается сечение радиационного захвата из оценки SWG-23 с имеющимися экспериментальными данными.

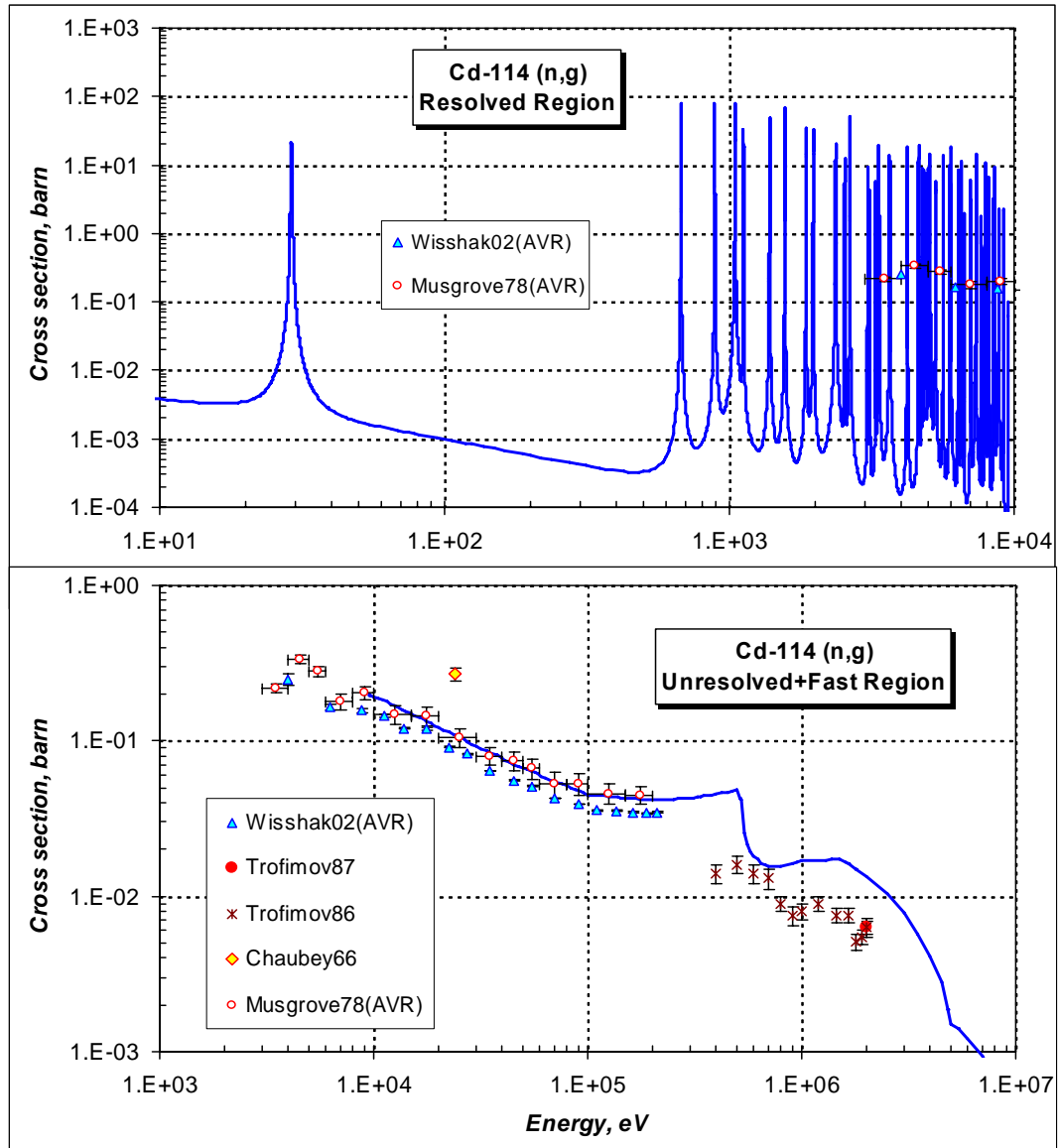


Рисунок 13 - Сравнение оцененного сечения радиационного захвата нейтронов на Cd-116 с экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 13 сравнения видно, что оцененная кривая хорошо согласуется с экспериментом Масгроува (1978) во всей области энергий и проходит приблизительно на 20-30% выше экспериментальных данных Висшака (2002 г.). Экспериментальные данные Трофимова (1986 г. и 1987 г.) лежат ниже оцененной кривой. В целом, совокупность экспериментальных данных указывает на возможное понижение сечения радиационного захвата в области энергий выше 100 кэВ.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку международной рабочей группы SWG-23 из ENDF/B-VII b2. Включить дополнительно файл MF=9 с секцией MT=16 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{115}\text{Cd}^m$, используя данные EAF-2003.

Автор рекомендации

Кощев В.Г.

48.13. Природный кадмий

Для рассмотренных выше оцененных данных стабильных изотопов кадмия были получены основные нейтронные сечения для природной смеси – полное сечение, сечение радиационного захвата, сечение упругого и неупругого рассеяния нейтронов. Для этого была использована программа MIXER из пакета прикладных программ PREPRO-2002, распространяемый секцией ядерных данных при МАГАТЭ. Ниже, в качестве тестирования основных сечений стабильных 8 изотопов кадмия, проведено сравнение полученных сечений для природной смеси с имеющимися экспериментальными данными.

Для природного кадмия сечение полного взаимодействия промерено сравнительно хорошо. Так на рисунке 14 приводится сравнение оцененного сечения полного взаимодействия в области резонансных энергий от 0.01 эВ до 1 эВ с имеющимися экспериментальными данными.

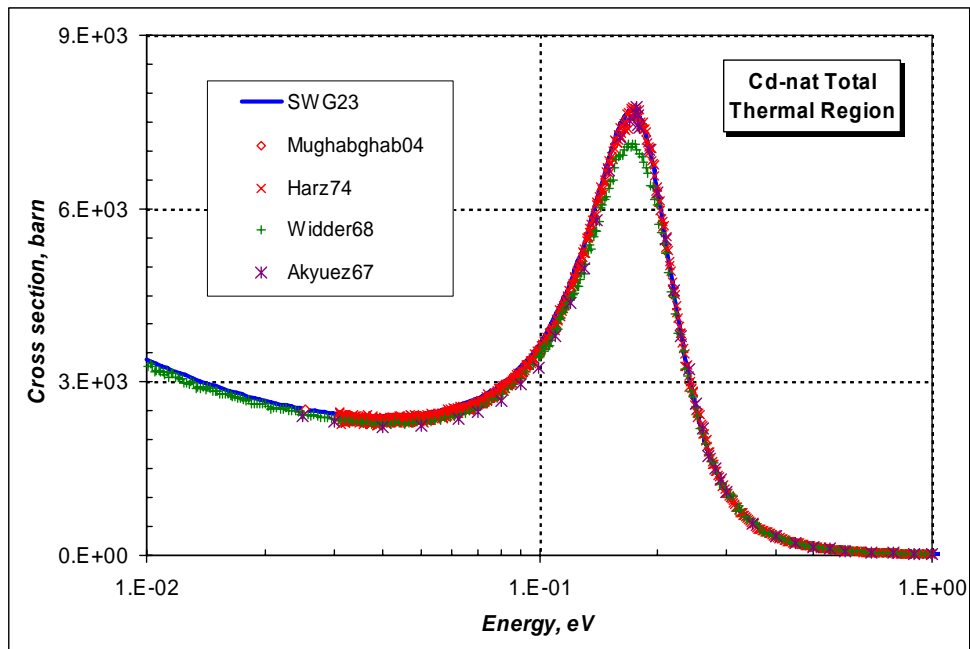


Рисунок 14 – Ход полного сечения Cd-nat в области энергий 0.01 - 10 эВ.

Из приведенного на рисунке 14 сравнения видно, что только оцененное сечение отлично согласуется с имеющимися наборами экспериментальных данных.

На рисунке 15 приводится сравнение оцененного сечения полного взаимодействия в области резонансных энергий от 10 кэВ до 10 МэВ с имеющимися экспериментальными данными. В этой области энергий существует достаточно много экспериментальных работ по измерению полного сечения. Поэтому, чтобы не нагружать рисунок большим количеством экспериментальных точек, сравнение представлено с помощью двух графиков.

Из приведенного на рисунке 15 сравнения видно, что только оцененное сечение хорошо согласуется с имеющимися наборами экспериментальных данных за исключением, быть может, данных группы Сеза, выполненных в 1965 году.

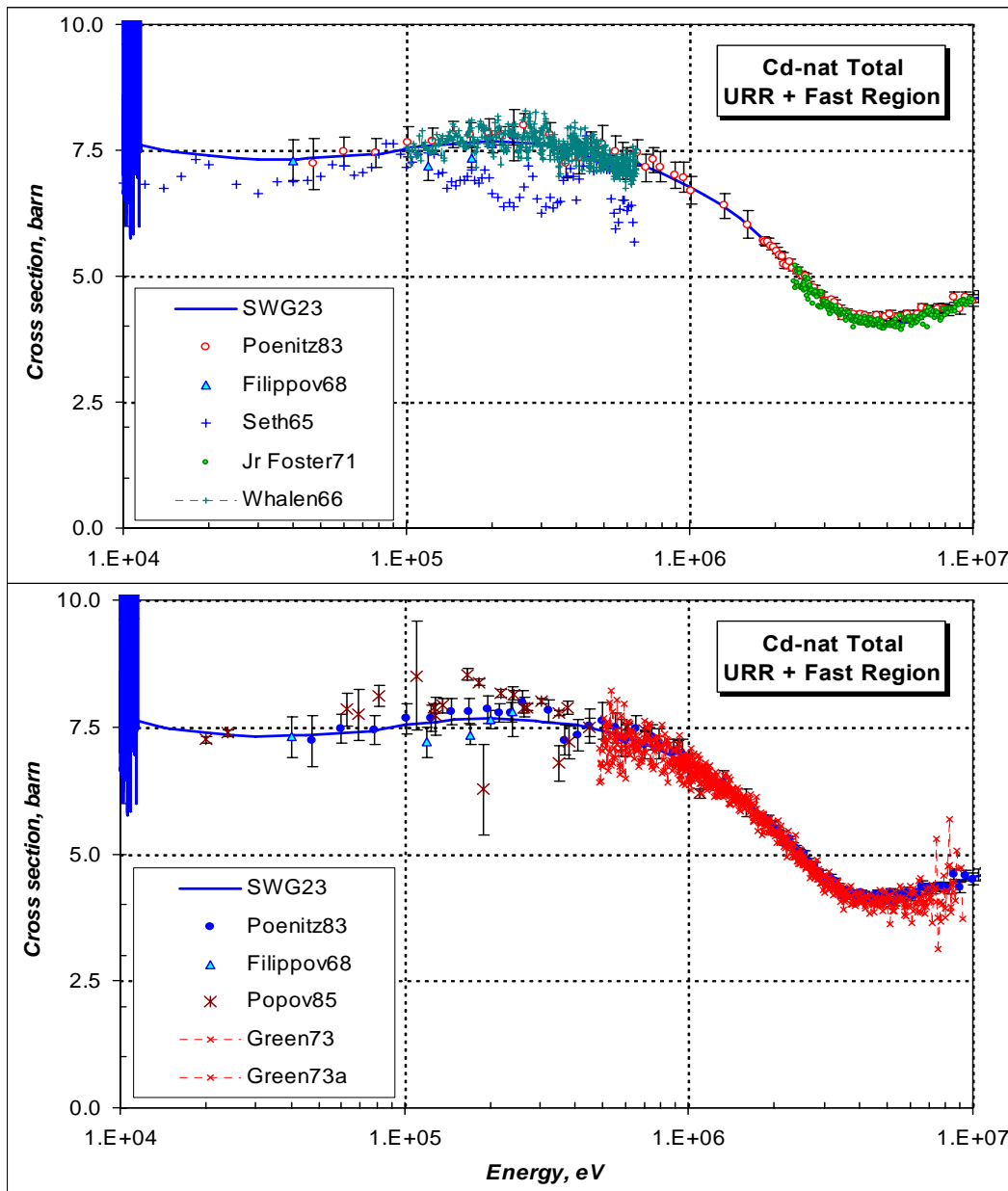


Рисунок 15 – Сравнение полного сечения Cd-nat с экспериментальными данными в области энергий 10 кэВ – 10 МэВ.

Что касается сечения радиационного захвата, то в таблице 2 сравниваются характеристики сечения радиационного захвата нейтронов в тепловой точке, резонансный интеграл. Все значения получены с помощью программы INTER и пакета программ PREPRO-2002.

Таблица 2. Характеристики сечения радиационного захвата Cd-nat.

| Оценка | $\sigma_\gamma(2200)$, кбарн | G-fact | I_γ , барн |
|------------|-------------------------------|--------|-------------------|
| SWG23 | 2.523 | 1.3599 | 65.9 |
| Mughabghab | 2.52 ± 0.05 | - | 66.4 ± 6.6 |

Из приведенной в таблице 2 информации видно, что все оценки сечения радиационного захвата нейтронов согласуются со значениями, рекомендованными в компиляции Мухабхаба (резонансный интеграл для компиляции Мухабхаба получен путем сложения соответствующих величин для стабильных изотопов).

В области энергий выше 10 кэВ сечение захвата промерено не так подробно, как сечение полного взаимодействия, но, тем не менее, имеется достаточно много экспериментальных измерений.

На рисунке 16 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата на природном кадмии с доступными экспериментальными данными.

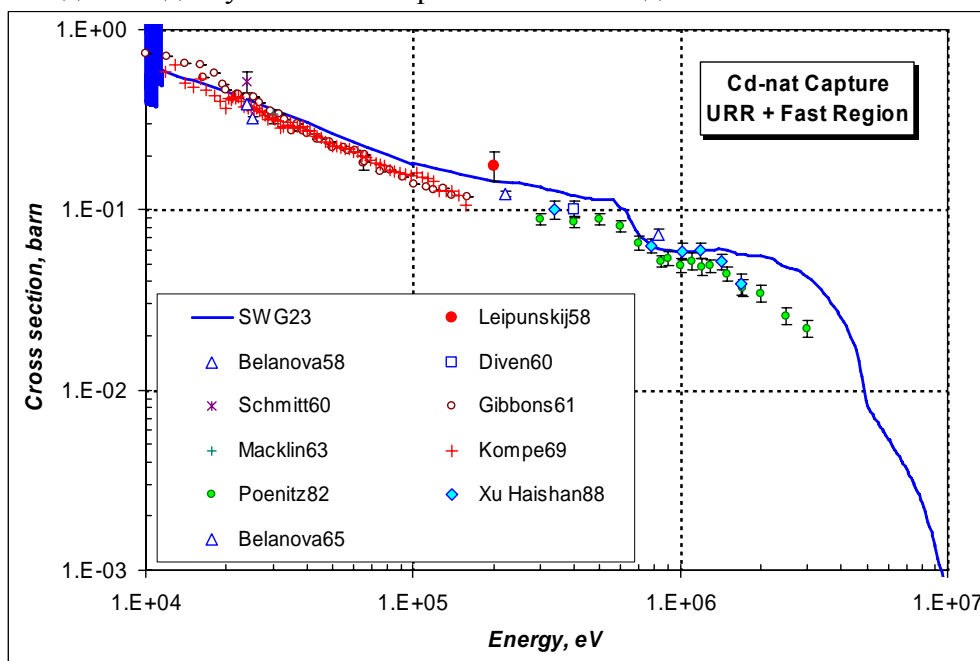


Рисунок 16 - Сравнение оцененного сечения радиационного захвата нейтронов на Cd-nat с экспериментальными данными в области энергий выше 10 кэВ.

Из приведенного на рисунке 16 сравнения видно, что оцененное сечение радиационного захвата, в целом, лежит выше всей совокупности экспериментальных данных. Не вдаваясь в подробности анализа согласованности оцененной кривой с экспериментальными наборами данных, следует отметить, что совокупность всей экспериментальной информации указывает на тенденцию к понижению сечения захвата. В связи с этим обстоятельством, вспомним, что и для стабильных изотопов экспериментальные данные Висхака (2002 г.) указывали на тенденцию к понижению сечения радиационного захвата в области энергий выше 10 кэВ.

Сечение упругого рассеяния на природном кадмии промерено довольно хорошо, хотя не так подробно, как это сделано для полного сечения и сечения радиационного захвата. Имеется достаточно большое количество экспериментальных измерений различных групп, по измерениям которых можно судить о надежности оцененного сечения. Так на рисунке 17 приводится сравнение оцененного сечения упругого рассеяния в области энергий от 10 кэВ до 10 МэВ с имеющимися экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 17 сравнения видно, что оцененное сечение упругого рассеяния, в целом, хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными. Отметим, также, что экспериментальные данные Смита (1994 г.) в библиотеки EXFOR, вероятно находятся с ошибкой. Их значения нам пришлось увеличить ровно на порядок с тем, чтобы они отражали общую величину сечения упругого рассеяния в области энергий 5 – 6 МэВ.

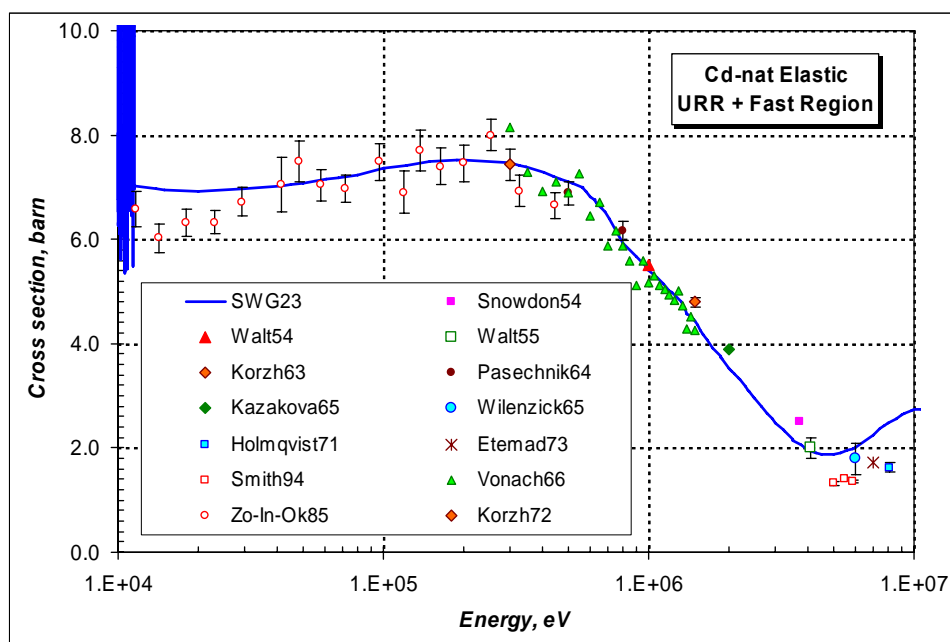


Рисунок 17 – Сравнение сечения упругого рассеяния на Cd-nat с экспериментальными данными в области энергий 10 кэВ – 10 МэВ.

В области энергий выше 200 кэВ с сечением упругого рассеяния и сечением радиационного захвата начинает конкурировать сечение неупругого рассеяния. Экспериментальных данных по измерению сечения неупругого рассеяния намного меньше, чем для вышерассмотренных сечений. На рисунке 18 приводится сравнение оцененного сечения неупругого рассеяния нейтронов на Cd-nat с немногочисленными экспериментальными данными.

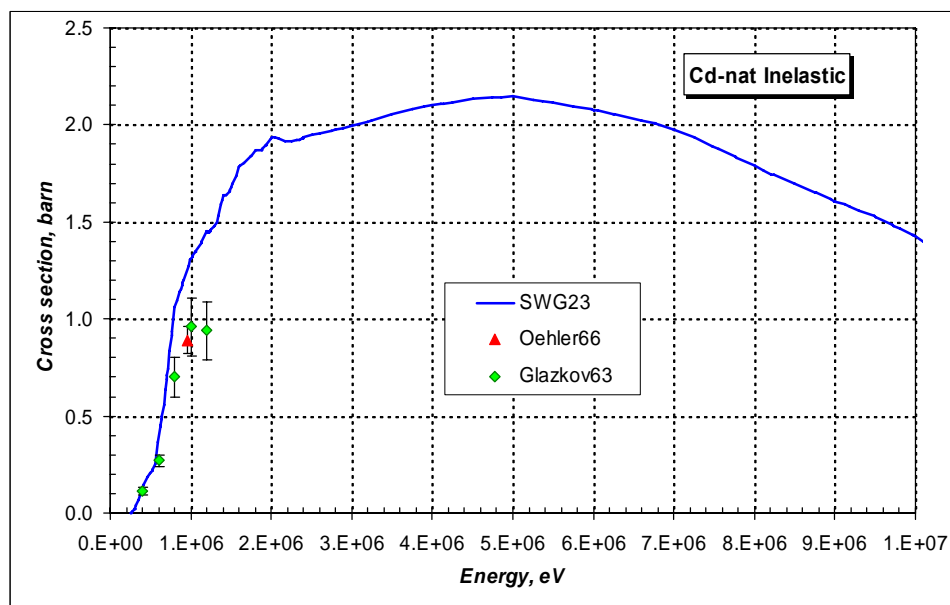


Рисунок 18 – Сравнение сечения неупругого рассеяния на Cd-nat с экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 18 сравнения видно, что экспериментальных данных недостаточно, чтобы оценить надежность оцененного сечения. Однако, можно сказать точно, что в области энергий порядка 1 МэВ экспериментальные данные лежат ниже оцененной кривой.

Из проведенного рассмотрения следует, что имеются резервы для повышения точности оценки сечений изотопов кадмия. При возможности эти резервы следует использовать.

49.ИНДИЙ

49.1. Индий-111

Радиоактивен ($T_{1/2}=2.8047$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона превращается в стабильный кадмий-111. В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакций $^{112}\text{Sn}_{(0.97\%)}(n,d; n,np)$ ^{111}In и $^{113}\text{In}_{(4.3\%)}(n,3n)$ ^{111}In .

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Сформировать файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера ^{108}Ag . Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить МАТ=4911.

Автор заключения

Николаев М.Н.

49.2. Индий-113

Содержание в естественной смеси 4.29%.

В известных библиотеках используются две оценки нейтронных данных:

- оценка, выполненная международной рабочей группой по продуктам деления в 1990 г. используется в библиотеках ФОНД-2.2, JENDL-3.3 и JEFF-3.1 (ниже – оценка JENDL-3.3);
- оценка, выполненная другой международной рабочей группой в 2004 – 2005 г., которая включена Мухабхабом в ENDF/B-VIIb2 (ниже – оценка ENDF/B-VII).

Ниже будут рассмотрены различия между ними в сравнении с экспериментальными данными.

1. Тепловая и резонансная области.

В табл.1 сравниваются тепловые сечения и значения резонансного интеграла захвата

Табл.1. Тепловые сечения и резонансный интеграл

| Оценка | $\sigma_i(0.0253 \text{ eV})$ | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|-----|
| JENDL-3.3 | 15.75 | 12.07 | 325 |
| ENDF/B-VII | 15.794 | 12.128 | 333 |

По оценке Мухабхаба, погрешность сечения захвата составляет ± 1.1 барн, а резонансного интеграла ± 30 барн. Различие оценок много меньше этих погрешностей.

В JENDL-3.3 резонансная область содержит 49 резонансов (все – s-резонансы) с максимальной энергией 1996 эВ. Область разрешенных резонансов простирается до 830 эВ. В ENDF/B-VII число резонансов много больше: 60 s-резонансов и 16 p-резонансов. На рис. 1 сравниваются нарастающие суммы числа резонансов в сравниваемых оценках.

Пропуск резонансов проявляется в обеих оценках. Отсутствие данных о р-резонансах выше 200 кэВ, очевидно, не связано с неправильной идентификацией спинов и четностей – просто нет необходимых данных. К сожалению, источник данных о р-резонансах в описании оценки не указывается.

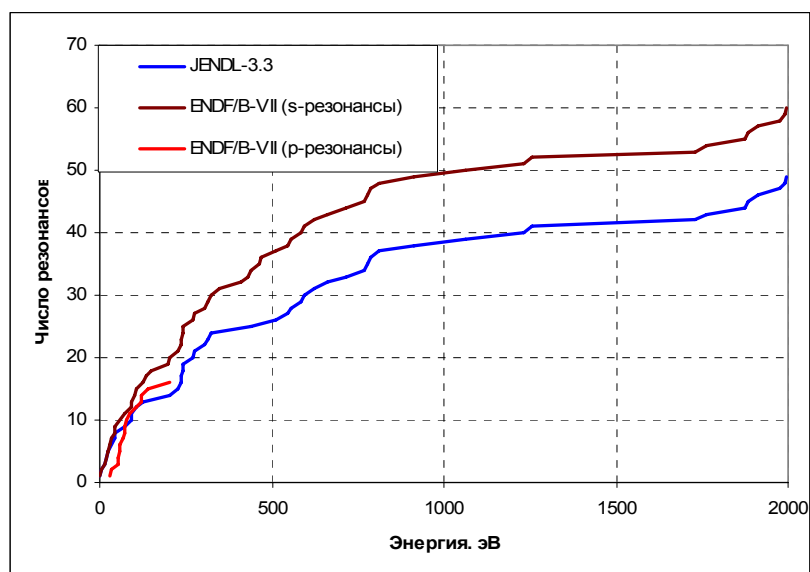


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

Из рис. 1 ясно, что не только к 830эВ в JENDL-3.3, но и к 600эВ в ENDF/B-VII пропущена значительная часть резонансов. Разумеется, это, в основном, слабые резонансы с малой нейтронной шириной, пропуск которых, вероятно, не слишком сильно влияет на оцениваемые сечения. На рис. 2 приведена нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин s-резонансов. Выше границы разрешенных резонансов кривые нанесены пунктиром. Несмотря на значительно больший пропуск резонансов, в оценке JENDL-3.3 нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин не намного ниже, чем в ENDF/B-VII и выше 500 эВ разница между ними сохраняется (как, впрочем. И разница в числе резонансов – см. рис.1). Причиной, побудившей оценщиков данных для ENDF/B-VII, снизить границу области разрешенных резонансов до 600 эВ, вероятно, послужило снижение наклона нарастающей суммы приведенных ширин после 600 эВ. Этот аргумент не слишком убедителен, поскольку, как видно из рис.2, в интервале 600-900 эВ этот наклон практически равен среднему наклону на интервале до 600 эВ. Полагая, что моделирование ВСЕХ резонансов в интервале 600-900 эВ средними резонансными параметрами едва ли обеспечит более надежную оценку сечений, чем описание этих сечений разрешенными резонансами, считаем, что установление границы области разрешенных резонансов на 900эВ вполне допустимо. В РОСФОНД целесообразно принять параметры из ENDF/B-VII с границей RRR, равной 900эВ.

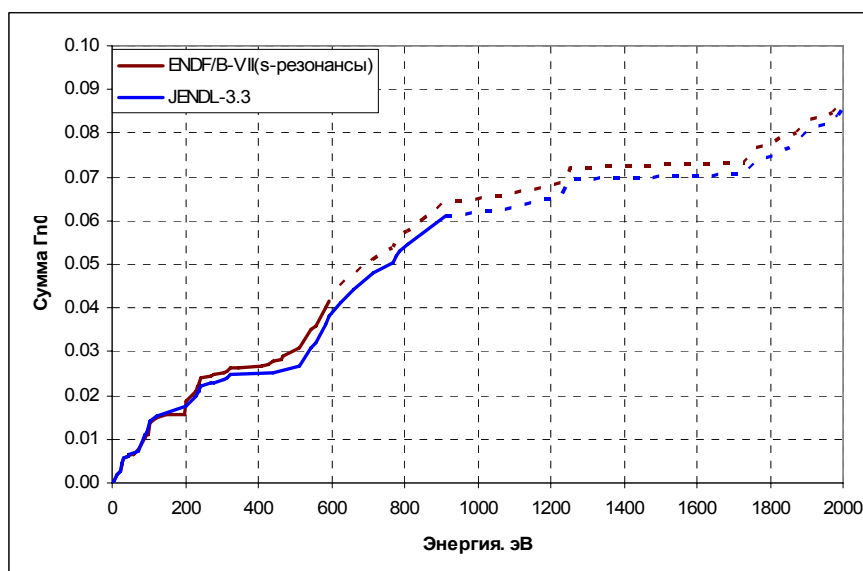


Рис.2. Нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин.

Область неразрешенных резонансов в сравниваемых оценках описывается одинаково. Одна и та же оценка используется и вне резонансной области, так что проблема выбора отпадает.

Индий, в частности, индий-113, часто используется в качестве активационного индикатора. В результате захвата образуется ^{114}In в основном ($T_{1/2}=71.9$ сек.) или изомерном ($T_{1/2}=49.51$ дн.). Для активации представляет интерес изомер. В тепловой области вероятность образования изомера при захвате равна 0.675 (Keish-63), причем полное сечение захвата, измеренное им (12 барн) прекрасно согласуется с оценкой. В интервале 0.36 – 1 МэВ вероятность образования изомера практически не зависит от энергии и равна 0.78 (Grench-68). Полное сечение захвата, полученное в этой работе, заметно отличается от оцененной кривой (рис.1).

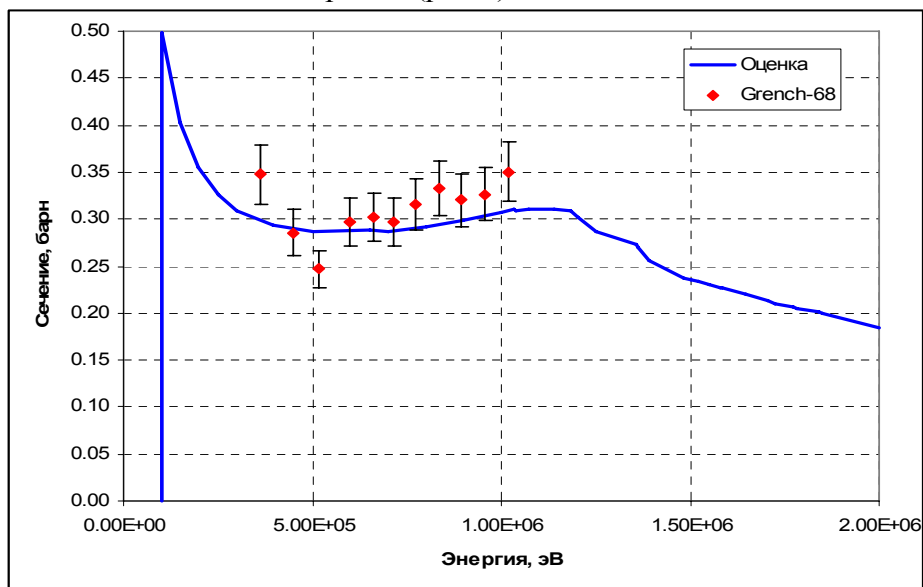


Рис.1. Сечение захвата

Что касается вероятности образования изомера, то в EAF-2003 что она снижается от 0.58 при низких энергиях до 0.57 при 2 МэВ и далее до 0.52 при 20 МэВ. Исходя из приведенных выше данных мы полагаем, что более реалистичной оценкой является

линейный с энергией рост от 0.675 в тепловой точке до 0.78 при 0.5 МэВ и далее – без изменений.

На рис. 2 оцененное сечение неупругого рассеяния сравнивается с единственным экспериментом Симакова (1981). Из этого измерения следует, что оцененное сечение неупругого рассеяния занижено почти на 20%.

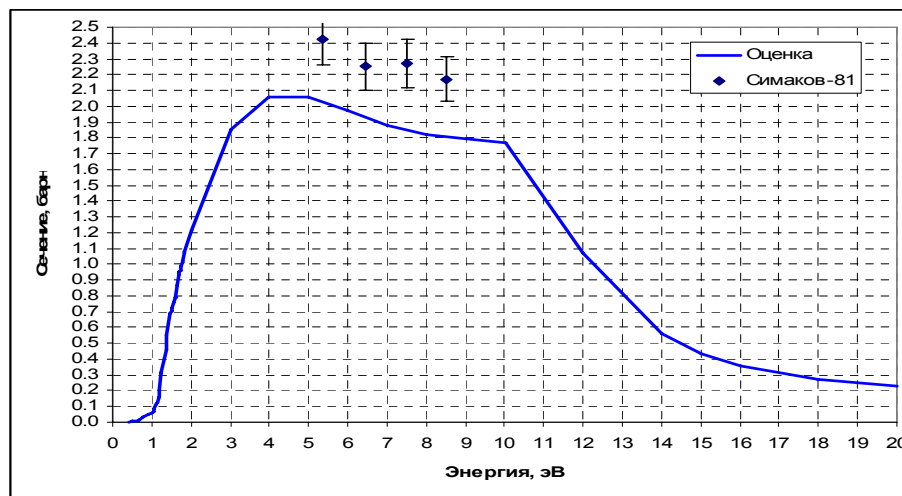


Рис.2. Сечение неупругого рассеяния.

Удобной для измерений реакцией является образование изомера $^{113}\text{In}^m$ при неупругом рассеянии ($T_{1/2}=99.476$ мин.). Сечение этой реакции многократно измерялось. На рис. 3 эти данные сравниваются с оценкой этого сечения из EAF-2003. Как видно, и здесь согласие между оцененными и экспериментальными данными оставляет желать лучшего.

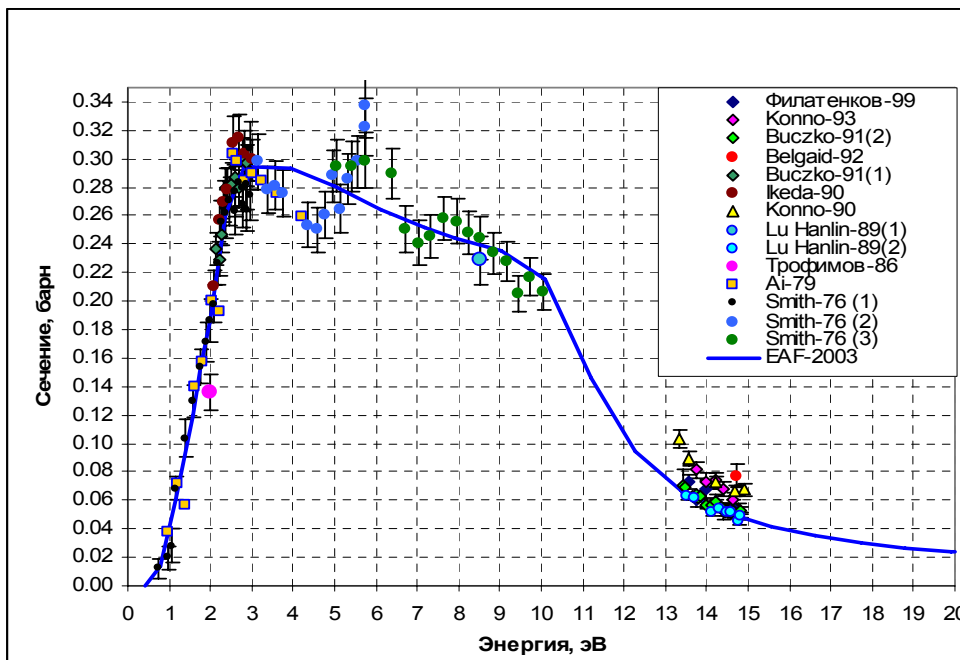


Рис.3. Сечение реакции $^{113}\text{In}(n,n')^{113}\text{In}^m$

На рис. 4 с экспериментальными данными сравнивается оценка сечения реакции $(n,2n)$. В этом случае также образуется как основное ($T_{1/2}=14.97$ мин.), так и изомерное ($T_{1/2}=20.56$ мин.) состояния ядра-продукта. На рис. 5 показаны результаты измерения вероятности образования изомера. Среднее всех этих измерений равно 0.865 ± 0.011 . На рис. 3 желтыми точками показаны результаты двух серий измерений сечения реакции

$^{113}\text{In}(n,2\text{T})^{112}\text{In}^m$, деленные на 0.865. Как видно эти результаты в пределах погрешностей согласуются с результатами прямых измерений сечения реакции (n,2n). Выпадение результатов двух независимых измерений вблизи 14 МэВ, очевидно, является артефактом.

Оцененное сечение хорошо согласуется с экспериментальными данными до 15 МэВ, а при более высоких энергиях представляется завышенным. Это завышение коррелирует с занижением сечения неупругого рассеяния при этих энергиях. (см. рис.3) .

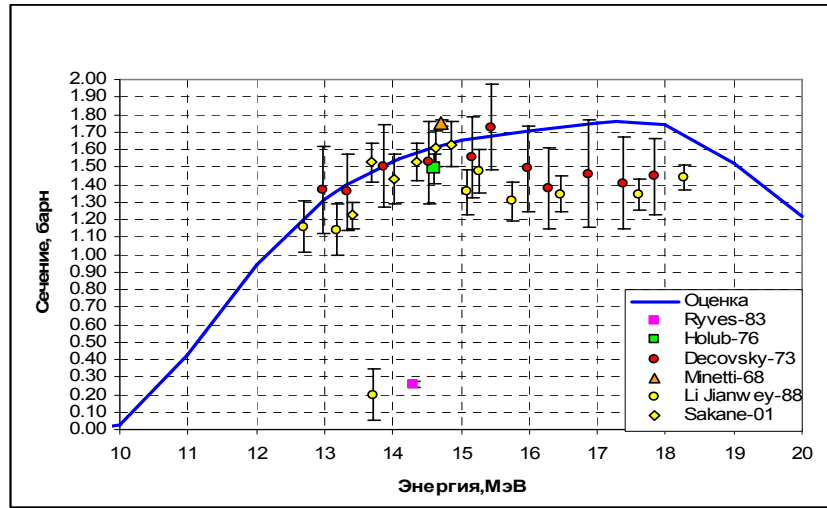


Рис.4. Сечение реакции (n,2n)

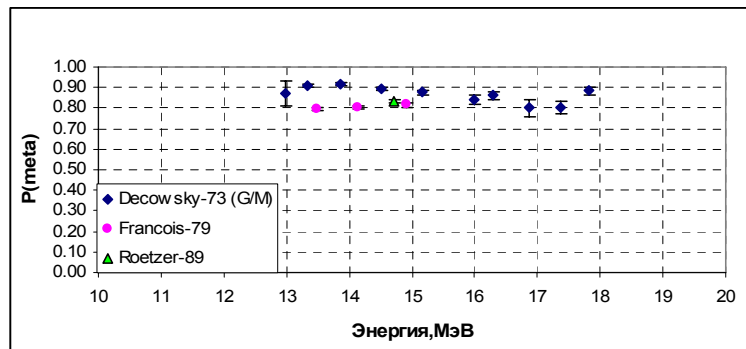


Рис.5. Вероятность образования изомера в реакции (n,2n)

Оцененное сечение реакции (n,3n) существенно превышает результаты единственного эксперимента (рис.6).

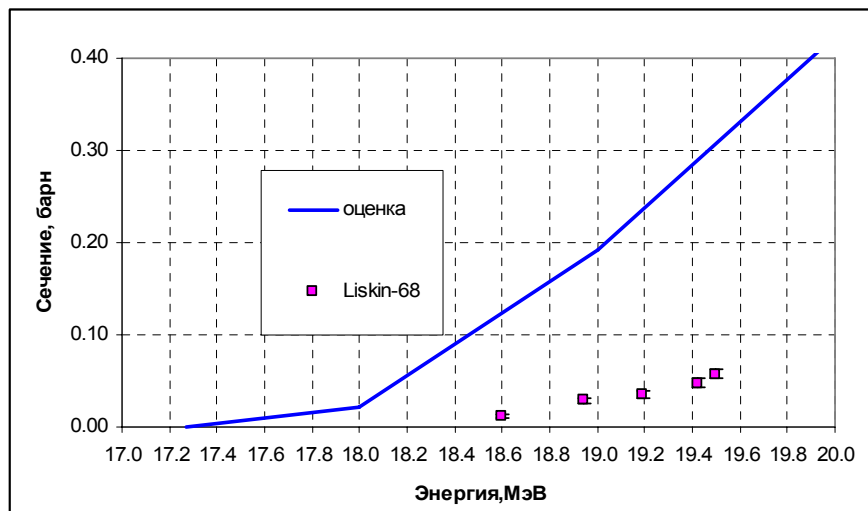


Рис.6. Сечение реакции (n,3n)

Закключение

В РОСФОНД следует включить оценку из ENDF/B-VIIb2, которую следует дополнить файлом MF=9 с данными о вероятностях образования долгоживущих изомеров – $^{114}\text{In}^m$, $^{113}\text{Cd}^m$ и $^{110}\text{Ag}^m$, а также файлом MF=10 с сечением образования изомера при неупругом рассеянии. Данные об образовании $^{114}\text{In}^m$ принять в соответствии с приведенными выше соображениями. Данные об образовании остальных изомеров принять в соответствии с EAF-2003.

Принятую оценку нельзя считать достаточно удовлетворительной. Пересмотр оцененных данных как в резонансной области (статистический учет пропущенных резонансов), так и вне резонансной области весьма желателен.

Автор заключения

Николаев М.Н.

49.3. Индий-114-m

Долгоживущий изомер ($T_{1/2}=49.51$ дн.) С вероятностью 3.25% испытывает захват орбитального электрона и превращается в стабильное олово-114. В остальных случаях переходит в основное состояние, испытывающее, в основном (99.5%) бета-распад в кадмий-114 ($T_{1/2}=71.9$ сек.), а в остальных случаях распадается в олово-114. В реакторах может образовываться за счет реакции $^{113}\text{In}_{(4.29\%)}(n,\gamma)$ и $^{115}\text{In}_{(95.713\%)}(n,2n)$.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Закключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Сформировать файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущих изомеров ^{113}Cd и ^{110}Ag . Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить MAT=4934.

Автор заключения

Николаев М.Н.

49.4. Индий-115

Содержание в естественной смеси 95.71%.

Слабо радиоактивен ($T_{1/2}=4.41 \cdot 10^{14}$ лет). Испытывает бета-распад в олово -115.

В известных библиотеках используются две оценки нейтронных данных:

- оценка, выполненная международной рабочей группой по продуктам деления в 1990 г. используется в библиотеках ФОНД-2.2, JENDL-3.3 и JEFF-3.1 (ниже – оценка JENDL-3.3);
- оценка, выполненная другой международной рабочей группой в 2004 – 2005 г., которая включена Мухабхабом в ENDF/B-VIIb2 (ниже – оценка ENDF/B-VII).

Ниже будут рассмотрены различия между ними в сравнении с экспериментальными данными.

2. Тепловая и резонансная области.

Тепловые сечения и значения резонансного интеграла захвата в обеих сравниваемых оценках одинаковы:

Табл.1. Тепловые сечения и резонансный интеграл

| Оценка | $\sigma_{el}(0.0253 \text{ eV})$ | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------|------|
| JENDL-3.3 ENDF/B-VII | 2.526 | 201.0 | 3210 |

По оценке Мухабхаба, погрешность сечения захвата составляет ± 2 барн, а резонансного интеграла ± 100 барн.

В JENDL-3.3 резонансная область содержит 206 s-резонансов с максимальной энергией 2004 эВ и 27 p-резонансов с максимальной энергией 493.7 эВ. Общее число резонансов 233. Область разрешенных резонансов простирается до 2000 эВ. В ENDF/B-VII число s-резонансов меньше -126 (максимальная энергия та же - 493.7 эВ), но зато p-резонансов больше - их 126 (максимальная энергия- 1992.7 эВ). Общее число резонансов 253. Граница RRR те же 2000 эВ.

На рис. 1 сравниваются нарастающие суммы числа резонансов в сравниваемых оценках.

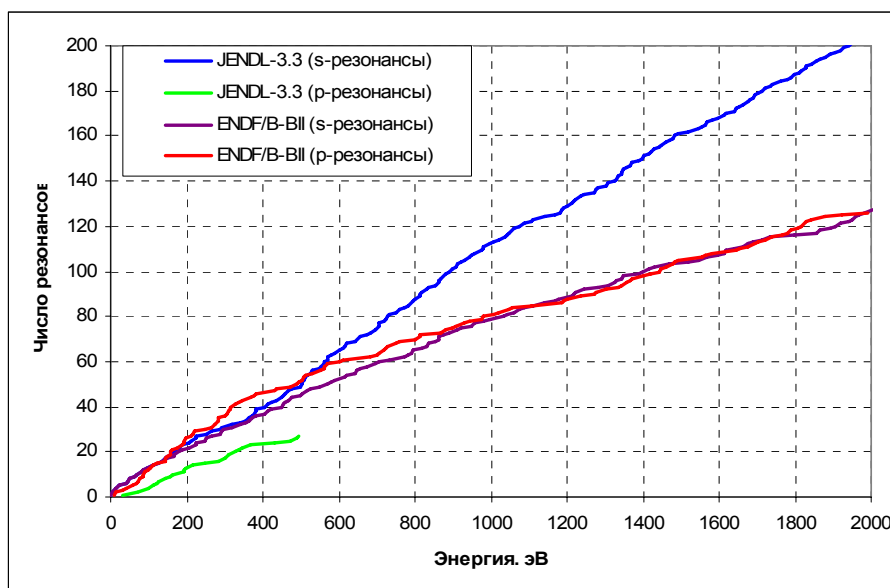


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

Ясно, что основное различие оценок заключается в распределении резонансов по четности. С точки зрения оценки поведения сечений в области разрешенных резонансов это не имеет большого значения. Согласно JENDL-3.3 до 2000 эВ нет сколько-нибудь заметного пропуска резонансов, а p-резонансы выше 500 эВ пропущены все, как один. Согласно ENDF/B-VII пропуск резонансов существен (кривые на рис.1 отклоняются от линейной аппроксимации к их начальным участкам), но существен одинаково и для относительно широких s-резонансов и для гораздо более узких p-резонансов.

На рис. 2 приведены нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов. В обеих оценках эти суммы нарастают практически линейно, создавая впечатление об отсутствии пропуска сильных резонансов. Для выявления преимущества одной из оценок требуется провести тщательный статистический анализ распределений приведенных нейтронных ширин, который весьма осложнен тем, что популяция s-резонансов содержит две системы уровней – с довольно близкими спинами – 4 и 5, а популяция p-резонансов целых 4 системы уровней с разными спинами. Проведение такого анализа в настоящей работе было бы неуместным.

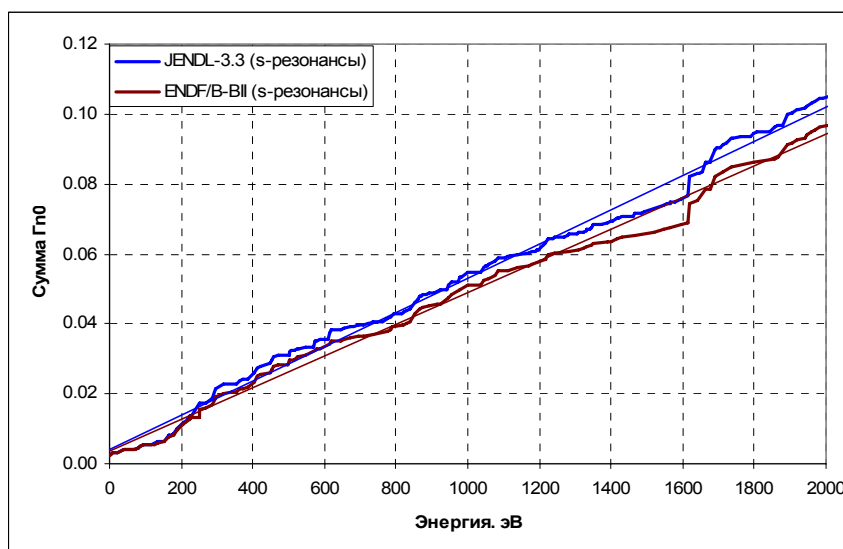


Рис.2. Нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин.

Область неразрешенных резонансов в сравниваемых оценках описывается одинаково. Одна и та же оценка используется и вне резонансной области, так что проблема выбора отпадает.

В РОСФОНД целесообразно все же принять оценку ENDF/B-VII, как более позднюю, а также потому, что в ней активное участие принимал столь авторитетный специалист, как Саид Мухабхаб.

Заключение

В РОСФОНД следует включить оценку из ENDF/B-VIIb2, дополнив ее файлом MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{114}\text{In}^m$, $^{115}\text{Cd}^m$, $^{113}\text{Cd}^m$ а также изомера $^{116}\text{In}^m$, используемого для регистрации нейтронов методом активации, воспользовавшись данными EAF-2003. Ввести файл MF=10 с сечением образования $^{115}\text{In}^m$, также используемого в активационных измерениях.

Заметим, что экспериментальная информация о сечении захвата с образованием $^{116}\text{In}^m$ ($T_{1/2}=54.29$ мин.) довольно противоречива и тщательная переоценка сечения образования этого изомера была бы весьма целесообразна. Следует пересмотреть и данные о сечении образования $^{115}\text{In}^m$, обеспечив их соответствие с данными по сечениям неупругого рассеяния с возбуждением дискретных уровней и континуума и схемы распада уровней.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

50. ОЛОВО

Обладая магическим числом протонов (50), олово имеет наибольшее число стабильных изотопов (10). Трудности модельного описания сечений при энергии ниже нескольких МэВ обусловлены низкой плотностью уровней и большой флуктуацией ширины нейтронных резонансов, часть из которых связана с простыми ядерными структурами типа входных состояний. Приведенные нейтронные силовые функции s - , p - , и d - волн существенно отличаются по величине и имеют заметную энергетическую зависимость. Описание сечений в таких ядрах при энергии ниже нескольких МэВ возможно только в методе сильной связи каналов нейтронных реакций с учётом большого числа каналов с возбуждением вибрационных уровней разной сложности.

Экспертный анализ проведённый подгруппами 21 и 23 рабочей группы по сотрудничеству в оценке показал[1], что единственными современными оценками для всех стабильных и части нестабильных изотопов являются оценки библиотеки JENDL-3. Все они выполнены в едином подходе с использованием согласованного набора параметров для модельных расчётов в области энергий выше области разрешённых резонансов и параметрами в области неразрешённых резонансов согласованными с оптико-статистическими и средними параметрами резонансов из области разрешённых резонансов. В 2006 году Мугхабгхаб[2] провёл переоценку параметров в резонансной области для большинства изотопов олова. Подгруппа 21 рекомендовала для получения рекомендованной наилучшей оценки заменить параметры в области разрешённых резонансов файлов изотопов олова библиотеки JENDL-3 на параметры, оцененные Мугхабгхабом. В связи с этим, для всех изотопов олова, для которых в JENDL-3 содержатся оцененные данные в области неразрешённых резонансов и высоких энергий, рекомендуется включить их и в библиотеку РОСФОНД. Качество описания имеющихся экспериментальных данных показано на рисунках 1 – 15. Для области разрешённых резонансов будет дан более детальный анализ и сравнение новой оценки Мугхабгхаба с имеющимися экспериментальными данными и предыдущей оценкой.

Область быстрых нейтронов

На рисунках 1 – 15 приведено сравнение оценки JENDL-3 с имеющимися экспериментальными данными, демонстрирующее качество модельного описания сечений в быстрой области энергий. Все рисунки взяты из рабочих материалов подгруппы 21[1]. Полное сечение и сечение неупругих процессов, приведённые на рисунка 1 и 2 для естественной смеси изотопов олова и полученные суммированием вкладов оценок сечений для отдельных изотопов показывают сложности описания этих сечений в сферической оптической модели. Использование метода сильной связи каналов с учётом большого числа уровней вибрационной природы различной сложности (как одно-, так и мульти-фононных) позволит существенно улучшить описание в особенности при низких энергиях. Такой подход был реализован в оценке отечественного файла библиотеки БРОНД-2. Однако результатом оценки являлся файл для естественной смеси изотопов олова, который лучше описывает полное сечение и сечение неупругих процессов приведённые на рисунках 1 и 2 чем в файлах других библиотек. Данные по отдельным изотопам в библиотеке БРОНД-2 отсутствуют. В целом хорошее описание сечений упругого рассеяния и парциальных сечений реакций для различных изотопов олова наблюдается в библиотеке JENDL-3.

Сравнение оценок сечения захвата с имеющимися экспериментальными данными для различных изотопов олова на рисунках 12 – 15 показывает их хорошее описание в библиотеке JENDL-3.

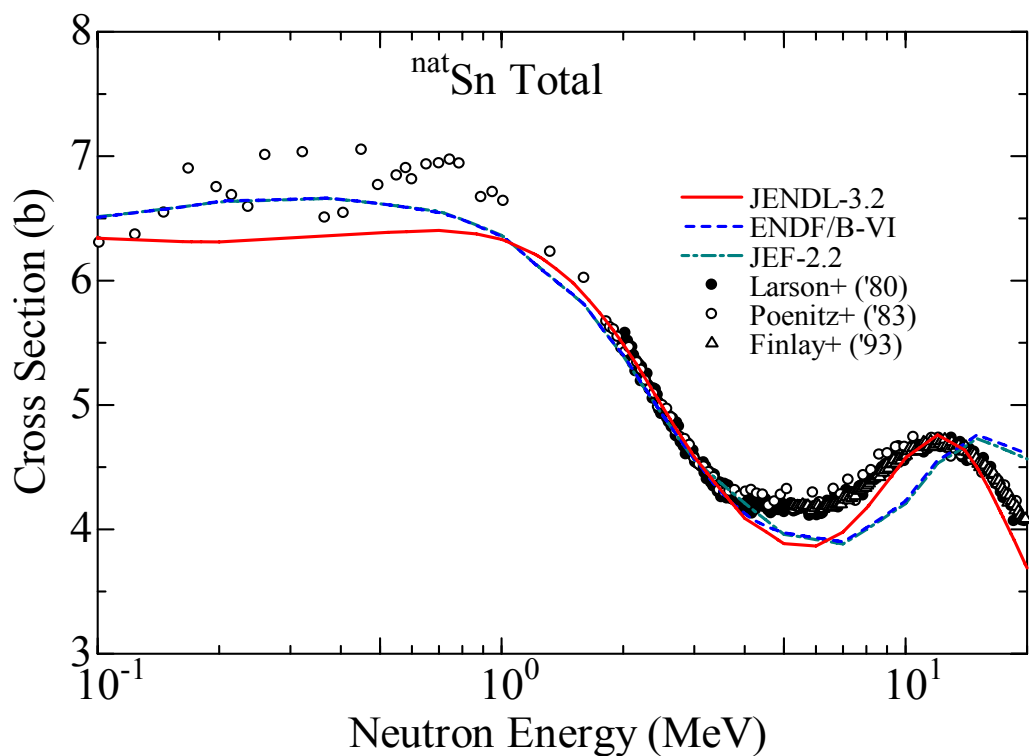


Рис. 1 Полное сечение нейтронов на естественном олове.

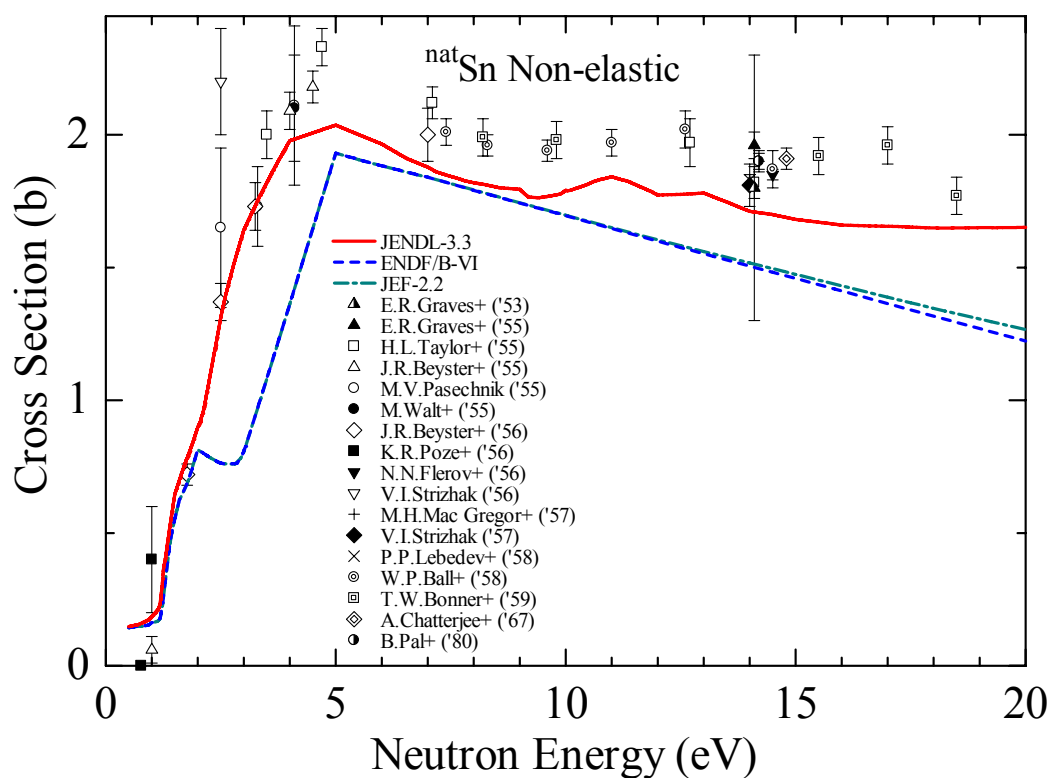


Рис. 2. Сечение неупругих процессов на естественном олове.

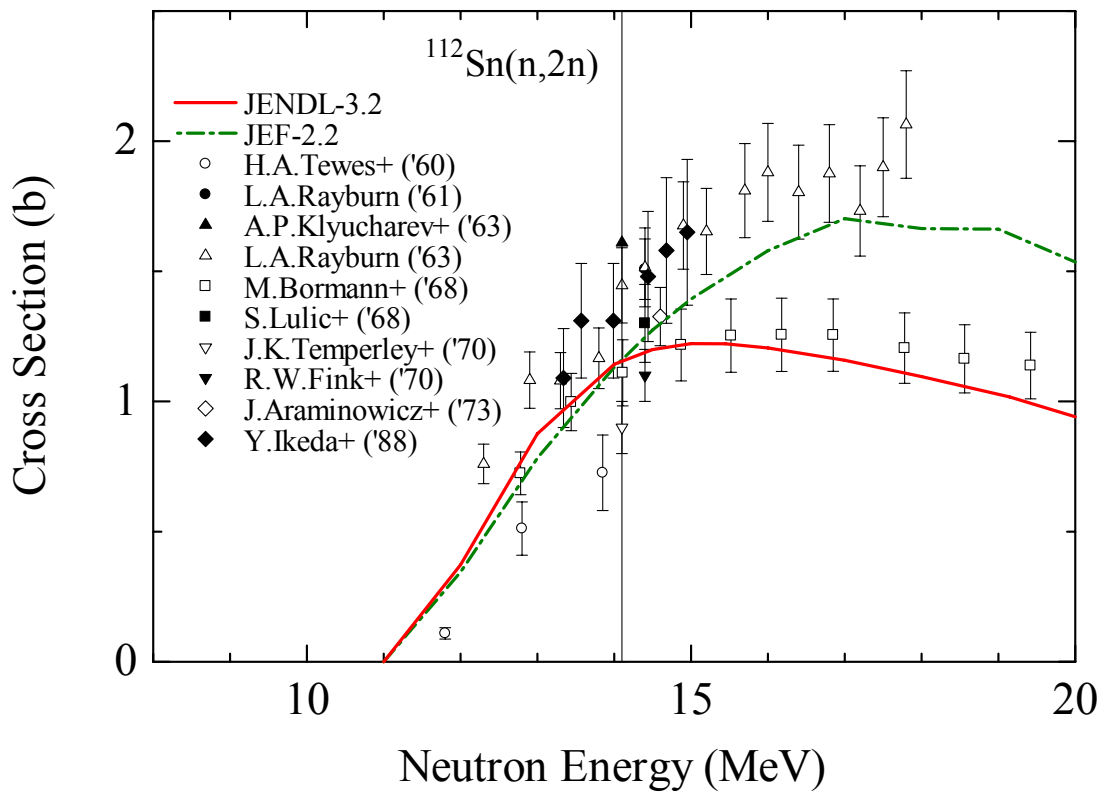


Рис. 3. Сечение (n,2n) на ^{112}Sn .

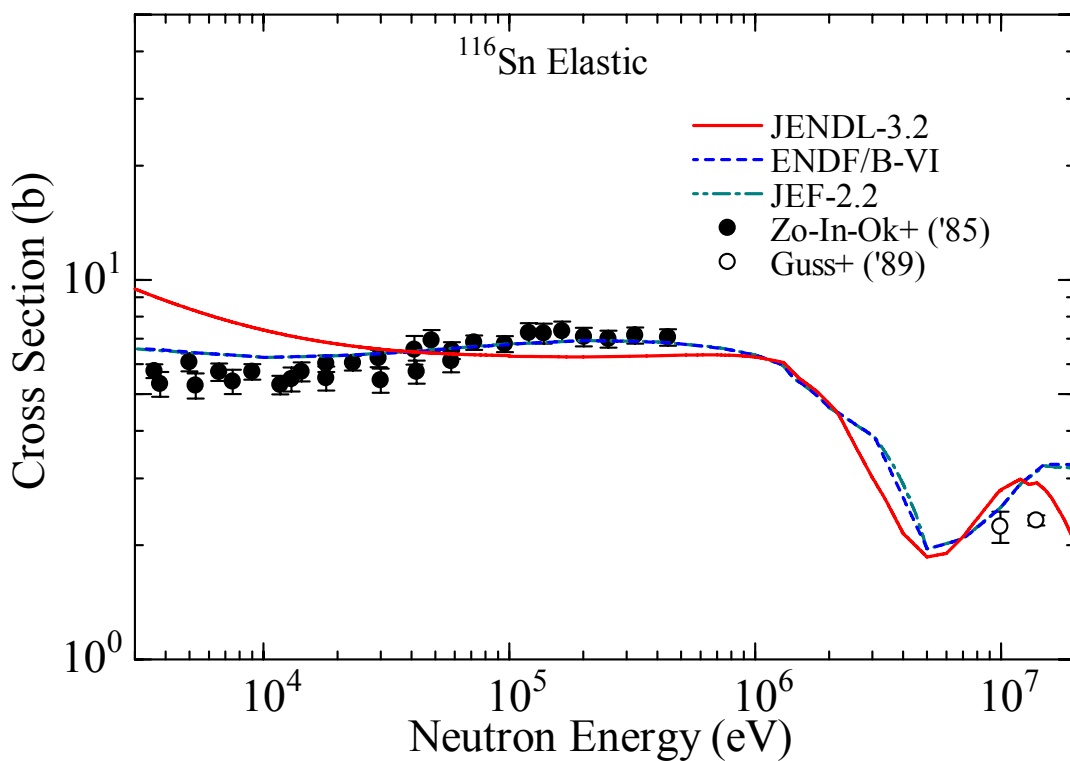


Рис. 4. Сечение упругого рассеяния на ^{116}Sn .

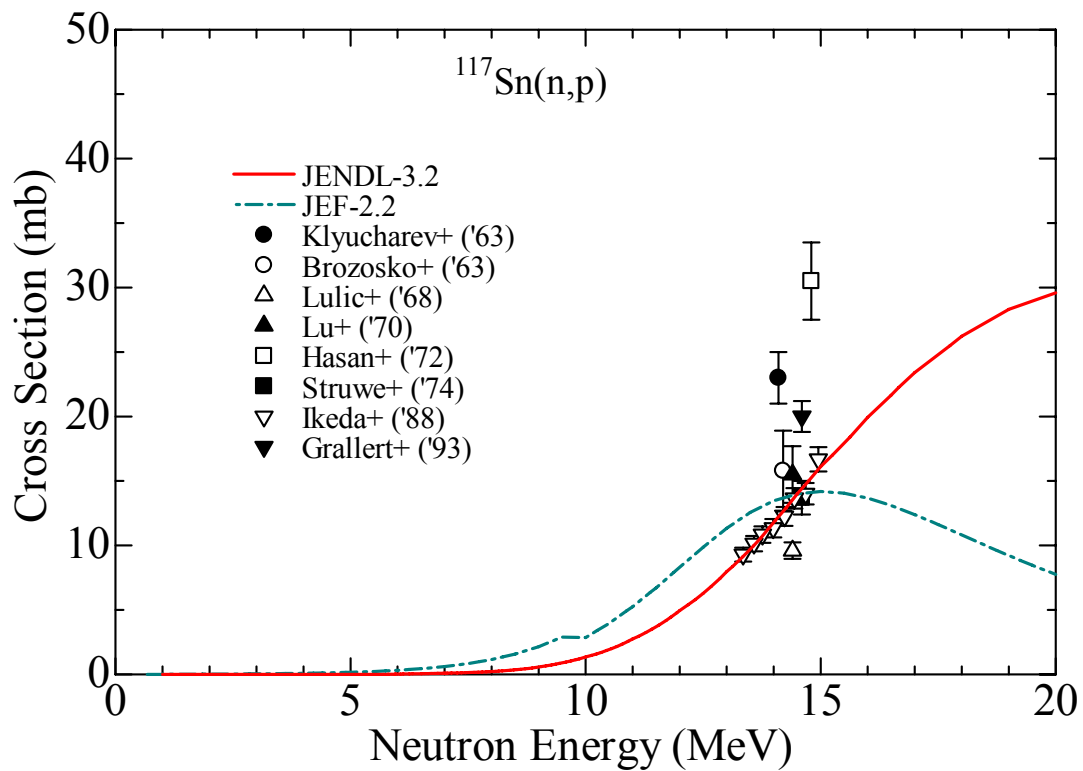


Рис. 5. Сечение (n,p) на ^{117}Sn .

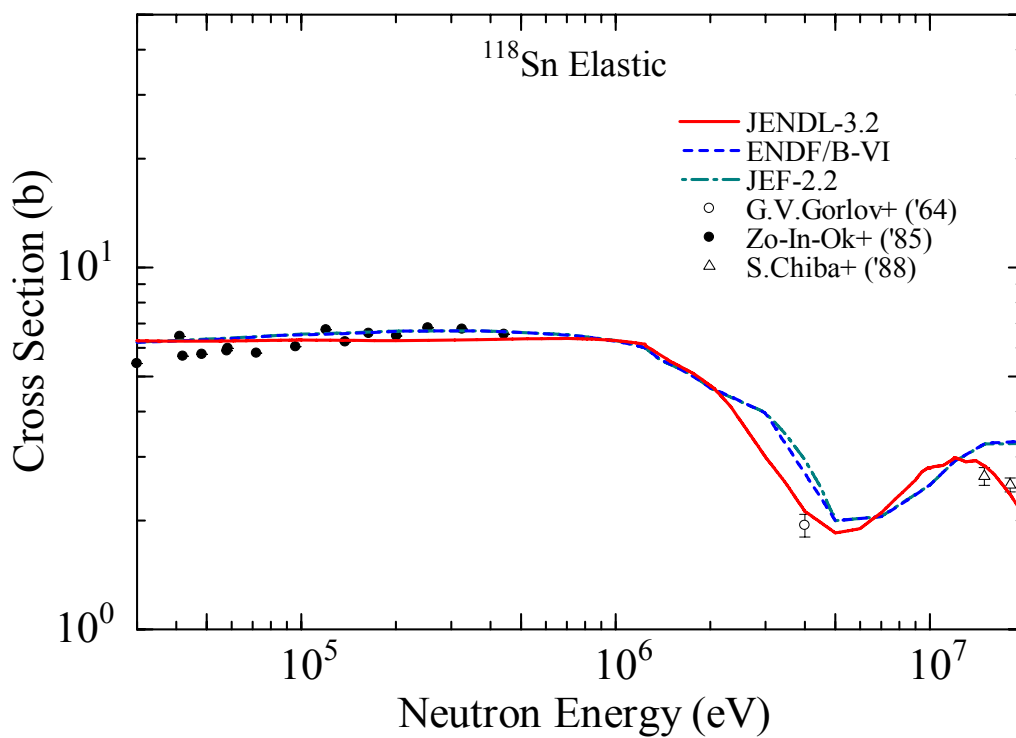


Рис. 6. Сечение упругого рассеяния на ^{118}Sn .

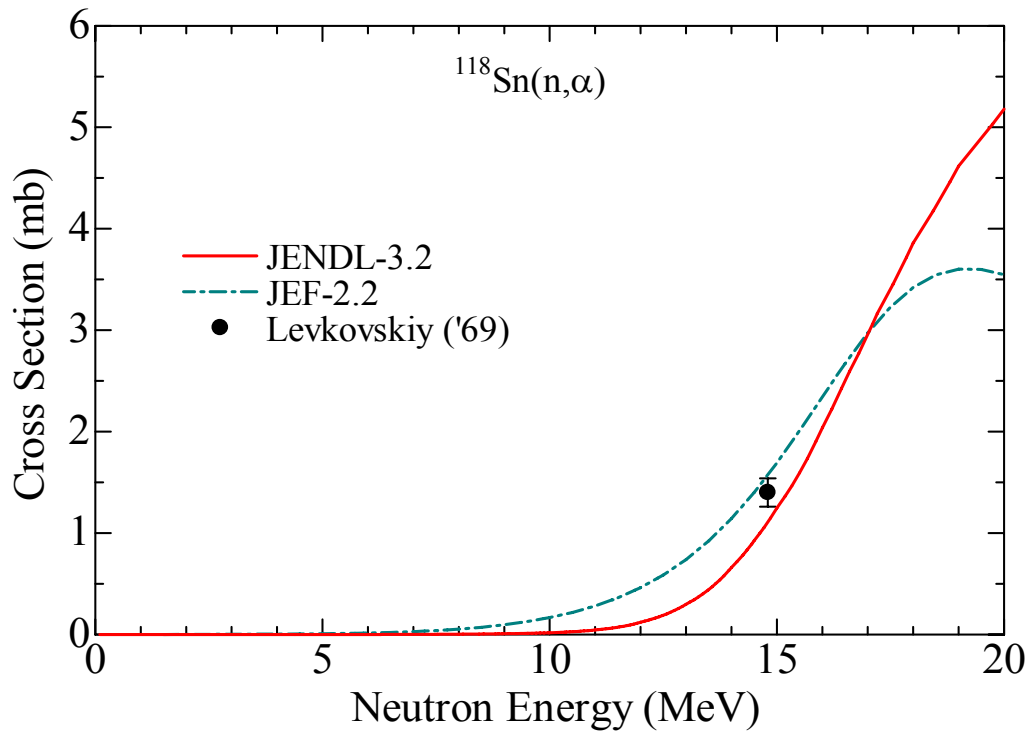


Рис. 7. Сечение (n,α) на ^{118}Sn .

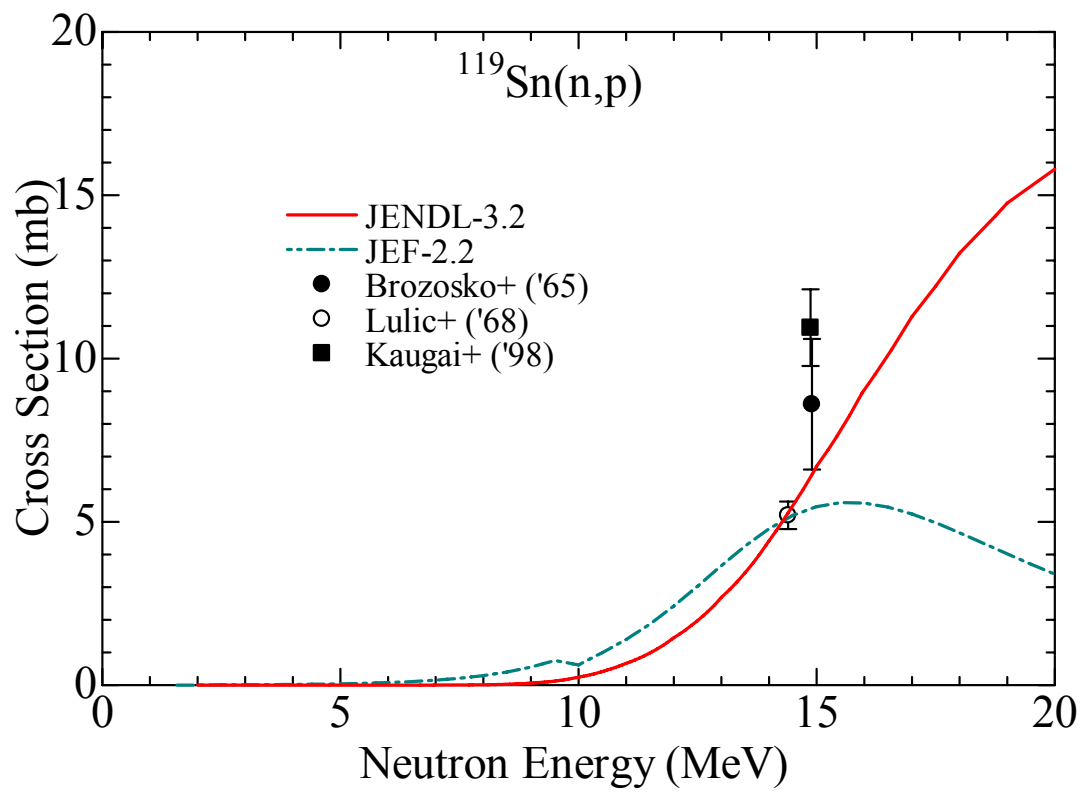


Рис. 8. Сечение (n,p) на ^{119}Sn .

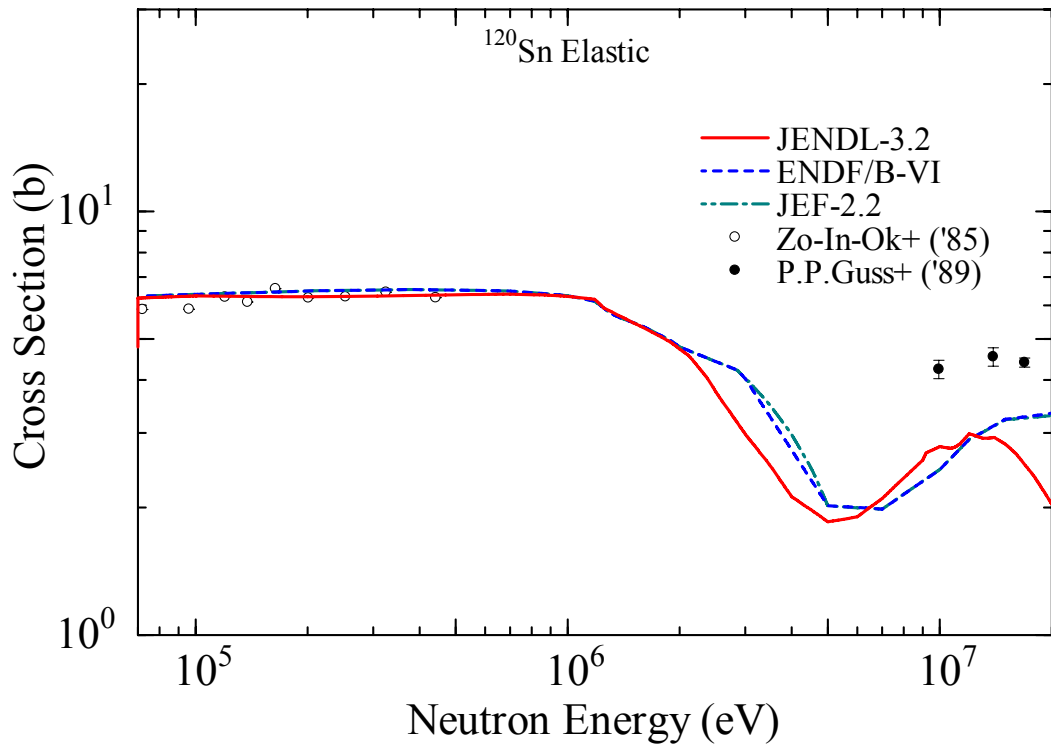


Рис. 9. Сечение упругого рассеяния на ^{120}Sn .

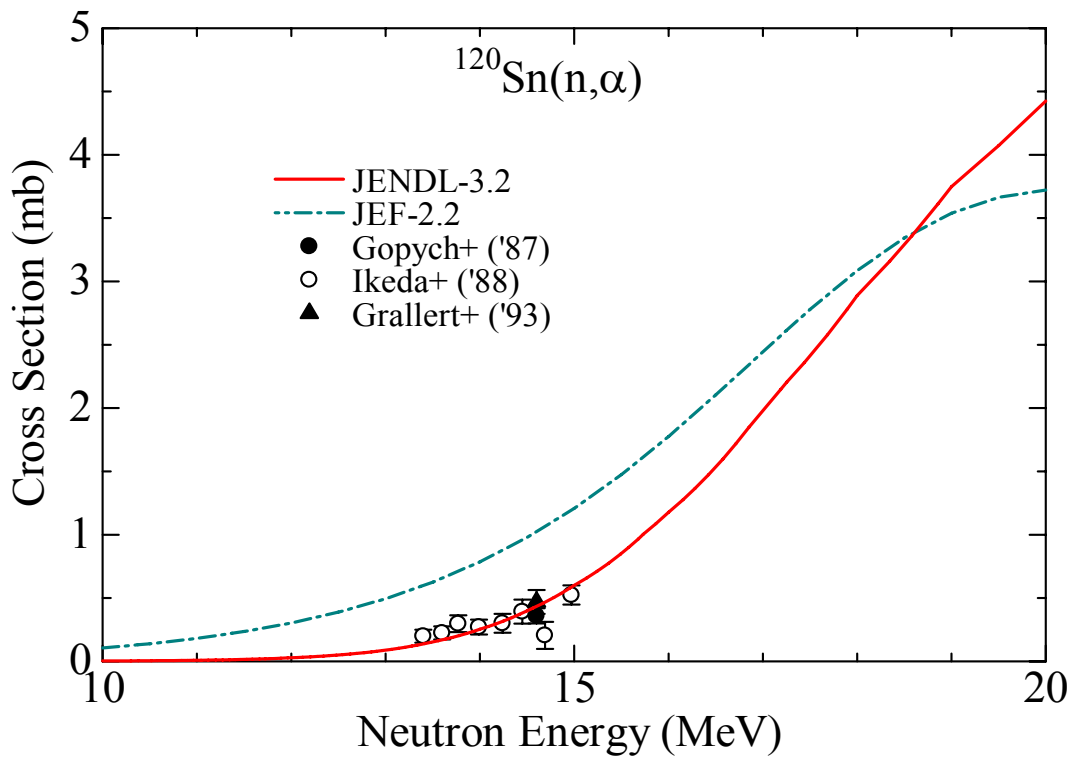


Рис. 10. Сечение (n,α) на ^{120}Sn .

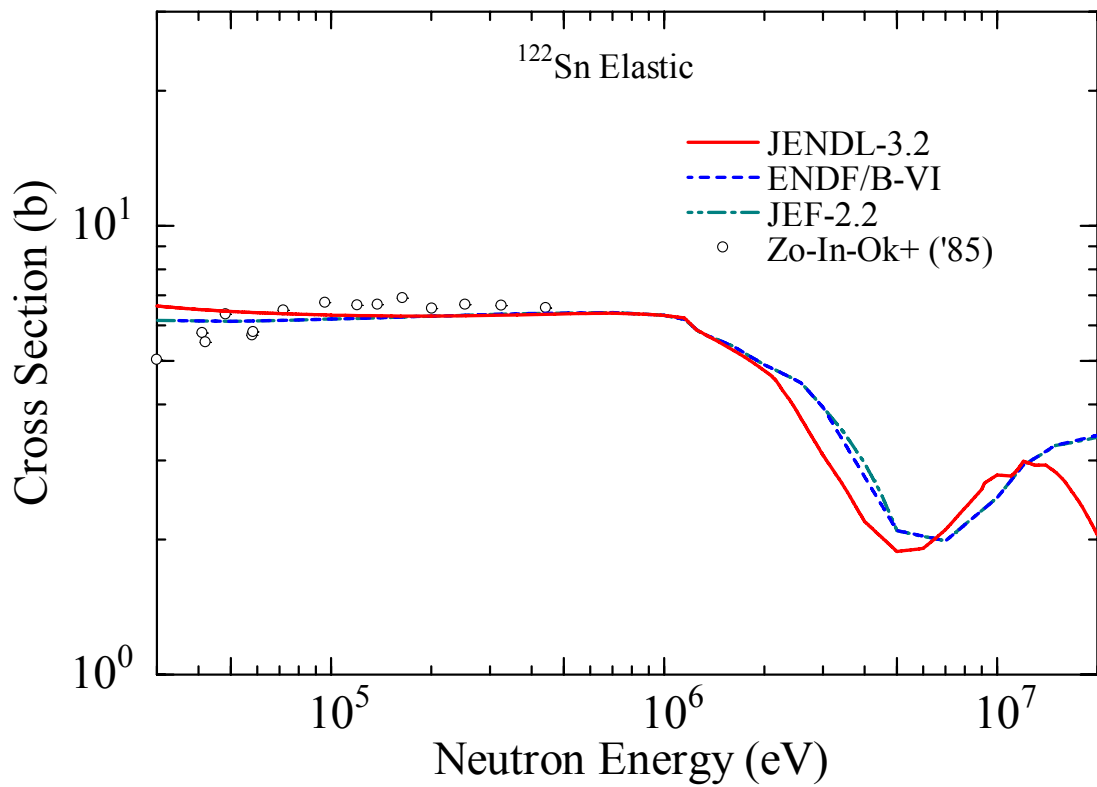


Рис. 11. Сечение упругого рассеяния на ^{122}Sn .

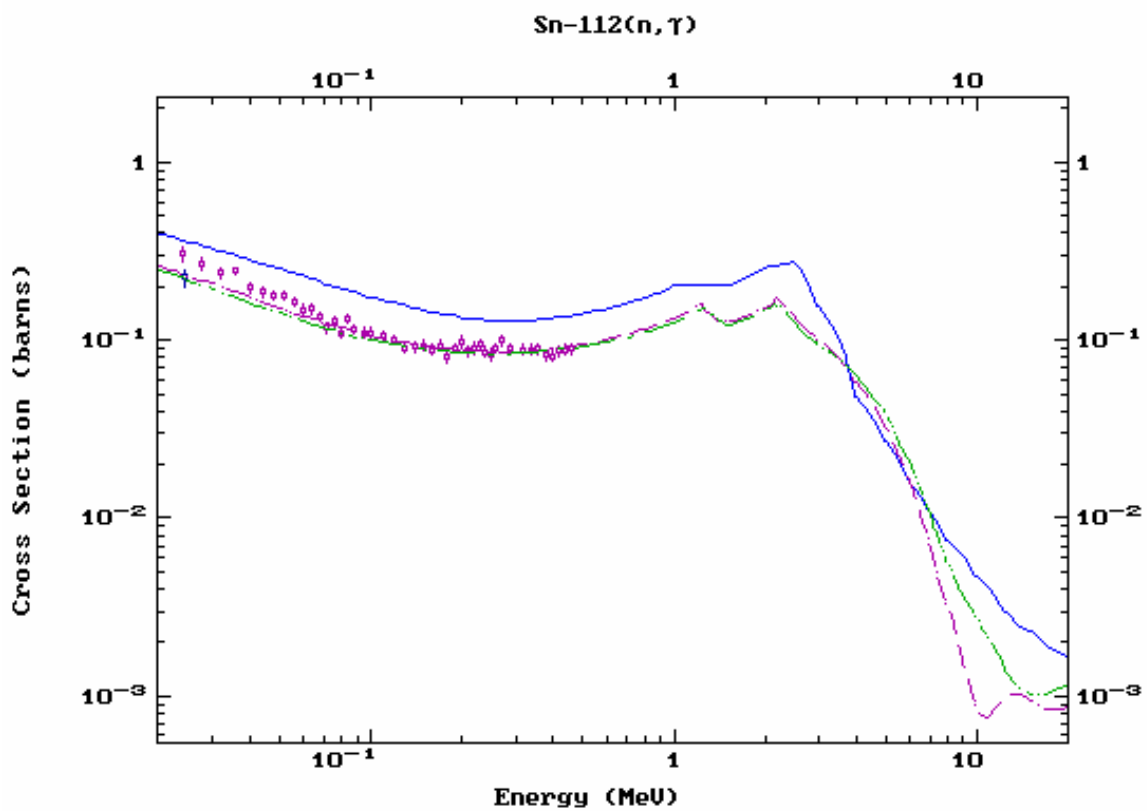


Рис. 12. Сечение захвата нейтронов на ^{112}Sn . Сплошная (синяя) линия – ENDF/B-VI, штрих-пунктирная (зелёная) линия – JENDL-3.3, пунктирная (фиолетовая) линия – JEF-2.

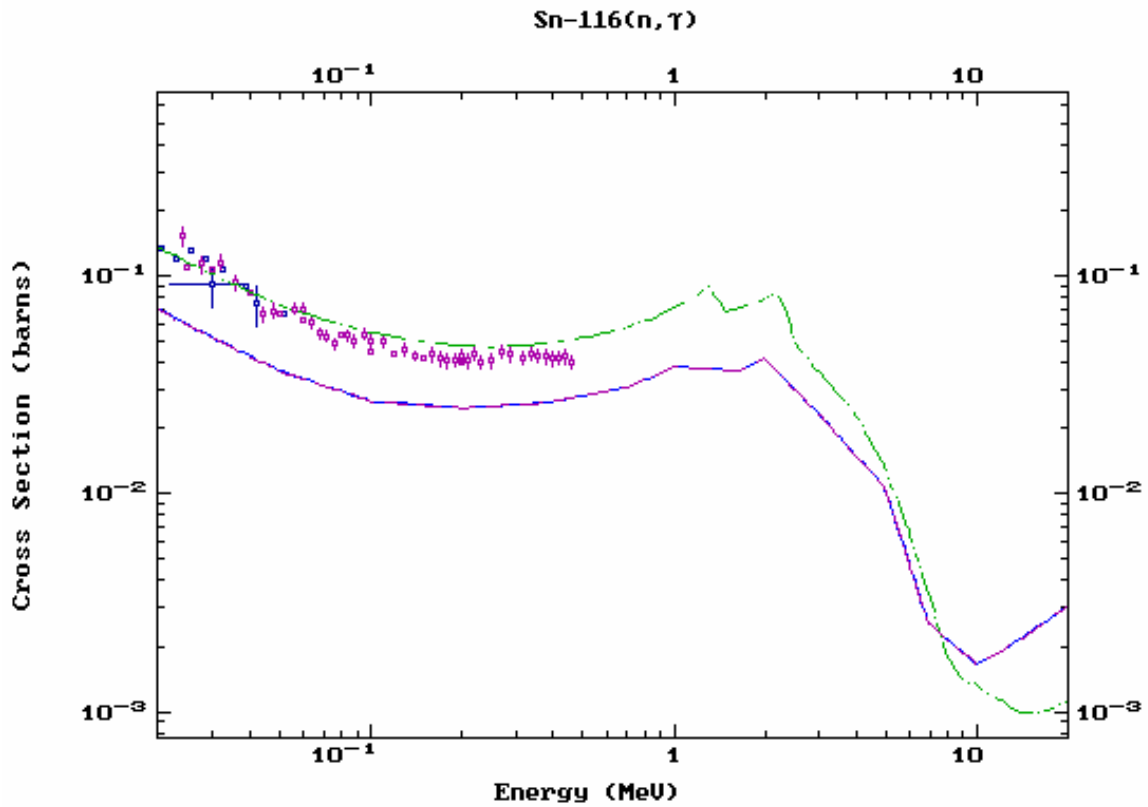


Рис. 13. Сечение захвата нейтронов на ^{116}Sn . Сплошная (синяя) линия – ENDF/B-VI, штрих-пунктирная (зелёная) линия – JENDL-3.3, пунктирная (фиолетовая) линия – JEF-2.

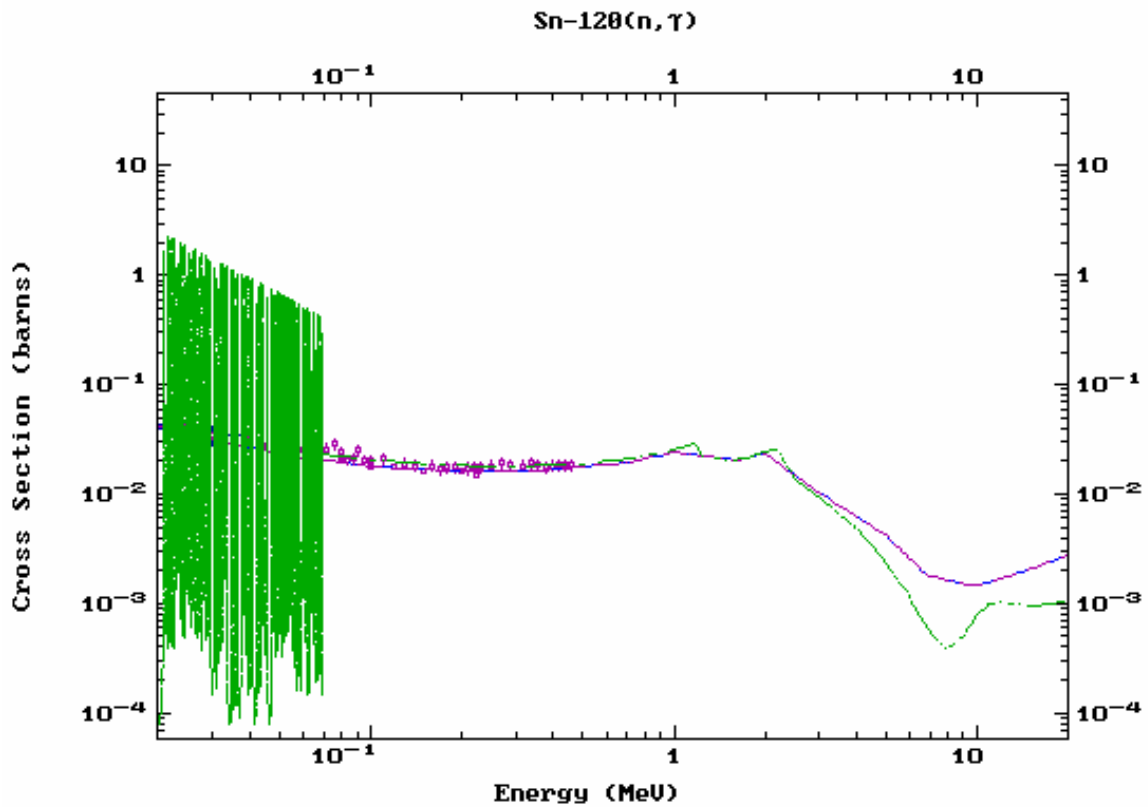


Рис. 14. Сечение захвата нейтронов на ^{120}Sn . Сплошная (синяя) линия – ENDF/B-VI, штрих-пунктирная (зелёная) линия – JENDL-3.3, пунктирная (фиолетовая) линия – JEF-2.

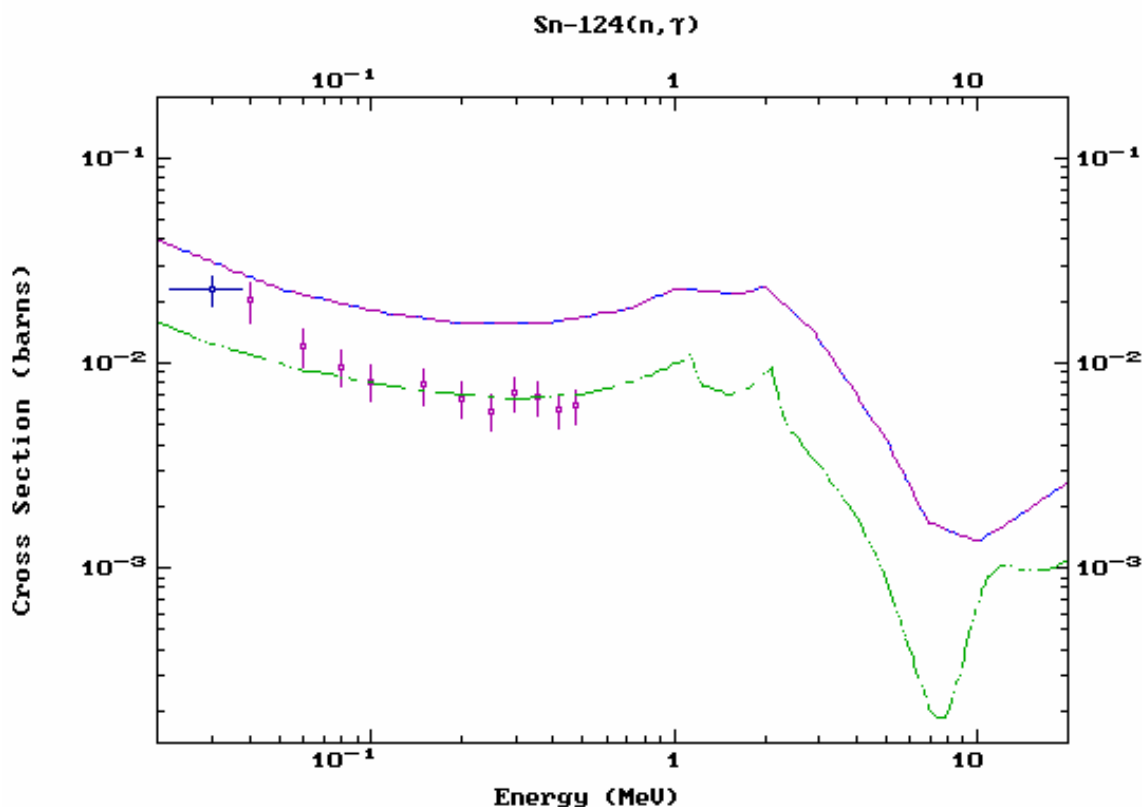


Рис. 15. Сечение захвата нейтронов на ^{124}Sn . Сплошная (синяя) линия – ENDF/B-VI, штрих-пунктирная (зелёная) линия – JENDL-3.3, пунктирная (фиолетовая) линия – JEF-2.

Общие характеристики и область разрешённых резонансов для изотопов олова

50.1. Олово-112

Содержание в естественной смеси: $0.97 \pm 0.01\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Сравнение областей разрешённых резонансов и тепловых сечений в различных библиотеках с новой оценкой Мугхабгхаба, включённой в файл ENDF/B-VII.b2, приведены в таблицах 1 и 2. Необходимо отметить, что существует заметный пропуск р-резонансов, который, как остаётся надеяться, из-за малой нейтронной ширины не приводит к заметной недооценки сечения захвата в резонансную область энергий.

Для включения в библиотеку РОСФОНД рекомендуется файл из библиотеки ENDF/B-VII.b2, который включает оценку для области неразрешённых резонансов и для быстрой области энергий из библиотеки JENDL-3.3 (взята без изменений из JENDL-3.2) с небольшими исправлениями формата и для резонансной области – новая оценка Мугхабгхаба (2006).

Таблица 1. Характеристики области разрешённых резонансов. Число резонансов приведено только для 2-х последних оценок.

| Библиотека | Энергетический диапазон, формализм описания | Число резонансов |
|---------------|---|---------------------|
| JENDL-3.2 | 10^{-5} eV~1.5 keV, MLBW | 10 s-рез., 3 p-рез. |
| JEF-2.2 | 10^{-5} eV~1.5 keV, MLBW | |
| ENDF/B-VI | 10^{-5} eV~1.5 keV, SLBW | |
| ENDF/B-VII.b2 | 10^{-5} eV~1.5 keV, MLBW | 10 s-рез., 5 p-рез. |

Таблица 2. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата (T=300K)

| Библиотека | Полное (барн) | Упругое (барн) | Захват (барн) | Резонансн. интеграл (барн) |
|------------------|---------------|----------------|---------------|----------------------------|
| JENDL-3.2 | 5.61853E+00 | 4.60926E+00 | 1.00927E+00 | 3.00705E+01 |
| JEF-2.2 | 5.30419E+00 | 4.57306E+00 | 7.31136E-01 | 2.98856E+01 |
| ENDF/B-VI | 6.36189E+00 | 5.21929E+00 | 1.14260E+00 | 2.97161E+01 |
| Mughabghab(Mu81) | - | - | 1.01±0.09 | 29±2 |
| ENDF/B-VII.b2 | 5.2748 | 4.4247 | 0.85005 | 30.0 |

50.2. Олово-113

Период полураспада: (115.09±0.03) дней.

Моды распада: e^- 100%.

Спин основного состояния: $1/2^+$.

Библиотека ENDF/B-VII.b2 является единственной содержащей полный файл для ^{113}Sn . Оценка в области высоких энергий выполнена в рамках модельных расчётов более полно учитывающих механизмы реакций, чем расчёты для JENDL-3. В резонансной области оценка основывается на резонансных параметрах рекомендованных Мугхабгхабом (2006) дополненных, где необходимо фиктивными резонансами, так что бы воспроизвести средние резонансные параметры на соседних ядрах и статистические распределения уровней и ширин. Область разрешённых резонансов от 10^{-5} эВ до 510 эВ содержит 11 s- и 18 p- резонансов в область неразрешённых резонансов расположена от 510 эВ до 78.09 кэВ – порога неупругого рассеяния. Следующие тепловые значения сечений рекомендованы как полученные из приведённых резонансных параметров: полное – 13.16 барн, упругое – 4.3 барна, захват 8.87 барн и резонансный интеграл захвата – 228 барн. Сечение захвата и резонансный интеграл близки к экспериментальным значениям полученным Ануфриевым (9±3 и 210±5 барн соответственно) [X4=40957]. На рисунке 16 приведены основные нейтронные сечения во всём интервале энергий. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей. Для включения в библиотеку РОСФОНД рекомендуется файл из библиотеки ENDF/B-VII.b2.

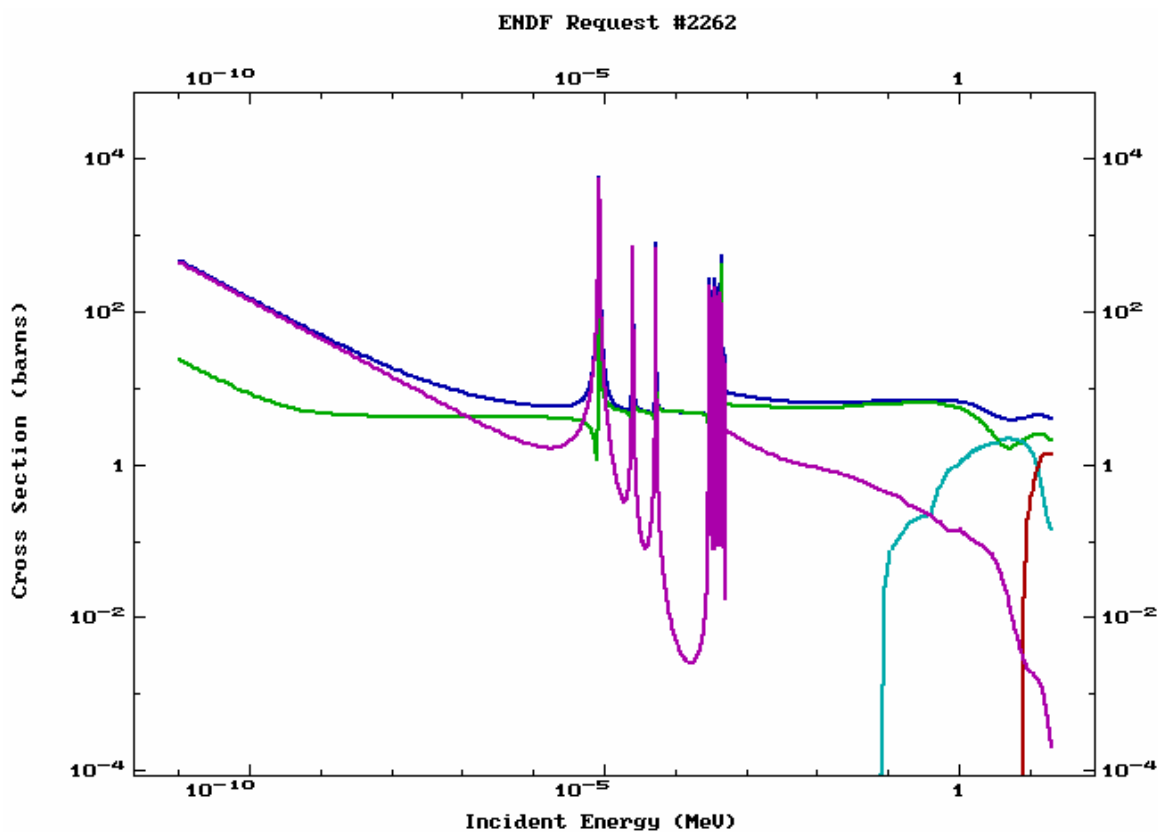


Рис. 16. Сечения из файла библиотеки ENDF/B-VII.b2. Синяя линия – полное сечение, зелёная линия – сечение упругого рассеяния, фиолетовая линия – сечение захвата, голубая линия – сечение неупругого рассеяния, красная линия – сечение (n,2n).

50.3. Олово-114

Содержание в естественной смеси: $0.66 \pm 0.01\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Сравнение областей разрешённых резонансов и тепловых сечений в различных библиотеках с новой оценкой Мугхабгхаба, включённой в файл ENDF/B-VII.b2, приведены в таблицах 3 и 4. Необходимо отметить, что верхняя граница области разрешённых резонансов была понижена в ENDF/B-VII.b2 до 2 кэВ, а нижняя граница области неразрешённых резонансов соответственно понижена до 2 кэВ. На рисунке 17 приводится сравнение сечений радиационного захвата из ENDF/B-VII.b2 с JENDL-3.2 в резонансной области энергий. Сечения совпадают для s- резонансов и существенно отличаются для p- резонансов. Причиной этого является ошибка в задании нейтронных ширин для p-резонансов в ENDF/B-VII.b2 (одинаковое значение 0.003 эВ задано для всех резонансов) и небольшом увеличении ширин захвата для p- резонансов (с 0.09 до 0.11 эВ). Более высокий резонансный интеграл захвата в ENDF/B-VII.b2 объясняется большим вкладом в сечение от первого p- резонанса имеющего нейтронную ширину 0.003 эВ в файле ENDF/B-VII.b2 и 0.0001532 эВ в файле JENDL-3.2. Нейтронные ширин p-резонансов были исправлены на приведённые в JENDL-3.2 и таким образом откорректированный файл из библиотеки ENDF/B-VII.b2 рекомендован для библиотеки

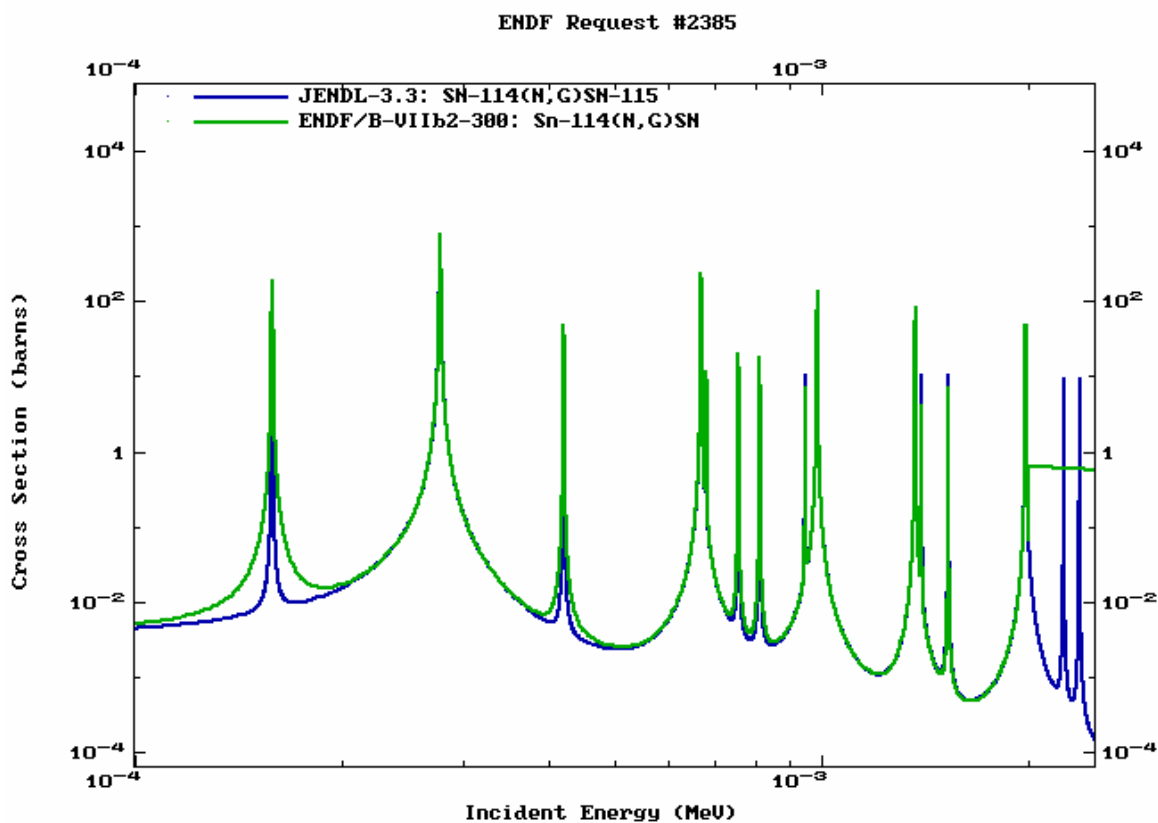
РОСФОНД¹. Резонансный интеграл захвата с откорректированными параметрам р-резонансов равен 6.7845 барн.

Таблица 3. Характеристики области разрешённых резонансов. Число резонансов приведено только для 2-х последних оценок.

| Библиотека | Энергетический диапазон, формализм описания | Число резонансов |
|---------------|---|---------------------|
| JENDL-3.2 | 10^{-5} эВ~2.5 кэВ, MLBW | 5 s-рез., 10 p-рез. |
| JEF-2.2 | 10^{-5} эВ~2.0 кэВ, MLBW | |
| ENDF/B-VI | 10^{-5} эВ~2.0 кэВ, SLBW | |
| ENDF/B-VII.b2 | 10^{-5} эВ~2.0 кэВ, MLBW | 5 s-рез., 8 p-рез. |

Таблица 4. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата (T=300K)

| Библиотека | Полное (барн) | Упругое (барн) | Захват (барн) | Резонансн. интеграл (барн) |
|------------------|---------------|----------------|---------------|----------------------------|
| JENDL-3.2 | 4.69162E+00 | 4.56632E+00 | 1.25306E-01 | 6.33087E+00 |
| JEF-2.2 | 6.78957E+00 | 5.68846E+00 | 1.10111E+00 | 3.43628E+00 |
| ENDF/B-VI | 6.78892E+00 | 5.68831E+00 | 1.10061E+00 | 3.43860E+00 |
| Mughabghab(Mu81) | - | 4.6±0.5 | 0.115±0.030 | 5.1±1.5 |
| ENDF/B-VII.b2 | 4.6710 | 4.5458 | 0.1252 | 7.83 |



¹ Включен файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера ^{114m}In^m в реакции (n,p) – М.Николаев

Рис. 17. Сравнение сечений захвата из библиотеки ENDF/B-VII.b2 (зелёная линия) и JENDL-3.3 (синяя линия) в резонансной области энергий.

50.4. Олово-115

Содержание в естественной смеси: $0.34 \pm 0.01\%$.

Спин основного состояния: $1/2^+$.

В таблицах 5 и 6 приведены основные характеристики области разрешённых резонансов, тепловые сечения и резонансные интегралы захвата в файлах различных библиотек оценённых данных. Обращают внимание большие изменения сечений в ENDF/B-VII.b2 по сравнению с JENDL-3.3, что обусловлено в первую очередь изменением положения отрицательного резонанса и его ширины. Предыдущая оценка JENDL-3.3 в тепловой точке и резонансного интеграла захвата основывались на оценке Мугхабгхаба 1981 года. Нынешняя оценка ENDF/B-VII.b2 основывается на последней оценке Мугхабгхаба (2006). В связи с тем, что опубликованные данные сечений в тепловой точке отсутствуют следует принять последние рекомендации Мугхабгхаба даже в условиях, что источник таких данных не известен. Файл из библиотеки ENDF/B-VII.b2 рекомендуется для библиотеки РОСФОНД.²

Таблица 5. Характеристики области разрешённых резонансов. Число резонансов приведено только для 2-х последних оценок.

| Библиотека | Энергетический диапазон, формализм описания | Число резонансов |
|---------------|---|------------------|
| JENDL-3.2 | 10^{-5} эВ~950 эВ, MLBW | 5 s-резонансов |
| JEF-2.2 | 10^{-5} эВ~692.75 эВ, MLBW | |
| ENDF/B-VI | 10^{-5} эВ~692.75 эВ, SLBW | |
| ENDF/B-VII.b2 | 10^{-5} эВ~950 эВ, MLBW | 5 s-резонансов |

Таблица 6. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата (T=300K)

| Библиотека | Полное (барн) | Упругое (барн) | Захват (барн) | Резонансный интеграл (барн) |
|------------------|---------------|----------------|---------------|-----------------------------|
| JENDL-3.2 | 3.82628E+01 | 8.40713E+00 | 2.98557E+01 | 1.33809E+01 |
| JEF-2.2 | 5.43199E+01 | 4.29735E+00 | 5.00224E+01 | 2.36832E+01 |
| ENDF/B-VI | 5.42999E+01 | 4.29724E+00 | 5.00027E+01 | 2.38852E+01 |
| Mughabghab(Mu03) | - | - | 30±7 | 29±6 |
| ENDF/B-VII.b2 | 67.048 | 9.0469 | 58.001 | 20.7 |

50.5. Олово-116

Содержание в естественной смеси: $14.34 \pm 0.09\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

² Дополнить оценку файлом MF=9 с данными об образовании долгоживущего изомера $^{114}\text{In}^m$ в реакциях (n,d) и (n,p) на основе данных EAF-2003. _ М. Николаев.

В таблицах 7 и 8 приведены основные характеристики области разрешённых резонансов, тепловые сечения и резонансные интегралы захвата. Несмотря на то, что тепловые сечения и резонансный интеграл захвата в оценке ENDF/B-VII.b2 существенно не изменились по сравнению с оценкой JENDL-3.3, резонансная область в ENDF/B-VII.b2 существенно расширена по сравнению с JENDL-3.3. Статистический анализ распределения уровней и их нейтронных ширин показывает, что до энергии нейтронов в 20 кэВ в файле библиотеки ENDF/B-VII.b2 нет заметных пропусков уровней как в s-, так и в p- волне в области разрешённых резонансов. Файл из библиотеки ENDF/B-VII.b2 рекомендуется для библиотеки РОСФОНД³.

Таблица 7. Характеристики области разрешённых резонансов.

| Библиотека | Энергетический диапазон, формализм описания | Число резонансов |
|---------------|---|-----------------------|
| JENDL-3.2 | 10^{-5} эВ~2 кэВ, MLBW | 7 s-рез., 5 p-рез. |
| JEF-2.2 | 10^{-5} эВ~2.1549 кэВ, MLBW | 7 s-рез., 5 p-рез. |
| ENDF/B-VI | 10^{-5} эВ~2.1549 кэВ, SLBW | 4 s-рез., 4 p-рез. |
| ENDF/B-VII.b2 | 10^{-5} эВ~30 кэВ, MLBW | 34 s-рез., 179 p-рез. |

Таблица 8. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата (T=300K)

| Библиотека | Полное (барн) | Упругое (барн) | Захват (барн) | Резонансный интеграл (барн) |
|------------------|---------------|----------------|---------------|-----------------------------|
| JENDL-3.2 | 4.45852E+00 | 4.33078E+00 | 1.27736E-01 | 1.21663E+01 |
| JEF-2.2 | 4.12163E+00 | 4.00120E+00 | 1.20426E-01 | 1.15953E+01 |
| ENDF/B-VI | 4.11705E+00 | 3.99663E+00 | 1.20421E-01 | 1.16212E+01 |
| Mughabghab(Mu03) | - | - | 0.13±0.03 | 11.9±1.0 |
| ENDF/B-VII.b2 | 4.4286 | 4.3009 | 0.12766 | 12.3 |

50.6. Олово-117

Содержание в естественной смеси: 7.68±0.07%.

Спин основного состояния: $1/2^+$.

Как видно из таблиц 9 и 10 новая оценка ENDF/B-VII.b2 существенно понижает значение сечения захвата в тепловой точке и содержит больше резонансов. Несмотря на возможные пропуски p- резонансов оценка ENDF/B-VII.b2 является предпочтительнее оценки JENDL-3.2. Низкое тепловое сечение захвата в ENDF/B-VII.b2 вероятно обусловлено учётом последних экспериментальных данных Кнопфа и др. (X4=22451, 1997). Файл из библиотеки ENDF/B-VII.b2 рекомендуется для библиотеки РОСФОНД⁴.

Таблица 9. Характеристики области разрешённых резонансов. Число резонансов приведено только для 2-х последних оценок.

³ Дополнить оценку файлом MF=9 с данными об образовании долгоживущих изомеров ¹¹³Cd^m, ¹¹⁵Cd^m и ¹¹⁷Sn^m на основе данных EAF-2003. _ М. Николаев.

⁴ Дополнить оценку файлом MF=9 с данными об образовании долгоживущего изомера ¹¹⁵Cd^m на основе данных EAF-2003. _ М. Николаев.

| Библиотека | Энергетический диапазон, формализм описания | Число резонансов |
|---------------|---|----------------------|
| JENDL-3.2 | 10^{-5} эВ ~2.35 кэВ, MLBW | 47 s-рез., 10 p-рез. |
| JEF-2.2 | 10^{-5} эВ ~610.91 эВ, MLBW | |
| ENDF/B-VI | 10^{-5} эВ ~610.91 эВ, SLBW | |
| ENDF/B-VII.b2 | 10^{-5} эВ ~2.30 кэВ, MLBW | 37 s-рез., 40 p-рез. |

Таблица 10. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата (T=300K)

| Библиотека | Полное (барн) | Упругое (барн) | Захват (барн) | Резонансный интеграл (барн) |
|------------------|---------------|----------------|---------------|-----------------------------|
| JENDL-3.2 | 7.30032E+00 | 5.12651E+00 | 2.17380E+00 | 1.78631E+01 |
| JEF-2.2 | 6.85852E+00 | 4.25925E+00 | 2.59920E+00 | 1.83251E+01 |
| ENDF/B-VI | 6.85669E+00 | 4.25849E+00 | 2.59820E+00 | 1.83977E+01 |
| Mughabghab(Mu03) | - | - | 1.32±0.18 | 15.7±2.5 |
| ENDF/B-VII.b2 | 6.3760 | 5.3055 | 1.0705 | 17.6 |

50.7. Олово-117m

Период полураспада: (13.76±0.04) дней.

Моды распада: изомерный переход, 100%, E=0.3146 МэВ.

Спин метастабильного состояния: 11/2⁻.

Единственный файл оценённых сечений имеющийся для ядра ^{117m}Sn является файл из активационной библиотеки JEFF-3.1/A. Сечения приведённые в файле представлены на рисунке 18. В связи с отсутствием каких-либо других данных файл JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁵.

⁵ Сохранить в файлу MF=9 лишь данные об образовании долгоживущих изомеров $^{115}\text{Cd}^m$ и $^{113}\text{Cd}^m$. Данные о сечении перехода в основное состояние перенести из файла MF=3 в файл MF=10 - М. Николаев.

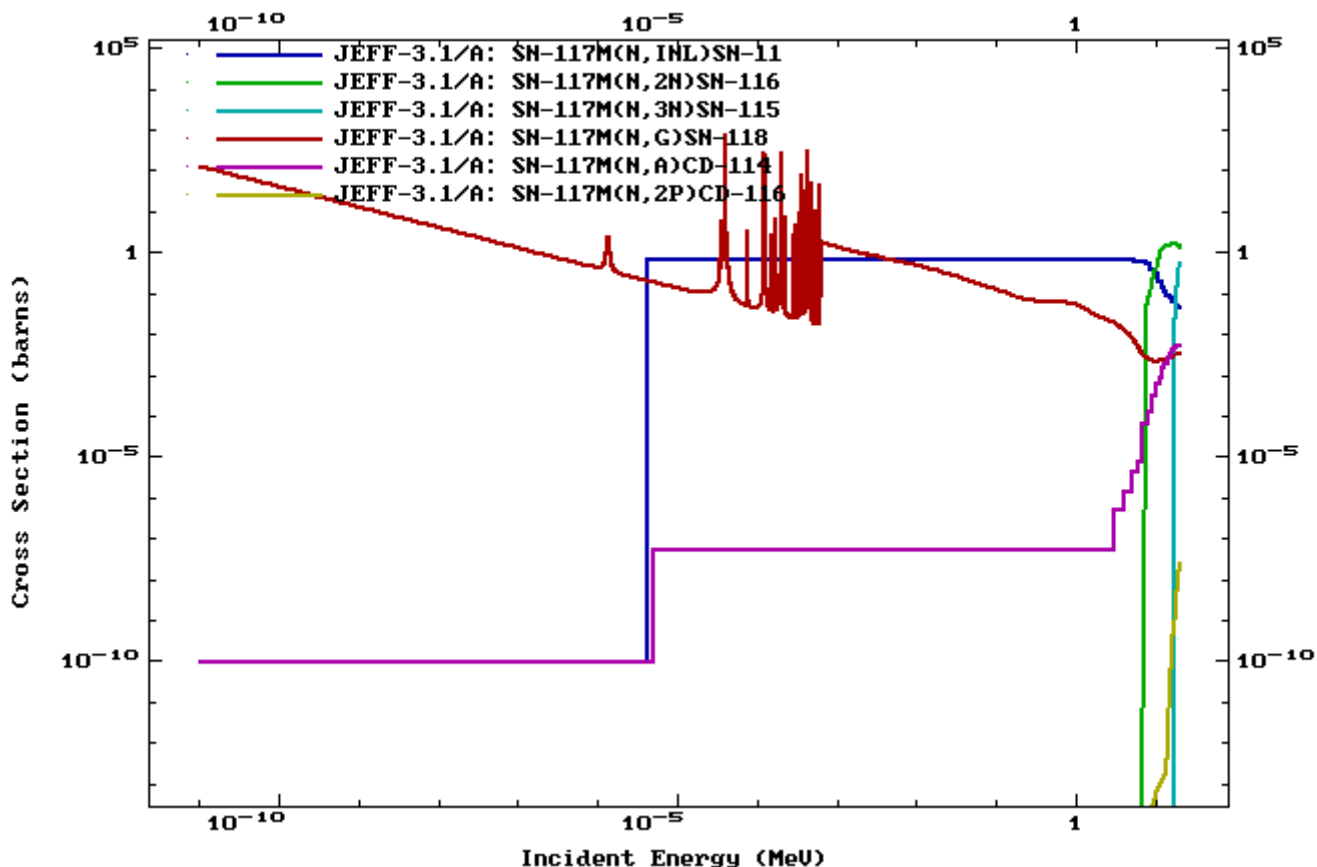


Рис. 18. Сечения в библиотеке JEFF-3.1/A.

50.8. Олово-118

Содержание в естественной смеси: $24.22 \pm 0.09\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файл ENDF/B-VII.b2 в области разрешённых резонансов содержит только уровни с идентифицированными квантовыми характеристиками; уровням с неизвестными спинами, чётностями и ширинами были приписаны средние характеристики р-резонансов в JENDL-3.2. Этим объясняется большее число р-резонансов и более высокое значение максимальной энергии области разрешённых резонансов в JENDL-3.2 (таблица 11). Очевидно также, что в ENDF/B-VII.b2 наблюдается пропуск р-резонансов, хотя из-за возможно малых нейтронных ширин этих резонансов, их вклад в среднее сечение захвата может быть и невелик. Как видно из таблицы 12, резонансный интеграл захвата в ENDF/B-VII.b2 заметно ниже чем в JENDL-3.2, что объясняется в основном меньшими ширинами захвата как для s-, так и для р-резонансов в этой оценке. На рисунке 19 приведены сечения захвата из библиотек ENDF/B-VII.b2 и JENDL-3.3 (=JENDL-3.2) в области энергий нейтронов определяющей вклад в резонансный интеграл захвата. С учётом новых результатов измерения площадей сечения захвата под резонансами (Висшак, Х4=22387, 1998), область разрешённых резонансов могла бы быть существенно расширена. Вероятно, что ревизия параметров резонансов Мугхабгхабом (2006) обусловлена корректировкой старых экспериментальных данных из-за изменения оценки

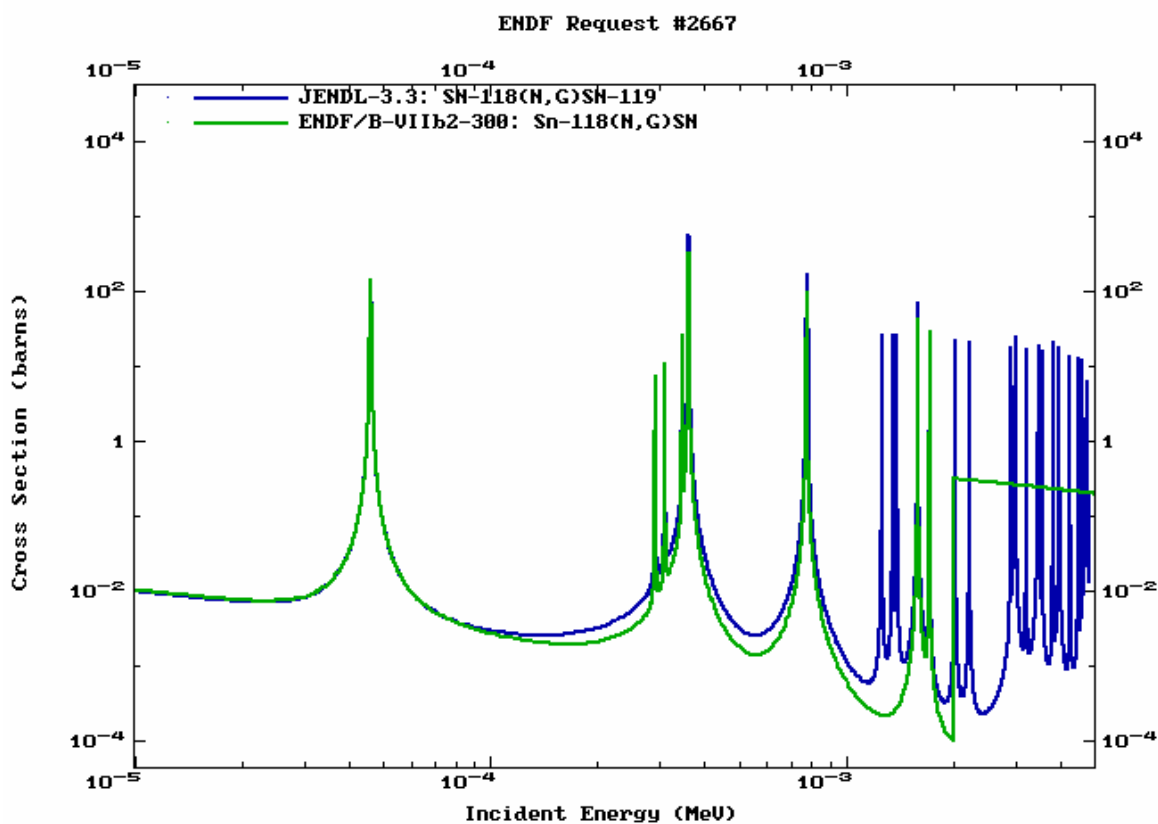
эффективности гамма-детектора. Файл из библиотеки ENDF/B-VII.b2 рекомендуется для библиотеки РОСФОНД⁶.

Таблица 11. Характеристики области разрешённых резонансов. Число резонансов приведено только для 2-х последних оценок.

| Библиотека | Энергетический диапазон, формализм описания | Число резонансов |
|---------------|---|---------------------|
| JENDL-3.2 | 10^{-5} эВ ~4.8 кэВ, MLBW | 8 s-рез., 20 p-рез. |
| JEF-2.2 | 10^{-5} эВ ~1.8927 кэВ, MLBW | |
| ENDF/B-VI | 10^{-5} эВ ~1.8927 кэВ, SLBW | |
| ENDF/B-VII.b2 | 10^{-5} эВ ~2.0 кэВ, MLBW | 8 s-рез., 5 p-рез. |

Таблица 12. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата (T=300K)

| Библиотека | Полное (барн) | Упругое (барн) | Захват (барн) | Резонансный интеграл (барн) |
|------------------|---------------|----------------|---------------|-----------------------------|
| JENDL-3.2 | 4.45810E+00 | 4.24017E+00 | 2.17925E-01 | 5.21290E+00 |
| JEF-2.2 | 4.20199E+00 | 4.11958E+00 | 8.24121E-02 | 5.99428E+00 |
| ENDF/B-VI | 4.19912E+00 | 4.11673E+00 | 8.23898E-02 | 5.99591E+00 |
| Mughabghab(Mu03) | - | - | 0.220±0.050 | 3.4±0.4 |
| ENDF/B-VII.b2 | 4.8836 | 4.6639 | 0.21796 | 3.96 |



⁶ Включить данные об образовании изомеров Cd-115m, Sn-117m и Sn-119m на основе EAF-2003 – М.Николаев.

Рис. 19. Сравнение сечений захвата в области энергий определяющих вклад в резонансный интеграл захвата.

50.9. Олово-119

Содержание в естественной смеси: $8.59 \pm 0.04\%$.

Спин основного состояния: $1/2^+$.

Новая оценка Мугхабгхаба (2006) включённая в ENDF/B-VII.b2 (таблица 13) содержит большее число резонансов, чем его оценка 1981 года использованная в JENDL-3.2. Значения нейтронных и гамма-ширин многих резонансов существенно изменились, что привело как к изменению сечения захвата в области разрешённых и увеличению резонансного интеграла захвата. Файл из библиотеки ENDF/B-VII.b2 рекомендуется для библиотеки РОСФОНД⁷.

Таблица 13. Характеристики области разрешённых резонансов. Число резонансов приведено только для 2-х последних оценок.

| Библиотека | Энергетический диапазон, формализм описания | Число резонансов |
|---------------|---|---------------------|
| JENDL-3.2 | 10^{-5} эВ ~1.3 кэВ, MLBW | 12 s-рез., 5 p-рез. |
| JEF-2.2 | 10^{-5} эВ ~547.2 эВ, MLBW | |
| ENDF/B-VI | 10^{-5} эВ ~547.2 эВ, SLBW | |
| ENDF/B-VII.b2 | 10^{-5} эВ ~1.26 кэВ, MLBW | 14 s-рез., 9 p-рез. |

Таблица 14. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата (T=300K)

| Библиотека | Полное (барн) | Упругое (барн) | Захват (барн) | Резонансный интеграл (барн) |
|------------------|---------------|----------------|---------------|-----------------------------|
| JENDL-3.2 | 6.87246E+00 | 4.69590E+00 | 2.17657E+00 | 5.15017E+00 |
| JEF-2.2 | 6.72503E+00 | 4.42416E+00 | 2.30080E+00 | 3.88332E+00 |
| ENDF/B-VI | 6.72404E+00 | 4.42415E+00 | 2.29989E+00 | 3.85999E+00 |
| Mughabghab(Mu03) | - | - | 2.2±0.5 | 2.9±0.5 |
| ENDF/B-VII.b2 | 7.1619 | 4.9878 | 2.1741 | 5.64 |

⁷ Включит данные об образовании изомера Cd-115m на основе EAF-2003 – М.Николаев.

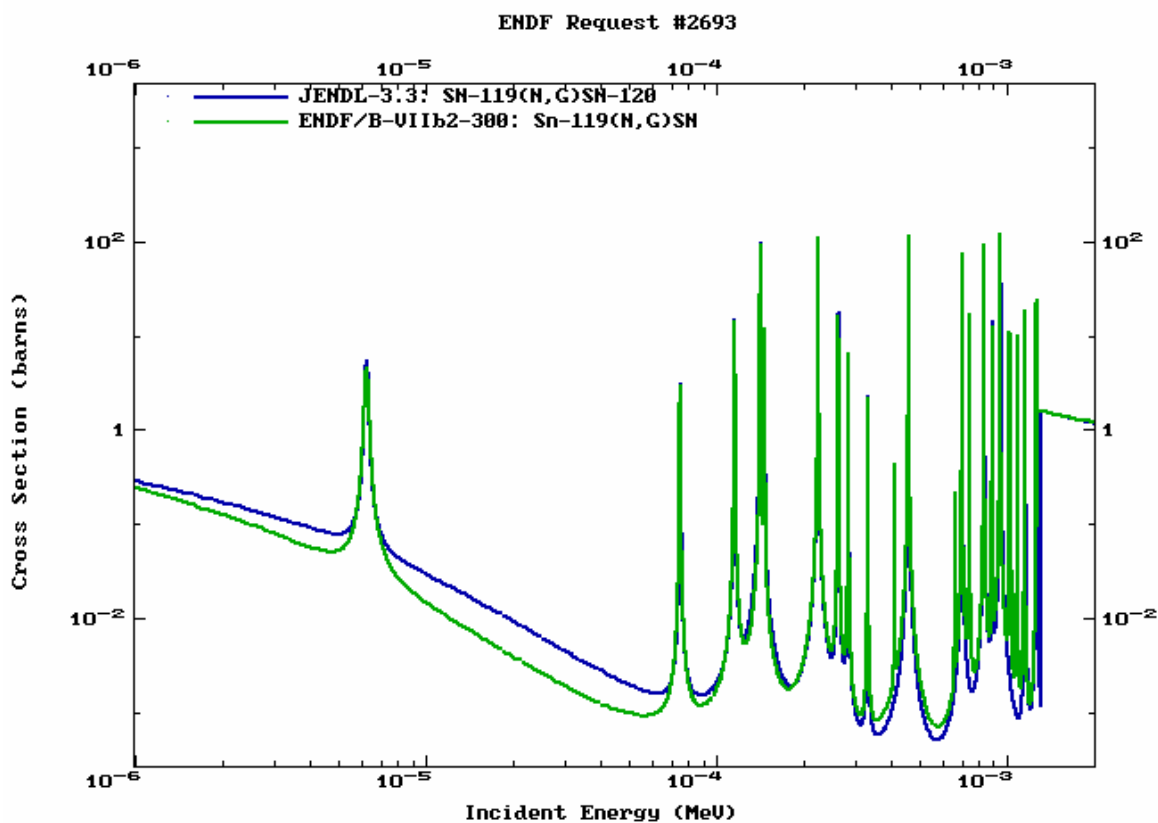


Рис. 20. Сравнение сечений захвата в области энергий определяющих вклад в резонансный интеграл захвата.

50.10. Олово-119m

Период полураспада: (293.1 ± 0.7) дней.

Моды распада: изомерный переход, 100%, $E=0.089531$ МэВ.

Спин метастабильного состояния: $11/2^-$.

Единственный файл оценённых сечений имеющийся для ядра ^{119m}Sn является файл из активационной библиотеки JEFF-3.1/A. Сечения приведённые в файле представлены на рисунке 21. В связи с отсутствием каких-либо других данных файл JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁸.

⁸ Сохранить в файле MF=9 только данные об образовании изомера Cd-117m. Данные о сечении перехода в основное состояние перенести из файла MF=3 в файл MF=10. – М.Николаев.

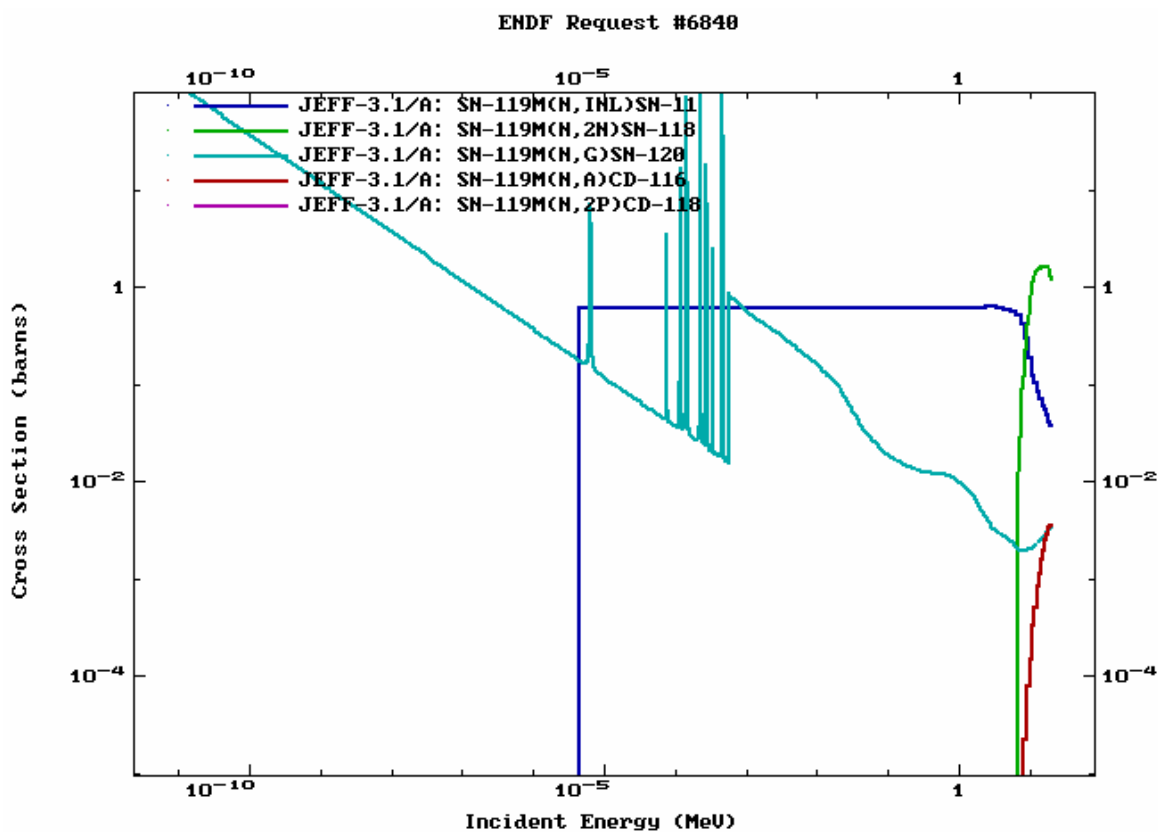


Рис. 21. Сечения в библиотеке JEFF-3.1/A.

50.11. Олово-120

Содержание в естественной смеси: $32.58 \pm 0.09\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

В таблицах 15 и 16 и на рисунке 22 приводится сравнение различных оценок в резонансной области. Как видно, различия между ENDF/B-VII.b2 и JENDL-3.2 небольшие. Статистический анализ распределения резонансов и их нейтронных ширин показывает, что как в файле библиотеки JENDL-3.2 так и в ENDF/B-VII.b2 отсутствуют заметные пропуски как s-, так и p- резонансов. Новая оценка Мугхабгхаба (2006) включённая в ENDF/B-VII.b2 учитывает результаты последних измерений Кёхлера и др. (X4=13909, 2001). Поэтому файл из библиотеки ENDF/B-VII.b2 рекомендуется для библиотеки РОСФОНД⁹.

Таблица 15. Характеристики области разрешённых резонансов. Число резонансов приведено только для 2-х последних оценок.

| Библиотека | Энергетический диапазон, формализм описания | Число резонансов |
|------------|---|-----------------------|
| JENDL-3.2 | 10^{-5} эВ ~70 кэВ, MLBW | 28 s-рез., 223 p-рез. |
| JEF-2.2 | 10^{-5} эВ ~14.271 кэВ, MLBW | |

⁹ Включить данные об образовании изомеров Sn-119m и Sn-121m на основе EAF-2003. – М.Николаев.

| | | |
|---------------|--------------------------------|-----------------------|
| ENDF/B-VI | 10^{-5} эВ ~14.271 кэВ, SLBW | |
| ENDF/B-VII.b2 | 10^{-5} эВ ~50 кэВ, MLBW | 37 s-рез., 223 p-рез. |

Таблица 16. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата ($T=300K$)

| Библиотека | Полное (барн) | Упругое (барн) | Захват (барн) | Резонансный интеграл (барн) |
|------------------|---------------|----------------|---------------|-----------------------------|
| JENDL-3.2 | 5.50203E+00 | 5.36278E+00 | 1.39248E-01 | 1.14579E+00 |
| JEF-2.2 | 4.54696E+00 | 4.40590E+00 | 1.41036E-01 | 1.18566E+00 |
| ENDF/B-VI | 4.54704E+00 | 4.40576E+00 | 1.41036E-01 | 1.17896E+00 |
| Mughabghab(Mu03) | - | - | 0.14±0.03 | 1.2±0.3 |
| ENDF/B-VII.b2 | 5.7523 | 5.6128 | 0.13951 | 1.14 |

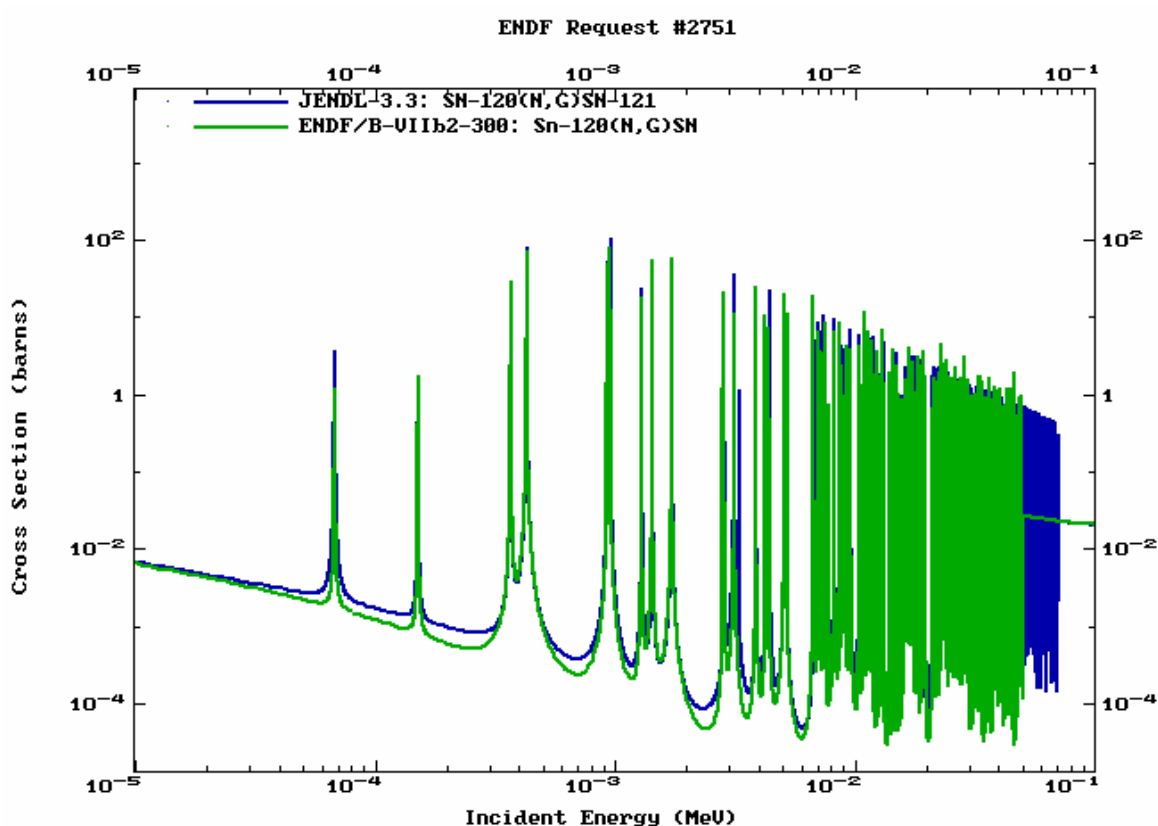


Рис. 22. Сравнение сечений захвата в области энергий определяющих вклад в резонансный интеграл захвата.

50.12. Олово-121

Период полураспада: (27.03 ± 0.04) часа.

Моды распада: β , 100%.

Спин основного состояния: $3/2^+$.

Единственный файл оценённых сечений имеющийся для ядра ^{121}Sn является файл из активационной библиотеки JEFF-3.1/A. Сечения приведённые в файле представлены на рисунке 23. В связи с отсутствием каких-либо других данных файл JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹⁰.

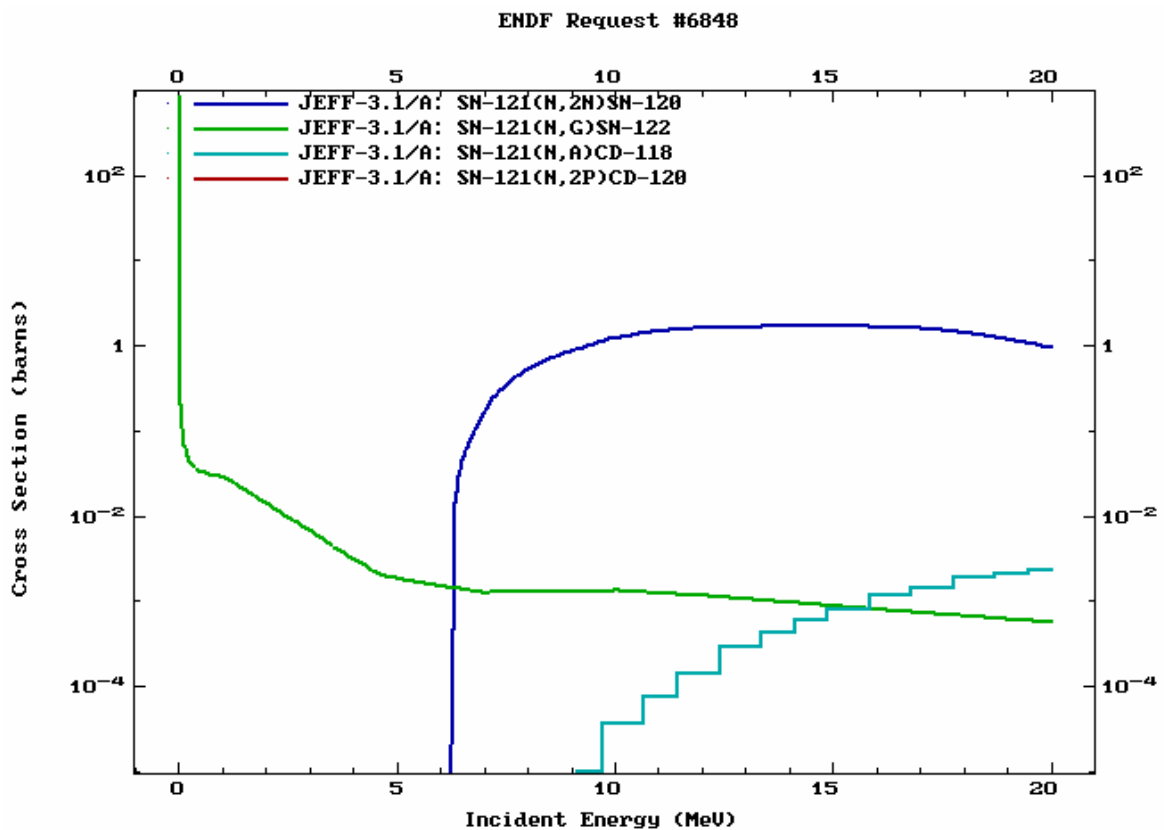


Рис. 23. Сечения в библиотеке JEFF-3.1/A.

50.13. Олово-121m

Период полураспада: (43.9 ± 0.3) года.

Моды распада: изомерный переход, 77.6%; β , 22.4%.

Спин изомерного состояния: $11/2^-$.

Единственный файл оценённых сечений имеющийся для ядра ^{121}Sn является файл из активационной библиотеки JEFF-3.1/A. Сечения приведённые в файле представлены на рисунке 24. В связи с отсутствием каких-либо других данных, файл JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД.

¹⁰ Сохранить в файле MF=9 только данные об образовании Sn-119m. Перенести сечение образования основного состояния из MF=3 в MF=10 – М.Николаев.

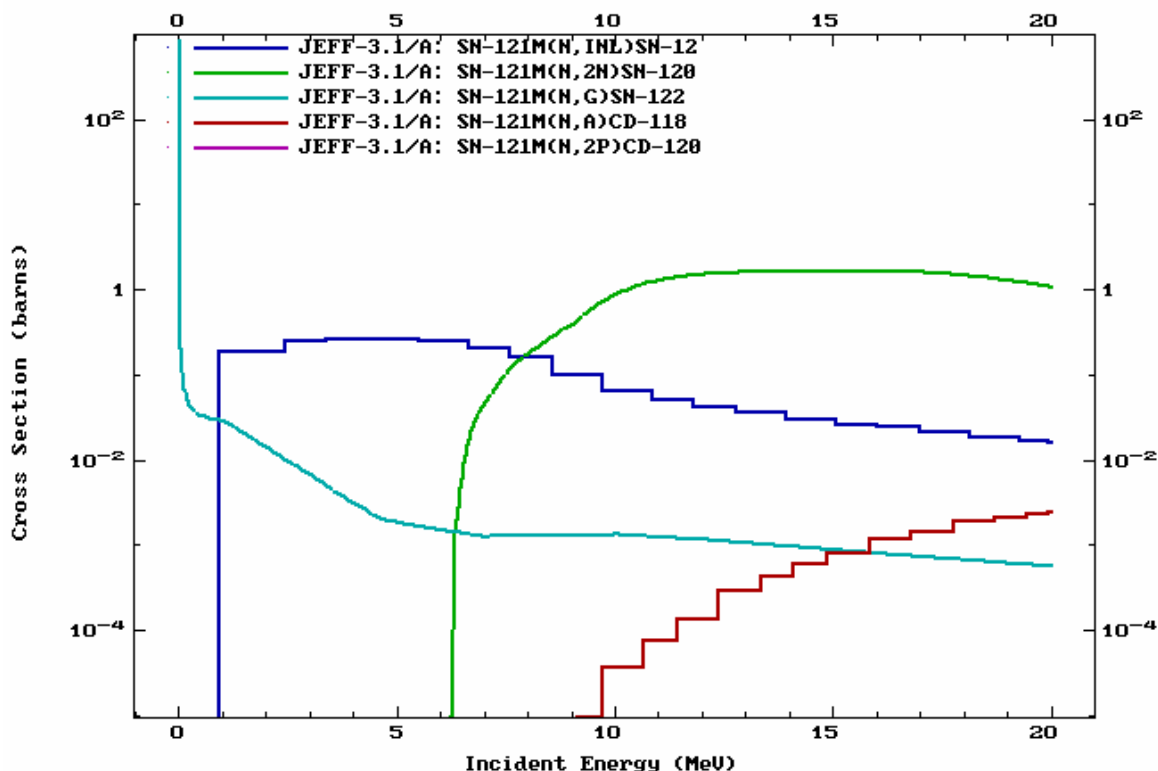


Рис. 24. Сечения в библиотеке JEFF-3.1/A.

50.14. Олово-122

Содержание в естественной смеси: $4.63 \pm 0.03\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Оценка ENDF/B-VII.b2 основывается на результатах новых измерений выполненных на ORELA Карлтоном и др. (X4=13148, 1995), поэтому резонансная область существенно расширена Мугхабгхабом (таблица 17). Значения в тепловой точке были также подвергнуты ревизии (таблица 18). Сравнение сечений в области разрешённых резонансов для библиотек ENDF/B-VII.b2 и JENDL-3.2 показано на рисунке 25. Учитывая, что оценка Мугхабгхаба (2006) включает анализ последних экспериментальных данных, файл из библиотеки ENDF/B-VII.b2 рекомендуется для библиотеки РОСФОНД¹¹.

Таблица 17. Характеристики области разрешённых резонансов. Число резонансов приведено только для 2-х последних оценок.

| Библиотека | Энергетический диапазон, формализм описания | Число резонансов |
|---------------|---|-----------------------|
| JENDL-3.2 | 10^{-5} эВ ~29 кэВ, MLBW | 5 s-рез., 23 p-рез. |
| JEF-2.2 | 10^{-5} эВ ~8.603903 кэВ, MLBW | |
| ENDF/B-VI | 10^{-5} эВ ~8.6039 кэВ, SLBW | |
| ENDF/B-VII.b2 | 10^{-5} эВ ~300 кэВ, MLBW | 68 s-рез., 287 p-рез. |

¹¹ Включить данные об образовании Sn-121m на основе EAF-2003. – М.Николаев.

Таблица 18. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата (T=300K).

| Библиотека | Полное (барн) | Упругое (барн) | Захват (барн) | Резонансный интеграл (барн) |
|------------------|---------------|----------------|---------------|-----------------------------|
| JENDL-3.2 | 3.99507E+00 | 3.81134E+00 | 1.83731E-01 | 8.85827E-01 |
| JEF-2.2 | 4.38384E+00 | 4.20279E+00 | 1.81032E-01 | 7.08441E-01 |
| ENDF/B-VI | 4.38065E+00 | 4.19941E+00 | 1.81032E-01 | 7.12665E-01 |
| Mughabghab(Mu03) | - | - | 0.139±0.015 | 0.81±0.04 |
| ENDF/B-VII.b2 | 4.5884 | 4.4424 | 0.1460 | 0.655 |

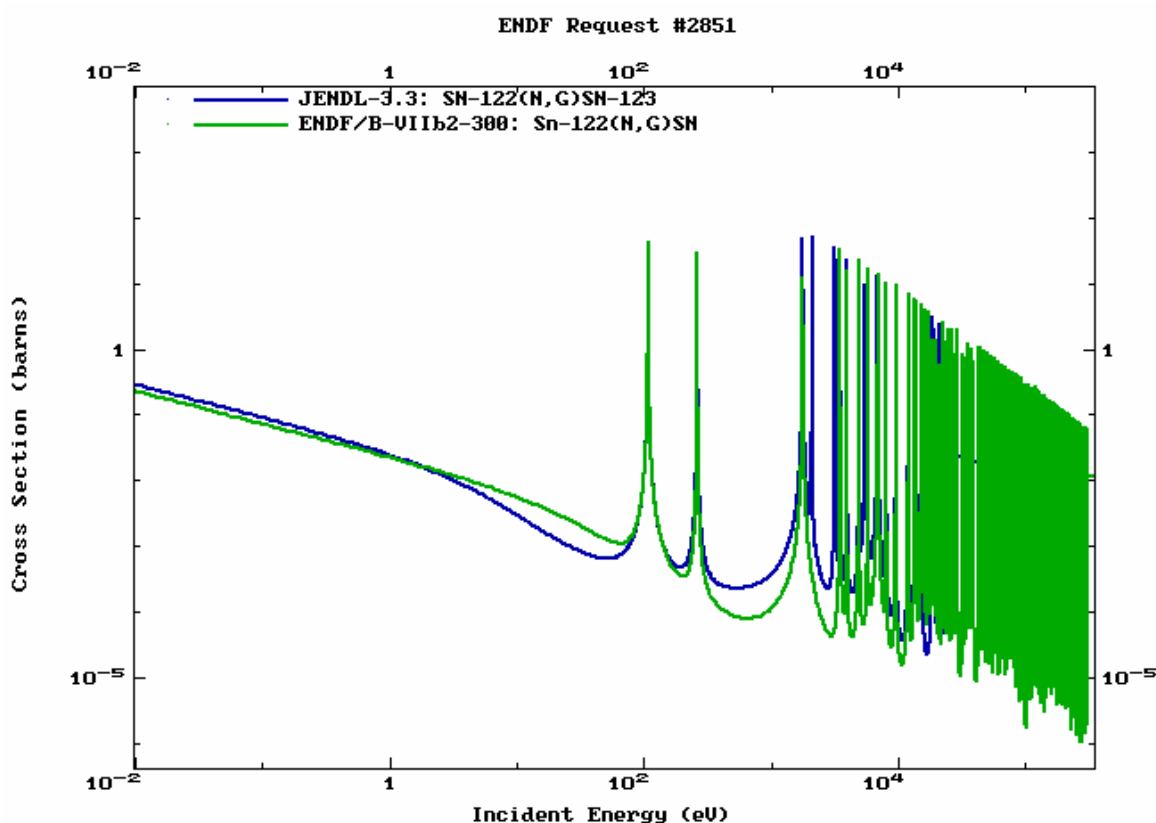


Рис. 25. Сравнение сечений захвата в резонансной области энергий.

50.15. Олово-123

Период полураспада: (129.2±0.4) дня.

Моды распада: β , 100%.

Спин основного состояния: 11/2⁻.

Экспериментальные данные для ядра ¹²³Sn отсутствуют. Последней оценкой выполненной в рамках модельных расчётов является оценка JENDL-3.2 которая после небольшой коррекции в соответствии с требованиями формата была включена в библиотеку ENDF/B-VII.b2. Сравнение сечений захвата из библиотеки ENDF/B-VI (=ENDF/B-V) и ENDF/B-VII.b2 (=JENDL-3.2) показано на рисунке 26. Так как модельные расчёты JENDL-3.2 основываются на современных значениях силовых функций и средних ширин, файл из

библиотеки ENDF/B-VII.b2, являющийся исправленной версией файла из JENDL-3.2, может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹².

ENDF Request #2858

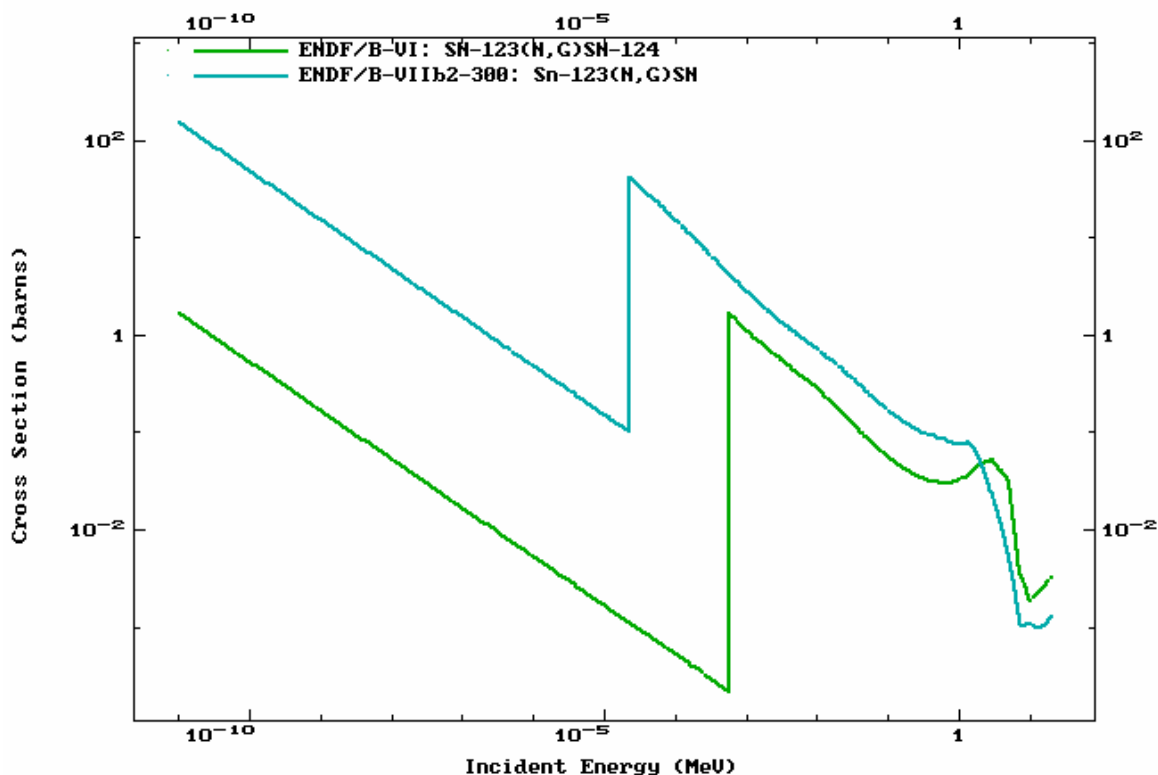


Рис. 26. Сравнение сечений захвата.

50.16. Олово-124

Содержание в естественной смеси: $5.79 \pm 0.05\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Оценка ENDF/B-VII.b2 существенно расширена в резонансной области за счёт результатов новых измерений выполненных на ORELA Карлтоном и др. (X4=13605, 1996), поэтому резонансная область существенно расширена Мугхабгхабом (таблица 19). Значения сечений в тепловой точке практически не изменились, в то время как сечение резонансного захвата несколько возросло (таблица 20). Сравнение сечений в области разрешённых резонансов для библиотек ENDF/B-VII.b2 и JENDL-3.2 показано на рисунке 26. Учитывая, что оценка Мугхабгхаба (2006) включает анализ последних экспериментальных данных, файл из библиотеки ENDF/B-VII.b2 рекомендуется для библиотеки РОСФОНД.

¹² Включить данные об образовании Sn-121m на основе EAF-2003. – М.Николаев.

Таблица 19. Характеристики области разрешённых резонансов. Число резонансов приведено только для 2-х последних оценок.

| Библиотека | Энергетический диапазон, формализм описания | Число резонансов |
|---------------|---|-----------------------|
| JENDL-3.2 | 10^{-5} эВ ~10.7 кэВ, MLBW | 1 s-рез., 9 p-рез. |
| JEF-2.2 | 10^{-5} эВ ~6.5067 кэВ, MLBW | |
| ENDF/B-VI | 10^{-5} эВ ~6.5067 кэВ, SLBW | |
| ENDF/B-VII.b2 | 10^{-5} эВ ~315 кэВ, MLBW | 35 s-рез., 156 p-рез. |

Таблица 20. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата (T=300K).

| Библиотека | Полное (барн) | Упругое (барн) | Захват (барн) | Резонансный интеграл (барн) |
|-------------------|---------------|----------------|---------------|-----------------------------|
| JENDL-3.2 | 4.55368E+00 | 4.41818E+00 | 1.35499E-01 | 7.82079E+00 |
| ENDF/B-VI | 4.59022E+00 | 4.46009E+00 | 1.29954E-01 | 7.05961E+00 |
| JEF-2.2 | 4.59028E+00 | 4.46031E+00 | 1.29954E-01 | 7.05968E+00 |
| Mughabghab (Mu03) | | | 0.134±0.005 | |
| ENDF/B-VII.b2 | 4.9195 | 4.7858 | 0.13372 | 8.03 |

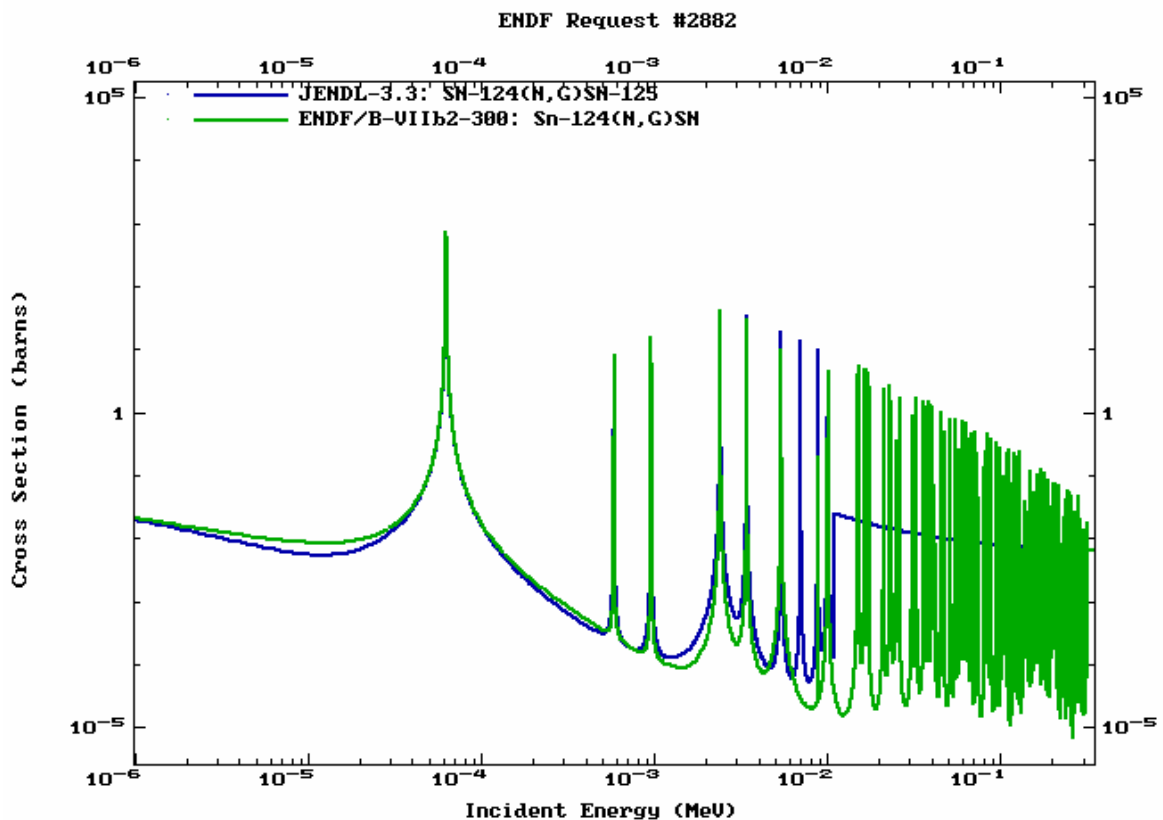


Рис. 27. Сравнение сечений захвата в резонансной области энергий.

50.17. Олово-125

Период полураспада: (9.64 ± 0.03) дня.

Моды распада: β , 100%.

Спин основного состояния: $11/2^-$.

Экспериментальные данные для ^{125}Sn отсутствуют. Последняя оценка для ^{125}Sn (ENDF/B-VII.b2) выполнена на основании модельных расчётов с учетом вклада различных механизмов реакций и использованием параметров оцененных из их анализа на соседних ядрах. В области разрешённых резонансов были введены фиктивные резонансы построенные исходя из систематик средних резонансных параметров для соседних ядер. На рисунке 28 приводится сравнение сечений радиационного захвата нейтронов для файлов библиотек ENDF/B-VII.b2 и ENDF/B-VI. Учитывая, что оценка ENDF/B-VII.b2 базируется на наиболее последовательном модельном описании сечений, файл из библиотеки ENDF/B-VII.b2 рекомендуется для библиотеки РОСФОНД.

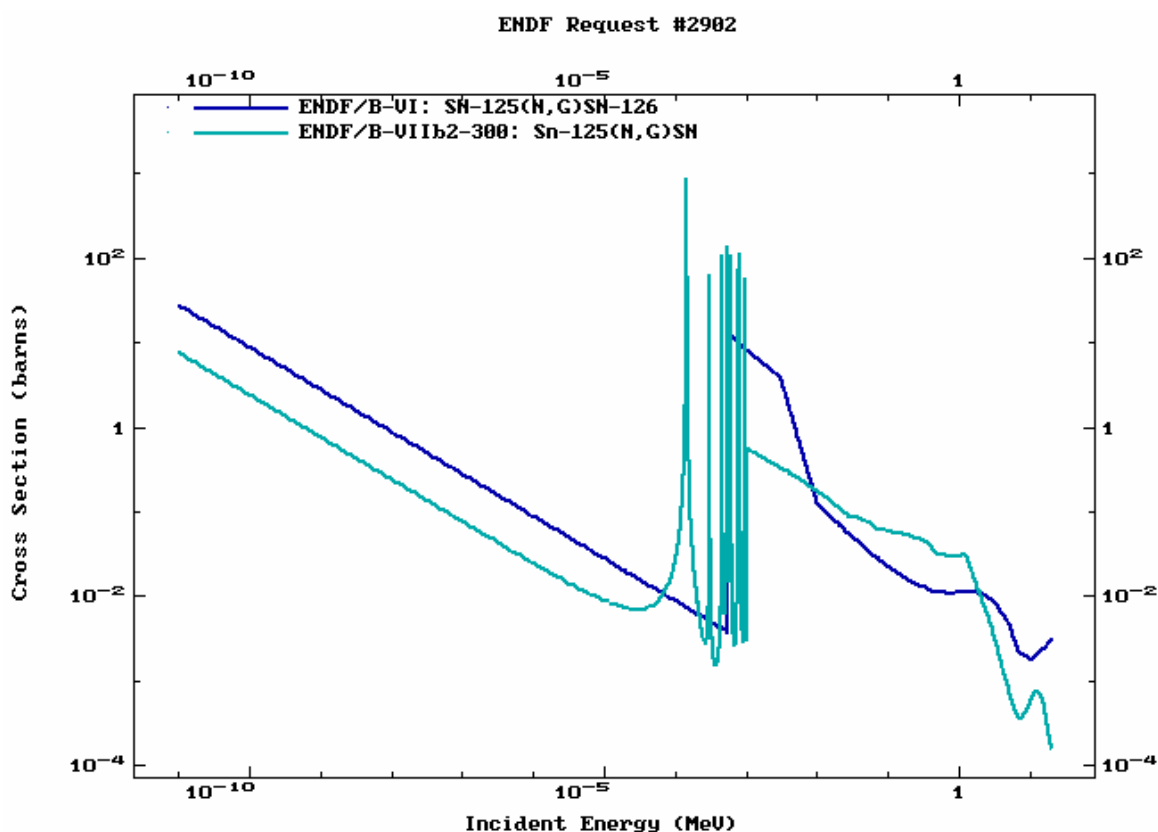


Рис. 28. Сравнение сечений радиационного захвата.

50.18. Олово-126

Период полураспада: $(2.30 \pm 0.14) \cdot 10^5$ лет.

Моды распада: β , 100%.

Спин основного состояния: 0^+ .

Экспериментальные данные по нейтронным сечениям для ^{126}Sn отсутствуют. Существуют две независимые оценки для ^{126}Sn , обе полученные в рамках модельных расчётов: оценка ENDF/B-V 1980 года, которая с незначительными изменениями и дополнениями была включена в ENDF/B-VI и JEFF-3.1, и оценка JENDL-3.2, которая была принята с небольшими поправками в формате в библиотеку ENDF/B-VII.b2. Сравнение сечения захвата из этих двух библиотек приведено на рисунке 29. Степень достоверности сечения для энергий нейтронов ниже нескольких кэВ мала в обеих библиотеках. Тем не менее учитывая, что оценка ENDF/B-VII.b2 (JENDL-3.2) опирается на систематику силовых функций и ширин учитывающую более поздние данные, файл из библиотеки ENDF/B-VII.b2 рекомендуется для библиотеки РОСФОНД.

Данные
для

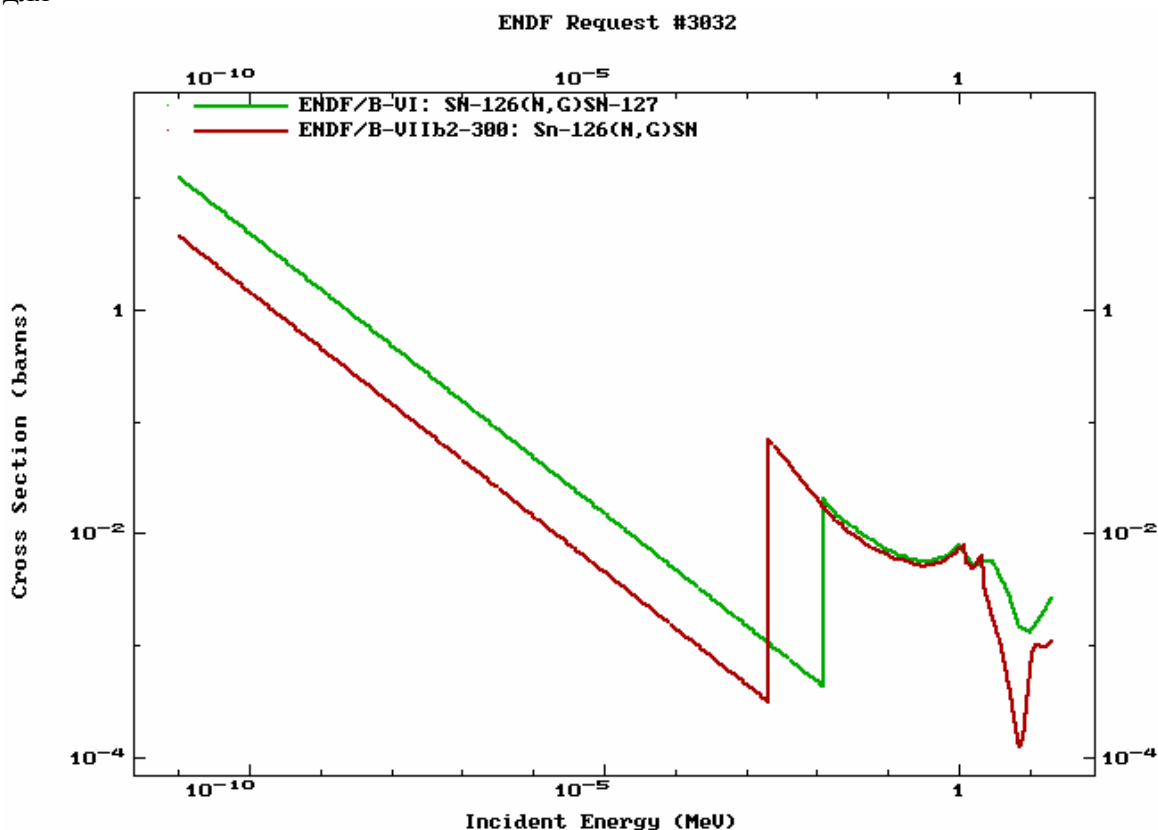


Рис. 29. Сравнение сечений радиационного захвата.

Литература

1. <http://www.nndc.bnl.gov/sg23/> (2006) и ссылки на этой странице.
2. S.F. Mughabghab, Atlas of Neutron Resonances, Elsevier Science (2006).

Общее заключение для изотопов олова

На основании вышеизложенного рекомендуется:

1. Для стабильных изотопов олова- ^{112}Sn , ^{114}Sn , ^{115}Sn , ^{116}Sn , ^{117}Sn , ^{118}Sn , ^{119}Sn , ^{120}Sn , ^{122}Sn , ^{124}Sn – принять в РОСФОНД файлы оцененных данных из ENDF/B-VII,

¹³ С учетом коррекции нейтроны ширин р-резонансов, сделанной в мае 2006 г.

содержащие последние рекомендации международной рабочей группы и уточненные Мухабхабом резонансные параметры. Файлы данных для изотопов с подчеркнутыми символами пополнить вероятностями образования долгоживущих изомеров, получив которые из данных файлов MF=10 для соответствующих изотопов из библиотеки EAF-2003.

2. Для радионуклидов ^{113}Sn , ^{123}Sn , ^{125}Sn , ^{126}Sn также принять файлы оцененных данных из ENDF/B-VIIb2.
3. Для ^{121}Sn , для которого данных в библиотеках общего назначения не содержится, а также для долгоживущих изомеров олова - $^{117}\text{Sn}^m$, $^{119}\text{Sn}^m$, $^{121}\text{Sn}^m$ включить в РОСФОНД данные из библиотеки EAF-2003 (=JEFF-3.1/A), сложив парциальные сечения реакций, приведенные в файле MF=10 и включив полученные суммы в виде дополнительных секций файла MF=3; данные об образовании долгоживущих изомеров представить в виде вероятностей в файлах MF=9, оставив в файлах MF=10 только сечения образования изомеров ядра-мишени.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

51. Сурьма

Рассмотрение состояния дел по нейтронным данным для всех изотопов сурьмы выполнено В.Г.Проняевым. Им же выданы рекомендации о включении файлов оцененных данных в РОСФОНД. Подстрочные примечания о необходимости введения данных о вероятностях образования долгоживущих изомеров сделаны М.Н.Николаевым.

51.1. Сурьма-119

В реакторах может образоваться за счет реакции $^{121}\text{Sb}(n,3n)$ или цепочки из двух реакций $(n,2n)$ через долгоживущий изомер $^{120}\text{Sb}^m$.
Период полураспада: (38.19 ± 0.22) дней.

Моды распада: e^- 100%.

Спин основного состояния: $5/2^+$.

Файлы

JEFF-3.1/A= EAF-2003 – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки, основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3. Другие файлы представляют библиотеки данных по распаду и не содержат оценок нейтронных сечений.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{119}Sb из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 1. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

Файл ^{119}Sb из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹.

¹ Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Вести файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{120}\text{Sb}^m$, $^{119}\text{Sn}^m$, $^{117}\text{Sn}^m$, используя данные из файла MF=10. Файл MF=10 исключить. – М.Н.

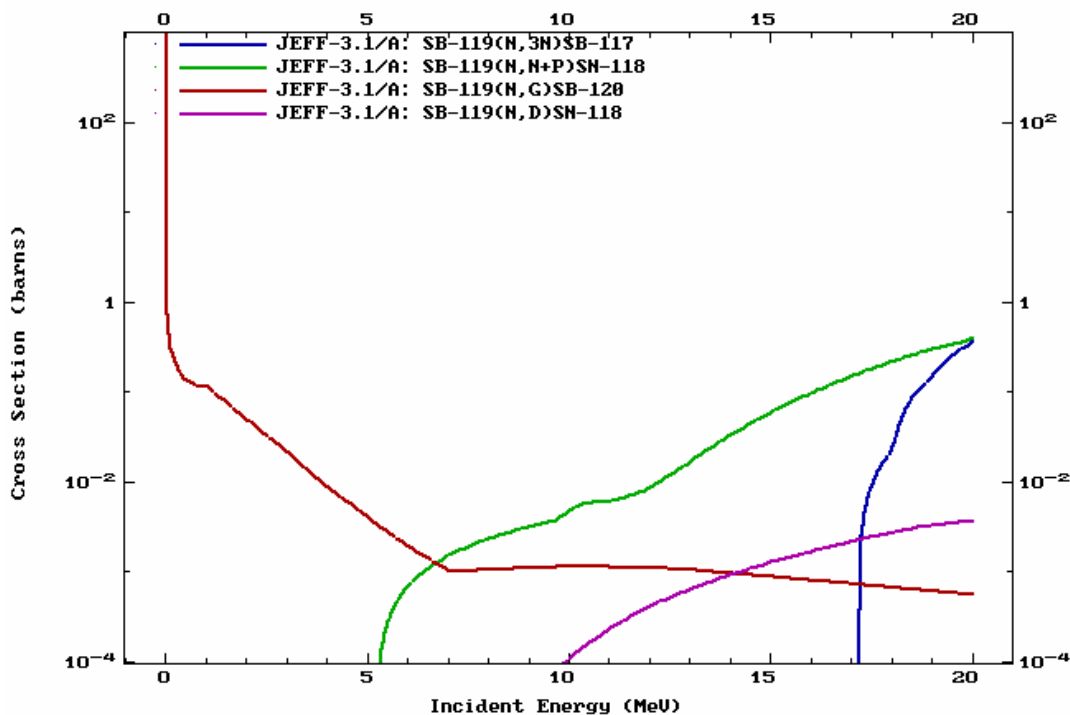


Рис. 1. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

51.2. Сурьма-120m

Долгоживущий изомер. В реакторах может образоваться за счет реакции $^{121}\text{Sb}(n,2n)$,
Период полураспада: 5.76 дн.

Моды распада: e^- 100%.

Спин основного состояния: 8^- .

Файлы

JEFF-3.1/A= EAF-2003 – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки, основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3. Другие файлы представляют библиотеки данных по распаду и не содержат оценок нейтронных сечений.

Данные

Экспериментальные данные отсутствуют. Оцененные сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

Файл $^{120}\text{Sb}^m$ из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД².

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

51.3. Сурьма-121

В ядерном топливе образуется как продукт деления.

Анализ данных подготовлен на основе заключения подгруппы 21 международной группы по оценке сечений (К. Шибата, 2003, <http://www.nndc.bnl.gov/sg21/rev/sb121.doc>).

Содержание в естественной смеси: $0.5721 \pm 0.0005\%$.

Спин основного состояния: $5/2^+$.

Файлы

CENDL-3: оценка 1997 года;

ENDF/B-VI: оценка 2000 года;

JEFF-2.2: оценка 1982 года с данными для сечения производства заряженных частиц взятыми из библиотеки REAC-ECN-4 и другими данными взятыми из библиотеки ENDF/B-V;

JENDL-3.2: оценка 1994 года;

JENDL-3.3: оценка взята из JENDL-3.2;

JEFF-3.0 оценка взята из JENDL-3.2;

ENDF/B-VIIb2: оценка в области разрешённых резонансов выполнена на основе Атласа-2006 (С. Мухабхаб), оценка в области быстрых нейтронов взята из CENDL-3.

Тепловая и резонансная область

CENDL-3: Область разрешённых и неразрешённых резонансов (MF1) взята из библиотеки JENDL-3.2.

ENDF/B-VI: область разрешённых резонансов расположена ниже 2.5261 кэВ и область неразрешённых резонансов – от 2.5261 до 37.4399 кэВ. Параметры оценены Мухабхабом в 1999 году.

JEFF-2.2: разрешённые резонансные параметры взяты из BNL-325 (1981) до энергии в 0.92223 кэВ; область неразрешённых резонансов отсутствует.

JENDL-3.2: область разрешённых резонансов ниже 2 кэВ, а неразрешённая резонансная область от 2 до 100 кэВ.

ENDF/B-VIIb2: оценка Мухабхаба (Атлас-2006) в области разрешённых резонансов (до 5.4 кэВ), оценка JENDL-3.2 в области неразрешённых резонансов (5.4 – 100 кэВ). Статистический анализ распределений резонансов и их ширин показывает небольшой

² Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Вести файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера $^{119}\text{Sn}^m$, используя данные из файла MF=10. Файл MF=10 исключить. – М.Н.

пропуск s- резонансов и более заметный пропуск p- резонансов имеющих малую нейтронную ширину.

Сравнение тепловых сечений и резонансных интегралов захвата показано в таблице 1.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл (барн, 300К).

| Библиотека | Полное | Упругое | Захват | Резонансный интеграл захвата |
|--------------|--------|---------|-----------|------------------------------|
| JENDL-3.2 | 9.5999 | 3.6056 | 5.9943 | 213.61 |
| ENDF/B-VI | 9.7271 | 3.8246 | 5.9025 | 205.39 |
| JEF-2.2 | 9.6942 | 3.7785 | 5.9157 | 206.24 |
| CENDL-3 | 9.5999 | 3.6056 | 5.9943 | 213.61 |
| BNL-325 | | | 5.9±0.2 | 200±20 |
| ENDF/B-VIIb2 | 9.7964 | 4.0258 | 5.7706 | 206 |
| Atlas-2006 | | | 5.77±0.11 | 202±20 |

Оценка ENDF/B-VIIb2 является наилучшей в области разрешённых резонансов и рекомендуется для включения в РОСФОНД.

Область быстрых нейтронов

CENDL-3: оценка основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Прямые процессы для неупругого нейтронов оценивались в приближении DWBA. Оценки сечения (n,2n) и захвата основаны на имеющихся экспериментальных данных. Сечение упругого рассеяния получено как разность между полным сечением и суммой сечений всех других реакций.

ENDF/B-VI: оценка основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Сечение захвата оценено на основе имеющихся экспериментальных данных. Для оценки вклада прямых процессов в неупругое рассеяние нейтронов использовался метод сильной связи каналов. Параметры оптической модели определялись из описания угловых распределений упругого рассеяния и полного сечения на природной сурьме. Сечения приведены до энергии 30 МэВ.

JEF-2.2: основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Более детальная информация отсутствует.

JENDL-3.2: основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Прямые процессы для неупругого нейтронов оценивались в приближении DWBA. Вклад прямых-полупрямых процессов в сечение захвата оценивался в рамках феноменологической модели. Сечение упругого рассеяния получено как разность между полным сечением и суммой сечений всех других реакций.

На рисунке 2 показаны результаты оценки полного сечения из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными для естественной сурьмы. Наилучшее согласие наблюдается для библиотеки JENDL-3.3 (JENDL-3.2).

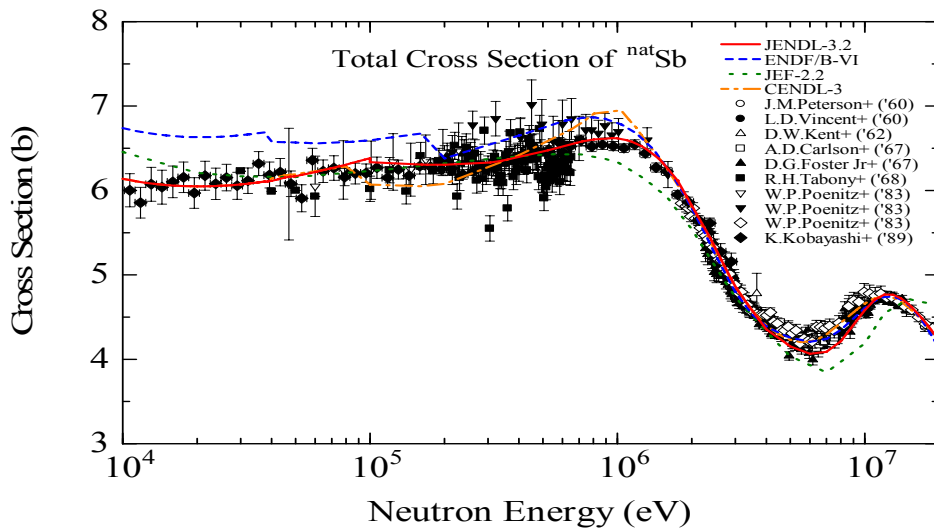


Рис. 2. Полные сечения для ^{121}Sb из разных библиотек в сравнении с экспериментальными данными для естественной сурьмы.

Сравнение сечения упругого рассеяния для ^{121}Sb из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными на естественной сурьме показано на рисунке 3. Оценка ENDF/B-VI как для полного, так и для упругого сечений проходит выше экспериментальных данных при энергии ниже одного МэВ, которые, вероятно, содержат трудноотделимый вклад от неупругого рассеяния нейтронов с возбуждением на первом уровне.

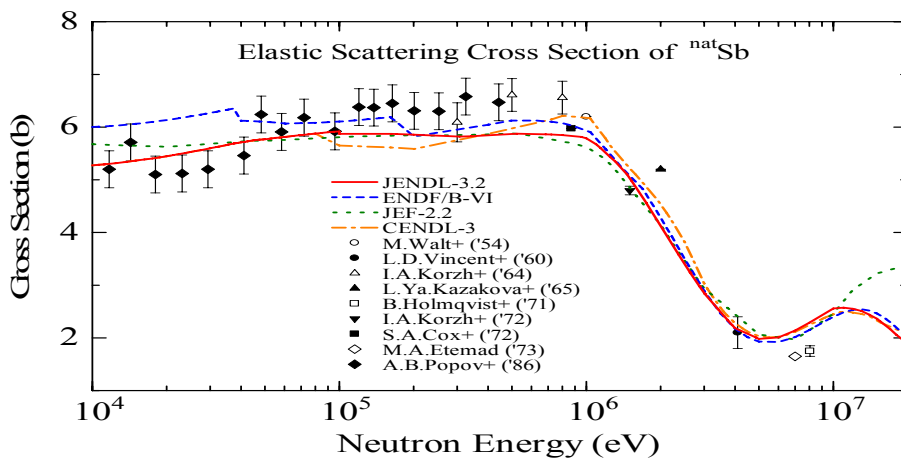


Рис. 3. Сечение упругого рассеяния для ^{123}Sb из разных библиотек в сравнении с экспериментальными данными для естественной сурьмы.

На рисунке 4 показано сравнение сечения захвата для ^{121}Sb из разных библиотек с экспериментальными данными имеющимися для этого изотопа. Как видно, ENDF/B-VIIb2 (CENDL-3) лучше всего описывает сечение.

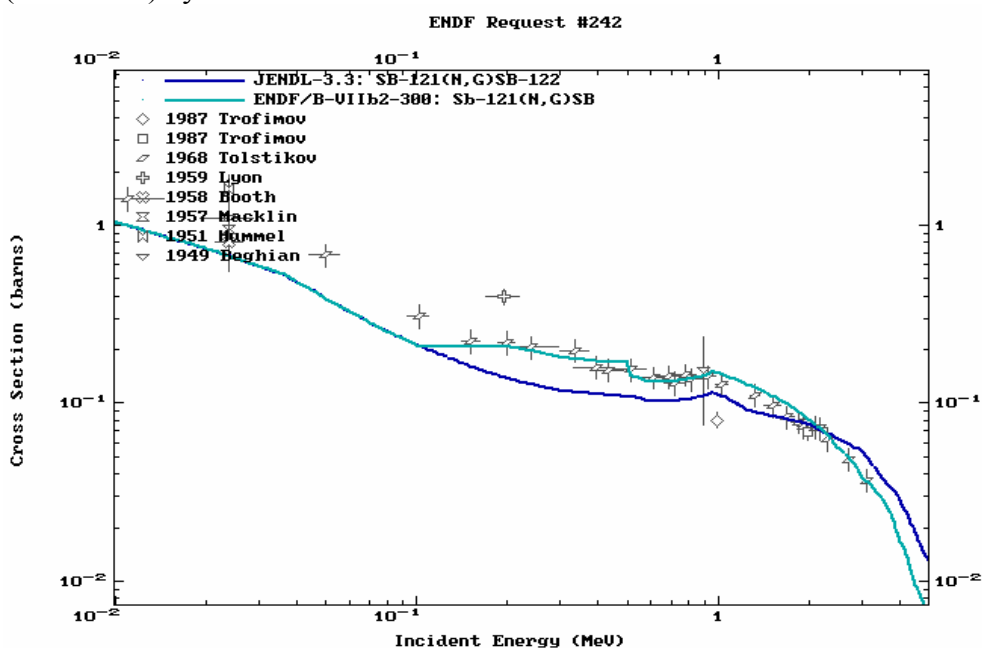


Рис. 4. Сечение захвата для ^{121}Sb из разных библиотек в сравнении с экспериментальными данными.

В оценке библиотеки CENDL-3 энерго-угловые распределения вторичных частиц представлены наиболее детально. Учитывая всё это, а также появление новой оценки Мухабхаба для резонансных параметров принятой в ENDF/B-VIIb2, можно рекомендовать файл из библиотеки ENDF/B-VIIb2 для библиотеки РОСФОНД³. Этот файл содержит средние резонансные параметры для области неразрешённых резонансов из библиотеки JENDL-3.3 (JENDL-3.2) и сечения в быстрой области включая энерго-угловые распределения вторичных частиц из библиотеки CENDL-3.

Автор рекомендации
Проняев В.Г.

³ Вести файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{119}\text{Sn}^m$, $^{120}\text{Sb}^m$, $^{121}\text{Sn}^m$, используя данные из файла MF=10 из библиотеки EAF-2003. – М.Н.

51.4. Сурьма-122

В ядерном топливе образуется, главным образом, в результате захвата нейтронов в олове-121. Непосредственный выход при делении ничтожно мал ($\sim 10^{-9}$).

Период полураспада: (2.7238 ± 0.0002) дней.

Моды распада: e^- 2.41%; β 97.59%.

Спин основного состояния: 2^- .

Файлы

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3. Другие файлы представляют библиотеки данных по распаду и не содержат оценок нейтронных сечений.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{122}Sb из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 5. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

Файл ^{122}Sb из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁴.

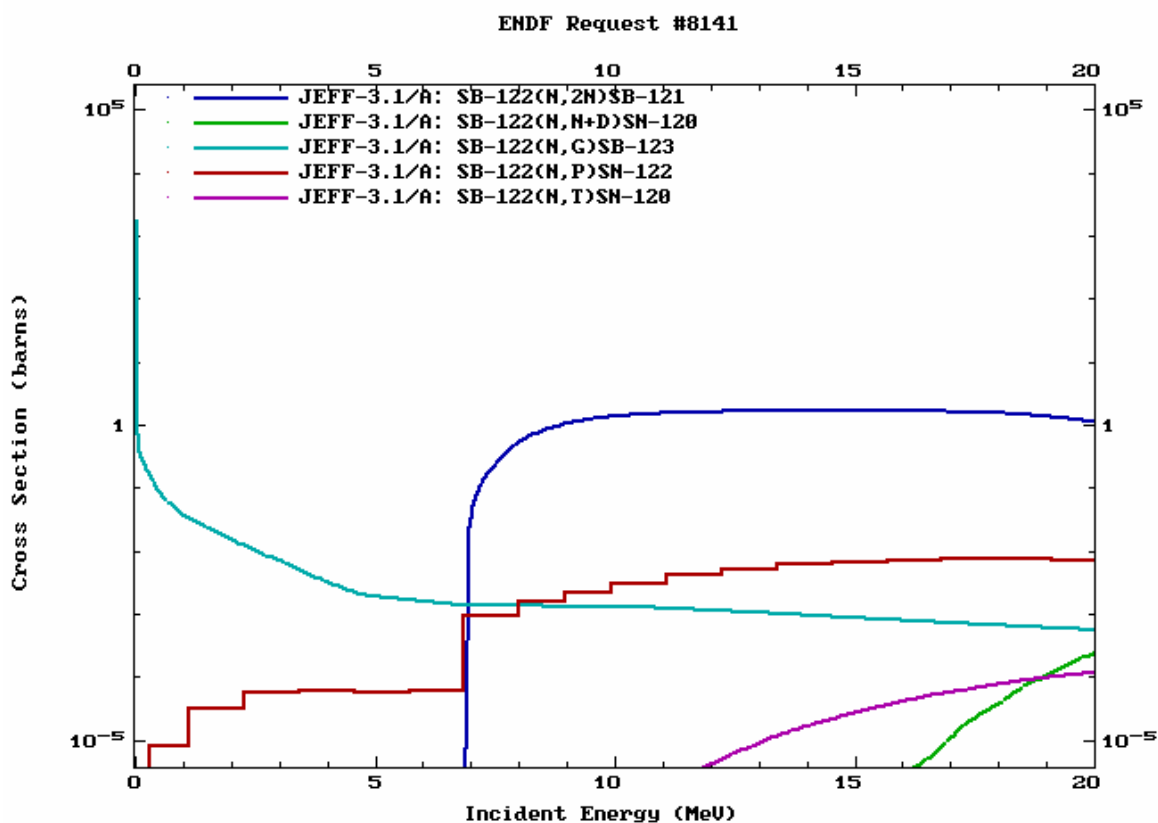


Рис. 5. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A.

⁴ Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Вести файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{120}\text{Sb}^m$ и $^{121}\text{Sn}^m$, используя данные из файла MF=10. Файл MF=10 исключить. – М.Н.

51.5. Сурьма-123

В ядерном топливе образуется как продукт деления.

Анализ данных подготовлен на основе заключения подгруппы 21 международной группы по оценке сечений (К. Шибата, 2003, <http://www.nndc.bnl.gov/sg21/rev/sb123.doc>).

Содержание в естественной смеси: $0.4279 \pm 0.0005\%$.

Спин основного состояния: $7/2^+$.

Файлы

CENDL-3: оценка 1999 года;

ENDF/B-VI: оценка 2000 года;

JEF-2.2: оценка 1982 года с данными для сечения производства заряженных частиц взятыми из библиотеки REAC-ECN-4 и другими данными взятыми из библиотеки ENDF/B-V;

JENDL-3.2: оценка 1994 года;

JENDL-3.3: оценка взята из JENDL-3.2;

JEFF-3.0 оценка взята из JENDL-3.2;

ENDF/B-VIIb2: оценка в области разрешённых резонансов выполнена на основе Атласа-2006 (С. Мухабхаб), оценка в области быстрых нейтронов взята из CENDL-3.

Тепловая и резонансная область

CENDL-3: Область разрешённых и неразрешённых резонансов (MF1) взята из библиотеки JENDL-3.2, при этом была допущена ошибка в знаке для энергии первого связанного состояния (+17 эВ вместо -17 эВ).

ENDF/B-VI: область разрешённых резонансов расположена ниже 2.479 кэВ и область неразрешённых резонансов – от 2.479 до 161 кэВ. Параметры оценены Мухабхабом в 1999 году.

JEF-2.2: разрешённые резонансные параметры взяты из BNL-325 (1981) до энергии в 1.5096 кэВ, область неразрешённых резонансов отсутствует.

JENDL-3.2: область разрешённых резонансов ниже 2.5 кэВ, а область неразрешённых резонансов от 2.5 до 100 кэВ.

ENDF/B-VIIb2: оценка Мухабхаба (Атлас-2006) в области разрешённых резонансов; оценка JENDL-3.2 в области неразрешённых резонансов. Статистический анализ распределений резонансов и их ширин не показывает существенного отклонения от предсказаний статистических моделей.

Сравнение тепловых сечений и резонансных интегралов захвата показано в таблице 2.

Таблица 2. Тепловые сечения и резонансный интеграл (барн, 300К).

| Библиотека | Полное | Упругое | Захват | Резонансный интеграл захвата |
|------------|--------|---------|--------|------------------------------|
| JENDL-3.2 | 8.1031 | 3.9149 | 4.1881 | 122 |
| ENDF/B-VI | 8.1217 | 4.0245 | 4.0973 | 127 |
| JEF-2.2 | 8.1220 | 3.7939 | 4.3280 | 127 |

| | | | | |
|--------------|--------|--------|---------|--------|
| CENDL-3 | 7.7074 | 3.5091 | 4.1983 | 186 |
| ENDF/B-VIIb2 | 7.5523 | 3.6784 | 3.8739 | 128 |
| BNL-325 | | | 4.2±0.1 | 125±20 |
| Atlas-2006 | 7.5523 | | | 126±20 |

Оценка ENDF/B-VIIb2 является наилучшей в области разрешённых резонансов.

Область быстрых нейтронов

CENDL-3: основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Прямые процессы для неупругого нейтронов оценивались в приближении DWBA. Оценки сечения (n,2n) и захвата основаны на имеющихся экспериментальных данных. Сечение упругого рассеяния получено как разность между полным сечением и суммой сечений всех других реакций.

ENDF/B-VI: основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Сечение захвата оценено на основе имеющихся экспериментальных данных. Метод сильной связи каналов использовался для оценки вклада прямых процессов в неупругое рассеяние нейтронов. Параметры оптической модели определялись из описания угловых распределений упругого рассеяния и полного сечения на природной сурьме. Сечения приведены до энергии 30 МэВ.

JEF-2.2: основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Детальная информация отсутствует.

JENDL-3.2: основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Прямые процессы для неупругого нейтронов оценивались в приближении DWBA. Вклад прямых-полупрямых процессов в сечение захвата оценивался в рамках феноменологической модели. Сечение упругого рассеяния получено как разность между полным сечением и суммой сечений всех других реакций.

На рисунке 6 показаны результаты оценки полного сечения из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными для естественной сурьмы. Наилучшее согласие наблюдается для библиотеки JENDL-3.3 (JENDL-3.2).

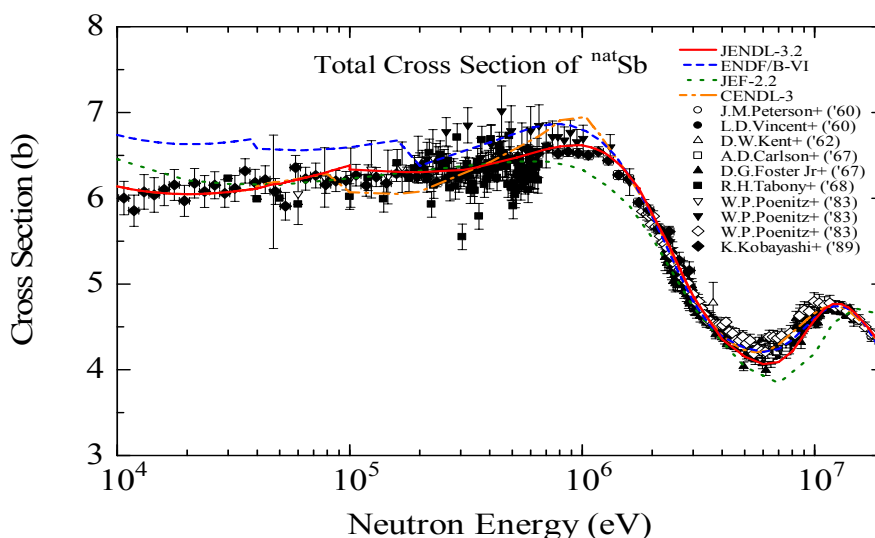


Рис. 6. Полные сечения для ^{123}Sb из разных библиотек в сравнении с экспериментальными данными для естественной сурьмы.

Сравнение сечения упругого рассеяния для ^{123}Sb из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными на естественной сурьме показано на рисунке 7. Оценка ENDF/B-VI как для полного, так и для упругого сечений проходит выше экспериментальных данных при энергии ниже одного МэВ, которые вероятно содержат трудноотделимый вклад от неупругого рассеяния нейтронов с возбуждением на первом низколежащем уровне.

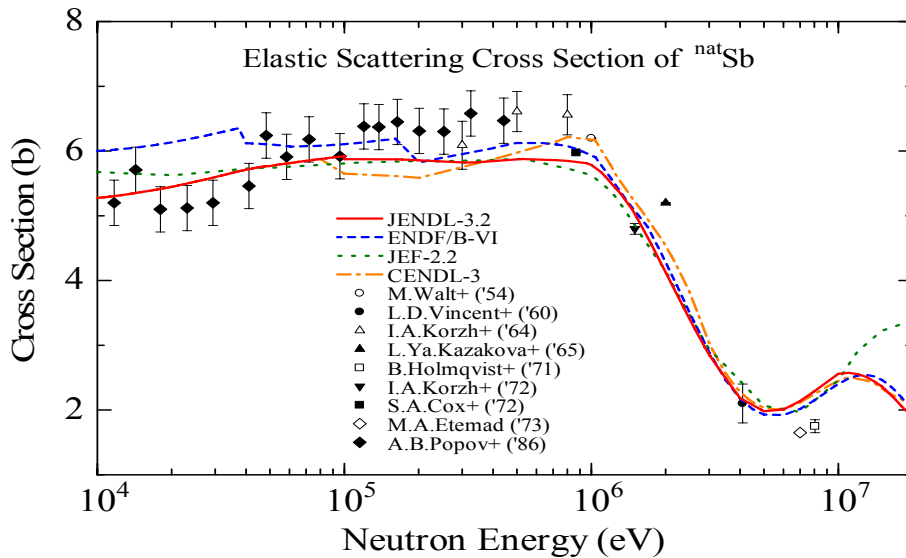


Рис. 7. Сечение упругого рассеяния для ^{123}Sb из разных библиотек в сравнении с экспериментальными данными для естественной сурьмы.

На рисунке 8 показано сравнение оценённых и экспериментальных данных для сечения захвата на ^{123}Sb , а на рисунке 9 показано сравнение сечения захвата для естественной смеси изотопов сурьмы из разных библиотек с экспериментальными данными, имеющимися в большем количестве для естественной смеси. В целом, наблюдается как хорошее согласие между результатами из разных библиотек, так и между результатами измерений на стабильных изотопах и естественной смеси.

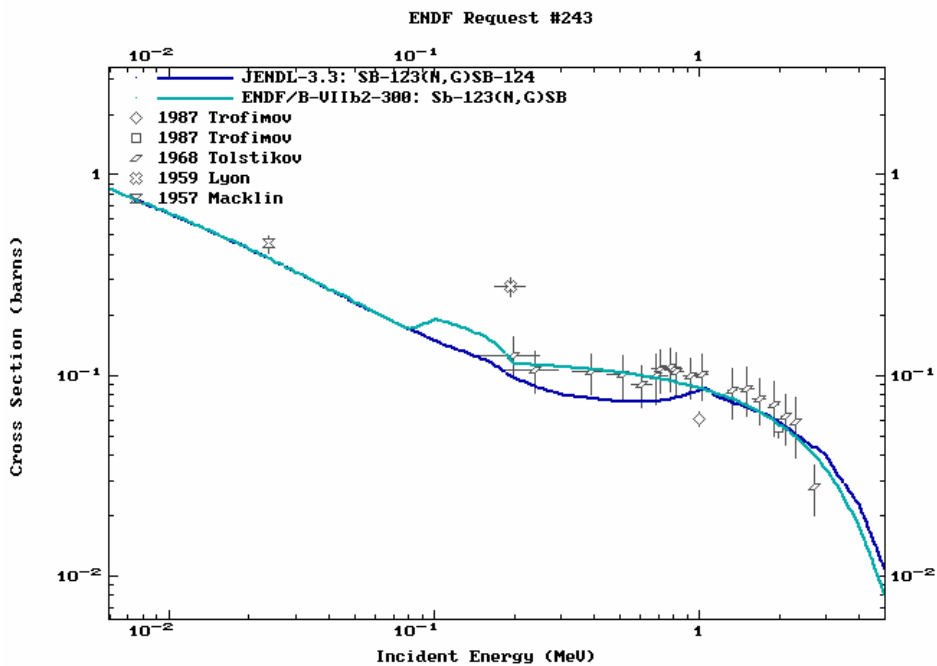


Рис. 8. Сечение захвата для ^{121}Sb из разных библиотек в сравнении с экспериментальными данными.

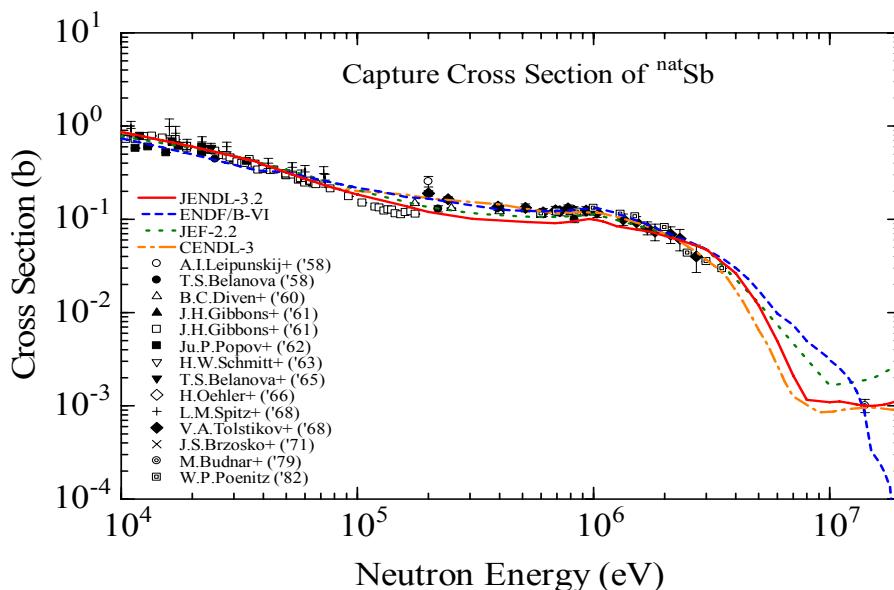


Рис. 9. Сечение захвата для $^{\text{nat}}\text{Sb}$ из разных библиотек в сравнении с экспериментальными данными для естественной сурьмы.

В оценке библиотеки CENDL-3 энерго-угловые распределения вторичных частиц представлены наиболее детально. Учитывая всё это, а также появление новой оценки Мухабхаба для резонансных параметров принятой в ENDF/B-VIIb2, можно рекомендовать файл из библиотеки ENDF/B-VIIb2 для библиотеки РОСФОНД. Этот файл содержит средние резонансные параметры для области неразрешённых резонансов из библиотеки JENDL-3.3 (JENDL-3.2) и сечения в быстрой области, включая энерго-угловые распределения вторичных частиц, из библиотеки CENDL-3⁵.

⁵ Вести файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера $^{123}\text{Sn}^{\text{m}}$, используя данные из файла MF=10 из библиотеки EAF-2003. – М.Н.

51.6. Сурьма-124

В ядерном топливе образуется, главным образом, за счет захвата нейтронов в олове-123. Непосредственный выход при делении мал ($\sim 10^{-6}$).
Период полураспада: (60.20 ± 0.03) дней.

Мода распада: β 100%.
Спин основного состояния: 3^- .

Файлы

ENDF/B-VI (JEF-2) - оценка взята из ENDF/B-IV.
ENDF/B-VIIb2 (JENDL-3.3) – оценка взята из JENDL-3.2.
Детальное сравнение оценок приведено в http://www.nndc.bnl.gov/sg21/rev/rev_list.htm.

Данные

Экспериментальные данные отсутствуют.
Подгруппа 21 рабочей группы по оценке сечений рекомендовала (2003) файл из библиотеки JENDL-3.2, поправленная версия которого (ENDF/B-VIIb2) и может быть включена в библиотеку РОСФОНД.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

51.7. Сурьма-125

В ядерном топливе образуется как продукт деления.
Период полураспада: (2.75856 ± 0.00025) дней.
Мода распада: β 100%.
Спин основного состояния: $7/2^+$.

Файлы

ENDF/B-VI (JEF-2) - оценка взята из ENDF/B-IV.
ENDF/B-VIIb2 (JENDL-3.3) – оценка взята из JENDL-3.2.
CENDL-3 – новая оценка для быстрых нейтронов (>100 кэВ), оценка для резонансной области взята из JENDL-3.2.

Детальное сравнение оценок приведено в <http://www.nndc.bnl.gov/sg21/rev/sb125.htm>.

Данные

Экспериментальные данные отсутствуют.
Подгруппа 21 рабочей группы по оценке сечений рекомендовала (2003) файл из библиотеки JENDL-3.2, поправленная версия которого (ENDF/B-VIIb2) и может быть включена в библиотеку РОСФОНД.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

51.8. Сурьма-126

В ядерном топливе присутствует как продукт деления.

Период полураспада: (12.48 ± 0.03) дней.

Мода распада: β 100%.

Спин основного состояния: 8^- .

Файлы

ENDF/B-VI (JEF-2) - оценка взята из ENDF/B-IV.

ENDF/B-VIIIb2 – новая оценка выполнена в 2006 году в NNDC/BNL в быстрой области с помощью программы EMPIRE и в резонансной области через обоснованные предположения о величине сечений в тепловой точке и генерации псевдо-резонансов в резонансной области. Параметры этих резонансов приняты такими же, как для сурьмы-121. Предположено из ядерно-статистических соображений, что средние резонансные параметры сурьмы-126 должны быть близки к таковым для сурьмы-121. Сечение захвата тепловых нейтронов принято равным 13 барнам и чтобы получить это значение подобраны параметры связанного состояния.

Данные

Экспериментальные данные отсутствуют. На рисунке 10 показаны полное сечение, сечение упругого и неупругого рассеяния и сечение захвата из библиотеки ENDF/B-VIIIb2, полученные в результате научно-обоснованной оценки. Этот файл может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁶.

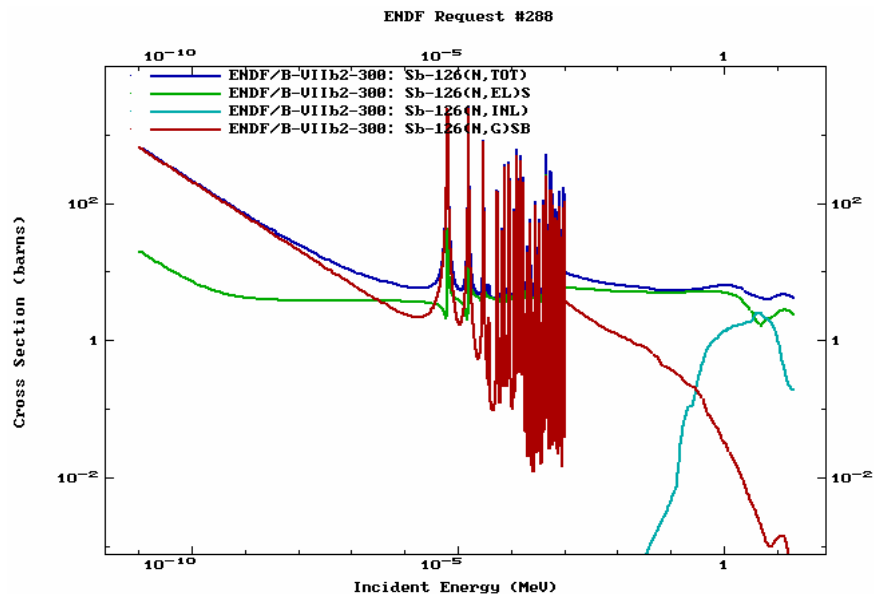


Рис. 10. Основные сечения в файле ¹²⁶Sb из библиотеки ENDF/B-VIIIb2.

⁶ Любопытно, что для сурьмы-126, не обладающей ни значительным выходом при делении (при делении ²³⁵U он составляет примерно 0.03%), ни высоким сечением поглощения или какими-либо еще необычными нейтронно-физическими свойствами, составлен файл данных более полный, чем для стабильных изотопов сурьмы, обладающих к тому же и большими выходами при делении (¹²¹Sb -0.13%; ¹²¹Sb -0.15%). В набор оцененных данных включены не только коррелированные энерго-угловые распределения (файл MF=6), но и данные об образовании фотонов в результате нейтронных реакций, которые не приводятся даже для стабильных изотопов. – М.Н.;

51.9. Сурьма-127

В ядерном топливе может присутствовать как продукт деления.

Период полураспада: (3.85 ± 0.05) дней.

Мода распада: β 100%.

Спин основного состояния: $7/2^+$.

Файлы

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3. Другие файлы представляют библиотеки данных по распаду и не содержат оценок нейтронных сечений.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{127}Sb из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 11. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

Файл ^{127}Sb из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁷.

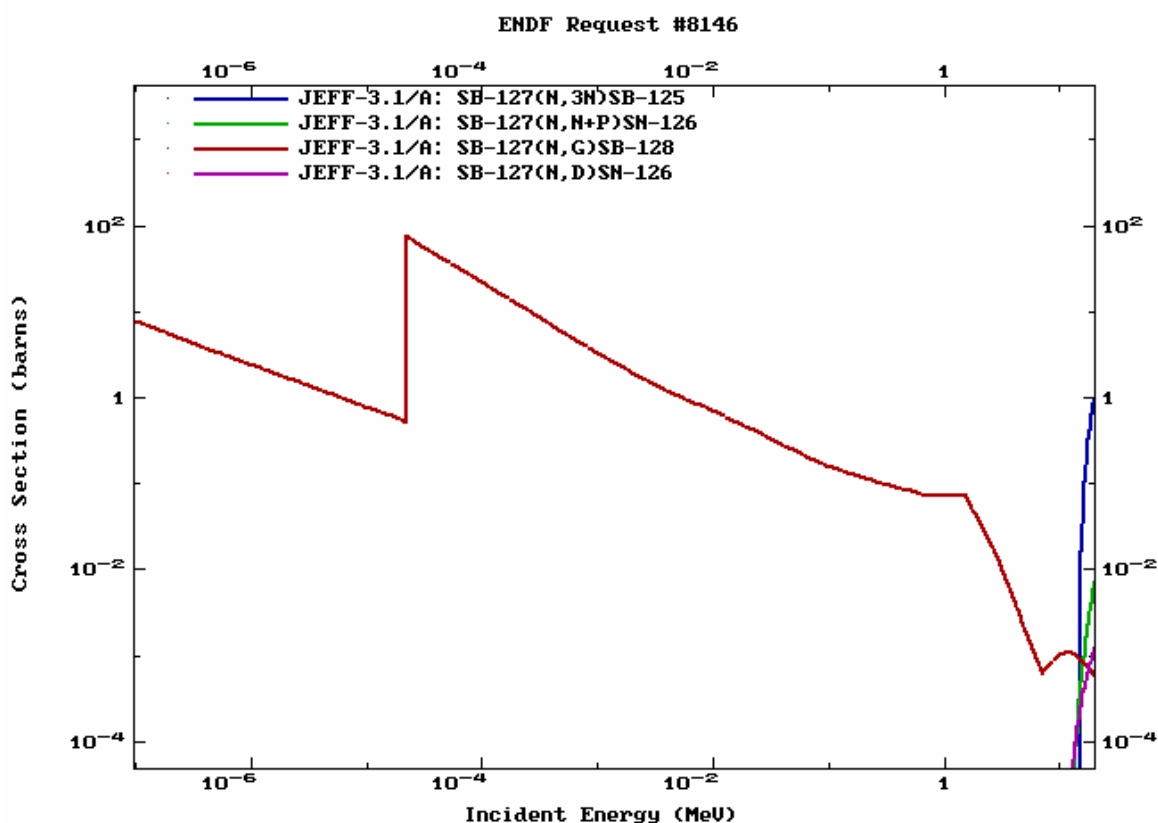


Рис. 11. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

⁷ Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Файл MF=10 исключить. – М.Н.

52. ТЕЛЛУР

52.1. Теллур-118

Период полураспада: (6 ± 2) дня.

Моды распада: e^- 100%.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файлы

JEFF-3.1/A=EAF-2003 – неполная оценка 2003 года файла для активационной библиотеки, основанная на данных из библиотеки ADL-3.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{118}Te из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 1. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

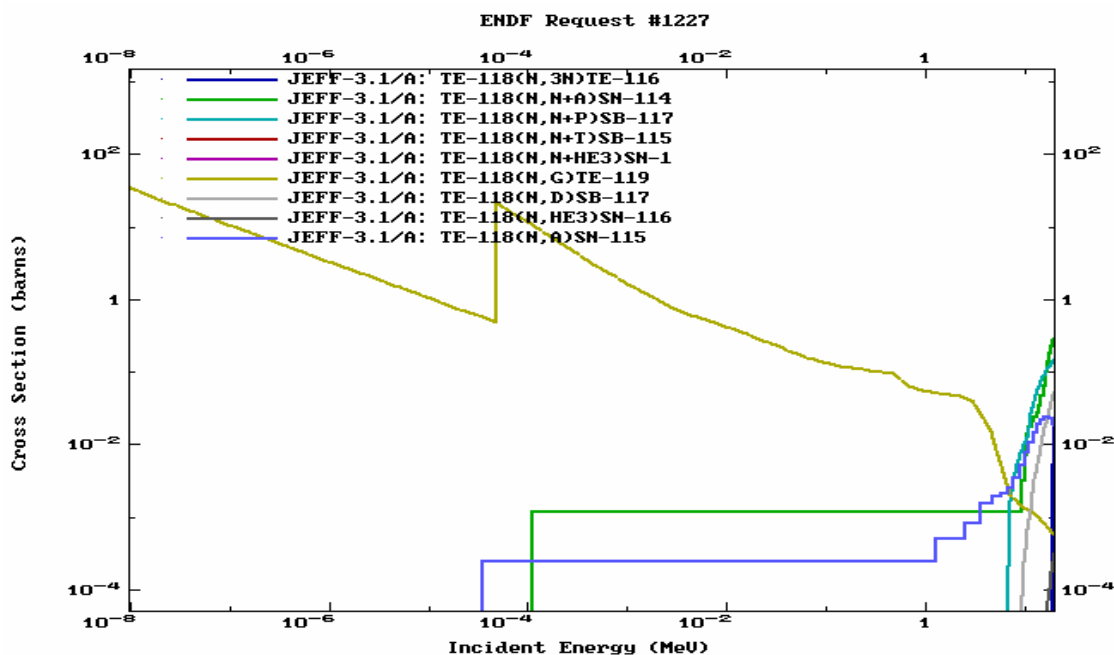


Рис. 1. Нейтронные сечения из библиотеки EAF-2003 для ^{118}Te .

Заключение

Файл ^{118}Te из библиотеки JEFF-3.1/A=EAF-2003 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

¹ Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Сформировать файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера ^{119}Te в реакции MT=102. Файлы MF=8 и MF=10 опустить. Файлу присвоить MAT=5218. – М.Николаев.

52.2. Теллур-119-м

Период полураспада: (4.70 ± 0.04) дня.
Моды распада: $e^- \sim 100\%$, $\text{IT} < 8.0 \cdot 10^{-3}\%$.
Спин метастабильного состояния: $11/2^-$.

Файлы

JEFF-3.1/A=EAF-2003 – неполная оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из библиотеки ADL-3.

Данные

Все нейтронные сечения для $^{119\text{m}}\text{Te}$ из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 2. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

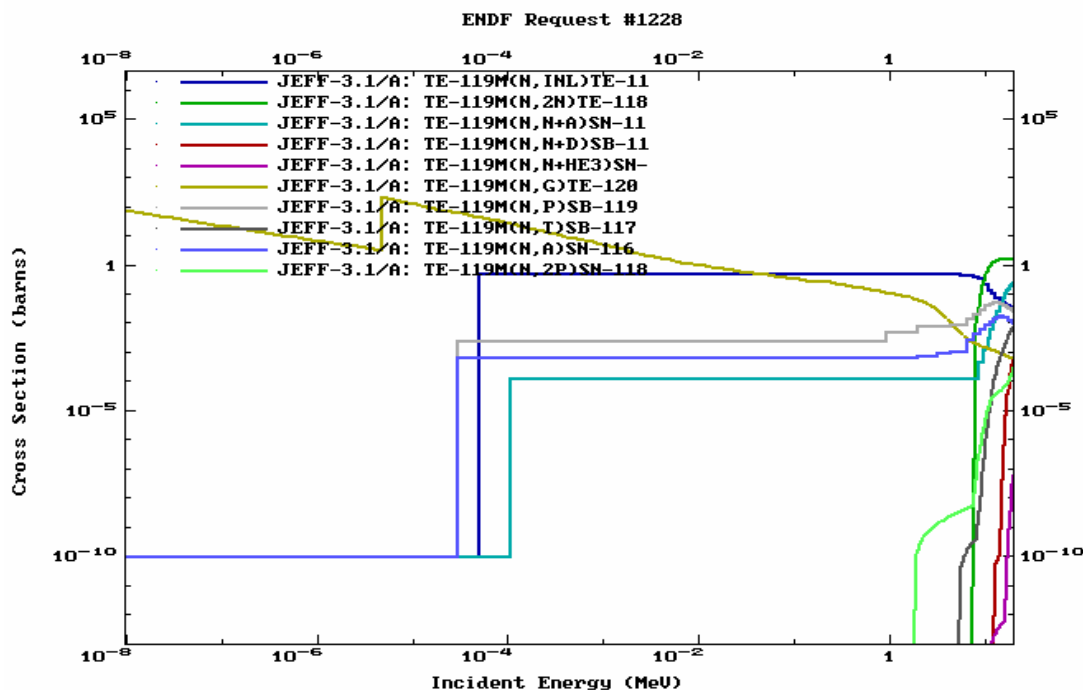


Рис. 2. Нейтронные сечения из библиотеки EAF-2003 для $^{119\text{m}}\text{Te}$.

Заключение

Файл $^{119\text{m}}\text{Te}$ из библиотеки JEFF-3.1/A=EAF-2003 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД².

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

² Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Сформировать файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{117}\text{Sn}^{\text{m}}$ в реакции MT=106. Секцию MF=4 с сечением образования основного состояния перенести из файла MF=3 в файл MF=10. Файлу присвоить MAT=5239. – М. Николаев.

52.3. Теллур-120

Содержание в естественной смеси: $0.09 \pm 0.01\%$.

Период полураспада: $> 2.2 \cdot 10^{16}$ лет.

Моды распада: $2e^-$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файлы

ENDF/B-VI: взята из оценки 1980 года выполненной для библиотеки ENDF/B-V

JEFF-3.1: взята из оценки ENDF/B-VI.

JENDL-3: оценка 1990 года.

ENDF/B-VII: взята из оценки JENDL-3 с небольшими исправлениями в формате.

JEFF-3.1/A=EAF-2003 – неполная оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из библиотеки ADL-3.

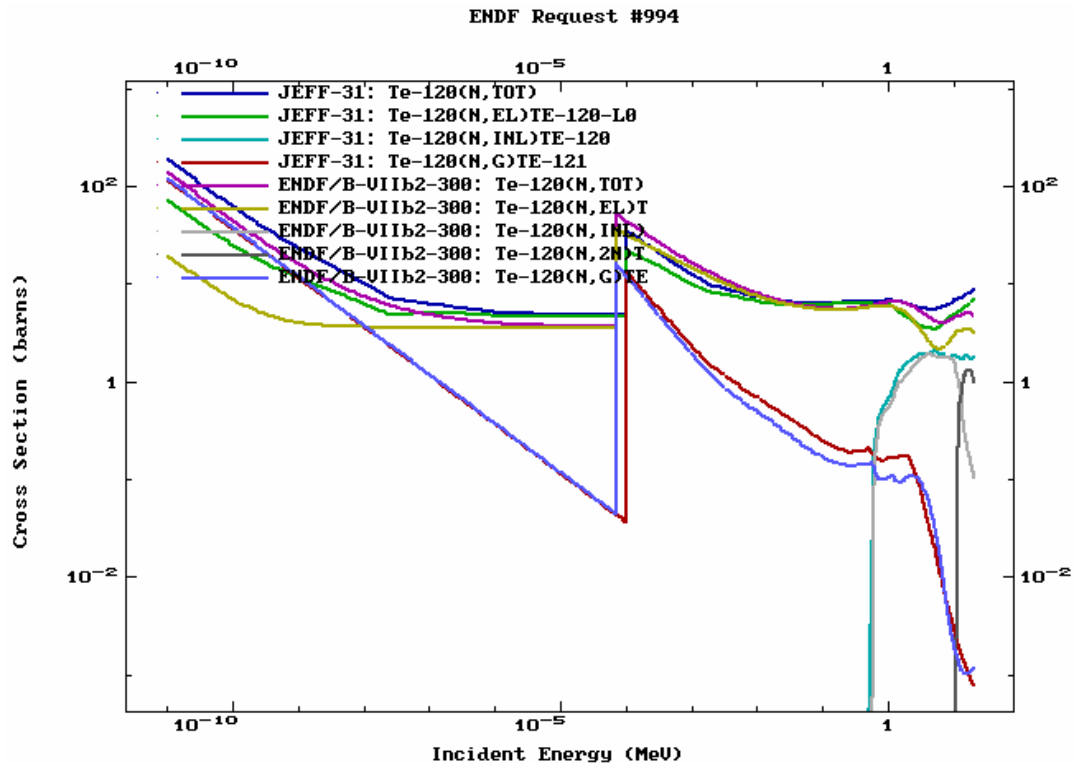


Рис. 3. Сравнение оценённых нейтронных сечений из библиотеки JEFF-3 и ENDF/B-VII.

На рисунке 3 показано сравнение основных сечений из двух имеющихся полных библиотек. Оценка JENDL-3 (ENDF/B-VII) выполнена на 10 лет позже, чем ENDF/B-V (JEFF-3.1) с использованием современных моделей ядерных реакций и учётом более поздних экспериментальных данных. Так сечение (n,2n) в ENDF/B-V (JEFF-3.1) включено в сечение неупругого рассеяния; в JENDL-3 (ENDF/B-VII) эти процессы разделены; энерго-угловые распределения оценены в рамках современных моделей ядерных реакций,

представление сечений и энерго-угловых распределений вторичных частиц является более полным, чем в ENDF/B-V (JEFF-3.1).

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JENDL-3 для включения в состав международной библиотеке для осколков деления. Этот файл, включенный с небольшими исправлениями в библиотеку ENDF/B-VII может быть рекомендован для библиотеки РОСФОНД³.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

52.4. Теллур-121

Период полураспада: (19.16 ± 0.05) дня.

Моды распада: e^- 100%.

Спин основного состояния: $1/2^+$.

Файлы

JEFF-3.1/A=EAF-2003 – неполная оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из библиотеки ADL-3.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{121}Te из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 4. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

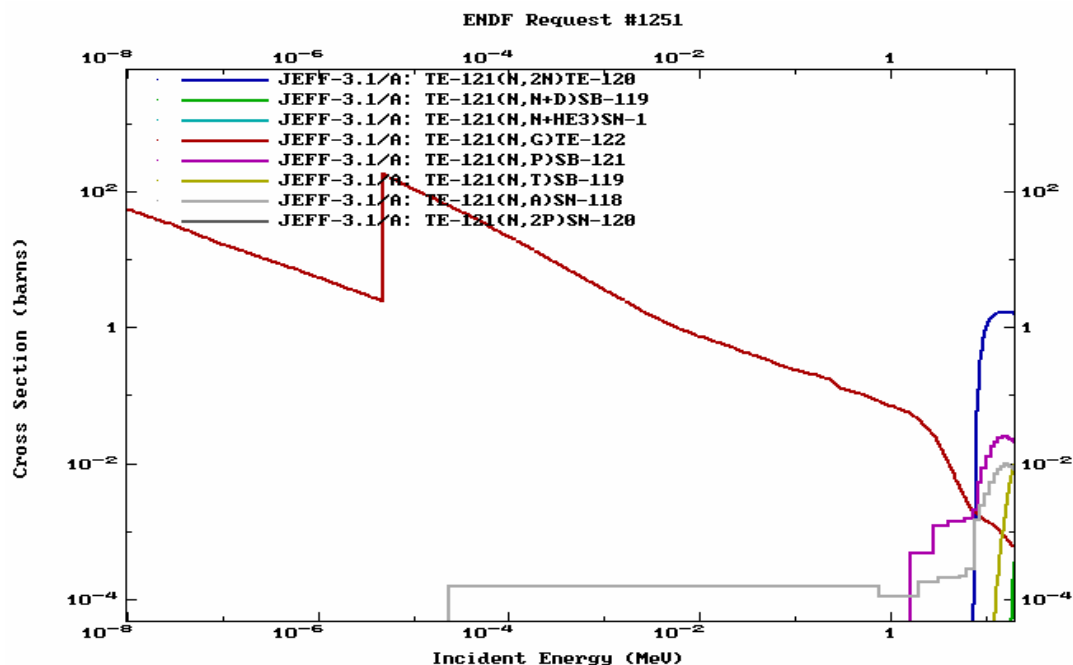


Рис. 4. Нейтронные сечения из библиотеки EAF-2003 для ^{121}Te .

³ Включить файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров в реакциях MT=16 ($^{119}\text{Te}^m$), 102 ($^{121}\text{Te}^m$), 103 ($^{120}\text{Sb}^m$) и 107 ($^{117}\text{Sn}^m$) на основе данных EAF-2003. Файлу присвоить MAT=5220.– М.Н.Николаев.

Файл ^{121}Te из библиотеки JEFF-3.1/A= EAF-2003 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁴.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

52.5. Теллур-121-м

Период полураспада: (154 ± 7) дня.
Моды распада: IT=88.6%, e^- 11.4%.
Спин основного состояния: $11/2^-$.

Файлы

JEFF-3.1/A=EAF-2003 – неполная оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из библиотеки ADL-3.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{121m}Te из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 5. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

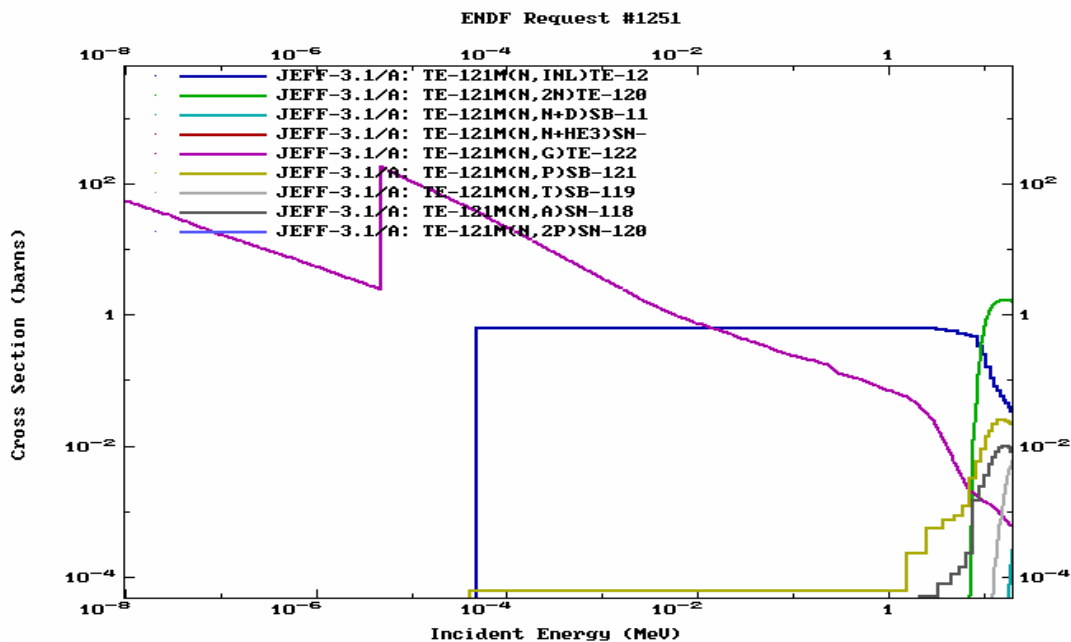


Рис. 5. Нейтронные сечения из библиотеки EAF-2003 для ^{121m}Te .

⁴ Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Сформировать файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров в реакциях MT=4($^{121}\text{Te}^m$), 17($^{119}\text{Te}^m$), 28($^{120}\text{Sb}^m$), 104($^{120}\text{Sb}^m$), 106. ($^{117}\text{Sn}^m$). Файлы MF=8 и MF=10 удалить. Файлу присвоить MAT=5221. – М.Николаев.

Заключение

Файл ^{121}Te из библиотеки JEFF-3.1/A=EAF-2003 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁵.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

52.6. Теллур-122

Содержание в естественной смеси: $2.55 \pm 0.12\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файлы

ENDF/B-VI: взята из оценки 1980 года выполненной для библиотеки ENDF/B-V (1974 год).

JEFF-3.1: взята из оценки ENDF/B-V.

JENDL-3: оценка 1990 года.

ENDF/B-VII: параметры в области разрешённых резонансов взяты из последней оценки С. Мугхабгхаба (Атлас-2006), область неразрешённых резонансов и оценка в области высоких энергий – из библиотеки JENDL-3.

Данные

Все оценки кроме ENDF/B-VII (JENDL-3) являются устаревшими. Оценка JENDL-3 в быстрой области энергий основывается на результатах расчётов по современным моделям с учётом последних экспериментальных данных. Область разрешённых резонансов в ENDF/B-VII расширена по сравнению с JENDL-3.

Сравнение оценённых сечений из этого файла с имеющимися экспериментальными данными для основных сечений показано на рисунках 6 – 9.

⁵ Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Сформировать файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров в реакциях $\text{MT}=17(^{119}\text{Te}^m)$, $28(^{120}\text{Sb}^m)$, $104(^{120}\text{Sb}^m)$, $106(^{117}\text{Sn}^m)$. Секцию MF=4 с сечением образования основного состояния ^{121}Te перенести из файла MF=3 в файл MF=10. Файл M=8 удалить. Файлу присвоить MAT=5211. – М.Николаев.

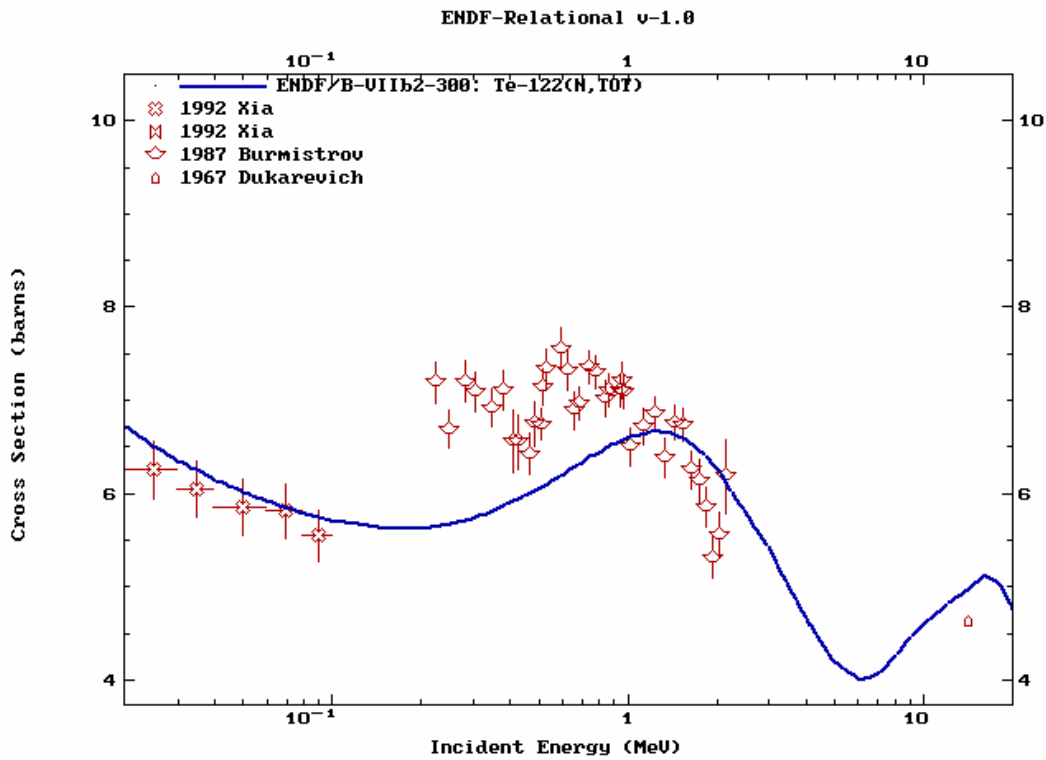


Рис. 6. Полное нейтронное сечение из библиотеки ENDF/B-VII (JENDL-3) для ^{122}Te в сравнении с имеющимися экспериментальными данными.

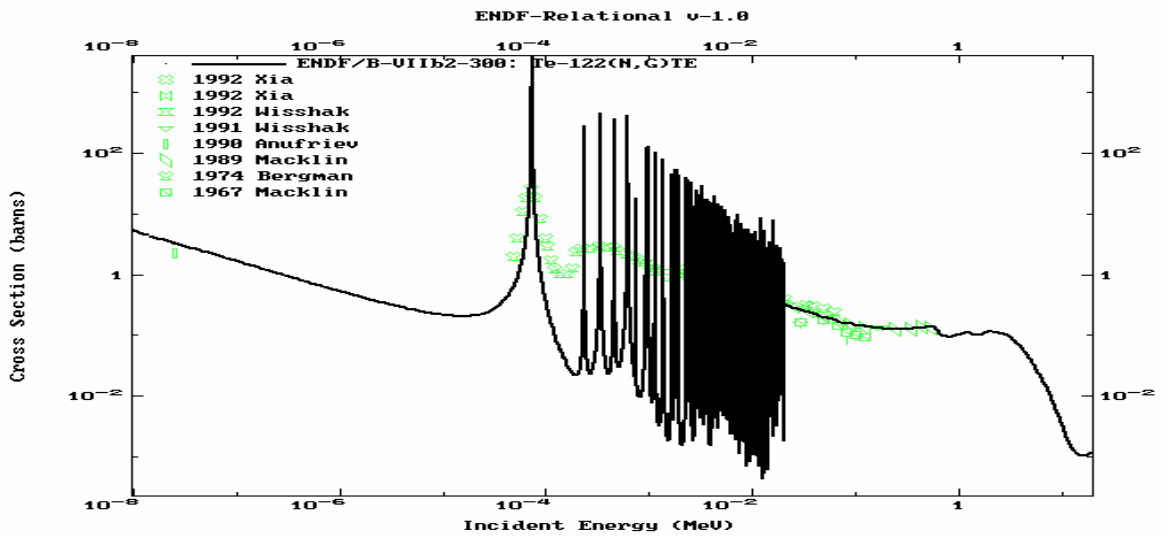


Рис. 7. Сечение захвата нейтронов из библиотеки ENDF/B-VII (JENDL-3) для ^{122}Te в сравнении с имеющимися экспериментальными данными

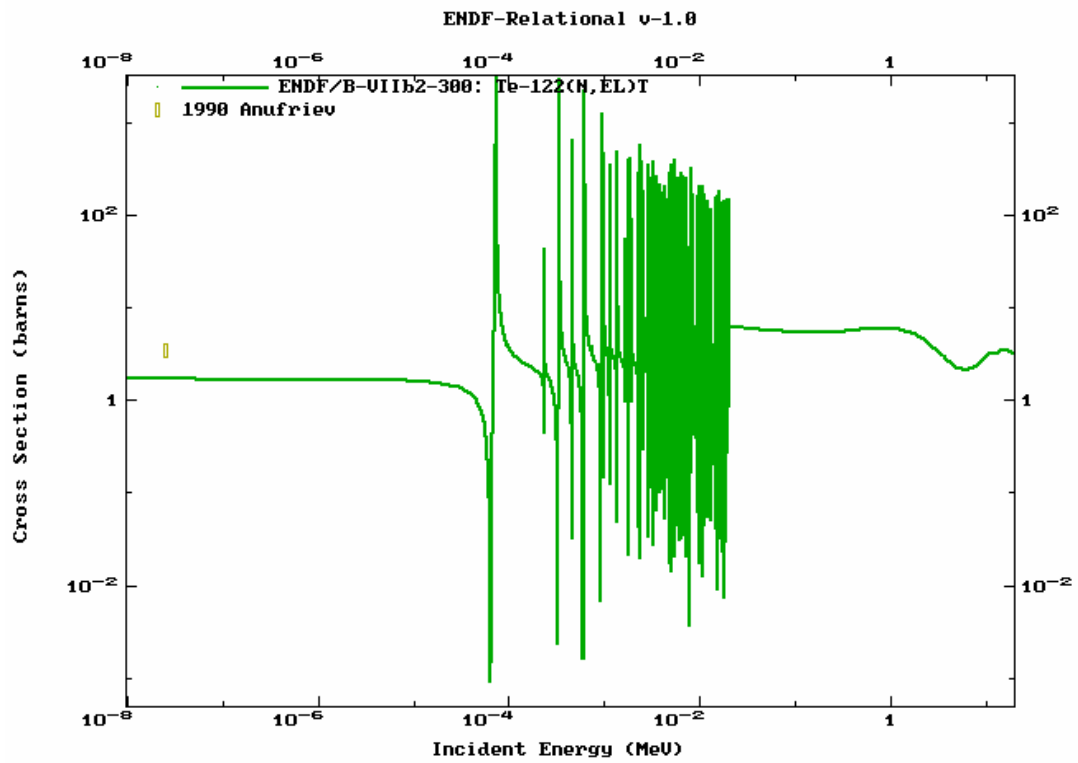


Рис. 8. Сечение упругого рассеяния нейтронов из библиотеки ENDF/B-VII (JENDL-3) для ^{122}Te в сравнении с имеющимися экспериментальными данными.

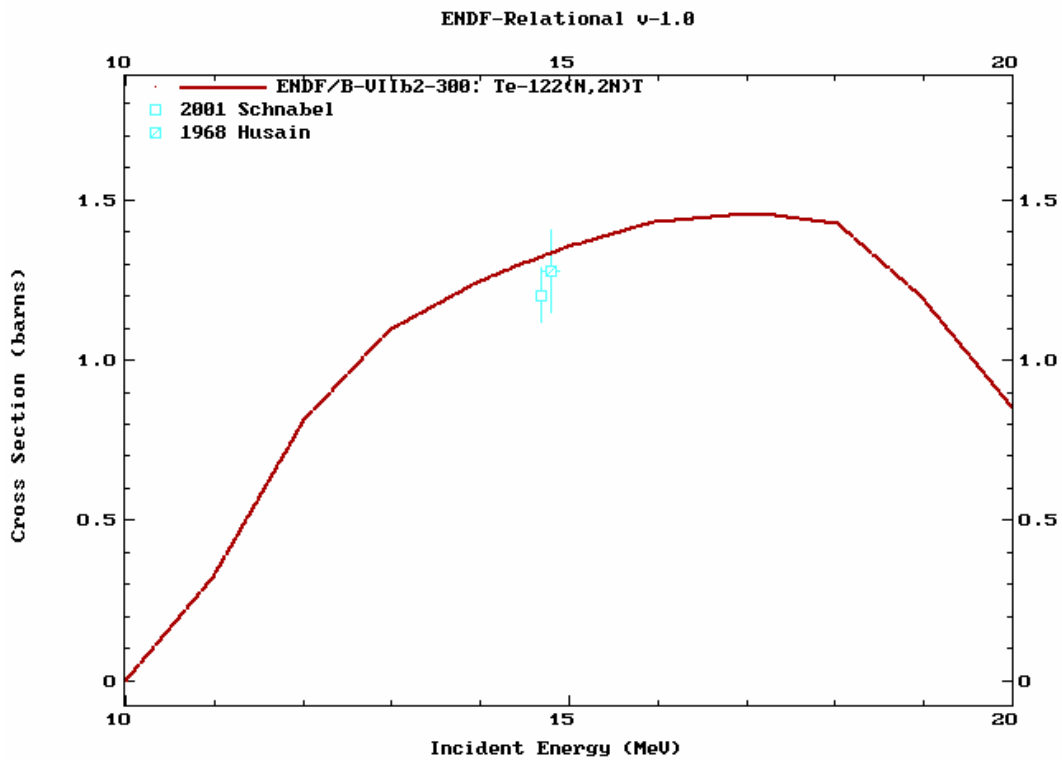


Рис. 9. Сечение реакции (n,2n) из библиотеки ENDF/B-VII (JENDL-3) для ^{122}Te в сравнении с имеющимися экспериментальными данными.

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JENDL-3 с новыми резонансными параметрами С. Мугхабгхаба (Атлас-2006) для включения в состав международной библиотеке для осколков деления. Файл содержит также полную оценку энерго-угловых распределений вторичных частиц. Этот файл рекомендован и для библиотеки РОСФОНД⁶.

52.7. Теллур-123

Содержание в естественной смеси: $0.89 \pm 0.03\%$.

Спин основного состояния: $1/2^+$.

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $7.6 \cdot 10^{-12}$.

Файлы

ENDF/B-VI: взята из оценки 1980 года выполненной для библиотеки ENDF/B-V (1974 год).

JEFF-3.1: взята из оценки ENDF/B-V.

JENDL-3: оценка 1990 года.

ENDF/B-VII: параметры в области разрешённых резонансов взяты из последней оценки С. Мугхабгхаба (Атлас-2006), область неразрешённых резонансов и оценка в области высоких энергий – из библиотеки JENDL-3.

Данные

Все оценки кроме ENDF/B-VII (JENDL-3) являются устаревшими. Оценка JENDL-3 в быстрой области энергий основывается на результатах расчётов по современным моделям с учётом последних экспериментальных данных. Область разрешённых резонансов в ENDF/B-VII расширена (до 2 кэВ) по сравнению с JENDL-3. Но результат этого расширения не является физически оправданным, так как в области выше 700 эВ существенен пропуск s-резонансов и полностью отсутствует вклад от р-резонансов. Поэтому сечение захвата в области от 700 эВ до 2 кэВ оказывается существенно заниженным.

Основные нейтронные сечения из этого файла показаны на рисунке 10, а сравнение полного сечения с имеющимися экспериментальными данными - рисунке 11.

⁶ Включить дополнительно файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров в реакциях $MT=16(^{121}\text{Te}^m)$, $102(^{123}\text{Te}^m)$, $107(^{119}\text{Sn}^m)$, используя данные из EAF-2003. Файлу присвоить MAT=5222. - М.Н.Николаев.

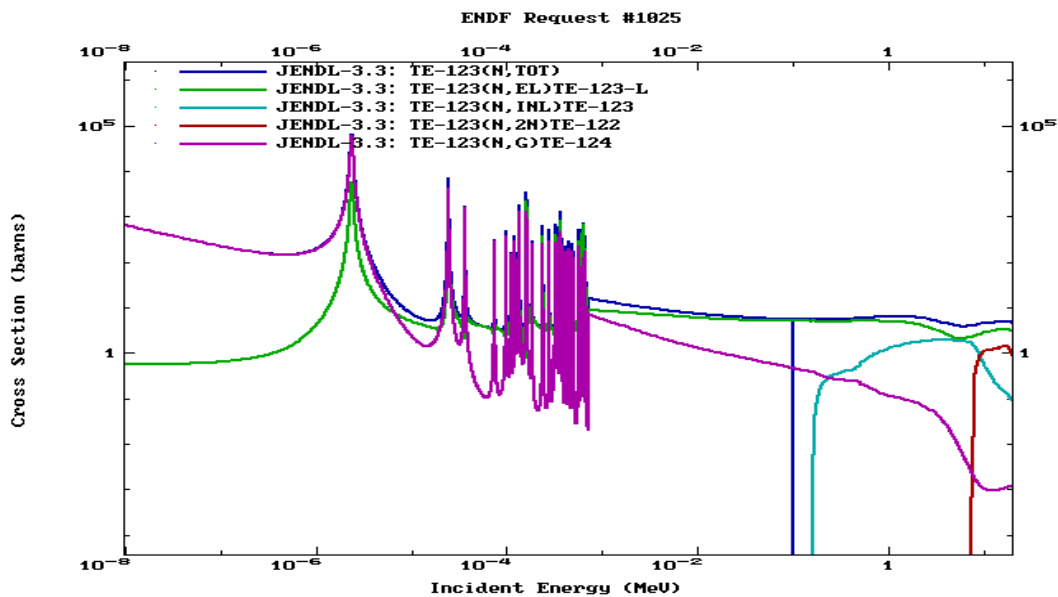


Рис. 10. Основные сечения реакций из библиотеки JENDL-3 для ^{123}Te .

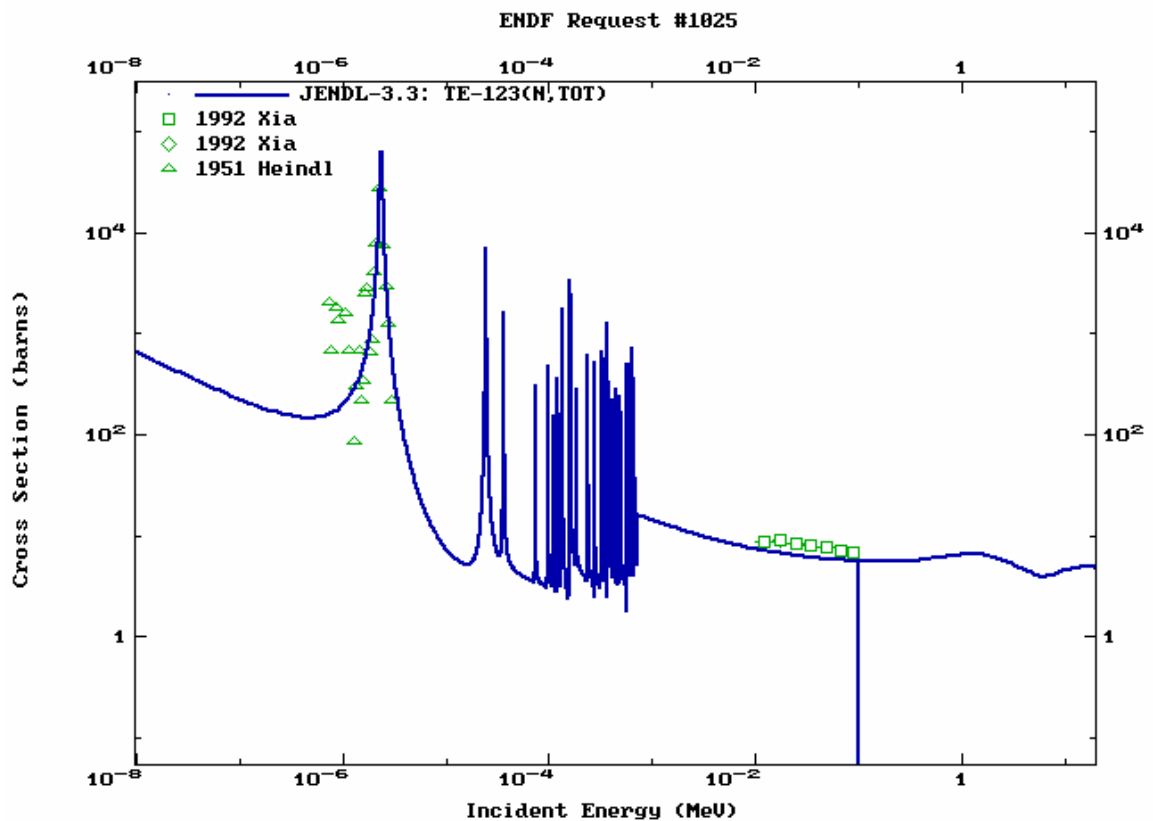


Рис. 11. Полное сечение из библиотеки JENDL-3 для ^{123}Te в сравнении с имеющимися экспериментальными данными.

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JENDL-3 с новыми резонансными параметрами С. Мугхабгхаба (Атлас-2006) для включения в состав международной библиотеки для осколков деления. Файл содержит также полную оценку энерго-угловых распределений вторичных частиц. Но так как при включении

новых резонансных параметров область разрешённых резонансов была необоснованно расширена, мы рекомендуем оценку JENDL-3 для библиотеки РОСФОНД⁷.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

52.8. Теллур-123-м

Период полураспада: (119.2±0.1) дня.

Моды распада: IT=100%.

Спин основного состояния: 11/2⁻.

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами 6.0*10⁻¹².

Файлы

JEFF-3.1/A – неполная оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из библиотеки ADL-3.

Данные

Все нейтронные сечения для ¹²³Te^m из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10⁻⁴ барн приведены на рисунке 12. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных физических зависимостей.

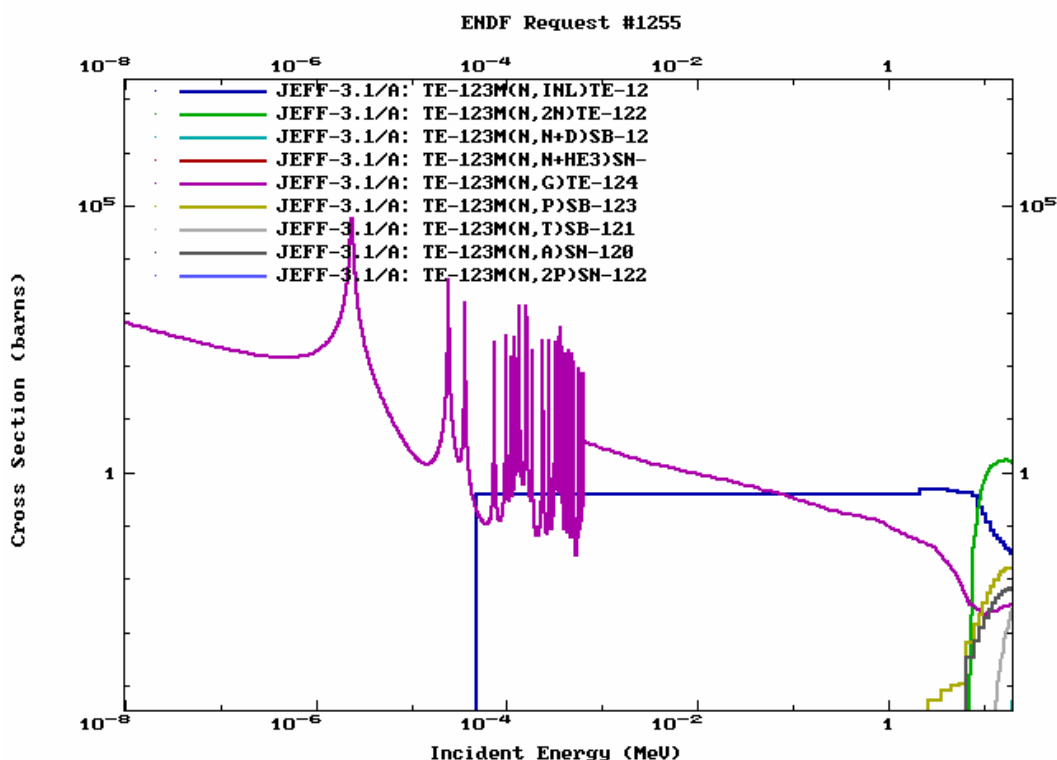


Рис. 12. Нейтронные сечения из библиотеки EAF-2003 для ¹²³Te^m.

⁷ Включить дополнительно файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров в реакциях MT=4(¹²³Te^m), 17(¹²¹Te^m), 22(¹¹⁹Sn^m), 106(¹²¹Sn^m), используя данные из EAF-2003. Файлу присвоить MAT=5223.-М.Н.Николаев.

Заключение

Файл ^{123m}Te из библиотеки EAF-2003 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁸.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

52.9. Теллур-124

Содержание в естественной смеси: $4.74 \pm 0.14\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $1.35 \cdot 10^{-6}$.

Файлы

ENDF/B-VI: взята из оценки 1980 года выполненной для библиотеки ENDF/B-V (1974 год).

JEFF-3.1: взята из оценки ENDF/B-V.

JENDL-3: оценка 1990 года.

ENDF/B-VII: параметры в области разрешённых резонансов взяты из последней оценки С. Мугхабгхаба (Атлас-2006), область неразрешённых резонансов и оценка в области высоких энергий – из библиотеки JENDL-3.

Данные

Все оценки кроме ENDF/B-VII (JENDL-3) являются устаревшими. Оценка JENDL-3 в быстрой области энергий основывается на результатах расчётов по современным моделям с учётом последних экспериментальных данных. Область разрешённых резонансов в ENDF/B-VII (ниже 15 кэВ) сужена по сравнению с JENDL-3 (ниже 30 кэВ).

⁸ Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Сформировать файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров в реакциях $\text{MT}=17(^{121}\text{Te}^m)$, $106. (^{121}\text{Sn}^m)$. Секцию MF=4 с сечением образования основного состояния ^{123}Te перенести из файла MF=3 в файл MF=10. Файл M=8 удалить. Файлу присвоить MAT=5213. – М.Николаев.

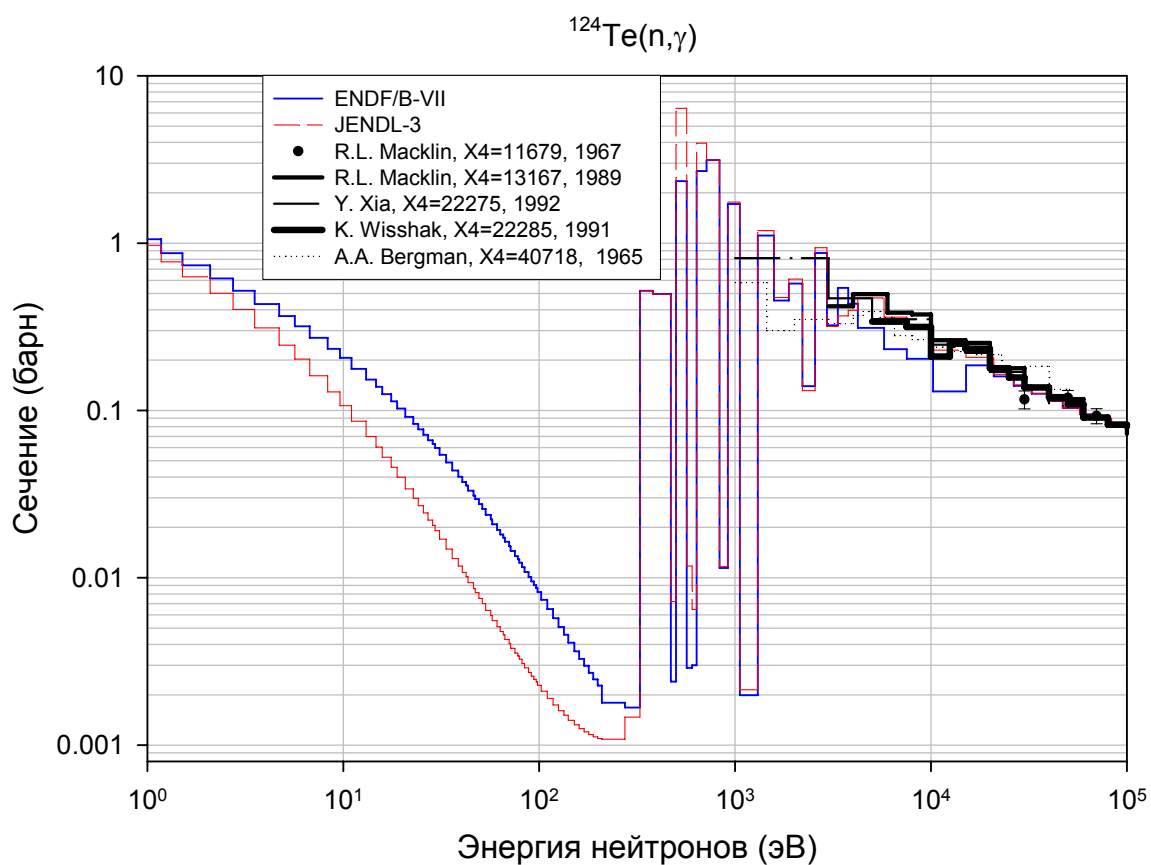


Рис. 13. Сечение захвата из библиотек ENDF/B-VII и JENDL-3 для ^{124}Te в групповом представлении в сравнении с имеющимися экспериментальными данными.

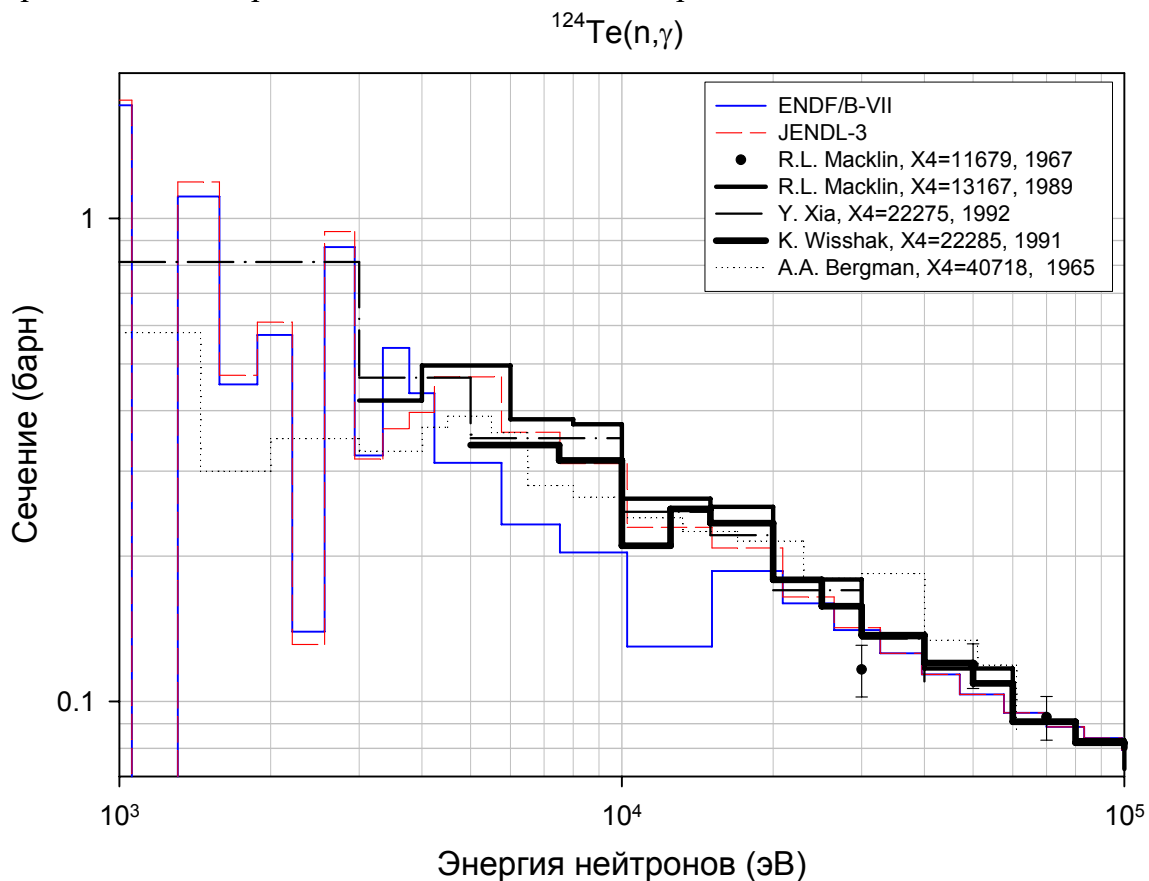


Рис. 14. То же, что на рисунке 13, но для более узкой области энергий.

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JENDL-3 с новыми резонансными параметрами С. Мугхабгхаба (Атлас-2006) для включения в состав международной библиотеке для осколков деления. Файл содержит также полную оценку энерго-угловых распределений вторичных частиц. Однако, как видно из рисунков 13 и 14, где сравнивается сечение захвата из двух библиотек с имеющимися экспериментальными данными, оценка ENDF/B-VII как в области разрешённых, так и в области неразрешённых резонансов противоречит всей совокупности имеющихся экспериментальных данных полученных с низким разрешением. Возможная причина этого – существенный пропуск резонансов в библиотеке ENDF/B-VII. Файл из JENDL-3 рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁹.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

52.10. Теллур-125

Содержание в естественной смеси: $7.07 \pm 0.15\%$.

Спин основного состояния: $1/2^+$.

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $6.67 \cdot 10^{-4}$.

Файлы

ENDF/B-VI: взята из оценки 1980 года выполненной для библиотеки ENDF/B-V (1974 год).

JEFF-3.1: взята из оценки ENDF/B-V.

JENDL-3: оценка 1990 года.

ENDF/B-VII: параметры в области разрешённых резонансов взяты из последней оценки С. Мугхабгхаба (Атлас-2006), область неразрешённых резонансов и оценка в области высоких энергий – из библиотеки JENDL-3.

Данные

Все оценки кроме ENDF/B-VII (JENDL-3) являются устаревшими. Оценка JENDL-3 в быстрой области энергий основывается на результатах расчётов по современным моделям с учётом последних экспериментальных данных. Область разрешённых резонансов в ENDF/B-VII (ниже 7.5 кэВ), близка к приведённой в JENDL-3 (ниже 7 кэВ), однако число резонансов (294 в ENDF/B-VII и 198 в JENDL-3), а также их разбиение на s- и p- волны существенно отличаются.

⁹ Включить дополнительно файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров в реакциях $MT=16(^{123}\text{Te}^m)$, $102(^{125}\text{Te}^m)$, $107(^{121}\text{Sn}^m)$, используя данные из EAF-2003. Файлу присвоить MAT=5224. - М.Н.Николаев.

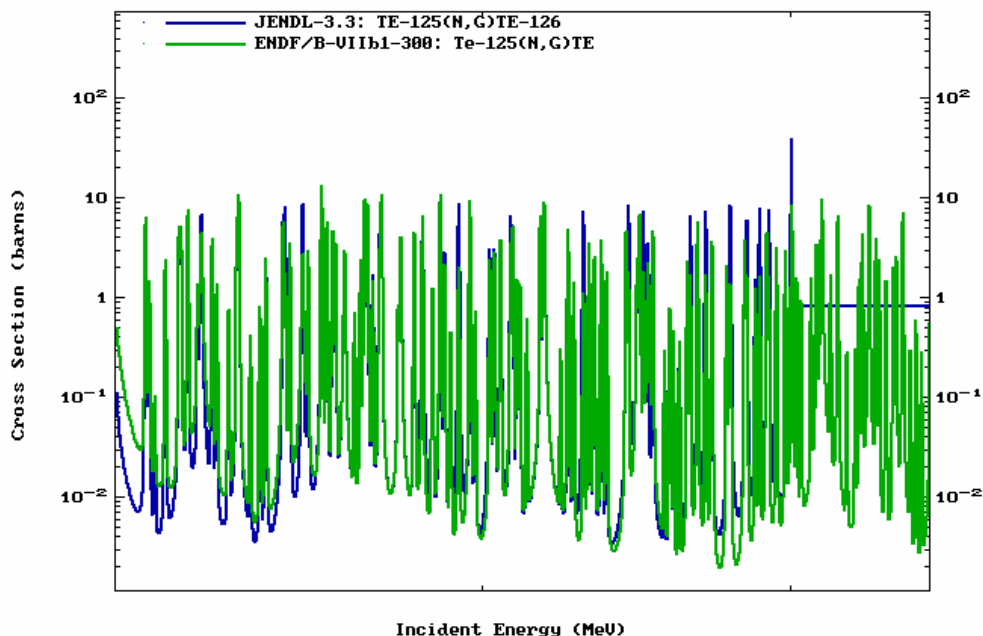


Рис. 15. Сравнение сечений захвата из библиотек ENDF/B-VII и JENDL-3 для ^{125}Te в области энергий нейтронов от 5 до 7.5 кэВ.

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JENDL-3 с новыми резонансными параметрами С. Мугхабгхаба (Атлас-2006) для включения в состав международной библиотеке для осколков деления. Файл содержит также полную оценку энерго-угловых распределений вторичных частиц. На рисунке 15 сравниваются сечения захвата из захвата из двух библиотек в резонансной области энергий, где наблюдаются различия между двумя оценками. Так как средние сечения для этих двух оценок отличаются несущественно, файл из библиотеки ENDF/B-VII рекомендован для библиотеки РОСФОНД¹⁰.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

52.11. Теллур-125-m

Период полураспада: (57.40 ± 0.15) дня.

Моды распада: IT=100%.

Спин основного состояния: $11/2^-$.

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $1.49 \cdot 10^{-4}$.

Файлы

¹⁰ Включить дополнительно файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров в реакциях MT= 4($^{125}\text{Te}^m$), 17($^{123}\text{Te}^m$), 22($^{121}\text{Sn}^m$), используя данные из EAF-2003. Файлу присвоить MAT=5225.- М.Н.Николаев.

JEFF-3.1/A – неполная оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из библиотеки ADL-3.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{125m}Te из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 16. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

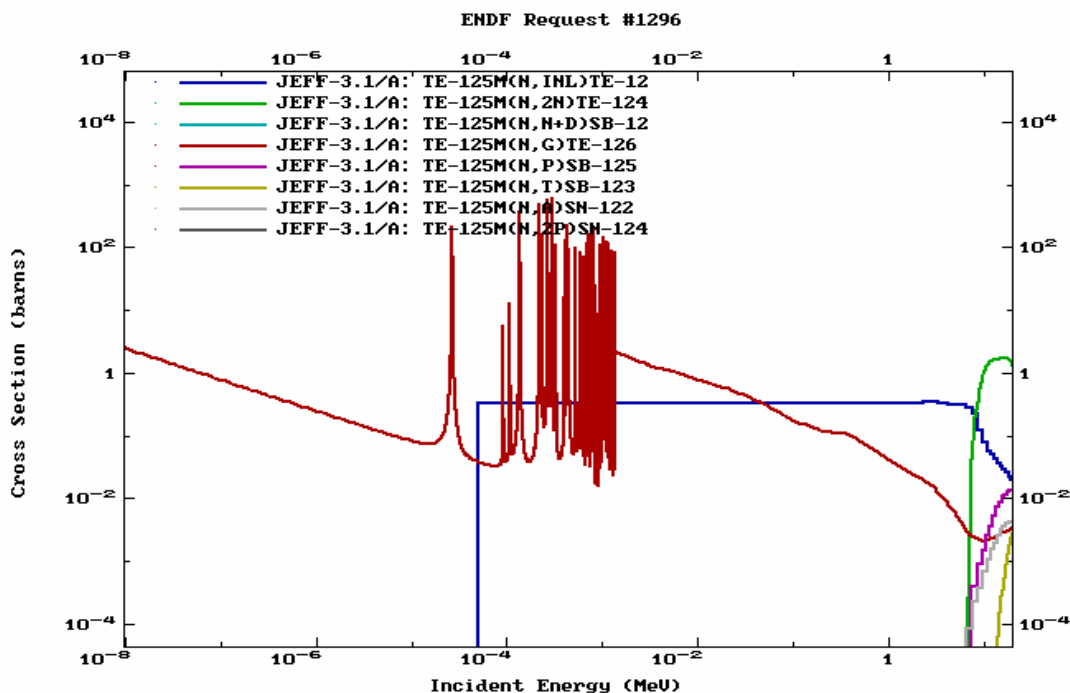


Рис. 16. Нейтронные сечения из библиотеки EAF-2003 для ^{125m}Te .

Заключение

Файл ^{125m}Te из библиотеки EAF-2003 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹¹.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

¹¹ Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Сформировать файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров в реакциях MT= 17 ($^{123}\text{Te}^m$), 22 ($^{121}\text{Sn}^m$). Секцию MF=4 с сечением образования основного состояния ^{125}Te перенести из файла MF=3 в файл MF=10. Файл M=8 удалить. Файлу присвоить MAT=5215. – М.Николаев.

52.12. Теллур-126

Содержание в естественной смеси: $18.84 \pm 0.25\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $1.17 \cdot 10^{-4}$.

Файлы

ENDF/B-VI: взята из оценки 1980 года выполненной для библиотеки ENDF/B-V (1974 год).

JEFF-3.1: взята из оценки ENDF/B-V.

JENDL-3: оценка 1990 года.

ENDF/B-VII: параметры в области разрешённых резонансов взяты из последней оценки С. Мугхабгхаба (Атлас-2006), область неразрешённых резонансов и оценка в области высоких энергий – из библиотеки JENDL-3.

Данные

Все оценки кроме ENDF/B-VII (JENDL-3) являются устаревшими. Оценка JENDL-3 в быстрой области энергий основывается на результатах расчётов по современным моделям с учётом последних экспериментальных данных. Область разрешённых резонансов в ENDF/B-VII (ниже 13.6 кэВ) сужена по сравнению с JENDL-3 (ниже 30).

Рис. 18. Сечение захвата из библиотек ENDF/B-VII и JENDL-3 для ^{126}Te в групповом представлении в сравнении с имеющимися экспериментальными данными.

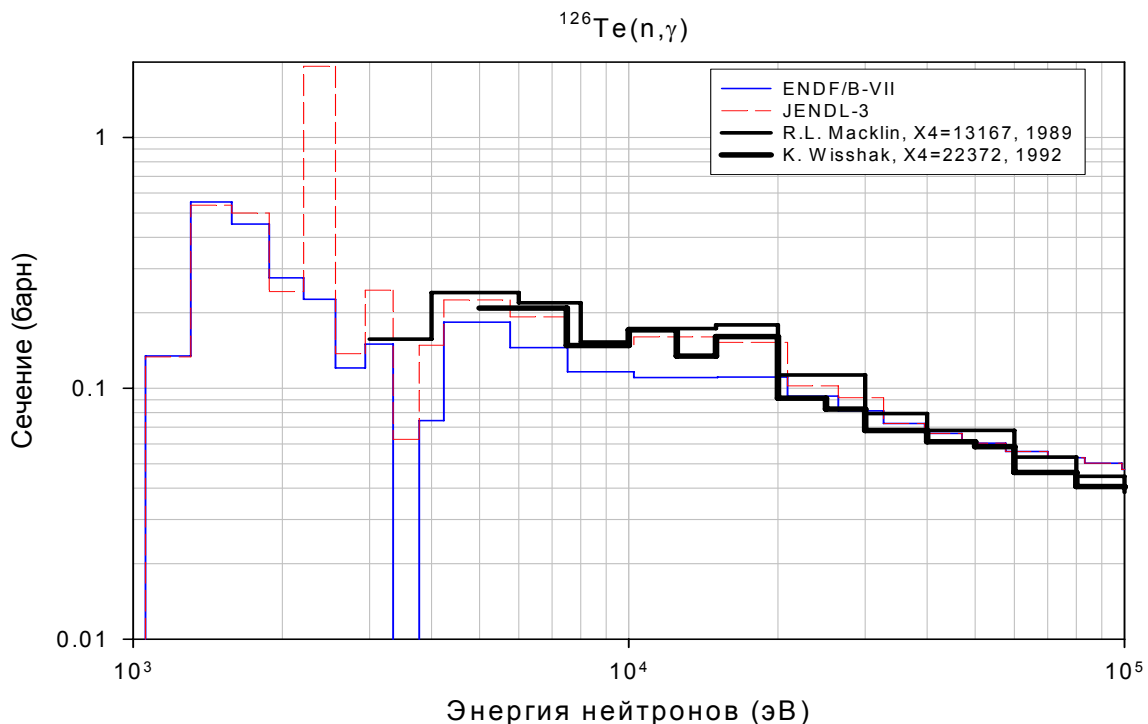


Рис. 19. Тоже, что на рисунке 13, но для более узкой области энергий.

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JENDL-3 с новыми резонансными параметрами С. Мугхабгхаба (Атлас-2006) для включения в состав международной библиотеке для осколков деления. Файл содержит также полную оценку энерго-угловых распределений вторичных частиц. На рисунке 17 показано сравнение поточечных сечений захвата из двух библиотек. Однако, как видно из рисунков 18 и 19, где сравнивается сечение захвата из двух библиотек с имеющимися экспериментальными данными, оценка ENDF/B-VII как в области разрешённых, так и в области неразрешённых резонансов противоречит имеющимся экспериментальным данным полученным с низким разрешением. Возможная причина этого – существенный пропуск резонансов в библиотеке ENDF/B-VII. Файл из JENDL-3 рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹².

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

52.13. Теллур-127-м

Период полураспада: (109 ± 2) дня.

Моды распада: $\Gamma = 97.6\%$, $\beta = 2.4\%$.

Спин метастабильного состояния: $11/2^-$.

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $4.95 \cdot 10^{-4}$.

Файлы

JEFF-3.1 (ENDF/B-VI) – взята из оценки ENDF/B-V (1974).

JENDL-3 (ENDF/B-VII) – оценка 1991 года.

Данные

Оценка JEFF-3.1 (ENDF/B-VI) является устаревшей. Оценка JENDL-3 (ENDF/B-VII) в быстрой области энергий основывается на результатах расчётов по современным моделям с учётом последних экспериментальных данных. На рисунке 20 показано сравнение основных нейтронных сечений из этих двух библиотек. Заметно отличаются сечения захвата. Оценка JENDL-3 основана на современных систематиках параметров. Файл содержит также полную оценку энерго-угловых распределений вторичных частиц. В JEFF-3.1 (ENDF/B-VI) сечение $(n,2n)$ включено в сечение неупругого рассеяния.

¹² Включить дополнительно файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров в реакциях $MT = 16(^{125}\text{Te}^m)$, $102(^{127}\text{Te}^m)$, используя данные из EAF-2003. Файлу присвоить MAT=5226.-
М.Н.Николаев.

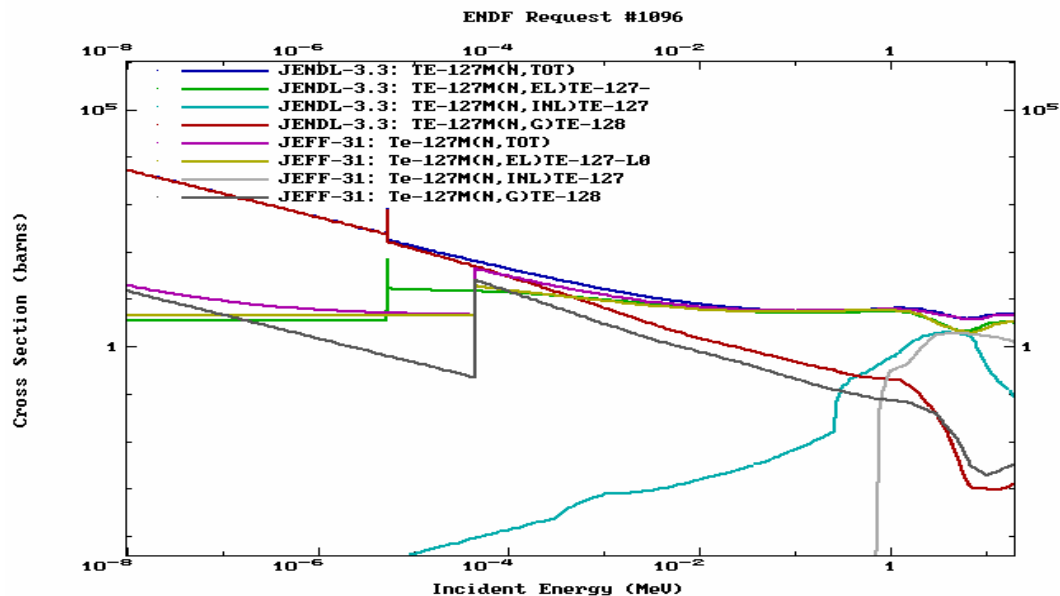


Рис. 20. Сравнение основных нейтронных сечений из библиотек JEFF-3.1 (ENDF/B-VI) и JENDL-3 (ENDF/B-VII).

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JENDL-3 для включения в состав международной библиотеке для осколков деления. Файл $^{127}\text{Te}^m$ из библиотеки JENDL-3 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹³.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

52.14. Теллур-128

Содержание в естественной смеси: $31.74 \pm 0.08\%$.

Период полураспада: $> 8.8 \cdot 10^{18}$ лет.

Моды распада: $2\beta = 100\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $4.82 \cdot 10^{-3}$.

Файлы

ENDF/B-VI: взята из оценки 1980 года выполненной для библиотеки ENDF/B-V (1974 год).

JEFF-3.1: взята из оценки JENDL-1.

JENDL-3: оценка 1990 года.

¹³ Включить дополнительно файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров в реакции $\text{MT}=17(^{125}\text{Te}^m)$. Включить также файл MF=10 с сечением образования основного состояния ^{127}Te , используя данные из EAF-2003. Файлу присвоить MAT=5237.- М.Н.Николаев.

ENDF/B-VII: параметры в области разрешённых резонансов взяты из последней оценки С. Мугхабгхаба (Атлас-2006), область неразрешённых резонансов и оценка в области высоких энергий – из библиотеки JENDL-3.

Данные

Оценка JEFF-3.1 (JENDL-1) и ENDF/B-VI являются устаревшими. Оценка JENDL-3 (ENDF/B-VII) в быстрой области энергий основывается на результатах расчётов по современным моделям с учётом последних экспериментальных данных. Файл содержит также полную оценку энерго-угловых распределений вторичных частиц.

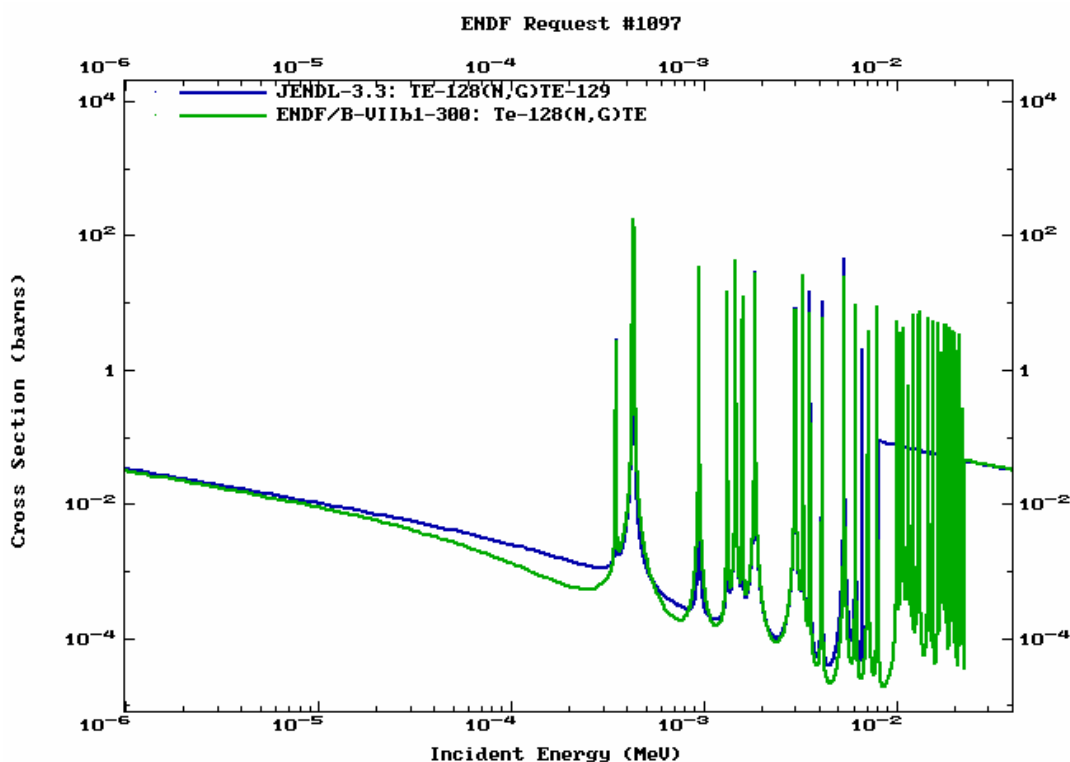


Рис. 21. Сравнение сечений захвата из библиотек JENDL-3 и ENDF/B-VII.

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JENDL-3 с новыми резонансными параметрами С. Мугхабгхаба (Атлас-2006) для включения в состав международной библиотеке для осколков деления. Эта рекомендация выполнена при формировании библиотеки ENDF/B-VII. При этом, область разрешённых резонансов была расширена с 8 кэВ (JENDL-3) до 22.5 кэВ (ENDF/B-VII). Средние сечения в этих двух библиотеках хорошо согласуются друг с другом за исключением области 8 – 10 кэВ, где разрешённые резонансы отсутствуют, а сечение в JENDL-3 оценено из средних параметров. Сравнение поточечных сечений из этих двух библиотек в области разрешённых и неразрешённых резонансов показано на рисунке 21.

Файл ^{128}Te из библиотеки ENDF/B-VII рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹⁴.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

52.15. Теллур-129-м

Период полураспада: (33.6 ± 0.1) дня.

Моды распада: $\Gamma = 63\%$, $\beta = 37\%$.

Спин метастабильного состояния: $11/2^-$.

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $8.67 \cdot 10^{-3}$.

Файлы

JEFF-3.1 (ENDF/B-VI) – взята из оценки ENDF/B-V (1974).

JENDL-3 (ENDF/B-VII) – оценка 1991 года.

Данные

Оценка JEFF-3.1 (ENDF/B-VI) является устаревшей. Оценка JENDL-3 (ENDF/B-VII) в быстрой области энергий основывается на результатах расчётов по современным моделям с учётом последних экспериментальных данных. На рисунке 22 показано сравнение основных нейтронных сечений из этих двух библиотек. Заметно отличаются сечения захвата. Оценка JENDL-3 основана на современных систематиках параметров. Файл содержит также полную оценку энерго-угловых распределений вторичных частиц. В JEFF-3.1 (ENDF/B-VI) сечение $(n,2n)$ включено в сечение неупругого рассеяния.

¹⁴ Включить дополнительно файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров в реакции $\text{MT} = 16(^{127}\text{Te}^m)$, $102(^{129}\text{Te}^m)$, используя данные из EAF-2003. Файлу присвоить MAT=5228.-
М.Н.Николаев.

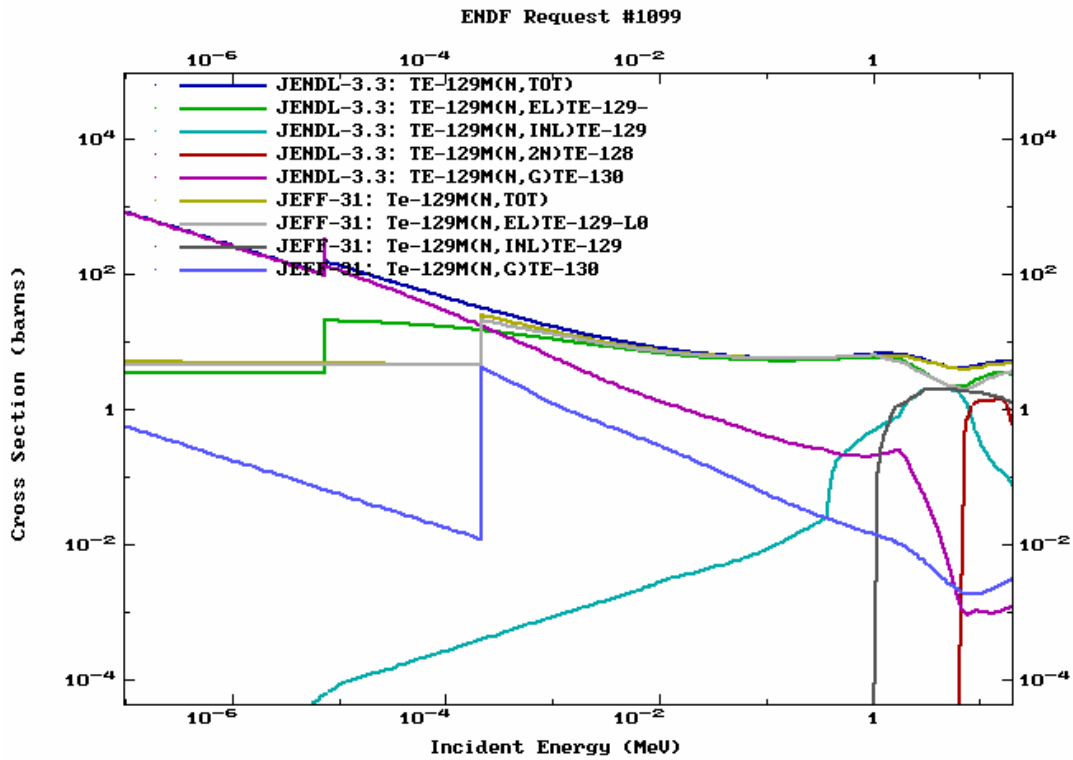


Рис. 22. Сравнение основных нейтронных сечений из библиотек JEFF-3.1 (ENDF/B-VI) и JENDL-3 (ENDF/B-VII).

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JENDL-3 для включения в состав международной библиотеке для осколков деления. Файл $^{129}\text{Te}^m$ из библиотеки JENDL-3 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹⁵.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

¹⁵ Включить дополнительно файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера $^{127}\text{Te}^m$ в реакции MT= 17, используя данные из EAF-2003. Файлу присвоить MAT=5239.- М.Н.Николаев.

52.16. Теллур-130

Содержание в естественной смеси: $34.08 \pm 0.62\%$.

Период полураспада: $> 5 \cdot 10^{23}$ лет.

Моды распада: $2\beta = 100\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $2.18 \cdot 10^{-2}$.

Файлы

ENDF/B-VI: взята из оценки выполненной для библиотеки ENDF/B-V (1974 год).

JEFF-3.1: взята из оценки выполненной для библиотеки ENDF/B-V (1974 год).

JENDL-3: оценка 1990 года.

CENDL-3: оценка 1999 года, ревизия 2001 года.

ENDF/B-VII: параметры в области разрешённых резонансов взяты из последней оценки С. Мугхабгхаба (Атлас-2006), в области неразрешённых резонансов – из JENDL-3 и оценка в области высоких энергий – из библиотеки CENDL-3.

Данные

Оценки JEFF-3.1 и ENDF/B-VI являются устаревшими. Оценка CENDL-3 (ENDF/B-VII) в быстрой области энергий основывается на результатах расчётов по современным моделям и наилучшим образом описывает последние экспериментальные данные. Файл содержит также полную оценку энерго-угловых распределений вторичных частиц.

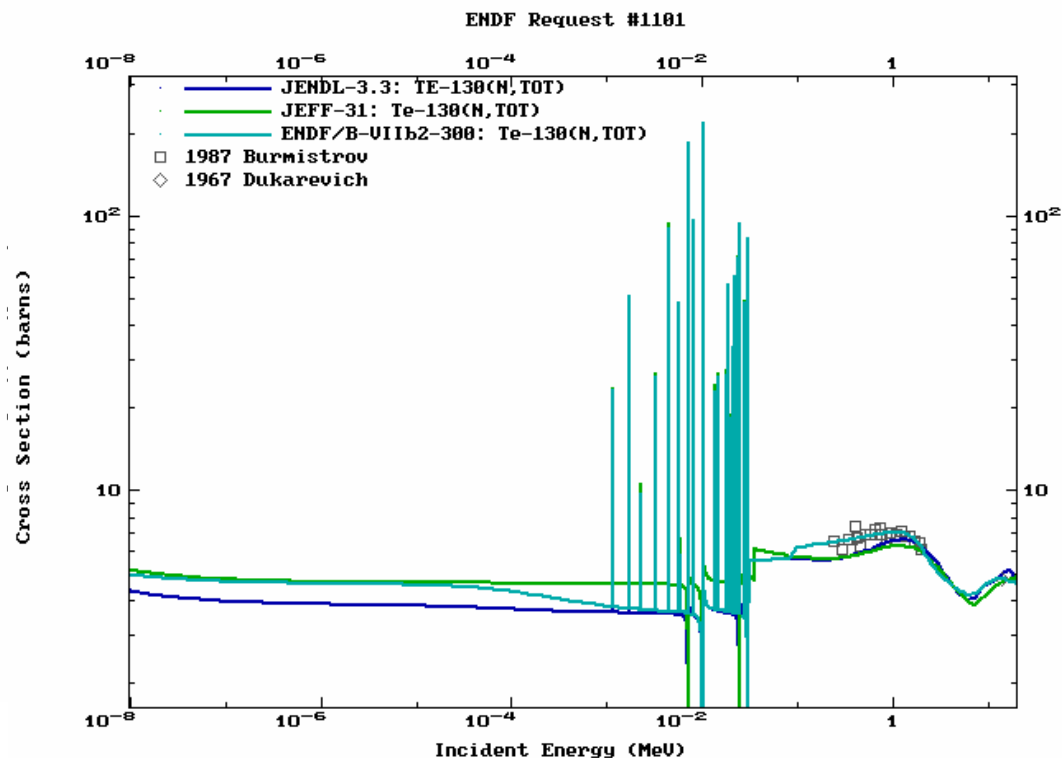


Рис. 23. Сравнение сечения захвата из библиотек JEFF-3.1, JENDL-3 и ENDF/B-VII с имеющимися экспериментальными данными.

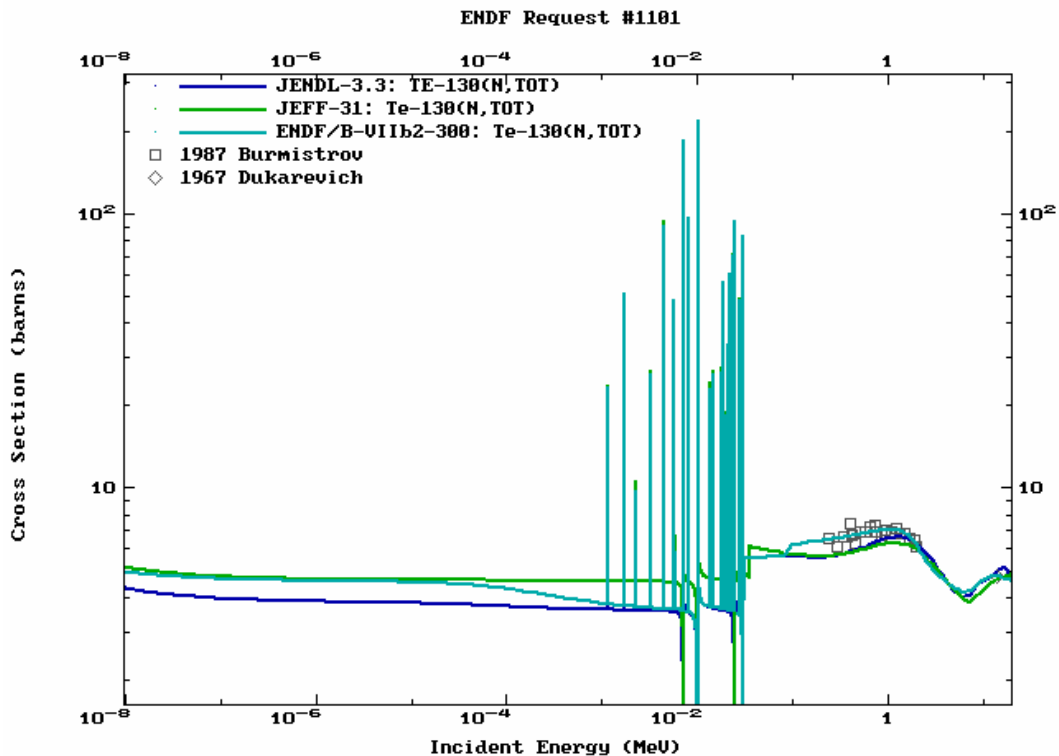


Рис. 24. Сравнение полного сечения из библиотек JEFF-3.1, JENDL-3 и ENDF/B-VII с имеющимися экспериментальными данными.

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из CENDL-3 с новыми резонансными параметрами С. Мугхабгхаба (Атлас-2006) для включения в состав международной библиотеке для осколков деления. Эта рекомендация выполнена при формировании библиотеки ENDF/B-VII. При этом, область разрешённых резонансов и их полное число не изменились, переоценены характеристики некоторых резонансов. На рисунках 23 и 24 показано сравнение оценённых сечений захвата и полного из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными. ENDF/B-VII (CENDL-3) наилучшим образом описывает полное сечение.

Файл ^{130}Te из библиотеки ENDF/B-VII рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹⁶.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

52.17. Теллур-131-м

Радиоактивен ($T_{1/2}=30$ ч.). Испытывает бета-распад в йод-131 (77.8%) или изомерный переход в основное состояние, распадающееся в тот же йод-131.

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $-6.08 \cdot 10^{-3}$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003

¹⁶ Включить дополнительно файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{129}\text{Te}^m$ и $^{131}\text{Te}^m$ в реакциях MT= 16 и 102, используя данные из EAF-2003. Файлу присвоить MAT=5230.- М.Н.Николаев.

содержится оценка нейтронных сечений. Экспериментальных данных для валидации оценки не имеется. Из данных оценки следуют следующие значения теплового сечения захвата и резонансного интеграла:

$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=12.9$ барна

$RI_c=24.9$ барна.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Сформировать файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{129}\text{Te}^m$ в реакции MT=17. Секцию MT=4 с сечением образования короткоживущего основного состояния перенести из файла MF=3 в MF=10. Файл MF=8 опустить. Файлу присвоить MAT=5211.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

52.18. Теллур-132

Период полураспада: (3.204 ± 0.013) дня.

Моды распада: $\beta = 100\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $-4.63 \cdot 10^{-2}$.

Файлы

ENDF/B-VI: взята из оценки выполненной для библиотеки ENDF/B-V (1974 год).

JEFF-3.1: взята из оценки выполненной для библиотеки ENDF/B-V (1974 год).

ENDF/B-VII: новейшая оценка выполненная в 2006 году.

Данные

Оценки JEFF-3.1 и ENDF/B-VI являются устаревшими. Оценка ENDF/B-VII в быстрой области энергий основывается на результатах расчётов по современным моделям и систематикам параметров. Файл содержит также полную оценку энерго-угловых распределений вторичных частиц. Параметры разрешённых резонансов симулированы исходя из систематик средних резонансных параметров. Основные сечения из файла библиотеки ENDF/B-VII показаны на рисунке 25. Оценка несомненно является наилучшей из всех доступных тех которые можно провести при полном отсутствии экспериментальных данных.

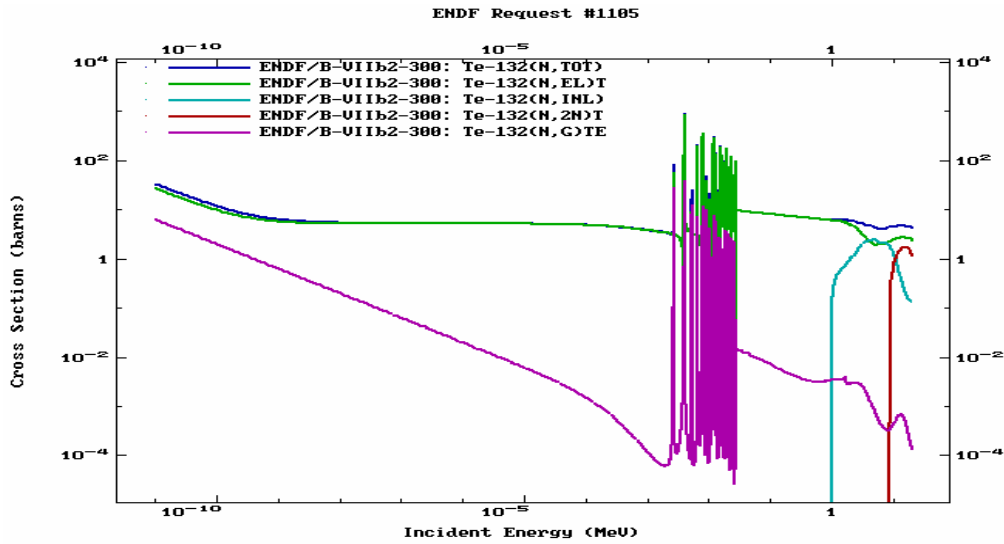


Рис. 24. Сравнение полного сечения из библиотек JEFF-3.1, JENDL-3 и ENDF/B-VII с имеющимися экспериментальными данными.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных для теллура-132 из ENDF/B-VII¹⁷.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

¹⁷ Включить дополнительно файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера ^{131m}Te в реакции MT= 16, используя данные из EAF-2003. Файлу присвоить MAT=5232.- М.Н.Николаев.

53.Йод

Замечание к оценке качества данных для осколков деления

Учитывая, что тяжелые изотопы йода являются важными продуктами деления, сделаем общие замечания по приоритетам к качеству данных. Наиболее важной областью энергий является область спектра нейтронов с максимальными нейтронными потоками в реакторах на тепловых и быстрых нейтронах, то есть около 0.0253 эВ и ниже 5 МэВ. Наиболее важными сечениями, выстроенными в порядке убывания важности являются интегральные сечения: захвата, полное сечение, сечение упругого рассеяния, неупругое рассеяния с возбуждением первых уровней и других пороговых сечений; дифференциальные данные: спектры вторичных нейтронов неупругого рассеяния и угловые распределения упруго рассеянных нейтронов.

53.1. Йод-124

Общие характеристики

Период полураспада: (4.176 ± 0.003) дней.

Моды распада: e^- 100%.

Спин основного состояния: 2^- .

Файлы оцененных данных

JEF-2.2 – оценка 1988 года файла для библиотеки данных по радиоактивному распаду полученная преобразованием данных из библиотеки ENSDF. Нейтронные сечения отсутствуют.

JEFF-3.1 – оценка 1997 года файла для библиотеки данных по радиоактивному распаду полученная преобразованием данных из библиотеки ENSDF. Нейтронные сечения отсутствуют.

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3.

Заключение

Все нейтронные сечения для ^{124}I из JEFF-3.1/A, имеющие значения выше 10^{-5} барн, приведены на рисунке 1. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей. Файл ^{124}I из библиотеки JEFF-3.1 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹.

¹ В файле РОСФОНДа парциальные сечения реакций, приведенные в JEFF-3.1/A (EAF-2003) в файле MF=10, просуммированы и суммы приведены в секциях MT=22, 28, 33, 104 и 106 файла MF=3. Данные о вероятностях образования теллура-123 в основном и долгоживущем изомерном состояниях включены в файл MF=9(секции MT=28 и MT-104). Файл MF=10 удален. – М.Н.Николаев.

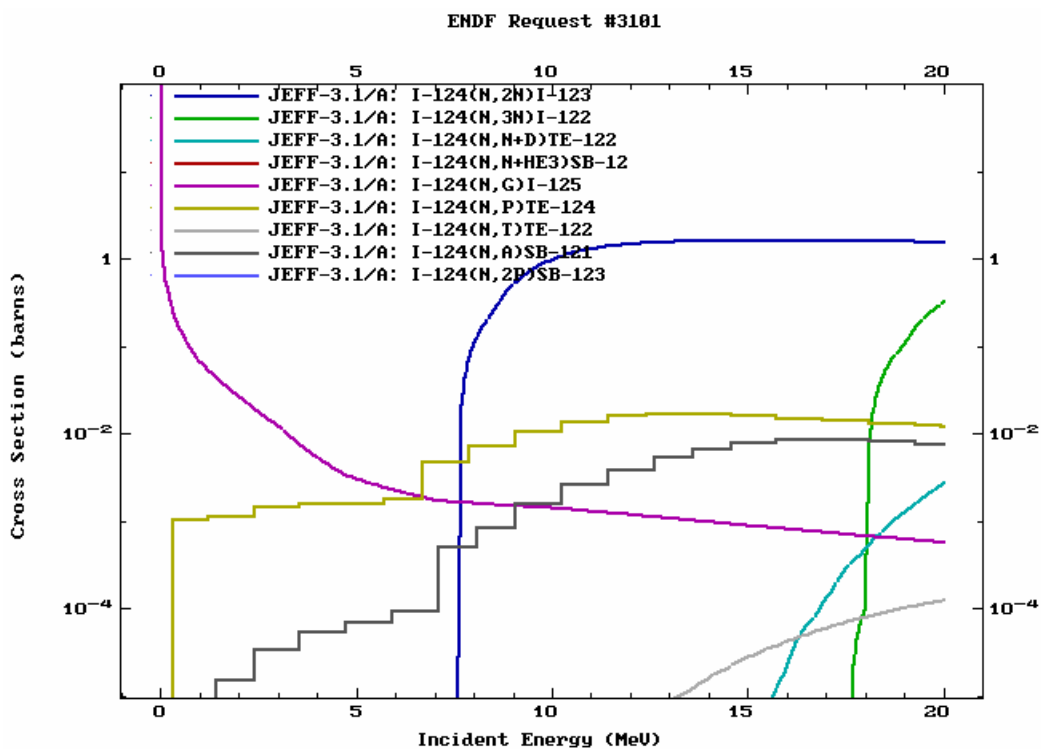


Рис. 1. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

53.2. Йод-125

Общие характеристики

Период полураспада: (59.400 ± 0.010) дней.

Моды распада: e^- 100%.

Спин основного состояния: $5/2^+$.

Файлы

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3.

Рекомендация

Все нейтронные сечения для ^{125}I из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-5} барн приведены на рисунке 1. Тепловое сечение захвата (894 барн) хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными: 894 ± 90 барн ($X4=20629$, Бресести, 1964) и 890 барн ($X4=12046$, Харпер, 1961), а резонансный интеграл захвата рассчитанный по программе PSYCHE7.1 равный 14838 барн не противоречит имеющемуся экспериментальному 13730 ± 2000 барн ($X4=20629$, Бресести, 1964). Сечения на рисунке 2

не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей. Файл ^{125}I из библиотеки JEFF-3.1 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД².

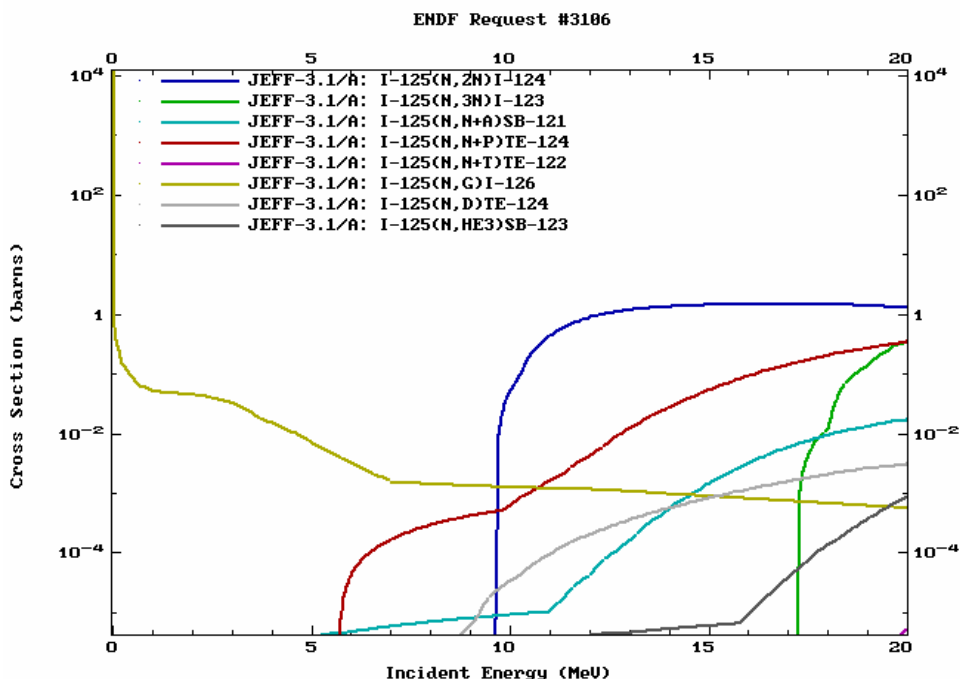


Рис. 2. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A (EAF-2003).

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

53.3. Йод-126

Общие характеристики

Период полураспада: (12.93 ± 0.05) дней.

Моды распада: e^- 52.7%, β^- 47.3%.

Спин основного состояния: 2^- .

Файлы

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3.

Рекомендация

Все нейтронные сечения для ^{126}I из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-5} барн приведены на рисунке 1. Тепловое сечение захвата (6192 барн) хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными: 9000 ± 5000 барн ($X_4=10546$, Элгарт, 1975) и 5960 барн ($X_4=10728$, Элгарт, 1971), а резонансный интеграл захвата рассчитанный по

² В файле РОСФОНДа парциальные сечения реакций, приведенные в JEFF-3.1/A (EAF-2003) в файле MF=10, просуммированы и суммы приведены в секциях MT=22, 28, 33, 104 и 106 файла MF=3. Данные о вероятностях образования теллура-123 и теллура-125 в основном и долгоживущем изомерном состояниях (секции MT=32, 105 и MT=103) включены в файл MF=9. Файл MF=10 удален. – М.Н.Николаев.

программе PSYCHE7.1 равный 41023 барн не противоречит имеющемуся экспериментальному 40600 барн ($X4=10728$, Элгарт, 1971). Сечения на рисунке 3 не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей. Файл ^{126}I из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД³.

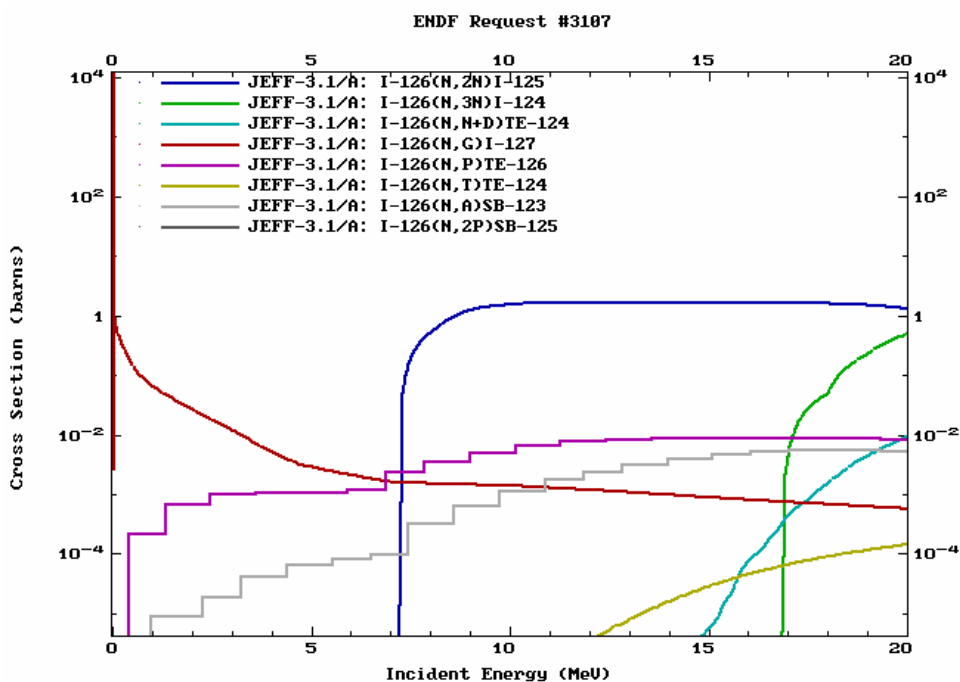


Рис. 3. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

³ В файле РОСФОНДа парциальные сечения реакций, приведенные в JEFF-3.1/A (EAF-2003) в файле MF=10, просуммированы и суммы приведены в сечениях MT=22, 28, 33, 104, и 106 файла MF=3. Данные о вероятностях образования теллура-125 в основном и долгоживущем изомерном состояниях включены в файл MF=9(секции MT=28 и MT-104). Файл MF=10 удален. – М.Н.Николаев.

53.4. Йод-127

Общие характеристики

Содержание в естественной смеси: 100%.

Спин основного состояния: $5/2^+$.

Файлы

ENDF/B-VI – оценка 1991 года основанная в резонансной области (до 1 кэВ) на параметрах оцененных Мугхабгхабом (1981) в формализме многоуровневого Брейт-Вигнера (MLBW). В интервале энергий 1 кэВ – 30 МэВ оценка основана на модельных расчётах.

JEFF-2 – оценка 1983 года, базируется в резонансной области энергий (ниже 2.02 кэВ) на параметрах оцененных Мугхабгхабом (1981) с их некоторой ревизией, включая параметры отрицательного резонанса. Сечения в области неразрешённых резонансов 2.02 – 60 кэВ заданы через средние резонансные параметры. Результаты модельных расчётов приведены в качестве оценки в интервале энергий 60 кэВ – 20 МэВ.

JENDL-3.2 – оценка 1990 года, основана на модификации оценки JENDL-2. MLBW анализ экспериментальных данных выполнен в области разрешённых резонансов до энергии в 2 кэВ. Область неразрешённых резонансов с учётом конкуренции со стороны неупругого рассеяния задана от 2 до 100 кэВ. Результаты модельных расчётов в области энергий от 100 кэВ до 20 МэВ.

CENDL-3 – оценка 1999 года с параметрами разрешённых и неразрешённых резонансов взятыми из JENDL-3.2. Результаты модельных расчётов в интервале энергий от 100 кэВ до 20 МэВ.

ENDF/B-VII – оценка 2005 года основанная на новой оценке резонансных параметров (Мугхабгхаб 2006) в области разрешённых резонансов до энергии 4.05 кэВ и оценке ENDF/B-VI для более высокой энергии.

Тепловая и резонансная области энергий

Оценка ENDF/B-VII в тепловой и резонансной области энергий является наилучшей. Она покрывает широкую область энергий до 4.05 кэВ. Значение интеграла резонансного захвата на несколько процентов больше, чем в других библиотеках. Анализ статистических распределений уровней и ширин показывает небольшой пропуск очень узких резонансов в s- волне, лишний уровень с аномально большой шириной и недостаток большого числа уровней с малыми нейтронными ширинами в p-волне. Однако эти недостатки не влияют существенным образом на значения средних сечений в резонансной области. Тепловые сечения в разных библиотеках отличаются незначительно.

Область быстрых нейтронов

Одногрупповое сечение захвата усреднённое по спектру нейтронов быстрого реактора в оценке ENDF/B-VII (ENDF/B-VI) на 20% выше чем в других оценках. Это отличие обусловлено более высоким сечением захвата в библиотеке ENDF/B-VII чем в других библиотеках в области энергий нейтронов от нескольких кэВ до сотен кэВ. Сравнение сечений захвата в области энергий выше 20 кэВ показано на рисунке 4. Более детальное сравнение для ENDF/B-VII с имеющимися данными приведено на рисунке 5. Существующий разброс экспериментальных данных (30% и выше) не позволяет сделать вывод о том какая оценка является более предпочтительной.

Полное сечение в библиотеке ENDF/B-VII хорошо согласуется с экспериментальными данными в быстрой области энергий (рисунок 6), разброс в оценках в 10 – 20% обусловлен используемыми в расчётах оптическими потенциалами.

Вклад прямых процессов в неупругое рассеяние (рисунок 7) учитывался только в библиотеках ENDF/B-VII и CENDL-3. Независимые оценки ENDF/B-VII и CENDL-3 близки друг к другу, хотя оценка вклада прямых процессов в CENDL-3 несколько занижена. В то же время, сравнение для сечения (n,2n) (рисунки 8 и 9) показывает, что оценка CENDL-3 лучше согласуется с последними экспериментальными данными, чем ENDF/B-VII. Энерго-угловые распределения вторичных частиц наилучшим образом представлены в файле MF=6 библиотеки ENDF/B-VII.

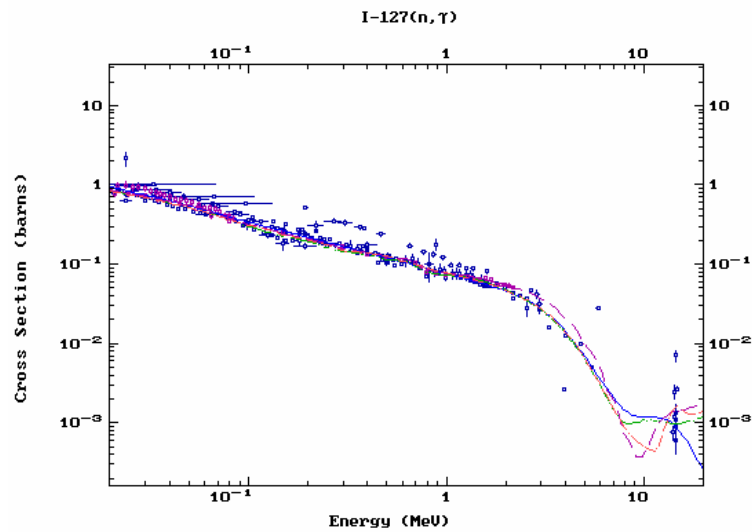


Рис. 4. Сравнение сечений захвата из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными (показаны одинаковым значком для всех работ без ссылок). Сплошная (голубая) линия - ENDF/B-VII, штрих-пунктирная (зелёная) линия - JENDL-3.2, пунктирная (фиолетовая) - JEF-2, короткие пунктиры (красная) - CENDL-3.

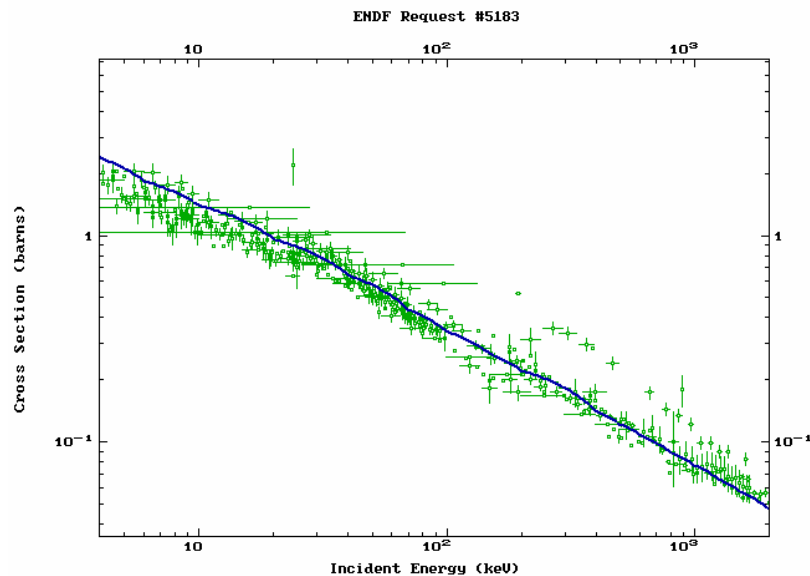


Рис. 5. Сравнение сечений захвата из библиотеки ENDF/B-VII (сплошная голубая линия) с имеющимися экспериментальными данными (показаны одинаковым значком для всех работ без ссылок).

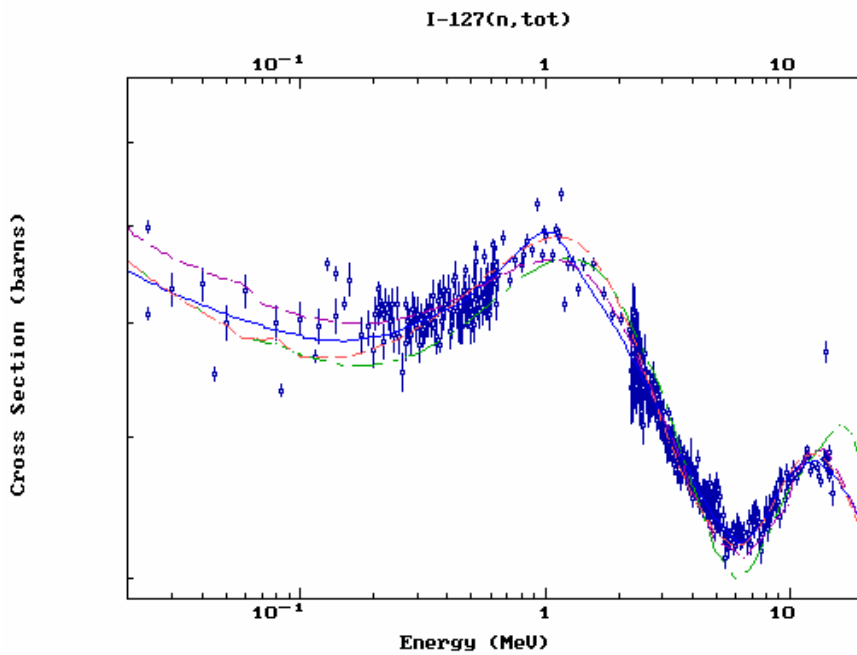


Рис. 6. Сравнение полного сечения из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными (показаны одинаковым значком для всех работ без ссылок). Сплошная (голубая) линия - ENDF/B-VII, штрих-пунктирная (зелёная) линия - JENDL-3.2, пунктирная (фиолетовая) - JEF-2, короткие пунктиры (красная) - CENDL-3.

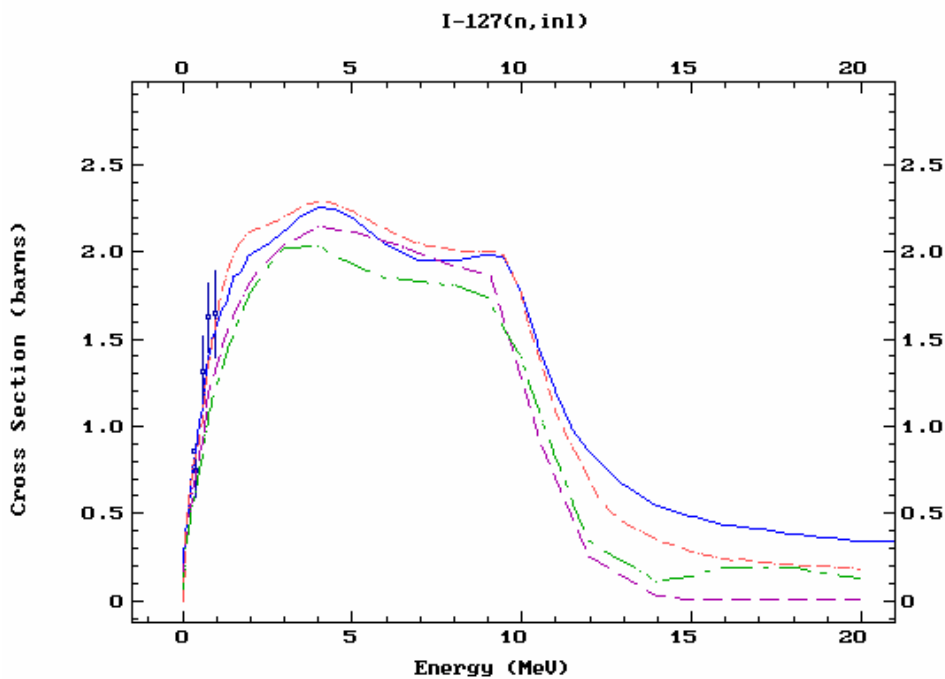


Рис. 7. Сравнение сечения неупругого рассеяния из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными (показаны одинаковым значком для всех работ без ссылок). Сплошная (голубая) линия - ENDF/B-VII, штрих-пунктирная (зелёная) линия - JENDL-3.2, пунктирная (фиолетовая) - JEF-2, короткие пунктиры (красная) - CENDL-3.

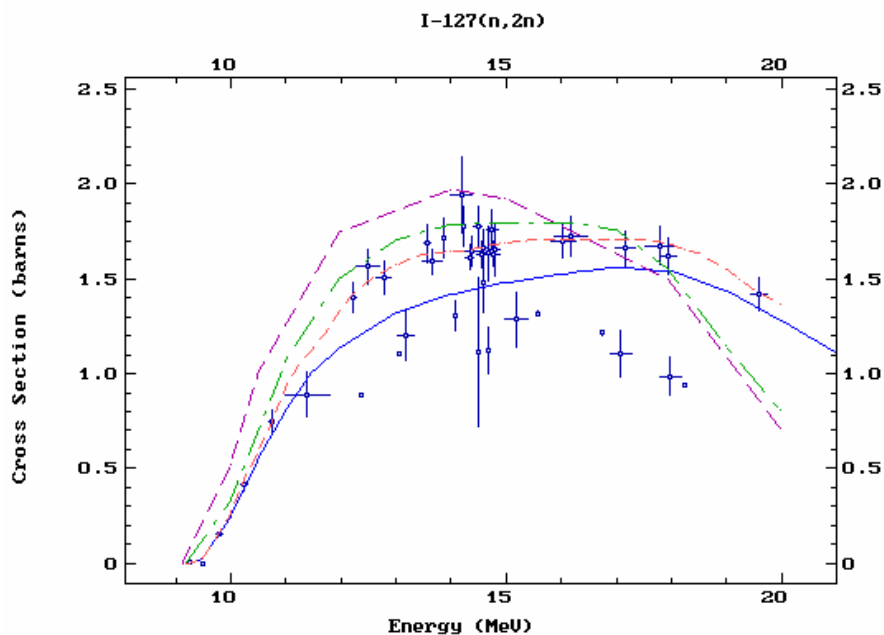


Рис. 8. Сравнение сечения реакции (n,2n) из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными (показаны одинаковым значком для всех работ без ссылок). Сплошная (голубая) линия - ENDF/B-VII, штрих-пунктирная (зелёная) линия - JENDL-3.2, пунктирная (фиолетовая) - JEF-2, короткие пунктиры (красная) - CENDL-3.

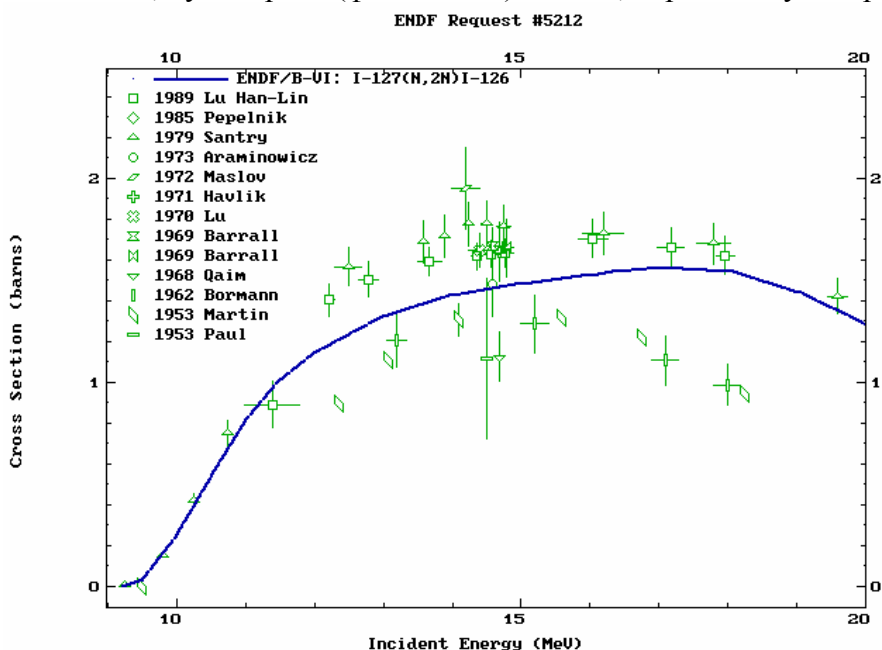


Рис. 9. Сравнение сечения реакции (n,2n) из разных библиотеки ENDF/B-VI (ENDF/B-VII) с имеющимися экспериментальными данными.

Рекомендация

Оценка из библиотеки ENDF/B-VII рекомендуется для включения в библиотеку РОСФОНД⁴.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

⁴ В РОСФОНДе из файла MF=9 исключена секция MT=107 поскольку изомеры сурьмы-124, вероятности которых описываются в этой секции, имеют короткие времена жизни. Исключен также файл MF=8, поскольку РОСФОНД не предусматривает рекомендацию распадных данных.

53.5. Йод-129

Общие характеристики

Период полураспада: $(1.57 \pm 0.04) \cdot 10^7$ лет.

Моды распада: β 100%.

Спин основного состояния: $7/2^+$.

Файлы

ENDF/B-VI – оценка 1980 года, основанная в резонансной области (до 166.72 эВ) на параметрах оцененных Мугхабгхабом (1981) в формализме одноуровневого Брейт-Вигнера (SLBW). В интервале энергий 166.72 эВ – 20 МэВ оценка основана на модельных расчётах.

JEF-2 – оценка 1991 года с областью разрешённых резонансов до 3.4 кэВ. Полный спин для s- резонансов с неизвестным спином приписывался случайным образом с сохранением правила $(2J+1)$. Область неразрешённых резонансов задана от 3.4 до 25 кэВ, а для более высоких энергий в оценке использовались результаты модельных расчётов по статистической и предравновесной модели.

JENDL-3.2 – оценка 1984 года, модифицированная в 1990 году. Область разрешённых резонансов со 127 MLBW s- резонансами расположена до 3.4 кэВ. Резонансам с неизвестным полным спином был приписан спин методом случайных чисел с учётом $(2J+1)$ зависимости и с сохранением приведённых ширин и захватных площадей. Параметры в области неразрешённых резонансов (3.4 кэВ – 100 кэВ) подбирались из наилучшего описания экспериментальных данных по полному сечению и сечению захвата. Результаты модельных расчётов использовались в оценке для энергий нейтронов выше 100 кэВ. В библиотеке JENDL-3.3 взята оценка JENDL-3.2 без каких-либо изменений.

BROND-2 – оценка 1985 года с 66 MLBW s- резонансами в резонансной области (и приписанным фиктивным полным спином равным спину ядра-мишени) лежащей до 2 кэВ и взятыми из оценки Мугхабгхаба (1981) и экспериментальных данных Маклина (1983). Область неразрешённых резонансов задана от 2 до 500 кэВ с параметрами подобранными из описания экспериментальных данных. Результаты расчётов по оптической и статистической моделям для энергий от 500 кэВ до 20 МэВ.

CENDL-3 – оценка 2001 года с параметрами разрешённых и неразрешённых резонансов взятыми из JENDL-3.2. Результаты расчётов по оптической, статистической и предравновесной модели с учётом вклада прямых процессов в интервале энергий от 100 кэВ до 20 МэВ.

ENDF/B-VII – оценка Мугхабгхаба 2006 года параметров разрешённых резонансов в области энергий до 3.4 кэВ (s- и p- резонансы) объединённая с оценкой JENDL-3.2 для области неразрешённых резонансов и быстрой области энергий.

Тепловая и резонансная области энергий

Сечение упругого рассеяния в тепловой точке (10.23 барн) также как и полное сечение (40.63 барн) вероятно слишком высоки. Экспериментальные данные Р. Блока для полного сечения 35.8 ± 4.0 барн дают оценку для сечения упругого рассеяния в тепловой точке в 4.8

барна. Как кажется, вклад гладкого фонового сечения от неупругого рассеяния в области неразрешённых резонансов не согласовано с ширинами неупругого рассеяния приведёнными в области разрешённых резонансов. Каких-либо данных для переоценки параметров в области разрешённых резонансов не существует.

Тепловые сечения (барны при энергии в 0.0253 эВ) из разных библиотек приведены ниже в таблице:

| Сечение | ENDF/B-VI | ENDF/B-VII | JEF-2 | JENDL-3.2 (и 3.3) | BROND-2 | CENDL-3 |
|---------|-----------|------------|--------|----------------------|---------|---------|
| Полное | 31.562 | 40.63 | 42.473 | 33.502 | 33.924 | 33.502 |
| Упругое | 4.560 | 10.23 | 8.571 | 6.496 | 7.012 | 6.496 |
| Захвата | 27.002 | 30.40 | 33.902 | 27.006 | 26.912 | 27.006 |

Измерения Блока (1960, X4=12024) полного сечения выполнены в 14 точках по энергии между 0.0253 эВ и 0.0453 эВ. Так как полное сечение в этой области с большой вероятностью может быть представлено как $\sigma(\text{tot}) = \sigma(\text{elastic}) + \sigma(\text{capture}) = S1 + S2/\sqrt{E_n}$ (где S1 и S2 являются константами), то простая оценка для энергии 0.0253 эВ даёт значение для полного сечения 35.4 барн с ошибкой около 3%. Все оценки (исключая JEF-2 и ENDF/B-VII) дают для теплового сечения захвата величину близкую к 27 барн, рекомендованную Мугхабгхабом (1981) и лишь на 5% ниже значения, которое может быть получено из измерений Блока. Однако, оценка ENDF/B-VII основывается на новой оценке Мугхабгхаба (2006) выполненной как для тепловой области, так и для области разрешённых резонансов и близка к значению 30.3 ± 1.2 барн полученном в последних измерениях Накамуры (X4=22819, 1996). Хотя число резонансов в оценках ENDF/B-VII и JENDL-3.2 близко, в JENDL-3.2 они представлены только s- резонансами, а в ENDF/B-VII заданы через 84 s- и 41 p- резонанса. Их анализ показывает большие пропуски резонансов и распределения ширин и расстояний между уровнями далёкими от статистических, а также к понижению сечения захвата в области разрешённых резонансов в ENDF/B-VII по сравнению с JENDL-3.2.

Хотя одnogрупповые сечения захвата усреднённые по спектру быстрого реактора отличаются лишь на 5% в разных библиотеках, это является результатом усреднения по широкой области энергий. Оценка JENDL-3.2 выше оценки ENDF/B-VI на 20 – 30% для энергий выше 6 кэВ и проходит по результатам измерений Маклина (X4=12806, 1983) выполненных с плохим разрешением. Новые экспериментальные данные Ногуре (X4=22868, 2004) хорошо согласуются с данными Маклина и показывают, что оценка сечения захвата в JENDL-3.2 возможно лишь немного завышена (рисунки 10 и 11). Учитывая, что оценка ENDF/B-VII получена объединением новой оценки в области разрешённых резонансов выполненной Мугхабгхабом (2006) и оценки JENDL-3.2 для области неразрешённых резонансов, хорошо описывающей экспериментальные сечения в этой области, она может быть рекомендована для включения в библиотеку РОСФОНД.

Область быстрых нейтронов

Для области быстрых нейтронов экспериментальные данные существуют только для реакции (n,2n). ENDF/B-VI и BROND-2 не содержат оценку (n,2n). Как видно (рисунок 12) все остальные оценки за исключением JEF-2 достаточно хорошо описывают экспериментальные данные. Полное и упругое сечение в разных библиотеках отличается на 10%. Сечения неупругого рассеяния с возбуждением дискретных уровней наилучшим образом, с учётом вкладов всех механизмов реакций, оценены в CENDL-3, но имеющийся

разрыв между последним дискретным уровнем (1.1116 МэВ) и порогом континуума уровней (2.4 МэВ) является существенным недостатком оценки неупругого рассеяния. Сечения всех остальных пороговых реакций являются незначительными. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов наилучшим образом представлены в библиотеке JENDL-3.2.

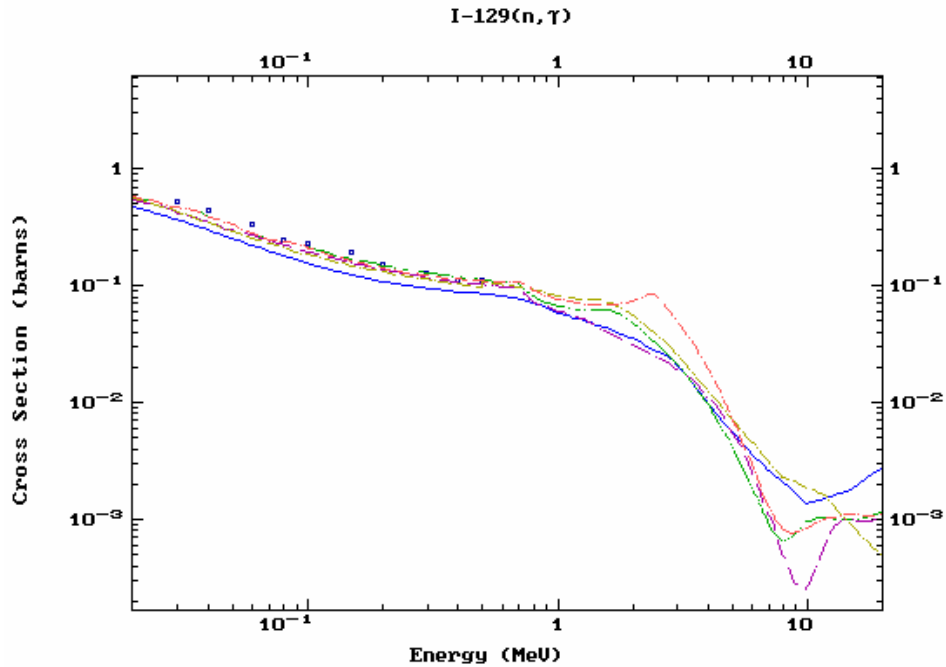


Рис. 10. Сравнение сечений захвата из разных библиотек с экспериментальными данными Маклина (X4=12806, 1983). Сплошная (голубая) линия - ENDF/B-VI, штрих-пунктирная (зелёная) линия - JENDL-3.2, пунктирная (фиолетовая) - JEF-2, короткие пунктиры (красная) - CENDL-3.

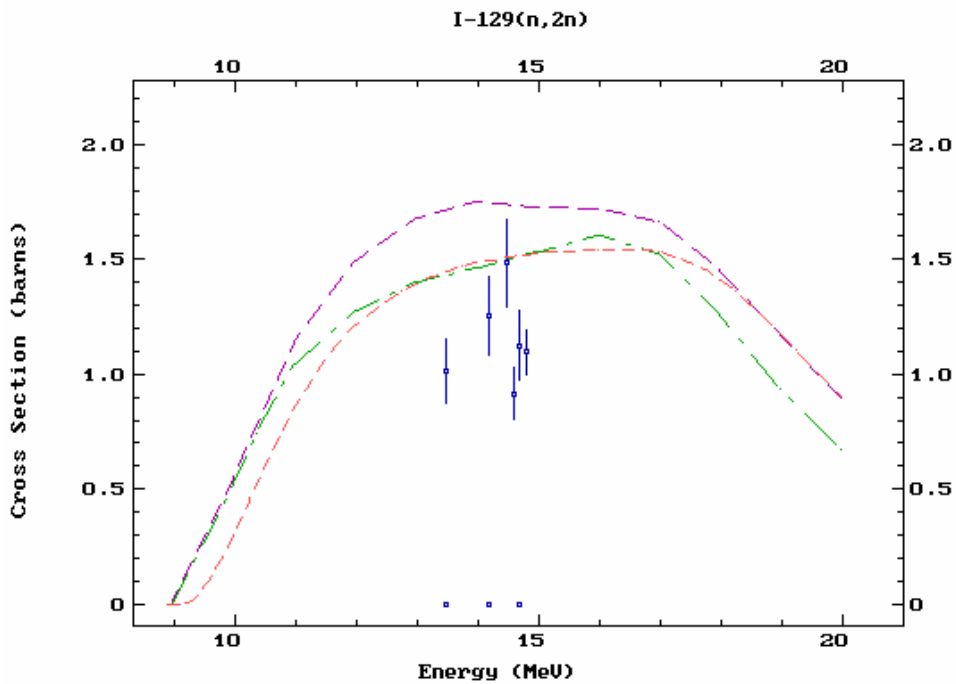


Рис. 11 Сравнение сечения реакции (n,2n) из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными (показаны одинаковым значком для всех работ без ссылок). Штрих-пунктирная (зелёная) линия - JENDL-3.2 (и ENDF/B-VII), пунктирная (фиолетовая) - JEF-2, короткие пунктиры (красная) - CENDL-3.

Рекомендация

Оценка из библиотеки ENDF/B-VII рекомендуется для включения в библиотеку РОСФОНД⁵.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

53.6. Йод-131

Общие характеристики

Период полураспада: 8.0207 дн.

Моды распада: β 100%.

Спин основного состояния: 7/2+

Файлы оцененных нейтронных данных

Имеются две независимых оценки – первая 1982 г. выполненная рабочей группой для библиотеки JEF-2, вошла без изменений в JEFF-3.1 и послужила основой для нейтронных сечений основных реакций в библиотеке EAF-2003.

Вторая оценка выполненная другой рабочей группой в 1990 г. для библиотеки JENDL-3, в 2005 г. вошла без существенных изменений в библиотеку ENDF/B-VIIb2. В последней оценке сечения, в частности сечение захвата, описываются средними параметрами неразрешенных резонансов в интервале от 30 эВ до 100 кэВ; ниже 30 эВ сечение захвата подчиняется закону $1/v$ при тепловом сечении 80 барн. Резонансный интеграл захвата равен 77.8 барн; тепловое сечение рассеяния – 3.6 барн. В оценке, принятой в JEFF-3.1, тепловое сечение захвата равно всего лишь 0.7 барна, а резонансный интеграл захвата -8 барн. Различие в оцененных энергетических поведениях сечения захвата показано на рис.12.

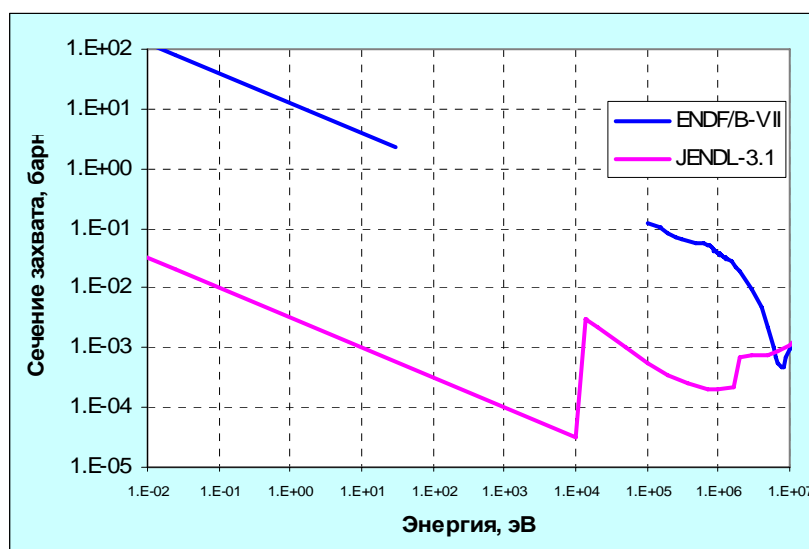


Рис.12. Сечение захвата йода-131
(в области неразрешенных резонансов кривая прерывается)

⁵ В РОСФОНДе из файла MF=9 исключена секция MT=107 поскольку изомеры сурьмы-124, вероятности которых описываются в этой секции, имеют короткие времена жизни. Исключен также файл MF=8, поскольку РОСФОНД не предусматривает рекомендацию распадных данных.

Заключение

Оснований утверждать, что вторая оценка намного надежнее первой, разумеется, нет. Тем не менее, представляется целесообразным включить в РОСФОНД более позднюю оценку из ENDF/B-VIIb2, дополнив ее данными об образовании долгоживущих изомеров, оцененными на основе EAF-2003.

Автор рекомендации

М.Н.Николаев

53.7. Йод-135

Общие характеристики

Период полураспада: 6.57 ч.

Моды распада: β 100%.

Спин основного состояния: 7/2+

Распадается в ксенон-135 с аномально высоким сечением захвата тепловых нейтронов.

Файлы оцененных нейтронных данных

Имеются две независимых оценки – первая 1982 г. выполненная рабочей группой для библиотеки JEF-2, вошла без изменений в JEFF-3.1 и послужила основой для нейтронных сечений основных реакций в библиотеке EAF-2003.

Вторая оценка выполненная другой рабочей группой в 1990 г. для библиотеки JENDL-3, в 2005 г. вошла без существенных изменений в библиотеку ENDF/B-VIIb2. В последней оценке сечения, в частности сечение захвата, описываются средними параметрами неразрешенных резонансов в интервале от 30 эВ до 100 кэВ; ниже 30 эВ сечение захвата подчиняется закону $1/v$ при тепловом сечении 80 барн. Резонансный интеграл захвата равен 34.6 барн; тепловое сечение рассеяния – 10.13 барн. В оценке, принятой в JEFF-3.1, тепловое сечение захвата равно всего лишь 0.02 барна, а резонансный интеграл захвата – 0.15 барн. Различие в оцененных сечениях захвата показано на рис.13. Заметим, что сечение захвата, принятое в JEFF-3.1 по крайней мере на порядок ниже, чем у близких к йоду-135 нейтронно-избыточных нечетно-четных ядер (например у цезия-135 $\sigma_c=8.9$ барн, у цезия-137 $\sigma_c=0.25$ барна).

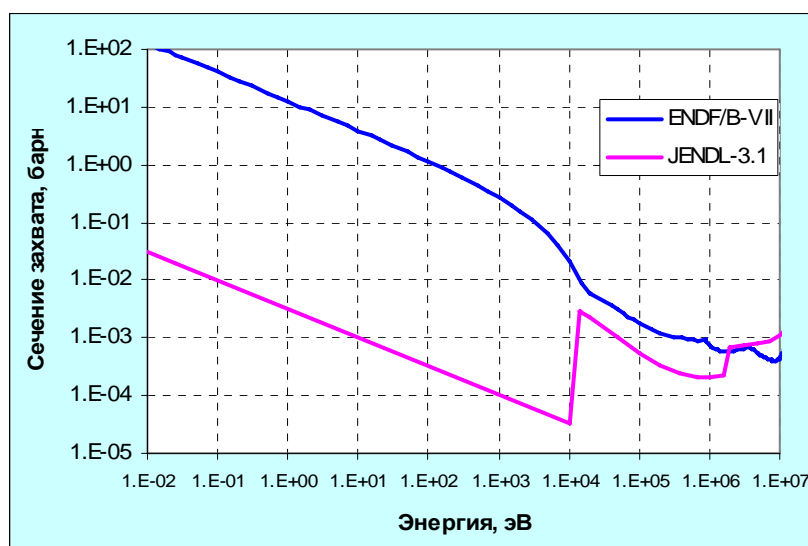


Рис.13. Сечение захвата йода-135

Заключение

Целесообразно включить в РОСФОНД более позднюю оценку из ENDF/B-VIIb2.

Автор рекомендации

М.Н.Николаев

54.КСЕНОН

54.0 Общие замечания

Известно 14 стабильных и долгоживущих изотопов и изомеров самария, из которых 9 сохранились в природе. Из оставшихся пяти четыре являются долгоживущими изомерами. Весьма существенен также сравнительно короткоживущий ^{135}Xe ($T_{1/2}=9.10\text{ч.}$) с гигантским сечением захвата тепловых нейтронов. Кроме него при делении ядер образуются еще 9 из упомянутых 15 нуклидов (из них три – изомеры).

Долгоживущий ^{127}Xe ($T_{1/2}=36.4\text{ дн.}$) образуются из природных изотопов в результате нейтронных реакций.

В библиотеке РОСФОНД представлены данные для всех 15 нуклидов. При обосновании выбора оцененных данных особое внимание уделялось ^{135}Xe , обладающему аномально высоким сечением поглощения тепловых нейтронов.

Нейтронные данные для изотопов и изомеров ксенона представлены в различных библиотеках со следующей полнотой:

ФОНД-2.2 – все 15 нуклидов (оценки 90-х годов).

БРОНД-2 – только ксенон-131.

JENDL-3.3 – 11 изотопов – стабильных или являющимися продуктами деления.

JEFF-3.1– 11 изотопов – стабильных или являющимися продуктами деления.

ENDF/B-VII b1.2 - 12 изотопов (включены данные для ^{123}Xe ($T_{1/2}=2.08\text{ ч.}$) из CENDL-3.

EAF-2003=JEFF-3.1(АСТ)- все 15 нуклидов, а также ^{123}Xe , оценки 2003 г. Приводятся только данные о нейтронных сечениях.

54.1. Ксенон-124

Содержание в природной смеси – 0.10%.

В ФОНД-2.2 и JENDL-3.3– одна и та же, выполненная рабочей группой в 1990г. Область разрешенных резонансов до 290 эВ (4 резонанса), неразрешенных – до 100 кэВ).

JEFF-3.1= M.R.Bhat and S.F.Mughanhab (ENDF/B-V), 1984 г. Область разрешенных резонансов до 375 эВ (4 резонанса), область неразрешенных резонансов отсутствует.

ENDF/B-VII b1.2 – оценка B.Yo, Q.Shen, S.F.Mughanhab 2000 – 2005. Сечения во всей области заданы поточечно.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется новейшая оценка B.Yo, Q.Shen, S.F.Mughanhab 2000 – 2005 (ENDF/B-VII b1.2). Дополнить оценку файлом MF=9, MT=107 с вероятностью образования Te-121m , используя данные EAF-2003.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

54.2. Ксенон-126

Содержание в природной смеси – 0.09%.

В ФОНД-2.2 и JENDL-3.3 – одна и та же, выполненная рабочей группой в 1990г. Область разрешенных резонансов до 485 эВ (1 резонанс при 460 эВ + связанное состояние), неразрешенных – до 100 кэВ).

JEFF-3.1 = M.R.Bhat and S.F.Mughanhab (ENDF/B-V), 1978 г. Область разрешенных резонансов до 485 эВ (3 резонанса из диссертации Рибона + связанное состояние; 2 резонанса сомнительны), область неразрешенных резонансов отсутствует.

ENDF/B-VII b1.2 – оценка W.F.Mughanhab 2005. Отличается от JENDL-3.3 расширением области разрешенных резонансов до 2334.5 эВ (4 резонанса + связанное состояние, причем первые два резонанса совершенно отличны от JEFF-3.1, а последний резонанс лежит при энергии 2332.5 эВ). Пересчитаны также энергетические спектры вторичных нейтронов реакций с возбуждением непрерывного спектра уровней ядра-продукта.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется новейшая оценка W.F.Mughanhab, 2005 (ENDF/B-VII b1.2). Введен дополнительный файл MF=9 с вероятностями образования $^{123}\text{Te}^g$ и $^{123}\text{Te}^m$ ($T_{1/2}=119.7$ дн.) в реакции (n, α). Вероятности оценены по данным EAF-2003.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

54.3. Ксенон-127

Радиоактивен: испытывает позитронный распад ($T_{1/2}=16.8$ дн.) в стабильный йод-127.

В ФОНД-2.2 – оценка J.Korecky, D.Nierop, 1992(EAF-3)

JEFF-3.1=EAF-2003 – оценка Forrest, Korecky, Sublet, Koning, 2003 г. Отличие от предыдущей версии состоит в пересмотре сечения захвата путем перерасчета по программе MASGAM с корректировкой на основе полуэмпирической систематики и введения небольшого вклада $1/v$ в сечение реакции (n, α) для лучшего согласия с экспериментальными данными.

В других библиотеках оцененных данных не содержится.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется новейшая оценка Forrest, Korecky, Sublet, Koning, 2003 г. (JEFF-3.1=EAF-2003) со следующими изменениями:

1. В файл MF=3 введены секции MT=17, 22 и 106 (данные получены путем суммирования подсекций соответствующих секций файла MF=10).

2. Введен файл MF=9 с вероятностями образования $^{125}\text{Te}^g$ и $^{125}\text{Te}^m$ ($T_{1/2}=119.7$ дн.) в реакции (n,n' α), а также $^{123}\text{Te}^g$ и $^{123}\text{Te}^m$ ($T_{1/2}=57.4$ дн.) в реакции (n, ^3He). Вероятности оценены по данным EAF-2003.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

54.4. Ксенон-128

Содержание в природной смеси – 1.91%.

В ФОНД-2.2 – та же оценка, что и в JENDL-3.3, с пересмотренными в 1999 г. В.н. Манохиным сечениями реакций (n,2n), (n,3n) и (n,p).

JENDL-3.3– оценка, выполненная рабочей группой в 1990г. Область разрешенных резонансов до 1700 эВ (10 резонансов, энергия последнего резонанса 2756 эВ), неразрешенных – до 100 кэВ.

JEFF-3.1= M.R.Bhat and S.F.Mughanhab (ENDF/B-V), 1978 г. Область разрешенных резонансов до 4000 эВ (10 резонансов из диссертации Рибона, энергия последнего резонанса 3441.3 эВ), область неразрешенных резонансов отсутствует.

ENDF/B-VII b1.2 – оценка W.F.Mughanhab 2005. Отличается от JENDL-3.3 расширением области разрешенных резонансов до 3500 эВ (14 резонансов + связанное состояние, последний резонанс лежит при энергии 3441.3 эВ). Пересчитаны также энергетические спектры вторичных нейтронов реакций с возбуждением непрерывного спектра уровней ядра-продукта.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется новейшая оценка W.F.Mughanhab, 2005 (ENDF/B-VII b1.2) со следующими изменениями:

1. Введен файл MF=9 с вероятностями образования $^{129}\text{Xe}^g$ и $^{129}\text{Xe}^m$ ($T_{1/2}=57.4$ дн.) в реакции (n, γ), а также $^{125}\text{Te}^g$ и $^{125}\text{Te}^m$ ($T_{1/2}=119.7$ дн.) в реакции (n, α). Вероятности оценены по данным EAF-2003.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

54.5. Ксенон-129^g

Содержание в природной смеси – 26.4%.

В ФОНД-2.2 – та же оценка, что и в JENDL-3.3, с пересмотренными в 1999 г. В.н. Манохиным сечениями реакций (n,2n) и (n,3n).

JENDL-3.3– оценка, выполненная рабочей группой в 1990г. Область разрешенных резонансов до 2700 эВ (70 резонансов, энергия последнего резонанса 4082 эВ), неразрешенных – до 100 кэВ.

JEFF-3.1= M.R.Bhat and S.F.Mughanhab (ENDF/B-V), 1978 г. Область разрешенных резонансов до 4200 эВ (те же 70 резонансов, что и в JENDL-3.3), область неразрешенных резонансов отсутствует.

ENDF/B-VII b1.2 – оценка S.F.Mughanhab 2005. Отличается от JENDL-3.3 расширением области разрешенных резонансов до 4100 эВ при том же числе тех же резонансов со слегка пересмотренными параметрами. Пересчитаны энергетические спектры вторичных нейтронов реакций с возбуждением непрерывного спектра уровней ядра-продукта.

Заключение

В РОСФОНД решено сохранить оценку из ФОНД-2.2 со следующими изменениями:

1. В области разрешенных и неразрешенных резонансов приняты параметры, оцененных Мухабхабом (сечение захвата тепловых нейтронов снизилось с 21.0 барн до 20.1 барн; резонансный интеграл снизился с 256 барн до 255 барн).

2. Введен файл MF=9 с вероятностями образования $^{125}\text{Te}^g$ и $^{125}\text{Te}^m$ ($T_{1/2}=119.7$ дн.) в реакции (n, p' α), а также $^{127}\text{Te}^g$ и $^{127}\text{Te}^m$ ($T_{1/2}=109$ дн.) в реакции (n, ^3He).

3. Введен файл MF=10 с MT=4 с сечением образования изомера $^{129}\text{Xe}^m$ ($T_{1/2}=8.89$ дн.)

Вероятности и сечение образования изомера оценены по данным EAF-2003.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

54.6. Ксенон-129^m

Долгоживущий изомер. Испытывает изомерный переход в основное состояние ($T_{1/2}=8.89$ дн.)

В ФОНД-2.2 – оценка J.Корецку, D.Nierop, 1992(EAF-3)

JEFF-3.1=EAF-2003 – оценка Forrest, Корецку, Sublet, Koning, 2003 г. Отличие от предыдущей версии состоит в пересмотре сечения (принята оценка JEF-2 вместо LEF-1)

В других библиотеках оцененных данных не содержится.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется новейшая оценка Forrest, Корецку, Sublet, Koning, 2003 г. (JEFF-3.1=EAF-2003) со следующими изменениями:

2. Введен файл MF=9 с вероятностями образования $^{125}\text{Te}^g$ и $^{125}\text{Te}^m$ ($T_{1/2}=119.7$ дн.) в реакции (n, p' α), а также $^{127}\text{Te}^g$ и $^{127}\text{Te}^m$ ($T_{1/2}=109$ дн.) в реакции (n, ^3He).

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

54.7. Ксенон-130

Содержание в природной смеси – 4.1%.

В ФОНД-2.2 – та же оценка, что и в JENDL-3.3, с пересмотренными в 1999 г. В.Н. Манохиным сечениями реакций (n,2n), (n,3n) и (n,p).

JENDL-3.3– оценка, выполненная рабочей группой в 1990г. Область разрешенных резонансов до 3600 эВ (17 резонансов, энергия последнего резонанса 3564 эВ), неразрешенных – до 100 кэВ.

JEFF-3.1= M.R.Bhat and S.F.Mughanhab (ENDF/B-V), 1978. Область разрешенных резонансов до 4000 эВ (12 резонансов, энергия последнего резонанса 3563.9 эВ), область неразрешенных резонансов отсутствует.

ENDF/B-VII b1.2 – оценка M.R.Bhat and S.F.Mughanhab 2005. Область разрешенных резонансов до 4000 эВ (19 s-резонансов и 2 p-резонанса, энергия последнего резонанса 3563.9 эВ), область неразрешенных резонансов отсутствует. Отличия от JENDL-3.3:

Во внерезонансной области сечения всех реакций пересчитаны заново.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) | (n,p) | (n, α) |
|---------------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|----------------|---------------|----------------|
| 0.0253 эВ | 11.04 | 6.26 | 0.000 | | | 4.777 | | |
| | 40.54 | 14.54 | 0.000 | | | 26.001 | | |
| Резонансный интеграл | 110.45 | 105.75 | 0.000 | | | 4.693 | | |
| | 157.53 | 140.24 | 0.000 | | | 17.299 | | |
| Спектр деления ^{235}U | 5.97 | 4.62 | 1.305 | 0.003 | 0.000 | 0.040 | 0.0000 | 0.0000 |
| | 5.88 | 4.78 | 0.998 | 0.002 | 0.000 | 0.101 | 0.0000 | 0.0000 |
| 14 МэВ | 4.92 | 2.95 | 0.053 | 1.910 | 0.000 | 0.000 | 0.0059 | 0.0003 |
| | 4.98 | 3.25 | 0.175 | 1.544 | 0.000 | 0.001 | 0.0073 | 0.0001 |

Изменение явилось следствием резкого сокращения радиационных ширин резонансов (с 0.1 – 0.2 эВ до 0.06 эВ). Изменены также параметры связанного состояния. Заметим, что в EXFOR в 2004 содержатся два разных результата измерения сечения захвата тепловых нейтронов: J.Masnamaga в 1950 г. получил 5 барн; T.Eastwood в 1963 г. – 26 барн. Основания для кардинального пересмотра сечений в тепловой и резонансной областях будут изложены во вскоре выходящей работе Мухабхаба¹.

Заключение

В РОСФОНД решено принять новую оценку M.R.Bhat and S.F.Mughanhab 2005 (ENDF/B-VII b1.2) с дополнением ее файлом MF=9 с вероятностями образования $^{127}\text{Te}^g$ и $^{127}\text{Te}^m$ ($T_{1/2}=109$ дн.) в реакции (n, α), $^{129}\text{Xe}^g$ и $^{129}\text{Xe}^m$ ($T_{1/2}=8.89$ дн.) в реакции (n,2n) и $^{131}\text{Xe}^g$ и $^{131}\text{Xe}^m$ ($T_{1/2}=11.9$ дн.) в реакции (n, γ). Вероятности оценены по данным EAF-2003.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

¹ S.F.Mughabghab: Atlas of Neutron Resonances, to be published by Elsevier, 2006 (5-th edition of BNL-325)

54.8. Ксенон-131^g

1. Общие характеристики

1.1. $Z=54$ (заряд)

1.2. $A=131$ (атомный номер)

1.3. $A_w=129.781$ (отношение массы ядра к массе нейтрона)

1.4. Содержание в естественной смеси $21.232\pm 0.062\%$

1.5. Спин основного состояния $3/2^+$

1.6. Имеется метастабильное состояние: $11/2^-$, $E_{lev}=0.163930\pm 0.000008$ МэВ;
 $T_{1/2}=11.934\pm 0.021$ дней

2. Файлы библиотек

ENDF/B-VI: оценка 1978 года, взятая из ENDF/B-V, последняя ревизия выполнена в 1999 году;

BROND-2: оценка 1985 года (24 резонанса, энергия последнего резонанса 1302.8 эВ), неразрешенных – до 80 кэВ.

ФОНД-2.2 – та же оценка, что и в JENDL-3.3, с пересмотренными в 1999 г. В.Н. Манохиным сечениями реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$.

JENDL-3: оценка 1984 года, последняя ревизия выполнена в 1990 году (40 резонансов+связанное состояние, энергия последнего резонанса 3945 эВ), неразрешенных – до 100 кэВ.

JEF-2 (JEFF-3.1): оценка 1982, основанная на оценке ENDF/B-V, последняя ревизия – в 1989 году (36 резонансов, энергия последнего резонанса 2149 эВ), область неразрешенных резонансов отсутствует;

CENDL-3: оценка 2000 года, резонансная область взята из JENDL-3 с корректировкой положения отрицательного резонанса, последняя ревизия – в 2002 году;

ENDF/B-VII: новая оценка 2005 года как для резонансной (С.Ф. Мугхабгхаб), так и для надрезонансной области энергий (программа EMPIRE, сотрудничество KAERI-BNL) (45 s-резонансов+ связанное состояние и 2 p-резонанса, энергия последнего резонанса 3564 эВ), область неразрешенных резонансов до 80.8 кэВ (т.е. до порога неупругого рассеяния);

3. Данные в тепловой и резонансной области

Все оценки, кроме ENDF/B-VII и CENDL-3, опираются на старые оценки резонансных параметров С.Ф. Мугхабгхабом. Новая оценка параметров и сечений в области разрешенных резонансов выполнена С.Ф. Мугхабгхаба [1]. Для оценки сечений в тепловой точке для анализа привлекались данные для естественной смеси и для отдельных изотопов. Отличия от JENDL-3.3 состоят, главным образом в пересмотре параметров связанного состояния, что привело к резкому снижению сечения упругого рассеяния.

В области неразрешенных резонансов использовались средние резонансные параметры, оцененные путем усреднения параметров разрешенных резонансов с учетом пропуска уровней. Средняя нейтронная силовая функция и радиационная-ширина для d-волны бралась такой же как и для s-волны. Согласно оценка, сечение захвата, усреднённое по спектру Максвелла с температурой 30 кэВ, составляет 306 миллибарн, что несколько ниже сечения, рекомендованного в компиляции Бира (453 ± 81 мбарн), которое, правда, не было основано на прямых экспериментальных результатах. Интересно, что более старые оценки BROND-2 и JENDL-3 (CENDL-3) несколько лучше согласуются с данными Бира из-за более высоких радиационных силовых функций и более высоких плотностей уровней, используемых в этих оценках. При формировании файла ENDF/B-VII верхняя граница

области разрешённых резонансов была взята при энергии 3.9452 кэВ. Как видно из рисунков 1 – 3, при таком выборе существует заметный пропуск s-резонансов с малой нейтронной шириной и основная часть всех пропущенных резонансов расположена при энергии выше 2.5 кэВ. Верхняя граница области разрешённых резонансов выбрана в JENDL-3 (CENDL-3) при энергии 2.25 кэВ.

Таблица 1. Тепловые сечения для ^{131}Xe .

| Библиотека Эксп. данные | Полное сечение, барн | Сечение захвата, барн | Сечение упругого рассеяния, барн |
|---|-------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| BROND-2 | 110.34 | 84.98 | 25.36 |
| JEF-2 | 109.44 | 85.0 | 24.44 |
| JENDL-3 | 109.17 | 85.05 | 24.12 |
| CENDL-3 | 101.26 | 100.01 | 1.249 |
| ENDF/B-VI | 91.22 | 90.03 | 1.187 |
| ENDF/B-VII | 91.18 | 90.00 | 1.183 |
| Lucas (1977) | | 100±6 | |
| BNL-325 (1973) | | 90±10 | |
| BNL-325 (1981) | | 85±10 | |
| S.F.Mughabghab, INDC(NDS)-424, p. 69 (2001) | | 85±10 | |

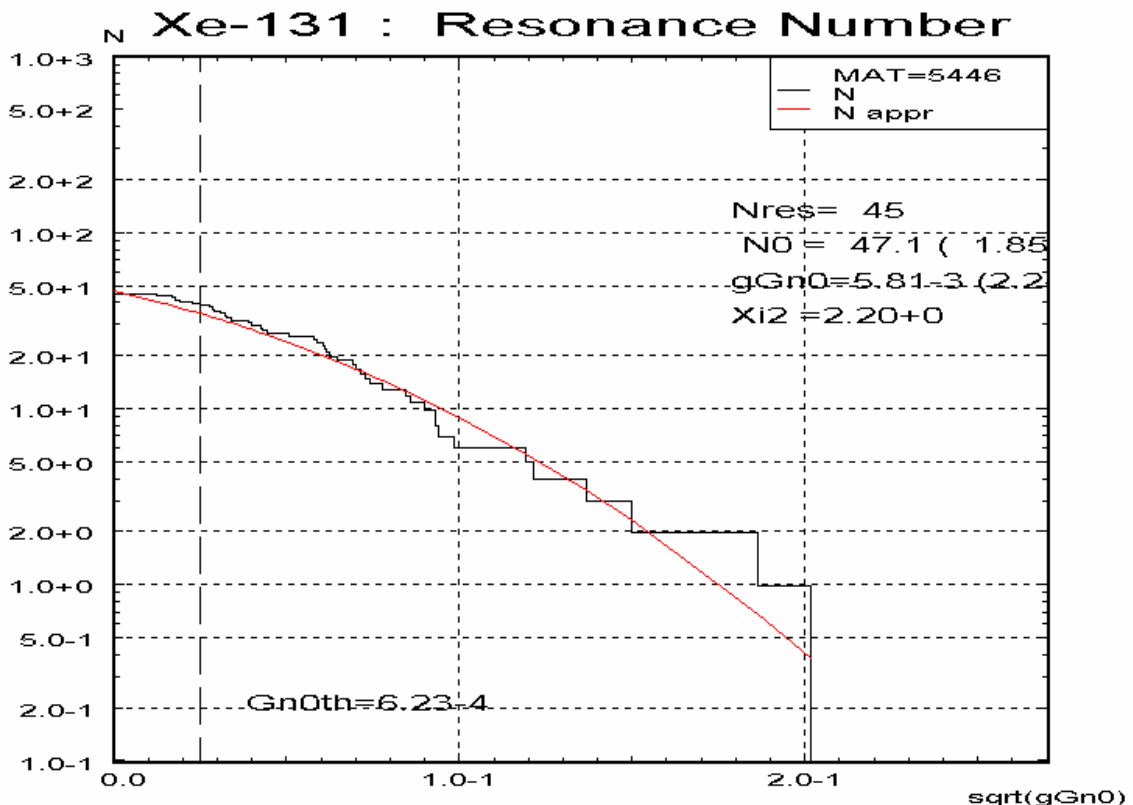


Рис. 1. Распределение числа нейтронных резонансов с данными ширинами для s-нейтронов из ENDF/B-VII (гистограмма) в сравнении с теоретически ожидаемым, полученным программой РЕБУС (гладкая кривая).

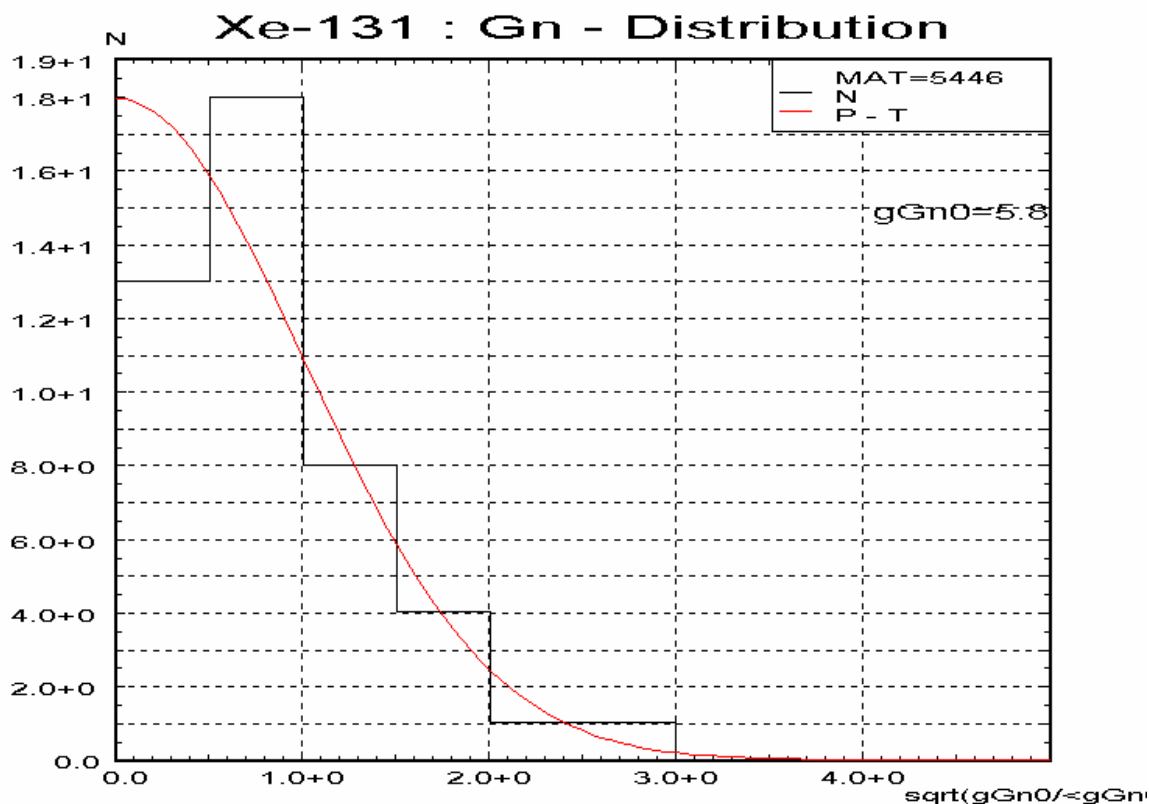


Рис. 2. Распределение числа резонансов имеющих нейтронную ширину больше или меньше средней ширины s-резонансов в ENDF/B-VII (гистограмма) в сравнении с теоретически ожидаемым, полученным программой РЕБУС (гладкая кривая).

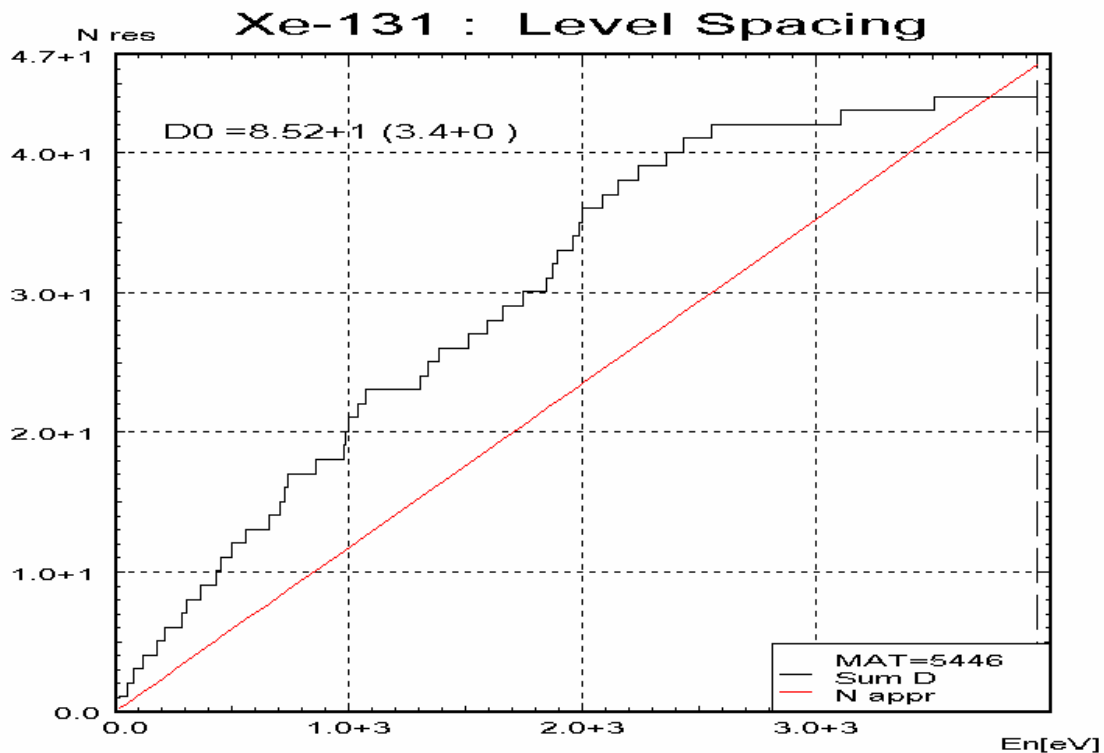


Рис. 3. Нарастающая сумма числа s-резонансов в ENDF/B-VII (гистограмма) в сравнении с полученным программой РЕБУС (гладкая кривая). Очевиден пропуск уровней при энергиях выше 2.5 кэВ.

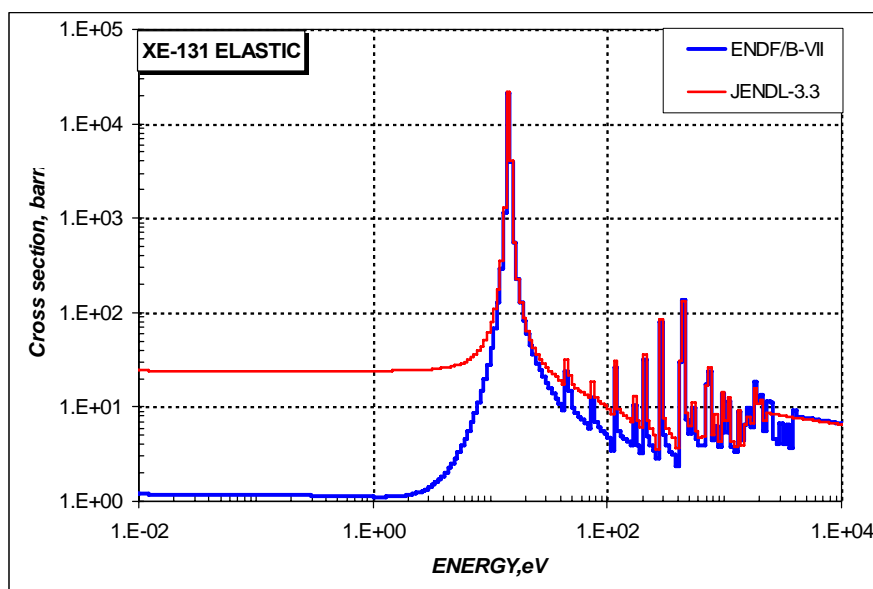


Рис.4. Сечение упругого рассеяния при низких энергиях.

На рис. 4 видно, как пересмотр параметров связанного состояния повлиял на сечение упругого рассеяния, которое снизилось в 20 раз. Коль скоро измерений полного сечения и, тем более, сечения упругого рассеяния на этом изотопе не выполнялось, никакой надежности в оценке полного сечения быть не может. На эту область приходится интерференционный минимум от резонанса при 14.4 эВ, который в оценке JENDL-3.3 заполнен крылом «отрицательного» резонанса. В новой оценке Мухабхаба ширина этого резонанса в 20 раз меньше и хотя сам резонанс расположен несколько ближе, минимум в сечении рассеяния сохраняется. В отсутствии прямых экспериментальных данных нельзя отдать предпочтение какой-либо из оценок. Практического значения сечение рассеяния тепловых нейтронов на ксеноне-131 не имеет.

Гораздо существеннее выбор верхней границы области разрешенных резонансов. На рис. 5 приведено сравнение оцененных сечений захвата в этой области (в мультигрупповой форме)

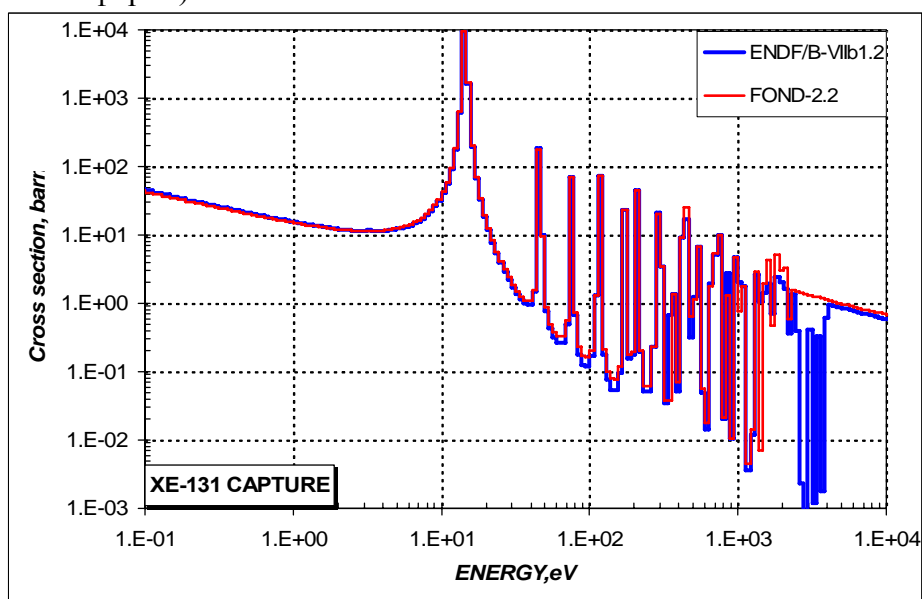


Рис. 5. Сечение захвата в области разрешенных резонансов по разным оценкам.

Очевиден провал в сечении захвата в интервале 2.5 – 4 кэВ, проявившийся в оценке ENDF-B-VII. Это является естественным следствием большого пропуска уровней в этой области, отчетливо видного из рис. 3. Влияние различий в параметрах связанного

состояния на сечении захвата никак не сказывается. Из рис. 3 и 5 следует, что распространение области разрешенных резонансов до 4 кэВ не оправдано и это делает предпочтительней оценку, принятую в JENDL-3.3.

4. Данные вне резонансной области

Оценка сечений в быстрой области энергий была выполнена во всех библиотеках с использованием модельных расчётов, при этом наиболее полно вклады различных механизмов реакций учтены в последних оценках JENDL-3 и CENDL-3. Сравнение оценок для основных сечений из разных библиотек показано на рисунках 6 – 9. Как видно, наибольшие отличия в оценках наблюдаются для сечения неупругого рассеяния. Это обусловлено использованием в расчётах разных оптических потенциалов. Вероятнее всего, сечение в библиотеке CENDL-3 является существенно завышенным, а в JENDL-3 - несколько заниженным. Энерго-угловые распределения вторичных частиц для разных реакций наиболее детально представлены в библиотеке CENDL-3.

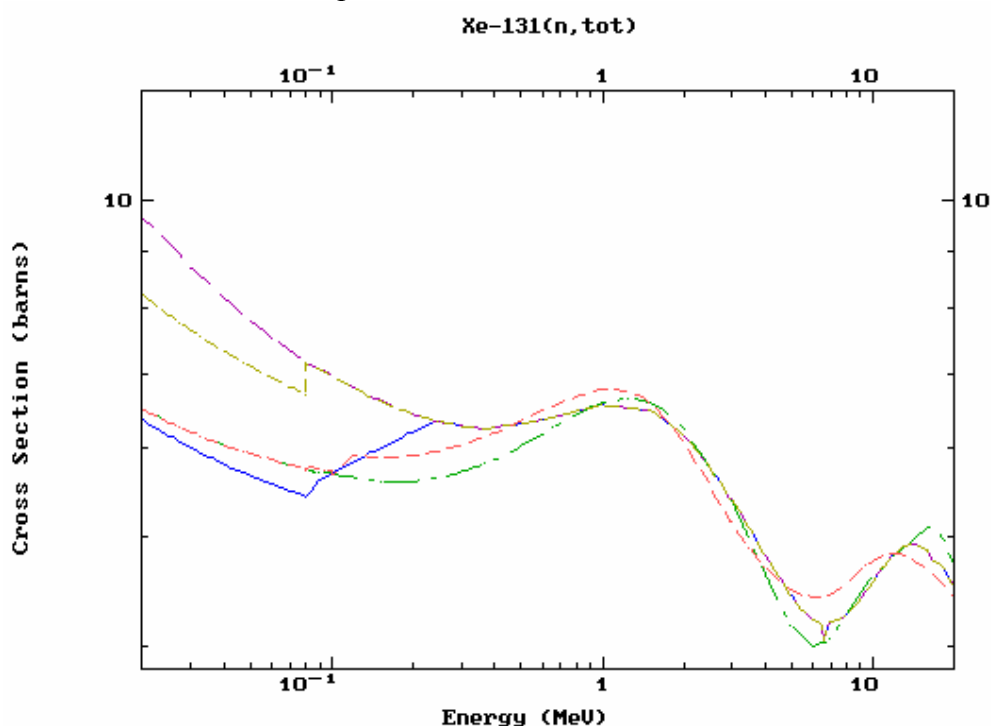


Рис. 6. Оценённое полное сечение из разных библиотек. Сплошная синяя кривая - ENDF/B-VI, пунктирная (фиолетовая) - JEF-2, пунктирная (жёлтая) – BROND-2, штрих-пунктирная (зелёная) - JENDL-3, пунктирная (красная) – CENDL-3.

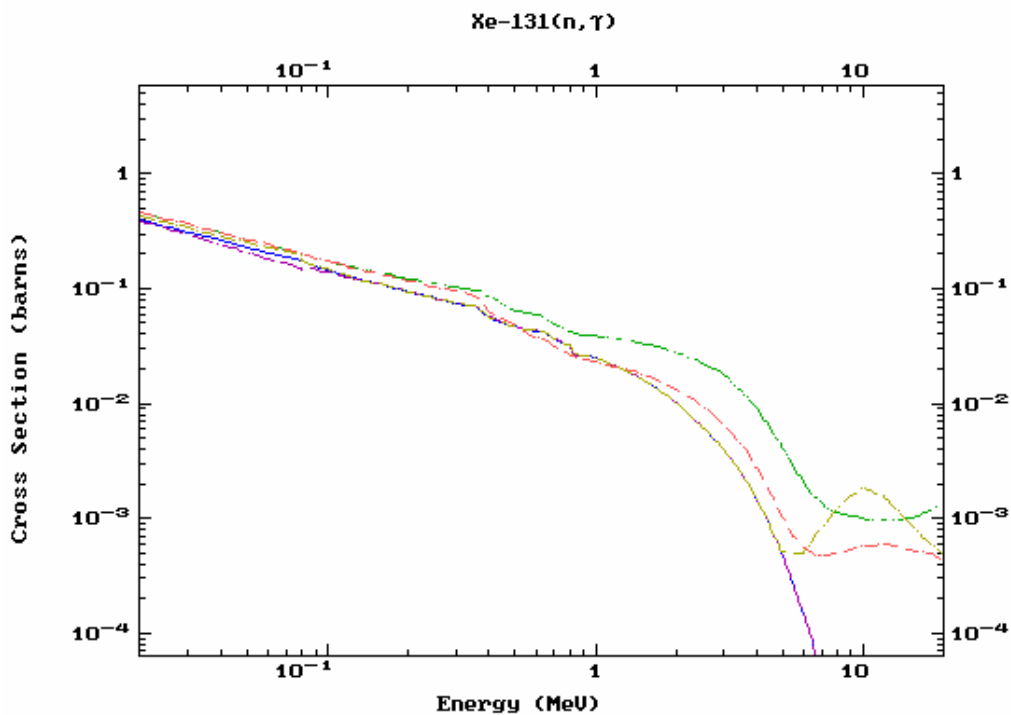


Рис. 7. Оценённые сечения захвата из разных библиотек. Сплошная синяя кривая - ENDF/B-VI и JEF-2, штрих-пунктирная (зелёная) - JENDL-3, короткие пунктиры (красная) - CENDL-3, длинные пунктиры (жёлтая) - BROND-2.

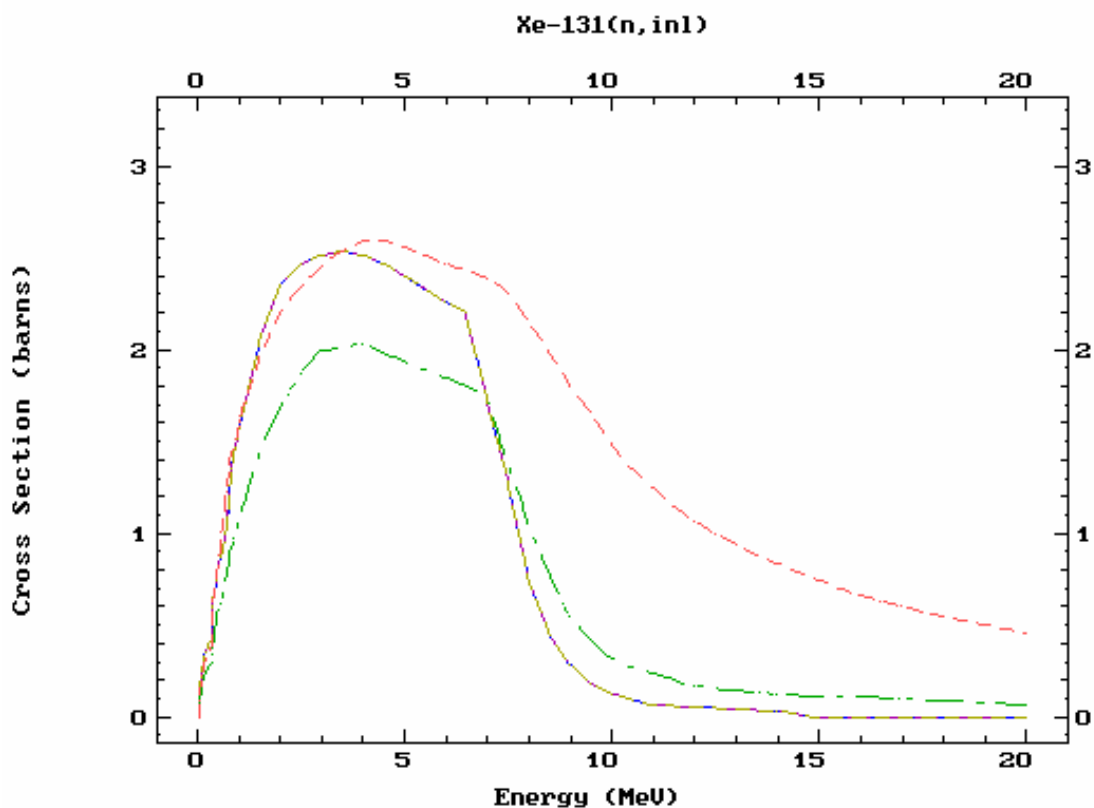


Рис. 8. Оценённое сечение неупругого рассеяния из разных библиотек. Сплошная синяя кривая - ENDF/B-VI и JEF-2, штрих-пунктирная (зелёная) - JENDL-3, пунктирная (красная) - CENDL-3.

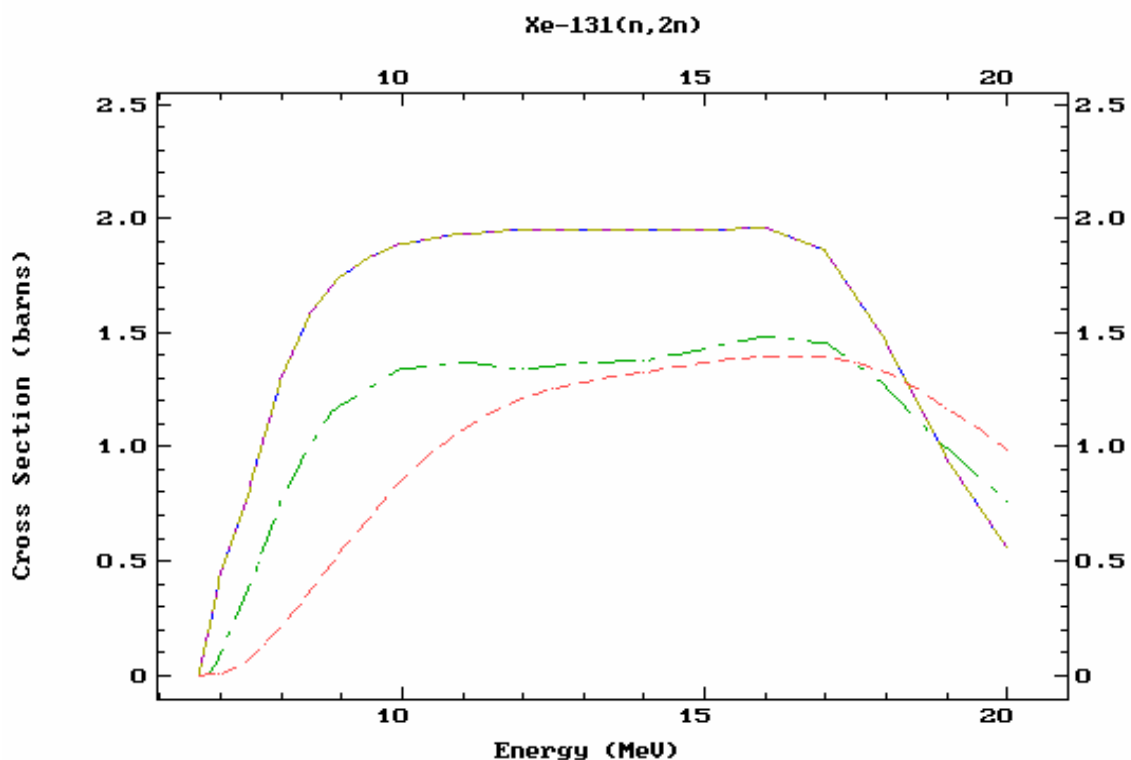


Рис. 9. Оценённое сечение реакции (n,2n) из разных библиотек. Сплошная синяя кривая - ENDF/B-VI и JEF-2, штрих-пунктирная (зелёная) - JENDL-3, пунктирная (красная) - CENDL-3.

5. Рекомендация

Для включения в библиотеку РОСФОНД рекомендуется файл библиотеки JENDL-3, т.е., по существу, предлагается, сохранить файл, содержащийся в библиотеке ФОНД-2.2. Следует, однако, ввести дополнительный файл MF=9, содержащий вероятности образования $^{129}\text{Xe}^g$ и $^{129}\text{Xe}^m$ ($T_{1/2}=8.89$ дн.) в реакции (n,3n) и $^{127}\text{Te}^g$ и $^{127}\text{Te}^m$ ($T_{1/2}=109$ дн.), а также файл MF=10 с сечением образования $^{131}\text{Xe}^m$ ($T_{1/2}=11.9$ дн.). Данные взять на основе EAF-2003.

Литература

1. Soo-Youl Oh, Jonghwa Chang, S.F. Mughabghab, BNL-NCS-67469 (2000)

Автор проведенного отбора оцененных данных

В.Г.Проняев.

54.9. Ксенон-131^m

Долгоживущий изомер. Испытывает изомерный переход в основное состояние ($T_{1/2}=8.89$ дн.)

В ФОНД-2.2 – оценка J.Корецку, D.Nierop, 1992(EAF-3)

JEFF-3.1=EAF-2003 – оценка Forrest, Корецку, Sublet, Koning, 2003 г. Отличие от предыдущей версии состоит в пересмотре сечения (принята оценка JEF-2 вместо LEF-1). Реального изменения сечений не произошло.

В других библиотеках оцененных данных не содержится.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется включить оценку Forrest, Корецку, Sublet, Koning, 2003 г. (JEFF-3.1=EAF-2003). Внесены следующие изменения:

1. Подсекции MT=17,22,28,104 и 106 в файле MF=10 сложены и суммы внесены в файл MF=3 с соответствующими MT.

2. Файл MF=10 удален.

3. Введен файл MF=9 с секциями MT=17, 22 и 106, содержащими вероятности образования $^{131}\text{Xe}^g$ и $^{131}\text{Xe}^m$ ($T_{1/2}=8.89$ дн.), $^{127}\text{Te}^g$ и $^{127}\text{Te}^m$ ($T_{1/2}=109$ дн.) и $^{129}\text{Te}^g$ и $^{129}\text{Te}^m$ ($T_{1/2}=33.6$ дн.)

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

54.10. Ксенон-132

6. Общие характеристики

1.1. $Z=54$ (заряд)

1.2. $A=132$ (атомный номер)

1.3. $A_w=130.771$ (отношение массы ядра к массе нейтрона)

1.4. Содержание в естественной смеси $26.909\pm 0.068\%$

1.5. Спин основного состояния 0^+

7. Файлы библиотек

ENDF/B-VI: оценка 1978 года, взятая из ENDF/B-V без какой-либо ревизии данных;

JEF-2: оценка 1982 г., основанная на оценке ENDF/B-V, последняя ревизия – в 1990 году;

ФОНД-2.2: содержит ту же оценку, что и JENDL-3 с измененными по рекомендации В.Н.Манохина сечениями реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$.

JENDL-3: оценка 1990 года, последняя ревизия выполнена в 1993 году;

CENDL-3: оценка 2000 года, последняя ревизия – в 2001 году.

8. Данные в тепловой и резонансной области

ENDF/B-VI: разрешенные резонансные параметры из BNL-325 (1973) приведены до 4 кэВ, радиус рассеяния – 5.85 ферми, область неразрешенных резонансов отсутствует;

JEF-2: область разрешенных резонансов – до 4.255 кэВ, взяты из BNL-325 (1981), радиус рассеяния равен 5.4 ферми, область разрешенных резонансов отсутствует;

оценка 1982, основанная на оценке ENDF/B-V, последняя ревизия – в 1990 году; JENDL-3, CENDL-3: область разрешённых резонансов – до 4.4 кэВ, радиус рассеяния - 5.31 ферми, для энергий нейтронов от 4.4 кэВ до 100 кэВ задана область неразрешённых резонансов. Сравнение тепловых сечений приведено в Таблице 1.

Таблица 1. Сравнение тепловых сечений из разных библиотек (барн)

| Оценка | Полное | Захват | Упругое |
|--|--------|-------------|---------|
| ENDF/B-VI | 4.74 | 0.44 | 4.3 |
| JEF-2 | 3.643 | 0.448618 | 3.637 |
| JENDL-3 | 3.60 | 0.45 | 3.15 |
| CENDL-3 | 3.60 | 0.45 | 3.15 |
| BNL-325 (1973) | | 0.415±0.060 | |
| S.F.Mughabghab, INDC(NDS)-424, p.72 (2001) | | 0.415±0.045 | |

Полное сечение и сечение упругого рассеяния в библиотеках JENDL-3 и CENDL-3 в области неразрешённых резонансов (4.4 – 100 кэВ) заметно (на 20 – 30 %) ниже чем в других библиотеках и лучше согласуется с экспериментальными данными по полному сечению на естественном ксеноне. Сечение захвата в области неразрешённых резонансов в библиотеках JENDL-3 и CENDL-3 лучше согласуется с измерениями Бира (X4=21937, 1984) при энергии 25 кэВ выполненными в 1984 году (рисунок 1).

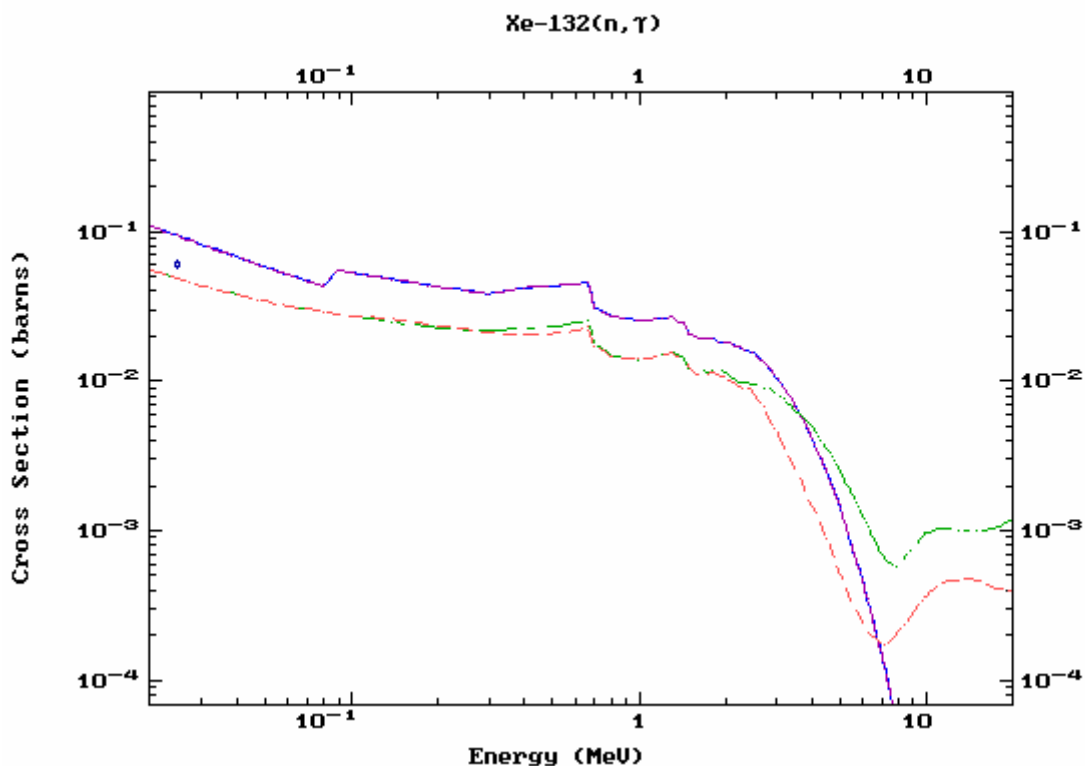


Рис. 1. Оценённые сечения захвата из разных библиотек в сравнении с экспериментальным значением Бира при 25 кэВ. Сплошная синяя кривая - ENDF/B-VI и JEF-2, штрих-пунктирная зелёная - JENDL-3, пунктирная красная – CENDL-3.

9. Оценка вне резонансной области энергий

ENDF/B-VI, JEF-2: сферическая оптическая и статистическая модели. Вклад прямого и предравновесного механизмов не учитывался.

JENDL-3: Сферическая и статистическая модели с учётом вклада прямых, полупрямых (для сечения захвата) и предравновесных процессов. Файл содержит оценку энергетических и угловых распределений вторичных частиц (MF=4, MF=5) для всех парциальных реакций.

ФОНД-2.2 сечения реакций (n,2n) и (n,3n) уточнены на основе полуэмпирической систематики.

CENDL-3: сферическая оптическая модель и объединённая статистическая модель и модель предравновесного распада с учётом вклада прямых процессов в неупругое рассеяние нейтронов.

Сумма сечений всех неупругих процессов при энергии около 5 МэВ в JENDL-3 (2.265 барн) ниже, чем в других библиотеках (2.4 барн), что обусловлено выбором параметров оптической модели, дающей близкие полные сечение, но заметно отличающиеся сечения упругого и неупругого рассеяния. Совокупность имеющихся экспериментальных данных по суммарным сечениям всех неупругих процессов для всех ядер, имеющих зависимость при данной энергии близкую к $A^{1/3}$ (где A – атомный номер ядра) показывает, что оценка библиотеки JENDL-3 является корректнее всех других. Сравнение сечений неупругого рассеяния из разных библиотек показано на рисунке 2.

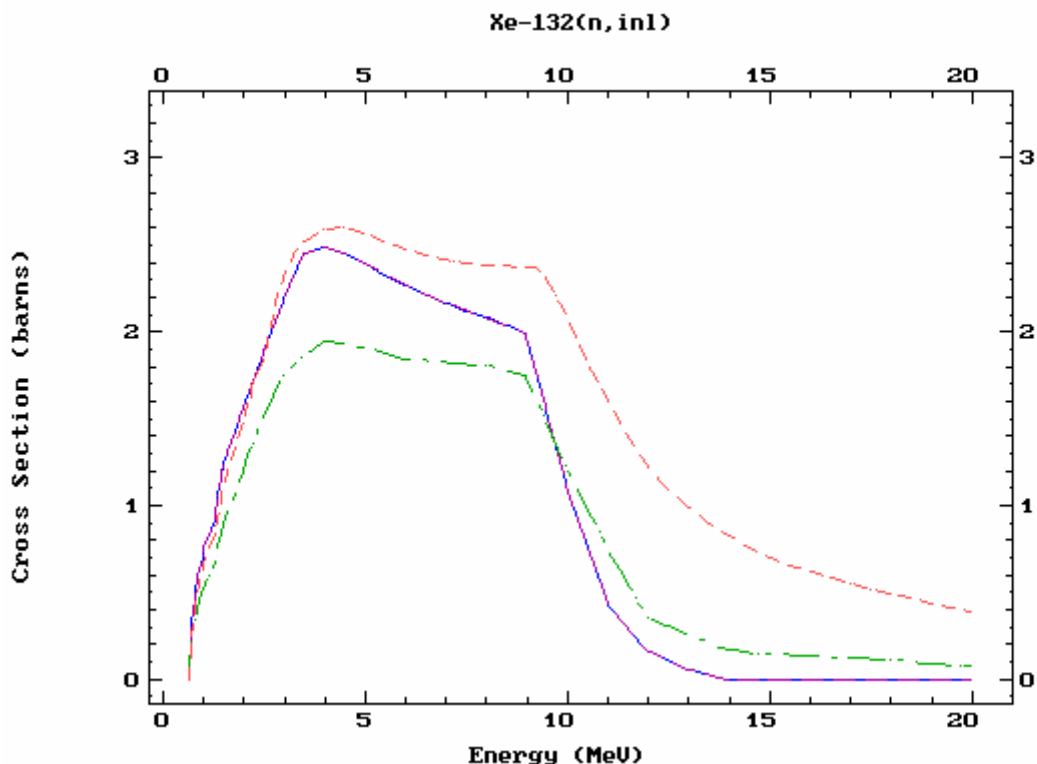


Рис. 2. Оценённые сечения неупругого рассеяния из разных библиотек. Сплошная синяя кривая - ENDF/B-VI и JEF-2, штрих-пунктирная зелёная - JENDL-3, пунктирная красная – CENDL-3.

10. Рекомендация

В библиотеку РОСФОНД рекомендуется включить файл из библиотеки JENDL-3.3, добавив к нему файл MF=9 с вероятностями образования $^{133}\text{Xe}^g$ и $^{133}\text{Xe}^m$ ($T_{1/2}=2.19$ дн.) в реакции (n,γ) , $^{131}\text{Xe}^g$ и $^{131}\text{Xe}^m$ ($T_{1/2}=11.9$ дн.) в реакции $(n,2n)$ и $^{129}\text{Te}^g$ и $^{129}\text{Te}^m$ ($T_{1/2}=33.6$ дн.) в реакции (n,α) . Данные взять на основе EAF-2003.

Автор проведенного отбора оцененных данных В.Г.Проняев.

54.11. Ксенон-133^g

Радиоактивен. Испытывает бета-распад в стабильный цезий-133 ($T_{1/2}=5.25$ дн.)

В ФОНД-2.2 и в JEFF-3.1 – оценка Shenter & Schmittroth, 1974 из ENDF/B-VI, куда она перешла из ENDF/B-IV.

JENDL-3.3 и в ENDF/B-VII b1.2 – оценка, выполненная рабочей группой в 1990г.

Ниже дано сравнение тепловых сечений и резонансных интегралов.

| Библиотека | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | $\sigma_r(0.0253 \text{ эВ})$ | Rlc |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------|
| FOND-3.3 | 190.0 | 194.8 | 356 |
| ENDF/B-VII b1.2 | 190.0 | 193.6 | 90.1 |

Заключение

В РОСФОНД решено принять новую оценку из ENDF/B-VII b1.2. Добавлен файл MF=9 с секциями MT=22 и MT=17 с вероятностями образования $^{129}\text{Te}^m$ и $^{131}\text{Xe}^m$, а также файл MF=10, содержащий сечение образования изомера Xe-133m ($T_{1/2}=2.19$ дн.).

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

54.12. Ксенон-133^m

Догоживущий изомер ($T_{1/2}=2.19$ дн.). Испытывает изомерный переход в основное состояние.

В ФОНД-2.2 – оценка J.Kopecky, D.Nierop, 1992(EAF-3)

JEFF-3.1=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 г. Отличие от предыдущей версии состоит в пересмотре сечения (принята оценка JEF-2 вместо LEF-1). Реального изменения сечений не произошло.

В других библиотеках оцененных данных не содержится.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется включить оценку Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 г. (JEFF-3.1=EAF-2003).

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

54.13. Ксенон-134

Содержание в природной смеси – 10.4%.

В ФОНД-2.2 – та же оценка, что и в JENDL-3.3, с пересмотренными в 1999 г. В.Н. Манохиным сечениями реакций (n,2n) и (n,3n).

JENDL-3.3– оценка, выполненная рабочей группой в 1990г. Область разрешенных резонансов до 10323 эВ (5 резонансов + связанное состояние, энергия последнего резонанса 9365 эВ), неразрешенных – до 100 кэВ.

JEFF-3.1= оценка H.Gruppelaar & E. Menarace (ENDF/B-V), 1982. Область разрешенных резонансов до 2000 эВ (1 резонанс при 1000.6 эВ + связанное состояние), область неразрешенных резонансов отсутствует.

ENDF/B-VII b1.2= CENDL-3 – оценка 1997 принятая в последние версии названных библиотек с пересмотром области разрешенных резонансов Мухабхабом¹. Область разрешенных резонансов до 10 кэВ (связанное состояние+2 s-резонанса и 3 p-резонансов; энергия последнего s-резонанса 1000.6 эВ, последнего p-резонанса – 7260 эВ), область неразрешенных резонансов отсутствует.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (жирным синим шрифтом)

| | Total | Inelastic | (n,2n) | (n, γ) | (n,p) |
|---------------------------------|--------------|-------------|--------------|----------------|--------------|
| 0.0253 эВ | 3.985 | | | 0.265 | |
| | 3.985 | | | 0.265 | |
| Резонансный интеграл | | | | 0.617 | |
| | | | | 0.613 | |
| Спектр деления ²³⁵ U | 5.91 | 1.07 | 0.002 | 0.009 | 0.000 |
| | 5.80 | 0.84 | 0.003 | 0.009 | 0.000 |
| 14 МэВ | 4.83 | 0.78 | 1.360 | 0.001 | 0.005 |
| | 4.98 | 0.14 | 1.688 | 0.001 | 0.002 |

Как видно, если не считать сомнительного резкого повышения сечения неупругого рассеяния при высоких энергиях, существенного изменения сечений при переходе от прежней оценки к новой не произошло.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно сохранить оценку прежнюю оценку, заменив в ней область разрешенных резонансов на оценку из ENDF/B-VII b1.2. Добавить файл MF=9 с секциями MT=16 и MT=107 с вероятностями образования Xe-133m и Te-131m, используя данные EAF-2003.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

54.14. Ксенон-135

1. Общие характеристики

- 1.1. Z =54 (заряд)
- 1.2. A=135 (атомный номер)
- 1.3. A_w=133.748 (отношение массы ядра к массе нейтрона)
- 1.4. Период полураспада (β^-) 9.14±0.02 часа
- 1.5. Спин основного состояния 3/2⁺

1.6. Метастабильное состояние: спин $11/2^-$, $T_{1/2}=15.29\pm 0.05$ минут, $P(IT)=99.994\%$, $P(\beta^-)=0.004\%$.

2.Файлы данных

Из-за большого сечения захвата нейтронов в тепловой и эпитепловой области энергий (около 3000000 барн при 0.069 эВ) и специфических путей накопления, ^{135}Xe играет важную роль в кинетике тепловых реакторов. Он обуславливает существенное изменение во временных интервалах порядка периода полураспада ^{135}I , предшественника ^{135}Xe (равного 6.57 ч. т.е. сравнимого с периодом полу распада ^{135}Xe) – т.н. эффект йодной ямы; в некоторых случаях накопление, выгорание и распад ^{135}Xe сказывается и на динамике разгона реактора (существенны временные интервалы порядка минут – см. раздел 6 ниже).

Все оценки сечений базируются на небольшом числе экспериментальных данных полученных в 50-х годах.

Оценка для библиотеки ENDF/B-VI (ENDF/B-VII), в дальнейшем В-6, была выполнена в резонансной области ниже 1 кэВ Леонардом, Стюартом и Шентером в 1967 году и дополнена для энергии выше 1 кэВ Шентером и Шмиттрофом в 1976 году результатами оптико-статистических расчётов. Все сечения заданы в поточечном представлении.

Оценка JEFF-3.1 взята из ENDF/B-VI.

В библиотеке ФОНД-2.2 содержится оценка из JENDL-3.2.

Оценка JENDL-3.2, в дальнейшем J-3, является оценкой JNDC FPND рабочей группы выполненной в 1990 году. В области разрешённых резонансов (10^{-5} – 190 эВ) задан один положительный s-резонанс в одноуровневом Брейт-Вигнеровском представлении. Радиационная ширина резонанса была подогнана так, чтобы воспроизвести тепловое сечение захвата в 2650000 барн рекомендованное Мугхабгхабом. Область неразрешённых резонансов для s-, p- и d- волн задана для энергий от 190 эВ до 100 кэВ. Нейтронная силовая функция бралась из расчётов по сферической оптической модели, среднее расстояние между уровнями – из описания результатов статистических модельных расчётов сечения захвата, радиационные силовые функции – из систематики для соседних ядер. Радиус эффективного рассеяния был выбран из описания полного сечения при 100 кэВ. Для энергии выше 100 кэВ оценка основана на результатах расчёта по оптической и статистической моделям и модели предравновесного распада. В радиационном захвате нейтронов учитывались вклады прямого и полупрямого механизмов. Сечения для 16 уровней неупругого рассеяния, расположенных до энергии 2.093 МэВ, были оценены по оптико-статистической модели. Вклад прямого механизма неупругого рассеяния не оценивался.

Оценка CENDL-3, в дальнейшем С-3, в области разрешённых и неразрешённых резонансов была взята из оценки JENDL-3.2. Полное сечение в области быстрых нейтронов было взято из имеющихся экспериментальных данных для природного ксенона. Для оценки парциальных сечений в области быстрых нейтронов использовались результаты расчётов по оптической и статистической моделям с учётом вклада прямых и предравновесных процессов. Для представления угловых и энергетических представлений вторичных частиц использовались файлы MF=4 и MF=5.

3.Тепловая и резонансная область энергий

В Таблице 1 приведены тепловые сечения (при 0.0253 эВ), резонансные интегралы RI , а также положение и ширина первого резонанса пр и положительной энергии. Результаты

измерений сечений усреднённых по спектрам указывают на то, что сечения захвата могут быть несколько выше, чем приведены в библиотеках. При ссылке на экспериментальные данные указывается номер работы из ЭКСФОР (X4).

Таблице 1

| Сечение, Параметр | ENDF/B-6= ENDF/B-7= JEF-2 | JENDL-3.2= JENDL-3.3= CENDL-3= ФОНД-2.2 | Экспериментальный результат, если существует. Комментарии. Частичные выводы |
|--|---------------------------------|--|--|
| E_{\min} , RRR, эВ | - | 1.0E-5 | Результаты расчёта по одноуровневой формуле Брейта-Вигнера для В-6 |
| E_{\max} , RRR, эВ | - | 190. | |
| N_{res} | - | 1 положительный при энергии 0.084 эВ | С-3: $D_0 \sim 385$ эВ, вероятность того, что другой резонанс может внести заметный вклад в сечение при энергии 0.084 эВ является пренебрежимо маленькой |
| Полное, барн | 2952760 | 2964573 | |
| Упругого рассеяния, барн | 299688 | 299554 | |
| Захвата, барн | 2653071 | 2665019 | 2650000 \pm 110000.(S.F.Mughabghab (1981) |
| RI захвата, b | 7675. | 7600. | Экспериментальные данные отсутствуют |
| R' , RRR, ферми | - | 5.31 | |
| $E_r(+)$, эВ | - | 0.084 (J=2) | 0.08415 (X4=12032); 0.0849 (X4=12031) |
| $\Gamma_n(+)$, эВ | - | 0.0194 (J=2) | 0.02057 (X4=12032); 0.0182 (X4=12031) |
| $\Gamma_\gamma(+)$, эВ | - | 0.095 (J=2) | 0.09493 (X4=12032); 0.0942 (X4=12031) |
| E_{\min} , URR, эВ | - | 190. | |
| E_{\max} , URR, кэВ | - | 100. | |
| R' , URR, ферми | - | 5.32 | |
| D_0 , min, эВ | - | ~ 380 | |
| Сечение захвата на спектре $^{235}\text{U}(n,f)$ | 0.0292 | 0.0946 | Прямые экспериментальные данные отсутствуют |
| Захват при 37.5 кэВ (kT=25 keV), мб | ~ 0.43 | 0.4134 | Прямые экспериментальные данные отсутствуют |

Полное сечение в области первого резонанса и сечение захвата показаны на рисунках 1 и 2. Имеются также экспериментальные данные по сечению захвата, усреднённому по спектру Максвелла при разной температуре нейтронного газа. Сравнение со значениями, рассчитанными из сечений захвата в библиотеке В-6, приводится на рисунке 3. Как видно, рассчитанное среднее по спектру нейтронов сечение захвата заметно меняется в рабочем интервале температур тепловых реакторов, обуславливая большой температурный коэффициент реактивности в реакторах с высоким отравлением ксеноном. Отметим также, что более поздние экспериментальные данные по средним сечениям (данные Фикеля и Сантри) лежат выше рассчитанных сечений.

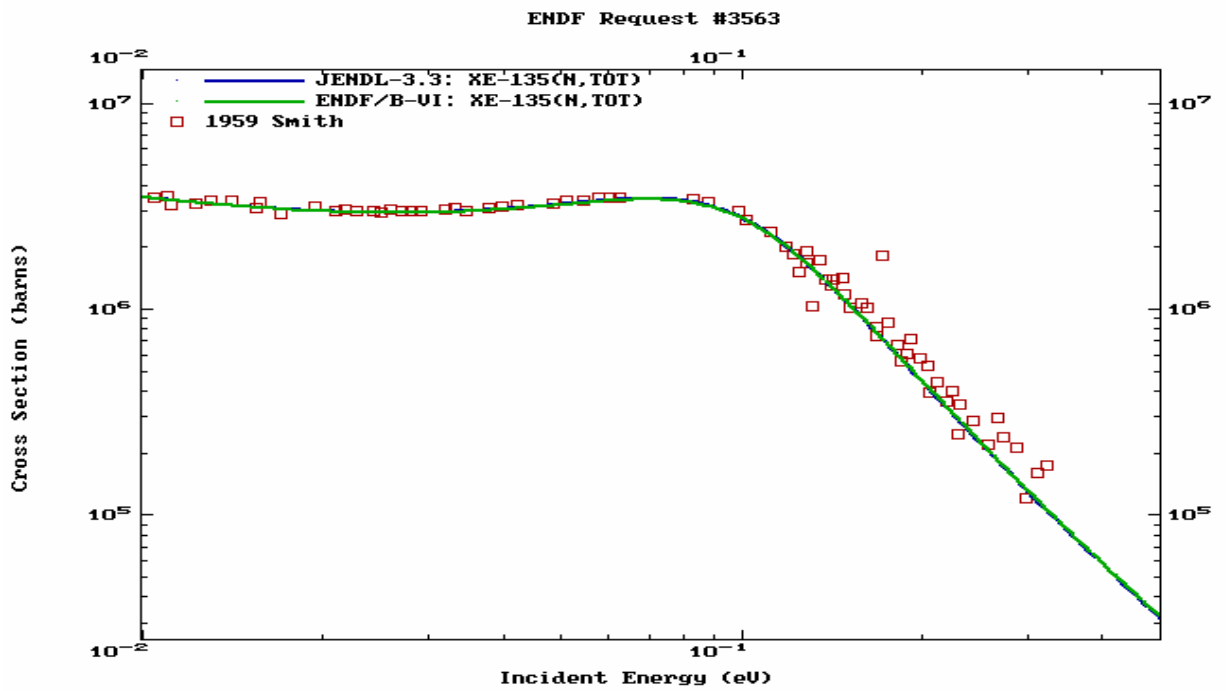


Рис. 1. Полное сечение ^{135}Xe из библиотек J-3 и В-6 в сравнении с имеющимися экспериментальными данными.

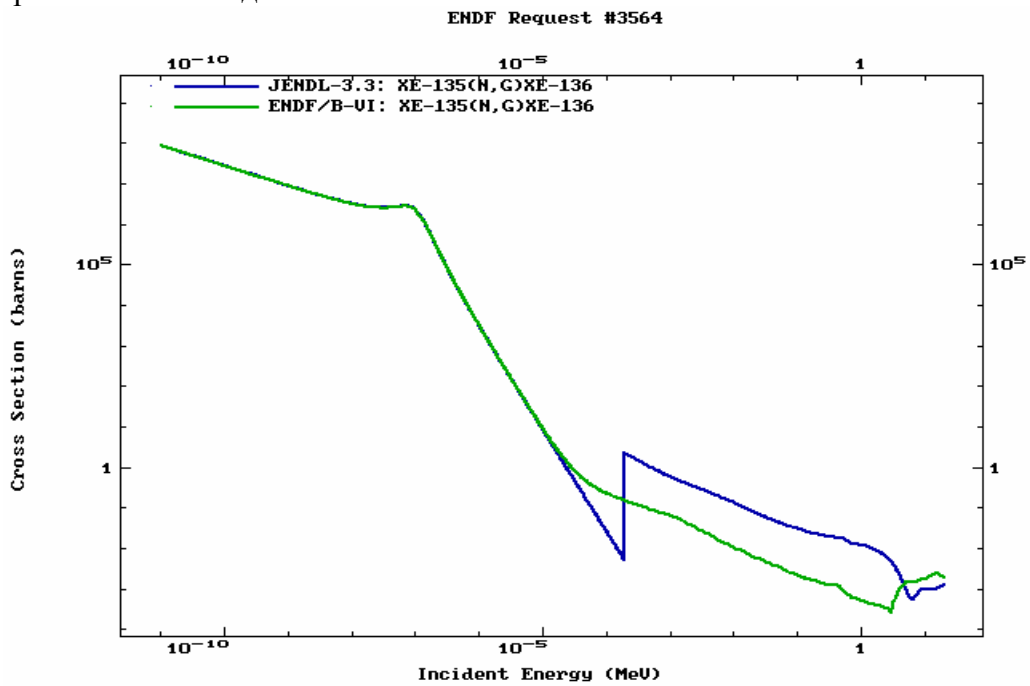


Рис. 2. Сравнение сечения захвата из библиотеки В-6 (плавная кривая) с сечением захвата из библиотеки J-3 (сечение с резким переходом между областью разрешённых и неразрешённых резонансов).

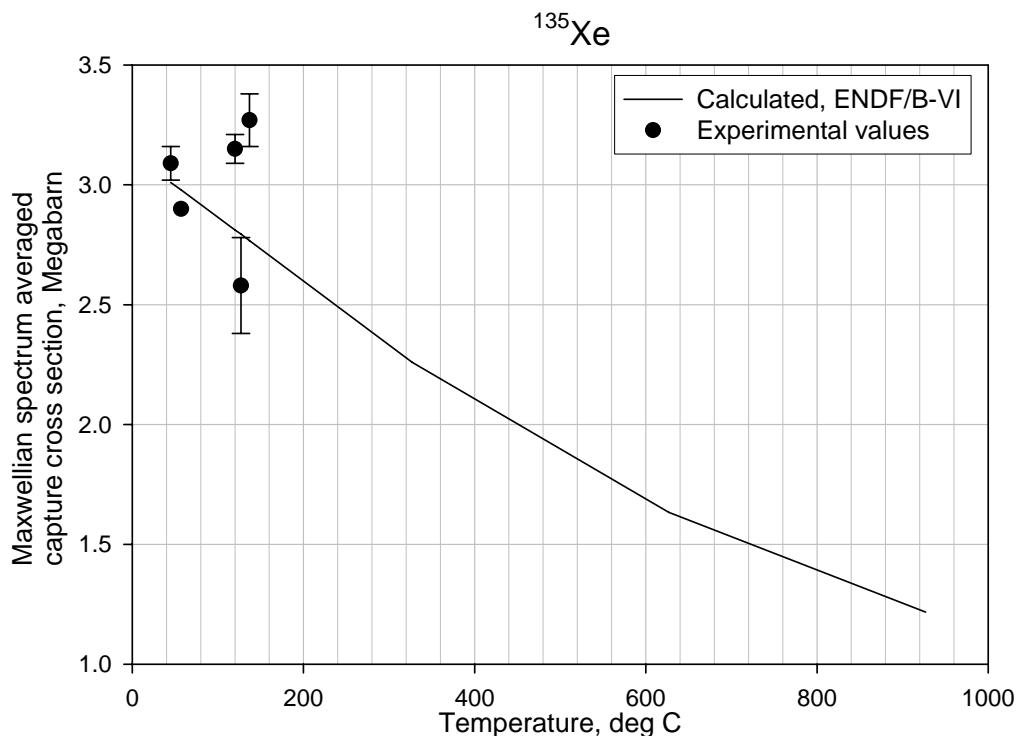


Рис. 3. Сечение захвата, усреднённое по максвелловскому спектру нейтронов с разными температурами. Расчёт – по сечению из библиотеки В-6, экспериментальные данные: X4=12007, J. Petrushka et al. (1955) T=57 deg. C, $\langle\sigma\rangle=2.9$ Mbarn; X4=12009, H. Fikel et al. (1959) T=120 deg C, $\langle\sigma\rangle=3.15\pm 0.06$ Mbarn; X4=12009, H. Fikel et al. (1959) T=137 deg C, $\langle\sigma\rangle=3.27\pm 0.11$ Mbarn; X4=12015, M. Freedman et al. (1956) T=127 deg C, $\langle\sigma\rangle=2.58\pm 0.20$ Mbarn; X4=10261, D. Santry (1973) T=45 deg C, $\langle\sigma\rangle=3.09\pm 0.07$ Mbarn

4. Область быстрых нейтронов

В Таблице 2 приведены основные характеристики оценок в области быстрых нейтронов ($E_n > 100$ кэВ). Так как экспериментальные данные для сечений в этой области энергий отсутствуют, в оценках использовались результаты расчётов по теоретическим моделям. Как показывает сравнение, сечение захвата в В-6 в этой области энергий на порядок величины ниже значений, принятых в J-3 и С-3. Вероятнее всего, что оно существенно занижено. На рисунке 1 приводится сравнение сечений неупругого рассеяния из разных библиотек. Несмотря на то, что сечение в С-3 является завышенным, оно лучше передаёт вклад прямых и предравновесных процессов в неупругое рассеяние нейтронов. К сожалению, ни одна из оценок не приводит энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в области континуума уровней в формате файла MF=6. Данные об образовании и спектрах вторичных гамма-квантов отсутствуют во всех библиотеках.

Таблица 2. Характеристики сечений из различных библиотек в области быстрых нейтронов.

| Сечение, параметр | ENDF/B-VI =ENDF/B-V =JEFF-3.1 | JENDL-3.2 =JENDL-3.3 | CENDL-3 | Экспериментальный результат, если существует. Комментарии. Частичные выводы |
|---|---|--|--|--|
| Нижняя граница начала расчётов по оптической и статистической моделям ядра, кэВ | 1. | 100. | 100. | |
| Полное | ~5.5(0.15 МэВ) 4.97(19.5 МэВ) | 5.61(0.15 МэВ) ~4.8(19.5 МэВ) | ~5.88(0.15 МэВ) ~4.52 (19.5 МэВ) | 5.85 барн (^{nat}Xe , $\langle E_n \rangle = 0.1 - 0.2$ МэВ, $X_4 = 11106$) 4.43 б (^{nat}Xe , $\langle E_n \rangle = 19 - 20$ МэВ, $X_4 = 11106$) С-3 основана на Экспериментальных данных для ^{nat}Xe |
| Дискретные уровни неупругого рассеяния | 1 уровень до 0.527 МэВ | 16 уровней до 2.093 МэВ | 15 уровней до 2.093 МэВ | Вклад прямых процессов не учитывался в В-6 и J-3. Пропущенные уровни в В-6. |
| Континуум уровней неупругого рассеяния | $E_{cont} = 0.527$ МэВ | $E_{cont} = 2.112$ МэВ | $E_{cont} = 2.093$ МэВ | Вклад механизма предравновесного распада учитывался в J-3, С-3 но не в В-6. В С-3 его вклад переоценен. |
| Полное сечение неупругого рассеяния | 1.858 барн при 5 МэВ 1.0 барн при 20 МэВ | ~1.94 барн при 5 МэВ ~0.076 барн при 20 МэВ | 2.57 барн при 5 МэВ ~0.38 барн при 20 МэВ | Среднее экспериментальное значение сечения неупругих процессов ($50 < Z < 60$, $4 < E_n < 6$ МэВ) - 2.12 барн. Вероятно С-3 переоценивает, а В-6 и J-3 недооценивает сечение неупругого рассеяния при 5 МэВ. Сечение неупругого рассеяния в В-6 и С-3 выше порога (n,2n) вероятно слишком высоко из-за большого вклада предравновесных процессов, а в J-3 слишком низко. |
| (n,2n) | нет (n,2n) | 1.384 барн при 14 МэВ | 1.497 барн при 14 МэВ | |
| (n,p), (n,a) и другие | | | | Сечения несут существенны для большинства приложений. |
| Угловые распределения упругого рассеяния | расчёты COM и CM | расчёты COM и CM | расчёты COM и CM | Учёт прямых реакций в каналах неупругого рассеяния понизит величину вклада механизма составного ядра в упругое рассеяние. |
| Угловые распределения упругого рассеяния | Изотропные в СЦМ | Результаты расчётов в CM | CM, модели предр. распада и прямых реакций | Представление MF=6 должно использоваться в С-3. |
| Спектры вторичных нейтронов | Температ. представл. | Таблицы вероятн. с учётом стат. и предравн. механизмов | Таблицы вероятн. с учётом стат. и предравн. механизмов | Для спектров при начальной энергии нейтронов выше порога (n,2n) реакции, В-6 содержит ошибочные температурные спектры. J-3 не учитывает вклад прямых процессов. |

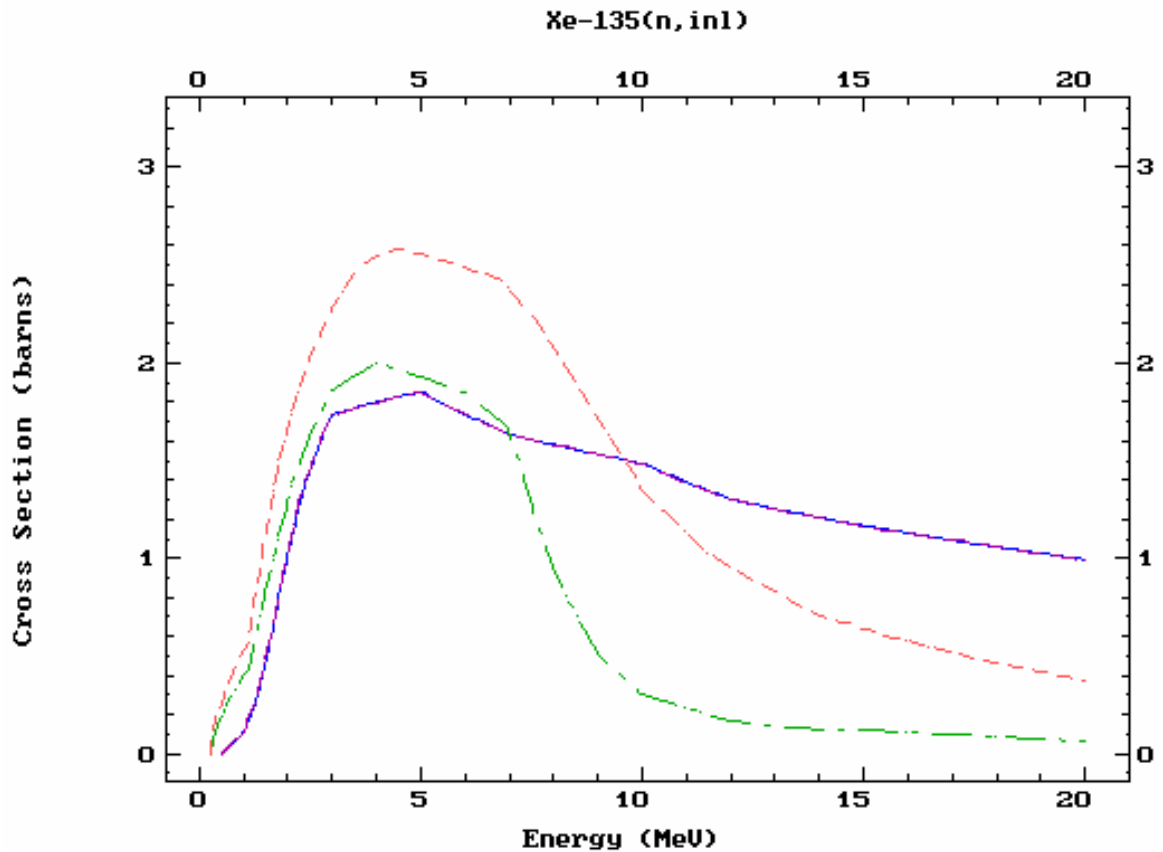


Рис. 4. Оценённые сечения неупругого рассеяния из разных библиотек. Сплошная синяя кривая - ENDF/B-VI и JEF-2, штрих-пунктирная зелёная - JENDL-3, пунктирная красная – CENDL-3.

5.Рекомендации

Так как сечения для тепловых и эпитепловых энергий нейтронов одинаковы во всех файлах, а основные различия в оценках наблюдаются в области быстрых нейтронов, мало существенной для практических приложений, оценка CENDL-3 может быть рекомендована как содержащая наиболее последовательное модельное описание сечений.

6. Динамические эффекты при выгорании ксенона

При глубоком отравлении ксеноном большого энергетического ядерного реактора (накоплении заметного количества ^{135}Xe) ксенон-135 может существенным образом повлиять и на динамику ядерного реактора. Выгорание ксенона в интенсивных нейтронных полях может приводить к заметному высвобождению связанной им положительной реактивности в течении короткого интервала времени (порядка одной – нескольких минут) и привести к локальному нарастанию мощности и аварийной ситуации. Так на четвёртом блоке Чернобыльской станции из-за низкого уровня мощности, на котором блок работал последние часы перед аварией, происходило существенное отравление реактора ^{135}Xe из-за его накопления вследствие распада осколков ^{135}I , образовавшихся при работе блока на номинальной мощности. Избыточная реактивность, связанная ^{135}Xe перед аварией, возможно, была на уровне $13\beta_{\text{eff}}$, т.е. много больше равновесной реактивности, связанной ксеноном при работе блока на номинальной

мощности. Так как реактор РБМК может быть представлен в виде системы нескольких интерферирующих активных зон, и так как из-за провала мощности перед аварией контроль за мощностью (нейтронными полями) осуществлялся только внешними ионизационными камерами, возможно, могла возникнуть следующая ситуация. Из-за неравномерности нейтронного поля и его превышения относительно среднего уровня в какой-то части реактора, в этой части началось интенсивное выгорание ксенона-135. Понижение концентрации ксенона вследствие его выгорания эквивалентно локальному введению положительной реактивности в эту часть реактора, нарастанию нейтронного потока в ней и дальнейшему ускорению выгорания ксенона. Как показывают простейшие оценки, рассматриваемая часть реактора (локальная зона) реактора выйдет на разгон на мгновенных нейтронах, когда выгорание ^{135}Xe увеличит положительную реактивность на долю запаздывающих нейтронов, за время порядка 3 минут. Этот процесс, медленно протекающий в начале (первые 2 минуты), в последнюю минуту развивается быстрее, чем по экспоненциальному закону. В этой оценке предполагается, что реактивность связанная ксеноном была равна $10\beta_{\text{eff}}$, эффективная доля запаздывающих нейтронов для реактора РБМК в конце кампании $\beta_{\text{eff}}=0.0045$; среднее время жизни запаздывающих нейтронов 0.063 сек, среднее время жизни мгновенных нейтронов 0.001 сек, и начальная плотность теплового потока нейтронов $5 \cdot 10^{13}$ нейтронов/см²/сек - характерная для средней плотности нейтронов при номинальной мощности. Внешними ионизационными камерами трудно зафиксировать локальный всплеск нейтронного поля (мощности) в небольшой части реактора, который может привести к катастрофическим последствиям. Более грубая и консервативная оценка, не учитывающая эффект положительной обратной связи в локальном нарастании нейтронного поля при локальном выгорании ксенона, даже не учитывающая сам эффект нарастания нейтронного поля, даёт оценку в 10 минут до выхода на разгон этой части реактора на мгновенных нейтронах. Более высокое содержание ксенона и более низкие значения $\beta_{\text{eff}}=0.0045$ могут существенно уменьшить время до разгона реактора на мгновенных нейтронах.

Автор проведенного отбора оцененных данных

В.Г.Проняев.

54.15. Ксенон-136

Содержание в природной смеси – 8.9%.

В ФОНД-2.2 – та же оценка, что и в JENDL-3.3, с пересмотренными в 1999 г. В.Н. Манохиным сечениями реакций (n,2n) и (n,3n).

JENDL-3.3 – оценка, выполненная рабочей группой в 1990г. Область разрешенных резонансов до 490 кэВ (связанное состояние + 4 s-резонанса (последний – при 253.5 кэВ) + 31 p-резонанса (последний при 580.75 кэВ), область неразрешенных резонансов отсутствует.

JEFF-3.1 = оценка M.Bhat&S.Mughabghab (ENDF/B-V), 1978. Область разрешенных резонансов отсутствует.

ENDF/B-VII b1.2 = CENDL-3 – оценка 1997 принятая в последние версии названных библиотек с пересмотром области разрешенных резонансов Мухабхабом¹. Область разрешенных резонансов до 490 кэВ (связанное состояние + 1 s-резонанс и 35 p-резонансов; энергия последнего s-резонанса 79.3 кэВ, последнего p-резонанса – 580.75 кэВ), область неразрешенных резонансов отсутствует.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (жирным синим шрифтом)

| | Total | Inelastic | (n,2n) | (n,γ) | (n,p) | (n,α) |
|---------------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0.0253 эВ | 8.475 6.088 | 0 | 0 | 0.26 0.261 | 0 | 0 |
| Резонансный интеграл | | 0 | 0 | 0.14 0.142 | 0 | 0 |
| Спектр деления ²³⁵ U | 5.21 5.11 | 0.87 0.68 | 0.0038 0.0041 | 0.0008 0.0005 | 0.0000 0.0000 | 0.0000 0.0000 |
| 14 МэВ | 4.87 4.98 | 0.69 0.16 | 1.68 1.71 | 0.0006 0.0010 | 0.0033 0.0002 | 0.0007 0.0003 |

Как видно, если не считать сомнительного резкого повышения сечения неупругого рассеяния при высоких энергиях, существенного изменения сечений при переходе от прежней оценки к новой не произошло.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно сохранить оценку прежнюю оценку, заменив в ней область разрешенных резонансов на оценку из ENDF/B-VII b1.2.

Автор отбора данных
Николаев М.Н.

55. ЦЕЗИЙ

Рассмотрение состояния дел по нейтронным данным для всех изотопов цезия выполнено В.Г.Проняевым. Им же выданы рекомендации о включении файлов оцененных данных в РОСФОНД. Подстрочные примечания о необходимости введения данных о вероятностях образования долгоживущих изомеров сделаны М.Н.Николаевым.

55.1. Цезий-129

Возможный путь образования в реакторе – реакция (n,d) на барии-130 (содержание – 0.1%).

Период полураспада: (32.06 ± 0.06) часа.

Мода распада: ϵ^- 100%.

Спин основного состояния: $1/2^+$.

Файлы

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3. Другие файлы представляют библиотеки данных по распаду и не содержат оценок нейтронных сечений.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{129}Cs из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 1. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

Заключение

Файл ^{129}Cs из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹.

Автор проведенного отбора оцененных данных

В.Г.Проняев.

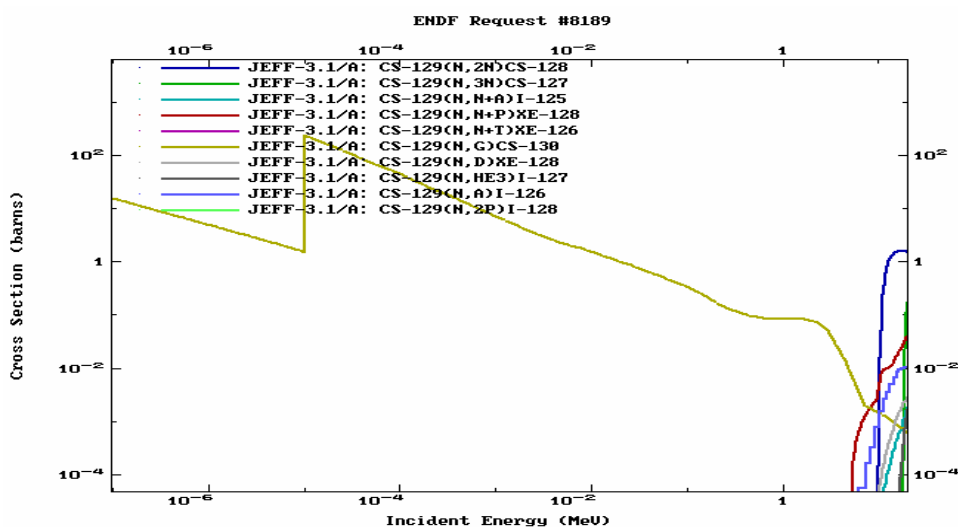


Рис. 1. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A.

¹ Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Вести файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{129}\text{Xe}^m$, используя данные из файла MF=10. Файл MF=10 исключить. – М.Н.

55.2. Цезий-131

Возможный путь образования в реакторе – реакция (n,d) на барии-132 (содержание – 0.1%).

Период полураспада: (9.689 ± 0.016) дней.

Мода распада: ϵ^- 100%.

Спин основного состояния: $5/2^+$.

Файлы

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3. Другие файлы представляют библиотеки данных по распаду и не содержат оценок нейтронных сечений.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{131}Cs из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 2. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

Заключение

Файл ^{131}Cs из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД².

Автор проведенного отбора оцененных данных

В.Г.Проняев.

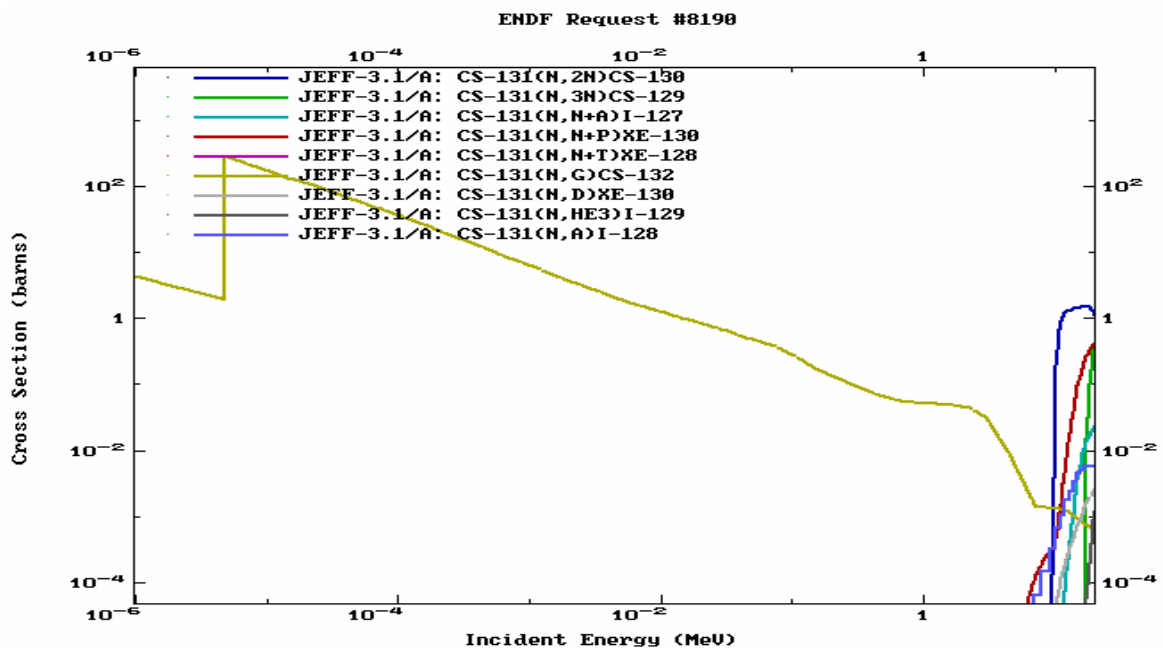


Рис. 2. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A.

² Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Вести файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущих изомеров $^{129\text{m}}\text{Xe}$ и $^{129\text{m}}\text{Xe}$, используя данные из файла MF=10. Файл MF=10 исключить. – М.Н.

55.3. Цезий-132

Возможные пути образования в реакторе – реакция (n,p) на барии-132 (содержание – 0.1%) и реакция (n,2n) на природном цезии-133.

Период полураспада: (6.480 ± 0.006) дней.

Моды распада: ϵ^- 98.13%, β^- 1.87%.

Спин основного состояния: 2^+ .

Файлы

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3. Другие файлы представляют библиотеки данных по распаду и не содержат оценок нейтронных сечений.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{132}Cs из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 3. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

Заключение

Файл ^{132}Cs из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД³.

Автор проведенного отбора оцененных данных

В.Г.Проняев.

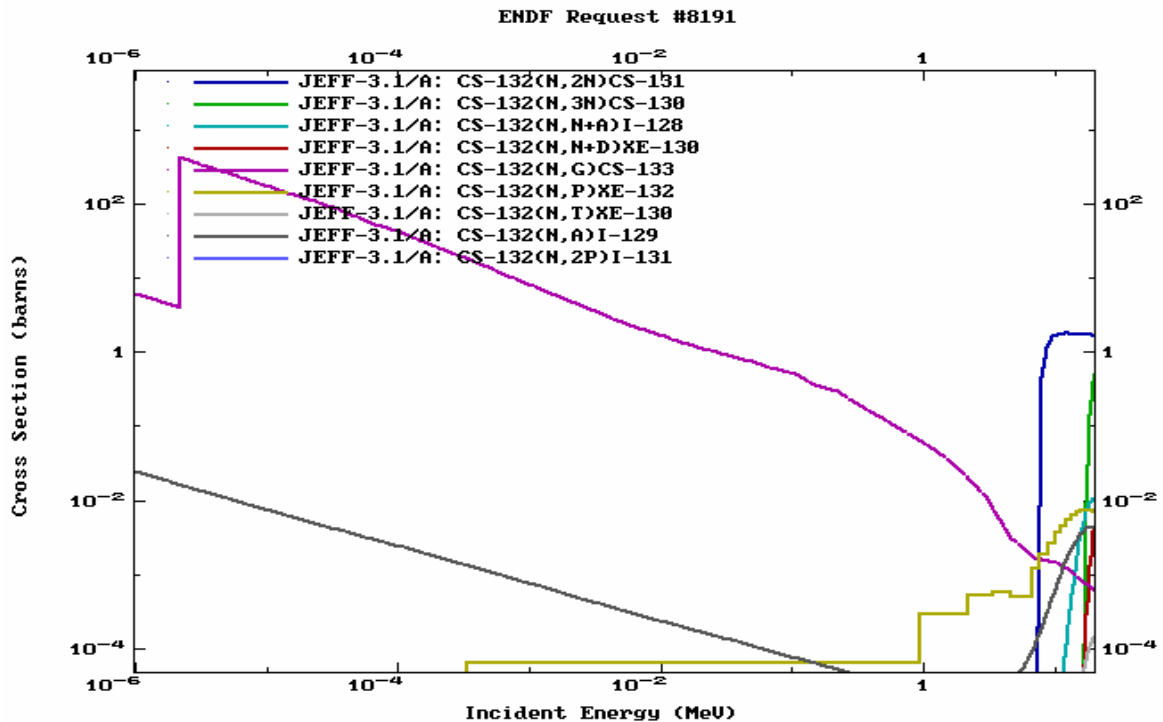


Рис. 3. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A.

³ Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Вести файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера ^{129m}Xe , используя данные из файла MF=10. Файл MF=10 исключить. – М.Н.

55.4. Цезий-133

Может содержаться в ядерном топливе как продукт деления.

Содержание в естественной смеси: 100%.

Спин основного состояния: $7/2^+$.

Файлы

Новая оценка для ^{133}Cs , включая резонансную и быструю области энергий, была выполнена в 2000 году для библиотеки ENDF/B-VIIb2. В связи с этим нет необходимости проводить анализ файлов из других библиотек, а достаточно показать непротиворечивость её совокупности экспериментальных данных.

Тепловая и резонансная область

Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата в файле хорошо согласуется с оценками приведёнными в Атласе Мухабхаба 2006. Статистический анализ распределений нейтронных ширин и расстояний между уровнями показывает, что как в s-, так и в p- волне отсутствует по крайней мере заметный пропуск резонансов, который может вести к недооценке сечения захвата в резонансной области энергий. На рисунке 4 показано сравнение оценённого сечения захвата в области разрешённых и неразрешённых резонансов с имеющимися экспериментальными данными. Учитывая невысокое разрешение для некоторых данных в резонансной области, в целом наблюдается хорошее согласие. Хорошее согласие с экспериментальными данными наблюдается и для полного сечения ниже энергии первого резонанса.

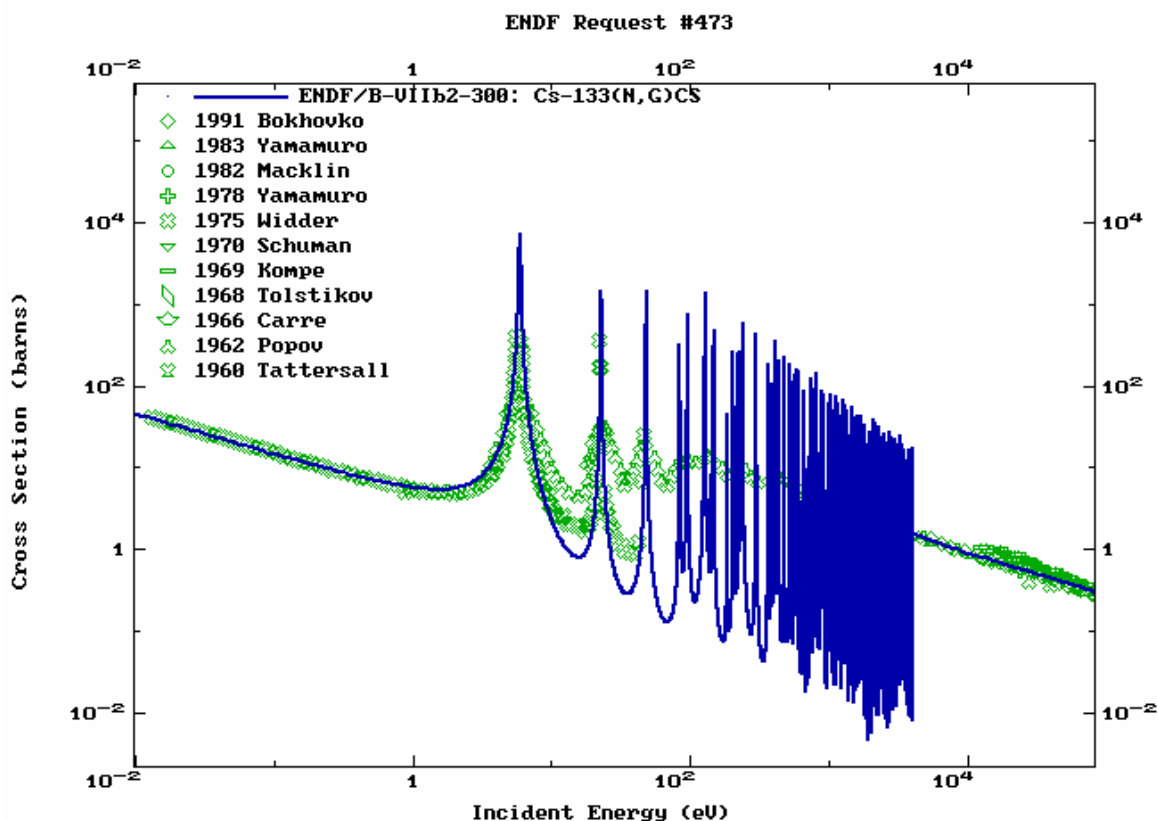


Рис. 4. Сравнение сечения захвата в тепловой, а так же в области разрешённых и неразрешённых резонансов из библиотеки ENDF/B-VIIb2 с имеющимися экспериментальными данными.

Область быстрых нейтронов

Сечения в области нейтронов быстрых энергий были получены с помощью программы EMPIRE при учёте вкладов всех возможных механизмов реакций. Качество описания экспериментальных данных по полному сечению показано на рисунке 5, а сечения (n,2n) – на рисунке 6.

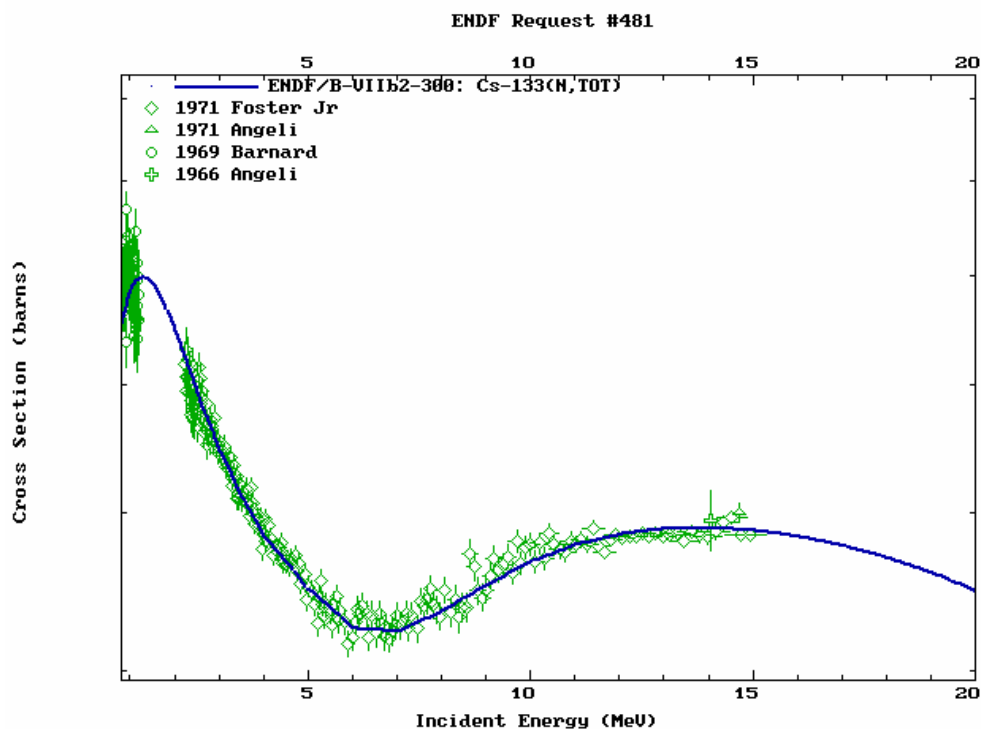


Рис. 5. Сравнение полного сечения из библиотеки ENDF/B-VIIb2 с имеющимися экспериментальными данными.

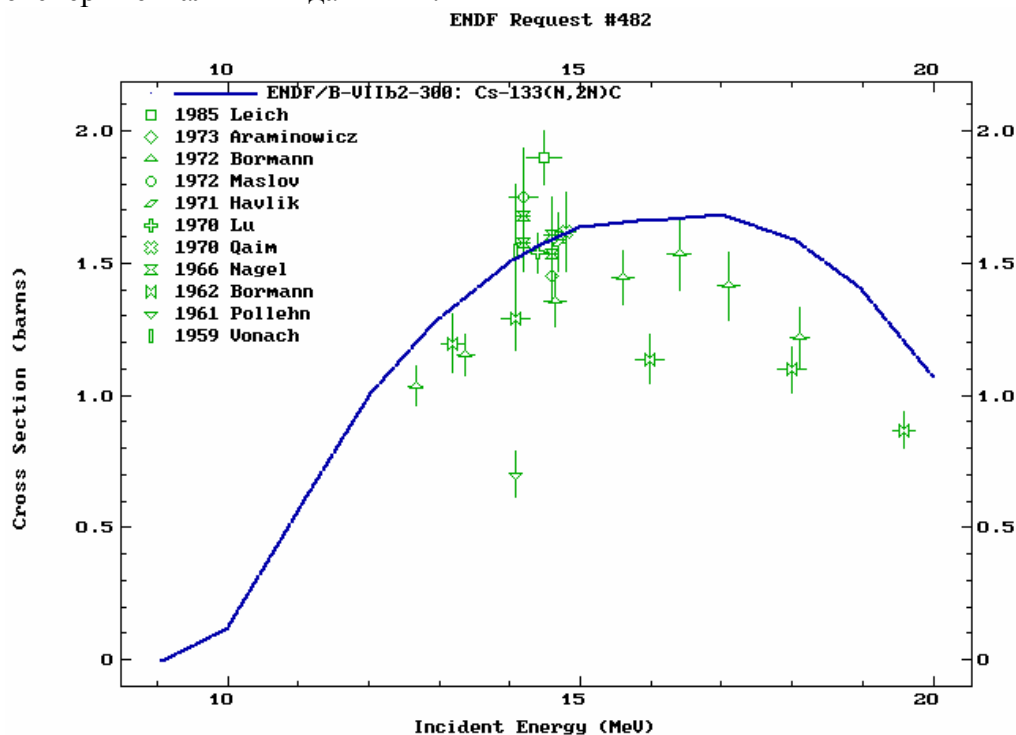


Рис. 6. Сравнение сечения (n,2n) из библиотеки ENDF/B-VIIb2 с имеющимися экспериментальными данными.

Заключение

Учитывая, что новая оценка хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными и рекомендована рабочей группой по оценке сечения как наилучшая, файл ^{133}Cs из библиотеки ENDF-VIIb2 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁴.

Автор проведенного отбора оцененных данных

В.Г.Проняев.

55.5. Цезий-134

В ядерном топливе может присутствовать как продукт деления.

Период полураспада: (2.0652 ± 0.0004) лет.

Моды распада: ϵ^- $3 \times 10^{-4}\%$, β^- 99.9997%.

Спин основного состояния: 4^+ .

Файлы

ENDF/B-VI (JEF-2) – оценка 1974 года.

JENDL-3.2 – оценка 1990 года.

CENDL-3 – оценка 1999 года.

ENDF/B-VIIb2 – в тепловой и резонансной области энергий ($E_n < 180$ эВ) оценка основывается на резонансных параметрах из Атласа Мухабхаба 2006, а для области неразрешённых резонансов и области высоких энергий - на оценке JENDL-3.2.

Тепловая и резонансная область

Так как резонансные параметры в Атласе-2006 не отличаются от приведённых в предыдущей оценке (MU81), то оценки JENDL-3.2 и ENDF/B-VIIb2 практически совпадают. Сечение захвата в области неразрешённых резонансов из библиотеки ENDF/B-VIIb2 (JENDL-3.2) показаны на рисунке 7 в сравнении с последними экспериментальными данными (Патронис, 2004). Экспериментальные данные представляют сечения, усреднённые по спектру Максвелла и показанные для средней энергии спектра. Очевидно, что расхождение между данными только возрастёт, если процедуру усреднения по спектру Максвелла провести для оценённого сечения.

⁴ Следует включить файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера $^{133}\text{Xe}^m$, используя данные файла MF=10 из EAF-2003. Образование $^{131}\text{Xe}^m$ в рамках данного файла описать невозможно, поскольку данные о сечении реакций (n,d) и (n,n'p) в нем не представлены.– М.Н.

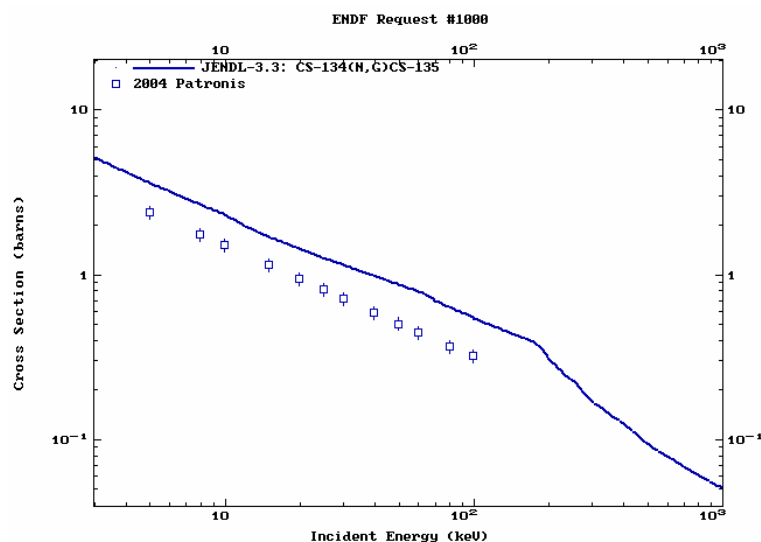


Рис. 7. Сравнение сечения захвата из библиотеки JENDL-3.2 (ENDF/B-VIIb2) с экспериментальными данными.

Область быстрых нейтронов

Экспериментальные данные в области энергий быстрых нейтронов практически отсутствуют. Сечения в области нейтронов быстрых энергий для последних оценок в быстрой области энергий (JENDL-3.2 и CENDL-3) были получены в оптико-статистических модельных расчётах с учётом вклада прямых процессов. Учитывая, что согласие между двумя независимыми оценками является неплохим, можно говорить о достаточной надёжности оценок основных сечений полученных в модельных расчётах.

Заключение

Файл ^{134}Cs из библиотеки ENDF-VIIb2 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁵. Сечение захвата в области неразрешённых резонансов в дальнейшем должно быть переоценено с учётом новейших данных Патрониса.

Автор проведенного отбора оцененных данных

В.Г.Проняев.

55.6. Цезий-135

В ядерном топливе может присутствовать как продукт деления.

Период полураспада: $(2.3 \pm 0.3) \cdot 10^6$ лет.

Мода распада: β 100%.

Спин основного состояния: $7/2^+$.

Файлы

ENDF/B-VI: Оценка 1974 года, существенная ревизия в 1998 году (MF=2, 3).

BROND-2: Оценка 1985 года, данные взяты из JENDL-1; сечение захвата выше 30 эВ пересмотрено.

JEF-2: Оценка 1975 года, существенная ревизия в 1985 и 1988 годах (MF=2), в 1989 году.

⁵ Следует включить файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера $^{133}\text{Xe}^m$, используя данные файла MF=10 из EAF-2003.

JENDL-3: Оценка 1984 года, взята из JENDL-2, существенная ревизия - в 1990 году.

CENDL-3: Оценка 1999 года. В тепловой области и области разрешённых резонансов совпадает с JENDL-3.

ENDF/B-VIIb2: Оценка 2005 года. Оценка в резонансной области основывается на новых параметрах из Атласа (Мухабхаб, 2006), оценка в области неразрешённых резонансов и быстрой области взята из JENDL-3.2 с несущественными поправками формата. Число резонансов, включённых в файл заметно увеличилось.

Тепловая и резонансная область

Учёт большего числа резонансов в ENDF/B-VIIb2 практически не изменил сечения в тепловой точке, но уменьшил величину резонансного интеграла захвата с более чем 60 барн в старых оценках – до 50.8 барна. Это улучшило согласие с независимой оценкой, основанной на прямых измерениях резонансного интеграла (37.9 ± 2.7) барна по сравнению с другими файлами. Учитывая, что заметная доля резонансного интеграла набирается в области неразрешённых резонансов, необходима переоценка. Сечение захвата в области неразрешённых резонансов из библиотеки ENDF/B-VIIb2 (JENDL-3.2) показаны на рисунке 8 в сравнении с последними экспериментальными данными (Патронис, 2004). Как видно, новейшие экспериментальные данные так же указывают на то, что сечение захвата в ENDF/B-VIIb2 (JENDL-3.2) в кэВ-ной области также завышены процентов на 30 и нуждаются в переоценке. Наиболее близкие значения к данным Патрониса содержатся в оценке BROND-2.

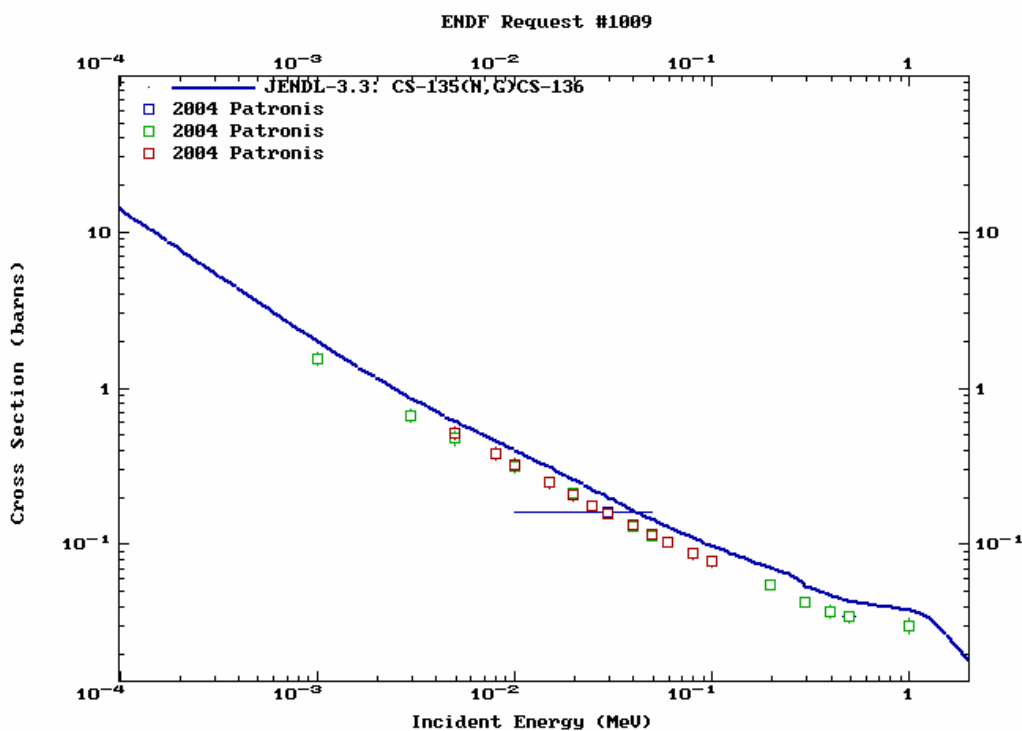


Рис. 8. Сравнение сечения захвата из библиотеки JENDL-3.2 (ENDF/B-VIIb2) с экспериментальными данными.

Область быстрых нейтронов

Экспериментальные данные в области энергий быстрых нейтронов практически отсутствуют. Сечения в области нейтронов быстрых энергий для последних оценок в быстрой области энергий (JENDL-3.2 и CENDL-3) были получены в оптико-статистических модельных расчётах с учётом вклада прямых процессов. Учитывая, что согласие между двумя независимыми оценками является неплохим, можно говорить о достаточной надёжности оценок основных сечений полученных в модельных расчётах.

Заключение

Файл ^{135}Cs из библиотеки ENDF-VIIb2 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁶. Сечение захвата в области неразрешённых резонансов и до 1 МэВ должно быть переоценено с учётом новейших данных Патрониса.

Автор проведенного отбора оцененных данных

В.Г.Проняев.

⁶ Дополнить файлом MF=9 с секцией 105 с вероятностью образования Хе-133m. Данные взять из EAF-2993.– М.Ниолаев.

55.7. Цезий-136

В ядерном топливе может присутствовать как продукт деления, образовываться в результате реакции $^{135}\text{Cs}(n,\gamma)$ и др.

Период полураспада: (13.04 ± 0.03) дней.

Мода распада: β 100%.

Спин основного состояния: 5^+ .

Файлы

ENDF/B-VI (JEF-2) – оценка 1974 года (взята из ENDF/B-V).

JENDL-3.2 – оценка 1990 года.

JEF-2 – оценка года (взята из ENDF/B-V), существенная ревизия выполнена в 1989 году (MF=2).

ENDF/B-VIIb2 – оценка взята из JENDL-3.2 с незначительной корректировкой формата.

Тепловая и резонансная область

Экспериментальные данные для ^{136}Cs отсутствуют за исключением недавних измерений сечений захвата усреднённых по спектру Максвелла с различной температурой (Патронис, 2004). Сравнение сечений захвата в области неразрешённых резонансов показывает, что модельные оценки дают завышенное сечение и JENDL-3 лучше согласуется с новейшими экспериментальными данными, чем ENDF/B-VI (рисунок 9).

Область быстрых нейтронов

Экспериментальные данные в области энергий быстрых нейтронов отсутствуют. Сечения в области нейтронов быстрых энергий в JENDL-3.2 были оценены в оптико-статистических модельных расчётах с учётом вклада прямых процессов и физически более обоснованы, чем в ENDF/B-VI.

Заключение

Файл ^{136}Cs из библиотеки ENDF-VIIb2 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД. Сечение захвата в области энергий неразрешённых резонансов и до 1 МэВ желательно переоценить с учётом новейших данных Патрониса.

Автор проведенного отбора оцененных данных

В.Г.Проняев.

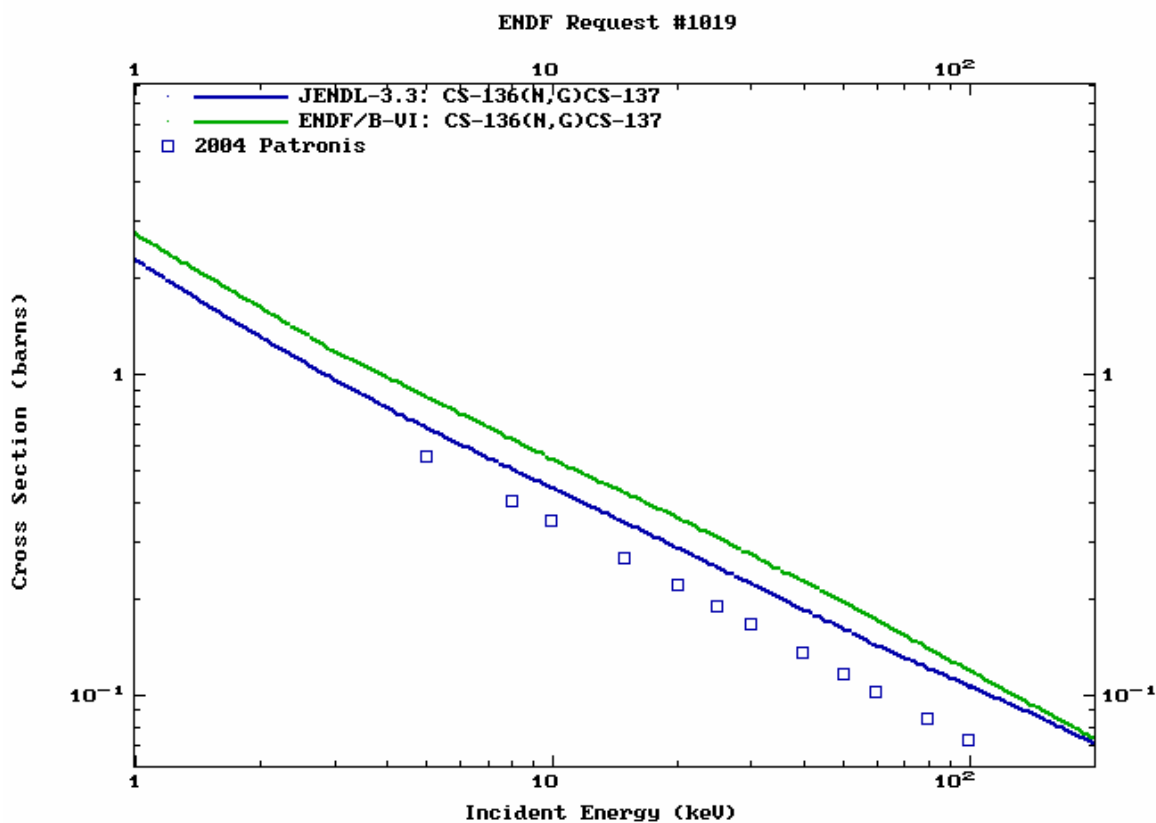


Рис. 9. Сравнение сечения захвата из библиотеки JENDL-3.2 и ENDF/B-VI с экспериментальными данными.

55.8. Цезий-137

В ядерном топливе может присутствовать как продукт деления.

Период полураспада: (30.03 ± 0.05) лет.

Мода распада: β 100%.

Спин основного состояния: $7/2^+$.

Файлы

ENDF/B-VI: Оценка 1974 года.

JEF-2: Оценка 1977 года, существенная ревизия в 1985 и 1988 годах (MF=2), в 1989 году.

JENDL-3: Оценка 1984 года, взята из JENDL-2, существенная ревизия - в 1990 году (MF2, MF3).

CENDL-3: Оценка 1999 года. В тепловой области и области разрешённых резонансов совпадает с JENDL-3, за исключением области 80 – 100 кэВ.

ENDF/B-VIIb2: Оценка взята из JENDL-3.2 с несущественными поправками формата.

Тепловая и резонансная область

Сравнение экспериментальных и оценённых тепловых сечений и резонансных интегралов захвата приведено в таблице 1. Как видно, JENDL-3 наилучшим образом описывает

тепловые сечения и резонансный интеграл хотя экспериментальное значение резонансного интеграла известно только для образования ядра-продукта в основном состоянии⁷.

Таблица 1. Сравнение тепловых сечений (барн, при 0.0253 эВ) и резонансных интегралов захвата (барн) из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными.

| Библиотека Эксперимент | Полное | Захват | Упругое | Резонансный интеграл захвата |
|---------------------------|--------|-----------------------------|---------|---------------------------------------|
| ENDF/B-VI | 4.987 | 0.110 | 4.877 | 0.488 |
| JEF-2 | 2.659 | 0.141 | 2.517 | |
| JENDL-3 (ENDF/B-VIIb2) | 3.79 | 0.25 | 3.54 | 0.36 |
| CENDL-3 | 3.84 | 0.26 | 3.54 | 2.11 |
| Maidana (1998) | | 0.253± 0.015 0.264±0.015 | | |
| Wada (2000) | | 0.27± 0.03 | | |
| Harada (1991) | | 0.25±0.02 | | 0.36±0.07 (только в осн. сост.) |

На рисунке 10 показано сравнение оценённого сечения захвата в области неразрешённых резонансов с последними экспериментальными данными Патрониса (2004). Как видно, все библиотеки существенно завышают сечения захвата в этой области энергий.

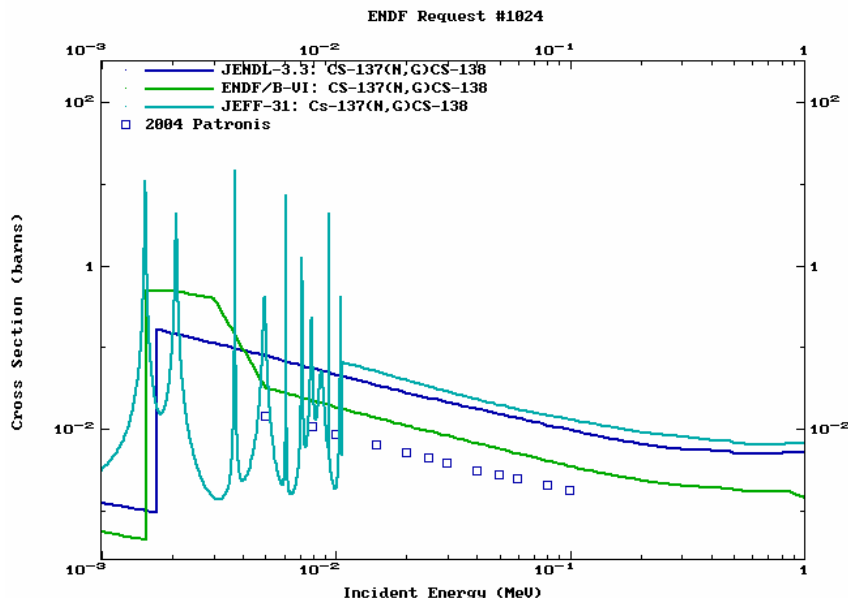


Рис. 10. Сравнение сечения захвата из библиотеки JENDL-3.2 и ENDF/B-VI и JEFF-3.1 (JEF-3.2) с экспериментальными данными.

⁷ По оценке EAF-2003 вероятность образования ядра-продукта в основном состоянии при низких энергиях составляет 90%. – М.Н.

Область быстрых нейтронов

Экспериментальные данные в области энергий быстрых нейтронов отсутствуют. Сечения в области нейтронов быстрых энергий в JENDL-3.2 были оценены в оптико-статистических модельных расчётах с учётом вклада прямых процессов и физически более обоснованы, чем в ENDF/B-VI.

Заключение

Файл ^{137}Cs из библиотеки ENDF-VIIb2 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД. Сечение захвата в области энергий неразрешённых резонансов и до 1 МэВ должно быть переоценено с учётом данных Патрониса.

Автор проведенного отбора оцененных данных

В.Г.Проняев.

56.БАРИЙ

56.1. Барий-128

Период полураспада: (2.43 ± 0.05) дня.

Моды распада: e^- 100%.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файлы

JEFF-3.1/A – неполная оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из библиотеки ADL-3.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{128}Ba из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 1. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

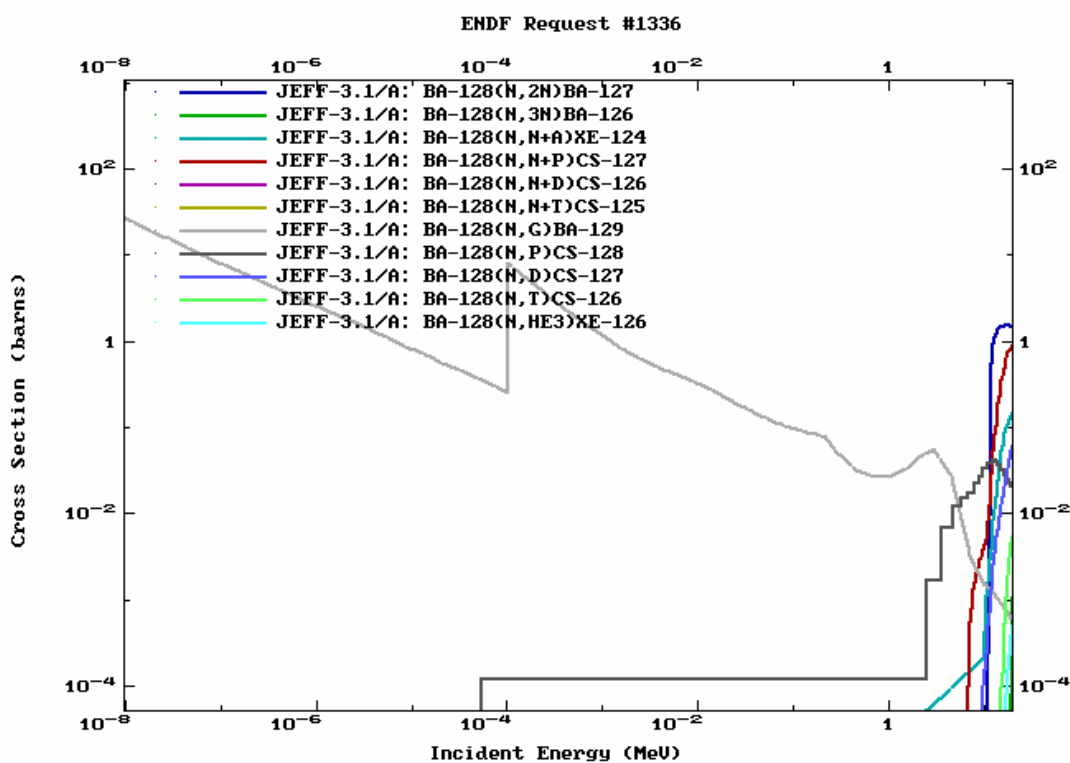


Рис. 1. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A для ^{128}Ba .

Заключение

Файл ^{128}Ba из библиотеки JEFF-3.1/A=EAF-2003 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

56.2. Барий-130

Содержание в естественной смеси: $0.106 \pm 0.001\%$.

Период полураспада: $> 3.5 \cdot 10^{14}$ лет.

Моды распада: $2e^{100}\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файлы

JENDL-3: оценка 1990 года.

CENDL-3: оценка 2001 года.

ENDF/B-VII: область неразрешённых резонансов и быстрая область взяты из оценки JENDL-3 с небольшими исправлениями в формате, резонансная область – оценка С. Мгхабгхаба (Атлас-2006).

JEFF-3.1/A – неполная оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из библиотеки ADL-3.

Данные

На рисунках 2 и 3 показано сравнение основных сечений из двух имеющихся полных библиотек. Оценка ENDF/B-VII отличается от JENDL-3 только тем, что в неё введена новая оценка резонансных параметров, которая существенно образом сечение упругого рассеяния в тепловой и резонансной области энергий.

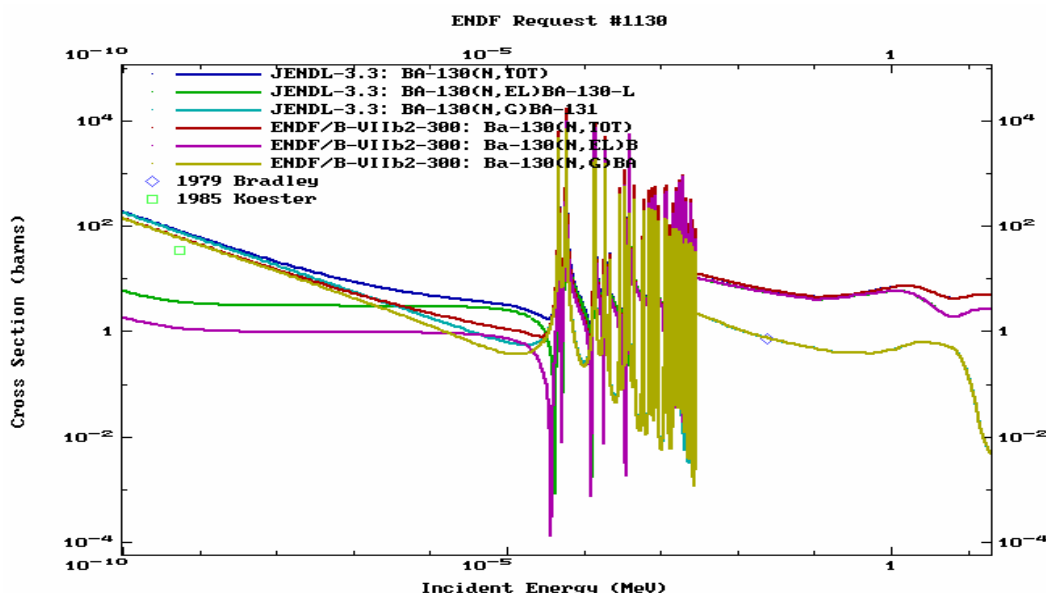


Рис. 2. Сравнение оценённых нейтронные сечения из библиотеки JENDL-3 и ENDF/B-VII.

¹ Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 исключить. – М.Николаев.

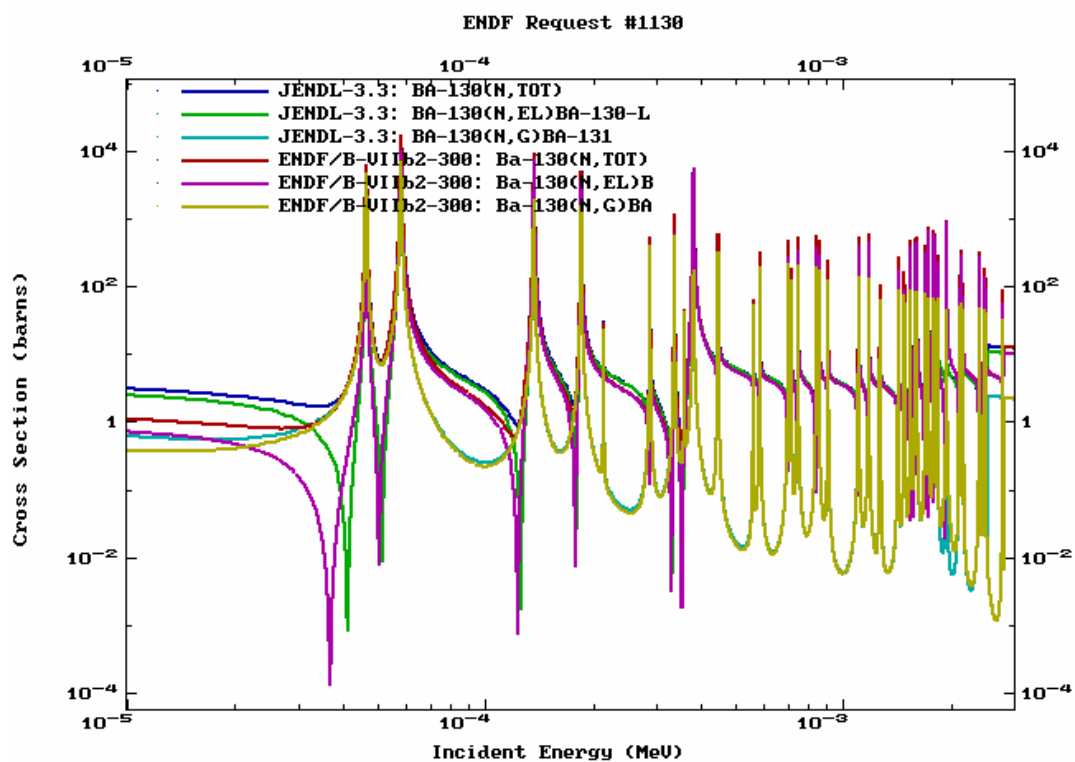


Рис. 3. Тоже что на рисунке 2, но для более узкого интервала энергий.

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JENDL-3 с новыми резонансными параметрами из Атласа-2006 для включения в состав международной библиотеки для осколков деления. Этот файл также рекомендован для библиотеки РОСФОНД.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

56.3. Барий-131

Период полураспада: (11.50 ± 0.06) дня.

Моды распада: e^- 100%.

Спин основного состояния: $1/2^+$.

Файлы

JEFF-3.1/A – неполная оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из библиотеки ADL-3.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{131}Ba из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 4. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

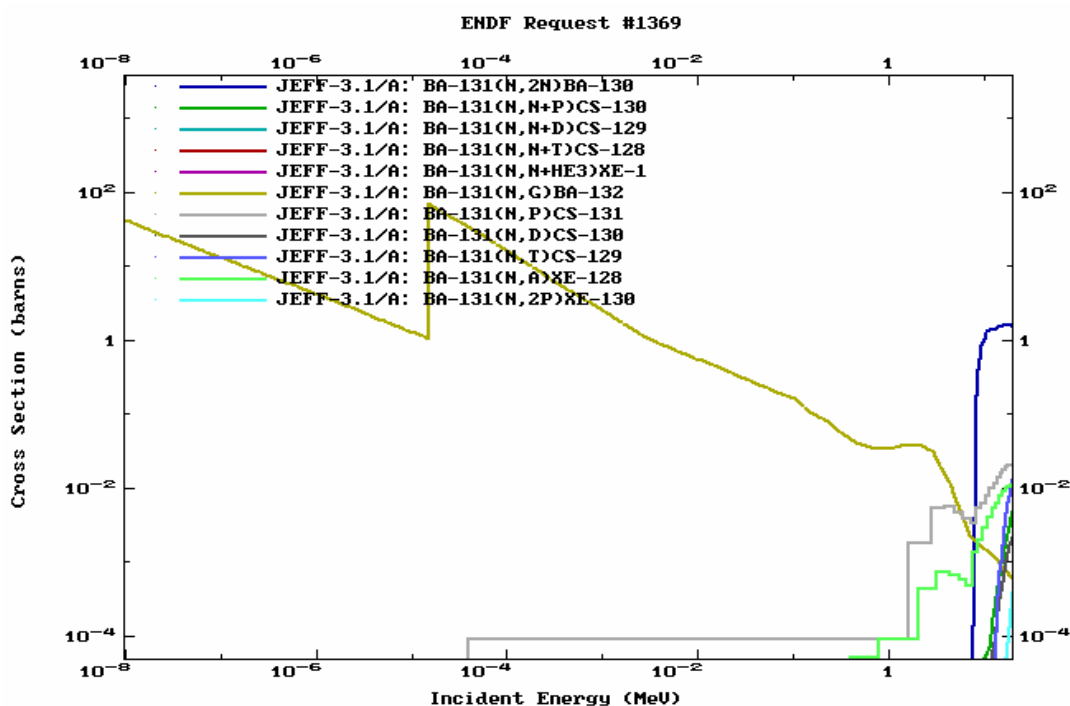


Рис. 4. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A для ^{131}Ba .

Заключение

Файл ^{131}Ba из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД².

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

² Ввести файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{129}\text{Xe}^m$, используя данные из EAF-2003. – М.Николаев.

56.4. Барий-132

Содержание в естественной смеси: $0.101 \pm 0.001\%$.

Период полураспада: $> 3.0 \cdot 10^{21}$ лет.

Моды распада: $2e^{-100}\%$.

Спин основного состояния: 0^{+} .

Файлы

JENDL-3: оценка 1990 года.

CENDL-3: оценка 2001 года.

ENDF/B-VII: область неразрешённых резонансов и быстрая область взяты из оценки JENDL-3 с небольшими исправлениями в формате, резонансная область – оценка С. Мухабгхаба (Атлас-2006).

JEFF-3.1/A – неполная оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из библиотеки ADL-3.

Данные

На рисунках 5 и 6 показано сравнение основных сечений из двух имеющихся полных библиотек. Оценка ENDF/B-VII отличается от JENDL-3 только тем, что в неё введена новая оценка резонансных параметров (С. Мухабгхаб, Атлас-2006), которая существенным образом изменила сечение упругого рассеяния в тепловой и резонансной области энергий.

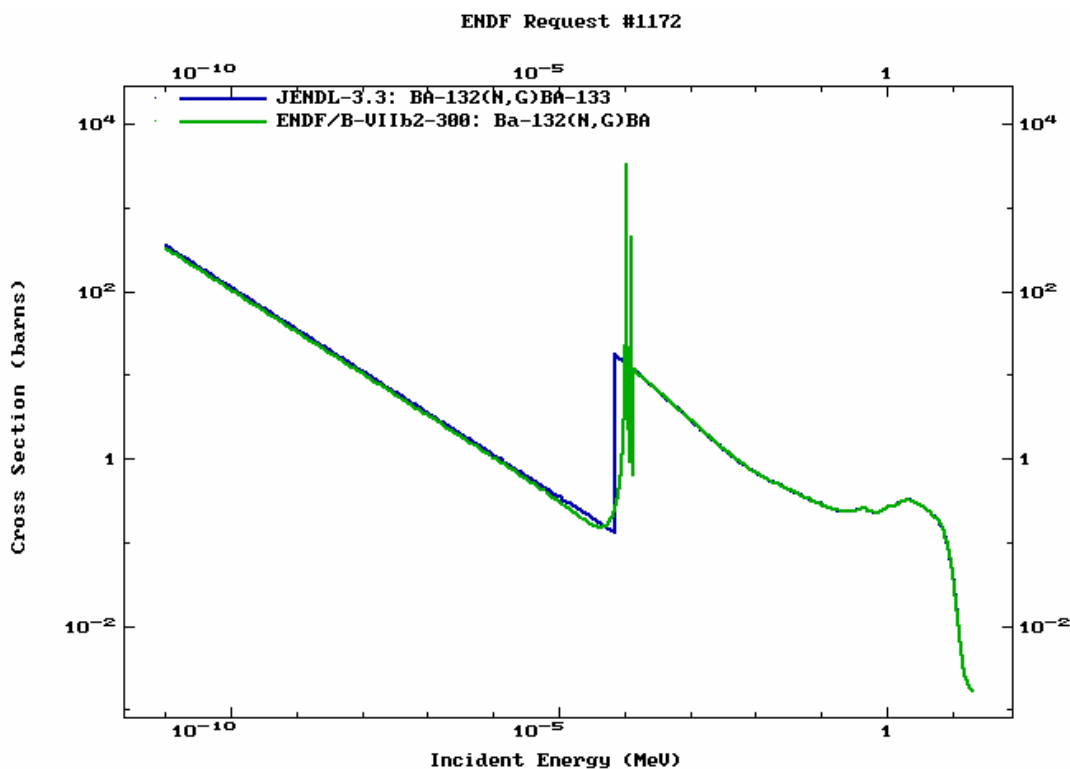


Рис. 5. Сравнение сечений захвата нейтронов из библиотеки JENDL-3 и ENDF/B-VII.

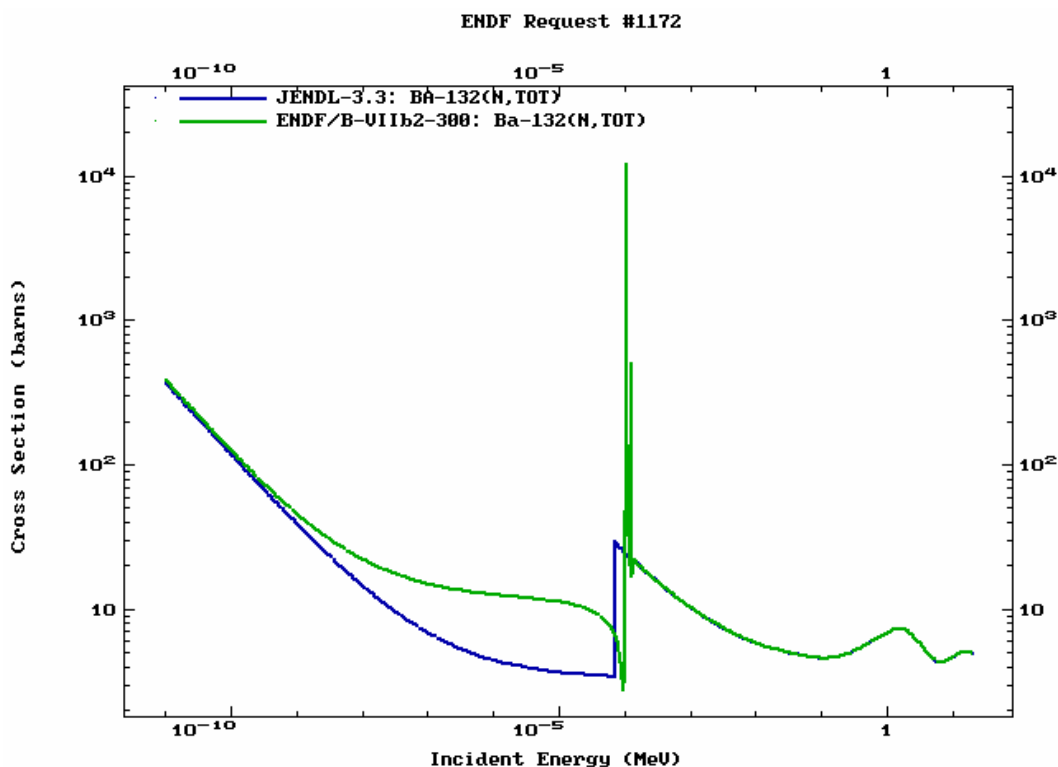


Рис. 6. Сравнение полных нейтронных сечений из библиотеки JENDL-3 и ENDF/B-VII.

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JENDL-3 с новыми резонансными параметрами из Атласа-2006 для включения в состав международной библиотеке для осколков деления. Этот файл также рекомендован для библиотеки РОСФОНД³.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

56.5. Барий-133

Период полураспада: 3841 ± 7 дней.

Моды распада: e^- 100%.

Спин основного состояния: $1/2^+$.

Файлы

ENDF/B-VII: оценка 2006 года. Область разрешённых и неразрешённых резонансов – оценка С. Мгхабгхаба (Атлас-2006), быстрая область – расчёты по программе EMPIRE с учётом вклада различных механизмов ядерных реакций.

³ Ввести файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{129}\text{Xe}^m$ и $^{133}\text{Ba}^m$, используя данные из файла MF=10 EAF-2003. – М.Николаев.

JEFF-3.1/A – неполная оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из библиотеки ADL-3.

Данные

Оценка ENDF/B-VII содержит полный файл оценённых нейтронных сечений для ^{133}Ba полученный в быстрой области энергий в расчётах с использованием современных моделей и систематик параметров. На рисунке 7 показаны основные сечения из этой библиотеки. Несомненно, что эти сечения являются физически обоснованными.

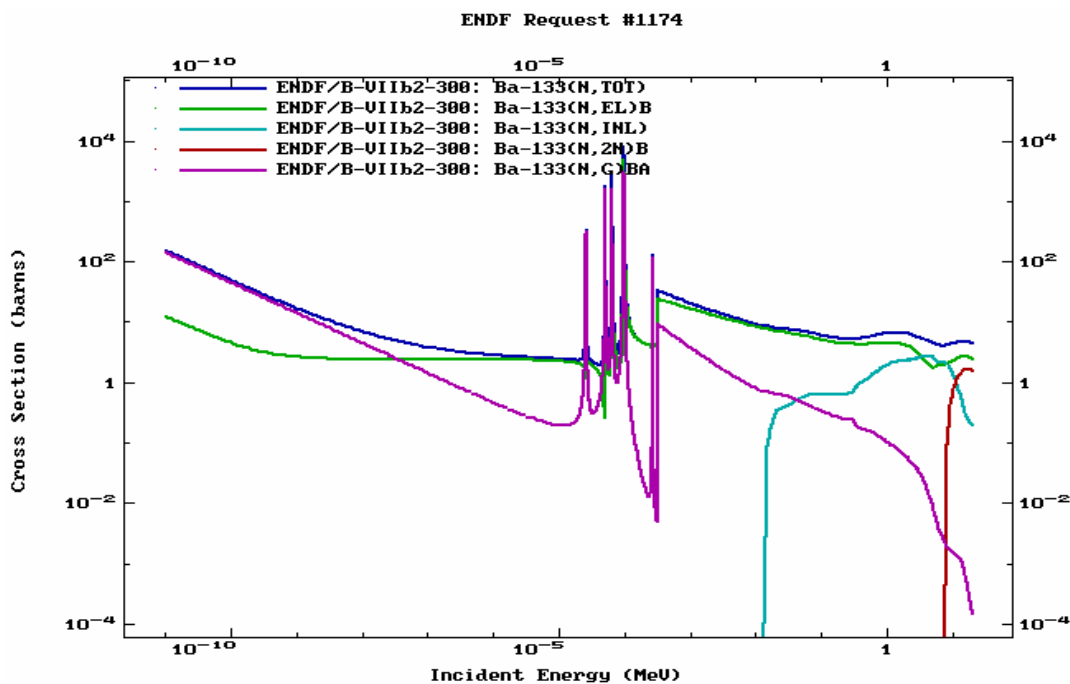


Рис. 7. Основные сечения из библиотеки ENDF/B-VII.

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала выполнить новую оценку для файла ^{133}Ba международной библиотеки осколков деления в области быстрых нейтронов с включением резонансных параметров из Атласа-2006. Этот файл также рекомендуется для включения в библиотеку РОСФОНД⁴

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

⁴ Ввести файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{129}\text{Xe}^m$ и $^{133}\text{Ba}^m$, используя данные из файла MF=10 EAF-2003. – М.Николаев.

56.6. Барий-133-м

Период полураспада: (38.9 ± 0.1) часа.

Моды распада: IT 99.99%, e^- $9.6 \cdot 10^{-3}\%$.

Спин основного состояния: $11/2^-$.

Файлы

JEFF-3.1/A – неполная оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из библиотеки ADL-3.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{133m}Ba из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 8. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

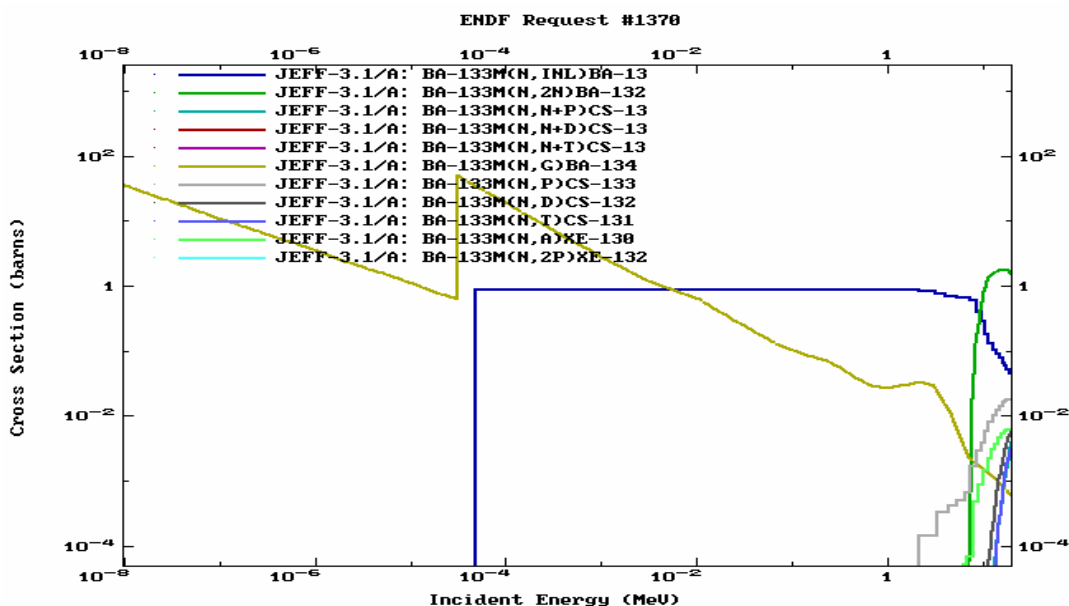


Рис. 8. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A для ^{133m}Ba .

Заключение

Файл ^{133m}Ba из библиотеки JEFF-3.1/A=EAF-2003 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁵.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

⁵ Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Включить файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера $^{131}\text{Xe}^m$. Секцию MT=4 перенести из файла MF=3 в файл MF=10. Файл MF=8 исключить. – М.Н.Николаев

56.7. Барий-134

Содержание в естественной смеси: $2.417 \pm 0.018\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файлы

JENDL-3 (ENDF/B-VI): оценка 1990 года.

CENDL-3: оценка 1999 года.

ENDF/B-VII: область неразрешённых резонансов и быстрая область взяты из оценки JENDL-3 с небольшими исправлениями в формате, резонансная область – оценка С. Мугхабгхаба (Атлас-2006).

Данные

На рисунках 9 и 10 показано сравнение основных сечений из двух имеющихся полных библиотек. Оценка ENDF/B-VII отличается от JENDL-3 только тем, что в неё введена новая оценка резонансных параметров (С. Мугхабгхаб, Атлас-2006), которая существенным образом изменила сечение упругого рассеяния в тепловой и резонансной области энергий.

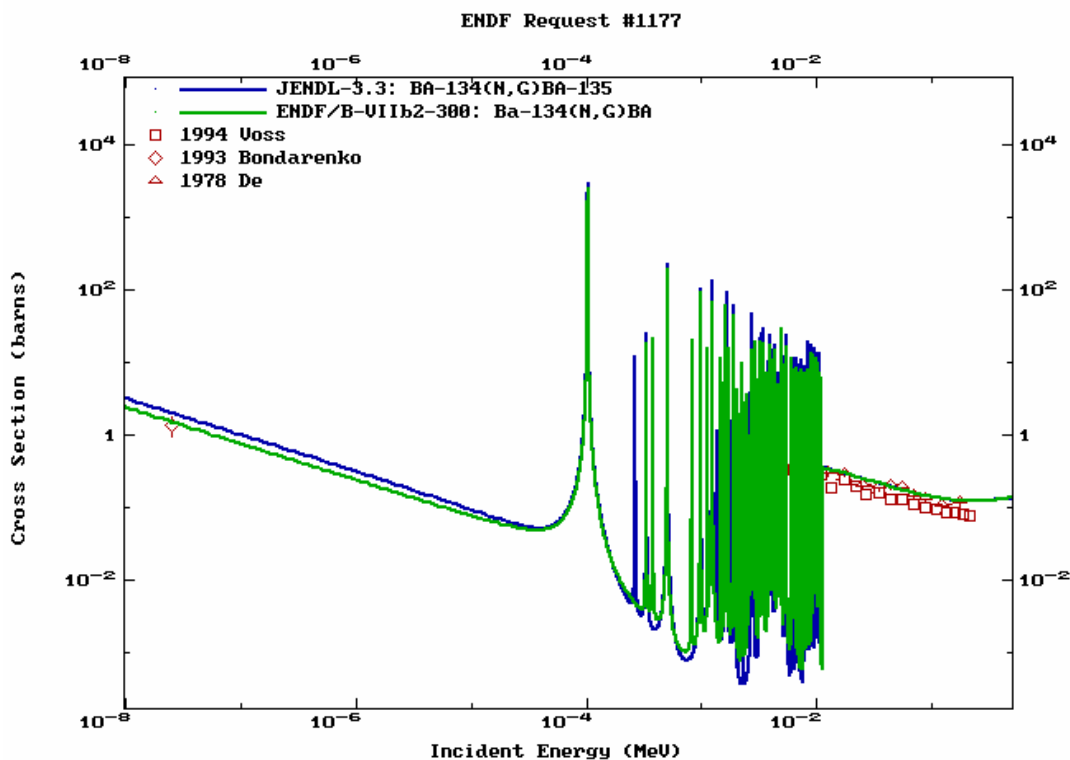


Рис. 9. Сравнение сечений захвата нейтронов из библиотеки JENDL-3 и ENDF/B-VII с имеющимися экспериментальными данными.

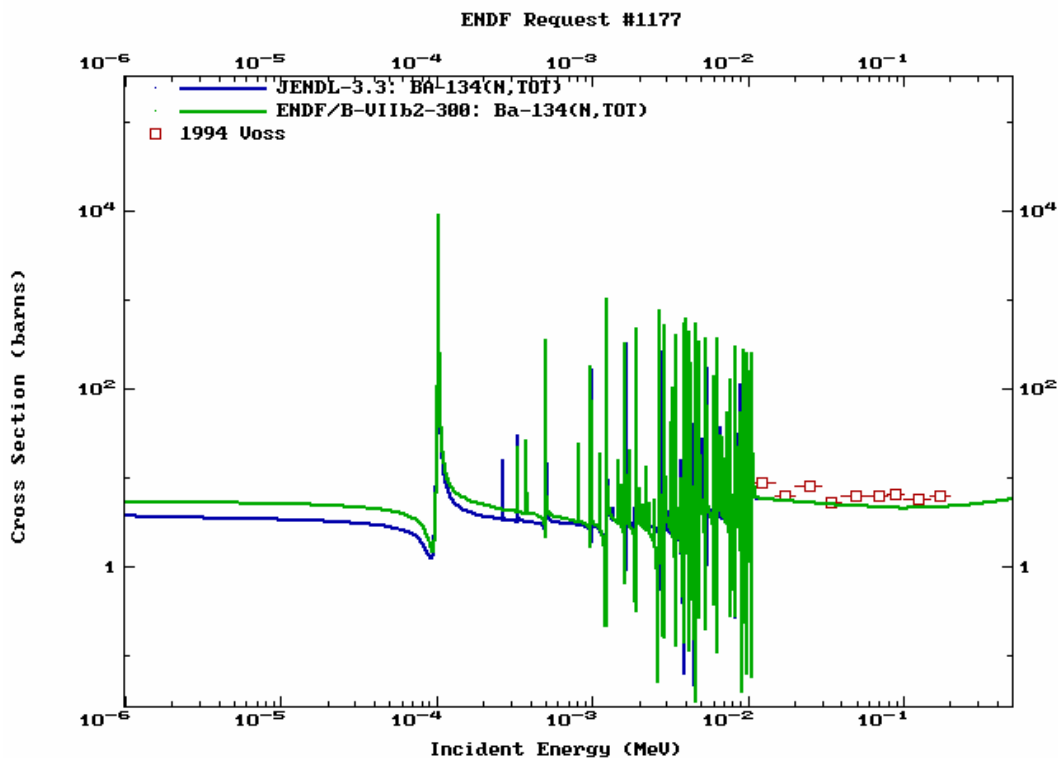


Рис. 10. Сравнение полного сечения для нейтронов из библиотеки JENDL-3 и ENDF/B-VII с имеющимися экспериментальными данными.

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JENDL-3 с новыми резонансными параметрами из Атласа-2006 для включения в состав международной библиотеки для осколков деления. Этот файл также рекомендован для библиотеки РОСФОНД⁶.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

⁶ Вести файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{131}\text{Xe}^m$, $^{134}\text{Cs}^m$, $^{135}\text{Ba}^m$ использовав данные из файла MF=10 EAF-2003. – М.Николаев.

56.8. Барий-135

Содержание в естественной смеси: $6.592 \pm 0.012\%$.

Спин основного состояния: $3/2^+$.

Файлы

JENDL-3 (ENDF/B-VI): оценка 1990 года.

CENDL-3: оценка 1999 года.

ENDF/B-VII: область неразрешённых резонансов и быстрая область взяты из оценки JENDL-3 с небольшими исправлениями в формате, резонансная область – оценка С. Мгхабгхаба (Атлас-2006).

Данные

На рисунках 11 показано сравнение сечений захвата из библиотек ENDF/B-VII и JENDL-3 в области разрешённых резонансов. Те же сечения в групповом представлении в сравнении с имеющимися экспериментальными данными показаны на рисунке 12. Более ранняя оценка JENDL-3 содержит намного больше резонансов большинство из которых являются искусственными и добавлены чтобы компенсировать вклад пропущенных резонансов. Это в основном s- резонансы с заметными нейтронными ширинами. Вероятно, что вклад от таких резонансов существенно завышен (рисунок 12).

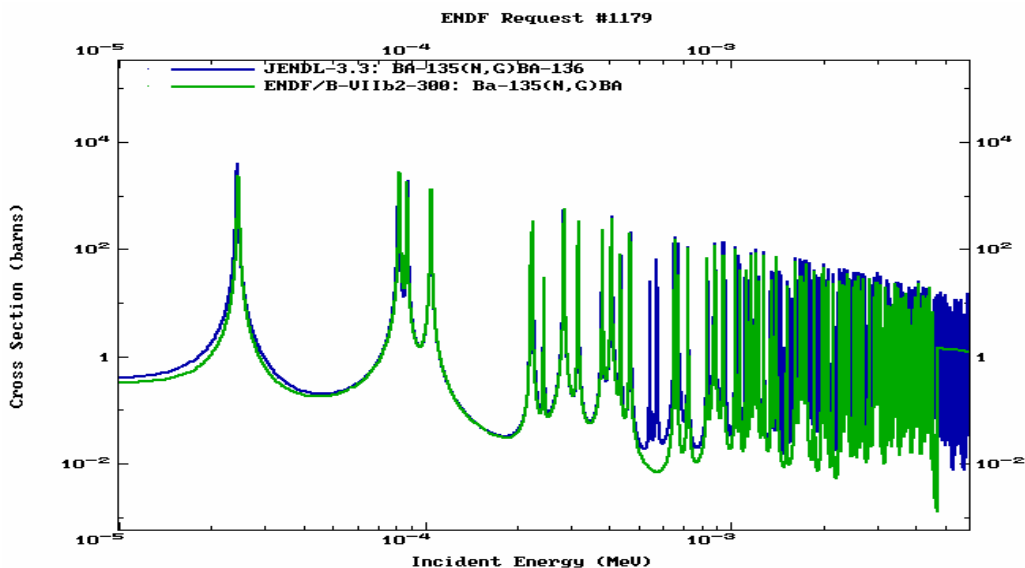


Рис. 11. Сравнение сечений захвата нейтронов из библиотеки JENDL-3 и ENDF/B-VII.

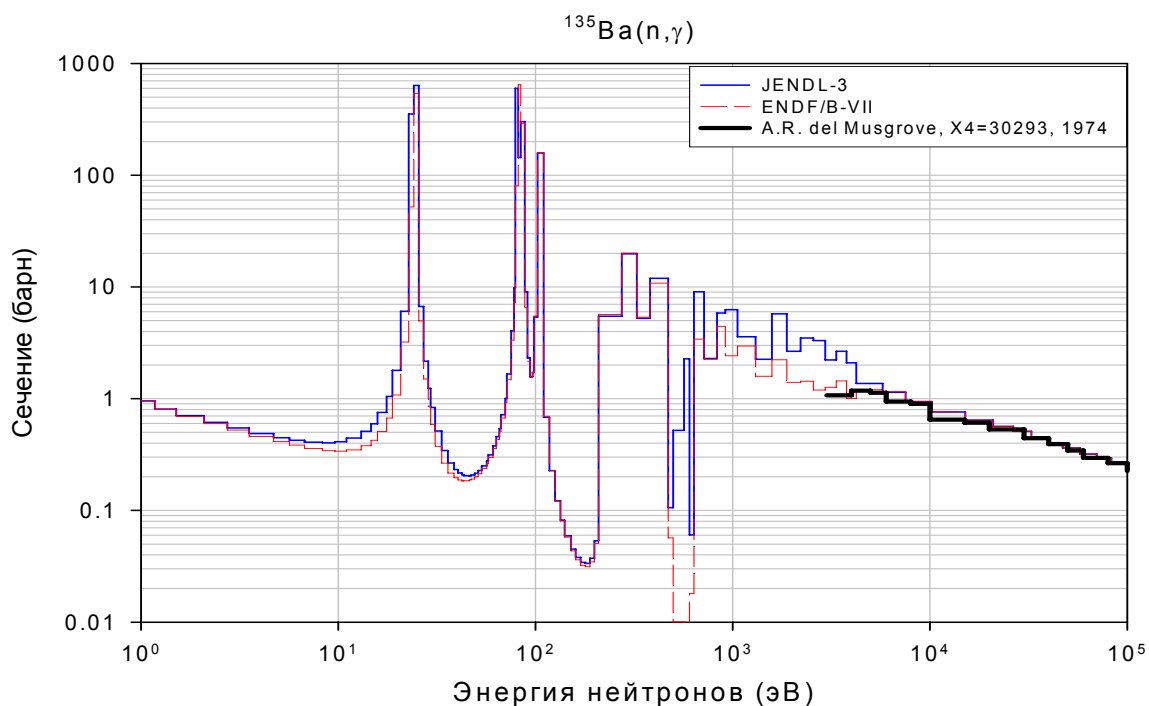


Рис. 12. Сравнение сечения захвата для нейтронов из библиотеки JENDL-3 и ENDF/B-VII в групповом представлении с имеющимися экспериментальными данными.

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JENDL-3 с новыми резонансными параметрами из Атласа-2006 для включения в состав международной библиотеки для осколков деления. Этот файл также рекомендован для библиотеки РОСФОНД⁷

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

⁷ Вести файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущих изомеров $^{133}\text{Xe}^m$ и $^{131}\text{Xe}^m$, а также Ва-135m и Ва-133m используя данные из файла MF=10 EAF-2003. – М.Николаев.

56.9. Барий-135-м

Период полураспада: (28.7 ± 0.2) часа.

Моды распада: IT 100%.

Спин основного состояния: $11/2^-$.

Файлы

JEFF-3.1/A – неполная оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из библиотеки ADL-3.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{135m}Ba из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 13. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

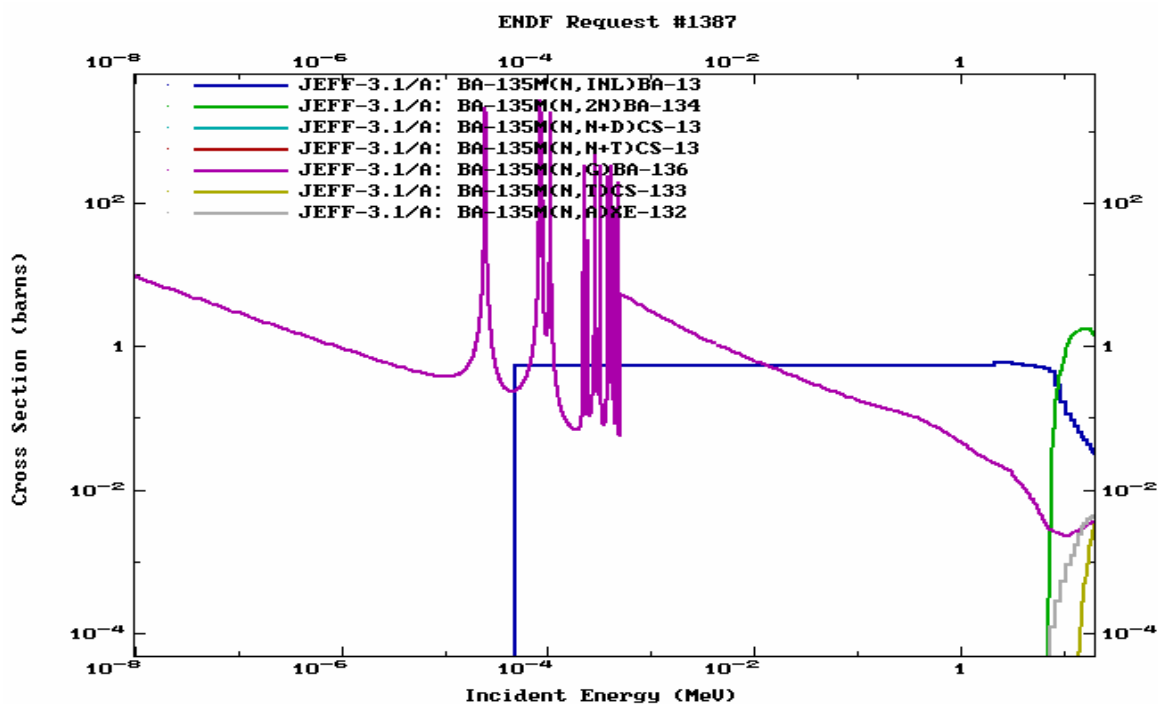


Рис. 13. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A для ^{135m}Ba .

Заключение

Файл ^{135m}Ba из библиотеки JEFF-3.1/A=EAF-2003 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁸.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

⁸ Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Включить файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера $^{131}\text{Xe}^m$. Секцию MT=4 перенести из файла MF=3 в файл MF=10. Файл MF=8 исключить. – М.Н.Николаев

56.10. Барий-136

Содержание в естественной смеси: $7.854 \pm 0.024\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файлы

JENDL-3 (ENDF/B-VI): оценка 1990 года.

CENDL-3: оценка 1999 года.

ENDF/B-VII: область неразрешённых резонансов и быстрая область взяты из оценки JENDL-3 с небольшими исправлениями в формате, резонансная область – оценка С. Мухабхаба (Атлас-2006).

Данные

На рисунках 14 и 15 показано сравнение сечений захвата и полного нейтронного сечения из двух имеющихся полных библиотек. Оценка ENDF/B-VII отличается от JENDL-3 только тем, что в неё введена новая оценка резонансных параметров (С. Мухабхаб, Атлас-2006), которая существенным образом изменила сечение упругого рассеяния в тепловой и резонансной области энергий. Сечение захвата усреднённое по группам в области разрешённых резонансов отличается не сильно в этих двух библиотеках, при этом сечение из ENDF/B-VII лучше согласуется с последними экспериментальными данными.

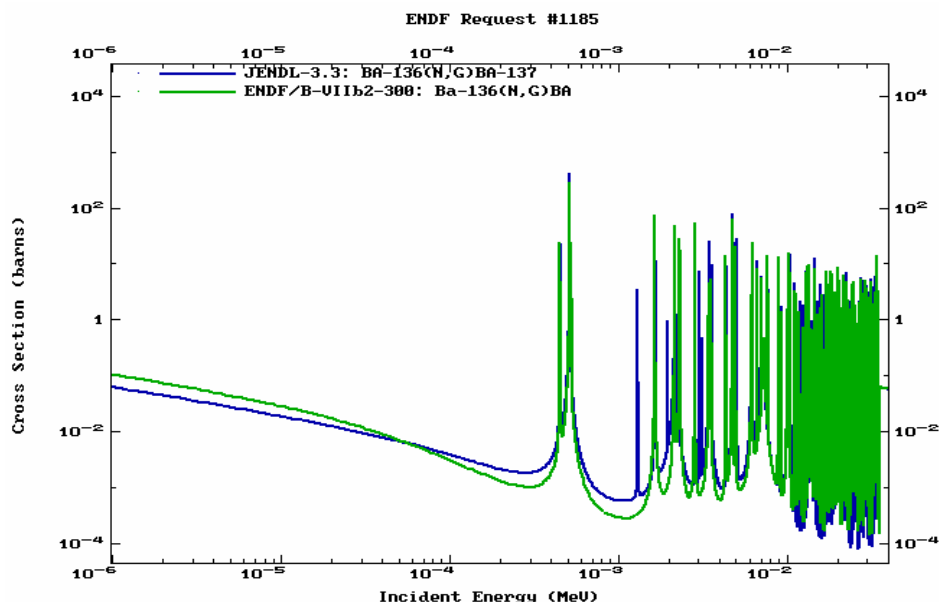


Рис. 14. Сравнение сечений захвата нейтронов из библиотеки JENDL-3 и ENDF/B-VII.

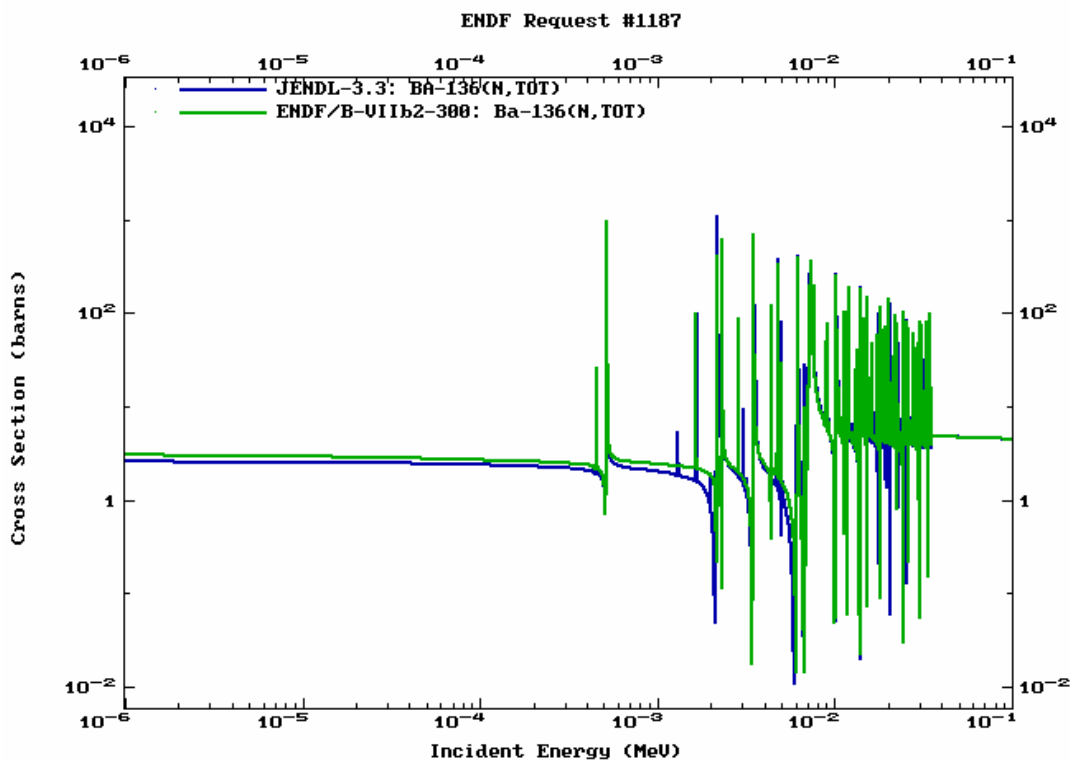


Рис. 15. Сравнение полного сечения из библиотеки JENDL-3 и ENDF/B-VII.

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JENDL-3 с новыми резонансными параметрами из Атласа-2006 для включения в состав международной библиотеки для осколков деления. Этот файл также рекомендован для библиотеки РОСФОНД⁹

Автор заключения

Проняев В.Г.

56.11. Барий-137

Содержание в естественной смеси: $11.232 \pm 0.024\%$.

Спин основного состояния: $3/2^+$.

Файлы

JENDL-3 (ENDF/B-VI): оценка 1990 года.

CENDL-3: оценка 1999 года.

ENDF/B-VII: область неразрешённых резонансов и быстрая область взяты из оценки JENDL-3 с небольшими исправлениями в формате, резонансная область – оценка С. Мгхабгхаба (Атлас-2006).

⁹ Вести файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущих изомеров $^{133}\text{Xe}^m$ и $^{135}\text{Ba}^m$, используя данные из файла MF=10 EAF-2003. – М.Николаев.

Данные

На рисунках 16 и 17 показано сравнение полного нейтронного сечения и сечения захвата из двух имеющихся полных библиотек. Оценка ENDF/B-VII отличается от JENDL-3 только тем, что в неё введена новая оценка резонансных параметров (С. Мугхабгхаб, Атлас-2006), которая существенным образом изменила сечение упругого рассеяния в тепловой и резонансной области энергий. Сечение захвата усреднённое по группам в области разрешённых резонансов (рисунок 18) отличается заметно в этих двух библиотеках. Это объясняется тем, что файл JENDL-3 содержит дополнительные искусственные резонансы, учитывающие их пропуск. Как кажется, вклад от этих резонансов в сечение захвата существенно завышен.

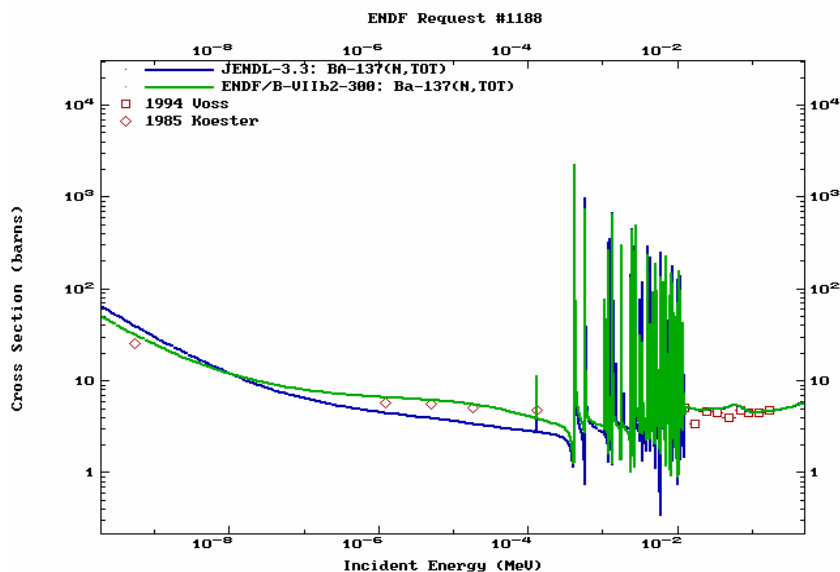


Рис. 16. Сравнение полного сечения из библиотеки JENDL-3 и ENDF/B-VII с имеющимися экспериментальными данными.

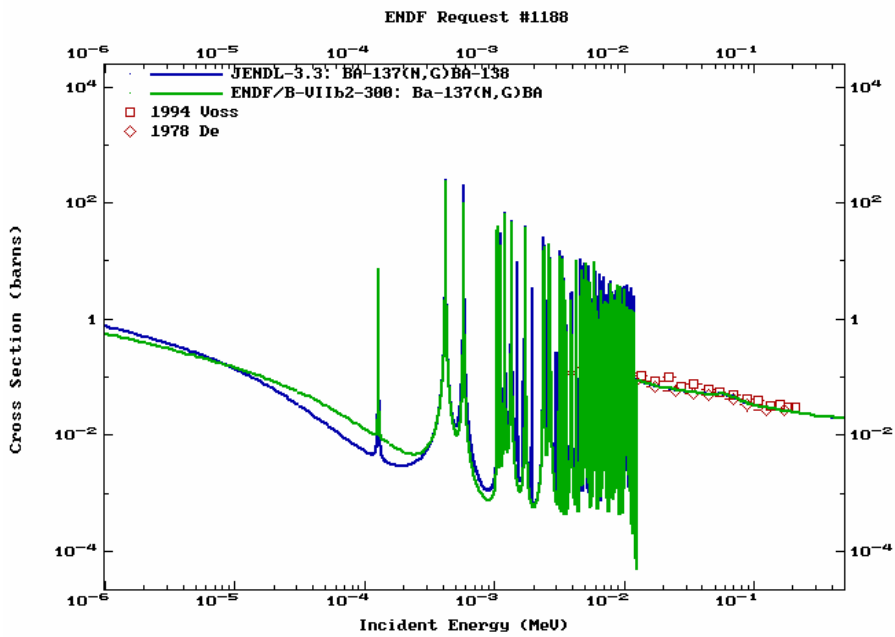


Рис. 17. Сравнение сечения захвата из библиотеки JENDL-3 и ENDF/B-VII с имеющимися экспериментальными данными.

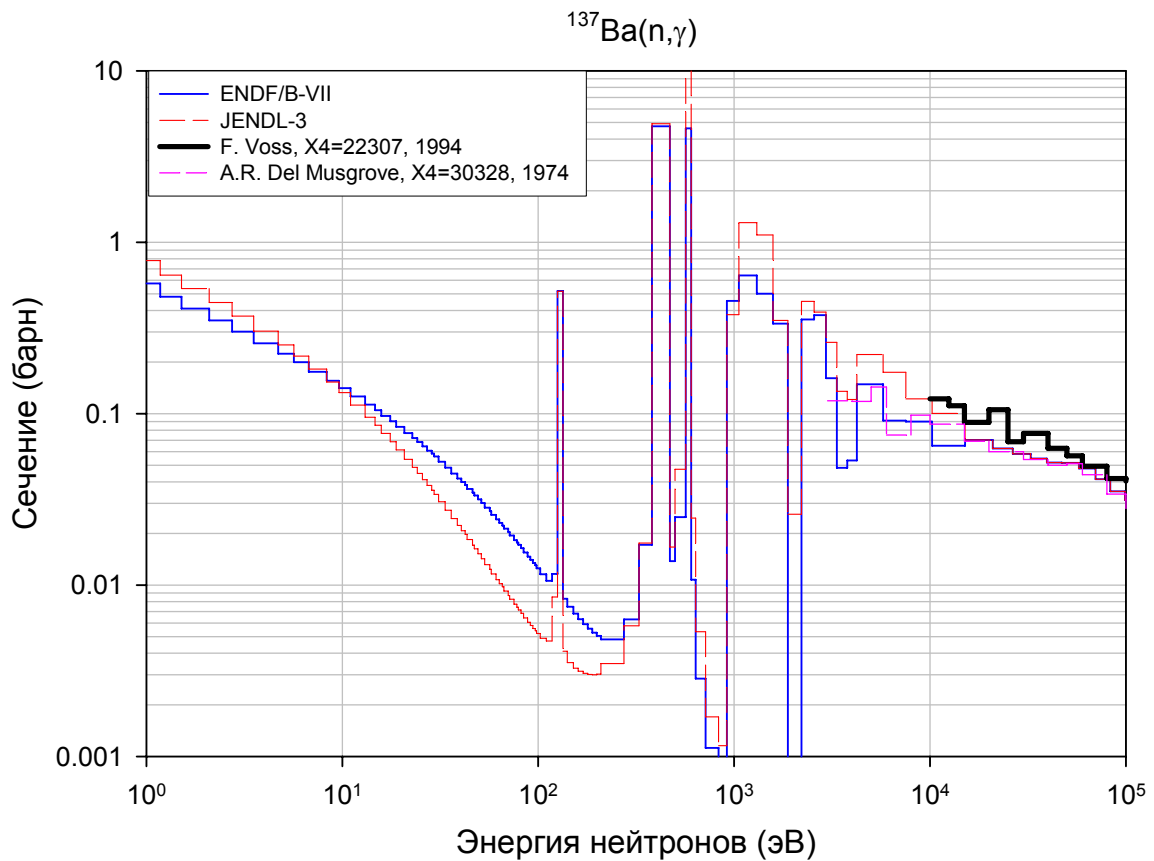


Рис. 18. Сравнение сечения захвата усреднённого по группам в области разрешённых резонансов из библиотеки JENDL-3 и ENDF/B-VII с имеющимися экспериментальными данными.

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JENDL-3 с новыми резонансными параметрами из Атласа-2006 для включения в состав международной библиотеке для осколков деления. Этот файл также рекомендован для библиотеки РОСФОНД¹⁰

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

56.12. Барий-138

Содержание в естественной смеси: $71.698 \pm 0.042\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файлы

JENDL-3 (ENDF/B-VI): оценка 1990 года.

CENDL-3: оценка 1999 года.

ENDF/B-VII: область неразрешённых резонансов и быстрая область взяты из оценки CENDL-3, резонансная область – оценка С. Мгхабгхаба (Атлас-2006).

Данные

На рисунках 19 и 20 показано сравнение полного нейтронного сечения и сечения захвата из двух имеющихся полных библиотек. Оценка ENDF/B-VII отличается от CENDL-3 только тем, что в неё введена новая оценка резонансных параметров (С. Мгхабгхаб, Атлас-2006), которая изменила сечение упругого рассеяния в тепловой и резонансной области энергий. Для учета вклада пропущенных резонансов, в сечение захвата в резонансной области ENDF/B-VII введена гладкая подложка. Область разрешённых резонансов расширена в ENDF/B-VII до 140 кэВ по сравнению со 100 кэВ в JENDL-3. Сечение захвата усреднённое по группам в области разрешённых резонансов (рисунок 21) отличается в этих двух библиотеках. Для сравнения на рисунке 21 приведены также экспериментальные данные, включая сечения усреднённые по спектру Максвелла при данной температуре кТ.

¹⁰ Вести файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущих изомеров $^{133}\text{Xe}^m$ и $^{135}\text{Ba}^m$, используя данные из файла MF=10 EAF-2003. – М.Николаев.

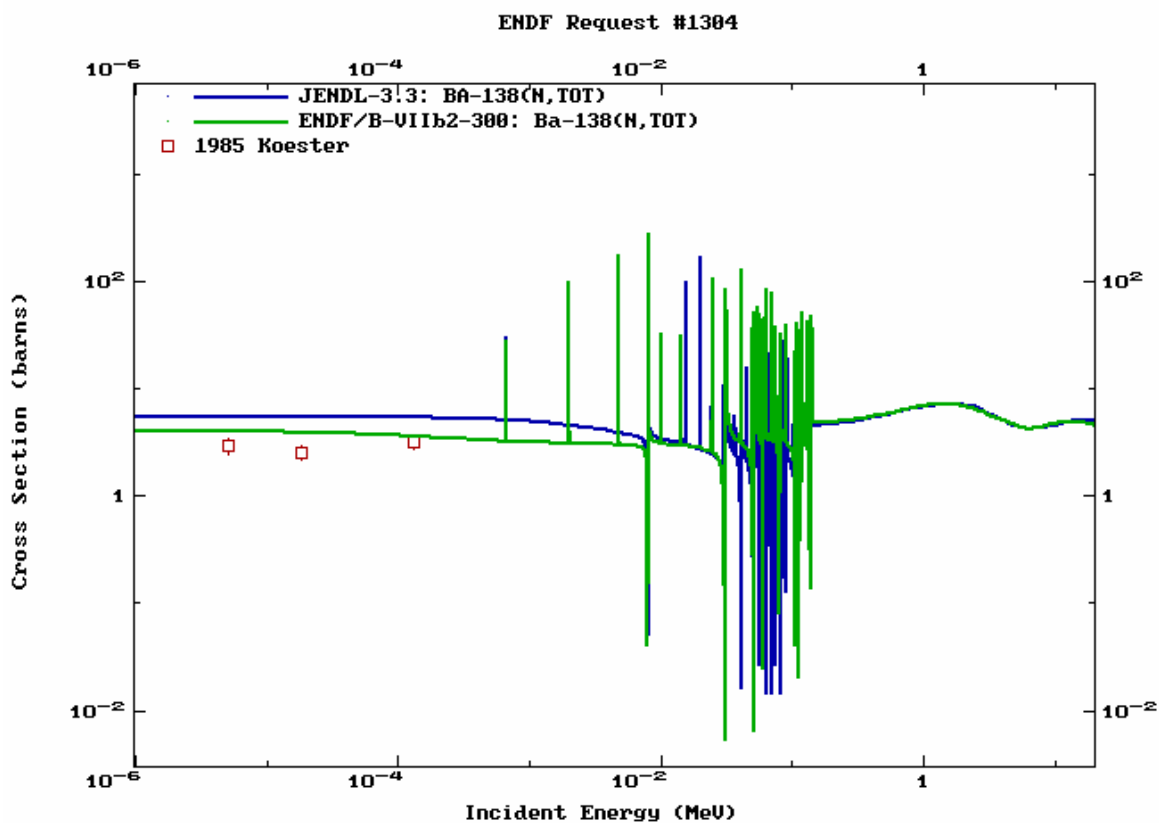


Рис. 19. Сравнение полного сечения из библиотеки JENDL-3 и ENDF/B-VII с имеющимися экспериментальными данными.

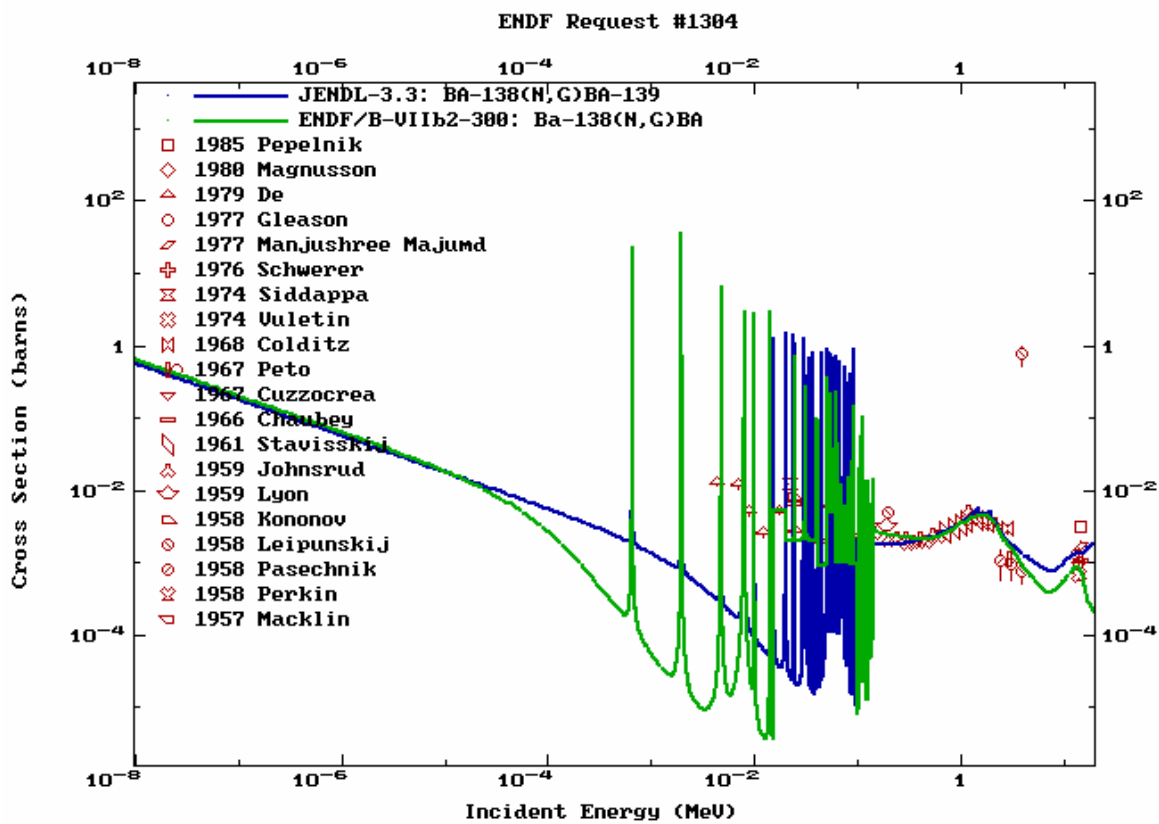


Рис. 20. Сравнение сечения захвата из библиотеки JENDL-3 и ENDF/B-VII с имеющимися экспериментальными данными.

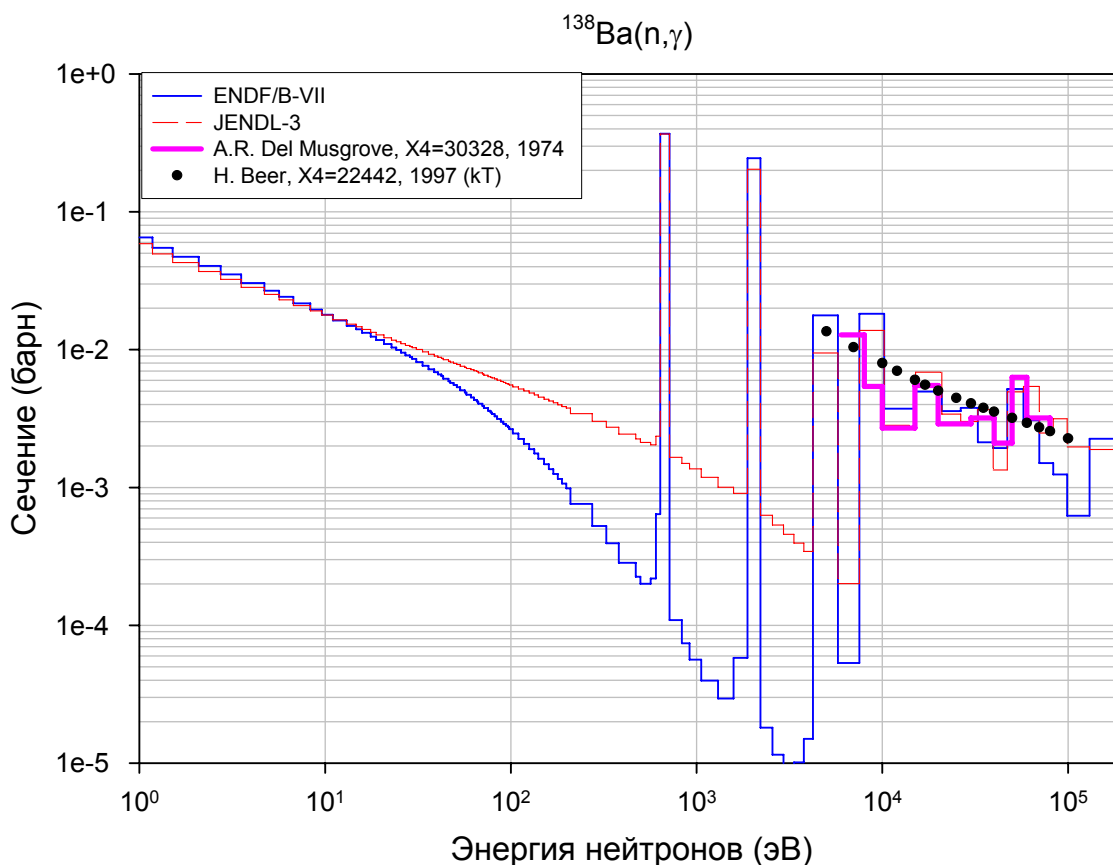


Рис. 21. Сравнение сечения захвата усреднённого по группам в области разрешённых резонансов из библиотеки JENDL-3 и ENDF/B-VII с имеющимися экспериментальными данными.

Заключение

Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из CENDL-3 с новыми резонансными параметрами из Атласа-2006 для включения в состав международной библиотеки для осколков деления. Этот файл также рекомендован для библиотеки РОСФОНД. Он может быть взят и из ENDF/B-VIIb2.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

56.13. Барий-140

Период полураспада: (12.752 ± 0.003) дня.

Моды распада: β 100%.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файлы

JEFF-3 – оценка 1992 года с генерацией искусственных резонансов в области разрешённых резонансов, базирующейся на систематиках средних ширин и средних расстояний между уровнями и модельным расчётам в более высокой области энергий.

ENDF/B-VI – устаревшая оценка 1974 года.

JENDL-3 - модельная оценка (1990), базирующаяся на систематике средних резонансных параметров силовых функций и параметров оптического потенциала.

ENDF/B-VII – оценка взята из JEFF-3.

Данные

Экспериментальные данные для ^{140}Ba отсутствуют. Сравнение сечения захвата из разных библиотек показано на рисунке 22. JEFF-3 даёт наибольшее сечение захвата в быстрой области энергий. Подгруппа 23 международной группы по оценке сечений рекомендовала файл из JEFF-3 для включения в состав международной библиотеки для осколков деления.

Все нейтронные сечения для ^{140}Ba из JEFF-3 имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 23. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

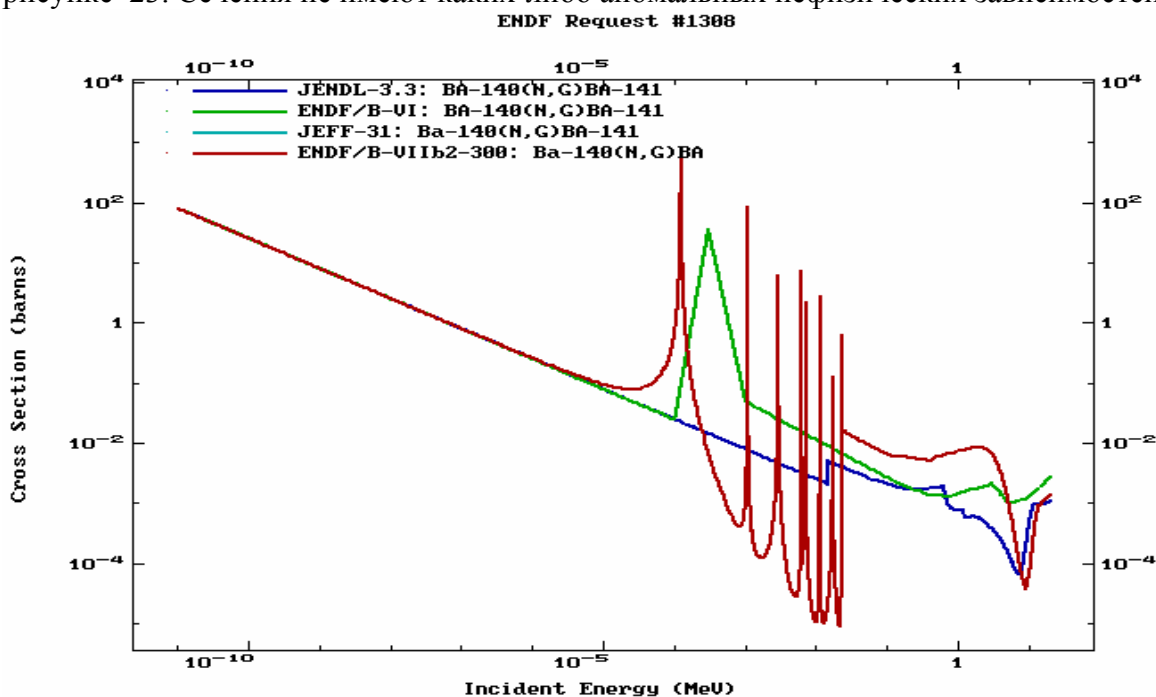


Рис. 22. Сравнение сечения захвата из разных библиотек оценённых данных.

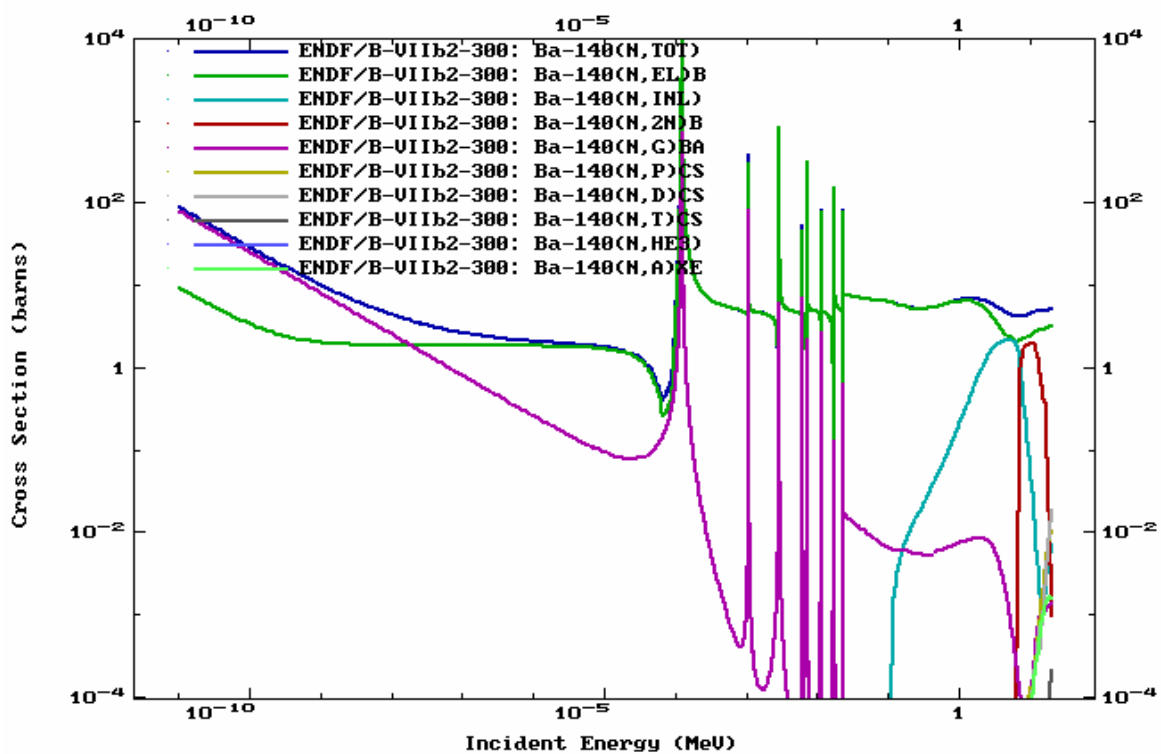


Рис. 23. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3 для ^{140}Ba .

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется принять файл данных из JEFF-3.1

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

57. ЛАНТАН

57.1. Лантан-137

Общие характеристики

Период полураспада: $(6 \pm 2) \cdot 10^4$ лет.

Моды распада: e^- 100%.

Спин основного состояния: $7/2^+$.

Файлы

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{137}La из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-5} барн приведены на рисунке 1. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

Рекомендация

Файл ^{137}La из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

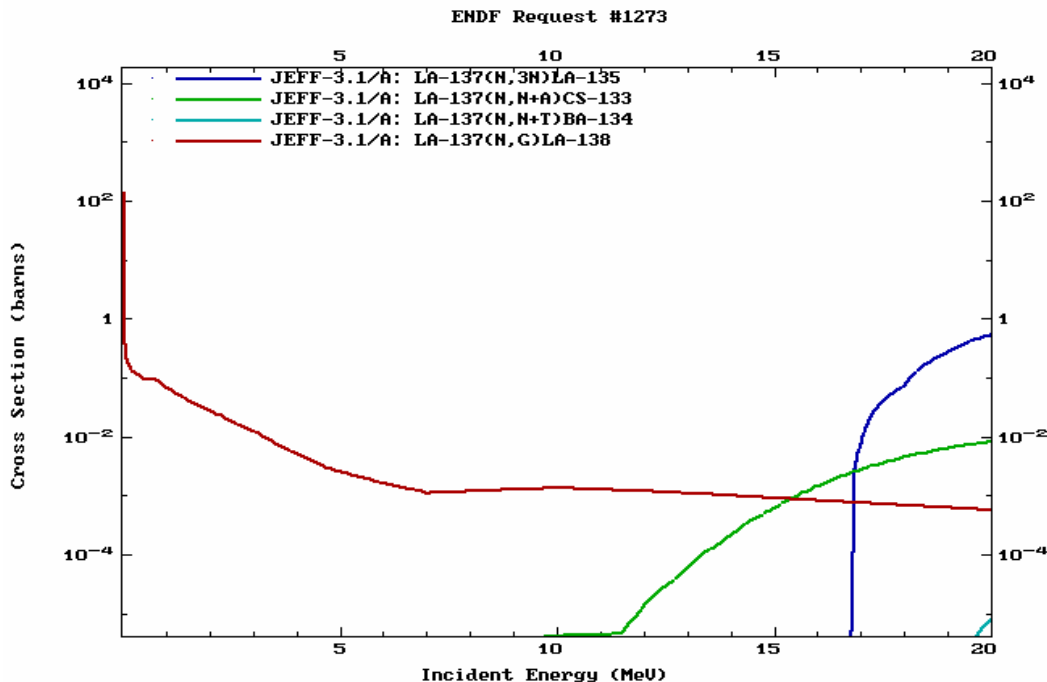


Рис. 1. Нейтронные сечения лантана-137 из библиотеки JEFF-3.1/A (EAF-2003).

¹ В файле MF=9 сохранить только данные об образовании долгоживущего Ba-135m (MT=105) – М.Николаев.

57.2. Лантан-138

Общие характеристики

Период полураспада: $(1.02 \pm 0.01) \cdot 10^{11}$ лет.

Содержание в естественной смеси: $0.090 \pm 0.001\%$.

Моды распада: β^- 65.6%, β^+ 34.4%.

Спин основного состояния: 5^+ .

Файлы

ENDF/B-VII.2 и JEFF-3.1 – взяты без изменений из JENDL-3.3 (JENDL-3.2)

JENDL-3.3 (JENDL-3.2) – оценка выполненная рабочей группой JNDC FPND для JENDL-3.1 в 1990 году.

Тепловая и резонансная область энергий

Параметры в области разрешённых резонансов основываются на оценке Мугхабгхаба и др. [Mu81]. Отрицательный резонанс добавлен для воспроизводства сечения захвата в тепловой точке, равного 57.2 ± 5.7 барн [Mu81, Mi76]. Значения сечений в тепловой точке и резонансный интеграл захвата приведены в таблице 1.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл (барн)

| Библиотека/Эксперимент | Полное | Упругое | Захват | Рез. интеграл |
|--------------------------|--------|---------|----------------|-------------------|
| JENDL-3.3 | 70.06 | 12.98 | 57.08 | 364 |
| Мугхабгхаба и др. [Mu81] | | | 57.2 ± 5.7 | 409 ± 90 |
| Мугхабгхаба и др. [Mu03] | | | 57.2 ± 5.7 | 362 ± 25 |
| Михаэль и др. [Mi76] | | | 57.2 ± 5.7 | $384 \pm 90^{*)}$ |

*) Резонансный интеграл без учета $1/\nu$ вклада. Полный резонансный интеграл равен 410 ± 90 барн.

В области неразрешённых резонансов (330 эВ - 100 кэВ) использовались нейтронные силовые функции, рассчитанные по оптической модели. Среднее расстояние между уровнями выбиралось из условия описания сечения захвата в этой области полученного в расчётах по статистической модели (программа CASTHY).

Область быстрых нейтронов

Полное сечение, сечения упругого и неупругого рассеяния и сечения захвата были оценены в сферической оптической и статистической модели, используя программу CASTHY. Силовая функция для гамма-лучей была определена из систематики радиационной ширины (0.085 эВ) и среднего расстояния между уровнями (24.5 эВ). 15 возбуждённых уровней до энергии 0.836 МэВ использовались в расчётах неупругого рассеяния. Формула Бенци-Реффо [Be69]

использовалась в расчётах прямого-полупрямого захвата. Все другие сечения реакций оценены в модели предравновесного распада и многоступенчатого испарительного механизма реакций с использованием программы PEGASUS. Сечения реакций (n,p) и (n, α) нормировались на 5.16 мбарн [Fo86], и 2.29 мбарн [Fo86] при 14.5 МэВ. Энергетические распределения вторичных частиц оценивались по программе PEGASUS. Угловые распределения упругого и неупругого рассеяния оценивались по программе CASTHY. Для других реакций они предполагались изотропными.

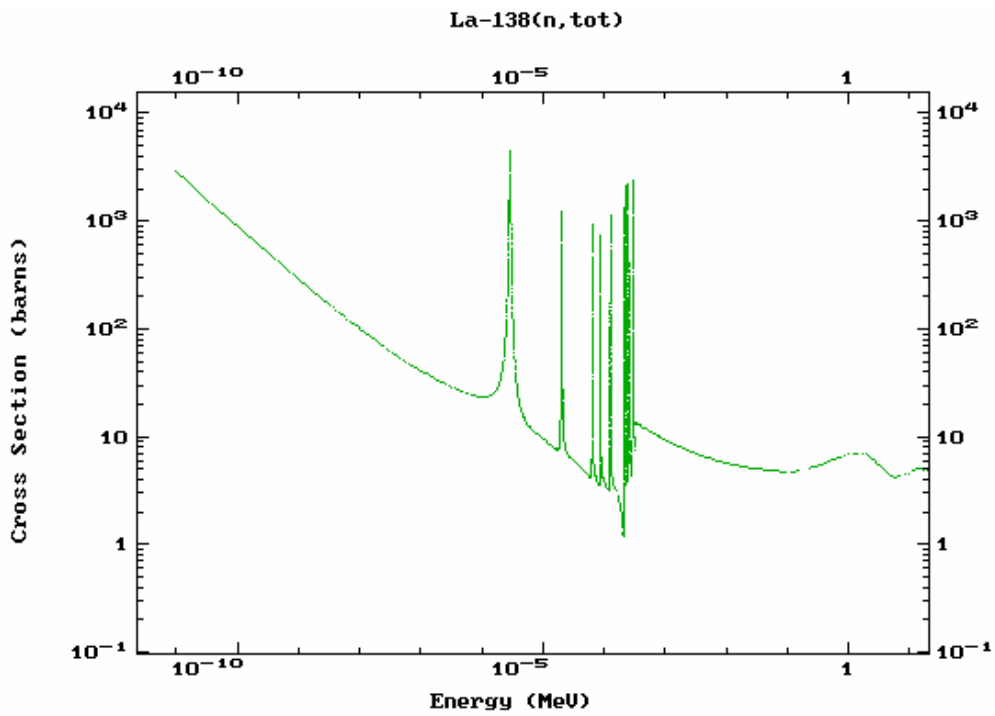


Рис. 1. Полное сечение в библиотеке JENDL-3.3.

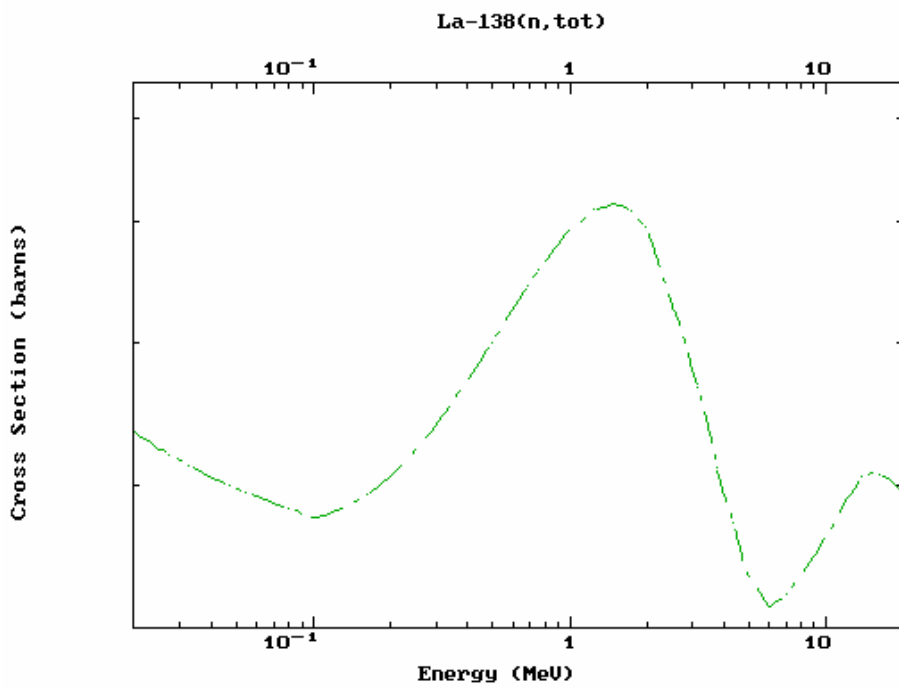


Рис. 2. Полное сечение в библиотеке JENDL-3.3 в быстрой области энергий.

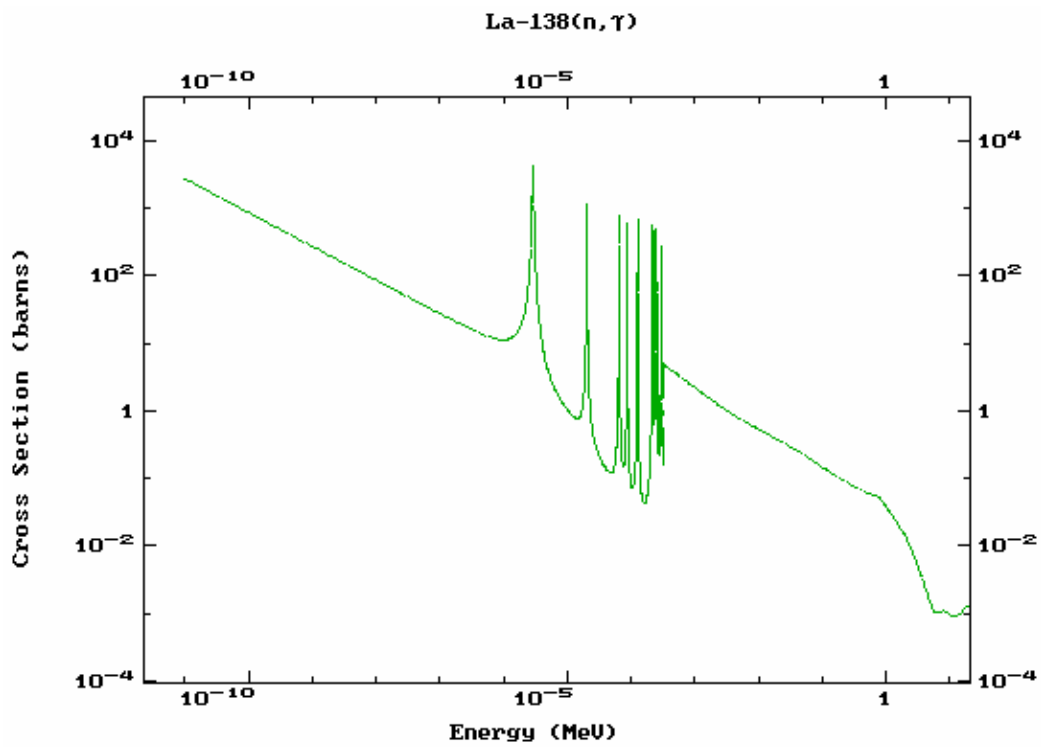


Рис. 3. Сечение радиационного захвата в библиотеке JENDL-3.3.

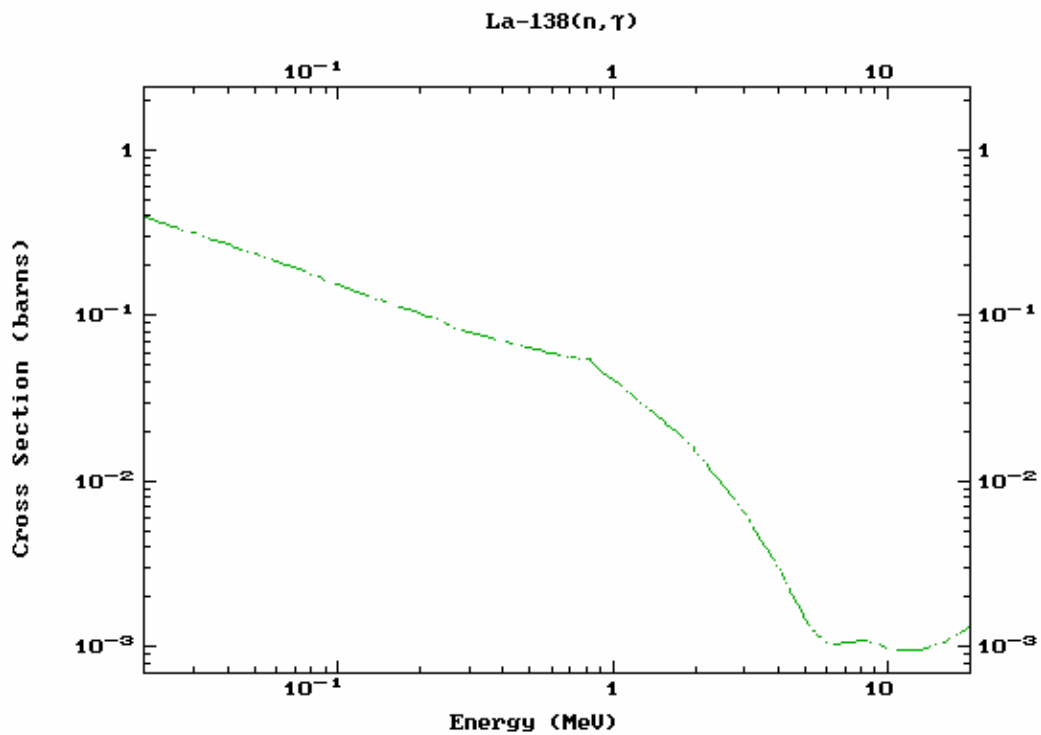


Рис. 4. Сечение радиационного захвата для быстрых нейтронов в библиотеке JENDL-3.3.

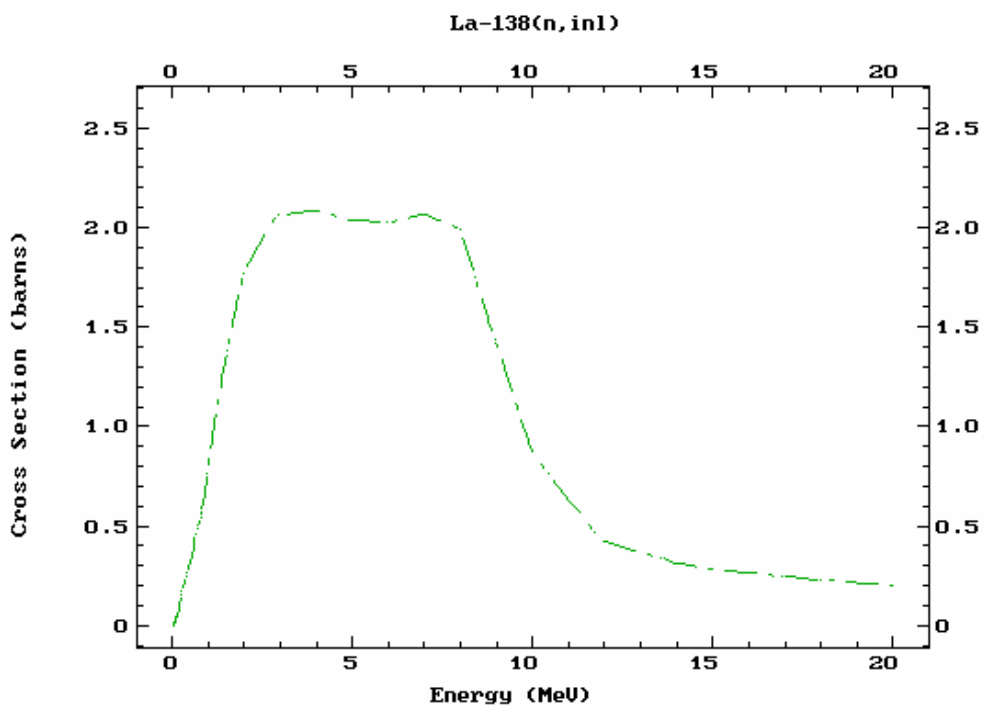


Рис. 5. Сечение неупругого рассеяния в библиотеке JENDL-3.3.

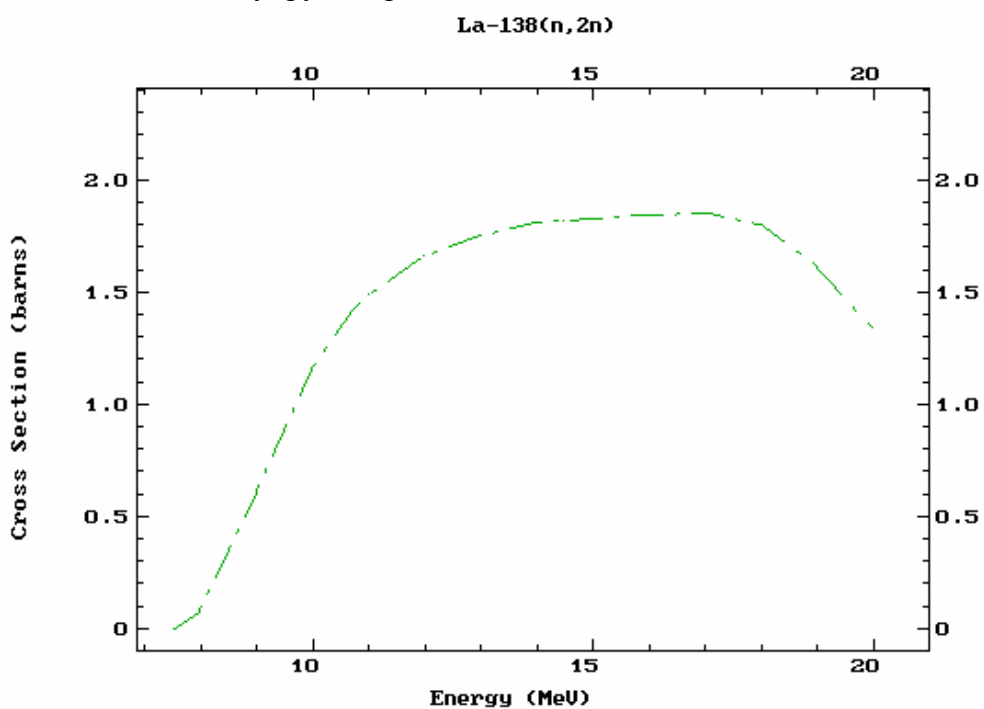


Рис. 6. Сечение (n,2n) в библиотеке JENDL-3.3.

Рекомендация

Оценка из библиотеки JENDL-3.3 рекомендуется для включения в библиотеку РОСФОНД.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

Литература

- [Be69] Benzi V. and Reffo G.: *CCDN-NW/10* (1969).
[Fo86] Forrest R.A.: *AERE-R 12419* (1986).
[Ka92] Kawai M. et al.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, **29**, 195 (1992).
[Mi76] Michael H., Neubert A., Wagner R. and Blair A.J.: *Int. J. Appl. Radiat. Isotopes*, **27**, 533 (1976).
[Mu81] Mughabghab S.F. et al.: *Neutron Cross Sections, Vol. 1, part A*, Academic press (1981).
[Mu03] Mughabghab S.F.: "Thermal Neutron Capture Cross Sections Resonance Integrals and g-Factors," *INDC(NDS)-440* (2002)

57.3. Лантан-139

Общие характеристики

Содержание в естественной смеси: 99.91%.
Спин основного состояния: $7/2^+$.

Файлы

ENDF/B-VI – оценка выполнена Шентером и др. в 1980 году. Ревизия оценки выполнена в 1991 году.

ENDF/B-VII.b2 – оценка 2005 года получена объединением новой оценки Мугхабгхаба (2006) для области разрешённых резонансов с оценкой CENDL-3 в области неразрешённых резонансов и быстрой области энергий.

JENDL-3.3 – оценка 1984 года рабочей группы JNDC FPND для библиотеки JENDL-2. Ревизия оценки выполнена в 1990 [Ka92] для JENDL-3.1 и в 1993 [Ka01] для JENDL-3.2. JENDL-3.3 практически идентична JENDL-3.2.

JEFF-3.0 (JEF-2.2) – данные взяты из оценки RCN-3. Резонансные параметры были переоценены в 1987 году и сечения с вылетом заряженных частиц были добавлены в 1989 году из библиотеки REAC-ECN-4.

CENDL-3 – новая оценка выполненная в 1999 году Жао и др. и пересмотренная в 2001 году.

Тепловая и резонансная область энергий

Верхняя граница областей разрешённых и неразрешённых резонансов в разных библиотеках приведена в Таблице 1.

Таблица 1. Характеристики областей разрешённых (PP) и неразрешённых (NP) резонансов в разных библиотеках. Формализм используемый в области разрешённых резонансов: SLBW – одноуровневый Брейт-Вигнер, MLBW – многоуровневый Брейт-Вигнер.

| Библиотека | Верхняя граница PP | Верхняя граница NP |
|------------|--------------------|--------------------|
| ENDF/B-VI | 9.0293 кэВ, SLBW | - |
| JENDL-3.3 | 15 кэВ, MLBW | 100 кэВ |
| JEFF-3.1 | 10.801 кэВ, MLBW | 250 кэВ |
| CENDL-3 | 15 кэВ, MLBW | 100 кэВ |

Сравнение тепловые сечений и резонансных интегралов захвата из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными приведены в таблице 2.

Таблица 2. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата для ^{139}La . Все значения приведены в барнах.

| Библиотека/Эксперимент | Полное | Упругое | Захват | Рез. интеграл |
|---------------------------------------|--------|------------|-------------------------|---------------|
| ENDF/B-VII | 19.208 | 10.169 | 9.039 | 11.4 |
| ENDF/B-VI | 21.447 | 12.452 | 8.995 | 12.0 |
| JENDL-3.3 | 19.060 | 10.130 | 8.930 | 11.7 |
| JEFF-3.0 | 19.443 | 10.512 | 8.931 | 11.9 |
| CENDL-3 | 18.371 | 10.130 | 8.241 | 11.5 |
| Mughabghab et al. [Mu81] | -- | 10.13±0.22 | 8.93±0.04 | 11.8±0.8 |
| Mughabghab [Mu01] | -- | -- | 8.24±0.05 | -- |
| (Экспериментальные данные после 1970) | | | | |
| De Corte et al. [De71] | | | | 11 |
| Ryves et al. [Ry71] | | | 9.03±0.33 | |
| Steinnes [St72] | | | | 11.8±1.2 |
| Alian et al. [Al73] | | | | 17.1 |
| Van der Linden et al. [Va74] | | | | 11.6±0.7 |
| Gleason [Gl75] | | | 9.15±0.25 ^{*1} | 12.5±0.4 |
| Mannhart [Ma75] | | | 8.933±0.036 | |
| Steinnes [St75] | | | | 11.2±0.5 |
| Takiue et al. [Ta78] | | | 8.63±0.34 ^{*1} | |
| Heft [He78] | | | | 12.6±0.6 |

*1 Усреднённое по спектру Максвелла

Оценка Мугхабгхаба 2006 года [Mu06], включённая в файл ENDF/B-VII является последней оценкой резонансных параметров. На рисунках 1 – 3 показаны статистические распределения, построенные для s-резонансов. Как видно, имеются лишь незначительные пропуски слабых s-резонансов. Для p- волны, пропуски резонансов с малыми нейтронными ширинами, по сравнению с предсказаниями статистической модели, являются более заметными, как видно даже из рисунка 5 суммы числа резонансов от энергии нейтрона. Но вклад от этих слабых резонансов в сечения мал и может не учитываться. Описание сечений в области неразрешённых резонансов в JENDL-3.3 (те же параметры приводятся в CENDL-3 и ENDF/B-VII) является согласованным как с областью разрешённых резонансов в ENDF/B-VII, так и с областью нейтронов быстрых энергий в CENDL-3 и ENDF/B-VII. Поэтому оценка ENDF/B-VII является наилучшей для тепловой области и области разрешённых и неразрешённых резонансов.

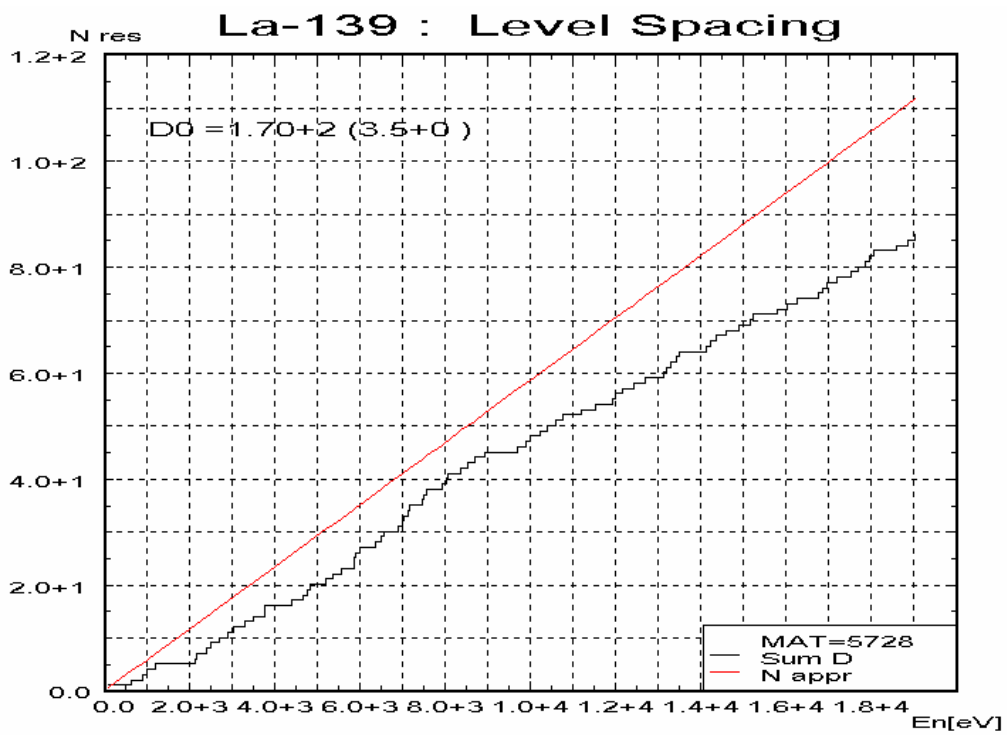


Рис. 1. Нарастающая сумма числа s- резонансов в зависимости от верхней границы области разрешённых резонансов.

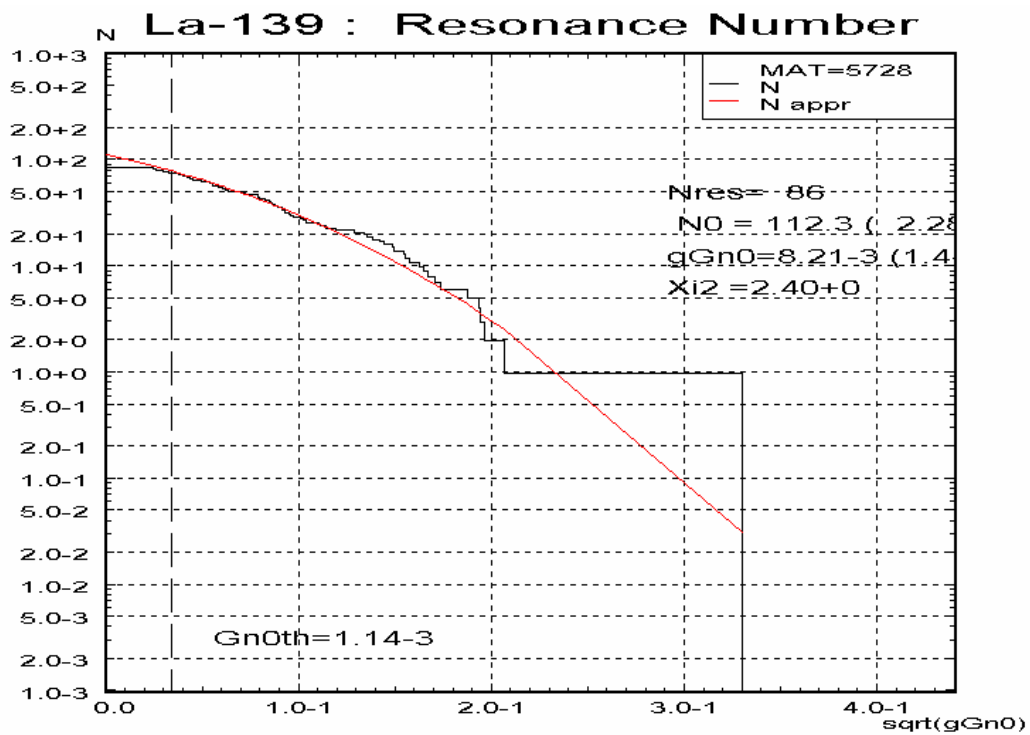


Рис. 2 . Распределение числа s- резонансов от их приведённой нейтронной ширины.

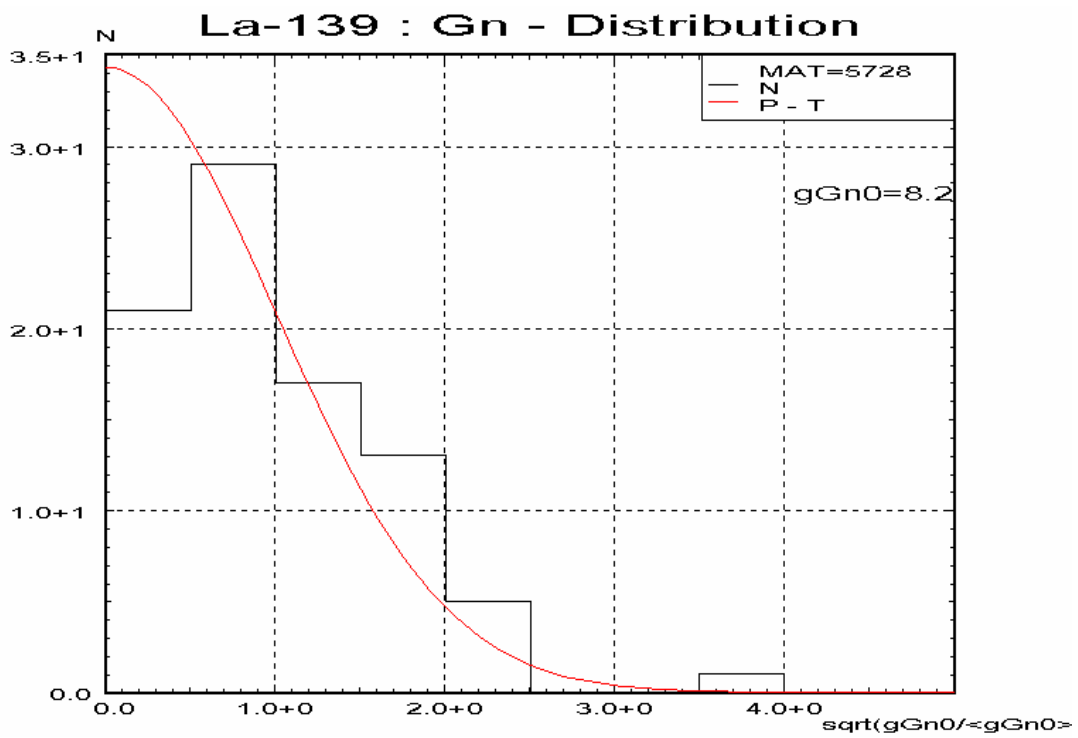


Рис. 3 . Распределение Портера-Томаса для приведённых нейтронных ширин s-резонансов.

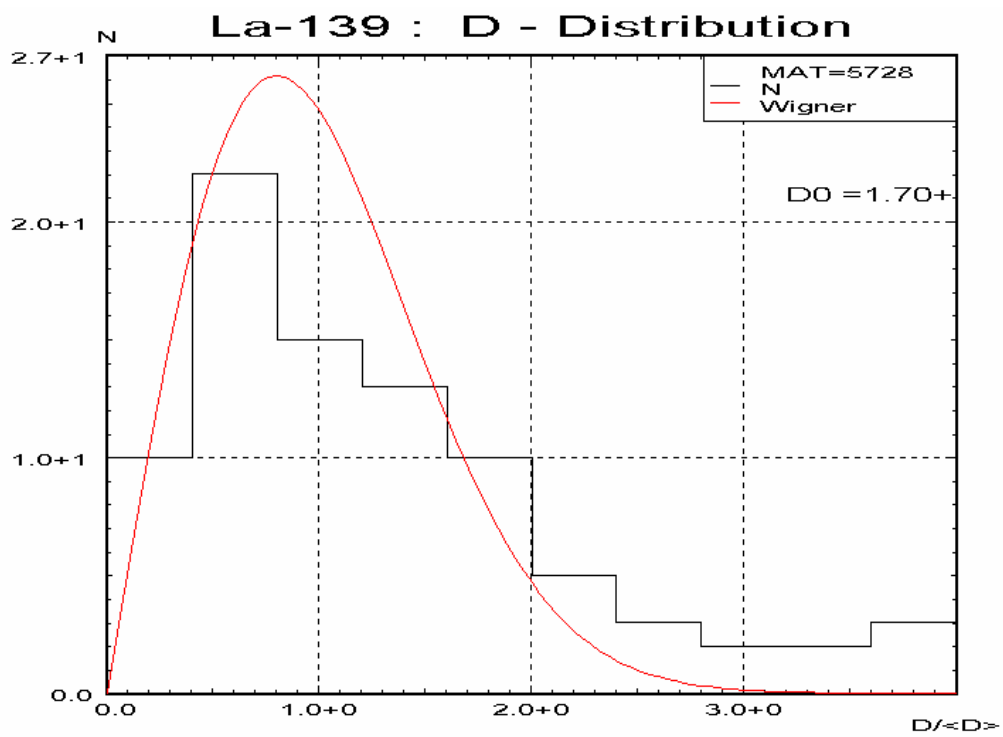


Рис. 4 . Распределение Вигнера для расстояний между уровнями s-резонансов.

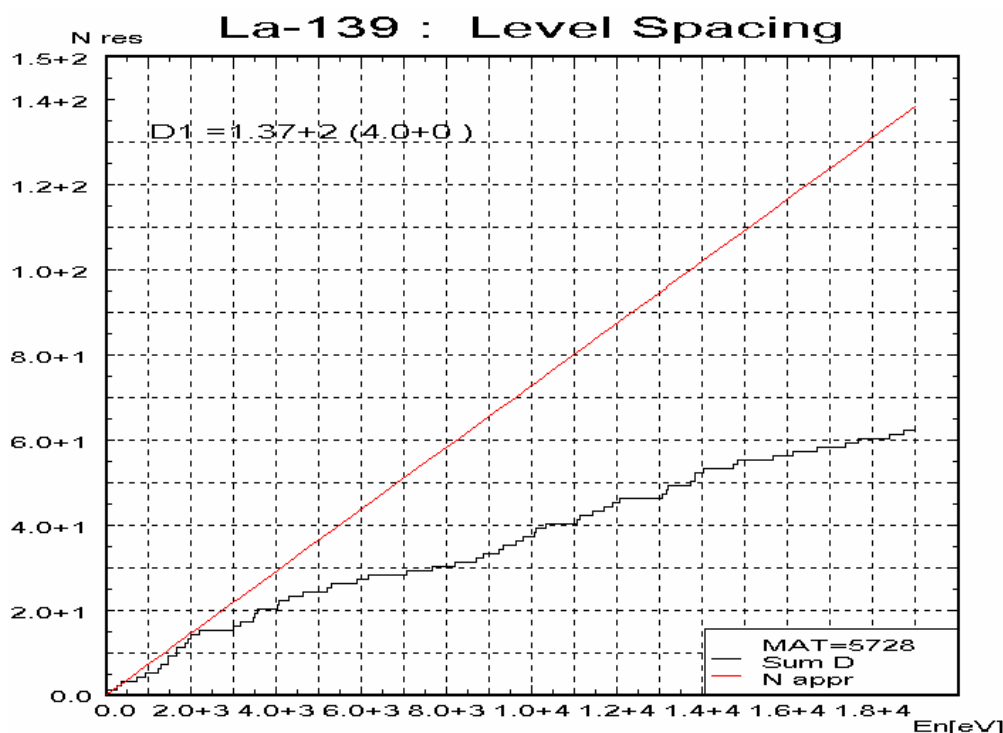


Рис. 5. Нарастающая сумма числа р- резонансов в зависимости от верхней границы области разрешённых резонансов.

Область быстрых нейтронов

ENDF/B-VI – модельные оптико-статистические расчёты выполнены с использованием оптического потенциала Молдауера [Мо63]. Сечение неупругого рассеяния рассчитано по программе COMNUC-3 с учётом 19 дискретных уровней. Сечение захвата рассчитано по программе NCAP. Пороговые реакции не приводятся.

Все угловые распределения вторичных частиц заданы изотропными в лабораторной системе координат. Испарительные спектры заданы для континуума уровней неупругого рассеяния.

JENDL-3.3 – сечения полного, упругого и неупругого рассеяния и сечение захвата рассчитаны в рамках сферической оптической модели по программе CASTHY. Силовая функция для канала захвата подбиралась таким образом, чтобы описать сечение захвата в 38 мбарн при 30 кэВ [Му78]. 12 уровней неупругого рассеяния учитывались в расчётах. Упрощённая формула Бенци и Реффо [Ве69] использовалась в оценке прямого-полупрямого захвата. Сечения других реакций рассчитывались по программе PEGASUS с учётом многоступенчатого испарительного и предравновесного механизмов реакции. Сечения реакций (n,p) and (n,α) нормировались к значениям 12 мбарн и 2.5 мбарн при энергии 14.5 МэВ рекомендованные соответственно Форрестом [Fo86] и Вёлфе и др. [Wo88].

Угловые распределения упругого и неупругого рассеяния были рассчитаны по программе CASTHY, а энергетические распределения вторичных частиц – по программе PEGASUS.

JEFF-3.0 – результаты расчёта по оптической модели с потенциалом Игараши. Сечения с вылетом заряженных частиц взяты из библиотеки REAC-ECN-4.

CENDL-3 – результаты расчёта по программе SUNF. Угловые и энергетические распределения вторичных частиц рассчитаны по программам SUNF и DWUCK.

ENDF/B-VII – оценка взята из CENDL-3 по рекомендации SG23 WPEC.

Результаты сравнения различных оценок с имеющимися экспериментальными данными для полного сечения и сечения захвата показаны на рисунках 6 – 7. Сравнение этих и других сечений, а также учитывая полноту представления данных, можно считать CENDL-3 (ENDF/B-VII) наилучшей оценкой в области энергий быстрых нейтронов.

Рекомендация

Учитывая изложенное выше, оценка из библиотеки ENDF/B-VII может быть рекомендована для включения в библиотеку РОСФОНД.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

Литература

- [Al73] Alian A. et al.: *J. Radioanal. Chem.*, **15**, 535 (1973) EXFOR20644.
- [Be69] Benzi V. and Reffo G.: *CCDN-NW/10* (1969).
- [De71] De Corte F. et al.: *J. Radioanal. Chem.*, **9**, 9 (1971) EXFOR20646.
- [Fo86] Forrest R.A.: *AERE-R 12419* (1986).
- [Gl75] Gleason G.: *Radiochem. Radioanaly. Lett.*, **23**, 317 (1975) EXFOR10644.
- [Ha76] Hacken G. et al.: *Phys. Rev.*, **C13**, 1884 (1976).
- [He78] Heft R.E.: *78Mayag*, 495 (1978) EXFOR12866.
- [Ka92] Kawai M. et al.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, **29**, 195 (1992).
- [Ka01] Kawai M. et al.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, **38**, 261 (2001).
- [Ma75] Mannhart W.: *Z. Phys.*, **A272**, 273 (1975) EXFOR20610.
- [Mo63] Moldauer P.A.: *Nucl. Phys.*, **47**, 65 (1963).
- [Mo69] Morgenstern J. et al.: *Nucl. Phys.*, **A123**, 561 (1961).
- [Mu73] Mughabghab S.F. and Garber D.I.: *BNL-325 3rd Edition* (1973).
- [Mu77] Musgrove A.R. de L. et al.: *Aust. J. Phys.*, **30**, 599 (1977).
- [Mu78] Musgrove A.R. de L. et al.: *78Harwell*, 449 (1978).
- [Mu81] Mughabghab S.F. et al.: *Neutron Cross Sections, Vol. 1, part A*, Academic press (1981).
- [Mu01] Mughabghab S.F.: *INDC(NDS)-424*, p.69 (2001).
- [Mu06] Mughabghab S.F.: *Atlas of Neutron Resonances*, Elsevier Publ. (2006).
- [Na83] Nakajima Y. et al.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, **20**, 183 (1983).
- [Ry71] Ryves T.B. et al.: *J. Nucl. Energy*, **25**, 129 (1971) EXFOR20791.
- [Sh67] Shwe H. et al.: *Phys. Rev.*, **159**, 1050 (1967).
- [St72] Steinnes E.: *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **34**, 2699 (1972) EXFOR20188.
- [St75] Steinnes E.: *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **37**, 1591 (1975) EXFOR20635.
- [Ta78] Takiue M. et al.: *Nucl. Instrum. Methods*, **148**, 157 (1978) EXFOR20853.
- [Va74] Van der Linden R. et al.: *J. Radioanal. Chem.*, **20**, 695 (1974) EXFOR20645.
- [Wo88] Woelfle R. et al.: *Appl. Radiat. Isot.*, **39**, 497 (1988).

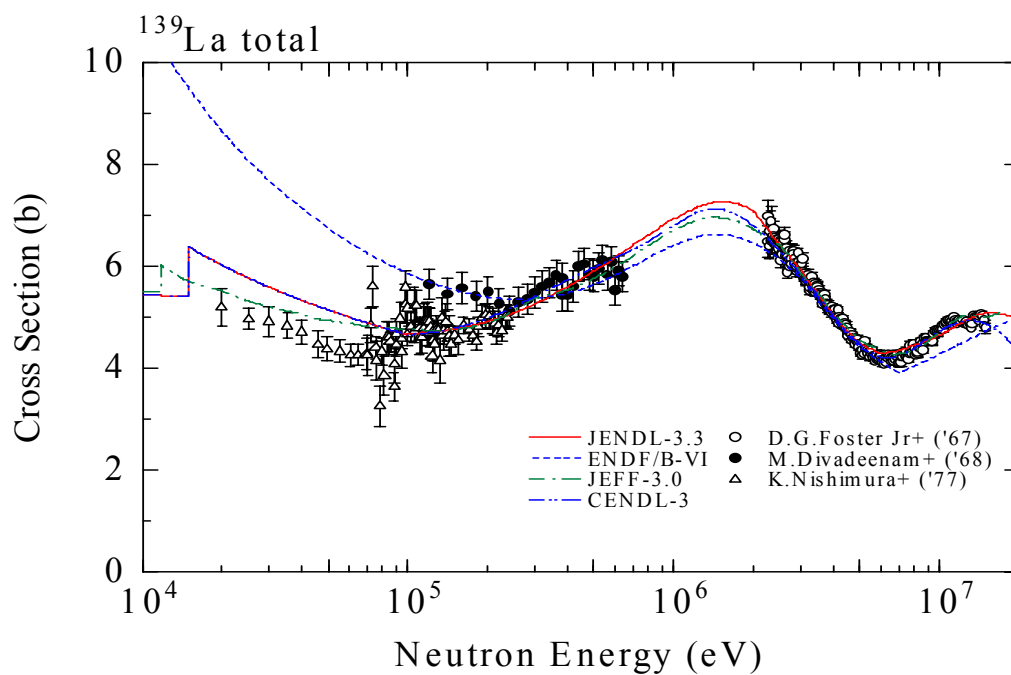


Рис. 6. Полное сечение ¹³⁹La в быстрой области энергий.

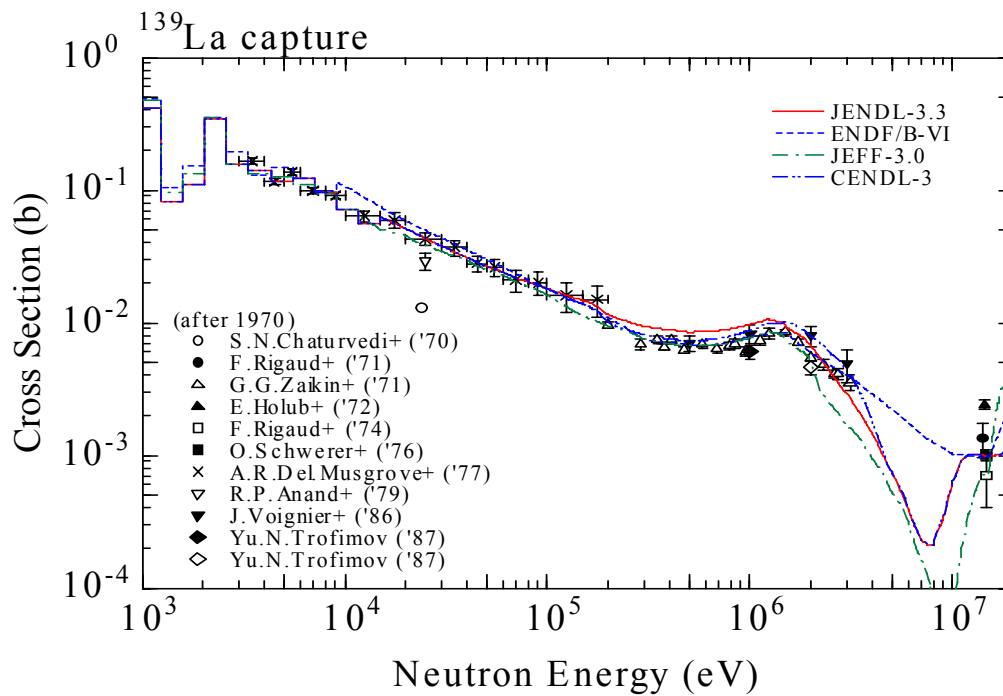


Рис. 7. Сечение захвата ¹³⁹La в быстрой области энергий.

57.4. Лантан-140

Общие характеристики

Период полураспада: (1.6781 ± 0.0003) дней.

Моды распада: β 100%.

Спин основного состояния: 3^- .

Файлы

ENDF/B-VI – оценка Шентера и Шмитроса 1974 года.

JEFF-3.0 (JEF-2.2) - взята из ENDF/B-V.

ENDF/B-VII – новая оценка (2005 – 2006) Хермана, Обложинского и Мугхабгхаба.

Тепловая и резонансная область энергий

Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата для ^{140}La приведённый в разных библиотеках в сравнении с имеющимися экспериментальными данными показаны в таблице 1. Необходимо отметить, что экспериментальные данные по полному сечению и по сечению упругого рассеяния отсутствуют и низкое сечение упругого рассеяния в ENDF/B-VII обусловлено как отсутствием вклада от отрицательных резонансов, так и небольшим по величине радиусом потенциального рассеяния (5 ферми), выбранным близким к радиусу на ^{139}La .

Область разрешенных резонансов в ENDF/B-VII простирается до 999 эВ и содержит параметры 15 резонансов, из которых последний лежит именно при 999 эВ и имеет полную ширину 1 эВ.

Область неразрешенных резонансов простирается до порога неупругого рассеяния – 30.178 кэВ.

Table 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата для ^{140}La . Все величины в барнах.

| Библиотека/Эксперимент | Полное | Упругое | Захват | Рез. интеграл |
|--------------------------|--------|---------|----------|----------------|
| ENDF/B-VII | 4.680 | 1.970 | 2.700 | 68.9 |
| ENDF/B-VI | 7.630 | 4.930 | 2.700 | 65.1 |
| JEFF-3.0 | 7.630 | 4.930 | 2.700 | 65.1 |
| Mughabghab et al. [Mu73] | | | 2.7±0.3 | |
| Mughabghab et al. [Mu81] | | | 2.7±0.3 | 69±4 |
| Katcoff et al. [Ka49] | | | 3.1±1.0* | |
| O'brien et al. [Ob67] | | | 2.7±0.3 | 69±4 (0.54 эВ) |

*) Усреднённое по спектру Максвелла.

Область быстрых нейтронов

Имеет смысл рассмотреть только результаты оценки ENDF/B-VII, как последней и выполненной с использованием оттестированного программного комплекса EMPIRE-2 с использованием параметров из библиотеки оценённых параметров RIPL-2. Все другие оценки неполные или существенно устаревшие.

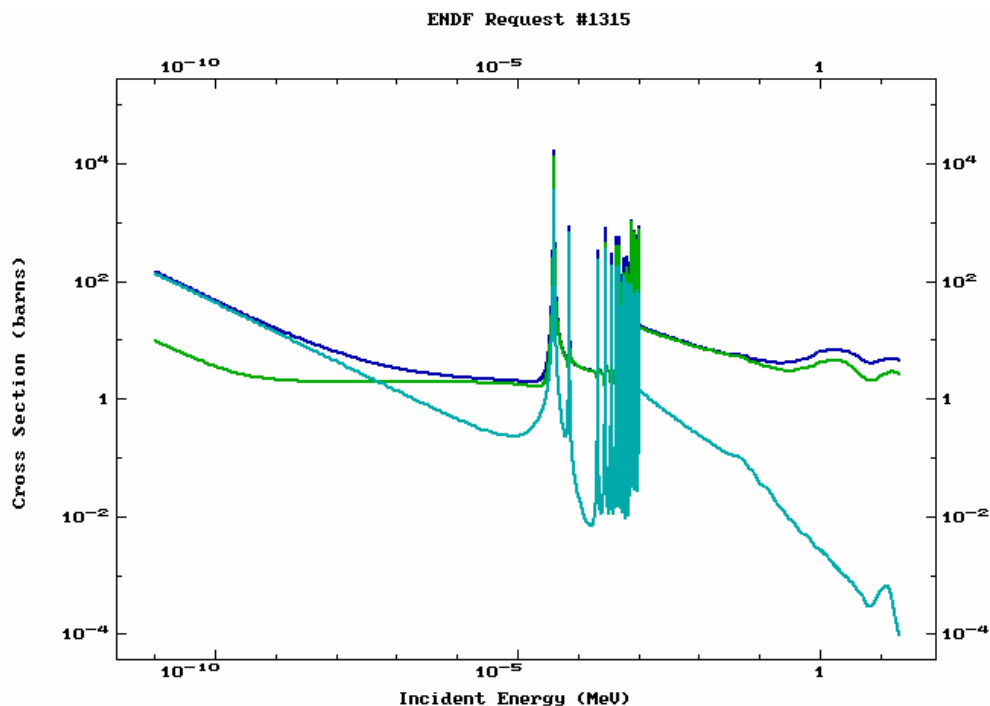


Рис. 3. Полное, упругое сечение и сечение захвата из библиотеки ENDF/B-VII.

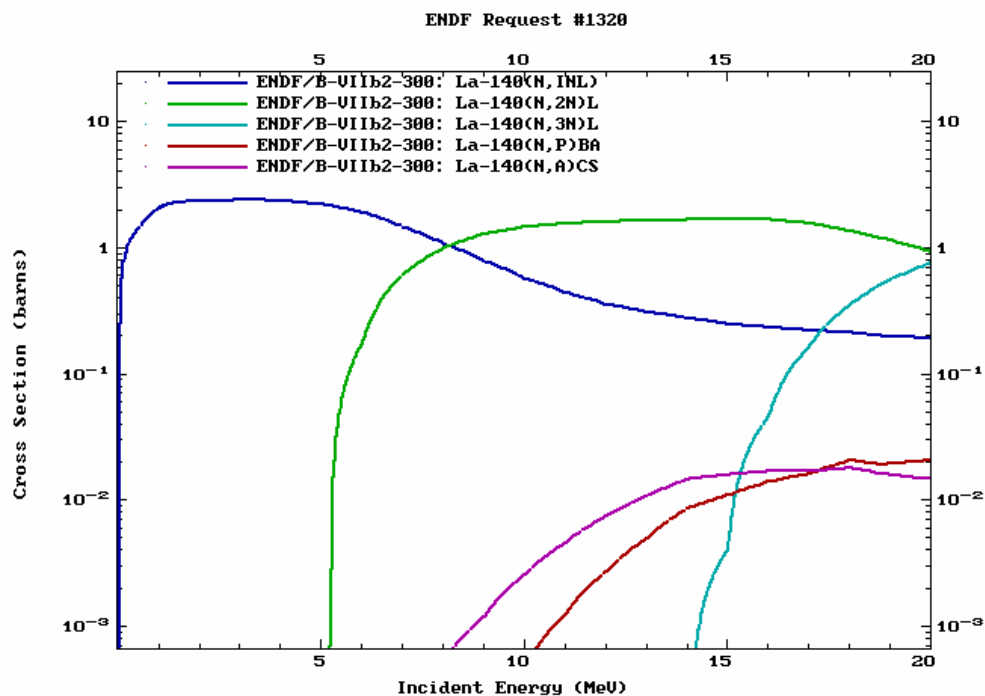


Рис. 4. Сечения реакций из библиотеки ENDF/B-VII.

На рисунках 3 и 4 показаны основные сечения библиотеки ENDF/B-VII. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

Рекомендация

Файл ^{140}La из библиотеки ENDF/B-VII может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД. Целесообразно сместить границу области разрешенных и неразрешенных резонансов до 1000эВ.

Литература

- [Ka49] Katcoff S. et al.: *J. Chem. Phys.*, **17**, 421 (1949).
- [Mu73] Mughabghab S.F. and Garber D.I.: "Neutron Cross Sections, Vol. I," *BNL-325* 3-rd Edition (1973).
- [Mu81] Mughabghab S.F. et al.: *Neutron Cross Sections, Vol. 1, part A*, Academic press (1981).
- [Ob67] O'brien H.A. et al.: *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **29**, 584 (1967).

58. ЦЕРИЙ

Рассмотрение состояния дел по нейтронным данным для всех изотопов церия выполнено В.Г.Проняевым. Им же выданы рекомендации о включении файлов оцененных данных в РОСФОНД

58.1. Церий-134

В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакции $^{136}\text{Ce}_{(0.19\%)}(n,3n)$.

Период полураспада: 3.16 дн.

Мода распада: ϵ^- 100%.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файлы

Полных наборов нейтронных данных не имеется. Нейтронные сечения, оцененные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003 (JEFF-3.1-Act).

Экспериментальных данных для их верификации не имеется.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять файл данных из EAF-2003.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

58.2. Церий-136

Содержание в естественной смеси: $(0.185 \pm 0.002)\%$.

Период полураспада: $> 0.7 \cdot 10^{14}$ лет.

Мода распада: $2\epsilon^-$ 100%.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файлы

Обзор подготовлен на основании анализа, выполненного Накагавой (http://www.nndc.bnl.gov/sg21/rev/rev_list.htm, 2004) в рамках подгруппы 21 международной рабочей группы по оценке сечений.

CENDL-3: Оценка Хана и др. 2000 года.

ENDF/B-VIIb2 – оценка основывается на резонансных параметрах из Атласа-2006 (Мухабхаб, 2006) в тепловой и резонансной области энергий ($E_n < 880$ эВ) и средних резонансных параметрах оцененных Мухабхабом для области неразрешённых резонансов. Сечения в области более высоких энергий оценены с помощью программы EMPIRE используя параметры библиотеки RIPL-3 и с учётом всех возможных механизмов реакций.

Тепловая и резонансная область

Сравнение тепловых сечений и резонансного интеграла захвата приведено в таблице 1, а сечений, усреднённых по спектру Максвелла при температуре 25 кэВ в таблице 2. Как показывает сравнение, ENDF/B-VIIb2 хорошо согласуется как с последними оценками Мухабхаба, так и с результатами прецизионных измерений.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата для ^{136}Ce . Все сечения даны в барнах.

| Библиотека/Эксперимент | Полное | Упругое | Захват | Резонансный интеграл |
|--------------------------|--------|----------|---------|----------------------|
| CENDL-3 | 12.50 | 5.25 | 7.25 | 6.96 |
| ENDF/B-VIIb2 | 11.63 | 4.18 | 7.45 | 76.68 |
| Mughabghab et al. [Mu81] | | | 7.3±1.5 | 58±12 |
| Mughabghab et al. [Mu06] | 4.17** | 6.5±1.0* | 77±12 | |

*) с образованием ядра-продукта в основном состоянии, **) из когерентного рассеяния на связанном атоме.

Таблица 2. Сравнение сечений захвата (мбарн) усреднённых по спектру Максвелла при температуре 25 кэВ с результатами измерений выполненных Капеллером [Ka96].

| | |
|-----------------|--------|
| CENDL-3 | 278 |
| ENDF/B-VIIb2 | 372 |
| Käppeler et al. | 355±21 |

Область быстрых нейтронов

Экспериментальные данные в области энергий быстрых нейтронов имеются только для реакции (n,2n). На рисунке 1 показано сравнение результата модельной оценки в ENDF/B-VIIb2 с имеющимися экспериментальными данными. Оценка других сечений является также физически обоснованной. Основные сечения из библиотеки ENDF/B-VIIb2 показаны на рисунке 2. Файл библиотеки CENDL-3 содержит явную ошибку для полного неупругого рассеяния.

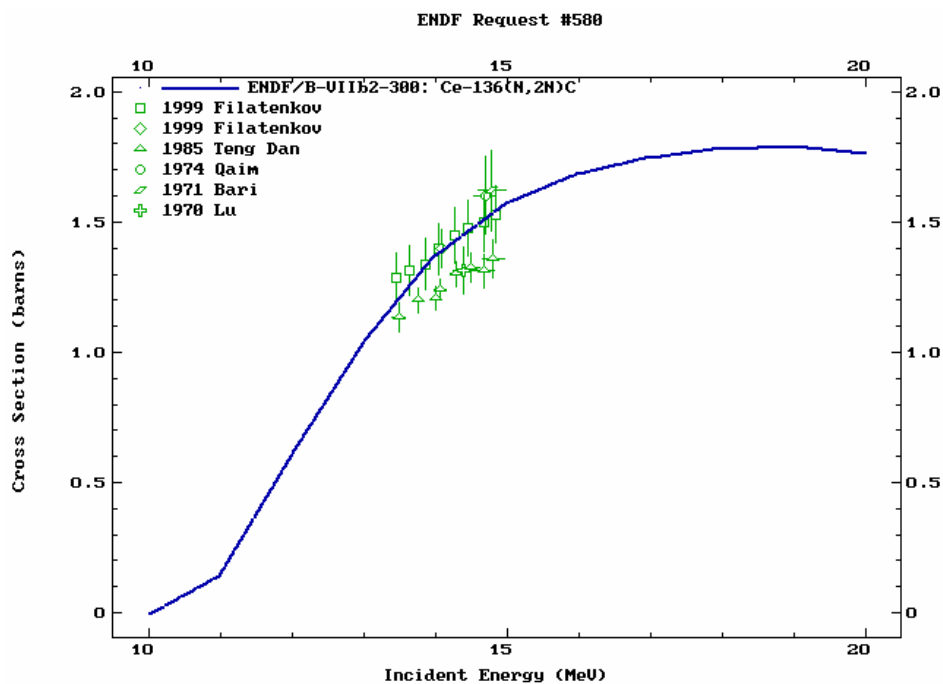


Рис. 1. Сечение (n,2n) из ENDF/B-VIIb2 в сравнении с имеющимися экспериментальными данными.

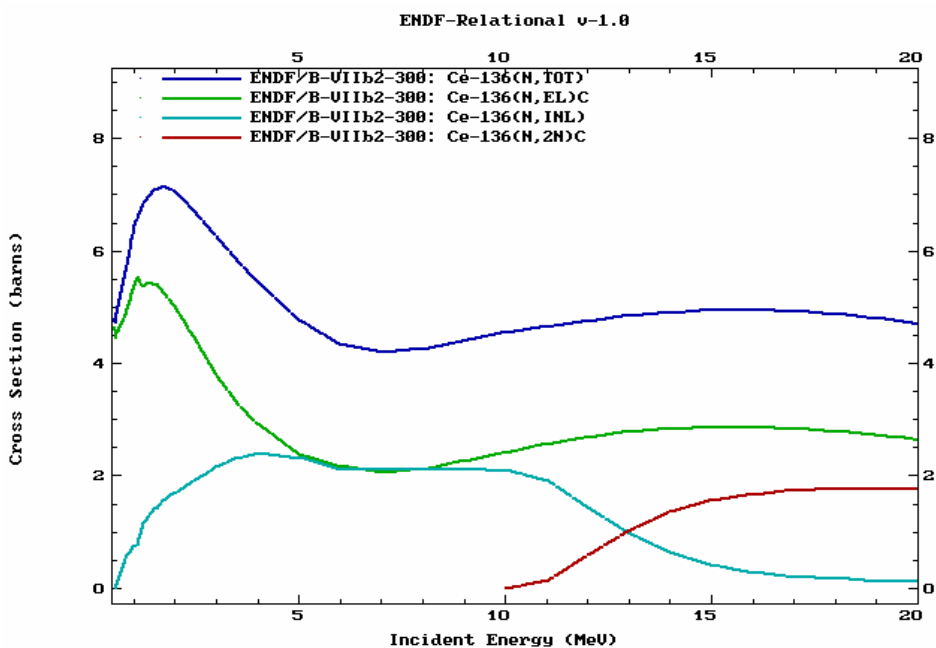


Рис. 2. Основные сечения из ENDF/B-VIIb2.

Заключение

Файл ^{136}Ce из библиотеки ENDF/B-VIIb2 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

¹ Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Вести файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{129}\text{Ce}^m$, используя данные из файла MF=10. Файл MF=10 исключить. – М.Н.

58.3. Церий-137-м

В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакции $^{136}\text{Ce}_{(0.19\%)}(n,\gamma)$.

Период полураспада: 34.4 ч.

Мода распада: изомерный переход в основное состояние.

Спин : $11/2^-$.

Файлы

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3. Другие файлы представляют библиотеки данных по распаду и не содержат оценок нейтронных сечений.

Данные

Все нейтронные сечения для $^{137\text{m}}\text{Ce}$ из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 3. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

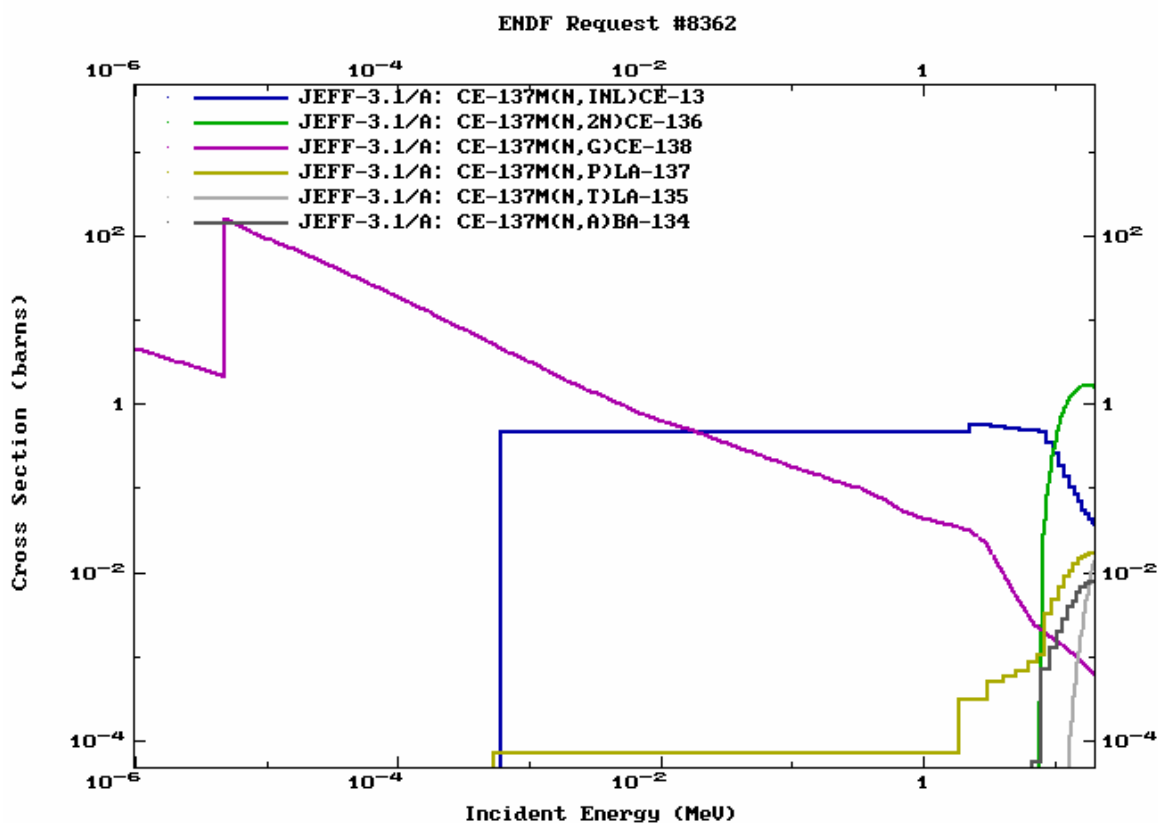


Рис. 3. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A для $^{137\text{m}}\text{Ce}$.

Заключение

Файл $^{137\text{m}}\text{Ce}$ из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

58.4. Церий-138

Содержание в естественной смеси: $(0.251 \pm 0.002)\%$.

Период полураспада: $> 0.9 \cdot 10^{14}$ лет.

Мода распада: $2e^-$ 100%.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файлы

Обзор подготовлен на основании анализа выполненного Накагавой (http://www.nndc.bnl.gov/sg21/rev/rev_list.htm, 2004) в рамках подгруппы 21 международной рабочей группы по оценке сечений.

CENDL-3: Оценка Хана и др. 2000 года.

ENDF/B-VIIb2 – оценка основывается на резонансных параметрах из Атласа-2006 (Мухабхаб, 2006) в тепловой и резонансной области энергий ($E_n < 999$ эВ) и средних резонансных параметрах оцененных Мухабхабом для области неразрешённых резонансов. Сечения в области более высоких энергий оценены с помощью программы EMPIRE используя параметры библиотеки RIPL-3 и с учётом всех возможных механизмов реакций.

Тепловая и резонансная область

Таблица 3. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата для ^{138}Ce . Все сечения даны в барнах.

| Библиотека/Эксперимент | Полное | Упругое | Захват | Резонансный интеграл |
|------------------------------|--------|---------|-------------------------|-------------------------|
| ENDF/B-VIIb2 | 3.623 | 2.586 | 1.037 | 9.54 |
| CENDL-3 | 5.500 | 4.385 | 1.115 | 1.15 |
| Mughabghab et al. [Mu81] | | | 1.1±0.3 | |
| Mughabghab et al. [Mu03] | | | 1.02±0.24 | |
| Pomeronce [Po52] | | | 8.7±6.1 ^{*1} | |
| Sehgal [Se62] | | | 1.26±0.20 ^{*3} | |
| Van der Linden et al. [Va74] | | | | 1.21±0.13 ^{*2} |
| Heft [He78] | | | 1.02±0.12 ^{*3} | 6.7±3.1 |

*1 измерения в спектре Максвелла.

*2 для образования ядра-продукта в изомерном состоянии.

*3 реакторные измерения.

Таблица 4. Сравнение сечений захвата (мбарн) усреднённых по спектру Максвелла при температуре 25 кэВ с результатами измерений выполненных Капеллером.

| Библиотека/Эксперимент | Захват |
|------------------------|--------|
| CENDL-3 | 48.3 |
| ENDF/B-VIIb2 | 320. |
| Käppeler et al. [Ka96] | 193±5 |

Как видно из таблиц, оценённые значения ENDF/B-VIIb2 лучше согласуются с имеющимися экспериментальными данными, чем оценка CENDL-3, хотя сечение,

усреднённое по спектру Максвелла с температурой 25 кэВ является завышенным по сравнению с результатами прецизионных измерений, выполненных Капеллером

Область быстрых нейтронов

Экспериментальные данные в области энергий быстрых нейтронов имеются только для реакции (n,2n). На рисунке 4 показано сравнение результата модельной оценки в ENDF/B-VIIb2 с имеющимися экспериментальными данными. Возможно, что оценённое полное сечение реакции (n,2n) в ENDF/B-VIIb2 является несколько заниженным. CENDL-3 даёт лучшее описание реакции (n,2n). Оценка других сечений является физически обоснованной. Основные сечения из библиотеки ENDF/B-VIIb2 показаны на рисунке 5.

Заключение

Файл ^{138}Ce из библиотеки ENDF/B-VIIb2 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД².

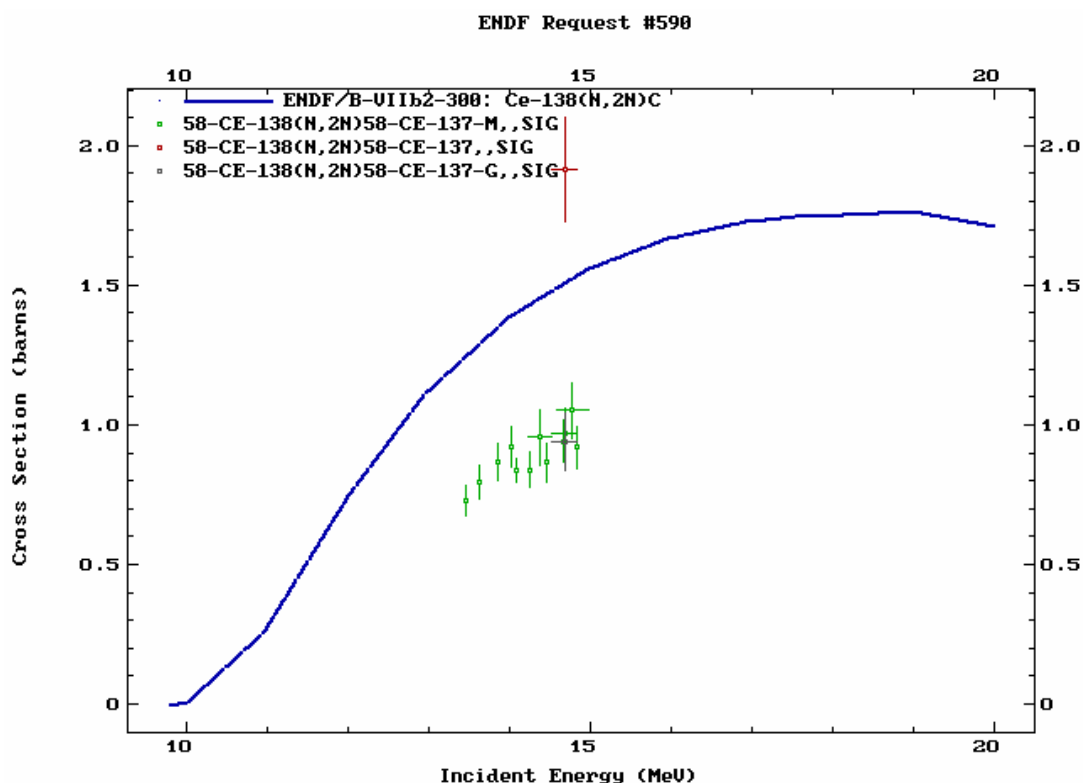


Рис. 4. Сечение (n,2n) из ENDF/B-VIIb2 в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Верхнее экспериментальное значение – полное сечение (n,2n), нижнее – сечение с возбуждением метастабильного (зелёные символы) или основного (серый символ) состояния.

² Следует включить файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера – $^{137}\text{Ce}^m$, используя данные файла MF=10 из EAF-2003. – М.Н.

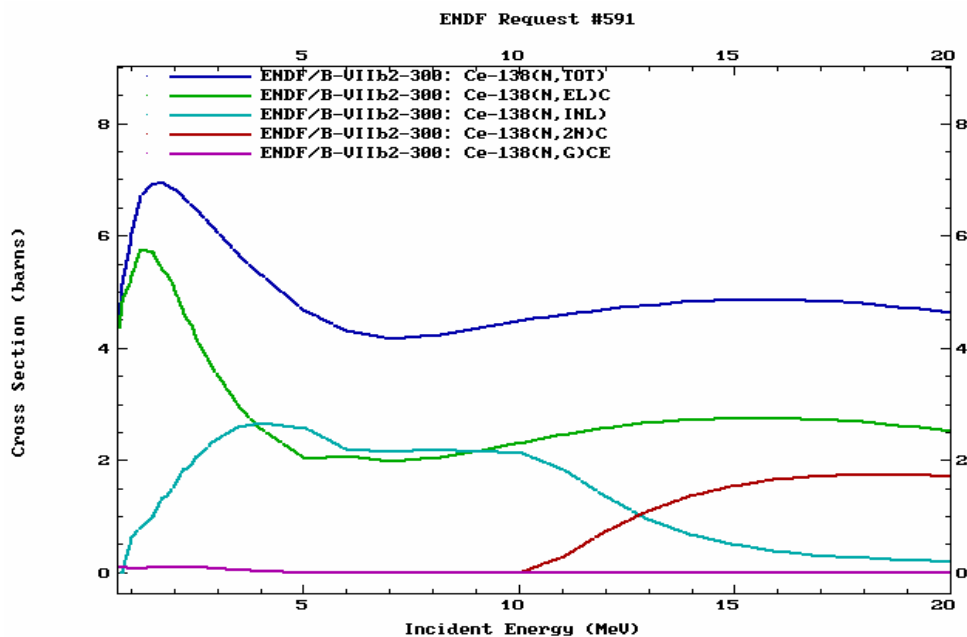


Рис. 5. Основные сечения из ENDF/B-VIIb2.

58.5. Церий-139

Период полураспада: (137.641 ± 0.020) дней.

Мода распада: ε^- 100%.

Спин основного состояния: $3/2^+$.

Файлы

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3. Оценка не является полной.

ENDF/B-VIIb2 – оценка основывается на параметрах фиктивных резонансов сгенерированных для описания теплового сечения захвата и средних резонансных параметрах оцененных Мухабхабом для области неразрешённых резонансов. Сечения в области более высоких энергий оценены с помощью программы EMPIRE используя параметры библиотеки RIPL-3 и с учётом всех возможных механизмов реакций.

Данные

Экспериментальные данные для ^{139}Ce отсутствуют. Все нейтронные сечения для ^{139}Ce из ENDF/B-VIIb2 имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 6. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

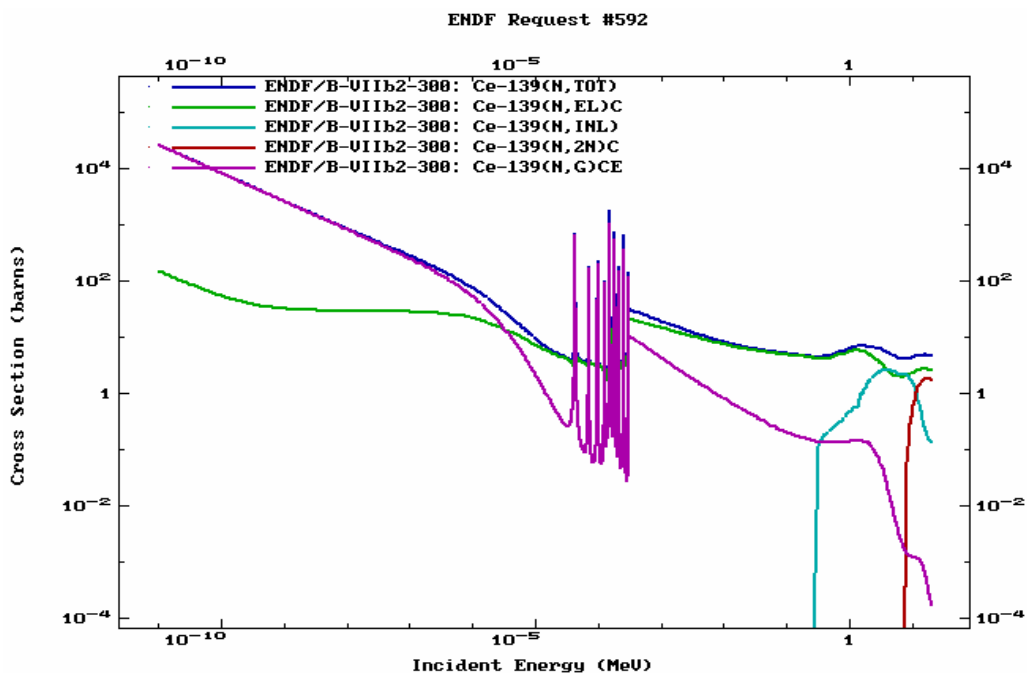


Рис. 6. Основные нейтронные сечения из библиотеки для ^{139}Ce ENDF/B-VIIb2.

Заключение

Файл ^{139}Ce из библиотеки ENDF/B-VIIb2 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД³.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

58.6. Церий-140

Содержание в естественной смеси: $(88.450 \pm 0.018)\%$.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файлы

Обзор подготовлен основываясь на анализе, выполненном Накагавой (http://www.nndc.bnl.gov/sg21/rev/rev_list.htm, 2002) в рамках подгруппы 21 международной рабочей группы по оценке сечений.

ENDF/B-VI: Оценка Шентера и др. 1974 года. Данные включены в ENDF/B-VI без каких либо исправлений.

JENDL-3.3: Оценка 1984 года выполненная JNDC FPND рабочей группой для JENDL-2. Данные были пересмотрены в 1990 году для включения в JENDL-3.1, в 1993 году для JENDL-3.2 и в 2002 году для JENDL-3.3.

JEFF-3.0: Файл JEF-2.2 основан на данных ENDF/B-V. Резонансные параметры были пересмотрены в 1985 году и сечения эмиссии заряженных частиц были включены в 1989 году. Файл JEFF-3.0 взят из JEF-2.2.

³Следует включить файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера – $^{137}\text{Ce}^m$, используя данные файла MF=10 из EAF-2003. – М.Н.

CENDL-3: Оценка Хана и др. 2000 года.

BROND-2: Оценка Игнатюка и др. 1990 года. За основу взяты данные из библиотеки JENDL-1.

ENDF/B-VIIb2 – оценка основывается на резонансных параметрах из Атласа-2006 (Мухабхаб, 2006) в тепловой и резонансной области энергий ($E_n < 200$ кэВ) и области неразрешённых резонансов и выше взятой из JENDL-3.2.

Тепловая и резонансная область

Сравнение сечений в тепловой точке, а так же резонансного интеграла захвата приведено в таблице 5. Как видно из таблицы, резонансный интеграл захвата в ENDF/B-VIIb2 слегка расходится с имеющимися экспериментальными значениями. Так же сечение захвата, усреднённые по спектру Максвелла в интервале температур 16 – 30 кэВ (таблица 6) лежит на 45% ниже чем получено на эксперименте (за исключением работы Х4=30361).

Таблица 5. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата для ^{140}Ce . Все сечения даны в барнах.

| Библиотека/Эксперимент | Полное | Упругое | Захват | Резонансный интеграл |
|------------------------------|--------|-----------|-----------|----------------------|
| ENDF/B-VIIb2 | 4.180 | 3.600 | 0.577 | 0.302 |
| ENDF/B-VI | 5.500 | 4.930 | 0.570 | 0.446 |
| JENDL-3.3 | 3.453 | 2.883 | 0.570 | 0.342 |
| JEFF-3.0 | 3.838 | 3.264 | 0.574 | 0.336 |
| CENDL-3 | 3.391 | 2.821 | 0.570 | 0.280 |
| BROND-2 | 3.530 | 2.960 | 0.570 | 0.461 |
| Mughabghab et al. [Mu81] | -- | 2.83±0.11 | 0.57±0.04 | 0.47±0.05 |
| Mughabghab [Mu06] | -- | -- | 0.57±0.02 | 0.54±0.05 |
| Katcoff et al. [Ka49] | | | 0.31±0.07 | |
| Hughes and Sherman [Hu50] | | | 0.24 | |
| Pomerance [Po52] | | | 0.63±10% | |
| Koehler and Wollan [Ko53] | | 2.8±0.1 | | |
| Lantz et al. [La64] | | | 0.59±0.06 | 0.48±0.05 |
| Alstad et al. [Al67] | | | 0.54±0.02 | 0.49±0.05 |
| Ricabarra et al. [Ri68] | | | | 0.25±0.03 |
| Vertebnyj et al. [Ve70] | | 4.0±0.2 | | |
| Steinnes [St72] | | | | 0.48±0.05 |
| Alian et al. [Al73] | | | 0.68 | 0.66 |
| Van der Linden et al. [Va74] | | | | 0.43±0.02 |
| Heft [He78] | | | | 0.483±0.005 |

Таблица 6. Сравнение сечений захвата (мбарн) из ENDF/B-VIIb2 усреднённых по спектру Максвелла при температуре 16, 24, 30 кэВ с результатами измерений.

| Энергия (кТ) | ENDF/B-VIIb2 | Эксперимент |
|--------------|--------------|-------------|
|--------------|--------------|-------------|

| | | |
|----|-------|---|
| 16 | 10.56 | 15.33±1.00 (X4=32536) |
| 24 | 8.72 | 12.63±0.57 (X4=21647) |
| 30 | 7.78 | 7.7±0.9 (X4=30361), 11.52±0.57 (X4=21647) |

Как видно из таблицы, резонансный интеграл захвата в ENDF/B-VIIb2 слегка расходится с имеющимися экспериментальными значениями.

Область быстрых нейтронов

Сравнение полного сечения в области быстрых нейтронов с экспериментальными данными показано на рисунке 7 отдельно для ENDF/B-VIIb2 (=JENDL-3.3) и для других библиотек – на рисунке 8. Согласие всех последних оценок с экспериментальными данными очень хорошее.

Сравнение сечения захвата в области быстрых нейтронов с экспериментальными данными показано на рисунке 9 для ENDF/B-VIIb2 (=JENDL-3.3) и на рисунке 10 для более ранних оценок. Как видно из рисунков, в области быстрых нейтронов (выше 200 кэВ) согласие с экспериментальными данными оценок из ENDF/B-VIIb2 (=JENDL-3.3) и CENDL-3 является хорошим.

На рисунке 11 показано сравнение экспериментальных данных с результатами оценок для сечения (n,2n). Хорошее согласие наблюдается как для JENDL-3.3 (=ENDF/B-VIIb2) так и для CENDL-3.

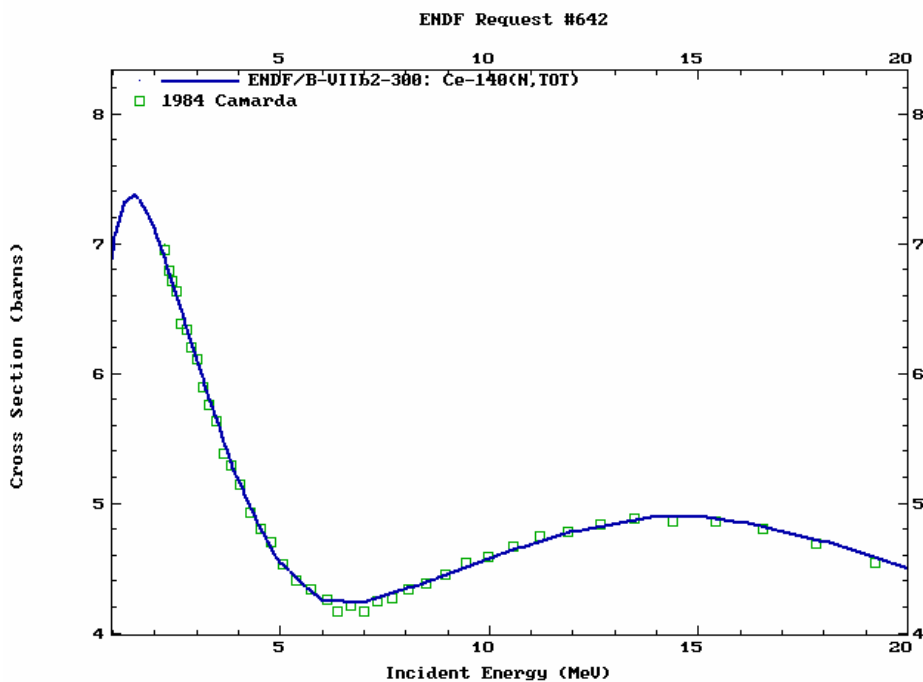


Рис. 7. Сравнение полного сечения ^{140}Ce из ENDF/B-VIIb2 с экспериментальными данными.

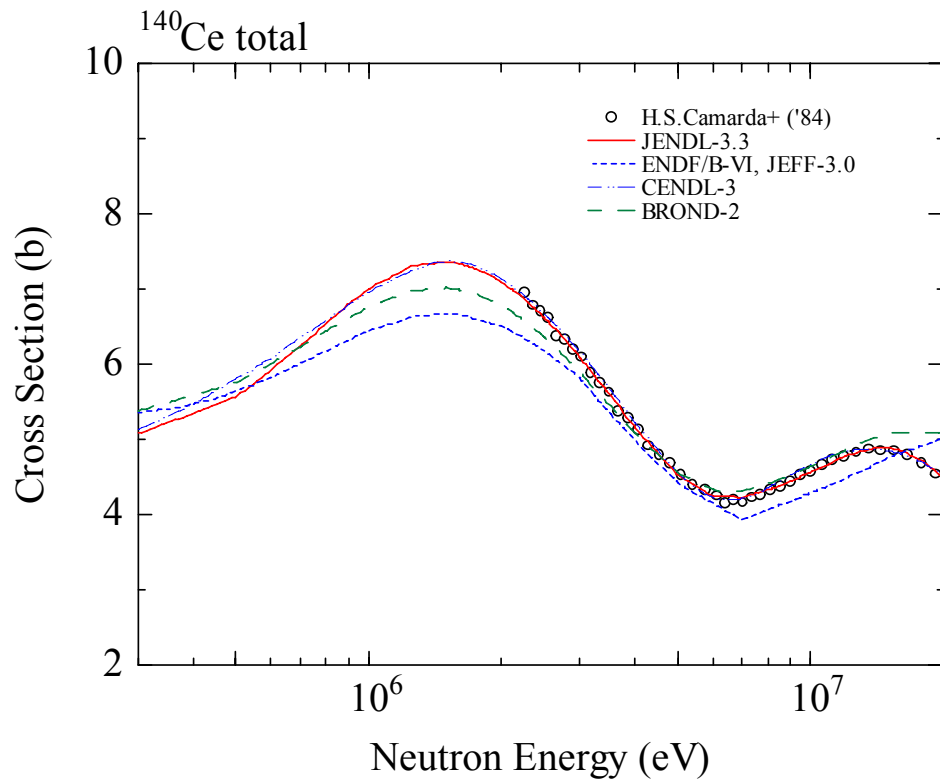


Рис. 8. Сравнение полного сечения ^{140}Ce из ранних оценок с экспериментальными данными.

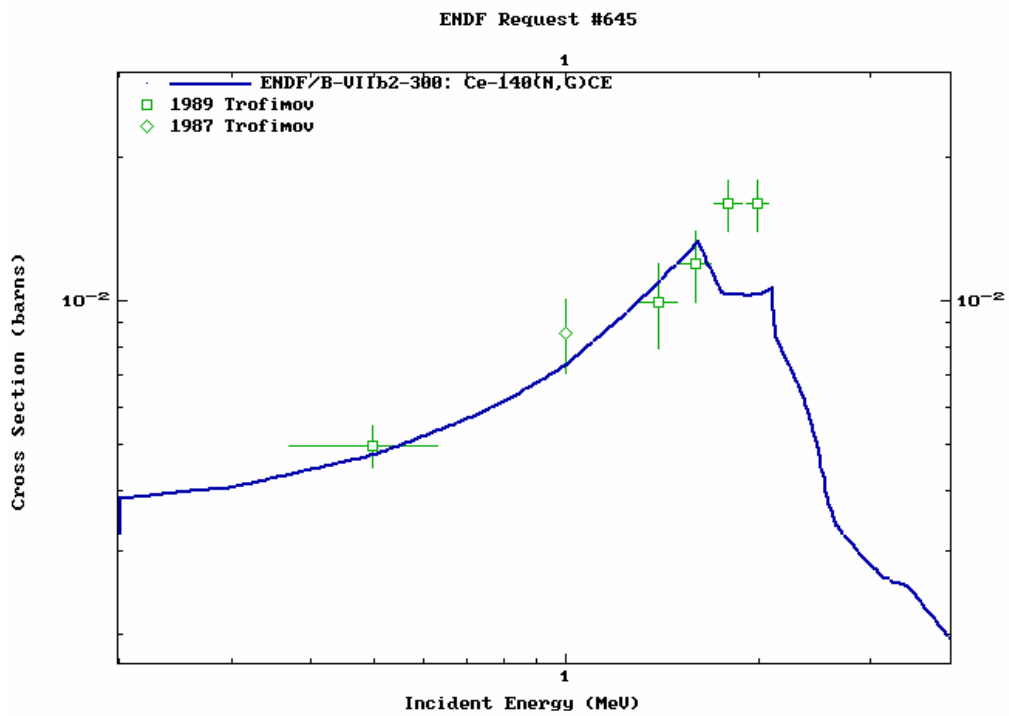


Рис. 9. Сравнение сечения захвата для ^{140}Ce из ENDF/B-VIIb2 (=JENDL-3.3) с экспериментальными данными.

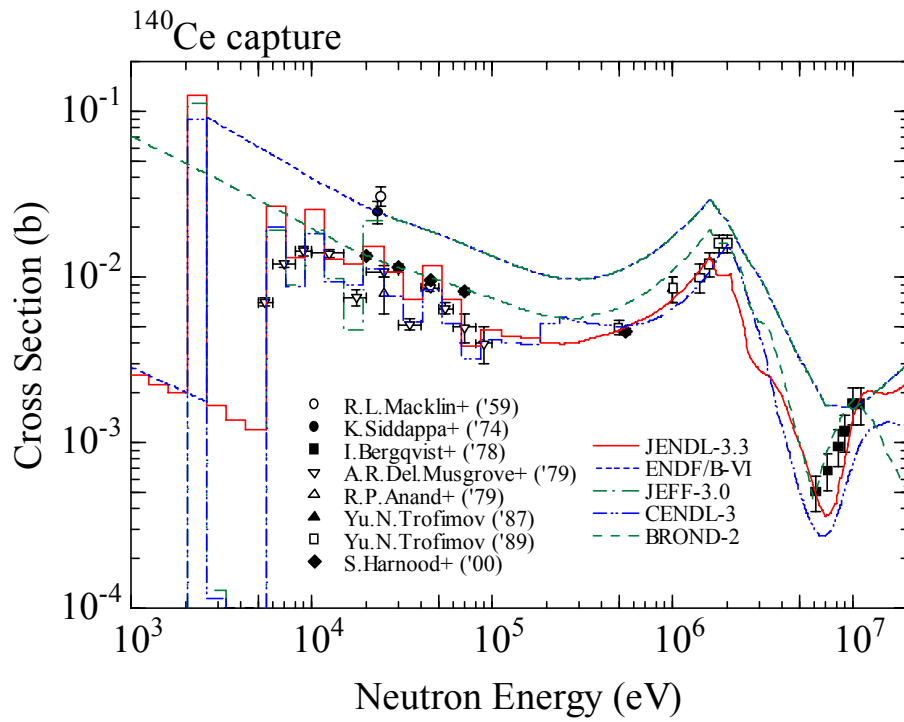


Рис. 10. Сравнение сечения захвата для ^{140}Ce из ранних оценок с экспериментальными данными.

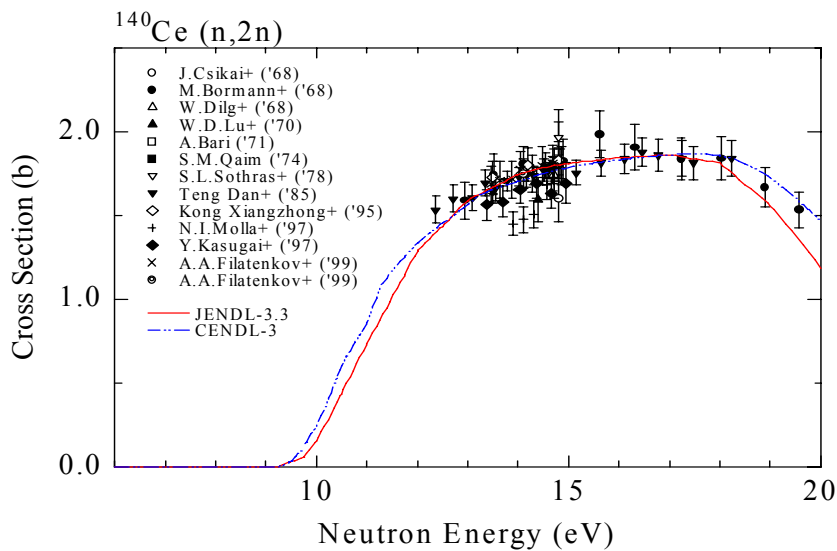


Рис. 11. Сравнение сечения $(n,2n)$ для ^{140}Ce из оценок JENDL-3.3 (=ENDF/B-VIIb2) и CENDL-3 с экспериментальными данными.

Закключение

Файл ^{140}Ce из библиотеки ENDF/B-VIIIb2 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД. Оценка сечения захвата в области энергий в несколько десятков кэВ нуждается в уточнении. При пересмотре оценки желательно включить в файл и данные об образовании фотонов в нейтронных реакциях, как это сделано в файлах данных для более легких изотопов с низким содержанием в естественной смеси.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

58.7. Церий-141

Период полураспада: (32.508 ± 0.013) дней.

Мода распада: β 100%.

Спин основного состояния: $7/2^-$.

Файлы

ENDF/B-VI: Оценка Шентера и др. 1974.

JENDL-3.3: Оценка рабочей группы JNDC FPND 1990 года.

JEFF-3.0: CNEN/CEA оценка для JEF-2.2. Резонансные параметры были модифицированы в 1988 году, и сечения с вылетом заряженных частиц были включены в 1989 году.

CENDL-3: Новая оценка Ю и др. 2000 года.

ENDF/B-VIIIb2 – оценка основывается на резонансных параметрах оцененных Мухабхабом (2006). Сечения в области неразрешённых резонансов и быстрой области энергий взяты из CENDL-3.

Тепловая и резонансная область

Сравнение сечений в тепловой точке, а также резонансного интеграла захвата приведено в таблице 7. Экспериментальные данные, за исключением данных Ланца для теплового сечения, отсутствуют.

Таблица 7. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата для ^{141}Ce . Все сечения даны в барнах.

| Библиотека/Эксперимент | Полное | Упругое | Захват | Резонансный интеграл |
|--------------------------|--------|---------|-----------------|----------------------|
| ENDF/B-VIIIb2 | 36.01 | 7.01 | 29.00 | 159 |
| ENDF/B-VI | 33.95 | 4.95 | 29.00 | 24.1 |
| JENDL-3.3 | 31.47 | 2.35 | 29.12 | 503 |
| JEFF-3.0 | 36.12 | 3.40 | 32.72 | 165 |
| CENDL-3 | 31.46 | 2.34 | 29.12 | 502 |
| Mughabghab et al. [Mu81] | -- | -- | 29 ± 3 | -- |
| Lantz et al. [La64] | | | $29 \pm 3^{*1}$ | |

-----*1 –
среднее по спектру теплового реактора

Область быстрых нейтронов

Сравнение оценённого полного сечения в области быстрых нейтронов для ^{141}Ce с экспериментальными данными для ^{140}Ce показано на рисунке 12. Хорошее согласие наблюдается для CENDL-3 (=ENDF/B-VIIb2).

На рисунке 13 показано полное сечение неупругого рассеяния для ^{141}Ce из разных библиотек. Необходимо отметить нефизическую зависимость сечения в ENDF/B-VI и отсутствие учёта вклада прямых процессов в файлах всех библиотек за исключением CENDL-3.

На рисунке 14 показано сравнение сечений захвата из разных библиотек. Несмотря на отсутствие экспериментальных данных наблюдается неплохое согласие между разными оценками.

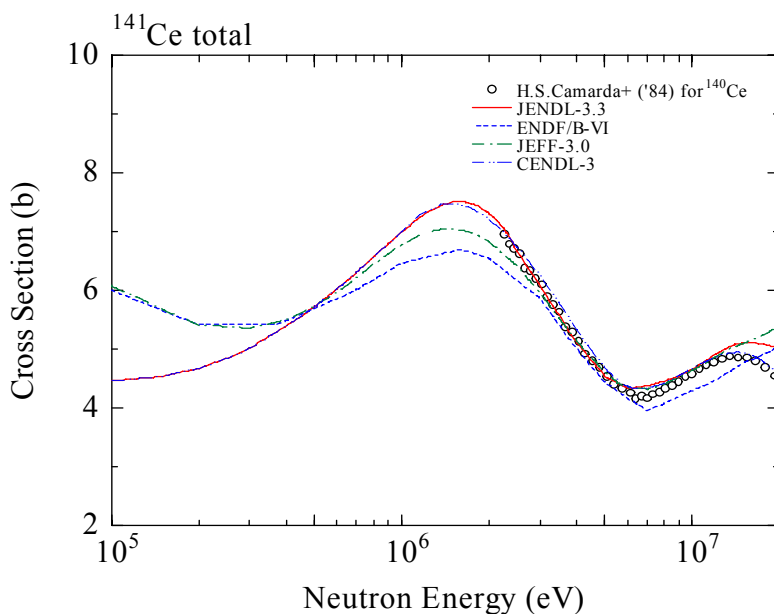


Рис. 12. Сравнение полного нейтронного сечения на ^{140}Ce с оценками из разных библиотек.

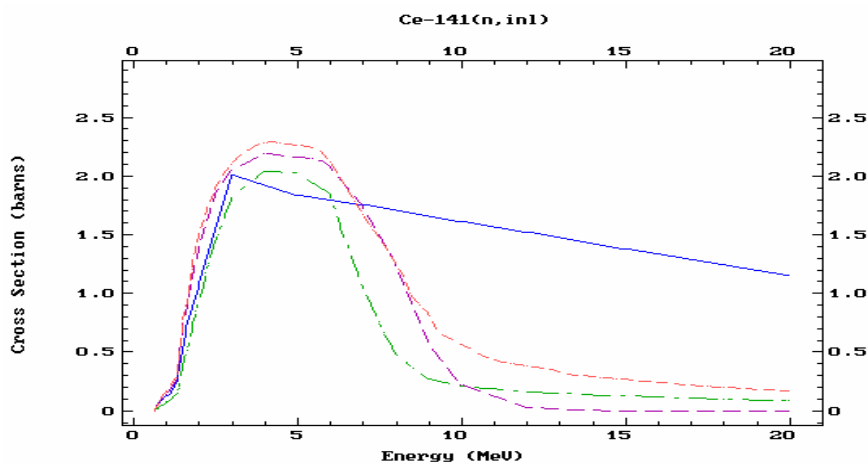


Рис. 13. Оценённое полное сечение неупругого рассеяния из разных библиотек. Сплошная синяя кривая - ENDF/B-VI, пунктирная (фиолетовая) - JEF-2, пунктирная (жёлтая) - BROND-2, штрих-пунктирная (зелёная) - JENDL-3, пунктирная (красная) - CENDL-3(=ENDF/B-VIIb2).

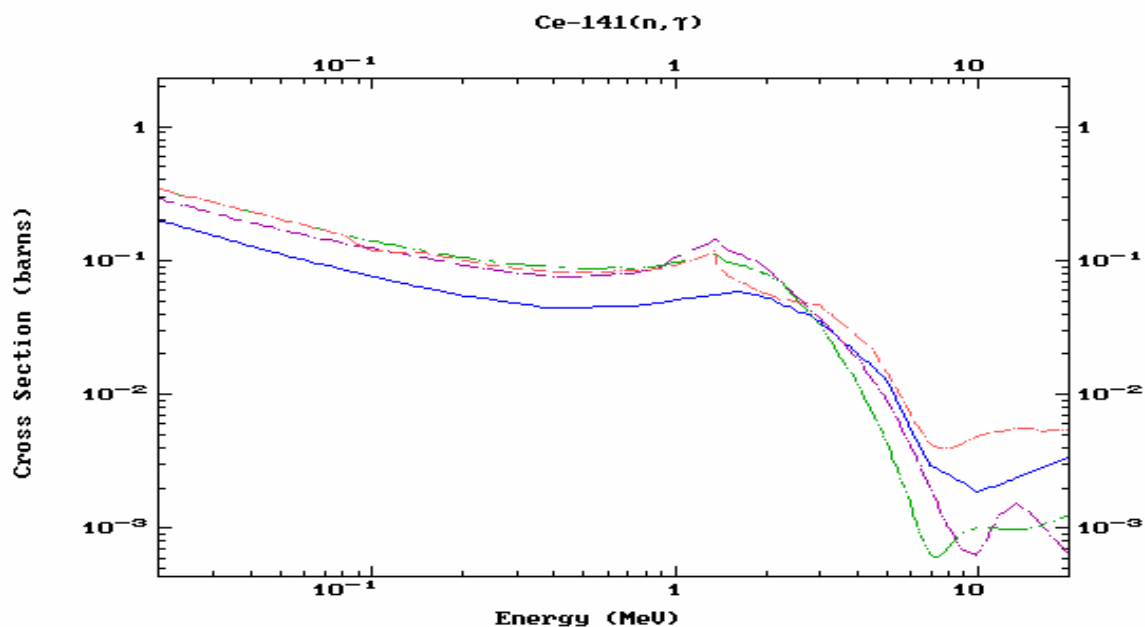


Рис. 14. Оценённое сечение захвата из разных библиотек. Сплошная синяя кривая - ENDF/B-VI, пунктирная (фиолетовая) - JEF-2, пунктирная (жёлтая) - BROND-2, штрих-пунктирная (зелёная) - JENDL-3, пунктирная (красная) - CENDL-3(=ENDF/B-VIIb2).

Заключение

Файл ^{141}Ce из библиотеки ENDF/B-VIIb2 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

58.8. Церий-142

Содержание в естественной смеси: $(11.114 \pm 0.017)\%$.

Период полураспада: $> 2.6 \cdot 10^{17}$ лет.

Мода распада: 2β 100%.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файлы

Обзор подготовлен на основании анализа, выполненного Накагавой (http://www.nndc.bnl.gov/sg21/rev/rev_list.htm, 2003) в рамках подгруппы 21 международной рабочей группы по оценке сечений.

ENDF/B-VI: Оценка Шентера и др. 1974 года

JENDL-3.3: Оценка рабочей группы JNDC FPND 1984 года. Оценка была пересмотрена в 1990 году для JENDL-3.1, в 1993 для JENDL-3.2.

JEFF-3.0: CNEN/CEA оценка для JEF-2.2 1976 года. Сечения с выходом заряженных частиц добавлены в 1989 году. JEFF-3.0 взята из JEF-2.2.

CENDL-3: Оценка Хана и др. 2000 года.

BROND-2: Данные взяты из JENDL-1 за исключением сечения захвата, переоценённого Игнатюком и др. в 1990 году.

ENDF/B-VIIb2 – оценка основывается на резонансных параметрах оцененных Мухабхабом (2006). Сечения в области неразрешённых резонансов и быстрой области энергий взяты из JENDL-3.3.

Тепловая и резонансная область

Сравнение сечений в тепловой точке, а также резонансного интеграла захвата приведено в таблице 8. Как видно, резонансный интеграл захвата во всех библиотеках лежит ниже значения, оценённого из реакторных экспериментов.

Таблица 8. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата для ^{142}Ce . Все сечения даны в барнах.

| Библиотека/Эксперимент | Полное | Упругое | Захват | Резонансный интеграл |
|--------------------------|--------|---------|----------------------|----------------------|
| ENDF/B-VIIb2 | 3.811 | 2.846 | 0.965 | 0.860 |
| ENDF/B-VI | 5.927 | 4.977 | 0.950 | 0.831 |
| JENDL-3.3 | 1.618 | 0.6145 | 1.004 | 0.931 |
| JEFF-3.0 | 4.670 | 3.770 | 0.900 | 1.01 |
| CENDL-3 | 1.586 | 0.615 | 0.971 | 0.918 |
| BROND-2 | 3.535 | 2.704 | 0.831 | 0.693 |
| Mughabghab et al. [Mu81] | -- | -- | 0.95 ± 0.05 | 1.15 ± 0.05 |
| Mughabghab [Mu01] | -- | -- | 0.97 ± 0.02 | -- |
| Mughabghab et al. [Mu06] | -- | -- | -- | 1.15 ± 0.05 |
| Katcoff et al. [Ka49] | -- | -- | $0.95 \pm 0.18^{*1}$ | -- |
| Hughes et al. [Hu50] | -- | -- | 0.72^{*1} | -- |

| | | | |
|------------------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Pomerance [Po52] | | $1.76 \pm 15\%$ ^{*1} | |
| Koehler et al. [Ko53] | 2.6 ± 0.2 | | |
| Vertebnyj [Ve70] | 3.7 ± 0.2 | | |
| Roy et al. [Ro56] | | 0.95 ± 0.05 ^{*1} | |
| Alstad et al. [Al67] | | 0.94 ± 0.09 ^{*1} | 1.6 ± 0.2 ^{*2} |
| Ricabarra et al. [Ri68] | | | 0.73 ± 0.04 ^{*3} |
| Van der Linden et al. [Va74] | | | 1.10 ± 0.06 ^{*4} |

*1 усреднённое по тепловому спектру

*2 от 0.4 эВ до 1 МэВ

*3 выше 0.6 эВ

*4 выше 0.55 эВ

Область быстрых нейтронов

Сравнение оценённого полного сечения в области быстрых нейтронов для ^{142}Ce с экспериментальными данными показано на рисунке 15. Хорошее согласие наблюдается для JENDL-3.3 (=ENDF/B-VIIb2).

На рисунке 16 показано сравнение сечений захвата из разных библиотек. Оценка JENDL-3.3 (=ENDF/B-VIIb2) неплохо согласуется с экспериментальными данными.

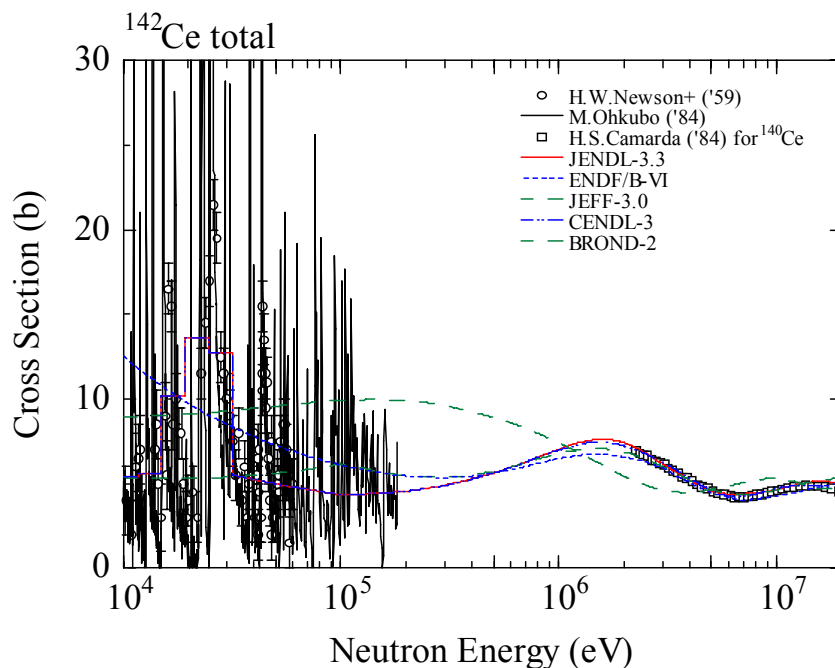


Рис. 15. Сравнение полного нейтронного сечения на ^{142}Ce с оценками из разных библиотек.

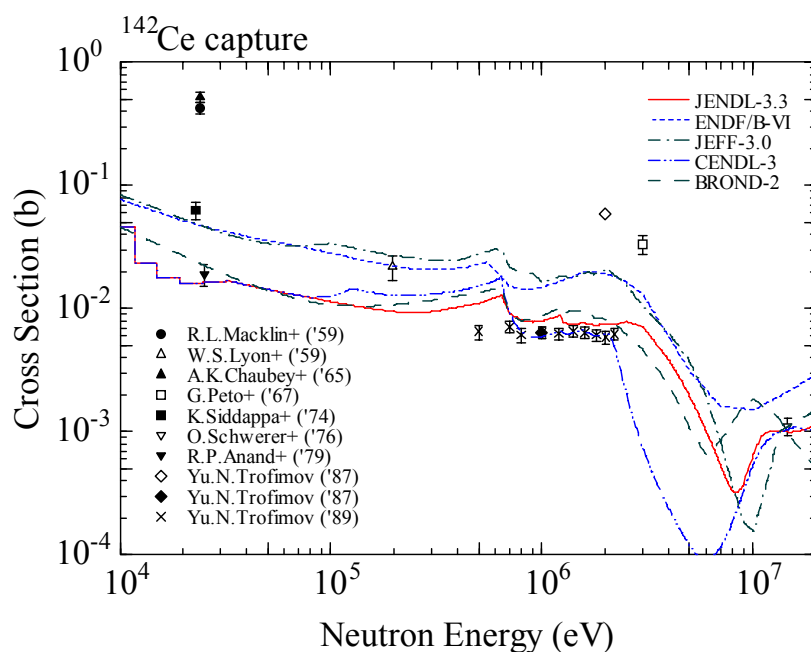


Рис. 16. Сравнение сечения захвата на ^{142}Ce с оценками из разных библиотек.

Заключение

Файл ^{142}Ce из библиотеки ENDF/B-VIIb2 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

58.9. Церий-143

Период полураспада: (33.039 ± 0.006) часа.

Мода распада: β^- 100%.

Спин основного состояния: $3/2^-$.

Файлы

ENDF/B-VI: Оценка Шентера и др. 1974.

JEFF-3.0: CNEN/CEA оценка для JEF-2.2. Сечения с вылетом заряженных частиц были включены в 1989 году.

ENDF/B-VIIb2 – оценка основывается на резонансных параметрах для псевдорезонансов в области разрешённых резонансов и средних резонансных параметрах в области неразрешённых резонансов. Оценка выполнена Мухабхабом (2006). Сечения области быстрых нейтронов оценены с помощью программы EMPIRE с учётом вклада всех возможных механизмов реакций. Так как экспериментальные данные практически отсутствуют, а расчёты EMPIRE базируются на последних оцененных модельных параметрах, нет необходимости проводить сравнение со устаревшими оценками ENDF/B-VI и JEFF-3.0, а достаточно показать, что основные сечения в ENDF/B-VIIb2 являются физически обоснованными.

Тепловая и резонансная область

Сравнение сечений в тепловой точке, а также резонансного интеграла захвата приведено в таблице 9.

Таблица 9. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата для ^{143}Ce . Все сечения даны в барнах.

| Библиотека/Эксперимент | Полное | Упругое | Захват | Резонансный интеграл |
|--------------------------|--------|---------|--------------------|----------------------|
| ENDF/B-VIIb2 | 13.97 | 7.97 | 6.0 | 43.2 |
| ENDF/B-VI | 11.0 | 5.0 | 6.0 | 41.5 |
| JEFF-3.0 | 11.0 | 5.0 | 6.0 | 41.5 |
| Mughabghab et al. [Mu06] | -- | -- | 6.0 ± 0.7 | -- |
| Roy et al. [Ro56] | -- | -- | $6.0 \pm 0.7^{*1}$ | -- |

*1 – среднее по спектру теплового реактора

Область быстрых нейтронов

Основные сечения из ENDF/B-VIIb2 в области быстрых нейтронов показаны на рисунке 17. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

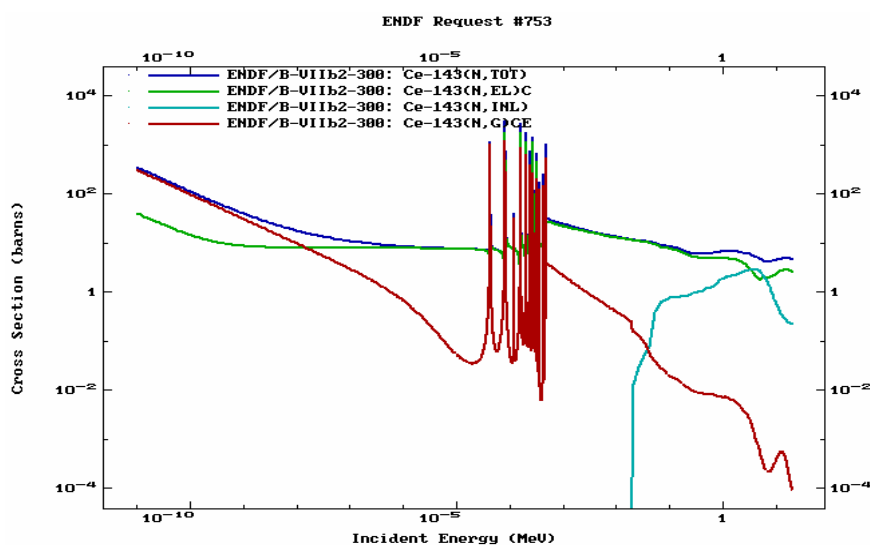


Рис. 17. Основные нейтронные сечения из библиотеки ENDF/B-VIIb2 для ^{143}Ce .

Заключение

Файл ^{143}Ce из библиотеки ENDF/B-VIIb2 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

58.10. Церий-144

Период полураспада: (284.91 ± 0.05) дней.

Мода распада: β 100%.

Спин основного состояния: 0^+ .

Файлы

ENDF/B-VI: Оценка Шентера и др. 1974 года.

JENDL-3.3: Оценка рабочей группы JNDC FPND 1984 года. Оценка была пересмотрена в 1990 году для JENDL-3.1.

JEF-2.2: Оценка 1976 года. Сечения с вылетом заряженных частиц были включены в 1989 году.

CENDL-3: Оценка 2000 года.

BROND-2: Оценка 1985 года.

ENDF/B-VIIb2 – оценка взята из JENDL-3.3 с небольшими форматными поправками.

Тепловая и резонансная область

Сравнение сечений в тепловой точке, а также резонансного интеграла захвата приведено в таблице 10. JENDL-3.2 (=ENDF/B-VIIb2) наилучшим образом описывает данные Лантца по тепловому сечению и резонансному интегралу захвата.

Таблица 10. Тепловые сечения и резонансный интеграл захвата для ^{144}Ce . Все сечения даны в барнах.

| Библиотека/Эксперимент | Полное | Упругое | Захват | Резонансный интеграл |
|--------------------------|--------|---------|---------------|----------------------|
| ENDF/B-VIIb2 | 3.78 | 2.78 | 1.0 | 2.55 |
| ENDF/B-VI | 6.024 | 5.024 | 1.0 | 2.07 |
| JENDL-3.2 | 3.78 | 2.78 | 1.0 | 2.55 |
| JEF-2.2 | 4.518 | 3.39 | 1.128 | 2.86 |
| CENDL-3 | 3.780 | 2.780 | 1.00 | 5.78 |
| BROND-2 | 3.668 | 2.659 | 1.00 | 1.05 |
| Mughabghab et al. [Mu06] | -- | -- | 1.0 ± 0.1 | 2.6 ± 0.3 |
| Lantz [La62] | | | 1.0 ± 0.1 | 2.6 ± 0.3 |

Область быстрых нейтронов

Сравнение основных сечений для файлов ^{144}Ce основных библиотек показано на рисунках 18 - 20. Сечения из оценки JENDL-3.3 (=ENDF/B-VIIb2) являются физически обоснованными.

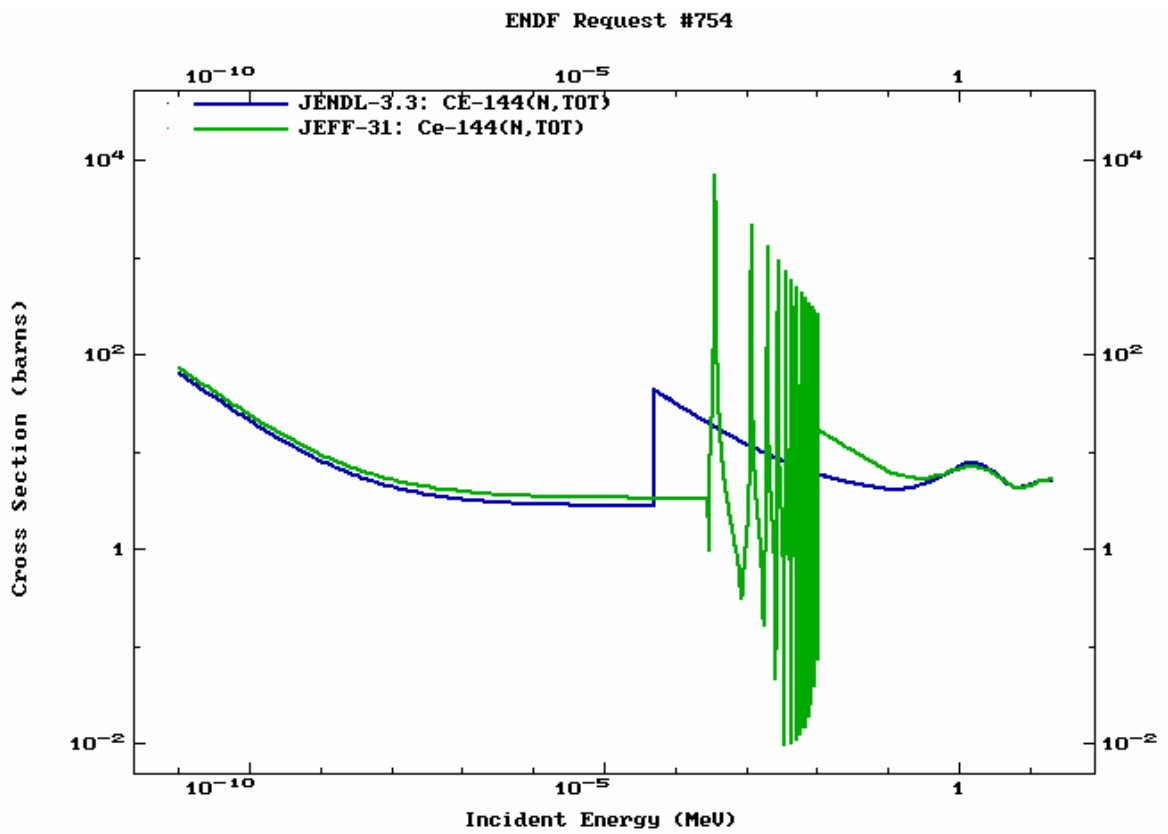


Рис. 18. Сравнение полного сечения JENDL-3.3 (= ENDF/B-VIIb2) с JEFF-3.1 для ^{144}Ce .

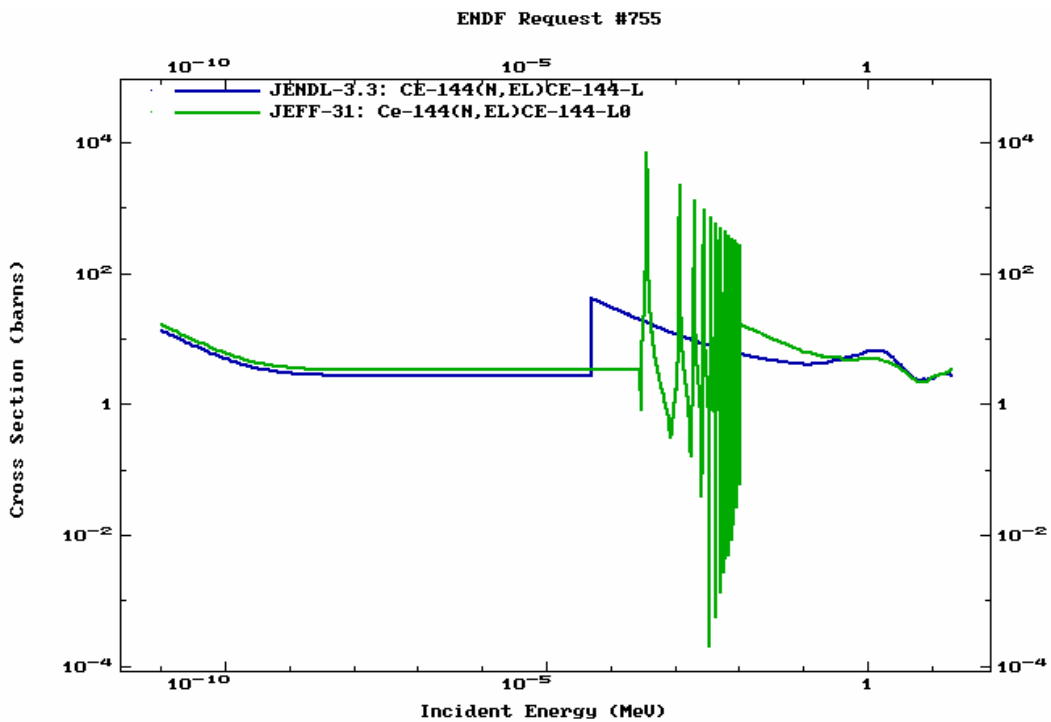


Рис. 19. Сравнение сечения упругого рассеяния JENDL-3.3 (= ENDF/B-VIIb2) с JEFF-3.1 для ^{144}Ce .

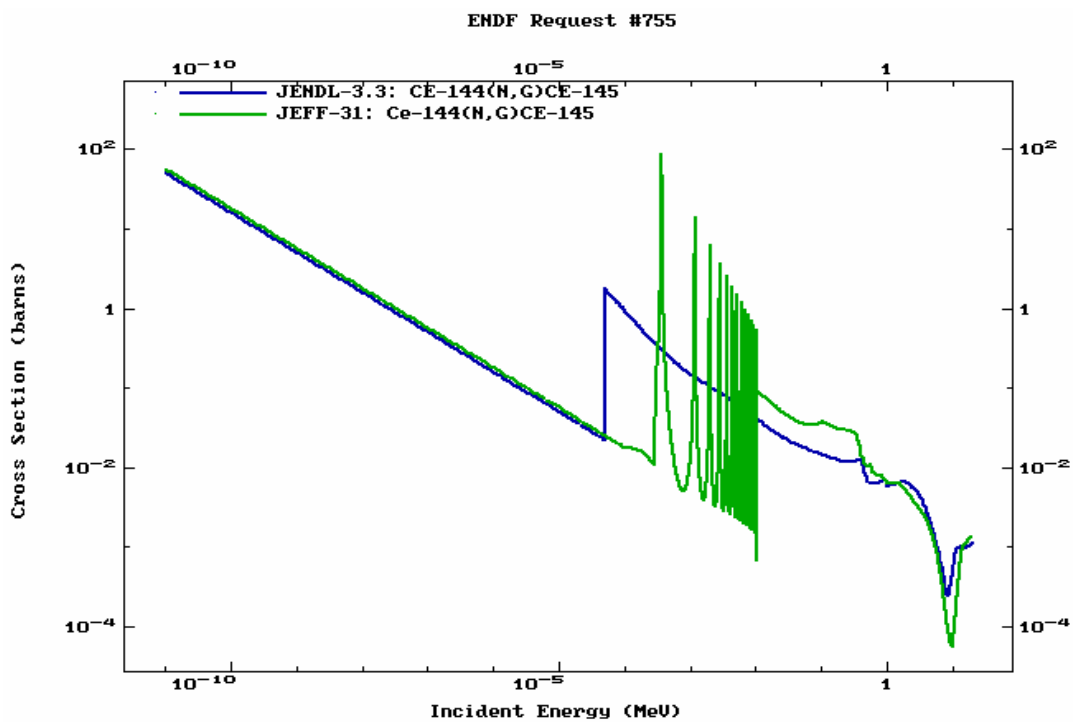


Рис. 20. Сравнение сечения захвата JENDL-3.3 (= ENDF/B-VIIb2) с JEFF-3.1 для ^{144}Ce .

Заключение

Файл ^{144}Ce из библиотеки ENDF/B-VIIb2 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

59.ПРАЗЕОДИМ

59.1. Празеодим-141

Стабильный изотоп (содержание в природной смеси=100%).
Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $4.439 \cdot 10^{-2}$.

Имеется три полных набора нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка Группелаара и Менапаса (H Gruppelaar, E. Menapace), 1982г.; оценка японской рабочей группой по продуктам деления, включенная в JENDL-3.3 и со значительными коррекциями в области резонансных энергий принятая в 2005 г., и для библиотеки ENDF/B-VII оценка выполнена подгруппой 23 международной рабочей группы по оценке нейтронных данных.

Область разрешенных резонансов.

Ниже в таблице 1 приводятся значения полного сечения, сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла, посчитанных по программе INTER:

Таблица 1 – Сравнение резонансных свойств Pr-141.

| | $\sigma_t(0.0253 \text{ eV})$ | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI_c |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| ENDF/B-VII | 14.22 барн | 11.51 барн | 17.8 барн |
| JENDL-3.3 | 14.05 барн | 11.50 барн | 18.3 барн |
| JEFF-3.1 | 14.08 барн | 11.48 барн | 17.9 барн |
| Мухабхаб | | 11.5 ± 0.3 барн | 17.4 ± 2.0 барн |

Как видим из приведенных в таблице 1 данных, наблюдается разительное согласие оцененных и рекомендованных значений теплового сечения радиационного захвата нейтронов. Что касается резонансного интеграла, то значение из JENDL кажется несколько завышенным. Это, однако, относится к оценке резонансных параметров связанных состояний первых резонансных уровней.

На рисунке 1 показана нарастающая сумма резонансных уровней s-уровней, а на рисунке 2 показана аналогичная зависимость для p-волны.

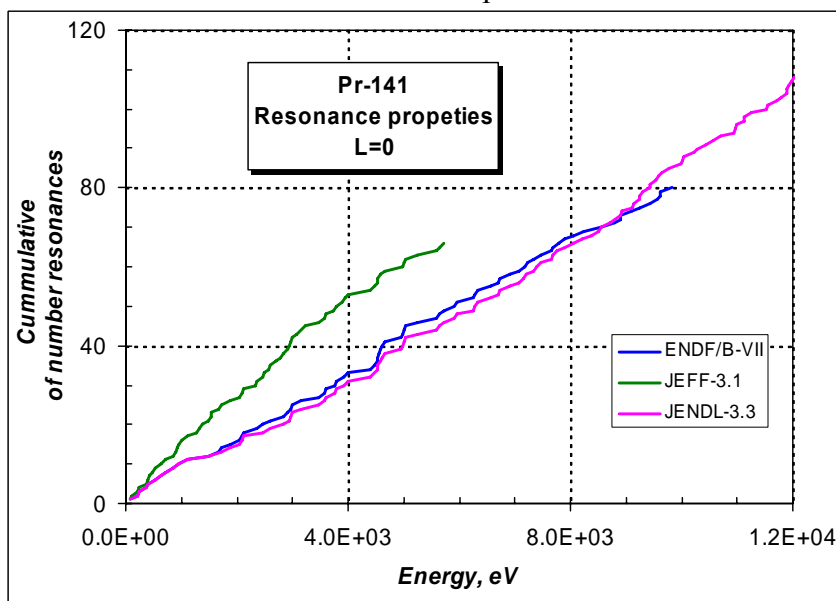


Рисунок 1 – Нарастающая сумма s-резонансов(l=0) для различных оценок.

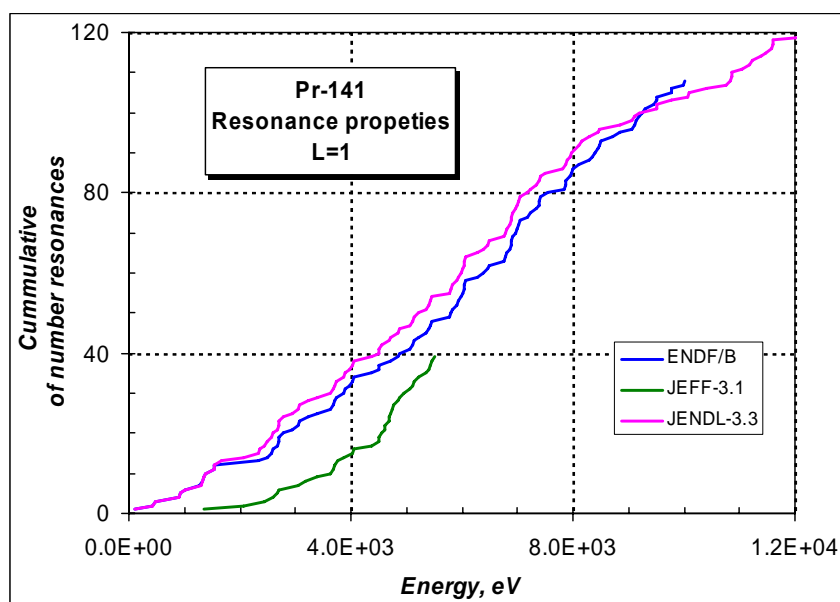


Рисунок 2 – Нарастающая сумма р-резонансов ($l=1$) для различных оценок.

Из приведенного на рисунках 1 и 2 сравнения видно, что оценки ENDF/B-VII и JENDL-3.3 исходят из одного и того же источника данных о резонансных уровнях Pr-141, но идентифицируют резонансные уровни по-разному. Оценка JEFF-3.1 сильно проигрывает вышеупомянутым оценкам.

Посчитаем плотность резонансов в двух равных энергетических интервалах от 0-5 кэВ и от 5-10 кэВ и в третьем интервале выше 10 кэВ. Результаты приводятся в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение плотности резонансных уровней Pr-141.

| | <i>0 - 5 кэВ</i> | <i>5 - 10 кэВ</i> | <i>выше 10 кэВ</i> |
|------------|------------------|-------------------|--------------------|
| ENDF/B-VII | 83 рез. | 104 рез. | 1 рез. |
| JENDL-3.3 | 86 рез. | 103 рез. | 59 рез. |
| JEFF-3.1 | 90 рез. | 15 рез. | - |

Как видим, плотность резонансов в первом интервале приблизительно одинакова для всех трех оценок, во втором интервале плотность одинакова для двух оценок, а в третьем интервале в оценке JENDL находится приемлемое число резонансов (верхняя граница – 13.226 кэВ).

Таким образом, из приведенного выше сравнения, следует, что целесообразно в РОСФОНД принять оценку резонансных параметров из JENDL-3.3, откорректировав резонансные параметры для первых связанных состояний резонансных уровней.

Область неразрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов для перечисленных оценок следующая:

| | нижняя граница, (кэВ) | верхняя граница, (кэВ) |
|------------|--------------------------|---------------------------|
| ENDF/B-VII | 10.06 | 146.47 |
| JENDL-3.3 | 13.23 | 100.0 |
| JEFF-3.1 | 5.77 | 300.0 |

Энергетическая зависимость оцененного сечения захвата в области энергий от 10 кэВ до 1 МэВ показана на рисунке 3.

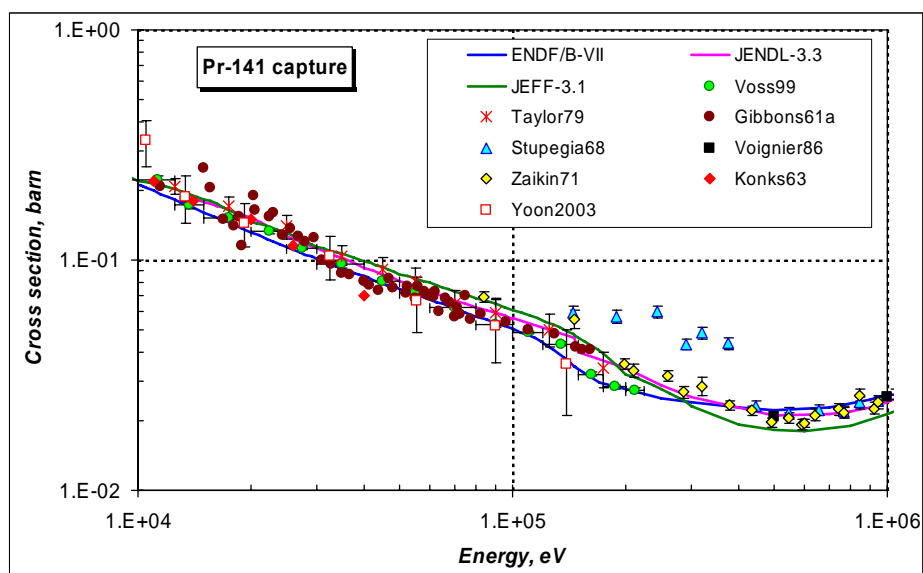


Рисунок 3. Сечение захвата Pr-141 в области энергий 10 кэВ-1 МэВ.

Из приведенного на рисунке 3 сравнения видно, что оценка ENDF/B-VII проведена, опираясь главным образом на эксперимент Восса (1999 г.), а экспериментальные данные Юна (2003) подтверждают эту оценку. Оценка JEFF выглядит наименее обоснованной.

На рисунке 4 приведены оцененные полные сечения в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Видно, что только оценка JEFF описывает всю совокупность экспериментальных данных, в то время, как оценки ENDF/B и JENDL завышены в области неразрешенных резонансов.

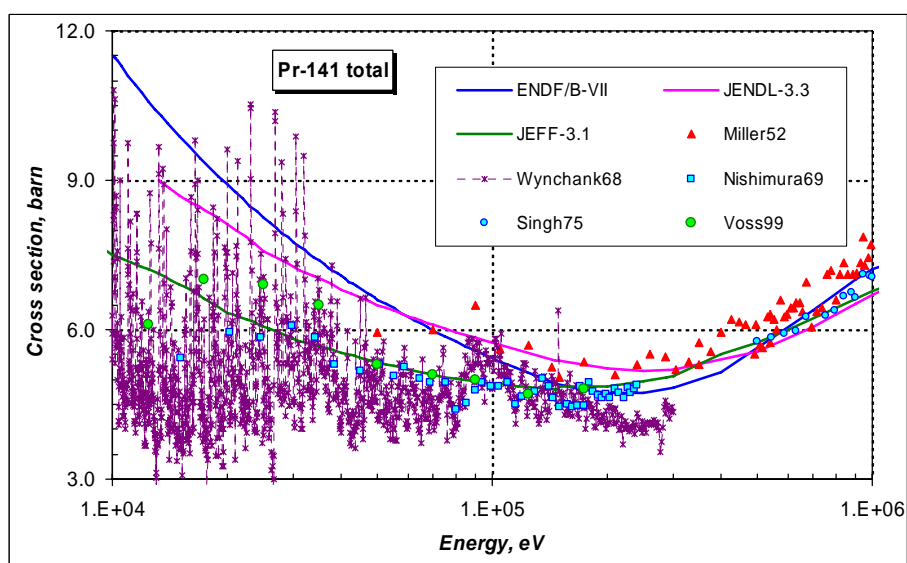


Рисунок 4. Полное сечение Pr-141 в области энергий 10 кэВ – 1 МэВ.

Выводы

Наиболее перспективной оценкой параметров разрешенных резонансов является набор из JENDL-3.3, но и оценка ENDF/B-VII до 10 кэВ является равнозначной.

В области неразрешенных резонансов нет удовлетворительной оценки средних резонансных параметров. Но, учитывая тот факт, что оценка сечения радиационного захвата Pr-141 является наиболее важной (поскольку Pr-141 входит в первую двадцатку наиболее значимых продуктов деления), наиболее привлекательной является оценка ENDF/B-VII.

Область гладких сечений.

На рисунке 5 показано сечение радиационного захвата нейтронов Pr-141 в области энергий выше 100 кэВ.

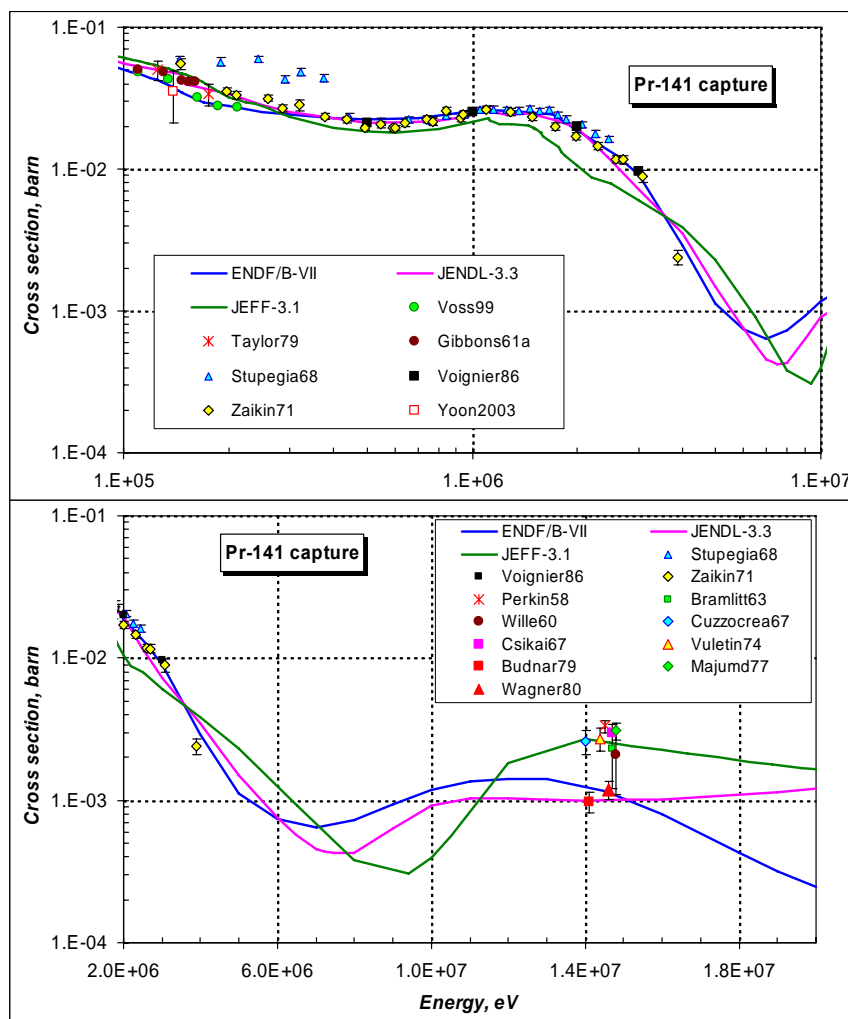


Рисунок 5. Сечение захвата Pr-141 в области энергий выше 100 кэВ.

Из приведенного на рисунке 5 сравнения видно, что и в этой области энергий в оценке ENDF/B-VII уделялось достаточное внимание согласованности оцененного сечения с последними наиболее свежими экспериментальными данными. Следует также отметить, что JENDL-3.3 является равнозначной и не уступает по надежности оценке сечения радиационного захвата из ENDF/B-VII.

На рисунке 6 приводится сравнение полного сечения взаимодействия Pr-141 в области энергий выше 100 кэВ с имеющимися экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 6 сравнения видно, что оценка ENDF/B наилучшим образом согласуется с имеющейся совокупностью экспериментальных данных. Оценка JENDL завышена в области энергий 100-400 кэВ и занижена в области энергий 0.7-3.0 МэВ.

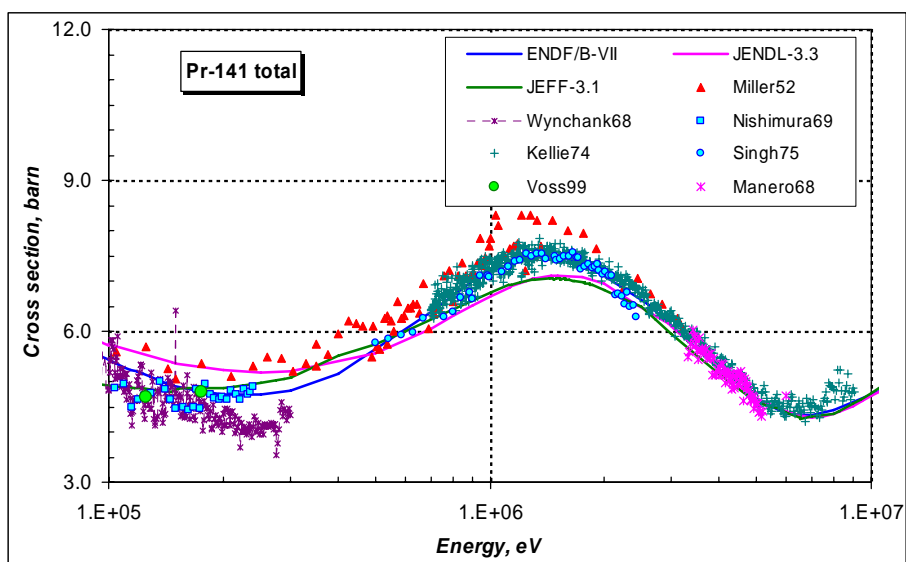


Рисунок 6. Полное сечение Pr-141 в области энергий выше 100 кэВ.

На рисунке 7 показано сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния нейтронов с имеющимися немногочисленными экспериментальными данными.

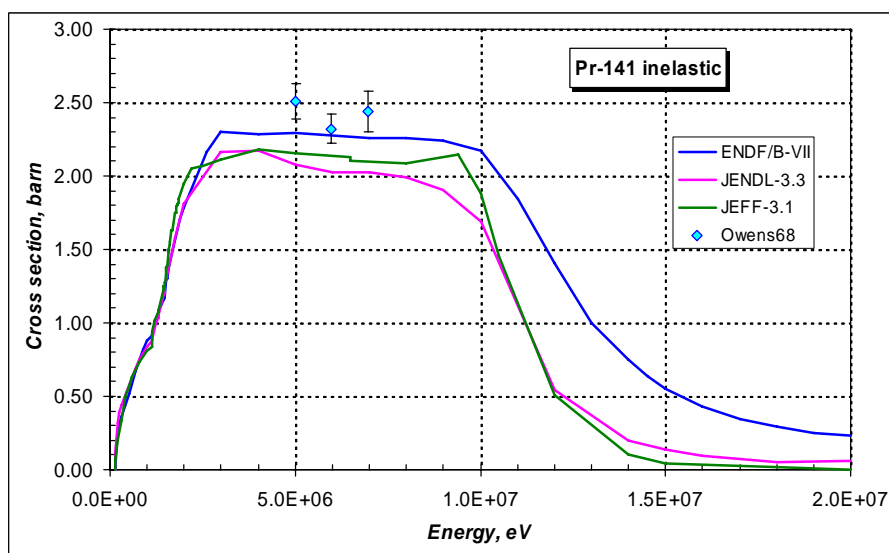


Рисунок 7. Сечение неупругого рассеяния нейтронов Pr-141.

Из приведенного на рисунке 7 сравнения видно, что оценка ENDF/B-VII лучше других согласуется с экспериментом Оуэна (1968 г.).

На рисунке 8 показано сравнение сечений образования вторичных нейтронов в результате реакций (n,2n) и (n,3n). Для реакции (n,2n) имеется большое количество экспериментальных измерений. Последние измерения выполненные, главным образом, японскими экспериментаторами указывают на тенденцию понижения сечения в области порога реакции. Этой тенденции наиболее соответствует оценка ENDF/B-VII. Заметим, что, и оценка EAF2003 хорошо согласуется с экспериментом как для описания сечения реакции (n,2n), так и для описания сечения реакции (n,3n).

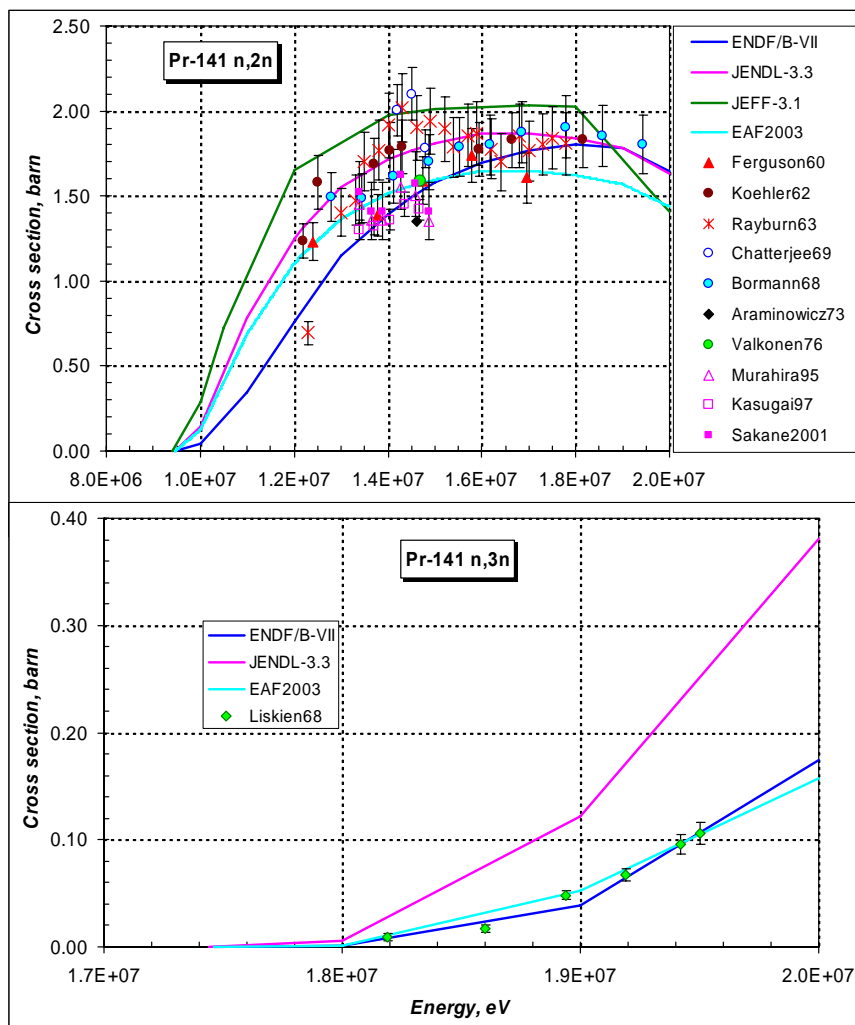


Рисунок 8. Сечение реакций (n,2n) и (n,3n) на Pr-141.

Заключение

Рекомендуется принять в РОСФОНД оцененные нейтронные данные из библиотеки ENDF/B-VII.

В дальнейшем, существует насущная потребность в переоценке принятых средних резонансных параметров с тем, чтобы наряду с корректным описанием сечения захвата, полное сечение в этой области энергий описывалось в согласии с имеющимися экспериментальными данными.

Имеется так же возможность расширить область разрешенных резонансов до энергии ~ 13 кэВ.

Автор заключения

Кошечев В.Н..

59.2. Празеодим-143

Радиоактивен ($T_{1/2}=13.57$ дн.). Путем бета-распада превращается в самарий-148. Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $4.023 \cdot 10^{-2}$. Имеется три полных набора нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка Группелаара и Менапаса (H Gruppelaar, E Menapace, 1982г.); оценка японской рабочей группой по продуктам деления, включенная в JENDL-3.3 и с ничтожными коррекциями принятая в 2005 г., и для библиотеки ENDF/B-VII оценка выполнена подгруппой 23 международной рабочей группы по оценке нейтронных данных на основе оценки из JENDL-3.3.

В таблице 3 приводятся значения оцененных сечений захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла, а так же немногочисленные имеющиеся экспериментальные данные и оценка Мухабхаба:

Таблица 3 – Сравнение резонансных свойств Pr-143.

| | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI_c |
|------------------|-------------------------------|-------------------|
| ENDF/B-VII | 89.9 барн | 131.4 барн |
| JENDL-3.3 | 90.0 барн | 222.4 барн |
| JEFF-3.1 | 89.0 барн | 195.6 барн |
| Мухабхаб-84 | 90 ± 10 | 190 ± 25 барн |
| Roy et al (1959) | 89 ± 10 | 190 ± 25 барн |

Из приведенной в таблице 3 информации видно, что различие наблюдается только для резонансного интеграла из оценки ENDF/B.

На рисунке 9 сравниваются оцененные энергетические поведения сечения захвата. Видно, что оценка ENDF/B выгодно отличается от других тем, что в ней присутствует область разрешенных резонансов. Оценка резонансных параметров для шести уровней в ней выполнена на основе единственного эксперимента Ануфриева и др. (1980 г.).

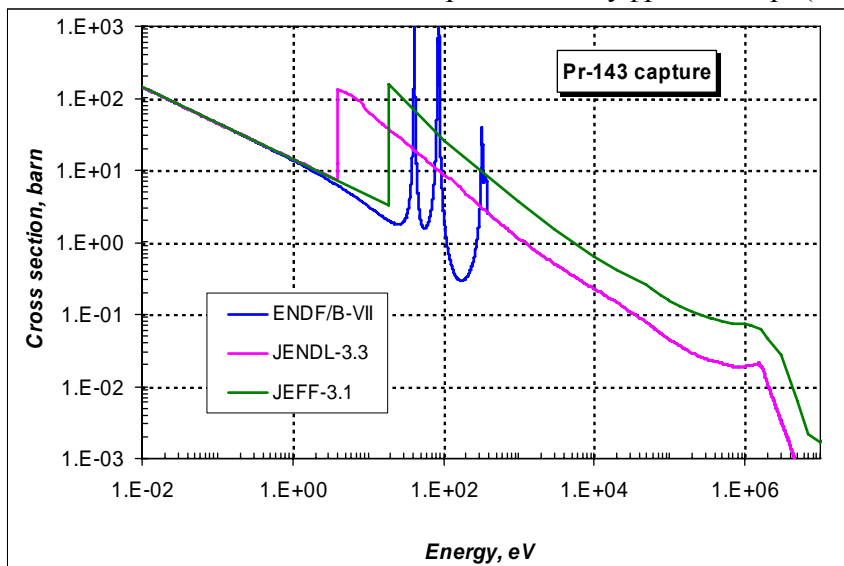


Рисунок 9. Сечение радиационного захвата Pr-143.

Выше 375 эВ оценка ENDF/B совпадает с оценкой JENDL. Поскольку радиационная ширина резонансных уровней намного меньше нейтронной ширины, имеется большая вероятность переоценки резонансных параметров для первых связанных уровней с тем, что бы описать не только тепловое сечение, но резонансный интеграл.

На рисунке 10 показано сравнение полного сечения взаимодействия Pr-143, а на рисунке 11 представлено сравнение сечения неупругого рассеяния нейтронов Pr-143.

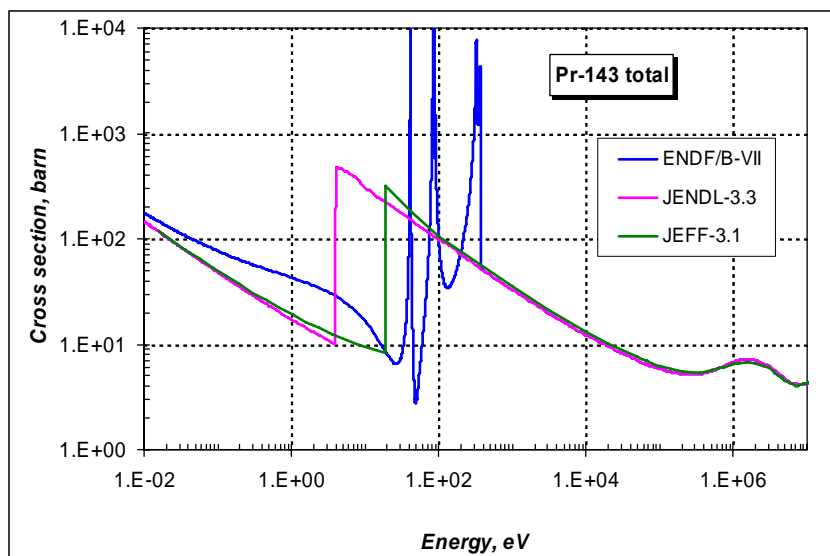


Рисунок 10. Полное сечение Pr-143.

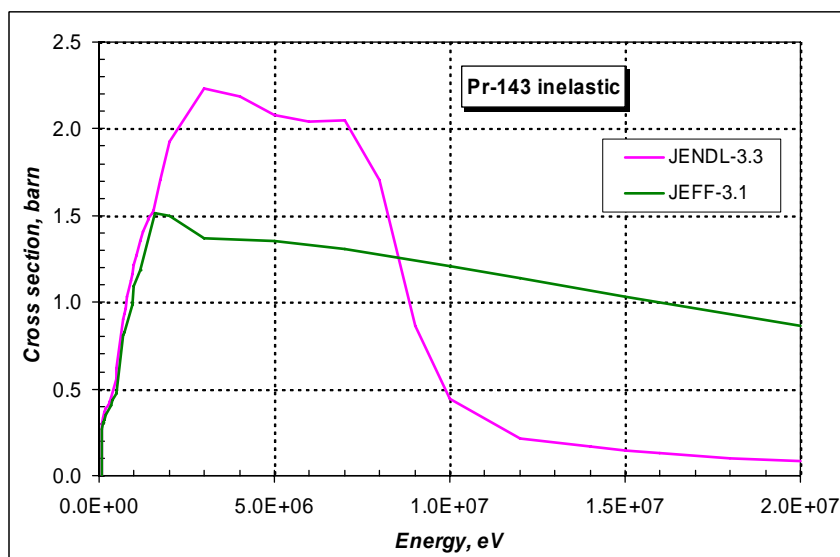


Рисунок 11. Сечение неупругого рассеяния нейтронов Pr-143.

Сравнение основных оцененных сечений позволяет отдать предпочтение оценке ENDF/B-VII, которая выгодно отличается от других наличием области разрешенных резонансов.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из ENDF/B-VII.

В дальнейшем переоценить резонансные параметры для связанных уровней с тем, чтобы расчетный резонансный интеграл не противоречил экспериментальному значению.

Автор рекомендации

Кощев В.Н.

60.НЕОДИМ

Изотопы неодима Nd-143, -145, -146, -148, входят в список пятидесяти важнейших продуктов деления, тогда как изотопы Nd-144, -146, -147 и -150 находятся во второй половине списка ста важнейших продуктов деления. Для всех изотопов неодима имеется весьма обширная экспериментальная информация, но, ввиду определенных разногласий экспериментальных данных, расхождения различных оценок оказываются весьма значительными.

Сравнение оценок, проведенное Рабочей группой по международной координации оценок ядерных данных, показало, что сечения радиационного захвата нейтронов, усредненные по стандартному спектру быстрого реактора, достаточно хорошо согласуются во всех библиотеках [98G]. Расхождения между оценками для сечения захвата нейтронов, проинтегрированному по накоплению продуктов деления в реакторе, не превышают 7%, и такая погрешность оценок радиационного захвата удовлетворяет современные требования к ядерным данным.

В то же время разногласия оценок сечений неупругого рассеяния нейтронов и сечений (n,2n) реакций оказались значительно большими. Эти разногласия обусловлены, в первую очередь, весьма ограниченным объемом экспериментальных данных о сечениях реакций неупругого рассеяния для энергий, близких к порогу реакции, а также использованием слишком упрощенных моделей ядерных процессов в ранних оценках нейтронных сечений.

Международной рабочей группой был проведен анализ всех имеющихся оценок нейтронных сечений изотопов неодима и были выработаны рекомендации по предпочтительным оценкам и возможным уточнениям предыдущих оценок [04M]. На основе этих рекомендаций были выполнены новые оценки ENDF/B-VII [06O], в которых данные для тепловых нейтронов и нейтронных резонансов были уточнены на основе нового издания атласа нейтронных резонансов [06M], а для быстрых нейтронов были выполнены расчеты всех сечений на основе современных теоретических моделей с оптимально подобранными параметрами.

Ниже будет представлено сравнение новых оценок с имеющимися экспериментальными данными, а также предыдущими оценками национальных библиотек.

98G H.Gruppelaar. Status of pseudo-fission-product cross sections for fast reactors. Report NEA/WPEC-17 (ECN-R-98-014), OECD, 1998.

04M Minutes of the Workshop on Assessment of Fission Product Evaluations (Brookhaven, April 2004), NNDC, Upton, 2004; www.nndc.bnl.gov/sg21/.т

05O P.Oblozinsky. Creation of International Library of Neutron Cross-Section Evaluations for the Bulk of Fission Products. Report Subgroup 23, OECD, Paris, 2006.

06M S.MUGHABGHAB. ATLAS NEUTRON RESONANCE PARAMETERS. ACADEMIC PRESS, NY, 2006

60.1. Неодим-140

Радиоактивен ($T_{1/2}=3.37$ д), испытывает захват орбитального электрона с переходом в празеодим-140, который, в свою очередь, тем же путем распадается ($T_{1/2}=3.4$ м) в стабильный церий-140.

Выход при делении пренебрежимо мал.

Полных наборов нейтронных данных не содержится ни в одной современной библиотеке.

Рекомендуется включить в РОСФОНД файл данных из библиотеки EAF-2003, переведя данные о сечениях реакций с образованием изомеров из файла MF=10 в файл MF=3

(сложив, разумеется, сечения по подсекциям). Для реакции $MT=107$ $MF=9$ с вероятностями образования церия-137 в основном и изомерном состоянии.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

60.2. Неодим-142

Стабилен, содержание в естественной смеси $(27.2 \pm 0.5)\%$.

Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $6.3 \cdot 10^{-11}$.

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для неодима-142:

JEFF-3.1 = JEFF-3.0 = JEF-2.2 – принята оценка ENDF/B-V, 1982, с дополнительными уточнениями и модификациями в 1988, 1989 и 1990;

ФОНД-2.2 = JENDL-3.3 – оценка M.Kawai и др., 1990, с небольшими модификациями в 1993;

CENDL-3 – оценка Qi-Chang Liang и Qing-Biao Shen, 1999;

БРОНД-3 – оценка А.В.Игнатьюка и др., 2003;

ENDF/B-VII – полностью новая оценка S.Muhgabghab и др., 2006,.

1. Общие характеристики

1.1. $Z = 60$ -зарядовое число;

1.2. $A = 142$ (атомный вес);

1.3. $AWR = 140.689$ (отношение массы ядра к массе нейтрона).

2 Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.1 Область разрешенных резонансов.

В JEFF-3.1(=JEF-2.2) граница области разрешенных резонансов выбрана равной 11.064 кэВ, параметры резонансов взяты из компиляции [81M] и принят радиус потенциального рассеяния $R_0 = 5.6$ фм.

В оценке JENDL-3.3 граница области разрешенных резонансов выбрана равной 26 кэВ, и принято значение $R_0 = 6.0$ фм. Нейтронные ширины резонансов взяты на основе анализа данных [71T] и радиационные ширины получены из анализа измеренной площади резонансов [77M] с учетом поправок, полученных в измерениях [81A]. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами были приняты значения ширин 78 мэВ для s-резонансов и 46 мэВ для p-резонансов. Параметры отрицательного резонанса определены из условий описания рекомендованного сечения захвата тепловых нейтронов [81M]. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов была принята без изменений в CENDL-3. Эти же параметры были приняты в БРОНД-3, но радиус потенциального рассеяния был взят $R_0 = 5.6$ фм. И параметры отрицательного резонанса приняты согласно [81M].

Для новой оценки ENDF/B-VII были взяты резонансные параметры [06M], которые основаны на тех же экспериментальных данных [71T, 77M, 81A], но верхняя граница разрешенных резонансов взята 22.52 кэВ и радиус потенциального рассеяния 5.6 фм. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами были приняты значения ширин 48.5 мэВ для s-резонансов, 43.5 мэВ для p-резонансов и 46.0 мэВ для d-резонансов. Радиационные ширины резонансов, использованные в оценках, показаны на рис. 1. Для большинства резонансов различия ширин не очень велики, но для некоторых различия достигают фактора 2. Уточнения параметров резонансов в новом атласе нейтронных резонансов [06M] по сравнению с предыдущей компиляцией [81A] обусловлены

уточнениями эффективности нейтронных детекторов, использованных в измерениях сечений. В результате использования уточненных методов статистического анализа резонансов заметно изменились в новой компиляции также извлекаемые усредненные характеристики резонансов: среднее расстояние между резонансами, нейтронные силовые функции и средние радиационные ширины.

Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров во всех оценках рекомендовано приближение MLBW. Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| Оценка | JEFF-3.1 | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Эсп. [81M, 06M] |
|---------|----------|-----------|------------|-----------------|
| полное | 27.15 | 26.40 | 26.63 | 26.2±0.9 |
| упругое | 8.52 | 7.70 | 7.93 | 7.5±0.5 |
| захвата | 18.63 | 18.70 | 18.69 | 18.7±0.7 |

резонансный интеграл захвата

выше 0.5 эВ: 6.15 8.68 6.18 34±11 exp., 8.8±0.5 cal.

Исключая JEFF-3.1, остальные оценки согласуются в пределах погрешности с имеющимися экспериментальными данными о нейтронных сечениях, но расходятся с экспериментальным значением резонансного интеграла. С другой стороны, резонансный интеграл, вычисленный на основе экспериментальных данных о параметрах нейтронных резонансов также расходится с измеренными значениями. Устранение этого расхождения требует дополнительного анализа обоих типов экспериментальных данных.

На рис. 2 и 3 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для полных нейтронных сечений некоторые разногласия в нейтронных ширинах резонансов не выходят за пределы погрешностей экспериментальных данных. В то же время, в экспериментальных данных проявляется ряд резонансов, которые были отнесены примесям посторонних изотопов, присутствующих в мишени. Вопрос о влиянии аналогичных примесей на измерения резонансного интеграла захвата остается открытым.

Для сечений захвата нейтронов имеются только экспериментальные данные, усредненные по большому числу резонансов. Разногласия оценок в этом случае проявляются, главным образом, в межрезонансных минимумах, и они обусловлены, в основном, заметными различиями радиационных ширин отрицательного резонанса в оценках. Значение ширины 3.9295 эВ, принятое в JENDL-3.3 и CENDL-3 представляется неоправданно большим, и именно эта ширина определяет слишком высокие сечения захвата JENDL-3.3 и CENDL-3 в межрезонансных минимумах в диапазоне энергий нейтронов до ~10 кэВ.

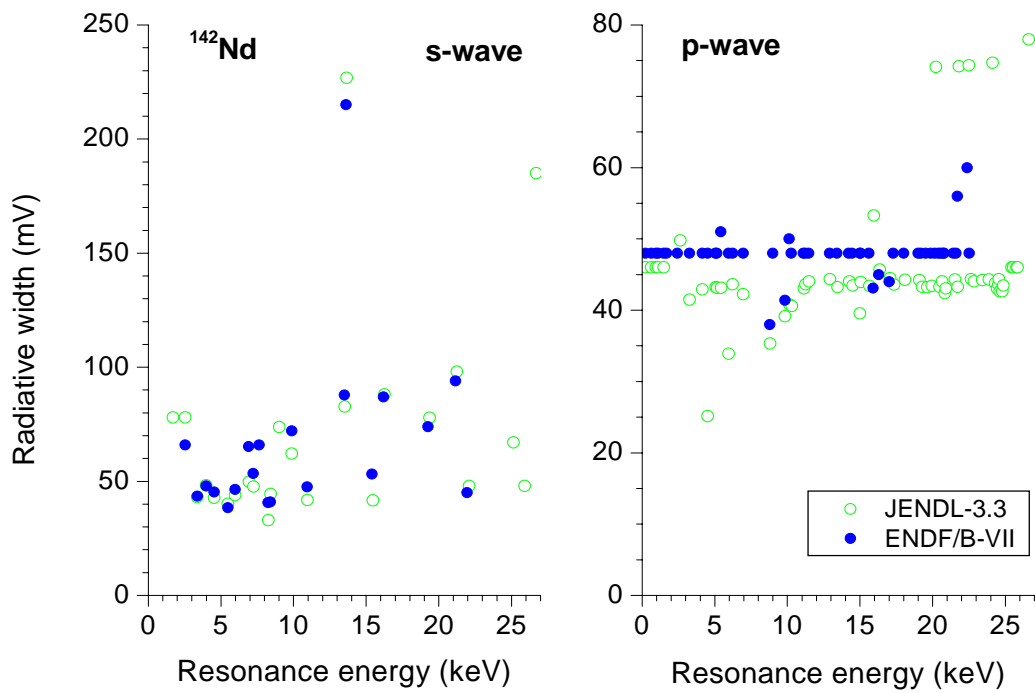


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках

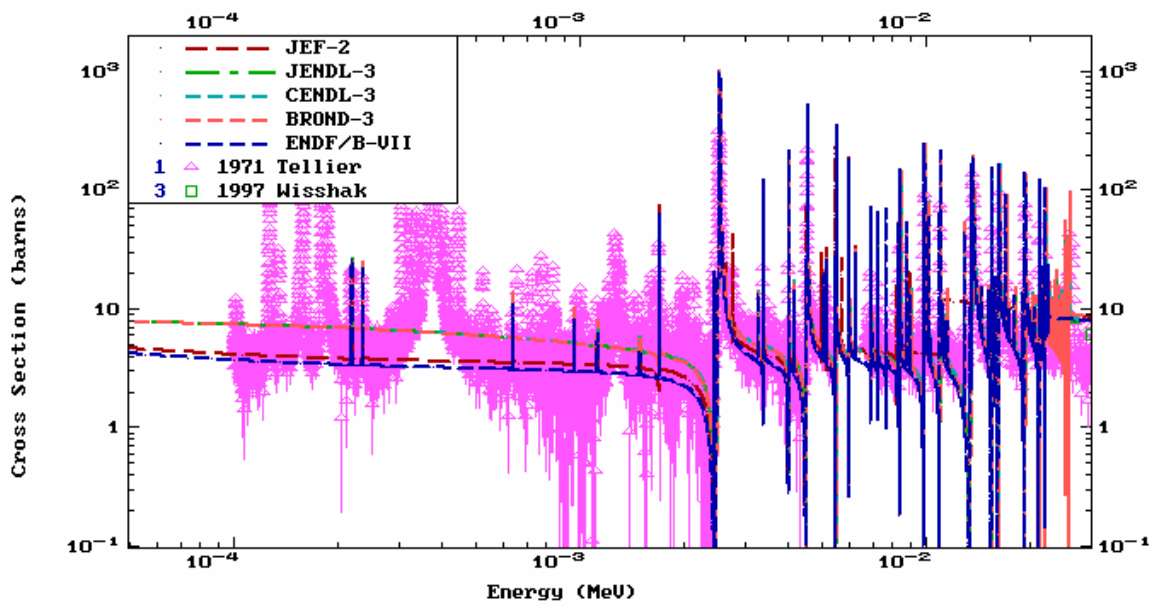


Рис. 2. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

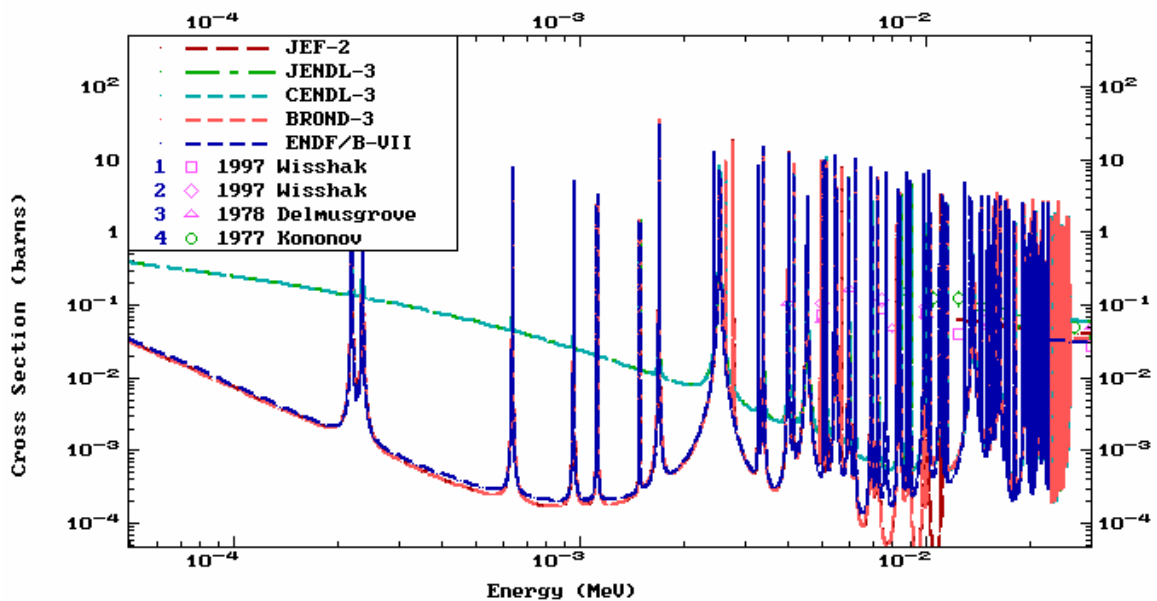


Рис. 3. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

2.2. Область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 нет области неразрешенных резонансов, но в остальных оценках такая область включена, и ее верхняя граница принята равной 100 кэВ в JENDL-3.3, CENDL-3 и БРОНД-3 и 200 кэВ в ENDF/B-VII.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 были рассчитаны на основе оптической модели. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов при энергии 10 кэВ. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 1.500E-4$, $S_1 = 0.400E-4$, $S_2 = 1.700E-4$, $Gg(s) = 0.064$ эВ и $Gg(p) = 0.044$ эВ, $D_0 = 531.7$ эВ, $R = 5.805$ ферми.

Оценка JENDL-3.3 для неразрешенных резонансов была принята без изменений в CENDL-3.

В БРОНД-3 были приняты значения нейтронных силовых функций и радиационных ширин, рекомендованные в компиляции [81M] и совпадающие с JENDL-3.3, но проведено независимое фитирование D_0 , чтобы достичь лучшего описания сечений радиационного захвата нейтронов в области энергий от 26 до 100 кэВ [97W].

В ENDF/B-VII радиационные ширины и нейтронные силовые функции были выбраны на основе статистического анализа параметров разрешенных резонансов, но средние расстояния между резонансами было также определено из условий оптимального описания наблюдаемых сечений радиационного захвата нейтронов [97W]. Использованы следующие значения параметров при энергии нейтронов 70 кэВ :

$S_0 = 1.70E-4$, $S_1 = 0.58E-4$, $S_2 = 1.45E-4$, $Gg(s) = 0.0485$ эВ и $Gg(p) = 0.0435$ эВ, $D_0 = 1058$ эВ, $R = 5.60$ ферми.

Следует отметить, что приведенные выше значения ширин и силовых функций, взятые из файла ENDF/B-VII, заметно отличаются от значений, приведенных в компиляции [06M]

Различия в выборе радиационных ширин и значений D_0 в значительной степени компенсируются при подгонке расчетных сечений к одним и тем же экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов. Однако, в различных оценках предпочтение отдавалось разным данным, и это непосредственно отражается как в расхождении выбранных параметров, так и в расхождении полученных сечений.

На рис. 4 и 5 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов вне области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными. Флуктуации экспериментальных данных [97W] столь значительны, что трудно отдать предпочтение какой-либо из оценок. С другой стороны, разногласия оценок полных сечений не очень велики в области неразрешенных резонансов.

Для сечений радиационного захвата нейтронов оценка JENDL-3.3 опиралась, в основном, на экспериментальные данные [77K]. Однако в более поздних прецизионных измерениях [97W] были получены более низкие сечения, на которые ориентировались оценки ENDF/B-VII и БРОНД-3 (рис. 5). Весьма малые погрешности данных [97W] позволяют считать оценки ENDF/B-VII и БРОНД-3 предпочтительными.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в области разрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. Однако, радиационная ширина отрицательного резонанса в оценках JENDL-3.3 и CENDL-3 представляется сильно завышенной, что приводит к существенно завышенным межрезонансным сечениям захвата в этих оценках. В области неразрешенных резонансов предпочтение следует отдать оценкам ENDF/B-VII и БРОНД-3, которые опираются на более поздние и более надежные измерения сечений радиационного захвата нейтронов.

71T Н. Tellier, Report CEA-N-1459 (1971).

77K В.Н. Кононов и др., ВАНТ, СЕР. ЯДЕРНЫЕ КОНСТАНТЫ, т. 22 (1977) с. 29.

77M A.R. Musgrove et al., Report AEEC/E-401 (1977).

82A B.J. Allen et al., Nucl. Sci. Eng. 82, 230 (1982)

81M S. Mughabghab et al., Neutron Cross Sections, Academic Press, NY, 1984, part B.

97W K. Wisshak et al., Phys. Rev., C57 (1998) 391.

06M S. Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY, 2006.

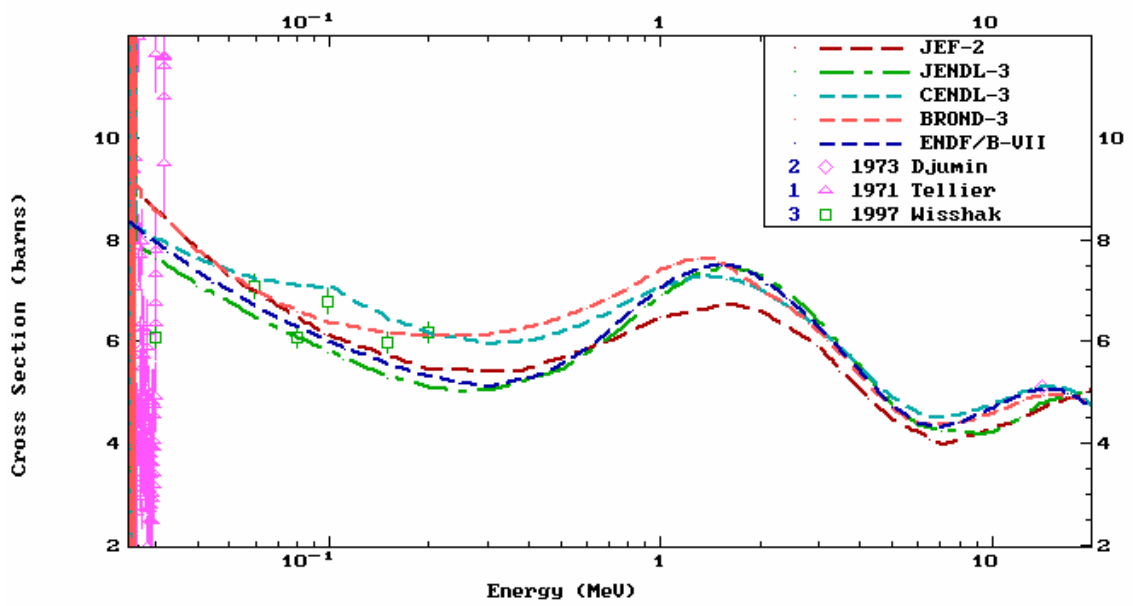


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения вне области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

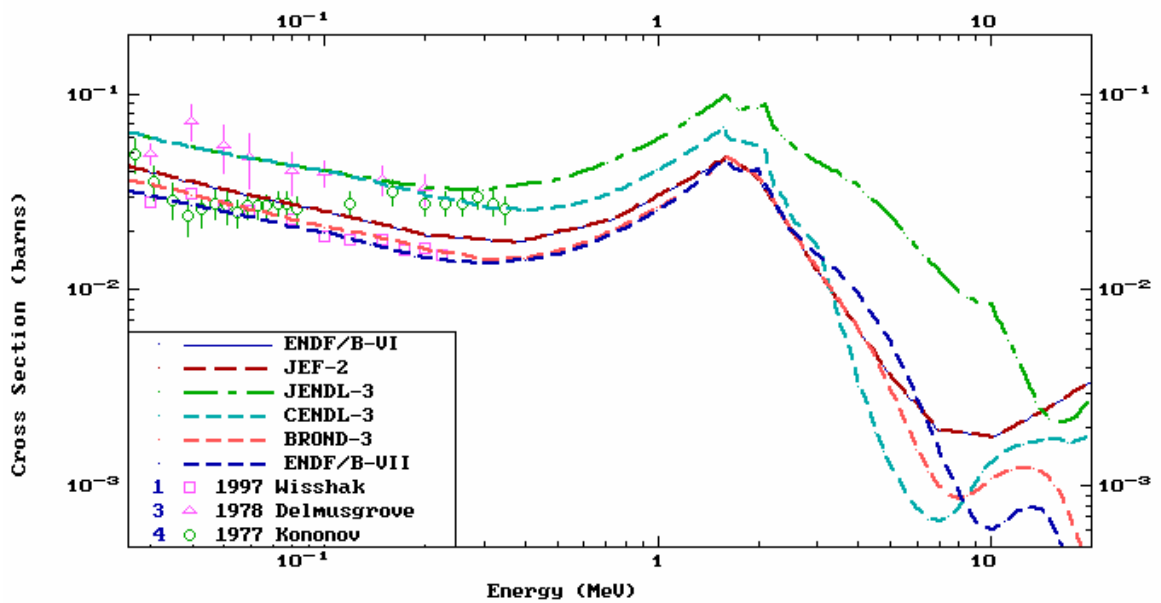


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов вне области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области

3.1. Полные сечения (MT=1)

Экспериментальные данные о полных нейтронных сечениях вне резонансной области для ^{142}Nd весьма малочисленные. Они приведены на рис. 4 в сравнении с имеющимися

оценками для энергий нейтронов выше 30 кэВ. Все оценки основаны на расчетах по оптической модели, но параметры использованного оптического потенциала отличаются в различных оценках весьма существенно. Эти различия проявляются наиболее сильно при энергиях нейтронов ниже 1 МэВ, и они отражаются также соответствующим образом в оценках околопороговых участков сечений неупругого рассеяния нейтронов. На основе экспериментальных данных трудно отдать предпочтение какой-либо из оценок, но, учитывая общие тенденции систематики полных сечений для близлежащих ядер, результаты оценок CENDL-3, БРОНД-3 и ENDF/B-VII кажутся более надежными.

3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов (МТ=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. Прямых экспериментальных данных по интегральным сечениям упругого рассеяния нейтронов для изотопа ^{142}Nd нет. В этих условиях можно ожидать, что более корректной для сечений упругого рассеяния будут оценка, в которой достигнуто лучшее описание данных по угловым распределениям упруго рассеянных нейтронов.

Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, обычно, опираются на расчеты по оптической модели, и разногласия в форме дифференциальных сечений рассеяния оказываются подобными расхождениям в полных нейтронных сечениях. Без соответствующих экспериментальных данных предпочтительными являются оценки, в которых достигнуто лучшее описание полных сечений.

3.3 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

В JEFF-3.1 рассматривался спектр 8 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в JENDL-3.3 учитывалось 11 уровней, в CENDL-3 – 15 уровней, в БРОНД-3 - 12 уровней и в ENDF/B-VII – 14 уровней. Так как при увеличении числа уровней соответствующим образом изменяется порог статистического описания уровней, так называемый континуум уровней, то различия в числе рассматриваемых уровней не должно заметно отражаться на оценках полного (интегрального) сечения неупругого рассеяния.

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 6. Каких-либо экспериментальных данных для этого сечения нет. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели, а также различием моделей расчета вкладов прямых и предравновесных процессов, существенных для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Оценку JEFF-3.1, насомненно, следует признать слишком примитивной: сильно заниженной в области энергий до 10 МэВ и столь же сильно завышенной выше 10 МэВ. JENDL-3.3 также следует признать заниженной во всем диапазоне энергий нейтронов выше 3 МэВ, что связано с использованием сферической оптической модели и недооценкой вклада предравновесных процессов. Остальные оценки дают весьма близкие значения сечений, но выше 13 МэВ оценка CENDL-3.3 все же представляется завышенной. Оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII представляются наиболее надежными.

Асимметрия угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов, обусловленная прямыми и предравновесными процессами, учтена во всех оценках, кроме JEFF-3.1, для рассеяния на мультиплетах низколежащих коллективных уровнях, а также для нейтронного рассеяния в континууме. Надежных экспериментальных данных по угловым распределениям неупруго рассеянных нейтронов для ^{142}Nd нет, и справедливость оценок соответствующих угловых распределений подтверждается, главным образом, их

подобием с аналогичными оценками для четно-четных изотопов неодима, где такие данные имеются.

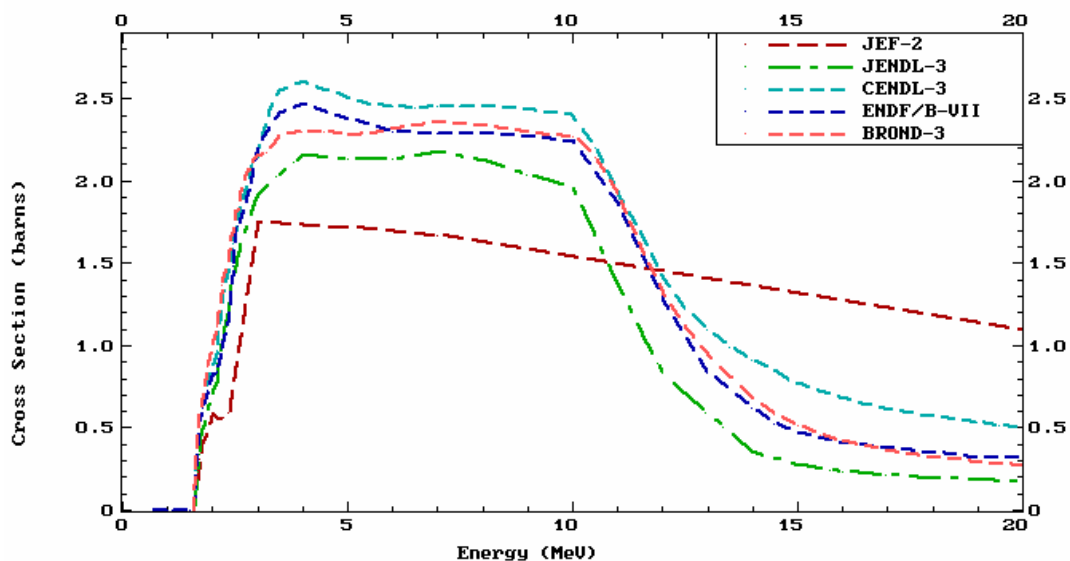


Рис. 6. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для ^{142}Nd

3.4 Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

Оценки сечений радиационного захвата нейтронов вне области разрешенных резонансов уже были представлены на рис. 5. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия обусловлены выбором экспериментальных данных, которым отдано предпочтение при подборе модельных параметров. Как уже отмечалось выше, ENDF/B-VII и БРОНД-3 ориентировались на более поздних прецизионных измерениях сечений захвата [97W], и это позволяет считать соответствующие оценки предпочтительными.

Для энергии нейтронов ~ 14 МэВ все оценки дают сечение захвата близкое к 1 мб, что хорошо согласуется с систематикой, основанной на модели прямого-коллективного захвата нейтронов [86Б]. Такая модель предсказывает энергетическую зависимость сечений захвата нейтронов с энергиями выше 10 МэВ, подобную оценкам ENDF/B-VI, и БРОНД-3, но существенно противоречащую оценкам JEFF-3.1, JENDL-3.3 и CENDL-3.

Необходимо, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 2-3 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не являются сколь-либо существенными для анализа характеристик ядерных реакторов.

3.5. Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT= 17)

Оценки сечений реакций (n,2n) показаны на рис. 7. Имеется сравнительно много экспериментальных данных для этого сечения, и все оценки согласуются с основной массой данных. Оценки CENDL-3 и ENDF/B-VII, по-видимому, лучше всего описывают набор данных выше 14 МэВ, и их можно признать предпочтительными.

Экспериментальных данных о сечении реакций (n,3n) нет. Сечение этой реакции существенно только выше 18 МэВ, и оно весьма мало. При энергии 20 МэВ сечение не превышает значений 30 – 40 мбарна. Для согласованности, для сечения реакции (n,3n) следует принимать ту же оценку, что выбрана предпочтительной для (n,2n).

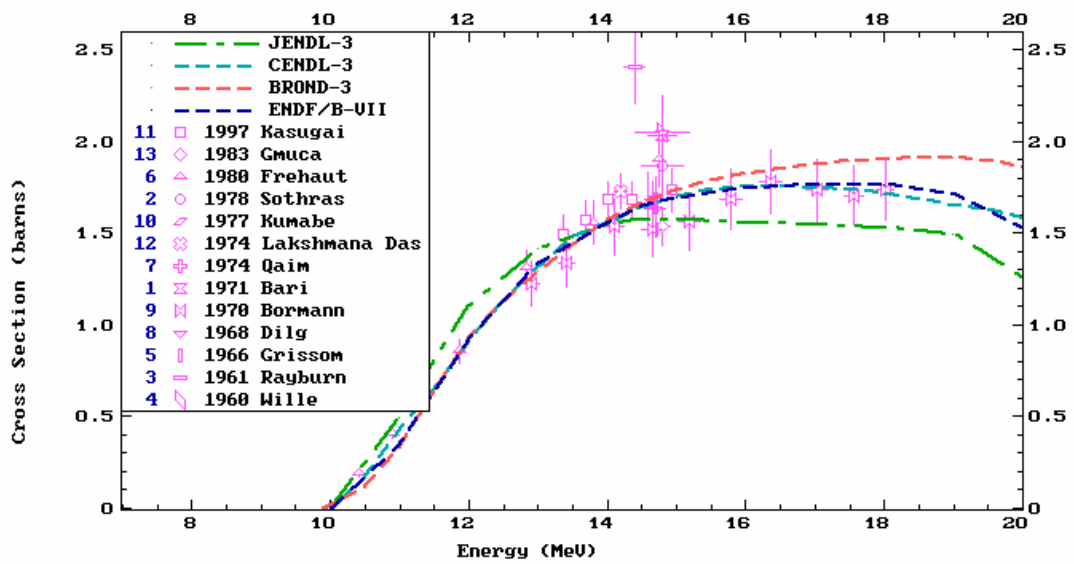


Рис.7. Оценки сечений реакции (n,2n) в сравнении с экспериментальными данными

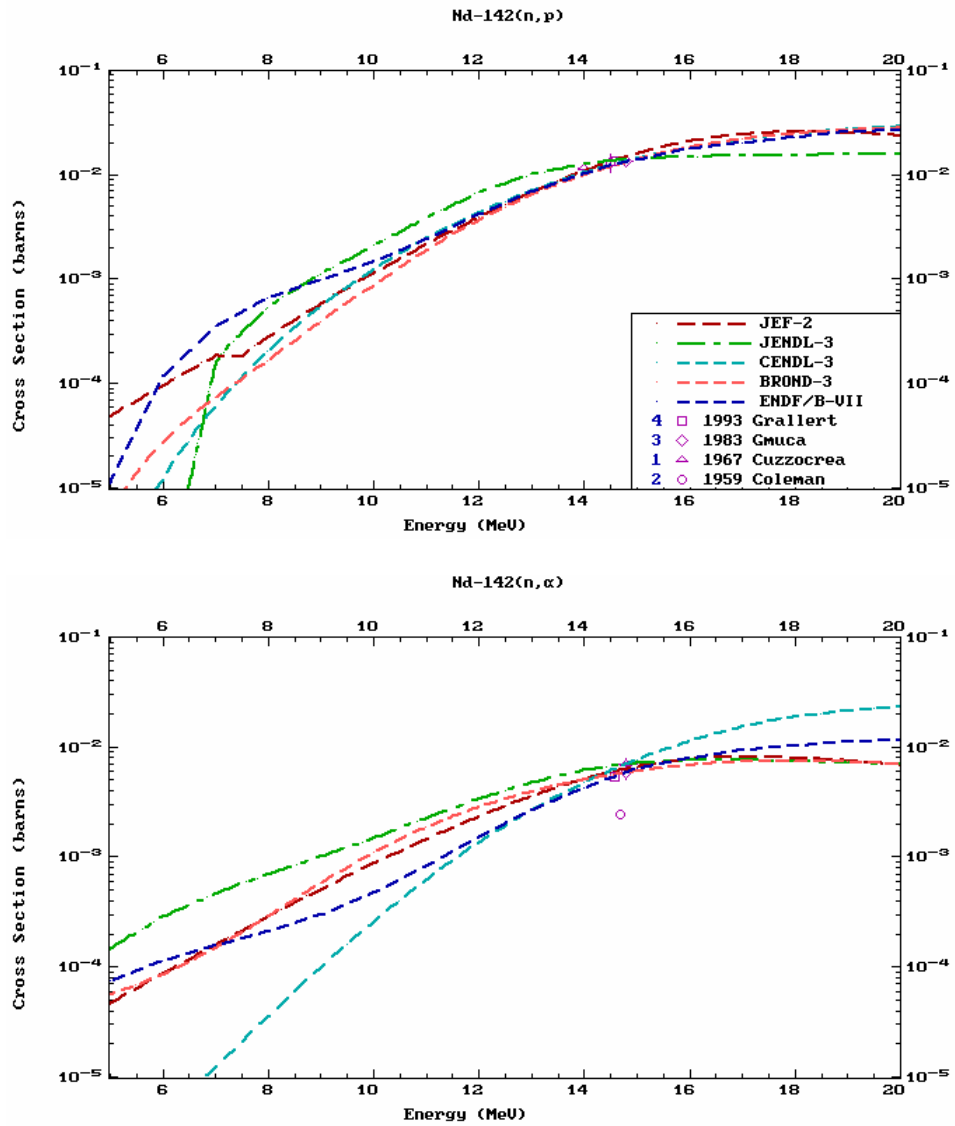


Рис. 8. Оценки сечений реакции $^{142}\text{Nd}(n,p)$ и $^{142}\text{Nd}(n,\alpha)$

3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц

Реакции с вылетом заряженных частиц включены во все рассматриваемые оценки. Эти реакции существенны только в области энергий нейтронов выше ~ 15 МэВ, и максимальное сечение таких реакций не превышает 30 мбарн. На рис. 8 показаны оценки сечений реакций (n,p) и (n,α) , соответствующие наиболее высоким выходам заряженных частиц. Разногласия между оценками этих реакций сравнительно невелики, так как все оценки неявным образом привязаны к имеющимся экспериментальным данным для энергии нейтронов ~ 14 МэВ. Для более низких и более высоких энергий расхождения оценок становятся весьма заметными. Без дополнительной информации вряд ли оправдано предпочтение какой-либо из оценок.

97W K. Wisshak et al., Phys. Rev., C57 (1998) 391.

86Б Т.С.Беланова и др., Радиационный захват нейтронов – Справочник, Энергоатомиздат, Москва, 1986.

4. Образование гамма-лучей

Сечения образования гамма-лучей, как правило, не содержатся в файлах для продуктов деления ядер. Однако, в ENDF/B-VII такие сечения включены вместе с сопутствующими оценками спектров гамма-лучей. Эти оценки выполнены на основе расчетов в оптико-статистической модели. Какой-либо тестировки оценок еще не проводилось, поэтому пока трудно сделать какой-либо вывод об их надежности.

5. Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, в области разрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. С другой стороны, оценки JEFF-3.1 и JENDL-3.3, по-видимому, нельзя признать удовлетворительными вне резонансной области ни для сечений неупругого рассеяния, ни для сечений радиационного захвата нейтронов. Оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений. Это свидетельствует об их достаточно высокой надежности и согласованности. Для библиотеки РОСФОНД в настоящее время целесообразно принять оценку ENDF/B-VII.

Следует однако заметить, что для оценки ENDF/B-VII еще не завершена всесторонняя тестировка и некоторые уточнения данных могут быть в нее внесены в ближайшие месяцы.

Проведенный сравнительный анализ оценок и экспериментальных данных для библиотеки РОСФОНД выполнен А.В.Игнатьюком.

60.3. Неодим-143

Стабилен, содержание в естественной смеси $(12.2 \pm 0.2)\%$

Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $5.95 \cdot 10^{-2}$.

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для неодима-143:

JEFF-3.1 = JEFF-3.0 = JEF-2.2 – оценка H.Gruppelaar и др., 1982, с дополнительными уточнениями и модификациями в 1988, 1989 и 1990;

ФОНД-2.2 = JENDL-3.3 – оценка M.Kawai и др., 1990, с небольшими модификациями в 1993;

CENDL-3 – оценка Qi-Chang Liang и Qing-Biao Shen, 1999;

БРОНД-3 – оценка А.В.Игнатюка и др., 2003;

ENDF/B-VII – принята оценка ENDF/B-VI.8, выполненная S.Muhgabghab в 2000, для резонансной области, и в значительной мере новая оценка M.Herman и др., 2006, вне резонансной области.

2. Общие характеристики

1.1. $Z = 60$ -зарядовое число;

1.2. $A = 143$ (атомный вес);

1.3. $AWR = 141.682$ (отношение массы ядра к массе нейтрона).

3 Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.2 Область разрешенных резонансов.

В JEFF-3.1(=JEF-2.2) граница области разрешенных резонансов выбрана равной 5.521 кэВ, параметры резонансов взяты из компиляции [81M] и принят радиус потенциального рассеяния $R_0 = 5.6$ фм.

В оценке JENDL-3.3 граница области разрешенных резонансов выбрана равной 5 кэВ, и принято то же значение $R_0 = 5.6$ фм. Нейтронные ширины резонансов взяты на основе анализа данных [71T, 71R] и радиационные ширины получены из анализа измеренной площади резонансов [71R, 77M] с учетом поправок, полученных в измерениях [81A]. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами были приняты значения ширин 77 мэВ для s-резонансов и 85 мэВ для p-резонансов. Параметры отрицательного резонанса определены из условий описания рекомендованного сечения захвата тепловых нейтронов [81M].

Для модифицированной оценки ENDF/B-VI.8 были приняты резонансные параметры [81M], которые основаны на тех же экспериментальных данных [71T, 77M, 81A], но верхняя граница разрешенных резонансов взята 5.5 кэВ при том же значении радиус потенциального рассеяния 5.6 фм. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами были приняты значения ширин 80 мэВ для s-резонансов и 50 мэВ для p-резонансов. Оценка ENDF/B-VI.8 для разрешенных резонансов включена без изменений в БРОНД-3, CENDL-3 и в новую версию ENDF/B-VII.

Радиационные ширины резонансов, использованные в оценках, показаны на рис. 1. Ширины большинства резонансов отличаются весьма заметно в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI, особенно для p-резонансов.

Параметры резонансов, представленные в компиляции [81M], были сохранены с незначительными изменениями и в новом издании атласа нейтронных резонансов [06M]. Однако, в результате использования уточненных методов статистического анализа резонансов заметно изменились в новом издании извлекаемые усредненные характеристики резонансов: среднее расстояние между резонансами, нейтронные силовые функции и средние радиационные ширины.

Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров во всех последних оценках рекомендовано приближение MLBW. Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| | | | |
|--|-----------|------------|------------------|
| Оценка | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Эксп. [81M, 06M] |
| полное | 408.2 | 405.2 | |
| упругое | 78.3 | 80.1 | 79.3±2.0 |
| захвата | 329.9 | 325.1 | 325±10 |
| (n,α) | .0174 | .0174 | .0174±.0016 |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | 130 | 130 | 129±30 cal. |

В пределах погрешности оценки хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

На рис. 2 и 3 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для полных нейтронных сечений некоторые разногласия в нейтронных ширинах резонансов не выходят за пределы погрешностей экспериментальных данных. Для сечений захвата нейтронов имеются только экспериментальные данные, усредненные по большому числу резонансов. Разногласия оценок в этом случае проявляются, главным образом, в межрезонансных минимумах, и они обусловлены заметными различиями средних радиационных ширин, принятых в оценках.

В всех оценках содержится область неразрешенных резонансов, верхняя граница которой принята равной 10 кэВ в JEFF-3.1 и 100 кэВ в JENDL-3.3, JENDL-3.3, БРОНД-3 и 225 кэВ в ENDF/B-VII.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S0, S1 и S2 были рассчитаны на основе оптической модели. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов при энергии 10 кэВ. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 2.624E-4$, $S_1 = 1.042E-4$, $S_2 = 1.783E-4$, $G_g = 0.079$ эВ, $D_0 = 36.9$ эВ, $R = 4.143$ ферми.

В ENDF/B-VII (=ENDF/B-VI.8) радиационные ширины и нейтронные силовые функции были выбраны на основе статистического анализа параметров разрешенных резонансов, но средние расстояния между резонансами было также определено из условий оптимального описания наблюдаемых сечений радиационного захвата нейтронов [00M].

Использованы следующие значения параметров при энергии нейтронов 70 кэВ [00M]:

$S_0 = 3.62E-4$, $S_1 = 0.80E-4$, $S_2 = 1.50E-4$, $G_g = 0.0799$ эВ, $D_0 = 32.8$ эВ, $R = 5.60$ ферми.

В БРОНД-3 были приняты эти же значения нейтронных силовых функций и радиационных ширин, но проведено независимое фитирование D_0 , чтобы достичь лучшего описания сечений радиационного захвата нейтронов в области энергий от 30 до 100 кэВ. В оценке CENDL-3 были приняты параметры предыдущей версии ENDF/B-VI.8.2, которые отличались от приведенных выше несколько меньшими значениями параметров: $S_0 = 3.50E-4$, $D_0 = 29.8$ эВ и $R = 5.54$ ферми.

Различия в выборе радиационных ширин и значений D_0 в значительной степени компенсируются при подгонке расчетных сечений к одним и тем же экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов. Однако, в различных оценках предпочтение отдавалось разным данным, и это непосредственно отражается как в расхождении выбранных параметров, так и в расхождении полученных сечений.

На рис. 4 и 5 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными. Резонансные флуктуации полных сечений сохраняется в экспериментальных данных во в области энергий до ~30 кэВ [71T], но во всех оценках в

этой области представлены только сечения, усредненные по резонансам. Если ориентироваться на экспериментальные данные [97W], полученные в для усредненных сечений, то оценки CENDL-3, ENDF/B-VII и БРОНД-3 для полных сечений выглядят предпочтительными по сравнению с JEFF-3.1 и JENDL-3.3.

Для сечений радиационного захвата нейтронов оценка JENDL-3.3 опиралась, в основном, на экспериментальные данные [78N]. Однако в более поздних прецизионных измерениях [97W] были получены более низкие сечения, на которые ориентировались оценки ENDF/B-VII и БРОНД-3 (рис. 5). Весьма малые погрешности данных [97W] позволяют считать оценки ENDF/B-VII и БРОНД-3 предпочтительными.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, в области разрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. В области неразрешенных резонансов предпочтение следует отдать оценкам ENDF/B-VII и БРОНД-3, которые опираются на более поздние и более надежные измерения нейтронных сечений.

71T H.Tellier, Report CEA-N-1459 (1971).

71R G.Rohr et al., Nuclear Data for Science and Technology (Knoxville, 1971), v. 2, p. 743.

77M A.R.Musgrove et al., Report AEEC/E-401 (1977).

78N Y.Nakajima et al., Proc. Conf. on Neutron Physics and Nucl. Data for Reactors, Harwell 1978, p. 438.

82A B.J. Allen et al., Nucl.Sci.Eng. 82, 230 (1982)

84M S.Mughabghab, Neutron Cross Sections, Academic Press, NY,1984, part B.

97W K.Wisshak et al., Phys. Rev., C57 (1998) 391.

00M S.Mughabghab et al., Report ENDF-362 (2000).

06M S.Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY,2006.

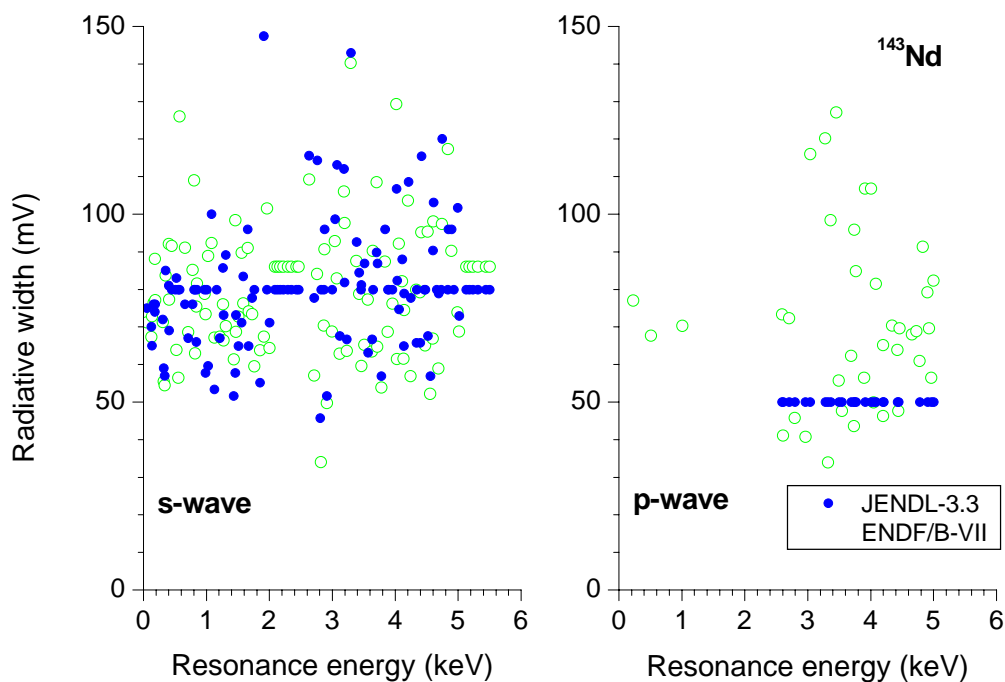


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках

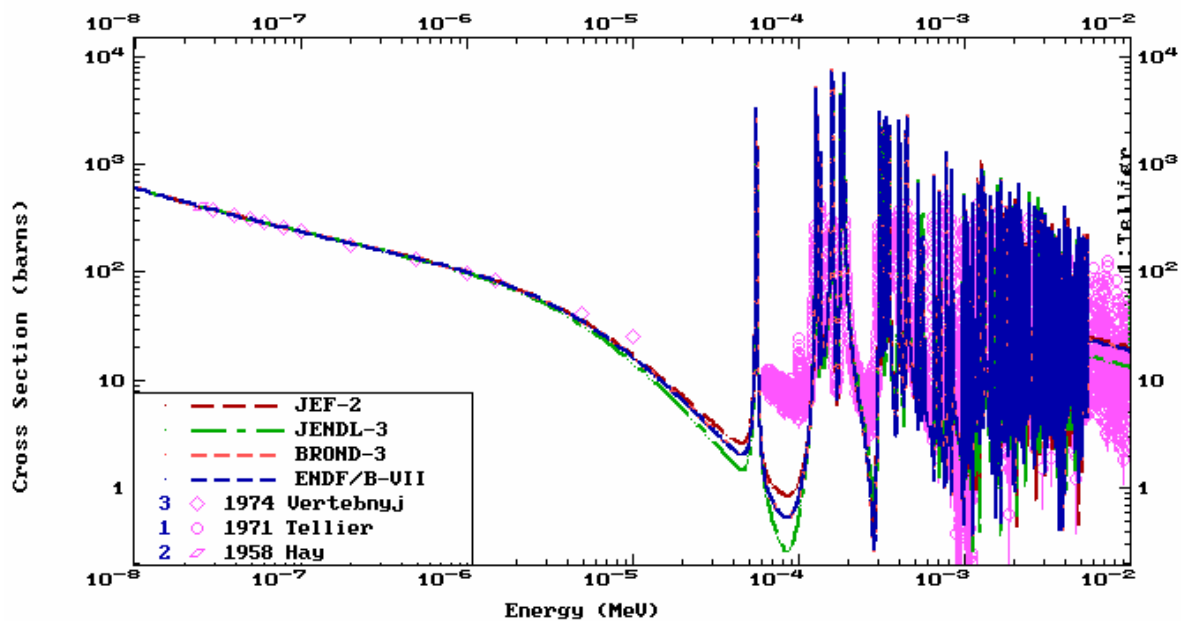


Рис. 2. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

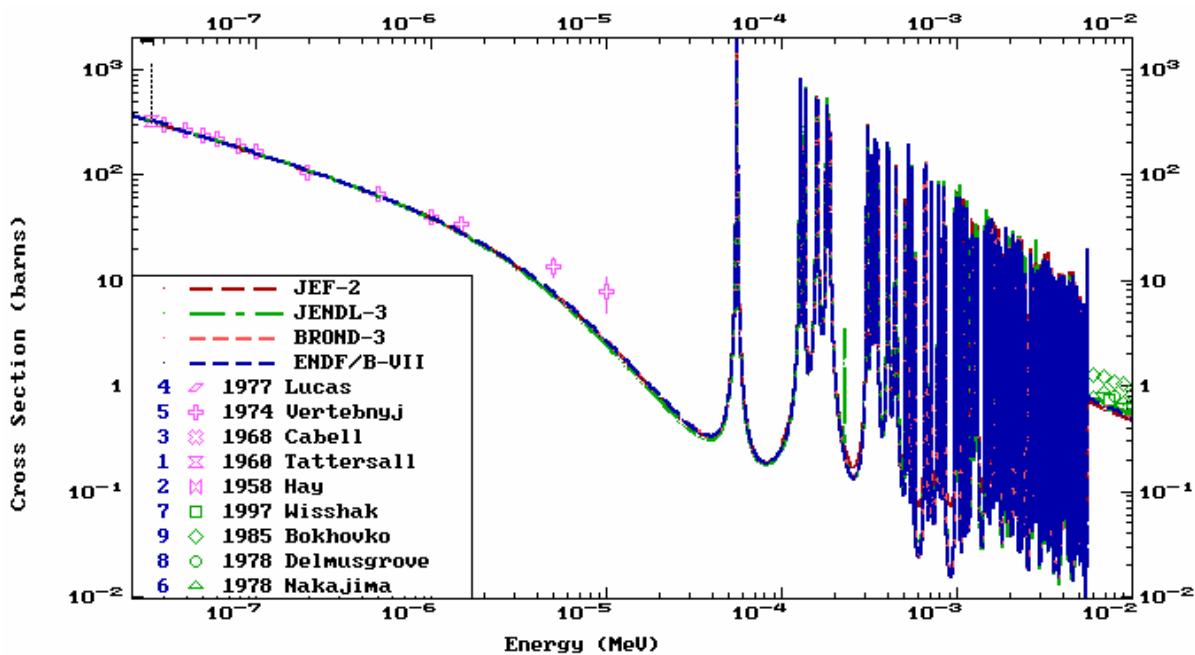


Рис. 3. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

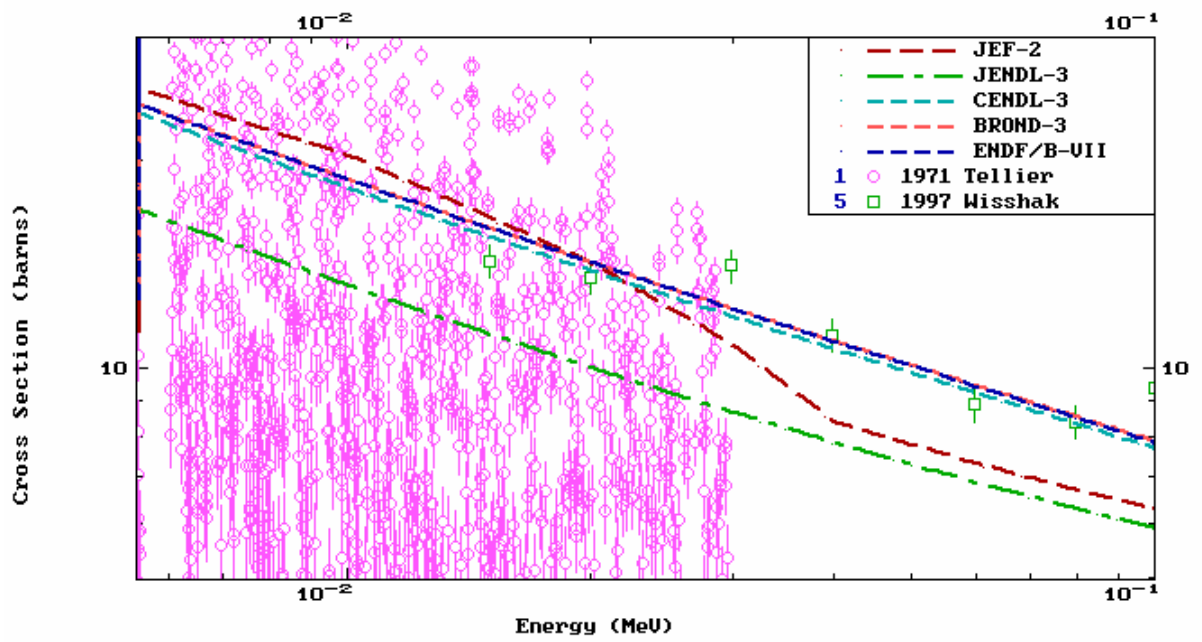


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

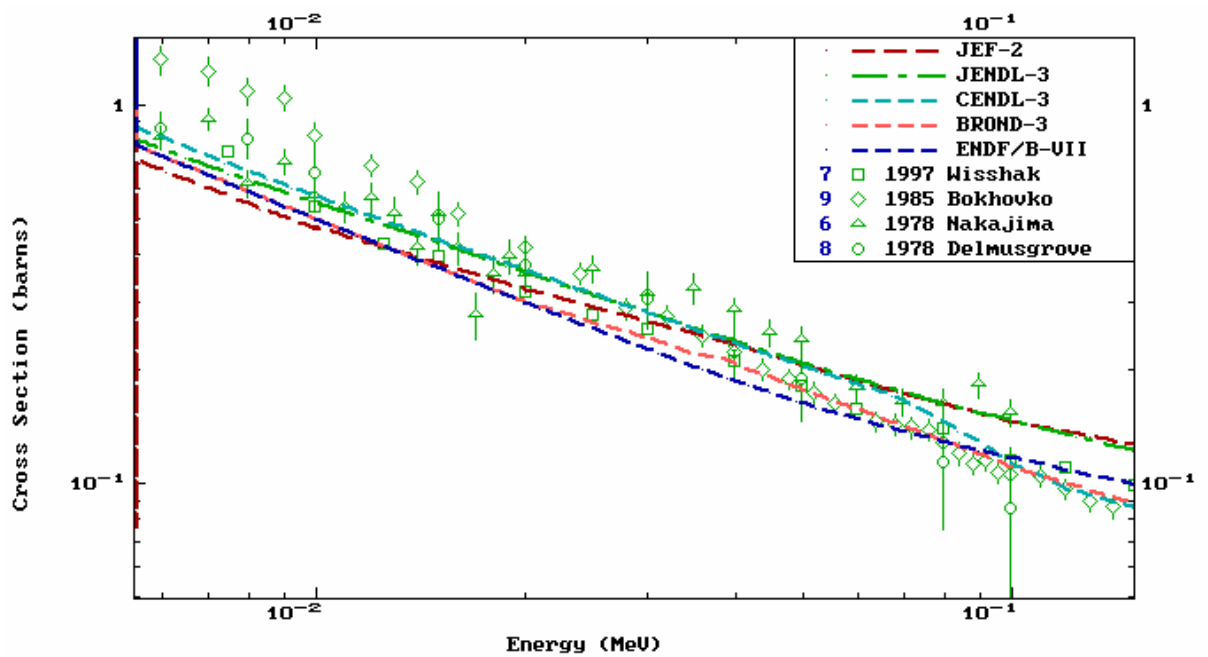


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

4. Нейтронные сечения вне резонансной области

3.1. Полные сечения (MT=1)

На рис. 6 показаны имеющиеся оценки полных нейтронных сечений в области энергий выше 50 кэВ в сравнении с экспериментальными данными. Все оценки основаны на расчетах по оптической модели, но параметры использованного оптического потенциала отличаются в различных оценках весьма существенно. Эти различия проявляются наиболее сильно при энергиях нейтронов ниже 1 МэВ, и они отражаются также соответствующим образом в оценках околопороговых участков сечений неупругого рассеяния нейтронов.

Экспериментальные данные о полных нейтронных сечениях вне резонансной области для ^{143}Nd весьма малочисленные. На основе этих данных оценки CENDL-3, ENDF/B-VII и БРОНД-3, несомненно, выглядят предпочтительными перед более ранними оценками JEFF-3.1 и JENDL-3.3.

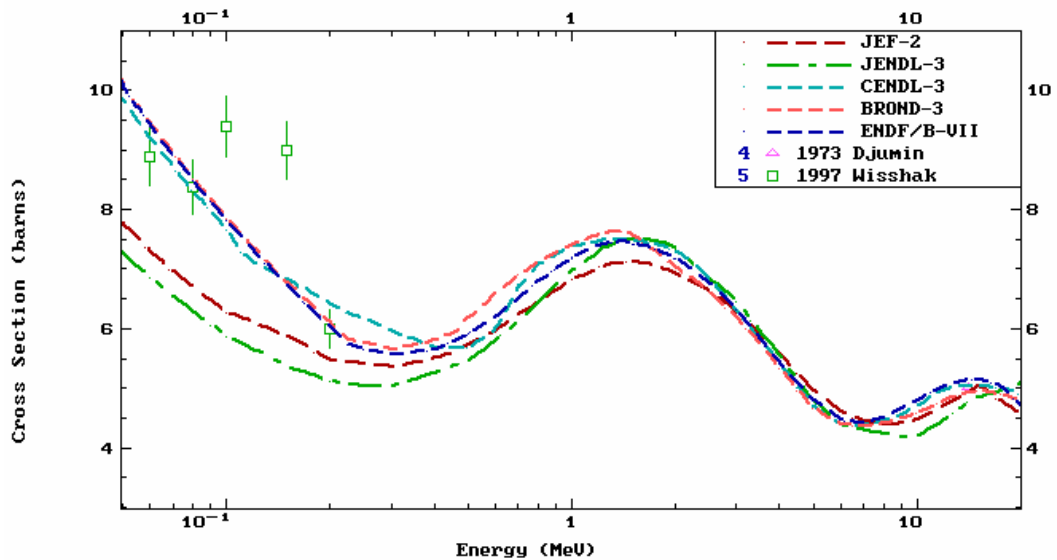


Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений ^{143}Nd в диапазоне энергий от 0.005 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. Прямых экспериментальных данных по интегральным сечениям упругого рассеяния нейтронов для изотопа ^{143}Nd нет. В этих условиях можно ожидать, что более корректной для сечений упругого рассеяния будет оценка, в которой достигнуто лучшее описание данных по угловым распределениям упруго рассеянных нейтронов.

Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, обычно, опираются на расчеты по оптической модели, и разногласия в форме дифференциальных сечений рассеяния оказываются подобными расхождениям в полных нейтронных сечениях. Без соответствующих экспериментальных данных предпочтительными являются оценки, в которых достигнуто лучшее описание полных сечений.

3.3 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

В JEFF-3.1 рассматривался спектр 26 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в JENDL-3.3 учитывалось 11 уровней, в CENDL-3 и БРОНД-3 – 14 уровней и в ENDF/B-VII – 16 уровней. Так как при увеличении числа уровней соответствующим образом изменяется порог статистического описания уровней, так называемый континуум уровней, то различия в числе рассматриваемых уровней не должно заметно отражаться на оценках полного (интегрального) сечения неупругого рассеяния.

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 7. Каких-либо экспериментальных данных для этого сечения нет. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели, а также различием моделей расчета вкладов прямых и предравновесных процессов, существенных для энергий нейтронов выше 7 МэВ. В области максимума оценку JENDL-3.3, по-видимому, следует признать заниженной, тогда как остальные оценки дают весьма близкие значения сечений. Выше 7 МэВ оценки JEFF-3.1 и JENDL-3.3, несомненно, слишком низкие, что связано с использованием сферической оптической модели и недооценкой вклада предравновесных процессов. Оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII представляются наиболее надежными.

Асимметрия угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов, обусловленная прямыми и предравновесными процессами, учтена во всех оценках, кроме JEFF-3.1, для рассеяния на мультиплетах низколежащих коллективных уровнях, а также для нейтронного рассеяния в континууме. Надежных экспериментальных данных по угловым распределениям неупруго рассеянных нейтронов для ^{143}Nd нет, и справедливость оценок соответствующих угловых распределений подтверждается, главным образом, их подобием с аналогичными оценками для четно-четных изотопов неодима, где такие данные имеются.

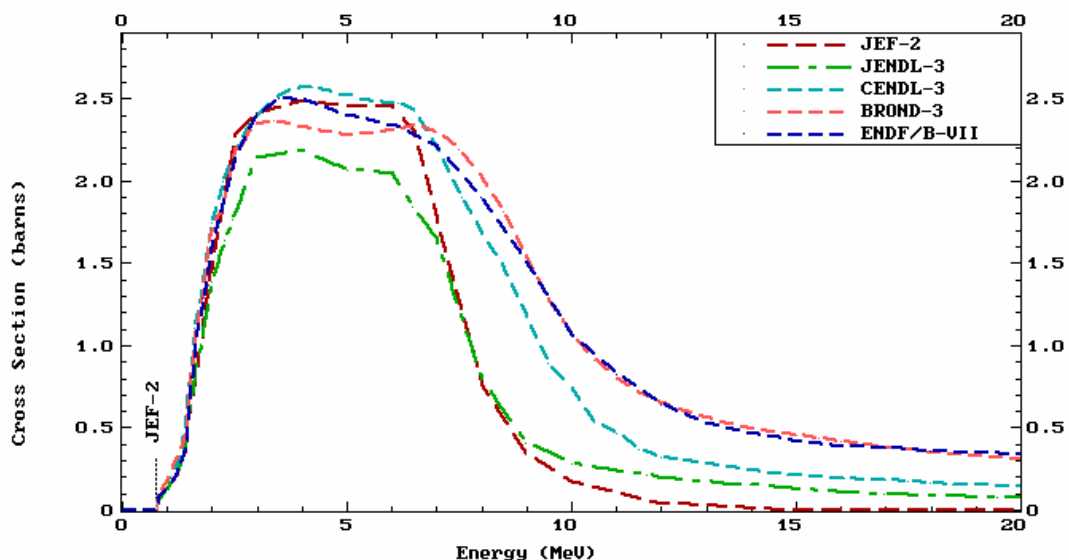


Рис. 7. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для ^{143}Nd

3.4 Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

На рис. 8 показаны оценки сечений радиационного захвата нейтронов выше 50 кэВ. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их

разногласия обусловлены выбором экспериментальных данных, которым отдано предпочтение при подборе модельных параметров. Как уже отмечалось выше, ENDF/B-VII и БРОНД-3 ориентировались на более поздних прецизионные измерения сечений захвата [97W], и это позволяет считать соответствующие оценки предпочтительными. Для энергии нейтронов ~ 14 МэВ все оценки дают сечение захвата близкое к 1 мб, что хорошо согласуется с систематикой, основанной на модели прямого-коллективного захвата нейтронов [86Б]. Такая модель предсказывает энергетическую зависимость сечений захвата нейтронов с энергиями выше 10 МэВ, подобную оценкам ENDF/B-VI, JEFF-3.1 и БРОНД-3, но существенно противоречащую оценке JENDL-3.3 и CENDL-3.

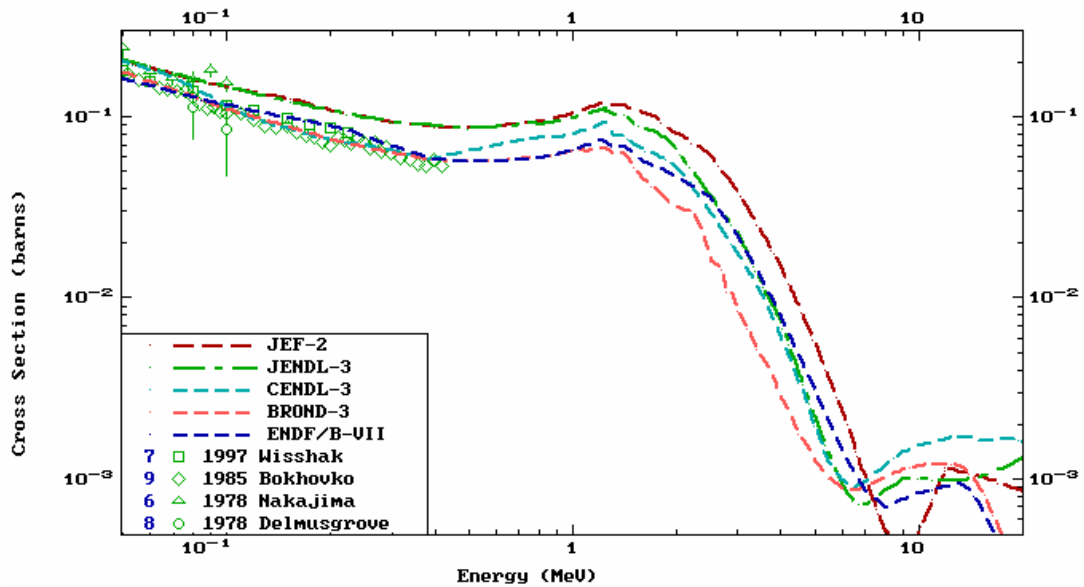


Рис. 8. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов для ^{143}Nd вне резонансной области в сравнении с экспериментальными данными

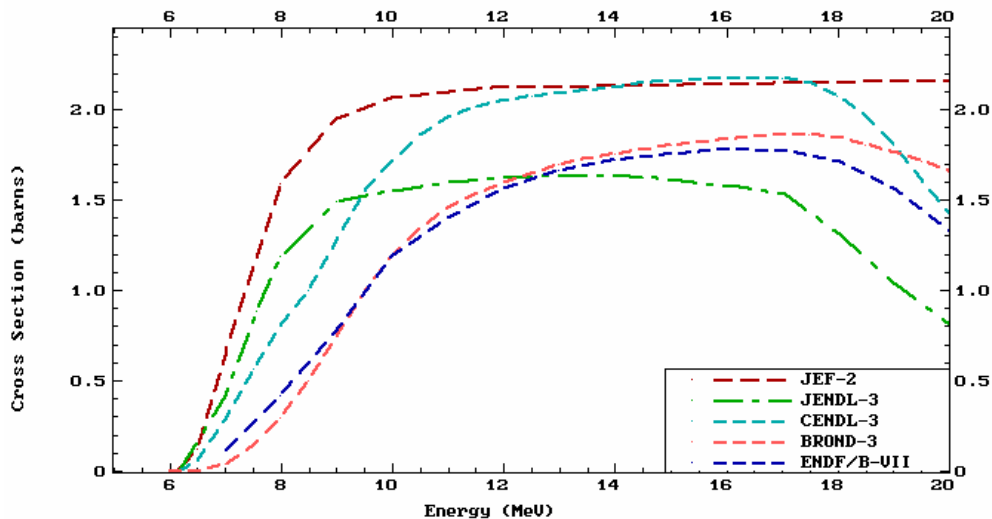


Рис.9. Оценки сечений реакции $(n,2n)$

Необходимо, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 2-3 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не являются сколь-либо существенными для анализа характеристик ядерных реакторов.

3.5. Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT= 17)

Оценки сечений реакций (n,2n) показаны на рис. 9. Экспериментальных данных для этого сечения нет. Оценки JEFF-3.1 и CENDL-3. несомненно, следует признать завышенными, так же как оценку JENDL-3.3 в области энергий до 10 МэВ. Недостатки этих оценок являются прямым следствием недооценки при этих энергиях сечений неупруго рассеяния нейтронов (рис. 7). БРОНД-3 и ENDF/B-VII дают весьма близкие значения сечений, которые также хорошо согласуются с оценками сечений для близлежащих четно-четных изотопов неодима, имеющих соответствующие экспериментальные данные.

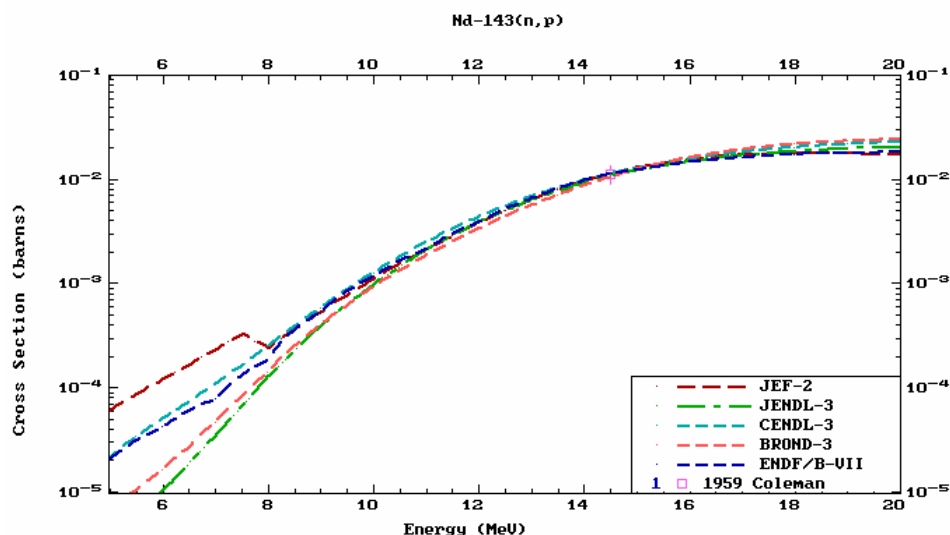
Экспериментальных данных о сечении реакций (n,3n) нет. Сечение этой реакции существенно только выше 17 МэВ, и оно примерно соответствует разности сечения реакции (n,2n) в максимуме и в любой из вышележащих энергетических точек. При энергии 20 МэВ сечение достигает значений 0.35 – 0.55 барна. Для согласованности, для сечения реакции (n,3n) следует принимать ту же оценку, что выбрана предпочтительной для (n,2n).

3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц

Реакции с вылетом заряженных частиц включены во все рассматриваемые оценки. Эти реакции существенны только в области энергий нейтронов выше 15 МэВ, и максимальное сечение таких реакций не превышает 30 мбарн. На рис. 10 показаны оценки сечений реакций (n,p) и (n, α), соответствующие наиболее высоким выходам заряженных частиц. Разногласия между оценками этих реакций сравнительно велики, и вряд ли оправдано предпочтение какой-либо из оценок без дополнительной информации. Следует отметить, что для данного изотопа реакция (n, α) проявляется уже в резонансной области, и для нее имеются экспериментальные данные как для тепловых нейтронов, так и для нейтронов в области неразрешенных резонансов (рис. 10).

97W К. Wisshak et al., Phys. Rev., C57 (1998) 391.

86Б Т.С. Беланова и др., Радиационный захват нейтронов – Справочник, Энергоатомиздат, Москва, 1986.



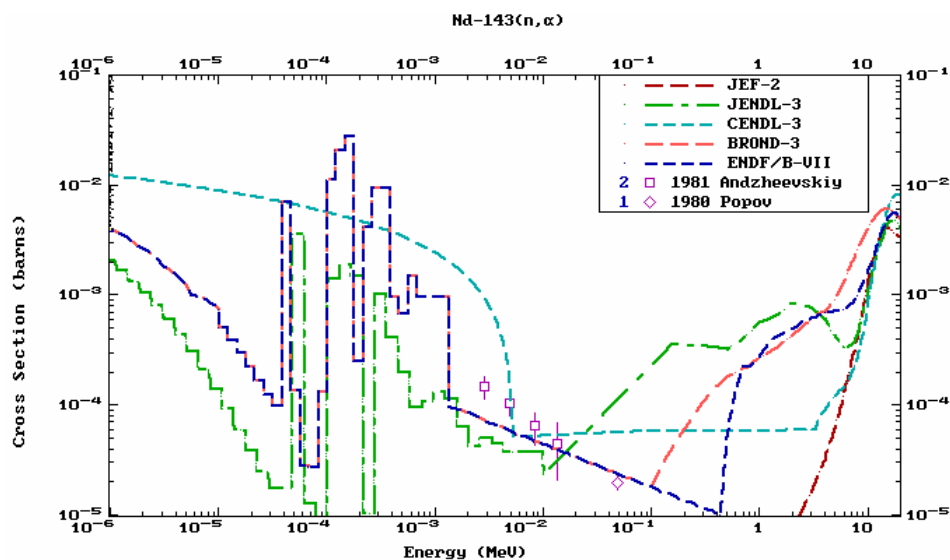


Рис.10. Оценки сечений реакции $^{143}\text{Nd}(n,p)$ и $^{143}\text{Nd}(n,\alpha)$
4. Образование гамма-лучей

Сечения образования гамма-лучей, как правило, не содержатся в файлах для продуктов деления ядер. Однако, в ENDF/B-VII такие сечения включены вместе с сопутствующими оценками спектров гамма-лучей. Эти оценки выполнены на основе расчетов в оптико-статистической модели. Какой-либо тестировки оценок еще не проводилось, поэтому пока трудно сделать какой-либо вывод об их надежности.

5. Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, в области разрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. С другой стороны, оценки JEFF-3.1 и JENDL-3.3, по-видимому, нельзя признать удовлетворительными ни для полных нейтронных сечений ниже энергии 1 МэВ, ни для сечений неупругого рассеяния нейтронов и (n,xn) реакций. Оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений. Это свидетельствует об их достаточно высокой надежности и согласованности. Для библиотеки РОСФОНД в настоящее время целесообразно принять оценку ENDF/B-VII.

Следует однако заметить, что для оценки ENDF/B-VII еще не завершена всесторонняя тестировка и некоторые уточнения данных могут быть в нее внесены в ближайшие месяцы.

Проведенный сравнительный анализ оценок и экспериментальных данных для библиотеки РОСФОНД

60.4. Неодим-144

Содержание в естественной смеси $(23.8 \pm 0.3)\%$

Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $5.47 \cdot 10^{-2}$.

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для неодима-144:

JEFF-3.1 = JEFF-3.0 = JEF-2.2 – оценка H.Gruppelaar, E.Menarace, 1983, с дополнительными уточнениями и модификациями в 1986, 1989 и 1990;
 ФОНД-2.2 = JENDL-3.3 – оценка M.Kawai и др., 1990, с небольшими модификациями в 1993;
 CENDL-3 – оценка Qi-Chang Liang и Qing-Biao Shen, 1999;
 БРОНД-3 – оценка А.В.Игнатьюка и др., 2003;
 ENDF/B-VII – полностью новая оценка S.Muhgabghab и др., 2006.

3. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 60$ -зарядовое число;
- 1.2. $A = 144$ (атомный вес);
- 1.3. $AWR = 142.674$ (отношение массы ядра к массе нейтрона).
- 1.4. Радиоактивен, испускает α -частицы с периодом полураспада $(2.29 \pm 0.16) 10^{15}$ лет.

4 Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.3 Область разрешенных резонансов.

В JEFF-3.1(=JEF-2.2) граница области разрешенных резонансов выбрана равной 12.0 кэВ, параметры резонансов взяты из компиляции [81M] и принят радиус потенциального рассеяния $R_0 = 8.0$ фм.

В оценке JENDL-3.3 граница области разрешенных резонансов выбрана равной 12 кэВ, и принято значение $R_0 = 6.0$ фм. Нейтронные ширины резонансов взяты на основе анализа данных [71T] и радиационные ширины получены из анализа измеренной площади резонансов [77M] с учетом поправок, полученных в измерениях [81A]. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами были приняты значения ширин 47 мэВ для s-резонансов и 41 мэВ для p-резонансов. Параметры отрицательного резонанса определены из условий описания рекомендованного сечения захвата тепловых нейтронов [81M]. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов была принята без изменений в CENDL-3 и БРОНД-3.

Для новой оценки ENDF/B-VII были взяты резонансные параметры [06M], которые основаны на тех же экспериментальных данных [71T, 77M, 81A], но верхняя граница разрешенных резонансов взята 9.975 кэВ и радиус потенциального рассеяния 6.4 фм. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами были приняты значения ширин 51 мэВ для s-резонансов, 36 мэВ для p-резонансов. Радиационные ширины резонансов, использованные в оценках, показаны на рис. 1. Для большинства резонансов различия ширин не очень велики, но для резонанса 1628 эВ они достигают фактора 2.6. Уточнения параметров резонансов в новом атласе нейтронных резонансов [06M] по сравнению с предыдущей компиляцией [81A] обусловлены уточнениями эффективности нейтронных детекторов, использованных в измерениях сечений. В результате использования уточненных методов статистического анализа резонансов заметно изменились в новой компиляции также извлекаемые усредненные характеристики резонансов: среднее расстояние между резонансами, нейтронные силовые функции и средние радиационные ширины.

Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров во всех оценках рекомендовано приближение MLBW. Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| Оценка | JEFF-3.1 | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Эксп. [06M] |
|--|----------|-----------|------------|--------------|
| полное | 3.841 | 4.604 | 5.042 | 4.36±0.31 |
| упругое | 0.259 | 1.001 | 1.448 | 1.0±0.2 |
| захвата | 3.582 | 3.603 | 3.594 | 3.6±0.3 |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | 4.162 | 4.30 | 4.439 | 4.2±0.5 cal. |

Все оценки согласуются в пределах погрешности с имеющимися экспериментальными данными о сечении захвата тепловых нейтронов и резонансном интеграле захвата, но JEFF-3.1 и ENDF/B-VII расходятся с экспериментальными данными по полным нейтронным сечениям и сечениям упругого рассеяния. По-видимому, параметры отрицательного резонанса в этих оценках нуждаются в корректировке.

На рис. 2 и 3 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для полных нейтронных сечений некоторые разногласия в нейтронных ширинах резонансов не выходят за пределы погрешностей экспериментальных данных. В то же время, в экспериментальных данных проявляется ряд резонансов, которые были отнесены примесям посторонних изотопов, присутствующих в мишени.

Для сечений захвата нейтронов имеются только экспериментальные данные в области неразрешенных резонансов. Небольшие разногласия оценок в резонансной области проявляются лишь в межрезонансных минимумах, и они обусловлены, в основном, различиями нейтронных ширин отрицательного резонанса.

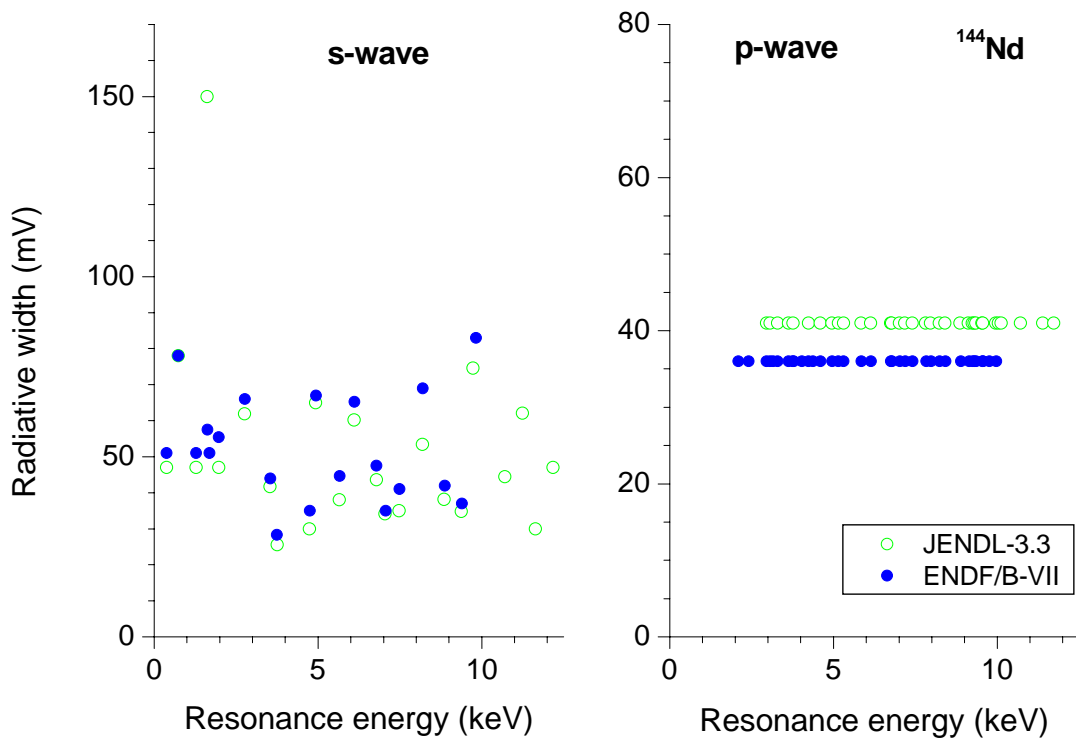


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках

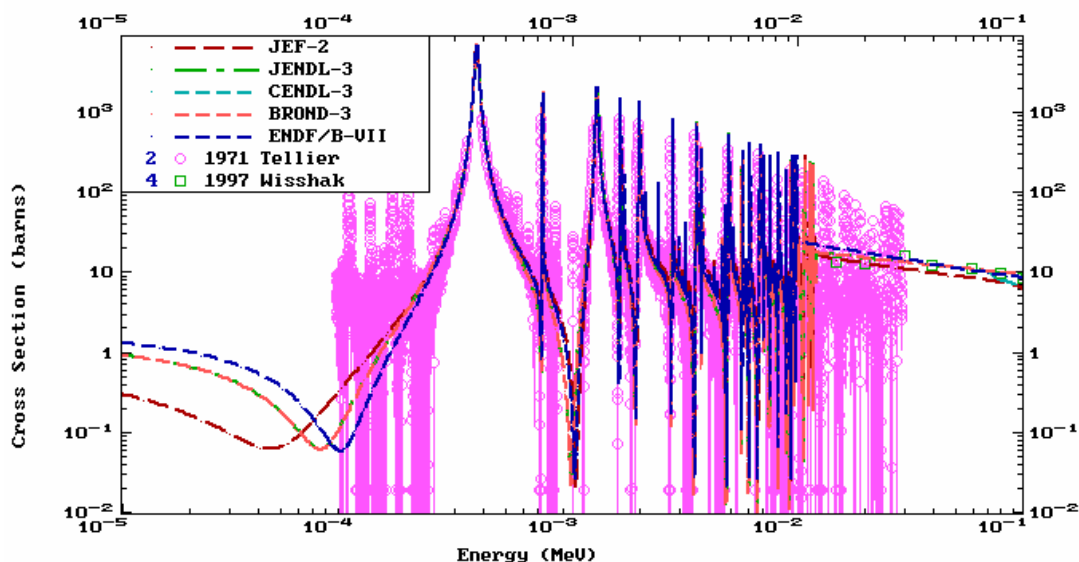


Рис. 2. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

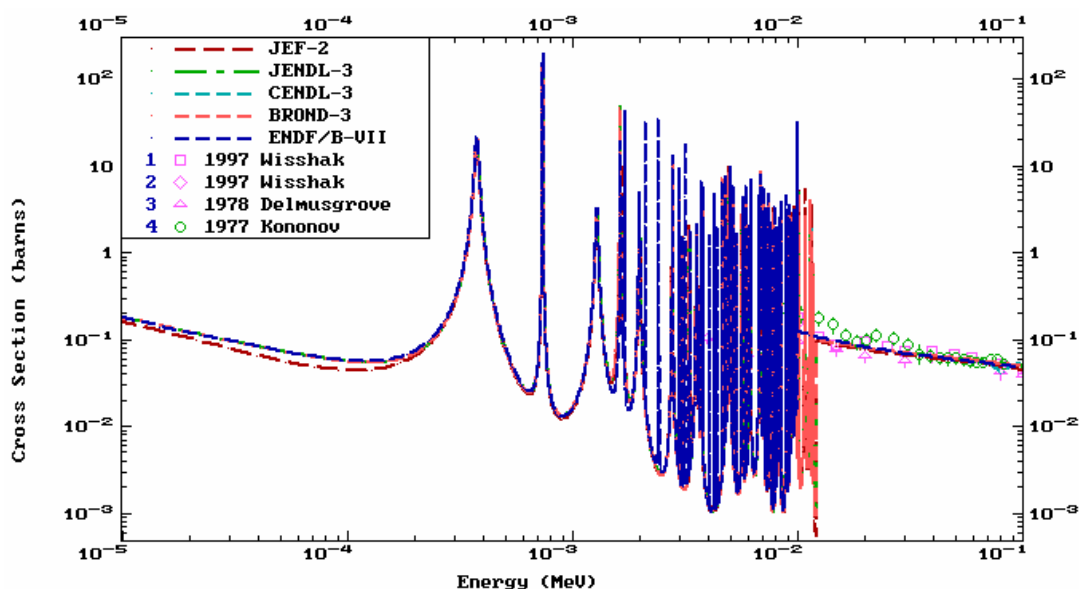


Рис. 3. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

2.2. Область неразрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов включена во все оценки, и ее верхняя граница принята равной 50 кэВ в JEFF-3.1, 100 кэВ в JENDL-3.3, CENDL-3 и БРОНД-3 и 250 кэВ в ENDF/B-VII.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S0, S1 и S2 были рассчитаны на основе оптической модели. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов при энергии 100 кэВ. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению,

рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 2.928E-4$, $S_1 = 0.688E-4$, $S_2 = 3.543E-4$, $Gg = 0.041$ эВ, $D_0 = 410.8$ эВ, $R = 7.66$ ферми.

Оценка JENDL-3.3 для неразрешенных резонансов была принята также в CENDL-3 и БРОНД-3.

В ENDF/B-VII радиационные ширины и нейтронные силовые функции были выбраны на основе статистического анализа параметров разрешенных резонансов, но средние расстояния между резонансами было также определено из условий оптимального описания наблюдаемых сечений радиационного захвата нейтронов [97W]. Используются следующие значения параметров при энергии нейтронов 70 кэВ :

$S_0 = 5.36E-4$, $S_1 = 0.92E-4$, $S_2 = 3.00E-4$, $Gg(s) = 0.057$ эВ, $Gg(p) = 0.036$ эВ и $Gg(d) = 0.048$ эВ, $D_0 = 400.8$ эВ, $R = 6.40$ ферми.

Следует отметить, что приведенные выше значения ширин и силовых функций, взятые из файла ENDF/B-VII, несколько отличаются от значений, приведенных в компиляции [06M]. Различия в выборе радиационных ширин и значений D_0 в значительной степени компенсируются при подгонке расчетных сечений к одним и тем же экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов.

Оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов в области неразрешенных резонансов показаны на приведенных выше рис. 2 и 3. Все оценки, кроме JEFF-3.1, ориентировались на данные [97W] как для полных сечений, так и для сечений радиационного захвата], и между ними нет существенных расхождений. Для полных нейтронных сечений оценка JEFF-3.1 представляется несколько заниженной.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в области разрешенных и неразрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. Некоторое предпочтение можно отдать оценке ENDF/B-VII, в которой использованы уточненные параметры нейтронных резонансов из компиляции [06M].

71T H.Tellier, Report CEA-N-1459 (1971).

77K B.H.Кононов и др., ВАЯТ, сер. Ядерные константы, т. 22 (1977) с. 29.

77M A.R.Musgrove et al., Report AEEC/E-401 (1977).

82A B.J. Allen et al., Nucl.Sci.Eng. 82, 230 (1982)

81M S.Mughabghab et al., Neutron Cross Sections, Academic Press, NY,1984, part B.

97W K.Wisshak et al., Phys. Rev., C57 (1998) 391.

06M S.Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY,2006.

5. Нейтронные сечения вне резонансной области

3.1. Полные сечения ($MT=1$)

Экспериментальные данные о полных нейтронных сечениях вне резонансной области для ^{144}Nd не очень много. Они приведены на рис. 6 в сравнении с имеющимися оценками для энергий нейтронов выше 50 кэВ. Все оценки основаны на расчетах по оптической модели, но параметры использованного оптического потенциала отличаются в различных оценках весьма существенно. Эти различия проявляются наиболее сильно при энергиях нейтронов ниже 1 МэВ, и они отражаются также соответствующим образом в оценках околопороговых участков сечений неупругого рассеяния нейтронов. Учитывая не монотонное поведение экспериментальных данных для энергий нейтронов ниже 200 кэВ, в этой области трудно сделать выбор между оценкам JENDL-3.3, БРОНД-3 или ENDF/B-

VII. Для энергий выше 1 МэВ оценка JENDL-3.3 несомненно противоречит экспериментальным данным, тогда как все остальные оценки хорошо согласуются с имеющимися данными.

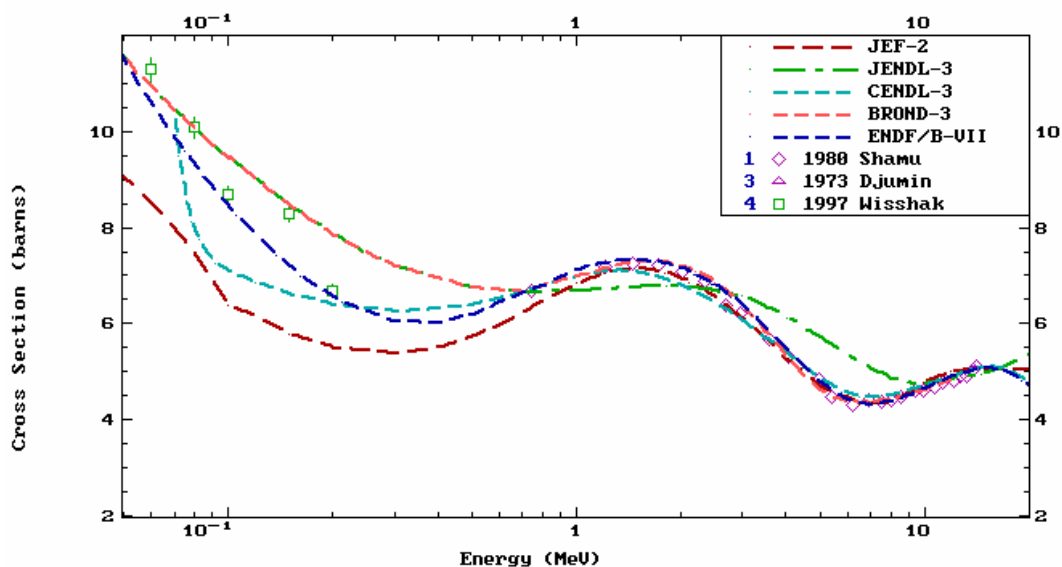


Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений вне резонансной области резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. Прямых экспериментальных данных по интегральным сечениям упругого рассеяния нейтронов для изотопа ^{144}Nd нет. В этих условиях можно ожидать, что более корректной для сечений упругого рассеяния будут оценка, в которой достигнуто лучшее описание данных по угловым распределениям упруго рассеянных нейтронов.

На рис. 7 показано сравнение оценок угловых распределений с имеющимися малочисленными экспериментальными данными. Анализ угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, как правило, осуществляется на основе расчетов по оптической модели, и оценки JEFF-3.1, БРОНД-3 или ENDF/B-VII хорошо описывают имеющиеся данные. Оценка JENDL-3.3 для обеих энергий оказывается менее удовлетворительной, так как в ней максимумы и минимумы дифференциальных сечений смещены к меньшим углам.

3.3 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

В JEFF-3.1 рассматривался спектр 14 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в JENDL-3.3 учитывалось 5 уровней, в CENDL-3 – 15 уровней, в БРОНД-3 - 19 уровней и в ENDF/B-VII – 39 уровней. Так как при увеличении числа уровней соответствующим образом изменяется порог статистического описания уровней, так называемый континуум уровней, то различия в числе рассматриваемых уровней не должно заметно отражаться на оценках полного (интегрального) сечения неупругого рассеяния.

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 8. Каких-либо экспериментальных данных для этого сечения нет. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели, а также различием моделей расчета вкладов прямых и предравновесных процессов, существенных для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Оценку JEFF-3.1, полученную в рамках сферической оптической модели без учета

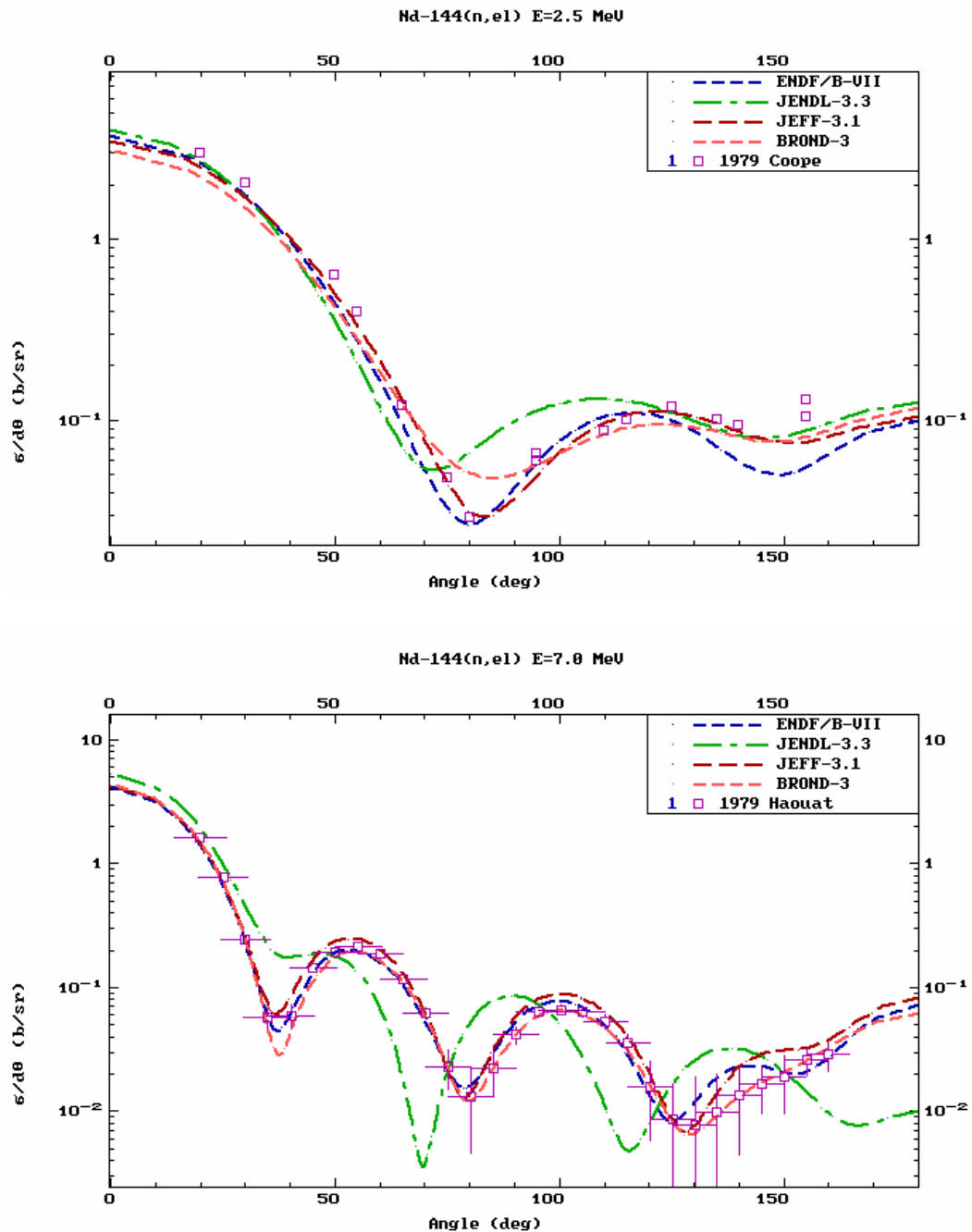


Рис. 7. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов при энергиях 2.5 и 7.0 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

предравновесных процессов, несомненно, следует признать существенно заниженной во всем диапазоне энергий. JENDL-3.3 представляется несколько завышенной, но такой вывод достаточно трудно обосновать. Остальные оценки дают весьма близкие значения сечений, и выбор между ними нельзя сделать без дополнительной информации.

Асимметрия угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов, обусловленная прямыми и предравновесными процессами, учтена во всех оценках, кроме JEFF-3.1, для рассеяния на мультиплетах низколежащих коллективных уровнях, а также для нейтронного рассеяния в континууме. Надежных экспериментальных данных по угловым распределениям неупруго рассеянных нейтронов для ^{144}Nd нет, и справедливость оценок соответствующих угловых распределений подтверждается, главным образом, их подобием с аналогичными оценками для ^{148}Nd и ^{150}Nd , где такие данные имеются.

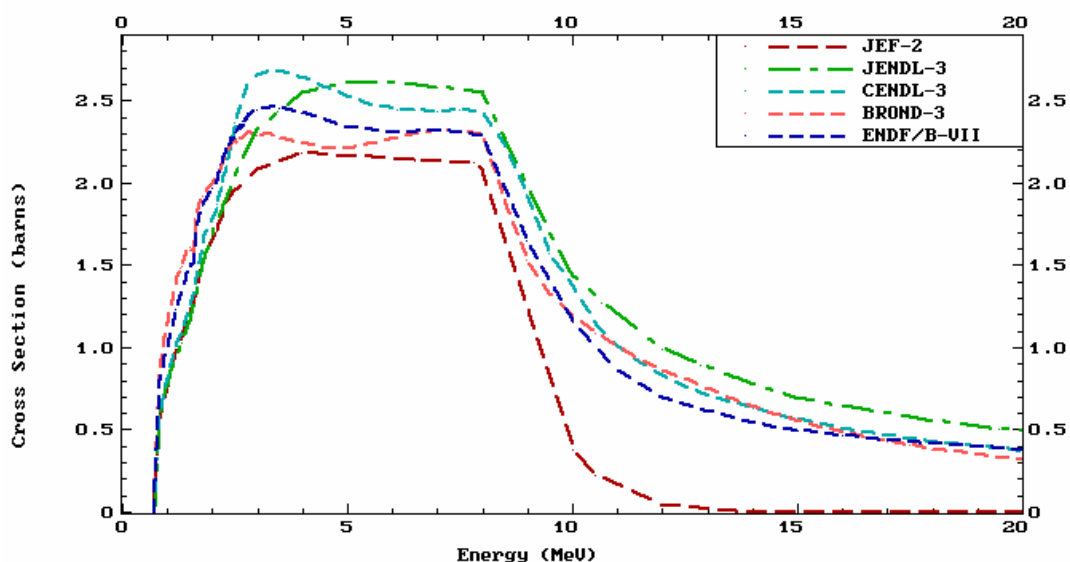


Рис. 8. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для ^{142}Nd

3.4 Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

Оценки сечений радиационного захвата нейтронов вне области разрешенных резонансов уже были представлены на рис. 9. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия обусловлены выбором экспериментальных данных, которым отдано предпочтение при подборе модельных параметров. Как уже отмечалось выше, все оценки ориентировались на прецизионные измерения сечений захвата [97W], и они достаточно хорошо согласуются как с данными, так и между собой во всем диапазоне энергий нейтронов до 1 МэВ.

Для энергии нейтронов ~ 14 МэВ все оценки, кроме CENDL-3, дают сечение захвата близкое к 1 мб, что хорошо согласуется с систематикой, основанной на модели прямого-коллективного захвата нейтронов [86Б]. Такая модель предсказывает энергетическую зависимость сечений захвата нейтронов с энергиями выше 10 МэВ, подобную оценкам ENDF/B-VII, и БРОНД-3, но существенно противоречащую оценкам JEFF-3.1, JENDL-3.3 и CENDL-3.

Необходимо, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 2-3 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не являются сколь-либо существенными для анализа характеристик ядерных реакторов.

3.5. Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT= 17)

Оценки сечений реакций (n,2n) показаны на рис. 10. Имеющиеся экспериментальные данные для этого сечения сравнительно хорошо описываются оценками JENDL-3.3, CENDL-3, БРОНД-3 и ENDF/B-VII, но кривая JEFF-3.1, несомненно, является слишком

завышенной. Оценки CENDL-3 и ENDF/B-VII, по-видимому, лучше всего описывают сечение выше 14 МэВ, и их можно признать предпочтительными. Экспериментальных данных о сечении реакций $(n,3n)$ нет. Сечение этой реакции существенно только выше 15 МэВ. При энергии 20 МэВ сечение не превышает значений 0.5 – 0.75 мбарна. Для согласованности, для сечения реакции $(n,3n)$ следует принимать ту же оценку, что выбрана предпочтительной для $(n,2n)$.

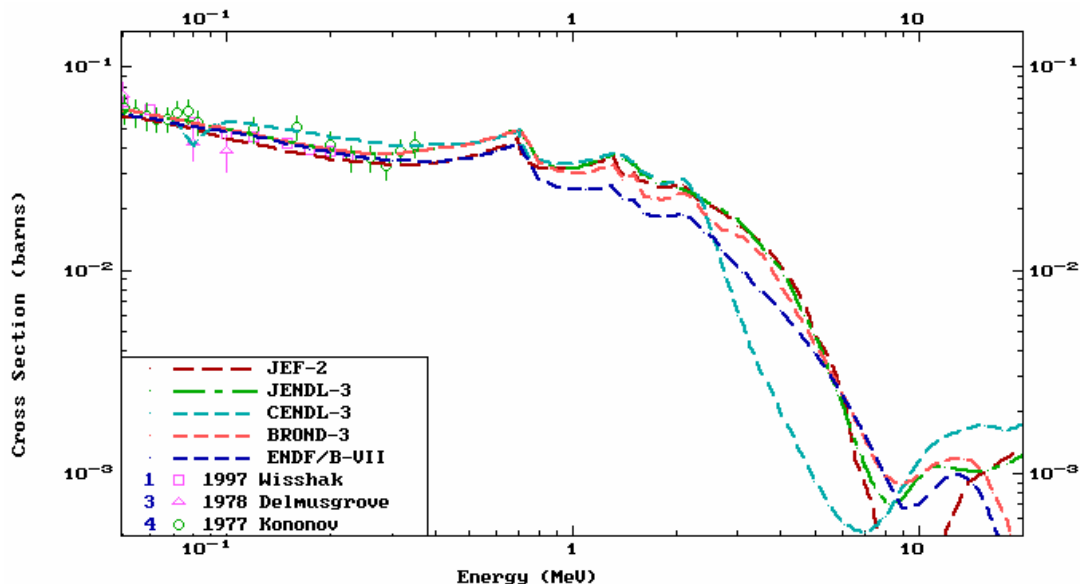


Рис. 9. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов вне резонансной области резонансов в сравнении с экспериментальными данными

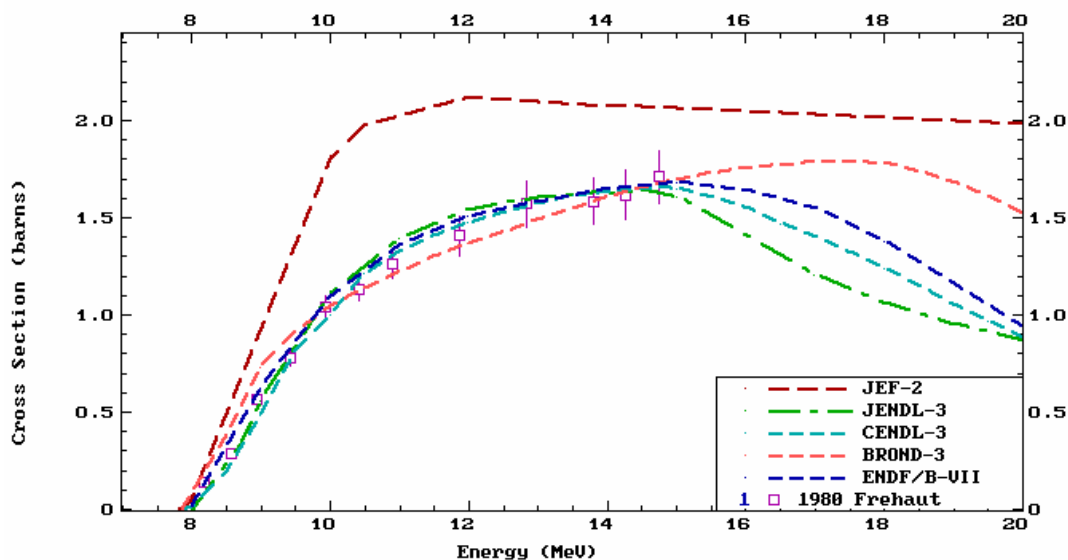


Рис.10. Оценки сечений реакции $(n,2n)$ в сравнении с экспериментальными данными

3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц

Реакции с вылетом заряженных частиц включены во все рассматриваемые оценки. Эти реакции существенны только в области энергий нейтронов выше ~ 15 МэВ, и максимальное сечение таких реакций не превышает 30 мбарн. На рис. 11 показаны оценки сечений реакций (n,p) и (n,α) , соответствующие наиболее высоким выходам заряженных частиц. Разногласия между оценками этих реакций сравнительно невелики, так как все оценки

невным образом привязаны к имеющимся экспериментальным данным для энергии нейтронов ~ 14 МэВ. Для более низких и более высоких энергий расхождения оценок становятся весьма заметными. Без дополнительной информации вряд ли оправдано предпочтение какой-либо из оценок.

97W К. Wisshak et al., Phys. Rev., C57 (1998) 391.

86Б Т.С. Беланова и др., Радиационный захват нейтронов – Справочник, Энергоатомиздат, Москва, 1986.

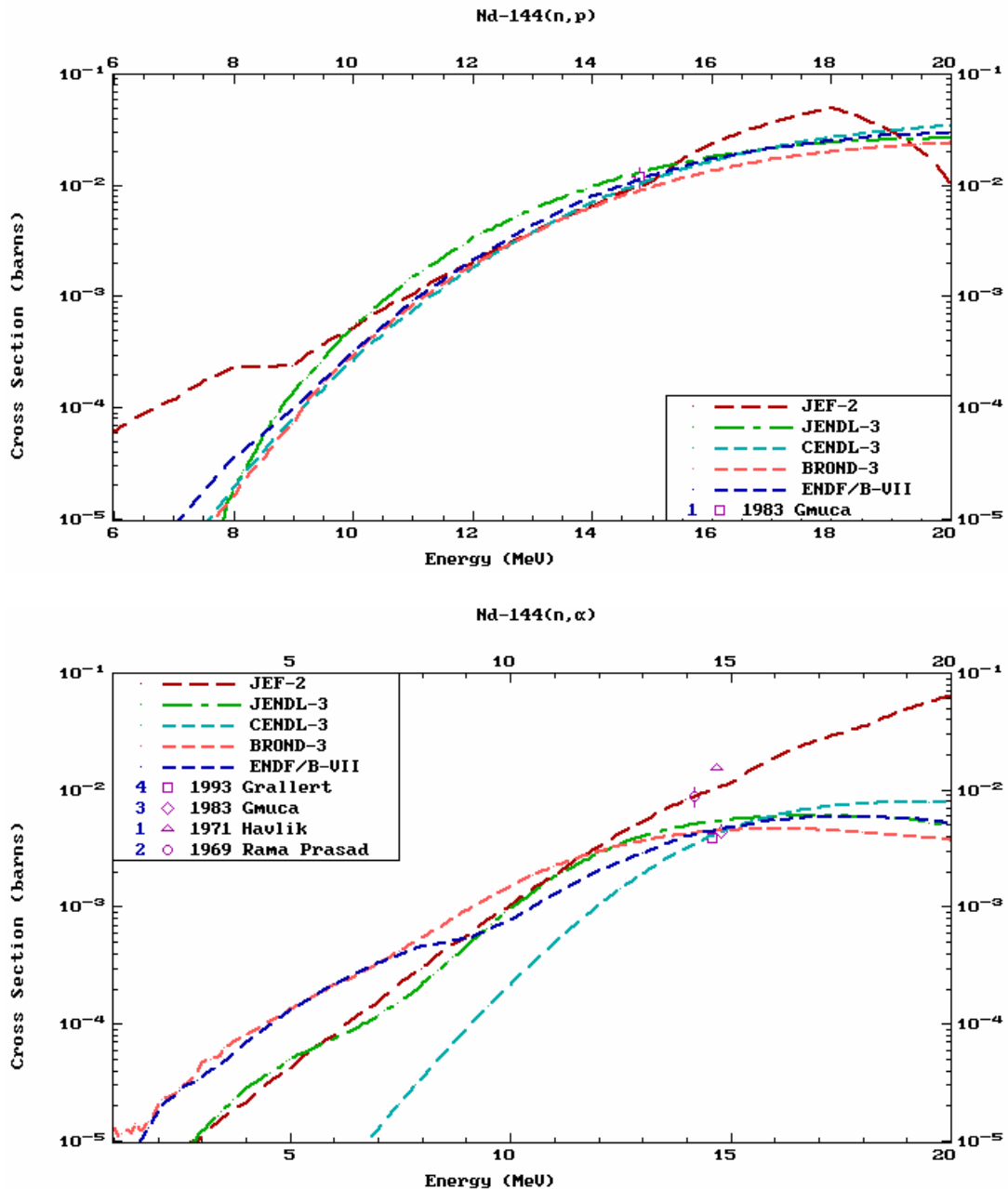


Рис. 8. Оценки сечений реакции $^{144}\text{Nd}(n,p)$ и $^{144}\text{Nd}(n,\alpha)$

4. Образование гамма-лучей

Сечения образования гамма-лучей, как правило, не содержатся в файлах для продуктов деления ядер. Однако, в ENDF/B-VII такие сечения включены вместе с сопутствующими

оценками спектров гамма-лучей. Эти оценки выполнены на основе расчетов в оптико-статистической модели. Какой-либо тестировки оценок еще не проводилось, поэтому пока трудно сделать какой-либо вывод об их надежности.

5. Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, в области разрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. С другой стороны, оценку JEFF-3.1, по-видимому, нельзя признать удовлетворительными вне резонансной области ни для сечений неупругого рассеяния, ни для сечений реакции $(n,2n)$. Оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений. Это свидетельствует об их достаточно высокой надежности и согласованности. Для библиотеки РОСФОНД в настоящее время целесообразно принять оценку ENDF/B-VII.

Следует однако заметить, что для оценки ENDF/B-VII еще не завершена всесторонняя тестировка и некоторые уточнения данных могут быть в нее внесены в ближайшие месяцы. Проведенный сравнительный анализ оценок и экспериментальных данных для библиотеки РОСФОНД выполнен А.В.Игнатьюком.

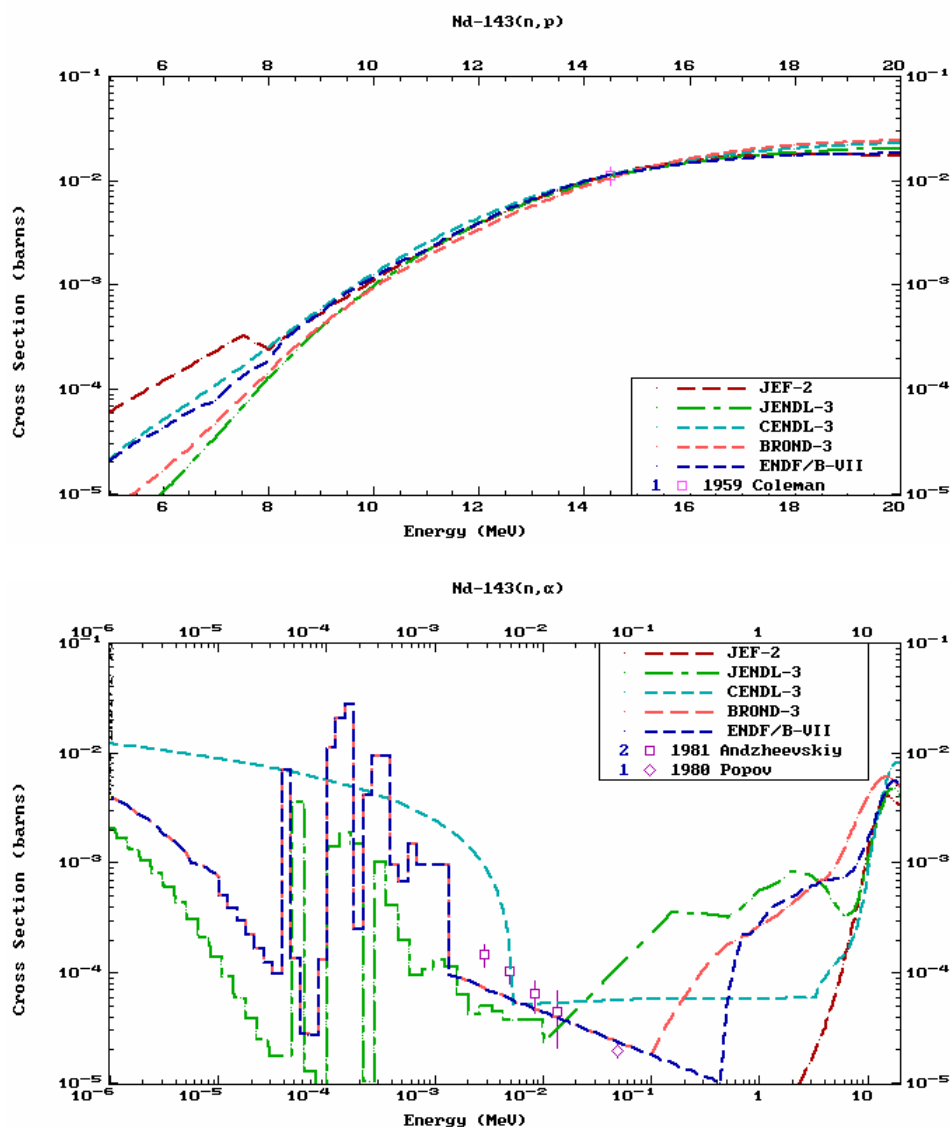


Рис.10. Оцененки сечений реакции $^{143}\text{Nd}(n,p)$ и $^{143}\text{Nd}(n,\alpha)$

4. Образование гамма-лучей

Сечения образования гамма-лучей, как правило, не содержатся в файлах для продуктов деления ядер. Однако, в ENDF/B-VII такие сечения включены вместе с сопутствующими оценками спектров гамма-лучей. Эти оценки выполнены на основе расчетов в оптико-статистической модели. Какой-либо тестировки оценок еще не проводилось, поэтому пока трудно сделать какой-либо вывод об их надежности.

5. Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, в области разрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. С другой стороны, оценки JEFF-3.1 и JENDL-3.3, по-видимому, нельзя признать удовлетворительными ни для полных нейтронных сечений ниже энергии 1 МэВ, ни для сечений неупругого рассеяния нейтронов и (n,xn) реакций. Оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений. Это свидетельствует об их достаточно высокой надежности и согласованности. Для библиотеки РОСФОНД в настоящее время целесообразно принять оценку ENDF/B-VII.

Следует однако заметить, что для оценки ENDF/B-VII еще не завершена всесторонняя тестировка и некоторые уточнения данных могут быть в нее внесены в ближайшие месяцы.

Проведенный сравнительный анализ оценок и экспериментальных данных для библиотеки РОСФОНД выполнен А.В.Игнатьюком.

60.5. Неодим-145

Стабилен, содержание в естественной смеси $(8.3 \pm 0.1)\%$.

Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $3.94 \cdot 10^{-2}$.

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для неодима-145:

JEFF-3.1 = JEFF-3.0 = JEF-2.2 – оценка H.Gruppelaar, E.Menapace, 1983, с дополнительными уточнениями и модификациями в 1986, 1989 и 1990;

ФОНД-2.2 = JENDL-3.3 – оценка M.Kawai и др., 1990, с небольшими модификациями в 1993;

CENDL-3 – оценка Qi-Chang Liang и Qing-Biao Shen, 1999;

БРОНД-3 – оценка А.В.Игнатьюка и др., 2003;

ENDF/B-VII – полностью новая оценка S.Muhgabghab и др., 2006,.

4. Общие характеристики

1.1. $Z = 60$ -зарядовое число;

1.2. $A = 145$ (атомный вес);

1.3. $AWR = 143.668$ (отношение массы ядра к массе нейтрона).

5 Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.4 Область разрешенных резонансов.

В JEFF-3.1(=JEF-2.2) граница области разрешенных резонансов выбрана равной 2.166 кэВ, параметры резонансов взяты из компиляции [81M] и принят радиус потенциального рассеяния $R_0 = 6.0$ фм. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами были приняты значения 75.117 мэВ.

В оценке JENDL-3.3 граница области разрешенных резонансов расширена до 4 кэВ, и принято то же значение $R_0 = 6.0$ фм. Нейтронные ширины резонансов взяты на основе анализа данных [71T] и радиационные ширины получены из анализа измеренной площади резонансов [77M,77R] с учетом поправок, полученных в измерениях [81A]. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами были приняты значения 87 мэВ. Параметры отрицательного резонанса определены из условий описания рекомендованного сечения захвата тепловых нейтронов [81M]. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов была принята без изменений в CENDL-3 и некоторой корректировкой радиационных ширин – также в БРОНД-3.

Для новой оценки ENDF/B-VII были взяты резонансные параметры [06M], которые основаны на тех же экспериментальных данных [71T, 77M, 77R, 81A], но верхняя граница разрешенных резонансов взята 3.978 кэВ и радиус потенциального рассеяния 6.0 фм. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами были приняты значения ширин 76.5 мэВ.

Радиационные ширины резонансов, использованные в оценках, показаны на рис. 1. Для многих резонансов различия ширин весьма значительны. В частности, в JENDL-3.3 для резонанс с энергией 1.195 кэВ взята радиационная ширина 208 мэВ и для резонанса с энергией 3.327 кэВ – ширина 260 мэВ (вне шкалы рис. 1!). Столь большие значения ширин противоречат экспериментальным данным по площади резонансов, и в БРОНД-3 они были приведены в соответствие с данными компиляции [81M]. Уточнения параметров резонансов в новом атласе нейтронных резонансов [06M] по сравнению с предыдущей компиляцией [81A] обусловлены уточнениями эффективности нейтронных детекторов, использованных в измерениях сечений. В результате использования уточненных методов статистического анализа резонансов заметно изменились в новой компиляции также извлекаемые усредненные характеристики резонансов: среднее расстояние между резонансами, нейтронные силовые функции и средние радиационные ширины.

Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров во всех оценках рекомендовано приближение MLBW. Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| Оценка | JEFF-3.1 | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Эксп. [06M] |
|--|----------|-----------------------|------------|-------------------|
| полное | 60.11 | 64.06 | 68.49 | 66.5±1.1 |
| упругое | 18.26 | 20.22 | 18.67 | 16.5±0.4 |
| захвата | 41.85 | 43.84 | 49.83 | 50.0±1.0 |
| (n, α) | | 8.85 10 ⁻⁵ | | <10 ⁻⁴ |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | 231.6 | 204 | 245.0 | 230±35 |

В предыдущей компиляции резонансных параметров [81M] экспериментальное значение сечения захвата было равным 42±2, и оценки JEFF-3.1, JENDL-3.3 и БРОНД-3 ориентировались на это значение. Ввиду изменения тепловых сечений [06M], необходима корректировка параметров отрицательного резонанса в перечисленных оценках. Оценка ENDF/B-VII ориентировалась на новые уточненные значения тепловых сечений.

На рис. 2 и 3 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися

экспериментальными данными. Для полных нейтронных сечений некоторые разногласия в нейтронных ширинах резонансов не выходят за пределы погрешностей экспериментальных данных.

Для сечений захвата нейтронов имеются только экспериментальные данные ниже первого резонанса и в области неразрешенных резонансов. Разногласия оценок радиационных ширин проявляются, в основном, в межрезонансных минимумах.

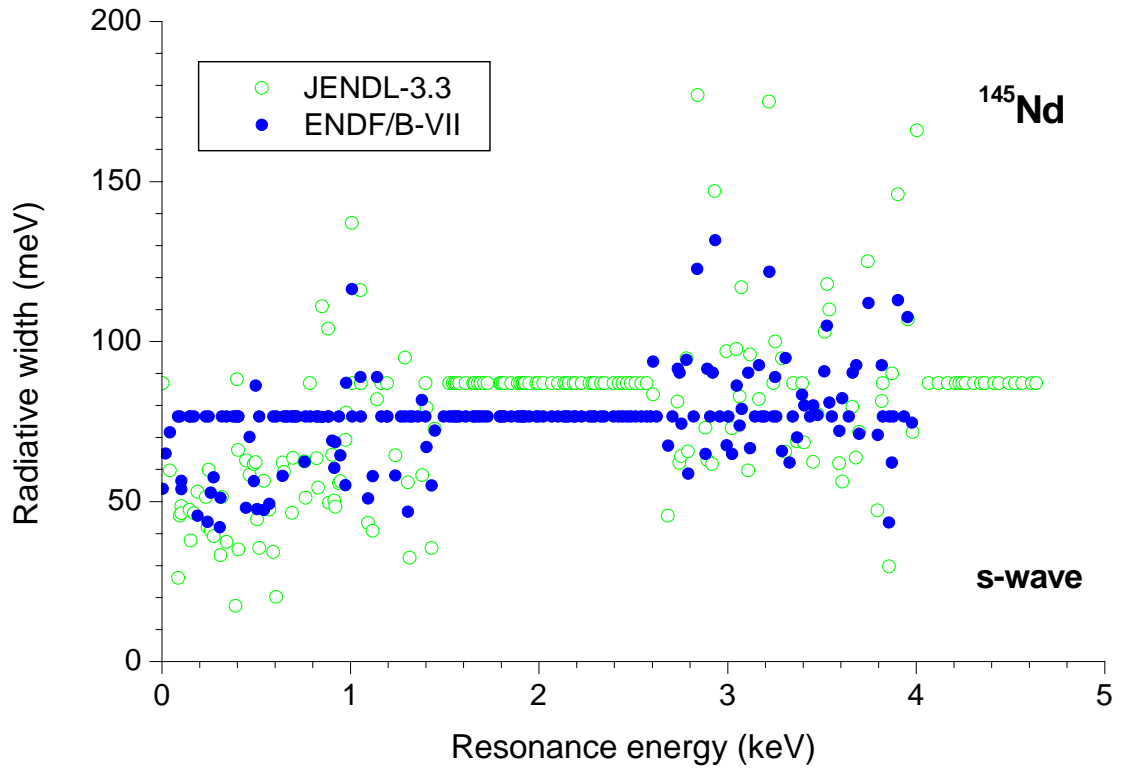


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках

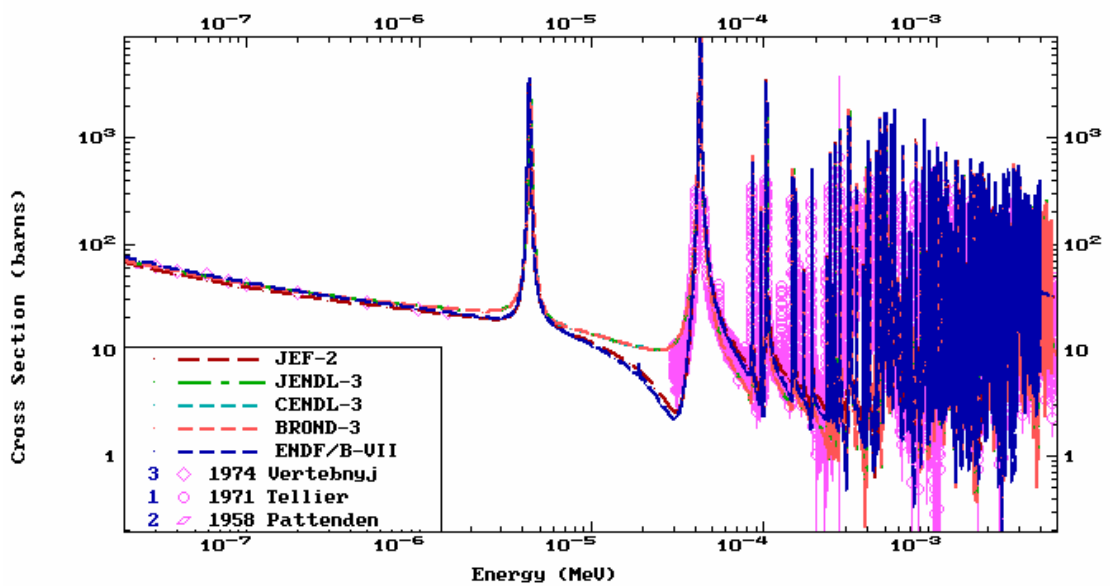


Рис. 2. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

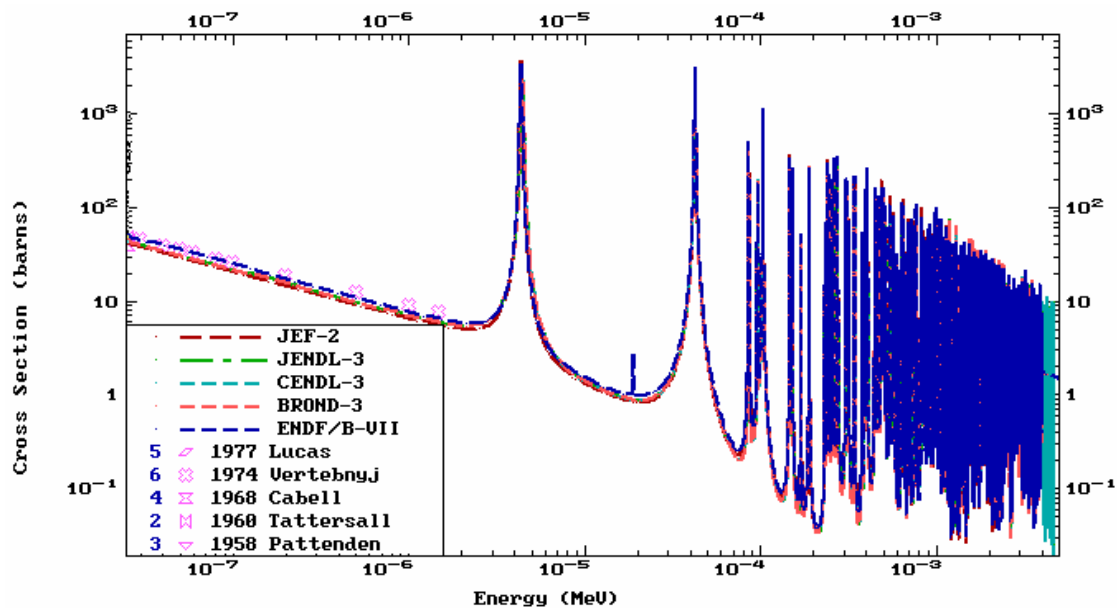


Рис. 3. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

2.2. Область неразрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов включена во все оценки, и ее верхняя граница принята равной 50 кэВ в JEFF-3.1, 100 кэВ в JENDL-3.3, CENDL-3 и БРОНД-3 и 67.69 кэВ в ENDF/B-VII.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 были рассчитаны на основе оптической модели. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента, и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов при энергии 100 кэВ. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 2.927E-4$, $S_1 = 0.685E-4$, $S_2 = 3.510E-4$, $G_g = 0.0975$ эВ, $D_0 = 17.8$ эВ, $R = 7.683$ фм.

Оценка JENDL-3.3 для неразрешенных резонансов была принята также в CENDL-3.

Для БРОНД-3 параметры неразрешенных резонансов были взяты из предыдущей оценки БРОНД-2:

$S_0 = 4.40E-4$, $S_1 = 0.70E-4$, $S_2 = 2.20E-4$, $G_g = 0.0843$ эВ, $D_0 = 17.0$ эВ, $R = 6.5$ ферми.

В ENDF/B-VII радиационные ширины и нейтронные силовые функции были выбраны на основе статистического анализа параметров разрешенных резонансов, но средние расстояния между резонансами было также определено из условий оптимального описания сечений радиационного захвата нейтронов [97W]. Использованы следующие значения параметров при энергии нейтронов 70 кэВ :

$S_0 = 4.75E-4$, $S_1 = 1.20E-4$, $S_2 = 0.80E-4$, $G_g(s \text{ и } d) = 0.0765$ эВ, $G_g(p) = 0.040$ эВ, $D_0 = 18.0$ эВ, $R = 5.791$ ферми.

Различия в выборе радиационных ширин и значений D_0 в значительной степени компенсируются при подгонке расчетных сечений к одним и тем же экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов.

Оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов в области неразрешенных резонансов показаны на рис. 4 и 5. Резонансные флуктуации

полных сечений сохраняется в экспериментальных данных во в области энергий до ~ 25 кэВ [71Т], но во всех оценках в этой области представлены только сечения, усредненные по резонансам. Если ориентироваться на экспериментальные данные [97W], полученные в для усредненных сечений, то оценки CENDL-3, ENDF/B-VII и БРОНД-3 для полных сечений выглядят несколько предпочтительнее, чем с JEFF-3.1 и JENDL-3.3.

Для сечений радиационного захвата нейтронов оценка JENDL-3.3 опиралась, в основном, на экспериментальные данные [78N]. Однако в более поздних прецизионных измерениях [97W] были получены более низкие сечения, на которые ориентировались оценки ENDF/B-VII и БРОНД-3 (рис. 5). Весьма малые погрешности данных [97W] позволяют считать оценки ENDF/B-VII и БРОНД-3 предпочтительными.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, в области разрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. В области неразрешенных резонансов предпочтение следует отдать оценкам ENDF/B-VII и БРОНД-3, которые опираются на более поздние и более надежные измерения нейтронных сечений.

71Т Н.Теллер, Report CEA-N-1459 (1971).

71R G.Rohr et al., Nuclear Data for Science and Technology (Knoxville, 1971), v. 2, p. 743.

77К В.Н.Кононов и др., ВАЯТ, сер. Ядерные константы, т. 22 (1977) с. 29.

77М A.R.Musgrove et al., Report AECC/E-401 (1977).

78N Y.Nakajima et al., Proc. Conf. on Neutron Physics and Nucl. Data for Reactors, Harwell 1978, p. 438.

82A B.J. Allen et al., Nucl.Sci.Eng. 82, 230 (1982)

81M S.Mughabghab et al., Neutron Cross Sections, Academic Press, NY,1984, part B.

97W K.Wisshak et al., Phys. Rev., C57 (1998) 391.

06M S.Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY,2006.

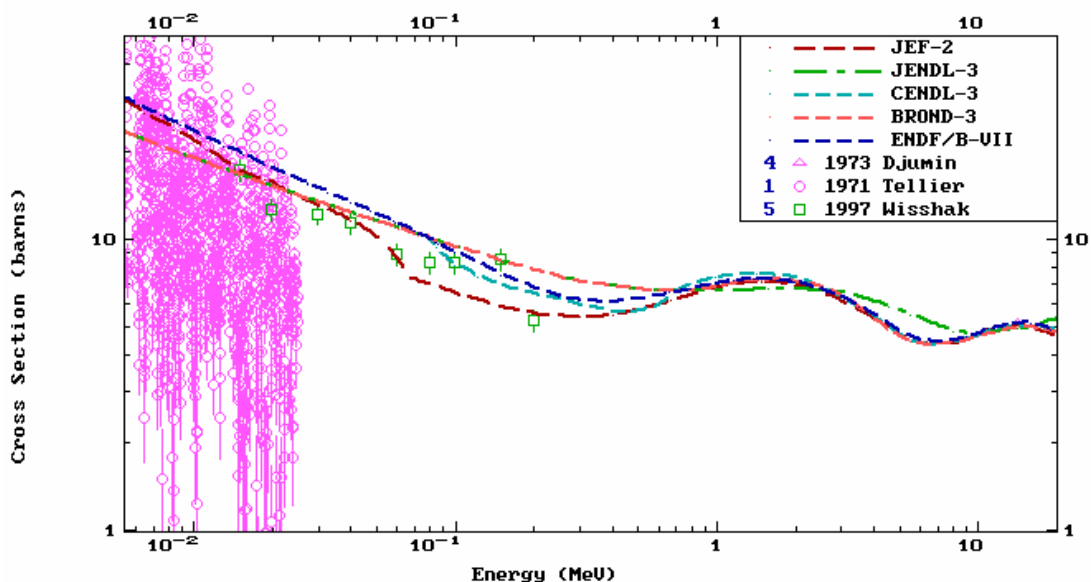


Рис. 4. Оценки полных нейтронных сечений вне резонансной области резонансов в сравнении с экспериментальными данными

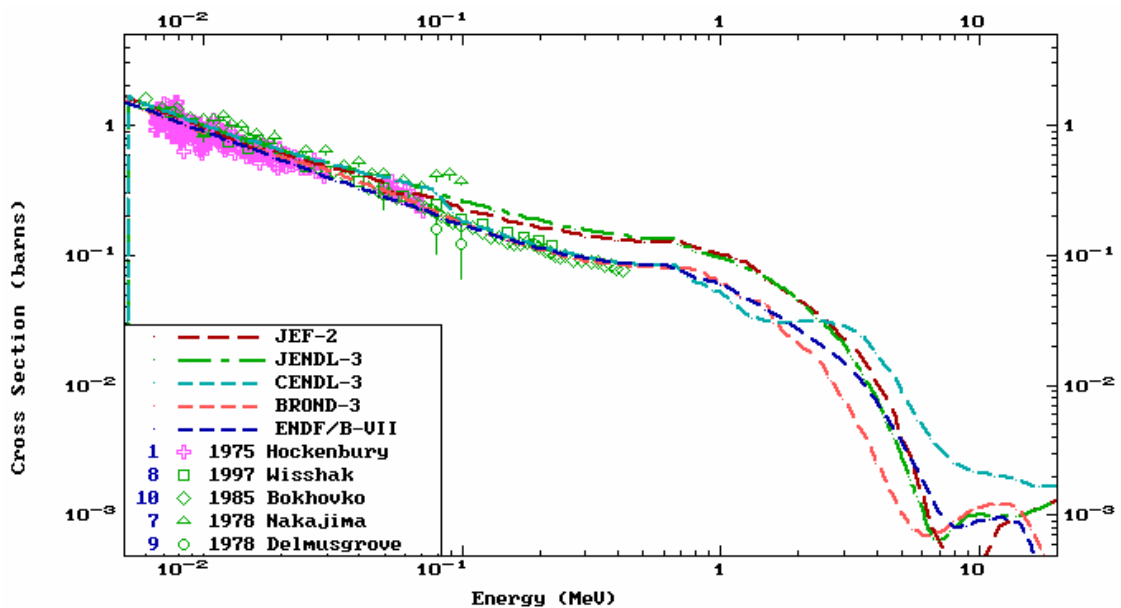


Рис. 5. Оценки полных нейтронных сечений вне резонансной области резонансов в сравнении с экспериментальными данными

6. Нейтронные сечения вне резонансной области

3.1. Полные сечения (MT=1)

Экспериментальные данные о полных нейтронных сечениях вне резонансной области для ^{145}Nd весьма мало [97W]. Они приведены на рис. 6 в сравнении с имеющимися оценками для энергий нейтронов выше 50 кэВ. Все оценки основаны на расчетах по оптической модели, но параметры использованного оптического потенциала отличаются в различных оценках весьма существенно. Эти различия проявляются наиболее сильно при энергиях нейтронов ниже 1 МэВ, и они отражаются также соответствующим образом в оценках околопороговых участков сечений неупругого рассеяния нейтронов. Учитывая не монотонное поведение экспериментальных данных для энергий нейтронов ниже 200 кэВ, в этой области трудно сделать выбор между оценкам JENDL-3.3, БРОНД-3 или ENDF/B-VII. Для энергий выше 1 МэВ оценка JENDL-3.3 противоречит остальным оценкам, которые достаточно хорошо согласуются между собой.

3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. Прямых экспериментальных данных по интегральным сечениям упругого рассеяния нейтронов для изотопа ^{145}Nd нет. В этих условиях можно ожидать, что более корректной для сечений упругого рассеяния будут оценка, в которой достигнуто лучшее описание данных по угловым распределениям упруго рассеянных нейтронов.

Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, обычно, опираются на расчеты по оптической модели, и разногласия в форме дифференциальных сечений рассеяния оказываются подобными расхождениям в полных нейтронных сечениях. Без соответствующих экспериментальных данных предпочтительными являются оценки, в которых достигнуто лучшее описание полных сечений.

3.3 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

В JEFF-3.1 рассматривался спектр 14 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в JENDL-3.3 учитывалось 16 уровней, в CENDL-3– 19 уровней, в БРОНД-3 - 13 уровней и в ENDF/B-VII – 25 уровней. Так как при увеличении числа уровней соответствующим образом изменяется порог статистического описания уровней, так называемый континуум уровней, то различия в числе рассматриваемых уровней не должно заметно отражаться на оценках полного (интегрального) сечения неупругого рассеяния.

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 6. Каких-либо экспериментальных данных для этого сечения нет. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели, а также различием моделей расчета вкладов прямых и предравновесных процессов, существенных для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Оценку JEFF-3.1, полученную в рамках сферической оптической модели без учета предравновесных процессов, насомненно, следует признать существенно заниженной во всем диапазоне энергий. JENDL-3.3 также представляется несколько заниженной для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Остальные оценки дают весьма близкие значения сечений, и выбор между ними нельзя сделать без дополнительной информации.

Асимметрия угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов, обусловленная прямыми и предравновесными процессами, учтена во всех оценках, кроме JEFF-3.1, для рассеяния на мультиплетах низколежащих коллективных уровнях, а также для нейтронного рассеяния в континууме. Надежных экспериментальных данных по угловым распределениям неупруго рассеянных нейтронов для ^{145}Nd нет, и справедливость оценок соответствующих угловых распределений подтверждается, главным образом, их подобием с аналогичными оценками для четно-четных изотопов неодима, где такие данные имеются.

3.4 Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

Оценки сечений радиационного захвата нейтронов вне области разрешенных резонансов уже были представлены на рис. 5. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия обусловлены выбором экспериментальных данных, которым отдано предпочтение при подборе модельных параметров. Как уже отмечалось выше, ENDF/B-VII и БРОНД-3 ориентировались на более поздних прецизи-

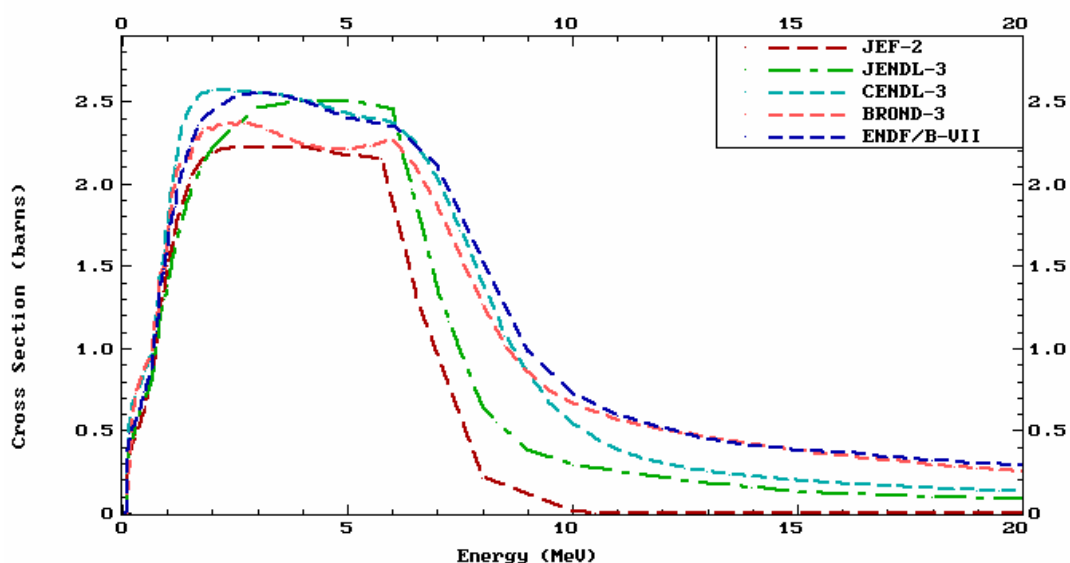


Рис. 6. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для ^{145}Nd

онные измерения сечений захвата [97W], и это позволяет считать соответствующие оценки предпочтительными.

Для энергии нейтронов ~ 14 МэВ все оценки, кроме CENDL-3, дают сечение захвата близкое к 1 мб, что хорошо согласуется с систематикой, основанной на модели прямого-коллективного захвата нейтронов [86Б]. Такая модель предсказывает энергетическую зависимость сечений захвата нейтронов с энергиями выше 10 МэВ, подобную оценкам ENDF/B-VII, и БРОНД-3, но существенно противоречащую оценкам JEFF-3.1, JENDL-3.3 и CENDL-3.

Необходимо, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 2-3 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не являются сколь-либо существенными для анализа характеристик ядерных реакторов.

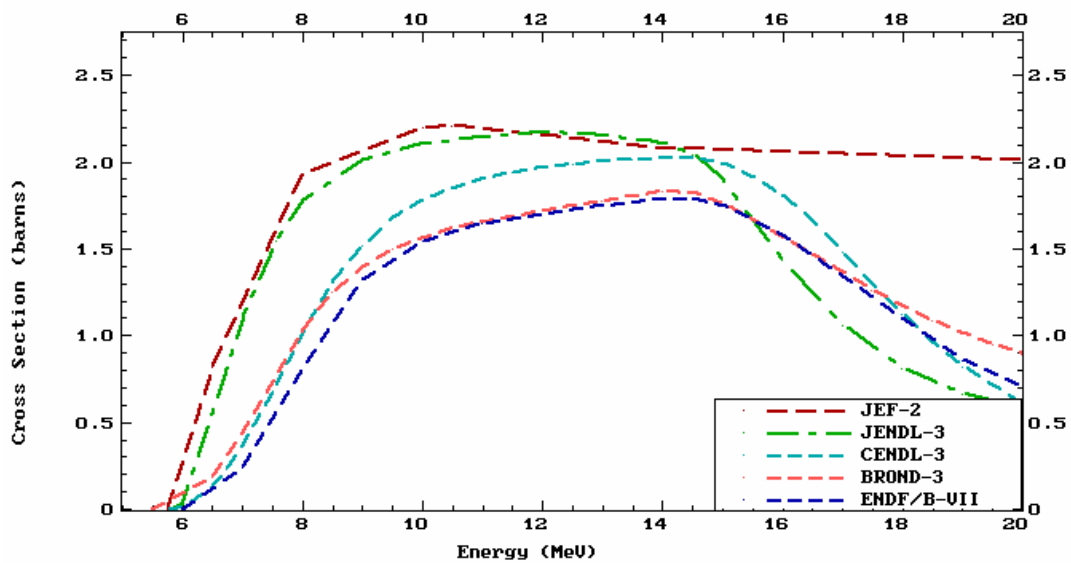


Рис. 7. Оценки сечений реакции (n,2n) в сравнении с экспериментальными данными

3.5. Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT=17)

Оценки сечений реакций (n,2n) показаны на рис. 7. Экспериментальных данных для этого сечения нет. Оценки JEFF-3.1 и JENDL-3.3 несомненно, следует признать завышенными в области энергий до 14 МэВ. Недостатки этих оценок являются прямым следствием недооценки при этих энергиях сечений неупруго рассеяния нейтронов (рис. 6). БРОНД-3 и ENDF/B-VII дают весьма близкие значения сечений, которые также хорошо согласуются с оценками сечений для близлежащих четно-четных изотопов неодима, имеющих соответствующие экспериментальные данные.

Экспериментальных данных о сечении реакции (n,3n) нет. Сечение этой реакции существенно только выше 15 МэВ. При энергии 20 МэВ сечение достигает значений 0.8 – 1.0 барн. Для согласованности, для сечения реакции (n,3n) следует принимать ту же оценку, что выбрана предпочтительной для (n,2n).

3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц

Реакции с вылетом заряженных частиц включены во все рассматриваемые оценки. Эти реакции существенны только в области энергий нейтронов выше ~ 15 МэВ, и максимальное сечение таких реакций не превышает 30 мбарн. На рис. 8 и 9 показаны оценки сечений реакций (n,p) и (n, α), соответствующие наиболее высоким выходам заряженных частиц. Разногласия между оценками реакции (n,p) сравнительно невелики, так как все оценки

неявным образом привязаны к имеющимся экспериментальным данным для энергии нейтронов ~ 14 МэВ. Для более низких и более высоких энергий расхождения оценок становятся весьма заметными. Без дополнительной информации вряд ли оправдано предпочтение какой-либо из оценок. Следует отметить, что для данного изотопа реакция (n,α) проявляется уже в резонансной области, и для нее имеются экспериментальные данные как для тепловых нейтронов, так и для нейтронов в области неразрешенных резонансов (рис. 9).

97W К. Wisshak et al., Phys. Rev., C57 (1998) 391.

86Б Т.С. Беланова и др., Радиационный захват нейтронов – Справочник, Энергоатомиздат, Москва, 1986.

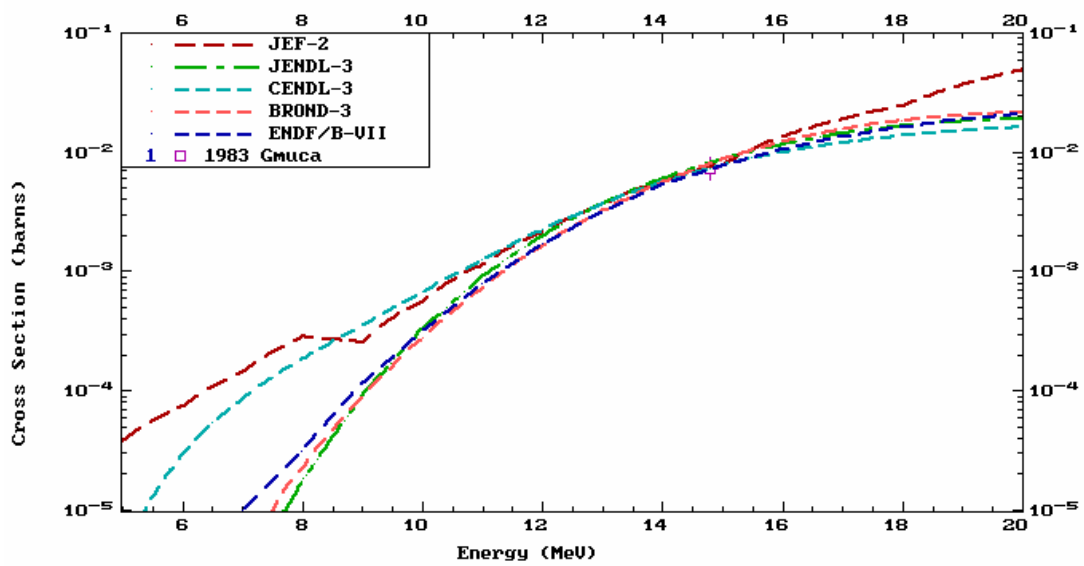


Рис. 8. Оценки сечений реакции $^{145}\text{Nd}(n,p)$

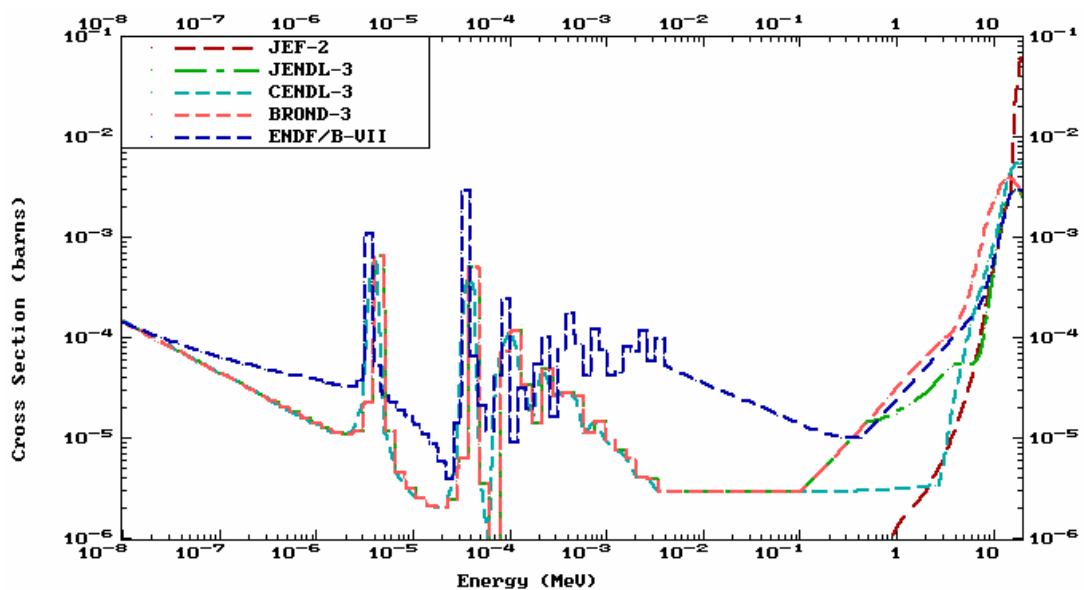


Рис. 9. Оценки сечений реакции $^{145}\text{Nd}(n,\alpha)$

4. Образование гамма-лучей

Сечения образования гамма-лучей, как правило, не содержатся в файлах для продуктов деления ядер. Однако, в ENDF/B-VII такие сечения включены вместе с сопутствующими оценками спектров гамма-лучей. Эти оценки выполнены на основе расчетов в оптико-статистической модели. Какой либо тестировки оценок еще не проводилось, поэтому пока трудно сделать какой-либо вывод об их надежности.

5. Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, в области разрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. С другой стороны, оценки JEFF-3.1 и JENDL-3.3, по-видимому, нельзя признать удовлетворительными вне резонансной области ни для сечений неупругого рассеяния, ни для сечений реакции (n,2n). Оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений. Это свидетельствует об их достаточно высокой надежности и согласованности. Для библиотеки РОСФОНД в настоящее время целесообразно принять оценку ENDF/B-VII.

Следует однако заметить, что для оценки ENDF/B-VII еще не завершена всесторонняя тестировка и некоторые уточнения данных могут быть в нее внесены в ближайшие месяцы.

Проведенный сравнительный анализ оценок и экспериментальных данных для библиотеки РОСФОНД выполнен А.В.Игнатьюком.

60.6. Неодим-146

Стабилен, содержание в естественной смеси (17.2±0.3)%.

Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $2.99 \cdot 10^{-2}$.

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для неодима-146:

JEFF-3.1 = JEFF-3.0 = JEF-2.2 – оценка Н.Gruppelaar, Е.Menapace, 1983, с дополнительными уточнениями и модификациями в 1986, 1989 и 1990;

JENDL-3.3 и ФОНД-2.2 – оценка японской рабочей группы по продуктам деления 1990; ENDF/B-VII – полностью новая оценка международной рабочей группы по оценке сечений продуктов деления с участием С.Ф.Мухабхаба и др., 2006.

Тепловые сечения, резонансный интеграл захвата и область разрешенных резонансов

В нижеследующей таблице сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы захвата следующие из данных различных файлов и рекомендованные Мухабхабом в его последнем атласе (2005).

| Библиотека | σ_{tot} | σ_{el} | σ_c | RI |
|------------|----------------|---------------|------------|-----------|
| JENDL-3.3 | 10.90 | 9.50 | 1.40 | 2.91 |
| JEFF-3.1 | | 4.34 | 1.40 | 2.82 |
| ENDF/B-VII | 12.81 | 11.32 | 1.49 | 2.75 |
| Мухабхаб | | 9.6±0.4 | 1.49±0.06 | 2.57±0.14 |

Область разрешенных резонансов в оценке ENDF/B-VII простирается до 7.5 кэВ, тогда как в JENDL-3.3 и в JEFF-3.1 до 10 кэВ. Снижение границы этой области в ENDF/B-VII обусловлено существенным пропуском уровней выше этой границы.

Исходя из изложенного и учитывая вполне обоснованную рекомендацию А.В.Игнатюка для неодима-145 и более легких изотопов неодима целесообразно включить в РОСФОНД оценку данных из ENDF/B-VII.

Автор рекомендации

М.Н.Николаев

60.7. Неодим-147

Радиоактивен ($T_{1/2}=10.96$ д), испытывает бета-распад в прометий-147, который в свою очередь тем же путем ($T_{1/2}=2.62$ д), распадается в самарий-147. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $2.23 \cdot 10^{-2}$.

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для неодима-147:

JEFF-3.1 = JEFF-3.0 = JEF-2.2 – оценка Н.Gruppelaar, Е.Menarase, 1983, с дополнительными уточнениями и модификациями в 1986, 1989 и 1990;
 JENDL-3.3 и ФОНД-2.2 – оценка японской рабочей группы по продуктам деления 1990;
 ENDF/B-VII – полностью новая оценка международной рабочей группы по оценке сечений продуктов деления с участием С.Ф.Мухабхаба и др., 2006.

Тепловые сечения, резонансный интеграл захвата и область разрешенных резонансов

В нижеследующей таблице сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы захвата следующие из данных различных файлов и рекомендованные Мухабхабом в его последнем атласе (2005).

| Библиотека | σ_{tot} | σ_{el} | σ_c | RI |
|------------|----------------|---------------|------------|-------|
| JENDL-3.3 | 510.3 | 79.3 | 431.0 | 631 |
| JEFF-3.1 | | 105.7 | 439.9 | 604.8 |
| ENDF/B-VII | 548.2 | 108.3 | 439.9 | 683.6 |
| МУХАБХАБ | | | 440±150 | |

Область разрешенных резонансов в оценке ENDF/B-VII простирается до 35эВ, тогда как в JENDL-3.3 и в JEFF-3.1 до 36 и 35.7 эВ. Различие несущественно: последний описанный резонанс имеет энергию 33.3 эВ.

Исходя из изложенного и учитывая вполне обоснованную рекомендацию А.В.Игнатюка для неодима-145 и более легких изотопов неодима целесообразно включить в РОСФОНД оценку данных из ENDF/B-VII.

Автор рекомендации

М.Н.Николаев

60.8. Неодим-148

Стабилен, содержание в естественной смеси (5.7±0.1)%.

Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $1.68 \cdot 10^{-2}$.

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для неодима-148:

JEFF-3.1 = JEFF-3.0 = JEF-2.2 – оценка Н.Gruppelaar, Е.Menapace, 1983, с дополнительными уточнениями и модификациями в 1986, 1989 и 1990;

JENDL-3.3 и ФОНД-2.2 – оценка японской рабочей группы по продуктам деления 1990;

ENDF/B-VII – полностью новая оценка международной рабочей группы по оценке сечений продуктов деления с участием С.Ф.Мухабхаба и др., 2006.

Тепловые сечения, резонансный интеграл захвата и область разрешенных резонансов

В нижеследующей таблице сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы захвата следующие из данных различных файлов и рекомендованные Мухабхабом в его последнем атласе (2005).

| Библиотека | σ_{tot} | σ_{el} | σ_c | RI |
|------------|----------------|---------------|------------|----------|
| JENDL-3.3 | 6.99 | 4.50 | 2.49 | 14.7 |
| JEFF-3.1 | | 0.66 | 2.50 | 19.93 |
| ENDF/B-VII | 6.88 | 4.30 | 2.58 | 15.9 |
| Мухабхаб | | 4.3±0.5 | 2.58±0.07 | 15.5±1.5 |

Область разрешенных резонансов в оценке ENDF/B-VII простирается до 7.5кэВ тогда как в JENDL-3.3 и в JEFF-3.1 до 8 кэВ и до 7.7 кэВ. Снижение границы этой области в ENDF/B-VII обусловлено существенным пропуском уровней выше этой границы.

Исходя из изложенного и учитывая вполне обоснованную рекомендацию А.В.Игнатюка для неодима-145 и более легких изотопов неодима целесообразно включить в РОСФОНД оценку данных из ENDF/B-VII.

Автор рекомендации

М.Н.Николаев

60.8. Неодим-150

Долгоживущий радионуклид ($T_{1/2}=0.79 \cdot 10^{19}$ лет), испытывает бета-распад в прометий-150, который, в свою очередь, тем же путем распадается в ($T_{1/2}=2.7$ ч) в самарий-150. Содержание в естественной смеси (5.7 ± 0.1)%.

Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $6.5 \cdot 10^{-3}$.

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для неодима-150:

JEFF-3.1 = JEFF-3.0 = JEF-2.2 – оценка Н.Gruppelaar, Е.Menapace, 1983, с дополнительными уточнениями и модификациями в 1986, 1989 и 1990;

JENDL-3.3 и ФОНД-2.2 – оценка японской рабочей группы по продуктам деления 1990;

ENDF/B-VII – полностью новая оценка международной рабочей группы по оценке сечений продуктов деления с участием С.Ф.Мухабхаба и др., 2006.

Тепловые сечения, резонансный интеграл захвата и область разрешенных резонансов

В нижеследующей таблице сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы захвата следующие из данных различных файлов и рекомендованные Мухабхабом в его последнем атласе (2005).

| Библиотека | σ_{tot} | σ_{el} | σ_c | RI |
|------------|----------------|---------------|------------|----------|
| JENDL-3.3 | 5.99 | 4.78 | 1.20 | 15.9 |
| JEFF-3.1 | | 4.74 | 1.18 | 15.7 |
| ENDF/B-VII | 5.67 | 4.63 | 1.04 | 15.8 |
| Мухабхаб | | 4.6±0.4 | 1.04±0.04 | 15.2±0.8 |

Область разрешенных резонансов в оценке ENDF/B-VII простирается до бкэВ тогда как в JENDL-3.3 и в JEFF-3.1 до 13.7 кэВ и до 5.12 кэВ. Снижение границы этой области в ENDF/B-VII обусловлено существенным пропуском уровней выше этой границы.

Исходя из изложенного и учитывая вполне обоснованную рекомендацию А.В.Игнатьюка для неодима-145 и более легких изотопов неодима целесообразно включить в РОСФОНД оценку данных из ENDF/B-VII.

Автор рекомендации

М.Н.Николаев

61.ПРОМЕТИЙ

61.1. Прометий-143

Радиоактивен ($T_{1/2}=265$ дн.). Захватывая орбитальный электрон превращается в неодим-143.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя по времени оценка нейтронных сечений. Экспериментальных данных для ее проверки нет. Из оценки следуют следующие значения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла:

$$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=15 \text{ барн}$$

$$RI_c=80 \text{ барна.}$$

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения реакций, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 удалить.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

61.2. Прометий-144

Радиоактивен ($T_{1/2}=1$ год). Захватывая орбитальный электрон превращается в неодим-144.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя по времени оценка нейтронных сечений. Экспериментальных данных для ее проверки нет. Из оценки следуют следующие значения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла:

$$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=35 \text{ барн}$$

$$RI_c=672 \text{ барна.}$$

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения реакций, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 удалить.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

61.3. Прометий-145

Радиоактивен ($T_{1/2}=17.7$ г.). Захватывая орбитальный электрон превращается в неодим-145.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя по времени оценка нейтронных сечений. Экспериментальных данных для ее проверки нет. Из оценки следуют следующие значения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла:

$$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=29 \text{ барн}$$

$$RI_c=458 \text{ барн.}$$

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения реакций, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 удалить.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

61.4. Прометий-146

Радиоактивен ($T_{1/2}=5.53$ г.). Захватывая орбитальный электрон превращается в неодим-146 (66%) или испытывает бета-распад в очень долгоживущий самарий-146.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя по времени оценка нейтронных сечений. Из оценки следуют следующие значения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла:

$$\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=8871 \text{ барн}$$

$$RI_c=62132 \text{ барна.}$$

Эти данные опираются на единственный приведенный в EXFORe результат Pinajian-67: $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})=8400 \pm 1680$ барн

Оцененная энергетическая зависимость сечения захвата показана на рис.1.

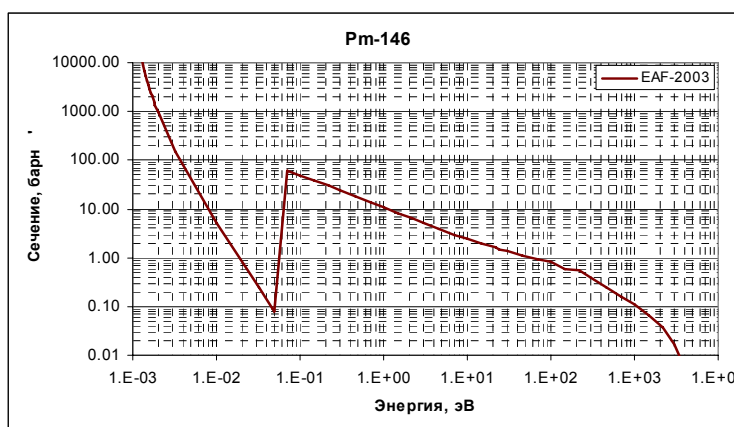


Рис.1. Сечение захвата.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения реакций, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 удалить.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

61.5. Прометий-147

Радиоактивен ($T_{1/2}=2.62$ г.). Испытывает бета-распад в самарий-147.

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $2.23 \cdot 10^{-2}$.

Имеется два полных набора нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка Группелаара и Менапаса (H Gruppelaar, E. Menapasa), 1982 г.;

оценка японской рабочей группой по продуктам деления, включенная в JENDL-3.3 и с ничтожными коррекциями принятая в 2005 г. в ENDF/B-VII подгруппой 23 международной рабочей группы по оценке нейтронных данных.

Следующие из этих оценок значения полного сечения, сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла:

| | $\sigma_t(0.0253 \text{ eV})$ | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI_c |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|
| JENDL-3.3 | 188.7 барн | 167.7 барн | 2206 барн |
| JEFF-3.1 | 180.6 барн | 180.6 барн | 2130 барн |

Приведем оценку Мухабхаба, из которой исходили оценщики, и наиболее показательные результаты измерений этих величин:

| | RI_c | |
|------------|-----------------|-----------------|
| Мухабхаб | 168.4 ± 3.5 | 2064 ± 100 |
| Mowatt-71 | 94 ± 10 | |
| Cabell-70 | 96 ± 18 | 1274 ± 60 |
| Fenner-67 | 82 ± 8 | 720 (от 0.2 эВ) |
| Schuman-62 | 124 ± 13 | 1200 |

Отметим, что Мухабхаб использовал результат измерения сечения захвата Гаггейером¹ не найденный нами в EXFORe. Заметим далее, что в 2004 г. Мухабхаб подтвердив свою оценку теплового сечения указал меньшее значение резонансного интеграла: 1274 ± 66 барн, что соответствует результату Кабелла.

Высокие значения сечения захвата тепловых нейтронов (181 барн) и резонансного интеграла (2141 барн) следуют и из оценки EAF-2003. Заметим также, что полное сечение в точности совпадает с результатом измерения его Ануфриевым (1976).

В связи с изложенным представляется целесообразным изменить параметры связанного состояния и 1-го резонанса так, чтобы не противореча измерению полного сечения получить более правдоподобные значения теплового сечения и резонансного интеграла. Для корректного выполнения этой операции следовало бы подгонять параметры так, чтобы наилучшим образом описать не только сечение при 0.0253 эВ и резонансный интеграл, но и энергетическую зависимость полного сечения, измеренную в работе Ануфриева и др. до 100 эВ. Не имея такой возможности, мы подобрали параметры вручную так, что получилось:

$$\sigma_t(0.0253 \text{ eV}) = 187 \text{ барн}$$

$$\sigma_c(0.0253 \text{ eV}) = 101 \text{ барн}$$

$$RI_c = 1343 \text{ барна.}$$

¹ Gaggeier, JIN, 38, 205 (76)

Это величины уже не противоречат приведенным экспериментальным данным столь разительно.

Энергетическая зависимость оцененного сечения захвата показана на рис.1. Видно, что и в области быстрых нейтронов оценка завышена относительно экспериментальных данных процентов на 40.

На рис. 2 приведены оцененные полные сечения в сравнении с данными Ануфриева. Малиновая кривая соответствует данным, непосредственно приведенным в EXFORe. Синяя кривая получена из данных о функции пропускания через образец толщиной 0.00175 ядер/ барн. Видно, что сравнение с данными Ануфриева не позволяют отдать предпочтение прежней или модифицированной оценке.

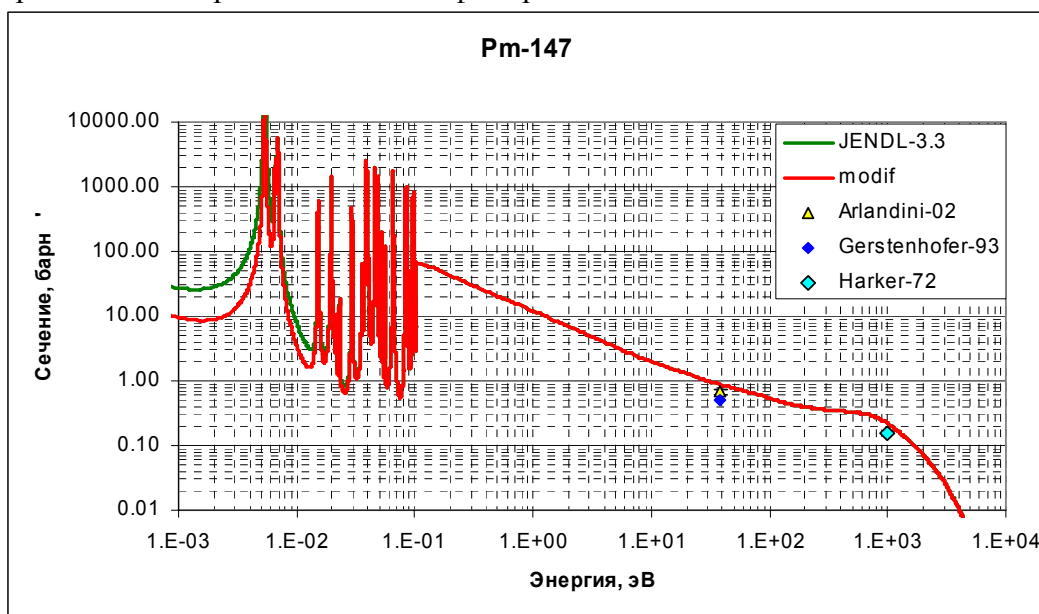


Рис.1. Сечение захвата.

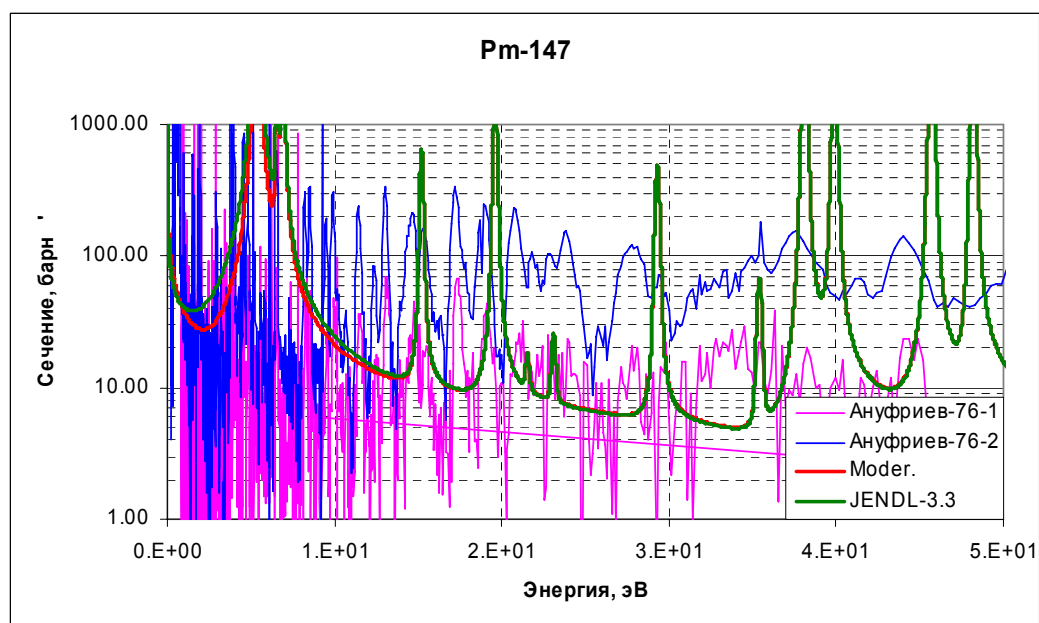


Рис.2. Полное сечение.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку с модифицированными параметрами первых резонансов. Отметить вероятную переоценку сечения захвата вне резонансной области, возможно, до 1.5 раз.

Включить в оценку секцию 9/16 с вероятностями образования основного и метастабильного состояний прометия-148 на основе данных EAF-2003.

Автор заключения

Николаев М.Н.

61.6. Прометий-148

Радиоактивен ($T_{1/2}=5.37$ дн.). Путем бета-распада превращается в самарий-148.

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $4.9 \cdot 10^{-10}$.

Имеется два полных набора нейтронных данных:

JEFF-3.1 – оценка Группелаара и Менапаса (H Gruppelaar, E. Menapace), 1982г.;

оценка японской рабочей группой по продуктам деления, включенная в JENDL-3.3 и с ничтожными коррекциями принятая в 2005 г. в ENDF/B-VII подгруппой 23 международной рабочей группы по оценке нейтронных данных.

В EAF-2003 содержится последняя по времени оценка нейтронных сечений.

Из оценок следуют следующие значения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла, сравниваемые ниже с немногими имеющимися экспериментальными данными и оценкой Мухабхаба:

| | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI_c |
|-------------|-------------------------------|--------------------|
| Мухабхаб-84 | 2000 ± 1000 | |
| JENDL-3.3 | 2000 барн | 3000 барн |
| JEFF-3.1 | 2000 барн | 40010 барн |
| EAF-2003 | 1000 барн | 2500 барн |
| Kiroujac-73 | | $3600 \pm 2400^*)$ |
| Mathes-63 | 1400 барн | |
| Schuman-62 | 3000 ± 2000 | 44000 барн |

^{*)} Принимая $RI_c(^{147}\text{Pm})=2280$ б; опираясь на оценку $RI_c(^{147}\text{Pm})=1300$ б, получим $RI_c(^{148}\text{Pm})=2050$ б

Сравнение с этими экспериментальными данными позволяет отдать предпочтение оценке JENDL-3.3, опирающейся на более надежное измерение резонансного интеграла.

На рис.1. сравниваются оцененные энергетические поведения сечения захвата. Резонанс в JENDL-3, видимо, выдуман для получения желаемых теплового сечения и резонансного интеграла.

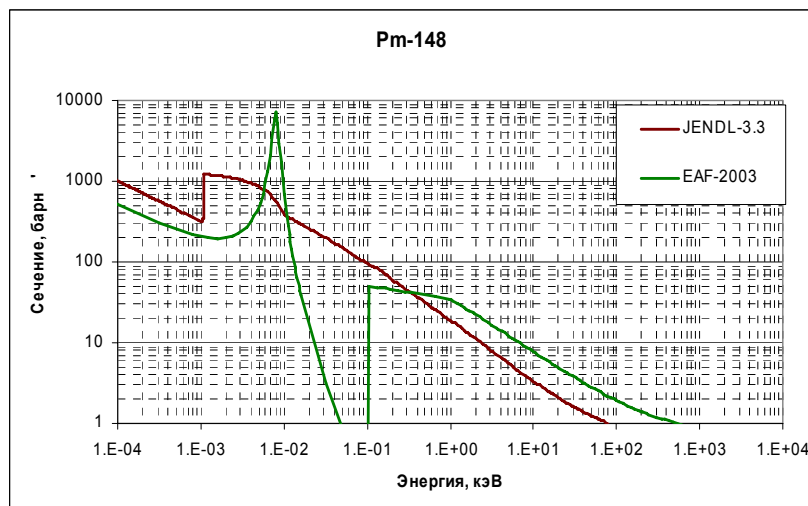


Рис.1. Сечение захвата.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из JENDL-3.3. Дополнить их файлом MF=10 с MT=4 из EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

61.7. Прометий-148-м

Радиоактивен ($T_{1/2}=41.3$ дн.). Путем бета-распада превращается в самарий-148. Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $1.0 \cdot 10^{-9}$. Имеется три полных набора оцененных нейтронных данных: CENDL-3 - оценка Жуанга и Шена (You-Xiang Zhuang, Qing-Biao Shen), 2001 г., включенная и в ENDF/B-VII; JENDL-3.3 - оценка японской рабочей группой по продуктам деления, 1990 г. JREFF-3.1 - оценка Группелаара и Менапаса (H Gruppelaar, E. Menapace), 1982г.; Кроме того, в EAF-2003 содержится оценка нейтронных сечений.

И в японской и в китайской оценках задана область разрешенных резонансов, содержащая один и тот же единственный резонанс, обнаруженный в работе Кируяка². В японской оценке эта область простирается до 0.6 эВ, после чего следует область неразрешенных резонансов; в китайской – до 1 эВ; область неразрешенных резонансов отсутствует.

Из оценок следуют следующие значения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла, сравниваемые ниже с немногими имеющимися экспериментальными данными из EXFORa и оценкой Мухабхаба:

| | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI_c |
|-------------|-------------------------------|----------------|
| JENDL-3.3 | 10648 барн | 4245 барн |
| CENDL-3 | 10669 барн | 4786 |
| JEFF-3.1 | 10616 барн | 3608 барн |
| EAF-2003 | 10677 барн | 3639 барн |
| Мухабхаб-84 | 10600 | 3600±2400 барн |
| Miyano-69 | 27000±2000 барн | |

Кроме работы Мийяно Мухабхаб ссылается на масс-спектрометрические измерения Мэтьюса (Mathews, 1963) и активационные измерения Шумана (Schuman, 1962), данные которых в EXFORe отсутствуют. Поэтому оценка Мухабхаба достаточно весома. Оценки тепловых сечений и резонансных интегралов практически совпадают друг с другом и оценкой Мухабхаба : различия много меньше погрешностей.

В области быстрых нейтронов японская и китайская оценки заметно различаются и между собой и с ранней оценкой Группелаара и Менапаса, хотя едва ли это различие может иметь какое-либо практическое значение. Экспериментальных данных для обоснования этих расчетных оценок, разумеется, нет.

На рис.1. сравниваются оцененные энергетические поведения сечения захвата.

² Kirouac et al, Nucl. Sci. Eng. 52, 310, 1973.

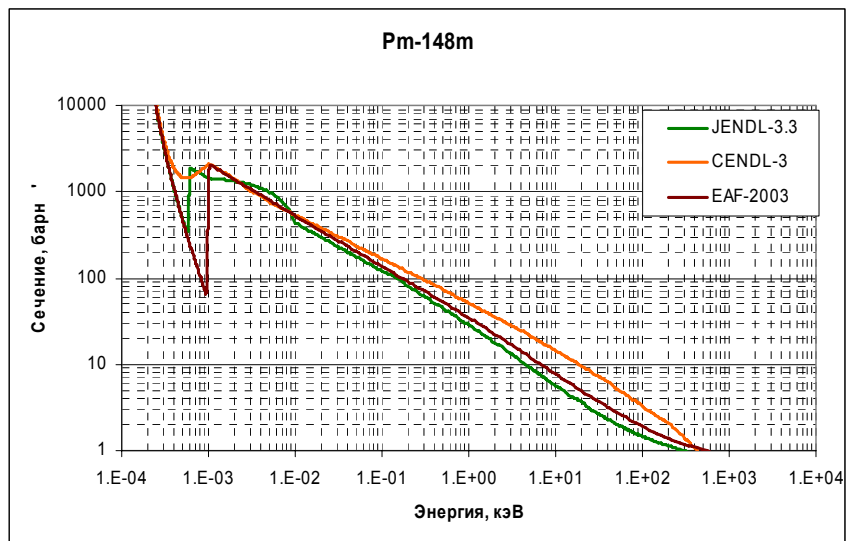


Рис.1. Сечение захвата.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из CENDL-3 с маленькими корректировками сделанными при включении этой оценки в ENDF/B-VII. Дополнить оценку файлом 10/4 с сечением образования основного состояния прометия-148, взяв данные из EAF-2003.

Автор рекомендации
Николаев М.Н.

61.8. Прометий-149

Радиоактивен ($T_{1/2}=53.1$ ч.). Путем бета-распада превращается в самарий-149.

Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $1.05 \cdot 10^{-2}$.

Имеется два полных набора оцененных нейтронных данных:

JEFF-3.1 - оценка Группелаара и Менапаса (H Gruppelaar, E. Menapace), 1982г.;

JENDL-3.3 - оценка японской рабочей группой по продуктам деления, 1990 г., включенная также и в ENDF/B-VII.

Кроме того, в EAF-2003 содержится оценка нейтронных сечений.

Область разрешенных резонансов отсутствует в обеих оценках. В японской оценке введена область неразрешенных резонансов до 100 кэВ.

Из оценок следуют следующие значения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла, сравниваемые ниже с немногими имеющимися экспериментальными данными из EXFORa и оценкой Мухабхаба:

| | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI_c |
|--------------|-------------------------------|----------------------|
| JENDL-3.3 | 1400 барн | 354 барн |
| JEFF-3.1 | 1400 барн | 1155 барн |
| EAF-2003 | 1479 барн | 17200 барн |
| Мухабхаб-84 | 1400 ± 300 | 3600 ± 2400 барн |
| Gaeggeler-76 | 1630 ± 160 барн | |
| Mowatt-68 | 1000 ± 400 барн | |
| Кондуоров-65 | 1700 ± 300 барн | |

Понятно, что оценщики принимают близкие значения теплового сечения (хотя, похоже, несколько заниженные в свете результата Геггелера), но разброс оценок резонансного интеграла экстремально велик.

На рис.1. сравниваются оцененные энергетические поведения сечения захвата.

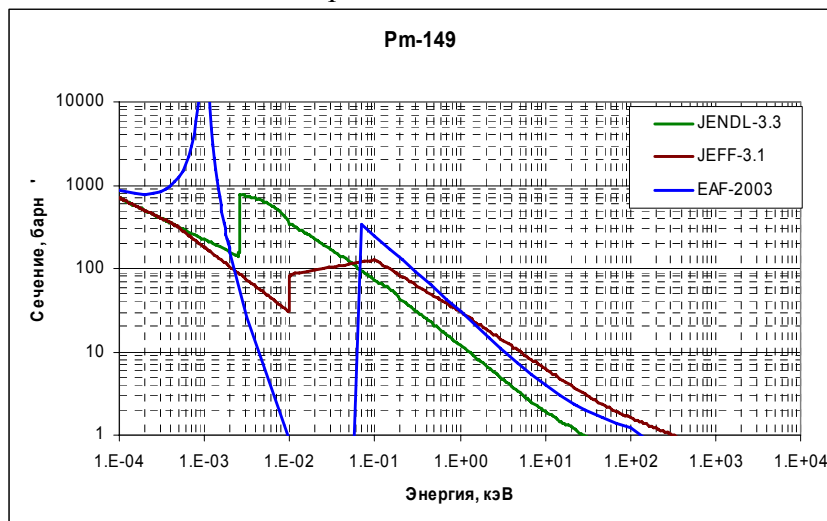


Рис.1. Сечение захвата.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из JENDL-3. Дополнить файл секцией 9/16 с вероятностями образования прометия-148 в основном и метастабильном состояниях. Взяв данные из EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

61.9. Прометий-151

Радиоактивен ($T_{1/2}=28.4$ ч.). Путем бета-распада превращается в долгоживущий самарий-151. Продукт деления. Выход при делении урана-235 тепловыми нейтронами $4.20 \cdot 10^{-3}$.

Имеется два полных набора оцененных нейтронных данных:

JEFF-3.1 - оценка рабочей группы по продуктам деления 1982г, выполненная для ENDF/B-V;

в ENDF/B-VII. - оценка Хермана, Обложинского, Сарера и Мухабхаба (Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabgh), 2005 г.

Область разрешенных резонансов имеется только в ENDF/B-VII (10 фиктивных резонансов от 0.03 до 123 эВ).

Из оценок следуют следующие значения сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла:

| | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI_c |
|--------------|-------------------------------|-----------|
| ENDF/B-VIIb2 | 219655 барн | 3084 барн |
| JEFF-3.1 | 700 барн | 2003 барн |
| EAF-2003 | 158 барн | 1847 барн |
| Mowatt-68 | 700 барн | |

Поскольку тепловое сечение захвата является наиболее важной характеристикой взаимодействия нейтронов с продуктом деления, приемлемой является только оценка JEFF-3.1

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из JENDL-3.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

62.САМАРИЙ

Известно 11 стабильных и долгоживущих изотопов самария, из которых 7 сохранились в природе. Два радиоактивных изотопа (^{151}Sm и ^{153}Sm) образуются в результате деления тяжелых ядер. В качестве продуктов деления образуются также стабильные изотопы ^{147}Sm , ^{149}Sm , ^{152}Sm и ^{154}Sm . Легкие радиоактивные изотопы (^{145}Sm и ^{146}Sm) образуются из природных изотопов в результате нейтронных реакций. В библиотеке РОСФОНД представлены данные для всех этих изотопов. При обосновании выбора оцененных данных особое внимание уделялось изотопам, обладающим аномально высокими сечениями поглощения (^{149}Sm и ^{151}Sm).

Нейтронные данные для изотопов самария представлены в различных библиотеках со следующей полнотой:

ФОНД-2.2 – все 11 изотопов (оценки 90-х годов).

БРОНД-2 – все стабильные изотопы (оценки конца 80-х годов).

JENDL-3.3 – 9 изотопов (кроме ^{145}Sm и ^{146}Sm) - оценки 90-х годов, близкие к содержащимся в ФОНД-2.2).

JEFF-3.1 - 9 изотопов (кроме ^{145}Sm и ^{146}Sm)- оценки, как правило, 80-х годов.

ENDF/B-VII b1.2 - 9 изотопов (кроме ^{145}Sm и ^{146}Sm)- оценки для основных изотопов пересмотрены в 2002 -2005 г.г.

EAF-2003=JEFF-3.1(АСТ)- все 11 изотопов, оценки 2003 г.

Файлы ядерных данных отечественной библиотеки БРОНД-2 для изотопов самария были сформированы в начале восьмидесятых годов. В связи с этим в библиотеку ФОНД-2.2 были включены более поздние оценки из библиотеки JENDL-2. За прошедшие годы появился ряд новых экспериментальных данных по полным нейтронным сечениям, сечениям радиационного захвата и (n,2n) реакций, а также существенно уточнились теоретические модели, привлекаемые для расчетов нейтронных сечений. Были выполнены также более поздние зарубежные оценки рекомендуемых ядерных данных для многих продуктов деления, включенные в библиотеки ENDF/B-VI, CENDL-3, JENDL-3.3 и JEFF-3.1. Сравнение различных оценок, проведенное Рабочей группой по международной координации оценок ядерных данных, показало, что сечения радиационного захвата нейтронов, усредненные по стандартному спектру быстрого реактора, достаточно хорошо согласуются во всех библиотеках.

В то же время разногласия оценок сечений неупругого рассеяния нейтронов и сечений (n,2n) реакций оказались значительно большими. Эти разногласия обусловлены, в первую очередь, весьма ограниченным объемом экспериментальных данных о сечениях неупругого рассеяния взаимодействия нейтронов, а также использованием слишком упрощенных моделей ядерных процессов в ранних оценках нейтронных сечений. В настоящее время Рабочей группой по координации оценок проводится уточнение нейтронных сечений для всех изотопов самария, накапливающихся в продуктах деления. Уточненные оценки включены в библиотеку БРОНД-3 и новую версию библиотеки ENDF/B-VII. Эти новые оценки, составленные при консультации и российских специалистов, будут внимательно рассматриваться при отборе оцененных данных для библиотеки РОСФОНД.

62.1. Самарий-144

Содержание в природной смеси -3.1%.

В ФОНД-2.2 – оценка А.М.Манн, 1980 (из ENDF/B0-VI.1).

В БРОНД-2 – оценка А.В.Игнатюка и М.В.Улаевой, 1989 г.

В JENDL-3.3- оценка М.Kawai et.al. , 1990 (введена область разрешенных резонансов до 10 кэВ).

JEFF-3.1=ФОНД-2.2.

ENDF/B-VII b1.2 – оценка R.Q. Wright, F.M.Mann, 1994 (введена область разрешенных резонансов до 143 эВ).

Сечения захвата тепловых нейтронов в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII b1.2 совпадают между собой и с рекомендацией Мухабхаба¹ (1.64 барна). Резонансные интегралы близки друг к другу (1.91 барна и 1.86 барна), но ниже рекомендуемого Мухабхабом¹ значения (2.38±0.17барна).

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется оценка М.Kawai et.al. , 1990 (JENDL-3.3), как наиболее детально описывающая энергетическое поведение сечений.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

62.2. Самарий-145

Радиоактивен ($T_{1/2}=340$ дн.). Испытывает позитронный распад в ^{145}Pm , который с периодом $T_{1/2}=17.7$ г. распадается в стабильный ^{145}Nd .

В ФОНД-2.2 – оценка J.Корецку, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

JEFF-3.1=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003). Файл MF=10 удален, т.к. изомеры, сечения которых там содержатся, весьма короткоживущи. Секции MT=17 и MT=22 внесены в MF=3.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

62.3. Самарий-146

Радиоактивен ($T_{1/2}=1.03 \cdot 10^8$ г.). Испытывает альфа-распад в стабильный ^{142}Nd .

В ФОНД-2.2 – оценка J.Корецку, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

JEFF-3.1=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003). Файл MF=8 удален.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

¹ S.F.Mughabghab. Thermal Neutron Cross Sections, Resonance integrals and G-factors. INDC(NDS)-440, IAEA,2003

62.4. Самарий-147

Содержание в природной смеси -15.0%.

Радиоактивен ($T_{1/2}=1.06 \cdot 10^{11}$ г.). Испытывает альфа-распад в стабильный ^{143}Nd .

В ФОНД-2.2 – оценка из JENDL-2, пересматривавшаяся в 1990,1993,1997 и 1999г.г. Область разрешенных резонансов сокращена с 1200 эВ до 1000эВ; введена область неразрешенных резонансов из БРОНД-2 до 100 кэВ

В БРОНД-2 – оценка А.В.Игнатьюка и И.В.Кравченко, 1985 г. Область разрешенных резонансов до 600 эВ; неразрешенных – до 600 кэВ.

В JENDL-3.3- оценка 1984, существенно пересмотренная в 1990 и 1993 г.г. Область разрешенных резонансов до 1200 эВ; неразрешенных – до 100 кэВ.

JEFF-3.1 – оценка H. Gruppelaar and E. Menarace, 1984 -1986 г.г. Область разрешенных резонансов – до 768 эВ, неразрешенных – до 70 кэВ.

ENDF/B-VIIb1.2 – оценка Kim,Herman,Oblozinsky,Oh,Mughabghab, 2005. Область разрешенных резонансов – до 2000 эВ, неразрешенных – до 122 кэВ.

Последняя оценка не только представляет энергетические зависимости сечений детальнее прежних, но и существенно полнее по номенклатуре: в ней представлены энергоугловые распределения продуктов нейтронных реакций, включая гамма-излучение.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется оценка Kim,Herman,Oblozinsky,Oh,Mughabghab, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

62.5. Самарий-148

Содержание в природной смеси -11.3%.

Радиоактивен ($T_{1/2}=7 \cdot 10^{15}$ г.). Испытывает альфа-распад в стабильный ^{144}Nd .

В ФОНД-2.2 – оценка из JENDL-2, 1984, пересматривавшаяся в 1990,1993,1997г.г. Область разрешенных резонансов до 5500эВ; область неразрешенных резонансов до 100 кэВ

В БРОНД-2 – оценка С.М.Захаровой и А.В.Игнатьюка, 1987 г. Область разрешенных резонансов до 600 эВ;

В JENDL-3.3- оценка 1984 -1993г.г. Область разрешенных резонансов до 5500 эВ; неразрешенных – до 100 кэВ.

JEFF-3.1 – оценка H. Gruppelaar and E. Menarace, 1982 -1989 г.г. Область разрешенных резонансов отсутствует

ENDF/B-VIIb1.2 – оценка W.G.Mughabghab, 2005 на основе JENDL-3.3. Граница области разрешенных резонансов снижена с– до 5500 эВ до 1000 эВ, область неразрешенных резонансов – до 100 кэВ. Введены небольшие корректировки в нерезонансной области. Как и прежде полные данные об энерго-угловых распределениях продуктов нейтронных реакций отсутствуют, однако угловые распределения и спектры вторичных нейтронов определены.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется оценка Mughabghab, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2). Дополнить файл секцией 9/103 с вероятностями образования прометия-148 в основном и изомерном состояниях, взяв данные из EAF-2003.

62.6. Самарий-149

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z=62$ -зарядовое число;
- 1.2. $A=149$ (атомный вес);
- 1.3. $AWR = 207.185$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Стабилен, содержание в естественной смеси 13.82 %;
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт |
|-----|-----------------|---------|---------------------------|--------------|
| 04 | n,n' | -.00482 | .0048522 | Sm-149 |
| 16 | (n,2n) | -5.596 | 5.6334 | Sm-148 |
| 17 | (n,3n) | -13.581 | 13.6718 | Sm-147 |
| 22 | (n,n α) | 1.145 | - | Nd-145 |
| 28 | (n,np) | -8.268 | 8.3233 | Pm-148 |
| 102 | n, γ | 8.258 | - | Sm-150 |
| 103 | (n,p) | -4.055 | 4.0825 | Pm-149 |
| 104 | (n,d) | -6.086 | 6.1261 | Pm-148 |
| 105 | (n,t) | -5.3872 | 5.4226 | Pm-147 |
| 107 | (n, α) | -7.0575 | 7.1038 | Nd-146 |

2. Нейтронные сечения в резонансной области (MF=2).

2.1. Область разрешенных резонансов.

В оценке БРОНД-2 верхняя граница области разрешенных резонансов была принята равной 120 эВ, тогда как в более поздних оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII (=ENDF/B-VI.8) эта граница увеличена до 520 эВ. Оценка JENDL-3.3 для области разрешенных и неразрешенных резонансов включена без изменений в CENDL-3, и оценка ENDF/B-VI.8 – в JEFF-3.1 (=JEFF-3.0). Все оценки нейтронных сечений опираются на параметры нейтронных резонансов, приведенные в компиляции Мугабгаба [84М], но имеются разногласия в определении спинов резонансов, не идентифицированных экспериментально, в выборе параметров отрицательного резонанса, определении радиуса потенциального рассеяния, а также некоторые разногласия нейтронных и радиационных ширин резонансов в пределах погрешности экспериментальных данных.

Во всех оценках для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближение MLBW. Радиус потенциального рассеяния выбран равным 7.52 ферми в JENDL-3.3 и 8.3 ферми - в ENDF/B-VII. Радиационные ширины резонансов, включенные в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, показаны на рис. 1. Можно видеть, что расхождения средних радиационных ширин оказываются весьма заметными: 62.0 мэВ для JENDL-3.3 и 78.5 мэВ для ENDF/B-VII.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице совместно с имеющимися экспериментальными данными:

| | | | |
|--------|-----------|------------|------------------------|
| Оценка | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | Эксперимент [84М, 03М] |
|--------|-----------|------------|------------------------|

| | | | |
|----------------------|-------|-------|----------------|
| полное | 40330 | 40336 | -- |
| упругое | 175.8 | 191.1 | -- |
| захвата | 40150 | 40144 | 40140±600 барн |
| резонансный интеграл | | | |
| захвата выше 0.5 эВ: | 3490 | 3477 | 3390±200 барн |

Обе оценки в пределах погрешности согласуются с экспериментальными значениями сечения радиационного захвата и резонансного интеграла захвата нейтронов.

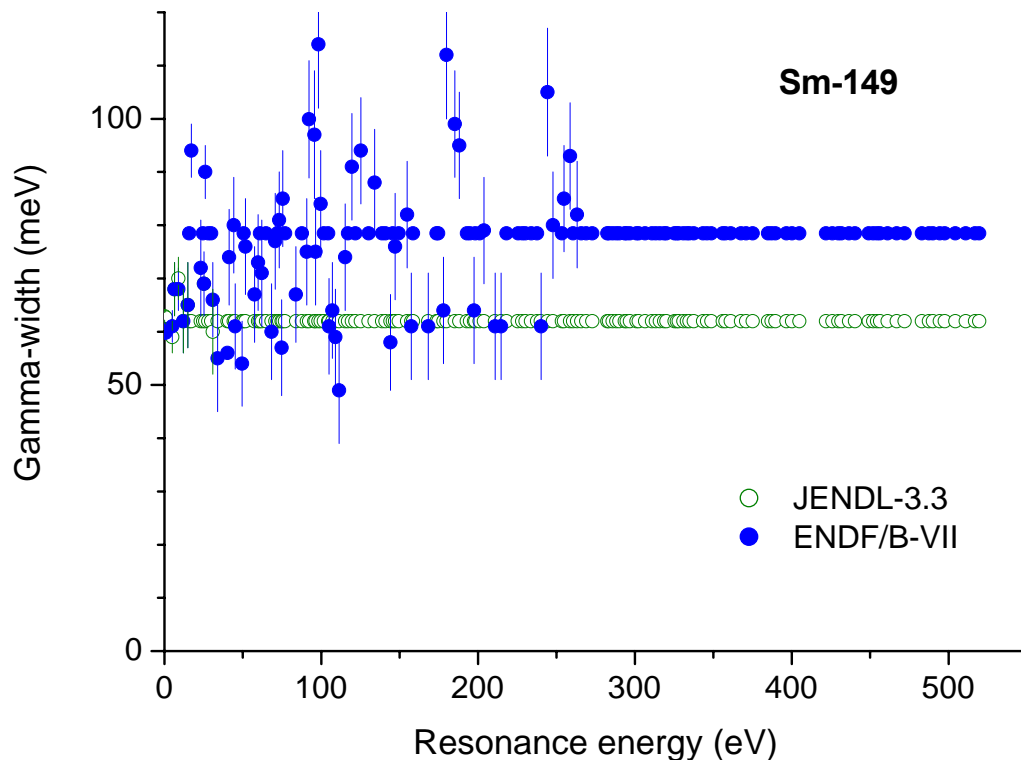


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3 (кружки) и ENDF/B-VII (сплошные точки)

2.2. Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s -резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s -резонансов в области энергий до 120 эВ соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0=2.1 \pm .1$ эВ и аналогичной аппроксимации нейтронных силовых функций $S_0 = (6.2 \pm 1.0) 10^{-4}$.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов обычно привлекается анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Так как число резонансов и нейтронные силовые функции в рассматриваемых оценках очень близки (рис. 2), то мы ограничимся только анализом резонансов из ENDF/B-VII, результаты которого представлены на рис. 3. Если ограничиться областью резонансов до 120 эВ, то для наблюдаемых 53 резонансов мы получим оценку числа резонансов с учетом пропуска $N_0=80 \pm 5$ и соответствующие оценки средних параметров: $D_0=1.50 \pm .12$ эВ и $S_0 = (6.0 \pm 0.5) 10^{-4}$. Эти значения параметров близки к значениям, использованным в БРОНД-2 и принятым в качестве рекомендованных в RIPL [03R]. В то же время, если рассматривать все резонансы в области энергий до 520 эВ, то для наблюдаемых 158 резонансов получим оценку $N_0=213 \pm 10$, которой соответствуют среднее расстояние

между резонансами $D_0=2.42 \pm .10$ эВ и нейтронная силовая функция $S_0 = (4.3 \pm 0.5) 10^{-4}$. Эти значения близки к результатам анализа, выполненного Мугабгом и др. [00S] для резонансной области файла ENDF/B-VI.8, и которая была включена без изменений в более поздний файл ENDF/B-VII.

Приведенные результаты анализа показывают, что определение средних резонансных параметров достаточно сильно зависит от выбора границ резонансной области и погрешности параметров, по-видимому, могут оказаться большими, чем декларируемые в оригинальных работах. Эти разногласия в определении погрешностей параметров необходимо иметь в виду при рассмотрении различий в оценках нейтронных сечений в области неразрешенных резонансов.

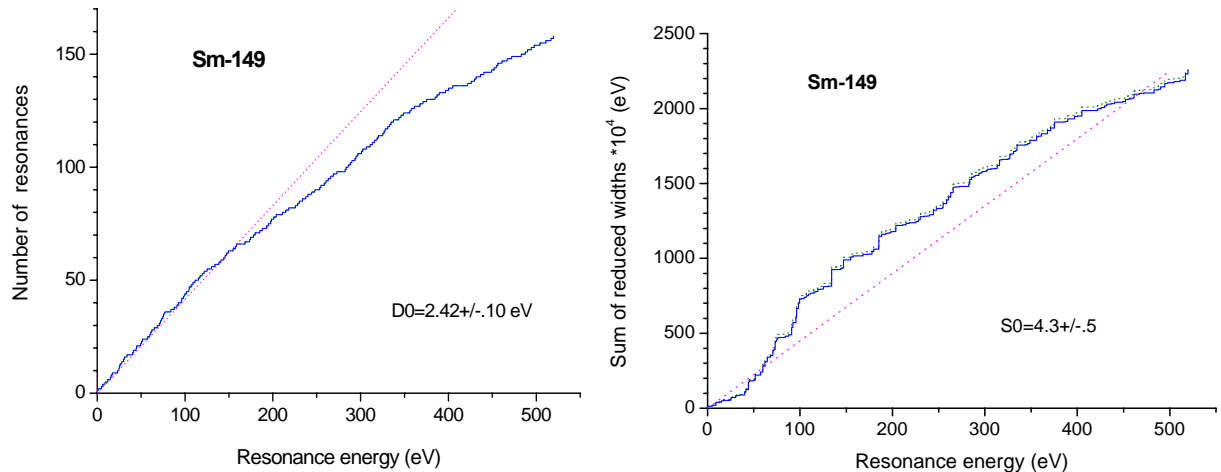


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин

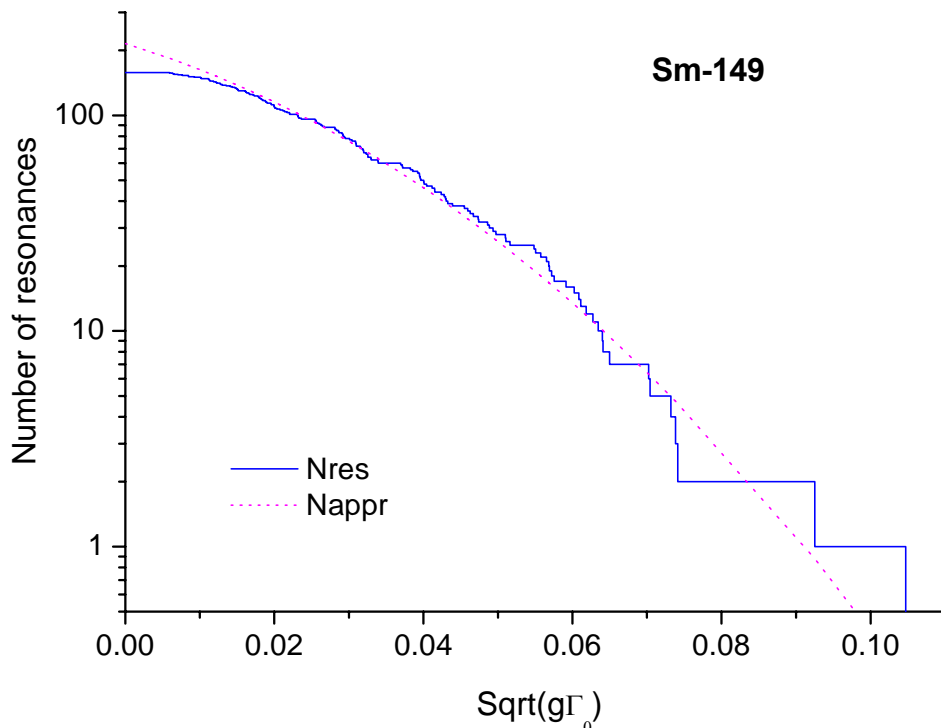


Рис. 3. Анализ пропуска резонансов

На рис. 4 оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для области разрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными по полным нейтронным сечениям. На рис. 5 показано сравнение оценок для сечений радиационного захвата нейтронов. Можно видеть, что обе оценки дают очень близкие результаты как для сечений нейтронных реакций в резонансной области.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что оценки параметров разрешенных резонансов в файлах JENDL-3.3 и ENDF/B-VII являются равноценными и нет оснований для предпочтения какой-либо из них.

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в оценках в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII принята одинаковой 100 кэВ. В БРОНД-2 была принята граница 520 кэВ, которую видимо следует признать слишком высокой. Во всех оценках для расчета нейтронных сечений в области неразрешенных резонансов используется одноуровневая формула Брейта-Вигнера.

Ниже приведены параметры неразрешенных резонансов, принятые в различных оценках для энергии 10 кэВ:

| Оценка | D0(эВ) | S0(10 ⁻⁴) | S1(10 ⁻⁴) | S2(10 ⁻⁴) | Gg(мэВ) | R(ферми) |
|------------|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|----------|
| БРОНД-2 | 1.90 | 4.80 | .50 | 4.8 | 64.0 | 7.5 |
| JENDL-3.3 | 1.27 | 4.60 | .30 | 4.9 | 62.0 | 7.9 |
| ENDF/B-VII | 2.45 | 4.53 | 1.00 | 4.0 | 78.5 (40.0 для p-волны) | 8.3 |

Следует отметить, что в оценке ENDF/B-VII радиационная ширина для p-волны была принята в два раза меньше чем для s- и d-волн, тогда как в остальных оценках радиационная ширина взята независимой от орбитального момента. Обращают на себя внимание также значительные расхождения нейтронных силовых функций p-волны и средних расстояний между резонансами.

Разногласия выбранных параметров неразрешенных резонансов приводят к значительным расхождениям оценок нейтронных сечений. На рис. 6 показано сравнение различных оценок полных нейтронных сечений. Прямых экспериментальных данных по полным сечениям для ¹⁴⁹Sm в области неразрешенных резонансов не существует, но для сравнения с оценками можно использовать имеющиеся данные для естественной смеси изотопов [54O, 57E, 70S], а также данные для близлежащего изотопа ¹⁵⁰Sm [93W]. Так как расчеты по оптической модели указывают на очень малое различие полных нейтронных сечений для соседних ядер, то подобное сравнение оценок с экспериментальными данными близлежащих представляется вполне оправданным. Все три независимых оценки полных сечений оказываются достаточно близкими между собой и согласующимися с экспериментальными данными для близлежащих ядер.

На рис. 7 показано аналогичное сравнение оценок для сечений радиационного захвата нейтронов. Для радиационного захвата имеются значительное противоречие ранних экспериментальных данных [75H, 77K, 81M] с результатами более поздних измерений [86M, 93G, 93W]. Очевидно, что оценка БРОНД-2 ориентировалась на первую группу данных, тогда как оценка JENDL-3.3 и ENDF/B-VII - на вторую. Так как измерения [86M, 93G, 93W] являются более надежными и хорошо согласующиеся между собой, следует считать оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII более достоверными. Между ними нет существенных разногласий, и оценку ENDF/B-VII для области неразрешенных резонансов следует признать предпочтительной как более позднюю..

54O A.Okazaki et al., Phys. Rev., v. 93 (1954) 461.

57E P.A.Egelstaff, Proc. Phys. Soc., v. A70 (1957) 51.

70S G.L.Sherwood et al., Nucl. Sci. Eng., v. 39 (1970) 67.

93W K.Wisshak et al., Phys. Rev., v. C48 (1993) 1401.

84M S.Mughabghab, Neutron Cross Sections, Academic Press, New York, 1984, part B.

00S S.Oh, J.Chang, S.Mughabghab, Report BNL-NCS-67469 (2000).

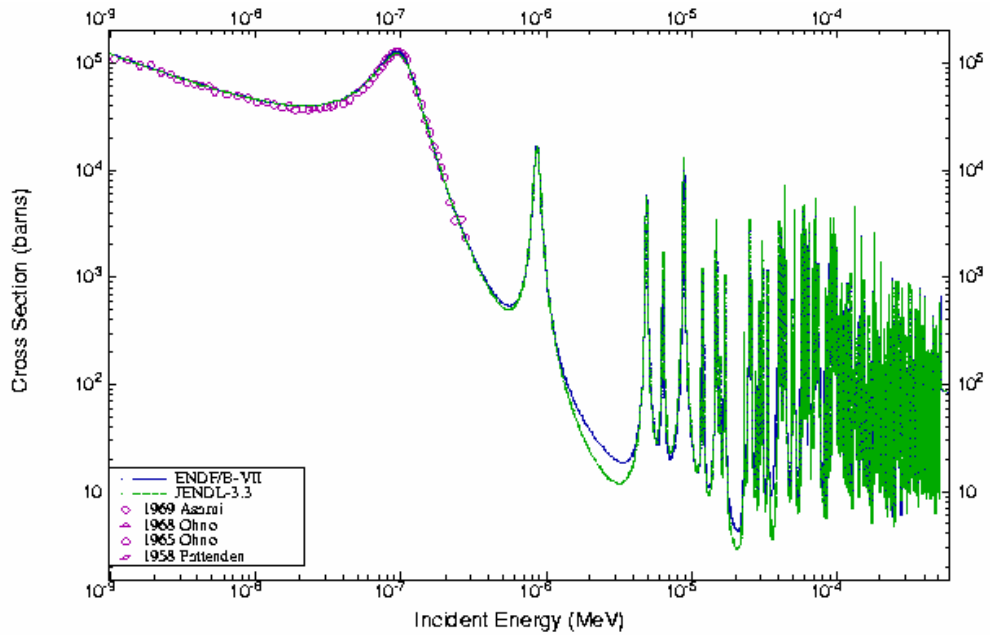


Рис. 4. Оценки полного нейтрона сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

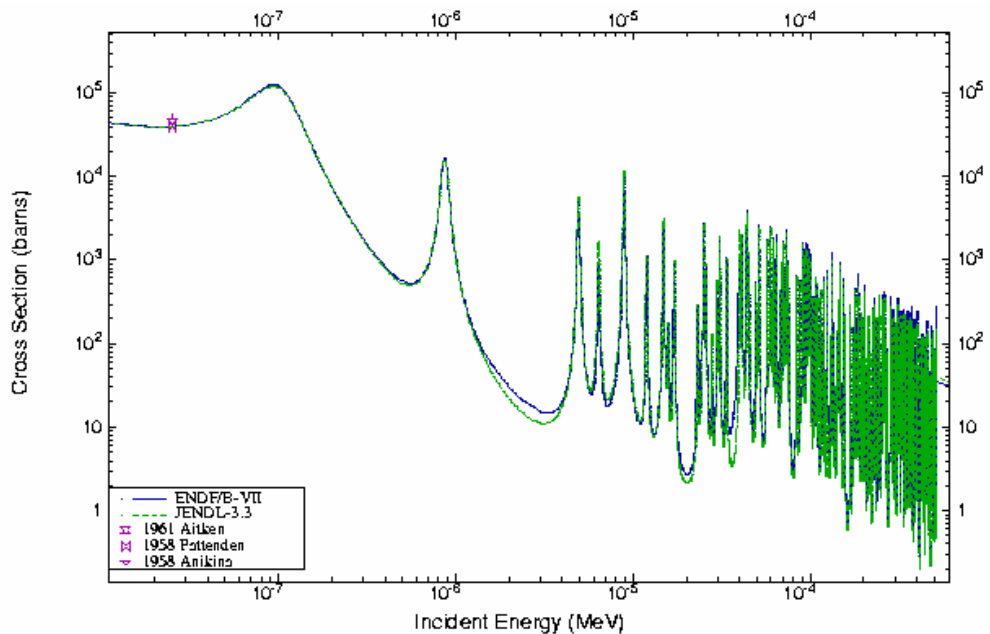


Рис. 5. Оценка сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов

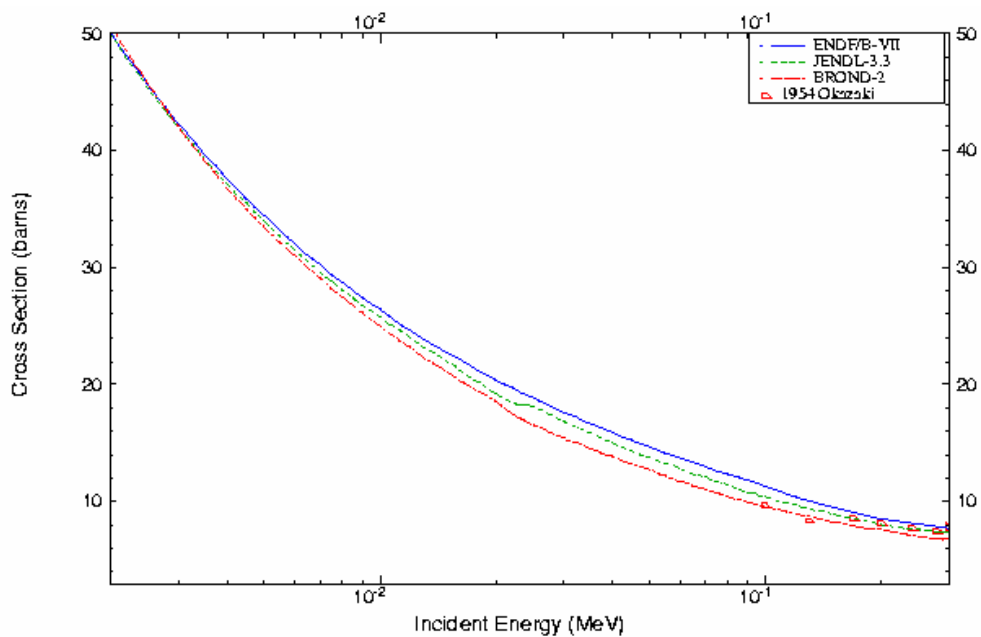


Рис. 6. Оценки полного нейтронного сечения в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными для естественной смеси изотопов самария [54O, 57E, 70S] и для изотопа ^{150}Sm [93W]

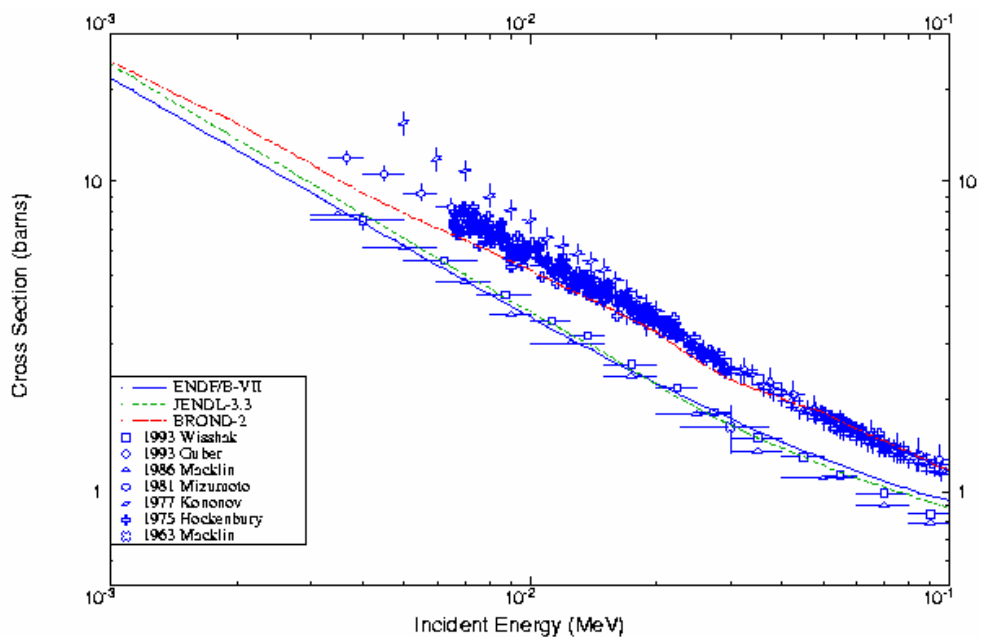


Рис. 7. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области

3.1. Полные сечения (MT=1)

На рис. 8 показаны имеющихся оценки полных нейтронных сечений в области энергий выше 200 кэВ в сравнении с экспериментальными данными для естественной смеси изотопов самария [54O, 70S, 71F, 74K] и данными для изотопа ^{150}Sm [80S]. Все оценки получены на основе расчетов по оптической модели, но параметры оптического потенциала в таких расчетах отличались весьма существенно. Оценка БРОНД-2 представляется заниженной в области энергий до 1.5 МэВ, и оценка ENDF/B-VII кажется оптимальной для всего диапазона энергий до 20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. Прямых экспериментальных данных по сечениям упругого рассеяния нейтронов для изотопа ^{149}Sm нет. В этих условиях можно ожидать, что более корректной для сечений упругого рассеяния будут оценка, в которой достигнуто лучшее описание полных нейтронных сечений. Поэтому предпочтительной можно считать оценку ENDF/B-VII.

Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, как правило, также осуществляются на основе расчетов по оптической модели. Экспериментальные данные по угловым распределениям имеются только для соседних четно-четных изотопов самария, и такие данные достаточно хорошо согласуются с соответствующими расчетами. Предпочтительными при этом являются расчеты, выполненные в рамках метода сильно связанных каналов, и оценку ENDF/B-VII для угловых распределений можно признать оптимальной.

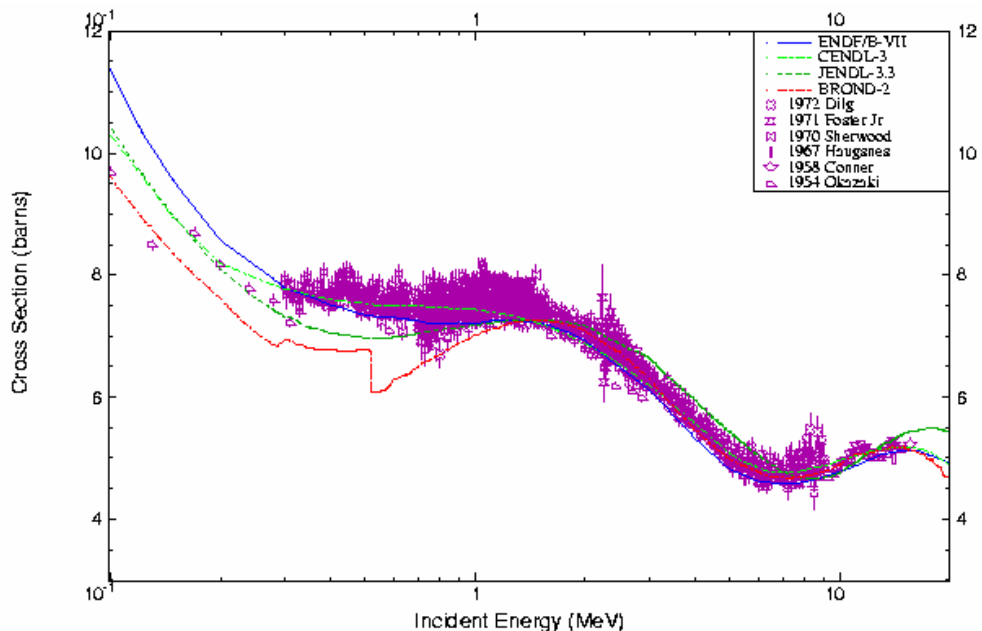


Рис. 8. Оценки полных нейтронных сечений ^{149}Sm в диапазоне энергий от 0.2 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными для естественной смеси изотопов самария [54O, 70S, 71F, 74K] и для изотопа ^{150}Sm [80S]

3.3 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема низколежащих уровней ^{149}Sm , взятая из таблицы изотопов [98F] и использованная в оценке ENDF/B-VII:

| № | Энергия (МэВ) | спин-четность |
|-----------|---------------|---------------|
| GR. | 0.0 | 7/2 - |
| 1 | 0.0225 | 5/2 - |
| 2 | 0.2770 | 5/2 - |
| 3 | 0.2859 | 9/2 - |
| 4 | 0.3500 | 3/2 - |
| 5 | 0.3990 | 1/2 - |
| 6 | 0.5285 | 3/2 - |
| 7 | 0.5584 | 5/2 - |
| 8 | 0.5909 | 9/2 - |
| 9 | 0.6060 | 3/2 - |
| 10 | 0.6364 | 7/2 - |
| 11 | 0.6582 | 9/2 + |
| 12 | 0.6647 | 11/2 - |
| 13 | 0.6970 | 5/2 + |
| Континуум | 0.700 | |

В оценках БРОНД-2, JENDL-3.3и CENDL-3 использована такая же схема для 10 нижайших уровней. Следует, однако, заметить, что уже начиная с 11-го уровня имеются неопределенности в идентификации спина уровней. В этих условиях необходимость статистического моделирования спинов более высоких уровней оказывается в значительной мере аналогичной статистическому моделированию уровней непрерывным спектром, и различия в числе дискретных уровней, учитываемых в оценках, оказывает сравнительно малое влияние на расчеты интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов.

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 9. Каких-либо экспериментальных данных для сечений неупругого рассеяния на нечетных изотопах самария нет. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели. Оценка JEFF-3.1, выполненная на основе сферической оптической модели, дает существенно завышенное сечение неупругого рассеяния в области энергий до 1.5 МэВ, тогда как остальные оценки удовлетворительно согласуются между собой. Следует, однако, отметить, что в оценке ENDF/B-VII пропущен околороговой участок сечения рассеяния на первом уровне вплоть до энергии 100 кэВ (верняя граница области неразрешенных резонансов).

Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов приняты изотропными в оценках БРОНД-2 и JEFF-3.1, тогда как анизотропия рассеяния нейтронов, обусловленная коллективными и предравновесными процессами, учтена в остальных оценках.

3.4 Сечение радиационного захвата (MT=102).

На рис. 10 показаны оценки сечений радиационного захвата нейтронов с энергией выше 100 кэВ в сравнении с экспериментальными данными. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия обусловлены различиями параметров оптической модели и плотности уровней в расчетах энергетической зависимости нейтронных и радиационных ширин. Как отмечалось выше, оценке БРОНД-2 ориентировалась на ранние экспериментальные данные, и ее следует считать завышенной. Остальные оценки удовлетворительно описывают

экспериментальные данные более поздних измерений, и оценку ENDF/B-VII можно признать оптимальной для всего диапазона энергий нейтронов.

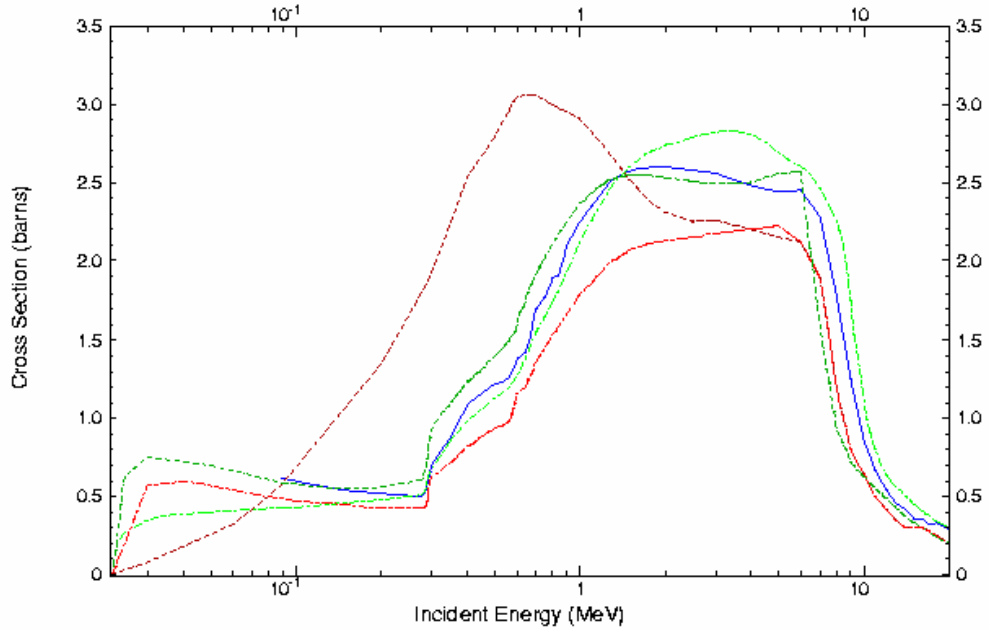


Рис. 9. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для ^{149}Sm в сравнении с экспериментальными данными

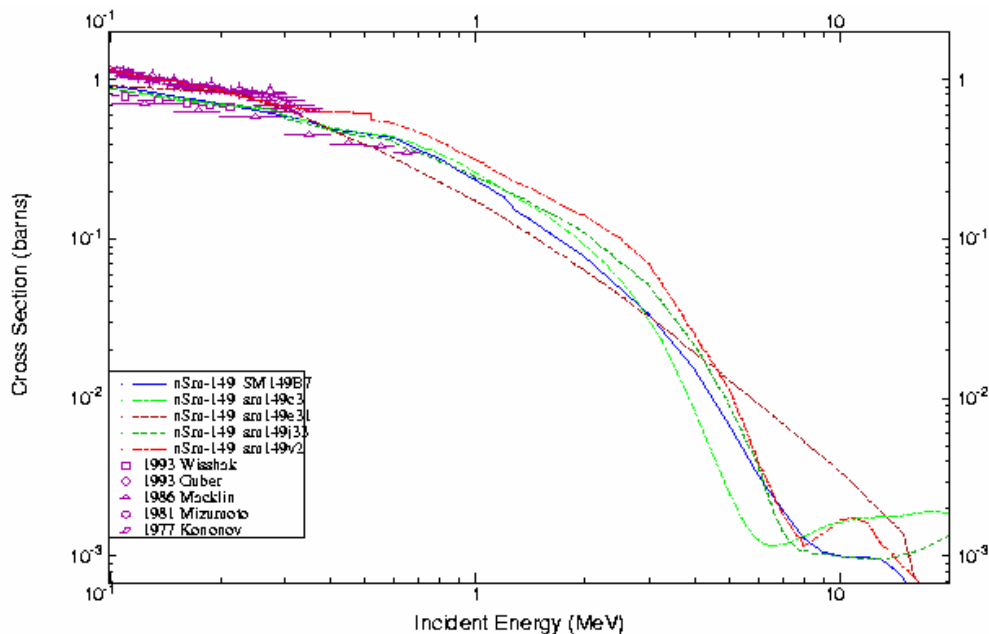


Рис. 10. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов ^{149}Sm в сравнении с экспериментальными данными [04N]

В области энергий выше 8-10 МэВ во всех оценках рассматривается механизм прямого-коллективного захвата нейтронов, но приближения, привлекаемые для его описания, различаются весьма значительно. Следует, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 2-3 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не являются существенными для анализа характеристик ядерных реакторов.

3.5. Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT= 17)

Экспериментальных данных о сечении реакций (n,2n) и (n,3n) нет. Имеющиеся оценки сечений реакции (n,2n) показаны на рис. 11. Сечение этой реакции довольно велико, поэтому разногласия в его оценках может быть существенным для практических приложений. Оценки БРОНД-2 и JEFF-3.1, выполненные без учета предравновесных процессов, дают несомненно заниженные сечения реакции в области энергий выше 15 МэВ. Оценка JENDL-3.3 кажется несколько завышенной в диапазоне энергий до 15 МэВ. Оценку ENDF/B-VII можно признать оптимальной для всего диапазона энергий нейтронов на основе подобия сечений реакции (n,2n) для соседних четно-четных изотопов самария, для которых имеются соответствующие экспериментальные данные.

Сечение реакции (n,3n) существенно только выше 16 МэВ, и оно определяется разностью сечения реакции (n,2n) в максимуме и в рассматриваемой энергетической точке. Из оценок, представленных на рис. 10, очевидно, что сечение реакции (n,3n) значительно завышено в BROND-2, сравнительно близко в оценках ENDF/B-VII и CENDL-3. Для всего диапазона энергий нейтронов оценка ENDF/B-VII кажется предпочтительной, хотя такой выбор трудно обосновать без дополнительной экспериментальной информации.

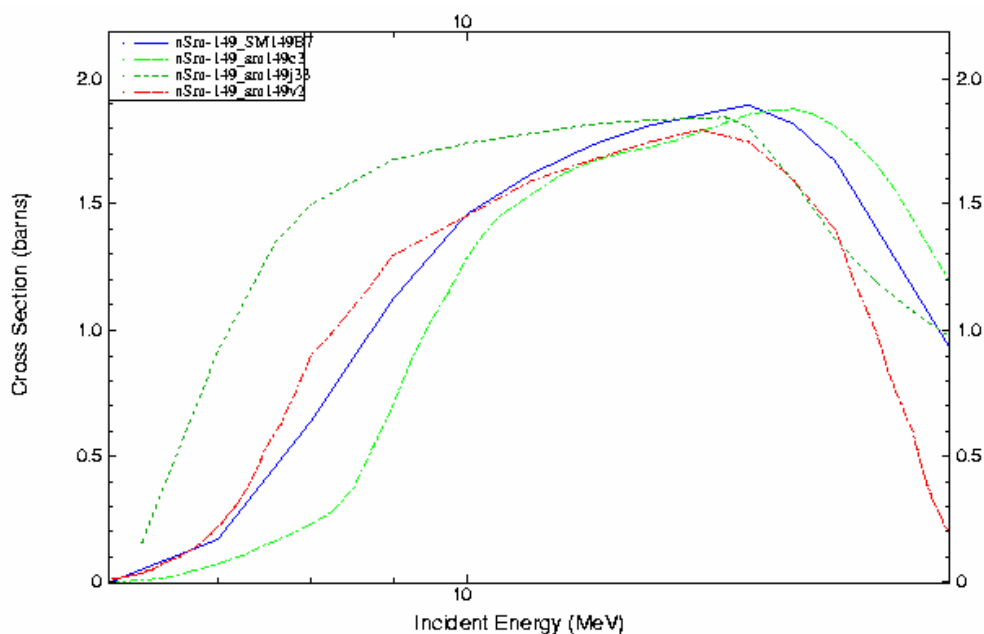


Рис.11. Оценки сечений реакции $^{149}\text{Sm} (n,2n)$

3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц: (n,np), (n,n α), (n,p), (n,d), (n,t), (n, α)

Реакции с вылетом заряженных частиц включены во все рассматриваемые оценки. Эти реакции существенны только в области энергий нейтронов выше 15 МэВ, и максимальное сечение этих реакций не превышает 20 мбарн. Разногласия между оценками таких реакций сравнительно велики, вряд ли оправдано предпочтение какой-либо из оценок без дополнительной информации.

- 54O A.Okazaki et al., Phys. Rev., v. 93 (1954) 461.
- 70S G.L.Sherwood et al., Nucl. Sci. Eng., v. 39 (1970) 67.
- 71F D.G.Foster et al., Phys. Rev., v. C3 (1971) 576.
- 74K J.D.Kellie et al., J. Phys., v. A7 (1974) 1758.
- 80S R.E.Shamu et al., Phys. Rev., v. C22 (1980) 1857.

4. Образование гамма-лучей

Оценки сечений образования и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата и неупругого взаимодействия нейтронов, содержатся только в файлах ENDF/B-VII. В ENDF/B-VII представлена детальная информация о спектрах дискретных гамма-лучей в различных процессах. Угловые распределения всех типов гамма-излучения в приняты изотропными.

5. Заключение

На основе проведенного рассмотрения оценок и имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что наиболее достоверной в настоящее время является оценка ENDF/B-VII. **Эту оценку следует рекомендовать для библиотеки РОСФОНД, исправив в ней сечение неупругого рассеяния на первом уровне в области энергий нейтронов до 100 кэВ.**²

Проведенный сравнительный анализ оценок и экспериментальных данных для библиотеки РОСФОНД выполнен А.В.Игнатьюком.

62.7. Самарий-150

Содержание в природной смеси -7.4%.

В ФОНД-2.2 – оценка из JENDL-2, 1984, пересматривавшаяся в 1990,1993,1997г.г. Область разрешенных резонансов до 1538 эВ; область неразрешенных резонансов до 100 кэВ

В БРОНД-2 – оценка С.М.Захаровой и А.В.Игнатьюка, 1987 г. Область разрешенных резонансов до 500 эВ;

В JENDL-3.3 та же оценка, что и в JENDL-2.

JEFF-3.1 – оценка H. Gruppelaar and E. Menapace, 1982 -1989 г.г. Область разрешенных резонансов отсутствует

ENDF/B-VIIb1.2 – оценка Kim,Herman,Oblozinsky,Oh,Mughabghab, 2005. Область разрешенных резонансов – до 1563 эВ, неразрешенных – до 333.6 кэВ.

Последняя оценка существенно полнее по номенклатуре: в ней представлены энергоугловые распределения продуктов нейтронных реакций, включая гамма-излучение.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется оценка Kim,Herman,Oblozinsky,Oh,Mughabghab, 2005. (ENDF/B-VIIb1.2).

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

² Дополнить файл секцией 9/103 с вероятностями образования прометия-148 в основном и изомерном состояниях, взяв данные из EAF-2003. – М. Николаев.

62.8. Самарий-151

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z=62$ -зарядовое число;
- 1.2. $A=151$ - атомный вес;
- 1.3. $AWR =149.623$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт |
|-----|-----------------|----------|---------------------------|--------------|
| 04 | n,n' | -0.00482 | .0048522 | Sm-151 |
| 16 | (n,2n) | -5.596 | 5.6334 | Sm-150 |
| 17 | (n,3n) | -13.581 | 13.6718 | Sm-149 |
| 22 | (n,n α) | 1.145 | - | Nd-147 |
| 28 | (n,np) | -8.268 | 8.3233 | Pm-150 |
| 102 | n, γ | 8.258 | - | Sm-152 |
| 103 | (n,p) | -4.055 | 4.0825 | Pm-151 |
| 104 | (n,d) | -6.086 | 6.1261 | Pm-150 |
| 105 | (n,t) | -5.3872 | 5.4226 | Pm-149 |
| 107 | (n, α) | -7.0575 | 7.1038 | Nd-148 |

Радиоактивен, испытывает β -распад ($T_{1/2}=90\pm 8$ лет) в стабильный европий-151.

2. Нейтронные сечения в резонансной области (MF=2).

2.1. Область разрешенных резонансов.

В оценке БРОНД-2 верхняя граница области разрешенных резонансов была принята равной 100 эВ, тогда как в более поздних оценках эта граница увеличена до 246 эВ в JENDL-3.3, до 296.56 эВ в JEFF-3.1 (=JEFF-3.0) и до 296.2 эВ в ENDF/B-VII (=ENDF/B-VI.8). Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в CENDL-3. Все оценки нейтронных сечений опираются на параметры нейтронных резонансов, приведенные в компиляции Мугабгаба [84M], но имеются разногласия в определении спинов резонансов, в выборе параметров отрицательного резонанса, определении радиуса потенциального рассеяния, а также некоторые разногласия нейтронных и радиационных ширин резонансов в пределах погрешности экспериментальных данных.

Во всех оценках для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW. Радиус потенциального рассеяния выбран равным 7.95 ферми в JENDL-3.3, 7.2 ферми - в JEFF-3.1 и 8.3 ферми - в ENDF/B-VII. Радиационные ширины резонансов, включенные в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, показаны на рис. 1. Можно видеть, что расхождения средних радиационных ширин оказываются весьма заметными: 96.0 мэВ для JENDL-3.3, 97,436 мэВ для JEFF-3.1 и 92.9 мэВ для ENDF/B-VII.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице совместно с имеющимися экспериментальными данными:

| Оценка | JENDL-3.3 | JEFF-3.1 | ENDF/B-VII | Эксперимент [84M] |
|---------|-----------|----------|------------|----------------------|
| полное | 15210 | 15252 | 15261 | 15200 \pm 300 барн |
| упругое | 50.4 | 39.3 | 62.0 | -- |

| | | | | |
|----------------------|-------|-------|-------|----------------|
| захвата | 15160 | 15213 | 15200 | 15200±300 барн |
| резонансный интеграл | | | | |
| захвата выше 0.5 эВ: | 3410 | 3458 | 3427 | 3520±160 барн |

Все оценки в пределах погрешности согласуются с экспериментальными значениями сечения радиационного захвата и резонансного интеграла захвата нейтронов.

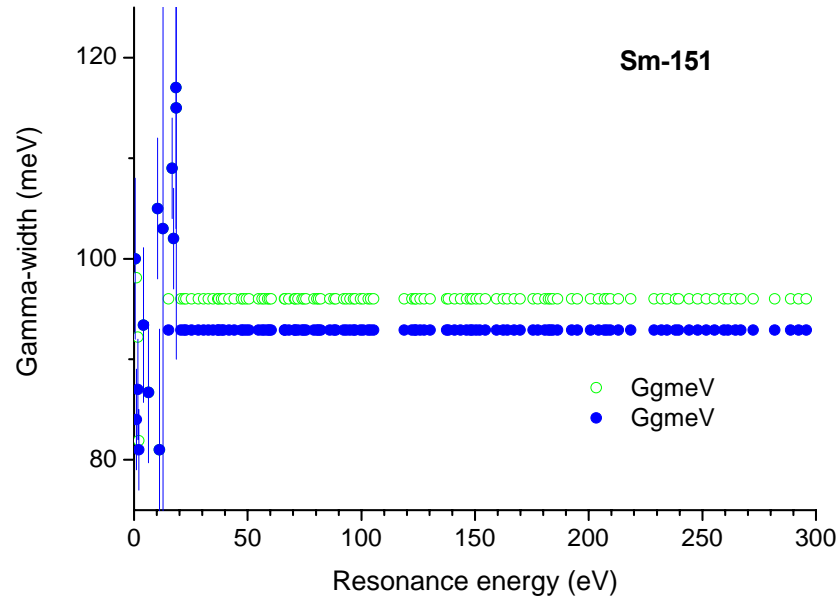


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3 (кружки) и ENDF/B-VII (сплошные точки)

2.2. Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов в области энергий до 100 эВ соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0 = 1.65 \pm .05$ эВ и аналогичной аппроксимации нейтронных силовых функций $S_0 = (3.4 \pm 0.3) 10^{-4}$. Такое определение не учитывает, однако, возможный пропуск резонансов, который является существенным уже выше 30 эВ.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов обычно привлекается анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Так как число резонансов и нейтронные силовые функции в рассматриваемых оценках очень близки (рис. 2), то мы ограничимся только анализом резонансов из ENDF/B-VII, результаты которого представлены на рис. 3. Если ограничиться областью резонансов до 100 эВ, то для наблюдаемых 60 резонансов мы получим оценку числа резонансов с учетом пропуска $N_0 = 95 \pm 3$ и соответствующие оценки средних параметров: $D_0 = 1.06 \pm .10$ эВ и $S_0 = (3.4 \pm 0.5) 10^{-4}$. Эти значения параметров близки к значениям, использованным в БРОНД-2 и принятым в качестве рекомендованных в RIPL [03R]. В то же время, если рассматривать все резонансы в области энергий до 296.2 эВ, то для наблюдаемых 120 резонансов получим оценку $N_0 = 201 \pm 12$, которой соответствуют среднее расстояние между резонансами $D_0 = 1.48 \pm .09$ эВ и нейтронная силовая функция $S_0 = (4.0 \pm 0.5) 10^{-4}$. Эти значения практически совпадают с результатами анализа, выполненного Мугабгом и

др. [00S] для резонансной области файла ENDF/B-VI.8, и которая была включена без изменений в более поздний файл ENDF/B-VII.

Приведенные результаты анализа показывают, что погрешности определения средних резонансных параметров, по-видимому, оказываются большими, чем декларируемые в оригинальных работах, и эти разногласия параметров необходимо принимать во внимание при рассмотрении различий оценок нейтронных сечений в области неразрешенных резонансов.

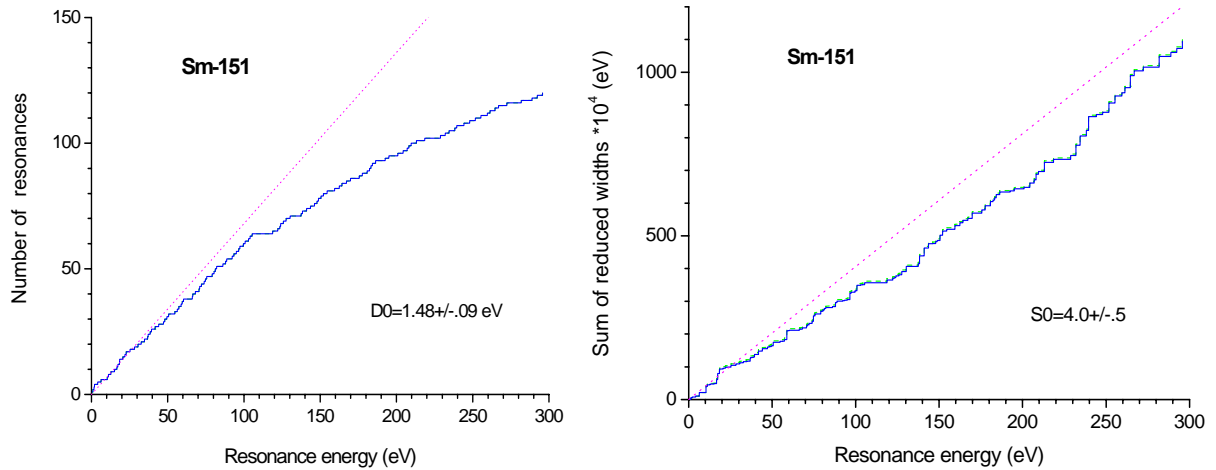


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин

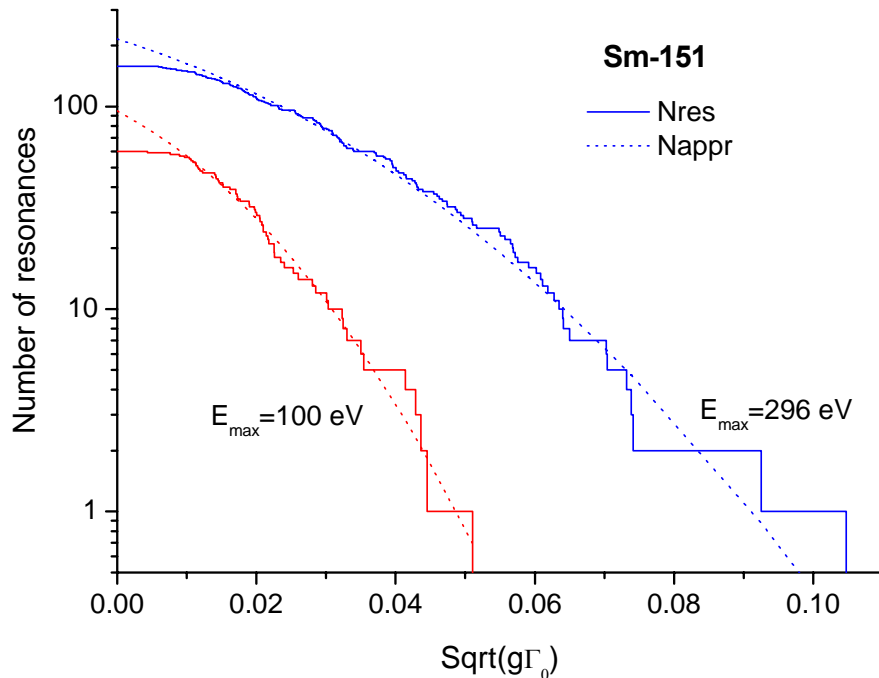


Рис. 3. Анализ пропуска резонансов для различных границ области разрешенных резонансов

На рис. 4 оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для области разрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными по полным нейтронным сечениям. На рис. 5 показано сравнение оценок для сечений радиационного захвата нейтронов. Все оценки, включая JEFF-3.1, отличаются, в основном, границами

области разрешенных резонансов и отмеченными выше различиями радиационных ширин резонансов. Эти различия обусловлены погрешностями имеющихся экспериментальных данных и именно они характеризуют основную компоненту погрешности сечения радиационного захвата, усредненного по резонансам.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что все оценки параметров разрешенных нейтронных резонансов, включенные в файлы JENDL-3.3, JEFF-3.1 и ENDF/B- VII являются равноценными, и нет оснований для предпочтения какой-либо из них. **Было признано целесообразным включить набор резонансных параметров ENDF/B- VII в БРОНД-3 как наиболее позднюю из имеющихся оценок.**

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в имеющихся оценках различается весьма значительно. В БРОНД-2 принята граница 10 кэВ, в JEFF-3.1 – 4 кэВ, в JENDL-3.3 – 100 кэВ и в ENDF/B-VII – 66.24 кэВ. В соответствии с форматом ENDF/B формула одноуровневого Брейта-Вигнера используется во всех оценках для расчета нейтронных сечений в области неразрешенных резонансов.

Выше уже были отмечены расхождения средних расстояний между резонансами и средних радиационных ширин, полученных из анализа разрешенных резонансов. Столь же значительны разногласия нейтронных силовых функций, которые обычно выбираются на основе расчетов по оптической модели. Ниже приведены параметры неразрешенных резонансов, принятые в различных оценках для энергии 10 кэВ:

| Оценка | D0(эВ) | S0(10 ⁻⁴) | S1(10 ⁻⁴) | S2(10 ⁻⁴) | Gg(мэВ) | R(ферми) |
|------------|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|----------|
| БРОНД-2 | 1.00 | 3.40 | .50 | 2.0 | 95.0 | 8.0 |
| JENDL-3.3 | 2.46 | 4.20 | 1.4 | 2.3 | 92.0 | 5.72 |
| JEFF-3.1 | 1.20 | 4.50 | 1.4 | 4.0 | 97.436 | 7.463 |
| ENDF/B-VII | 1.48 | 4.06 | .80 | 2.5 | 92.9 (40.0 для p-волны) | 8.3 |

Следует отметить, что в оценке ENDF/B-VII радиационная ширина для p-волны была принята в два раза меньшей, чем для s- и d-волн, тогда как в остальных оценках радиационная ширина взята независимой от орбитального момента.

Разногласия выбранных параметров неразрешенных резонансов приводят к значительным расхождениям оценок нейтронных сечений. На рис. 6 показано сравнение различных оценок полных нейтронных сечений. Прямых экспериментальных данных по полным сечениям для ¹⁵¹Sm в области неразрешенных резонансов не существует, но для сравнения с оценками можно использовать имеющиеся данные для естественной смеси изотопов [54O, 57E, 70S], а также данные для близлежащего изотопа ¹⁵⁰Sm [93W]. Так как расчеты по оптической модели указывают на очень малое различие полных нейтронных сечений для соседних ядер, то подобное сравнение оценок с экспериментальными данными близлежащих представляется вполне оправданным. На основе проведенного сравнения можно сделать вывод, что оценки БРОНД-2, JENDL-3.3 и CENDL-3 противоречат экспериментальным данным, и оценки JEFF-3.1 и ENDF/B-VII кажутся предпочтительными.

На рис. 7 показано аналогичное сравнение оценок для сечений радиационного захвата нейтронов. Экспериментальные данные для этого сечения были впервые измерены недавно на нейтронном спектрометре ЦЕРН [04N], и в диапазоне энергий до 10 кэВ они хорошо согласуются с оценками БРОНД-2 и ENDF/B-VII, но лежат несколько выше этих оценок при более высоких энергиях. Оценка JENDL-3.3 (=CENDL-3) во всей области неразрешенных резонансов является существенно заниженной, тогда как JEFF-3.1 несколько завышенной.

Чтобы устранить расхождение с экспериментальными данными во всей области неразрешенных резонансов, в оценке ENDF/B-VII (=ENDF/B-VI.8) были сохранены без изменений параметры s-волны, но радиационная ширина для p-волны была взята такой же, как для s- и d-волн, и нейтронная силовая функция d-волны была определена из условий оптимального описания экспериментальных данных по полным нейтронным сечениям и сечению радиационного захвата нейтронов. Уточненные таким образом параметры неразрешенных резонансов включены в оценку БРОНД-3 с той же верхней границей, что и в ENDF/B-VII. Полученные сечения показаны на рис. 6 и 7 совместно с другими оценками.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в настоящее время для области разрешенных и неразрешенных резонансов оценка БРОНД-3 является оптимальной. Она включает в себя оценку ENDF/B-VII для разрешенных резонансов и существенные уточнения этой оценки для области энергий от 10 до 66.24 кэВ на основе новых экспериментальных данных о радиационном захвате нейтронов. Оценку БРОНД-3 целесообразно рекомендовать для включения в РОСФОНД без каких либо изменений.

54O A.Okazaki et al., Phys. Rev., v. 93 (1954) 461.

57E P.A.Egelstaff, Proc. Phys. Soc., v. A70 (1957) 51.

70S G.L.Sherwood et al., Nucl. Sci. Eng., v. 39 (1970) 67.

93W K.Wisshak et al., Phys. Rev., v. C48 (1993) 1401.

84M S.Mughabghab, Neutron Cross Sections, Academic Press, New York, 1984, part B.

00S S.Oh, J.Chang, S.Mughabghab, Report BNL-NCS-67469 (2000).

03R Reference Input Parameter Library (RIPL-2), IAEA-TECDOC, Vienna, 2003; www.nds.iaea.org/RIPL-2/

04N n_TOF Collaboration, Phys. Rev. Lett., v. 93 (2004) 161103.

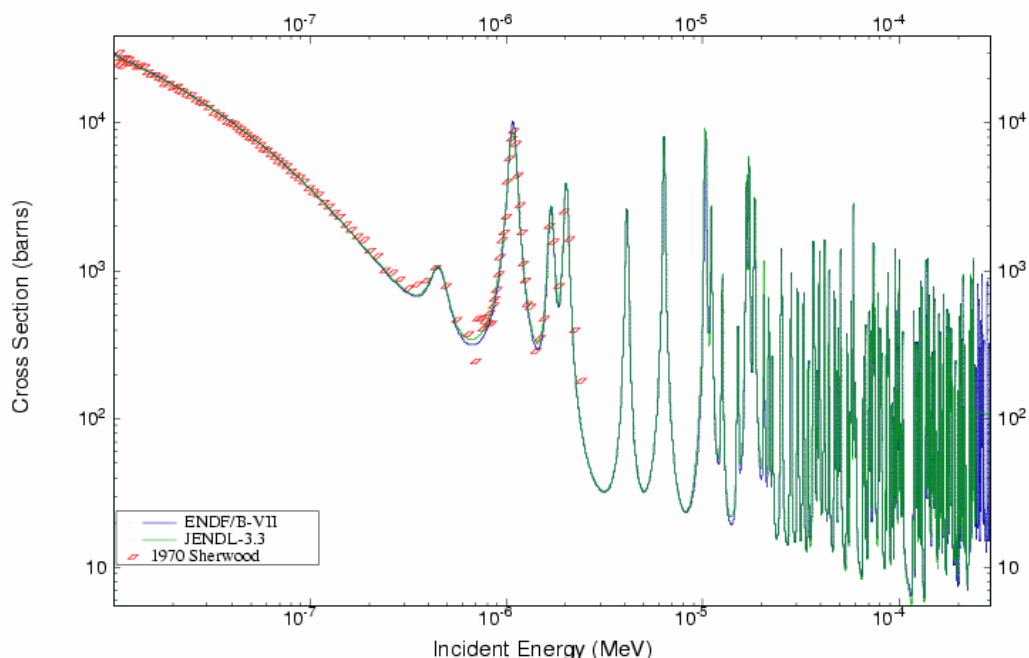


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

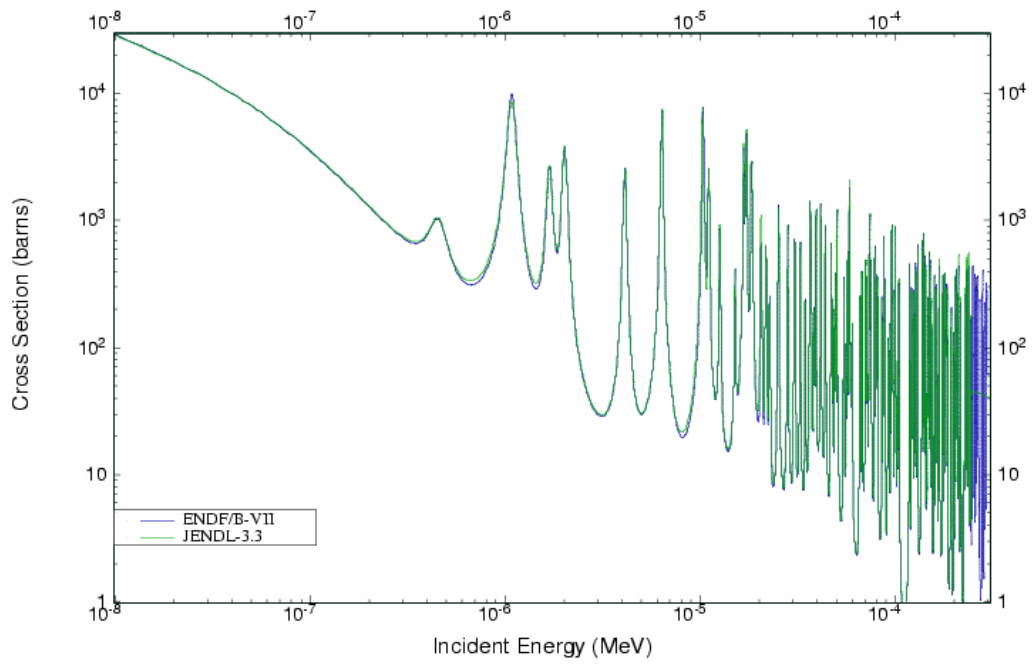


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов

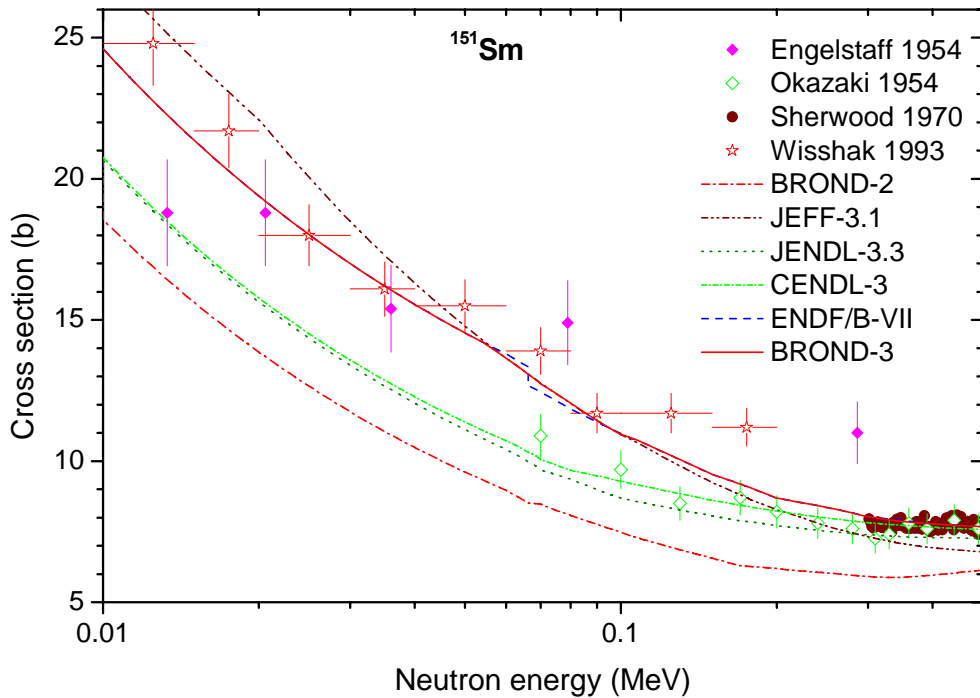


Рис. 6. Оценки полного нейтронного сечения в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными для естественной смеси изотопов самария [54O, 57E, 70S] и для изотопа ^{150}Sm [93W]

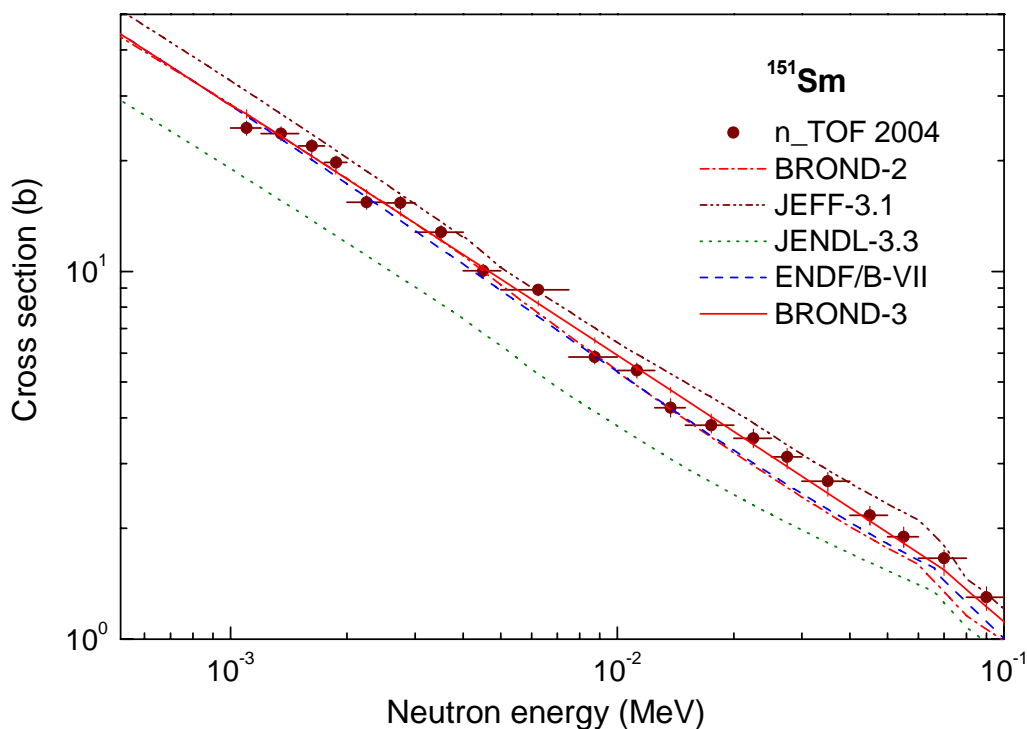


Рис. 7. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

4. Нейтронные сечения вне резонансной области

3.1. Полные сечения ($MT=1$)

На рис. 8 показаны имеющиеся оценки полных нейтронных сечений в области энергий выше 200 кэВ в сравнении с экспериментальными данными для естественной смеси изотопов самария [54O, 70S, 71F, 74K] и данными для изотопа ^{150}Sm [80S]. Все оценки получены на основе расчетов по оптической модели, но параметры оптического потенциала в таких расчетах отличались весьма существенно. Оценки БРОНД-2 и JEFF-3.1 несомненно являются заниженными в области энергий до 2 МэВ, и оптимальными для всего диапазона энергий до 20 МэВ следует признать оценки CENDL-3, ENDF/B-VII и BROND-3, которые хорошо согласуются между собой и с имеющейся совокупностью экспериментальных данных.

3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов ($MT=2$).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. Прямых экспериментальных данных по сечениям упругого рассеяния нейтронов для изотопа ^{151}Sm нет. В этих условиях можно ожидать, что более корректными для сечений упругого рассеяния будут оценки, в которых достигнуто лучшее описание полных нейтронных сечений. Поэтому предпочтительными следует признать оценки CENDL-3, ENDF/B-VII и BROND-3.

Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, как правило, также осуществляются на основе расчетов по оптической модели. Экспериментальные данные по угловым распределениям имеются только для соседних четно-четных изотопов самария, и такие данные достаточно хорошо согласуются с соответствующими расчетами. Предпочтительными при этом являются расчеты, выполненные в рамках метода сильно

связанных каналов. Для БРОНД-3 угловые распределения упруго рассеянных нейтронов (MF=4, MT=2) взяты из оценки ENDF/B-VII.

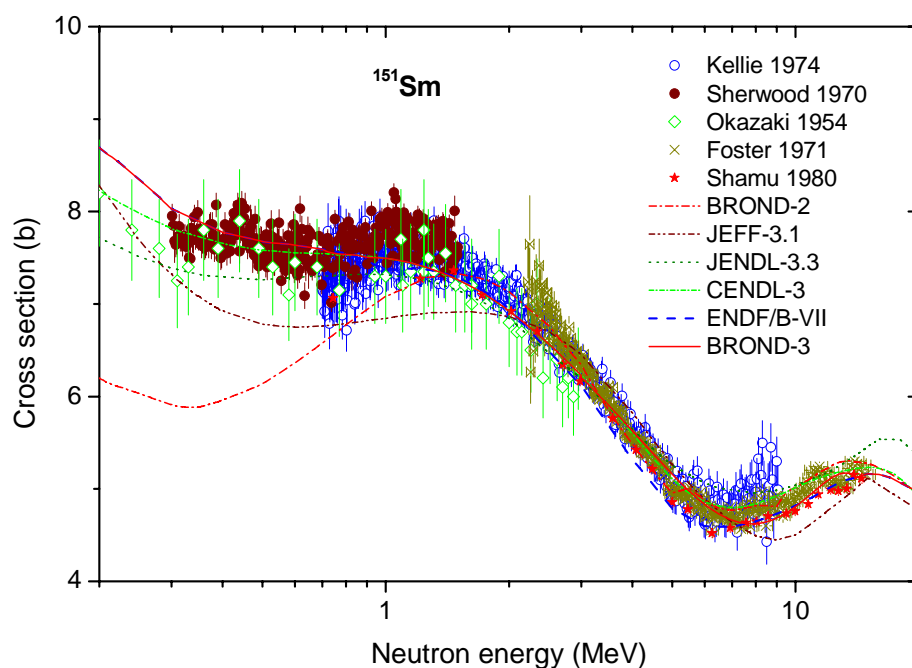


Рис. 8. Оценки полных нейтронных сечений ^{151}Sm в диапазоне энергий от 0.2 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными для естественной смеси изотопов самария [54O, 70S, 71F, 74K] и для изотопа ^{150}Sm [80S]

3.3 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведена схема низколежащих уровней ^{151}Sm , взятая из таблицы изотопов [98F] и использованная в оценке БРОНД-3:

| № | Энергия (МэВ) | спин-четность |
|----------|---------------|---------------|
| GR. | 0.0 | 5/2 - |
| 1 | 0.0048 | 3/2 - |
| 2 | 0.0658 | 7/2 - |
| 3 | 0.0697 | 5/2 - |
| 4 | 0.0915 | 9/2 + |
| 5 | 0.1048 | 3/2 - |
| 6 | 0.1479 | 13/2 + |
| 7 | 0.1677 | 5/2 + |
| 8 | 0.1684 | 5/2 - |
| 9 | 0.1754 | 9/2 - |
| 10 | 0.2090 | 7/2 - |
| 11 | 0.2611 | 11/2 - |
| 12 | 0.2850 | 1/2 - |
| 13 | 0.2946 | 9/2 - |
| 14 | 0.3026 | 5/2 - |
| 15 | 0.3068 | 3/2 + |
| Континум | 0.310 | |

В оценке ENDF/B-VII использована такая же схема уровней, тогда как в JENDL-3.3 рассматривались 20 уровней, в CENDL-3 – 19 уровней и в JEFF-3.1 – 40 уровней. Следует, однако, заметить уже начиная с 12-го уровня имеются неопределенности идентификации спина уровней. В этих условиях необходимость статистического моделирования спина

более высоких уровней оказывается в значительной мере аналогичной статистическому моделированию уровней непрерывным спектром, и различия в числе дискретных уровней, учитываемых в оценках, оказывает сравнительно малое влияние на расчеты интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов.

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 9. Каких-либо экспериментальных данных для сечений неупругого рассеяния на нечетных изотопах самария нет. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели. Оценки БРОНД-2 и JEFF-3.1, выполненные на основе сферической оптической модели, дают существенно завышенное сечение рассеяния на первом уровне в области энергий до 70 кэВ и слишком низкое интегральное сечения неупругого рассеяния при энергиях нейтронов выше 10 МэВ. Оценка JENDL-3.3 кажется заниженной в всем диапазоне энергий от 0.1 до 8 МэВ. БРОНД-3 очень близок к оценке CENDL-3, и обе эти оценки не сильно отличаются от ENDF/B-VII. Следует, однако, отметить, что в оценке ENDF/B-VII пропущен околопороговый участок сечения рассеяния на первом уровне вплоть до порога возбуждения второго уровня (рис. 9).

Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов приняты изотропными в оценках БРОНД-2 и JEFF-3.1, тогда как анизотропия рассеяния нейтронов, обусловленная коллективными и предравновесными процессами, учтена в остальных оценках.

3.4 Сечение радиационного захвата (MT=102).

На рис. 10 показаны оценки сечений радиационного захвата нейтронов с энергией выше 100 кэВ в сравнении с новыми экспериментальными данными [04N]. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия обусловлены различиями параметров оптической модели и плотности уровней в расчетах энергетической зависимости нейтронных и радиационных ширин. Как отмечалось выше, в оценке БРОНД-3 нейтронные силовые функции для p- и d-волн были определены из условий оптимального описания наблюдаемых сечений захвата нейтронов в области неразрешенных резонансов, и аппроксимация этих силовых функций в рамках оптической модели обеспечивает хорошее описание экспериментальных данных во всем диапазоне энергий нейтронов вплоть до 1 МэВ (рис. 10).

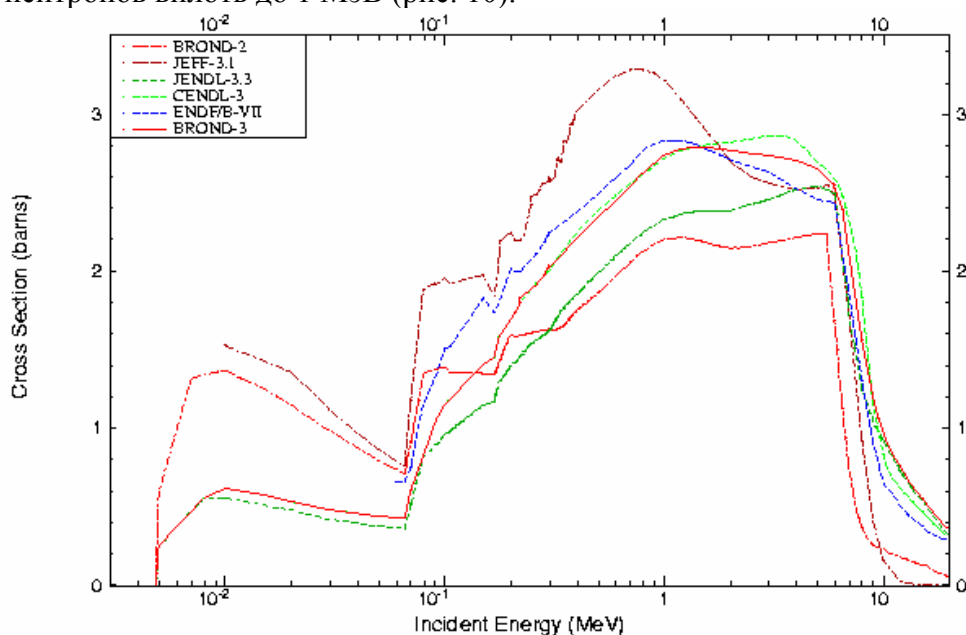


Рис. 9. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для ^{151}Sm в сравнении с экспериментальными данными

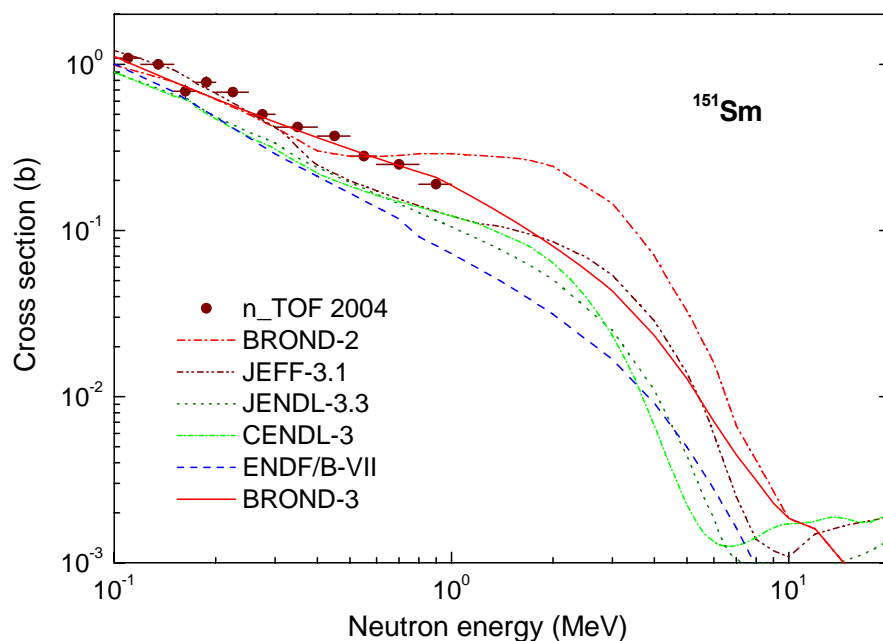


Рис. 10. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов ^{151}Sm в сравнении с экспериментальными данными [04N]

В области энергий выше 8-10 МэВ во всех оценках рассматривается механизм прямого-коллективного захвата нейтронов, но приближения, привлекаемые для его описания, различаются весьма значительно. Следует, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 2-3 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не являются сколь-либо существенными для анализа характеристик ядерных реакторов.

3.5. Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT= 17)

Экспериментальных данных о сечении реакций (n,2n) и (n,3n) нет. Имеющиеся оценки сечений реакции (n,2n) показаны на рис. 11. Сечение этой реакции сравнительно велико, поэтому разногласие его оценок опасно для многих практических приложений. Оценки БРОНД-2 и JEFF-3.1, выполненные на основе сферической оптической модели, дают несомненно завышенные сечения реакции. Оценка JENDL-3.3 кажется несколько заниженной в диапазоне энергий до 16 МэВ. Оценка БРОНД-3 весьма близка к CENDL-3, и обе эти оценки не сильно отличаются от ENDF/B-VII в диапазоне энергий до 16 МэВ. Выше 16 МэВ ENDF/B-VII кажется несколько заниженной, но при отсутствии каких-либо экспериментальных данных трудно сделать вывод о предпочтительной оценке в области высоких энергий.

Сечение реакции (n,3n) существенно только выше 16 МэВ, и оно определяется разностью сечения реакции (n,2n) в максимуме и в рассматриваемой энергетической точке. Из оценок, представленных на рис. 10, очевидно, что сечение (n,3n) реакции значительно завышено в БРОНД-2, сравнительно близко в оценках БРОНД-3 и CENDL-3 и примерно в 2 раза более высокое в ENDF/B-VII. Оценки БРОНД-3 и CENDL-3 кажутся предпочтительными, но без дополнительной экспериментальной информации трудно обосновать надежность такого выбора.

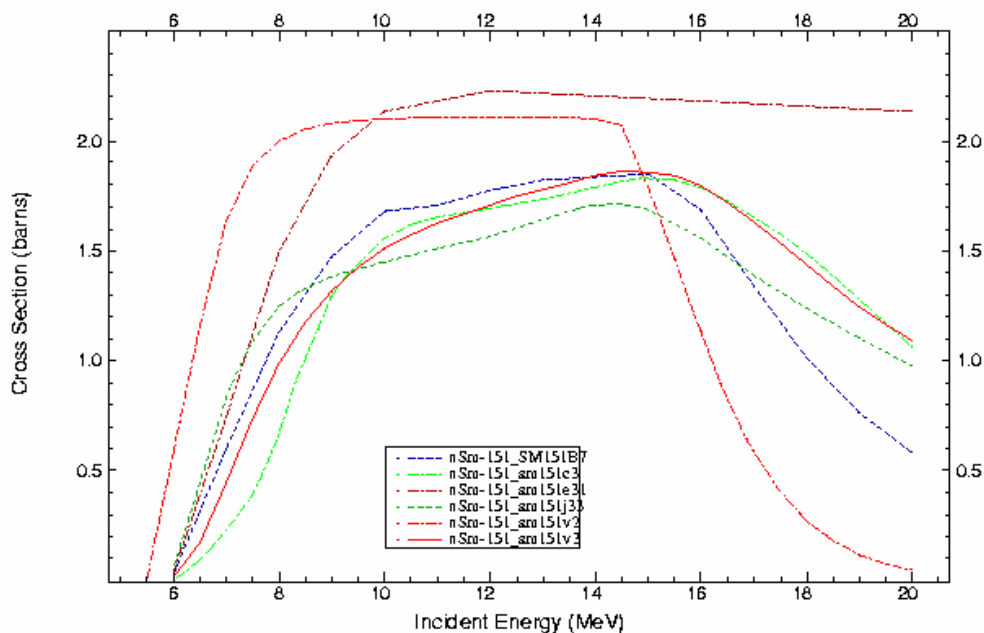


Рис.11. Оценки сечений реакции $^{151}\text{Sm}(n,2n)$

3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц: (n,np) , $(n,n\alpha)$, (n,p) , (n,d) , (n,t) , (n,α)

Реакции с вылетом заряженных частиц включены во все рассматриваемые оценки. Эти реакции существенны только в области энергий нейтронов выше 15 МэВ, и максимальное сечение этих реакций не превышает 20 мбарн. Разногласия между оценками таких реакций сравнительно велики, вряд ли оправдано предпочтение какой-либо из оценок без дополнительной информации.

- 54O A.Okazaki et al., Phys. Rev., v. 93 (1954) 461.
- 70S G.L.Sherwood et al., Nucl. Sci. Eng., v. 39 (1970) 67.
- 71F D.G.Foster et al., Phys. Rev., v. C3 (1971) 576.
- 74K J.D.Kellie et al., J. Phys., v. A7 (1974) 1758.
- 80S R.E.Shamu et al., Phys. Rev., v. C22 (1980) 1857.
- 04N n_TOF Collaboration, Phys. Rev. Lett., v. 93 (2004) 161103.

4. Образование гамма-лучей

Оценки сечений образования и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата и неупругого взаимодействия нейтронов, содержатся только в файлах ENDF/B-VII и БРОНД-3. В ENDF/B-VII представлена более детальная информация о спектрах дискретных гамма-лучей в различных процессах, но интегральные выходы и спектры гамма-лучей в этих оценках оказываются весьма подобными. Угловые распределения всех типов гамма-излучения в обеих оценках приняты изотропными.

5. Заключение

На основе проведенного рассмотрения оценок и имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что более достоверной в настоящее время является оценка БРОНД-3. В нее включены те же параметры разрешенных нейтронных резонансов, что и в ENDF/B-VII, но достигнуты определенные уточнения параметров неразрешенных резонансов и обеспечено описание новых экспериментальных данных о радиационном

захвате нейтронов. Оценки сечений основных нейтронных реакций вне резонансной области в БРОНД-3 достаточно хорошо согласуются с оценками ENDF/B-VII³.

Проведенный сравнительный анализ оценок и экспериментальных данных для библиотеки РОСФОНД выполнен А.В.Игнатьюком.

62.9. Самарий-152

Содержание в природной смеси -26.7%.

В ФОНД-2.2 – оценка из JENDL-2, 1984, пересматривавшаяся в 1990,1994 г.г. Область разрешенных резонансов до 5029 эВ; область неразрешенных резонансов до 100 кэВ

В БРОНД-2 – оценка Т.С.Белановой, С.М.Захаровой и А.В.Игнатьюка, 1987 г. Область разрешенных резонансов до 1000 эВ, неразрешенных – до 122.6 кэВ.

В JENDL-3.3 та же оценка, что и в ФОНД-2.2.

JEFF-3.1 – оценка H. Gruppelaar and E. Menarace, 1982 -1989 г.г. Область разрешенных резонансов до 369 эВ, область неразрешенных резонансов отсутствует.

ENDF/B-VIIb1.2 – оценка Kim,Herman,Oblozinsky,Oh,Mughabghab, 2005. Область разрешенных резонансов – до 5101 эВ, неразрешенных – до 122.6 кэВ.

Последняя оценка существенно полнее по номенклатуре: в ней представлены энергоугловые распределения продуктов нейтронных реакций, включая гамма-излучение.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется оценка Kim,Herman,Oblozinsky,Oh,Mughabghab, 2005. (ENDF/B-VIIb1.2).

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

62.10. Самарий-153

Радиоактивен ($T_{1/2}=46.27$ ч.). Испытывает бета-распад в стабильный ¹⁵³Eu.

В ФОНД-2.2 – оценка из JENDL-2, 1984, пересматривавшаяся в 1990,1993,1997г.г. Область разрешенных резонансов до 4.4 эВ (1 резонанс); область неразрешенных резонансов до 100 кэВ

В JENDL-3.3 - практически та же оценка, что и в ФОНД-2.2.

ENDF/B-VIIb1.2 – практически та же оценка, что и в ФОНД-2.2. Отличия состоят в изменении сечений реакций (n,2n) и (n,3n) (сечение первой из них понижено при 14 Мэв на 11%).

Заключение

В РОСФОНДе рекомендуется сохранить оценку из ФОНД-2.2.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

³ К сожалению, на момент формирования библиотеки РОСФОНД файл оцененных данных для самария-151 из библиотеки БРОНД-3 оказался утерянным авторами. Поэтому в РОСФОНД включен файл данных из ENDF/B-VII, несколько уступающий файлу из БРОНД-3 в точности описания сечения захвата быстрых нейтронов. – В.Н.Кошечев.

62.11. Самарий-154

Содержание в природной смеси -22.7%.

В ФОНД-2.2 – оценка из JENDL-2, 1984, пересматривавшаяся в 1990 и 1994 г.г.
Область разрешенных резонансов до 3000 эВ; область неразрешенных резонансов до 100 кэВ

В БРОНД-2 – оценка Т.С.Белановой, С.М.Захаровой и А.В.Игнатьюка, 1989 г.
Область разрешенных резонансов до 2500 эВ, неразрешенных – до 82 кэВ.

В JENDL-3.3 та же оценка, что и в ФОНД-2.2.

JEFF-3.1 – оценка H. Gurrpelaar and E. Menarase, 1982 -1990 г.г. Область разрешенных резонансов до 3103 эВ, область неразрешенных резонансов отсутствует.

ENDF/B-VIIb1.2=CENDL-3 – оценка Jian-Chuan Ming, Qing-Biao Shen, 1999.
Данные в областях разрешенных и неразрешенных резонансов такие же, как в оценке JENDL. Вне резонансной области сечения основных реакций согласуются с предыдущими оценками в пределах 10- 20%; лишь сечения реакций с вылетом заряженных частиц отличаются в 1.5 – 2 раза, оставаясь ничтожно малыми.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется оценка Jian-Chuan Ming, Qing-Biao Shen, 1999. (ENDF/B-VIIb1.2=CENDL-3).

Автор отбора данных
Николаев М.Н.

63. ЕВРОПИЙ

63.0 Общие замечания

Для библиотеки РОСФОНД требовалось отобрать нейтронные данные для 12-ти стабильных и долгоживущих изотопов европия. Данные для всех этих изотопов содержатся в библиотеке ФОНД-2.2. Однако, как будет видно далее, нейтронные данные для ряда изотопов было бы целесообразно заменить на оценки более современные и полные, выполненные в последние годы. Рассмотрим результаты деятельности по переоценке данных для изотопов европия, проведенной в последние годы в сравнении с оценками, содержащимися в ФОНД-2.2. При этом главное внимание будем обращать на результаты оценки сечения захвата.

Все экспериментальные данные, используемые при сравнении с оцененными сечениями, были взяты из базы данных EXFOR-CINDA (версия 1.81, июнь 2005).

Рекомендованные значения Мухабхаба приводятся согласно работе “Thermal Neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and G-factors”, INDC(NDS)-440, 2003.

Радиоактивные изотопы.

Для 6-ти долгоживущих изотопов диспрозия – ^{145}Eu , ^{146}Eu , ^{147}Eu , ^{148}Eu , ^{149}Eu и ^{150}Eu полных наборов нейтронных данных нет. В библиотеке ФОНД-2.2 нейтронные данные для них были приняты из EAF-3. В версии библиотеки EAF-2003 данные по радиоактивному захвату нейтронов в большинстве своем практически не изменились, однако остальные сечения были пересмотрены с учетом расчетов по программам, реализующих новые теоретические модели.

Отдельно следует отметить долгоживущие изотопы ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu и ^{156}Eu , для которых имелись полные наборы нейтронных данных. Для этих изотопов характерны большие сечения радиационного захвата и большое время жизни. Они являются продуктами деления, которые дают заметный суммарный вклад в полное сечение поглощения всех продуктов деления.

Стабильные изотопы.

Данные для стабильных изотопов европия в библиотеке ФОНД-2.2 были взяты из библиотеки JENDL-3.3 с небольшой корректировкой данных (март 1990). Изменения коснулись пересмотра сечений для пороговых реакций.

В библиотеке JEF-3.1 для Eu-151 используется оценка, выполненная для JEF-2.2 (~ENDF/B-V). Для Eu-153 - оценка, выполненная для японской библиотеки нейтронных данных JENDL-3.2.

В библиотеке JENDL-3.3 нейтронные данные не пересматривались по сравнению с версией JENDL-3.2 (март 1990).

В ENDF.B-VII (beta 1.2 версия, ноябрь 2005) принята оценка, выполненная в рамках проекта по созданию международной библиотеки продуктов деления. Авторы оценки: Мухабхаб (S.Mughabghab, BNL) - (резонансная область); Обложинский (P. Oblozinsky, BNL), Рохман (D.Rochman, BNL) и Херман (M.Herman, BNL) - (область более высоких энергий).

При анализе нейтронных данных для отдельных изотопов мы будем исходить из той общей информации, которая изложена выше.

63.1. Европий-145

Испытывает позитронный распад в ^{145}Nd (стабильный изотоп) посредством цепочки распада ^{145}Eu ($T_{1/2}=5.93$ дн) \rightarrow ^{145}Sm ($T_{1/2}=340$ дн) \rightarrow ^{145}Pm ($T_{1/2}=17.7$ г) \rightarrow ^{145}Nd (стабильный).

В ФОНД-2.2 – оценка J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 1 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

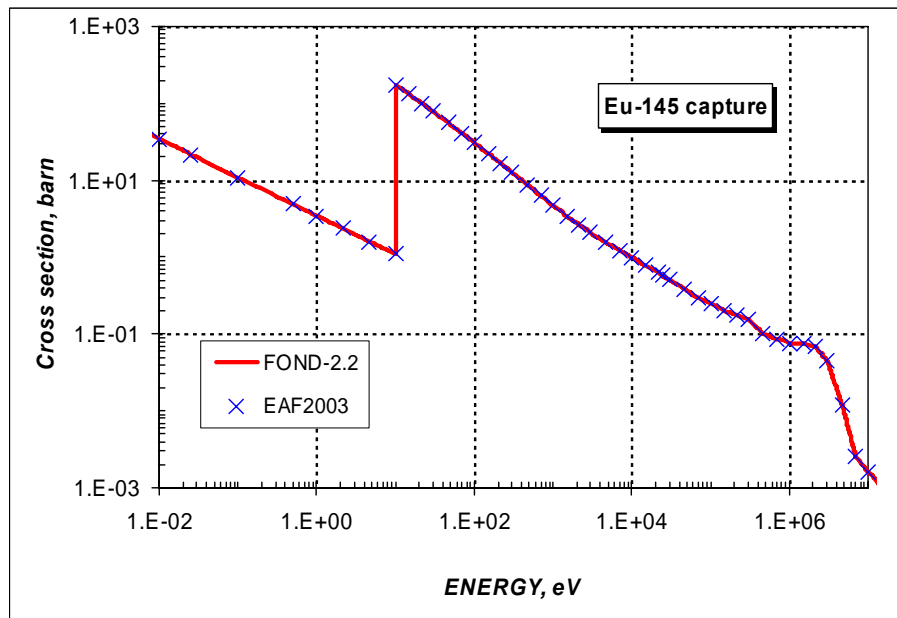


Рисунок 1 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-145.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 21.70 барна.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.Н.

63.2. Европий-146

Испытывает распад в ^{142}Nd (стабильный изотоп) посредством цепочки распада ^{146}Eu ($T_{1/2}=4.51$ дн., ϵ -распад) \rightarrow ^{146}Sm ($T_{1/2}=1.03\text{E}7$ лет, α -распад) \rightarrow ^{142}Nd (стабильный).

В ФОНД-2.2 – J.Копецкы, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 2 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

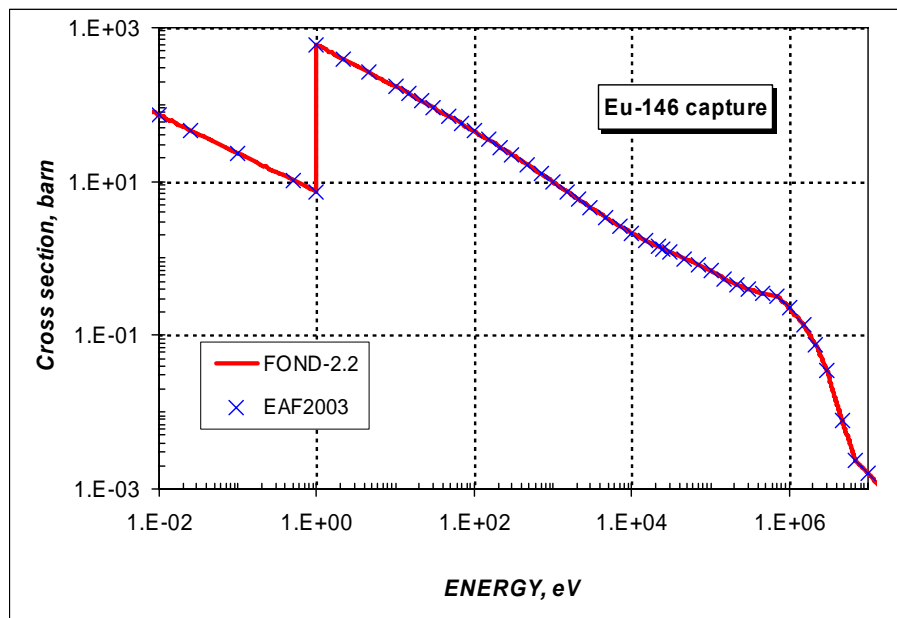


Рисунок 2 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-146.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 46.25 барна.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.Н.

63.3. Европий-147

Испытывает распад в ^{143}Nd (стабильный изотоп) посредством цепочки распада ^{147}Eu ($T_{1/2}=24.6$ дн., ϵ -распад) \rightarrow ^{147}Sm ($T_{1/2}=1.06\text{E}^{11}$ лет, α -распад) \rightarrow ^{143}Nd (стабильный).

В ФОНД-2.2 – J.Кореcky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 3 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

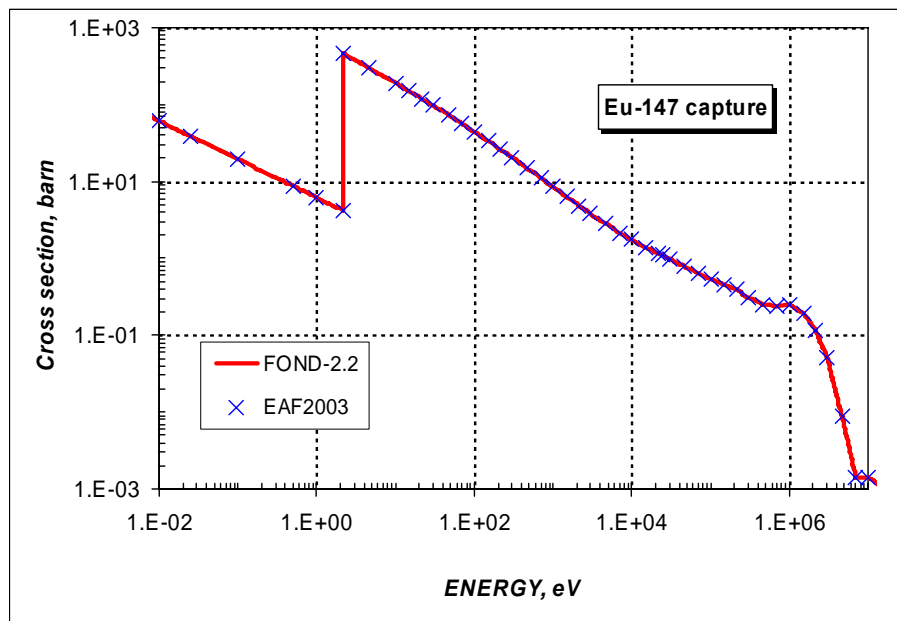


Рисунок 3 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-147.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 38.72 барна.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

63.4. Европий-148

Испытывает распад в ^{141}Pr (стабильный изотоп) посредством цепочки распада ^{148}Eu ($T_{1/2}=55.6$ дн., ϵ -распад) \rightarrow ^{148}Sm ($T_{1/2}=7.0\text{E}^{15}$ лет, α -распад) \rightarrow ^{144}Nd ($T_{1/2}=2.29\text{E}^{15}$ лет, α -распад) \rightarrow ^{141}Pr (стабильный).

В ФОНД-2.2 – J.Корецкы, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 4 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

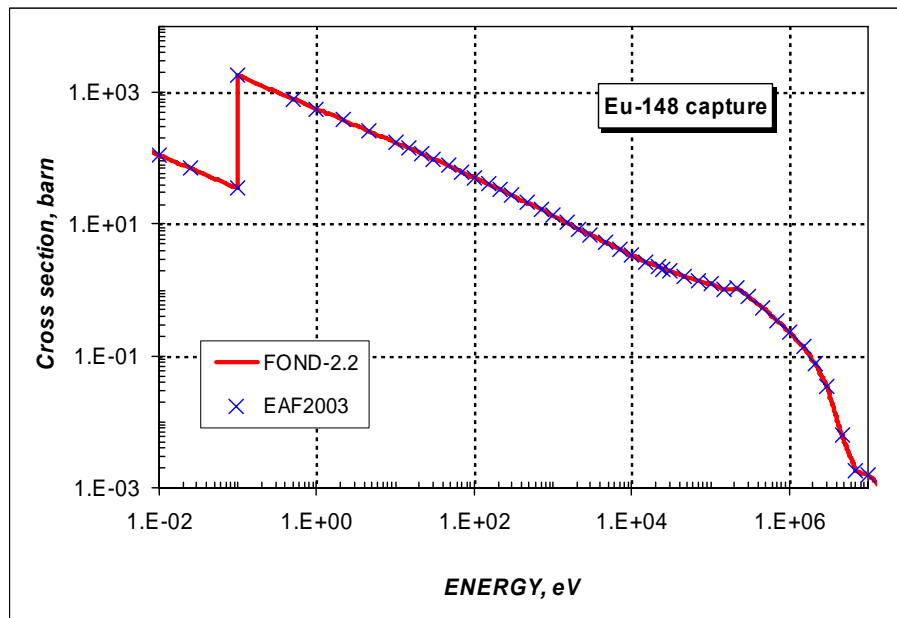


Рисунок 4 – Сечение радиационного захвата нейтронов на ^{148}Eu .

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 69.77 барна.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.Н.

63.5. Европий-149

Испытывает позитронный распад в ^{149}Sm (стабильный изотоп) посредством цепочки распада ^{149}Eu ($T_{1/2}=93.1$ дн) \rightarrow ^{149}Sm (стабильный).

В ФОНД-2.2 – J.Кореcky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 5 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно из рисунка 5, сечение радиационного захвата было переоценено. Сечения остальных реакций также пересчитаны с использованием современных модельных параметров, которые основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

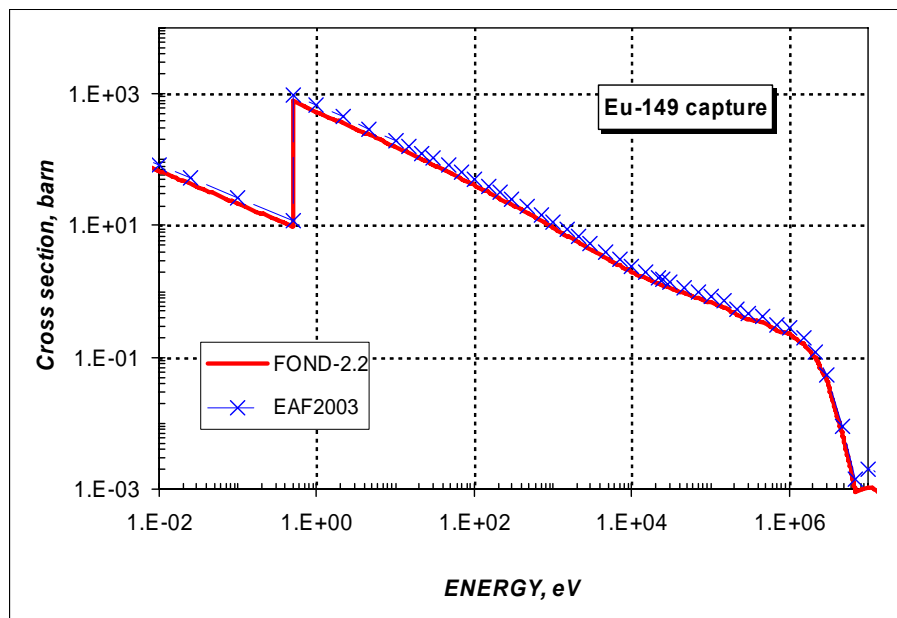


Рисунок 5 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-149.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре изменилось: было – 42.82 барн, стало – 52.86 барн.

В файле MF=9 сохранена только секция MT=111 с вероятностями образования прометия-148 в основном и изомерном состояниях.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.Н.

63.6. Европий-150

Испытывает позитронный распад в ^{150}Sm (стабильный изотоп) посредством цепочки распада ^{150}Eu ($T_{1/2}=36.9$ лет) \rightarrow ^{150}Sm (стабильный).

В ФОНД-2.2 – J.Кореcky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 6 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

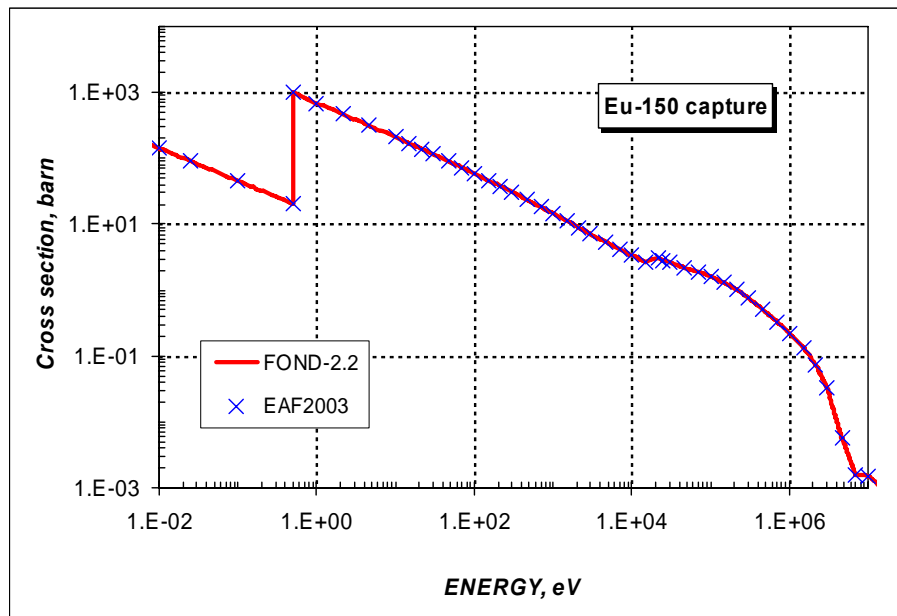


Рисунок 6 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-150.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 90.55 барна.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.Н.

63.7. Европий-151

Содержание в естественной смеси 47.8%.

В ФОНД-2.2 – оценка, выполненная для JENDL-3.2, в которой модифицировали сечения пороговых реакций, 1999.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JEF-2.2 (~ENDF/B-V).

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – новая оценка Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabghab, 2005.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 1. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 1. Резонансные свойства Eu-151.

| Оценка | Граница области RRR, eV | Граница области URR, keV | $\sigma_\gamma(2200)$, барн | $\sigma_\gamma(Maxw)$, барн | G-factor | I_γ , барн |
|------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|----------|-------------------|
| ENDF/B | 100. | 100. | 9 182.2 | 8 523.2 | 0.9390 | 3 291.5 |
| JENDL | 98.2 | 100. | 9 164.5 | 8 098.0 | 0.8939 | 3 107.6 |
| JEFF | 98.2 | 10.0 | 9 163.4 | 8 095.9 | 0.8937 | 3 352.8 |
| Mughabghab | | | 9200±1 | | 0.8940 | 3300±3 |

Из приведенной в таблице 1 информации видно, что наилучшее согласие с оцененным значением сечения захвата из компиляции Мухабхаба имеет оценки ENDF/B. Отметим, что при этом для G-фактора из оценки ENDF/B наблюдается расхождение ~ 5% между оцененным и рекомендуемым значением Мухабхаба.

На рисунке 7 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов в резонансной области энергий с имеющимися экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 7 сравнения видно, что оценка ENDF/B не согласуется с экспериментом Виддера (1975) в тепловой области энергий ~0.1 эВ, что и явилось причиной различия в G-факторе от рекомендованного значения.

Возможно, что в новой оценке Мухабхаба (2005) для такого описания сечения радиационного захвата в тепловой области энергий имелись основания, но, в настоящее время, они нам не известны.

Отметим, что, во-первых, в области энергий 0.01 – 0.1 эВ форма кривой сечения у всех оценок отличается от экспериментальной кривой. Во-вторых, выше 1 эВ с экспериментальными данными расходятся все оценки.

В области энергий 1 – 10 эВ оценка JENDL и ENDF/B по-разному описывают некоторые резонансные уровни.

Выше 10 эВ наблюдается хорошее согласие между всеми оценками.

В целом, для Eu-151 в резонансной области энергий наблюдается хорошее согласие в оценке резонансного поглощения нейтронов.

В тепловой области энергий главной составляющей сечения полного взаимодействия является сечение радиационного захвата. Поэтому имеет прямой резон посмотреть на согласованность оцененных и экспериментальных данных по полному сечению в отмеченной области энергий. Такое сравнение показано на рисунке 8.

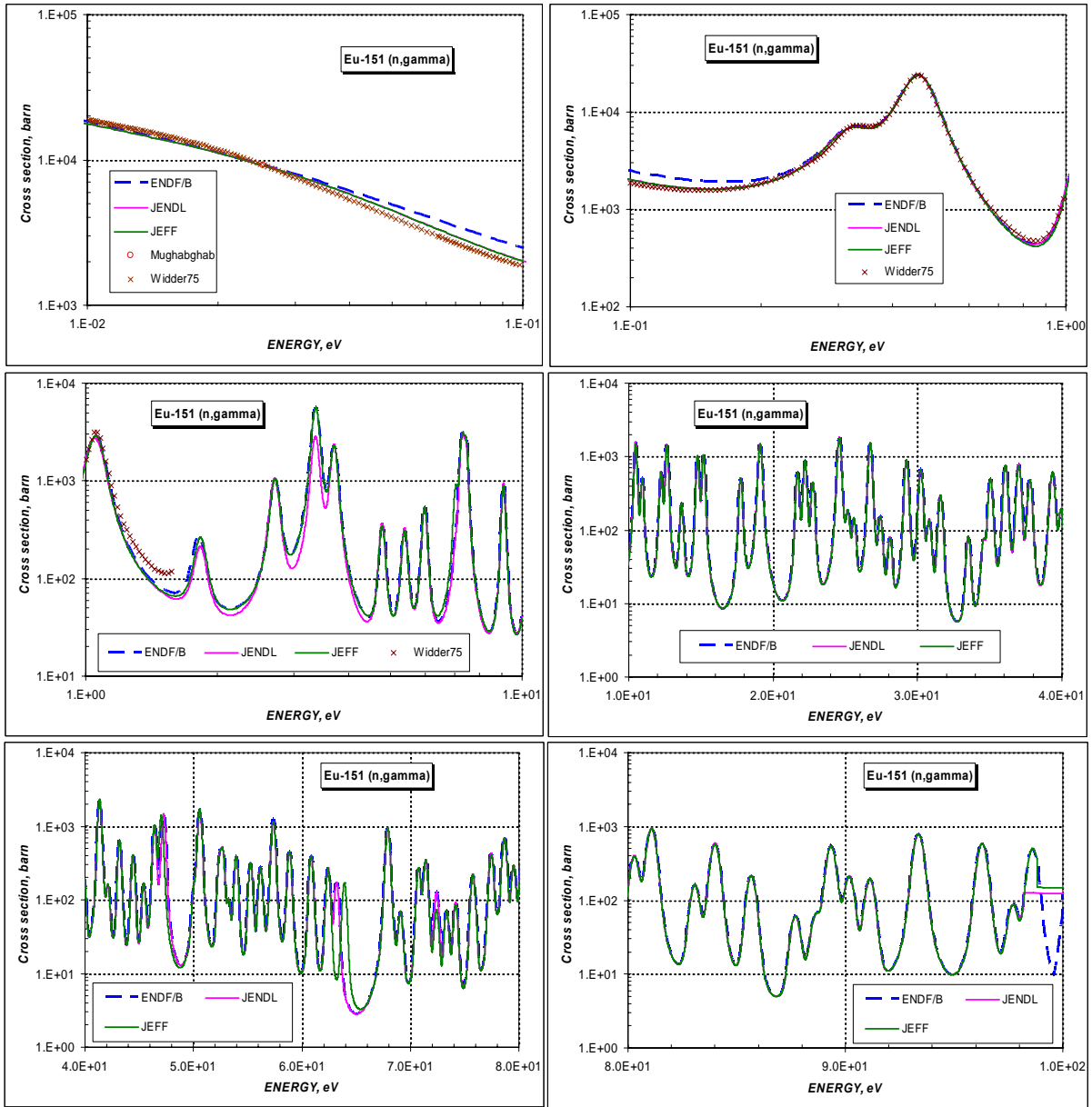


Рисунок 7 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-151 в резонансной области энергий.

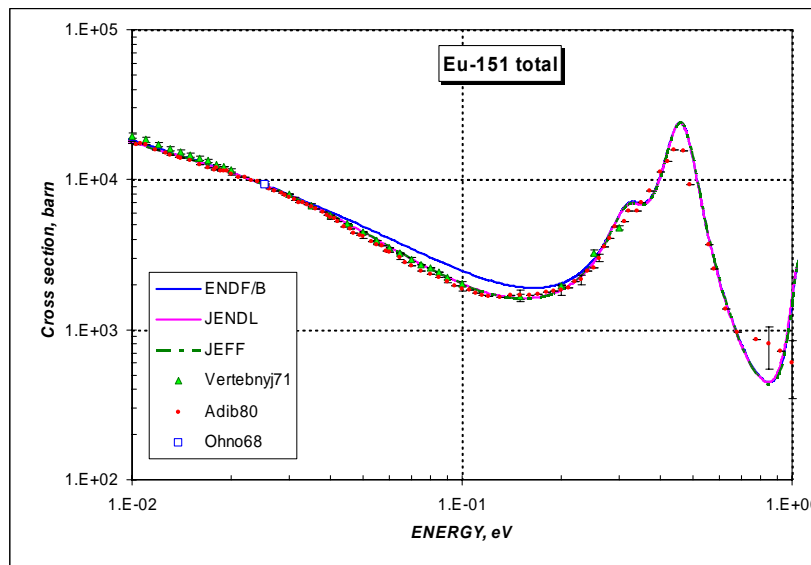


Рисунок 8 – Полное сечение Eu-151 в области энергий 0.01 – 1 эВ.

Из приведенного на рисунке 8 сравнения оцененных значений полного сечений с имеющимися экспериментальными данными видно, что поведение полного сечения в тепловой области, как и поведение сечения радиационного захвата, не подтверждает ход сечения из оценки ENDF/B. **В отсутствии дополнительной информации, которой, возможно, располагают, специалисты, готовившие оцененные данные для ENDF/B-VII, целесообразно внести коррективу в принятые в этой оценке параметры связанного состояния и первых двух резонансов, лежащих выше энергии связи нейтрона, заменив их на параметры из JEFF-3.1. В файле, включенном в РОСФОНД такая замена сделана, в результате чего, сечения при энергиях ниже 1эВ, следующие из этого файла, совпадают с таковыми из JEFF-3.1.**

На рисунке 9 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 100 эВ с имеющимися экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 9 сравнения видно, что до 300 кэВ оценки ENDF/B и JENDL согласуются друг с другом и ориентированы на воспроизведение экспериментальных данных Маклина (1987) и Боховко (1991). Оценка JEF в этой области энергий ориентирована на более старые экспериментальные данные Кзира (1970), Мицумото (1979) и Кононова (1977).

Выше 300 кэВ оценка JEF хорошо воспроизводит эксперимент Хокенбарри (1975), но плохо соответствует новым экспериментальным данным. Из двух оценок ENDF/B и JENDL, первая проходит по самому низу совокупности экспериментальных данных. В целом, обе оценки согласовано описывают имеющиеся новые экспериментальные данные в области энергий выше 100 эВ.

Заключение

РОСФОНД предлагается принять оценку Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabghab, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2) с заменой параметров трех первых резонансов.

Включить секцию 9/107 с вероятностями образования прометия-148 в основном и изомерном состояниях, используя данные EAF-2003.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

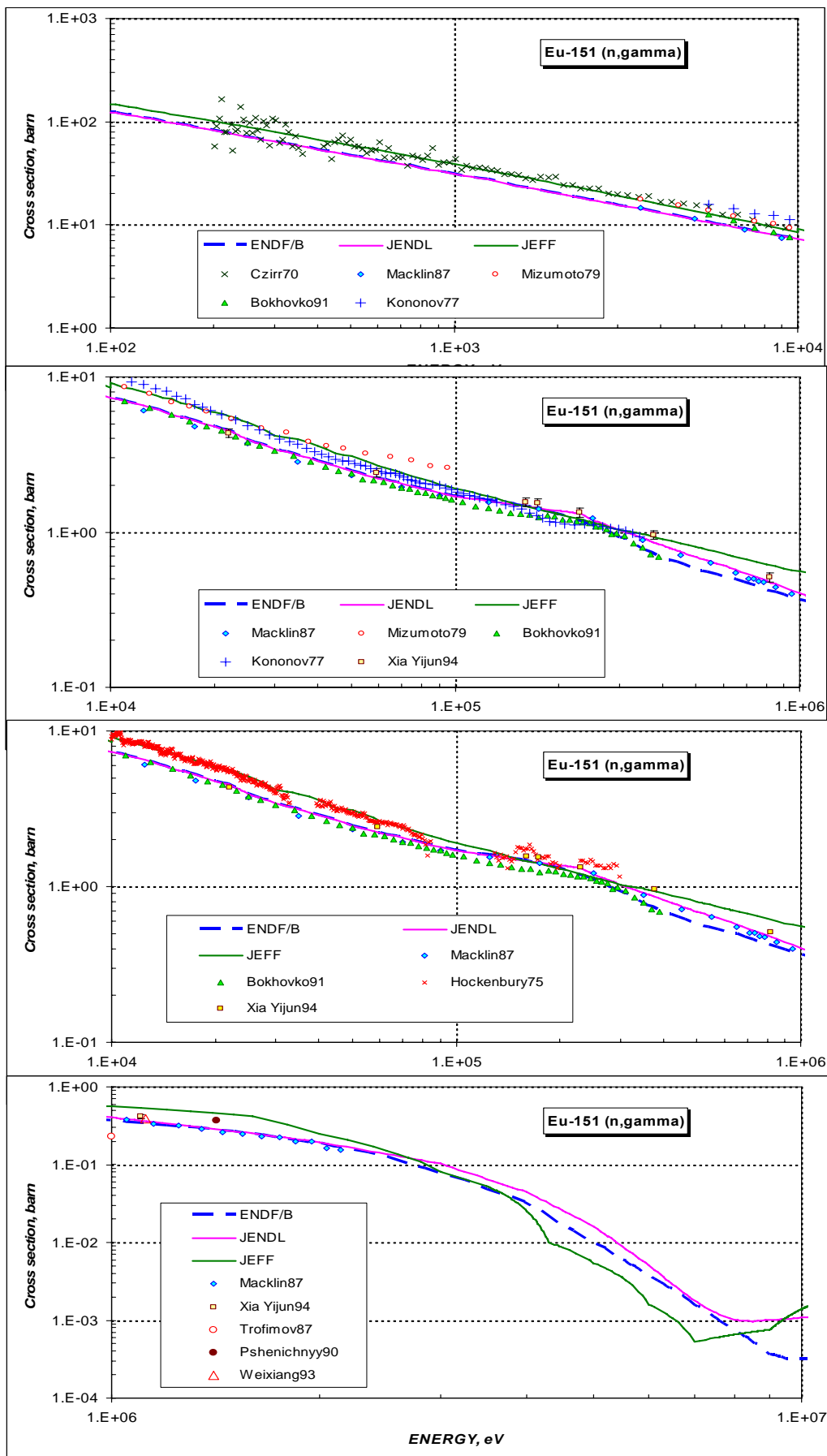


Рисунок 9 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-151 в области энергий выше 100 эВ.

63.8. Европий-152

Изотоп Eu-152 образуется путем выгорания стабильного изотопа Eu-151. Он имеет три изомерных состояния.

В основном состоянии - период полураспада $T_{1/2}=13.516$ лет. Из которого изотоп, с ~70% вероятностью испытывая β -распад превращается в стабильный изотоп Gd-150 (α -активный), и с ~30% вероятностью в результате позитронного распада превращается в Sm-152.

В первом изомерном состоянии - период полураспада составляет 9.31 часа. Цепочка распада аналогичная основному состоянию, с той лишь разницей, что поменялись местами вероятности процессов распада. Вероятность изомерного перехода ничтожно мала.

Во втором изомерном состоянии ($T_{1/2}=96$ мин.) испытывает изомерный переход в основное состояние с испусканием γ -кванта.

В ФОНД-2.2 – оценка J.Кореску, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JENDL-3.2.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – оценка R.Wright и JNDC FPND W.G. (2005) для международной библиотеки продуктов деления. В области разрешенных резонансов (1.E-5 эВ – 62.07 эВ) использована оценка ENDF/B, выше – оценка JENDL-3.3.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 2. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 2. Резонансные свойства Eu-152.

| Оценка | Граница области RRR, eV | Граница области URR, keV | $\sigma_\gamma(2200)$, барн | $\sigma_\gamma(Maxw)$, барн | G-factor | I_γ , барн |
|-----------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|----------|-------------------|
| ENDF/B | 62. | 100. | 12 792. | 11 618. | 0.9187 | 2 378. |
| JENDL | 6.55 | 100. | 12 747. | 11 574. | 0.9185 | 2 139. |
| FOND | - | - | 2 310.3 | 2 075.5 | 0.8984 | 3 679. |
| Von Egidy | | | 10 900 ± 1800 | | | 1 580. |

Из приведенной в таблице 2 информации видно, что и оценка ENDF/B и оценка JENDL согласуется с экспериментальным значением сечения захвата. Отметим, имеется сильное расхождение между рекомендованным Мухабхабом (BNL-325, 1981) значением резонансного интеграла и величинами, полученными на основе оцененных сечений. Из табличных данных видно также, что оценка, принятая в ФОНД, нуждается в пересмотре.

На рисунке 10 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 10 сравнения видно, что оценка ENDF/B существенно расширяет область разрешенных резонансов. При описании резонансов в районе 2 эВ оценка ENDF/B выше оценки JENDL, что и обуславливает небольшие расхождения в величине резонансного интеграла между этими оценками.

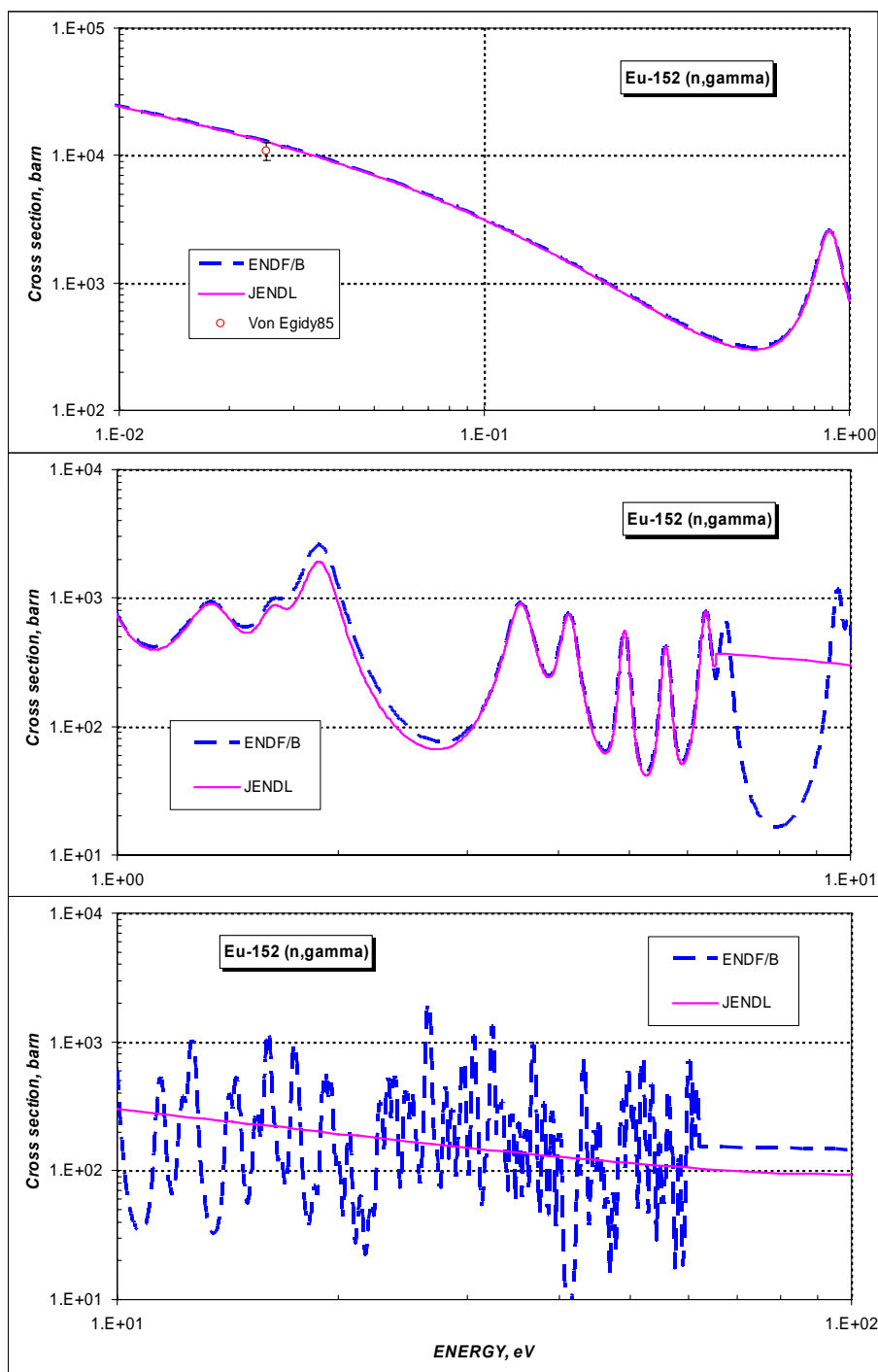


Рисунок 10 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-152 в резонансной области энергий.

На рисунке 11 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 100 эВ. Экспериментальные данные отсутствуют.

Из приведенного на рисунке 11 сравнения видно, что до 500 кэВ оценки ENDF/B и JENDL не согласуются друг с другом. Эта область является переходной для оценки ENDF/B с тем, чтобы состыковаться в дальнейшем с оценкой JENDL. В дальнейшем обе оценки идентичны.

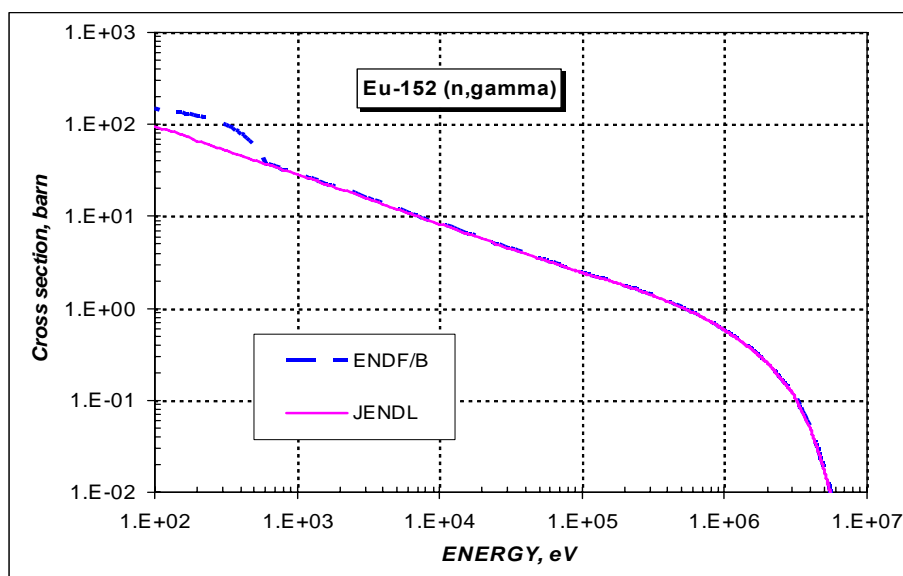


Рисунок 11 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-152 в области энергий выше 100 эВ.

Заключение

Учитывая тот факт, что в оценке данных для ENDF/B область разрешенных резонансов существенно расширена, в РОСФОНД предлагается принять оценку Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabghab, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2). Включить секцию 9/22 с вероятностями образования прометия-148 в основном и изомерном состояниях, используя данные EAF-2003.

Автор отбора данных

Кощеев В.Н.

63.9. Европий-153

Содержание в естественной смеси 52.19%. Eu-153 – один из основных осколков деления при делении в быстром реакторе. Выход его при делении ядерного топлива достаточно велик от $\sim 182.E-3$ (U235) до $\sim 5.74E-3$ (Pu-241).

В ФОНД-2.2 – оценка, выполненная для JENDL-3.2, в которой по рекомендации В.Н. Манохина модифицировали сечения пороговых реакций, 1999.

В БРОНД-2.2 – оценка, выполненная А.Игнатьюком и И.Кравченко в 1985 году. В 1989 году резонансная область энергий пересмотрена Г.Мантуровым.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JENDL-3.2.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – новая оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabghab, 2005.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 3. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 3. Резонансные свойства Eu-153.

| Оценка | Граница области RRR, eV | Граница области URR, keV | $\sigma_\gamma(2200)$, барн | $\sigma_\gamma(Maxw)$, барн | G-fact | I_γ , барн |
|----------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|--------|-------------------|
| ENDF/B | 97.8 | 83.9 | 312.4 | 304.4 | 0.9858 | 1 428. |
| JENDL | 97.2 | 100. | 312.6 | 304.6 | 0.9858 | 1 411. |
| BROND | 100.0 | 100. | 312.5 | 304.6 | 0.9858 | 1 508. |
| Mughabg hab | | | 312. ± 7. | | 0.986 | 1 420. ± 100. |

Из приведенной в таблице 3 информации видно, все оценки хорошо согласуются с рекомендованным значением сечения захвата из компиляции Мухабхаба. Что касается резонансного интеграла, то лучше других оценок рекомендованное значение согласуется с ENDF/B, хотя все оцененные значения резонансного интеграла согласуются друг с другой и с рекомендацией Мухабхаба лучше, чем заявленная точность рекомендованного значения.

На рисунке 12 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов в тепловой области энергий с имеющимися экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 12 сравнения видно, что все оценки и ENDF/B, и JENDL и БРОНД замечательным образом согласуются с рекомендованным значением Мухабхаба и не согласуется с экспериментом Виддера (1975) в тепловой области энергий. Если в случае с Eu-151 эксперимент Виддера находился ниже всей совокупности оцененных кривых, то на этот раз экспериментальные точки лежат значительно выше оцененных кривых. Конечно, этот факт не опровергает экспериментальные данные, но ставит под сомнение правильность определения результатов эксперимента.

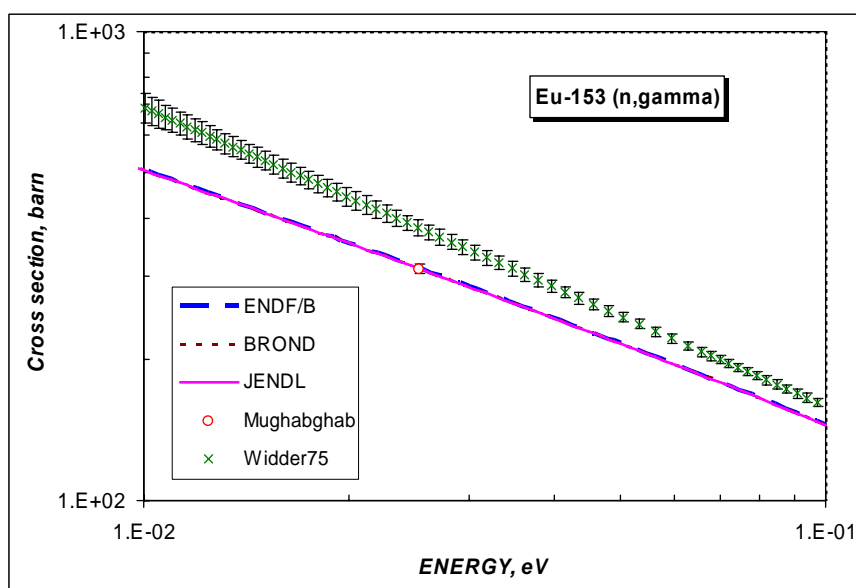


Рисунок 12 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-153 в тепловой области энергий.

На рисунке 13 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов в резонансной области энергий с имеющимися экспериментальными данными.

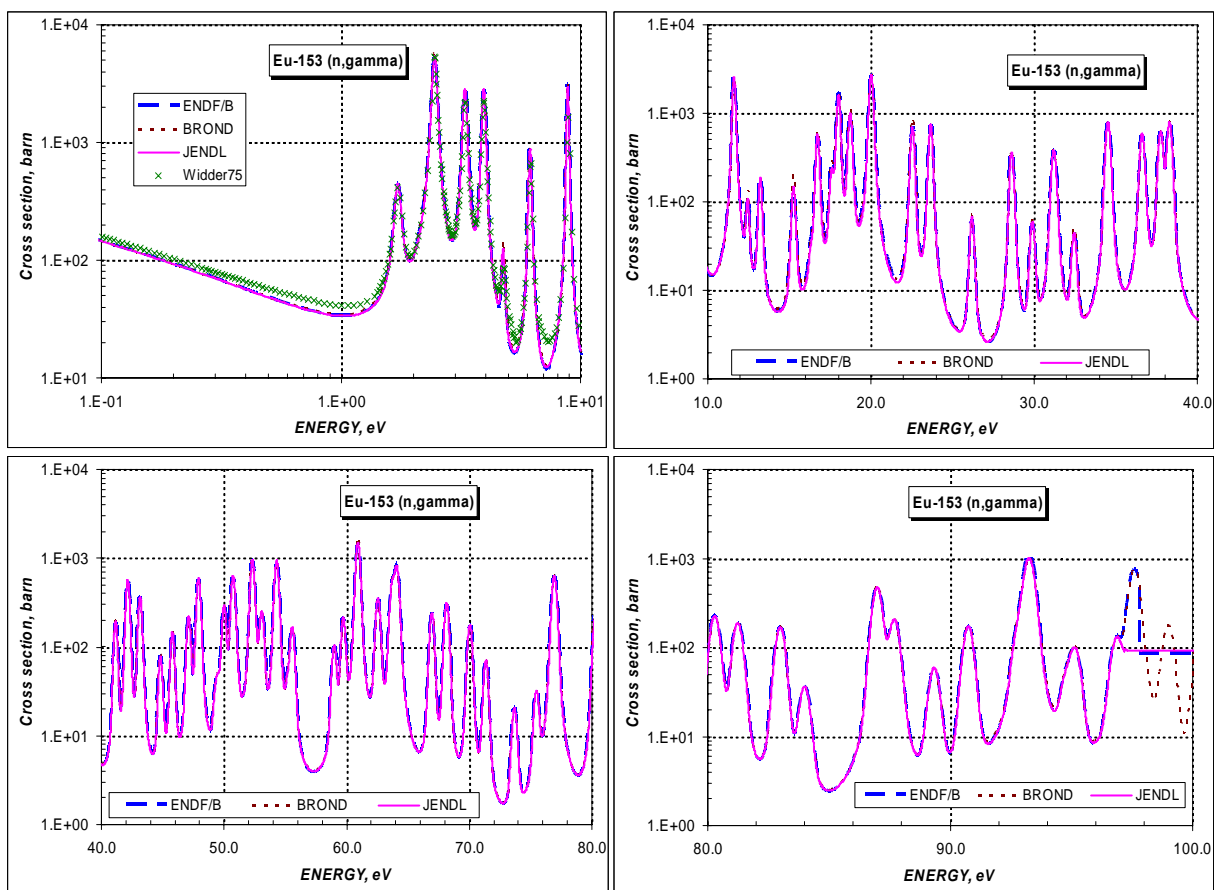


Рисунок 13 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-153 в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 13 сравнения видно, что все оценки и ENDF/B, и JENDL и БРОНД согласовано описывают резонансное поглощение в области энергий до 100 эВ. При этом все оценки не согласуются с экспериментом Виддера (1975) в тепловой области энергий.

На рисунке 14 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 100 эВ с имеющимися экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 14 сравнения видно, что в области энергий от 100 эВ до 1 кэВ оценки ENDF/B и БРОНД имеют “нерегулярную” форму сечения и отличаются от оценки JENDL. Это, вероятно, связано с интерполяцией параметров неразрешенных резонансов.

Выше 1 кэВ все оценки согласуются друг с другом и ориентированы на воспроизведение экспериментальных данных Конкса (1968), Маклина (1987), Боховко (1991), Вейхианга (1993) и Хиа Юджуна (1994).

Более старые экспериментальные данные Кзира (1970), Мицумото (1979), Кононова (1977), Хокенбарри (1975) и Моксона (1976) не согласуются с более

поздними экспериментальными данными. Совокупность “старых” данных приблизительно на 40 % находится выше совокупности “новых” данных.

В области энергий выше 3 МэВ оценки начинают различаться согласно результатам различным расчетных программ. Однако в этой области энергий и сами сечения становятся малыми.

Заключение

Учитывая, что

- в оценке данных для ENDF/B принимали участие Mughabghab et al.;
- оценка выполнена в 2005 году;
- оценка выполнена в рамках международной библиотеки для продуктов деления,

в РОСФОНД предлагается принять оценку ENDF/B-VII betha 1.2 версию.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

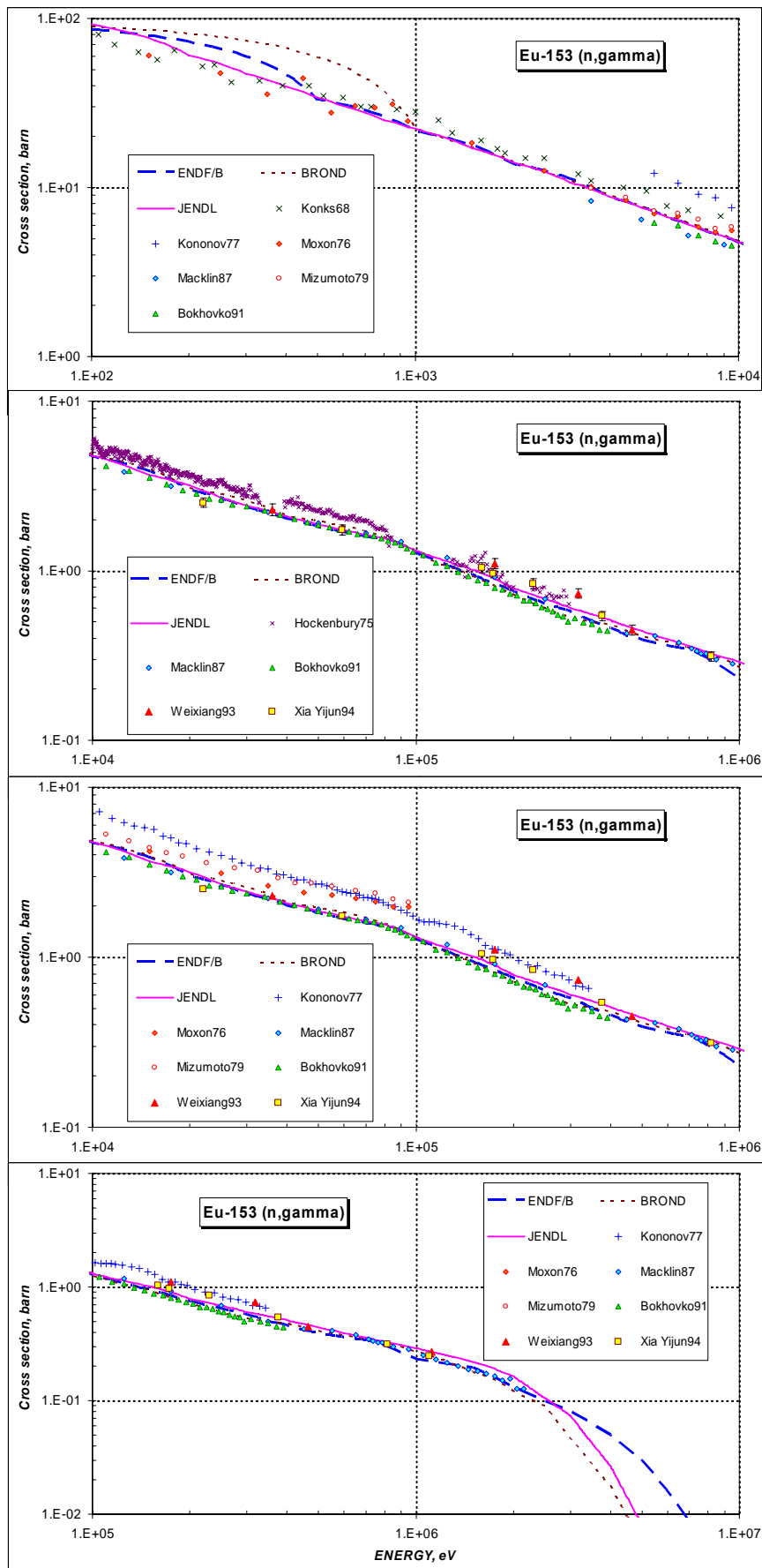


Рисунок 14 – Сечение радиационного захвата нейтронов на ^{153}Eu в области энергий выше 100 эВ.

63.10. Европий-154

Изотоп Eu-154 образуется путем выгорания стабильного изотопа Eu-153. Он имеет изомерное состояние.

В основном состоянии - период полураспада $T_{1/2}=8.592$ лет. Из которого изотоп, с ~99.98% вероятностью испытывая β -распад превращается в стабильный изотоп Gd-154. В изомерном состоянии ($T_{1/2}=46.3$ мин.) испытывает изомерный переход в основное состояние с испусканием γ -кванта.

Кроме того, Eu-154 является одним из осколков деления при делении в быстром реакторе. Выход его при делении ядерного топлива достаточно велик от $\sim 2.0E-4$ (U235) до $\sim 6.1E-4$ (Pu-241).

В ФОНД-2.2 – оценка, выполненная для JENDL-3.2, в которой модифицировали сечения пороговых реакций, 1999.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для ENDF/B-VI rel.7.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – оценка S.Mughabghab и JNDC FPND W.G. (2005) для международной библиотеки продуктов деления. В области разрешенных резонансов (1.E-5 эВ – 27.5 эВ) использована новая оценка Мухабхаба, выше – оценка CENDL-3.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 4. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 4. Резонансные свойства Eu-154.

| Оценка | Граница области RRR, eV | Граница области URR, keV | $\sigma_\gamma(2200)$, барн | $\sigma_\gamma(Maxw)$, барн | G-factor | I_γ , барн |
|------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|----------|----------------------|
| ENDF/B | 27.5 | 100. | 1 353. | 1 663. | 1.2441 | 1 317. |
| JENDL | 26.2 | 100. | 1 847. | 2 212. | 1.2116 | 1 194. |
| JEFF | 63.0 | 10.0 | 1 845. | 2 199. | 1.2057 | 1 358. |
| Mughabghab | | | 1 340. $\pm 130.$ | | | 1 600. $\pm 200.$ |

Из приведенной в таблице 4 информации видно, что оценка ENDF/B наилучшим образом согласуется с рекомендованным значением сечения захвата. Оцененные значения из JEFF и JENDL не согласуются с рекомендованным значением сечения захвата в тепловой точке. Отметим также, что имеется расхождение между рекомендованным Мухабхабом (BNL-325, 1981) значением резонансного интеграла и величинами, полученными на основе оцененных сечений для всех оценок.

На рисунке 15 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 15 сравнения видно, что величина резонансного интеграла в оценке JEFF приближается к рекомендованному значению, вероятно, за счет описания резонансных минимумов. В настоящее время, отсутствует возможность сравнительного анализа резонансных параметров для первых резонансных уровней. Но после выхода новой компиляции Мухабхаба такой анализ был бы уместен.

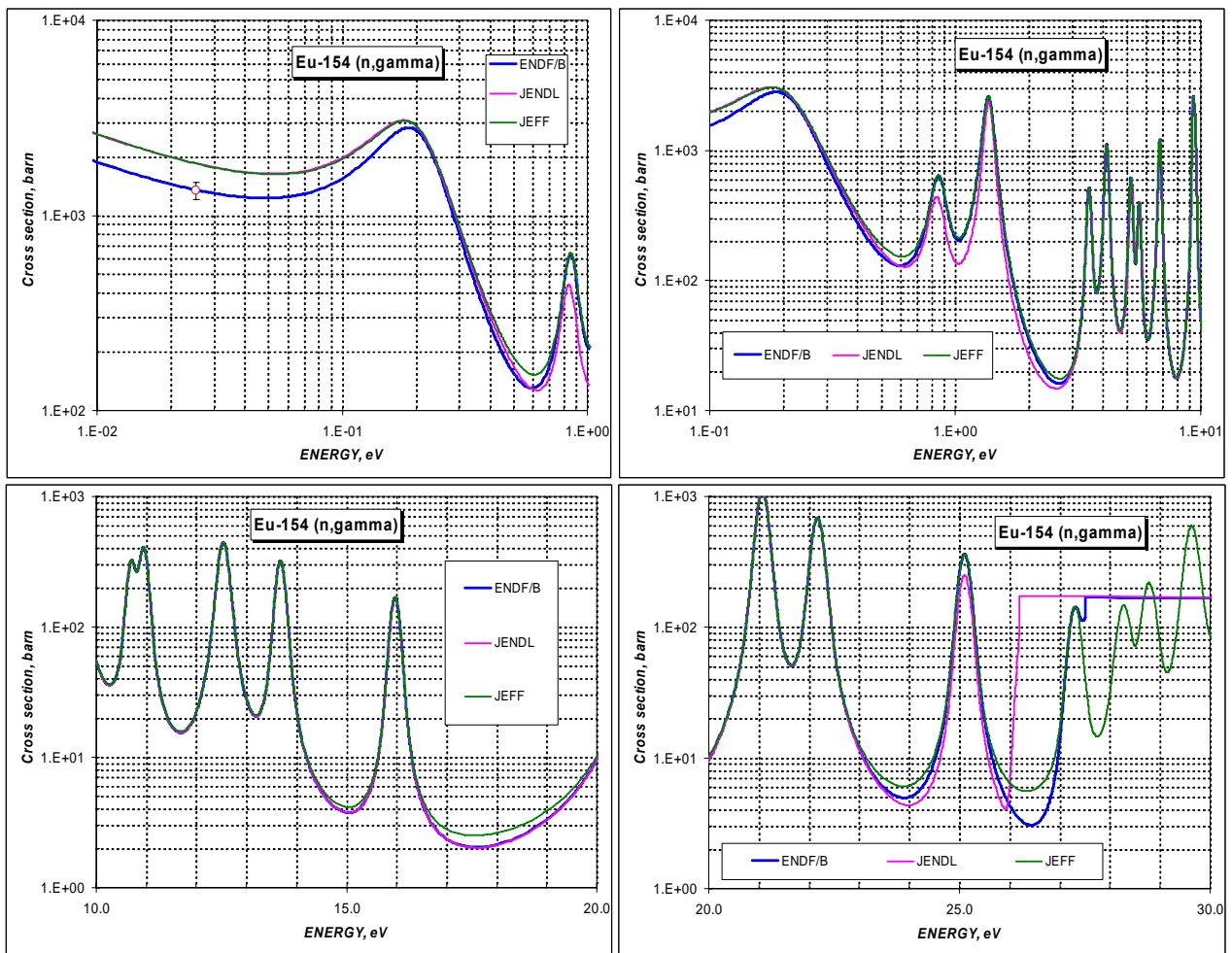


Рисунок 15 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-154 в резонансной области энергий.

На рисунке 16 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 100 эВ. Экспериментальные данные в этой области энергии отсутствуют.

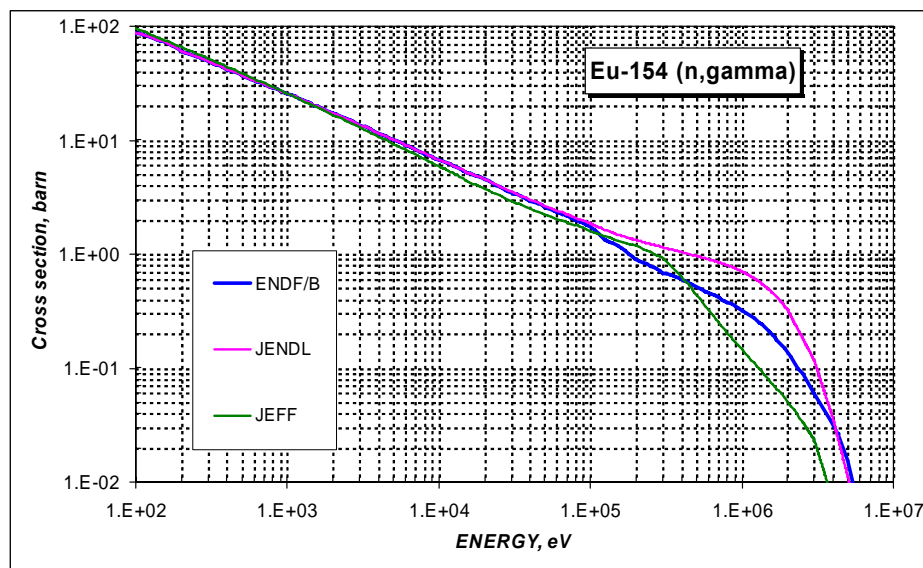


Рисунок 16 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-154 в области энергий выше 100 эВ.

Из приведенного на рисунке 16 сравнения видно, что в области энергий от 100 эВ до 100 кэВ все оценки согласуются друг с другом.

В области энергий выше 100 кэВ оценки начинают различаться согласно результатам различным расчетных программ. Однако в этой области энергий и сами сечения становятся малыми.

Заключение

Учитывая, что

- в оценке резонансных параметров для ENDF/B принимал участие Mughabghab et al.;
- эта оценка выполнена в 2005 году;
- выполнена в рамках международной библиотеки для продуктов деления,

в РОСФОНД предлагается принять оценку ENDF/B-VII betha 1.2 версию.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

63.11. Европий-155

Изотоп Eu-155 образуется путем выгорания радиоизотопа Eu-154, имеющего период полураспада $T_{1/2}=8.8$ лет. Период полураспада Eu-155 $T_{1/2}=4.761$ лет.

Кроме того, Eu-155 является одним из важнейших осколков деления при делении в быстром реакторе. Выход его при делении ядерного топлива достаточно велик от $\sim 3.4E-4$ (U-235) до $\sim 2.95E-3$ (Pu-241).

В ФОНД-2.2 – оценка, выполненная для JENDL-3.2, в которой модифицировали сечения пороговых реакций, 1999.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для ENDF/B-VI rel.7.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – международной рабочей группой рекомендована оценка CENDL-3, основу которой составляет откорректированная в области высоких энергий версия оценки JENDL-3.3.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 5. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 5. Резонансные свойства Eu-155.

| Оценка | Граница области RRR, eV | Граница области URR, keV | $\sigma_\gamma(2200)$, барн | $\sigma_\gamma(Maxw)$, барн | G-factor | I_γ , барн |
|-------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|----------|-------------------|
| ENDF/B | 29.7 | 100. | 3 760. | 3 802. | 1.0229 | 15 531. |
| JENDL | 29.7 | 100. | 3 760. | 3 802. | 1.0229 | 15 531. |
| JEFF | 37.5 | 10.0 | 3 757. | 3 811. | 1.0213 | 15 516. |
| Mughabg hab | | | 3 950. $\pm 125.$ | | | 16 000. \pm |

Из приведенной в таблице 5 информации видно, что все оценки согласуются с рекомендованным значением сечения захвата одинаково плохо. Отметим, что расхождения между рекомендованным Мухабхабом (BNL-325, 1981) значением резонансного интеграла и величинами, полученными на основе оцененных сечений, отсутствуют, вероятно, в силу большой погрешности рекомендованной величины резонансного интеграла.

На рисунке 17 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 17 сравнения видно, что величина резонансного интеграла в оценке JEFF приближается к рекомендованному значению, вероятно, за счет описания резонансных минимумов. В настоящее время, отсутствует возможность сравнительного анализа резонансных параметров для первых резонансных уровней. Но после выхода новой компиляции Мухабхаба такой анализ был бы уместен. Возможно, что в новой компиляции произошло уточнение значения резонансного интеграла.

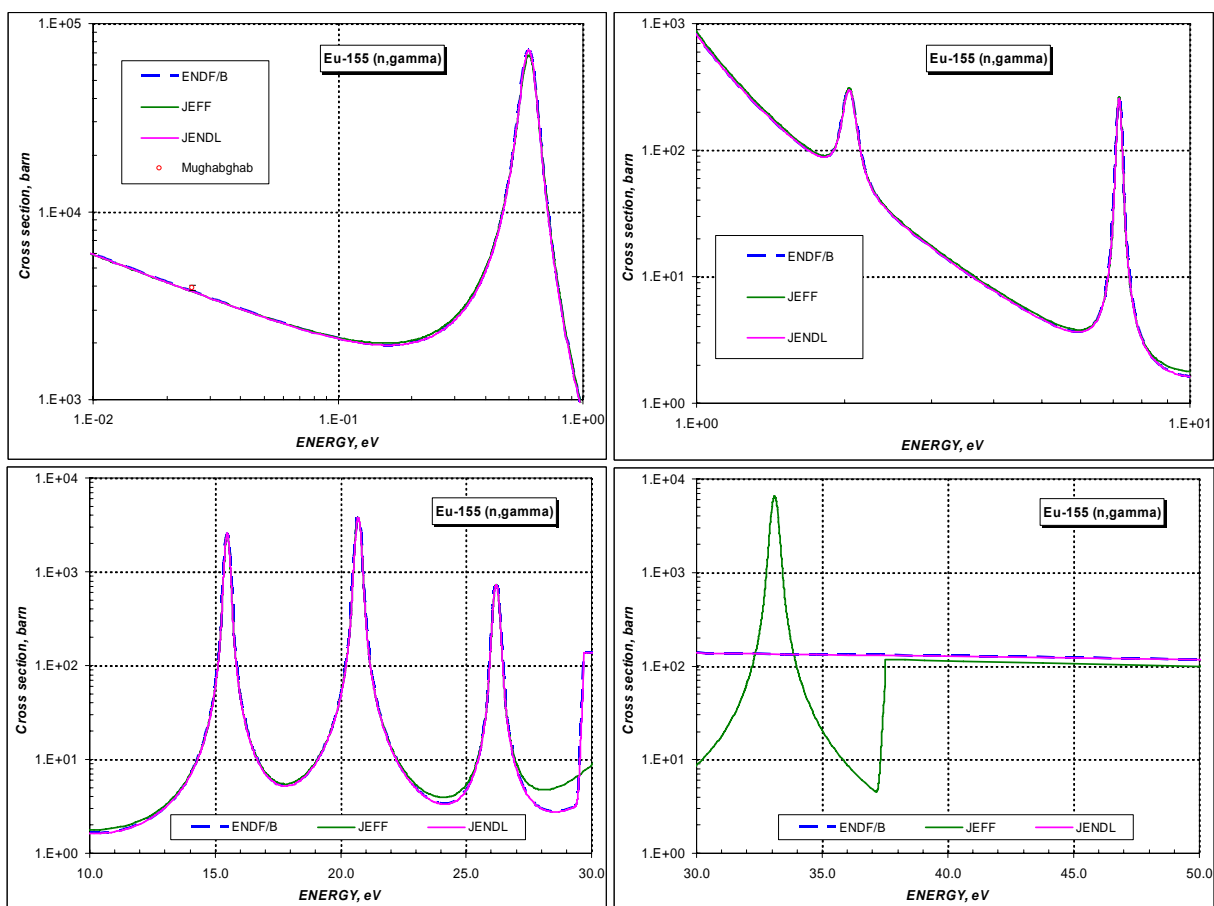


Рисунок 17 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-155 в резонансной области энергий.

На рисунке 18 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 100 эВ. Экспериментальные данные в этой области энергии отсутствуют.

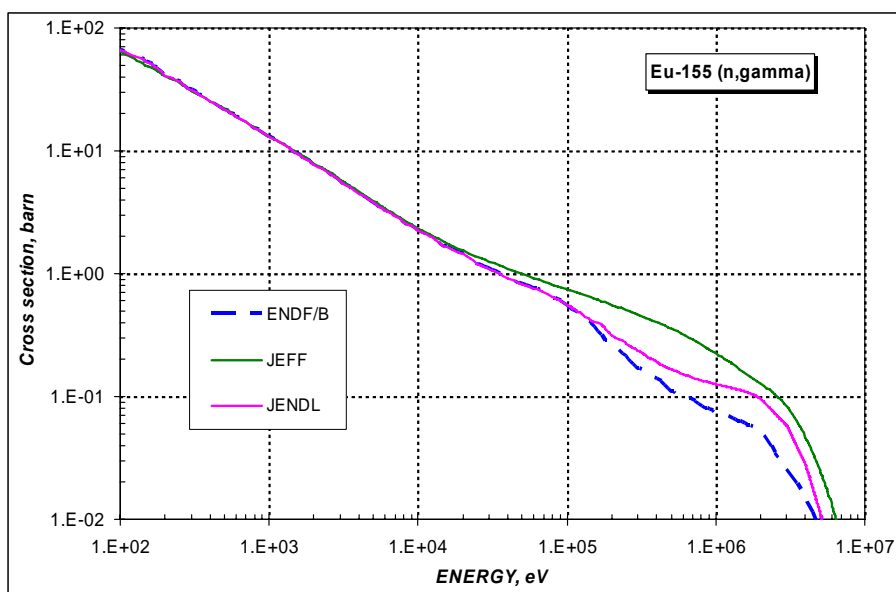


Рисунок 18 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-155 в области энергий выше 100 эВ.

Из приведенного на рисунке 18 сравнения видно, что в области энергий от 100 эВ до 10 кэВ все оценки согласуются друг с другом.

В области энергий выше 10 кэВ оценки начинают различаться согласно результатам вычислений по различным расчетным программам. Однако в этой области энергий и сами сечения становятся малыми.

Заключение

Учитывая, что

- все оценки сечения радиационного захвата хорошо согласуются друг с другом;
- оценка для ENDF/B выполнена в 2005 году;
- оценка выполнена в рамках международной библиотеки для продуктов деления,

в РОСФОНД предлагается принять оценку ENDF/B-VII beta 1.2 версию.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

63.12. Европий-156

Изотоп Eu-156 образуется путем выгорания радионуклида Eu-155 $T_{1/2}=4.761$ лет. Период полураспада Eu-156 $T_{1/2}=15.19$ дней.

Кроме того, Eu-156 является одним из осколков деления при делении в быстром реакторе. Выход его при делении ядерного топлива от $\sim 2.0E-5$ (U-235) до $\sim 3.0E-4$ (Pu-241).

В ФОНД-2.2 – оценка, выполненная для JEF-2.2, в которой модифицировали сечения пороговых реакций, 1999.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JEF-2.2.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – международной рабочей группой рекомендована оценка JENDL-3.3, с незначительными изменениями, 2005.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 6. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 6. Резонансные свойства Eu-156.

| Оценка | Граница области RRR, eV | Граница области URR, keV | $\sigma_\gamma(2200)$, барн | $\sigma_\gamma(Maxw)$, барн | G-factor | I_γ , барн |
|------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|----------|-------------------|
| ENDF/B | - | 1 эВ – 100 | 100. | 98.9 | 1.0001 | 1 873. |
| JENDL | - | 1 эВ – 100 | 100. | 98.9 | 1.0001 | 1 873. |
| ФОНД-2.2 | - | - | 482. | 477. | 1.0005 | 1 492. |
| JEFF | - | - | 482. | 477. | 1.0005 | 1 492. |
| Mughabghab | | | | | | |

Из приведенной в таблице 6 информации видно, что нет никакой ясности по поводу правильности сечения радиационного захвата для Eu-156. Имеется европейская оценка, в которой сечение в тепловой точке в 4 - 5 раз больше, чем в японской оценке, а значение резонансного интервала меньше на 20 - 25%.

На рисунке 19 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов в широкой области энергий от 0.01 эВ до 10 МэВ.

Из приведенного на рисунке 19 сравнения видно, насколько теоретические кривые сечения радиационного захвата различаются между собой.

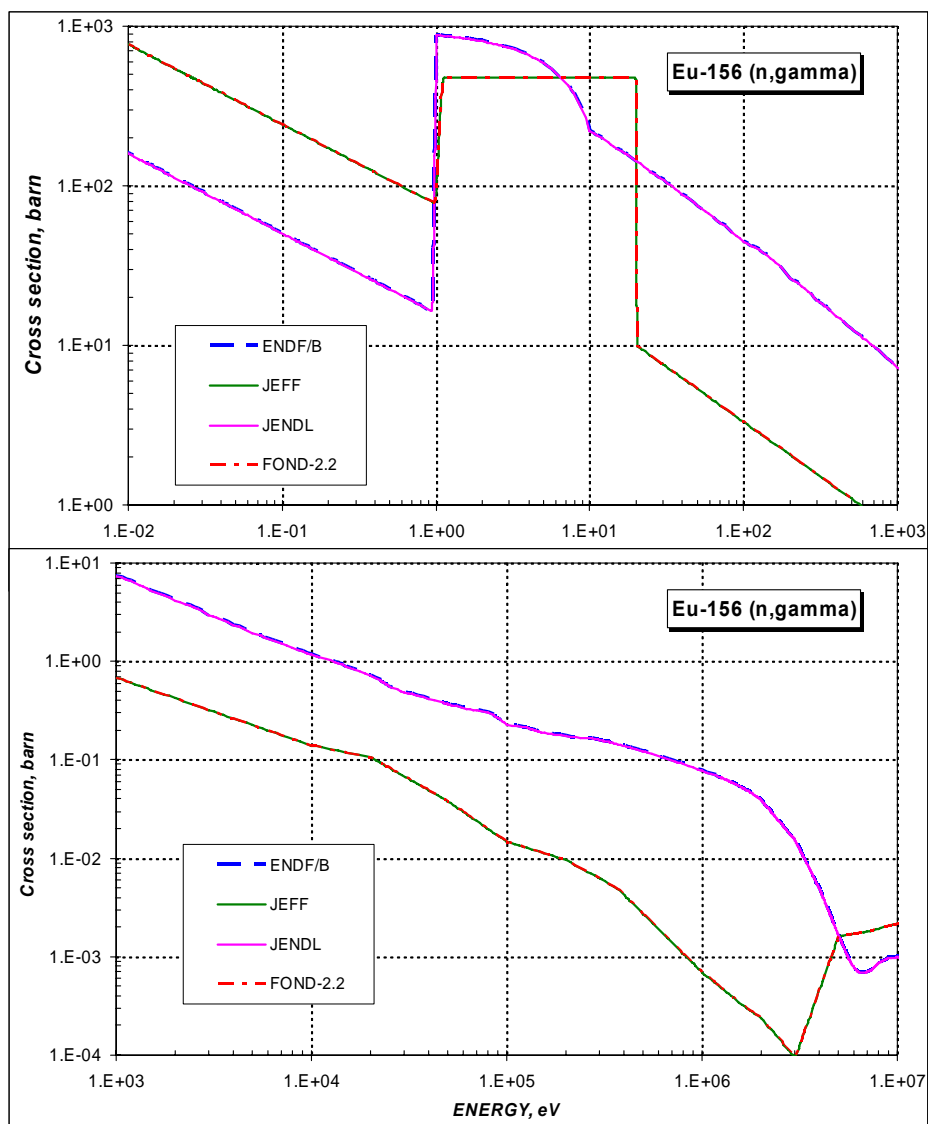


Рисунок 19 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-156.

Заключение

Учитывая, что экспериментальных оснований для выбора оценки сечений европия-156 не имеется, для европия-156 (как и для более легких изотопов этого элемента) целесообразно принять в РОСФОНДе оценку международной группы, включенную в ENDF/B-VII.

Автор отбора данных

Кошцев В.Н.

63.13. Природный европий

В настоящем разделе приводятся результаты тестирования 299-групповых сечений, полученных на основании оцененных нейтронных данных стабильных изотопов из различных оценок. Мультигрупповые сечения для стабильных изотопов были получены с помощью программы переработки нейтронных данных NJOY. Затем с весом концентрации их в смеси, были получены мультигрупповые сечения для природного европия.

Сравнение проводилось только для тех типов сечения, для которых в международной базе экспериментальной информации EXFOR имелись какие либо наборы экспериментальных данных.

На рисунке 20 приведено общее сравнение оцененных сечений полного взаимодействия в области энергий от 0.01 эВ до 10 МэВ.

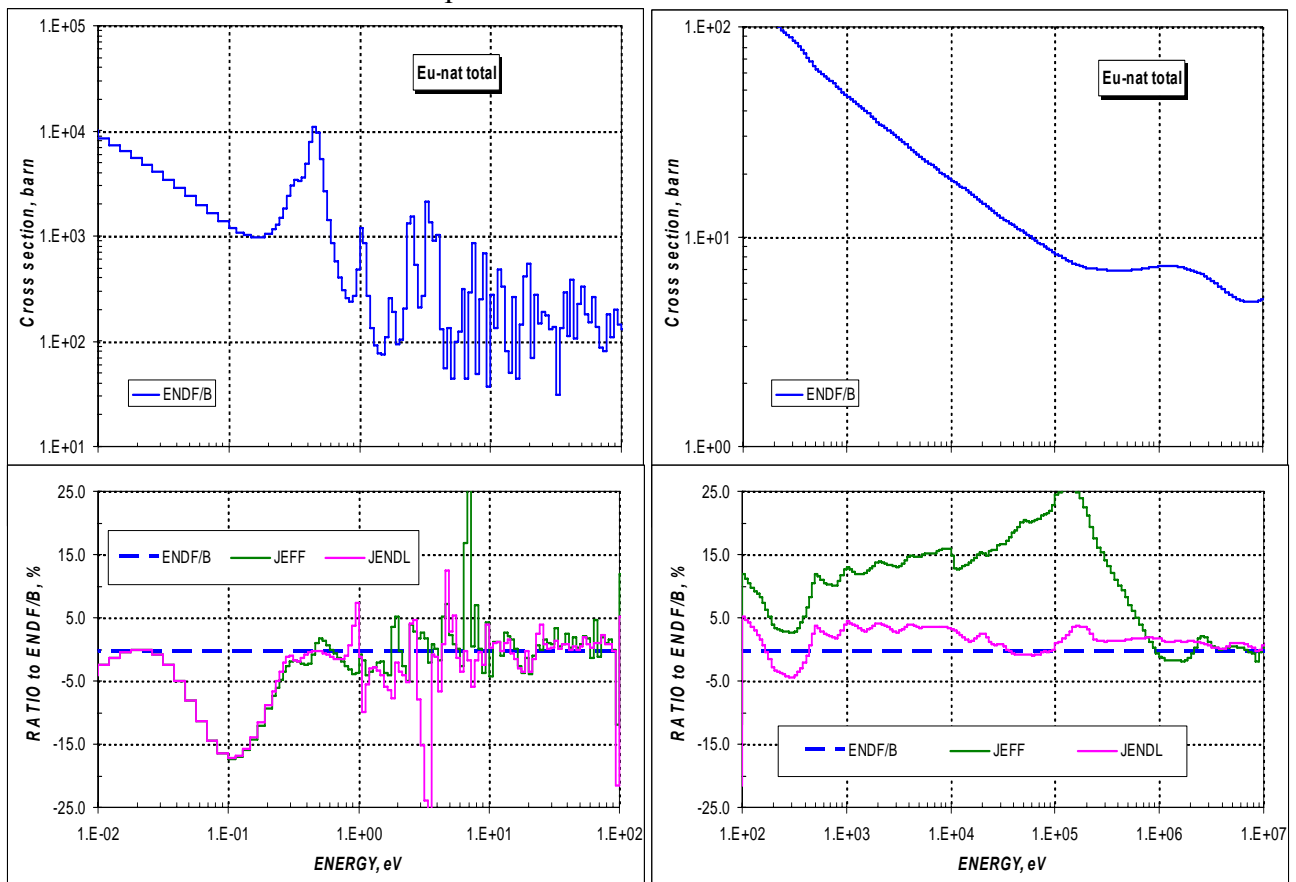


Рисунок 20 – Сравнение оцененных мультигрупповых сечений полного взаимодействия для Eu-nat в области энергий 0.01 эВ – 10 МэВ.

Из представленной на рисунке 20 информации видно, что полное сечение из оценки ENDF/B в интервале энергий от 0.03 до 0.3 эВ лежит выше остальных. Расхождение достигает 15 %. Это связано с отличием полного сечения для Eu-151 (см. раздел 63.7). Напомним, что в этой области энергий в РОСФОНД принята откорректированная оценка, совпадающая с JEFF-3.1.

В области энергий от 1 эВ до 200 эВ оценки, в целом, согласуются в пределах 5% с некоторыми “осцилляциями”, связанными с различным положением резонансных уровней. Выше 200 эВ оценки JENDL и ENDF/B согласуются между собой в пределах лучше, чем 5%, в то время, как оценка JEFF вплоть до энергии 1 МэВ отличается от остальных до 25 %. В области энергий выше 1 МэВ все оценки прекрасно согласуются между собой.

Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия с имеющимися экспериментальными данными в области энергий до 1 эВ показано на рисунке 21.

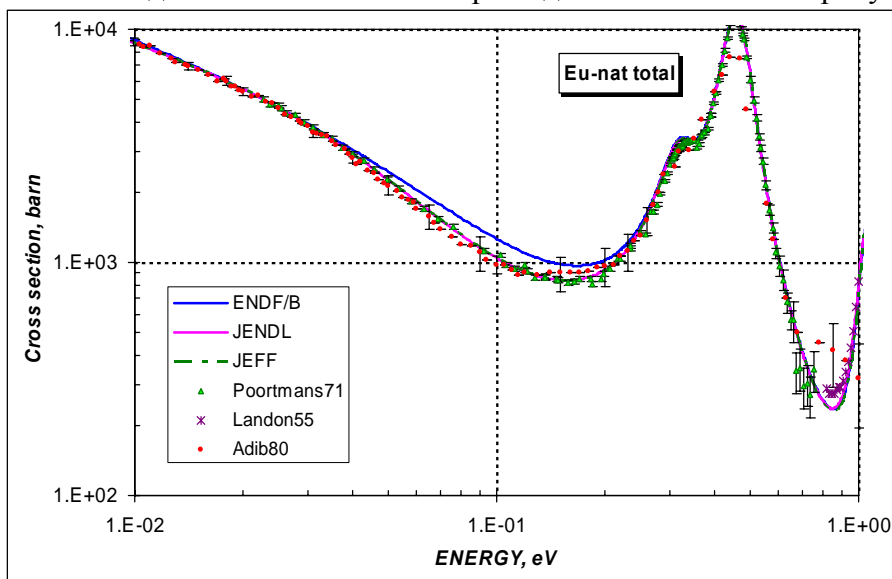


Рисунок 21 – Сравнение оцененных и экспериментальных данных для полного сечения Gd-nat в области энергий 0.01 эВ – 1.0 эВ.

Из приведенного сравнения на рисунке 21 видно, что для оценки ENDF/B наблюдаются существенные расхождения от экспериментальных данных, в то время как, оценки JEF и JENDL согласуются со всей совокупностью экспериментальных данных. Это различие объясняется расхождением в полном сечении европия-151, отмеченном ранее.

Сравнение оцененных сечений с имеющимися экспериментальными данными в области энергий от 100 эВ до 10 МэВ показано на рисунке 22.

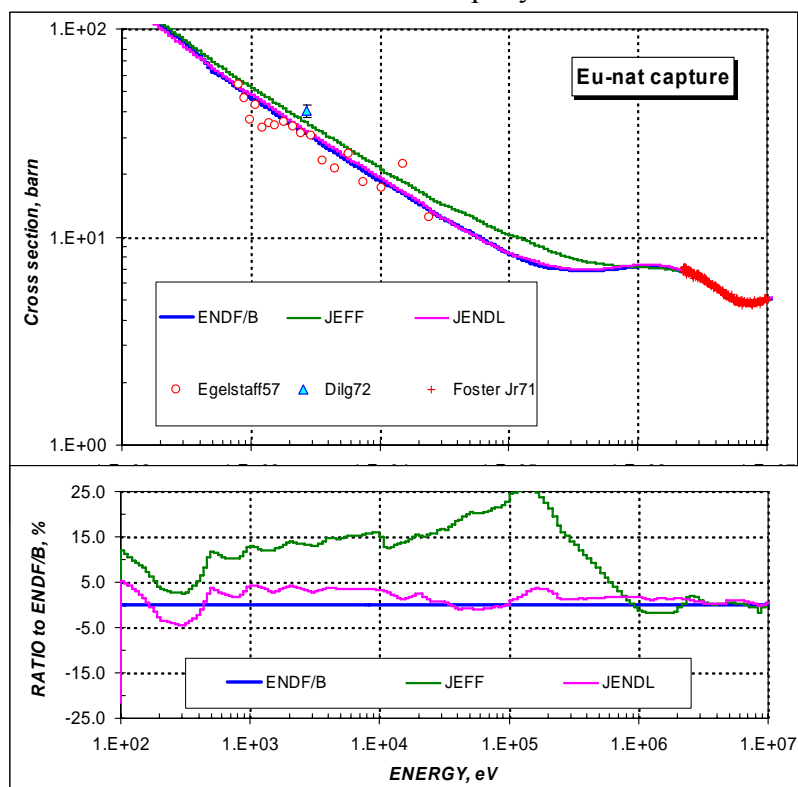


Рисунок 22 – Сравнение оцененных и экспериментальных данных для полного сечения Gd-nat в области энергий 100. эВ – 10 МэВ.

Из приведенного сравнения на рисунке 22 видно, что прекрасное согласие оцененных сечений объясняется наличием детального эксперимента Фостера (1971). В области энергий ниже 1 МэВ экспериментальные данные не многочисленны и противоречивы. Экспериментальная точка Дилга (1972) не согласуется с экспериментальными данными Эгельстаффа, полученными еще в 1957 году.

Далее, было протестировано сечение захвата, полученное, путем свертки сечений с весом концентрации стабильных изотопов в природной смеси.

Для захвата были посчитаны значения сечения в тепловой точке и резонансный интеграл на основе рассмотренных выше значений для стабильных изотопов. Они сравнивались со значениями, рекомендованными в компиляции Мухабхаба. Сравнение приведено в таблице 9.

Таблица 7. Резонансные свойства Eu-nat.

| Оценка | $\sigma_{\gamma}(2200)$, барн | I_{γ} , барн |
|--|-----------------------------------|----------------------|
| ENDF/B | 4 553. | 2 319. |
| JENDL | 4 545. | 2 222. |
| JEFF | 4 544. | 2 339. |
| <i>Mughabgha</i> <i>b</i> | 4 565. ± 100. | 2 320. ± 150. |

Из приведенной в таблице 7 информации видно, что оценка ENDF/B наилучшим образом согласуется с рекомендуемыми значениями Мухабхаба. В то же время, и остальные оцененные значения согласуются с рекомендациями Мухабхаба в пределах заявленной точности.

На рисунке 23 представлено сравнение оцененных сечений в области энергий от 0.01 эВ до 10 МэВ.

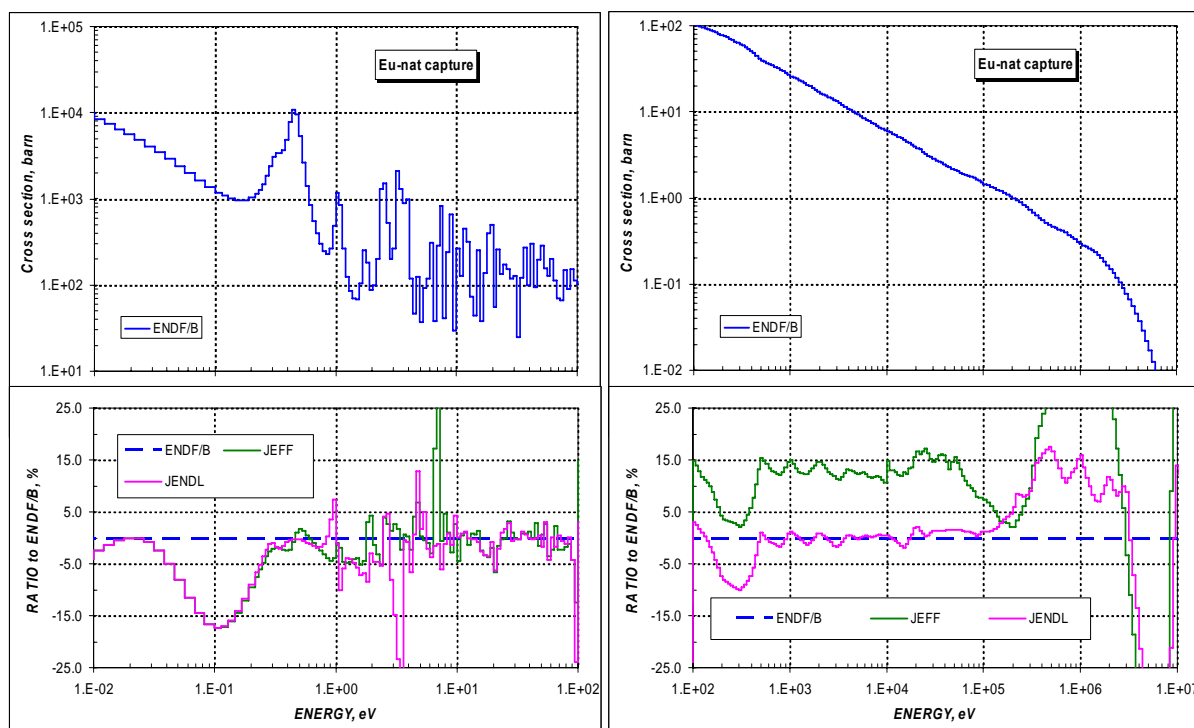


Рисунок 23 – Сравнение оцененных мультигрупповых сечений захвата для Eu-nat в области энергий 0.01 эВ – 10 МэВ.

Из представленной на рисунке 23 информации видно, что сечение захвата из оценки ENDF/B в интервале энергий от 0.03 до 0.3 эВ лежит выше остальных. Расхождение достигает более 15 %. Это связано с отличием сечения захвата для Eu-151 (см. раздел 63.7). В области энергий от 1 эВ до 200 эВ оценки, в целом, согласуются в пределах 5% с некоторыми “осцилляциями”, связанными с различным положением резонансных уровней. В области энергий от 200 эВ до 100 кэВ оценки JENDL и ENDF/B согласуются между собой в пределах 5%, в то время, как оценка JEFF во всей области энергий отличается от остальных. Различия достигают в среднем 15%. В области энергий выше 200 кэВ все оценки наблюдаемое расхождение сечений объясняется различиями в используемой теоретической расчетной модели сечений.

Экспериментальных данных по сечению захвата в области низких энергий нет. Об “истинности” оцененных сечений захвата можно судить по ситуации в этой области энергий с оценкой полного сечения. Как было видно выше, оценка ENDF/B не согласуется с экспериментальными данными в области энергий от 0.02 – 0.2 эВ.

Сравнение оцененных сечений захвата с имеющимися экспериментальными данными в области энергий выше 100 эВ показано на рисунке 24.

В области энергий от 100 эВ до 10 кэВ оценки ENDF/B и JENDL лежат на 10 - 15% ниже всех экспериментальных данных и оценки JEFF. Рассогласованность вызвана тем, что принятая в РОСФОНД оценка данных для Eu-151 опирается на эксперименты Моксона (1987) и Боховко (1991), экстраполяция которых на область несколько более низких энергий и ведет к отмеченному противоречию. Пересмотр принятых для Eu-151 данных не представляется целесообразным, т.к. погрешность сечения захвата в килоэлектронвольтовой области едва-ли ниже 20%.

В области энергий от 10 кэВ до 100 кэВ оценки JENDL и ENDF/B согласованно в пределах 5% описывают наилучшим образом экспериментальные данные. Выше 100 кэВ наблюдается расхождение всех оценок с экспериментом Боховко (1991), данные которого лежат в основе оценки сечения захвата для Eu-151 и Eu-153.

В области энергий выше 100 МэВ оценки ENDF/B и JENDL в пределах неопределенности ~20% согласованно описывают имеющиеся в этой области энергий экспериментальные данные. Оценка JEFF в этой области несколько завышена.

К сожалению, никакой другой экспериментальной информации найти не удалось. Поэтому в отсутствии экспериментальных данных мы не стали проводить сравнение оцененных сечений для других процессов.

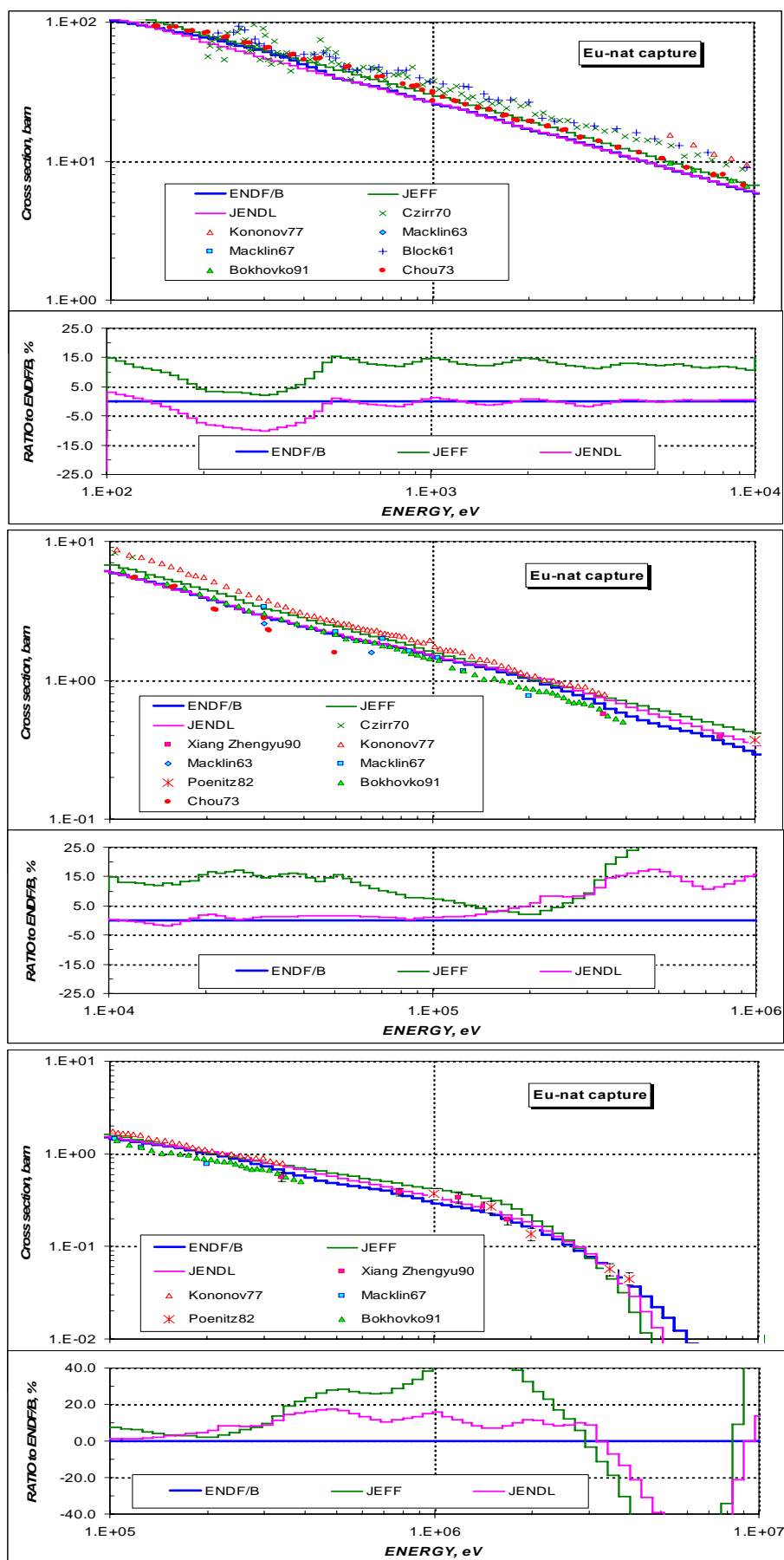


Рисунок 24 – Сравнение оцененных и экспериментальных данных для сечения захвата $Gd\text{-nat}$ в области энергий 100 эВ – 10 МэВ.

Заключение

Принятые в РОСФОНД оцененные данные для изотопов европия, в целом подтверждаются имеющимися экспериментальными данными для природного европия. Сомнение вызывает лишь поведение сечения захвата в интервале 1-10 кэВ. Возможно, что оно занижено процентов на 10-15 (главным образом, из за сравнительно низкого сечения захвата, принятого в этой области для европия-151). Надежных экспериментальных данных, позволяющих разрешить это противоречие, в настоящее время в нашем распоряжении не имеется.

Автор заключения – В.Н.Кощеев.

64. ГАДОЛИНИЙ

64.0 Общие замечания

Для библиотеки РОСФОНД требовалось отобрать нейтронные данные для 12-ти стабильных и долгоживущих изотопов гадолиния. Данные для всех этих изотопов содержатся в библиотеке ФОНД-2.2. Однако, как будет видно ниже, нейтронные данные для всех изотопов целесообразно заменить на более современные и полные оценки, выполненные в последние годы. Рассмотрим результаты деятельности по переоценке данных для изотопов гадолиния, проведенной в последние годы в сравнении с оценками, содержащимися в ФОНД-2.2. При этом главное внимание будем обращать на результаты оценки сечения захвата.

Все экспериментальные данные, используемые при сравнении с оцененными сечениями, были взяты из базы данных EXFOR-CINDA (версия 1.81, июнь 2005).

Радиоактивные изотопы.

Ни для одного из 4-х долгоживущих изотопов диспрозия – ^{148}Gd , ^{149}Gd , ^{150}Gd и ^{151}Gd – авторы библиотеки EAF в версии EAF-2003 данные по радиационному захвату нейтронов не пересматривали, т.е. они сохранились такими же, как в ФОНД-2.2.

Отдельно следует отметить долгоживущий изотоп ^{153}Gd , нейтронные данные для которого в полном объеме имелись только в библиотеке ENDF/B-VII (beta 1.2 version).

Стабильные изотопы.

Данные для стабильных изотопов гадолиния в библиотеке ФОНД-2.2 были взяты из библиотеки БРОНД-2.2. Авторы: Блохин А.И. и Беланова Т.С.

В библиотеке JEF-3.1 для Gd-152, Gd-155 и Gd-157 используется оценка, выполненная для японской библиотеки нейтронных данных JENDL-3.2. Для Gd-154, Gd-158 и Gd-160 – оценка, выполненная для ENDF/B-IV. Для Gd-156 – оценка, выполненная для JEF-2.2 (INEA/CEA).

В библиотеке JENDL-3.3 нейтронные данные не пересматривались по сравнению с версией JENDL-3.2 (март 1990).

В ENDF/B-VII (beta 1.2 версия, ноябрь 2005) принята оценка, выполненная в рамках проекта по созданию международной библиотеки продуктов деления. Авторы оценки Мухабхаб (S.Mughabghab, BNL)(резонансная область) и Обложинский (P. Oblozinsky, BNL), Рохман (D.Rochman, BNL) и Херман (M.Herman, BNL) - область более высоких энергий. Будучи самыми последними по времени и по методике оценки эти данные, несомненно, являются более надежными, чем прежние оценки, принятые в ФОНД-2.2.

При изложении данных для отдельных изотопов мы будем исходить из той общей информации, которая изложена выше.

64.1. Гадолиний-148

Альфа-активен. $^{148}\text{Gd}(T_{1/2}=74.6 \text{ г}) \rightarrow ^{144}\text{Sm}$ (стабильный).

В ФОНД-2.2 – J.Корецкы, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 1 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

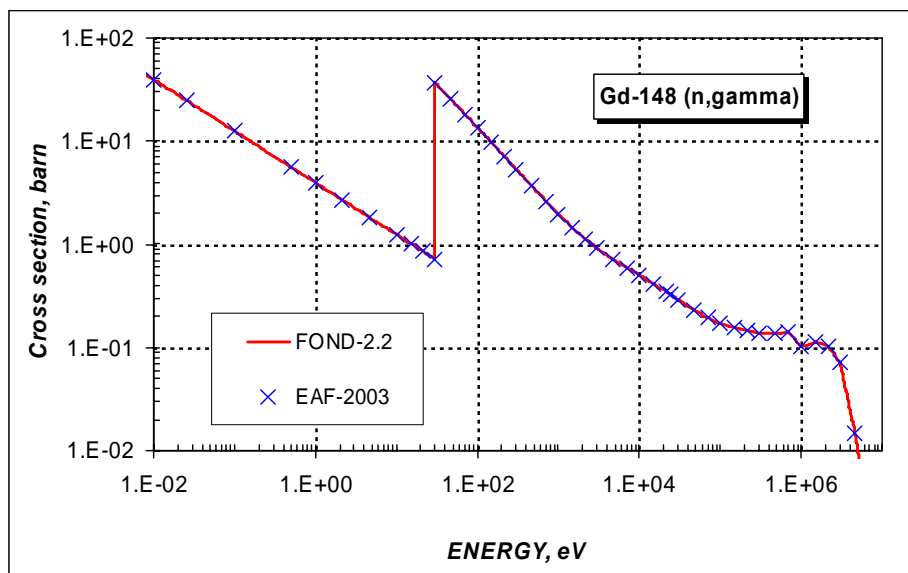


Рисунок 1 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-148.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 24.83 барна.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.Н.

64.2. Гадолиний-149

Испытывает с позитронный распад: $^{149}\text{Gd}(T_{1/2}=9.28 \text{ дн}) \rightarrow ^{149}\text{Eu}(T_{1/2}=93.1 \text{ дн}) \rightarrow ^{149}\text{Sm}(\text{стабильный})$.

В ФОНД-2.2 – оценка J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation) – оценка, Forrest Kopecky, Sublet, Koning, = EAF-2003.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 2 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

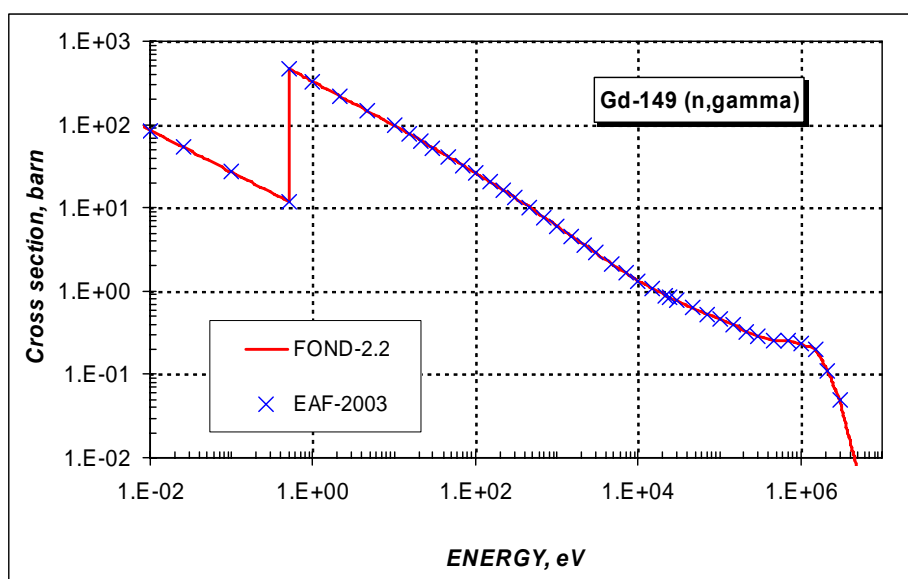


Рисунок 2 - Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-149.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 53.42 барна.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.Н.

64.3. Гадолиний-150

Альфа-активен. $^{150}\text{Gd}(T_{1/2}=1.79\text{E}^6 \text{ г}) \rightarrow ^{146}\text{Sm}(T_{1/2}=1.03\text{E}^7 \text{ г}) \rightarrow ^{142}\text{Nd}$ (стабильный).

В ФОНД-2.2 – оценка J.Кореcky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Кореcky, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 3 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

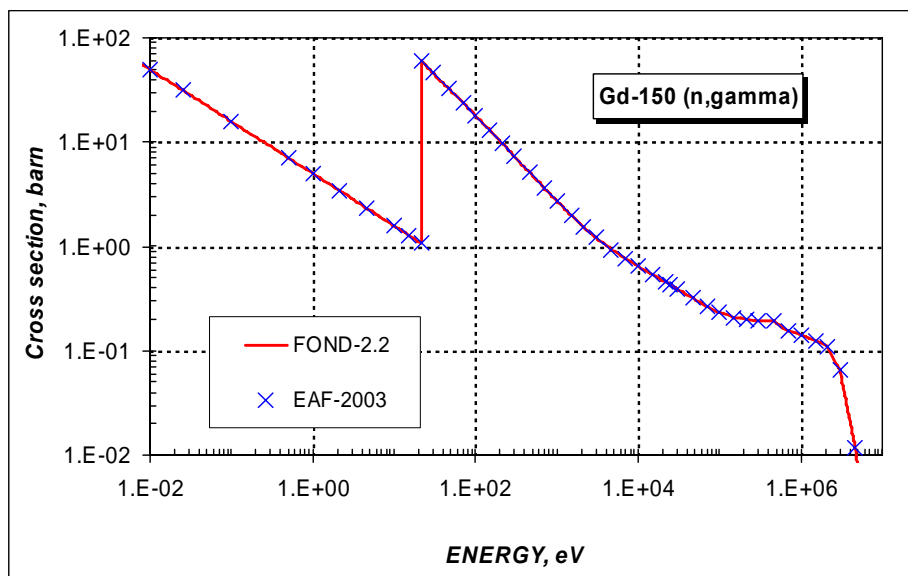


Рисунок 3 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-150.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Кореcky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 31.38 барна.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.Н.

64.4. Гадолиний-151

Испытывает позитронный распад в ^{151}Eu (стабильный) с периодом $T_{1/2}=124$ дн.
В ФОНД-2.2 – оценка J.Корецкы, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation) – оценка, Forrest Корецкы, Sublet, Koning, = EAF-2003.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 4 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

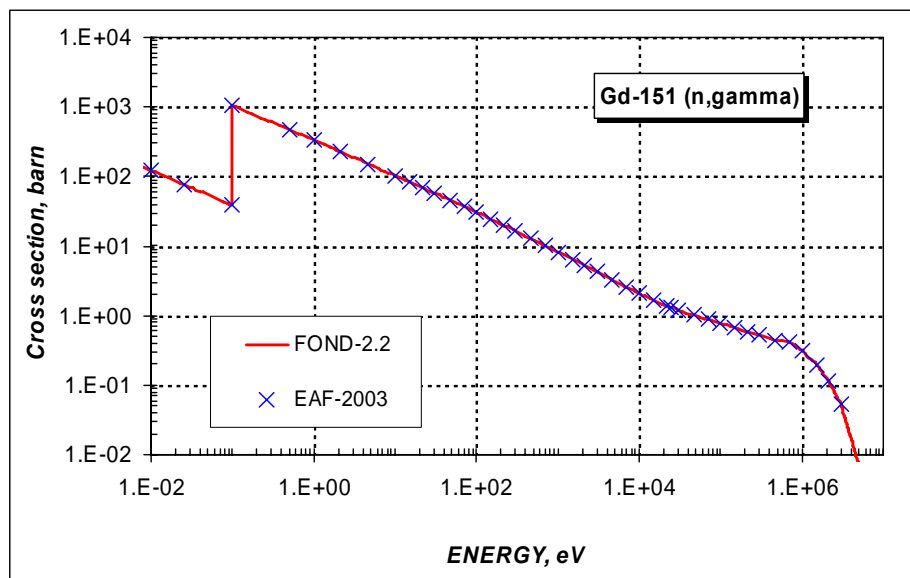


Рисунок 4 - Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-151.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Корецкы, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 76.45 барна.

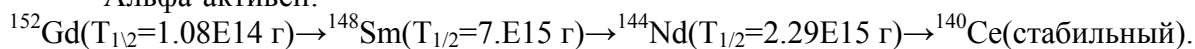
Автор отбора данных

Кощев В.Н.Н.

64.5. Гадолиний-152

Содержание в естественной смеси 0.20%.

Альфа-активен:



В ФОНД-2.2 – оценка Блохина, Белановой, 1989.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 без изменений, 1990.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2, с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – новая оценка Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabgh, 2005.

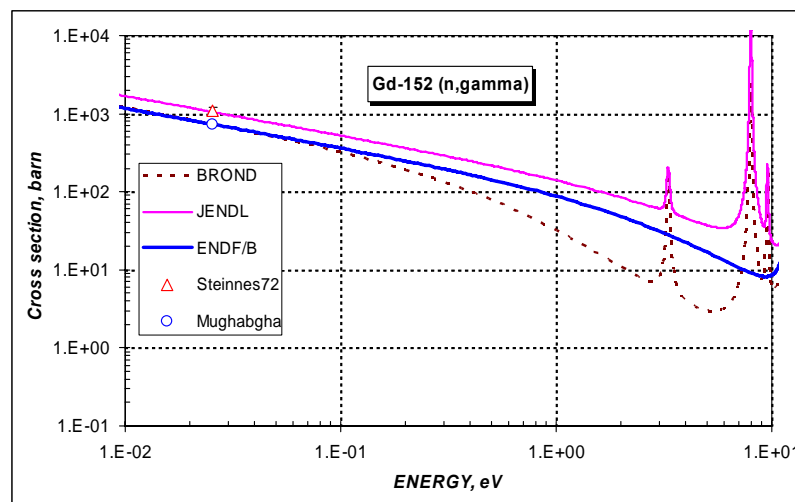
Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 1. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 1. Резонансные свойства Gd-152

| Оценка | Граница области RRR, keV | Граница области URR, keV | $\sigma_\gamma(2200)$, барн | $\sigma_\gamma(\text{Maxw})$, барн | G-fact | I_γ , барн |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------------|--------|-------------------|
| ENDF/B | 2.6 | 50.0 | 735.0 | 723.6 | 0.9959 | 559.4 |
| JENDL | 2.66 | 100.0 | 1055.8 | 1041.1 | 0.9975 | 987.7 |
| JEFF | 2.66 | 100.0 | 1055.8 | 1041.1 | 0.9975 | 987.7 |
| BROND | 0.234 | - | 736.8 | 711.6 | 0.9771 | 505.6 |
| Mughabghab (2003) | | | 735±20 | | | 2020±160 |

Из приведенной в таблице 1 информации видно, что наилучшее согласие с оцененным значением сечения захвата из компиляции Мухабхаба¹ имеет оценки ENDF/B и БРОНД. Отметим, что наблюдается существенное расхождение между оцененными значениями резонансного интеграла I_γ и значением, рекомендуемым Мухабхабом. Следует, однако отметить, что Мухабхаб отмечает большое различие между измеренным резонансным интегралом и вычисленным по резонансным параметрам.

На рисунке 5 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в тепловой области энергий с имеющимися экспериментальными данными.



¹ Оценка Мухабхаба основана на результатах усреднения двух измерений резонансного интеграла – Neft-78 (2020±80 барн) и Steiness-72 (3000±300 барн). Других прямых экспериментальных не имеется.

Рисунок 5 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-152 в тепловой области.

Видно, что оценки BROND и ENDF ориентируются на значение сечения захвата, рекомендуемое Мухабхабом, в то время, как оценка JENDL ориентируется на эксперимент Стейнса(1972).

В оценке ENDF/B существенно изменены параметры связанного состояния (оно сдвинуто с -10 эВ на -6.12 эВ, но его нейтронная ширина сокращена втрое, а радиационная в 14 раз). Первых три резонанса, параметры которых приведены в компиляции Мухабхаба (BNL-325, 3-е издание, 1984), в новой оценке, выполненной с его участием, отсутствуют; в том числе довольно сильный резонанс при 8 эВ, который, вероятно, отнесен, к влиянию примеси Самария-152 в образце. Отбрасывание резонансов, естественно, привело к резкому снижению резонансного интеграла. Отметим, к тому же, что в БРОНД сечение восстанавливается с помощью формализма Райха-Мура, а в ENDF/B используется многоуровневая формула Брейта-Вигнера. Всё это и объясняет различие в форме резонансов как на рисунке 6, так и в дальнейшем.

На рисунке 6 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий от 10 эВ до 1 кэВ.

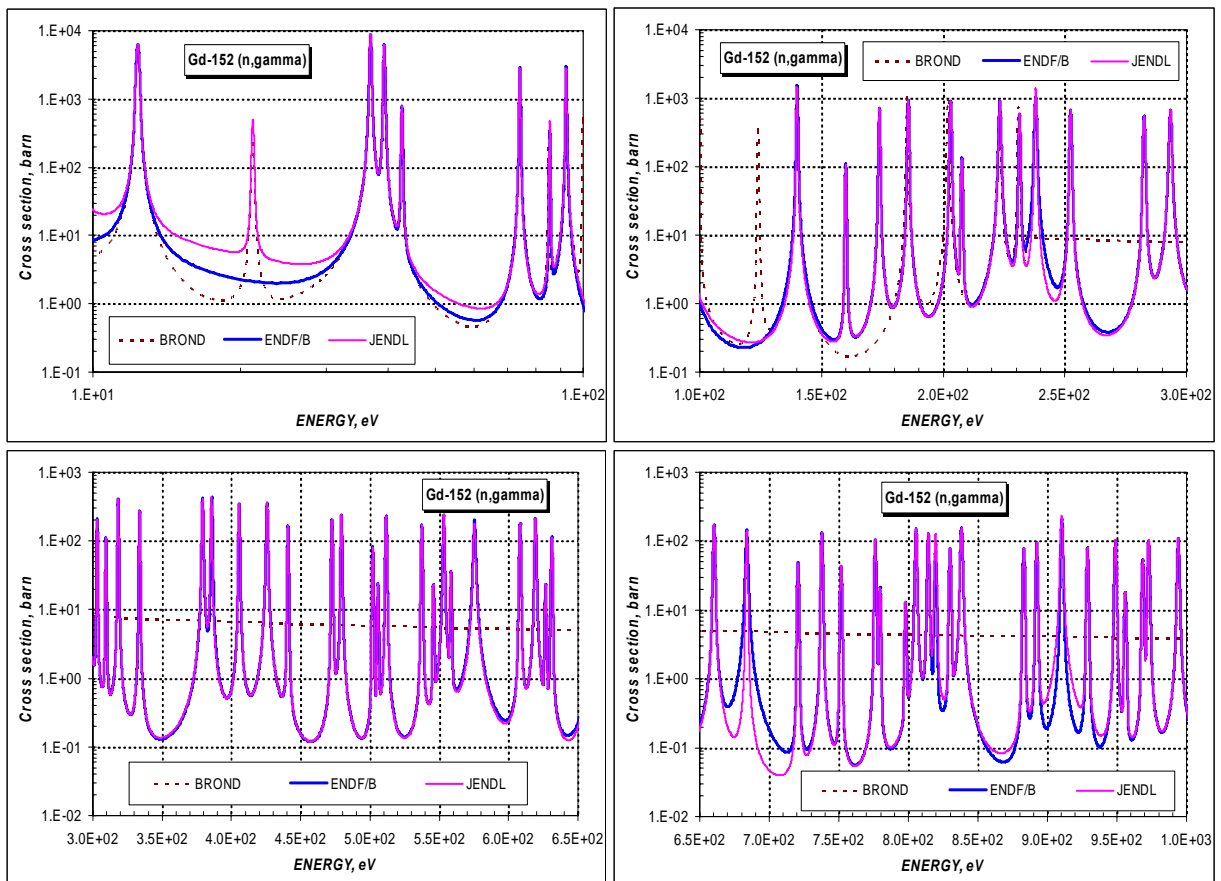


Рисунок 6 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-152 в резонансной области энергий от 10 эВ до 1 кэВ.

Из приведенного на рисунке 6 сравнения видно, что в оценке ENDF/B имеются пропуски резонансов, которые наблюдаются в других оценках. В тоже время, как в оценке БРОНД наблюдаются резонансы, которых нет в других оценках и пропущены резонансы, присутствующие в других оценка. Учитывая тот факт, что резонансный интеграл I_γ из оценки JENDL лучше согласуется с рекомендуемым значением Мухабхаба, можно предположить, что оценка JENDL лучше других описывает начальную область резонансных энергий. Заметим что, практически невозможно даже для этой оценки,

разумным образом модифицируя ее, получить рекомендуемое значение резонансного интеграла.

На рисунке 7 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 2.5 кэВ с имеющимися экспериментальными данными.

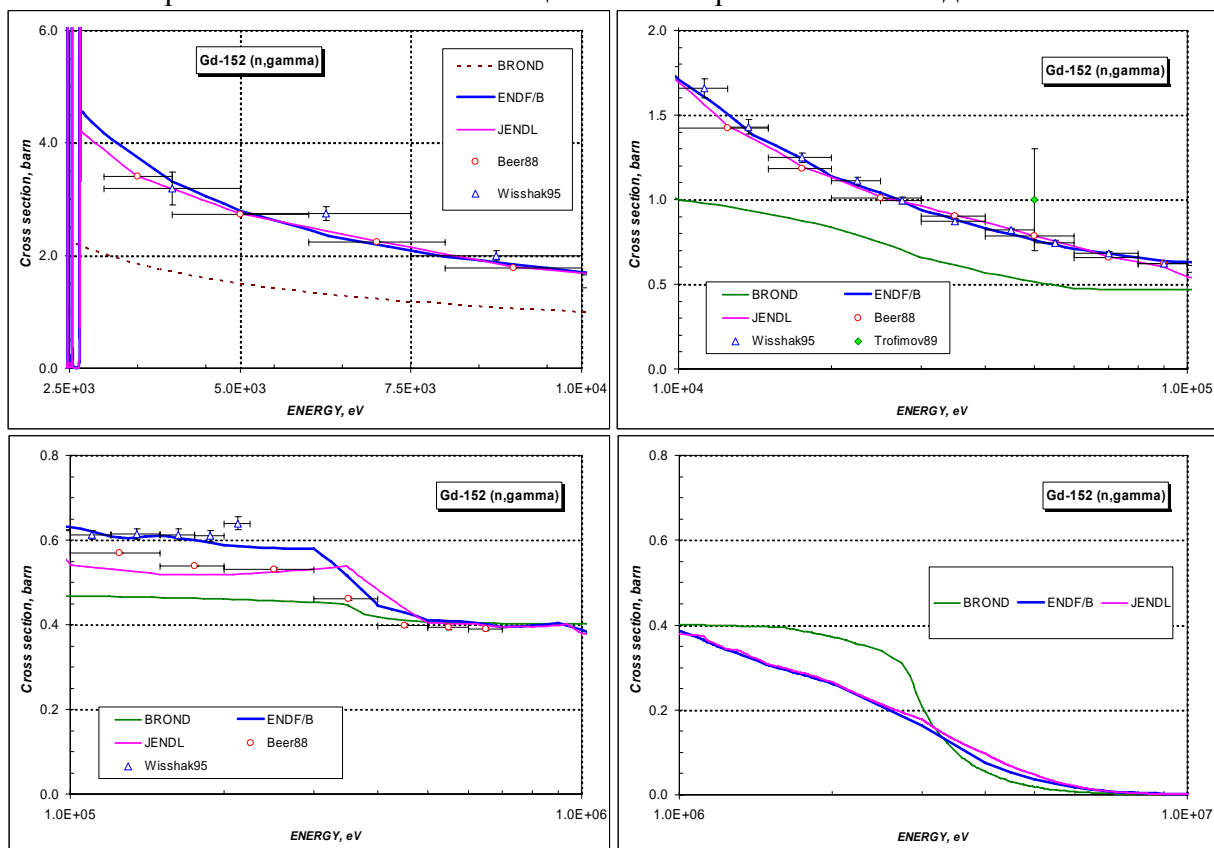


Рисунок 7 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-152 в области энергий от 2.5 кэВ до 10 МэВ.

Из приведенного на рисунке 7 сравнения видно, что оценка ENDF/B лучше согласуется с экспериментом Висхака (1995), в то время как оценка JENDL лучше описывает эксперимент Бира(1988). Основные различия наблюдаются в области энергий 100 – 300 кэВ. В целом, оценки согласовано описывают имеющиеся немногочисленные экспериментальные данные.

Заключение

Учитывая тот факт, что концентрация данного изотопа в естественной смеси мала и, что в оценке данных для ENDF/B принимал участие сам Мухабхаб а в ближайшем будущем появится публикация новой компиляции резонансных параметров Мухабхаба (апрель 2006), в РОСФОНД предлагается принять оценку Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

В дальнейшем, возможно, потребуется уточнить как резонансные параметры первых резонансов согласно новой компиляции резонансных параметров Мухабхаба, так и рекомендуемое значение резонансного интеграла.

Автор отбора данных
Кошечев В.Н.

64.6. Гадолиний-153

Испытывает позитронный распад в ^{153}Eu (стабильный) с периодом $T_{1/2}=240.4$ дн.

В ФОНД-2.2 – J. Kopecky, D. Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation) – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003.

В ENDF/B-VII b1.2 – новая оценка Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabgh, 2005.

Несмотря на нестабильность этот изотоп, возникающий в результате радиационного захвата в гадолинии-152 и в реакции (n,2n) на гадолинии-154, может заметно сказываться на поглощении нейтронов в гадолинии, облучаемом в реакторе за счет исключительно высокого сечения радиационного захвата.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 2. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 2. Резонансные свойства Gd-153

| Оценка | Граница области RRR, eV | Граница области URR, keV | $\sigma_\gamma(2200)$, барн | $\sigma_\gamma(\text{Maxw})$, барн | G-fact | I_γ , барн |
|------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------------|--------|--------------------------|
| ENDF/B | 129. | - | 22300. | 16300. | 0.7392 | 189.9 |
| JENDL | - | - | - | - | - | - |
| JEFF | - | - | 20300. | 20500. | 1.009 | 2.17E⁴ |
| BROND | - | - | - | - | - | - |
| Вертебный (1987) | | | 23000. ±3000. | | | |

Из приведенной в таблице 2 информации видно, что наилучшее согласие с экспериментальным значением сечения захвата согласно эксперименту Вертебного и др. имеет оценка ENDF/B, но и оценка JEFF не противоречит экспериментальному значению. Отметим, что в рассматриваемых оценках наблюдается существенное расхождение между значениями резонансного интеграла I_γ .

На рисунке 8 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок.

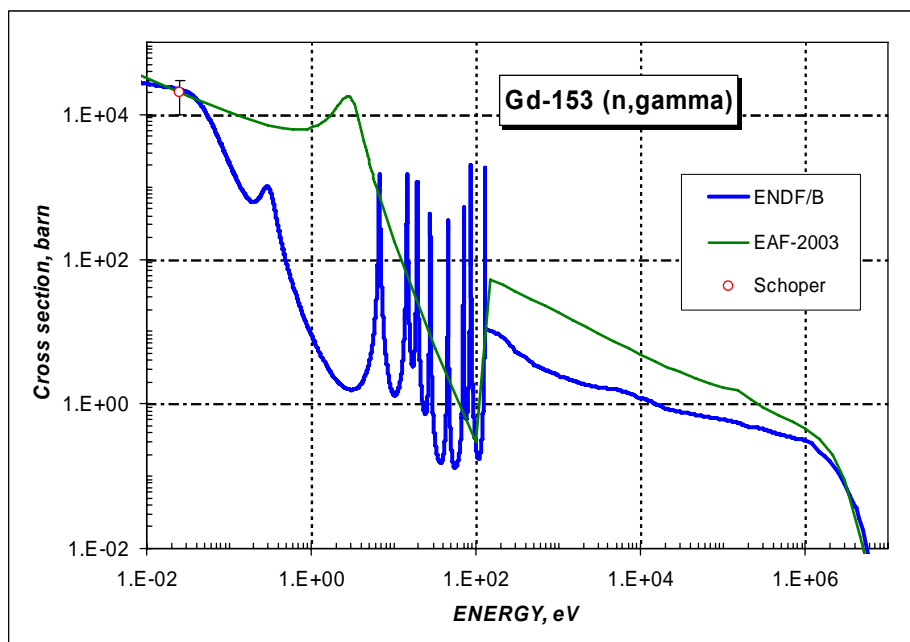


Рисунок 8 - Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-153.

Из представленного на рисунке 8 сравнения видно, что в оценках существенно различается энергетический ход сечения радиационного захвата, что и обуславливает различие в величине резонансного интеграла. В оценке ENDF/B сечение восстанавливается с помощью многоуровневого формализма Брейт-Вигнера. В оценке EAF-2003 расчет сечения выполнен с помощью программы MASGAM, в которой сечения рассчитываются по оптической модели с учетом предравновесных процессов.

Для разрешения существующего противоречия привлечем экспериментальные данные по полному сечению, которые имеются в базе экспериментальных данных EXFOR. На рисунке 9 показано сравнение экспериментальных данных по полному сечению Вертебного и др. с полным сечением из оценки ENDF/B. Там же приводятся парциальные сечения (упругое рассеяние и радиационный захват), составляющие сечение полного взаимодействия.

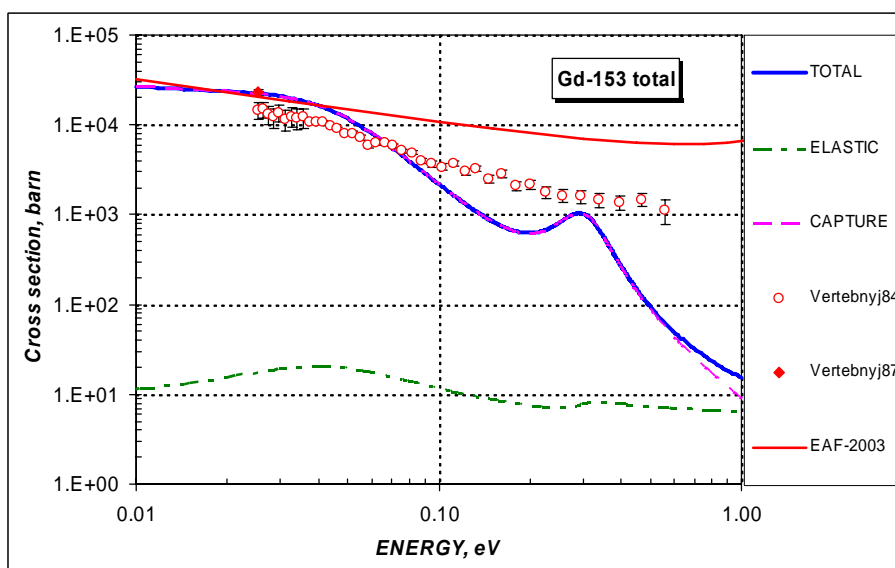


Рисунок 9 - Сечение полного взаимодействия на Gd-153 в тепловой области энергий.

Из приведенного на рисунке 9 сравнения видно, что основной вклад в полное взаимодействие в области энергий до 1 эВ происходит за счет радиационного захвата

нейтронов. Существующие экспериментальные данные подтверждают ход сечения из ENDF/B. Оценка сечения радиационного захвата в EAF-2003 в области резонансных энергий, вероятно, является ошибочной.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2). В дальнейшем желательно уточнить значение резонансного интеграла и параметры первых резонансных уровней.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

64.7. Гадолиний-154

Содержание в естественной смеси 2.18%.

В ФОНД-2.2 – оценка Блохина, Белановой, 1989.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JEF-2.2~ENDF/B-IV, 1982.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2, с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – новая оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 3. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 3. Резонансные свойства Gd-154

| Оценка | Граница области RRR, keV | Граница области URR, keV | $\sigma_{\gamma}(2200)$, барн | $\sigma_{\gamma}(Maxw)$, барн | G-fact | I_{γ} , барн |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|---------------------|
| ENDF/B | 2.76 | 50.0 | 85.2 | 83.3 | 0.9891 | 216.0 |
| JENDL | 2.76 | 100.0 | 85.0 | 83.3 | 0.9919 | 213.7 |
| JEFF | 0.276 | - | 85.0 | 84.1 | 1.000 | 246.3 |
| BROND | 0.986 | - | 86.8 | 85.5 | 0.9965 | 228.2 |
| Mughabghab (2003) | | | 85±12 | | 0.9967 | 245±30 |

Из приведенной в таблице 3 информации видно, что согласие с оцененным значением сечения захвата из компиляции Мухабхаба имеют все оценки. В целом, все оценки в пределах заявленной точности, согласуются с рекомендованными значениями резонансного интеграла.

На рисунке 10 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в тепловой области энергий с имеющимися экспериментальными данными.

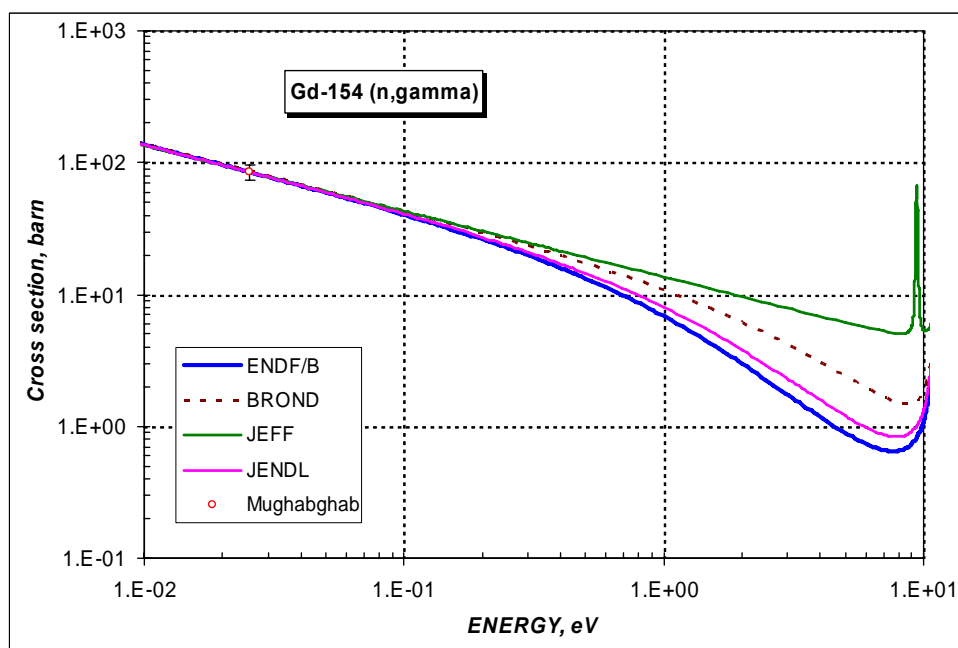


Рисунок 10 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-154 в тепловой области.

Из приведенного на рисунке 10 сравнения видно, что для всех оценок наблюдается различный характер описания сечения в эпирезонансной области энергий, что и обуславливает, главным образом, различие в резонансном интеграле.

На рисунке 11 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий от 10 эВ до 0.9 кэВ.

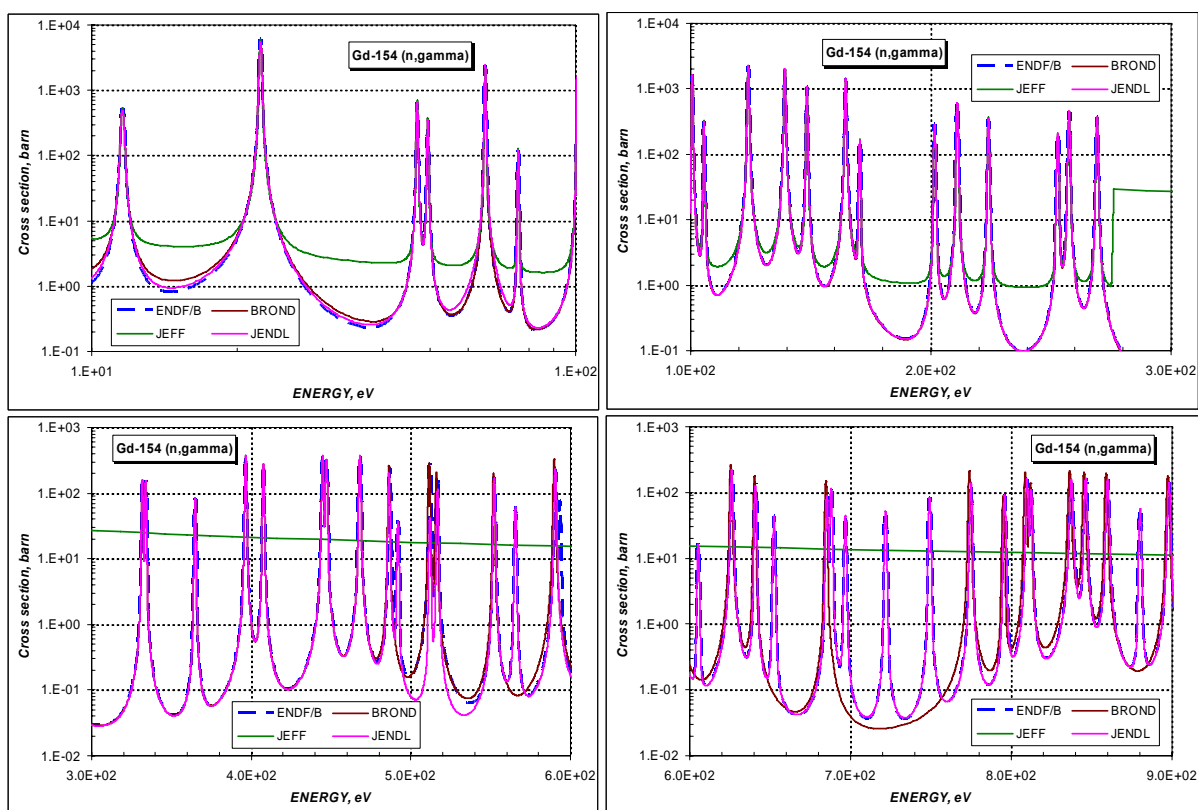


Рисунок 11 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-152 в резонансной области энергий от 10 эВ до 0.9 кэВ.

Из приведенного на рисунке 11 сравнения видно, что только оценки ENDF/B и JENDL согласуются друг с другом по полноте резонансных уровней и по качеству их описания.

Рассмотрим сечение радиационного захвата в области энергий выше 3 кэВ, резонансная структура сечений уже не разрешена. Сравнение оцененных сечений с имеющимися экспериментальными данными приводится на рисунке 12.

Из представленного на рисунке 12 сравнения видно, что до 10 кэВ оценка ENDF/B и JEF опираются на эксперимент Висхака(1995), оценка JENDL лежит ниже ENDF/B, описывая эксперимент Бира(1968). Оценка БРОНД основывается на эксперименте Шорина (1974), данные которого лежат выше всей совокупности экспериментальных данных.

Далее оценки ENDF/B, JENDL и JEF согласуются между собой в пределах 20% в области энергий ~ 0.1 МэВ, и в пределах 5 - 10% в области энергий ~ 1 МэВ.

Выше 1 МэВ экспериментальные данные отсутствуют, здесь различия в энергетическом ходе сечения определяются как различиями в используемых моделях, так и различиями в используемых модельных параметрах.

Оценка ENDF/B представляется более привлекательной, поскольку опирается на более современные экспериментальные данные и в основе ее лежат расчеты по более современным моделям.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

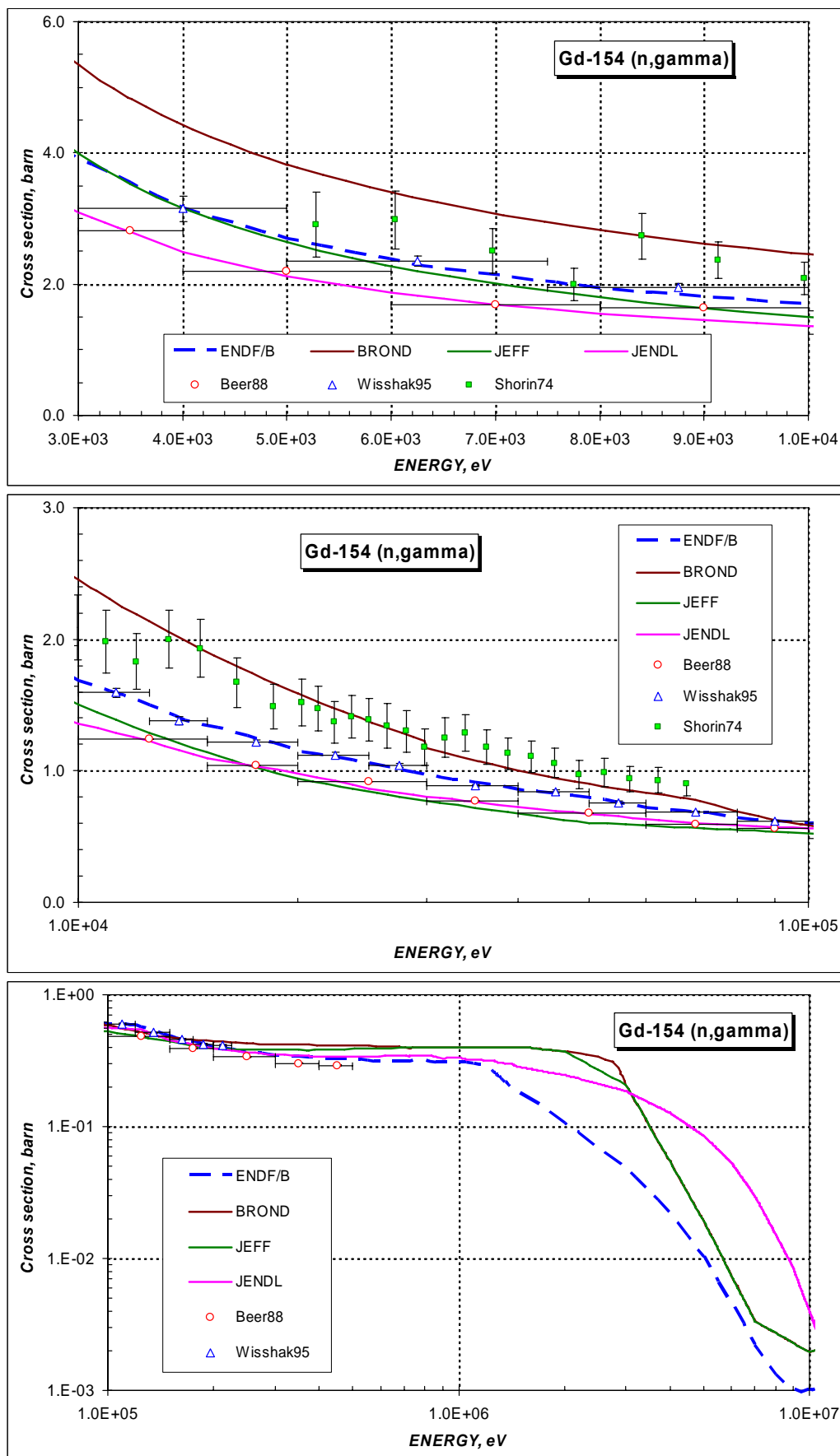


Рисунок 12 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-154 в области энергий от 3 кэВ до 10 МэВ.

64.8. Гадолиний-155

Содержание в естественной смеси 14.80%. Изотоп Gd-155 является одним из важнейших выгорающих изотопов гадолиния. Выгорая, он превращается в стабильный изотоп Gd-156.

Кроме того, Gd-155 является осколком деления тяжелых ядер. Выход его при делении ядерного топлива невелик от $\sim 1.E-5$ (U235) до $\sim 1.2E-4$ (Pu-241). Однако, из-за наличия у него большого сечения радиационного захвата нейтронов в тепловой области, его вклад в суммарное сечение захвата является заметным.

В ФОНД-2.2 – оценка Блохина, Белановой, 1989.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JENDL-2~JENDL-3.2, 1988.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – новая оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 4. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 4. Резонансные свойства Gd-155

| Оценка | Граница области RRR, eV | Граница области URR, keV | $\sigma_{\gamma}(2200)$, барн | $\sigma_{\gamma}(Maxw)$, барн | G-fact | I_{γ} , барн |
|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|---------------------|
| ENDF/B | 183. | 60.4 | 60 729. | 50 344. | 0.8386 | 1542. |
| JENDL | 182. | 100. | 60 729. | 50 343. | 0.8386 | 1533. |
| JEFF | 182. | 100. | 60 729. | 50 344. | 0.8386 | 1544. |
| BROND | 183. | 104. | 60 903. | 50 488. | 0.8386 | 1555. |
| Mughabghab (2003) | | | 60 900. \pm 500. | | 0.8390 | 1447. \pm 100. |

Из приведенной в таблице 4 информации видно, что в целом, все оценки в пределах заявленной точности, согласуются с рекомендованными значениями резонансного интеграла.

На рисунке 13 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в начале резонансной области энергий с имеющимися экспериментальными данными.

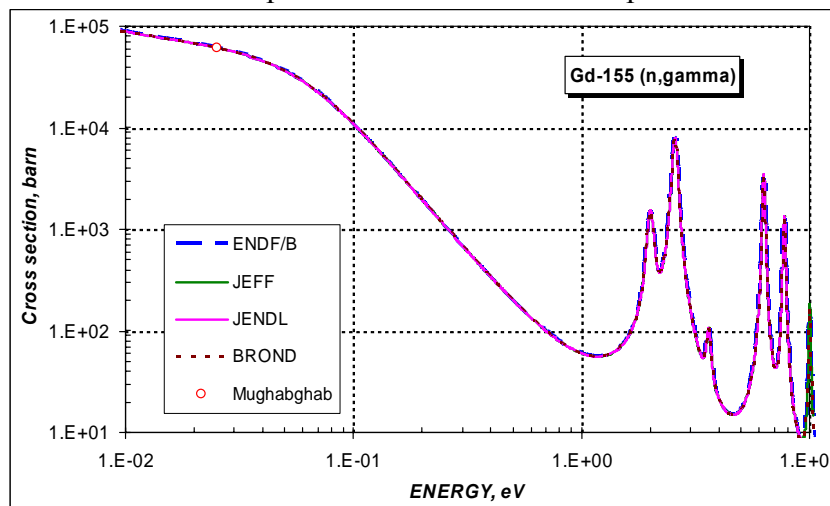


Рисунок 13 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-155 в тепловой области.

Хорошее согласие между оценками наблюдается и в резонансной области энергий выше 10 эВ (смотри рисунок 14).

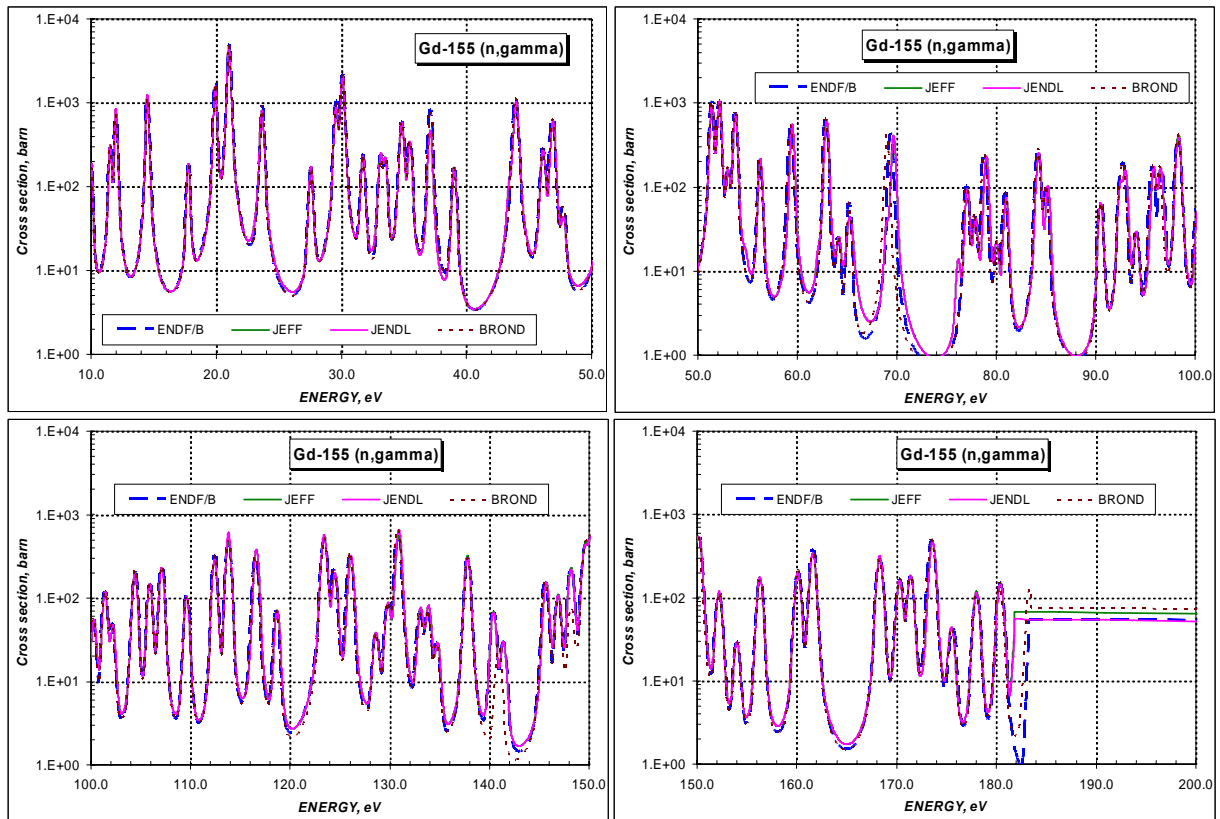


Рисунок 14 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-155 в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 14 сравнения видно, что в целом, все оценки хорошо согласуются друг с другом при описании резонансного поглощения нейтронов.

В области гладких сечений экспериментальная информация имеется в области энергий выше 1 кэВ. Сравнение имеющихся экспериментальных данных с оцененными значениями сечения радиационного захвата в области энергий выше 1 кэВ приведено на рисунке 15.

Из приведенного на рисунке 15 сравнения видно, что в области энергий от 1 кэВ до 10 кэВ оценка БРОНД лежит выше других, опираясь на эксперимент Шорина и др.(1974). Остальные оценки хорошо согласуются друг с другом и с экспериментальными данными.

В области энергий от 10 до 100 кэВ в соответствии с экспериментом Шорина “проваливается” вниз. Оценка ENDF/B наилучшим образом согласуется с совокупностью экспериментальных данных. Оценка JEF лежит выше остальных, опираясь на экспериментальные данные Накажима и др.(1984).

В области энергий от 0.1 до 1.0 МэВ две оценки JENDL и ENDF/B, согласуясь между собой, наилучшим образом согласуются с экспериментальными данными. Оценки БРОНД и JEF в этой области выпадают.

В области энергий выше 1 МэВ сечение реакции резко падает и экспериментальных данных совсем немного. Наилучшим образом экспериментальные данные описываются оценкой из ENDF/B. Хотя и оценка JENDL не противоречит экспериментальным данным.

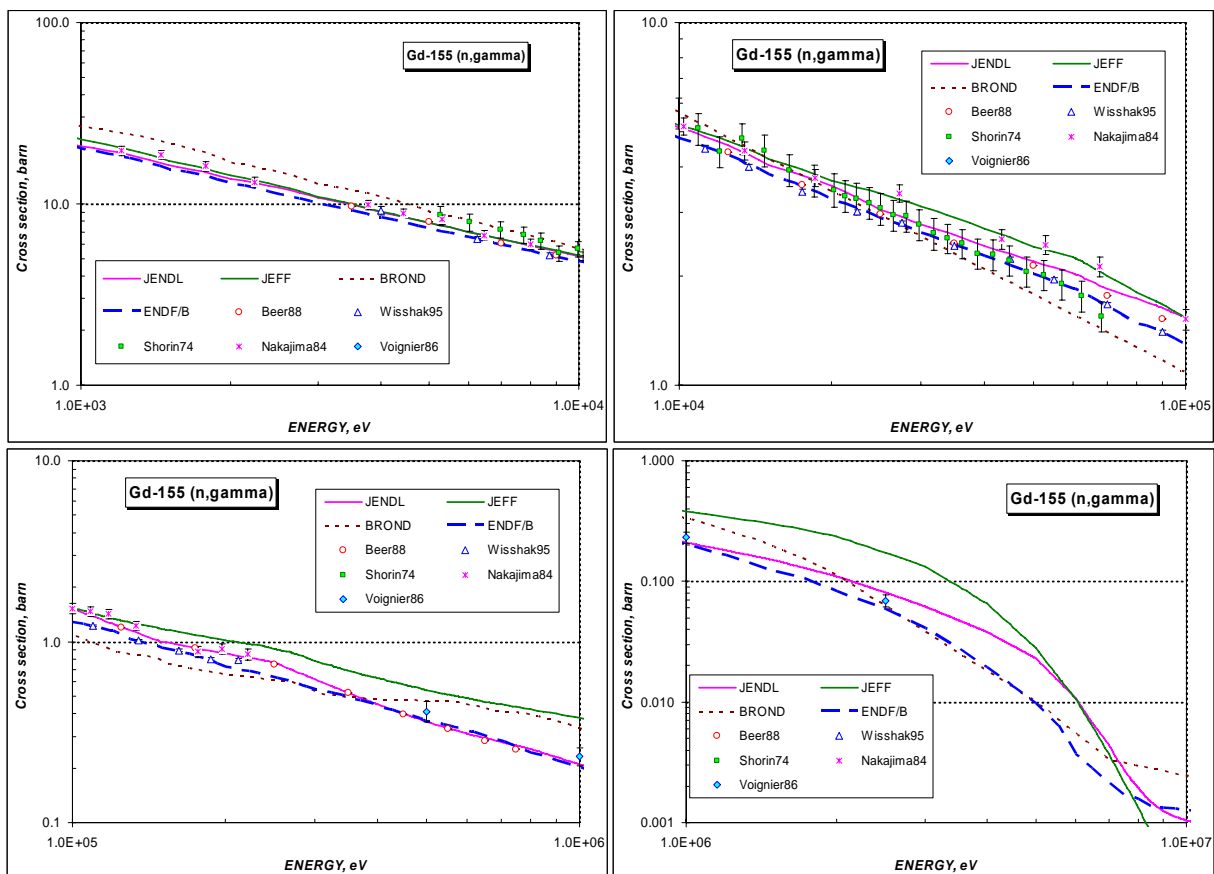


Рисунок 15 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-155 в области энергий выше 1 кэВ.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

64.9. Гадолиний-156

Содержание в естественной смеси 20.47%. Gd-156 является также одним из основных осколков деления в ядерном реакторе. Выход его при делении ядерного топлива довольно значителен: он составляет от $\sim 1.7E-4$ (U235) до $\sim 2.46E-3$ (Pu-241). Из-за этого его вклад в суммарное сечение захвата продуктов деления является заметным.

В ФОНД-2.2 – оценка Блохина, Белановой, 1989.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JEF-2.2 (ENEA/CEA), 1982.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – новая оценка Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabghab, 2005.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 5. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 5. Резонансные свойства Gd-156

| Оценка | Граница области RRR, keV | Граница области URR, keV | $\sigma_\gamma(2200)$, барн | $\sigma_\gamma(Maxw)$, барн | G-fact | I_γ , барн |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|--------|-------------------|
| ENDF/B | 2.2 | - | 1.795 | 1.775 | 1.0006 | 107.2 |
| JENDL | 2.21 | 100. | 2.188 | 2.164 | 1.0005 | 119.7 |
| JEFF | 1.58 | 50. | 1.536 | 1.519 | 1.0006 | 100.2 |
| BROND | 0.98 | - | 2.056 | 2.034 | 1.0005 | 117.3 |
| Mughabghab (2003) | | | 1.8 ± 0.7 | | 1.0007 | 104 ± 15 |

Из приведенной в таблице 5 информации видно, что в целом все оценки в пределах заявленной точности, согласуются с рекомендованными значениями резонансного интеграла, однако ENDF/B согласуется наилучшим образом.

На рисунке 16 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в начале резонансной области энергий.

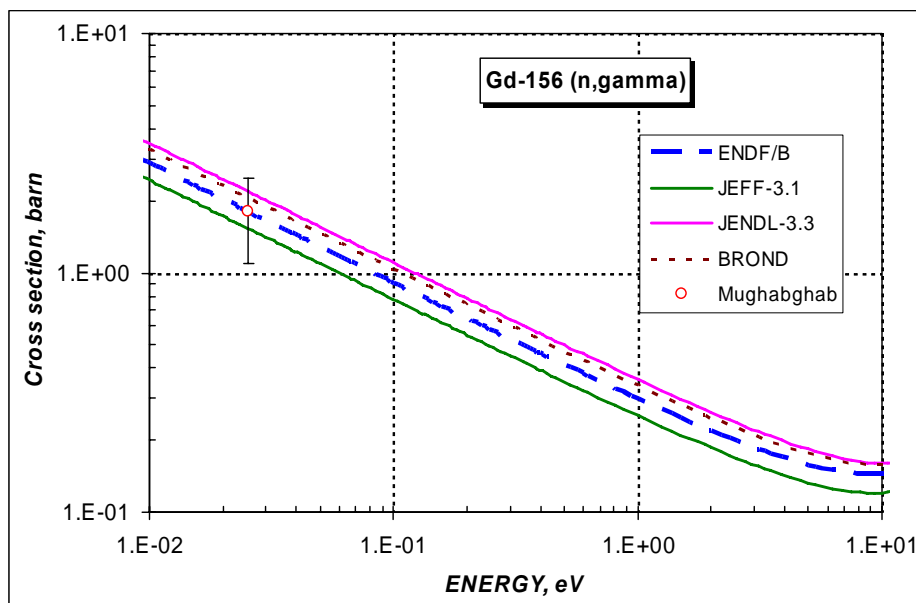


Рисунок 16 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-156 в тепловой области.

На рисунке 17 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий от 10 эВ до 2.0 кэВ.

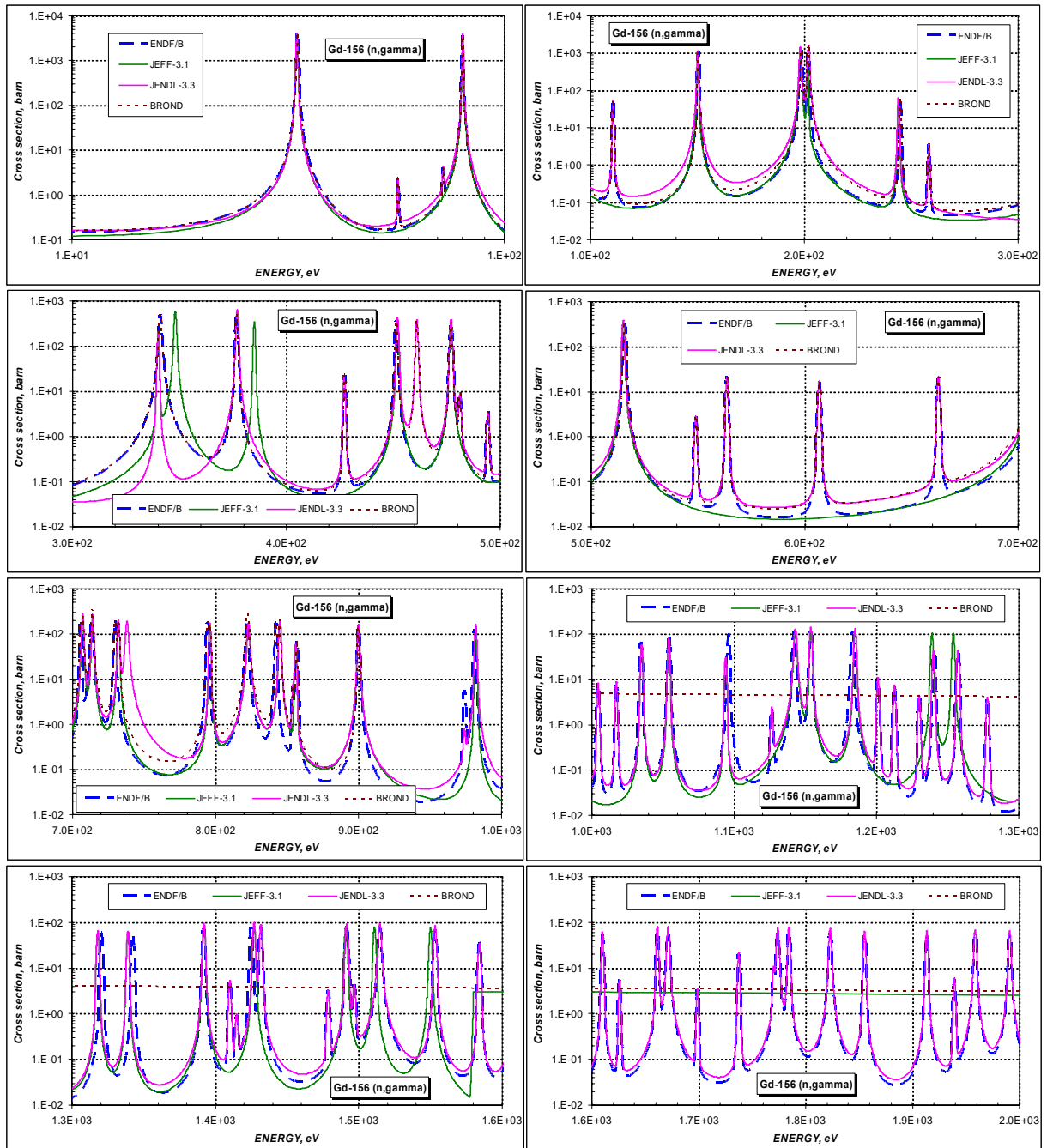


Рисунок 17 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-156 в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 17 сравнения видно, что не все оценки хорошо описывают резонансное поглощение нейтронов. В целом, наилучшим образом друг с другом согласуются оценки ENDF/B и JENDL, как по полноте резонансных уровней, так и по качественному описанию резонансов. В оценке JEF наблюдается большой пропуск уровней. Оценка БРОНД хорошо согласуется с ENDF/B, но резонансная область у нее простирается только до 0.98 кэВ.

В области гладких сечений экспериментальная информация немногочисленна – всего два набора экспериментальных данных. Сравнение имеющихся экспериментальных

данных с оцененными значениями сечения радиационного захвата в области энергий выше 2 кэВ приведено на рисунке 18.

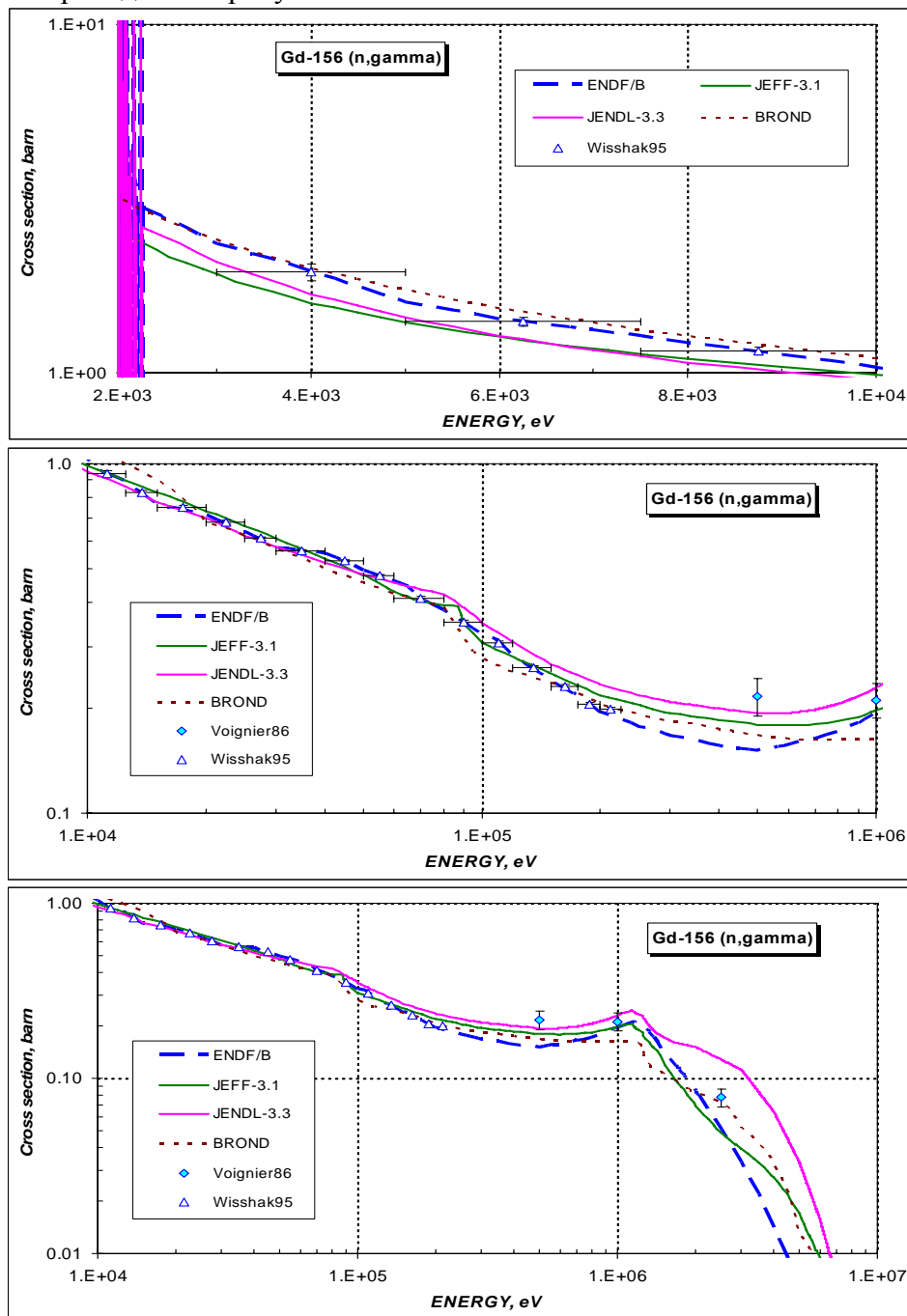


Рисунок 18 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-156 в области энергий выше 2 кэВ.

Из приведенного на рисунке 18 сравнения видно, что в области энергий от 2 кэВ и до 10 МэВ оценки БРОНД и ENDF/В наилучшим образом согласуются друг с другом и с экспериментальными данными Висхака (1995) и Войжнира(1988). Оценка JENDL, ориентируясь на эксперимент Войжнира(1988), в области энергий до 10 кэВ лежит ниже всех оценок, а выше 100 кэВ – находится выше всех.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Автор отбора данных Кощеев В.Н.

64.10. Гадолиний-157

Содержание в естественной смеси 15.65%. Изотоп Gd-157 является одним из важнейших выгорающих изотопов гадолиния. Выгорая, он превращается в стабильный изотоп Gd-158.

Кроме того, Gd-157 является осколком деления в ядерном реакторе. Выход его при делении ядерного топлива от $\sim 7 \cdot 10^{-5}$ (U235) до $\sim 1.39 \cdot 10^{-3}$ (Pu-241). Из-за наличия у него большого сечения радиационного захвата нейтронов в тепловой области, его вклад в суммарное сечение захвата является существенным.

В ФОНД-2.2 – оценка Блохина, Белановой, 1989.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JENDL-3.2, 1982.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – новая оценка Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabgh, 2005.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 6. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 6. Резонансные свойства Gd-157

| Оценка | Граница области RRR, eV | Граница области URR, keV | $\sigma_\gamma(2200)$, барн | $\sigma_\gamma(Maxw)$, барн | G-factor | I_γ , барн |
|--------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|----------|--------------------------------|
| ENDF/B | 306. | 55. | 253 700. | 212 400. | 0.8468 | 753.6 |
| JENDL | 304. | 100. | 253 600. | 212 500. | 0.8475 | 761.1 |
| JEFF | 215. | - | 253 200. | 212 100. | 0.8471 | 761.8 |
| BROND | 306. | 10. | 253 500. | 212 200. | 0.8468 | 757.2 |
| Mughabghab (2003) | | | 254 000. $\pm 815.$ | | 0.8472 | <u>754.\pm20.</u> |

Из приведенной в таблице 6 информации видно, что в целом, все оценки в пределах заявленной точности, согласуются с рекомендованными значениями резонансного интеграла.

На рисунке 19 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в начале резонансной области энергий со значением, рекомендованным Мухабхабом.

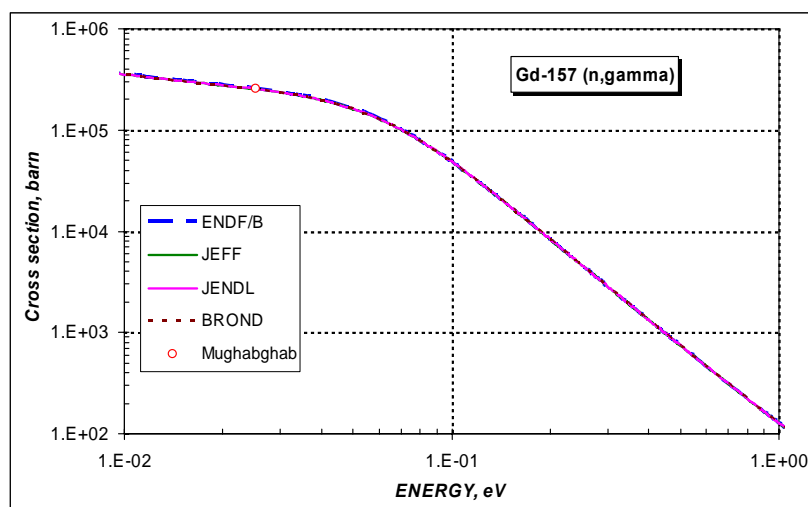


Рисунок 19 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-157 в тепловой области.

Хорошее согласие между оценками наблюдается и в резонансной области энергий выше 10 эВ (смотри рисунок 20).

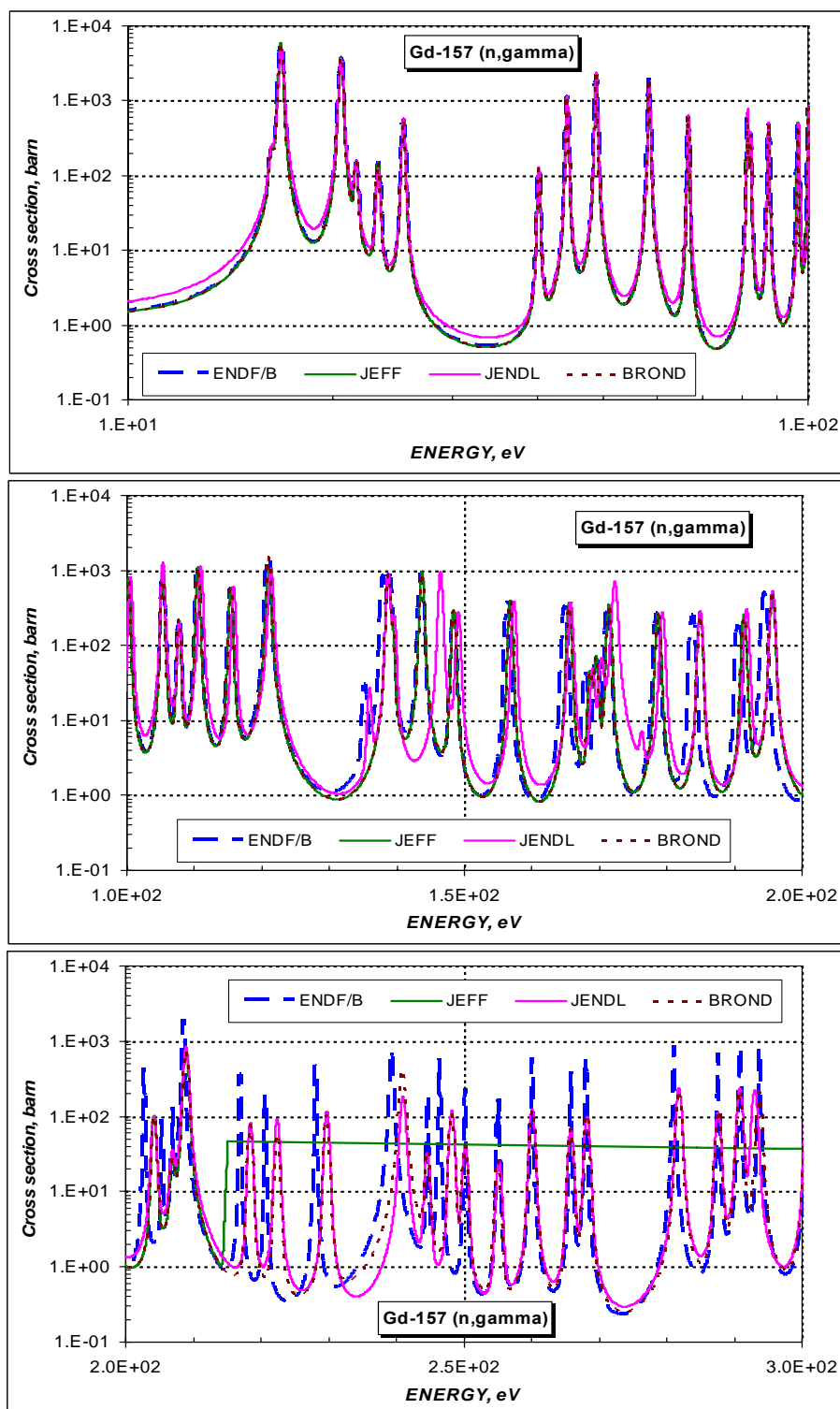


Рисунок 20 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-157 в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 20 сравнения видно, что не все оценки хорошо согласуются друг с другом при описании резонансного поглощения нейтронов. До 120 эВ все оценки согласуются между собой, кроме JENDL, в которой минимумы не так глубоки, как в других оценках. Выше 120 эВ наблюдаются существенные различия в описании резонансных уровней. Видно, что в последней оценке ENDF/B (Мухабхаб и др.) для части уровней резонансные параметры сильно изменены.

В области гладких сечений экспериментальная информация имеется в области энергий выше 1 кэВ. Сравнение имеющихся экспериментальных данных с оцененными значениями сечения радиационного захвата в области энергий выше 1 кэВ приведено на рисунке 21.

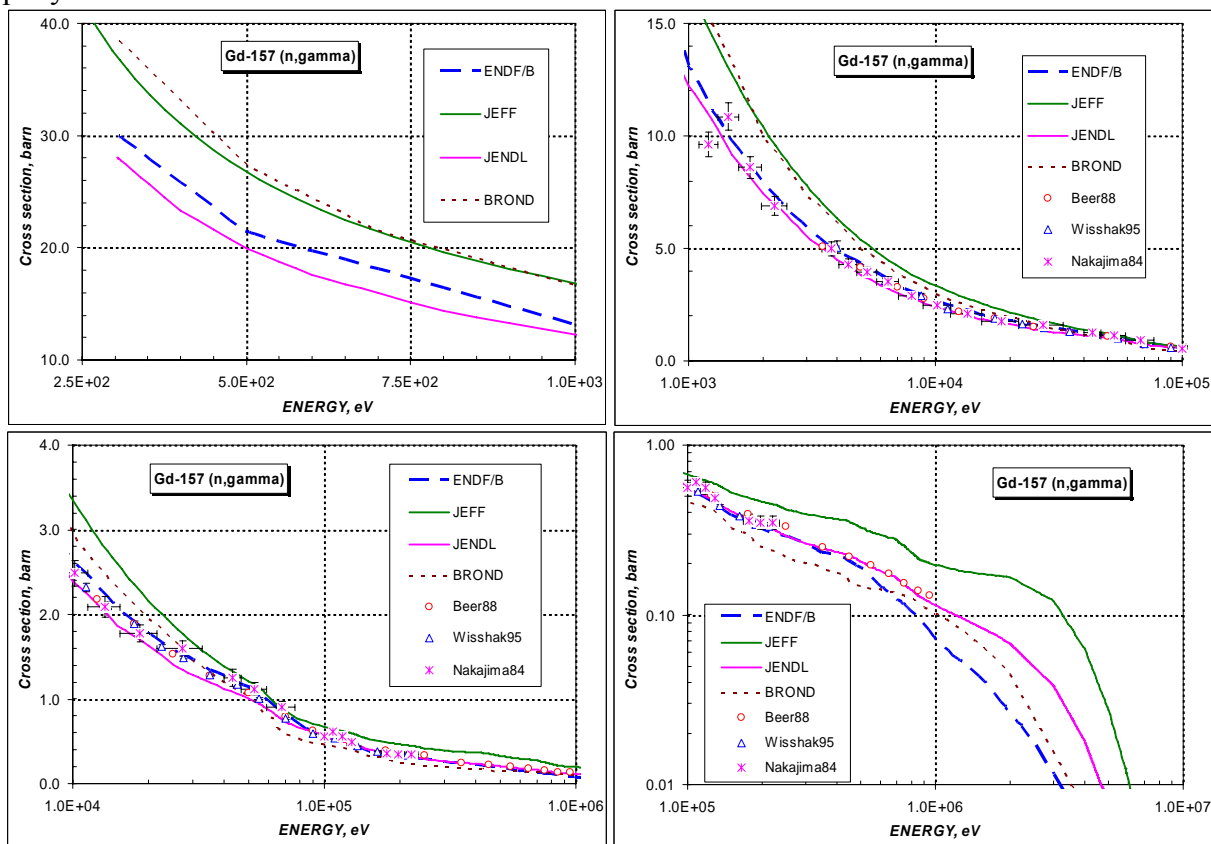


Рисунок 21 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-157 в области энергий выше 250 эВ.

Из приведенного на рисунке 21 сравнения видно, что в области энергий от 1 кэВ до 10 кэВ оценки БРОНД и JEF лежат выше других, не согласуясь с экспериментальными данными. Остальные оценки ENDF/B и JENDL согласуются друг с другом и с экспериментальными данными. До 1 МэВ наилучшим образом с экспериментальными данными согласуется ENDF/B, при оценке которой использовались экспериментальные данные Висхака (1995).

В области энергий выше 1 МэВ сечение реакции резко падает, а экспериментальных данных нет. Наилучшим образом согласуются друг с другом оценки ENDF/B, БРОНД и JENDL, в то время как, оценка JEF явным образом и неоправданно лежит выше.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

64.11. Гадолиний-158

Содержание в естественной смеси 24.84%. Gd-158 является одним из основных осколков деления в ядерном реакторе. Выход его при делении ядерного топлива значителен и составляет от $\sim 6.E-5$ (U235) до $\sim 1.35E-3$ (Pu-241). Его вклад в суммарное сечение захвата является также заметным.

В ФОНД-2.2 – оценка Блохина, Белановой, 1989.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JEF-2.2~ENDF/B-IV, 1982.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – новая оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 7. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 7. Резонансные свойства Gd-158

| Оценка | Граница области RRR, keV | Граница области URR, keV | $\sigma_\gamma(2200)$, барн | $\sigma_\gamma(Maxw)$, барн | G-fact | I_γ , барн |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|--------|-------------------|
| ENDF/B | 9.98 | - | 2.20 | 2.18 | 1.0006 | 68.1 |
| JENDL | 6.6 | 100. | 2.50 | 2.47 | 1.0004 | 63.7 |
| JEFF | 6.0 | - | 2.50 | 2.47 | 1.0006 | 62.8 |
| BROND | 9.98 | - | 1.97 | 1.95 | 1.0007 | 70.8 |
| Mughabghab (2003) | | | 2.2 ± 0.2 | | 1.0009 | $73. \pm 7.$ |

Из приведенной в таблице 7 информации видно, что не все оценки в пределах заявленной точности, согласуются с рекомендованными значениями сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла. Наилучшим образом с рекомендуемыми Мухабхабом значениями согласуются оценки ENDF/B и БРОНД. В то время как, оценки сечения захвата тепловых нейтронов в JEF и JENDL кажутся завышенными, а резонансные интегралы- заниженными.

На рисунке 22 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в тепловой и эпитепловой областях.

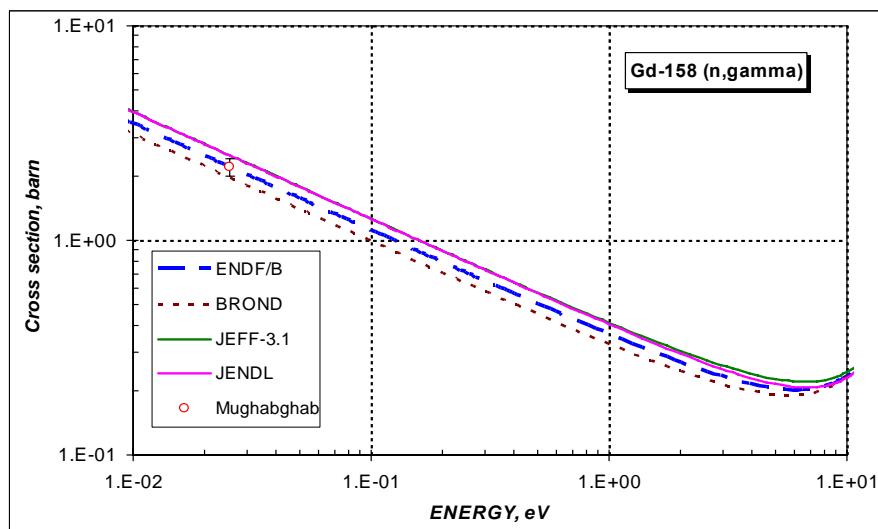


Рисунок 22 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-158 в тепловой области.

На рисунке 23 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий от 10 эВ до 3.0 кэВ.

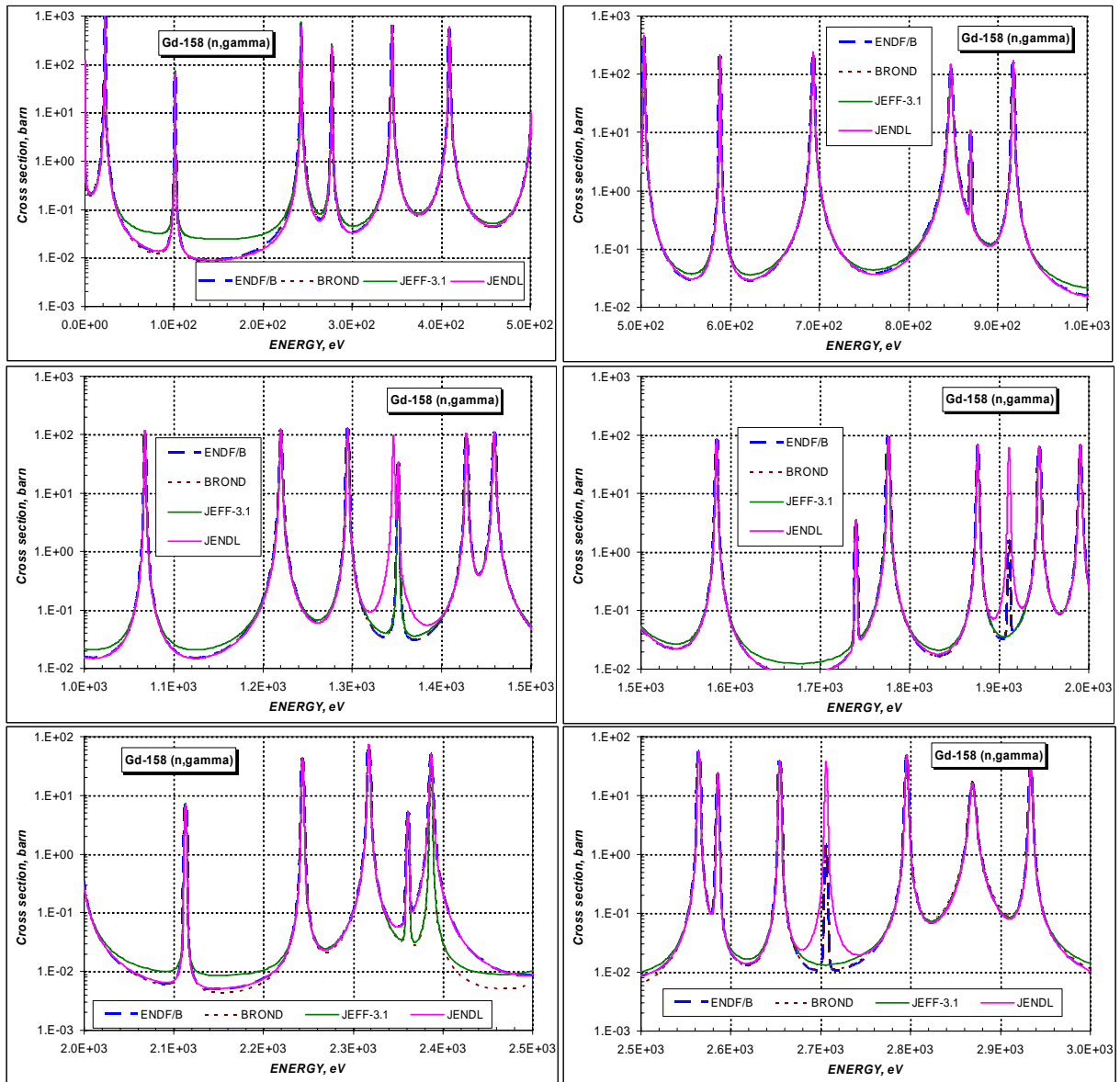


Рисунок 23 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-158 в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 23 сравнения видно, что, в целом, все оценки хорошо согласуются друг с другом при описании резонансного поглощения нейтронов, за исключением, быть может, оценки JEF. Видно, что в последней оценке ENDF/B (Мухабхаб и др) для некоторой части уровней резонансные параметры изменены.

В области гладких сечений экспериментальная информация имеется в области энергий от 10 кэВ до 10 МэВ. Сравнение имеющихся экспериментальных данных с оцененными значениями сечения радиационного захвата в области энергий от 10 кэВ до 10 МэВ приведено на рисунке 24.

Из приведенного на рисунке 24 сравнения видно, что Оценка ENDF/B, для которой учитывались экспериментальные данные Висхака (1995), наилучшим образом согласуется со всей совокупностью экспериментальных данных. С ENDF/B хорошо согласуется и оценка JENDL.

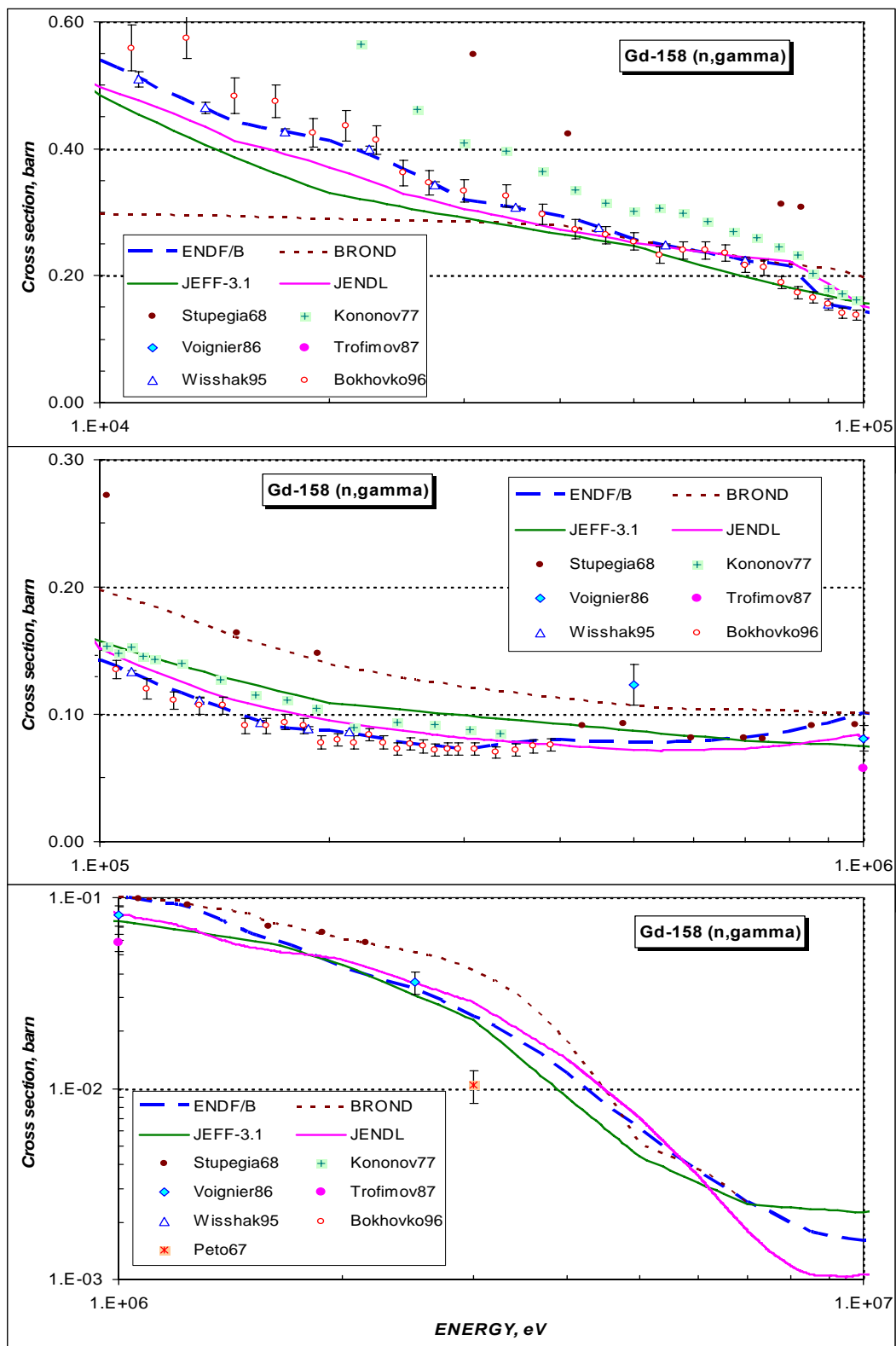


Рисунок 24 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-158 в области энергий от 10 кэВ до 10 МэВ.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Автор отбора данных
Кощеев В.Н.

64.12. Гадолиний-160

Содержание в естественной смеси 21.86%. Gd-160 является одним из осколков деления тяжелых ядер. Его выход при делении ядерного топлива составляет от $\sim 1.E-5$ (U235) до $\sim 3.9E-4$ (Pu-241).

В ФОНД-2.2 – оценка Блохина, Белановой, 1989.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JEF-2.2~ENDF/B-IV, 1982.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – новая оценка Herman, Oblozinsky, Sayer, Mughabgh, 2005.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 8. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 8. Резонансные свойства Gd-160

| Оценка | Граница области RRR, keV | Граница области URR, keV | $\sigma_\gamma(2200)$, барн | $\sigma_\gamma(Maxw)$, барн | G-factor | I_γ , барн |
|------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|----------|-------------------|
| ENDF/B | 9.66 | - | 1.410 | 1.394 | 1.0000 | 8.09 |
| JENDL | 4.22 | 100. | 0.796 | 0.787 | 0.9997 | 11.9 |
| JEFF | 2.88 | - | 0.770 | 0.761 | 1.0001 | 8.21 |
| BROND | 9.67 | - | 0.209 | 0.206 | 1.0001 | 7.57 |
| Mughabghab | | | 1.4 ± 0.3 | | 0.9997 | 7.4 ± 1.0 |

Из приведенной в таблице 8 информации видно, что с рекомендованными значениями Мухабхаба наилучшим образом согласуется оценка ENDF/B. В то время как, оценки JEF и JENDL кажутся заниженными по отношению к тепловому значению сечения и завышенными по отношению к резонансному интегралу. Оценка БРОНД имеет ошибочное значение сечения в тепловой точке.

На рисунке 25 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в резонансной области энергий от 0.01 эВ до 5.0 кэВ.

Из приведенного на рисунке 25 сравнения видно, насколько неправильно описывают сечение в тепловой области оценки JEF, JENDL и БРОНД.

Далее, оценка JENDL не согласуется с другими оценками в описании минимумов в сечении резонансного поглощения.

Оценки БРОНД и ENDF/B хорошо согласуются друг с другом при описании резонансного поглощения нейтронов, за исключением тепловой области энергий.

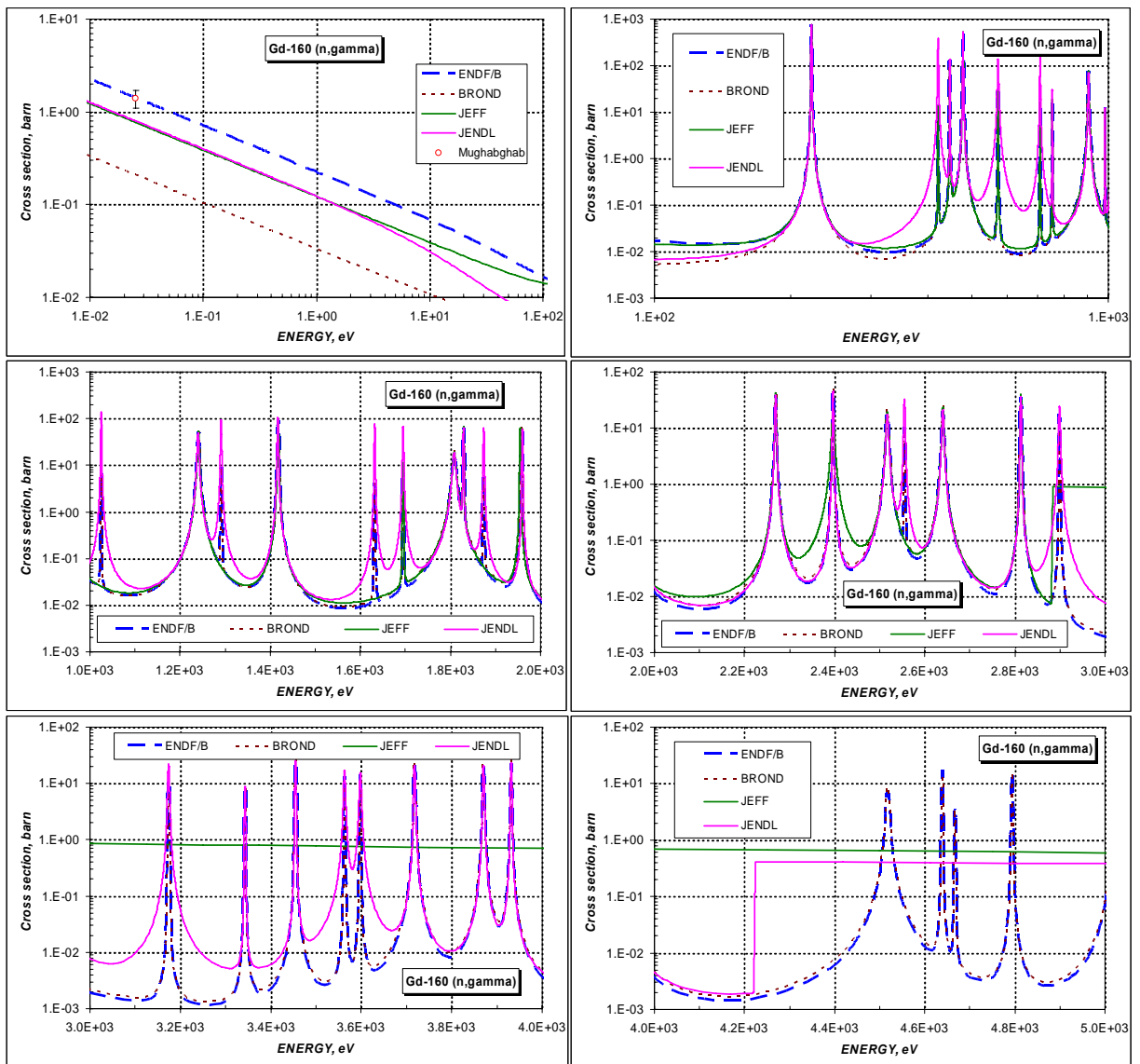


Рисунок 25 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-158 в резонансной области энергий.

В области гладких сечений экспериментальная информация имеется в области энергий от 10 кэВ до 20 МэВ. Сравнение имеющихся экспериментальных данных с оцененными значениями сечения радиационного захвата в области энергий от 10 кэВ до 10 МэВ приведено на рисунке 26.

Из приведенного на рисунке 26 сравнения видно, что оценка ENDF/B, в которой учитывались экспериментальные данные Боховко и др. (1996), наилучшим образом согласуется со всей совокупностью экспериментальных данных.

С оценкой ENDF/B хорошо согласуется и оценка JENDL.

Оценки сечений, принятые в JEF и БРОНД представляется ошибочными.

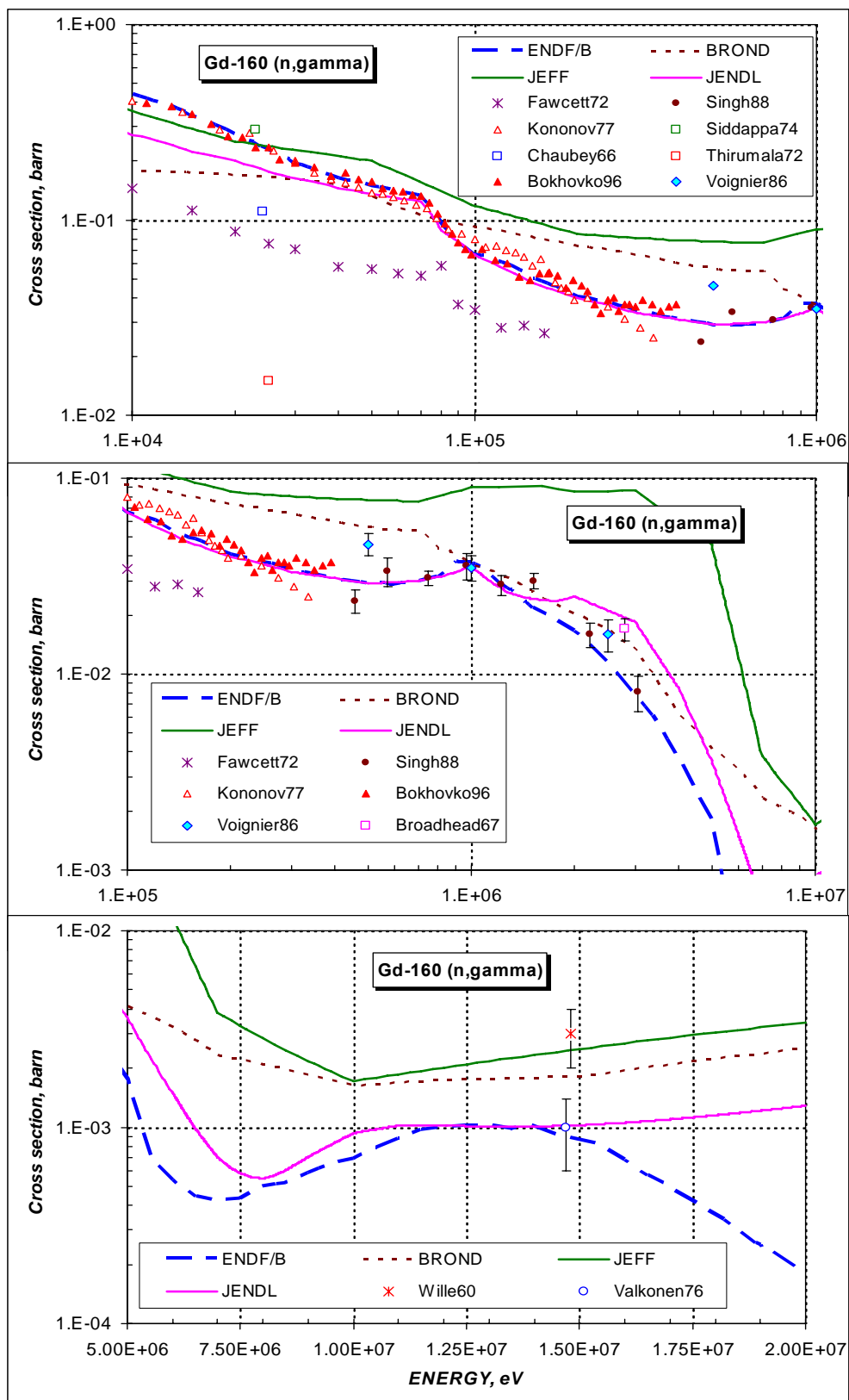


Рисунок 26 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-160 в области энергий от 10 кэВ до 10 МэВ.

Заклучение

В РОСФОНД принимается оценка Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Автор отбора данных Кошечев В.Н.

64.13. Природный гадолиний

Включать в РОСФОНД файл данных для натурального гадолиния не предполагается. В настоящем разделе приводятся результаты тестирования 299-групповых сечений, полученных на основании оцененных нейтронных данных стабильных изотопов из различных оценок. Мультигрупповые сечения для стабильных изотопов были получены с помощью программы переработки нейтронных данных NJOY. Затем с весом концентраций их в естественной смеси, были получены мультигрупповые сечения для природного гадолиния.

Сравнение проводилось только для тех типов сечения, для которых в международной базе экспериментальной информации EXFOR имелись какие-либо наборы экспериментальных данных.

На рисунке 27 приведено сравнение оцененных сечений полного взаимодействия в области энергий от 0.01 эВ до 10 МэВ.

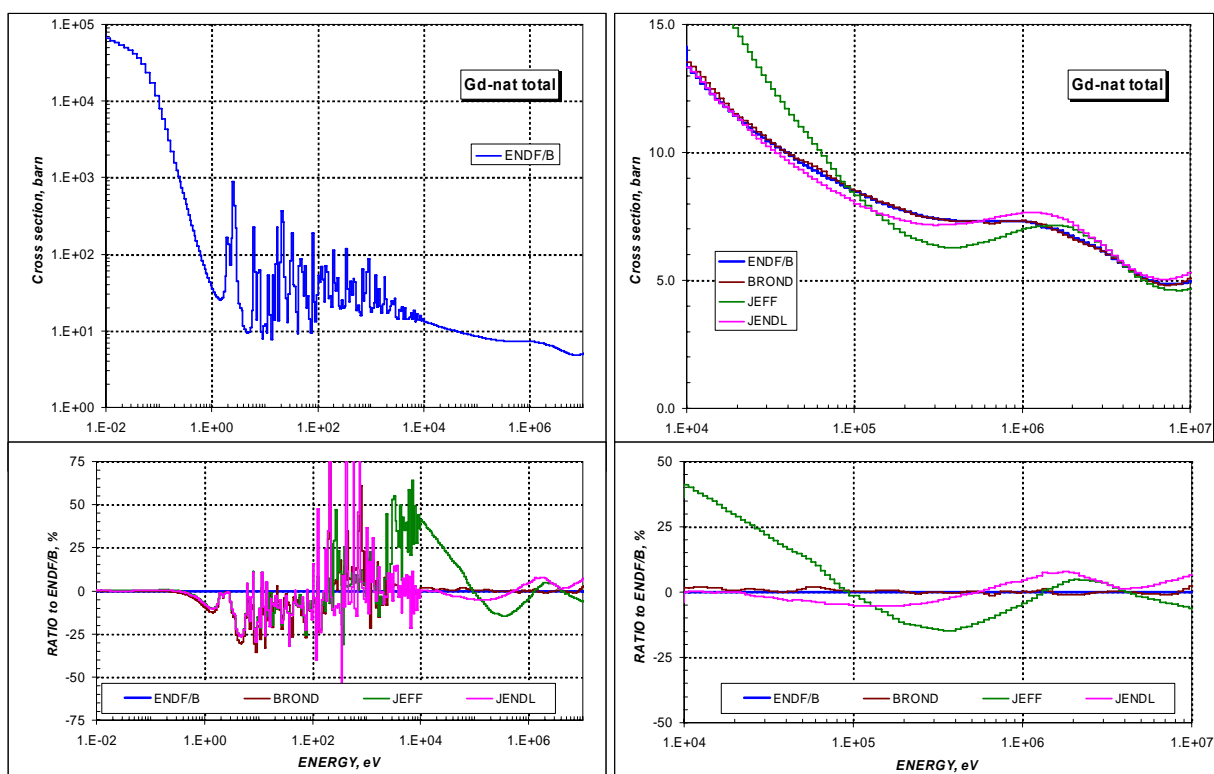


Рисунок 27 – Сравнение оцененных мультигрупповых сечений полного взаимодействия для Gd-nat в области энергий 0.01 эВ – 10 МэВ.

Из представленной на рисунке 27 информации видно, что оценка полного сечения оценки ENDF/B в интервале энергий от 0.1 до 200 эВ лежит выше остальных оценок, в среднем, на 10 - 15 %. В области энергий выше 1 кэВ оценка JEF расходится до 50% с оценкой ENDF/B. В области энергий выше 10 кэВ все оценки (кроме JEF) согласуются между собой в пределах 5 – 7 %.

Сравнение оцененных сечений с имеющимися экспериментальными данными показано на рисунке 28.

Из приведенного сравнения на рисунке 28 видно, что только оценки ENDF/B и БРОНД согласуются со всей совокупностью экспериментальных данных, в то время как, для оценок JEF и JENDL наблюдаются существенные расхождения от экспериментальных данных.

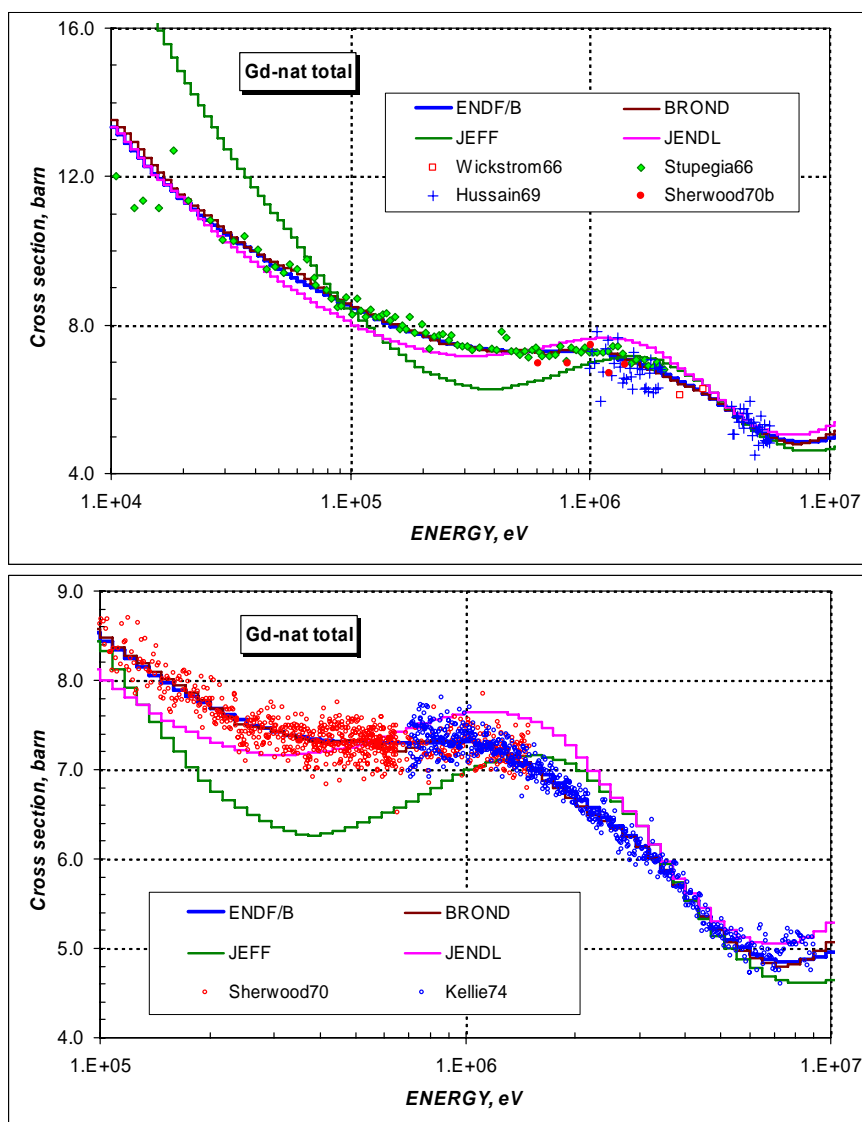


Рисунок 28 – Сравнение оцененных и экспериментальных данных для полного сечения Gd-nat в области энергий выше 10 кэВ.

Далее, было протестировано сечение захвата, полученное, как и полное сечение, путем свертки сечений с весом концентрации стабильных изотопов в природной смеси.

Для захвата были рассчитаны значения сечения в тепловой точке и резонансный интеграл на основе рассмотренных выше значений для стабильных изотопов. Они сравнивались со значениями, рекомендованными в компиляции Мухабхаба. Сравнение приведено в таблице 9.

Таблица 9. Сечение захвата медленных нейтронов Gd-nat.

| Оценка | $\sigma_{\gamma}(2200)$, барн | I_{γ} , барн |
|-------------------|--------------------------------|---------------------|
| ENDF/B | 48 699. | 392.5 |
| JENDL | 48 686. | 395.6 |
| JEFF | 48 625. | 393.1 |
| BROND | 48 647. | 397.9 |
| Mughabghab | 48 890. ± 104. | 390. ± 10. |

Из приведенной в таблице 9 информации видно, что оценка ENDF/B наилучшим образом согласуется с рекомендуемыми значениями Мухабхаба. В то же время, все оцененные значения согласуются с рекомендациями Мухабхаба в пределах заявленной точности.

На рисунке 29 представлено сравнение оцененных сечений в области энергий от 0.01 эВ до 10 МэВ.

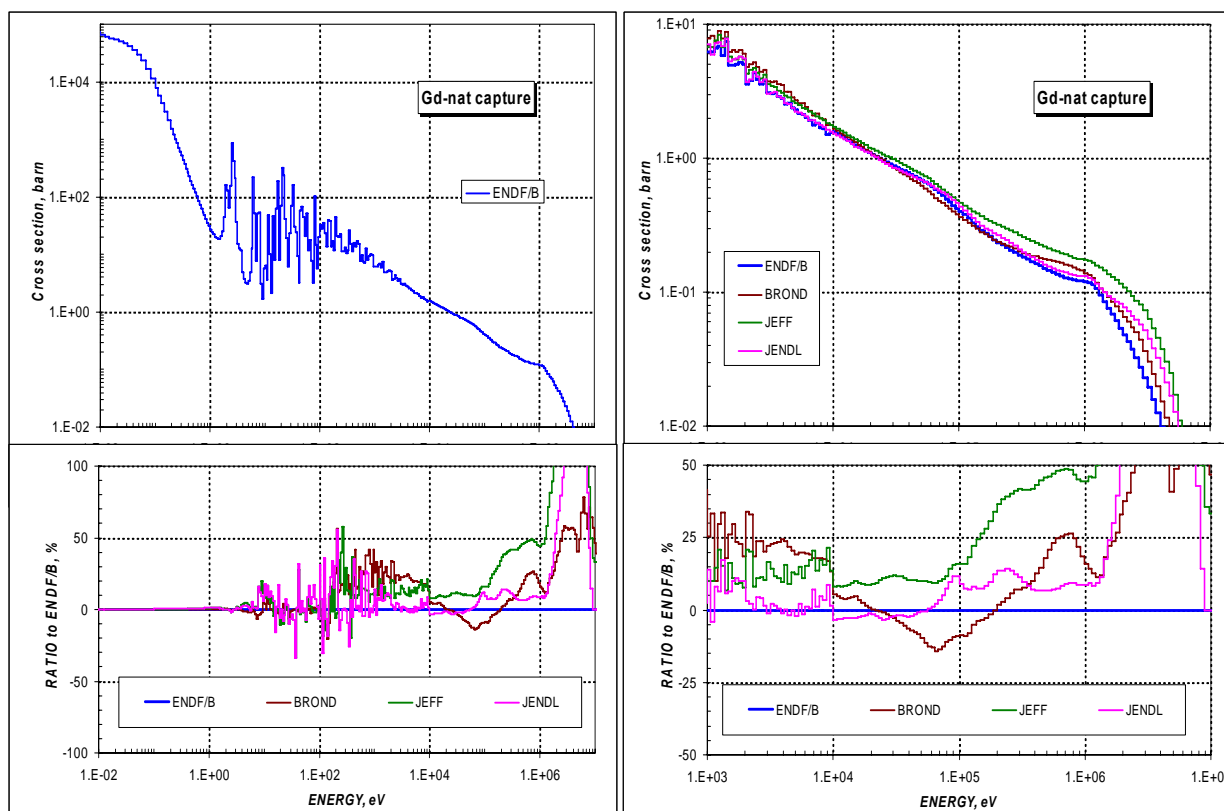


Рисунок 29 – Сравнение оцененных мультигрупповых сечений захвата для Gd-nat в области энергий 0.01 эВ – 10 МэВ.

Из представленной на рисунке 29 информации видно, что оценка сечения захвата в интервале энергий от 0.1 до 200 эВ лежит выше остальных оценок, в среднем, на 10 - 15 %. В области энергий выше 1 кэВ оценка JEF расходится до 50% с оценкой ENDF/B. В области энергий выше 10 кэВ все оценки (кроме JEF) согласуются между собой в пределах 5 – 7 %.

Из приведенного на рисунке 29 сравнения видно, что до 100 эВ оценки согласуются в пределах 10 %, от 100 эВ до 10 кэВ расхождения между оценками достигают ~ 25 - 30 %, выше 10 кэВ – в пределах 20 % (не считая JEF). В области энергий выше 1 МэВ, где сечения малы по величине, расхождения возрастают до 100 %.

Сравнение оцененных сечений с имеющимися экспериментальными данными показано на рисунке 30.

Из приведенного сравнения на рисунке 30 видно, что оценка ENDF/B в области энергий от 1 до 10 кэВ лежит ниже совокупности экспериментальных данных, а выше 10 кэВ наилучшим образом согласуется со всеми наборами экспериментальных данных.

Что касается других оценок, то только оценка JEF выше 100 кэВ лежит выше всей совокупности экспериментальных данных. Остальные оценки согласуются между собой в пределах разброса различных экспериментальных наборов данных.

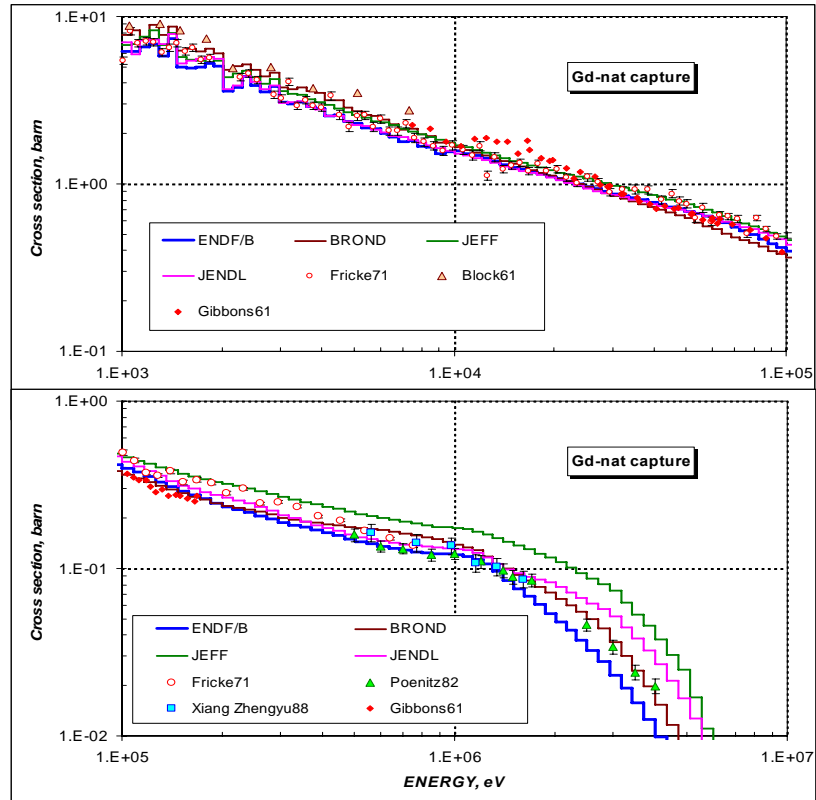


Рисунок 30 – Сравнение оцененных и экспериментальных данных для сечения захвата на Gd-nat в области энергий выше 1 кэВ.

И, наконец, в базе экспериментальных данных EXFOR имелись немногочисленная экспериментальная информация по сечению неупругого рассеяния нейтронов. На рисунке 31 представлено сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния и экспериментальных данных.

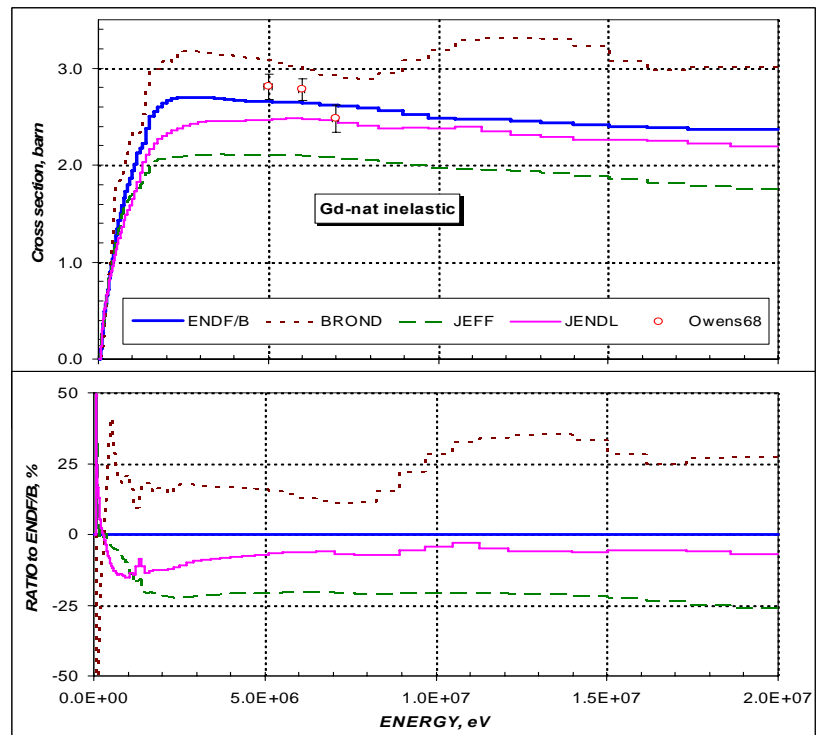


Рисунок 31 – Сравнение оцененных и экспериментальных данных для сечения неупругого рассеяния на Gd-nat.

Из представленной на рисунке 31 информации видно, что оценка ENDF/B наилучшим образом согласуется с экспериментом Оуэнса (1968). В пределах 10 % с экспериментом согласуется оценка JENDL. Остальные оценки противоречат экспериментальным данным.

Заключение

Принятые в РОСФОНД оценки Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2) для стабильных изотопов гадолиния не противоречат имеющейся совокупности экспериментальных данных для природной смеси.

Автор заключения – В.Н.Кощеев.

65.ТЕРБИЙ

Природный тербий содержит лишь один изотоп – ^{159}Tb . Имеется также 5 долгоживущих нейтронно-дефицитных радиоактивных изотопов тербия (один из которых - ^{156}Tb – обладает достаточно долгоживущим изомером) и три нейтронно-избыточных радиоактивных изотопов.

65.1. Тербий-153

В реакторе может образовываться в ничтожных количествах в результате реакции $^{156}\text{Dy}_{(0.06\%)}(n,nt)$.

Радиоактивен ($T_{1/2}=2.34$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона превращается в ^{153}Gd , который затем распадается ($T_{1/2}=239.47$ дн.) в стабильный европий-153.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится файл данных о сечениях нейтронных реакций, оцененных расчетным путем. Экспериментальных данных для их проверки не имеется.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 113 барн.

Резонансный интеграл захвата: 1965 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

65.2. Тербий-155

В реакторе может образовываться в ничтожных количествах в результате реакции $^{156}\text{Dy}_{(0.06\%)}(n,d)$, (n,p) .

Радиоактивен ($T_{1/2}=5.32$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона превращается в стабильный ^{155}Gd .

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится файл данных о сечениях нейтронных реакций, оцененных расчетным путем. Экспериментальных данных для их проверки не имеется.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 109 барн.

Резонансный интеграл захвата: 2028 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Включить файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{156}\text{Tb}^m$. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения
Николаев М.Н.

65.3. Тербий-156

В реакторе может образовываться в ничтожных количествах в результате реакции $^{156}\text{Dy}_{(0.06\%)}(n,p)$, $^{158}\text{Dy}_{(0.10\%)}(n,t)$.

Радиоактивен ($T_{1/2}=5.4$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона превращается в стабильный ^{156}Gd .

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится файл данных о сечениях нейтронных реакций, оцененных расчетным путем. Экспериментальных данных для их проверки не имеется.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 155 барн.

Резонансный интеграл захвата: 2360 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3.

Автор заключения
Николаев М.Н.

65.4. Тербий-156-m

В реакторе может образовываться в ничтожных количествах в результате реакции $^{156}\text{Dy}_{(0.06\%)}(n,p)$, $^{158}\text{Dy}_{(0.10\%)}(n,t)$.

Радиоактивен ($T_{1/2}=24.4$ ч.). Испытывает изомерный переход в основное состояние.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится файл данных о сечениях нейтронных реакций, оцененных расчетным путем. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 94.5 барн.

Резонансный интеграл захвата: 220 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения
Николаев М.Н.

65.5. Тербий-157

В реакторе может образовываться в ничтожных количествах в результате реакций $^{158}\text{Dy}_{(0.10\%)}(n,d)$, (n,np) ; $^{159}\text{Tb}(n,3n)$; $^{158}\text{Tb}_{(T_{1/2}=180\text{лет})}(n,2n)$.

Радиоактивен ($T_{1/2}=71$ г.). Захватывая орбитальный электрон превращается в стабильный гадолиний-157.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится файл данных о сечениях нейтронных реакций, оцененных расчетным путем. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 84.3 барн.

Резонансный интеграл захвата: 1843 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Включить файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{156}\text{Tb}^m$. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

65.6. Тербий-158

В реакторе может образовываться в небольших количествах в результате реакций $^{158}\text{Dy}_{(0.10\%)}(n,p)$ или $^{159}\text{Tb}(n,2n)$; ¹

Радиоактивен ($T_{1/2}=180$ лет). Захватывая орбитальный электрон превращается в стабильный гадолиний-157(83.4%); в остальных случаях испытывает бета-распад в стабильный диспрозий-158.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится файл данных о сечениях нейтронных реакций, оцененных расчетным путем. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 105 барн.

Резонансный интеграл захвата: 1773 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Включить файл MF=9 с вероятностью образования долгоживущего изомера $^{156}\text{Tb}^m$. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

65.7. Тербий-159

Единственный стабильный изотоп.

В современных библиотеках фигурируют три различных оценки нейтронных данных для тербия:

1. Оценка Группелара и Менапаса (Gruppelaar H, Menapace E.), выполненная в 1983 г. – используется в JEFF-3.1.
2. Оценка японской рабочей группы JNDC FPND, выполненная в 1984 г. для JENDL-2 используется в JENDL-3.3 и в ФОНД-2.2;
3. Оценка С.Мухабхаба и японской рабочей группы JNDC FPND, выполненная в 2005 г. и включенная в библиотеку ENDF/B-VIIb2.

Ниже эти оценки будут сравнены между собой и с имеющимися экспериментальными данными

1. Тепловая и резонансная области

В таблице 1. сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы захвата.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

| | $\sigma(0.0253\text{эВ})$ | RI |
|--------------|---------------------------|--------|
| JEFF-3.1 | 23.2 | 406 |
| JENDL-3.3 | 26.52 | 471 |
| ENDF/B-VIIb2 | 23.35 | 415 |
| Мухабхаб-03 | 23.3±0.4 | 418±20 |

Преимущество ENDF/B-VIIb2 очевидно.

Область разрешенных резонансов в оценке JEFF-3.1 содержит лишь 30 резонансов и простирается от 17 до 170 эВ.

В JENDL-3.3 эта область содержит 227 резонансов выше энергии связи нейтрона и одно связанное состояние. Максимальная энергия -1192.2 эВ. Граница области -1188 эВ.

В ENDF/B-VIIb2 область разрешенных резонансов содержит 222 резонанса выше энергии связи нейтрона и два связанных состояния. Максимальная энергия - 1192.2 эВ. Граница области -1250 эВ.

На рис.1 сравниваются нарастающие суммы резонансов в двух последних оценках. В ENDF/B-VIIb2 отсутствуют очень слабые резонансы при 23.1, 35.1 и 35.9 эВ и пары резонансов при 130 эВ и 155 эВ объединены. Более существенны различия в оценке нейтронных ширин. На рис. 2 показаны нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин. Видно, что в ENDF/B-VII нейтронные ширины в среднем несколько ниже. Однако нарастающие суммы в обеих оценках весьма близки к линейным, показывая, что пропущены только очень слабые резонансы (наличие пропуска очевидно из рис.1).

Из приведенных данных следует, что верхняя граница области разрешенных резонансов в ENDF/B-VII несколько завышена. Граница между двумя последними резонансами, принятая в JENDL-3.3 представляется более оправданной. В то же время, более поздняя оценка резонансных параметров, выполненная при участии С. Мухабхаба делает параметры из ENDF/B-VIIb2 более привлекательными.

Что касается области неразрешенных резонансов, то в них приняты одни и те же параметры. Верхняя граница этой области – 100 кэВ. Сечения в ней до порога неупругого рассеяния (58.368 кэВ) полностью определяются параметрами резонансов. Выше этого порога, вклад неупругого рассеяния учтен плавной подложкой в полное

сечение. Влияние неупругого рассеяния на резонансную самоэкранировку сечений захвата и упругого рассеяния учитывается введением ширины конкурирующего процесса.

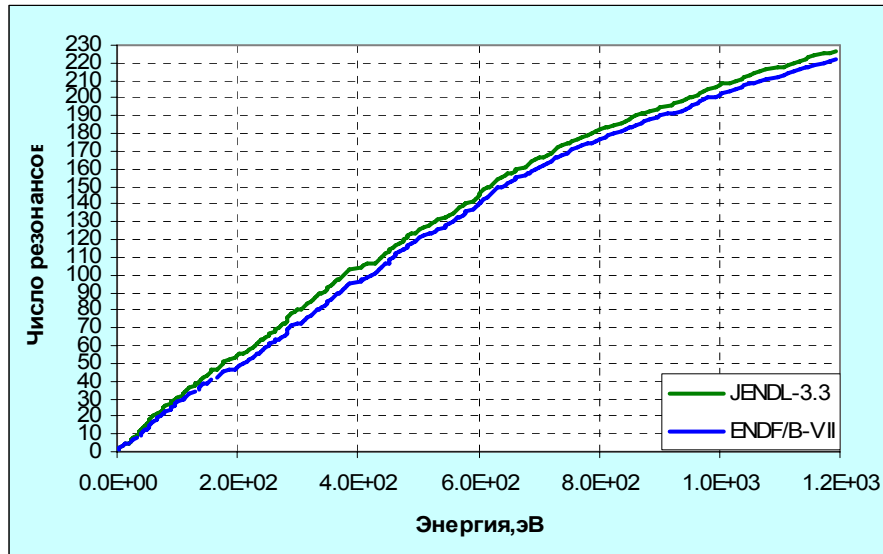


Рис.1. Нарастающая сумма числа резонансов

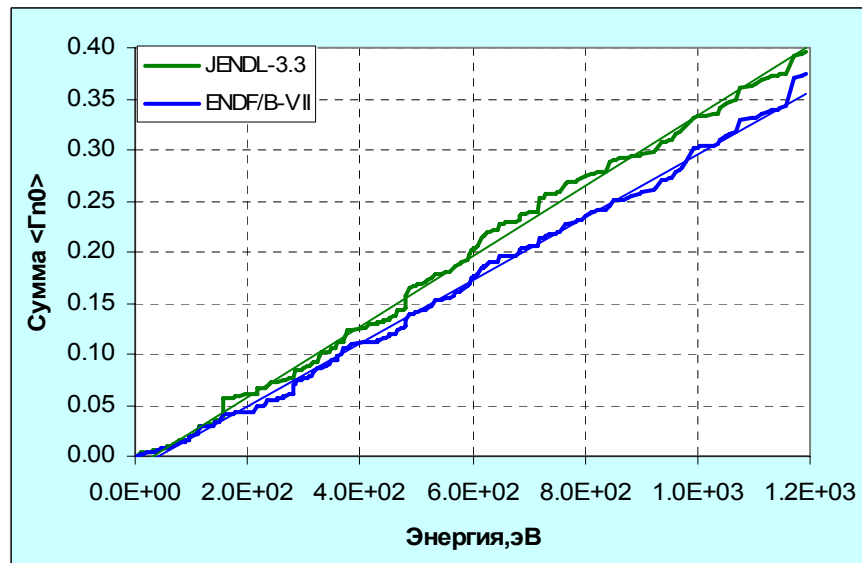


Рис.2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин

2. Сечения вне резонансной области

На рис.3. Приведены экспериментальные данные по сечению захвата в сравнении с оценкой JEFF-3.1 и JENDL-3.3. Вне резонансной области последняя оценка принята и в ENDF/B-VIIb2. Преимущества последней оценки перед оценкой JEFF-3.1 очевидны. В то же время в важной области сотен кэВ оцененное сечение, видимо, завышено, о чем свидетельствуют данные и Боховко и Гиббонса.

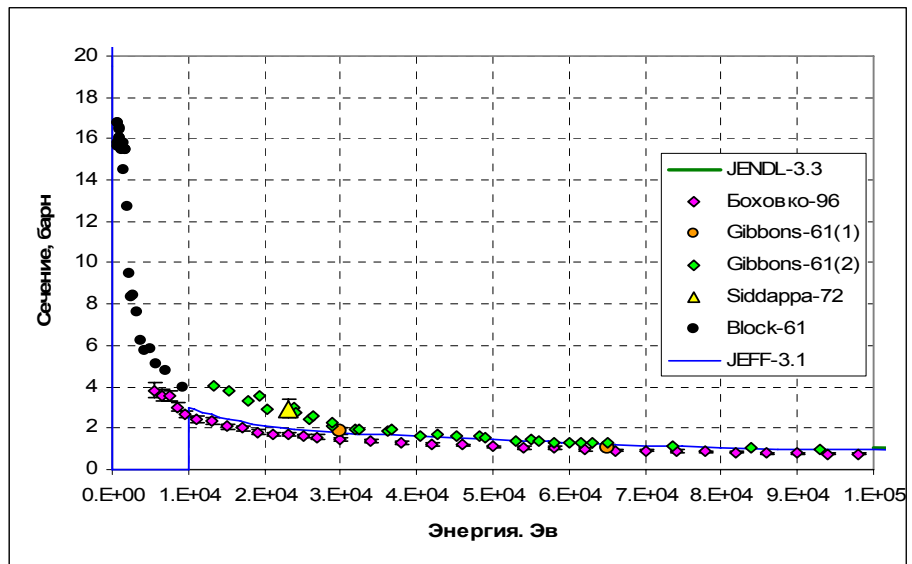


Рис.3а. Сечение захвата

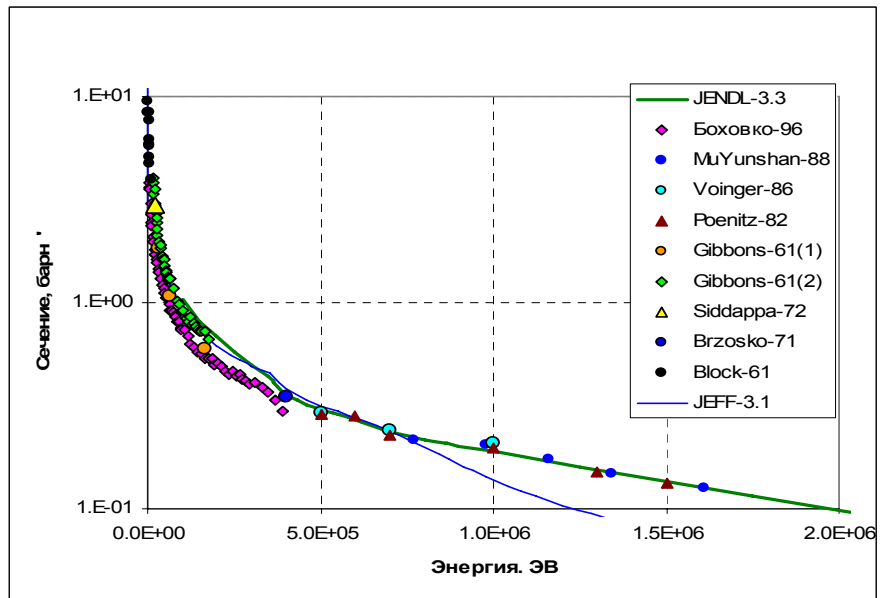


Рис.3б. Сечение захвата

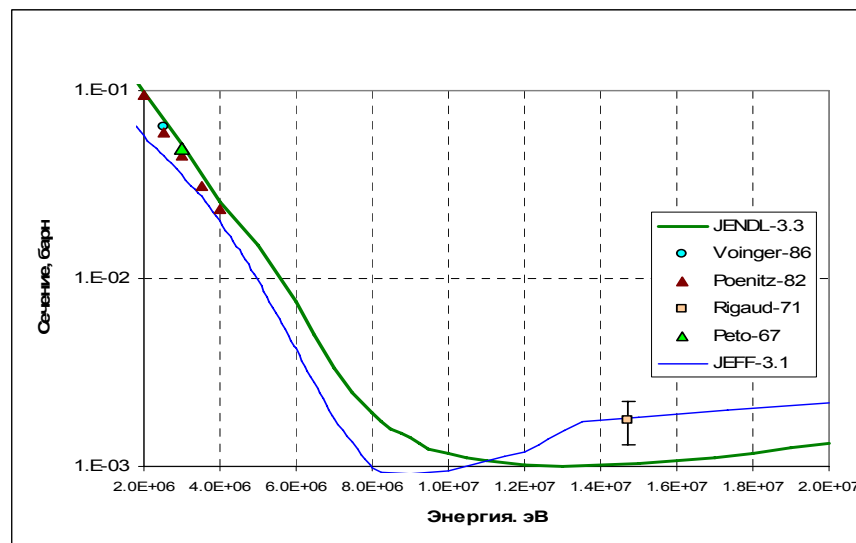


Рис.3в. Сечение захвата

При 14 – 15 МэВ оценка JENDL-3.3 лежит ниже результата Риго на два декларированных автором стандартных отклонения. Для решения вопроса об истинном значении сечения в этой области весьма желательны дополнительные экспериментальные данные.

На рис.4. сравниваются с экспериментальными данными оцененные полные сечения. Преимущество последней оценки очевидно и здесь.

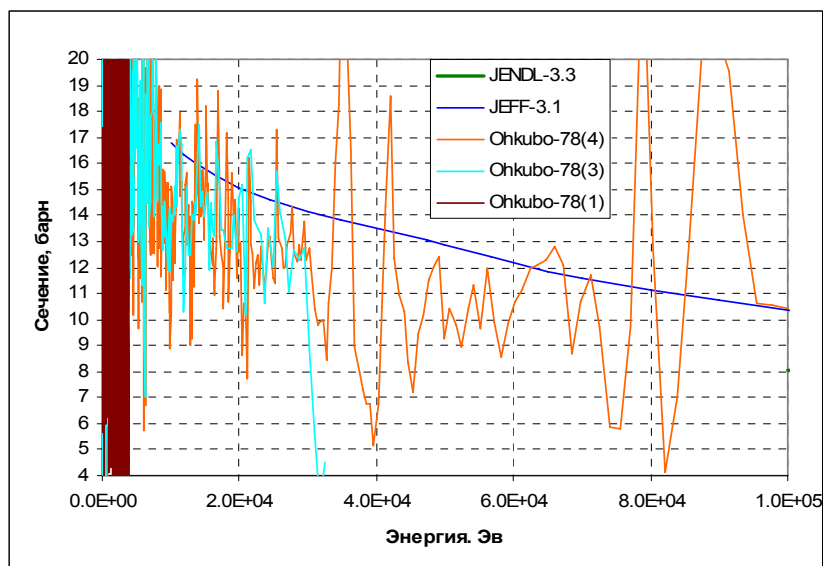


Рис.4а. Полное сечение

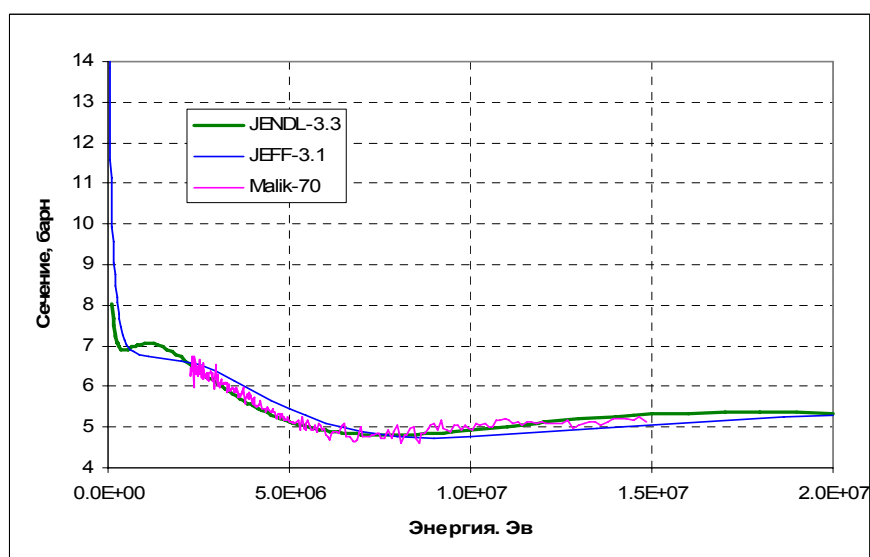


Рис.4б. Полное сечение

На рис. 5 приведены оцененные и измеренные сечения реакции (n,2n), в результате которой образуется долгоживущий ($T_{1/2}=180$ лет) изотоп ^{158}Tb . Согласие оценки JENDL-3.3 с экспериментальными данными приемлемое, чего не скажешь об оценке, принятой в JEFF-3.1, в которой реакция (n,3n) слита с реакцией (n,2n).

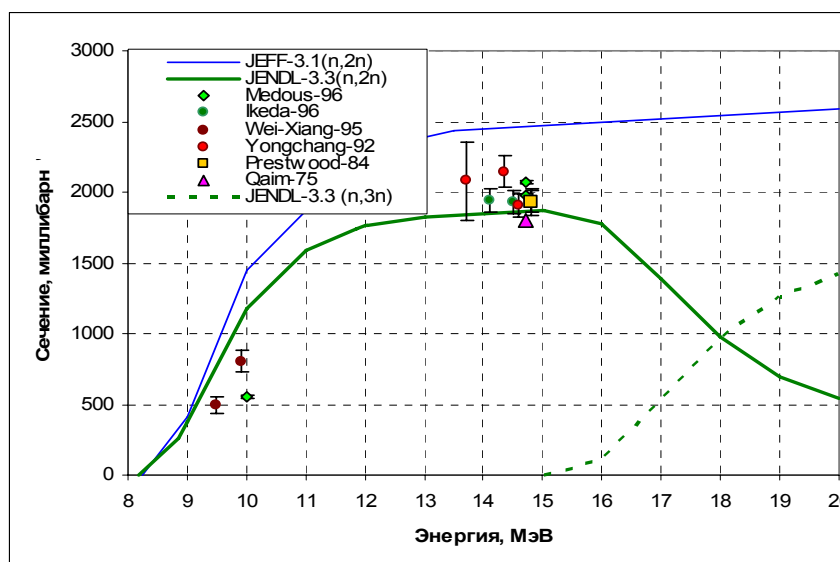


Рис.5. Сечение реакции (n,2n) и (n,3n) – пунктир.

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из ENDF/B=VIIb2, содержащий уточненные резонансные параметры. Установить границу области разрешенных резонансов такой, как в JENDL-3.3.

В дальнейшем следует пересмотреть оценку, по крайней мере в части значений сечения захвата вне резонансной области. Следует также выявить причины превышения оцененного сечения реакции (n,2n) вблизи порога над экспериментальными данными и попытаться устранить их.

Автор заключения

Николаев М.Н.

65.8. Тербий-160

В реакторе может образовываться в небольших количествах в результате реакции $^{159}\text{Tb}(n,\gamma)$, а также как продукт деления.

Радиоактивен ($T_{1/2}=72.3$ дн.). Испытывает бета-распад в стабильный диспрозий-160.

Имеются полные наборы нейтронных данных в библиотеках JEFF-3.1 и ENDF/B-VIIb2.

В JEFF-3.1 содержится оценка Шентера, Шмиттроса и Рейча (R.E.Schenter, F.Schmittroth, C.Reich), выполненная в середине 70-х годов.

В ENDF/B-VIIb2 содержится оценка Мухабхаба (S. Mughabghab)- резонансная область и Хермана, Обложинского и Сарера (M.Herman, P.Oblozinsky, B.Sarer) вне резонансной области.

В EAF-2003 приводятся оценки нейтронных сечений.

Различие в оцененных данных велико:

| Библиотека | Полное | Захват | Упругое | Резонансный интеграл захвата |
|--------------|--------|--------|---------|------------------------------|
| ENDF/B-VIIb2 | 339.2 | 333.7 | 5.44 | 3645 |
| JEFF-3.1 | 530.4 | 525 | 5.4 | 1131 |
| EAF-2003 | | 525 | | 1856 |

Заключение

Оценка, принятая в ENDF/B-VIIb2, безусловно, является наиболее надежной и ее и следует включить в РОСФОНД.

Автор заключения

Николаев М.Н.

65.9. Тербий-161

В реакторе может образовываться в небольших количествах в результате реакций $^{160}\text{Tb}(n,\gamma)$ или $^{160}\text{Dy}(n,p)$, $^{161}\text{Dy}(n,np)$ и т.п., а также как продукт деления.

Радиоактивен ($T_{1/2}=6.906$ дн.). Испытывает бета-распад в стабильный диспрозий-161.

Полных наборов нейтронных данных не имеется.

В EAF-2003 приводятся теоретические оценки нейтронных сечений.

Экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 47.6 барн.

Резонансный интеграл захвата: 1236 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003.

Автор заключения

Николаев М.Н.

66. ДИСПРОЗИЙ

66.0 Общие замечания

Для библиотеки РОСФОНД требовалось отобрать нейтронные данные для 10 стабильных и долгоживущих изотопов диспрозия. Представлялось также целесообразным включить данные для ^{165}Dy , имеющего период полураспада лишь 2.33 ч., но обладающим высоким сечением захвата тепловых нейтронов (около 4000 барн). Данные для всех этих изотопов содержатся в библиотеке ФОНД-2.2., однако, как будет видно, из дальнейшего, большинство из них целесообразно заменить на более современные и полные оценки, выполненные в последние годы и включенные в современные зарубежные библиотеки. Рассмотрим результаты деятельности по переоценке данных для изотопов диспрозия, проведенной в последние годы в сравнении с оценками, содержащимися в ФОНД-2.2. При этом главное внимание будем обращать на результаты оценки сечения захвата, поскольку

Радиоактивные изотопы.

Из 3-х долгоживущих изотопов диспрозия - ^{154}Dy , ^{159}Dy и ^{166}Dy - авторы библиотеки EAF в версии EAF-99 пересмотрели данные только для ^{159}Dy ($T_{1/2}=144.4$ дн.), увеличив сечение захвата тепловых нейтронов с 83.45 барн (EAF-3) до 8000 барн, а в версии EAF-2003 – до 10368 барн. Основанием для пересмотра явился пересчет сечения по программе MUSGAM.

Изменено сечение захвата и для ^{165}Dy ($T_{1/2}=2.33$ ч.) с 3600 барн до 4447 барн. Заметим, что Мухабхаб¹ приводит для этого сечения значение 3800 ± 300 барн. Никаких аргументов в пользу увеличения сечения захвата для этого радионуклида в доступной документации не приводится.

Стабильные изотопы.

Данные для ^{156}Dy (0.06%) и ^{156}Dy (0.10%) содержатся только в активационных библиотеках EAF. Сечения радиационного захвата для них пересматривались на основе программы SIGECN-MASGAN, но сколько-нибудь существенного изменения не претерпели.

Данные для ^{160}Dy (2.34%) в библиотеке ФОНД-2.2 были взяты из EAF-3. В ENDF/B-VI и в JEF-3.0 использовались более совершенные оценки, опирающиеся на резонансные параметры, оцененные Мухабхабом. В ENDF.B-VII принята оценка Ох (S.Y.Oh, KAERI)(резонансная область) и Обложинского (P. Oblozinsky, BNL) (область более высоких энергий). В оценке принимали активное участие Мухабхаб (S.F. Mughabghab, BNL) и Ли (Y.D.Lee, KAERI).

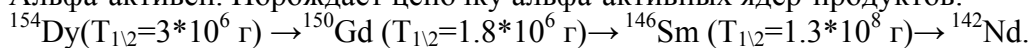
Для ^{161}Dy , ^{162}Dy , ^{163}Dy , ^{164}Dy в ФОНД-2.2 были включены оценки из JEF-2, в которых сечения в области разрешенных резонансов описывались параметрами меньшего числа резонансов, чем было приведено Мухабхабом¹. К моменту формирования РОСФОНДа появились новые оценки той же группы авторов, которая выполняла оценку данных для ^{160}Dy . Будучи самыми последними по времени и по методике оценки эти данные, несомненно, являются более надежными, чем прежние оценки, принятые в ФОНД-2.2.

При изложении данных для отдельных изотопов мы будем исходить из той общей информации, которая изложена выше.

¹ S.F.Mughabghab et. Al. Neutron Cross Sections. V.1. Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. Part B. Academic Press, 1981.

66.1. Диспрозий-154

Альфа-активен. Порождает цепочку альфа-активных ядер-продуктов:



В ФОНД-2.2 – J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation) – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рис. 1-3 сравниваются сечения различных реакций из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата сохранено неизменным. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе более современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

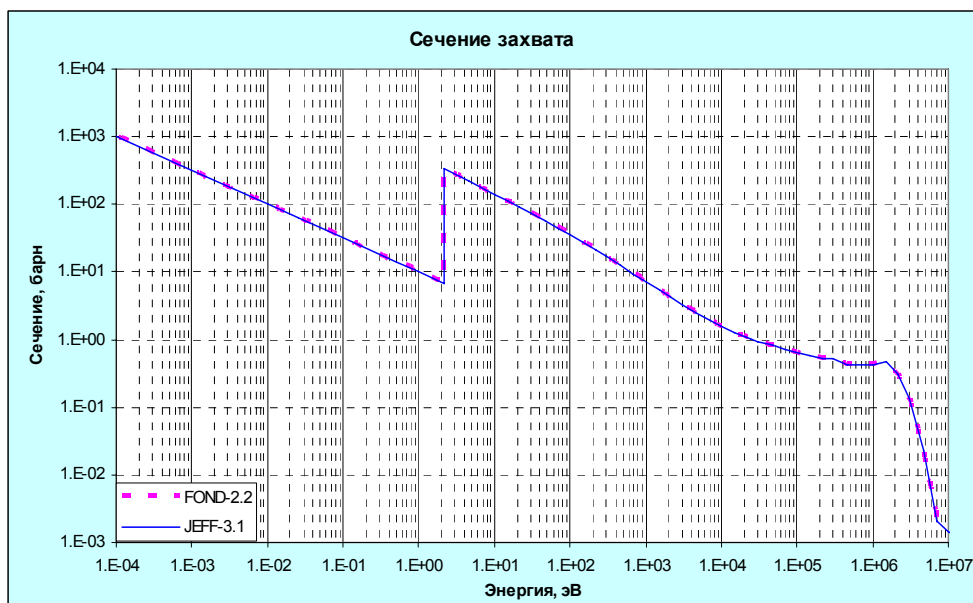


Рис.1

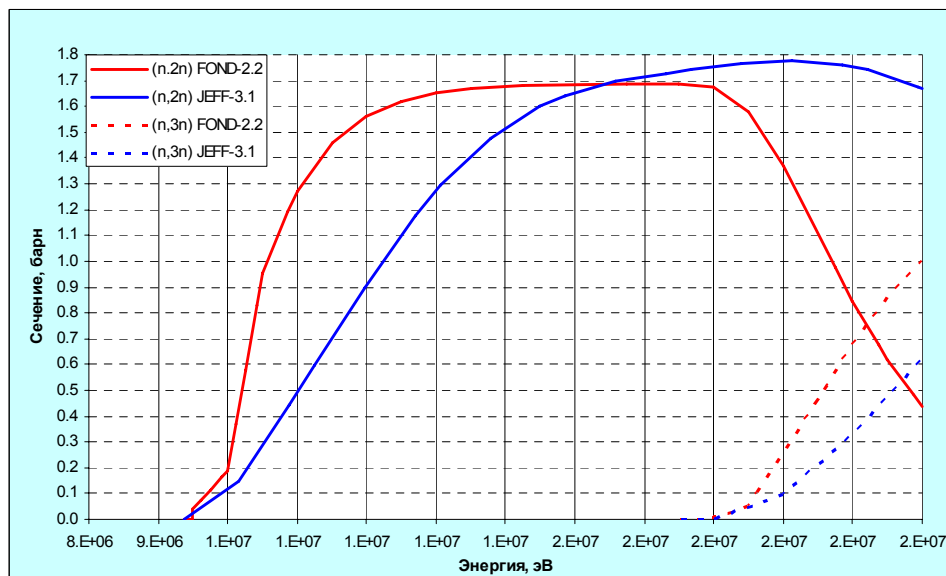


Рис.2.

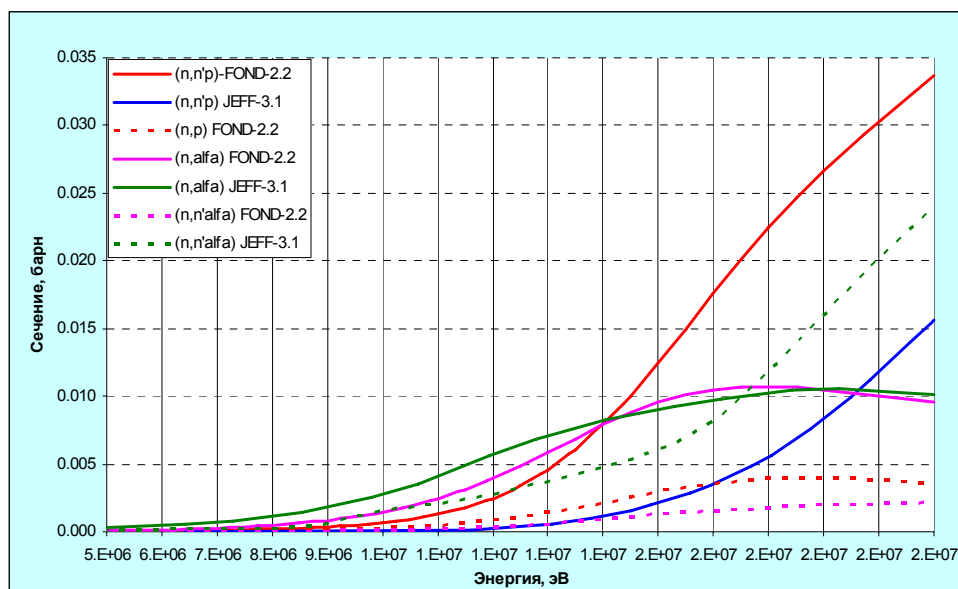


Рис. 3.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (JEFF-3.1).
 Файлы MF=8 и MF=10 исключены. Изомеры, сечения которых приведены в файле MF=10, имеют периоды полураспада менее суток. Суммарные сечения реакций (n,p), (n,n'd) и (n,n't), просуммированные по подсекциям файла MF=10, включены в файл MF=3.
 Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 63.28 барна.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

66.2. Диспрозий-156

Содержание в естественной смеси 0.06%.

В ФОНД-2.2 – J.Корецкы, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation) – оценка, Forrest Kopecky, Sublet, Koning, 2003.

В ENDF/B-VII b1.2 – оценка Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabgh, 2005. Введена область разрешенных резонансов (до 91 эВ), данные о полном и парциальных сечениях и энерго-угловые распределения продуктов нейтронных реакций.

В JENDL оцененные данные отсутствуют.

Первые две оценки содержат данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

Оценка, принятая в ENDF/B-VII b1.2, полная и несомненно, что в РОСФОНД следует рекомендовать именно ее. К сожалению, в этой оценке отсутствуют данные по реакции (n,3n), хотя в перечне реакций, указанном в текстовом заголовке, она перечислена. Решено ввести сечение этой реакции, взяв его из оценки JEFF-3.1, а энерго-угловые распределения продуктов реакции позаимствовать из оценки, принятой в ENDF/B-VII b1.2 для диспрозия-160, внося в нее необходимые коррективы.

На рис. 4-7 сравниваются сечения основных реакций из перечисленных оценок. В случае сечения захвата приведены имеющиеся скудные экспериментальные данные. Важно отметить, что точка при 500 кэВ, появившаяся после выполнения оценки, прекрасно с ней согласуется.

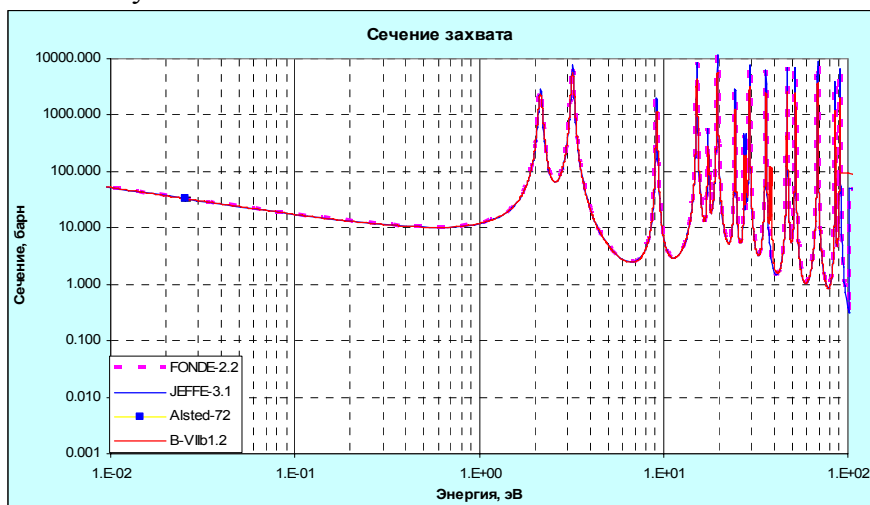


Рис.4а

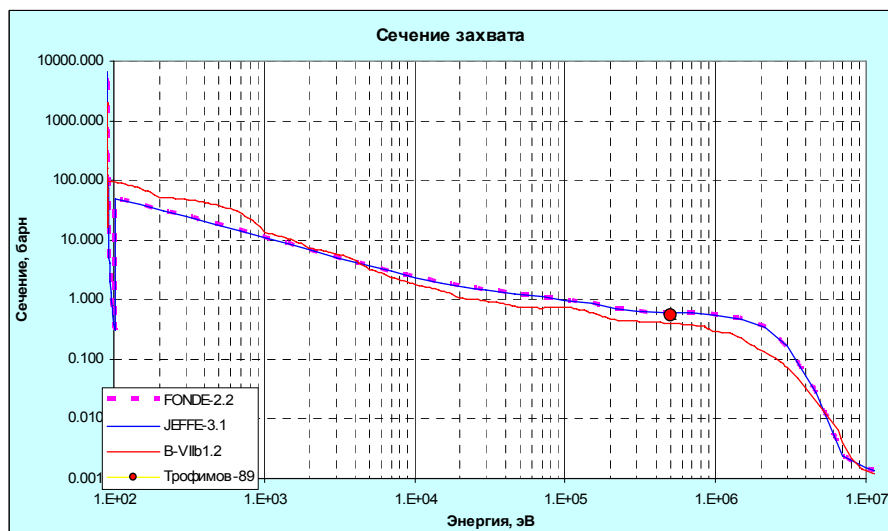


Рис.4б

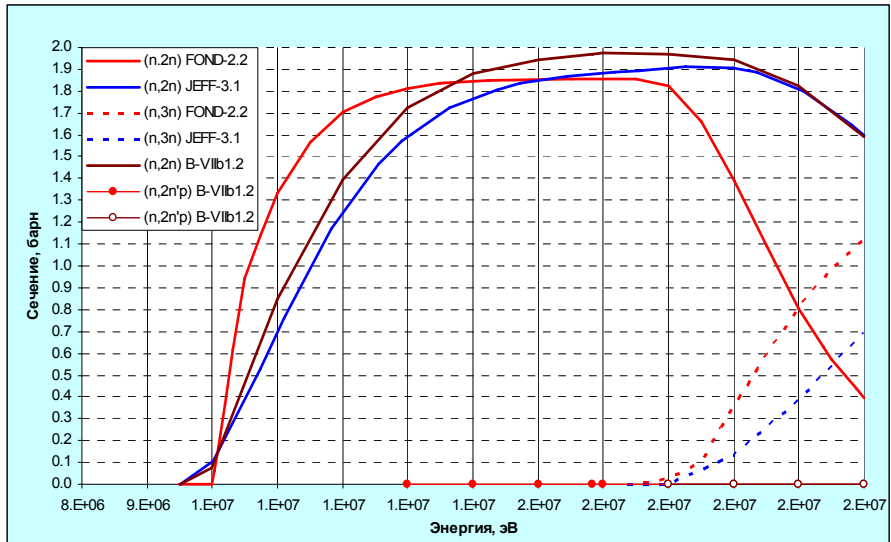


Рис.5

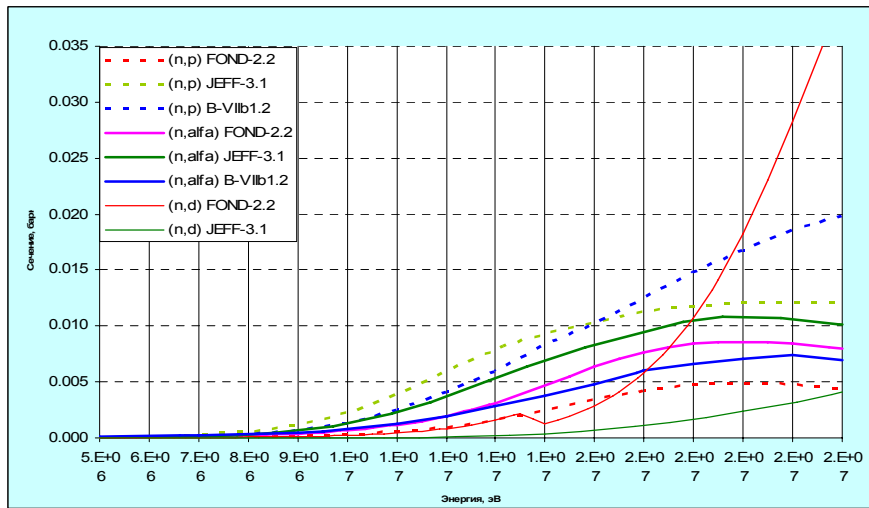


Рис. 6

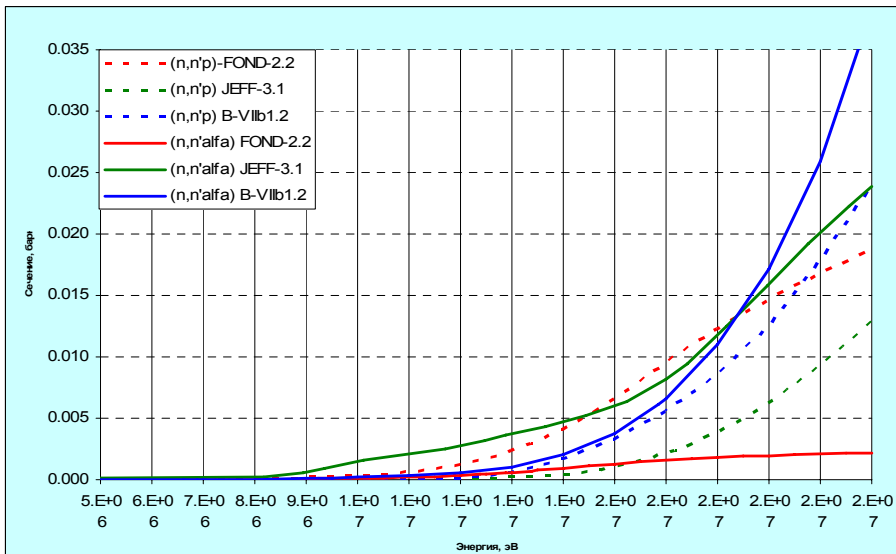


Рис.7

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2) с введением данных о сечении и энерго-угловых распределениях реакции (n,3n), полученных указанным выше образом. Дополнительно включена секция 9/103 с вероятностями образования тербия-156 в основном и изомерных состояниях на основе данных EAF-2003².

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) | (n,p) | (n, α) |
|---------------------------------|----------------|----------------|-------------|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|
| 0.0253 эВ | 37.15 | 4.09 | | | 33.06 | | 0.000 | 37.15 |
| | | | | | 33.04 | | | |
| Резонансный интеграл | 2075.01 | 1053.35 | | | 1021.66 | | 0.000 | 2075.01 |
| | | | | | 954.45 | | | |
| Спектр деления ²³⁵ U | 8.08 | 5.71 | 2.14 | 0.002 | 0.225 | 0.000 | 0.000 | 8.08 |
| | | | | 0.002 | 0.400 | 0.000 | 0.000 | |
| 14 МэВ | 5.34 | 2.99 | 0.46 | 1.88 | 0.001 | 0.008 | 0.004 | 5.34 |
| | | | | 1.84 | 0.001 | 0.002 | 0.005 | |

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

66.3. Диспрозий-158

Содержание в естественной смеси 0.10%.

В ФОНД-2.2 –J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation) – оценка, Forrest Kopecky, Sublet, Koning, 2003.

В ENDF/B-VII b1.2 – оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005. Введена область разрешенных резонансов (до 86.2 эВ), данные о полном и парциальных сечениях и энерго-угловые распределения продуктов нейтронных реакций.

В JENDL оцененные данные отсутствуют.

Первые две оценки содержат данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

Оценка, принятая в ENDF/B-VII b1.2, полная и несомненно, что в РОСФОНД следует рекомендовать именно ее. К сожалению, в этой оценке отсутствуют данные по реакции (n,3n), что в перечне реакций, указанном в текстовом заголовке, она перечислена. Решено ввести сечение этой реакции, взяв его из оценки JEFF-3.1, а энерго-угловые распределения продуктов реакции позаимствовать из оценки, принятой в ENDF/B-VII b1.2 для диспрозия-160, внося в нее необходимые коррективы.

На рис. 7-10 сравниваются сечения основных реакций из перечисленных оценок. В случае сечения захвата приведены имеющиеся скудные экспериментальные данные. Важно отметить, что точка при 500 кэВ, появившаяся после выполнения оценки, прекрасно с ней согласуется.

На рис. 4-6 сравниваются сечения основных реакций из перечисленных оценок. В случае сечения захвата приведены имеющиеся скудные экспериментальные данные.

² Сравнительно долгоживущим ($T_{1/2}=24.4$ ч) является первое изомерное состояние.

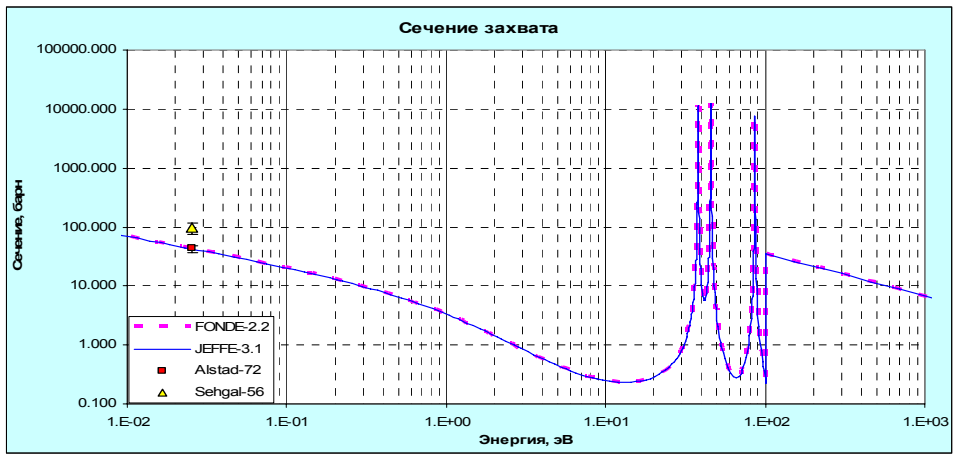


Рис.7а

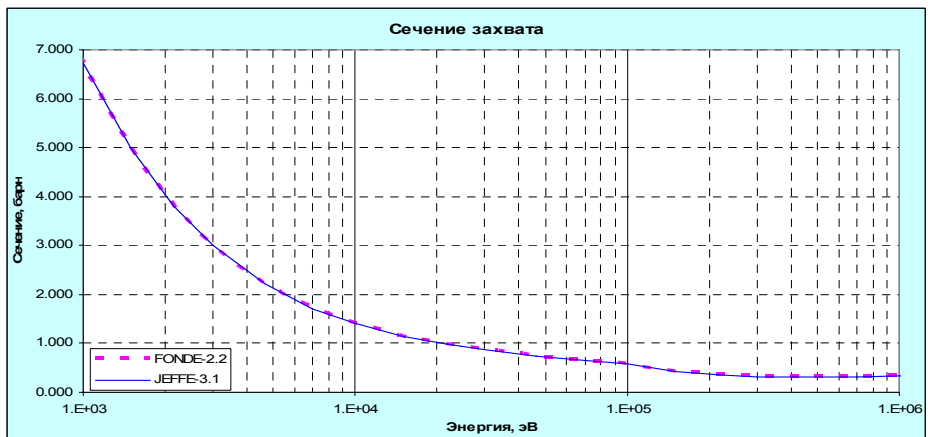


Рис.7б

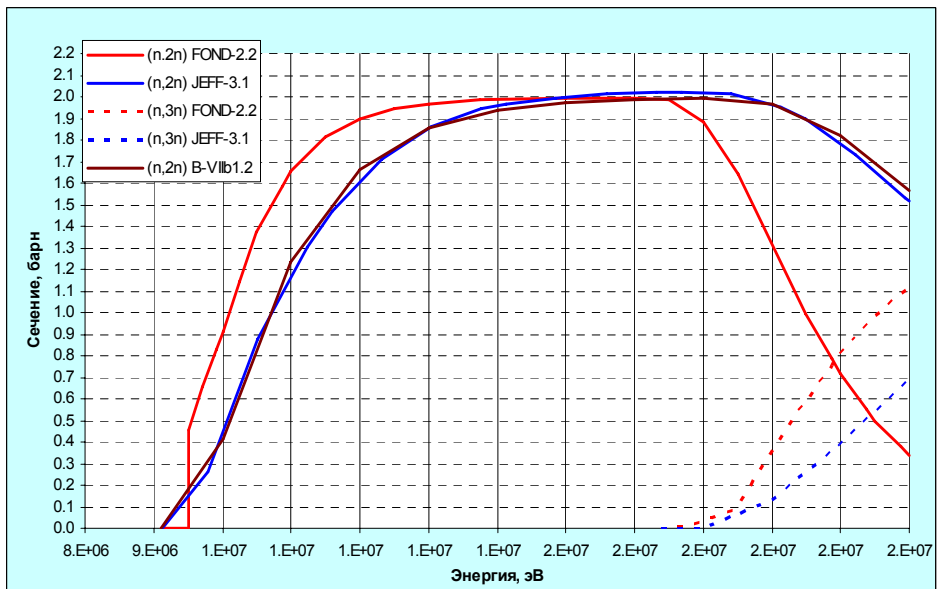


Рис.8

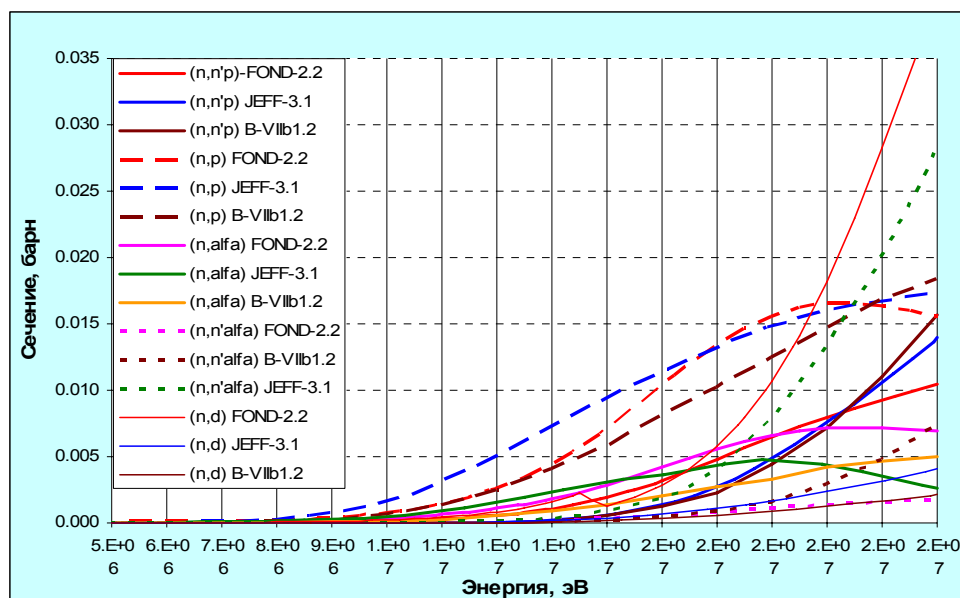


Рис.9

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2) с введением данных о сечении и энерго-угловых распределениях реакции $(n,3n)$, полученных указанным выше образом.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) | (n,p) | (n, α) |
|---------------------------------|---------------|---------------|-------------|--------------|--------|----------------|--------------|----------------|
| 0.0253 эВ | 49.60 | 6.53 | | | | 43.07 | | |
| | | | | | | 42.98 | | |
| Резонансный интеграл | 450.01 | 267.01 | 0.00 | | | 183.00 | | |
| | | | | | | 180.32 | | |
| Спектр деления ^{235}U | 6.94 | 4.45 | 2.35 | 0.003 | | 0.147 | 0.000 | 0.000 |
| | | | | 0.004 | 0.000 | 0.226 | | |
| 14 МэВ | 5.12 | 2.59 | 0.58 | 1.939 | | 0.001 | 0.006 | 0.001 |
| | | | | 1.985 | 0.000 | 0.001 | 0.007 | 0.003 |

Автор отбора данных
Николаев М.Н.

66.4. Диспрозий-159

Испытывает позитронный распад в ^{159}Tb (стабильный) с периодом $T_{1/2}=144.4$ дн.

В ФОНД-2.2 – J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation) – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

В последней оценке пересмотрены сечения всех реакций. Особенно велико изменение сечения радиационного захвата: при тепловой энергии оно возросло от 83.45 барн до 10368 барн (предположено наличие резонанса при 1 эВ – см. рис.10). Следует отметить, что увеличение сечения захвата происходило в 2 этапа: в версии библиотеки EAF-99 диспрозию-159 приписано сечение захвата, равное 8000 барн, но сечение, как и в предыдущей оценке, монотонно спадает с энергией. Характер различий в сечениях пороговых реакций при пересмотре оценки таков же, как и для предыдущих изотопов, и поэтому графики этих сечений для рассматриваемого радионуклида не приводятся.

Оценки содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

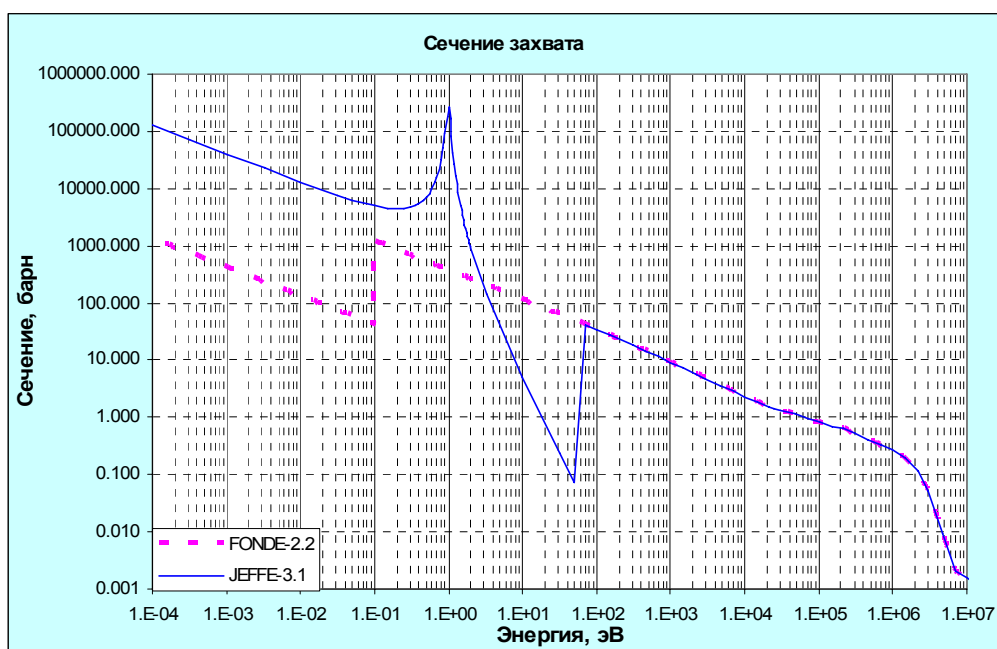


Рис.10.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (JEFF-3.1).
Файлы MF=8 и MF=10 исключены. Изомеры, сечения которых приведены в файле MF=10, имеют периоды полураспада менее суток. Суммарные сечения реакций (n,d), (n,n'p) и (n,n't), просуммированные по подсекциям файла MF=10, включены в файл MF=3. Сечение захвата тепловых нейтронов - 10368 барн.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

66.5. Диспрозий-160

Содержание в естественной смеси 2.34%.

В ФОНД-2.2 – оценка R.E.Schenter and F.Schmittroth, 1974 (JEF-2).

В JEFF-3.1 (Activation) – оценка, Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003.

В JEFF-3.1 и в ENDF/B-VI.7 – та же оценка R.E.Schenter and F.Schmittroth, частично пересмотренная R.Q. Wright, 1998. Область разрешенных резонансов распространена до 169 эВ (было – 20.5 эВ).

В ENDF/B-VII – оценка Lee,Oh,Mughabghab and Oblozinsky, 2003. Введены детальные данные об энерго-угловых распределениях продуктов нейтронных реакций. Область разрешенных резонансов распространена до 2008 эВ

В ENDF/B-VII.b1.2 - Kim,Herman,Oh,Oblozinsky, 2005. Введено описание реакций с вылетом заряженных частиц с возбуждением дискретных уровней ядра-продукта.

Оценка Форреста и др. содержит данные только о сечениях нейтронных реакций, однако набор этих реакций полон, в отличие от оценки Райта, в которой отсутствуют данные даже о сечениях реакций (n,2n) и (n,3n).

Оценка, принятая в ENDF/B-VII лишена недостатков предыдущих оценок: она достаточно полна как по номенклатуре описанных реакций, так и по номенклатуре представленных нейтронных данных. Энергетический ход сечений в ней описан максимально полно.

На рис. 11- 13 сравниваются сечения основных реакций из перечисленных оценок. В случае сечения захвата приведены и имеющиеся экспериментальные данные.

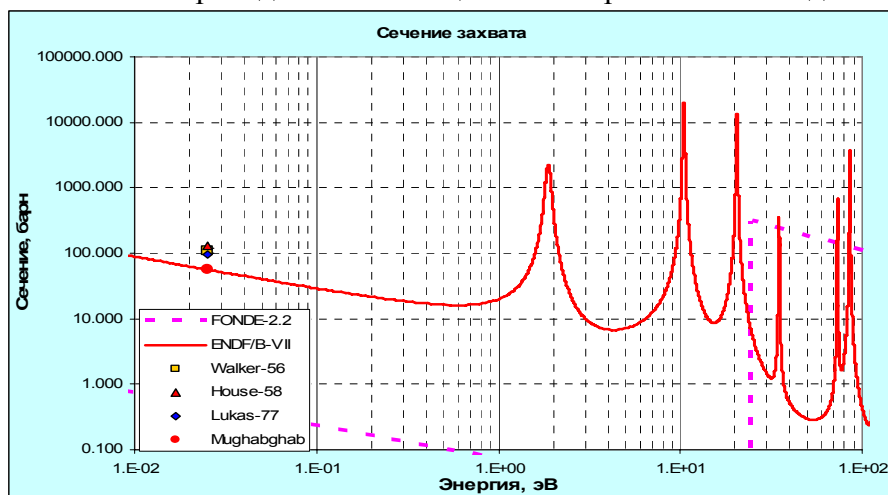


Рис.11а

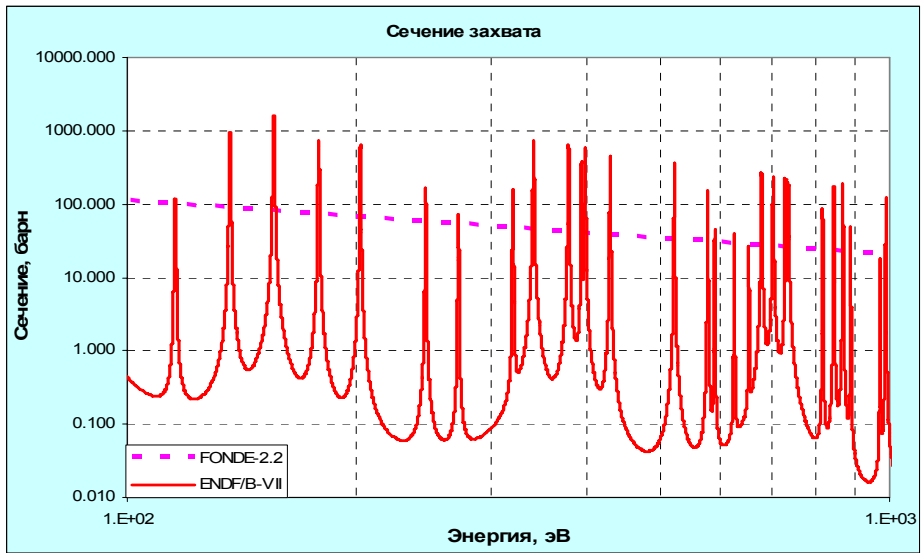


Рис.11б

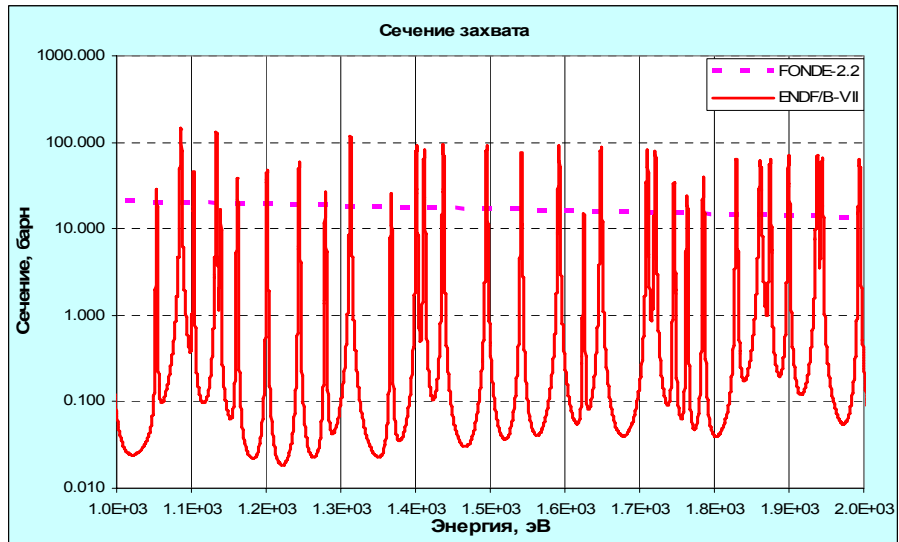


Рис.11в

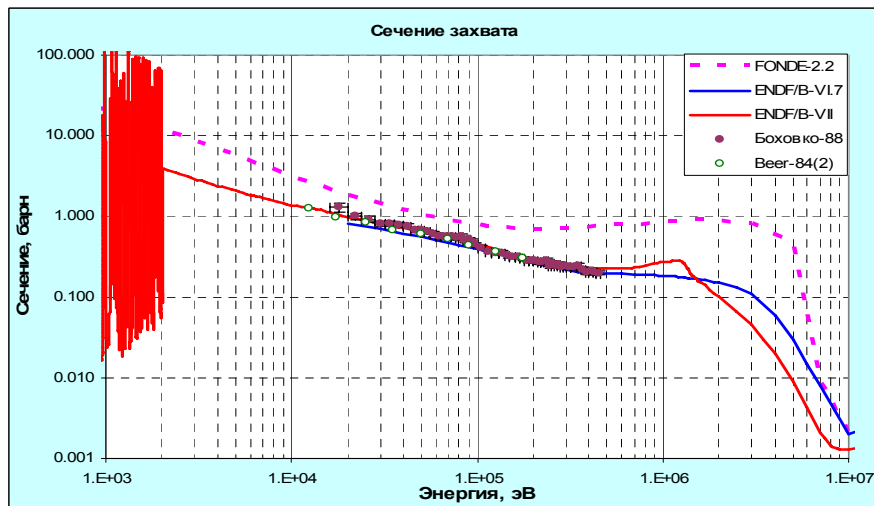


Рис.11д

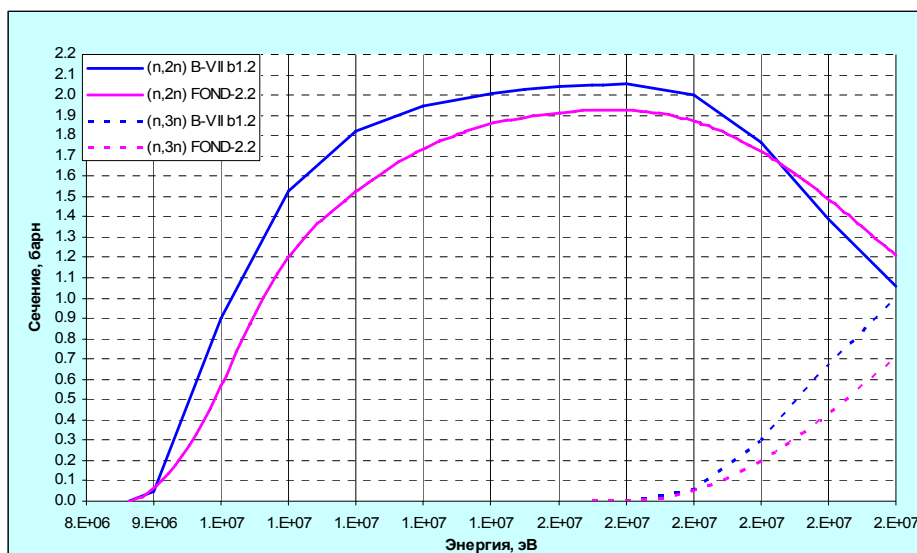


Рис.12

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Kim,Herман,Oh,Oblozinsky, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) | (n,p) | (n, α) |
|---------------------------------|---------------|--------------|-------------|--------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| 0.0253 эВ | 61.70 | 5.72 | | | | 55.98 | | |
| | 63.34 | 2.31 | | | | 61.02 | | |
| Резонансный интеграл | 1452.5 | 346.0 | | | | 1106.5 | | |
| | 2314.1 | 639.3 | .004 | | | 1674.8 | | |
| Спектр деления ²³⁵ U | 6.84 | 4.40 | 2.31 | 0.004 | 0.000 | 0.16 | 0.000 | 0.000 |
| | 6.46 | 4.66 | 1.02 | 0.003 | 0.000 | 0.77 | 0.000 | 0.000 |
| 14 МэВ | 5.29 | 2.79 | 0.47 | 2.01 | 0.000 | 0.001 | .006 | .003 |
| | 6.62 | 3.66 | 1.09 | 1.86 | 0.000 | 0.003 | .006 | 0.002 |

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

66.6. Диспрозий-161

Содержание в естественной смеси 18.9%.

В ФОНД-2.2 – оценка R.E.Schenter and F.Schmittroth, 1974 (JEF-2) с пересмотренными в 1999г. В.Н.Манохиным данными по сечениям реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$ и включением данных по реакциям (n,p) и (n,α) из ADL-3.

В JEFF-3.1 и в ENDF/B-VI.7 – та же оценка, частично пересмотренная R.Q. Wright, 1998. Область разрешенных резонансов распространена до 996 эВ (было – 676 эВ).

В ENDF/B-VII – оценка Lee,Oh,Mughabghab and Oblozinsky, 2003. Введены детальные данные об энерго-угловых распределениях продуктов нейтронных реакций.

В ENDF/B-VII.b1.2 - Kim,Herman,Oh,Oblozinsky, 2005. Введено описание реакций с вылетом заряженных частиц с возбуждением дискретных уровней ядра-продукта.

На рис. 11- 13 сравниваются сечения основных реакций из перечисленных оценок. В случае сечения захвата приведены и имеющиеся экспериментальные данные.

Как видно, наиболее существенным изменением является продление области разрешенных резонансов до 1 кэВ. Выше этой границы принятые сечения захвата надежно подтверждены экспериментальными данными.

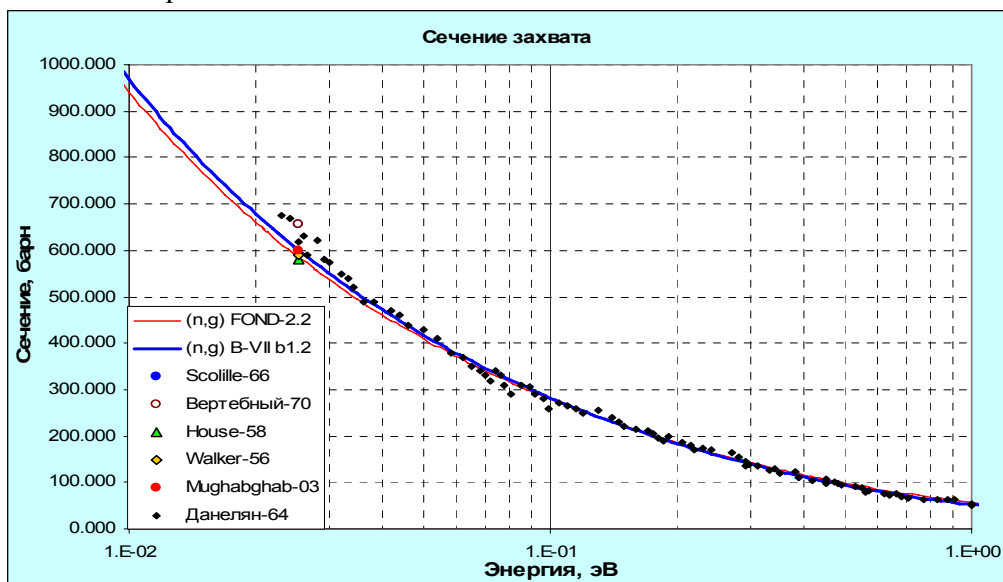


Рис.13а

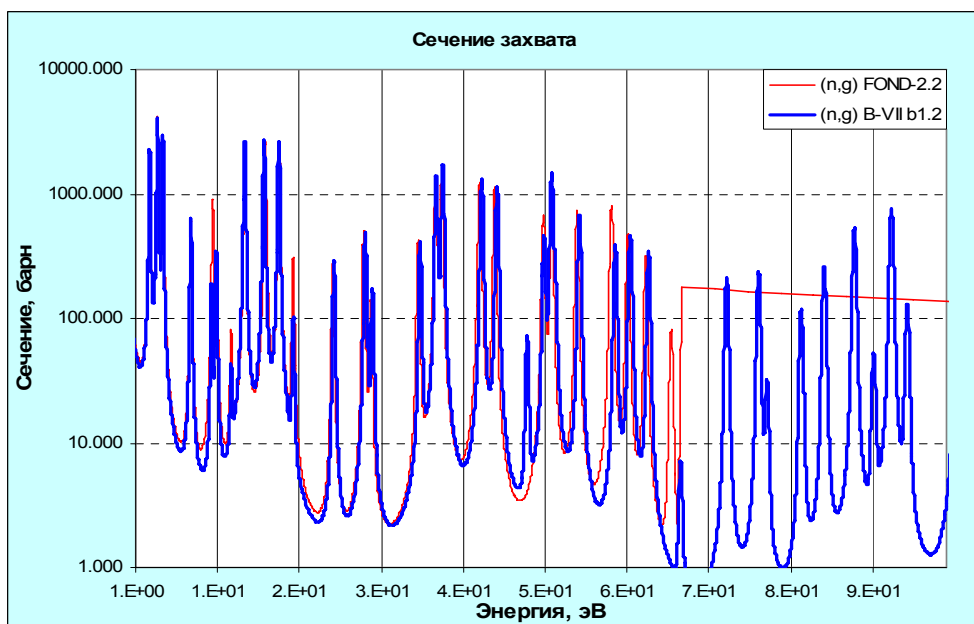


Рис.13б

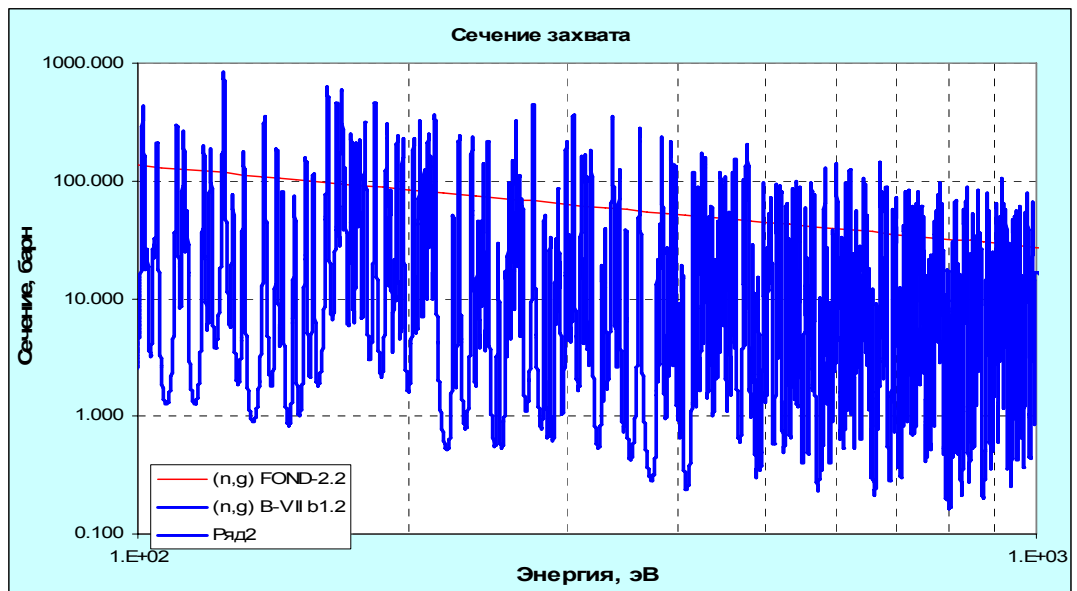


Рис.13в

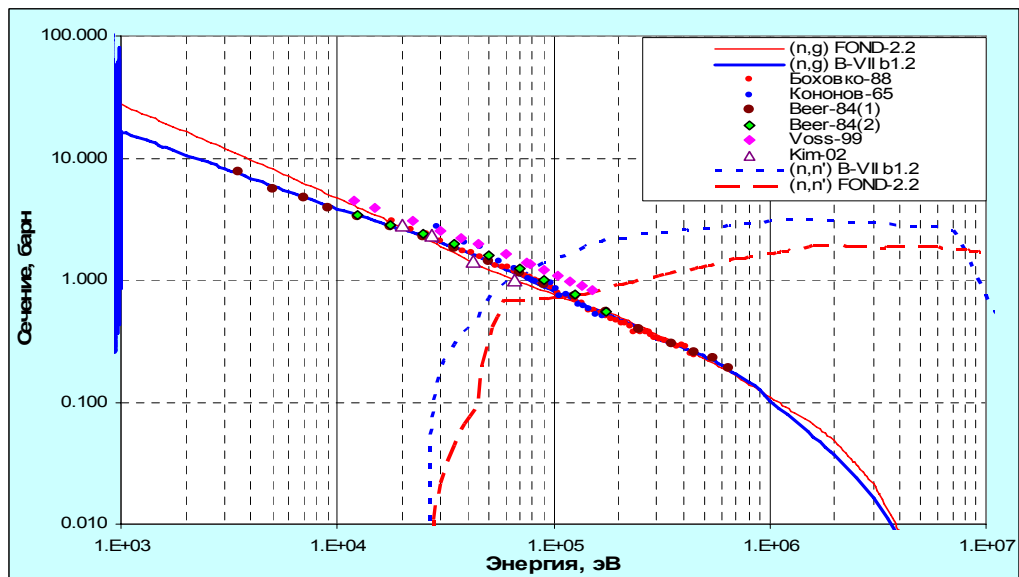


Рис.13г.

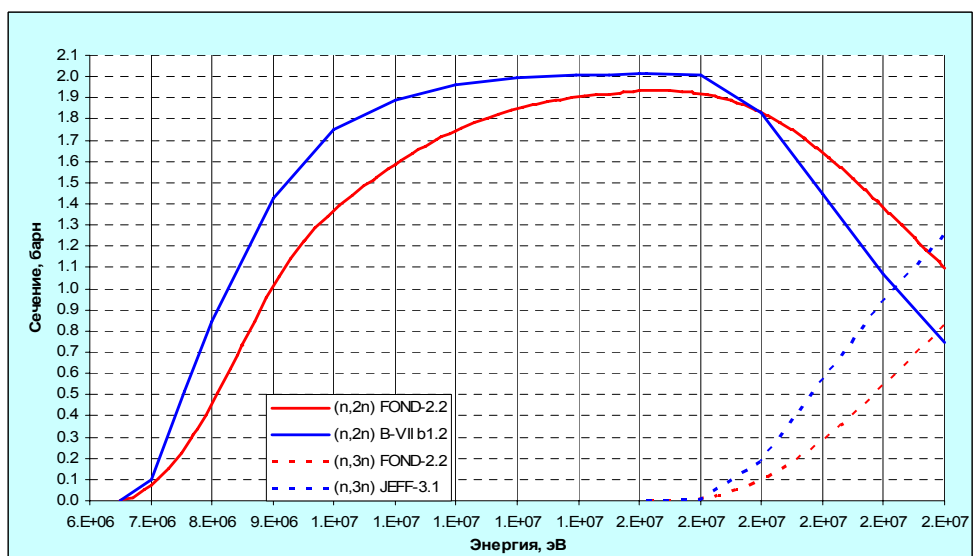


Рис.14

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Kim,Herman,Oh,Oblozinsky, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) | (n,p) | (n, α) |
|---------------------------------|----------------|---------------|-------------|-------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| 0.0253 эВ | 617.64 | 17.53 | | | | 600.11 | | |
| | 608.83 | 23.80 | | | | 585.02 | | |
| Резонансный интеграл | 1236.36 | 160.51 | 0.97 | | | 1074.87 | | |
| | 1556.54 | 340.09 | 0.49 | | | 1215.96 | | |
| Спектр деления ^{235}U | 7.11 | 4.13 | 2.84 | 0.01 | 0.000 | 0.120 | | |
| | 6.48 | 4.68 | 1.67 | 0.01 | 0.000 | 0.126 | | |
| 14 МэВ | 5.27 | 2.90 | 0.36 | 2.01 | 0.000 | 0.00 | 0.006 | 0.003 |
| | 6.67 | 3.28 | 1.47 | 1.90 | 0.000 | 0.003 | 0.004 | 0.002 |

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

66.7. Диспрозий-162

Содержание в естественной смеси 25.5%.

В ФОНД-2.2 – оценка R.E.Schenter and F.Schmittroth, 1974 (JEF-2) с пересмотренными в 1999г. В.Н.Манохиным данными по сечениям реакций (n,2n) и (n,3n) и включением данных по реакциям (n,p) и (n, α) из ADL-3.

В JEFF-3.1 и в ENDF/B-VI.7 – та же оценка, частично пересмотренная R.Q. Wright, 1998. Область разрешенных резонансов распространена до 1220 эВ (было – до 430 эВ)

В ENDF/B-VII – оценка Lee,Oh,Mughabghab and Oblozinsky, 2003, в которой даны детальные энерго-угловые распределения продуктов нейтронных реакций. Область разрешенных резонансов распространена до 4848 эВ.

В ENDF/B-VII.b1.2 - Kim,Herman,Oh,Oblozinsky, 2005, отличающаяся от предыдущей, главным образом, более детальным описанием спектров дискретных состояний ядер-продуктов.

На рис. 15- 16 сравниваются сечения основных реакций из основных оценок. В случае сечения захвата приведены и имеющиеся экспериментальные данные.

Как видно, наиболее существенным изменением является продление области разрешенных резонансов до 1 кэВ. Выше этой границы принятые сечения захвата надежно подтверждены экспериментальными данными.

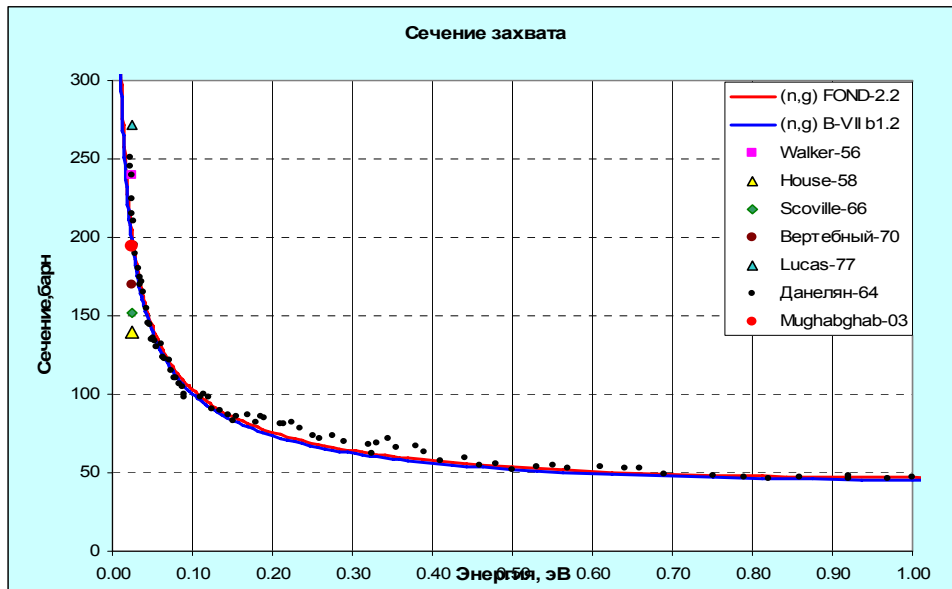


Рис.15а

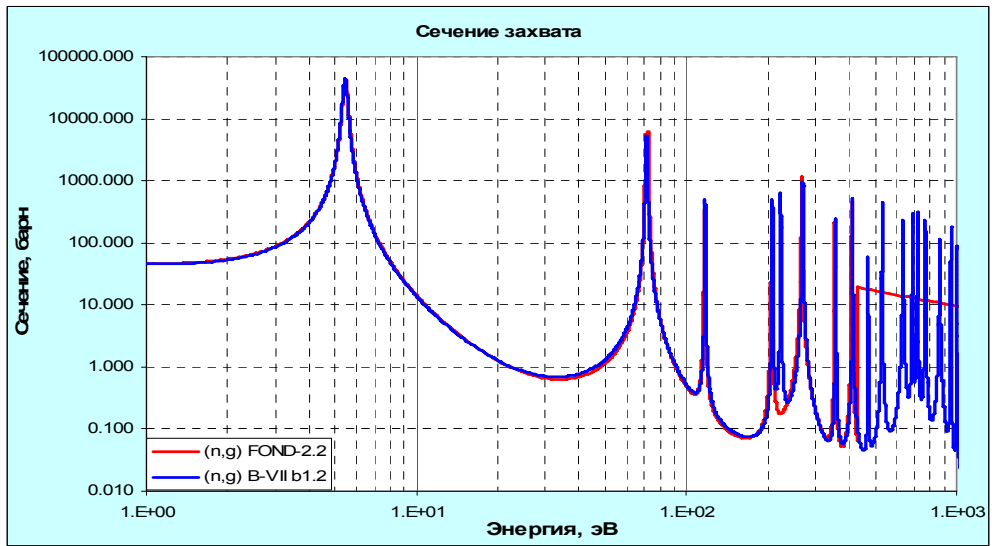


Рис.15б

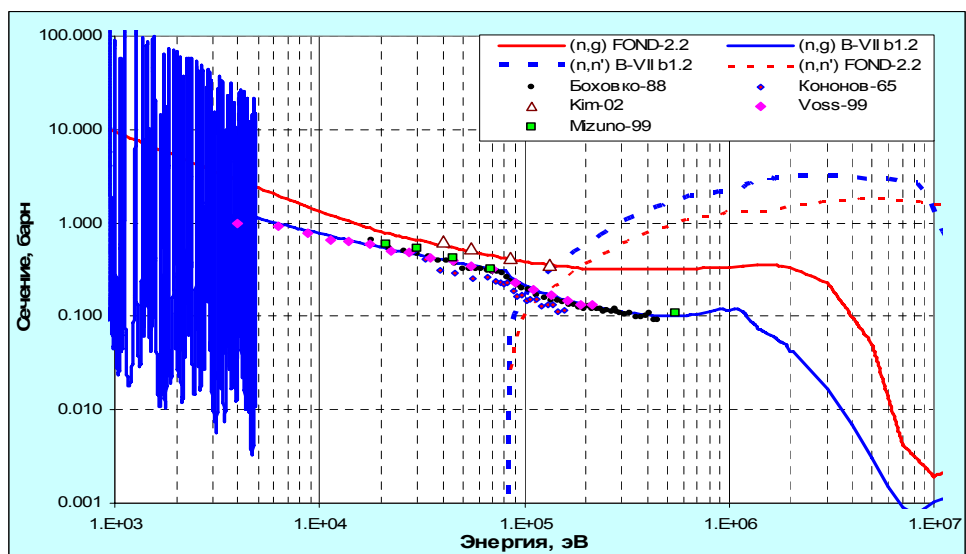


Рис.15в.

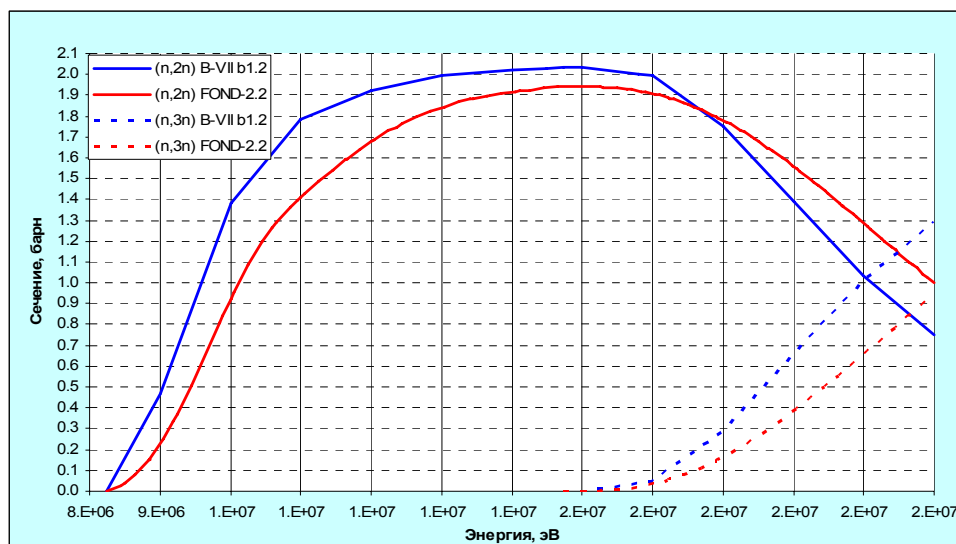


Рис.16
Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Kim, Herman, Oh, Oblozinsky, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) | (n,p) | (n, α) |
|---------------------------------|----------------|---------------|-------------|-------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| 0.0253 эВ | 199.39 | 0.23 | | | | 199.16 | | |
| | 194.11 | 0.17 | | | | 193.94 | | |
| Резонансный интеграл | 3477.96 | 693.77 | 0.01 | | | 2784.18 | | |
| | 3519.26 | 763.02 | 0.02 | | | 2756.22 | | |
| Спектр деления ^{235}U | 6.49 | 4.86 | 1.35 | 0.00 | 0.000 | 0.279 | 0.000 | 0.000 |
| | 7.04 | 4.46 | 2.50 | 0.01 | 0.000 | 0.069 | 0.000 | 0.000 |
| 14 МэВ | 6.68 | 3.33 | 1.43 | 1.91 | 0.000 | 0.003 | 0.003 | 0.001 |
| | 5.31 | 2.82 | 0.47 | 2.02 | 0.000 | 0.001 | 0.003 | 0.001 |

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

66.8. Диспрозий-163

Содержание в естественной смеси 24.9%.

В ФОНД-2.2 – оценка R.E.Schenter and F.Schmittroth, 1974 (JEF-2) с пересмотренными в 1999г. В.Н.Манохиным данными по сечениям реакций (n,2n) и (n,3n) и включением данных по реакциям (n,p) и (n, α) из ADL-3.

В JEFF-3.1 и в ENDF/B-VI.7 – та же оценка, частично пересмотренная R.Q. Wright, 1998. Область разрешенных резонансов расширена до 1000 эВ (ранее – до 487.6 эВ). Как и в предыдущей оценке, энергия первого возбужденного состояния ^{163}Dy принята равной 25 кэВ (как у ^{161}Dy)

В ENDF/B-VII – оценка Lee,Oh,Mughabghab and Oblozinsky, 2003, в которой даны детальные энерго-угловые распределения продуктов нейтронных реакций. Энергии первого уровня присвоено правильное значение -73.44 кэВ.

В ENDF/B-VII.b1.2 - Kim,Herman,Oh,Oblozinsky, 2005, отличающаяся от предыдущей, главным образом, более детальным описанием спектров дискретных состояний ядер-продуктов.

На рис. 17- 18 сравниваются сечения основных реакций из основных оценок. В случае сечения захвата приведены и имеющиеся экспериментальные данные.

Как видно из рис. 17, наиболее существенным изменением является продление области разрешенных резонансов до 1 кэВ. Выше этой границы принятые сечения захвата надежно подтверждены экспериментальными данными.

Рис. 18 показывает влияние уточнения энергии первого уровня ^{163}Dy .

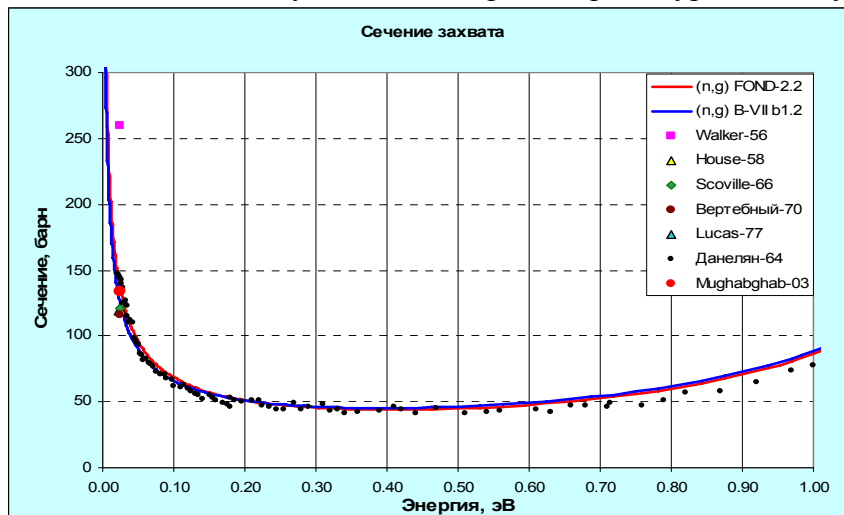


Рис.17а

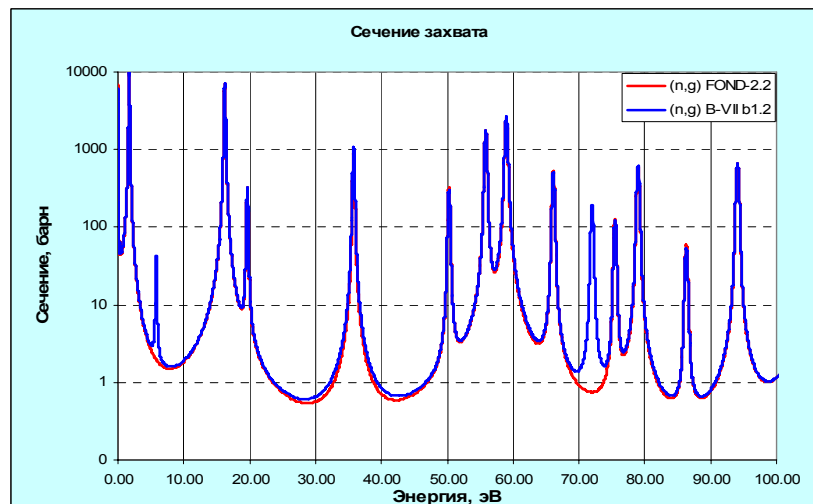


Рис.17б

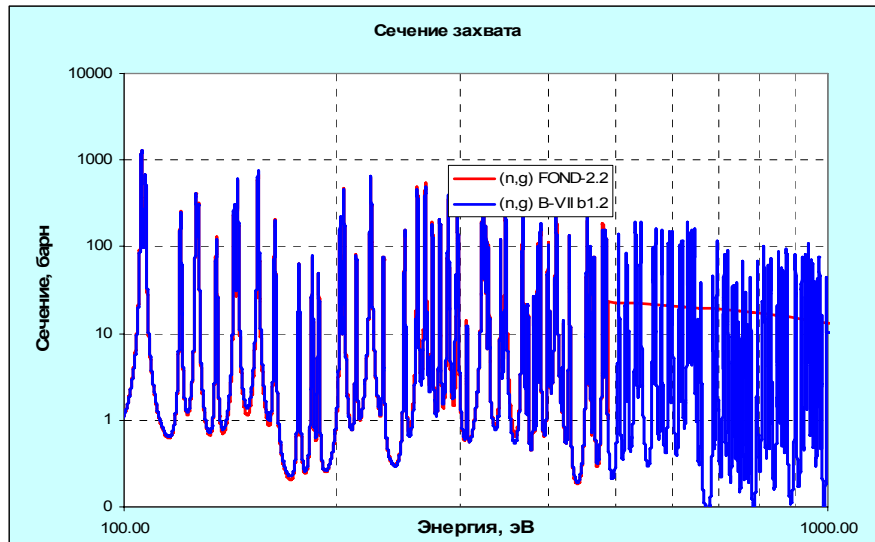


Рис.17в

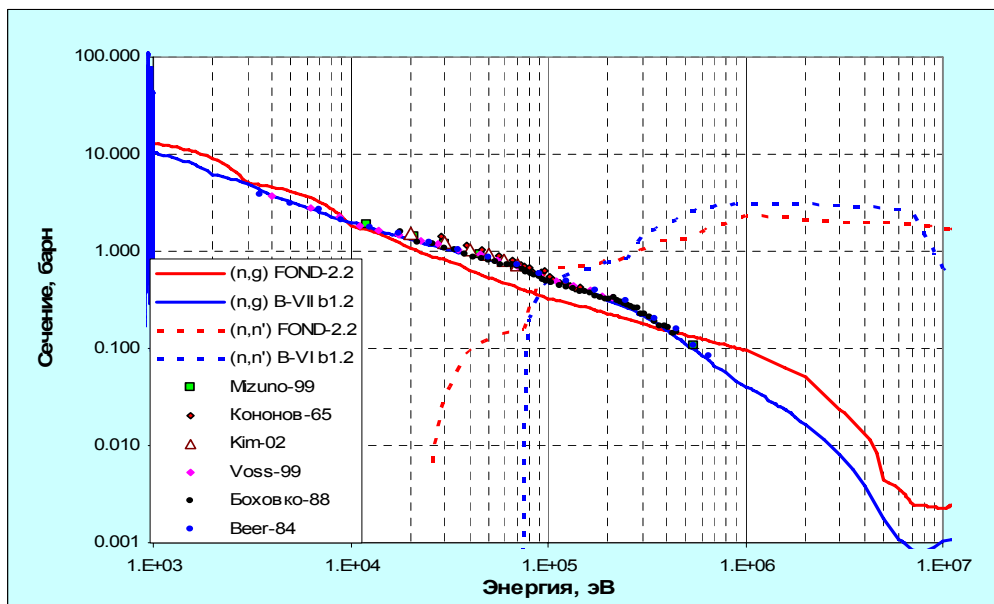


Рис.17г.

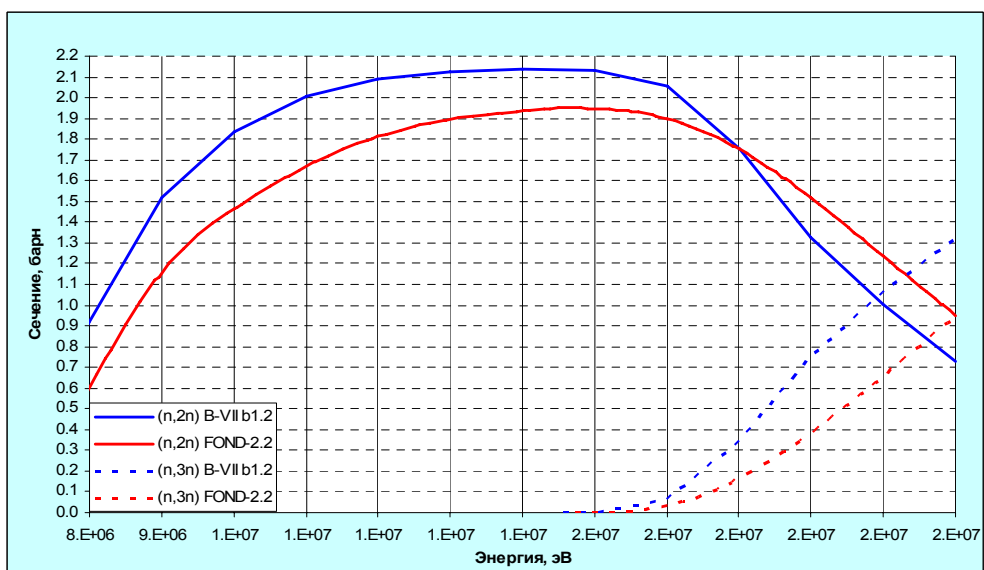


Рис.18

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Kim, Herman, Oh, Oblozinsky, 2005 (ENDF/B-VII b1.2).

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) | (n,p) | (n, α) |
|---------------------------------|----------------|---------------|-------------|--------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| 0.0253 эВ | 126.68 | 3.28 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 123.41 | 0.000 | 0.000 |
| | 136.74 | 2.33 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 134.40 | 0.000 | 0.000 |
| Резонансный интеграл | 1719.65 | 231.10 | 0.09 | 0.000 | 0.000 | 1488.47 | 0.000 | 0.000 |
| | 1793.11 | 323.02 | 0.22 | 0.000 | 0.000 | 1469.87 | 0.000 | 0.000 |
| Спектр деления ²³⁵ U | 7.09 | 4.27 | 2.74 | 0.018 | 0.000 | 0.064 | 0.000 | 0.000 |
| | 6.54 | 4.55 | 1.90 | 0.012 | 0.000 | 0.083 | 0.000 | 0.000 |
| 14 МэВ | 5.33 | 2.93 | 0.36 | 2.03 | 0.000 | 0.001 | 0.003 | 0.002 |
| | 6.70 | 3.23 | 1.53 | 1.93 | 0.000 | 0.003 | 0.003 | 0.002 |

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

66.9. Диспрозий-164

Содержание в естественной смеси 28.2%.

В ФОНД-2.2 – оценка R.B.Leonard and R.B.Stewart, 1967 (JEF-2=ENDF/B-IV) с пересмотренными в 1999г. В.Н.Манохиным данными по сечениям реакций (n,2n) и (n,3n) и включением данных по реакциям (n,p) и (n, α) из ADL-3. Область разрешенных резонансов включала параметры только двух резонансов и простиралась от 2.23 эВ до 273 эВ.

В JEFF-3.1 и в ENDF/B-VI.7 – та же оценка, основательно пересмотренная R.Q. Wright, 1998. Область разрешенных резонансов расширена до 19 кэВ и включает данные для 114 резонансов, рекомендованных Мухабхабом. Область неразрешенных резонансов простирается до 50 кэВ.

В ENDF/B-VII – оценка Lee, Oh, Mughabghab and Oblozinsky, 2003, в которой даны детальные энерго-угловые распределения продуктов нейтронных реакций. Область разрешенных резонансов сужена: ее граница 7 кэВ. Область неразрешенных резонансов расширена до 73 кэВ т.е. до порога неупругого рассеяния.

В ENDF/B-VII.b1.2 - Kim, Herman, Oh, Oblozinsky, 2005, отличающаяся от предыдущей, главным образом, более детальным описанием спектров дискретных состояний ядер-продуктов.

Учитывая, что автором последних оценок являлся сам Мухабхаб, можно полагать, основания для ограничения области разрешенных резонансов имелись. В самом деле, в последней оценке в области разрешенных резонансов лежит 42 s-резонанса и 28 p-резонансов (с максимальной энергией 4.916 кэВ) – практически столько же, сколько и в предыдущей оценке в этой области энергий. В интервале от 4.9 до 7 кэВ p-резонансы не разрешены. В интервале от 7 до 21 кэВ в оценкт Райта лежит почти столько же s-резонансов, сколько и до 7 кэВ (p-резонансы, естественно, отсутствуют). Таким образом в этом интервале пропущены не только все p-резонансы, но и, по крайней мере, половина s-резонансов. Целесообразность описания сечений в этом интервале средними резонансными параметрами очевидна.

На рис. 19- 20 сравниваются сечения основных реакций из основных оценок. В случае сечения захвата приведены и имеющиеся экспериментальные данные.

Как видно из рис. 19в, наиболее существенным изменением является продление области разрешенных резонансов до 7 кэВ. Выше этой границы принятые сечения захвата находят подтверждение в новейших экспериментальных данных.

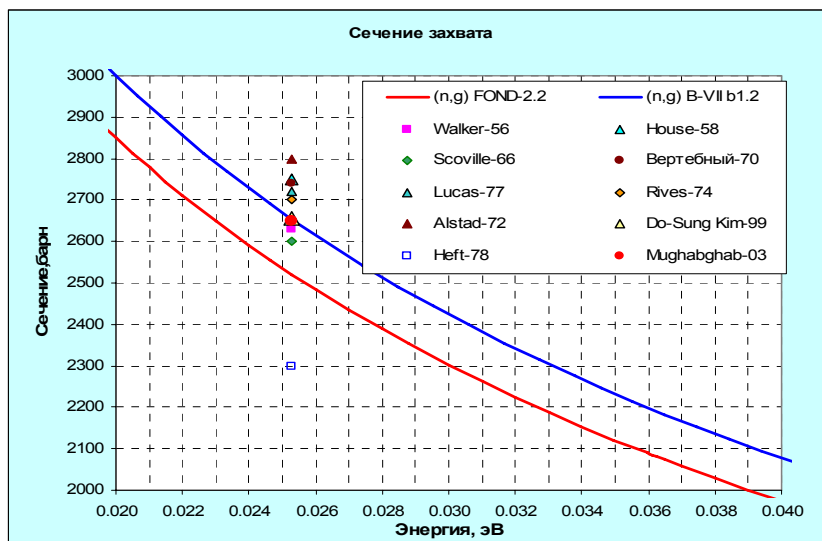


Рис.19а

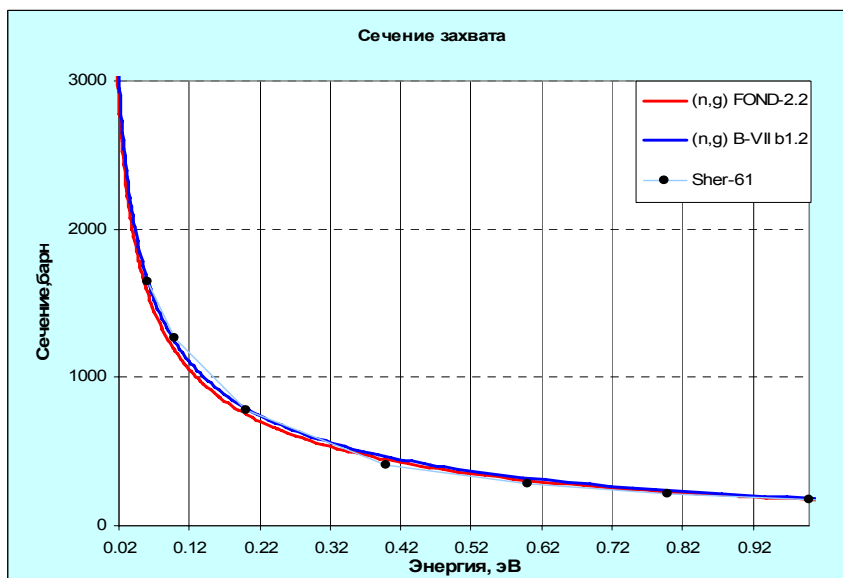


Рис.19б

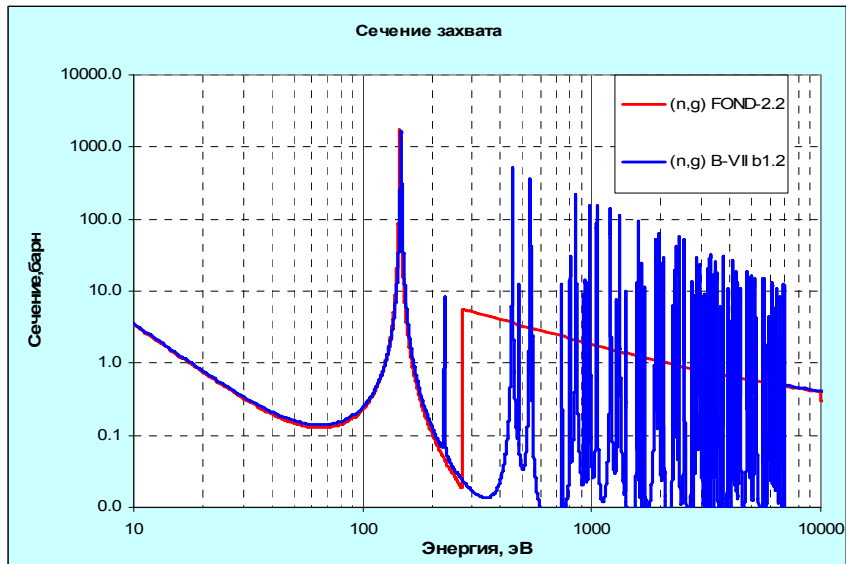


Рис.17в

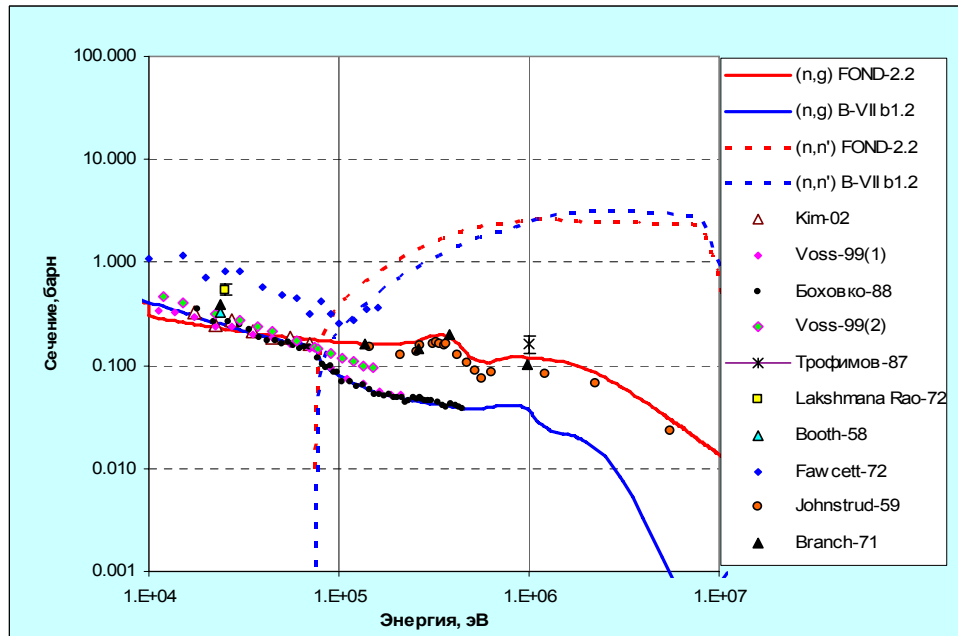


Рис.19г.

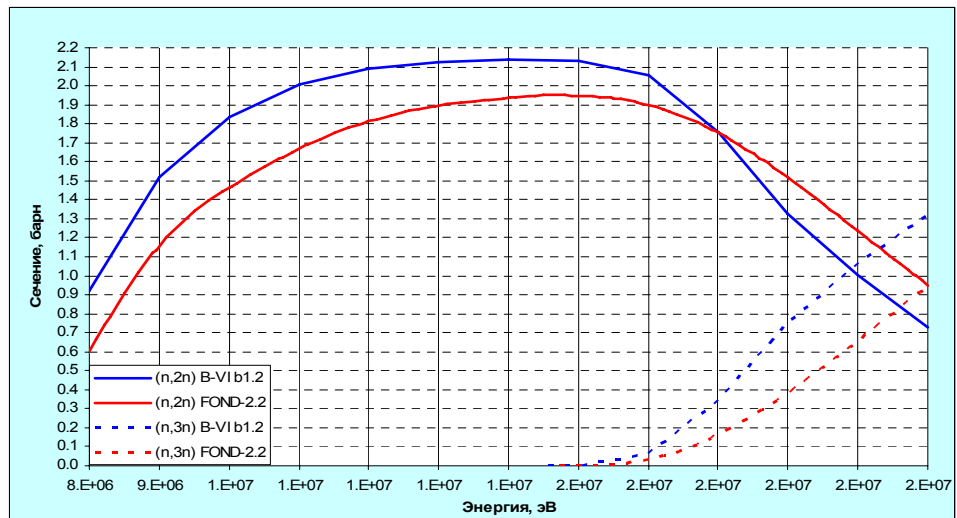


Рис.20

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Kim, Негман, Oh, Oblozinsky, 2005 (ENDF/B-VII b1.2).

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) | (n,p) | (n, α) |
|---------------------------------|----------------|---------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| 0.0253 эВ | 2981.17 | 328.36 | | | | 2652.80 | | |
| | 2909.57 | 390.04 | | | | 2519.53 | | |
| Резонансный интеграл | 889.93 | 547.00 | 0.038 | | | 342.89 | | |
| | 994.89 | 666.61 | 0.069 | | | 328.21 | | |
| Спектр деления ²³⁵ U | 7.08 | 4.51 | 2.54 | 0.008 | 0.000 | 0.025 | 0.000 | 0.000 |
| | 6.75 | 4.34 | 2.30 | 0.006 | 0.000 | 0.099 | 0.000 | 0.000 |
| 14 МэВ | 5.32 | 2.81 | 0.48 | 2.029 | 0.000 | 0.001 | 0.002 | 0.001 |
| | 5.26 | 3.25 | 0.040 | 1.956 | 0.000 | 0.009 | 0.002 | 0.001 |

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

66.10. Диспрозий-165

Короткоживущий изотоп: испытывает бета-распад в стабильный гольмий-165 ($T_{1/2}=2.35$ ч.). Поскольку этот изотоп нарабатывается в результате поглощения нейтронов в диспрозии-164 и обладает весьма высоким сечением поглощения тепловых нейтронов, нейтронные данные для него включены в РОСФОНД.

В ФОНД-2.2 содержалась оценка Копецкого и Ниеропа из EAF=3.

В JEFF-3.1 содержится оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning (EAF-2003).

Основное отличие последней оценки состоит в введении низколежащего резонанса, резко увеличившего резонансный интеграл (с 1277 барн до 20181 барна). При этом сечение захвата нейтронов с энергией 0.0253 эВ практически сохранилось (с 3600 барн снизилось до 3573 барн). Изменения иллюстрируются нижеследующим рисунком.

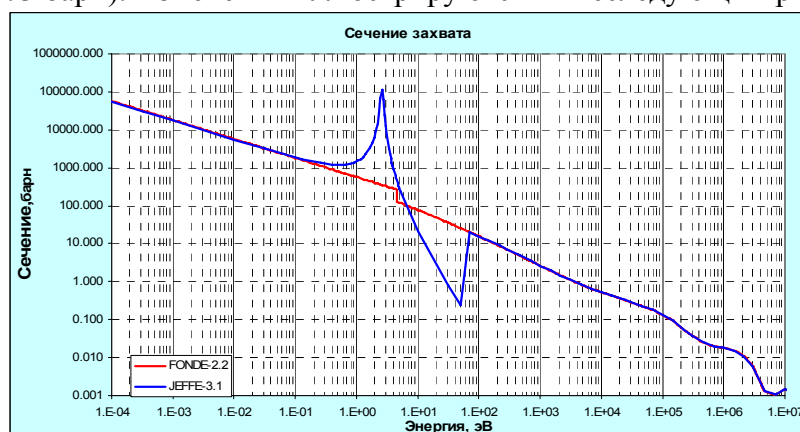


Рис.21

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning (JEFF-3.1=EAF-2003).

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

66.11. Диспрозий-166

^{166}Dy испытывает бета-распад ($T_{1/2}=81.5$ ч.) в основное состояние гольмия-166 ($T_{1/2}=26.80$ ч.; распадается в стабильный эрбий-166).

В ФОНД-2.2 содержится оценка Копецкого и Ниеропа из EAF=3.

В JEFF-3.1 содержится оценка Forrest, Кореcky, Sublet, Koning (EAF-2003).

Наиболее существенным изменением является перенос данных о сечении реакции $(n,2n)$ в файл MF=10, где даны сечения образования диспрозия-165 в основном и в метастабильном ($T_{1/2}=1.5$ мин.) состояниях. Поскольку образующийся изомер слишком короткоживущий, данные следует снова перенести в файл MF=3 и в таком виде включать его в РОСФОНД.

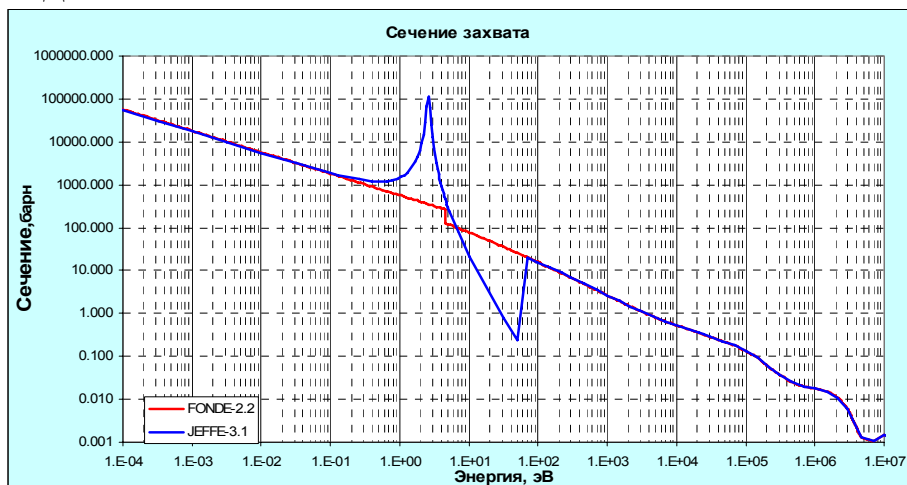


Рис.21

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Копецкого и Ниеропа (EAF-2003) с включением сечения реакции $(n,2n)$ в файл MF=3 и с исключением файлов MF=8 и MF=10. Материалу присвоен МАТ=6666.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

66.12. Диспрозий природный

Включать в РОСФОНД файл данных для натурального диспрозия не предполагается. Задача настоящего параграфа состоит в валидации принятых в РОСФОНД оцененных нейтронных данных для стабильных изотопов диспрозия путем сравнения следующих из этих оценок нейтронных сечений для натурального диспрозия с результатами непосредственных измерений.

С этой целью на основе оцененных нейтронных данных, принятых в РОСФОНД, были рассчитаны 299-групповые константы для каждого стабильного изотопа, которые затем были свернуты с весом концентраций изотопов в естественной смеси в 299-групповые константы для природного диспрозия. Полученные таким образом 299-групповые сечения ниже сравниваются с имеющимися для природного диспрозия экспериментальными данными.

Полное сечение

На рис. 22 сравниваются с экспериментальными данными оцененные полные сечения натурального диспрозия.

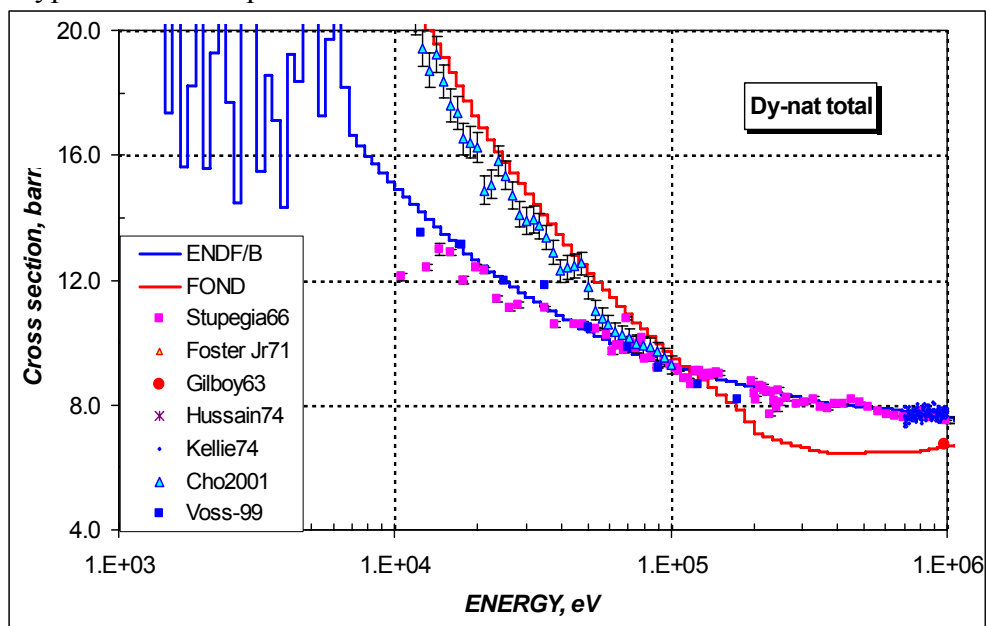


Рис.22а. Полное сечение натурального диспрозия

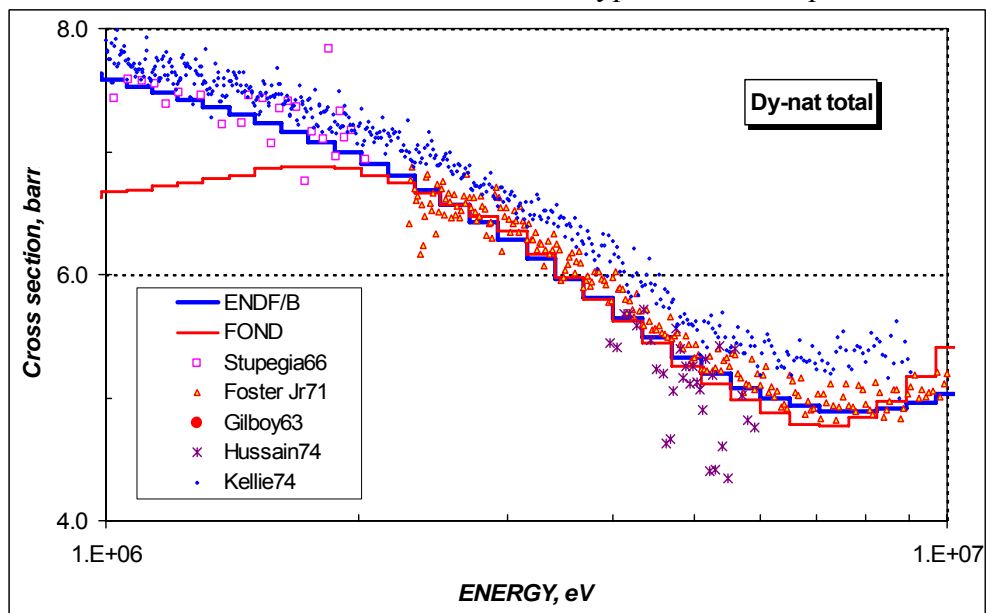


Рис.22б. Полное сечение натурального диспрозия

Обращает на себя внимание существенное различие прежней и новой оценок при энергиях ниже 2 МэВ. В интервале от 0.1МэВ до 2 МэВ прежняя оценка противоречит согласующимся друг с другом экспериментальным данным Stupregia (1966) и Kellie (1974), тогда как новая неплохо с ними согласуется. Однако в области 10-100 кэВ. Имеющиеся экспериментальные данные противоречивы: новая оценка в этой области опирается на данные Stupregia, согласующимися с более поздними данными Voss³ (1975), тогда как прежняя оценка подтверждается данными Cho (2001), полученными много позже выполнения оценки.

Вклады различных изотопов в полное сечение в интервале 10 – 100 кэВ практически не зависят от энергии и составляют:

- ^{164}Dy – 28%;
- ^{163}Dy – 25%;
- ^{162}Dy – 26%;
- ^{161}Dy 18%
- ^{160}Dy , ^{158}Dy и ^{156}Dy в сумме – 3%.

Как видим, эти вклады близки друг к другу для всех изотопов, кроме легчайших. Поскольку при выборе оценок для РОСФОНДа на полные сечения изотопов в этой области энергий внимания не обращалось, сравним принятые для основных изотопов полные сечения с имеющимися для них экспериментальными данными на групповом уровне.

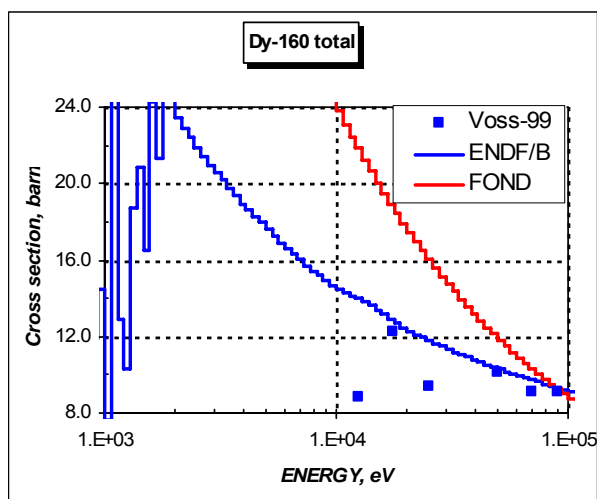


Рис.23а. Полное сечение диспрозия-160

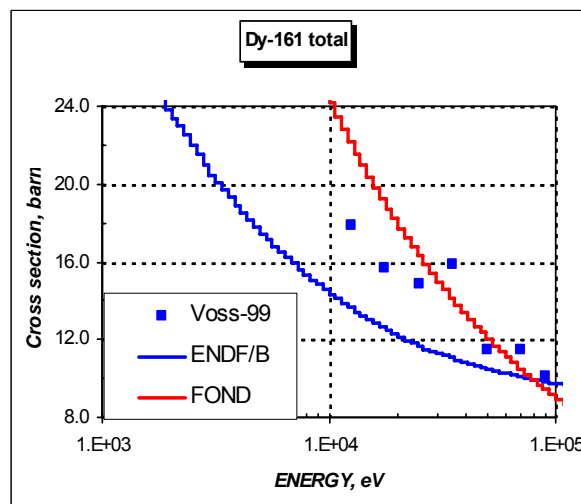


Рис.23б. Полное сечение диспрозия-161

³ Приведенные на рис. 22 данные Voss'a получены путем суммирования измеренных в этой работе полных сечений всех стабильных изотопов.

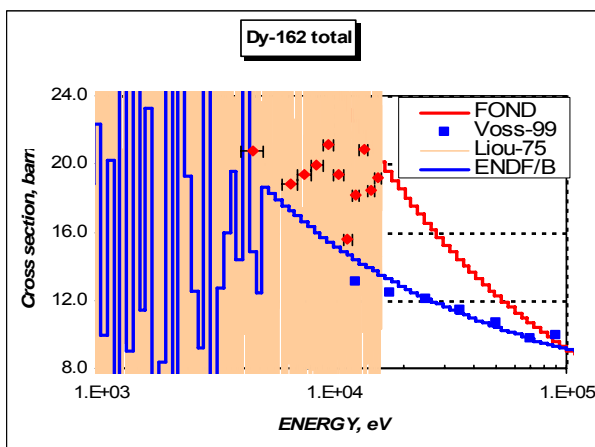


Рис.23в. Полное сечение диспрозия-162

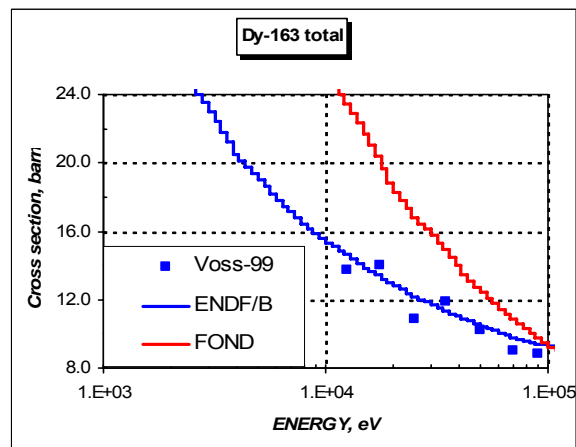


Рис.23г. Полное сечение диспрозия-163

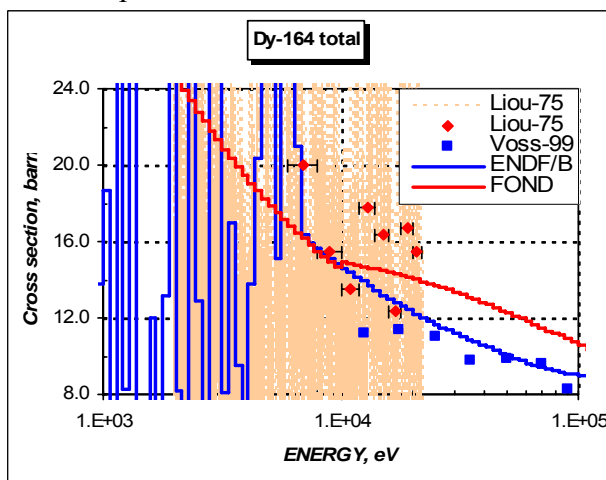


Рис. 23д. Полное сечение диспрозия-160.

Как видно из приведенных рисунков, принятые в РОСФОНД оцененные данные по полным сечениям изотопов, в целом, подтверждаются результатами измерений Voss (1999). Наибольшее расхождение с результатами этого эксперимента наблюдается для ^{161}Dy , где оно при 10 кэВ достигает 4 барн. Поскольку вклад этого изотопа в полное сечение составляет всего 18%, устранение этого расхождения путем переоценки полного сечения ^{161}Dy , не устранит расхождение между оцененными данными для полного сечения природного диспрозия и результатами Cho.

Для ^{162}Dy и ^{164}Dy в рассматриваемой области энергий имеются также детальные данные Liou (1975), которые на рис.24 изображены как тонкими линиями, так и точками, полученными путем усреднения измерений с высоким разрешением по интервалам, отмеченным на этих точках. Результаты Liou лежат примерно, на 3 барна выше оцененных кривых (вблизи 10 кэВ). Согласование оцененных данных с этими результатами приблизит оцененные значения полного сечения к данным Cho, но расхождение все равно окажется очень большим.

Констатируя наличие противоречий в экспериментальных данных по полному сечению диспрозия, мы, однако, не находим очевидных резонансов для пересмотра принятых оценок полных сечений изотопов.

Сечение радиационного захвата

В следующей таблице сравниваются сечения захвата тепловых нейтронов и резонансные интегралы по оценкам ФОНД-2.2 и ENDF/B-VII со значениями, рекомендованными Мухабхабом в 2003 г.

| Оценка | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ}), \text{ барн}$ | $RI_c, \text{ барн}$ |
|--------|---|----------------------|
|--------|---|----------------------|

| | | |
|-------------------|---------------|-----------------|
| ФОНД-2.2 | 906.8 | 1437.5 |
| ENDF/B-VII | 943.0 | 1399.2 |
| Mughabghab | 943±15 | 1480±100 |

Как видно, новая оценка значительно лучше согласуется с рекомендуемым Мухабхабом сечением захвата тепловых нейтронов; расхождение в резонансных интегралах хотя и возросло, но не вышло за пределы экспериментальной погрешности.

На рис. 24 оцененное сечение радиационного захвата сравнивается с имеющимися для природного диспрозия экспериментальными данными. Приведенные на рисунке данные Voss (1975) получены путем сложения вкладов для изотопов, для которых проводились измерения. Данные для ^{161}Dy в EXFOR представлены для иного энергетического разбиения и при оценке вклада этого изотопа в сечение захвата для естественной смеси, они переносились на более детальную энергетическую сетку, для которой имелись данные для других изотопов.

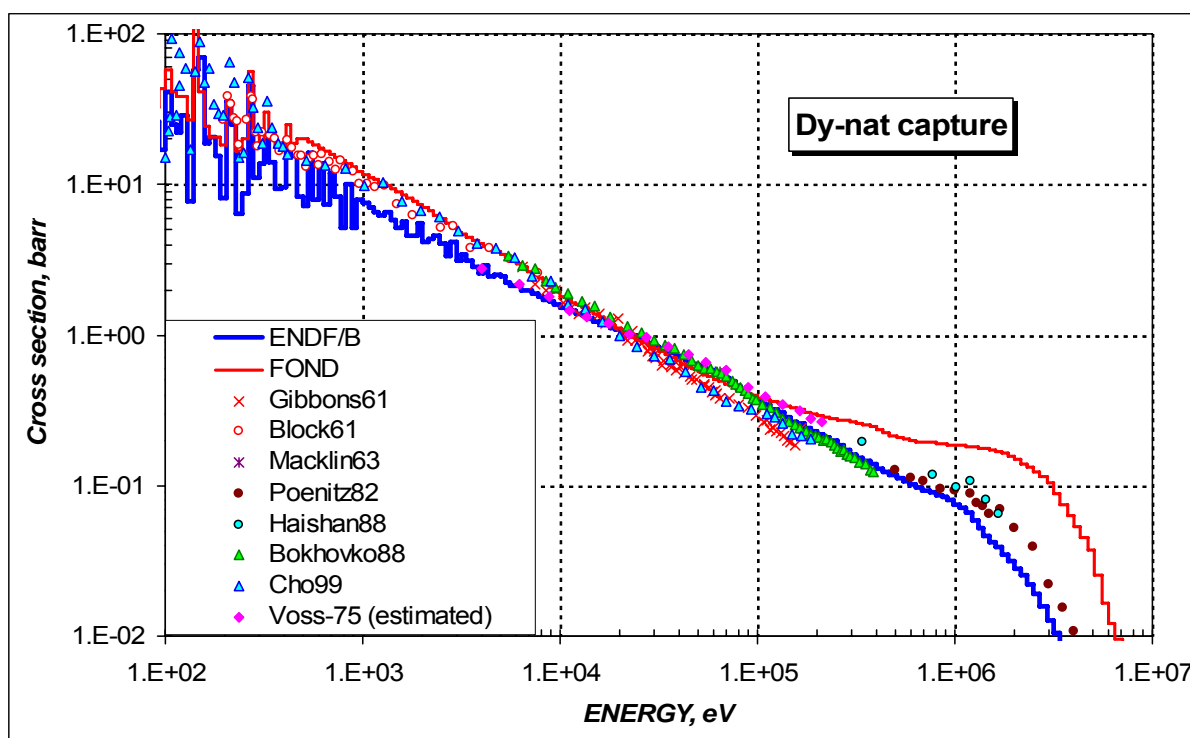


Рис.24. Сечение захвата для природного диспрозия.

Как видно, между оценками и поддерживающими их экспериментальными данными имеются существенные расхождения: в области нескольких кэВ данные отличаются примерно вдвое. Вклады изотопов в полное сечение захвата в области от 1 до 100 кэВ слабо зависят от энергии и составляют:

- ^{164}Dy – 7%;
- ^{163}Dy – 35%;
- ^{162}Dy – 9%;
- ^{161}Dy 47%
- ^{160}Dy , ^{158}Dy и ^{156}Dy в сумме – 2%.

Таким образом, объяснить двукратное расхождение можно лишь неточностями в оценке сечений четных изотопов.

Из рис. 13г. следует, что принятое в РОСФОНД сечение захвата для ^{161}Dy может быть увеличено в окрестности десяти кэВ, примерно, на 30%, если при оценке опереться только на данные Voss'a (1999), не приняв во внимание все остальные экспериментальные результаты. Это приведет к увеличению сечения захвата природного диспрозия при 10 кэВ лишь на 10% и никак не объяснит отмеченное выше расхождение.

Из рис. 17 г видно, что разброс экспериментальных данных для ^{163}Dy в области десятков кэВ не превышает 10%. В окрестности 10 кэВ данные двух имеющихся в этой области работ Mizuno, Voss'a и Beer'a согласуются даже лучше. Таким образом, существенно повысить принятые сечения захвата в этой энергетической области для этого изотопа невозможно, не приходя в противоречие со всей совокупностью имеющихся для него экспериментальных данных.

Рис. 19г показывает, что в случае ^{164}Dy разброс экспериментальных данных весьма велик, и при 10 кэВ сечение можно было бы увеличить в 2.7раза, если опереться целиком на данные Fawcett'a (1972), существенно превосходящие все остальные. Однако, поскольку вклад этого изотопа в сечение природного диспрозия мал, даже такое экстремальное решение не устранил наблюдающегося при 10 кэВ расхождения между данными Боховко(1988) и Voss'a, отличающимися в интервале 9 -11 кэВ от 60 до 30%.

Проведенное рассмотрение показывает лишь наличие значительных противоречий в экспериментальных данных по сечению захвата изотопов диспрозия и их естественной смеси, но не позволяет отдать определенное предпочтение ни данным об относительно высоком сечении захвата, ни принятым при оценке результатам, из которых следует принятое, значительно более низкое сечение захвата.

Сечение неупругого рассеяния

Экспериментальных данных о сечении неупругого рассеяния на изотопах диспрозия не имеется. Что касается природного диспрозия, то для него в базе данных УЧАЩК содержатся результаты единственного эксперимента, с которыми на рис.25 проводится сравнение оцененных данных. Преимущества оценки ENDF/B, отобранной в РОСФОНД, очевидны.

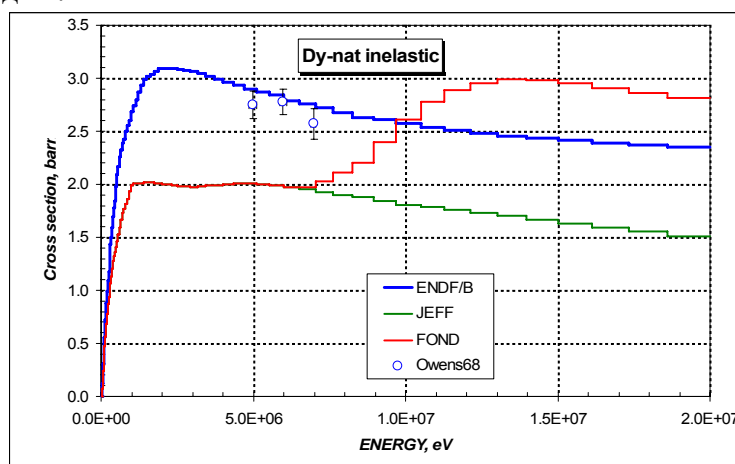


Рис.25. Сечение неупругого рассеяния нейтронов на диспрозии

Заключение, к которому приводит проведенное рассмотрение состоит в том, чтобы сохранить в библиотеке РОСФОНД, принятые в нее данные для изотопов, обратив внимание пользователей на возможную заниженность рекомендуемых сечений захвата. Разрешить имеющееся противоречие можно лишь путем привлечения дополнительных экспериментальных данных (возможно, интегральных экспериментов на быстрых критических реакторах).

Авторы заключения – В.Н. Кошечев, М.Н. Николаев.

67.ГОЛЬМИЙ

Природный гольмий содержит лишь один изотоп- ^{165}Ho . Кроме того имеется один весьма долгоживущий нейтронно-дефицитный изотоп - ^{165}Ho (4570лет) и один нейтронно-избыточный - ^{165}Ho (26.8 ч.), имеющий долгоживущий изомер $^{165}\text{Ho}^m$ (1200 лет). Таким образом в РОСФОНДе должны быть представлены данные для 4-х нуклидов.

67.1. Гольмий-163

В реакторе может образовываться за счет реакций $^{165}\text{Ho}(n,3n)$ и $^{164}\text{Er}(n,d)$, (n,np) . Слабо радиоактивен ($T_{1/2}=4570$ лет). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в стабильный диспрозий-163.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержатся сечения нейтронных реакций, оцененные теоретическим путем. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 54.9 барн.

Резонансный интеграл захвата: 1463 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

67.2. Гольмий-165

Единственный стабильный изотоп.

В современных библиотеках оцененных данных содержатся следующие оценки: ФОНД-2.2 – оценка Шентера и Шмиттроа (R.E.Schenter, F.Schmitroth), выполненная в 1974 г. для ENDF/B-V.

JEFF-3.1 – оценка Янга и Артура (P.G.Young, E.D.Arthur), 1988 г. для ENDF/B-VI, слегка подправленная Мак-Лейн (V.McLane) в 1997 г.

ENDF/B-VIIb2 – прежняя оценка с полным пересмотром Мухабхабом области разрешенных резонансов (ниже 1.25 кэВ).

Преимущество последней оценки настолько очевидно, что проводить детальное сравнение ее с предыдущими оценками нет смысла.

Сравним сечения захвата и резонансные интегралы из этой оценки с данными из EAF-2003.

Сечение захвата тепловых нейтронов: ENDF/B-VIIb2 – 64.7 барн; EAF-2003 – 66.6 барн.

Резонансный интеграл захвата: ENDF/B-VIIb2 – 682 барна; EAF-2003 – 761 барн.

Область разрешенных резонансов

В файле данных ENDF/B-VIIb2 область разрешенных резонансов содержит параметры 248 резонансов выше энергии связи нейтрона и 2-х связанных состояний. Максимальная резонансная энергия – 1233 эВ. Граница области разрешенных резонансов -1250 эВ.

На рис.1. приведена нарастающая сумма числа резонансов, из которой видно, что выше 500 эВ имеет место пропуск части резонансов. Можно было бы надеяться, что пропущенные резонансы узки и не дают существенного вклада в нейтронные сечения. Однако рис.2, на котором показана нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин, показывает, что это не так: выше 600 эВ нейтронные ширины резонансов оказываются в среднем заметно ниже, чем в интервале до 600 эВ.

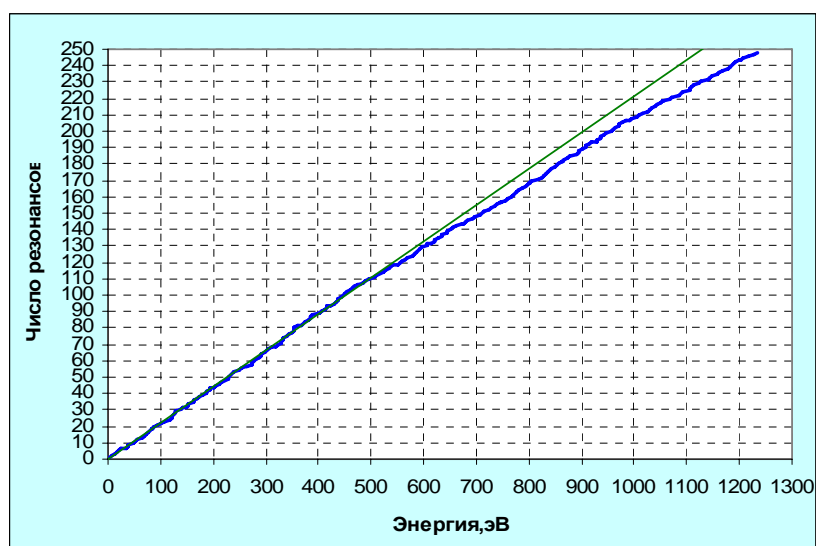


Рис.1. Нарастающая сумма резонансов

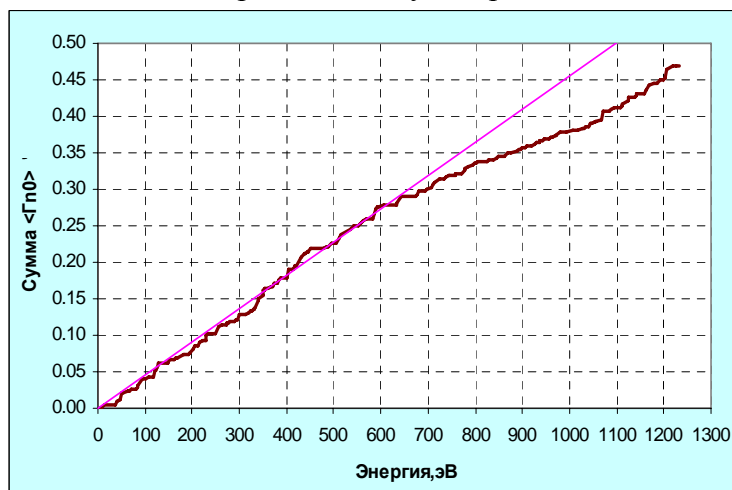


Рис.2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин

Отмеченная ситуация необычна и нуждается в детальном рассмотрении методов определения нейтронных ширин резонансов в двух половинах рассматриваемой энергетической области.

Сечения вне резонансной области

На рис. 3 оцененные сечения захвата сравниваются с результатами измерений. Можно отметить завышение сечения захвата в области сотен кэВ, важной для быстрых реакторов, которое при пересмотре оценки следовало бы устранить.

На рис.4 полное сечение из оценки сравнивается с единственным имеющимся экспериментом. В области ниже 4 МэВ можно было бы ожидать лучшего согласия между ними. Для разрешения противоречия желательны дополнительные эксперименты.

На рис.5 сравниваются с экспериментальными данными оценки сечений реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$. Согласие неплохое.

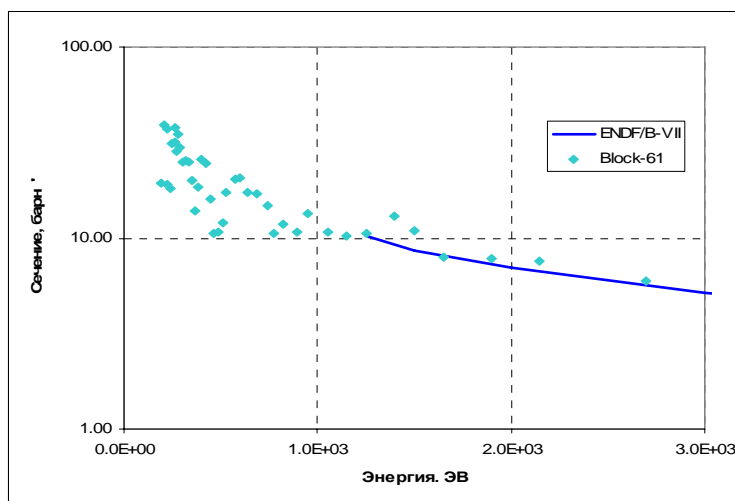


Рис.3а. Сечение захвата

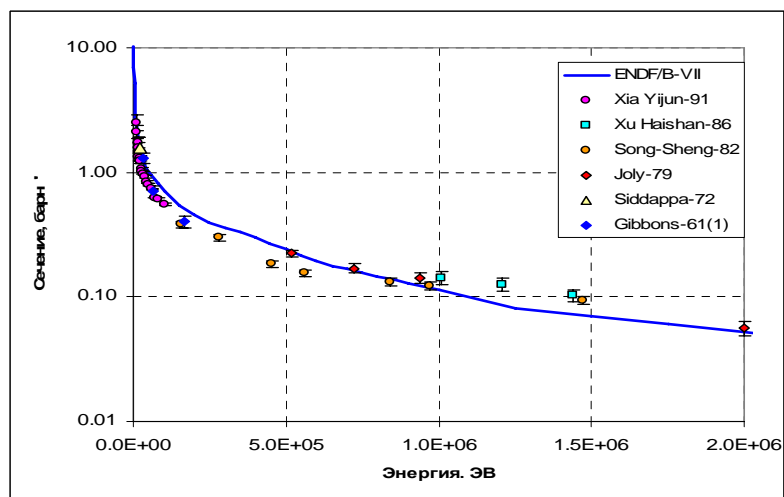


Рис.3б. Сечение захвата

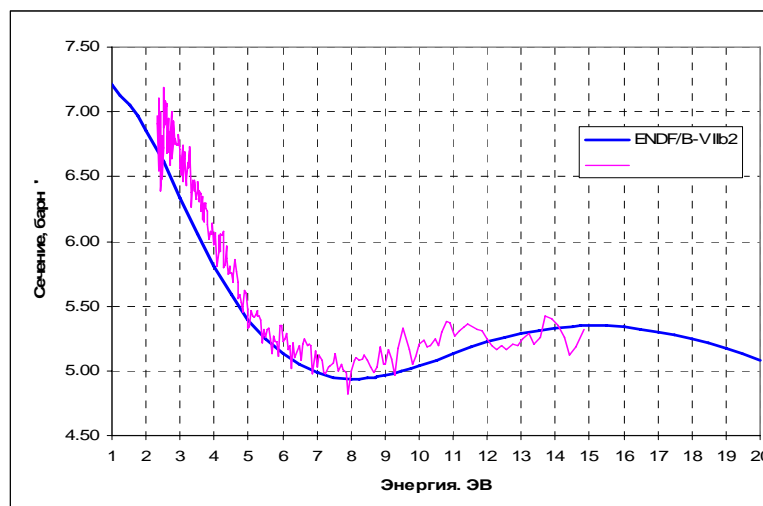


Рис.4. Полное сечение

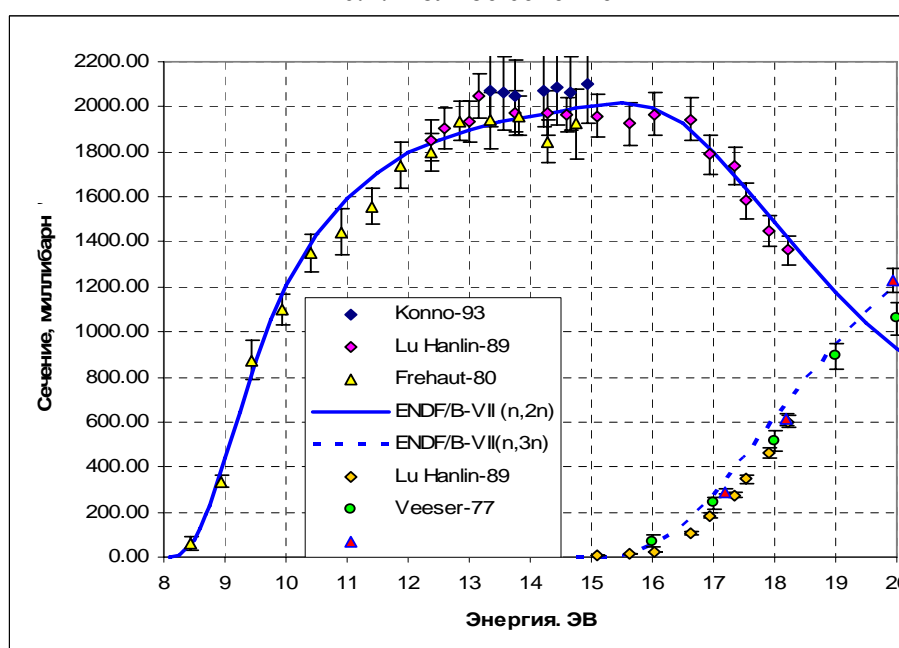


Рис.5. Сечения реакций (n,2n) и (n,3n)

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл из ENDF/B-VIIb2.

При возможности желательно произвести переоценку параметров разрешенных резонансов выше 500 -600 эВ. Было бы целесообразным ввести область неразрешенных резонансов и обеспечить лучшее согласие между оцененным сечением захвата и результатами экспериментов.

Автор заключения

Николаев М.Н.

67.3. Гольмий-166

В реакторе может образовываться за счет реакций $^{165}\text{Ho}(n,\gamma)$ и $^{166}\text{Er}(n,d)$, (n,p).
Радиоактивен ($T_{1/2}=28.80$ ч.). Испытывает бета-распад в эрбий-166.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержатся сечения нейтронных реакций, оцененные теоретическим путем. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 54.9 барн.
Резонансный интеграл захвата: 1463 барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

67.4. Гольмий-166-m

В реакторе может образовываться за счет реакций $^{165}\text{Ho}(n,\gamma)$ и $^{166}\text{Er}(n,d)$, (n,p).
Радиоактивен ($T_{1/2}=1200$ лет). Испытывает бета-распад в эрбий-166.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержатся сечения нейтронных реакций, оцененные теоретическим путем. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 3164 барн.
Резонансный интеграл захвата: 24636 барн.

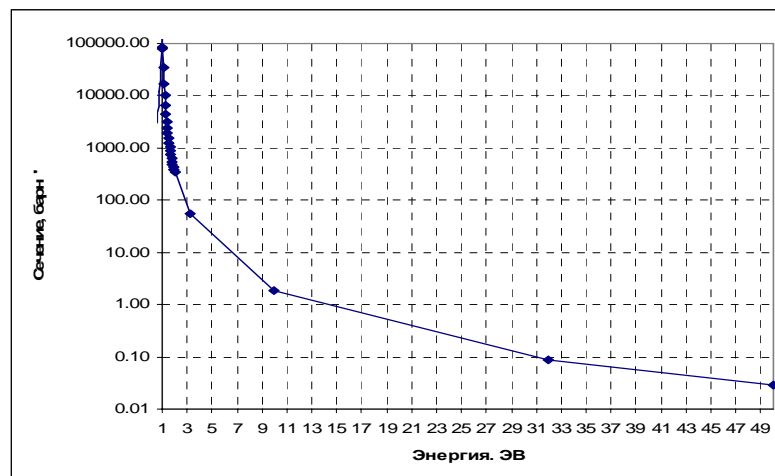


Рис.1а Сечение захвата

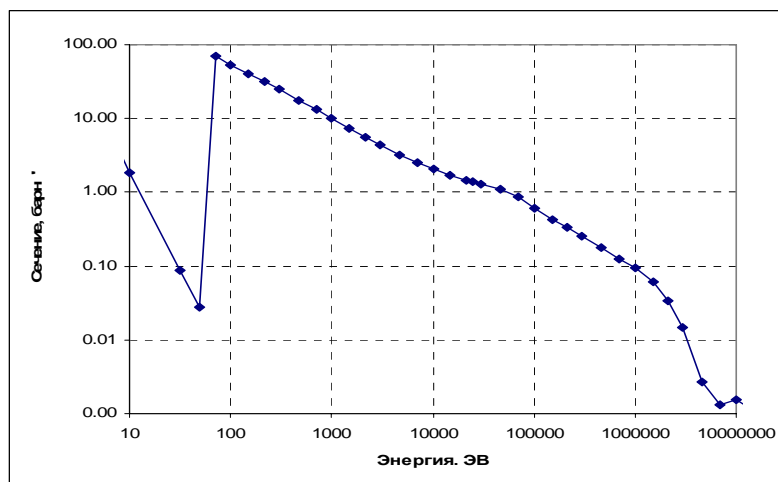


Рис.16 Сечение захвата.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

68. ЭРБИЙ

Природный эрбий включает шесть изотопов. В таблице 1 приводится вклад каждого изотопа в естественную смесь.

Таблица 1 – Состав природного эрбия, %

| Изотоп | % |
|--------|--------|
| Er-162 | 0.139 |
| Er-164 | 1.601 |
| Er-166 | 33.503 |
| Er-167 | 22.869 |
| Er-168 | 26.978 |
| Er-170 | 14.910 |

Существует также три долгоживущих изотопа – ^{160}Er ($T_{1/2}=28.6$ ч.), ^{169}Er ($T_{1/2}=9.40$ дн.) и ^{172}Er ($T_{1/2}=49$ ч.).

Для реакторостроения эрбий представляет интерес как элемент, имеющий довольно большое сечение поглощения во всей области энергий, а ^{167}Er характеризуется высоким сечением поглощения тепловых нейтронов (~ 700 барн).

Оценки файла для натурального эрбия нет ни в одной библиотеке оцененных данных. Для изотопов эрбия существует две независимых оценки – старая оценка С.М.Захаровой и др. (1976г.), содержащаяся в библиотеках FOND-2.2 и БРОНД-2, и новая оценка Гарун-ар-Рашида и др. (2000г.), принятая в современных зарубежных библиотеках (ENDF/B-VII, JENDL-3.3, JEFF-3.1).

68.1. Эрбий-160

Испытывает позитронный распад с периодом $T_{1/2}=28.6$ ч.

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций (MT=16,17,22,24,33,102,106,107,111). Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (JEFF-3.1).

Файлы MF=8 и MF=10 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов – 49.0 барн.

Автор отбора данных Забродская С.В.

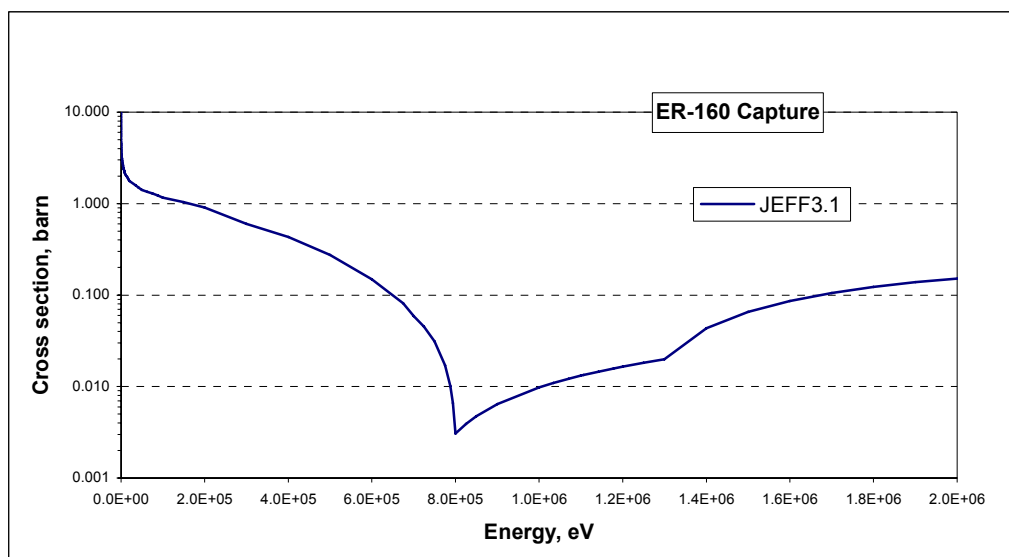


Рис.6.1.Сечение захвата

68.2. Эрбий-162

1.Общие характеристики

Z=68

A=162

Aw= 1.605380+2

Содержание в естественной смеси: 0.139%

Перечень нейтронных реакций

Таблица 1.1

| MT | Реакция | JENDL3.3 | | FOND2.2 | |
|-------|--------------------------|-------------|--------------------------|-------------|--------------------------|
| | | Q,МэВ | E _{порог.} , эВ | Q,МэВ | E _{порог.} , эВ |
| 16 | (n,2n) ¹⁶¹ Er | -9.209370+6 | 9.266740+6 | -9.20900+ 6 | 9.26636+ 6 |
| 17 | (n,3n) ¹⁶⁰ Er | -1.642670+7 | 1.652900+7 | -1.64260+ 7 | 1.65280+ 7 |
| 22*) | (n,nα) ¹⁵⁸ Dy | 1.647910+6 | | | |
| 28 | (n,np) ¹⁶¹ Ho | -6.428030+6 | 6.468070+6 | -6.42100+ 6 | 6.46100+ 6 |
| 102 | (n,γ) ¹⁶³ Er | 6.904700+6 | | 6.90500+ 6 | |
| 103 | (n,p) ¹⁶² Ho | 4.863390+5 | | 4.94400+ 5 | |
| 104*) | (n,d) ¹⁶¹ Ho | -4.203460+6 | 4.229640+6 | | |
| 105*) | (n,t) ¹⁶⁰ Ho | -6.827720+6 | 6.870250+6 | | |
| 107 | (n,α) ¹⁵⁹ Dy | 8.478280+6 | | 8.48261+ 6 | |

*) В оценке С.М.Захаровой и др. данных об этих реакциях не содержится.

Энергии нейтронных реакций, приведенные в файлах оцененных данных, удовлетворительно согласуются с порогами этих реакций.

2. Область низких энергий.

На рис. 1.1, 1.2 и 1.3 приведены полное сечение, сечение радиационного захвата и сечение упругого рассеяния в области энергий ниже 1.5 эВ. Налицо противоречивость экспериментальных данных. Данные Вертебного и данные Власова – это данные одной и той же группы, полученные в одном и том же институте – Киевском Институте Ядерных Исследований. Они находятся в противоречии с сечением захвата, измеренным Глернсетом в 70 г. При оценке данные, полученные в Киеве, были проигнорированы и оценка опиралась на результат измерения наиболее сечения радиационного захвата Глернсетом. Решение представляется достаточно обоснованным¹.

В таблице 1 приводится сечение в тепловой точке.

Таблица 1.2

| | JENDL3.3 | FOND2.2 | Мухабхаб - 2003 |
|---------------------|----------|---------|-----------------|
| Упругое рассеяние | 8.002 | 53.6 | |
| Радиационный захват | 18.908 | 29.0 | 19±2 |
| Полное сечение | 26.911 | 82.6 | |

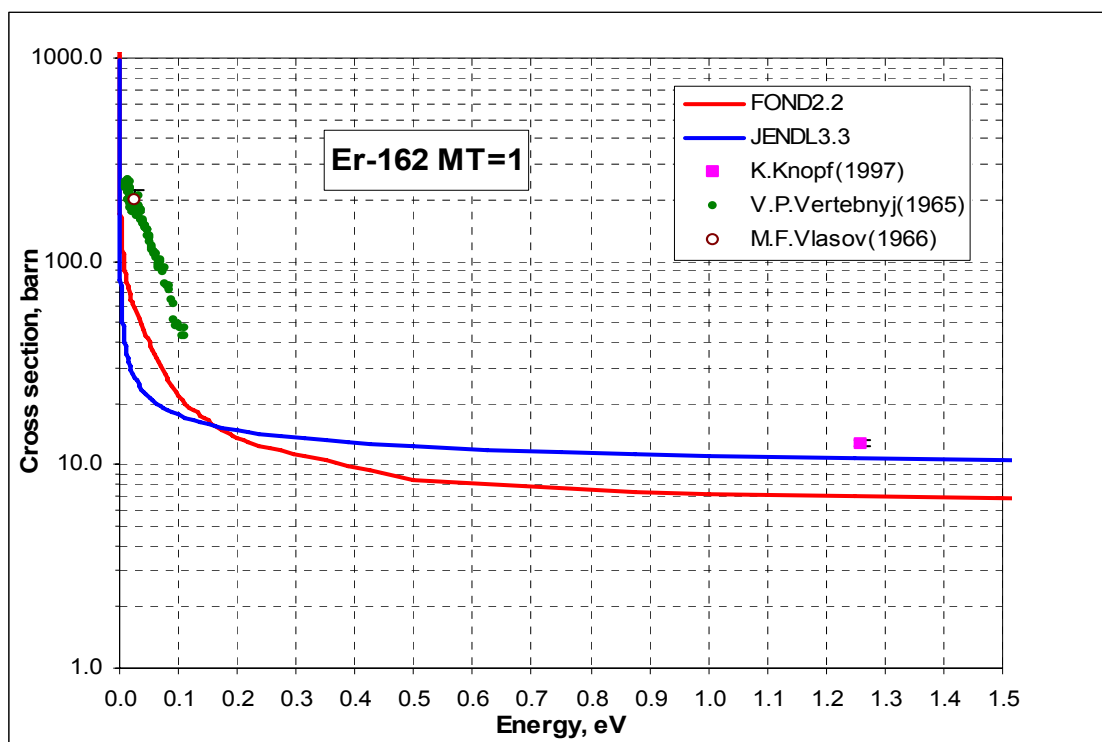


Рис. 1.1 Полное сечение при низких энергиях.

¹ Вероятной причиной противоречивости результатов измерений является недооценка содержания эрбия-167 в образце эрбия-162, что должно было приводить к завышению полного сечения и некоторому занижению сечения упругого рассеяния.

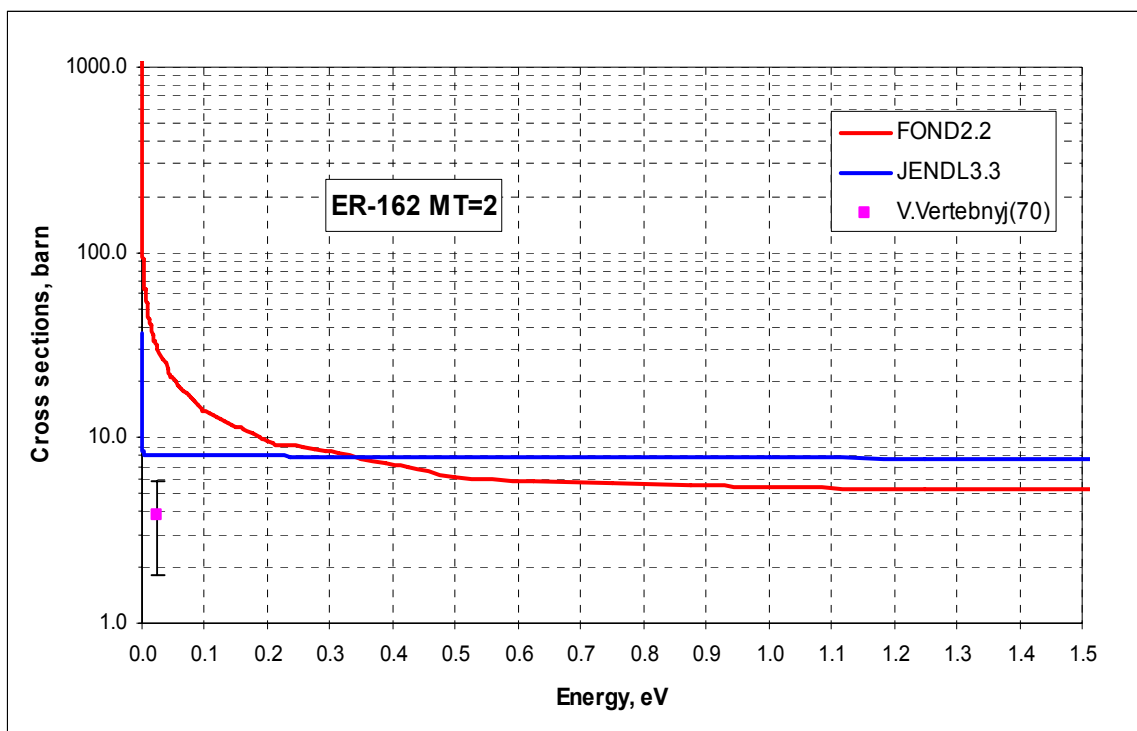


Рис. 1.2. Сечение упругого рассеяния при низких энергиях.

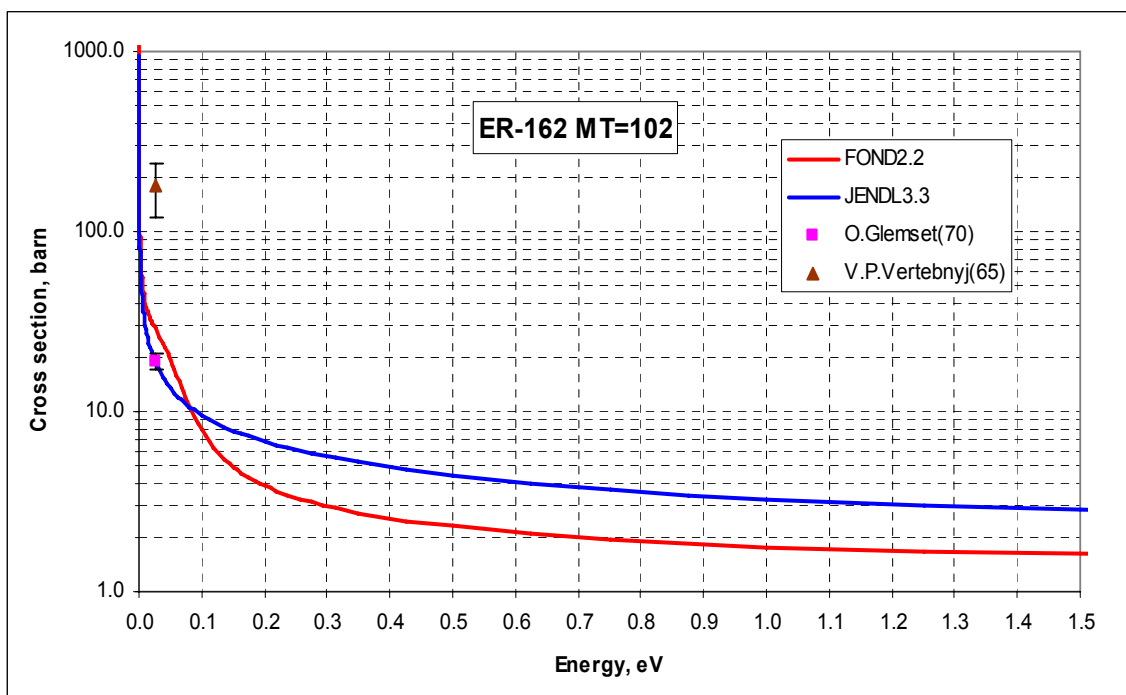


Рис.1.

3. Сечение радиационного захвата при низких энергиях.

3. Резонансная область.

В обеих оценках, и в FOND-2.2 и в JENDL-3.3, приводятся резонансные параметры для 18-ти s-резонансов, с максимальной энергией 228.5 эВ. Однако область разрешенных резонансов определяется по-разному. В FOND-2.2 с помощью этих параметров описывается ход сечений только до 70 эВ, а далее до 800 эВ лежит область неразрешенных резонансов. В JENDL-3.3 область разрешенных резонансов распространена до 250 эВ, а область неразрешенных резонансов отсутствует. Резонансные

параметры в FOND-2.2 были взяты из работы Мухабхаба 1966 г.², а в JENDL3.3 приведены более поздние данные того же Мухабхаба³, сохранившиеся до 2003 г.⁴ Самым важным изменением явилось иное описание сечений в тепловой области: вместо резонанса при 0.034 эВ введено связанное состояние при 32.5 эВ, что существенно повлияло на тепловые сечения (особенно на сечение упругого рассеяния).

На рис. 1.4 и 1.5 приведены поведения полного сечения и сечения радиационного захвата в области разрешенных резонансов. Как видно, согласие обеих оценок вполне удовлетворительно (не считая некоторых смещений по энергии двух резонансов).

Однако, распространение области разрешенных резонансов до 250 эВ не является вполне оправданным. В самом деле, в интервале между 250 и 70 эВ лежит лишь 7 резонансов из 17 лежащих выше энергии связи нейтрона. Пропуск значительной части резонансов в этом интервале очевиден. Пропущенные резонансы даже при малой нейтронной ширине могут дать существенный вклад в радиационный захват и корректная оценка должна была бы учитывать этот вклад хотя бы в виде нерезонансной подложки. Другим очевидным недостатком новой оценки является отсутствие области неразрешенных резонансов. Устранение этих недостатков, однако, выходит за рамки настоящей работы (особенно с учетом того, что содержание эрбия-162 в естественной смеси мало).

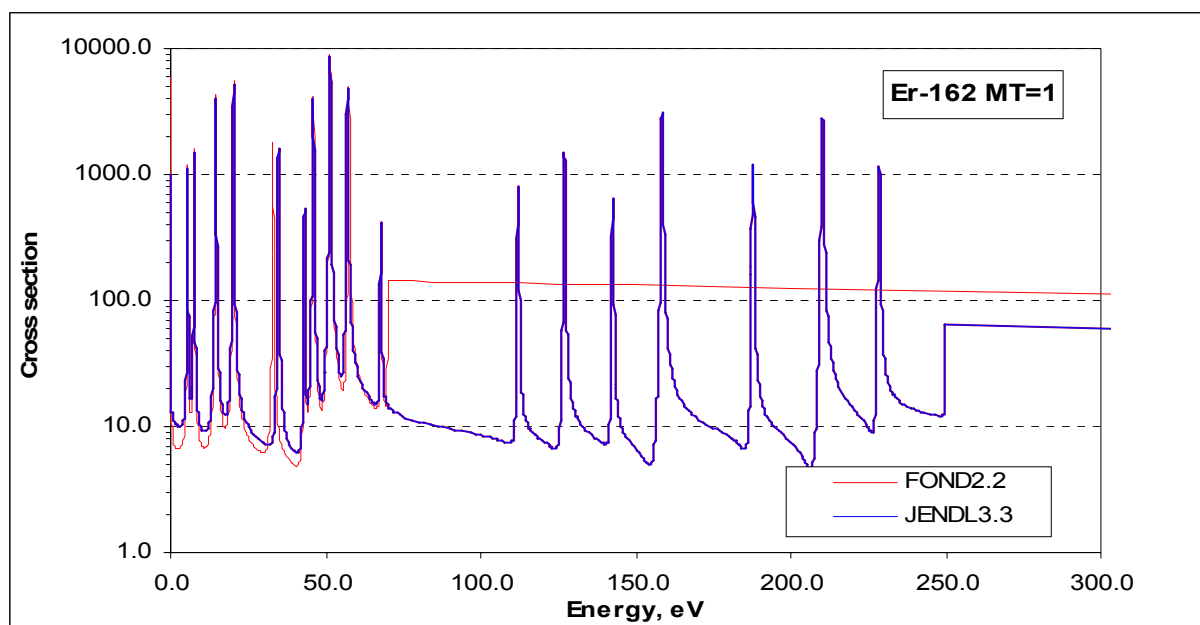


Рис.1. 4. Полное сечение в области разрешенных резонансов.

² BAPS 11,3,334,DB2

³ Neutron Cross Section: Vol.1, Neutron Resonance Parameters and thermal cross Section. Academic Press, 1984.

⁴ S.F.Mughabghab. Thermal Neutron Cross Sections, Resonance integrals and G-factors. INDC(NDS)-440, IAEA,2003.

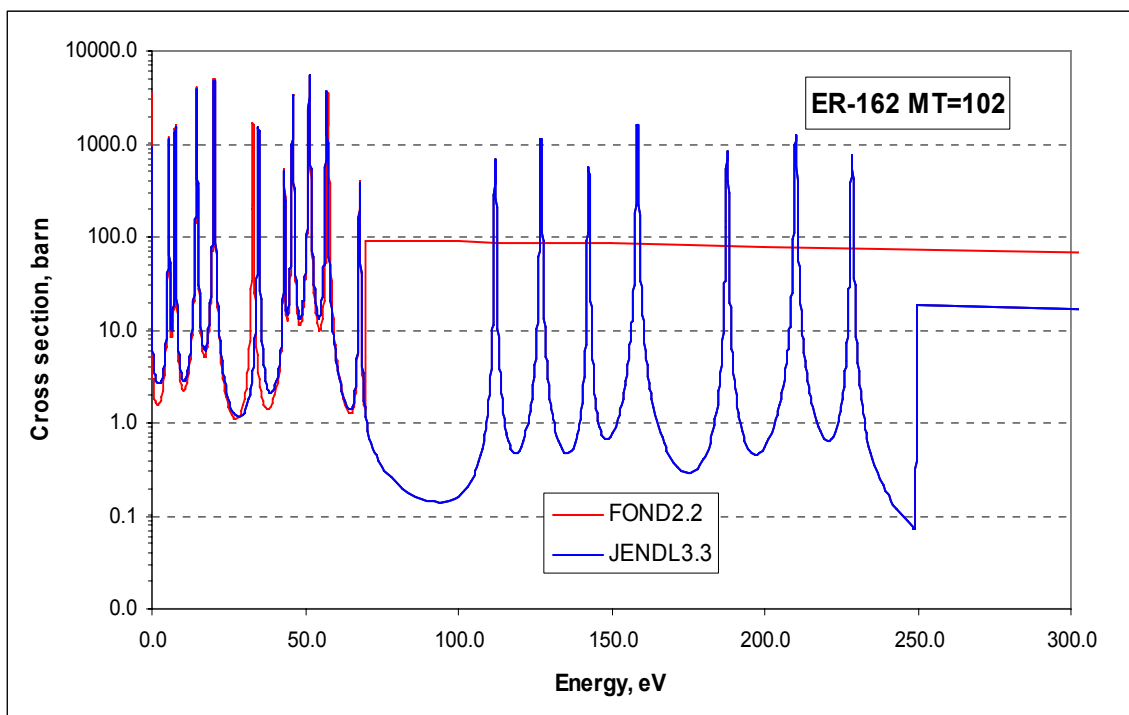


Рис. 1.5. Сечение захвата в области разрешенных резонансов.

4. Сечения вне резонансной области

Вне резонансной области сечения оценивались на основе модельных расчетов. На рис. 1.6 сравниваются энергетические поведения сечений основных реакций в этой области. Расхождения между ними сравнительно невелики. Сечение захвата, принятое в новой оценке, подтверждается экспериментальным результатом Трофимова (см. рис.6а). Сечение реакции $(n,2n)$ – целым рядом экспериментальных данных.

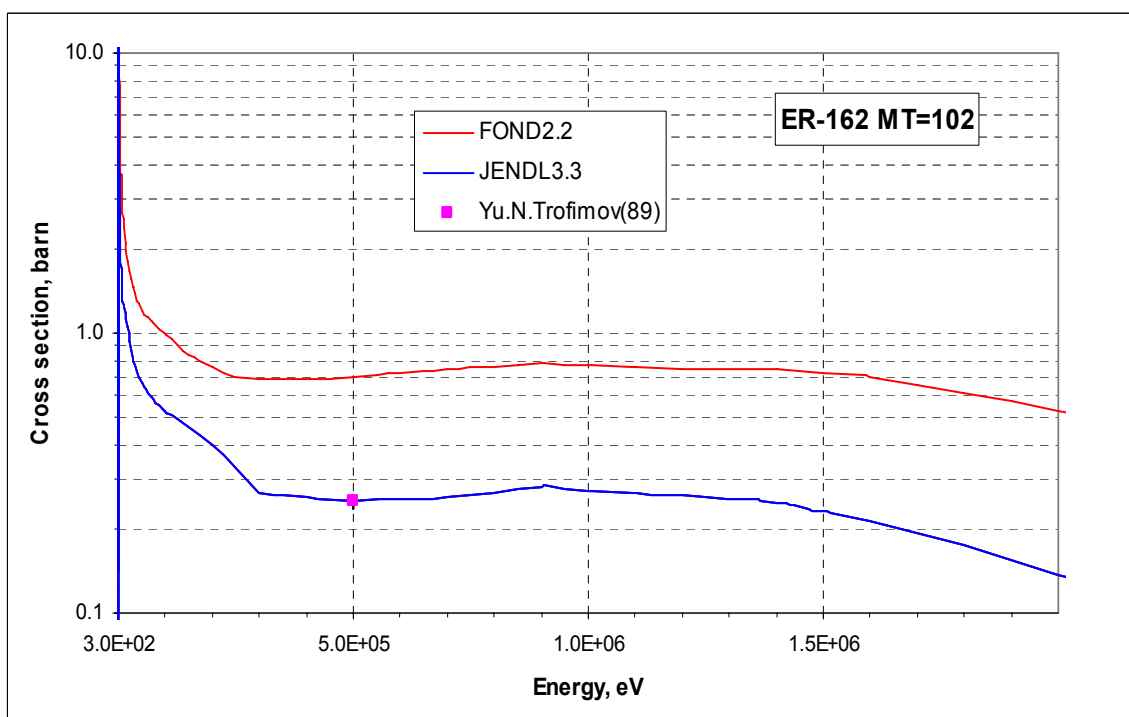


Рис. 1.6а. Сечение радиационного захвата вне резонансной области.

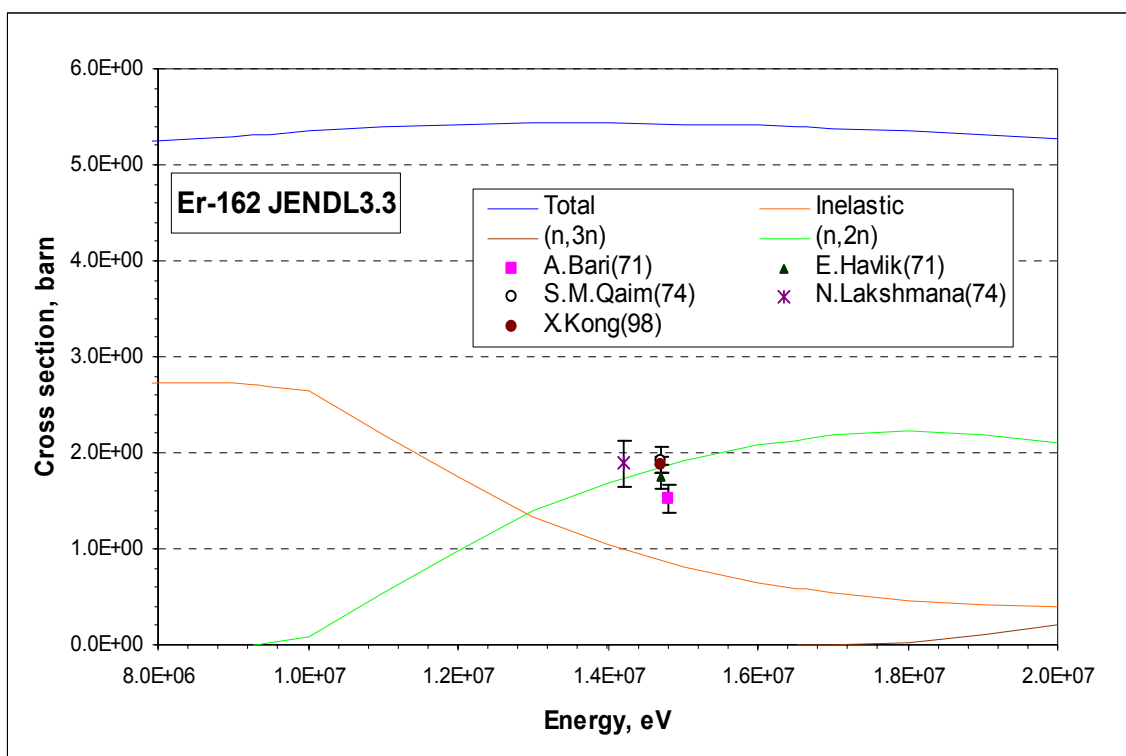


Рис.1.6б. Сечения вне резонансной области.

При описании неупругого рассеяния в новой оценке учтено возбуждение каждого из первых 17 известных уровней ядра-мишени. Начиная с энергии 18-го уровня принимается непрерывный спектр состояний ядра-мишени. В прежней оценке корректно учтено возбуждение лишь первых пяти уровней, а область континуума начинается лишь с 2.4 МэВ (см. табл.2), т.о. неупругое рассеяние в интервале 1.09 – 2.4 МэВ описывалось некорректно – возбуждением лишь двух уровней (на самом деле, как теперь известно, в этом интервале имеется около 30 уровней). Преимущество новой оценки очевидно.

Таблица 2.2. Схемы уровней эрбия-162, учитываемые при неупругом рассеянии.

| № уровня+50 | Энергия, МэВ | |
|-------------|--------------|---------|
| | JENDL3.3 | FOND2.2 |
| 51 | 0.1020 | 0.1020 |
| 52 | 0.3295 | 0.330 |
| 53 | 0.667 | 0.6640 |
| 54 | 0.9007 | 0.9010 |
| 55 | 1.0019 | 1.0020 |
| 56 | 1.0871 | 1.0940 |
| 57 | 1.0968 | 2.2520 |
| 58 | 1.1280 | 2.3220 |
| 59 | 1.1710 | |
| 60 | 1.2863 | |
| 61 | 1.3521 | |
| 62 | 1.3567 | |
| 63 | 1.4123 | |
| 64 | 1.4204 | |
| 65 | 1.4299 | |
| 66 | 1.4597 | |

| | | |
|----|--------|-------|
| 67 | 1.4691 | |
| 91 | 1.5000 | 2.385 |

5. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

Экспериментальных данных в EXFOR нет. В обеих оценках энергетические распределения считаются не зависящими от угловых (данные для всех реакций с вылетом вторичных нейтронов приводятся в файлах MF=4 (угловые распределения) и MF=5 (энергетические распределения для реакций с возбуждением непрерывного спектра состояний ядер-продуктов). Угловые распределения нейтронов, испускаемых в реакциях с возбуждением непрерывного спектра ядер-продуктов (MT=16, 17, 22, 28), кроме неупругого рассеяния приняты изотропными в лабораторной системе координат. Угловые распределения для упругого и неупругого рассеяния рассчитывались по программе CASTY.

6. Образование фотонов в нейтронных реакциях

Фотонные данные есть только в JENDL3.3. Приводится следующая информация: неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней ядра-мишени: в файле MF=12 для MT=51-67 приведены вероятности испускания дискретных квантов, соответствующих переходам между уровнями; реакции с возбуждением непрерывного спектра уровней ядер-продуктов – множественности и непрерывные спектры фотонов, рассчитанные по статистической модели (по программе EGNASH), заданные в соответствующих секциях файлов MF=12 MF=15.

Угловые распределения фотонов во всех случаях приняты изотропными.

7. Заключение

6.1. Вывод: В РОСФОНДе целесообразно принять оценку А.К.М.Нарун-ар-Рашид, М.Игашира, Т.Охсаки и К.Шибата (JENDL-3.3).

Принятые оцененные данные желательно откорректировать с учетом замечаний, сделанных в в разделе 3.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

Таблица 1.3

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) | (n,p) | (n, α) |
|---------------------------------|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| 0.0253 эВ | 59.288 | 30.192 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 29.096 | 0.000 | 0.000 |
| | 26.954 | 8.028 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 18.927 | 0.000 | 0.000 |
| Резонансный интеграл | 854.616 | 279.748 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 574.868 | 0.000 | 0.000 |
| | 693.985 | 242.797 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 451.188 | 0.000 | 0.000 |
| Спектр деления ²³⁵ U | 6.916 | 4.304 | 2.077 | 0.002 | 0.000 | 0.533 | 0.000 | 0.000 |
| | 6.745 | 4.803 | 1.758 | 0.001 | 0.000 | 0.182 | 0.000 | 0.000 |
| 14 МэВ | 5.272 | 3.098 | 0.468 | 1.622 | 0.000 | 0.072 | 0.012 | 0.001 |
| | 5.435 | 2.689 | 1.047 | 1.683 | 0.000 | 0.002 | 0.009 | 0.003 |

6.2. Автор обоснования оцененных данных: Забродская С.В.

68.3. Эрбий-164

1. Общие характеристики

$Z=68$

$A=164$

$A_w= 1.62521+2$

Содержание в естественной смеси: **1.61%**

Перечень нейтронных реакций

Для Er-164 существует две независимых оценки – старая оценка С.М.Захаровой и др. (1976г.), содержащаяся в библиотеках FOND-2.2 и БРОНД-2, и новая оценка Гарун-ар-Рашида и др. (2000г.), принятая в современных зарубежных библиотеках (ENDF/B-VII, JENDL-3.3, JEFF-3.1).

Таблица 2.1

| MT | Реакция | JENDL3.3 | |
|-----|-----------------------------|-------------|--------------------------|
| | | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, эВ |
| 16 | $(n,2n)^{163}\text{Er}$ | -8.846370+6 | 8.900800+6 |
| 17 | $(n,3n)^{162}\text{Er}$ | -1.574770+7 | 1.584460+7 |
| 22 | $(n,\alpha)^{160}\text{Dy}$ | 1.306910+6 | |
| 28 | $(n,np)^{163}\text{Ho}$ | -6.854030+6 | 6.896200+6 |
| 102 | $(n,\gamma)^{165}\text{Er}$ | 6.649700+6 | |
| 103 | $(n,p)^{164}\text{Ho}$ | -2.306610+5 | 2.320800+5 |
| 104 | $(n,d)^{163}\text{Ho}$ | -4.629460+6 | 4.657950+6 |
| 105 | $(n,t)^{162}\text{Ho}$ | -6.778720+6 | 6.820430+6 |
| 107 | $(n,\alpha)^{161}\text{Dy}$ | 7.760280+6 | |

Энергии нейтронных реакций, приведенные в файлах оцененных данных, удовлетворительно согласуются с порогами этих реакций.

Радиоактивность: не радиоактивен

2. Область низких энергий

На рис.2.1-2.2 приведены полное сечение, сечение радиационного захвата и сечение упругого рассеяния в тепловой области, рассчитанные по оцененным резонансным параметрам. При 0.0253 эВ полное сечение в новой оценке не согласуется с экспериментами В.П.Вертебного(1965) и Мухабхаба(67), поскольку отдает предпочтение измерениям сечения радиационного захвата и рассеяния. Эксперимент О.Glemset(70) точно лежит на кривой сечения. Два эксперимента В.П.Вертебного(1965 и 1975) для сечения упругого рассеяния практически совпадают и лежат ближе к новой оценке, полученной, естественно, с учетом результатов измерений нейтронных сечений в области разрешенных резонансов.

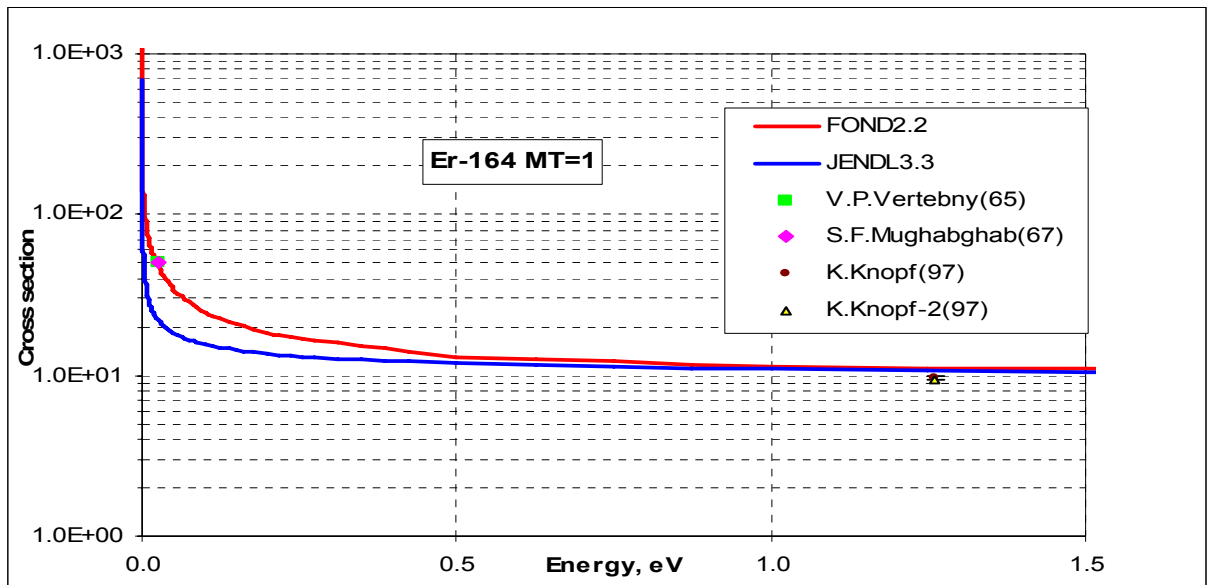


Рис.2.1. Полное сечение при низких энергиях

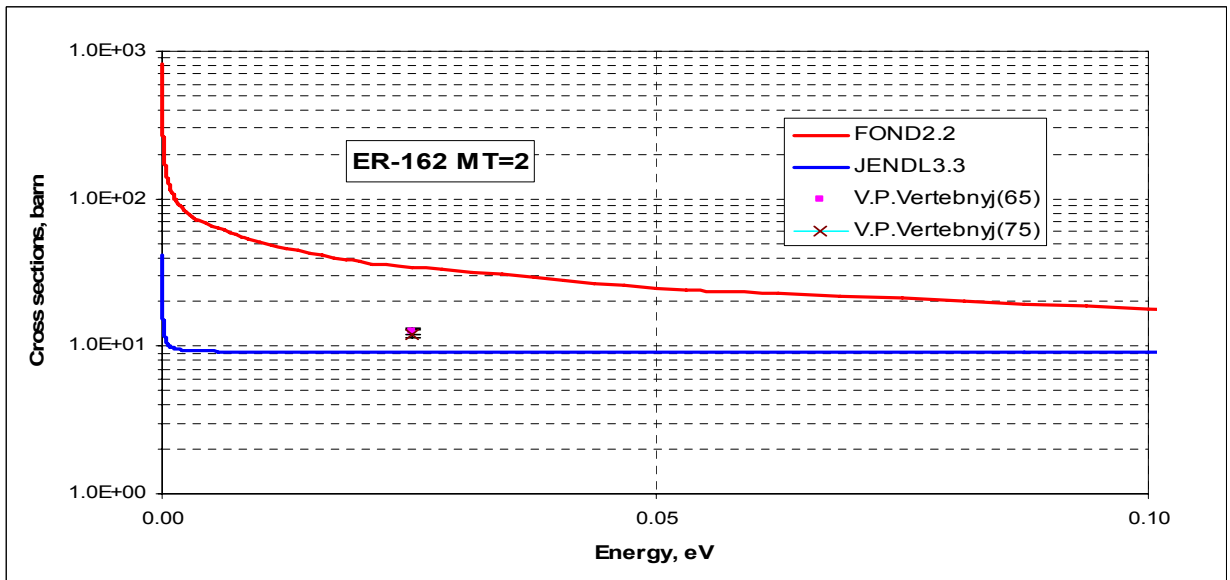


Рис.2.2. Сечение упругого рассеяния при низких энергиях

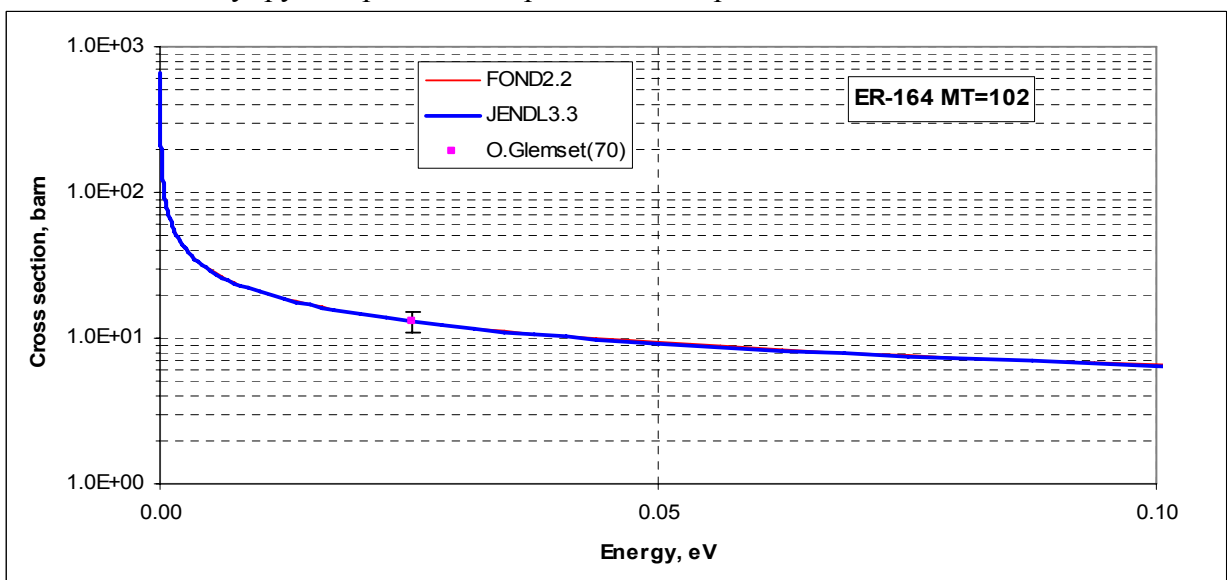


Рис.2.3. Сечение радиационного захвата при низких энергиях

2. Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов в FOND2.2 простирается до 230 эВ; в JENDL3.3 - до 800 эВ. Резонансные параметры в FOND-2.2 были взяты из работы Мухабхаба 1966 г.⁵, а в JENDL3.3 приведены более поздние данные того же Мухабхаба⁶, сохранившиеся до 2003г.⁷

На рис.6.4. и 6.5. представлены полное сечение и сечение радиационного захвата в области разрешенных резонансов. Экспериментальных данных, имеющиеся в этой области⁸, в EXFOR.

Распространение области разрешенных резонансов до 800 эВ в оценке ENDF/B-VII не является вполне оправданным. В самом деле, в интервале между 800 и 230 эВ лежит лишь 6 резонансов из 17 лежащих выше энергии связи нейтрона. Пропуск значительной части резонансов в этом интервале очевиден. Пропущенные резонансы даже при малой нейтронной ширине могут дать существенный вклад в радиационный захват и корректная оценка должна была бы учитывать этот вклад хотя бы в виде нерезонансной подложки. Другим очевидным недостатком новой оценки является отсутствие области неразрешенных резонансов. Устранение этих недостатков, однако, выходит за рамки настоящей работы (особенно с учетом того, что содержание эрбия-162 в естественной смеси мало).

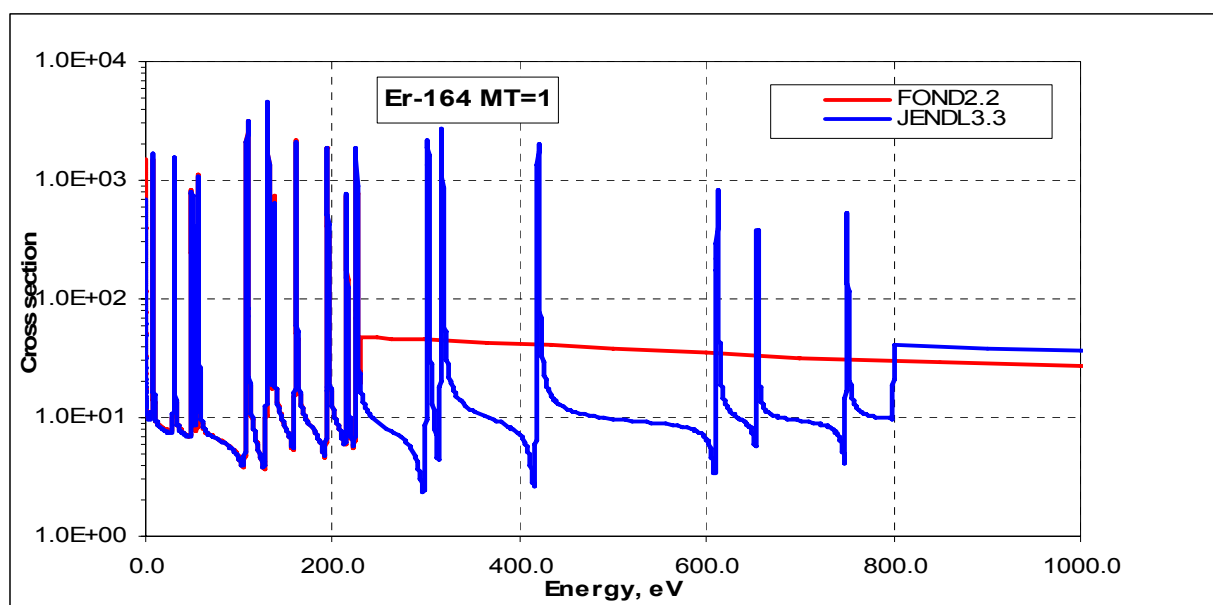


Рис.2.4. Полное сечение в области разрешенных резонансов.

⁵ BAPS 11,3,334,DB2

⁶ Neutron Cross Section: Vol.1, Neutron Resonance Parameters and thermal cross Section. Academic Press, 1984.

⁷ S.F.Mughabghab. Thermal Neutron Cross Sections, Resonance integrals and G-factors. INDC(NDS)-440, IAEA, 2003.

⁸ Liou et al. Phys.Rev/C,5,974?1973.

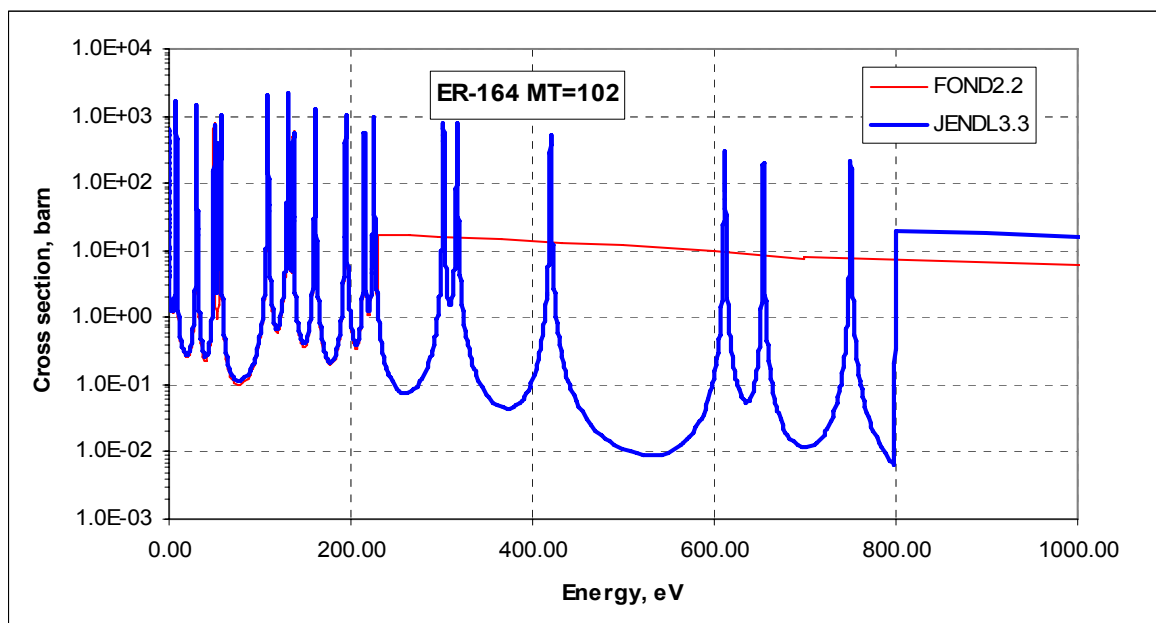


Рис.2.5. Сечение радиационного захвата в области разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов описана только в FOND-2.2 и то только от 230 до 700 кэВ. Средние резонансные параметры не зависят от энергии.

3. Сечения вне резонансной области

Вне резонансной области сечение оценивались на основе модельных расчетов. На рис.2.6.-2.7 сравниваются поведение полного сечения и сечения радиационного захвата с экспериментами. Видно, что новая оценка полного сечения JENDL3.3 ориентировалась на эксперимент А.Н.Демина(1977). Результат Ю.Н.Трофимова(1987) для сечения радиационного захвата при 1 МэВ лежит существенно ниже оцененных данных..

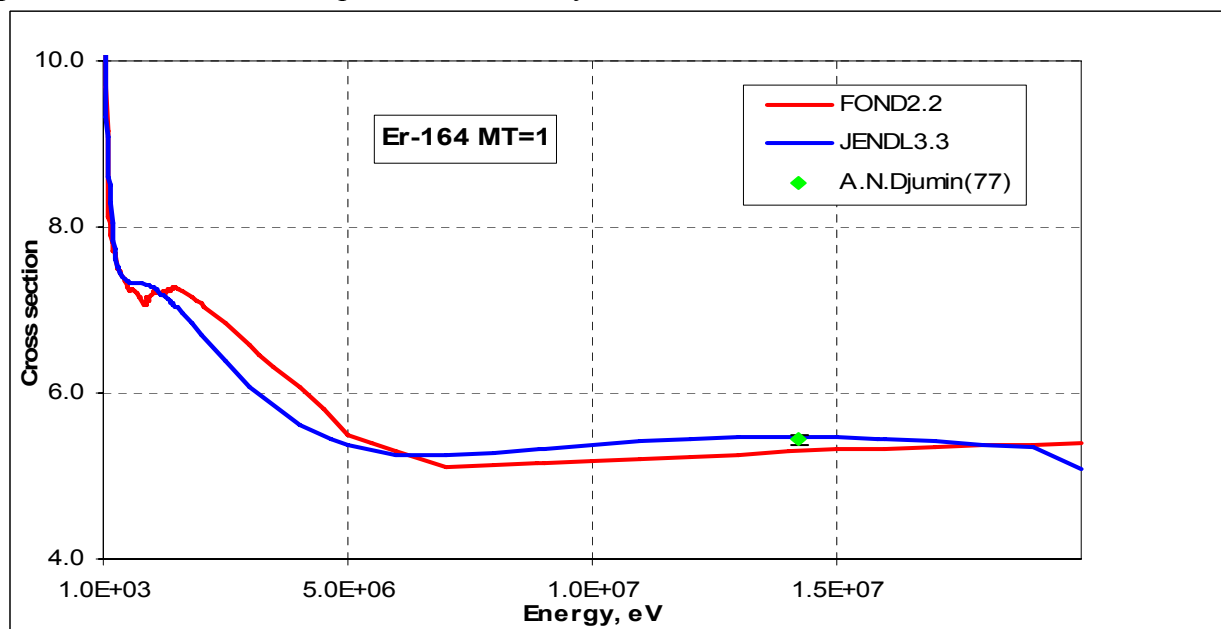


Рис.2.6. Полное сечение вне резонансной области

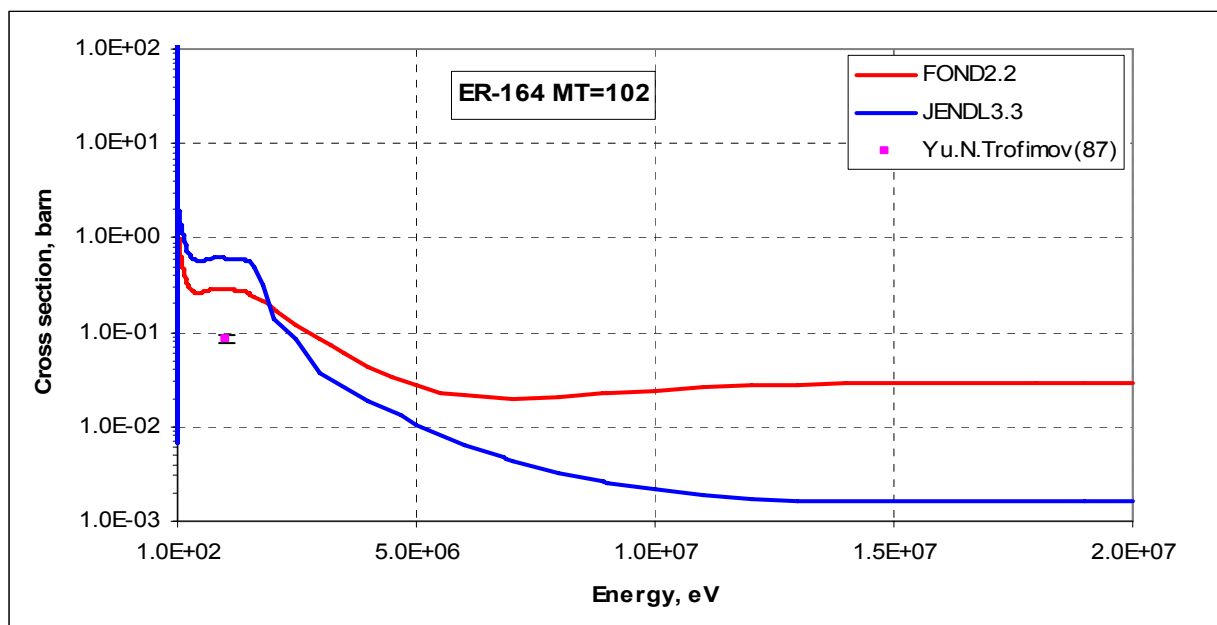


Рис.2.7. Сечение радиационного захвата вне резонансной области

Остальные основные реакции приводятся на рис. 2.8

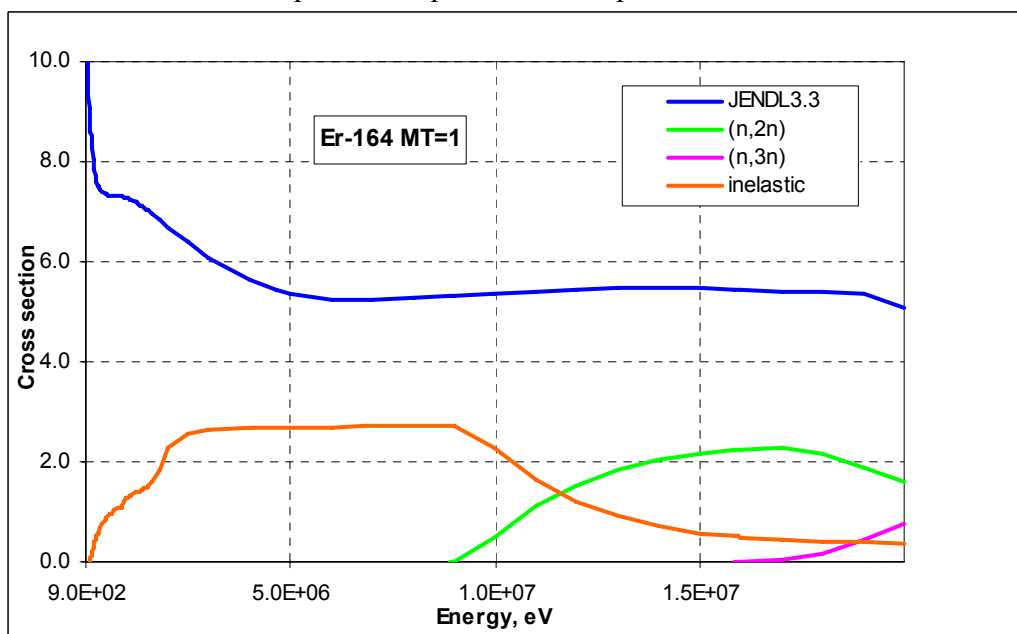


Рис.2.8. Сечения вне резонансной области

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

Экспериментальных данных в EXFOR нет. В обеих оценках энергетические распределения считаются не зависящими от угловых (данные для всех реакций с вылетом вторичных нейтронов приводятся в файлах MF=4 (угловые распределения) и MF=5 (энергетические распределения для реакций с возбуждением непрерывного спектра состояний ядер-продуктов). Угловые распределения нейтронов, испускаемых в реакциях с возбуждением непрерывного спектра ядер-продуктов (MT=16,17, 22, 28), кроме неупругого рассеяния приняты изотропными в лабораторной системе координат. Угловые распределения для упругого и неупругого рассеяния рассчитывались по программе CASTY.

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

В JENDL3.3 (ENDF/B7) приводится следующая информация:

неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней ядра-мишени:

в файле MF=12 для MT=51-66 приведены вероятности испускания дискретных квантов, соответствующих переходам между уровнями;

реакции с возбуждением непрерывного спектра уровней ядер-продуктов –

множественности и непрерывные спектры фотонов, рассчитанные по статистической модели (по программе EGNASH), заданные в соответствующих секциях файлов MF=12 MF=15.

Угловые распределения фотонов во всех случаях приняты изотропными.

6. Заключение

6.1. Вывод: Несмотря на сомнения в корректности оценки сечения захвата быстрых нейтронов (см. выше раздел 5 и рис. 2.7), в РОСФОНД принимается оценка JENDL-3.2 (=ENDF/B-7), полнее учитывающая данные о резонансной структуре сечений.

Принятые оцененные данные желательно откорректировать с учетом замечаний, сделанных в в разделе 2.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) | (n,p) | (n, α) |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|----------------|
| 0.0253 эВ | 47.4262 | 34.3034 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 13.1228 | 0.0000 | 0.0000 |
| | 22.0902 | 9.1285 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 12.9617 | 0.0000 | 0.0000 |
| Резонансный интеграл | 327.2890 | 182.6760 | 0.0054 | 0.0000 | 0.0000 | 144.6080 | 0.0000 | 0.0000 |
| | 340.9230 | 174.3130 | 0.0017 | 0.0000 | 0.0000 | 166.6090 | 0.0000 | 0.0000 |
| Спектр деления ^{235}U | 6.9420 | 4.8610 | 1.8751 | 0.0021 | 0.0000 | 0.2038 | 0.0000 | 0.0000 |
| | 6.7853 | 4.6716 | 1.7362 | 0.0027 | 0.0000 | 0.3748 | 0.0000 | 0.0000 |
| 14 МэВ | 5.3000 | 3.4055 | 0.3560 | 1.5030 | 0.0000 | 0.0290 | 0.0060 | 0.0005 |
| | 5.4688 | 2.7112 | 0.7155 | 2.0304 | 0.0000 | 0.0016 | 0.0074 | 0.0015 |

6.2. Автор обоснования оцененных данных: Забродская С.В.

68.4. Эрбий-166

1. Общие характеристики

1.1. $Z=68$

1.2. $A=166$

1.3. $A_w= 1.645050+2$

1.4. Содержание в естественной смеси: **33.61%**

1.5. Перечень нейтронных реакций

Независимые оценки Er-166 представлены в двух библиотеках FOND2.2(1976) и JENDL3.3(2000), которая полностью перешла в библиотеку JEFF3.1. В библиотеке ENDF/B-7 также содержатся данные JENDL3.3, но с коррекцией резонансных параметров. В таблице по нейтронным реакциям, исходя из вышесказанного, приводятся энергии реакций и их пороги.

Таблица 4.1

| MT | Реакция | JENDL3.3 | |
|-----|------------------------------|-------------|--------------------------|
| | | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, эВ |
| 16 | $(n,2n)^{165}\text{Er}$ | -8.475370+6 | 8.526890+6 |
| 17 | $(n,3n)^{164}\text{Er}$ | -1.512570+7 | 1.521760+7 |
| 22 | $(n,n\alpha)^{164}\text{Dy}$ | 8.309080+5 | |
| 28 | $(n,np)^{165}\text{Ho}$ | -7.316030+6 | 7.360500+6 |
| 32 | $(n,nd)^{164}\text{Ho}$ | -1.313180+7 | 1.321160+7 |
| 102 | $(n,\gamma)^{167}\text{Er}$ | 6.436700+6 | |
| 103 | $(n,p)^{166}\text{Ho}$ | -1.071660+6 | 1.078170+6 |
| 104 | $(n,d)^{165}\text{Ho}$ | -5.091460+6 | 5.122410+6 |
| 105 | $(n,t)^{164}\text{Ho}$ | -6.873720+6 | 6.915500+6 |
| 107 | $(n,\alpha)^{163}\text{Dy}$ | 7.102280+6 | |

Энергии нейтронных реакций, приведенные в файлах оцененных данных, удовлетворительно согласуются с порогами этих реакций.

Радиоактивность: не радиоактивен

2. Область низких энергий

На рис.4.1(аб), 4. 2 и 4.3 приведены оцененные полное сечение, сечение радиационного захвата и сечение упругого рассеяния в области низких энергий, а также соответствующие экспериментальные данные. Последние, как видно, весьма противоречивы. Результаты измерений сечения захвата различаются в разы; в то же время данные двух последних работ (Кнопфа и Данона) прекрасно согласуются между собой и оцененные кривые опираются, естественно, на них. Вероятной причиной разброса экспериментальных данных являлась неточность знания изотопного состава образца. Единственная точка при 1.26 эВ точно совпала с расчетным значением. В тепловой же точке похоже было отдано предпочтение экспериментам на захвате К.Кнопф(1997) и Y.Danon(1998). В ENDF/B-7 упругое рассеяние также точно совпала с измерением К.Кнопф(1997).

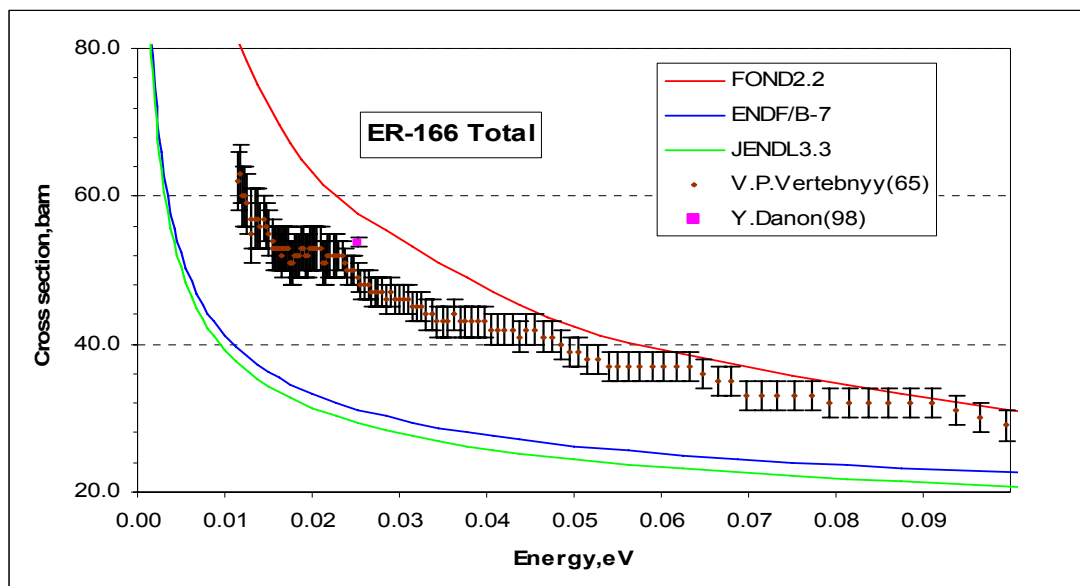


Рис.4.1.a Полное сечение Er-166 при низких энергиях.

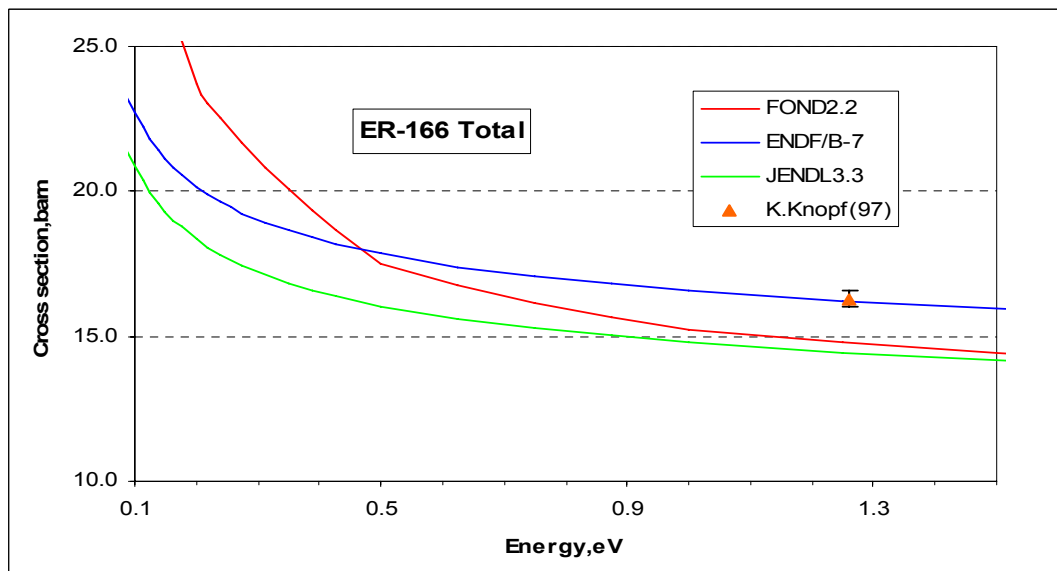


Рис. 4.1.b Полное сечение Er-166 при низких энергиях.

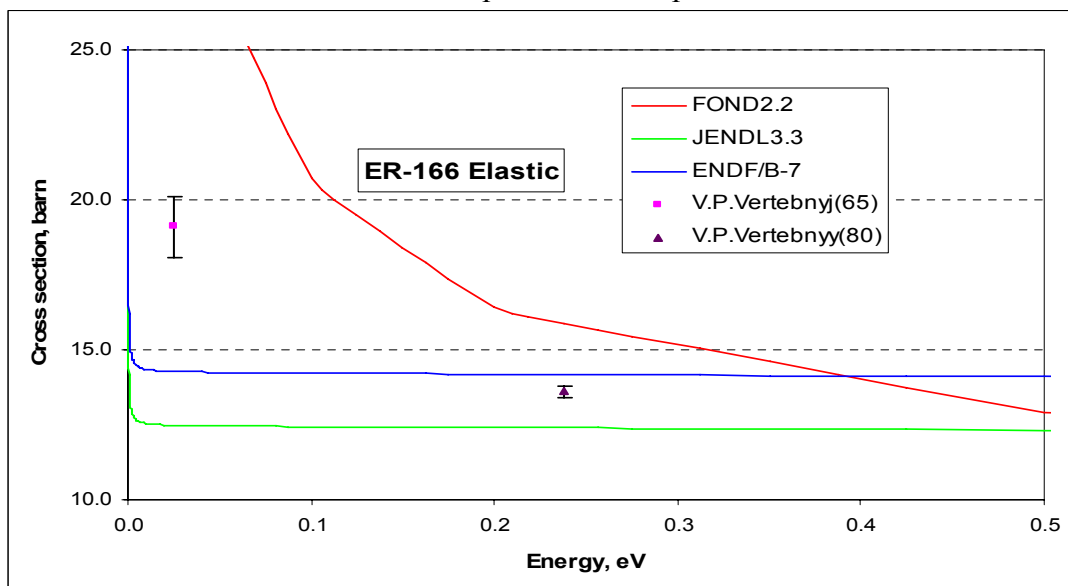


Рис. 4.2. Сечение упругого рассеяния Er-166 при низких энергиях

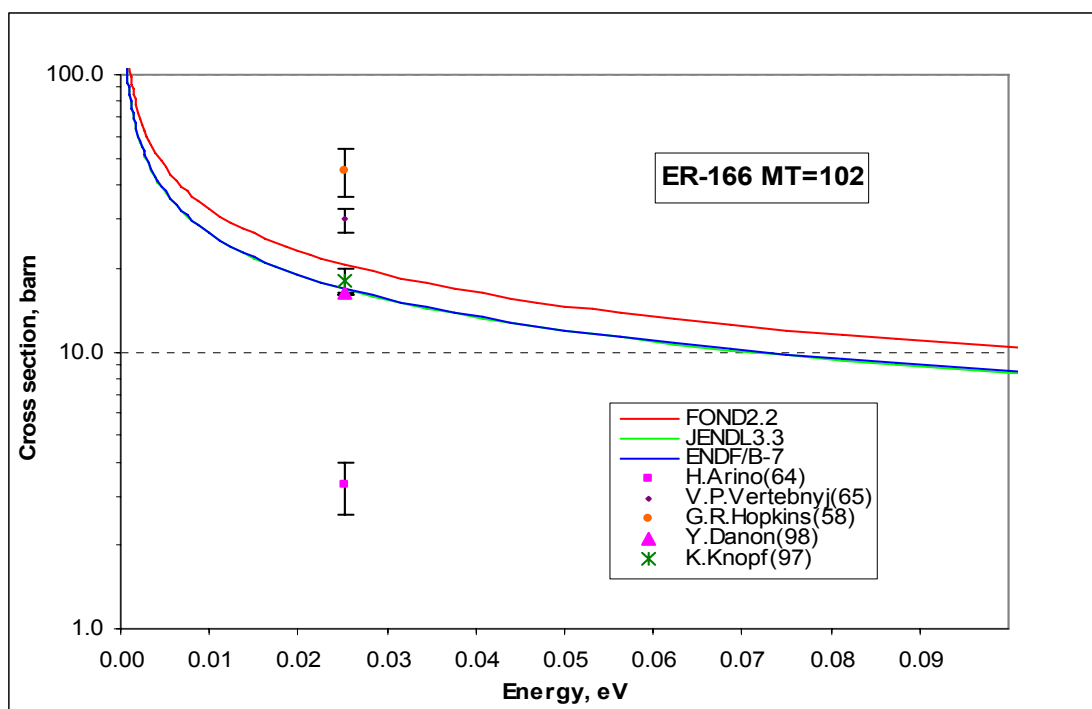


Рис. 4.3. Сечение радиационного захвата Er-166 при низких энергиях

В таблице 4.2 приводятся сечения при 0.0253эВ.

Таблица 3.2

| | FOND2.2 | JENDL3.3 | ENDF/B-7 |
|---------|---------|----------|----------|
| Elastic | 37.1 | 12.448 | 14.236 |
| Capture | 20.6 | 16.765 | 16.872 |
| Total | | 29.213 | 31.107 |

2. Резонансная область

Описание области разрешенных резонансов приводится в Таблице 4.2. Резонансные параметры в FOND-2.2 были взяты из работы Мухабхаба 1966 г.⁹, а в JENDL3.3 приведены более поздние данные того же Мухабхаба¹⁰, сохранившиеся до 2003 г.¹¹, а в ENDF/B-7 – приводятся уже новые данные Мухабхаба(2006г) для более широкой области энергий.

⁹ BAPS 11,3,334,DB2

¹⁰ Neutron Cross Section:Vol.1, Neutron Resonance Parameters and thermal cross Section. Academic Press, 1984.

¹¹ S.F.Mughabghab. Thermal Neutron Cross Sections, Resonance integrals and G-factors. INDC(NDS)-440, IAEA,2003.

Таблица 4.2

| | FOND2.2 | JENDL3.3 | ENDF/B-7 |
|--|--------------------------------|---|----------------|
| Граница области разрешенных резонансов | 4.2 кэВ | 3.0 кэВ | 5.0 кэВ |
| Авторы оценки | Мюллер(1960) Муhabхаб(1966) | Landolt-Boernstein(1998) Y.Danon(1998) Муhabхаб(1984) | Муhabхаб(2006) |
| Радиус рассеяния | 0.767 | 0.8295 | 0.810 |
| Количество разрешенных резонансов | 175 | 78 | 174 |
| Область нерешенных резонансов | 4.2 ÷ 6 кэВ | нет | нет |

На рис. 4.4а,б приведены поведения полного сечения в области разрешенных резонансов.

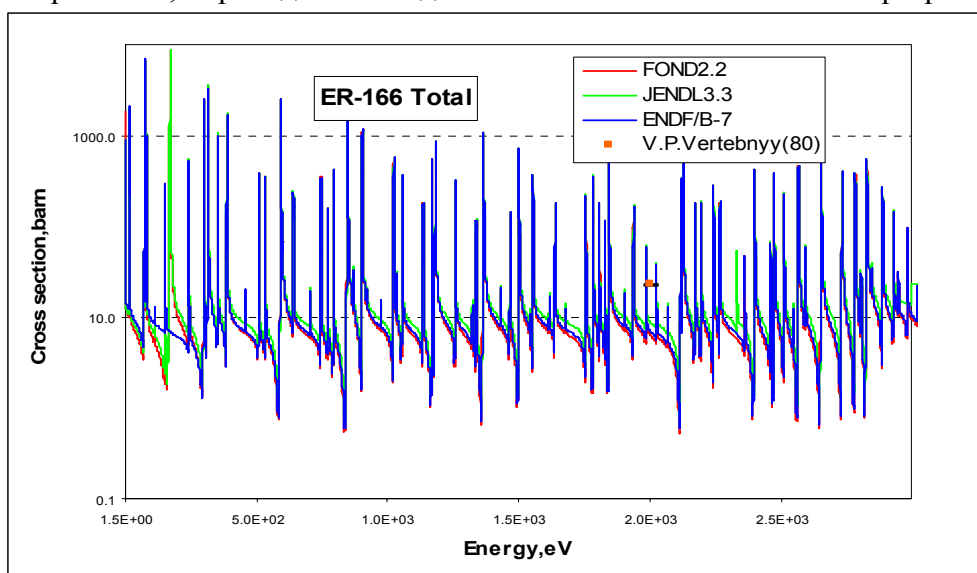


Рис. 4.4.а Полное сечение Er-166 до 3 кэВ

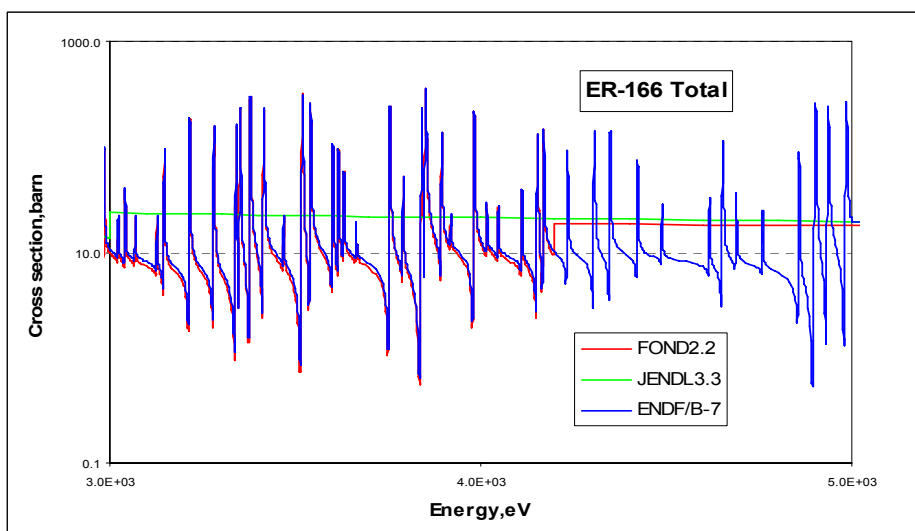


Рис. 4.4.б Полное сечение Er-166 до 5 кэВ

Первый рисунок полного сечения приведен до 3 кэВ – границы разрешенной резонансной области в JENDL3.3. При 2 кэВ есть экспериментальная точка В.П.Вертебного(1980). Следующий рисунок – до границы разрешенной резонансной области в ENDF/B-7. При 4.2 кэВ наблюдается граница и в FOND2.2.

Область неразрешенных резонансов описана только в FOND2.2 до 6 кэВ.

3.Сечения вне резонансной области

Вне резонансной области сечения оценивались на основе модельных расчетов. На рис.4.5 а,b приводится сравнение сечение захвата с экспериментальными данными. Начиная с 5 кэВ оценки JENDL3.3. и ENDF/B-7 совпадают.

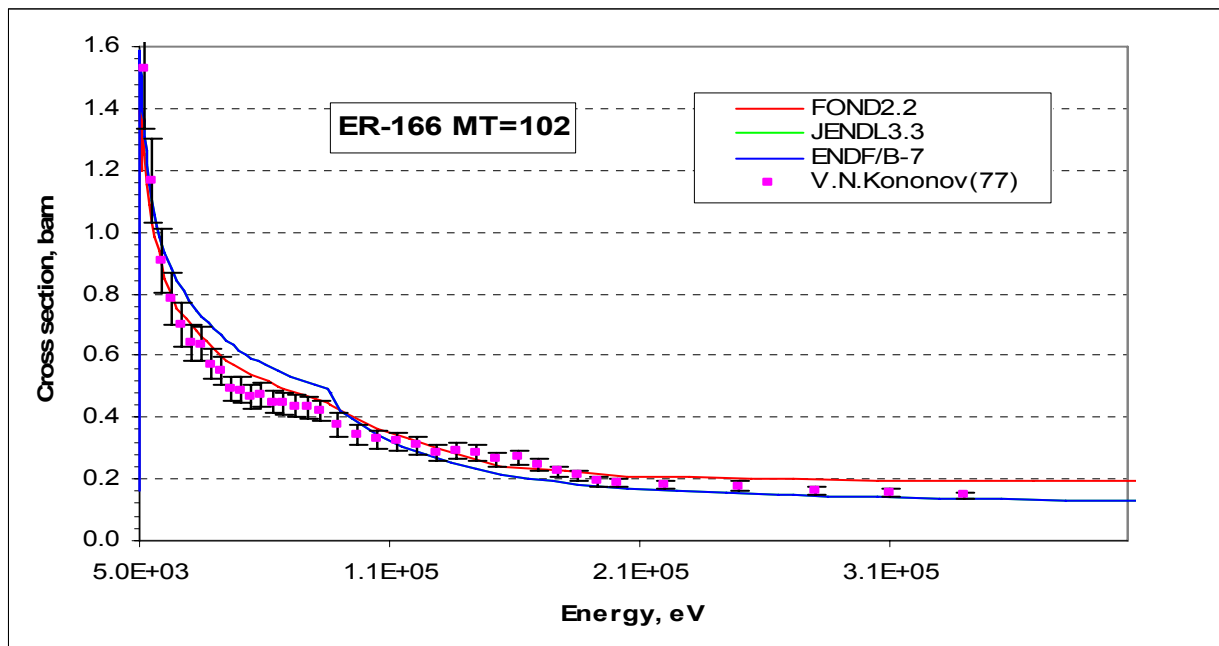


Рис. 4.5.a Сечение радиационного захвата вне резонансной области

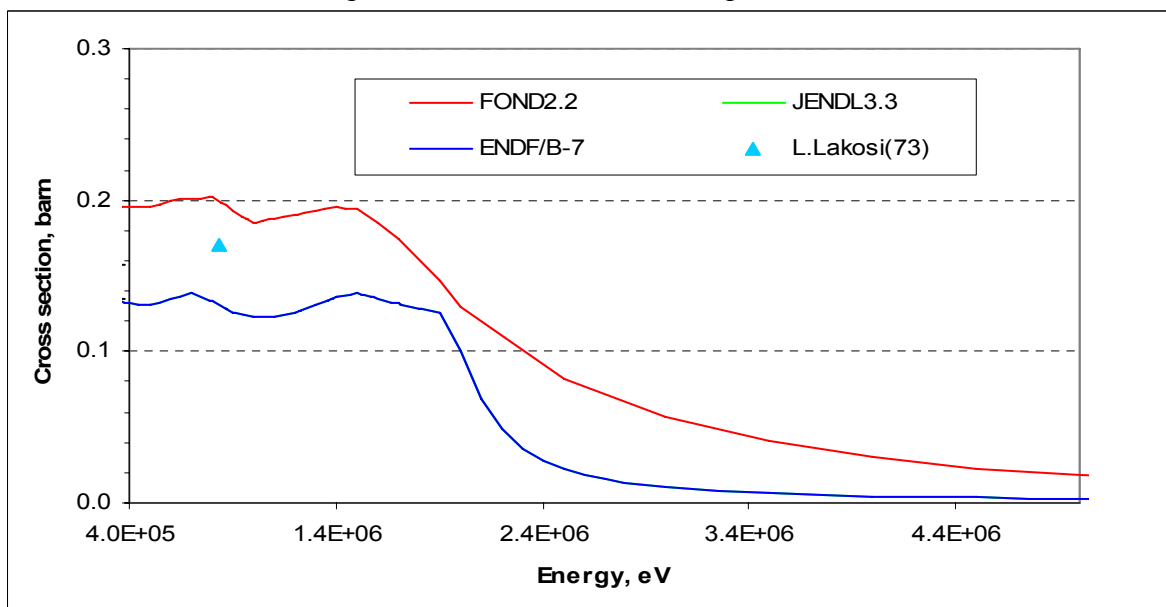


Рис. 4.5.b Сечение радиационного захвата вне резонансной области

Сечения, принятые в JENDL3.3 (ENDF/B-7), описывают экспериментальные данные отнюдь не идеально. Ясно, что результатам Кононова и Лакоси невозможно

удовлетворить одновременно. Однако поведение сечения захвата вблизи порога неупругого рассеяния, очевидно, можно было бы описать лучше, чем это сделано в последней оценке. В области сотен кэВ, оцененная кривая лежит ниже всех экспериментальных данных.

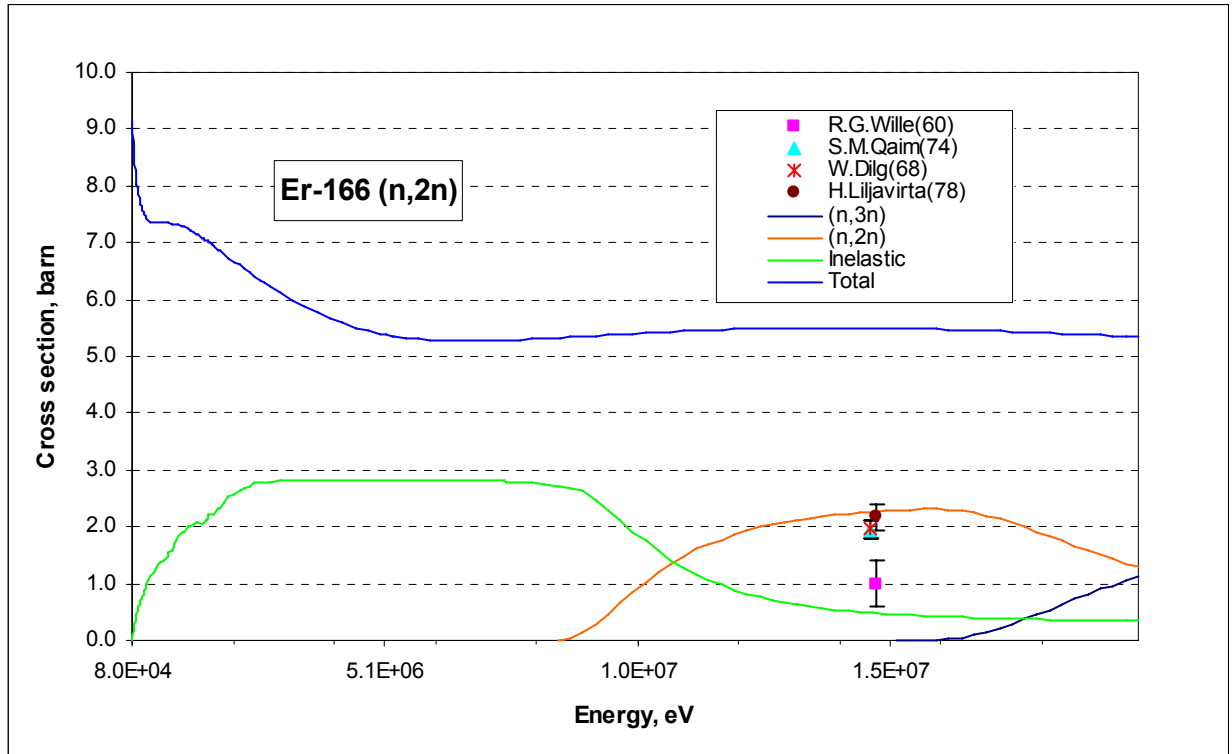


Рис. 4.6. Сечение вне резонансной области

На рис 4.6 приводятся с полным все остальные существенные реакции:

(n,2n),(n3n),неупругое рассеяние. Все экспериментальные данные относятся только к реакции (n,2n). Хорошее согласие со всеми экспериментом наблюдается при энергии 14 МэВ, кроме данных R.G.Wille(1960г).

При новом описании оценки неупругого рассеяния учтено возбуждение каждого из 24 уровней, вместо 7 уровней ранее в FOND2.2.

Таблица 4.4 Схема уровней ER-166 при неупругом рассеянии

| № уровня | Энергия, МэВ | |
|----------|--------------|---------|
| | JENDL3.3 | FOND2.2 |
| 51 | 0.0806 | 0.081 |
| 52 | 0.2650 | 0.265 |
| 53 | 0.5455 | 0.545 |
| 54 | 0.7859 | 0.787 |
| 55 | 0.8594 | 0.86 |
| 56 | 0.9112 | 0.957 |
| 57 | 0.9562 | 1.076 |
| 58 | 1.0753 | |
| 59 | 1.2160 | |
| 60 | 1.3496 | |
| 61 | 1.3760 | |
| 62 | 1.4582 | |
| 63 | 1.4599 | |
| 64 | 1.5134 | |
| 65 | 1.5284 | |

| | | |
|----|--------|--|
| 66 | 1.5557 | |
| 67 | 1.5722 | |
| 68 | 1.5962 | |
| 69 | 1.6624 | |
| 70 | 1.6658 | |
| 71 | 1.6788 | |
| 72 | 1.6923 | |
| 73 | 1.7031 | |
| 74 | 1.7870 | |

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

Экспериментальных данных в EXFOR нет. В обеих оценках энергетические распределения считаются не зависящими от угловых (данные для всех реакций с вылетом вторичных нейтронов приводятся в файлах MF=4 (угловые распределения) и MF=5 (энергетические распределения для реакций с возбуждением непрерывного спектра состояний ядер-продуктов). Угловые распределения нейтронов, испускаемых в реакциях с возбуждением непрерывного спектра ядер-продуктов (MT=16,17, 22, 28), кроме неупругого рассеяния приняты изотропными в лабораторной системе координат. Угловые распределения для упругого и неупругого рассеяния рассчитывались по программе CASTY.

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

Фотонные данные есть в JENDL3.3(ENDF/B7). Приводится следующая информация: неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней ядра-мишени: в файле MF=12 для MT=51-74 приведены вероятности испускания дискретных квантов, соответствующих переходам между уровнями; реакции с возбуждением непрерывного спектра уровней ядер-продуктов – множественности и непрерывные спектры фотонов, рассчитанные по статистической модели (по программе EGNASH), заданные в соответствующих секциях файлов MF=12 MF=15.

Угловые распределения фотонов во всех случаях приняты изотропными.

6. Заключение

6.1. Вывод: В РОСФОНД целесообразно принять оценка JENDL-3.3 (=ENDF/B-7), содержащую последние данные в резонансной области. Эту оценку при желательно уточнить: ввести область неразрешенных резонансов, позволяющую описать ход нейтронных сечений до порога неупругого рассеяния; пересмотреть оценку сечений выше этого порога, обеспечивающую стыковку на пороге и лучше согласующуюся с экспериментальными данными при более высоких энергиях.

В файл включены данные об образовании долгоживущего ($T_{1/2}=1200$ лет) изомера $^{166}\text{No}^m$ в реакции (n,p) на основе данных EAF-2003.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) | (n,p) | (n, α) |
|---------------------------------|----------|----------|-----------|--------|--------|----------------|--------|----------------|
| 0.0253 эВ | 57.7329 | 37.1240 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 20.6089 | 0.0000 | 0.0000 |
| | 31.1646 | 14.2796 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 16.8849 | 0.0000 | 0.0000 |
| Резонансный интеграл | 352.6470 | 242.9210 | 0.0242 | 0.0000 | 0.0000 | 109.7020 | 0.0000 | 0.0000 |
| | 303.4590 | 205.8360 | 0.0161 | 0.0000 | 0.0000 | 97.6070 | 0.0000 | 0.0000 |
| Спектр деления ^{235}U | 6.8838 | 4.7182 | 2.0189 | 0.0029 | 0.0000 | 0.1438 | 0.0000 | 0.0000 |
| | 6.8141 | 4.6475 | 2.0671 | 0.0039 | 0.0000 | 0.0956 | 0.0000 | 0.0000 |
| 14 МэВ | 5.2734 | 3.2292 | 0.3260 | 1.6940 | 0.0000 | 0.0190 | 0.0048 | 0.0004 |
| | 5.5021 | 2.7553 | 0.5357 | 2.2023 | 0.0000 | 0.0019 | 0.0054 | 0.0009 |

6.2. Автор обоснования оцененных данных: Забродская С.В.

68.5. Эрбий-167

1. Общие характеристики

Z=68

A=167

Aw= 1.654980+2

Содержание в естественной смеси: **22.93%**

Перечень нейтронных реакций

Независимые оценки Er-167 представлены в двух библиотеках: FOND2.2 (BROND2,1976) и JENDL3.3(2000), которая полностью перешла в библиотеку JEFF3.1. В библиотеке ENDF/B-7 также содержатся данные JENDL3.3, но с коррекцией области разрешенных резонансов, поэтому на рисунках в этой области будут представлены три оценки. В таблице 4.1 по нейтронным реакциям приводятся энергии реакций (Q) и пороги из библиотек FOND2.2 и JENDL3.3(ENDF/B-7).

Таблица 4.1

| MT | Реакция | JENDL3.3 | |
|-----|----------------------------------|-------------|--------------------------|
| | | Q, МэВ | E _{порог.} , эВ |
| 16 | (n,2n) ^{166}Er | -6.435370+6 | 6.474260+6 |
| 17 | (n,3n) ^{165}Er | -1.491070+7 | 1.500080+7 |
| 22 | (n, α) ^{163}Dy | 6.669080+5 | |
| 28 | (n,np) ^{166}Ho | -7.507030+6 | 7.552390+6 |
| 32 | (n,nd) ^{165}Ho | -1.152680+7 | 1.159640+7 |
| 102 | (n, γ) ^{168}Er | 7.770700+6 | |
| 103 | (n,p) ^{167}Ho | -2.246610+5 | 2.260180+5 |
| 104 | (n,d) ^{166}Ho | -5.282460+6 | 5.314380+6 |
| 105 | (n,t) ^{165}Ho | -5.268720+6 | 5.300560+6 |
| 107 | (n, α) ^{164}Dy | 8.325280+6 | |

Энергии нейтронных реакций, приведенные в файлах оцененных данных, удовлетворительно согласуются с порогами этих реакций.

Радиоактивность: не радиоактивен

2. Область низких энергий

На рис.1, 2 и 3 приведены полное сечение, сечение радиационного захвата и сечение упругого рассеяния до 1 эВ. Для Er-167 важны два первых резонанса 0.46 и 0.584 эВ. Полное сечение в оценках JENDL3.3 и ENDF/B-7 проходит по точкам, полученным в

измерениях Н.В.Моллера, чего нельзя сказать про оценку ФОНД-2.2, в которой принята параметризация, выполненная самим Моллером. Единственный эксперимент В.П.Вертебного(1965) для упругого рассеяния существенно отличается от всех расчетных кривых сечения. Вполне возможно, что сечение упругого рассеяния даже в последней оценке, принятой в ENDF/B-VII, занижено. Однако, поскольку роль упругого рассеяния на эрбии-167 ничтожно мала, острая необходимость в переоценке отсутствует. В таблице 4.2 приводятся сечения в тепловой точке.

Таблица 4.2

| | FOND2.2 | JENDL3.3 | ENDF/B-7 |
|---------------------|---------|----------|----------|
| Упругое рассеяние | 26.8 | 1.335 | 2.4509 |
| Радиационный захват | 653. | 642.274 | 649.00 |
| Полное сечение | | 643.609 | 651.45 |

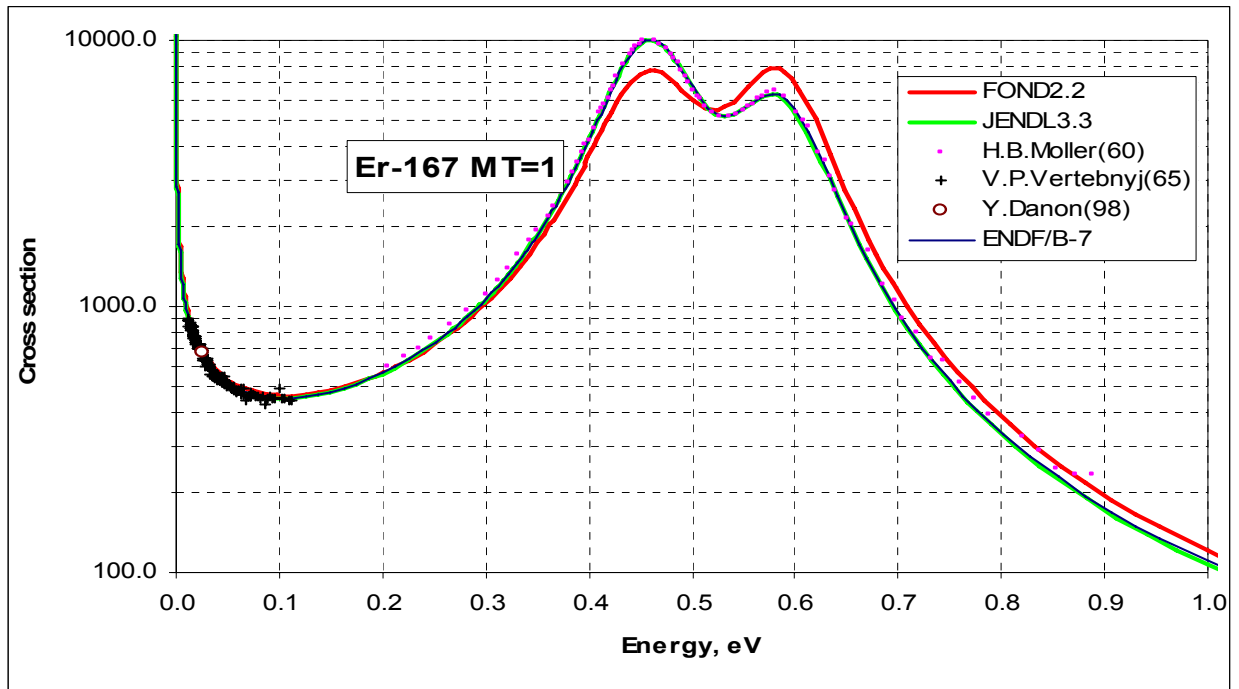


Рис.4.1 Полное сечение при низких энергиях

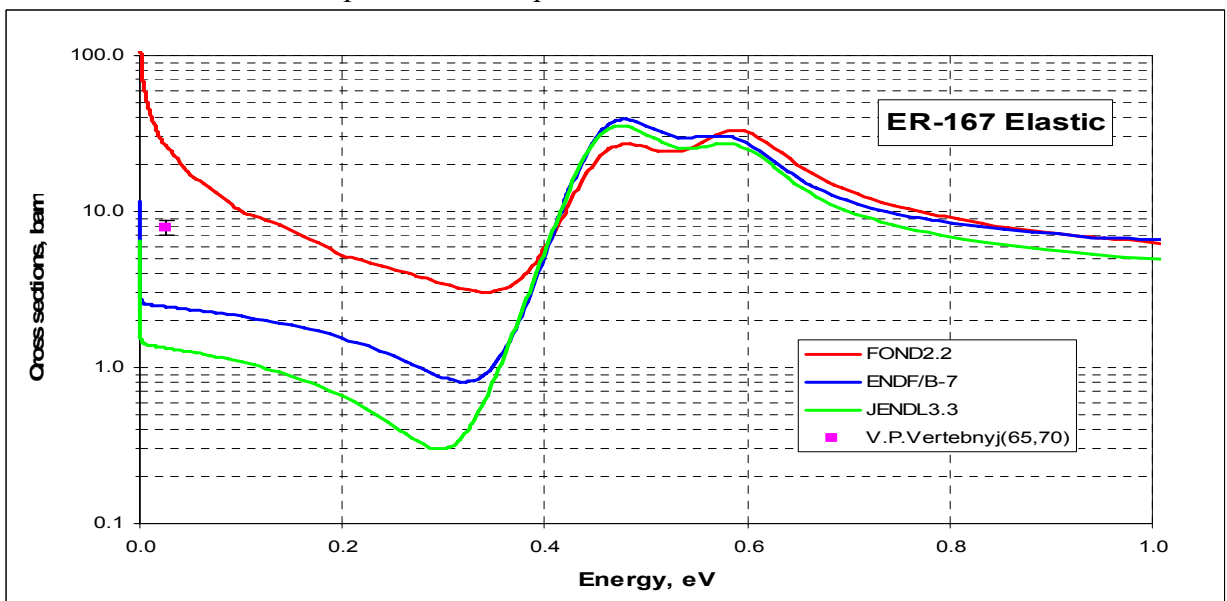


Рис.4.2 Сечение упругого рассеяния при низких энергиях

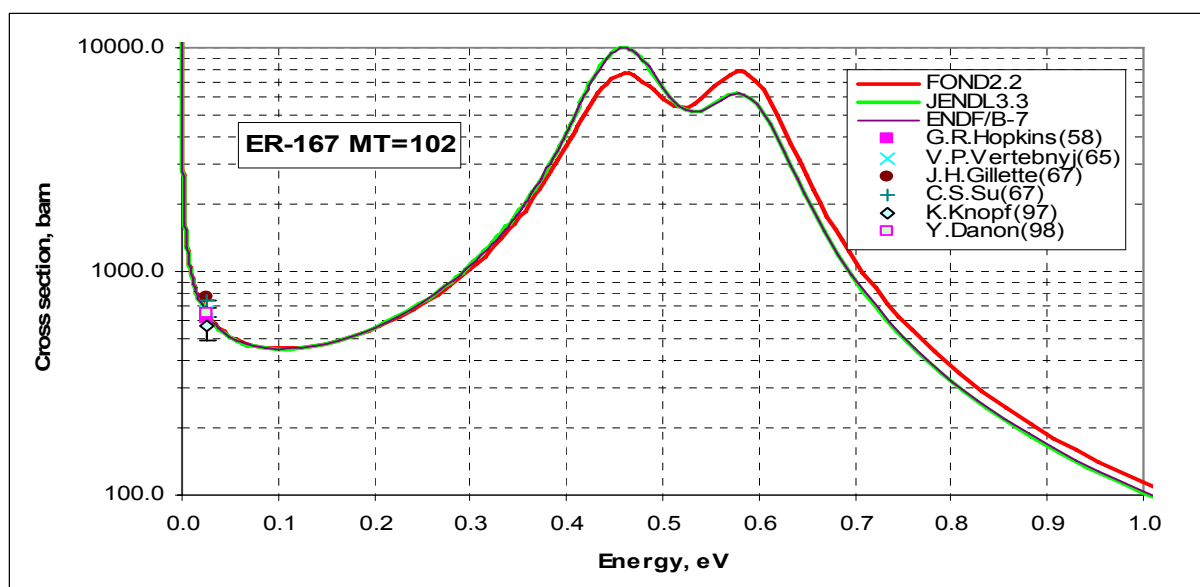


Рис.4.3 Сечение радиационного захвата при низких энергиях

3. Резонансная область

Область разрешенных резонансов представлена в библиотеках по-разному. Из таблицы 4.2 видно, что область разрешенных резонансов в FOND2.2 и JENDL3.3 практически совпадает 500 и 591 эВ, в ENDF/B-7 область разрешения тянется до 1.75 кэВ. Область неразрешенных резонансов в FOND2.2 тянется всего до 1 кэВ, в остальных библиотеках - до 10 keV.

Таблица 4.3

| | FOND2.2 | JENDL3.3 | ENDF/B-7 |
|-----------------------------------|--------------------------------|---|-------------------------------|
| Область разрешенных резонансов | 1.0E-5 ÷ 0.5 кэВ | 1.0E-5 ÷ 0.591 кэВ | 1.0E-5 ÷ 1.75 кэВ |
| Оценка | Мюллер(1960) Мухабхаб(1966) | Landolt-Boernstein(1998) Y.Danon(1998) Мухабхаб(1984) | Мухабхаб(2006) |
| Радиус рассеяния | 0.989 | 0.820 | 0.790 |
| Количество разрешенных резонансов | 272 (макс. энергия 1686 эВ) | 124 (макс. энергия 590.1 эВ) | 270 (макс. энергия 1686.4 эВ) |
| Область нерешенных резонансов | 0.5 ÷ 1 кэВ | 0.591 ÷ 10 кэВ | 1.75 ÷ 10 кэВ |

Выбор параметров в ENDF/B-7 был основан на последней оценке Мухабхаба, не учитывающей, видимо, каких-либо новых экспериментальных данных. Неясно, что позволило продлить область разрешенных резонансов до 1750 эВ. Максимальная энергия в работе H.I.Liou et al (EXFOR -10591001) равна 1689 эВ и резонанс с максимальной энергией обнаружен именно в этой работе. В интервале 1690-1775 эВ должно содержаться около 10 s-резонансов. Провал в сечении захвата отчетливо виден на рис. 4.4с. В новой оценке изменена параметризация сечений в тепловой области: введено связанное состояние при -23.6 эВ. Понижен также радиус рассеяния.

На рисунках 4.4(a,b,c) представлено полное сечение в резонансной области:

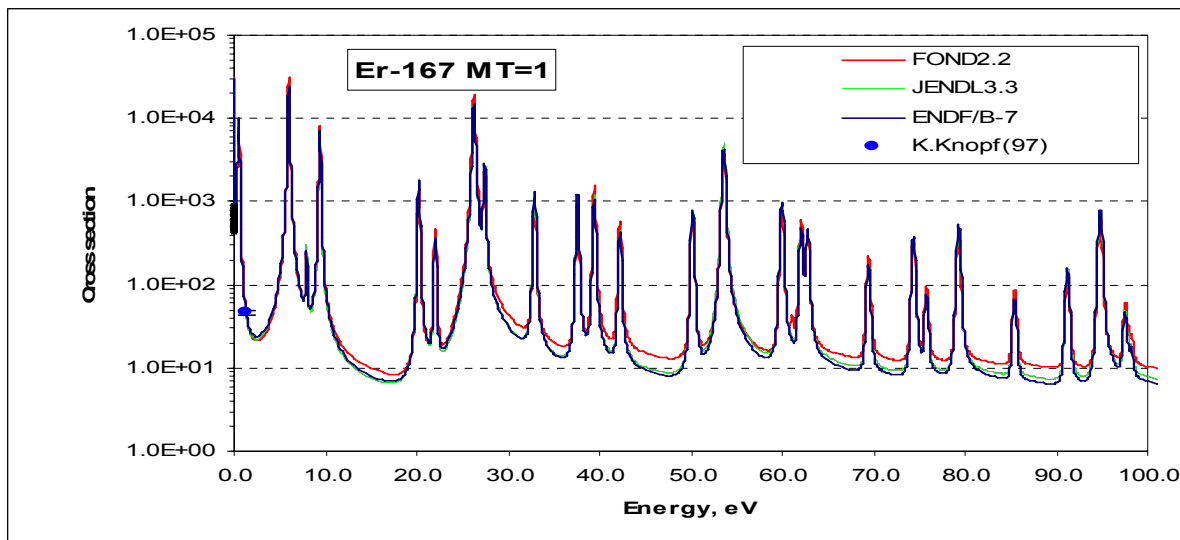


Рис.4.4а Полное сечение в области разрешенных резонансов

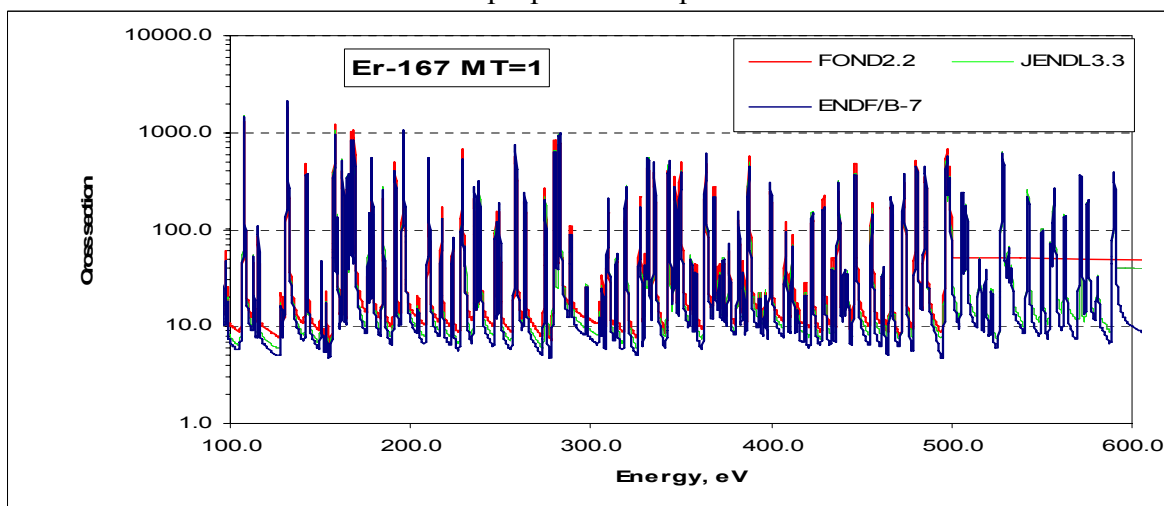


Рис.4.4б Полное сечение в области разрешенных резонансов

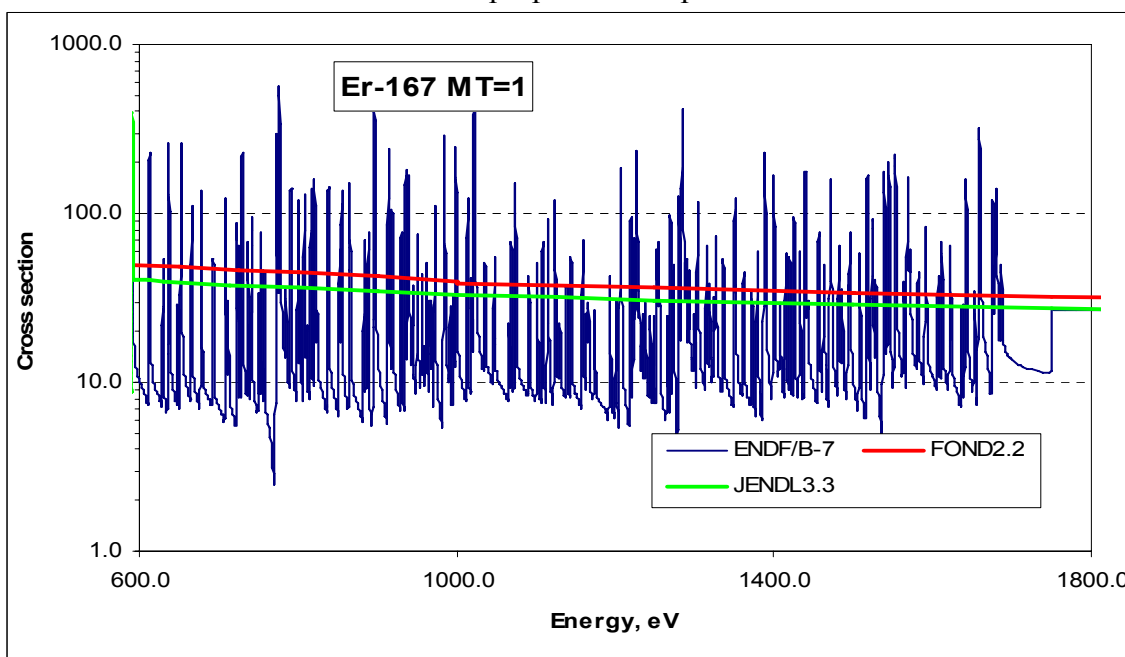


Рис.4.4с Полное сечение в области разрешенных резонансов

Из рис.4а видно, что в оценках приводятся разные резонансные параметры, данные JENDL3.3 ближе к ENDF/B-7. Далее до 500 и 591 эВ – картина сохраняется(рис 4.4в). После 1.75 кэВ оценка ENDF/B-7 совпадает с JENDL3.3.

Графики сечений радиационного захвата повторяют ситуации с полным сечением и здесь не приводятся.

Область неразрешенных резонансов: в FOND2.2 область неразрешенных резонансов представлена в формате, когда средние резонансные параметры зависят от энергии. В ENDF/B-7 использована оценка JENDL3.3, в которой средние параметры также не зависят от энергии.

Представляется целесообразным принять в РОСФОНД оценку из ENDF/B-VII, ограничив область разрешенных резонансов 1690 эВ.

3. Сечения вне резонансной области

Вне резонансной области сечения оценивались на основе модельных расчетов. На рис.4.5а,б приводится сравнение сечение захвата с экспериментальными данными. Оценка JENDL3.3(=ENDF/B-7) проходит по данным двух экспериментов, которые проводились с разницей 20 лет – В.С. Шорин (1978) и А.К.Нарун(2001).

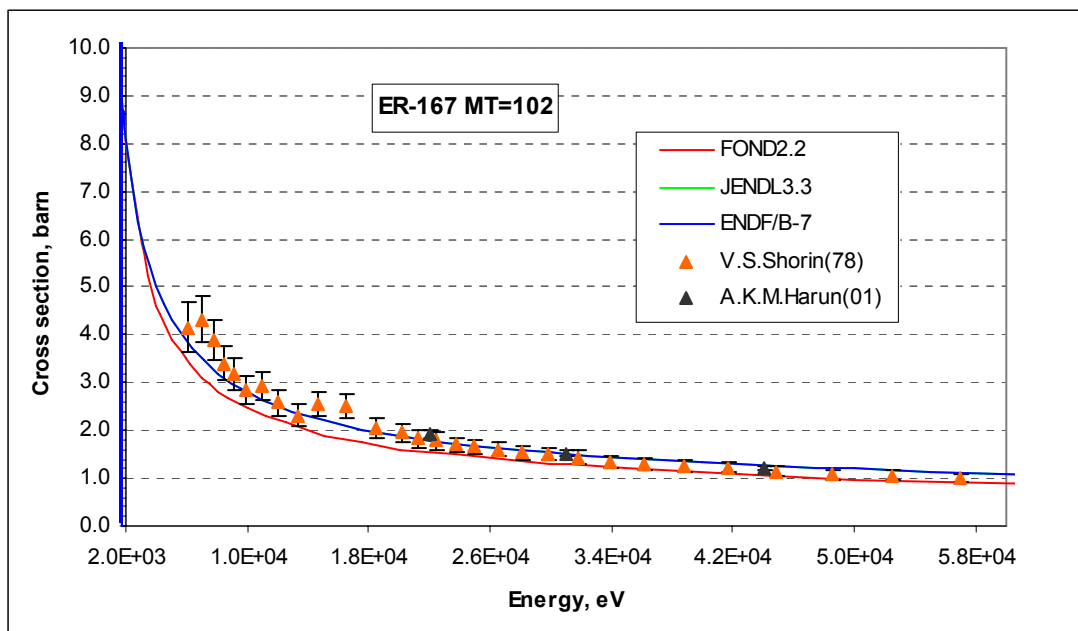


Рис.4.5а Сечение радиационного захвата вне резонансной области

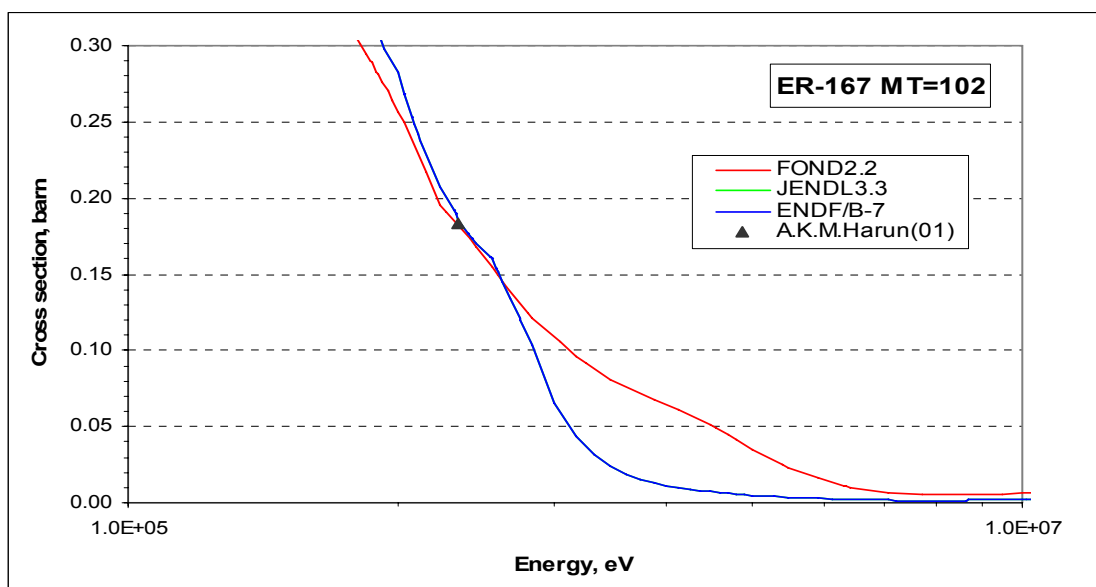


Рис.4.5b Сечение радиационного захвата вне резонансной области

На рис 4.6 приводятся, в сравнении с полным сечением, сечения всех остальных существенных реакций: (n,2n), (n3n), неупругое рассеяние. Все экспериментальные данные относятся только к неупругому рассеянию. Приемлемое согласие с экспериментом наблюдается только при энергии 14 МэВ. Расхождение между экспериментальными и оцененными данными при более низких энергиях, вероятно, обусловлено недооценкой в эксперименте неупругого рассеяния с возбуждением низколежащих уровней эрбия. Первый уровень эрбия-167 имеет энергию 79 кэВ и рассеяние с возбуждением этого уровня при начальной энергии нейтронов порядка 1 МэВ нелегко отделить от упругого рассеяния.

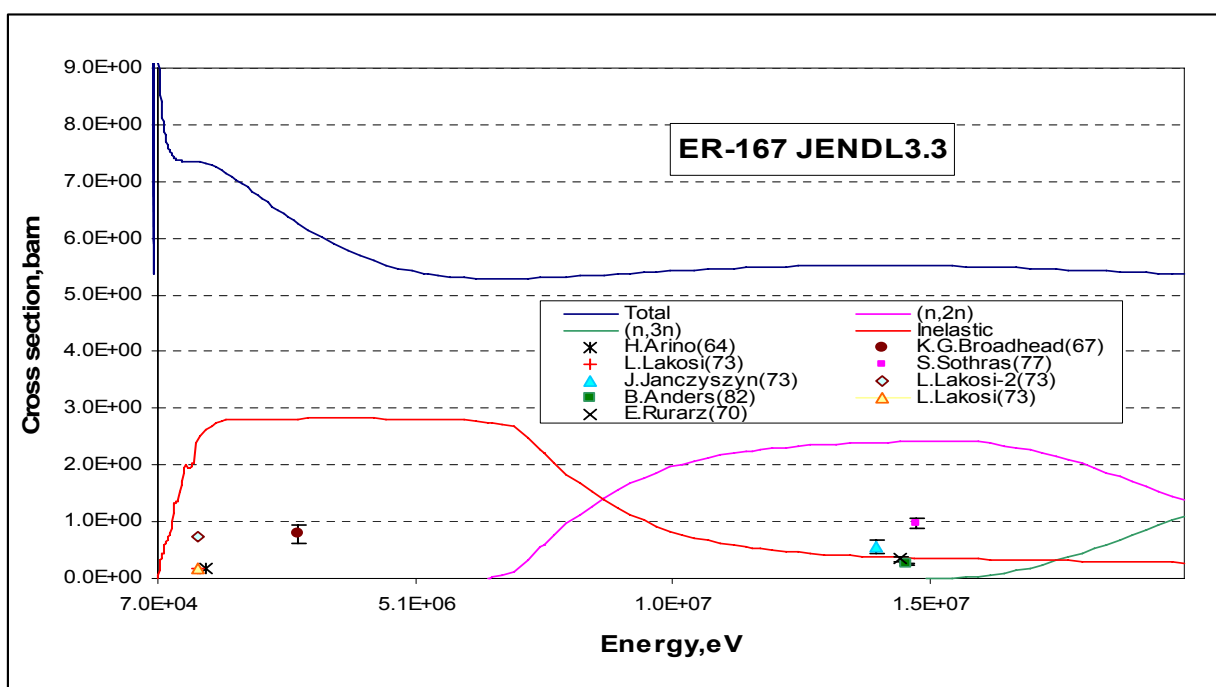


Рис.4.5b Сечение вне резонансной области

В новой оценке неупругого рассеяния учтено возбуждение каждого из 23 уровней (вместо 7 уровней, учитывавшихся в FOND2.2).

Таблица 4.4 Схема уровней ER-167 при неупругом рассеянии

| № уровня +50 | Энергия, МэВ | |
|--------------|--------------|---------|
| | JENDL3.3 | FOND2.2 |
| 51 | 0.0793 | 0.0793 |
| 52 | 0.1780 | 0.1780 |
| 53 | 0.2078 | 0.2080 |
| 54 | 0.2649 | 0.2650 |
| 55 | 0.2816 | 0.2820 |
| 56 | 0.2949 | 0.2960 |
| 57 | 0.3466 | 0.3460 |
| 58 | 0.4133 | |
| 59 | 0.4300 | |
| 60 | 0.4344 | |
| 61 | 0.4420 | |
| 62 | 0.5315 | |
| 63 | 0.5358 | |
| 64 | 0.5738 | |
| 65 | 0.5874 | |
| 66 | 0.6408 | |
| 67 | 0.6452 | |
| 68 | 0.6624 | |
| 69 | 0.6679 | |
| 70 | 0.6833 | |
| 71 | 0.7110 | |
| 72 | 0.7111 | |
| 73 | 0.7453 | |

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

Экспериментальных данных в EXFOR нет. В обеих оценках энергетические распределения считаются не зависящими от угловых (данные для всех реакций с вылетом вторичных нейтронов приводятся в файлах MF=4 (угловые распределения) и MF=5 (энергетические распределения для реакций с возбуждением непрерывного спектра состояний ядер-продуктов). Угловые распределения нейтронов, испускаемых в реакциях с возбуждением непрерывного спектра ядер-продуктов (MT=16,17, 22, 28), кроме неупругого рассеяния приняты изотропными в лабораторной системе координат. Угловые распределения для упругого и неупругого рассеяния рассчитывались по программе CASTY.

6. Образование фотонов в нейтронных реакциях

В JENDL3.3 (ENDF/B7) приводится следующая информация:
 неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней ядра-мишени:
 в файле MF=12 для MT=51-73 приведены вероятности испускания дискретных квантов, соответствующих переходам между уровнями;
 реакции с возбуждением непрерывного спектра уровней ядер-продуктов – множественности и непрерывные спектры фотонов, рассчитанные по статистической модели (по программе EGNASH), заданные в соответствующих секциях файлов MF=12 MF=15.
 Угловые распределения фотонов во всех случаях приняты изотропными.

7. Заключение

6.1. Вывод: В РОСФОНДе принимается оценка ENDF/B-7, с упомянутой выше коррекцией границы области разрешенных резонансов.

В файл включены данные об образовании долгоживущего ($T_{1/2}=1200$ лет) изомера $^{166}\text{Ho}^m$ в реакциях(n,d) и (n,n'p) на основе данных EAF-2003.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) | (n,p) | (n, α) |
|---------------------------------|-----------------|----------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0.0253 эВ | 680.842 | 26.756 | 0 | 0 | 0 | 654.086 | 0 | 6.96E-05 |
| | 652.575 | 2.457 | 0 | 0 | 0 | 650.118 | 0 | 0 |
| Резонансный интеграл | 4000.140 | 602.899 | 0.100 | 0 | 0 | 3397.140 | 0 | 3.12E-05 |
| | 3495.420 | 493.890 | 0.030 | 0 | 0 | 3001.500 | 0 | 0 |
| Спектр деления ^{235}U | 6.865 | 4.543 | 2.197 | 0.013 | 5.17E-06 | 0.112 | 3.80E-06 | 4.50E-07 |
| | 6.832 | 4.320 | 2.401 | 0.017 | 7.44E-06 | 0.094 | 5.60E-06 | 5.07E-06 |
| 14 МэВ | 5.300 | 3.226 | 0.126 | 1.934 | 0 | 0.007 | 6.00E-03 | 6.00E-04 |
| | 5.519 | 2.724 | 0.388 | 2.397 | 0 | 0.002 | 5.64E-03 | 1.70E-03 |

6.2. Автор обоснования оцененных данных: Забродская С.В.

68.6. Эрбий-168

1. Общие характеристики

Z=68

A=168

Aw= 1.664870+2

Содержание в естественной смеси: **26.78%**

Перечень нейтронных реакций

Независимые оценки Er-166 представлены в двух библиотеках FOND2.2(1976) и JENDL3.3(2000), которая полностью перешла в библиотеку JEFF3.1. В библиотеке ENDF/B-7 также содержатся данные JENDL3.3, но с коррекцией резонансных параметров. В таблице по нейтронным реакциям приводятся энергии реакций и их пороги.

Таблица 6.1

| MT | Реакция | JENDL3.3 | |
|-----|----------------------------------|-------------|--------------------------|
| | | Q, МэВ | E _{порог.} , эВ |
| 16 | (n,2n) ^{165}Er | -7.771370+6 | 7.818050+6 |
| 17 | (n,3n) ^{164}Er | 1.420670+7 | 1.429200+7 |
| 22 | (n, α) ^{164}Dy | 5.539080+5 | |
| 28 | (n,np) ^{165}Ho | 7.996030+6 | |
| 32 | (n,nd) ^{164}Ho | 1.305380+7 | 1.313220+7 |
| 102 | (n, γ) ^{167}Er | 6.003700+6 | |
| 103 | (n,p) ^{166}Ho | -1.936660+6 | 1.948290+6 |
| 104 | (n,d) ^{165}Ho | -5.771460+6 | 5.806130+6 |
| 105 | (n,t) ^{164}Ho | -6.795720+6 | 6.836540+6 |
| 107 | (n, α) ^{163}Dy | 6.270280+6 | |

Энергии нейтронных реакций, приведенные в файлах оцененных данных, удовлетворительно согласуются с порогами этих реакций ($E_{\text{пор}}=Q*(AWR+1)/AWR$). В оценке JENDL3.3 набор нейтронных реакций представлен шире.

Радиоактивность: не радиоактивен

2.Область низких энергий

На рис.6.1, 6.2 и 6.3 приведены оцененные полное сечение, сечение радиационного захвата и сечение упругого рассеяния в области низких энергий, а также соответствующие экспериментальные данные. Последние, как видно, весьма противоречивы. Расчетные сечения радиационного захвата по всем оценкам точно одинаковы и все проходят через данные М.Такіие(78). Сумма измеренных сечений захвата и рассеяния оказывается существенно ниже результатов измерений полного сечения и Вертебным и Мухабхабом. В то же время при 1.3 эВ, оцененная кривая лежит заметно выше результата Кнопфа. Данные Вертебного внутренне противоречивы: $\sigma_c + \sigma_s = 6.0 \text{ барн} + 13.1 \text{ барн} = 18.1 \text{ барн} \ll \sigma_t = 35 \text{ барн}$.

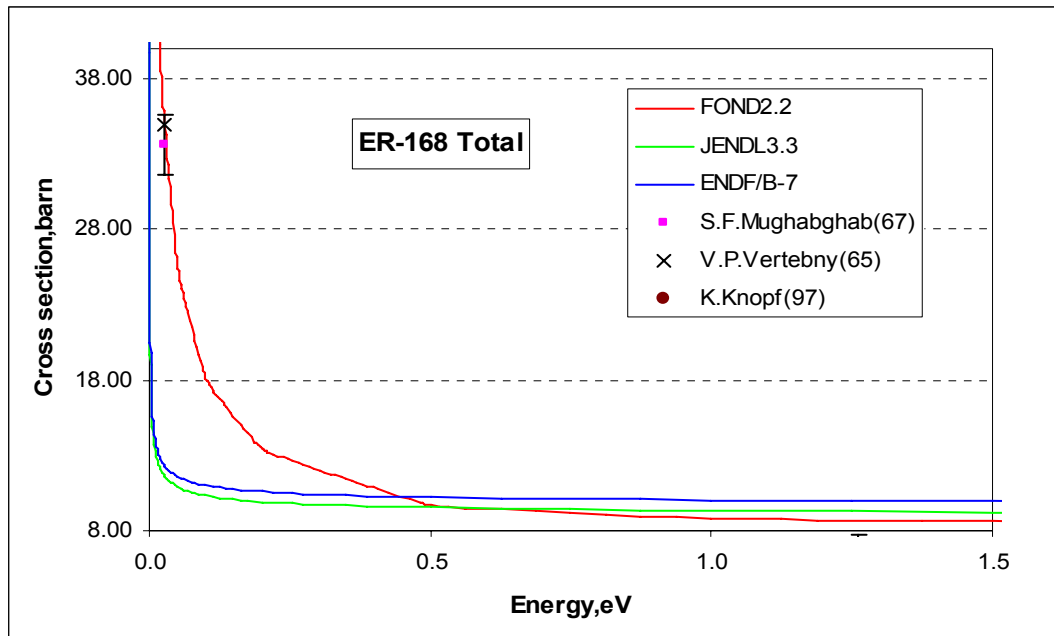


Рис.6.1 Полное сечение Er-168 при низких энергиях

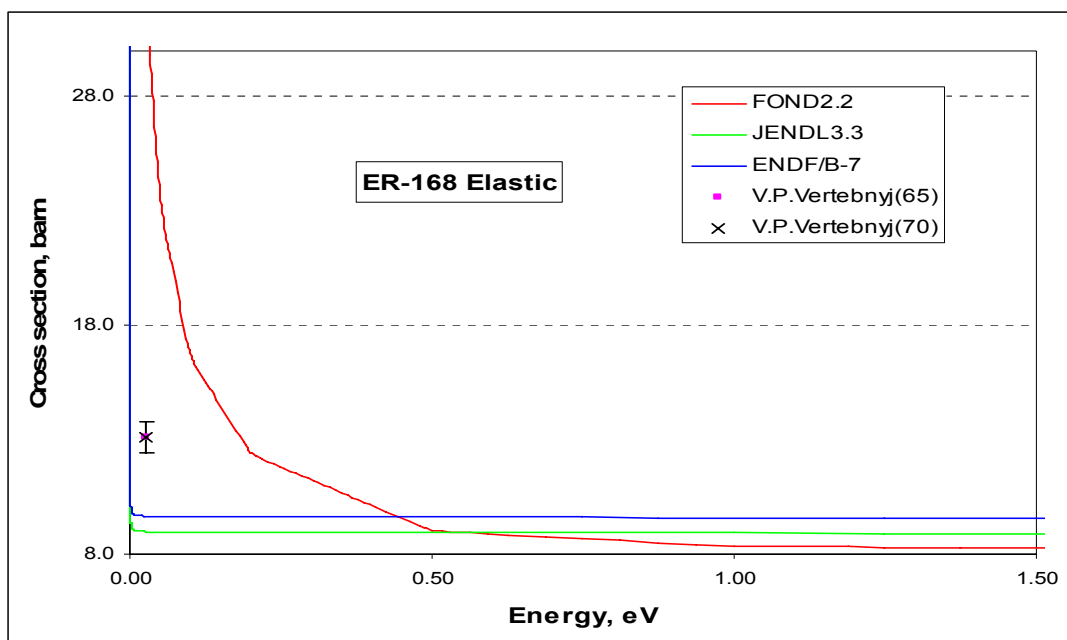


Рис.6.2. Сечение упругого рассеяния при низких энергиях

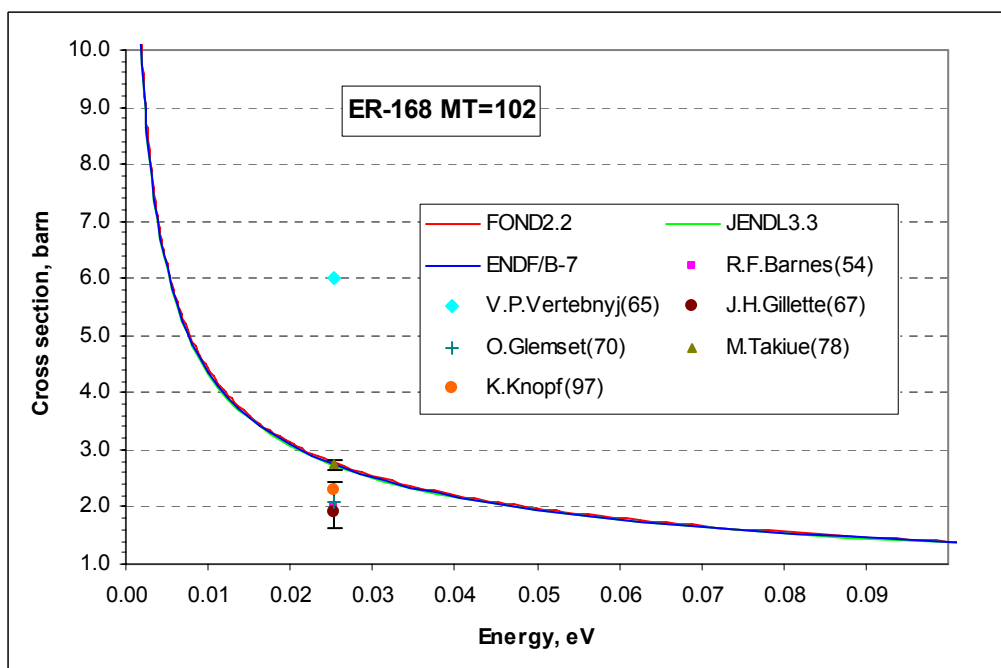


Рис.6.3. Сечение радиационного захвата при низких энергиях

В таблице 6.2 приводятся оцененные сечения при 0.0253 эВ.

Таблица 6.2

| | FOND2.2 | JENDL3.3 | ENDF/B-7 |
|---------------------|---------|----------|----------|
| Elastic | 33.2 | 8.957 | 9.6322 |
| Capture | 2.78 | 2.729 | 2.7412 |
| Total | | 11.687 | 12.373 |
| Res.integ.(capture) | 38.5 | 38.311 | 37.1 |

Как видим, расхождения велики только в сечении рассеяния.

3. Резонансная область

Область разрешенных резонансов описана в оценках по-разному. В таблице 5.3 приводятся границы этой области. В ENDF/B-7 она равна 15 кэВ, т.е. намного выше, чем в предыдущих оценках.

На рис. 6.4а,в приводится полное сечение в области разрешенных резонансов. На них четко видны все границы.

Таблица 6.2

| | FOND2.2 | JENDL3.3 | ENDF/B-7 |
|--|-----------------------------|--|----------------|
| Граница области разрешенных резонансов | 5.0 кэВ | 3.5 кэВ | 15.0 кэВ |
| Оценка | Лью(1970) Мухабхаб(1966) | Landolt- Voernstein(1998) Мухабхаб(1984) | Мухабхаб(2006) |
| Радиус рассеяния | 0.767 | 0.760 | 0.780 |
| Количество разрешенных резонансов | 106(l=0)+24(l=1) | 34+21 | 102+28 |
| Область неразрешенных резонансов | 5. ÷ 6 кэВ | нет | нет |

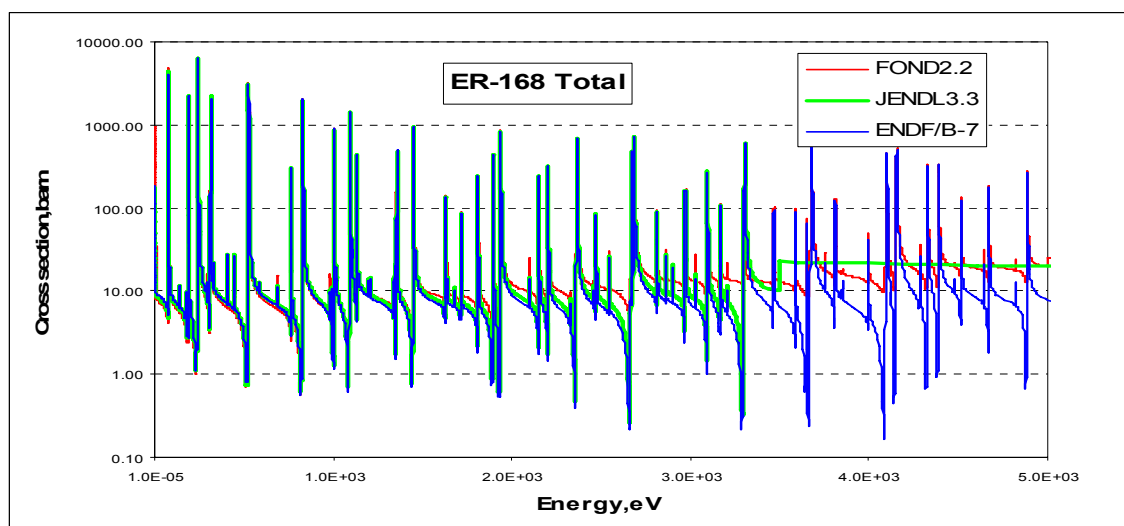


Рис.6.4а. Полное сечение в области разрешенных резонансов

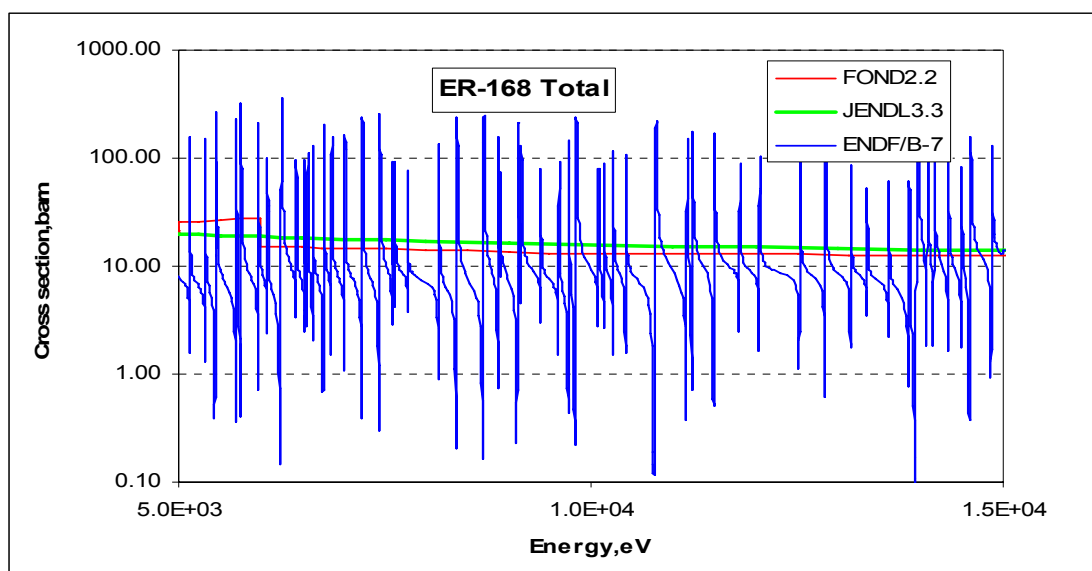


Рис.6.4б. Полное сечение в области разрешенных резонансов

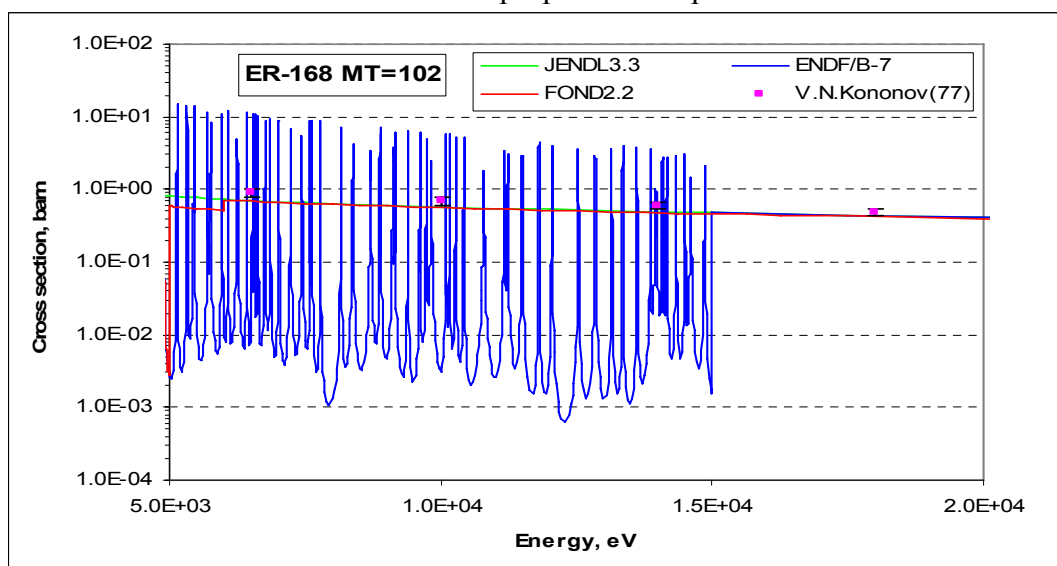


Рис.6.5. Сечение радиационного захвата в области разрешенных резонансов

Как видно из приведенных рисунков, вблизи границы разрешенных резонансов в новой оценке среднее сечение захвата существенно ниже, чем в предыдущих, что заставляет заподозрить пропуск значительной части резонансов. На рис. 6.6 приведены нарастающие суммы числа резонансов. Видно, что выше 5 кэВ пропуск s-резонансов становится существенным. Пропущены и все p-резонансы.

На рис.6.5 показано сечение радиационного захвата с 5 до 20 кэВ, где есть экспериментальные данные В.Н.Кононова (1977), начиная с 6.5 кэВ. В этой области наблюдается хорошее согласие с экспериментом оценок FOND2.2 и JENDL3.3. и резкое противоречие экспериментальным данным новой оценки.

Очевидно, оценка ENDF/B-VII выше 5 кэВ не может быть рекомендована в РОСФОНД.

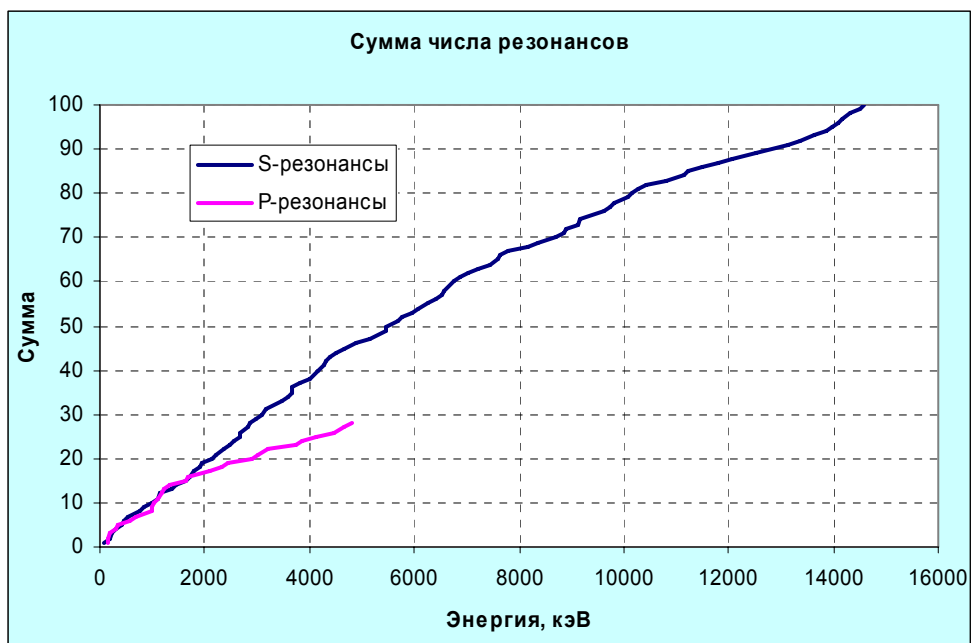


Рис.6.6. Нарастающие суммы числа резонансов (оценка ENDF/B-VII)

Область неразрешенных резонансов представлена только в FOND-2.2, где она простирается только до 6 кэВ (от 5 кэВ). Вводить столь узкую область неразрешенных резонансов в этой узкой области представляется нецелесообразным.

3. Сечение захвата вне резонансной области

В JENDL3.3 сечение радиационного захвата было получено на основе статистической модели и рассчитано по программе GNASH. В библиотеке ENDF/B-7 выше 1.5 кэВ без изменения взята оценка JENDL3.3. На рис. 6.7 а,b приводится продолжение экспериментальных данных В.Н.Кононова (1977). До 100 кэВ новая оценка с ними согласуется приемлемо, но при более высоких энергиях идет заметно ниже.

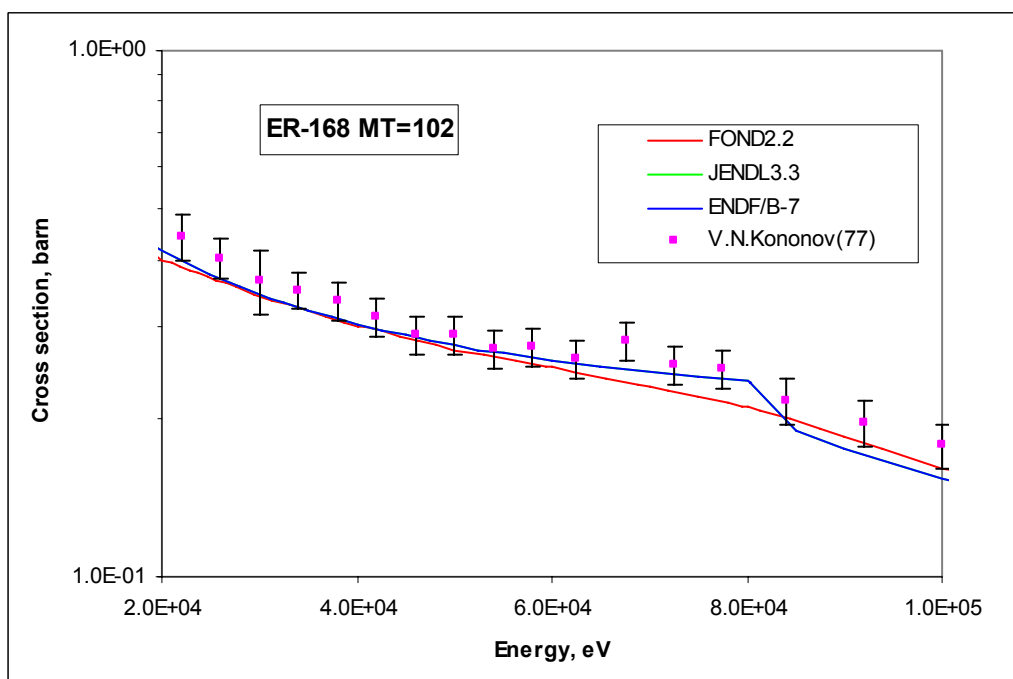


Рис.6.7а Сечение реакции (n,γ)

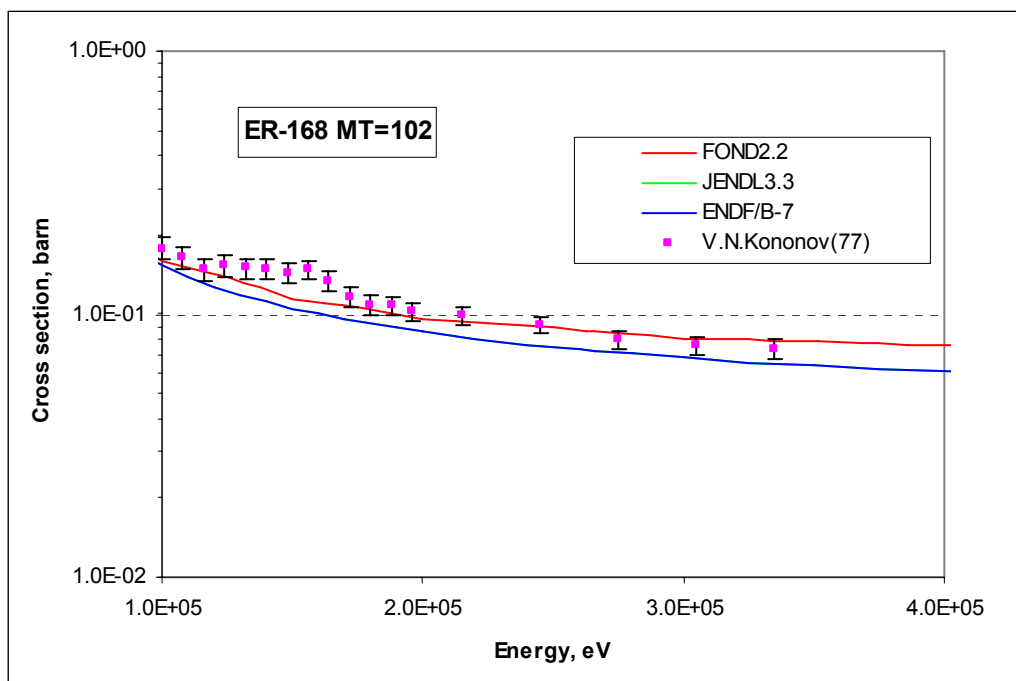


Рис.6.7b Сечение реакции (n, γ)

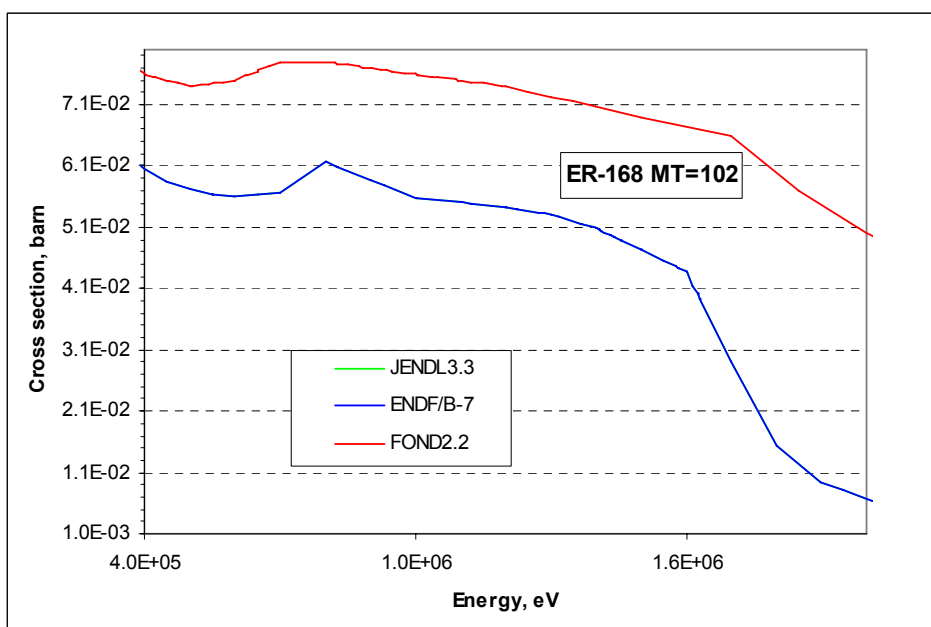


Рис.6.7с Сечение реакции (n, γ)

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

Экспериментальных данных в EXFOR нет. В обеих оценках энергетические распределения считаются не зависящими от угловых (данные для всех реакций с вылетом вторичных нейтронов приводятся в файлах MF=4 (угловые распределения) и MF=5 (энергетические распределения для реакций с возбуждением непрерывного спектра состояний ядер-продуктов). Угловые распределения нейтронов, испускаемых в реакциях с возбуждением непрерывного спектра ядер-продуктов (MT=16,17, 22, 28), кроме неупругого рассеяния приняты изотропными в лабораторной системе координат. Угловые распределения для упругого и неупругого рассеяния рассчитывались по программе CASTY.

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

В JENDL3.3 (ENDF/B7) приводится следующая информация:

неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней ядра-мишени:

в файле MF=12 для MT=51-79 приведены вероятности испускания дискретных квантов, соответствующих переходам между уровнями;

реакции с возбуждением непрерывного спектра уровней ядер-продуктов –

множественности и непрерывные спектры фотонов, рассчитанные по статистической модели (по программе EGNASH), заданные в соответствующих секциях файлов MF=12 MF=15.

Угловые распределения фотонов во всех случаях приняты изотропными.

6. Заключение

6.1. Вывод: В РОСФОНД целесообразно принять оценку JENDL-3.3, заменив резонансные параметры на те, что в ENDF/B-VII, но снизив границу области разрешенных резонансов до 5 кэВ.

В файл включить данные об образовании долгоживущего ($T_{1/2}=1200$ лет) изомера ^{166m}Ho в реакциях (n,t) и (n,n'd) на основе данных EAF-2003.

6.2. Авторы обоснования оцененных данных: Забродская С.В. Кошечев В.Н.

68.7. Эрбий-169.

Испытывает позитронный распад с периодом $T_{1/2}=9.4$ дн.

В ФОНД-2.2 – J.Копецкы, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation) – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют. Из рисунка видно, что никаких изменений по сечению радиационного захвата не произошло.

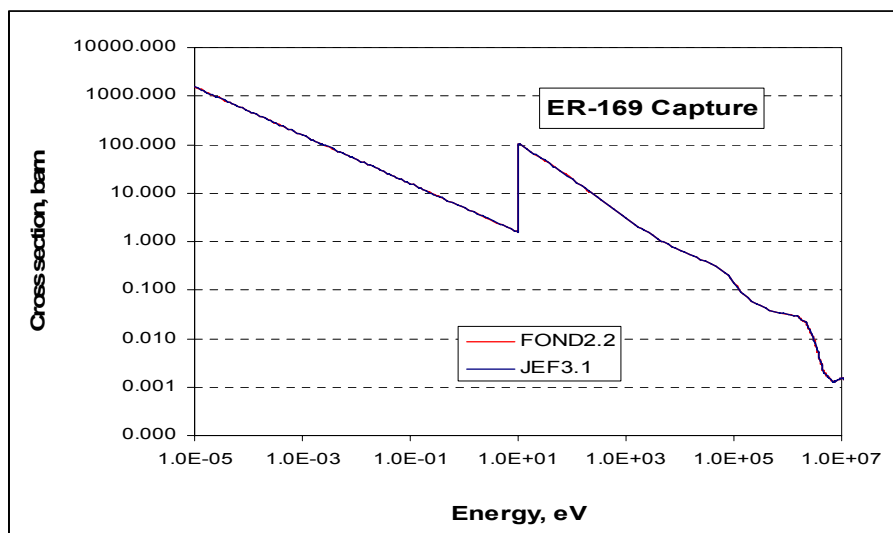


Рис.7.1. Сечение захвата

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (JEFF-3.1).
 Файлы MF=8 и MF=10 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов – 31.1 барн.

Автор отбора данных Забродская С.В.

68.8. Эрбий-170

1. Общие характеристики

Z=68

A=170

Aw= 1.68476+2

Содержание в естественной смеси: **14.93%**

Перечень нейтронных реакций

Независимые оценки Er-170 представлены в двух библиотеках: FOND2.2 (BROND2,1976) и JENDL3.3(2000), которая полностью перешла в библиотеку JEFF3.1. В библиотеке ENDF/B-7 также содержатся данные JENDL3.3, но с пересмотренной областью разрешенных резонансов. В таблице 4.1 по нейтронным реакциям приводятся энергии реакций (Q) и их пороги.

Таблица 8.1

| MT | Реакция | JENDL3.3 | |
|-----|--------------------------|-------------|--------------------------|
| | | Q, МэВ | E _{порог.} , эВ |
| 16 | (n,2n) ¹⁶⁵ Er | -7.258370+6 | 7.301450+6 |
| 17 | (n,3n) ¹⁶⁴ Er | -1.326170+7 | 1.334070+7 |
| 22 | (n,nα) ¹⁶⁴ Dy | 5.190800+4 | |
| 28 | (n,np) ¹⁶⁵ Ho | -8.601030+6 | 8.652080+6 |
| 32 | (n,nd) ¹⁶⁴ Ho | -1.297380+7 | 1.305080+7 |
| 102 | (n,γ) ¹⁶⁷ Er | 5.681700+6 | |
| 103 | (n,p) ¹⁶⁶ Ho | -3.085660+6 | 3.103980+6 |
| 104 | (n,d) ¹⁶⁵ Ho | -6.376450+6 | 6.414310+6 |
| 105 | (n,t) ¹⁶⁴ Ho | -6.715720+6 | 6.755580+6 |
| 107 | (n,α) ¹⁶³ Dy | 5.469280+6 | |

Энергии нейтронных реакций, приведенные в файлах оцененных данных, удовлетворительно согласуются с порогами этих.

Радиоактивность: не радиоактивен

2. Область низких энергий

На рис.8.1,8. 2 и 8.3 приведены полное сечение, сечение радиационного захвата и сечение упругого рассеяния, а также соответствующие экспериментальные данные. Последние, как видно, весьма противоречивы. Сечение радиационного захвата в новой оценке проходит через результат Барнеса (1954г), оказавшийся посередине между весьма разбросанными данными более поздних измерений: разброс сечения от 4.3 барн(S.K.Mangal-1963) до 15 барна(K.Knopf-1997).

Полное сечение в прежней оценке опиралось на результат Вертебного (1965). Более поздний результат Батта (1980) лежит еще выше. Следует, однако, заметить, что данные Вертебного внутренне противоречивы: $\sigma_c + \sigma_s = 12 \text{ барн} + 15.9 \text{ барн} = 17.9 \text{ барн} \ll \sigma_t = 45.0 \text{ барн}$. Это противоречие (обусловленное, вероятно, неточностью знания изотопного состава образца) явилось, видимо, одним из главных оснований того, что эти данные в новой оценке были проигнорированы.

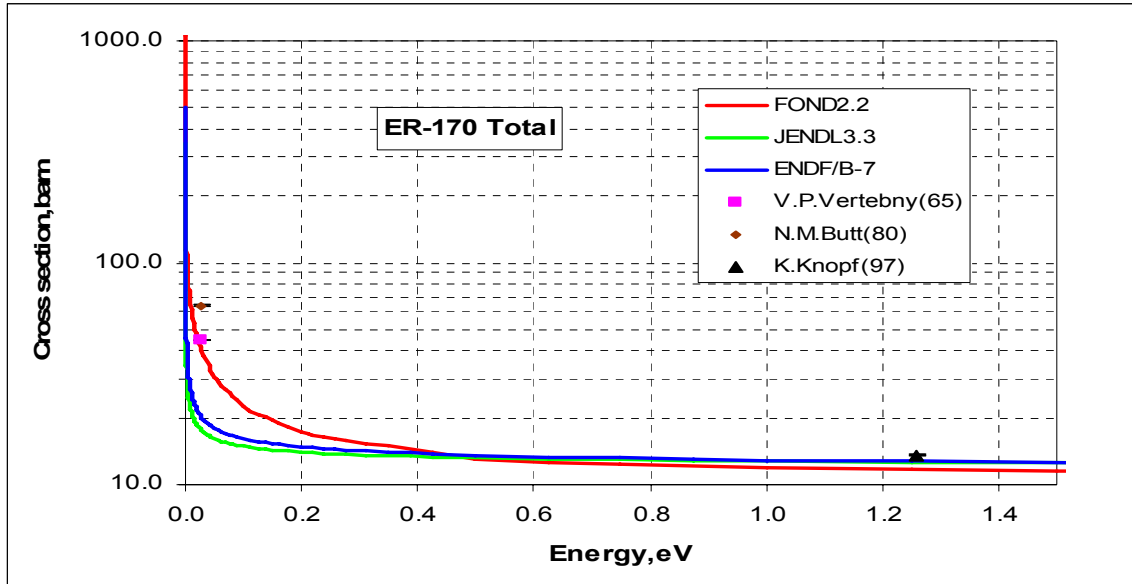


Рис. 8.1. Полное сечение при низких энергиях.

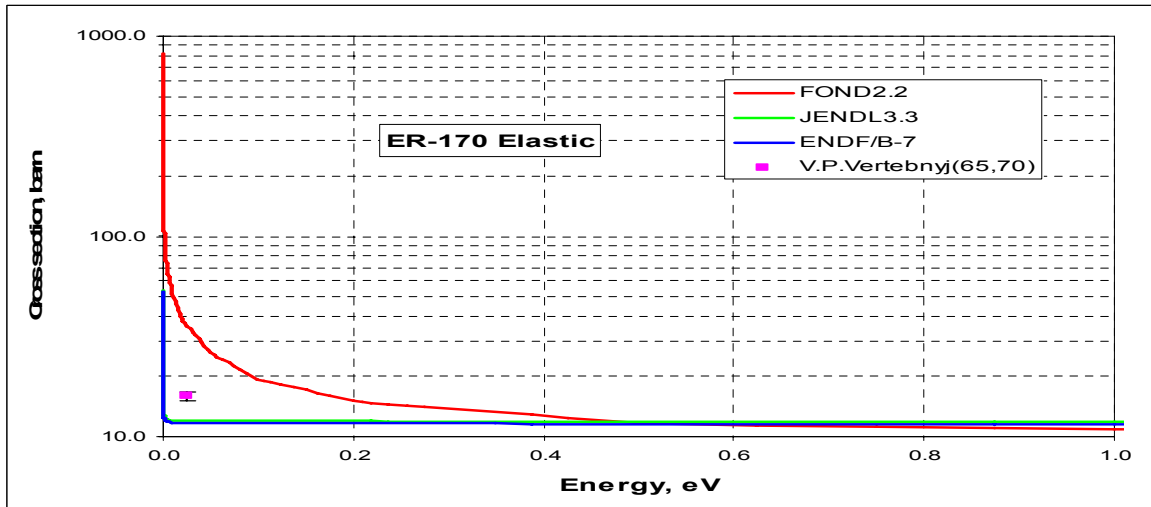


Рис. 8.2. Сечение упругого рассеяния при низких энергиях

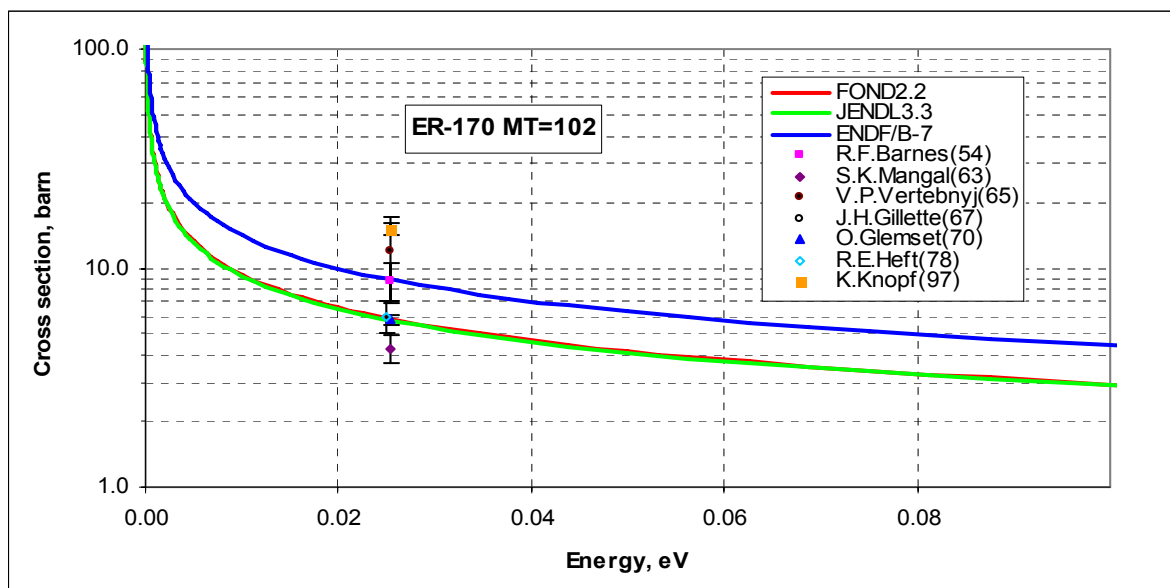


Рис. 8.3. Сечение радиационного захвата при низких энергиях.

2. Резонансная область

Область разрешенных резонансов во всех оценках определена по-разному. В Таблице 6.2 приводятся границы области. Распространение области разрешенных резонансов до 5 кэВ в новой оценке в данном случае представляется достаточно оправданным: в интервале до 3 кэВ лежит 20 резонансов; в интервале от 3 до 5 кэВ – 11 резонансов, т.е. плотность уровней хотя и снижена, но лишь на 17%, что не слишком превышает статистическую погрешность ($\pm 10\%$). Все зарегистрированные р-резонансы (числом 31) лежат ниже 4.3 кэВ. По статистике в интервале 4.3-5 кэВ может лежать лишь 2-3 слабых р-резонанса. В целом, все возможно пропущенные интервале 3 – 5 кэВ резонансы могли бы дать вклад в среднее по этому интервалу сечению захвата, не превышающий первых процентов.

Таблица 8.2

| | FOND2.2 | JENDL3.3 | ENDF/B-7 |
|--|----------------|--|------------------|
| Граница области разрешенных резонансов | 4.7 кэВ | 3.0 кэВ | 5.0 кэВ |
| Оценка | Мухабхаб(1966) | Landolt-Boernstein(1998) Мухабхаб(1984) | Мухабхаб(2006) |
| Радиус рассеяния | 0.840 | 0.800 | 0.820 |
| Количество разрешенных резонансов | 126 | 42 | 126 |
| Область неразрешенных резонансов | 4.7 ÷ 6 кэВ | нет | 5.0 ÷ 79.147 кэВ |

На рис.8.4, 8.5 приведены поведения полного сечения и сечения радиационного захвата в области разрешенных резонансов. Измерений сечения захвата в этой области не проводились. На рисунках четко видны границы области разрешения резонансов для JENDL3.3 – 3 кэВ, FOND2.2 - 4.7 кэВ, ENDF/B-7 – 5 кэВ.

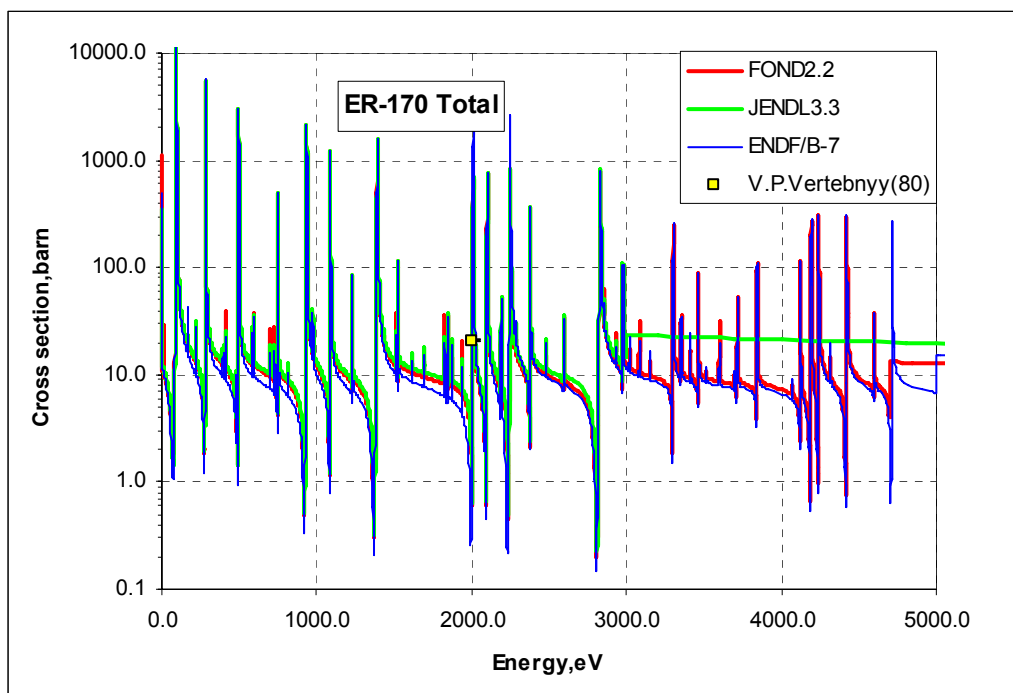


Рис. 8.4. Полное сечение в области разрешенных резонансов.

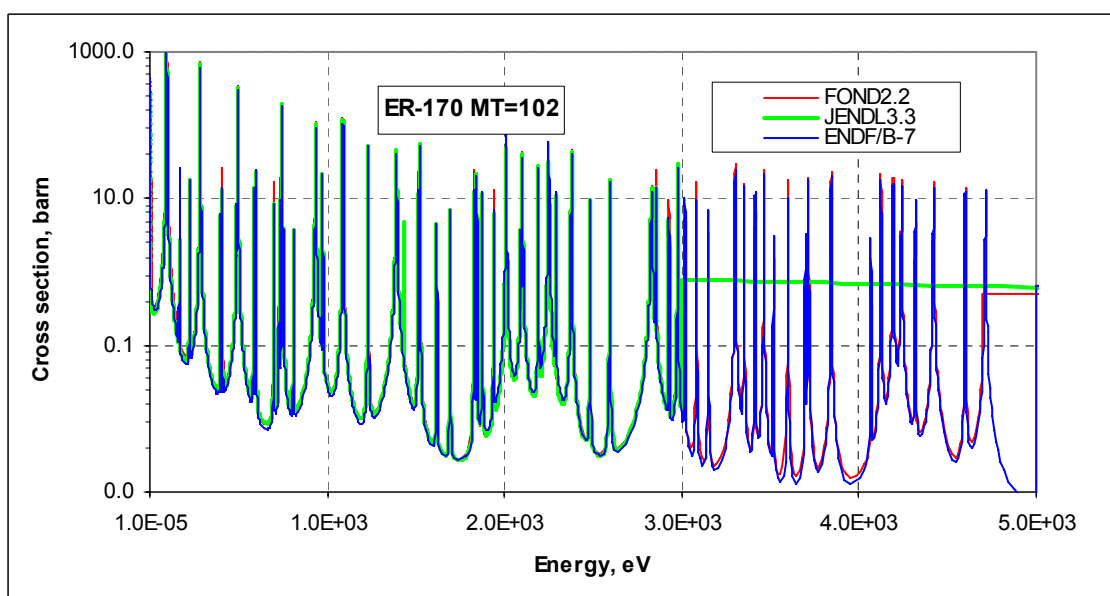


Рис. 8.5. Сечение захвата в области разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов простирается в FOND2.2 только до 6 кэВ; в ENDF/B-7 - до 79.147 кэВ. Средние резонансные параметры зависят от энергии. На рис.8.6, 8.7 приведены поведения полного сечения и сечения радиационного захвата в области неразрешенных резонансов.

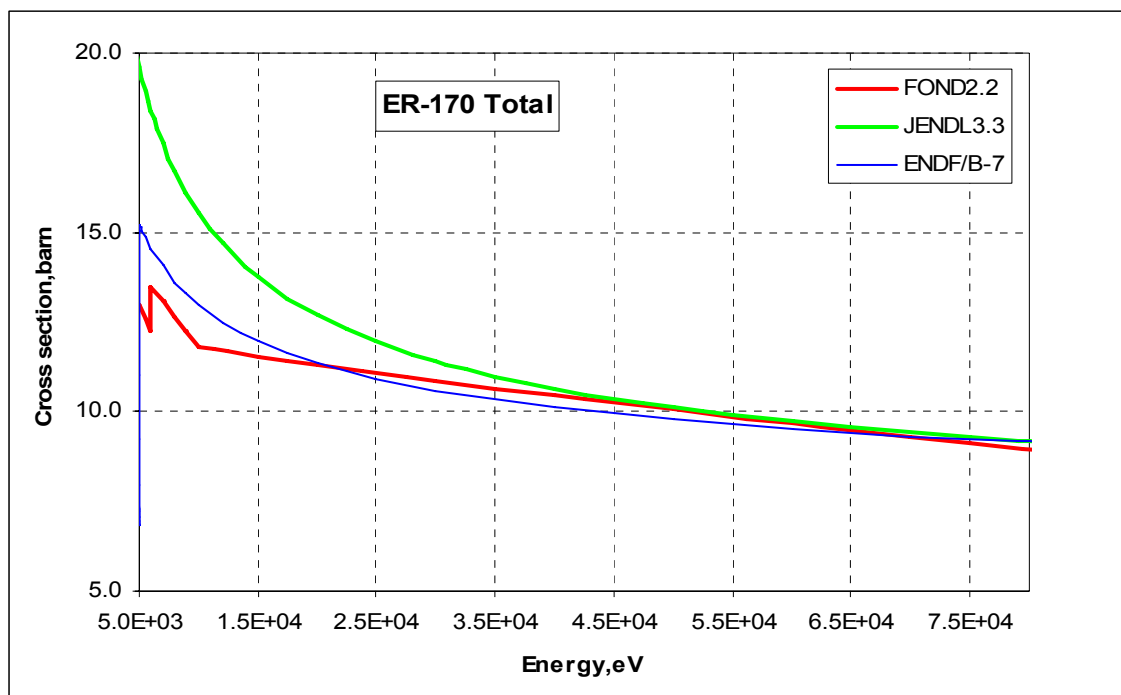


Рис. 8.6. Полное сечение в области неразрешенных резонансов.

Для сечения захвата в EXFORе оказалось много экспериментов в области неразрешенных резонансов. Новые оценки, как видно, опирались, главным образом, на результаты экспериментов В.Н.Кононова(1977) и J.Best(2001).

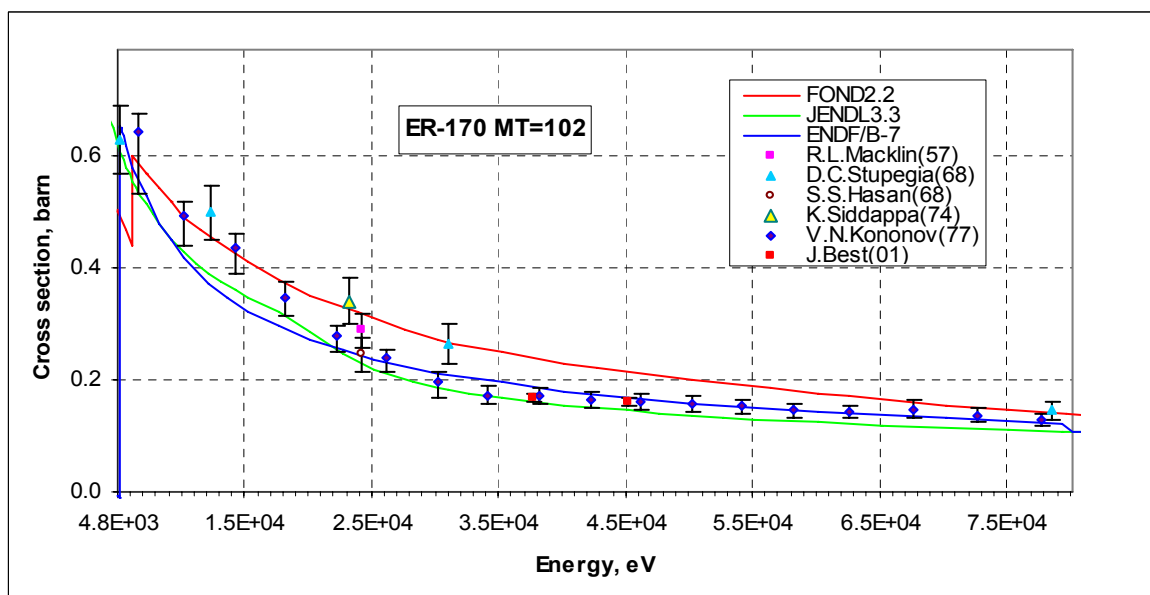


Рис. 8.7. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов.

3. Сечения вне резонансной области

Вне резонансной области сечения оценивались на основе модельных расчетов. Ниже приведены рисунки только по сечению радиационного захвата в этой области, для которого имеются экспериментальные данные. Данные D.C.Stupegia(1998) и В.Н.Кононова(1977) продолжают из области неразрешенных резонансов; к ним в

рассматриваемом энергетическом интервале добавляются данные еще двух экспериментов. Данные Ю.Н.Трофимова(87) согласуются с новой оценкой, G.Peto(67) – с FOND2.2.

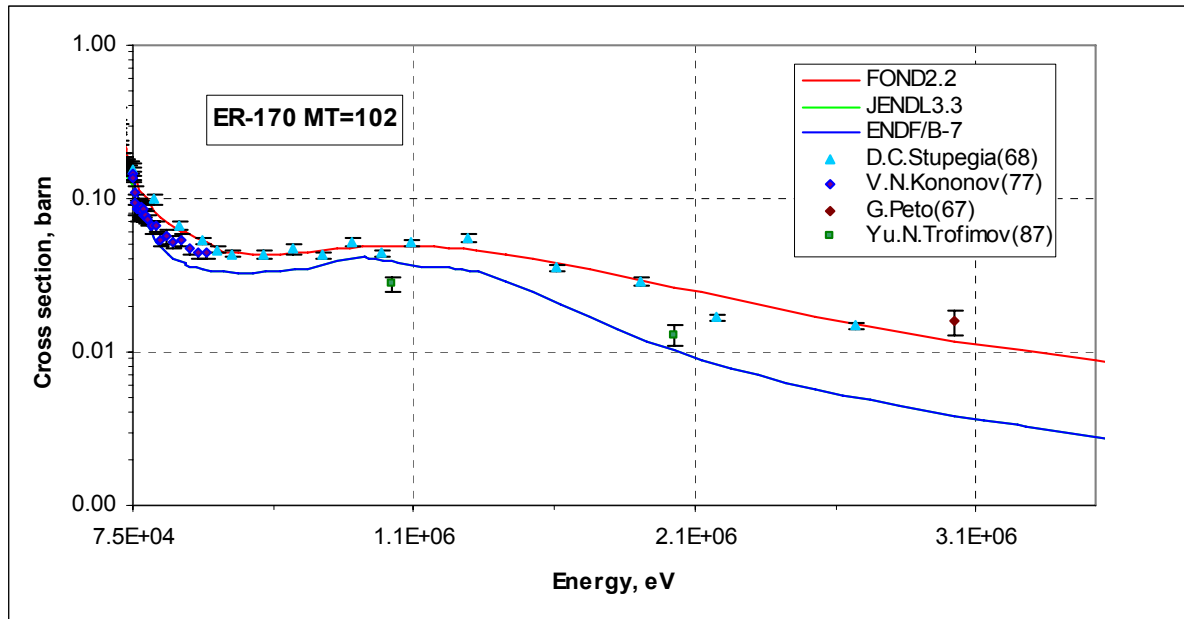


Рис. 8.8. Сечение захвата вне резонансной области.

В области 14 МэВ оба эксперимента J.Vuletin(1974) и M.Valkonen(1976) подтверждают преимущество новой оценки.

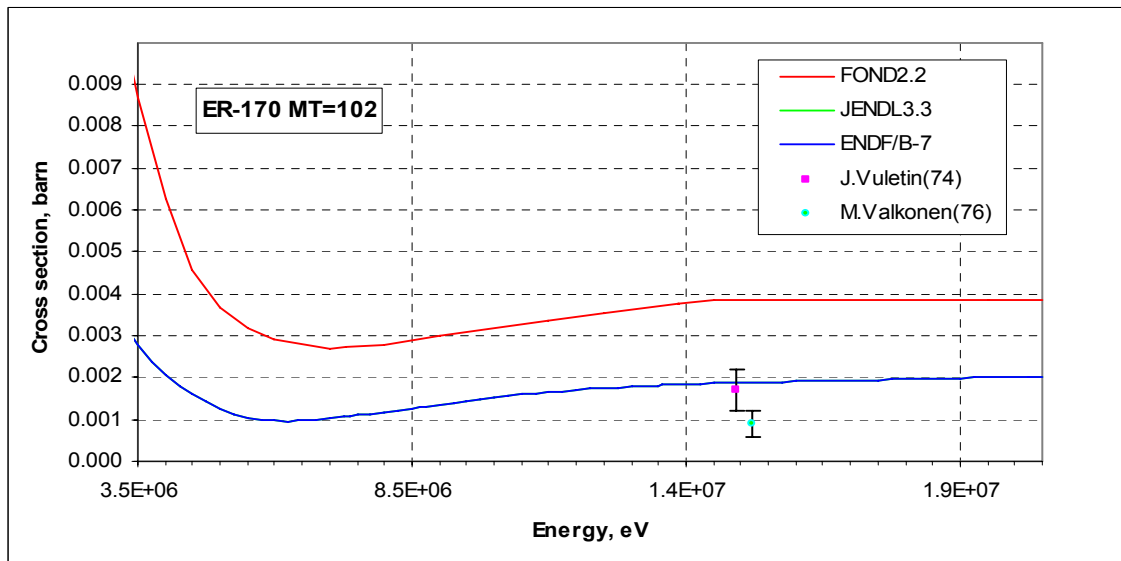


Рис. 6.9. Сечение захвата вне резонансной области.

На рис.8.10 приведены все остальные важные реакции из новой оценки

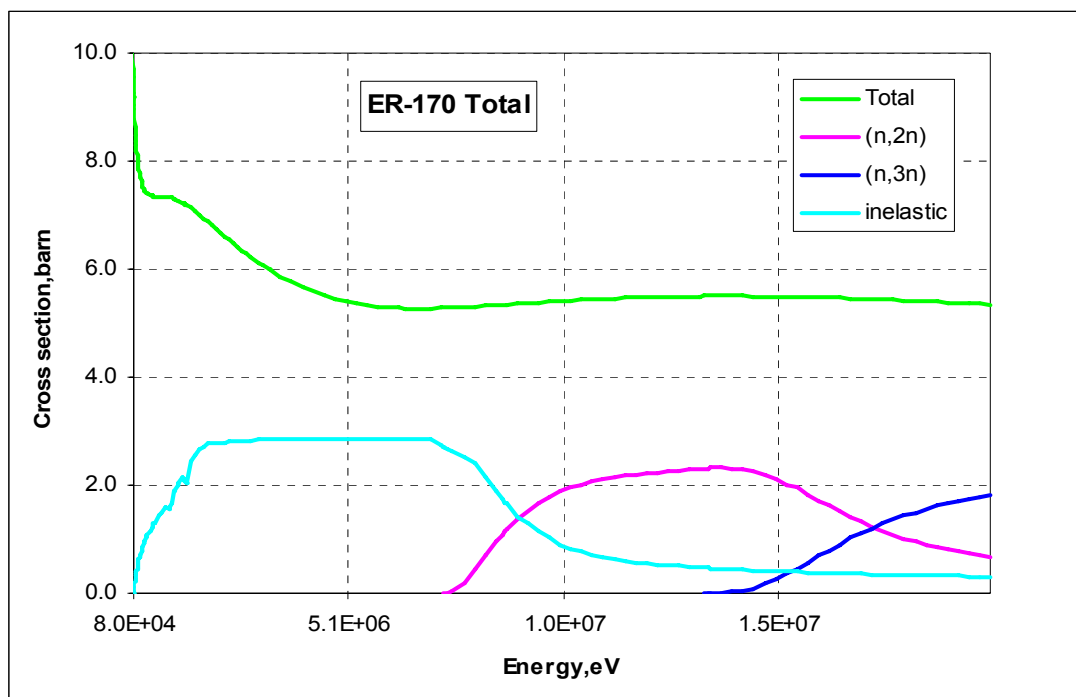


Рис. 8.10. Сечение нейтронных реакций вне резонансной области.

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

Экспериментальных данных в EXFOR нет. В обеих оценках энергетические распределения считаются не зависящими от угловых (данные для всех реакций с вылетом вторичных нейтронов приводятся в файлах MF=4 (угловые распределения) и MF=5 (энергетические распределения для реакций с возбуждением непрерывного спектра состояний ядер-продуктов). Угловые распределения нейтронов, испускаемых в реакциях с возбуждением непрерывного спектра ядер-продуктов (MT=16,17, 22, 28), кроме неупругого рассеяния приняты изотропными в лабораторной системе координат. Угловые распределения для упругого и неупругого рассеяния рассчитывались по программе CASTY.

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

В JENDL3.3 (ENDF/B7) приводится следующая информация:
 неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней ядра-мишени:
 в файле MF=12 для MT=51-64 приведены вероятности испускания дискретных квантов, соответствующих переходам между уровнями;
 реакции с возбуждением непрерывного спектра уровней ядер-продуктов – множественности и непрерывные спектры фотонов, рассчитанные по статистической модели (по программе EGNASH), заданные в соответствующих секциях файлов MF=12 MF=15.
 Угловые распределения фотонов во всех случаях приняты изотропными.

6. Заключение

6.1. Вывод: В РОСФОНДе принимается оценка ENDF/B-7.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) | (n,p) | (n, α) |
|------------------------------------|----------|----------|-----------|--------|--------|----------------|--------|----------------|
| 0.0253 эВ | 41.6041 | 35.7468 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 5.8573 | 0.0000 | 0.0000 |
| | 20.5605 | 11.7027 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 8.8578 | 0.0000 | 0.0000 |
| Резонансный Интеграл | 604.8500 | 546.2870 | 0.0414 | 0.0000 | 0.0000 | 58.5207 | 0.0000 | 0.0000 |
| | 596.9090 | 555.1160 | 0.0205 | 0.0000 | 0.0000 | 41.7726 | 0.0000 | 0.0000 |
| Спектр деления ^{235}U | 7.0252 | 5.1441 | 1.8386 | 0.0076 | 0.0000 | 0.0349 | 0.0000 | 0.0000 |
| | 6.8077 | 4.5966 | 2.1765 | 0.0114 | 0.0001 | 0.0231 | 0.0000 | 0.0000 |
| 14 МэВ | 5.2738 | 3.4364 | 0.1640 | 1.6630 | 0.0040 | 0.0039 | 0.0020 | 0.0006 |
| | 5.5020 | 2.7215 | 0.4392 | 2.3094 | 0.0278 | 0.0019 | 0.0019 | 0.0002 |

6.2. Автор обоснования оцененных данных: Забродская С.В.

68.9. Эрбий-172.

Испытывает позитронный распад в с периодом $T_{1/2}=49$ ч.

В JEFF-3.1 (Activation) – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций (MT=16,17,22,32,33,102,103,105,106,107,111). Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

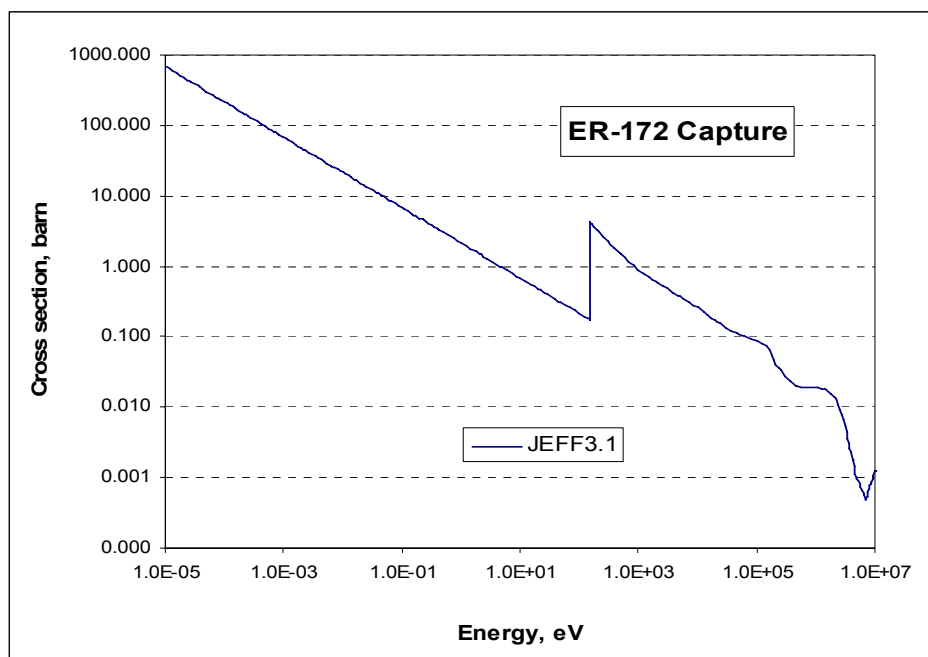


Рис9.1. Сечение захвата

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (JEFF-3.1).
Файлы MF=8 и MF=10 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов – 13.54 барн.

Автор отбора данных Забродская С.В.

68.11. Эрбий природный

Включать в РОСФОНД файл данных для натурального эрбия не предполагается. Задача настоящего параграфа состоит в валидации принятых в РОСФОНД оцененных нейтронных данных для стабильных изотопов диспрозия путем сравнения следующих из этих оценок нейтронных сечений для натурального диспрозия с результатами непосредственных измерений.

С этой целью на основе оцененных нейтронных данных, принятых в РОСФОНД, были рассчитаны 299-групповые константы для каждого стабильного изотопа, которые затем были свернуты с весом концентраций изотопов в естественной смеси в 299-групповые константы для природного диспрозия. Полученные таким образом 299-групповые сечения ниже сравниваются с имеющимися для природного диспрозия экспериментальными данными.

На рис.11.1 и 11.2 Приведены оцененные и экспериментальные данные по полному сечению природного диспрозия и по сечению захвата при низких энергиях.

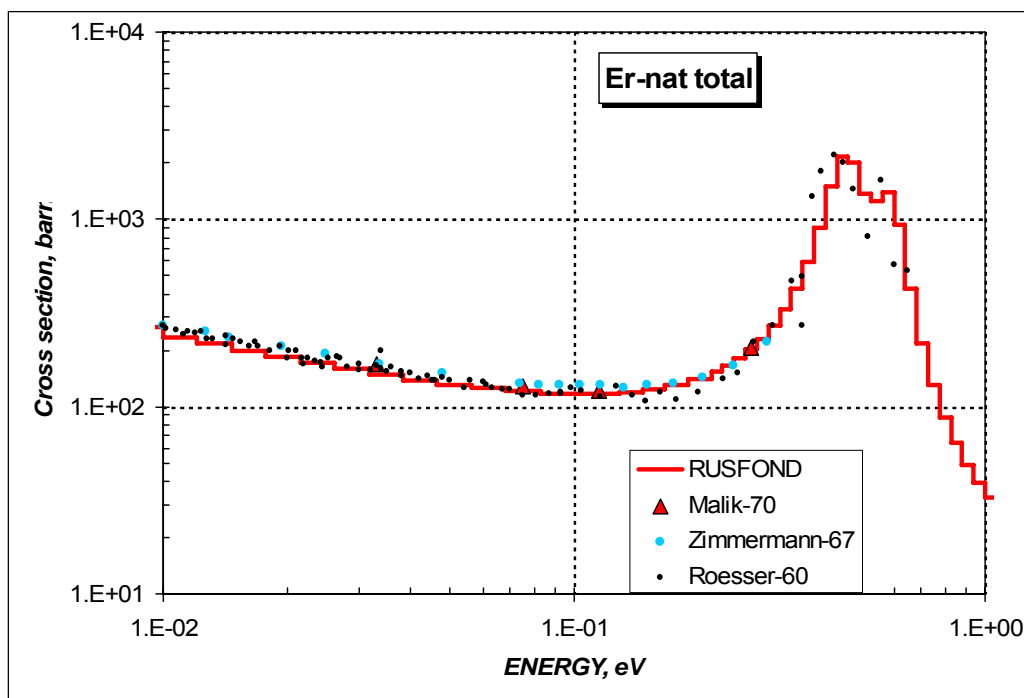


Рис.11.1 Полное сечение эрбия при низких энергиях

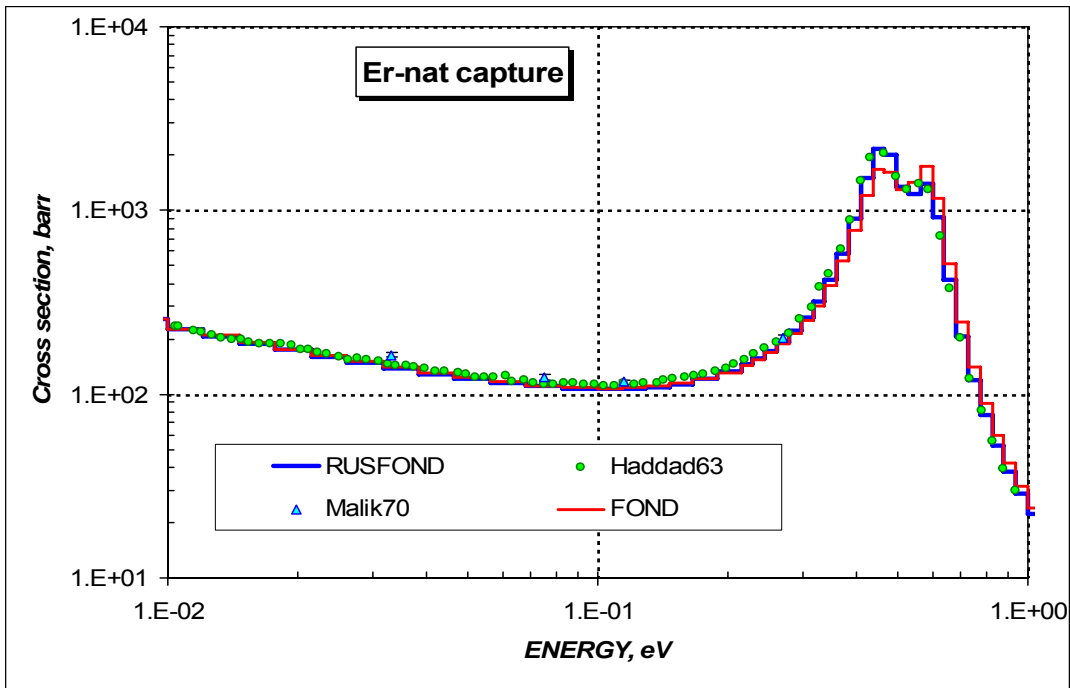


Рис. 11.2. Сечение захвата эрбия при низких энергиях.

Как видно, согласие оцененных и экспериментальных данных в этой области энергий не оставляет желать лучшего.

На рис. 11.3 и 11.4 приведены полное сечение и сечение радиационного захвата вне резонансной области в сравнении с экспериментальными данными для природного эрбия.

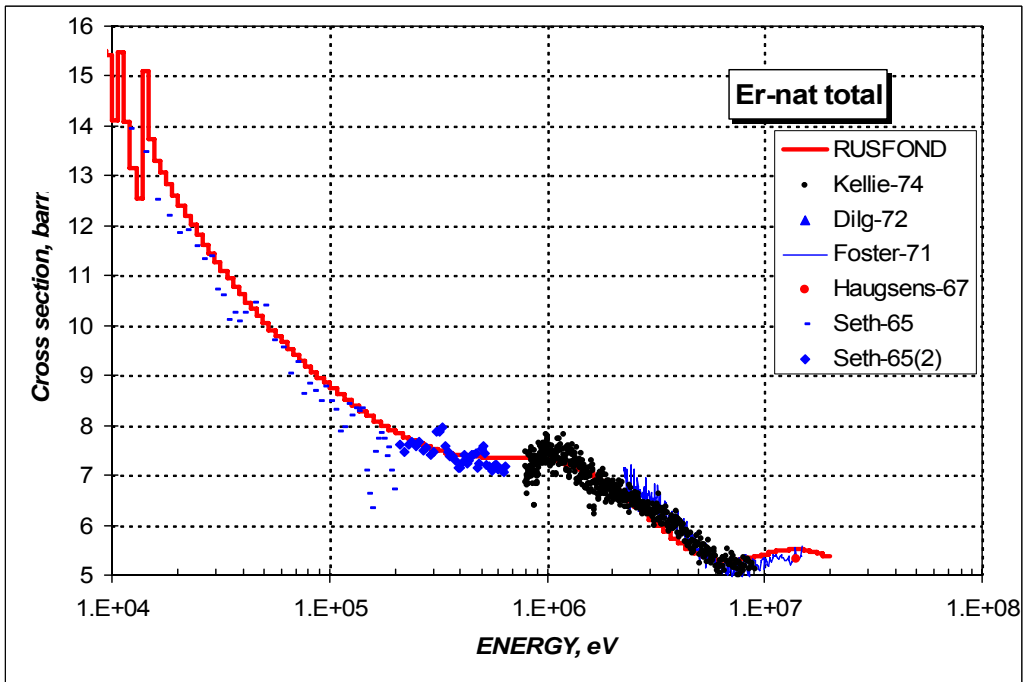


Рис.11.3. Полное сечение эрбия вне резонансной области

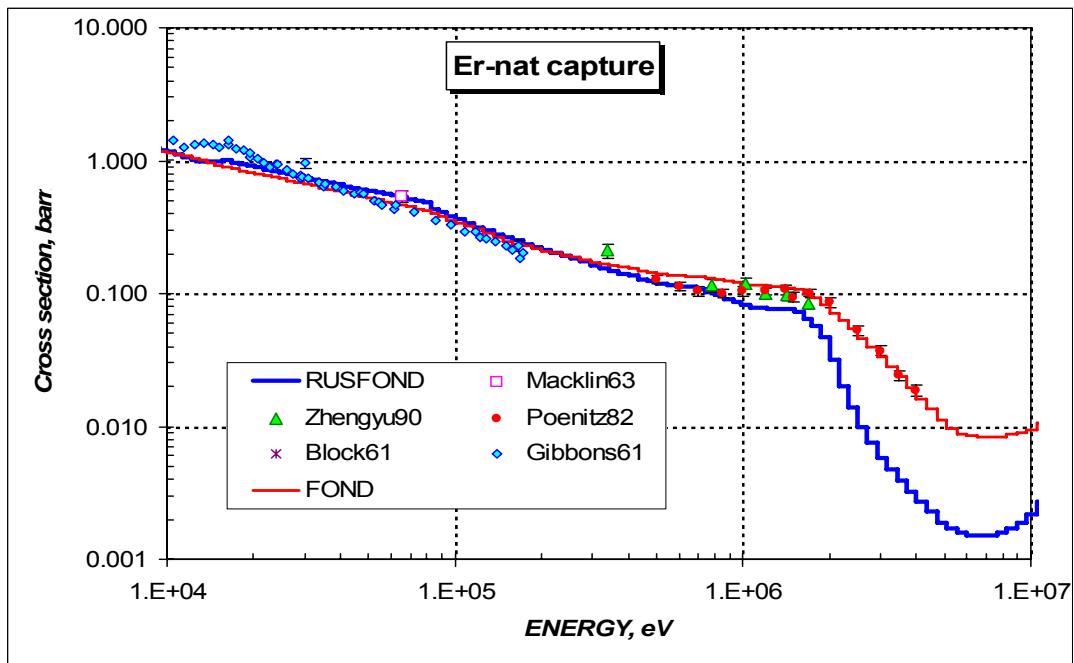


Рис. 11.4. Сечение радиационного захвата вне резонансной области.

Как видно, в области быстрых нейтронов, расхождения между свернутыми оцененными сечениями захвата для изотопов отличаются от экспериментальных данных для природного диспрозия в среднем на $\pm 20\%$. Это выходит за пределы погрешностей экспериментальных данных, приведенных на рис. 11.4. Расхождение может быть устранено путем переоценки сечений захвата для основных “вкладчиков” в сечение захвата природного диспрозия в рассматриваемой области энергии – эрбия-166 и эрбия-167, сечения захвата для которых в области быстрых нейтронов слабо обоснованы экспериментальными данными (см. разделы 63.4 и 63.5). Такая переоценка выходит, однако, за рамки настоящей работы и мы здесь лишь ограничимся констатацией факта расхождений, ограничивающих точность данных по сечению захвата быстрых нейтронов на природном диспрозии, примерно, 20%.

На рис. 11.5 проводится сравнение оцененных данных по сечению неупругого рассеяния между собой и с единственным имеющимся в базе данных EXFOR экспериментом. Преимущество новой оценки очевидно.

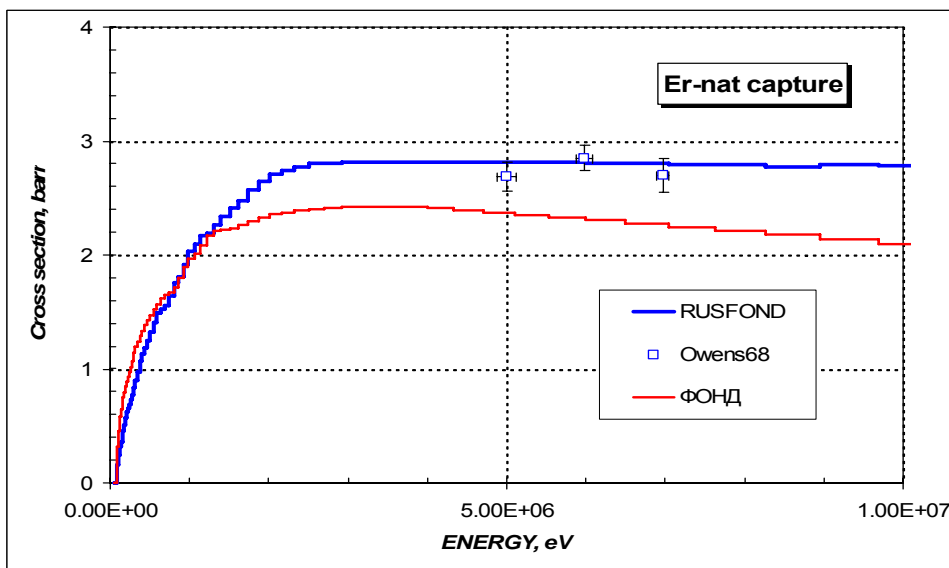


Рис.11.5. Сечение неупругого рассеяния нейтронов на эрбии.

Заключение.

Принятые в РОСФОНД оцененные нейтронные данные о сечении захвата для изотопов эрбия в области быстрых нейтронов (выше 10 кэВ) не вполне согласуются с результатами экспериментов для природного эрбия. Улучшение согласия путем переоценки сечений захвата для изотопов возможно и в будущем желательно такую переоценку выполнить. Полное сечение и сечение неупругого рассеяния для природного эрбия в этой области согласуются с экспериментальными данными для природного эрбия удовлетворительно. В области низких энергий экспериментальные данные для природного эрбия убедительно подтверждают корректность оценки данных для основных стабильных изотопов.

Авторы заключения – В.Н. Кошечев, М.Н. Николаев.

69.ТУЛЛИЙ

Туллий имеет только один стабильный изотоп - ^{169}Tm – и 6 радиоактивных с периодом полураспада более суток: 3 нейтронно-дефицитных (^{165}Tm , ^{167}Tm , ^{168}Tm) и три нейтронно-избыточных (^{170}Tm , ^{171}Tm , ^{172}Tm).

69.1. Туллий-165

Радиоактивен ($T_{1/2}=30.06$ ч.). Захватывая орбитальный электрон превращается в эрбий-165, который тем же путем ($T_{1/2}=10.3$ ч.) распадается в стабильный гольмий-165. В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакции $^{168}\text{Yb}_{(0.13\%)}(n,nt)$. При делении ядер не образуется.

В библиотеке EAF-2003 содержатся оценки нейтронных сечений, полученные расчетным путем. Никаких экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 67.1 барн.

Резонансный интеграл захвата: 1725 барн.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

69.2. Туллий-167

Радиоактивен ($T_{1/2}=30.06$ ч.). Захватывая орбитальный электрон превращается в стабильный эрбий-167. В реакторах может образовываться в малых количествах за счет реакции $^{168}\text{Yb}_{(0.13\%)}(n,np)$, (n,t) , $^{169}\text{Tm}(n,3n)$, $^{169}\text{Tm}(n,2n)$, $^{168}\text{Tm}(n,2n)$.

В библиотеке EAF-2003 содержатся оценки нейтронных сечений, полученные расчетным путем. Никаких экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 54.1 барн.

Резонансный интеграл захвата: 1169 барн.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

69.3. Туллий-168

Радиоактивен ($T_{1/2}=30.06$ ч.). Захватывая орбитальный электрон превращается в стабильный эрбий-167. В реакторах может образовываться в малых количествах за счет реакции $^{168}\text{Yb}_{(0.13\%)}(n, p)$, $^{169}\text{Tm}(n, 2n)$.

В библиотеке EAF-2003 содержатся оценки нейтронных сечений, полученные расчетным путем. Никаких экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 69.7 барн.

Резонансный интеграл захвата: 1611 барн.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

69.4. Туллий-169

Единственный стабильный изотоп.

Ни в одной библиотеке оцененных нейтронных данных не содержится полного набора нейтронных данных для туллия.

В библиотеке EAF-2003 содержатся оценки нейтронных сечений, полученные расчетным путем.

Между тем для ^{169}Tm имеется довольно богатая экспериментальная информация. В Атласе Мухабхаба 1984 г. содержатся резонансные параметры для нескольких десятков резонансов; имеются данные по полному сечению, по сечениям захвата и упругого рассеяния, а при высоких энергиях измерялись сечения реакций $(n, 2n)$, $(n, 3n)$, (n, α) , (n, t) , $(n, ^3\text{He})$.

На рис. 1 приведены результаты измерения полного сечения.

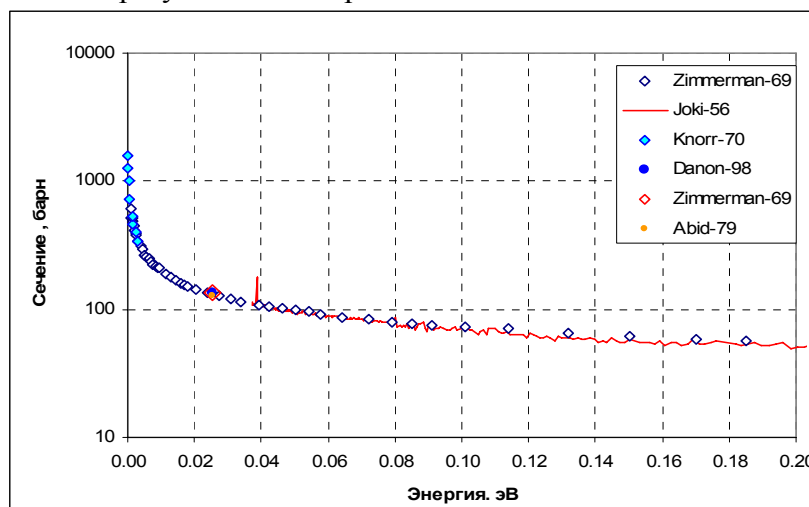


Рис. 1а. Полное сечение.

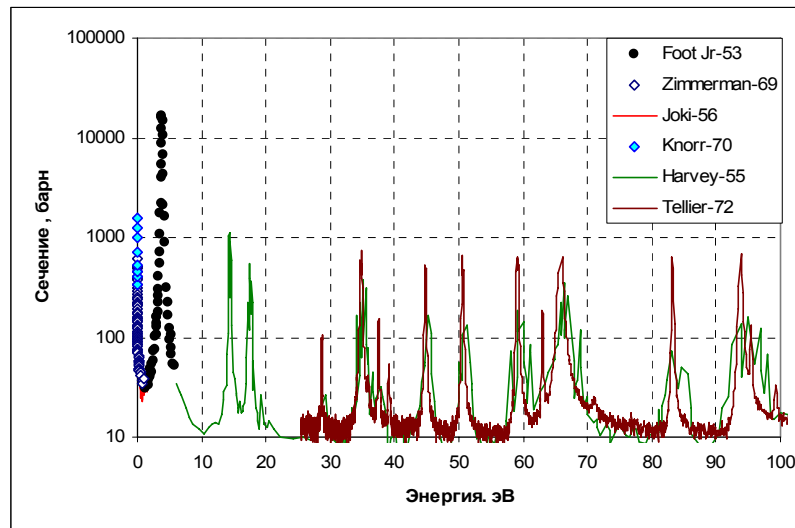


Рис.26. Полное сечение.

Как видно, до 100 эВ данные разных авторов неплохо согласуются между собой. Однако при более высоких энергиях результаты Тельера явно ошибочны. Для демонстрации этого на рис. 3в приведен результат измерения сечения захвата Блоком, которое при энергиях ниже 2 кэВ оказывается существенно больше полного сечения, измеренного Тельером. Выше 2 кэВ результаты этого автора расходятся с измерением Вертебного на фильтрованном пучке нейтронов и с оценкой полного сечения для гольмия, которое должно быть близко к таковому для туллия. Рис. 1г показывает, что при более высоких энергиях так оно и есть.

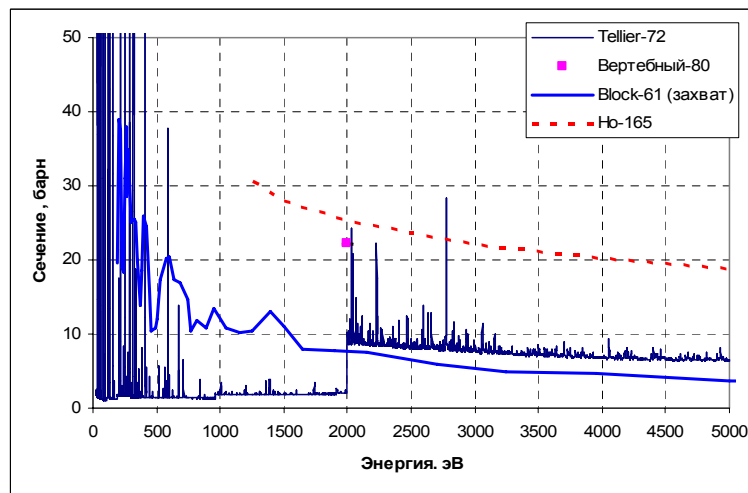


Рис1в. Полное сечение в сравнении с сечением захвата

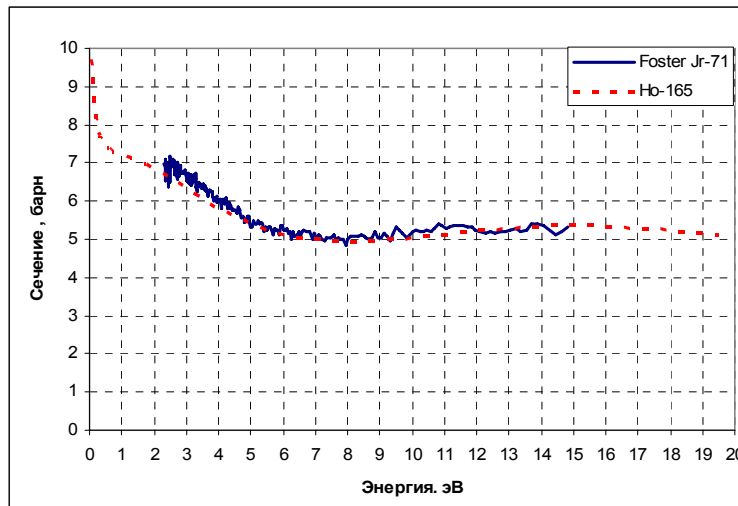


Рис.2г. Полное сечение

Хорошо промерены сечения туллия и при очень низких энергиях (см.рис.2), что позволяет реалистично оценить параметры связанного состояния (или состояний).

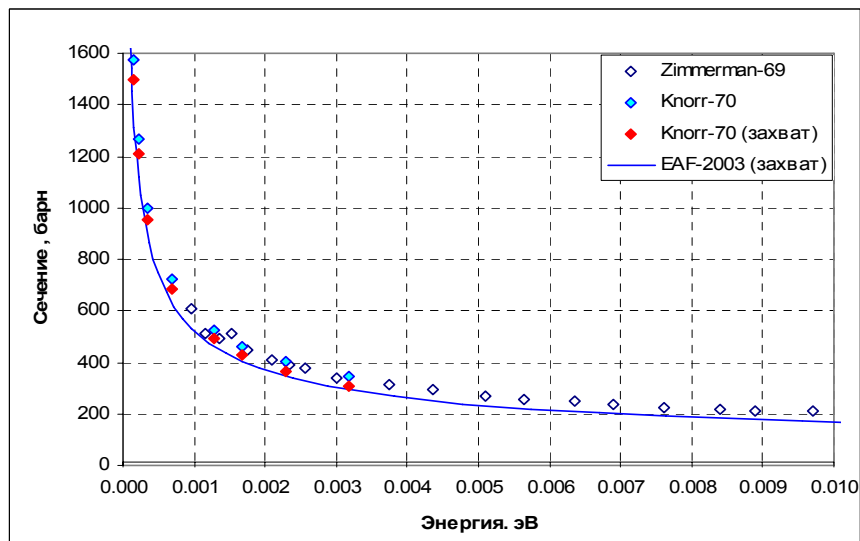


Рис.2а. Полное сечение и сечение захвата при низких энергиях.

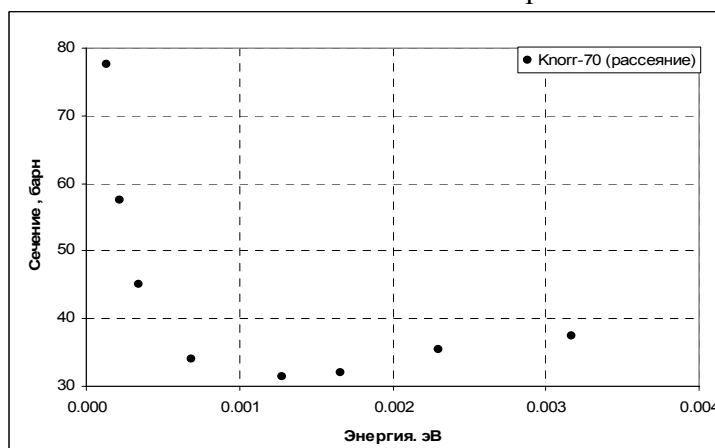
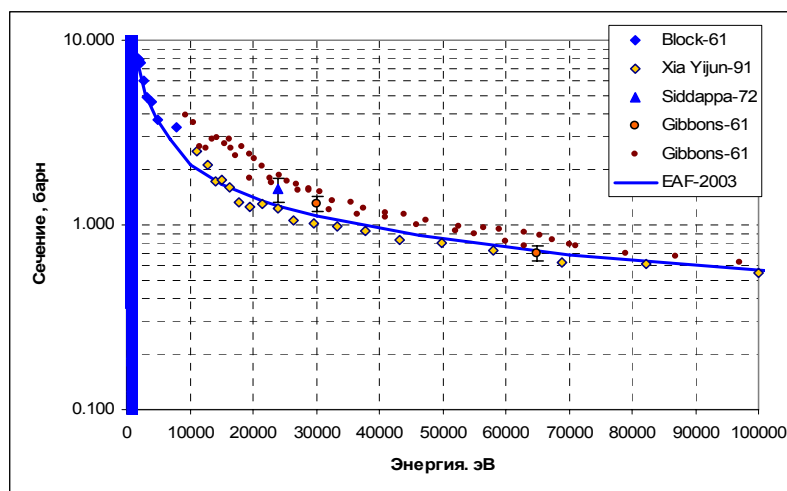


Рис.2б. Сечение рассеяния при низких энергиях.

На рис. 3 оценка сечения захвата из EAF-2003 сравнивается с экспериментальными данными. Согласие, как видим, приемлемое. Ниже 1585 эВ оцененная кривая отражает резонансную структуру сечений.



Оцененное сечение захвата тепловых нейтронов 104.8 барна;

Резонансный интеграл захвата – 1710 барн.

Эти величины вполне согласуются с результатами измерений, усреднение которых, выполненное Мухабхабом, дает, соответственно, 105 ± 2 барна и 1720 ± 30 барн.

Сечения пороговых реакций также находятся в приемлемом согласии с результатами измерений.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

При первой возможности необходимо провести полную оценку нейтронных данных для туллия.

Автор заключения

Николаев М.Н.

69.5. Туллий-170

Радиоактивен ($T_{1/2}=128.6$ дн.). Испытывает бета-распад в иттербий-170 (99.87%); в остальных случаях превращается в эрбий-170 путем захвата орбитального электрона. В реакторах может образовываться в малых количествах за счет реакции $^{169}\text{Tm}(n,\gamma)$.

В библиотеке EAF-2003 содержатся оценки нейтронных сечений, полученные расчетным путем.

Жиллетт (Gillette-67) масс-спектрометрически измерил тепловое сечение и резонансный интеграл захвата ^{170}Tm , получив, соответственно, 92 ± 4 барна и 1560 ± 60 барн.

В эксперименте Стокса (Stockes-74) было измерено полное сечение в интервале от 0.05 до 100 эВ и описал полученные результаты параметрами Брейта-Вигнера.

Коккер (Cocker, Nucl. Sci.Eng.,23, 201 (1969)) также масс-спектрометрически определил интегральные характеристики захвата нейтронов в туллии-170. Все названные данные были учтены Мухабхабом в его оценке 1984 г. и привели к следующим рекомендациям:

сечение захвата тепловых нейтронов: 92 ± 4 барн;

резонансный интеграл захвата: 460 ± 50 барн.

Как видим, в результат, доложенный Жиллеттом, внесена кардинальная поправка.

Оценка EAF-2003 согласуется с рекомендацией Мухабхаба:
сечение захвата тепловых нейтронов: 91.8 барн;
резонансный интеграл захвата: 557 барн.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Отметить противоречивость экспериментальных данных по резонансному интегралу и желательность его переоценки.

Составление полного файла данных для столь долгоживущего радионуклида также было бы желательным.

Автор заключения

Николаев М.Н.

69.6. Туллий-171

Радиоактивен ($T_{1/2}=1.92$ г.). Испытывает бета-распад в иттербий-171. В реакторах может образовываться в малых количествах за счет цепочки реакций $^{169}\text{Tm}(n,\gamma)^{170}\text{Tm}(n,\gamma)$.

В библиотеке EAF-2003 содержатся оценки нейтронных сечений, полученные расчетным путем.

Жиллетт (Gillette-67) масс-спектрометрически измерил тепловое сечение и резонансный интеграл захвата ^{170}Tm , получив, соответственно, 4.5 ± 0.2 барна и 118 ± 6 барн.

В эксперименте Стокса (Stokes-74) было измерено полное сечение в интервале от 0.05 до 100 эВ и описал полученные результаты параметрами Брейта-Вигнера.

Коккер (Cocker, Nucl. Sci. Eng., 23, 201 (1969)) также масс-спектрометрически определил интегральные характеристики захвата нейтронов в туллии-170. Все названные данные были учтены Мухабхабом в его оценке 1984 г. и привели к следующим рекомендациям:

сечение захвата тепловых нейтронов: 160^{+30}_{-100} барн;

резонансный интеграл захвата: 116 – 325 барн.

Как и в случае туллия-170, экспериментальные данные сильно различаются.

Оценка EAF-2003:

сечение захвата тепловых нейтронов: 160 барн;

резонансный интеграл захвата: 448 барн, т.е. превышает большее из значений, указанных Мухабхабом.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Отметить противоречивость экспериментальных данных по резонансному интегралу и желательность его переоценки.

Составление полного файла данных для столь долгоживущего радионуклида также было бы желательным.

Автор заключения

Николаев М.Н.

69.7. Туллий-172

Радиоактивен ($T_{1/2}=63.6$ ч.). Испытывает бета-распад в иттербий-172.

В библиотеке EAF-2003 содержатся оценки нейтронных сечений, полученные расчетным путем. Никаких экспериментальных данных для их проверки нет.

Сечение захвата тепловых нейтронов: 38.2 барн.

Резонансный интеграл захвата: 848 барн.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

70. ИТТЕРБИЙ

Природный иттербий имеет 7 стабильных изотопов: ^{168}Yb , ^{170}Yb , ^{171}Yb , ^{172}Yb , ^{173}Yb , ^{174}Yb , ^{176}Yb и три достаточно долгоживущих радиоактивных изотопа: ^{166}Yb , ^{169}Yb , ^{175}Yb .

Ни один из изотопов иттербия не образуется при делении ядер в качестве осколка. Возможные реакции образования изотопов иттербия в реакторе – это реакции (n,p) на изотопах лютеция и реакции (n, α) на изотопах гафния. Все эти реакции имеют высокие пороги. Не удивительно, что ни для одного изотопа иттербия, равно как и для природного иттербия в современных библиотеках не содержится полных файлов оцененных данных. Полная информация о сечениях нейтронных реакций содержится в библиотеке EAF-2003, данные которой и будут кратко обсуждаться ниже.

70.1. Иттербий-166

Радиоактивен ($T_{1/2}=56.7$ ч.). Путем захвата орбитального электрона распадается в туллий-166, а затем ($T_{1/2}=7.7$ ч.) в эрбий-166. Возможный источник – реакция $^{168}\text{Yb}_{(0.13\%)}(n,3n)$.

Согласно EAF-2003:

сечение захвата тепловых нейтронов: 48.3 барн;

резонансный интеграл захвата: 326 барн.

Экспериментальных данных для проверки этих и других нейтронных сечений в EXFORe не содержится.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

70.2. Иттербий-168

Содержание в естественной смеси 0.13%

На рис.1. оценка сечения захвата из EAF-2003 сравнивается с имеющимися экспериментальными данными.

Согласно EAF-2003:

сечение захвата тепловых нейтронов: 2305 барн;

резонансный интеграл захвата: 21213 барн.

Это практически совпадает с рекомендацией Мухабхаба (2300 ± 170 и 21300 ± 1000), которая опирается на результаты 6 независимых измерений.

Резонансный интеграл почти полностью определяется первым резонансом. Структура сечений в резонансной области, принятая в оценке (см. где приводится сечение захвата) в точности соответствует параметрам из атласа 1984 г. :

| E0,eV | gГn,meV | Гg,meV | gГn0 |
|---------------|-------------|-----------|------------|
| 0.597 | 2.2 | 64 | 2.8 |
| 9.71 | 0.08 | 64 | 0.026 |
| 22.5 | 25.6 | 64 | 5.4 |
| 27.14 | 2.45 | 64 | 0.47 |
| 188.09 | 171 | 64 | 12.5 |

При их оценке не были приняты во внимание результаты Вертебного, (Vertebny-72), который работая с образцом, содержащим 17% ^{168}Yb , не обнаружил резонанса при 188 эВ, но отметил довольно сильные резонансы при 8.17 эВ и 66.8 эВ, а также слабые резонансы при 40.8 эВ, 56.8 эВ, 80.7 эВ, 253 эВ и 289 эВ, нейтронные ширины которых не определены. С другой стороны, Лью (Liou-73) подтвердил наличие резонансов при 22ю5 эВ и 188 эВ в экспериментах с природным иттербием и образцами обогащенных изотопов кроме ^{168}Yb .

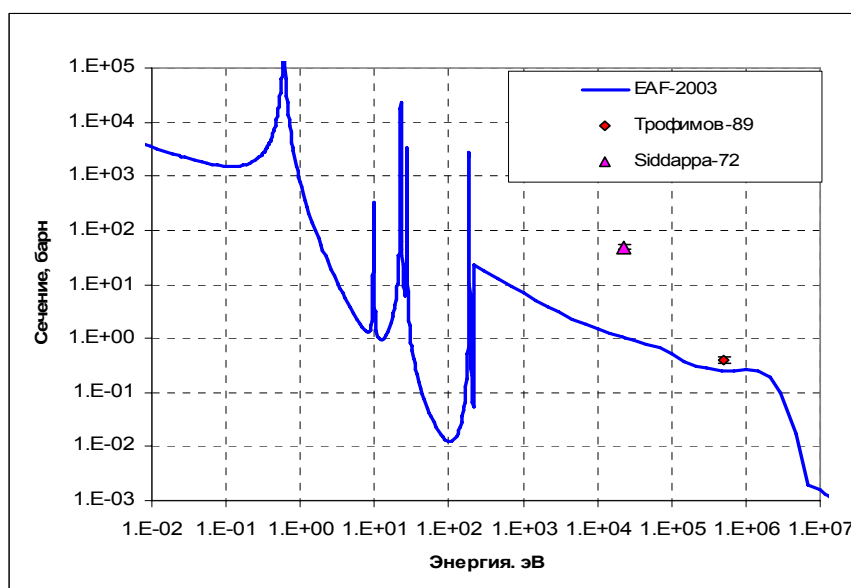


Рис.1. Сечение захвата.

Рис.1 показывает, что вне резонансной области оцененное сечение захвата, вероятно занижено.

Под действием тепловых нейтронов возможна реакция (n,α) . Из измерений Энсалема (Ensallem-74) ее сечение равно 0.1 миллибарна; оцененное значение именно таково.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

70.3. Иттербий-169

Радиоактивен ($T_{1/2}=32.018$ дн.). Путем захвата орбитального электрона распадается в туллий-169. Наиболее вероятный источник этого изотопа – реакция $^{168}\text{Yb}_{(0.13\%)}(n,\gamma)$.

Согласно EAF-2003:

сечение захвата тепловых нейтронов: 3601 барн;

резонансный интеграл захвата: 2162 барн.

Тепловое сечение совпадает с рекомендацией Мухабхаба (1984): 3600 ± 300 барн, а резонансный интеграл существенно ниже рекомендованного Мухабхабом: 5200 ± 500 барн. В EXFORe экспериментальных данных для этого изотопа не приводится. Тем не менее, в справочнике Мухабхаба 1984 г. даны параметры 21 резонанса с энергиями до 45.4 эВ. Структура сечения захвата в оценке EAF-2003 соответствует этим данным (см. рис.1)

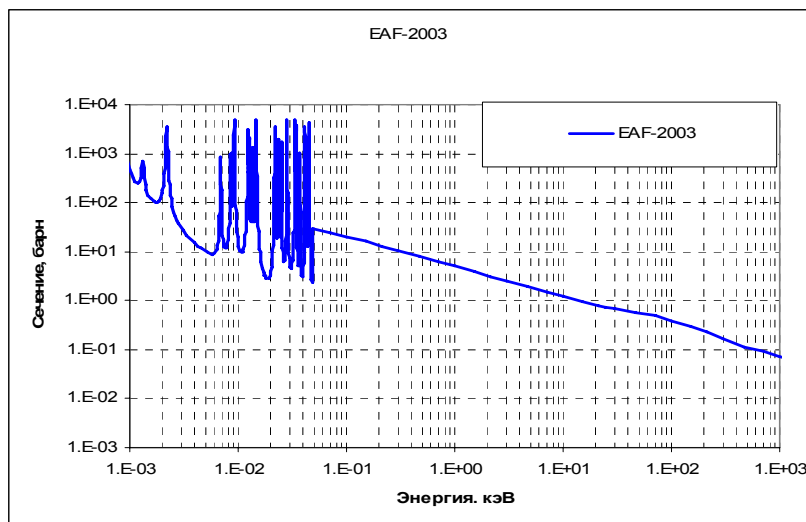


Рис.1. Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

70.4. Иттербий-170

Содержание в естественной смеси 3.04%

На рис.1. оценка сечения захвата из EAF-2003 сравнивается с имеющимися экспериментальными данными.

Согласно EAF-2003:

сечение захвата тепловых нейтронов: 11.4 барн;

резонансный интеграл захвата: 323 барн.

Это совпадает с рекомендацией Мухабхаба 1984г. (11.4 ± 1.0 и 320 ± 30), но несколько выше его последних рекомендаций (2006) : 9.9 ± 1.8 и 293 ± 30 барн. В EXFORe даны только данные Доброземцева-71 (12 ± 2 барн и 270 ± 30 барн соответственно).

Резонансная структура в EAF-2003 описана только до 1 кэВ, хотя известны параметры трех сильных резонансов выше этой энергии (до 1320 эВ).

Вне резонансной области сечение захвата ниже 100 кэВ низковато, а выше - излишне высоко относительно экспериментальных данных, из которых результаты Висшака отличаются весьма высокой точностью.

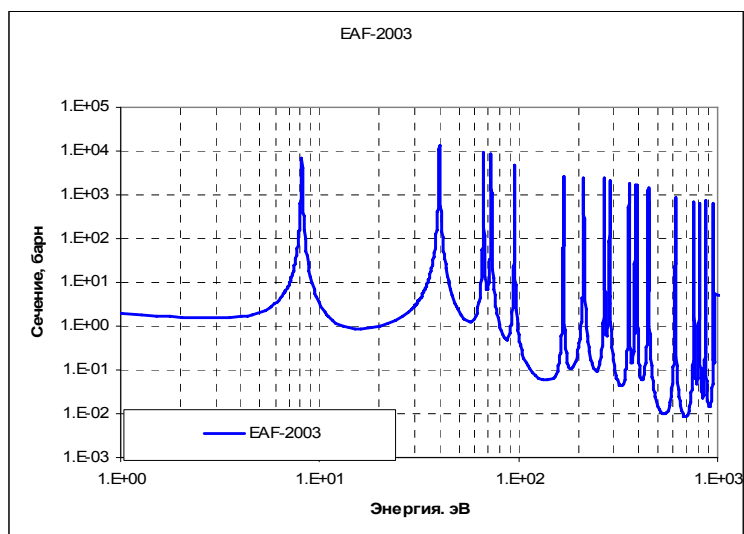


Рис.1а. Сечение захвата.

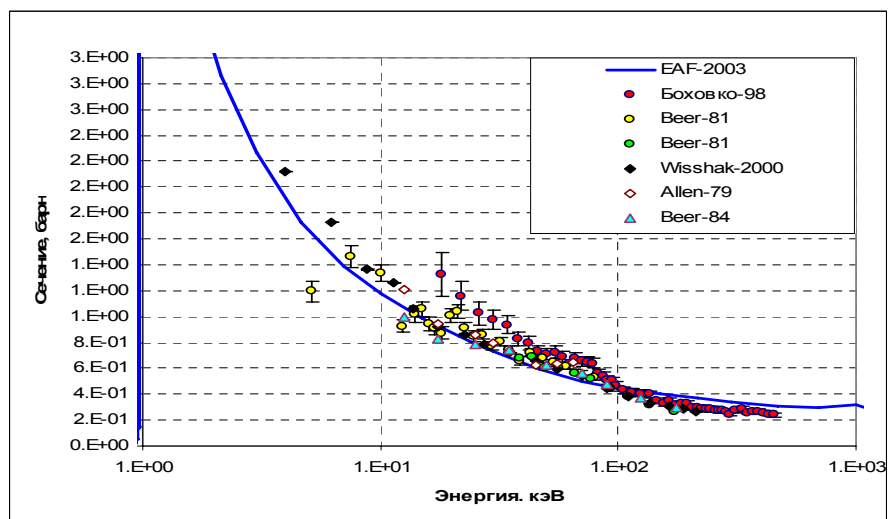


Рис.1б. Сечение захвата

Под действием тепловых нейтронов возможна реакция (n,α) . Из измерений Энсалема (Ensallem-74) ее сечение равно 0.1 миллибарна; оцененное значение именно таково. Однако согласно данным Андреева-65 это сечение не превышает 0.04 миллибарн.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

70.5. Иттербий-171

Содержание в естественной смеси 14.28%

На рис.1. оценка сечения захвата из EAF-2003 сравнивается с имеющимися экспериментальными данными.

Согласно EAF-2003:

сечение захвата тепловых нейтронов: 48.8 барн;

резонансный интеграл захвата: 322 барн.

Это совпадает с рекомендацией Мухабхаба 1984г. (48.6 ± 2.5 и 315 ± 30), но несколько выше его последней рекомендации (2006) по сечению захвата: 58.3 ± 4.0 барна, соответствующей измерениям Доброземцева-71 (58 ± 4 барн и 332 ± 30 барн).

Резонансная структура в EAF-2003 описана до 1585 эВ, хотя известны параметры шести сильных резонансов выше этой энергии (до 1685 эВ).

Вне резонансной области сечение захвата удовлетворительно согласуется с совокупностью экспериментальных данных, хотя и лежит несколько выше недавних результатов Висшака, претендующих на весьма высокую точность.

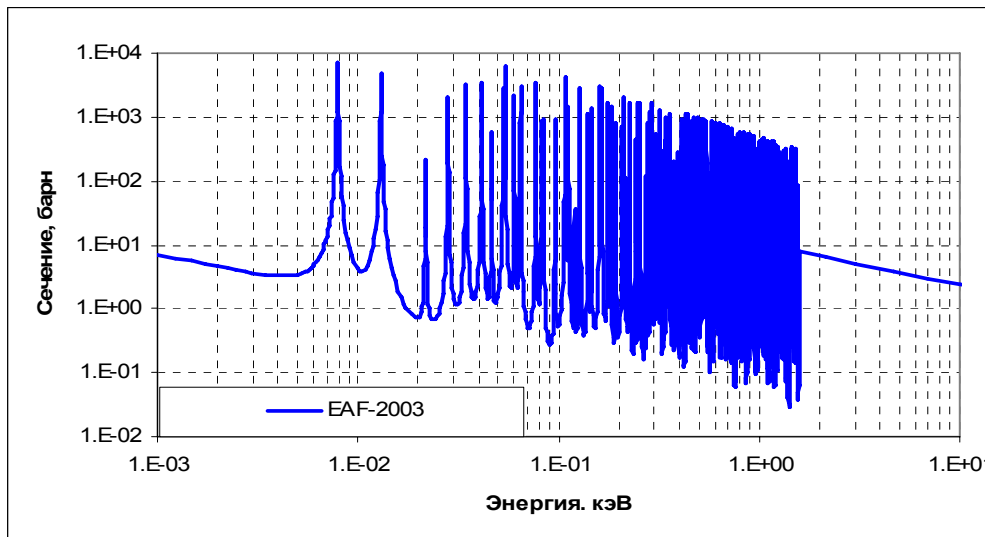


Рис.1а. Сечение захвата.

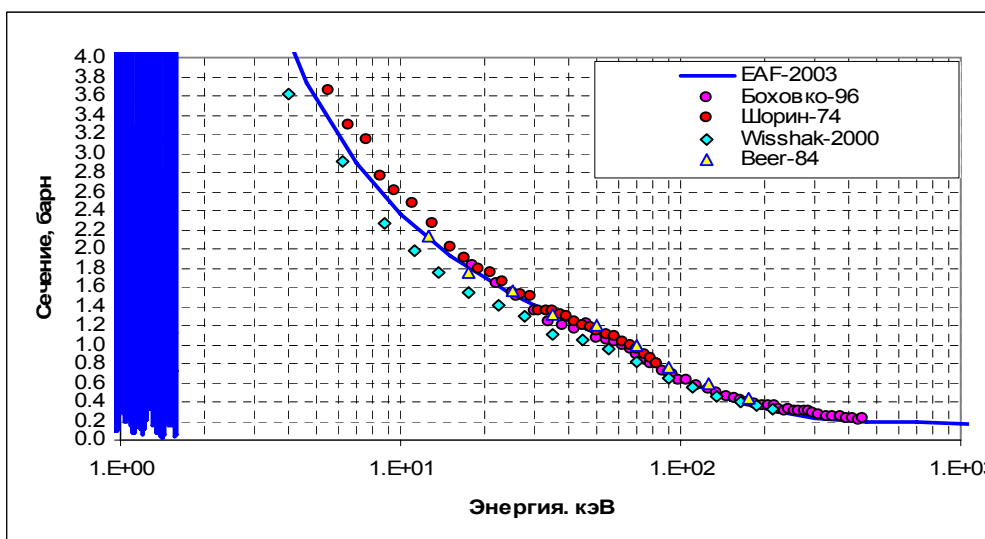


Рис.1б. Сечение захвата

Под действием тепловых нейтронов возможна реакция (n, α). Из измерений Энсалема (Ensallem-74) ее сечение равно 1.5 миллибарна; оцененное значение именно таково. Однако согласно данным Андреева-65 это сечение не превышает 0.04 миллибарн.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор заключения
Николаев М.Н.

70.6. Иттербий-172

Содержание в естественной смеси 21.83%

На рис.1. оценка сечения захвата из EAF-2003 сравнивается с имеющимися экспериментальными данными.

Согласно EAF-2003:

сечение захвата тепловых нейтронов: 0.80 барн;

резонансный интеграл захвата: 26.8 барн.

Это практически совпадает с рекомендацией Мухабхаба 1984г. (0.8 ± 0.4 и 25 ± 3), но ниже его последней рекомендации (2006) по сечению захвата: 1.3 ± 0.8 барна, соответствующей измерениям Доброземцева-71 (1.3 ± 0.8 барн и 25 ± 3 барн).

Резонансная структура в EAF-2003 описана до 3.71 кэВ, хотя могла бы быть продолжена до 10 кэВ.

Вне резонансной области сечение захвата удовлетворительно согласуется с совокупностью экспериментальных данных, хотя и лежит несколько выше недавних результатов Висшака, претендующих на весьма высокую точность.

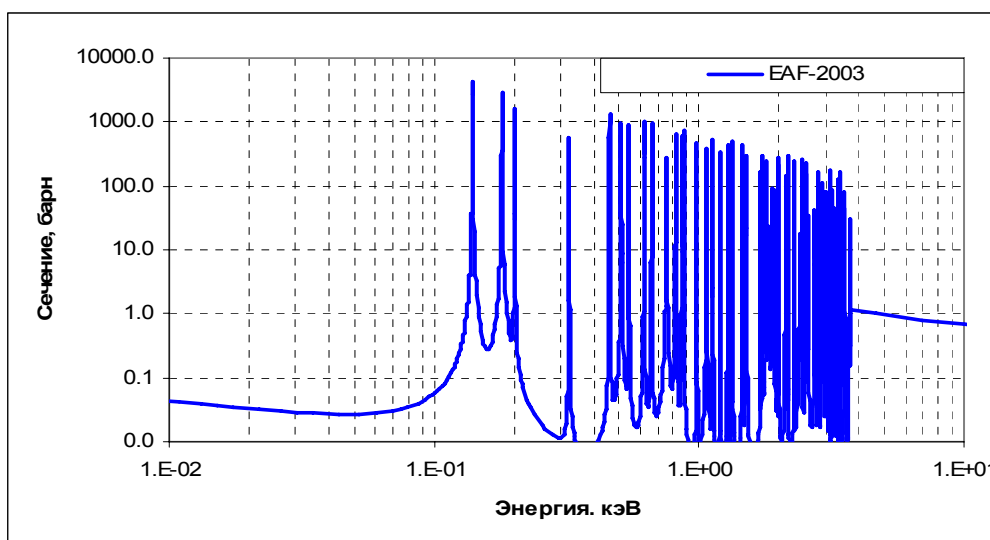


Рис.1а. Сечение захвата.

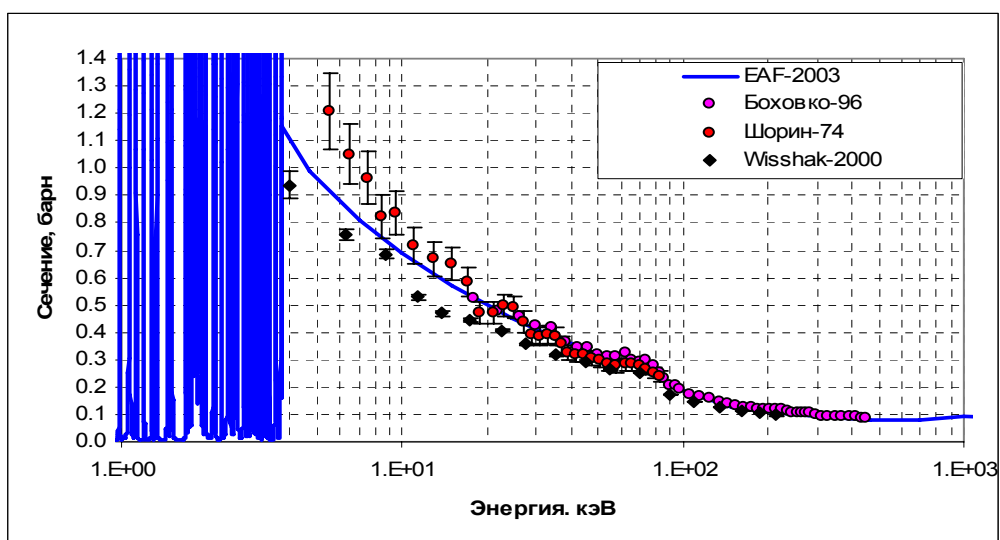


Рис.16. Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

70.7. Иттербий-173

Содержание в естественной смеси 16.13%

На рис.1. оценка сечения захвата из EAF-2003 сравнивается с имеющимися экспериментальными данными.

Согласно EAF-2003:

сечение захвата тепловых нейтронов: 17 барн;

резонансный интеграл захвата: 379 барн.

Это совпадает с рекомендацией Мухабхаба 1984г. (17.1 ± 1.3 и 380 ± 30), но чуть ниже его последней рекомендации (2006) по сечению захвата: 15.5 ± 1.5 барна, соответствующей измерениям Доброземцева-71 (1.3 ± 0.8 барн). Последний однако дает для резонансного интеграла большее значение- 410 ± 40 барн.

Резонансная структура в EAF-2003 описана до 1.58 кэВ, хотя могла бы быть продолжена до 1.8 кэВ.

Вне резонансной области сечение захвата удовлетворительно согласуется с совокупностью экспериментальных данных, хотя и лежит несколько выше недавних результатов Висшака, претендующих на весьма высокую точность.

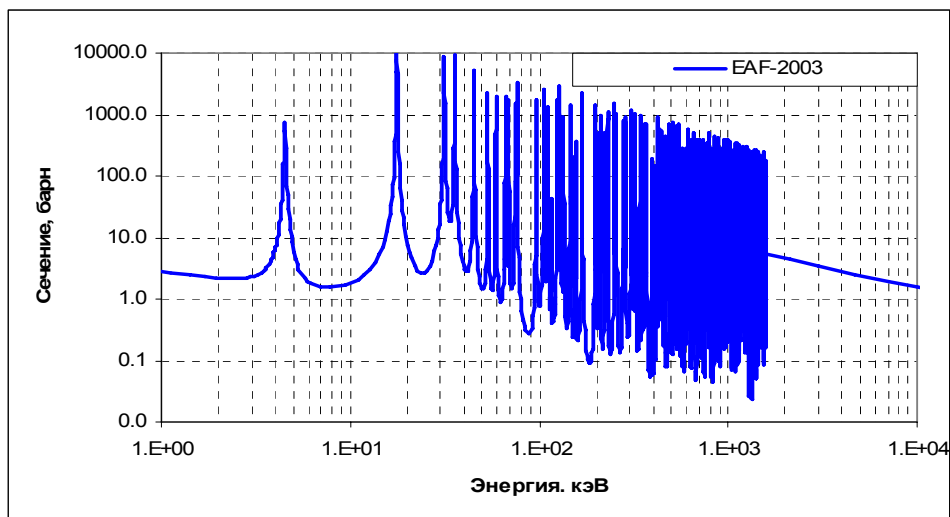


Рис.1а. Сечение захвата.

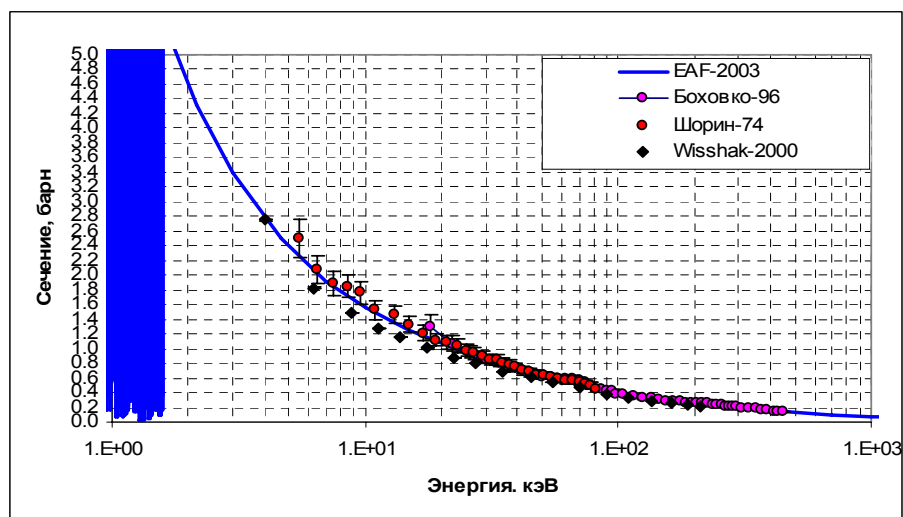


Рис.1б. Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

70.8. Иттербий-174

Содержание в естественной смеси 31.83%

На рис.1. оценка сечения захвата из EAF-2003 сравнивается с имеющимися экспериментальными данными.

Согласно EAF-2003:

сечение захвата тепловых нейтронов: 69.2 барн;

резонансный интеграл захвата: 27.6 барн.

Это совпадает с рекомендацией Мухабхаба 1984г. (69.4 ± 5.0 и 27 ± 3), но чуть ниже его последней рекомендации (2006) по сечению захвата: 63.2 ± 1.5 барна. Заметим, что никакой дополнительной экспериментальной информации в промежуток времени между этими оценками не появилось.

Резонансная структура в EAF-2003 описана до 4.3 кэВ, хотя могла бы быть продолжена до 19 кэВ.

Вне резонансной области сечение захвата удовлетворительно согласуется с совокупностью экспериментальных данных, хотя и лежит несколько выше недавних результатов Висшака, претендующих на весьма высокую точность.

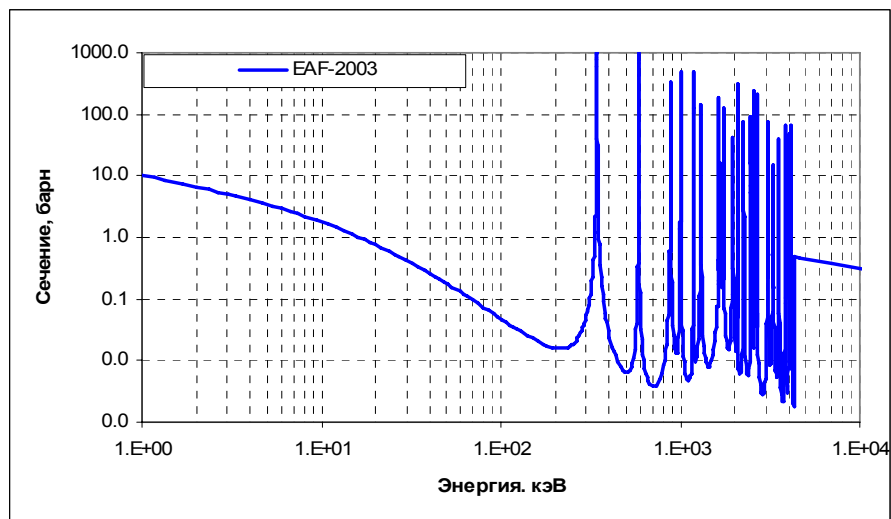


Рис.1а. Сечение захвата.

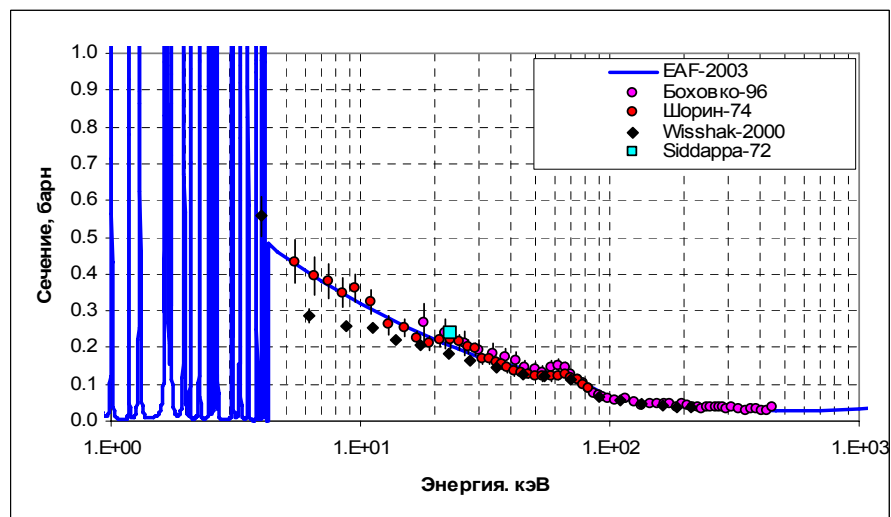


Рис.1б. Сечение захвата

Заклучение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор заклочения

Николаев М.Н.

70.9. Иттербий-175

Радиоактивен ($T_{1/2}=4.2$ дн.). Испытывает бета-распад в стабильный лютеций-175.
На рис.1. оценка сечения захвата из EAF-2003 сравнивается с имеющимися экспериментальными данными.

Согласно EAF-2003:

сечение захвата тепловых нейтронов: 28.3 барн;

резонансный интеграл захвата: 237 барн.

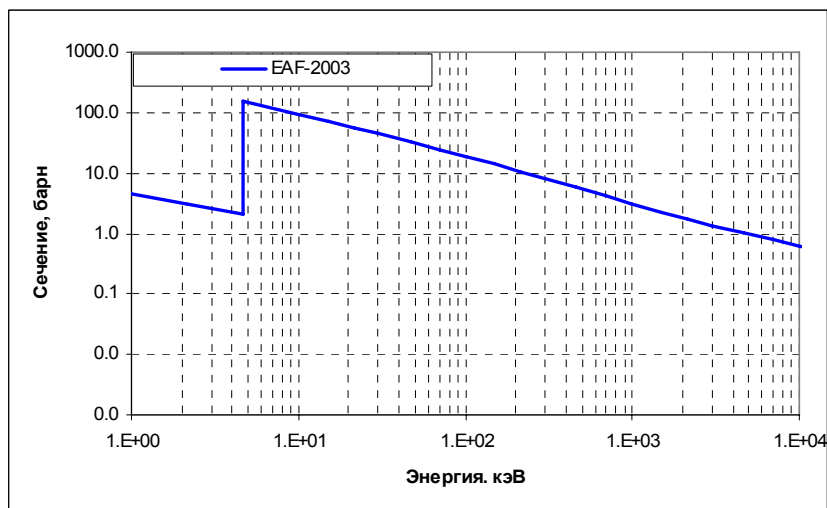


Рис.1а. Сечение захвата.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

70.10. Иттербий-176

Содержание в естественной смеси 12.76%

На рис.1. оценка сечения захвата из EAF-2003 сравнивается с имеющимися экспериментальными данными.

Согласно EAF-2003:

сечение захвата тепловых нейтронов: 2.86 барн;

резонансный интеграл захвата: 2.85 барн.

Это совпадает с рекомендациями Мухабхаба 1984г. и 2003 г. (2.85 ± 0.05 и 6.3 ± 0.6).

Резонансная структура в EAF-2003 описана до 3 кэВ, хотя могла бы быть продолжена до 19.7 кэВ.

Вне резонансной области сечение захвата не противоречит экспериментальным данным, согласие между которыми оставляет желать лучшего.

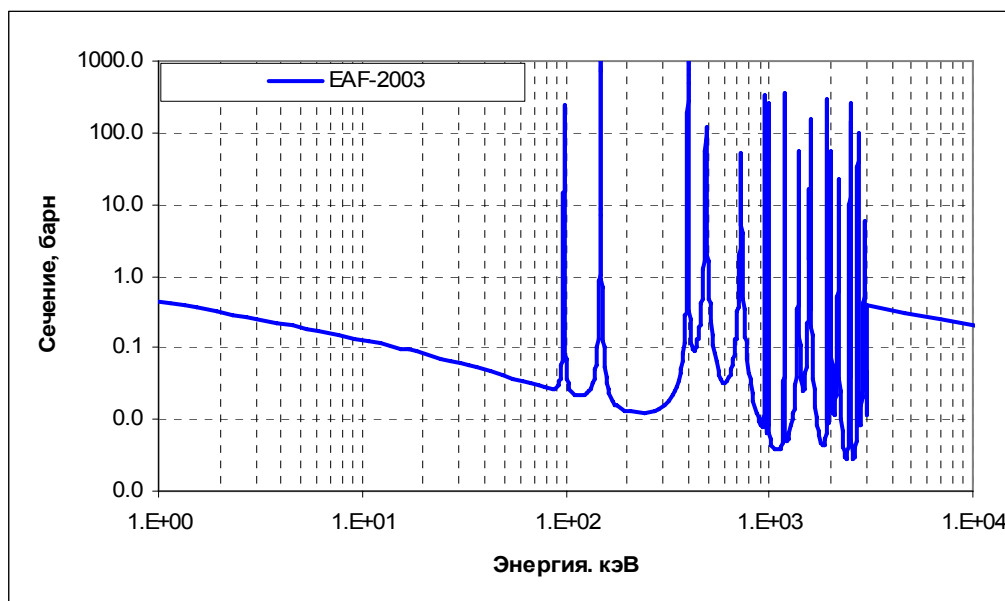


Рис.1а. Сечение захвата.

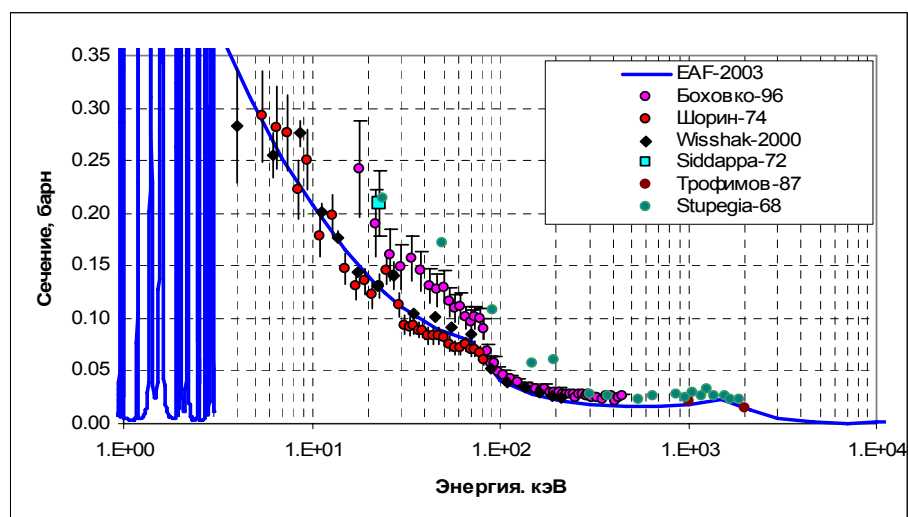


Рис.1б. Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных из EAF-2003. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

71.ЛЮТЕЦИЙ

71.1. Лютеций-169

Радиоактивен ($T_{1/2}=1.42$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в иттербий-169, которых, в свою очередь, тем же путем превращается ($T_{1/2}=32.026$ дн.) в стабильный туллий-169. В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакций $^{170}\text{Lu}_{(T_{1/2}=2.0 \text{ дн.})}(n,2n)$ или $^{171}\text{Lu}_{(T_{1/2}=8.22 \text{ дн.})}(n,3n)$

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Оцененные тепловое сечение и резонансный интеграл захвата:

$\sigma_c=75$ барн; $RI= 1586$ барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8, 10 опустить.

Файлу присвоить MAT=7169.

Автор заключения

Забродская С.В.

71.2. Лютеций-170

Радиоактивен ($T_{1/2}=2.01$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в стабильный иттербий-170. В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакций $^{171}\text{Lu}_{(T_{1/2}=8.22 \text{ дн.})}(n,2n)$ или $^{172}\text{Lu}_{(T_{1/2}=6.7 \text{ дн.})}(n,3n)$. Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Оцененные тепловое сечение и резонансный интеграл захвата:

$\sigma_c=89.11$ барн; $RI= 1683$ барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8, 9, 10 опустить.

Файлу присвоить MAT=7170.

Автор заключения

Забродская С.В.

71.3. Лютеций-171

Радиоактивен ($T_{1/2}=8.24$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в стабильный иттербий-171В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакций $^{172}\text{Lu}(T_{1/2}=6.7 \text{ дн.})(n,2n)$ или $^{173}\text{Lu}(T_{1/2}=1.37 \text{ лет})(n,3n)$.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Оцененные тепловое сечение и резонансный интеграл захвата:

$\sigma_c=54.32$ барн; $RI= 1548$ барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8, 9, 10 опустить.

Файлу присвоить MAT=7171.

Автор заключения

Забродская С.В.

71.4. Лютеций-172

Радиоактивен ($T_{1/2}=6.70$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в стабильный иттербий-172. В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакций $^{173}\text{Lu}(T_{1/2}=1.37 \text{ л.})(n,2n)$ или $^{174}\text{Lu}(T_{1/2}=3.31 \text{ л.})(n,3n)$.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003.

Экспериментальных данных для их валидации нет.

Оцененные тепловое сечение и резонансный интеграл захвата:

$\sigma_c=70.84$ барн; $RI= 1555$ барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8, 10 опустить.

Файлу присвоить MAT=7172.

Автор заключения

Забродская С.В.

71.5. Лютеций-173

Радиоактивен ($T_{1/2}=1.37$ лет). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в стабильный иттербий-173. В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакций $^{172}\text{Lu}(T_{1/2}=6.7 \text{ дн.})(n,\gamma)$, $^{174}\text{Lu}(T_{1/2}=3.31 \text{ г.})(n,2n)$ или $^{175}\text{Lu}(n,3n)$.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003.

Экспериментальных данных для их валидации нет.

Оцененные тепловое сечение и резонансный интеграл захвата:

$\sigma_c=47.16$ барн; $RI= 1119$ барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8, 10 опустить.

Файлу присвоить MAT=7173.

Автор заключения

Забродская С.В.

71.6. Лютеций-174

Радиоактивен ($T_{1/2}=3.31$ г.). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в стабильный иттербий-174. В реакторах может образовываться в ничтожных количествах за счет реакций $^{175}\text{Lu}(n,2n)$ или $^{176}\text{Lu}(n,3n)$.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Оцененные тепловое сечение и резонансный интеграл захвата:

$\sigma_c=56.43$ барн; $RI= 1550$ барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=8 опустить. В файле MF=10 сохранить только секцию MT=4.

Файлу присвоить MAT=7174.

Автор заключения

Забродская С.В.

71.7. Лютеций-174-m

Долгоживущий изомер ($T_{1/2}=142$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в стабильный иттербий-174 с вероятностью 0.7% и с 99.3% испытывает изомерный переход в основное состояние.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

$\sigma_c=56.44$ барн; $RI= 1550$ барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=8 опустить. Секцию MT=4 из файла MF=3 перенести в MF=10.

Файлу присвоить MAT=7114.

Автор заключения

Забродская С.В.

71.8. Лютеций-175

Содержание в естественной смеси 97.41%.

Имеется единственная полная оценка нейтронных данных Райта и Леонард-Стюарта (R.Q. Wright , Leonard-Stewart), принятая в библиотеках ENDF/B-VIIb2 и JEFF-3.1. В других библиотеках полных файлов для этого нуклида не содержится.

1. Тепловая и резонансная области

В табл. 1 тепловые сечения сравниваются с рекомендацией Мухабхаба¹.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

| | $\sigma(0.0253\text{эВ})$ | RI |
|--------------------------|---------------------------|--------|
| JEFF-3.1 | 23.09 | 621.31 |
| Мухабхаб-03 ¹ | 23.5±3.1 | 880±40 |

Область разрешенных резонансов содержит 115 резонансов выше энергии связи нейтрона и одно связанное состояние. Максимальная энергия - 487.71 эВ. Граница области - 411 эВ. Все резонансы идентифицированы как s-резонансы. Их параметры приняты в соответствии с рекомендацией Мухабхаба¹ (резонансам, спины которых определены не были, эти спины приписаны составителями оценки).

На рис.1 приведена нарастающая сумма резонансов. На рис. 2 показана нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин. Из Рис. 1 можно заключить, что заметного пропуска резонансов нет: их сумма нарастает практически линейно. Однако, сумма приведенных ширин (рис.2) после 50 эВ резко снижает свой наклон. Создается впечатление, что выше 100 эВ значительную долю разрешенных резонансов составляют узкие p-резонансы.

¹ S.F.Mughabghab. Thermal neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-Factors. INDC (NDS)-440, Feb.2003.

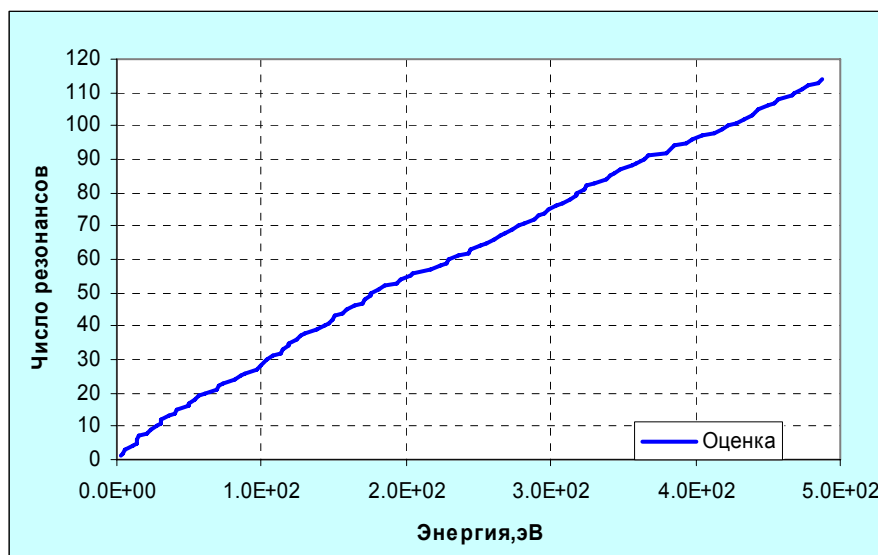


Рис.1. Нарастающая сумма числа резонансов

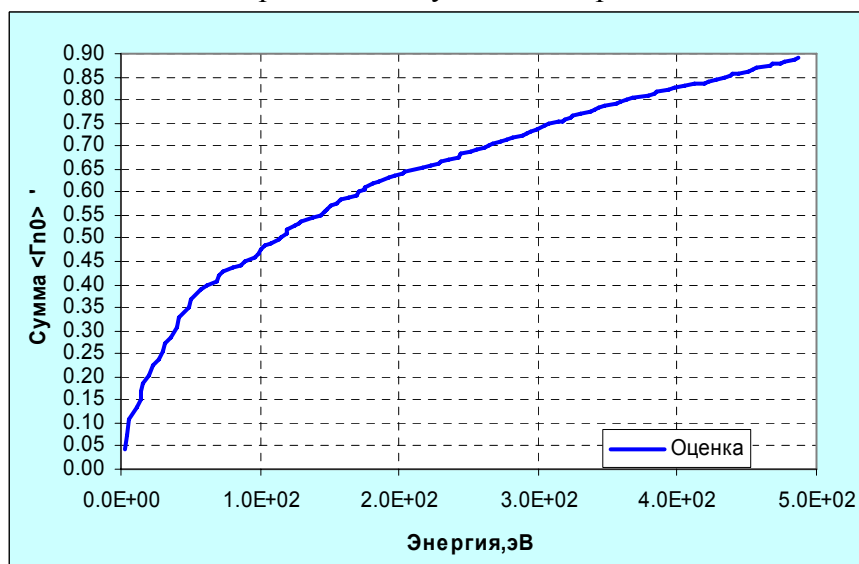
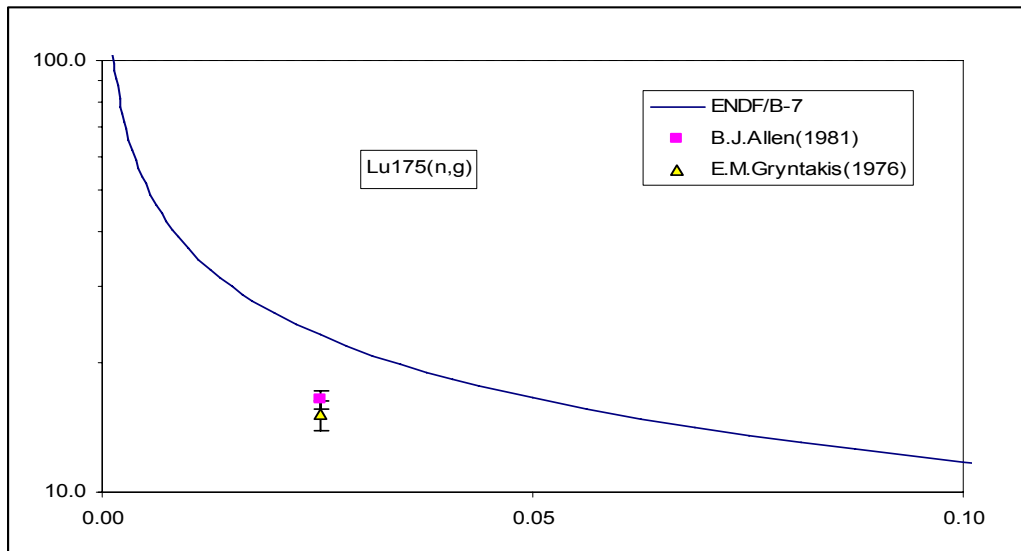


Рис.2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин

Желателен более тщательный статистический анализ разрешенных резонансов. Однако этот анализ, понятно, не изменит ни числа, ни ширин разрешенных резонансов, а позволит лишь в лучшем случае, сделать заключение о пропуске части р-резонансов. Поэтому оценка резонансных параметров в области разрешенных резонансов может быть принята в существующем виде в надежде на то, что пропуск слабых р-резонансов не повлияет существенно на рассчитываемые сечения.

Область неразрешенных резонансов простирается до 10 кэВ. В ней даются средние параметры s- и р-резонансов.

Ниже на рис.3(а-с) приведены экспериментальные данные по сечению захвата в сравнении с оценкой. Рассматривались только последние по годам экспериментальные данные. В тепловой точке данные экспериментов идут ниже оценки, опирающейся на рекомендацию Мухабхаба, который, вероятно, обладал дополнительной экспериментальной информацией, не вошедшей в EXFOR. В области разрешенных резонансов согласие с экспериментальными данными лучше.



На рис.3а. Экспериментальные данные по сечению захвата в сравнении с оценкой

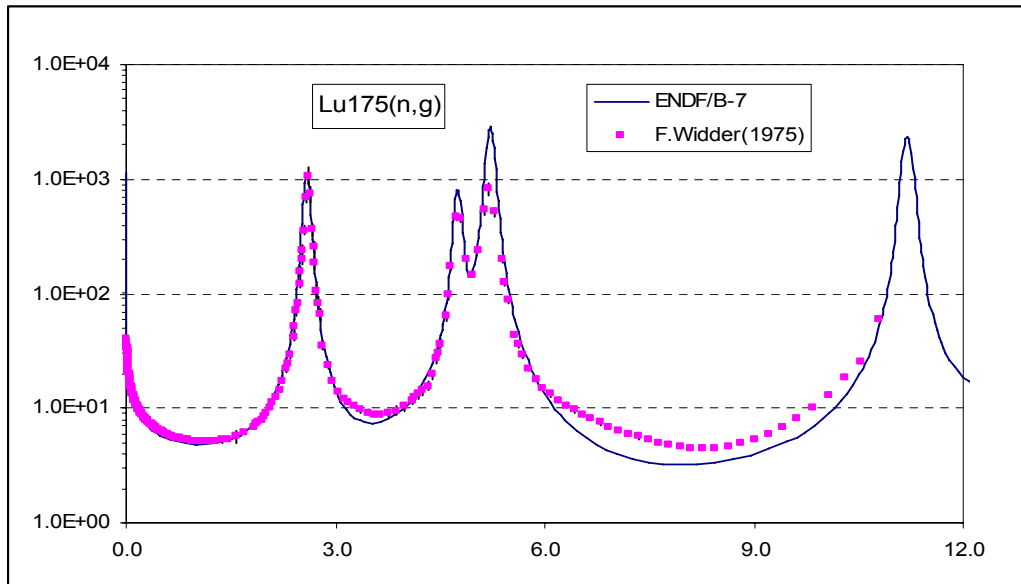


Рис.3б. Сечение захвата

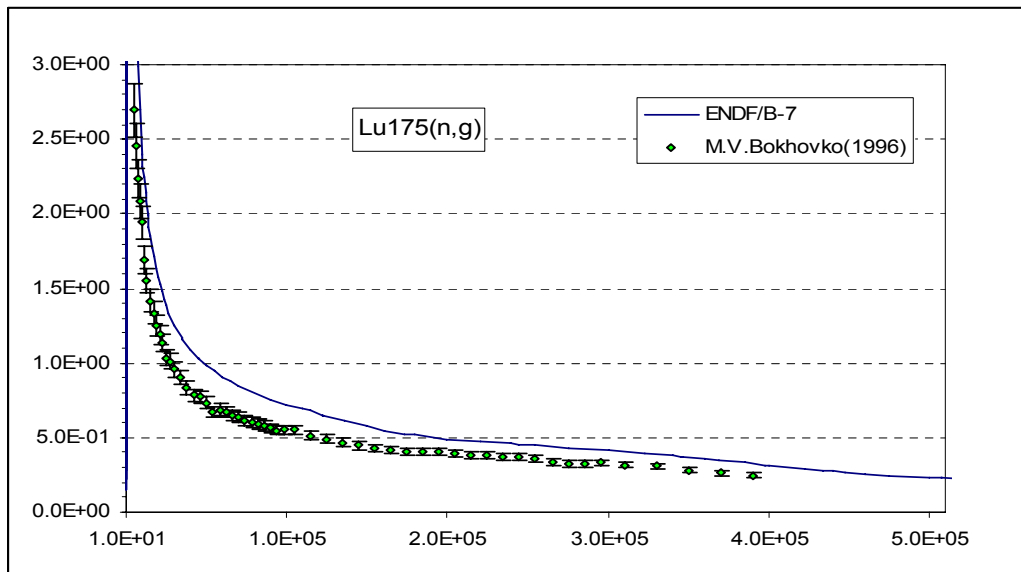


Рис.3с. Сечение захвата

В области неразрешенных резонансов и выше наиболее полный эксперимент из современных – эксперимент М.В.Боховко(1996). Оценочная кривая проходит заметно выше этих данных.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку Райта и Леонард-Стюарта. Включить в нее файл MF=9 с секцией MT=16, описывающую вероятность образования долгоживущего изомера $^{174}\text{Lu}^m$, используя данные из EAF-2003.

При возможности пересмотреть оценку с учетом новых экспериментальных данных (в частности, данных Боховко) и новой рекомендации Мухабхаба (2006г.), пока автору недоступной.

Автор заключения

Забродская С.В.

71.9. Лютеций-176

Содержание в естественной смеси 2.59%. ($T_{1/2}=4.08\text{E}+10$ лет).

Имеется единственная полная оценка нейтронных данных Райта и Леонард-Стюарта (R.Q. Wright, Leonard-Stewart), принятая в библиотеках ENDF/B-VIIIb2 и JEFF-3.1. В других библиотеках полных файлов для этого нуклида не содержится.

2. Тепловая и резонансная области

В табл. 1 тепловые сечения сравниваются с рекомендацией Мухабхаба².

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

| | $\sigma(0.0253\text{эВ})$ | RI |
|--------------------------|---------------------------|-----------------|
| JEFF-3.1 | 2098.2 | 921.1 |
| Мухабхаб-03 ³ | 2090. \pm 70. | 1087. \pm 40. |

Область разрешенных резонансов содержит 59 резонансов выше энергии связи нейтрона и одно связанное состояние. Максимальная энергия – 135.4 эВ. Граница области - 102 эВ. Все резонансы идентифицированы как s-резонансы. Их параметры приняты в соответствии с рекомендацией Мухабхаба¹ (резонансам, спины которых определены не были, эти спины приписаны составителями оценки).

На рис.1 приведена нарастающая сумма резонансов. На рис. 2 показана нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин. Из Рис. 1 можно заключить, что заметного пропуска резонансов нет: их сумма нарастает практически линейно. Однако, сумма приведенных ширин (рис.2) ведет себя неравномерно.

² S.F.Mughabghab. Thermal neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-Factors. INDC (NDS)-440, Feb.2003.

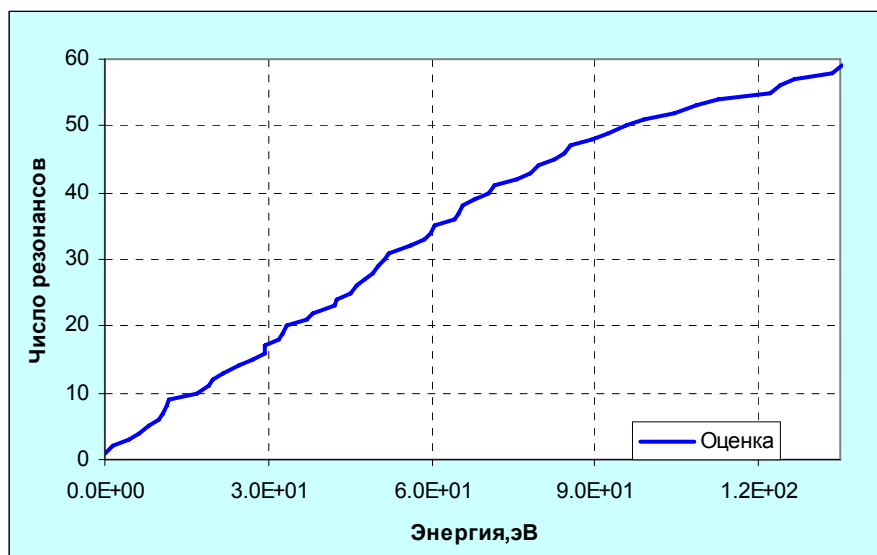


Рис.1. Нарастающая сумма числа резонансов

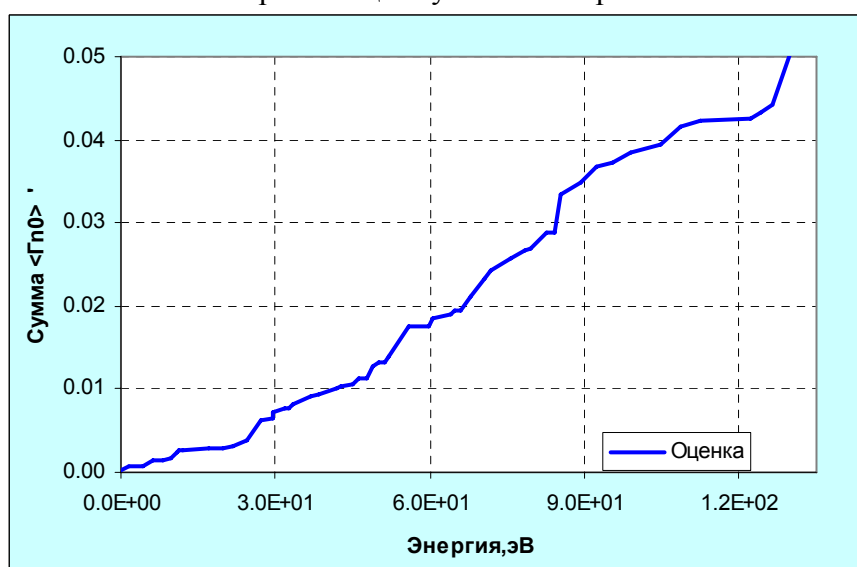
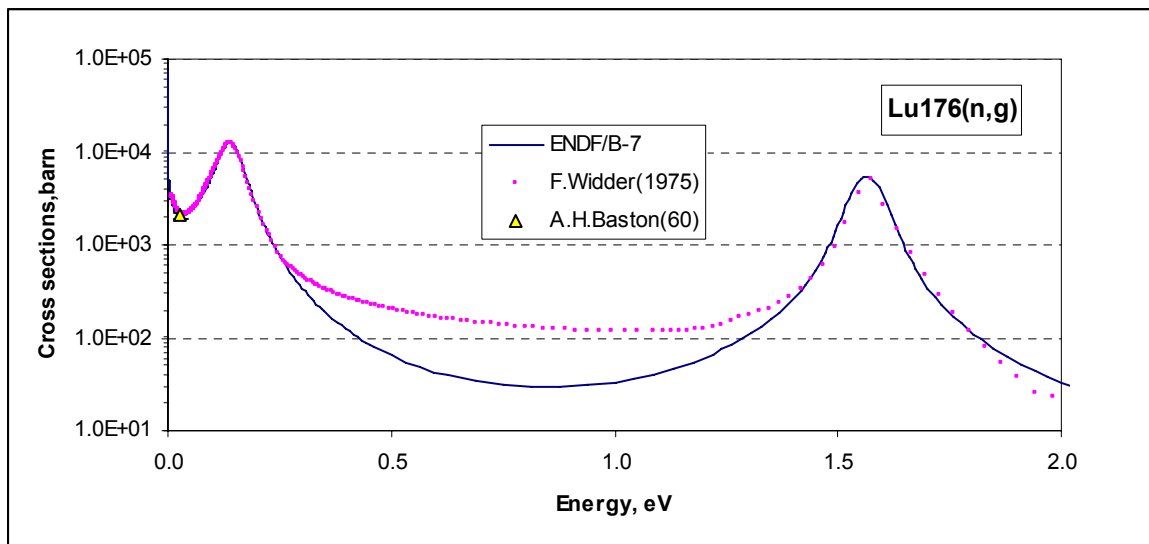


Рис.2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин

Область неразрешенных резонансов простирается до 10 кэВ. В ней даются средние параметры s- и p-резонансов.

Ниже на рис.3(a,b) приведены экспериментальные данные по сечению захвата в сравнении с оценкой. В тепловой области данные эксперимента F.Widder(1975), кроме промежуточной области между резонансами, идеально совпадают с оцененными значениями. В тепловой точке – экспериментальный результат A.Y.Baston(1960) не противоречит расчетному значению. В области неразрешенных резонансов экспериментальных данных нет.



На рис.3а. Экспериментальные данные по сечению захвата в сравнении с оценкой

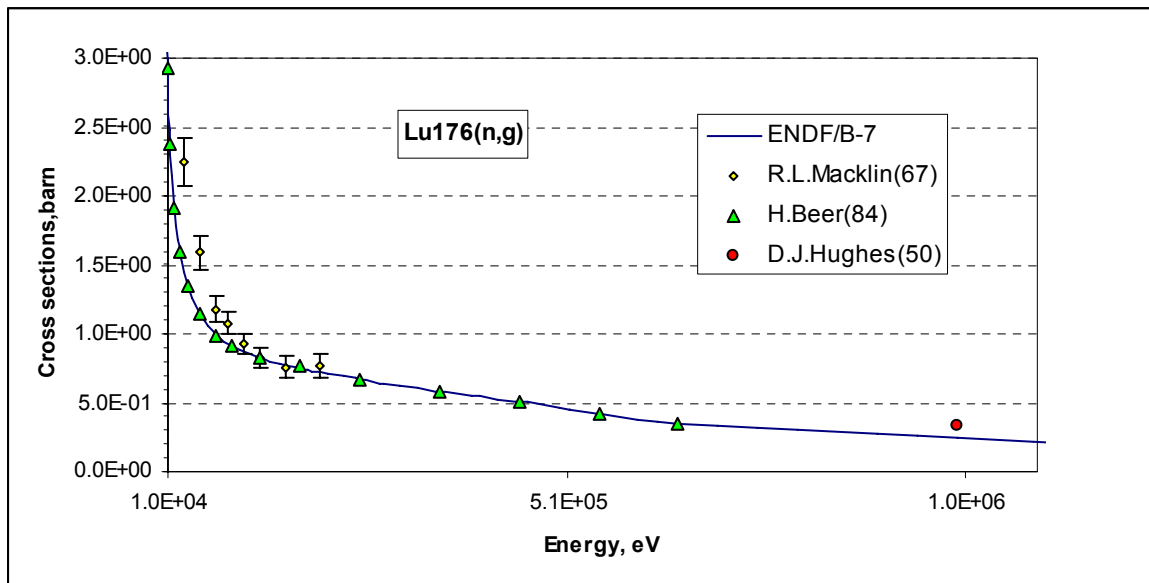


Рис.3б. Сечение захвата

Далее, за границей неразрешенных резонансов (10 кэВ) экспериментальные данные находятся в согласии с расчетными. В точке 1 МэВ приведет давнишний эксперимент D.J.Hughes(50), поскольку в EXFOR более поздних данных нет. Также отсутствуют экспериментальные данные при высоких энергиях.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку Райта и Леонард-Стюарта. Включить в нее файл MF=9 с секцией MT=17, описывающую вероятность образования долгоживущего изомера ^{174}Lu , и с секцией MT=102 с вероятностями образования основного и изомерного состояний лутеция -177, используя данные из EAF-2003.

71.10. Лютеций-177

Радиоактивен ($T_{1/2}=160.4$ д.). Испытывает β^- - распад в стабильный ^{177}Hf . В реакторах может образовываться за счет реакций $^{176}\text{Lu}(n,\gamma)$.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Оцененные тепловое сечение и резонансный интеграл захвата:

$\sigma_c=1018.5$ барн; $RI= 92968$ барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=8 опустить. В файле MF=10 сохранить только секцию MT=4.

Файлу присвоить MAT=7177.

Автор заключения

Забродская С.В.

71.11. Лютеций-177-m

Долгоживущий изомер ($T_{1/2}=6.734$ дн.). Испытывает β^- - распад в метастабильное состояние ^{177}Hf ($T_{1/2}=51.4$ мин.) с вероятностью 79%, остальное - это изомерный переход в основное состояние ^{177}Hf . В реакторах может образовываться за счет реакций $^{176}\text{Lu}(n,\gamma)$.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Оцененные тепловое сечение и резонансный интеграл захвата:

$\sigma_c=0.055$ барн; $RI= 1.4089$ барн.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=8 опустить. Секцию MT=4 из файла MF=3 перенести в MF=10.

Файлу присвоить MAT=7187.

Автор заключения

Забродская С.В.

72. ГАФНИЙ

72.0. Общие замечания

Гафний имеет 6 стабильных изотопов: ^{174}Hf , ^{176}Hf , ^{177}Hf , ^{178}Hf , ^{179}Hf , ^{180}Hf . Два из них имеют долгоживущие изомеры (причем – вторые). Это $^{178}\text{Hf}^m$ ($T_{1/2}=31\text{г.}$) и $^{179}\text{Hf}^m$ ($T_{1/2}=25\text{дн.}$). Имеется еще 4 долгоживущих радиоактивных изотопов гафния: ^{172}Hf , ^{175}Hf , ^{181}Hf , ^{182}Hf .

Имеет место следующее положение с файлами оцененных данных.

Для всех нуклидов имеются оценки нейтронных сечений в библиотеке EAF-2003(последняя версия). Там содержатся также данные об образовании изомерных состояний ядер-продуктов. Для радионуклидов оценка выполнялась, в основном, на основе теоретических моделей с параметрами, подобранными для описания сходных ядер.

Для стабильных изотопов полные наборы оцененных данных содержатся в библиотеках ENDF/B-VII.b2, JENDL-3.3, и JEFF-3.1.

ENDF/B-VII.b2 содержит оценки, базой для которых послужили файлы, созданные в 1976 г. М.Дрейком и др. (M.Drake, D.Sarges, T.Moung et al). Резонансная область опиралась на оценки резонансных параметров начала 70-х годов. Вне резонансной области оценка опиралась, в первую очередь на имеющиеся экспериментальные данные. В ENDF/B-VII.b2 включены файлы данных из ENDF/B-VI, в которых в 1991 г. Райтом (R.Q.Wright) были пересмотрены данные в области как разрешенных резонансов (приняты параметры, рекомендованные в компиляции Мухабхаба 1984 г.), так и в области неразрешенных резонансов.

JENDL-3.3 содержит оценки, базой для которых послужили файлы, созданные Хида, Йошида и Шибата (Hida, Yoshida, Shibata) в 1989 г. для JENDL-3. В 1994 г. Накагава (T.Nakagawa) пересмотрел данные по сечениям упругого и неупругого рассеяния. В 2004 г. Шибата ввел еще ряд усовершенствований, в частности принял секцию Резонансных параметров из ENDF/B-VI.

JEFF-3.1 содержит оценки, базой для которых послужили файлы из JENDL-3.3, в которых были изменены параметры резонансов при энергии ниже 200 эВ на основе результатов новых измерений¹. Для расчетов рекомендована формула Райха-Мура, а не многоуровневая формула Брейта-Вигнера, как ранее. Небольшие коррективы внесены и параметры резонансов при более высоких энергиях.

Из сказанного ясно, что наиболее поздней и, вероятно, наиболее корректной оценкой нейтронных данных для стабильных изотопов является JEFF-3.1. Насколько это заключение оправдано будет ясно из рассмотрения данных для каждого изотопа в отдельности.

Следует подчеркнуть, что в JEFF-3.1 и в JENDL-3.3 намного подробнее описывается неупругое рассеяние; представлены сечения по большему числу реакций.

Наконец, заметим, что в библиотеке ФОНД-2.2 полный файл для природного гафния принят из библиотеки ENDF-78 (оценка Хавертона), а для стабильных изотопов приняты файлы из JENDL-2. Для радиоактивных изотопов в эту библиотеку были включены только данные о нейтронных сечениях из ADL-3 (библиотеке, положенной в основу EAF-2003, но в значительной степени устаревшей).

¹ Trbovich M.J. et al. Int. Conf. on Nucl. Data for Sci & Techn. Santa Fe, USA, 2004.

72.1. Гафний-172

Радиоактивен ($T_{1/2}=1.87$ г.). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в лютеций-174, которых, в свою очередь, тем же путем превращается ($T_{1/2}=6.7$ дн.) в стабильный иттербий-174. В реакторах может образовываться в малых количествах за счет реакций $^{174}\text{Hf}(n,3n)$ или $^{174}\text{Hf}(n,2n)$ $^{173}\text{Hf}(n,2n)$. Последняя маловероятна, поскольку ^{173}Hf имеет период полураспада менее суток, первая – из за высокого порога реакции.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить MAT=7272.

Автор заключения

Николаев М.Н.

72.2. Гафний-174

Содержание в естественной смеси 0.16%.

1. Области тепловых и резонансных энергий.

В табл. 1 тепловые сечения сравниваются с рекомендацией Мухабхаба². На рис. 1 сравниваются между собой и с экспериментальными данными оцененные энергетические зависимости сечения захвата.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

| | $\sigma(0.0253\text{эВ})$ | RI |
|--------------------------|---------------------------|--------|
| JEFF-3.1 | 549.5 | 442.3 |
| ENDF/B-VIIb2 | 561.8 | 355.2 |
| JENDL-3.3 | 561.5 | 363.1 |
| FOND-2.2 | 390 | 492 |
| Мухабхаб-03 ² | 549.7±7 | 436±35 |

² S.F.Mughabghab. Thermal neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-Factors. INDC (NDS)-440, Feb.2003.

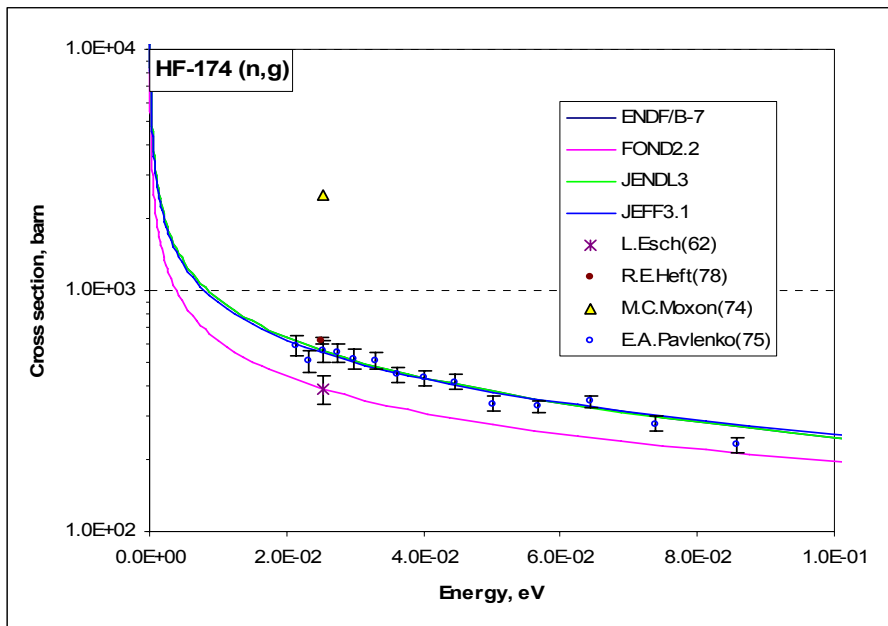


Рис. 1. Сечение захвата

На рис.2. с экспериментальными данными сравниваются оценки полного сечения. Из приводимых данных очевидно преимущество JEFF-3.1.

Область разрешенных резонансов во всех оценках содержит 10 резонансов при энергиях выше энергии связи нейтрона, и простирается до 220 -230 эВ. В JEFF-3.1 эта граница 220 эВ, что вполне оправдано при энергии последнего резонанса 211 эВ.

Область неразрешенных резонансов распространена до 50 кэВ, как и JENDL-3.3. В ENDF/B-VII эта область распространена до 90 кэВ при независимых от энергии средних параметрах.

Вывод ясен: в резонансной области в РОСФОНД следует принять оценку из JEFF-3.1

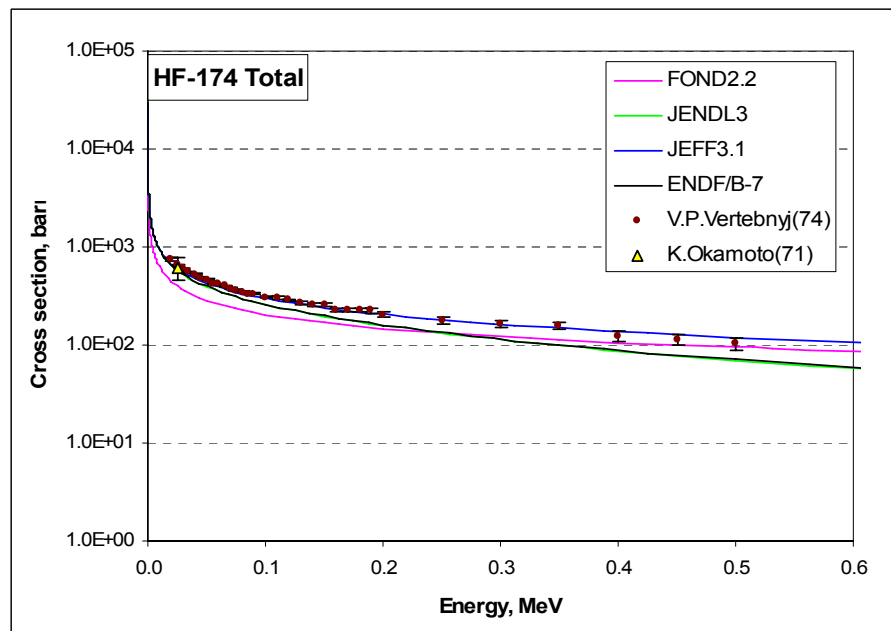


Рис.2. Полное сечение.

2. Данные вне резонансной области

На рис.3. оцененные данные по сечению неупругого рассеяния (толстые линии) и реакциям (n,2n) (тонкие линии) и (n,3n) (пунктир) сравниваются друг с другом. Данные

JEFF-3.1 в точности совпадают с таковыми из JENDL-3.3 и потому не изображены. Данные о реакции (n,3n) в ФОНД-2.2 и в ENDF/B-VII отсутствуют.

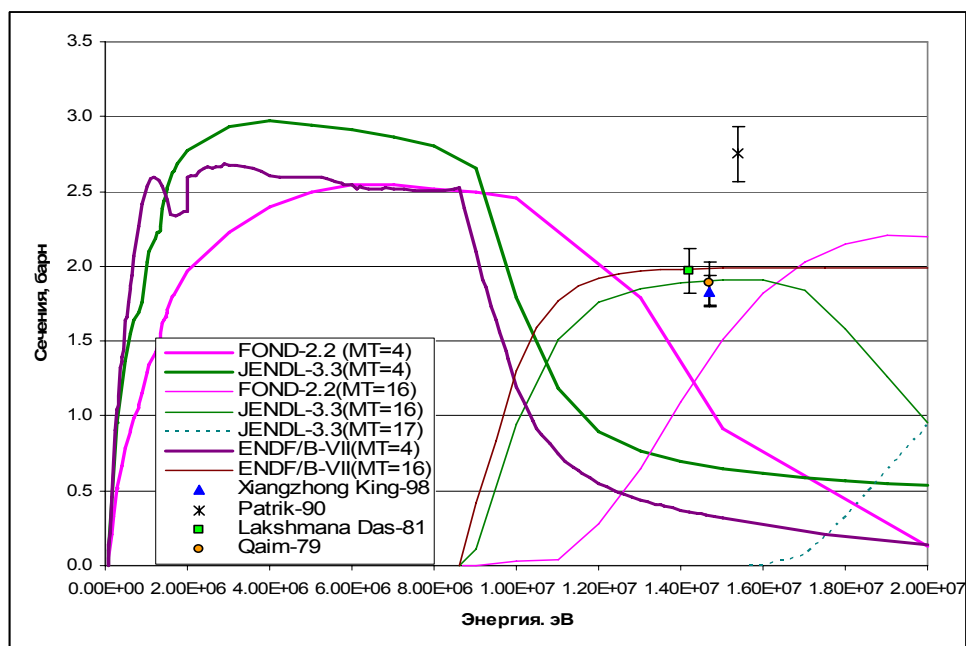


Рис. 3. Сечения неупругого рассеяния и реакций (n,2n) и (n,3n).

Вне резонансной области кроме полного сечения (см. рис. 2) имеются результаты измерений только сечения реакции (n,2n), которые согласуются друг с другом кроме явно завышенного результата Патрика.

В JEFF-3.1 и JENDL-3.3 описывается возбуждение 18 дискретных уровней при неупругом рассеянии; в ENDF/B-VIIb2 только 3. Это ясно проявилось в поведении полного сечения неупругого рассеяния. Зато в этой оценке описывается сечение реакции (n,p), в результате которой с вероятностью около 40% образуется изотоп $^{174}\text{Lu}^m$ с периодом полураспада 142 дня. К сожалению, ни в JEFF-3.1, ни в JENDL-3.3 данные об этой реакции отсутствуют. Ввести сечение этой реакции в файл данных JEFF-3.1 перед включением его в РОСФОНД оказалось не просто, поскольку имеющиеся оценки величины сечения различаются весьма сильно: согласно ENDF/B-VIIb2 при 20 МэВ сечение этой реакции равно 265 миллибарн, а согласно EAF-2003 – всего 5.8 миллибарн. Точно такое же сечение этой реакции было и в библиотеке JENDL-2 (а, следовательно, в в ФОНД-2.2), в которой, кстати, наличествовала и реакция (n, α). Число дискретных уровней, возбуждаемых при неупругом рассеянии, как и в JENDL-3.3 равно 18. Причина, по которой при переходе от JENDL-2 к JENDL-3 из рассматриваемых реакций исчезли (n,p) и (n, α), неизвестны.

Достоинством JEFF-3.1 и JENDL-3.3 является описание данных об образовании гамма-квантов, которые в ENDF/B-VIIb2 и в ФОНД-2.2 отсутствуют.

Заключение.

В РОСФОНД следует принять оценку из JEFF-3.1. В дальнейшем целесообразно ее дополнение данными обо всех энергетически возможных нейтронных реакциях и данными об образовании долгоживущего изомера $^{174}\text{Lu}^m$. Сделать это используя данные EAF-2003 невозможно, поскольку в этой библиотеке энергии реакции (n,p) приписано значение +5.145 МэВ, что привело к тепловому сечению достигающему 1 барн. В действительности энергия этой реакции равна – 2.71 МэВ.

Авторы заключения

Забродская С.В., Николаев М.Н.

72.3. Гафний-175

Радиоактивен ($T_{1/2}=70$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в стабильный лутеций-174. В реакторах может образовываться в малых количествах за счет реакций $^{174}\text{Hf}(n,\gamma)$ или $^{176}\text{Hf}(n,2n)$.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущего изомера – $^{174}\text{Lu}^m$ – перенести в файл MF=9. Файлы MF=10 и MF=8 опустить.

Файлу присвоить МАТ=7275.

Автор заключения

Николаев М.Н.

72.4. Гафний-176

Содержание в естественной смеси 5.26%.

1. Области тепловых и резонансных энергий.

В табл. 1 тепловые сечения сравниваются с рекомендацией Мухабхаба³. На рис. 1 сравниваются между собой и с экспериментальными данными оцененные энергетические зависимости сечения захвата. Как видно, разброс экспериментальных данных весьма велик и погрешность, приписанная Мухабхабом сечению захвата, вероятно, занижена. Сечение захвата при более высоких энергиях изображено на рис. 1б. Современные оценки опираются на данные Бира и не учитывают поле поздние и подробные результаты Боховко. Вследствие этого в области 300 – 450 кэВ сечение захвата, видимо, существенно недооценено.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

| | $\sigma(0.0253\text{эВ})$ | RI |
|--------------------------|---------------------------|--------|
| JEFF-3.1 | 21.3 | 694.3 |
| ENDF/B-VIIb2 | 13.76 | 401.3 |
| JENDL-3.3 | 23.48 | 893.1 |
| FOND-2.2 | 38.0 | 360 |
| Мухабхаб-03 ³ | 23.5±3.1 | 880±40 |

³ S.F.Mughabghab. Thermal neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-Factors. INDC (NDS)-440, Feb.2003.

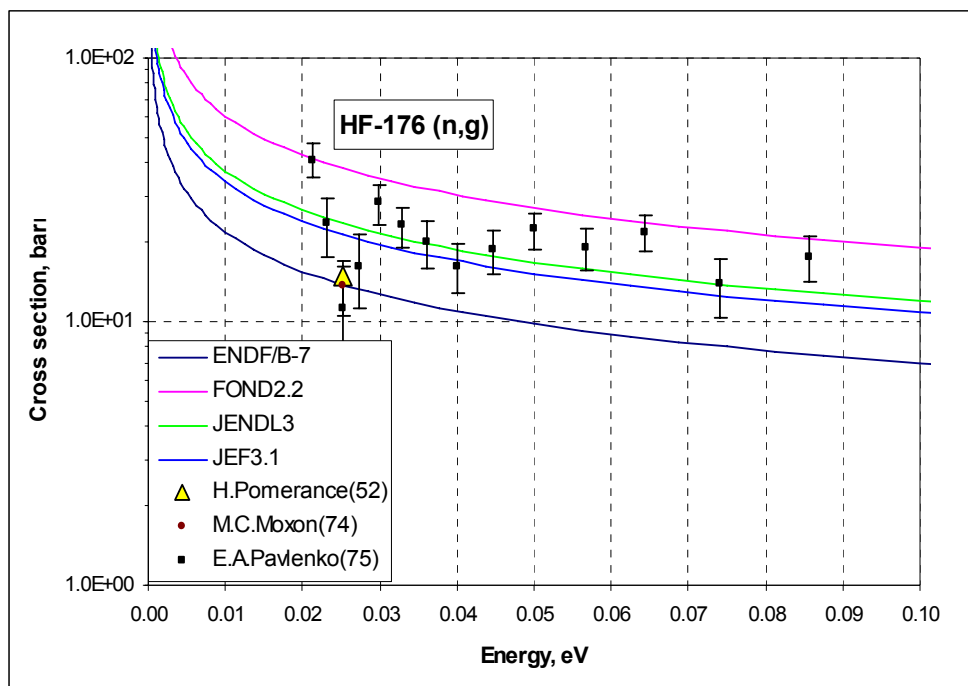


Рис. 1а. Сечение захвата

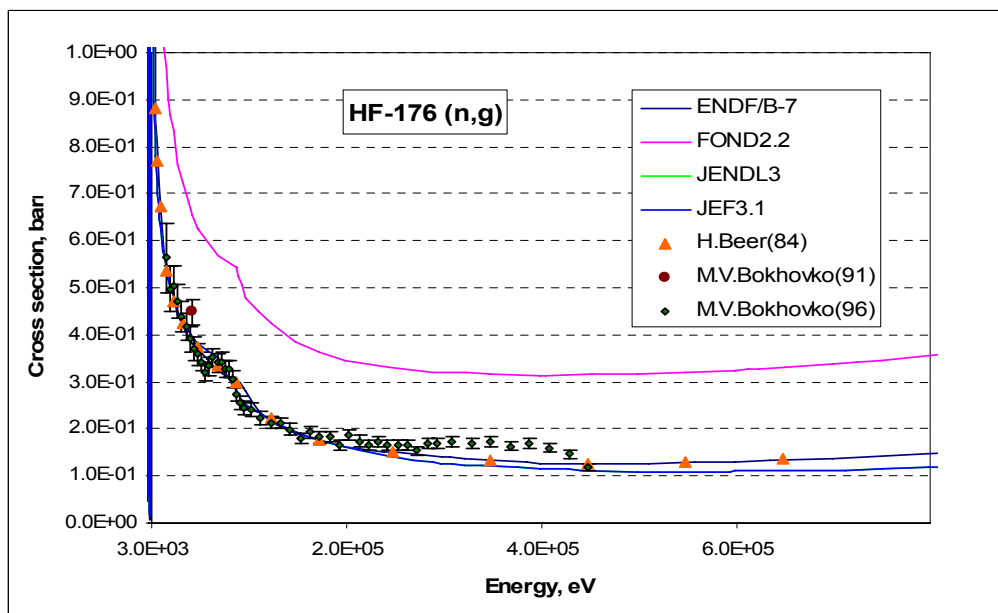


Рис.1б. Сечение захвата

На рис.2. с экспериментальными данными сравниваются оценки полного сечения. Разброс экспериментальных данных весьма велик и не позволяет ни отдать предпочтение той или иной оценке, ни помочь в разрешении противоречия в данных по сечению захвата. Единственный эксперимент по сечению рассеяния тепловых нейтронов был выполнен Вертебным (1974) и дал 15 ± 3 барна, что намного превышает оцененные значения (5.5 барна в JENDL-3.3 и JEFF_3.1 и 6.7 барна в ENDF/B-VII)

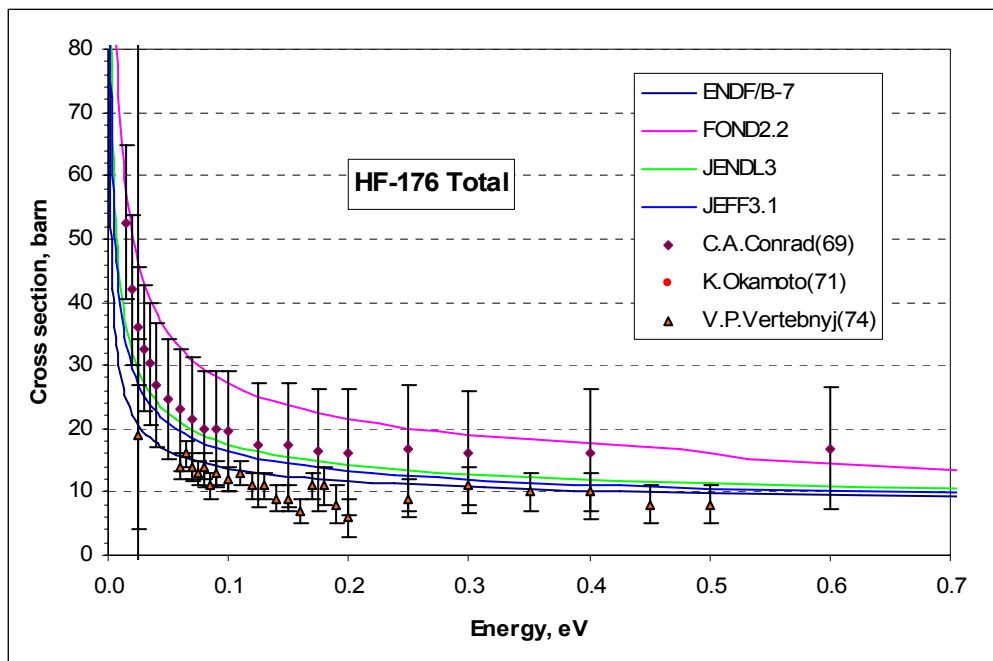


Рис.2. Полное сечение

Область разрешенных резонансов во всех оценках содержит 22 резонанса при энергиях выше энергии связи нейтрона, и простирается до 700 эВ в JENDL-3.3 и JEFF-3.1 и до 1080 эВ в ENDF/B-VII. В ENDF/B-VII и JEFF-3.1 введено два связанных состояния, для описания аномального поведения сечений в тепловой области, в JENDL-3.3 – одно. Тем не менее, как видно из рисунков, различие сечений между в JENDL-3.3 и JEFF-3.1 меньше, чем между ними и ENDF/B-VII.

В JEFF-3.1 и JENDL-3.3 область разрешенных резонансов ограничена 700 эВ, хотя энергия последнего резонанса равна 1064 эВ. В ENDF/B-VII эта граница установлена при 1080 эВ. Разумеется, в верхней части области разрешенных резонансов в этом случае имеет место пропуск части уровней (см. рис. 3). Однако характер энергетической зависимости нарастающей суммы приведенных нейтронных ширин указывает на то, что пропущены только слабые уровни. Из рис. 3 можно оценить, что среднее расстояние между резонансами составляет 33.3 эВ. Следовательно, в интервале до 1080 эВ пропущено, примерно, 10 резонансов, из которых 4 – в области ниже 700 эВ. Наиболее корректно было бы учесть вклад пропущенных резонансов введением плавной подложки, но коль скоро это не сделано, лучше детально учесть ход сечений в разрешенных сильных резонансах, чем описывать все резонансы из статистических соображений, оснований для которых, при скудости экспериментальных данных, не много.

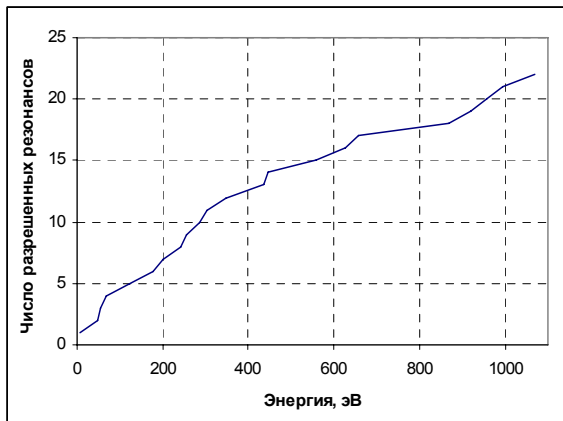


Рис.3. Нарастающая сумма числа резонансов

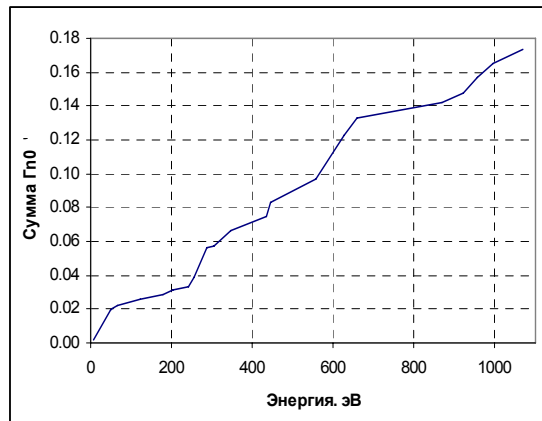


Рис.4. Нарастающая сумма приведенных ширин

Учитывая, что в JEFF-3.1 параметры низколежащих уровней уточнены на основе дополнительной экспериментальной информации, в РОСФОНД целесообразно принять именно эту оценку. Однако область разрешенных резонансов целесообразно продлить до 1080эВ, как в ENDF/B-VII.

Область неразрешенных резонансов в ENDF/B-VII распространена до 90 кэВ, т.е. до порога неупругого рассеяния. Приведенные нейтронные и радиационные ширины и среднее расстояние между уровнями для всех значений четности и орбитального момента (учтены вклады s-, p- и d-волн) от энергии не зависят. Для s-волны силовая функция равна $2.5 \cdot 10^{-4}$, радиационная $-15 \cdot 10^{-4}$, и та и другая находятся в полном соответствии с оценкой по области разрешенных резонансов.

В японской оценке, принятой и в JEFF-3.1, плотность уровней возрастает с энергией, а нейтронные ширины сокращаются, так что нейтронная силовая функция остается постоянной и равной для s-волны $1 \cdot 10^{-4}$, радиационная силовая функция на нижней границе области равна $20 \cdot 10^{-4}$, а к 50 кэВ дорастает до $36 \cdot 10^{-4}$. Радиационная силовая функция растет, поскольку радиационные ширины приняты независимыми от энергии.

Характер резонансных параметров, принятых в ENDF/B-VII, несомненно, более физически оправдан (по крайней мере, для s-волны). Однако значения этих параметров, как видно, из рис. 1б, подобраны неудачно и на границе области неразрешенных резонансов следующее из них сечение захвата оказывается заниженным втрое. Поэтому в РОСФОНД по необходимости следует принять оценку в области неразрешенных резонансов из JENDL-3.3 (=JEFF-3.1). При этом без дополнительных исследований расширять границу этой области нет оснований.

2. Данные вне резонансной области

На рис.3. оцененные данные по сечению неупругого рассеяния (толстые линии), реакциям (n,2n) (тонкие линии) и (n,3n) (пунктир) сравниваются друг с другом. Данные JEFF-3.1 в точности совпадают с таковыми из JENDL-3.3 и потому не изображены. Данные о реакции (n,3n) в ФОНД-2.2 и в ENDF/B-VII отсутствуют.

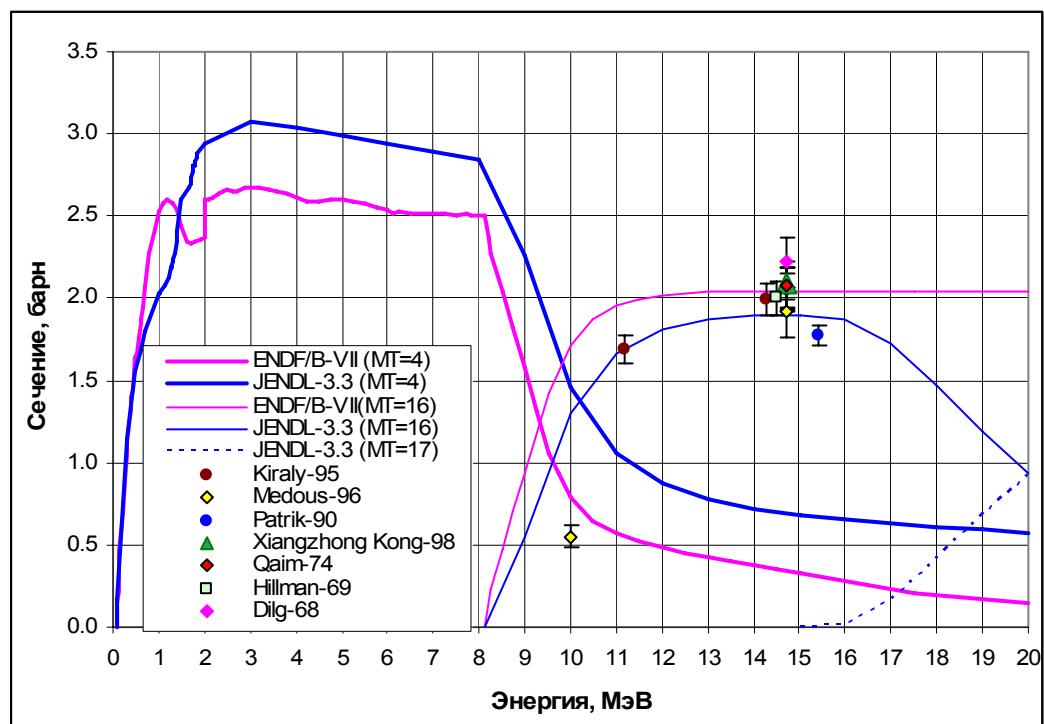


Рис. 3. Сечения неупругого рассеяния и реакций (n,2n) и (n,3n).

Вне резонансной области кроме полного сечения (см. рис. 2) имеются результаты измерений только сечения реакции (n,2n), которые согласуются друг с другом кроме, повидимому, заниженного результата Медоуза про 10 МэВ.

В JEFF-3.1 и JENDL-3.3 описывается возбуждение 23 дискретных уровней при неупругом рассеянии; в ENDF/B-VIIb2 только 3. Это ясно проявилось в поведении полного сечения неупругого рассеяния.

Достоинством JEFF-3.1 и JENDL-3.3 является описание данных об образовании гамма-квантов, которые в ENDF/B-VIIb2 и в ФОНД-2.2 отсутствуют.

Заключение.

В РОСФОНД следует принять оценку из JEFF-3.1. Границу области разрешенных резонансов переместить на 1080 эВ. В дальнейшем целесообразно дополнение оценки данными обо всех энергетически возможных нейтронных реакциях и усовершенствование описания области неразрешенных резонансов.

Авторы заключения

Забродская С.В., Николаев М.Н.

72.5. Гафний-177

Содержание в естественной смеси 18.60%.

1. Области тепловых и резонансных энергий.

В табл. 1 тепловые сечения сравниваются с рекомендацией Мухабхаба⁴. На рис. 1 сравниваются между собой и с экспериментальными данными оцененные энергетические зависимости сечения захвата. Как видно, экспериментальные данные хорошо согласуются друг с другом. Выше 0.05эВ современные оценки лежат несколько выше данных Павленко. Сечение захвата при более высоких энергиях изображено на рис. 1б. Современные оценки опираются на данные Бира и не противоречат более поздним и подробным результатам Боховко при энергиях выше 100 кэВ. При энергиях порядка десятков кэВ расхождения результатов двух последних авторов существенно: достигает 20%.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

| | $\sigma(0.0253\text{эВ})$ | RI |
|--------------------------|---------------------------|----------|
| JEFF-3.1 | 371.9 | 7211 |
| ENDF/B-VIIb2 | 373.5 | 7175 |
| JENDL-3.3 | 373.5 | 7208 |
| FOND-2.2 | 352 | 6950 |
| Мухабхаб-03 ⁴ | 373±10 | 7173±200 |

⁴ S.F.Mughabghab. Thermal neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-Factors. INDC (NDS)-440, Feb.2003.

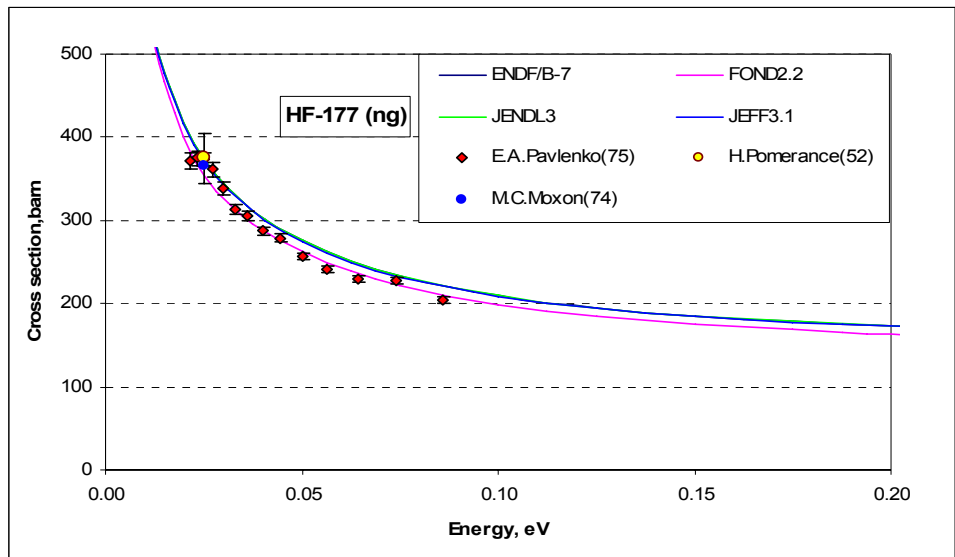


Рис. 1а. Сечение захвата

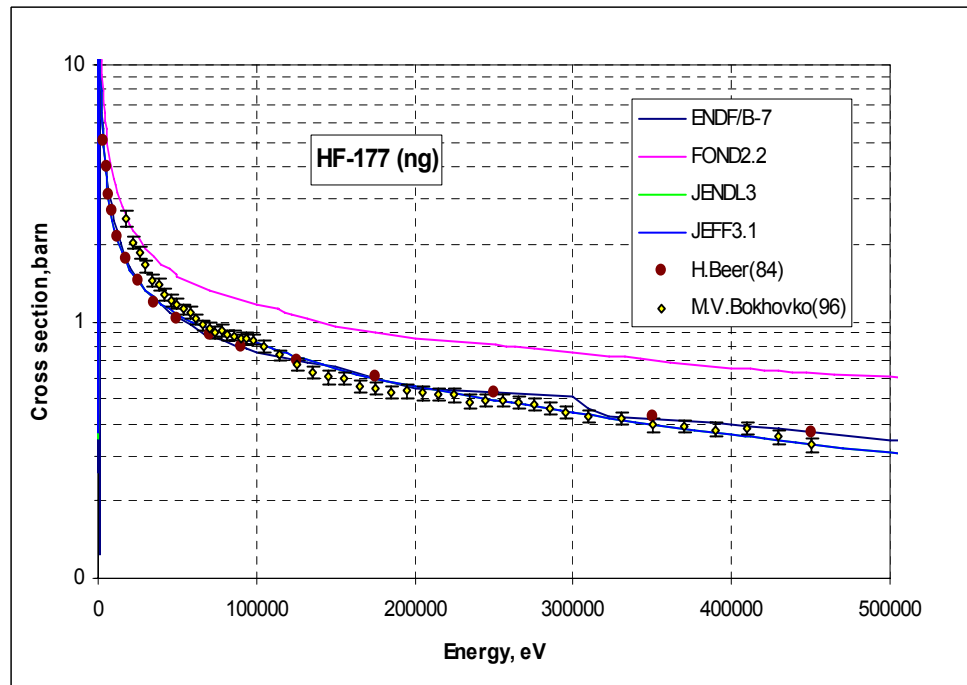


Рис.1б. Сечение захвата

На рис.2. с экспериментальными данными сравниваются оценки полного сечения. Согласие оценок с экспериментальными данными вполне приемлемое.

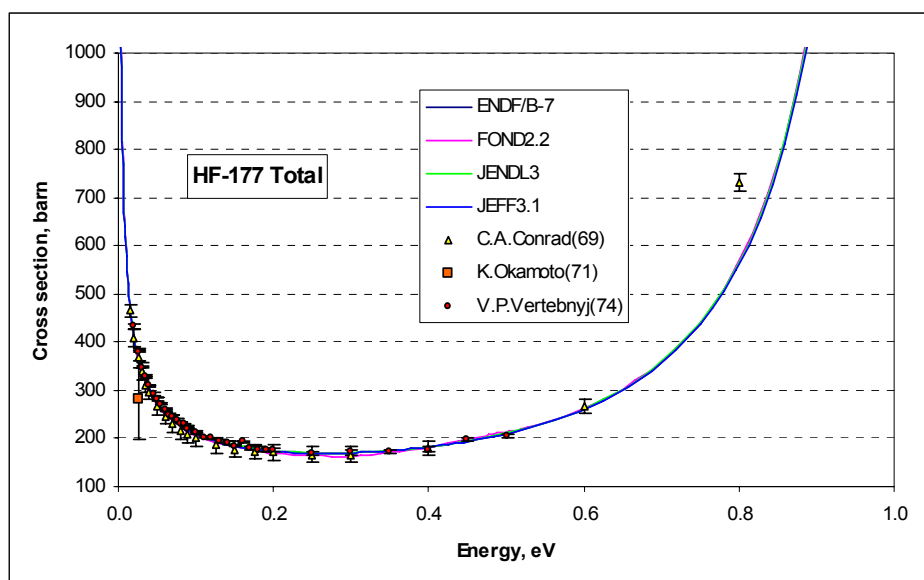


Рис.2. Полное сечение

Область разрешенных резонансов во всех оценках содержит 180 резонансов при энергиях выше энергии связи нейтрона. Связанные состояния ни в одной оценке не введены.

В JEFF-3.1 и JENDL-3.3 область разрешенных резонансов ограничена 250 эВ, хотя энергия последнего резонанса равна 696.6 эВ. В ENDF/B-VII эта граница установлена при 700 эВ. Разумеется, в верхней части области разрешенных резонансов в этом случае имеет место пропуск части уровней (см. рис. 3). Однако характер энергетической зависимости нарастающей суммы приведенных нейтронных ширин указывает на то, что пропущены только слабые уровни. Из рис. 3 можно оценить, что среднее расстояние между резонансами составляет 2.6 эВ. Следовательно, в интервале до 700 эВ пропущено, примерно, 90 резонансов, и все – выше 240 эВ. Это более половины всех резонансов и пренебрегать их вкладом не следовало бы. Наиболее корректно было бы учесть вклад пропущенных резонансов введением плавной подложки, но коль скоро это не сделано, в ENDF/B-VII решено, что детально учесть ход сечений в разрешенных сильных резонансах и пренебречь остальными лучше, чем описывать все резонансы из статистических соображений, оснований для которых, при скудости экспериментальных данных, не много. В случае гафния-176, где число резонансов в сомнительной области было мало, с этим можно было согласиться. В рассматриваемом же случае число резонансов велико и имеются достаточные основания для описания структуры сечений средними резонансными параметрами.

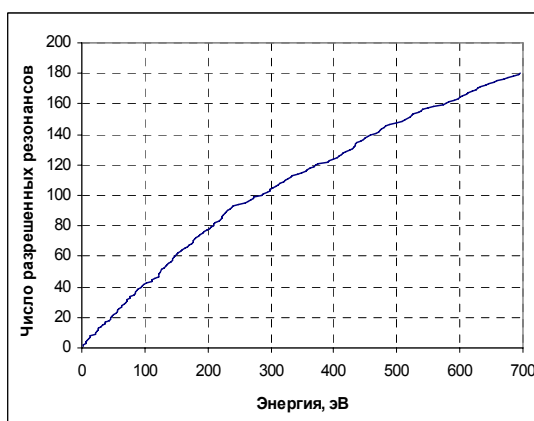


Рис.3. Нарастающая сумма числа резонансов

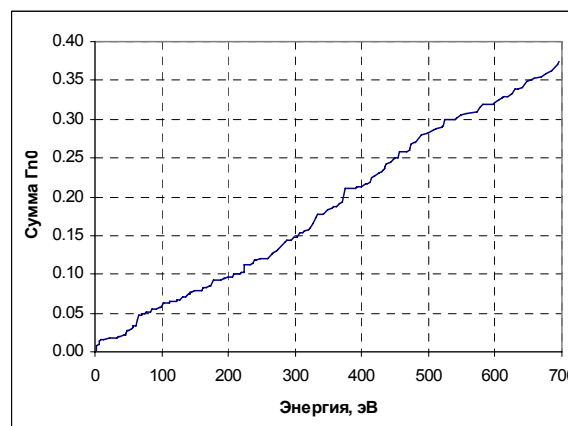


Рис.4. Нарастающая сумма приведенных ширин

Область неразрешенных резонансов в ENDF/B-VII распространена до 90 кэВ, т.е. почти до порога неупругого рассеяния. Приведенные нейтронные и радиационные ширины и среднее расстояние между уровнями для всех значений четности и орбитального момента (учтены вклады s-, p- и d-волн) от энергии не зависят. Для s-волны силовая функция равна $1.7 \cdot 10^{-4}$, радиационная $-120 \cdot 10^{-4}$; ни одна из них не соответствует оценкам по области разрешенных резонансов: $(5.36 \cdot 10^{-4})$ и $250 \cdot 10^{-4}$.

В японской оценке, принятой и в JEFF-3.1, плотность уровней возрастает с энергией, а нейтронные ширины сокращаются, так что нейтронная силовая функция остается постоянной и равной для s-волны $2.5 \cdot 10^{-4}$, радиационная силовая функция на нижней границе области равна $79 \cdot 10^{-4}$, а к 50 кэВ дорастает до $114 \cdot 10^{-4}$. Радиационная силовая функция растет, поскольку радиационные ширины приняты независимыми от энергии.

Таким образом, противоречие в силовых функциях в области разрешенных и неразрешенных резонансов имеет место в обеих сравниваемых оценках.

2. Данные вне резонансной области

На рис.3. оцененные данные по сечению неупругого рассеяния (толстые линии), реакциям (n,2n) (тонкие линии) и (n,3n) (пунктир) сравниваются друг с другом. Данные JEFF-3.1 в точности совпадают с таковыми из JENDL-3.3 и потому не изображены. Данные о реакции (n,3n) в ФОНД-2.2 и в ENDF/B-VII отсутствуют.

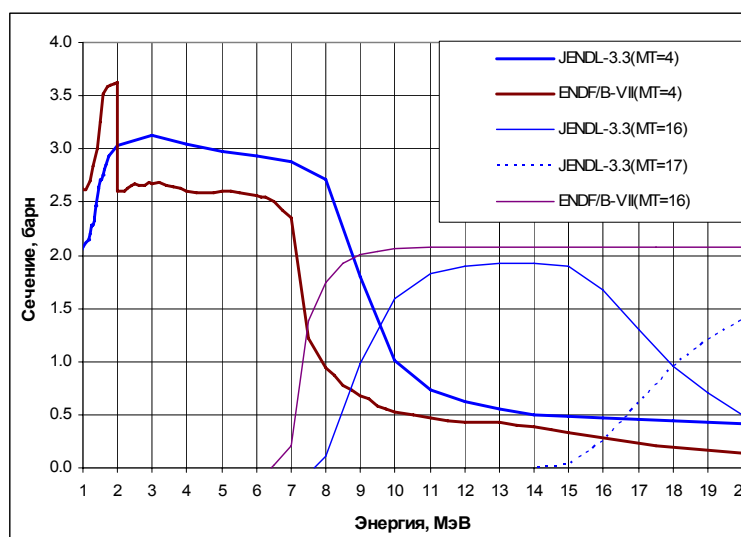


Рис. 3. Сечения неупругого рассеяния и реакций (n,2n) и (n,3n).

В JEFF-3.1 и JENDL-3.3 описывается возбуждение 21 дискретного уровня при неупругом рассеянии; в ENDF/B-VIIb2 только 10, причем их возбуждение учитывается только до 2 МэВ. Это ясно проявилось в поведении полного сечения неупругого рассеяния.

Достоинством JEFF-3.1 и JENDL-3.3 является также описание данных об образовании гамма-квантов, которые в ENDF/B-VIIb2 и в ФОНД-2.2 отсутствуют.

Заключение.

В РОСФОНД следует принять оценку из JEFF-3.1. В дальнейшем целесообразно ее дополнение данными обо всех энергетически возможных нейтронных реакциях и усовершенствование описания области неразрешенных резонансов. Включить файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров - $^{177}\text{Lu}^m$ и $^{178}\text{Hf}^n$, используя данные из EAF-2003.

72.6. Гафний-178

Содержание в естественной смеси 27.28%.

1. Области тепловых и резонансных энергий.

В табл. 1 тепловые сечения сравниваются с рекомендацией Мухабхаба⁵. На рис. 1 сравниваются между собой и с экспериментальными данными оцененные энергетические зависимости сечения захвата. Оцененные сечения хорошо согласуются с результатами последних измерений в тепловой области. В области более высоких энергий в JENDL-3.3, а потому и в JEFF-3.1 почему-то проигнорированы результаты Бира. Сечение захвата здесь явно занижено.

На рис.2. с экспериментальными данными сравниваются оценки полного сечения. Согласие всех оценок с экспериментальными данными вполне приемлемое.

Область разрешенных резонансов во всех оценках содержит 24 резонанса при энергиях выше энергии связи нейтрона и одно связанное состояние.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

| | $\sigma(0.0253\text{эВ})$ | RI |
|--------------------------|---------------------------|---------|
| JEFF-3.1 | 83.9 | 1871 |
| ENDF/B-VIIb2 | 84.0 | 1905 |
| JENDL-3.3 | 84.0 | 1914 |
| FOND-2.2 | 86 | 1920 |
| Мухабхаб-03 ⁵ | 84±4 | 1950±50 |

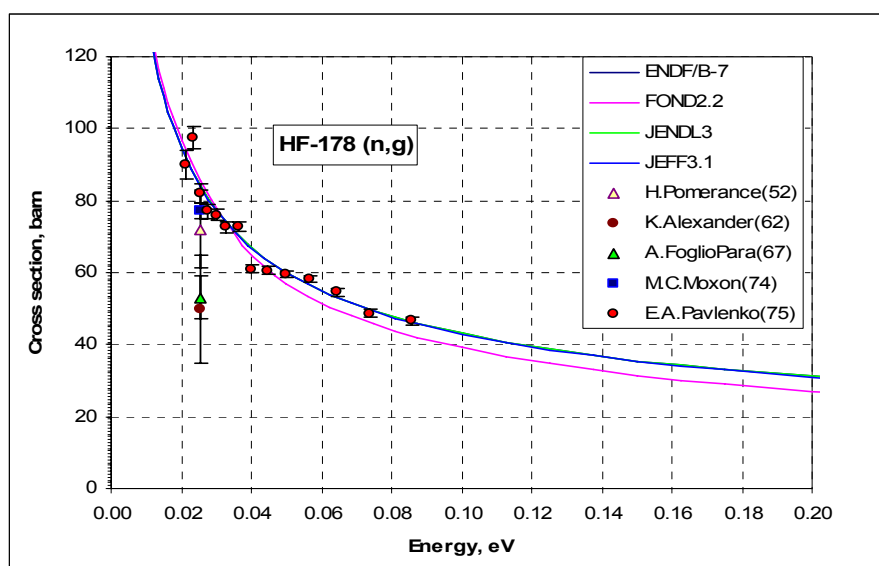


Рис. 1а. Сечение захвата

⁵ S.F.Mughabghab. Thermal neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-Factors. INDC (NDS)-440, Feb.2003.

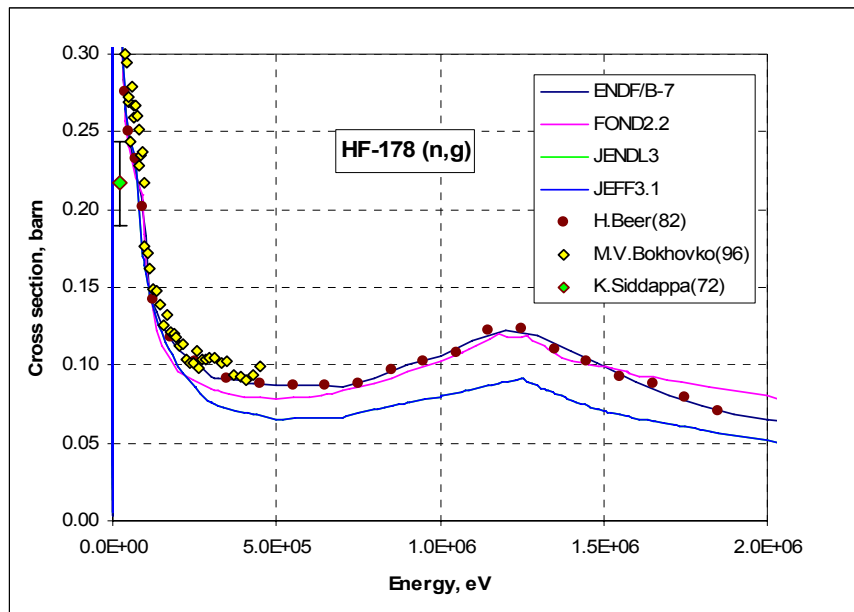


Рис.1б. Сечение захвата

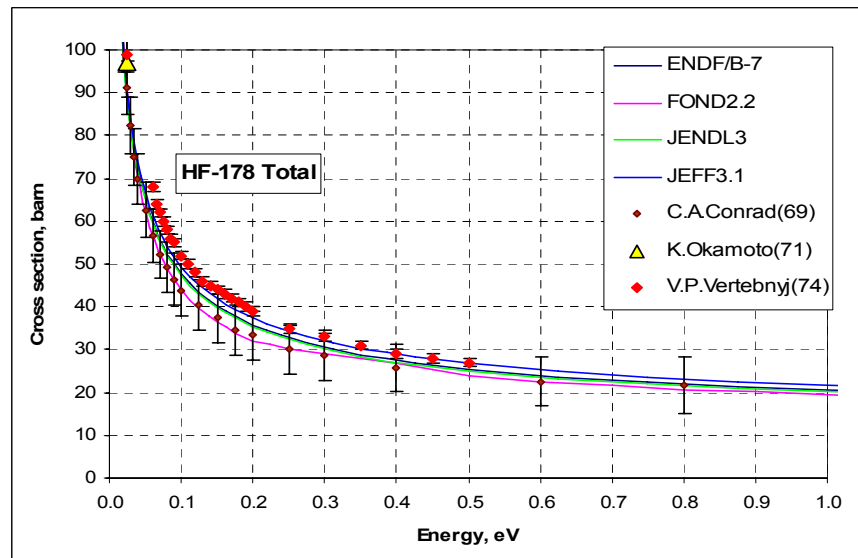


Рис.2. Полное сечение

В JEFF-3.1и JENDL-3.3 область разрешенных резонансов ограничена 1500 эВ, хотя энергия последнего резонанса равна 2090 эВ. В ENDF/B-VII эта граница установлена при 2100 эВ. Из рис. 3 и 4 не следует наличие существенного пропуска уровней в области разрешенных резонансов и граница этой области, принятая в ENDF/B-VII, представляется оправданной.

Область неразрешенных резонансов в ENDF/B-VII распространена до 90 кэВ, т.е. почти до порога неупругого рассеяния. Приведенные нейтронные и радиационные ширины и среднее расстояние между уровнями для всех значений четности и орбитального момента (учтены вклады s-, p- и d-волн) от энергии не зависят. В японской оценке, принятой и в JEFF-3.1, граница области неразрешенных резонансов 50 кэВ; плотность уровней возрастает с энергией, а нейтронные ширины сокращаются, так что нейтронная силовая функция остается постоянной. Значения силовых функций в рассматриваемых оценках различаются не сильно и для s-волны неплохо согласуются с оценкой по области разрешенных резонансов.

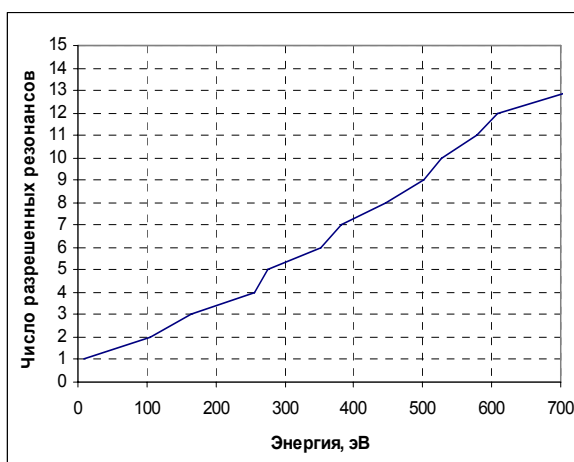


Рис.3. Нарастающая сумма числа резонансов

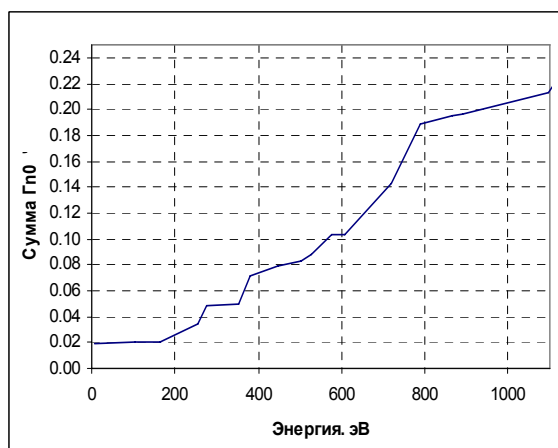


Рис.4. Нарастающая сумма приведенных ширин

Изложенное выше приводит к выводу, что параметры разрешенных резонансов следует принять из JEFF-3.1, поскольку в ней учтена новая экспериментальная информация (не противоречащая предыдущей), а границу области разрешенных резонансов принять в соответствии с ENDF/B-VIIb2.

2. Данные вне резонансной области

На рис.3. оцененные данные по сечению неупругого рассеяния (толстые линии), реакциям $(n,2n)$ (тонкие линии) и $(n,3n)$ (пунктир) сравниваются друг с другом. Данные JEFF-3.1 в точности совпадают с таковыми из JENDL-3.3 и потому не изображены. Данные о реакции $(n,3n)$ в ФОНД-2.2 и в ENDF/B-VII отсутствуют.

Экспериментальные результаты Икеда, изображенные на рис.3, лежат много ниже оцененных кривых, что и естественно, поскольку измерить все акты неупругого рассеяния, четко отделив их от упругого рассеяния, невероятно сложно: при упругом рассеянии нейтронов с энергией 14 МэВ на гафнии-178 нейтрон теряет, в среднем, примерно 150 кэВ, а максимально – вдвое больше. Эти потери сравнимы с потерей энергии при рассеянии с возбуждением низколежащих уровней гафния. Поэтому отмеченное расхождение между экспериментальными и оцененными сечениями неупругого рассеяния, не должно сеять сомнения в корректности последних.

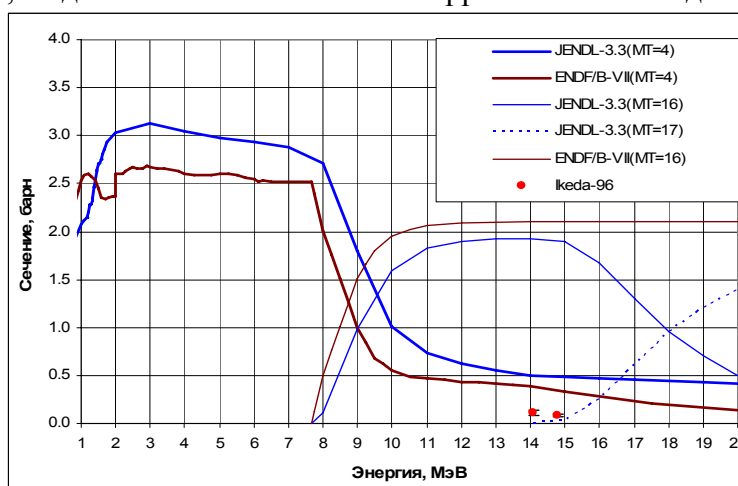


Рис. 3. Сечения неупругого рассеяния и реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$.

В JEFF-3.1 и JENDL-3.3 описывается возбуждение 21 дискретного уровня при неупругом рассеянии; в ENDF/B-VIIb2 только 3. Это ясно проявилось в поведении полного сечения неупругого рассеяния.

Достоинством JEFF-3.1 и JENDL-3.3 является также описание данных об образовании гамма-квантов, которые в ENDF/B-VIIb2 и в ФОНД-2.2 отсутствуют.

Существенным недостатком оценки является отмеченное выше занижение сечении захвата в области 1 мэВ (см. рис. 16). Однако, устранение этого недостатка означало бы, по существу, переоценку всего файла, а учитывая сравнительно небольшое содержание гафния-177 в естественной смеси, было решено, что выполнение этой переоценки выходит за рамки настоящей работы.

Заключение.

В РОСФОНД следует принять оценку из JEFF-3.1. При первой возможности следует пересмотреть оценку с главной целью устранения расхождения между оцененным сечением захвата и данными Бира. Целесообразно также дополнение оценки данными обо всех энергетически возможных нейтронных реакциях. Включить в оценку файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера - $^{179}\text{Hf}^m$, используя данные из EAF-2003.

Авторы заключения

Забродская С.В., Николаев М.Н.

72.7. Гафний-178n

Радиоактивен ($T_{1/2}=31$ г.). Рападается путем изомерного перехода. В реакторах образуется за счет реакции $^{177}\text{Hf}(n,\gamma)$

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущих изомеров – $^{179}\text{Hf}^m$ и $^{177}\text{Lu}^m$ – перенести в файл MF=9. Файлы MF=10 и MF=8 опустить.

Файлу присвоить MAT=7275.

Автор заключения

Николаев М.Н.

72.8. Гафний-179

Содержание в естественной смеси 13.62%.

2. Области тепловых и резонансных энергий.

В табл. 1 тепловые сечения сравниваются с рекомендацией Мухабхаба⁶. На рис. 1 сравниваются между собой и с экспериментальными данными оцененные энергетические зависимости сечения захвата. Оцененные сечения хорошо согласуются с единственным

⁶ S.F.Mughabghab. Thermal neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-Factors. INDC (NDS)-440, Feb.2003.

результатом, обладающим приемлемой точностью – результатом Моксона. В области более высоких энергий последние оценки приемлемо согласуются с данными и Боховко и Бира. Лучше это согласие в оценке JENDL-3.3 (=JEFF-3.1).

На рис.2. с экспериментальными данными сравниваются оценки полного сечения. Все оценки идут по экспериментальным данным Конрада. Результаты Вертебного и Окамото признаны завышенными. В самом деле, сечение упругоготрассения по измерению Вертебного равно 6.7 ± 0.1 барн. Если принять полное сечение, измеренное тем же Вертебным, которое равно 65 барн, то сечение захвата окажется равным 58.3 барна, что хотя и согласуется с результатами Боллинджера (1953) и Померанца (1953), обладающими большими погрешностями, резко противоречит результату Моксона.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

| | $\sigma(0.0253\text{эВ})$ | RI |
|--------------------------|---------------------------|--------------|
| JEFF-3.1 | 40.8 | 509.2 |
| ENDF/B-VIIb2 | 43.6 | 548 |
| JENDL-3.3 | 42.8 | 522.3 |
| FOND-2.2 | 45 | 517 |
| Мухабхаб-03 ^б | 41 ± 3 | 630 ± 30 |

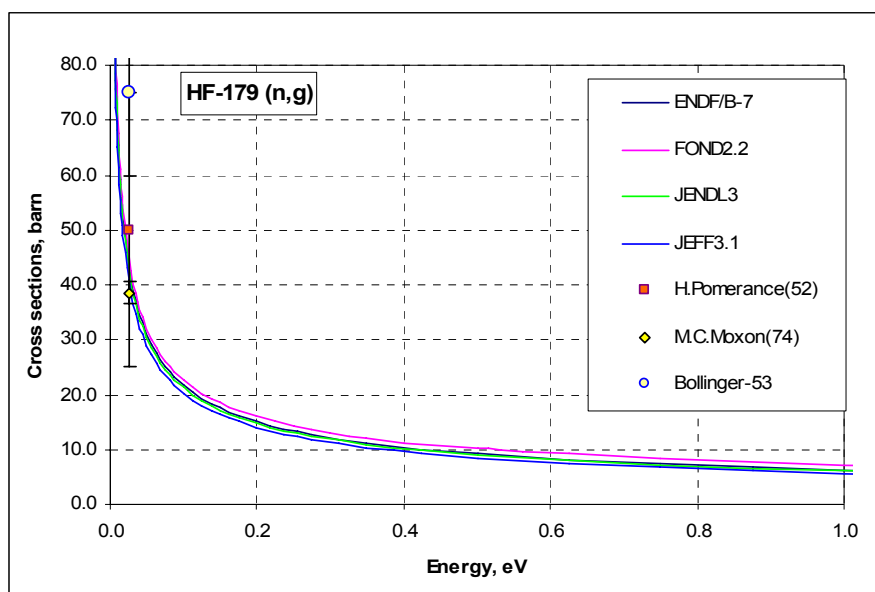


Рис. 1а. Сечение захвата

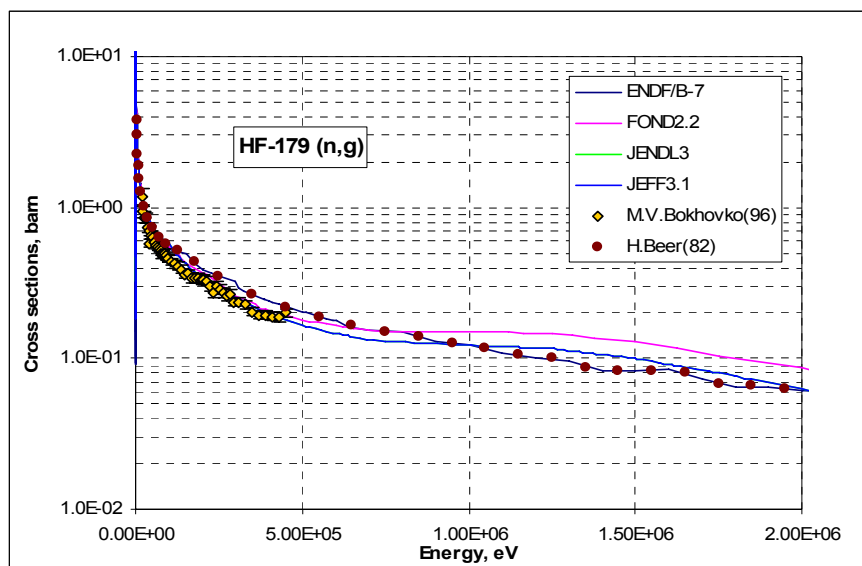


Рис.16. Сечение захвата

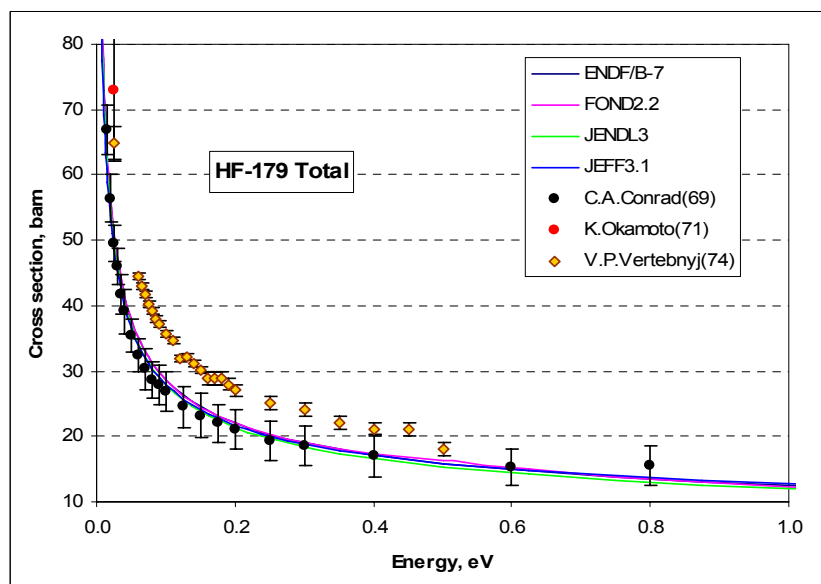


Рис.2. Полное сечение

Область разрешенных резонансов в разных оценках содержит разное число резонансов:

- JENDL-3.3: 107 резонансов до 1010 эВ + связанное состояние; граница RRR- 250 эВ;
- ENDF/B-VII: 70 резонансов до 689 эВ + связанное состояние; граница RRR – 450 эВ;
- JEFF-3.1: 81 резонанс до 1010эВ +2 связанных состояния; граница RRR – 250 эВ.

На рис. 3 приведены нарастающие суммы числа резонансов в обсуждаемых оценках, а на рис. 4 – нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин. Налицо большие различия. Заметим, что в JENDL-3.3 приведены все резонансы из справочника Мухабхаба 1984 г., в том числе и те, для которых в справочнике указаны только резонансные энергии, а ширины не приведены. В JENDL-3.3 этим резонансам из каких-то соображений приписаны нейтронные ширины (радиационные ширины постоянны). Соображения, видим, были резонными, поскольку, как видно, из рис. 3 нарастающая сумма резонансов ведет себя линейно, а сумма приведенных ширин хоть и испытывает аномалии, однако они отнюдь не связаны с определением неизвестных нейтронных ширин. Как видно из рис. 5 нейтронные ширины добавленных резонансов ниже среднего

уровня. Учет пропущенных резонансов служит основанием для продления области разрешенных резонансов до 450 эВ. Весьма странно, что авторы оценки этим основанием не воспользовались и границу RRR установили на 250 эВ. Не менее странно, что в ENDF/B-VII эта граница установлена на 450эВ, хотя без учета вклада пропущенных резонансов оснований для этого нет.

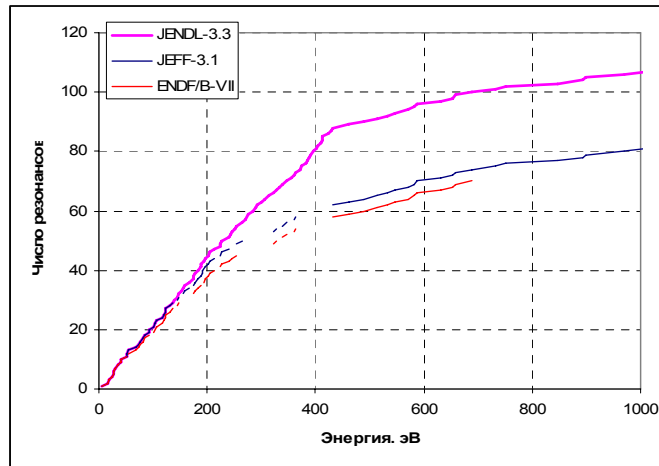


Рис.3. Нарастающие суммы числа резонансов. Разрывы на кривых JEFF-3.1 и ENDF/B-VII показывают места пропуска резонансов.

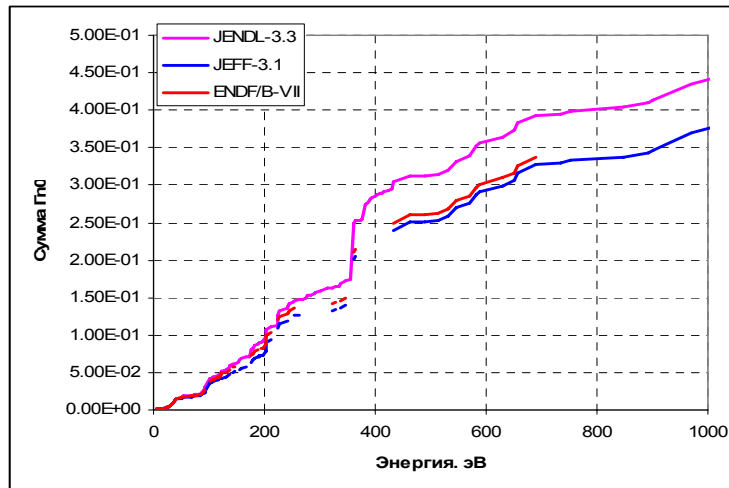


Рис.4. Нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин

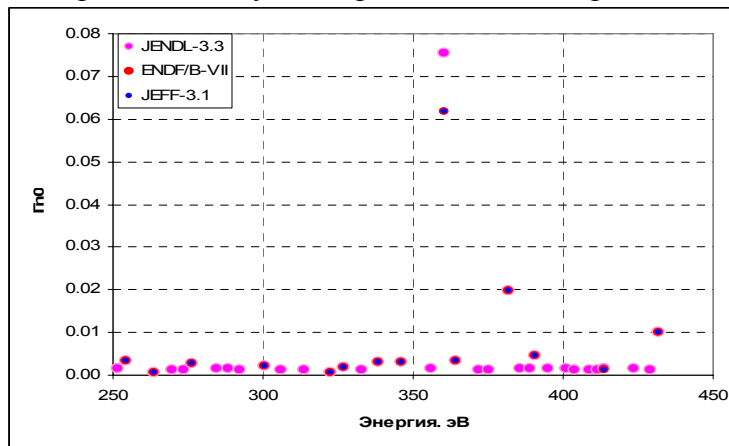


Рис.5. Приведенные нейтронные ширины резонансов по разным оценкам

Область неразрешенных резонансов в ENDF/B-VII распространена до 90 кэВ, т.е. почти до порога неупругого рассеяния. Тогда как в японской оценке, а, следовательно, и в JEFF-3.1, эта область простирается только до 50 кэВ.

. Изложенное выше приводит к выводу, что до 200 эВ следует принять резонансные параметры из JENDL-3.3, заменив нейтронные ширины резонансов лежащих ниже 200 кэВ на оценку из JEFF-3.1 (учитывающую новые экспериментальные данные). Границу области разрешенных резонансов принять равной 400 эВ. Средние резонансные параметры принять из той оценки, которая будет выбрана из рассмотрения сечений вне резонансной области.

2. Данные вне резонансной области

На рис.6. оцененные данные по сечению неупругого рассеяния (толстые линии), реакциям (n,2n) (тонкие линии) и (n,3n) (пунктир) сравниваются друг с другом. Данные JEFF-3.1 в точности совпадают с таковыми из JENDL-3.3 и потому не изображены. Данные о реакции (n,3n) в ENDF/B-VII отсутствуют.

Экспериментальные данные о сечениях реакций, показанных на рисунке, отсутствуют (хотя имеются активационные измерения сечений образования изомерных состояний).

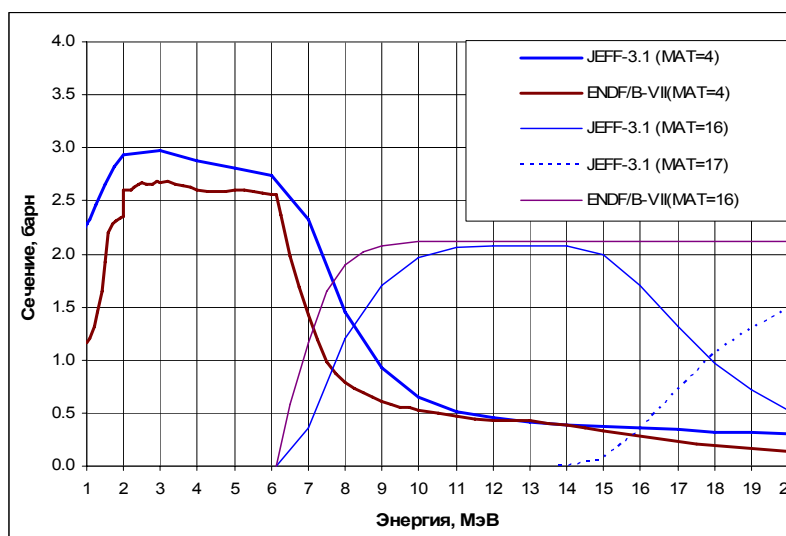


Рис. 6. Сечения неупругого рассеяния и реакций (n,2n) и (n,3n).

В JEFF-3.1 и JENDL-3.3 описывается возбуждение 12 дискретных уровней при неупругом рассеянии; в ENDF/B-VIIb2 только 3. Это ясно проявилось в поведении полного сечения неупругого рассеяния.

Достоинством JEFF-3.1 и JENDL-3.3 является также описание данных об образовании гамма-квантов, которые в ENDF/B-VIIb2 и в ФОНД-2.2 отсутствуют.

Заключение.

В РОСФОНД следует принять оценку из JEFF-3.1. В будущем целесообразно дополнение оценки данными обо всех энергетически возможных нейтронных реакциях. Включить в оценку файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера - $^{178}\text{Hf}^n$, используя данные из EAF-2003.

Авторы заключения

Забродская С.В., Николаев М.Н.

72.9. Гафний-179n

Радиоактивен ($T_{1/2}=25$ дн.). Рападается путем изомерного перехода. В реакторах образуется за счет реакции $^{178}\text{Hf}(n,\gamma)$

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003.

Экспериментальных данных для их валидации нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущих изомеров – $^{178}\text{Hf}^m$ и $^{177}\text{Lu}^m$ – перенести в файл MF=9. Файлы MF=10 и MF=8 опустить.

Файлу присвоить МАТ=7275.

Автор заключения

Николаев М.Н.

72.10. Гафний-180

Содержание в естественной смеси 35.08%.

3. Области тепловых и резонансных энергий.

В табл. 1 тепловые сечения сравниваются с рекомендацией Мухабхаба⁷. На рис. 1 сравниваются между собой и с экспериментальными данными оцененные энергетические зависимости сечения захвата. Оцененные сечения хорошо согласуются с совпадающими результатами трех измерений. В области более высоких энергий оценка ENDF/B-VII значительно лучше соответствует экспериментальным данным.

На рис.2а. с экспериментальными данными сравниваются оценки полного сечения. И в этом случае оценка ENDF/B-VII выглядит предпочтительнее.

Табл. 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата

| | $\sigma(0.0253\text{эВ})$ | RI |
|--------------------------|---------------------------|------|
| JEFF-3.1 | 13.1 | 29.7 |
| ENDF/B-VIIb2 | 13.0 | 34.5 |
| JENDL-3.3 | 13.0 | 34.0 |
| FOND-2.2 | 12.6 | 34.6 |
| Мухабхаб-03 ⁷ | 14.04±0.07 | 35±1 |

⁷ S.F.Mughabghab. Thermal neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-Factors. INDC (NDS)-440, Feb.2003.

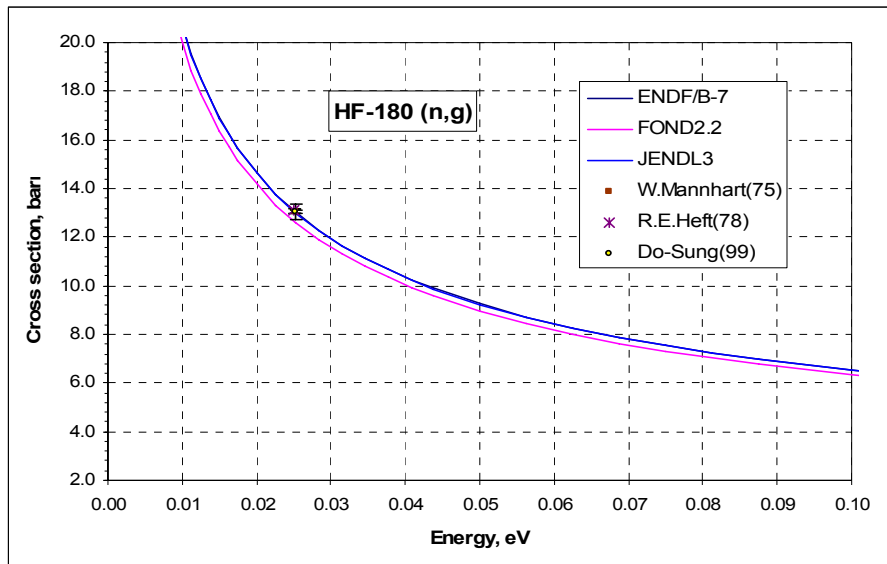


Рис. 1а. Сечение захвата

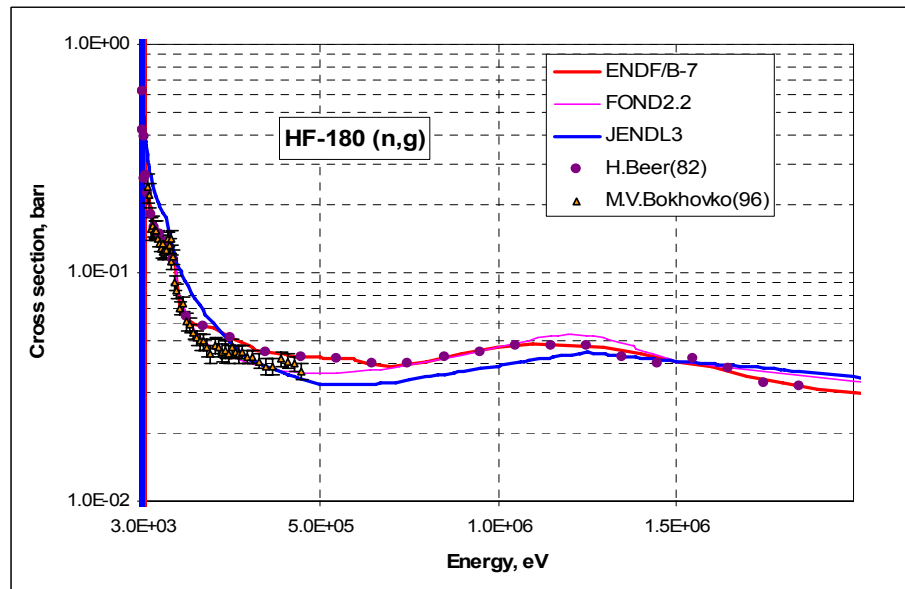


Рис.1б. Сечение захвата

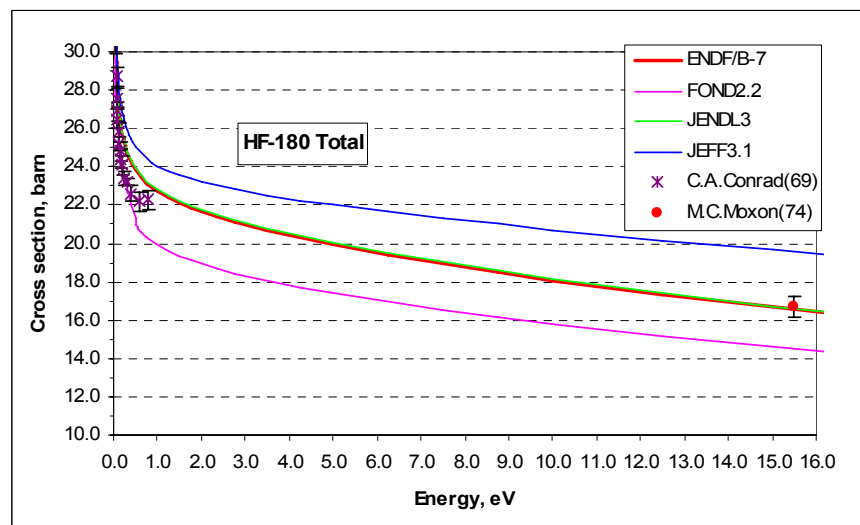


Рис.2а. Полное сечение

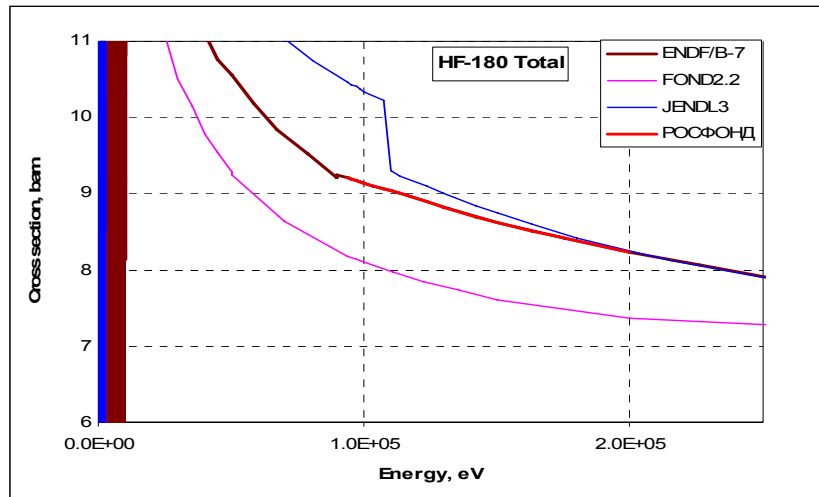


Рис.2б. Полное сечение

Область разрешенных резонансов в разных оценках описывается по-разному: в JENDL-3.3: 150 s-резонансов до 9865 эВ + связанное состояние; граница RRR- 2500 эВ; в ENDF/B-VII и JEFF-3.1: 88 s-резонансов до 11350 эВ +одно или два (JEFF-3.1) связанных состояния и 66 р-резонансов до 9850 эВ; граница RRR – 2500 эВ (JEFF-3.1) или 10 кэВ (ENDF/B-VII). В JEFF-3.1 используется формула Райха-Мура, в ENDF/B-VII – Многоуровневая формула Брейта-Вигнера. Кроме этого эти две последние оценки различаются только параметрами связанных состояний и первых двух резонансов. Как отмечалось, эти отличия практически не сказались ни на тепловых сечениях, ни на резонансном интеграле.

На рис. 3 приведены нарастающие суммы числа резонансов в обсуждаемых оценках, а на рис. 4 – нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов. Бросается в глаза изменение при 2700 эВ условий проведения экспериментов, на основе которых проведено определение резонансных параметров. В самом деле, выше этой энергии экспериментально были определены энергии резонансов и резонансные интегралы захвата, а нейтронные ширины удалось определить лишь для нескольких сильных резонансов. Из рис. 4 видно, что в ENDF/B-VII (и в JEFF-3.1) к р-резонансам отнесены резонансы с малыми резонансными интегралами и потому с малыми нейтронными ширинами: нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин оставшихся в оценке ENDF/B-VII s-резонансов ведет себя почти так же, как и в оценке JENDL-3.3, в которой все резонансы считаются s-резонансами.

Из сказанного выше следует, прежде всего, что до 2700 эВ пропущено три десятка резонансов. По оценке ENDF/B-VII это – очень слабые резонансы и их пропуск не должен давать существенного вклада в сечения, что, очевидно, и послужило поводом для распространения области разрешенных резонансов до 10 кэВ. Оснований ограничивать область разрешенных резонансов 2500 эВ не усматривается: в рассматриваемом случае именно в этой области и имеет место пропуск значительной части уровней.

Оценка области разрешенных резонансов в ENDF/B-VII представляется наиболее убедительной.

В области неразрешенных резонансов эта оценка, как видно из рис. 1б, также имеет преимущество. Область неразрешенных резонансов в ENDF/B-VII распространена до 90 кэВ, т.е. почти до порога неупругого рассеяния. На рис.2б видно, что при 10 кэВ полное сечение, рассчитанное по средним резонансным параметрам, хорошо стыкуется с сечением, заданным поточечно в файле MF=3. В JENDL-3.3 (и JEFF-3.1) плавная стыковка при 50 кэВ обеспечена не хуже, но в сечении, заданном поточечно, при 110 кэВ наблюдается необъяснимый разрыв.

Представляется целесообразным принять в РОСФОНД оценку средних резонансных параметров из ENDF/B-VII, продлив ее до порога неупругого рассеяния

(93.823 keV). В интервале от этого порога до 200 кэВ, где оценки полного сечения в ENDF/B-VII и JENDL-3.3 сравниваются, принята сглаженная кривая, изображенная на рис. 16 красной линией, а выше 200 кэВ – принята оценка JENDL-3.3. Как видно из рис.3, сечение неупругого рассеяния в оценке ENDF/B-VII, как и в случае других изотопов гафния, имеет неоправданно нерегулярную энергетическую зависимость; реакция (n,3n) не учтена. Есть и другие недочеты в этой оценке. Поэтому целесообразность принять в рассматриваемой энергетической области оценку JENDL-3.3 представляется несомненной. Так это сделано и в JEFF-3.1.

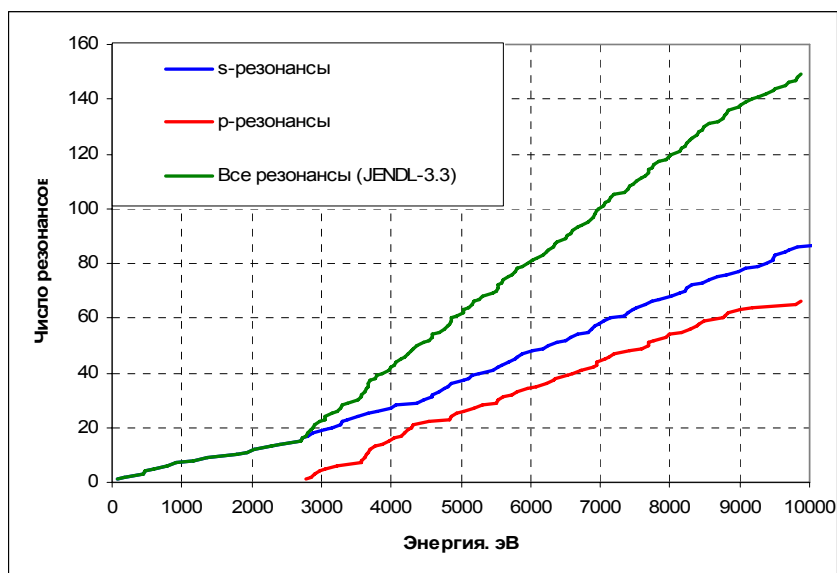


Рис.3. Нарастающие суммы числа резонансов. Разрывы на кривых JEFF-3.1 и ENDF/B-VII показывают места пропуска резонансов.

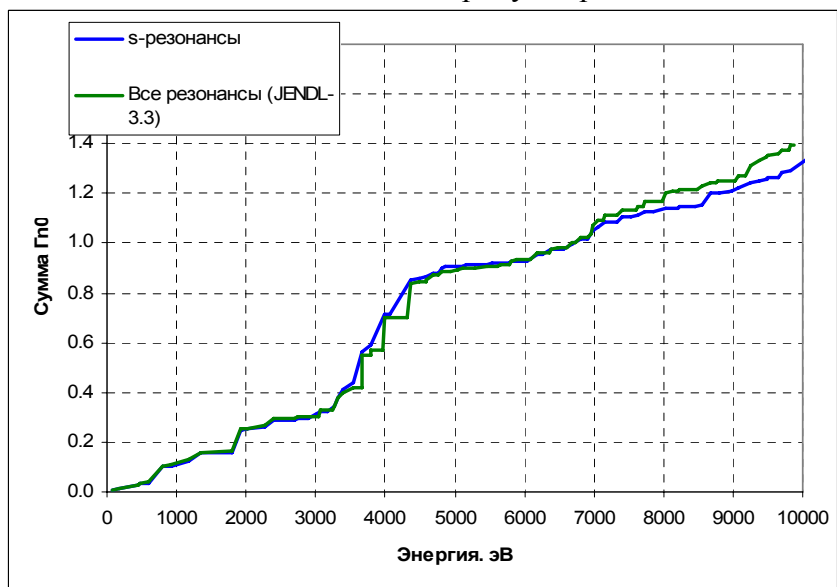


Рис.4. Нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов

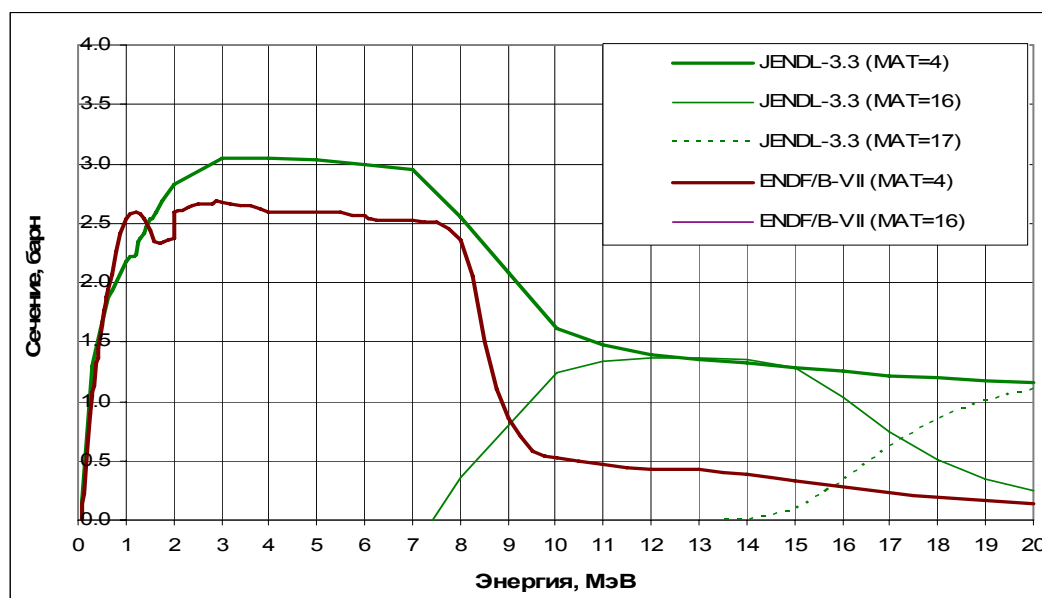


Рис. 5. Сечения неупругого рассеяния и реакций (n,2n)и (n,3n).

Достоинством JEFF-3.1 и JENDL-3.3 является также описание данных об образовании гамма-квантов, которые в ENDF/B-VIIb2 и в ФОНД-2.2 отсутствуют.

Заключение.

В РОСФОНД следует принять параметры разрешенных резонансов из JEFF-3.1, область неразрешенных резонансов продлить до 10 кэВ; параметры неразрешенных резонансов принять из ENDF/B-VII, продлив область неразрешенных резонансов до порога неупругого рассеяния. В интервале от этого порога до 200 кэВ, обеспечить плавную сшивку сечения, рассчитываемого по средним резонансным параметрам с сечением заданного поточечно в файле JENDL-3.3. При более высоких энергиях принять данные из JENDL-3.3, В будущем целесообразно дополнение оценки данными обо всех энергетически возможных нейтронных реакциях. Включить в оценку файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров - $^{178}\text{Hf}^n$ и $^{179}\text{Hf}^n$, используя данные из EAF-2003.

Авторы заключения

Забродская С.В., Николаев М.Н.

72.11. Гафний-181

Радиоактивен ($T_{1/2}=42.39$ дн.). Испытывает бета-распад в стабильный тантал-181. В реакторах образуется за счет реакции $^{180}\text{Hf}(n,\gamma)$

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущего изомера – $^{179}\text{Hf}^m$ – перенести в файл MF=9. Файлы MF=10 и MF=8 опустить.

Файлу присвоить МАТ=7281.

Автор заключения

Николаев М.Н.

72.12. Гафний-182

Слабо радиоактивен ($T_{1/2}=8.9 \cdot 10^6$ лет.). Испытывает бета-распад в тантал-182, который, в свою очередь, распадается ($T_{1/2}=114.43$ дн.) в стабильный вольфрам-182. В реакторах образуется за счет цепочки реакций $^{180}\text{Hf}(n,\gamma)^{181}\text{Hf}(n,\gamma)^{182}\text{Hf}$.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003.

Экспериментальных данных для их валидации нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=10 и MF=8 опустить.

Файлу присвоить МАТ=7282.

Автор заключения

Николаев М.Н.

73. ТАНТАЛ

В РОСФОНДе должны быть приведены нейтронные данные для 2-х природных и 4-х долгоживущих радиоактивных изотопов тантала.

Из двух природных изотопов тантала только ^{181}Ta является стабильным. Другой природный нуклид – очень долгоживущий изомер $^{180}\text{Ta}^m$, имеющий период полураспада (вероятно, по отношению к одновременному захвату двух орбитальных электронов) более $1.2 \cdot 10^{15}$ лет. В основном состоянии этот изотоп имеет период полураспада всего 8.15 ч., распадаясь частично путем захвата электрона в гафний-180, частично путем бета-распада в вольфрам-180. Данные для основного состояния $^{180}\text{Ta}^g$ в РОСФОНД не включаются.

73.1. Тантал-177

Радиоактивен ($T_{1/2}=56.6$ ч). Испытывая захват орбитального электрона превращается в ^{177}Hf (стабильный).

В ФОНД-2.2 – данные отсутствуют.

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

На рисунке 1 приводится сечение радиоактивного захвата нейтронов из JEFF-3.1

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют. Сечение захвата тепловых нейтронов равно 23.274 барна.

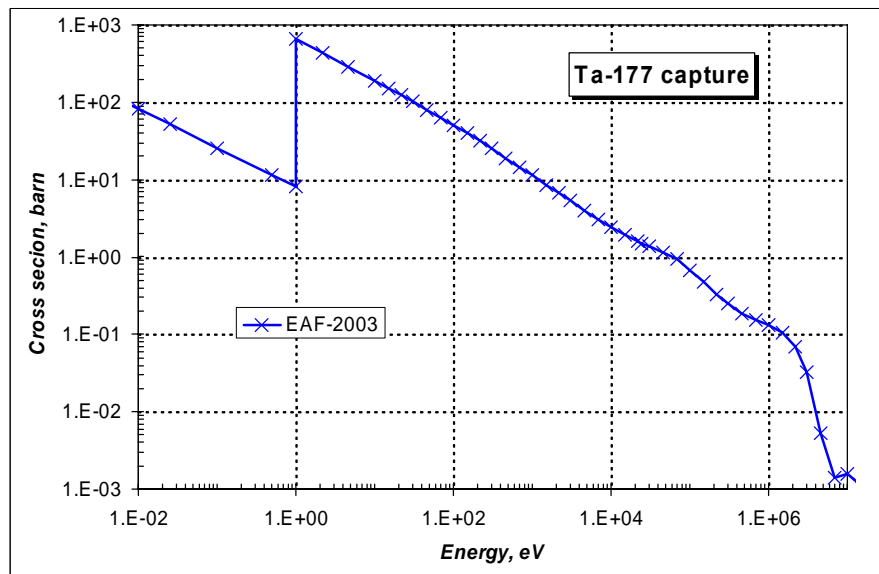


Рисунок 1 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Ta-177.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1). Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущего изомера – $^{174}\text{Lu}^m$ – перенести в файл MF=9. Файл MF=10 опустить. Файл MF=8 исключить.

Автор отбора данных

Кощеев В.Н.

73.2. Тантал-179

Испытывает ε -распад. ^{179}Ta ($T_{1/2}=1.82$ г) \rightarrow ^{179}Hf (стабильный).

В ФОНД-2.2 – J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

На рисунке 2 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата одинаковым образом возросло. Все сечения реакций в EAF-2003 пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют. Сечение захвата тепловых нейтронов равно 45.65 барна.

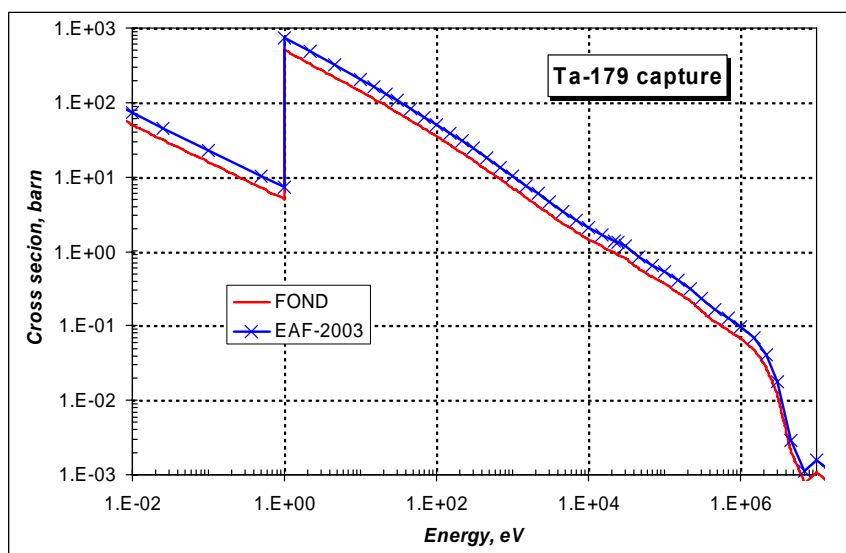


Рисунок 2 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Ta-179.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1). Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущих изомеров – $^{180}\text{Ta}^m$, $^{179}\text{Hf}^m$, $^{178}\text{Hf}^m$ и $^{177}\text{Lu}^m$ – перенести в файл MF=9. Файл MF=10 опустить. Файл MF=8 исключить.

Автор отбора данных

Кощеев В.Н.

73.3. Тантал-180m

Содержание в естественной смеси 0.012%.

В ФОНД-2.2 – J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

На рисунке 3 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата изменилось, и оценка EAF2003 хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными Висхака. Все сечения реакций в EAF-2003 пересчитаны на основе современных модельных параметров. Они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

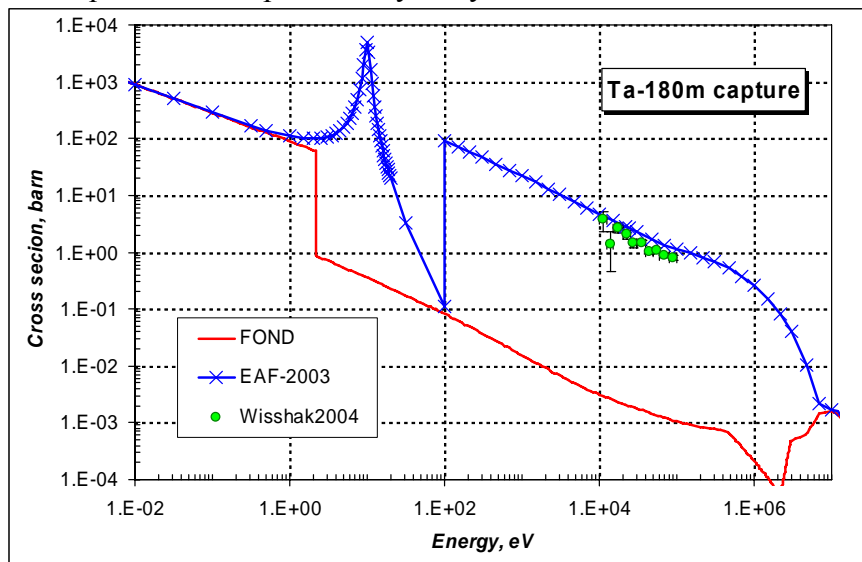


Рисунок 3 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Ta-180m.

Однако, следует заметить, что имеется возможность существенно обновить нейтронные данные для Ta-180m.

Так, в последней публикации Мухабхаба (2006) имеются резонансные параметры до 100 эВ. На рисунке 4 показана нарастающая сумма резонансов из упомянутой работы. Приведенная кривая показывает, что пропуски резонансов начинаются приблизительно с 80 эВ.

Имеются экспериментальные данные с хорошим разрешением по полному сечению взаимодействия вплоть до 40 кэВ. Они показаны на рисунке 5 вместе с кривой сечения радиационного захвата из EAF-2003. Из приведенной на рисунке 5 информации следует, что, во-первых, экспериментальные данные группы Харви подробно отражают резонансную структуру сечений вплоть до 1 кэВ; и, во-вторых, структура сечения захвата в EAF-2003 совершенно не коррелирует со структурой полного сечения. Таким образом, налицо существует возможность модификации нейтронных данных для Ta-180m.

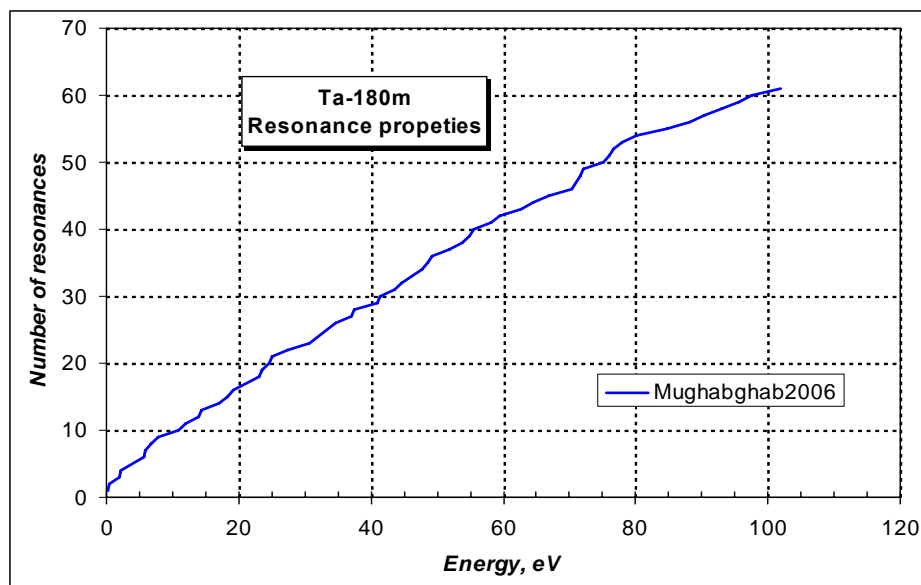


Рисунок 4 – Нарастающая сумма резонансов для Ta-180m.

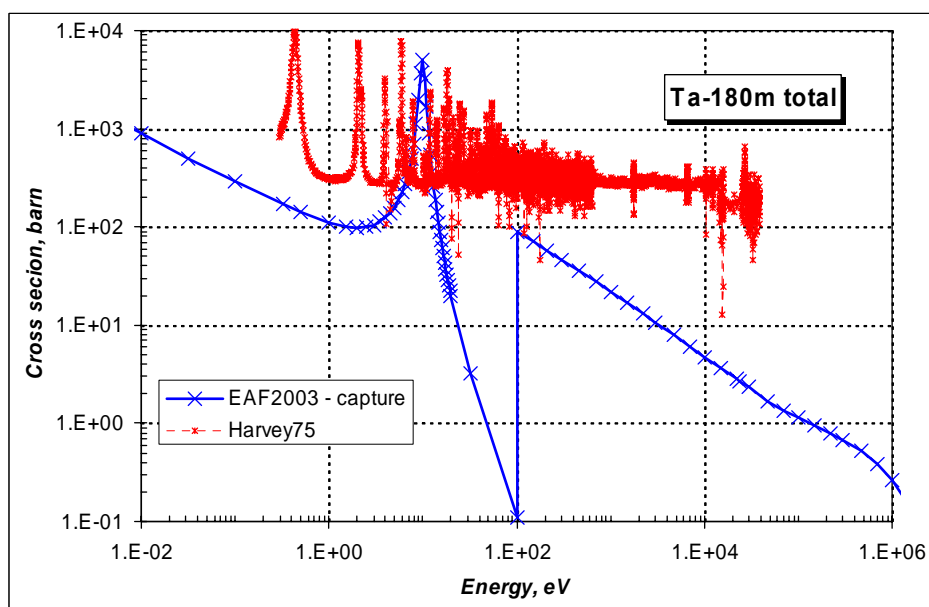


Рисунок 5 – Сравнение сечения радиационного захвата нейтронов с экспериментальными данными по полному сечению на Ta-180m.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1). Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов равно 45.65 барна. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущих изомеров – $^{180}\text{Ta}^m$, $^{179}\text{Hf}^m$, $^{178}\text{Hf}^n$ и $^{177}\text{Lu}^m$ – перенести в файл MF=9. Сечение образования $^{180}\text{Ta}^g$ при неупругом рассеянии перенести в файл MF=10. Файл MF=8 исключить.

При первой возможности следует провести модификацию нейтронных данных с целью получения полного набора нейтронных данных для Ta-180m.

Автор отбора данных
Кошечев В.Н.

73.4. Тантал-181

одержание в естественной смеси 99.988%.

В ФОНД-2.2 – оценка Ховертона, выполненная для ENDL-72 и сохраненная в библиотеках ENDF/B-VI и в ENDF/B-VII(beta2).

В БРОНД-2.2 – оценка Мантурова, выполненная для БРОНД в 1988 году. Область резонансных энергий представлена как суперпозиция двух изотопов. Первый изотоп содержит резонансные параметры для s- и d-волн с радиусом $R=7.9$ ферми, а второй – для p-волны с радиусом $R=7.0$ ферми.

В JEFF-3.1 – оценка, взятая без каких либо изменений из JENDL-3.3.

В JENDL-3.3 – оценка Яомуро, выполненная в 1987 для JENDL-3; с незначительными изменениями в 1994. Для версии 3.3 Шибата(JAERY) в 2002 году переоценил сечение (n,a) ниже 500 кэВ, а полное сечение и сечение упругого рассеяния пересчитал. Более корректно представлены энергетические спектры нейтронных реакций вблизи порога реакции. Удалены секция MF3, MT251 и матрица преобразования в MF4, MT2.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 1. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 1. Резонансные свойства Та-181.

| Оценка | Граница области RRR, keV | Граница области URR, keV | $\sigma_{\gamma}(2200)$, барн | G-factor | I_{γ} , барн |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------|---------------------|
| ENDF/B | | | 21.12 | 1.0039 | 739.5 |
| JENDL | 2.4 | 100.0 | 20.67 | 1.0032 | 659.5 |
| БРОНД | 1.0 | 136.9 | 20.58 | 1.0031 | 659.7 |
| Mughabghab | | | 20.5±0.5 | 1.0041 | 660.±23. |

Из приведенной в таблице 1 информации видно, что наилучшее согласие с оцененным значением сечения захвата из компиляции Мухабхаба имеет оценки БРОНД и JENDL.

На рисунке 6 приводится сравнение нарастающей суммы разрешенных резонансов для упомянутых оценок. Из приведенного на рисунке 6 сравнения видно, что до 1 кэВ обе оценки хорошо согласуются друг с другом по числу представленных резонансов. Оценка JENDL выглядит предпочтительнее, поскольку в ней область разрешенных резонансов распространена до энергии 2.4 кэВ.

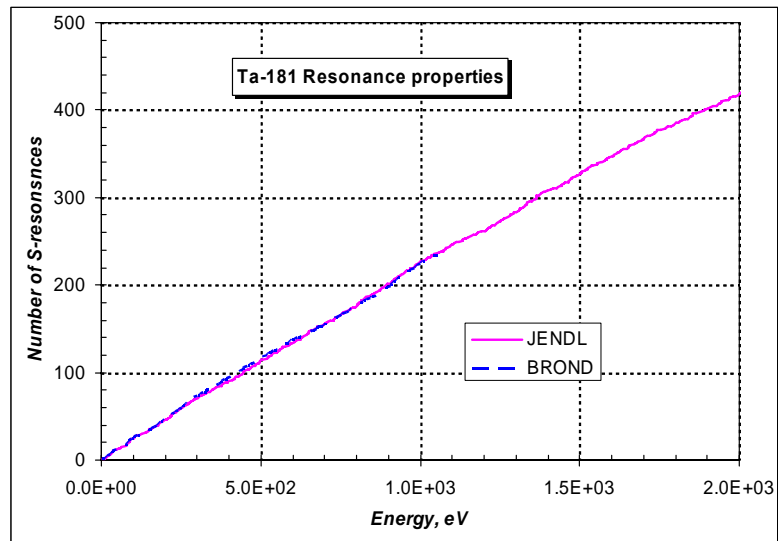


Рисунок 6 – Сравнение нарастающей суммы резонансов для Ta-181.

Рассмотрим ниже сравнение между собой 28-групповых сечений в области резонансных энергий от 0.01 эВ до 100 кэВ (разбивка по энергии согласно номенклатуре БНАБ), полученных путем переработки файлов нейтронных данных с помощью программы NJOY. Сравнение сечений проведено относительно оценки ФОНД, которая, как видно из предисловия к разделу 73.4, совпадает с оценкой ENDF/B.

На рисунке 7 представлено сравнение полного сечения, на рисунке 8 показано сравнение сечения захвата.

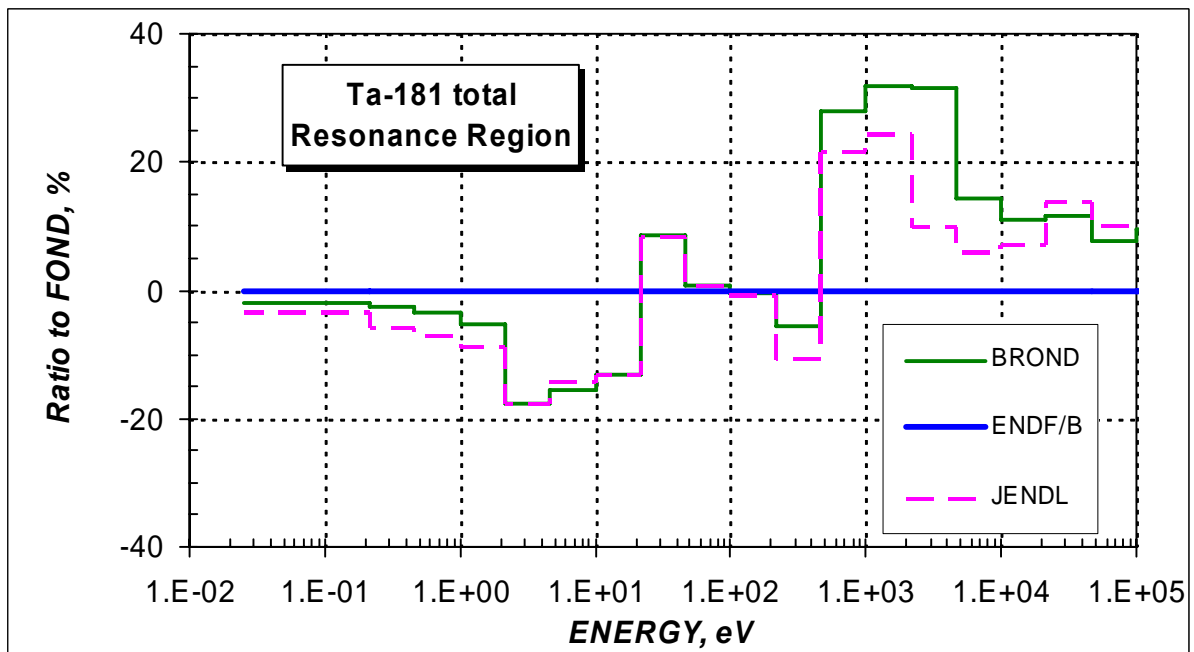


Рисунок 7 - Сравнение полного сечения для Ta-181 в области резонансных энергий.

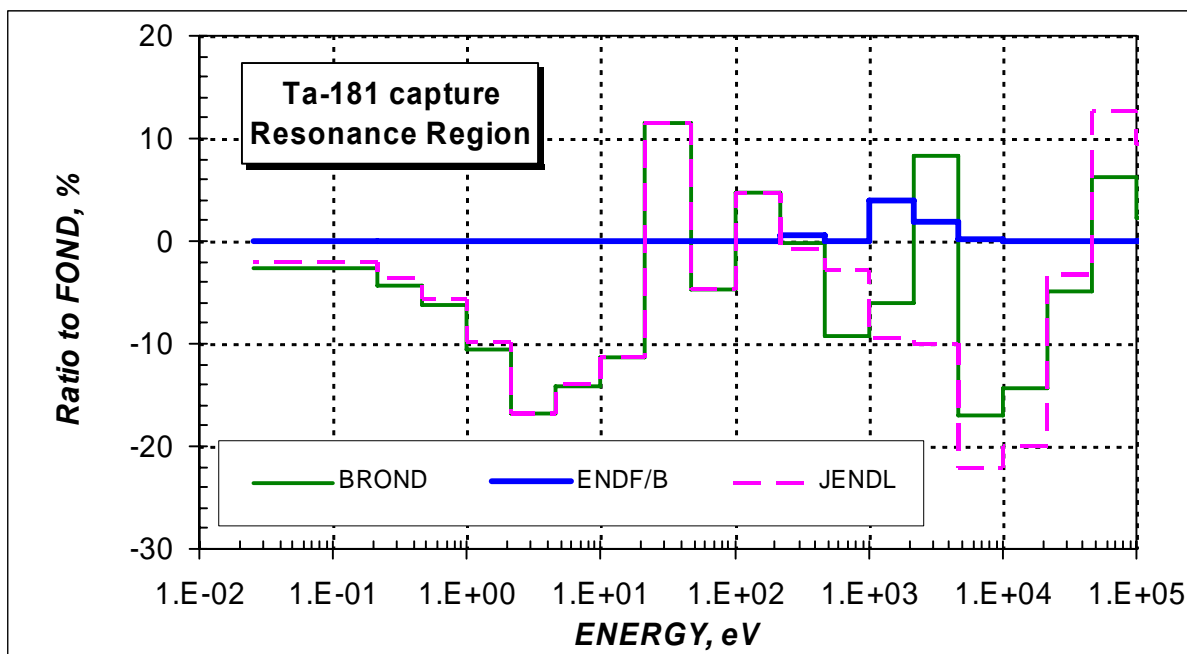


Рисунок 8 - Сравнение сечения захвата нейтронов для Та-181 в области резонансных энергий.

Из приведенного на рисунках 7-8 сравнения видно, что оценки БРОНД(1988) и JENDL(1994) хорошо согласуются друг с другом и одинаковым образом отличаются от оценки Ховертона(1972), которая принята в ФОНД и в ENDF/B, что говорит о правильной тенденции в переоценке нейтронных данных. Далее, различия более 10 % между оценками БРОНД и JENDL наблюдаются в области энергий $\sim 1 - 4$ кэВ. Следует отметить, что для БРОНД с 1 кэВ начинается область неразрешенных резонансов, а для JENDL конец области разрешенных резонансов приходится на 2.4 кэВ.

В таблице 2 приводятся средние резонансные параметры, полученные из разрешенных резонансных параметров.

Таблица 2. Средние резонансные параметры Та-181.

| Оценка | Граница области (RRR, кэВ) | $\Gamma_n^0 * 10^3$, эВ | $\bar{\Gamma}_\gamma * 10^3$, эВ | \bar{D} , эВ | $S_0 * 10^4$ |
|--------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------|
| JENDL | 2.4 | 1.49 | 67.7 | 5.00 | 1.49 |
| БРОНД | 1.0 | 1.55 | 57.0 | 4.48 | 1.69 |

Из таблицы 2 видно, что средние резонансные параметры достаточно хорошо согласуются между собой, что собственно и показывает сравнение средних сечений.

Сравним, далее, средние резонансные параметры, используемые в области неразрешенных резонансов. В частности, рассмотрим поведение силовой функции.

На рисунке 9 показано поведение силовой функции для s-волны в области энергий неразрешенных резонансов для различных оценок. Там же приводятся значения силовой функции, полученные усреднением параметров разрешенных резонансов. Из приведенного на рисунке 9 сравнения видно, что энергетическая зависимость силовой функции из оценки JENDL сильно отличается от поведения аналогичной величины из оценки БРОНД. Но, если в оценке Мантурова (БРОНД) значения силовой функции согласованы в области разрешенных и неразрешенных резонансов, и сама энергетическая

зависимость носит известный характер, то оценка JENDL представляет собой не согласованной характер не только по величине, но и по характеру энергетической зависимости.

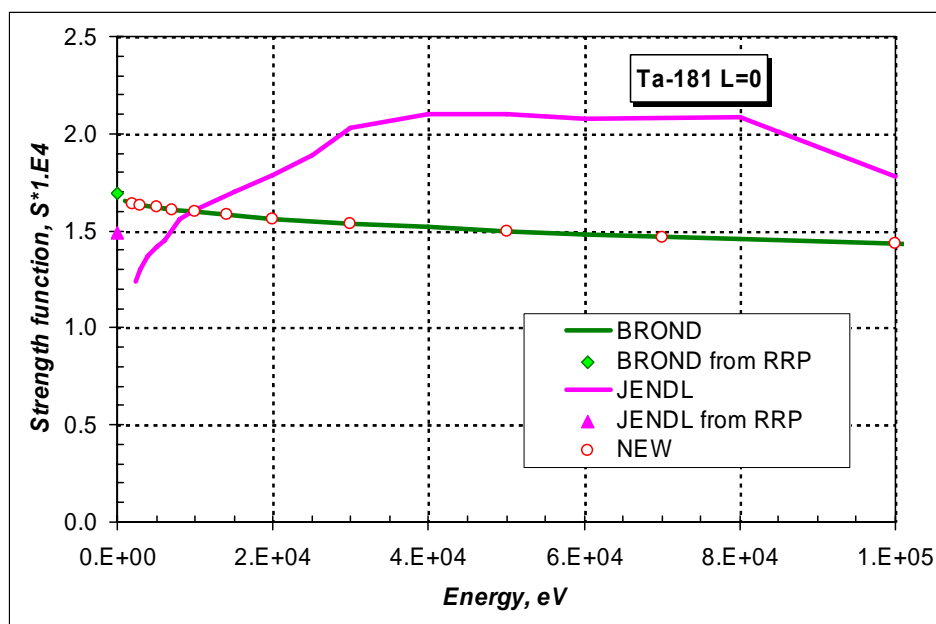


Рисунок 9 - Сравнение силовой функции ($l=0$) для Та-181 в области энергий неразрешенных резонансов.

Однако, представление средних резонансных параметров в оценке БРОНД носит неоправданно усложненный характер, а именно, резонансные параметры заданы для двух псевдоизотопов. Первый из них содержит резонансные параметры для S- и P-волн, а второй псевдоизотоп содержит резонансные параметры для D-волны. Такое представление резонансных параметров вызвано тем обстоятельством, что в оценке Мантурова применяется различный радиус взаимодействия для S- и P- волн.

Для файла данных РОСФОНД было решено использовать оценку Мантарова, но с одним радиусом взаимодействия $R=7.9$ ферми. Это приводит к тому, что не удастся удовлетворительным образом описать процесс неупругого рассеяния нейтронов с помощью средних резонансных параметров. Сечение неупругого рассеяния согласно оценке Мантурова получается ниже, чем используется в оценках ENDF/B(=БРОНД) и в JENDL.

Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия с имеющимися экспериментальными данными в области энергий неразрешенных резонансов показано на рисунке 10.

Из приведенного на рисунке 10 сравнения видно, что оценка ENDF/B лежит ниже всех экспериментальных данных. Оценка БРОНД и JENDL хорошо согласуются между собой в области энергий ниже 20-30 кэВ. Ниже 20 кэВ оценка JENDL находится в противоречии с экспериментальными данными группы Бийона (1973 г.) и экспериментальной точки Вертебного (1983 г.), полученную путем усреднения сечения на достаточно широком интервале энергий. Вероятно, ход сечения оценки JENDL определился тем обстоятельством, что при оценке сечений эксперименту группы Тсубоне (1984 г.) был приписан слишком высокий вес, а экспериментальные данные Вертебного отсутствовали. Новая оценка улучшает энергетический ход сечения в области энергий от 2 до 7 кэВ по сравнению с оценкой БРОНД.

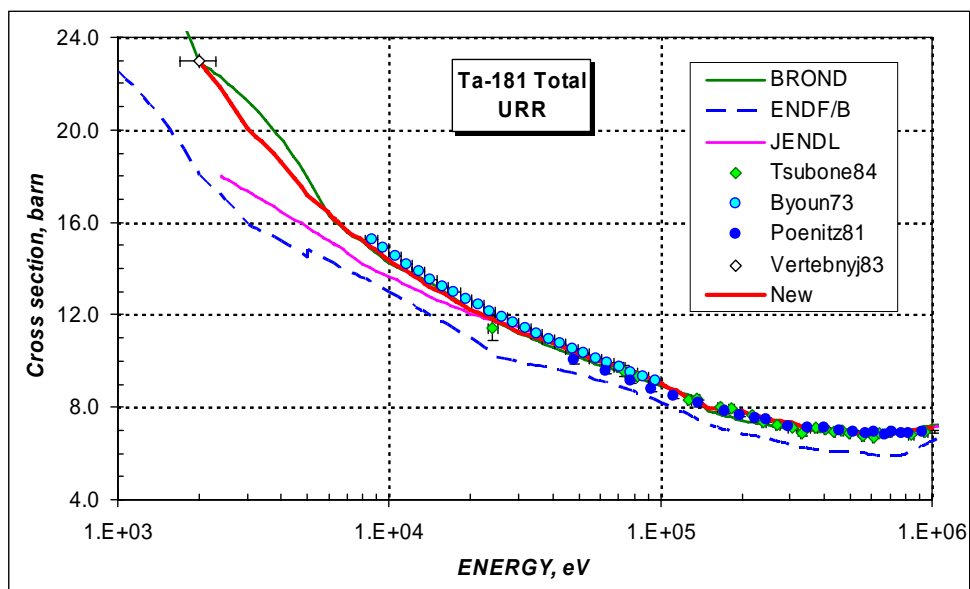


Рисунок 10 - Сравнение полного сечения для Та-181 в области энергий неразрешенных резонансов.

Сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов с имеющимися экспериментальными данными в области энергий неразрешенных резонансов показано на рисунке 11.

Из приведенного на рисунке 11 сравнения видно, что имеется довольно большая совокупность экспериментальной информации по измерению сечения радиационного захвата нейтронов на Та-181. Оцененные сечения из БРОНД и JENDL хорошо согласуются между собой. Из общей согласованности несколько выпадает оценка ENDF/B, особенно, выше энергии 5 кэВ. Новая реализация оценки Мантурова не ухудшает согласованности оцененного сечения с имеющимися экспериментальными данными.

Таким образом, в области неразрешенных резонансов рекомендуется для Росфонда использовать модифицированную оценку Мантурова в интервале энергий от 2 до 100 кэВ.

Далее, обратим внимание на область высоких энергий, т.е. выше 100 кэВ. На рисунке 12 приводится сравнение оцененных сечений полного взаимодействия с наборами экспериментальных данных.

Из приведенного на рисунке 12 сравнения видно, что оцененные сечения полного взаимодействия хорошо согласуются друг с другом и с имеющимися наборами экспериментальных данных выше 2 МэВ. В области энергий от 100 кэВ до 2 МэВ оценка ENDF/B лежит ниже совокупности экспериментальных данных. Отметим, что последние экспериментальные измерения группы Финлея (1993 г.) указывает на то, что выше 15 МэВ оценка ENDF/B является предпочтительней. Другими словами, оценка полного сечения из JENDL в этой области энергий требует корректировки.

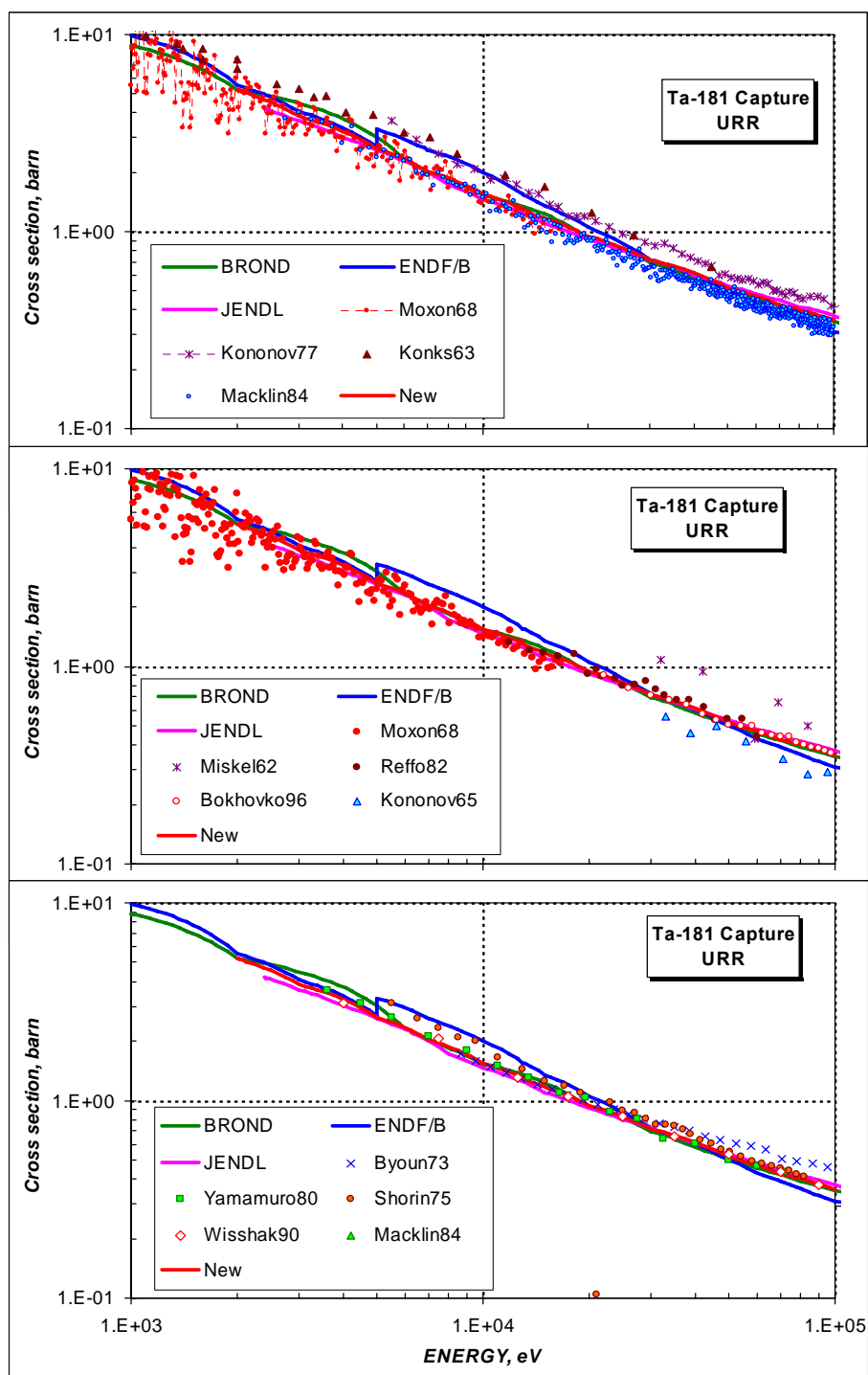


Рисунок 11 - Сравнение сечения захвата нейтронов для Ta-181 в области энергий неразрешенных резонансов.

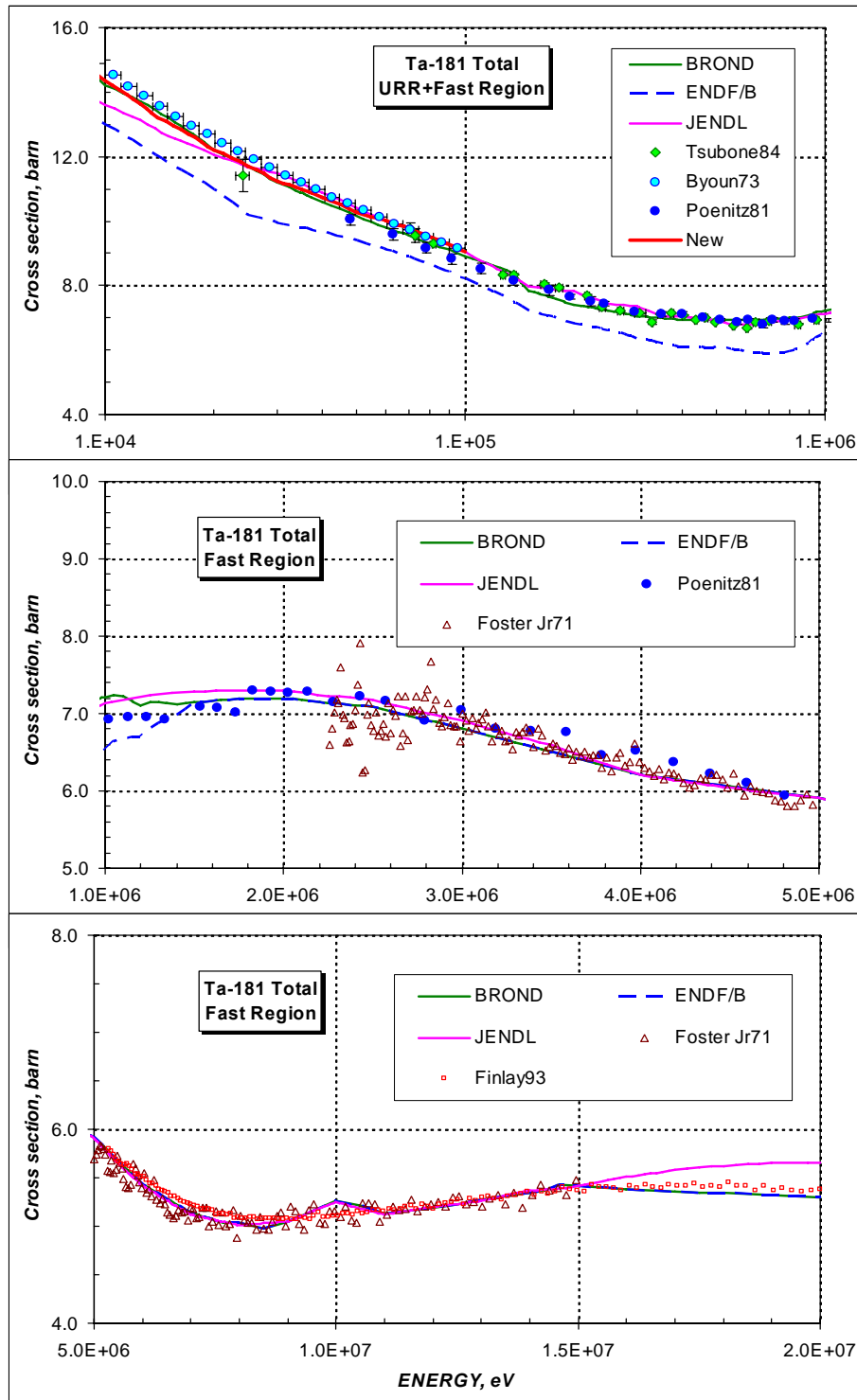


Рисунок 12 - Сравнение полного сечения для Та-181 в области энергий выше 100 кэВ.

На рисунке 13 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов с имеющимися наборами экспериментальных данных в области энергий выше 100 кэВ.

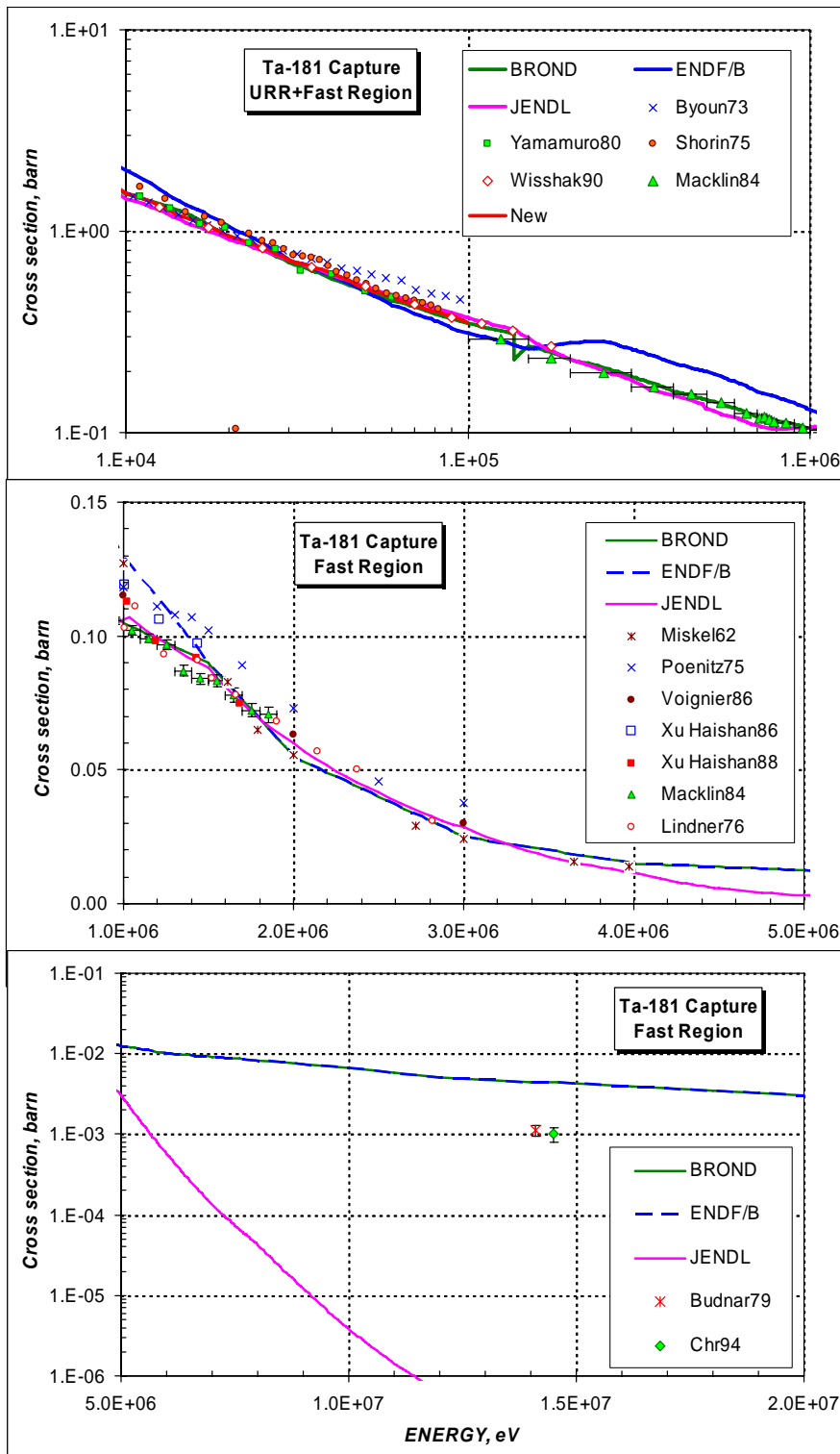


Рисунок 13 - Сравнение сечения захвата нейтронов для Ta-181 в области энергий выше 100 кэВ.

Из приведенного на рисунке 13 сравнения видно, что оцененные сечения из JENDL и БРОНД вплоть до 4 МэВ согласуются друг с другом и с имеющимися экспериментальными данными. Выше 4 МэВ оценка JENDL начинает неоправданно “проваливаться” вниз и нуждается в корректировке. Правда и сами значения сечения радиационного захвата в отмеченной области становятся очень малыми по величине. Здесь начинают играть заметную роль другие процессы, в частности, неупругое рассеяние нейтронов.

На рисунке 14 представлено сравнение оцененных сечений суммарного неупругого рассеяния нейтронов и немногочисленных экспериментальных данных.

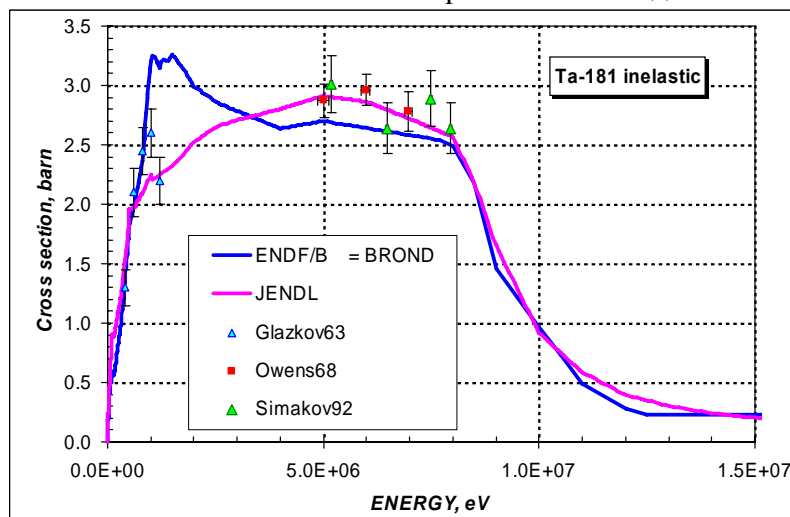


Рисунок 14 - Сравнение суммарного сечения неупругого рассеяния нейтронов для Ta-181.

Из представленного на рисунке 14 сравнения видно, что оценка JENDL, в целом, лучше согласуется с экспериментальными данными, нежели оценка ENDF/B. В области энергий ~ 1.0 МэВ расхождения между оценками являются максимальными и составляют $\sim 30-40\%$. Экспериментальные данные группы Глазкова (1963 г.) согласуются в пределах погрешностей как с оценкой ENDF/B, так и с оценкой JENDL. Происхождение пика сечения в области энергии 1 МэВ могло бы быть вызвано резонансной структурой сечений неупругого рассеяния. Однако, такой оценки сечения не было сделано ни в ENDF/B ни в JENDL.

В таблице 3 приводится сравнение используемых в оценках схемы уровней при неупругом рассеянии нейтронов на Ta-181.

Таблица 3 – Сравнение схемы уровней при неупругом рассеянии нейтронов на Ta-181.

| ENDF/B | JENDL | TO198 |
|--------|--------|--------|
| 0.0062 | 0.0062 | 0.0062 |
| 0.1361 | 0.1360 | 0.1363 |
| 0.1586 | 0.1590 | 0.1586 |
| 0.3015 | 0.3010 | 0.3016 |
| 0.3375 | 0.3380 | 0.3375 |
| 0.4822 | 0.4820 | 0.4822 |
| 0.4950 | 0.4950 | 0.4952 |
| | 0.5430 | 0.5425 |
| | 0.6150 | 0.6152 |
| 0.6200 | 0.6190 | 0.6190 |
| 0.7200 | 0.7170 | 0.7167 |
| | 0.7730 | 0.7730 |
| 0.9250 | 0.9650 | 0.9650 |
| | 1.0280 | 1.0279 |
| | 1.0300 | |
| 1.1930 | | 1.2314 |

Из приведенной в таблице информации видно, что в ENDF/B имеются значительные пропуски уровней. Континуум уровней (значения энергий выделены желтым цветом) начинается выше 1 МэВ, и следовательно, происхождение пика в суммарном сечении неупругого рассеяния сечения на континууме уровней прояснить не могут.

Обратимся к сравнению сечений неупругого рассеяния нейтронов на отдельных уровнях возбуждения, представленному на рисунке 15.

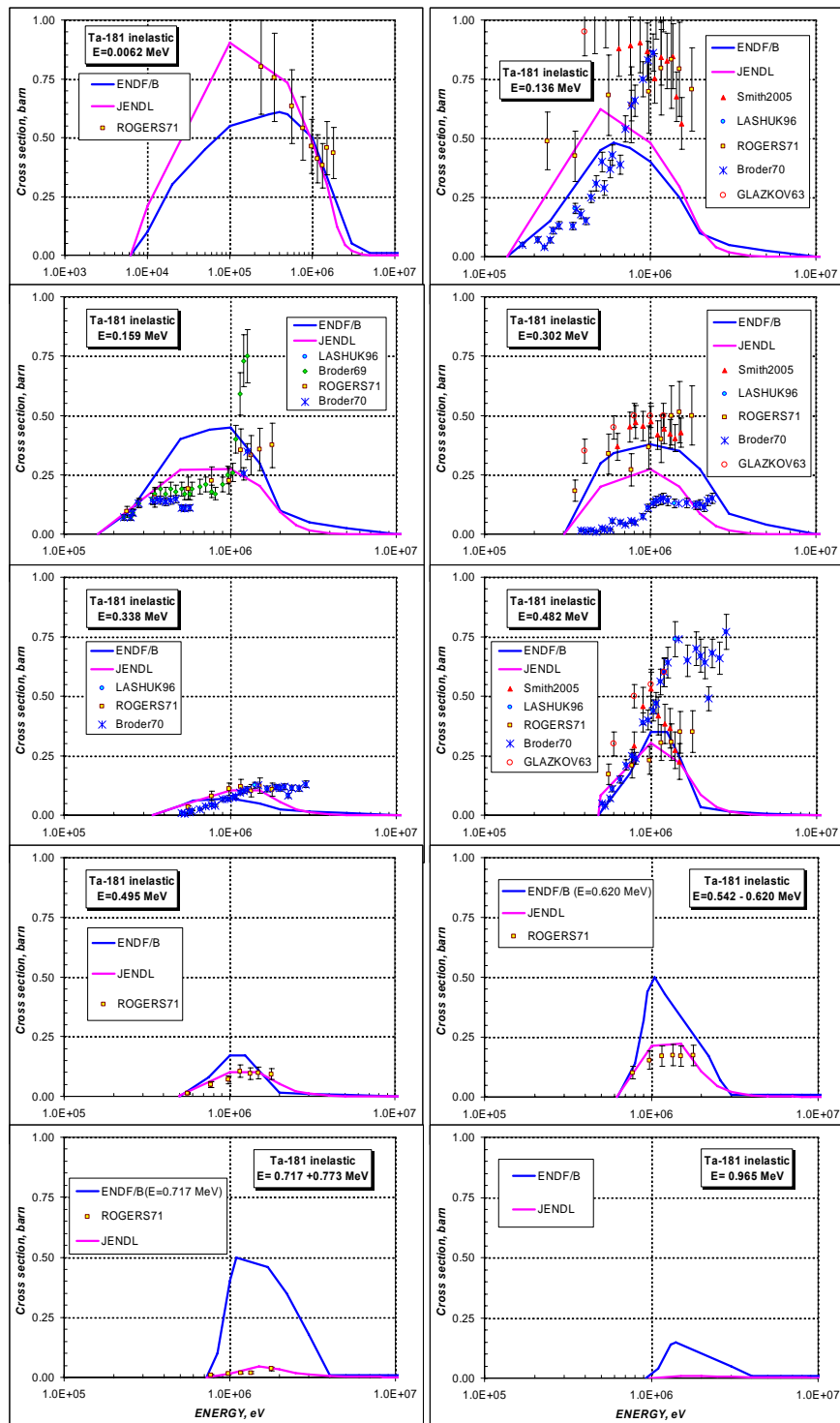


Рисунок 15 - Сравнение сечения неупругого рассеяния нейтронов на отдельных уровнях возбуждения для Ta-181.

Из приведенного на рисунке 15 сравнения видно, что оцененные сечения удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Имеющиеся экспериментальные данные не противоречат идее резонансного характера сечения в области энергий 1 МэВ. Однако, следует отметить, что суммарное сечение для первых семи уровней в обеих оценках приблизительно одинаково, серьезные расхождения начинаются при оценке более высоких уровней. Выше 0.5 МэВ оценка ENDF/B завышает сечение по отношению к JENDL более чем на 1 барн, что мы и наблюдаем на рисунке 14. Таким образом, причиной пика сечения в оценке ENDF/B являются завышенные значения сечения неупругого рассеяния на уровнях возбуждения выше 500 кэВ.

Следовательно, оценка неупругого рассеяния JENDL, в целом, является более привлекательной, чем ENDF/B.

Следует отметить, что измерение сечения неупругого рассеяния на первом низколежащем уровне представляет собой очень сложную не только экспериментальную процедуру, но и постэкспериментальную обработку. Данные должны быть определены с большой экспериментальной ошибкой. Скорее всего, экспериментальные данные для второго уровня представляют собой сумму сечений двух низколежащих уровней (0.0062 + 0.136 МэВ). Следует также учитывать, что данные Лашука (1996 г.) есть нечто иное, как еще одна публикация данных группы Бродера, полученных в конце 60-х годов. Уместно будет напомнить здесь, что сечение неупругого рассеяния, определяемое из средних резонансных параметров (в частности, в оценке Мантурова) оказывается значительно ниже оцененных кривых именно в этой области энергий. Вероятно, в дальнейшем следует вернуться к переоценке сечения неупругого рассеяния.

Следующим важным сечением на Ta-181 является сечение реакции (n,2n). В результате этой реакции образуется короткоживущий Ta-180 в основном состоянии с $T_{1/2} = 8.2$ часа и долгоживущего изомера Ta-180m с периодом полураспада $T_{1/2} > 1.2E+15$ лет. На рисунке 16 представлено сравнение оцененных и экспериментальных данных сечения реакции (n,2n). Там же приводится пунктирная кривая вклада процесса с образованием изомера Ta-180m полученная на основе данных из оценки ADL-3.

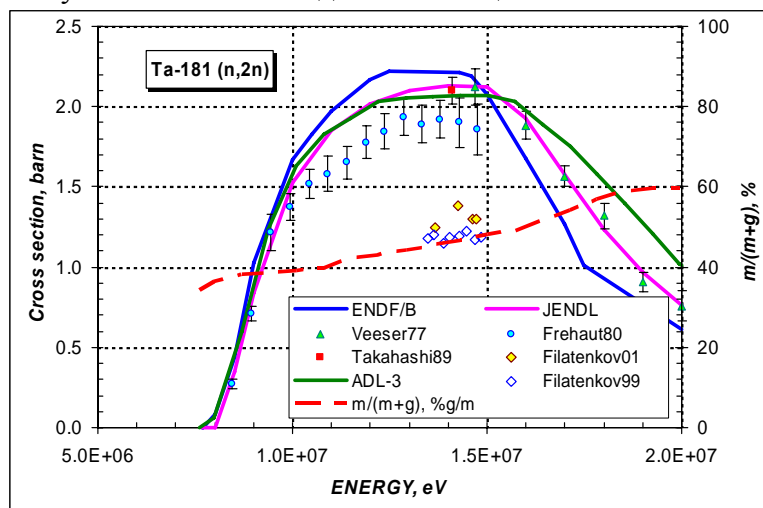


Рисунок 16 - Сравнение сечения реакции (n,2n) для Ta-181.

Из приведенного на рисунке 16 сравнения видно, что оценка JENDL наилучшим образом описывает совокупность экспериментальных данных. В среднем, каждый второй акт взаимодействия приводит к образованию изомерного состояния Ta-180m. Следует отметить, что данные Филатенко (2001 г.), взятые из библиотеки EXFOR ошибочно относятся к данным описывающим полное сечение реакции (n,2n). В действительности, как это хорошо видно на рисунке 16 они вероятнее всего относятся к процессу образования изомера. Для сравнения, там же приведены данные Филатенко (1999 г.) описывающие сечение реакции с образованием Ta-180 в основном состоянии.

Кроме того, на Ta-181 возможны реакции с вылетом протона и альфа частицы (n,p) и (n,alfa). Первая реакция имеет сечение в максимуме порядка десятка миллибарн, а вторая – порядка миллибарна. Сравнение экспериментальных и оцененных кривых сечения реакции (n,p) показано на рисунке 17, а аналогичное сравнение для сечения реакции (n,alfa) показано на рисунке 18.

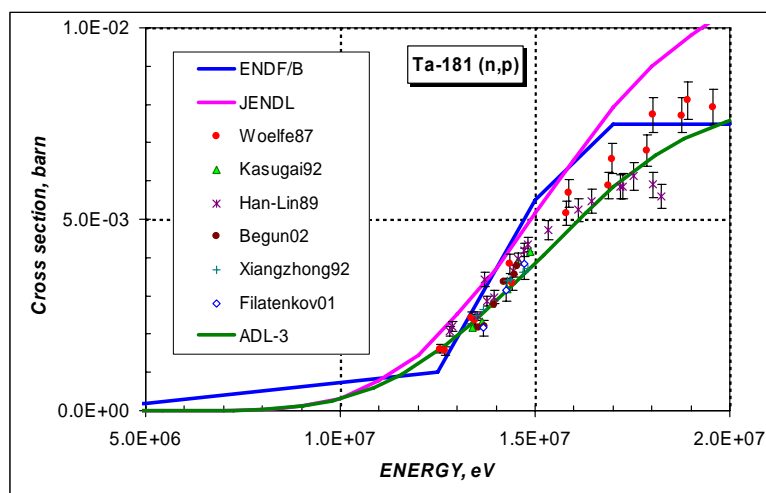


Рисунок 17 - Сравнение сечения реакции (n,p) для Ta-181.

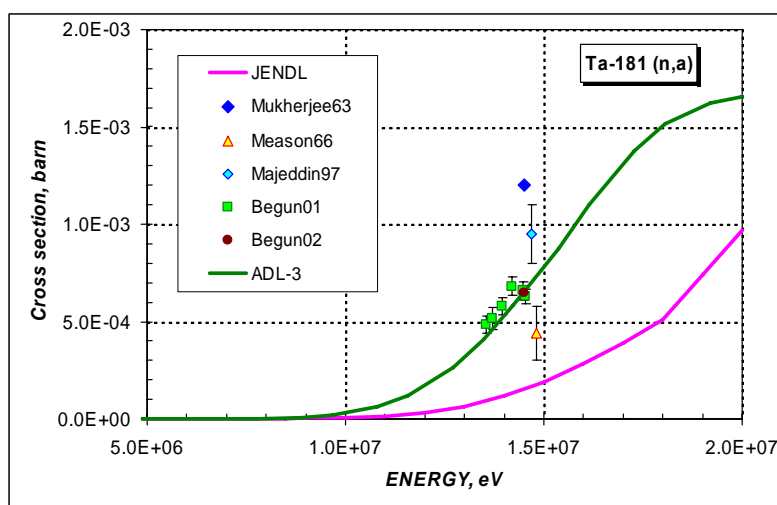


Рисунок 18 - Сравнение сечения реакции (n,α) для Ta-181.

Из приведенного на рисунке 17 сравнения видно, что оценка ADL лучше других согласуется с экспериментальными данными. Оценка JENDL может быть модифицирована. Оценка ENDF/B, в целом, неплохо согласуется с экспериментом, но задана на грубой энергетической сетке, особенно в районе порога реакции.

Из приведенного на рисунке 18 сравнения сечения реакции (n,α) видно, что оценка ADL хорошо согласуется с экспериментом, а оценка JENDL является заниженной.

Заключение

На основе проведенного анализа параметров разрешенных резонансов и наиболее важных нейтронных сечений рекомендуется в библиотеку РОСФОНД'а для тантала-181 принять оценку нейтронных данных из библиотеки JENDL-3.3 со следующими изменениями:

- в области неразрешенных резонансов использовать оценку Мантурова;
- сечение радиационного захвата выше 4 МэВ провести согласно экспериментальным данным;
- сечения реакции (n,p) и (n,α) провести согласно имеющимся экспериментальным данным.
- ввести файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера: ^{180m}Ta , используя данные из EAF-2003.

В дальнейшем следует вернуться к более корректной оценке неупругого рассеяния нейтронов.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

73.5. Тантал-182

Испытывает β -распад. $^{182}\text{Ta}(T_{1/2}=114.4 \text{ д}) \rightarrow ^{182}\text{W}$ (стабильный).

В ФОНД-2.2 – оценка J.Кореску, D.Nierop, 1992 (EAF-3) и представляют собой нейтронные данные для активационного анализа.

В ENDF/B-VII находится полный файл нейтронных данных, основа которых - нейтронные данные из ENDF/B-IV (оценка Отга, Данфорда и Оттевайта, 1971 г) без каких либо изменений.

В JEFF-3.1 находится полный файл нейтронных данных, основа которых - нейтронные данные из ENDF/B-IV (оценка Отга, Данфорда и Оттевайта, 1971 г) в которых проведена небольшая коррекция средних резонансных параметров и поправлено значение энергии реакции с вылетом альфа частицы.

В EAF-2003 содержатся нейтронные данные для активационного анализа, причем сечение захвата нейтронов совпадает с JEFF-3.1.

На рисунке 18 приводится сравнение полного сечения из перечисленных оценок. А на рисунке 19 приводится сравнение сечения радиоактивного захвата нейтронов.

Как видно и рисунков 18 и 19, различие в сечениях наблюдаются в области энергий от 35 эВ до 100 кэВ. Никаких экспериментальных данных для проверки надежности выполненных оценок нет.

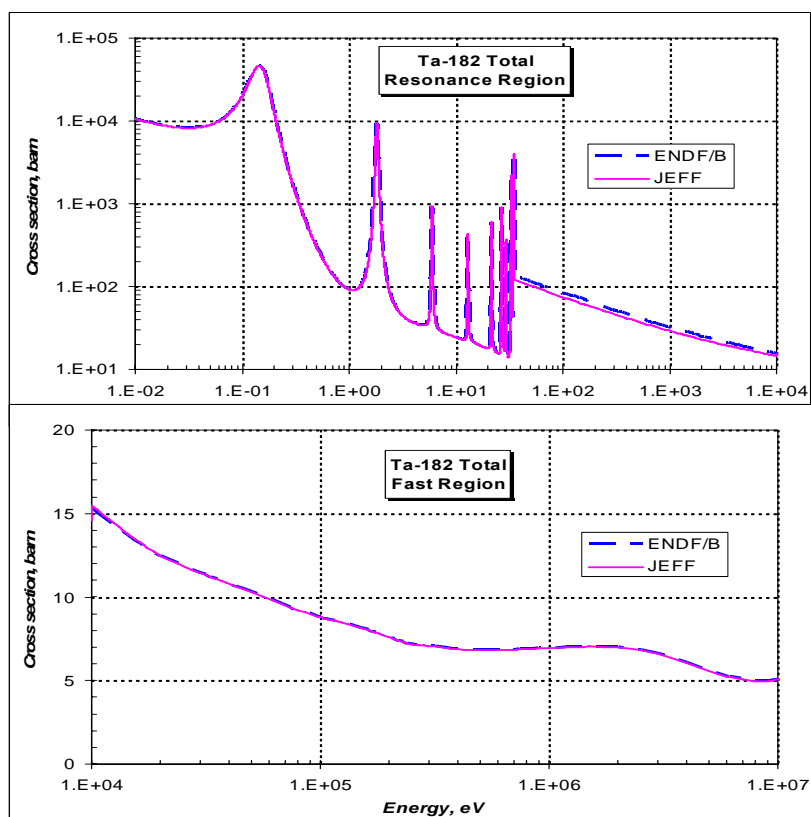


Рисунок 18 – Сечение полного взаимодействия нейтронов на Ta-182.

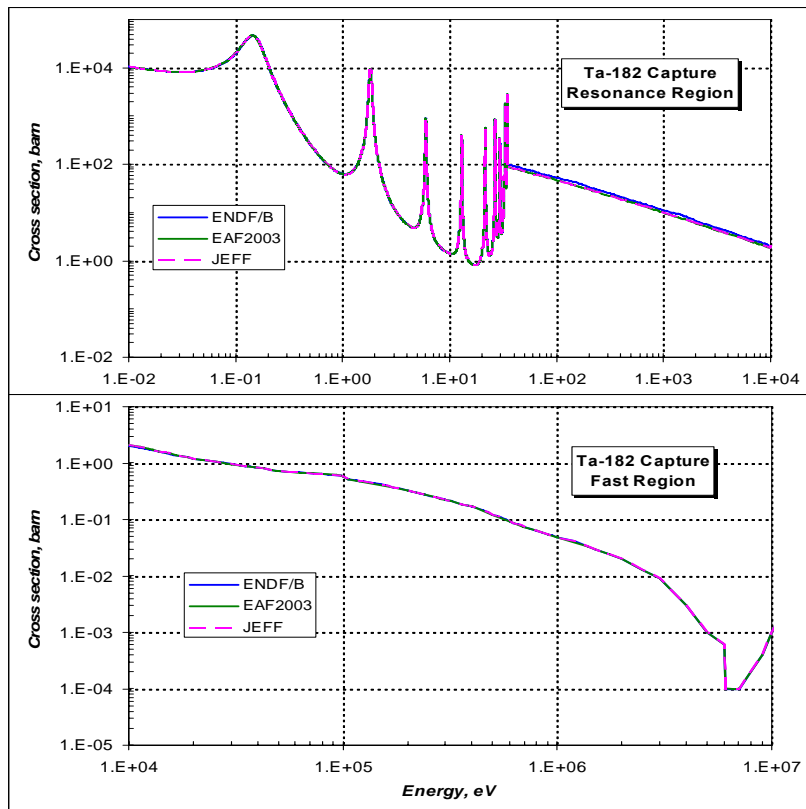


Рисунок 19 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Ta-182.

Закключение.

В РОСФОНД для Та-182 принимается оценка нейтронных данных из JEFF-3.1. Дополнить файл секцией 9/17 с вероятностями образования основного и изомерного состояний тантала-180, используя данные EAF-2003.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

73.6. Тантал-183

Испытывает β -распад. ^{183}Ta ($T_{1/2}=5.1$ д) \rightarrow ^{183}W (стабильный).

В ФОНД-2.2 – оценка J.Корецку, D.Niergor, 1992 (EAF-3) и представляют собой нейтронные данные для активационного анализа.

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

На рисунке 20 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата нейтронов не изменилось. Поскольку все сечения реакций в EAF-2003 пересчитаны на основе современных модельных параметров, то, возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

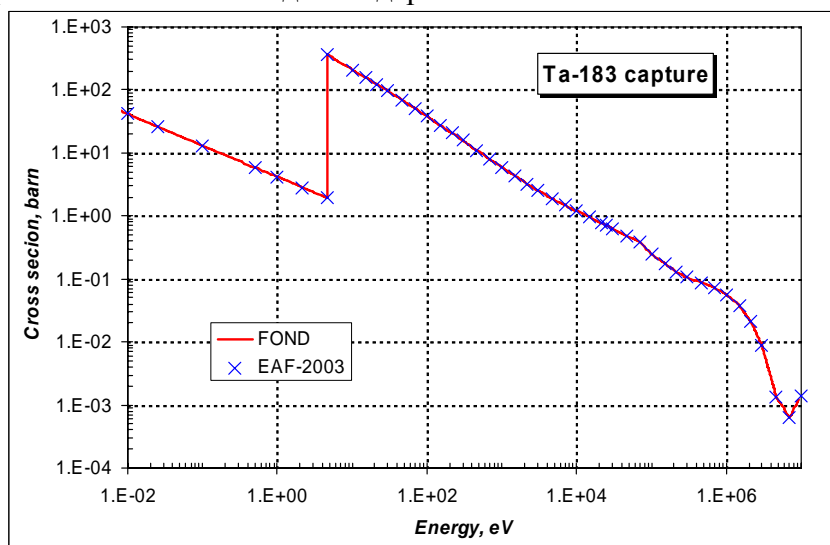


Рисунок 20 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Та-183.

Сечение захвата тепловых нейтронов равно 45.65 барна.

Закключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1). Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 исключить.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

74.ВОЛЬФРАМ

Ниже будут рассмотрены оценки нейтронных данных для 5 долгоживущих ($T_{1/2}$ более суток) и 5 стабильных изотопов вольфрама.

74.1. Вольфрам-178

Радиоактивен. Спин и четность 1^+ . Испытывая захват орбитального электрона ($T_{1/2} = 21.6$ дн.) превращается в изомер $^{178}\text{Ta}^m$, который с периодом 9.31 мин. распадается в стабильный $^{178}\text{Hf}^1$. В реакторе этот изотоп может быть образован в реакции $^{180}\text{W}(n,3n)$. Полных оценок нейтронных данных для ^{178}W неизвестно. Оценка сечений нейтронных реакций, основанная на теоретических расчетах и полуэмпирических систематиках, содержится в библиотеке EAF.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из последней версии библиотеки EAF – EAF-2003. Сечения образования конечных ядер в основном и изомерном состояниях в реакциях (n,p) и $(n,2p)$, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

74.2. Вольфрам-180

Содержание в естественной смеси 0.12%. Спин и четность – 0^+ . Полных наборов оцененных нейтронных данных нет ни в одной библиотеке не содержится. В EAF-2003 приведены энергетические зависимости сечений реакций, отличных от рассеяния. В ФОНД-2.2 содержится только секция параметров разрешенных резонансов (9 резонансов с максимальной энергией 614 эВ; область разрешенных резонансов распространена до 215 эВ). Г.Н. Мантуров по программе EVPAR подобрал средние резонансные параметры, описывающие экспериментальные данные Кононова-87 по полному сечению и Боховко-86 по сечению захвата (см. рис. 1 и 2). Никаких иных данных по полному сечению не имеется, а что касается сечения захвата, то существует лишь результат измерения при тепловой энергии, полученный в 1952 г. с погрешностью более 100%.

¹ Является ли состояние гафния, образующееся при распаде вольфрама-178, изомерным ($I=7^-$) или основным ($I=1^+$) достоверно неизвестно.

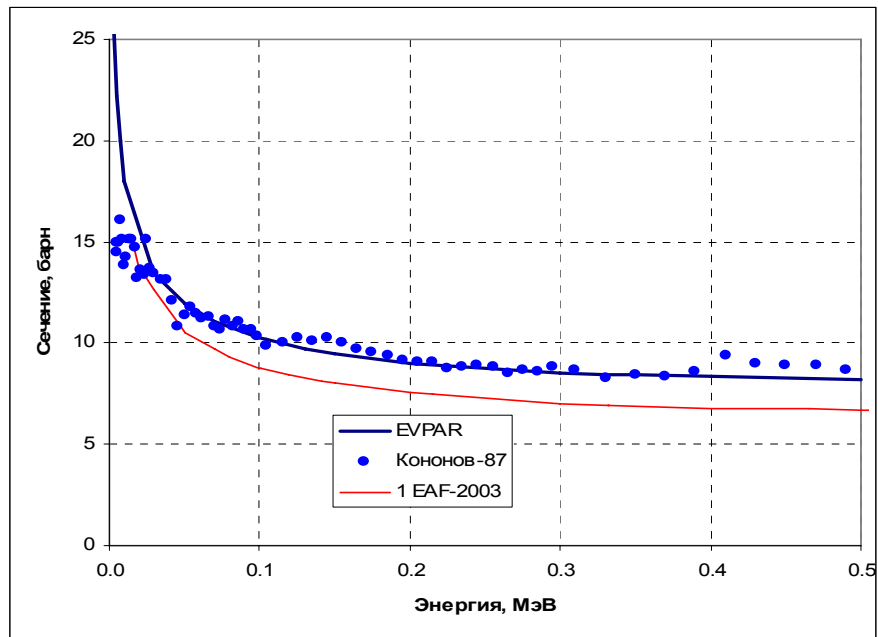


Рис. 1. Полное сечение.

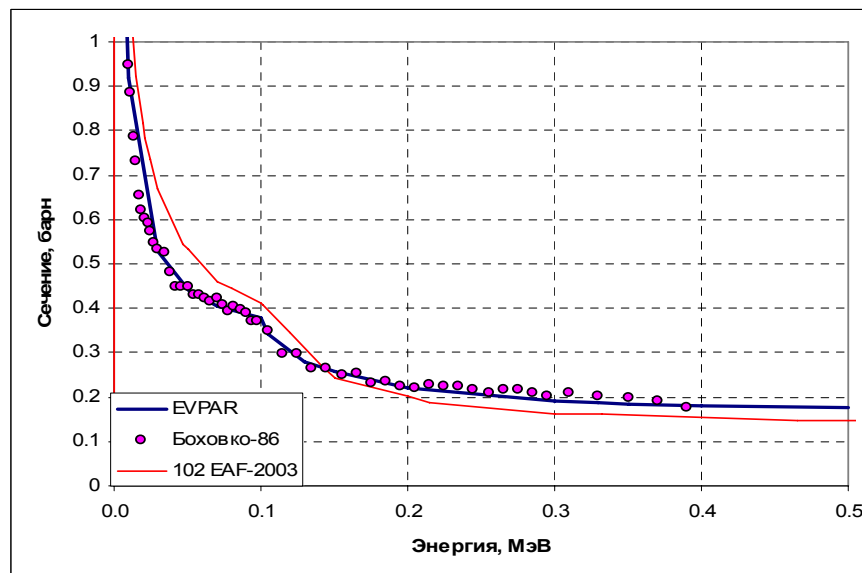


Рис.2. Сечение захвата.

Заключение.

Целесообразно создать для РОСФОНДа полный файл оцененных нейтронных данных для вольфрама-180 используя имеющиеся оценки в резонансной области энергий и близость свойств ^{180}W и ^{182}W :

1. Параметры разрешенных резонансов принять в соответствии с оценкой Л.П.Абагян (ФОНД-2.2), дополнив их связанным состоянием, оцененным Мухабхабом. Границу области разрешенных резонансов установить при 500 эВ.

2. Средние параметры неразрешенных резонансов принять в соответствии с оценкой Г.Н.Мантурова. Границу области неразрешенных резонансов принять равной 100 кэВ.

3. Сечения всех реакций вне резонансной области, принять на основе файла для вольфрама-182, внеся в них следующие изменения.

(а) Полное сечение в интервале от 2 МэВ до 100 кэВ плавно увеличить от 0 до 18% для обеспечения стыковки с расчетом по резонансным параметрам при 100 кэВ.

(б) Сечение радиационного захвата модифицировать аналогичным образом для обеспечения стыковки при 100 кэВ.

(с) Энергии пороговых реакций принять равными тем, что указаны в EAF-2003.

В сечения неупругого рассеяния никаких изменений не вводить, поскольку схемы уровней ^{180}W и ^{182}W достаточно близки друг к другу.

Все угловые и энерго-угловые распределения, а также данные об образовании фотонов в нейтронных реакциях принять такими, как для вольфрама-182, внося коррективы лишь на различие порогов реакций.

Ввести файл MF=9 с секцией MT=103, содержащей вероятности образования тантала-180 в основном (короткоживущем) и изомерном (долгоживущем) состояниях на основе данных EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

74.3. Вольфрам-181

Радиоактивен. Спин и четность $9/2^+$. Испытывая захват орбитального электрона ($T_{1/2} = 21.6$ дн.) превращается в стабильный ^{181}Ta . В реакторе этот изотоп может быть образован в реакции $^{180}\text{W}(n,\gamma)$ и $^{180}\text{W}(n,2n)$. Полных оценок нейтронных данных для ^{178}W неизвестно. Оценка сечений нейтронных реакций, основанная на теоретических расчетах и полуэмпирических систематиках, содержится в библиотеке EAF.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из последней версии библиотеки EAF – EAF-2003. Сечения образования конечных ядер в основном и изомерном состояниях в реакциях $(n,3n)$, $(n,n'\alpha)$, $(n,n'p)$, $(n,n't)$, (n,d) , $(n,^3\text{He})$ и (n,α) , содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Включить файл MF=10 с вероятностями образования долгоживущих изомеров в реакциях (n,α) , $(n,^3\text{He})$, а также (n,d) и $(n,n'p)$, получив их из данных о сечениях из MF=10. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

74.4. Вольфрам-182

Содержание в естественной смеси 26.50%. Спин и четность – 0^+ . Достаточно полные наборы независимо оцененных данных содержатся:

в ФОНД-2.2 и БРОНД-2 – оценка Ottewite, Rose and Young из ENDF/B-IV, с пересмотренной в 1983 г. резонансной областью – разрешенные резонансы оценены Л.П.Абагян, средние резонансные параметры подобраны Г.Н.Мантуровым для описания данных по сечению захвата и полному сечению;

в ENDF/B-VIIb2 – оценка Chadwick, Young and Arthur 1996 г.;

в JENDL-3.3 и JEFF-3.1 – оценка Watanabe and Asami 1983 г.

1. Тепловая область и область разрешенных резонансов.

В таблице 1 сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы, рассчитанные на основе перечисленных выше оценок². Там же приведены данные, рекомендованные Мухабхабом.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл.

| | $\sigma_{\text{tot}}(0.0253 \text{ eV})$ | $\sigma_{\text{el}}(0.0253 \text{ eV})$ | $\sigma_{\text{c}}(0.0253 \text{ eV})$ | RI_{c} | |
|------------|--|---|--|-----------------|--------------|
| ENDF/B-VII | 32.403 | 11.857 | 20.546 | | 596.822 |
| FOND-2.2 | 25.481 | 4.474 | 21.007 | | 601.957 |
| JEFF-3.1 | 29.579 | 8.869 | 20.710 | | 627.965 |
| Мухабхаб | | 8.840 | 19.900 | | 604.000 |
| | | ± 0.300 | ± 0.200 | | ± 60.000 |

Как видно, по параметрам, приведенным в таблице, с рекомендацией Мухабхаба лучше всего согласуется оценка JEFF-3.1 (-JENDL-3.3).

Область разрешенных резонансов в рассматриваемых оценках описывается по-разному. В FOND-2.2 даны параметры 159 s-резонанса и 3 p-резонансов; максимальная резонансная энергия- 13253 эВ, однако область разрешенных резонансов распространена только до 4650 эВ (за ней начинается область неразрешенных резонансов). Ниже энергии 1-го резонанса сечения в этой оценке заданы поточечно.

В ENDF/B-VII приводятся параметры только 69 резонансов, максимальная резонансная энергия – 4492 эВ. Область разрешенных резонансов простирается до 4500 эВ, после чего следует область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 приводятся параметры 144 резонансов, максимальная энергия – 13253 эВ (как и в ФОНДе, где, однако, ниже этой энергии описано на 15 s-резонансов, а всего на 18 резонансов больше). Область разрешенных резонансов распространена до 12 кэВ; область неразрешенных резонансов отсутствует.

На рис. 1. приведена нарастающая сумма числа s-резонансов. Здесь рассматриваются только оценки из ФОНД-2.2 и JEFF-3.1, поскольку в ENDF/B-VII описано слишком мало резонансов.

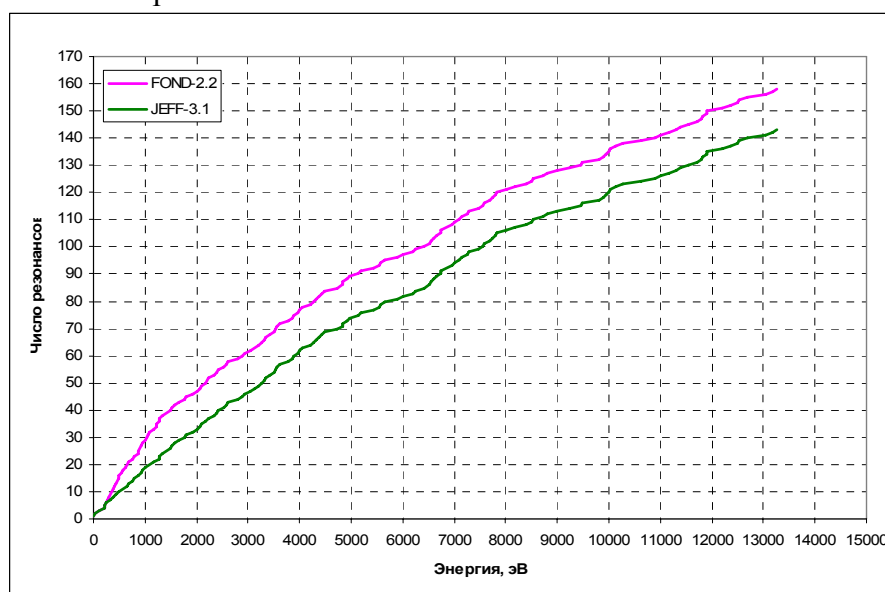


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

² Для этой цели по программе NJOY рассчитывался детальный ход сечений в резонансной области и затем с помощью программы INTER рассчитывались нужные величины.

Различие в числе резонансов накопилось уже на первом-втором килоэлектронвольте и далее не меняется. По оценке Абагян пропуск уровней становится существенным начиная с 1 кэВ. В JEFF-3.1 пропуск намечается только с 5 кэВ.

На рис. 2. приведены нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин. Как видно, до 5500 эВ эти суммы почти совпадают, т.е. различие в числе низколежащих резонансов обусловлено резонансами с малыми ширинами.

Эта сумма нарастает практически линейно до 5.5 кэВ, т.е. все пропущенные имели малые ширины, что позволяет, видимо, распространить область разрешенных резонансов до 5 кэВ. В то же время, видно, что пропуск резонансов до 12 кэВ, существенен и обоснованность распространения области разрешенных резонансов до столь высокой энергии, как это сделано в JENDL-3.3 (и JEFF-3.1), представляется сомнительной.

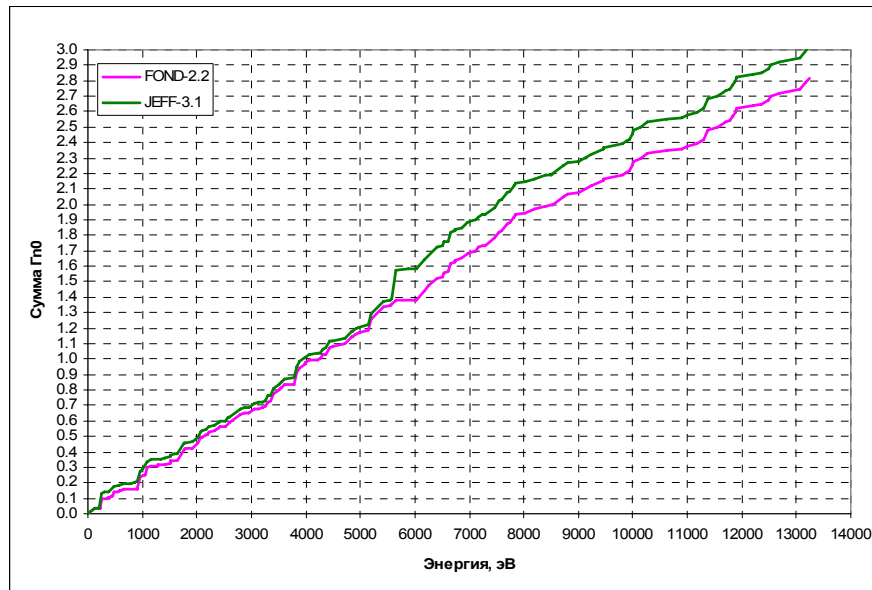


Рис. 2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин.

Сравним распределение приведенных нейтронных ширин с теоретически ожидаемым распределением Портера –Томаса. . Сравнение удобно проводить сравнивая число резонансов, попавших в 10-процентные квантили. Такое сравнение проводится на рис. 3 для различных рассматриваемых энергетических областей. В каждом из интервалов средняя приведенная ширина выбиралась такой, чтобы в верхних квантилях, где пропуск маловероятен, отклонения наблюдаемых чисел резонансов от статистически ожидаемых имели бы разные знаки и не превосходили бы существенно статистически ожидаемые.

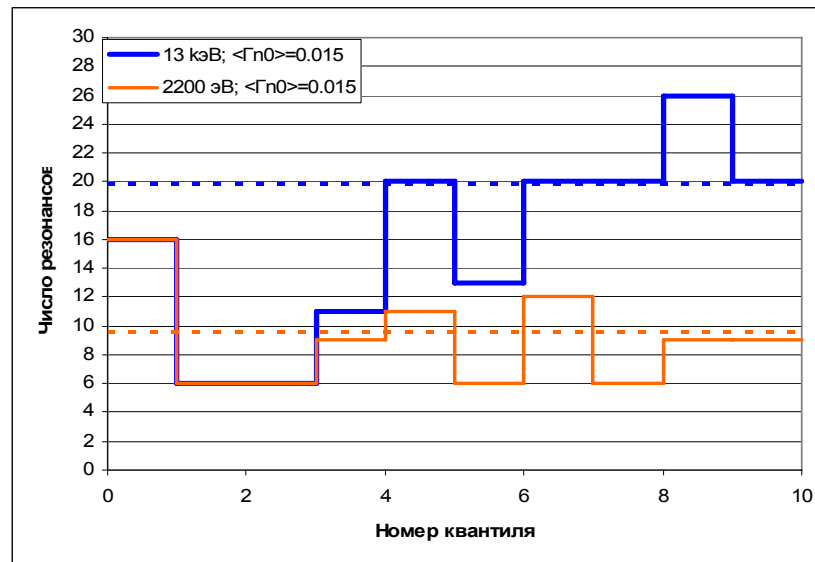


Рис.3. Распределение приведенных нейтронных ширин s-резонансов по квантилям распределения Портера-Томаса.

Средняя приведенная нейтронная ширина принималась одной и той же и в широком и в узком интервалах. Видно, что число резонансов, попавших в нижние три квантиля, при расширении интервала не изменилось: все эти резонансы лежат при низких энергиях. Соответственно доля резонансов, попавших в нижние квантили с расширением интервала сократилась, что и указывает на наличие пропуска: ожидаемое число резонансов в области до 13 кэВ около 200. Создается впечатление, что резонансы, попавшие в первый квантиль – это достаточно широкие p-резонансы, а s-резонансы пропущены. Ширины трех резонансов, принятых в оценке Абагян за p-резонансы, настолько малы, что если их рассматривать как s-резонансы, то они попадут в первый квантиль, увеличив полное число попавших в него резонансов до 20. Как бы то ни было, из рис. 3 видно, что в области до 5 кэВ пропущены только узкие резонансы, которые не могут дать в нейтронные сечения большого вклада. Исходя из изложенного представляется целесообразным **включить в РОСФОНД резонансные параметры из оценки Л.П.Абагян, как наиболее полной, но расширить область разрешенных резонансов до 5кэВ.**

2. Область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 (=JENDL-3.3) область неразрешенных резонансов, как говорилось выше, не описывается; в ENDF/B-VII и в FOND-2.2 она простирается до 100 кэВ (т.е. практически до порога неупругого рассеяния, 100.6 кэВ), причем приводимые параметры рекомендуются не только для расчета резонансной самоэкранировки, но и самих сечений. В обеих оценках сечения описываются с учетом вкладов s-, p- и d –волн. Никаких плавных подложек к сечениям нет.

Сравнение средних параметров, подобранных для описания измеренных сечений, для выбора оценки смысла, видимо, нет. Сравним результаты расчетов, выполненных на основе этих параметров, с помощью программы NJOY, с экспериментальными данными в интересующей нас области энергий.

На рис. 4. оцененные данные по сечению захвата сравниваются с экспериментальными. Пунктиром проведены результаты расчетов по средним резонансным параметрам. В свете всей совокупности экспериментальных данных оценка, принятая в ENDF/B-VII, представляется заниженной, а оценка, принятая в JEFF-3.1 – заниженной. В ФОНД-2.2 включена оценка, выполненная с учетом всего набора имеющихся экспериментов, с точки зрения качества описания сечения захвата она, очевидно, предпочтительнее.

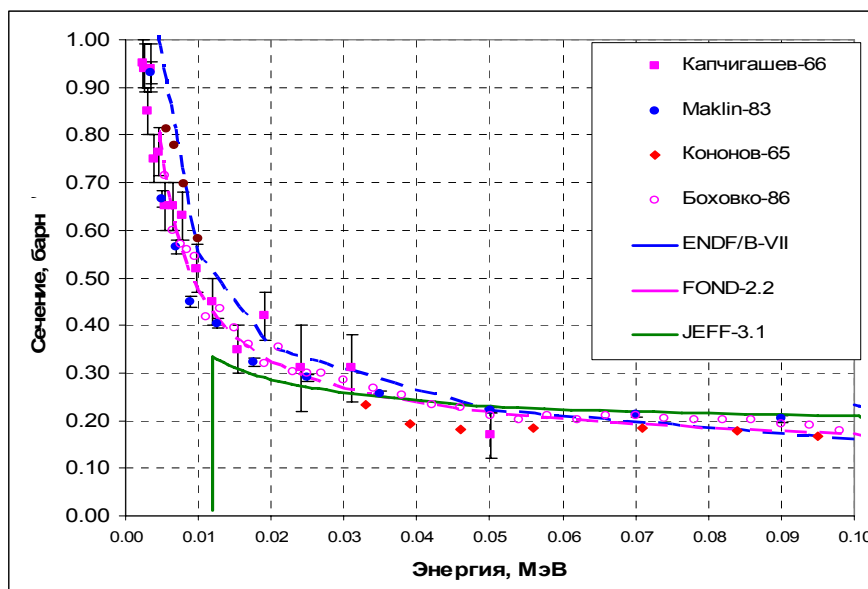


Рис.4. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов.

На рис. 5 проводится сравнение оцененных и измеренных данных по полному сечению. Экспериментальная информация весьма скудна. Данные Кононова в EXFORe приводятся в виде пропусканий T через образец толщиной $n=0.0431$ ядер/барн и приведенные здесь сечения получены как $-\ln(T)/n$, т.е. при низких энергиях данные занижены за счет самоэкранировки. При энергиях выше 60 кэВ эти искажения становятся несущественными.

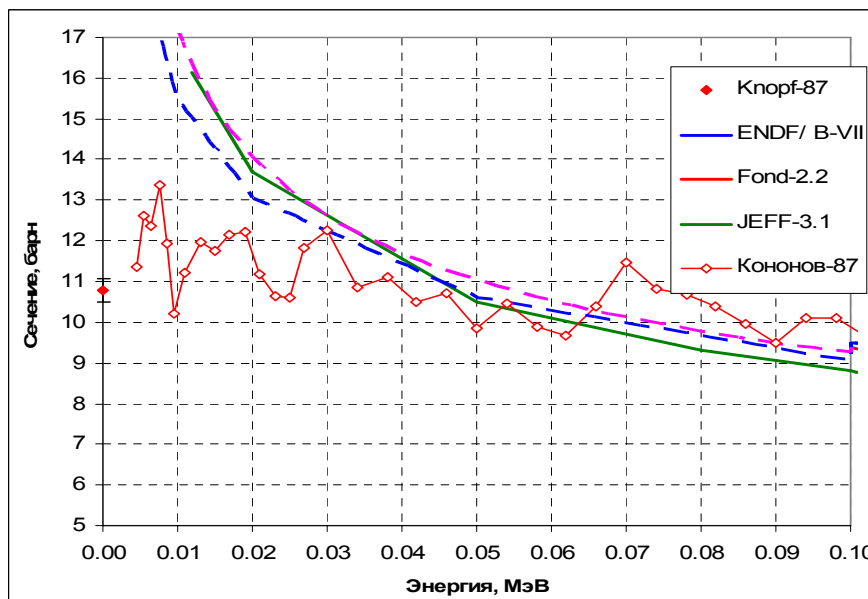


Рис. 5. Полное сечение в области неразрешенных резонансов

Расчеты по средним резонансным параметрам из указанных в легенде библиотек изображены пунктирными кривыми. Все оценки близки друг к другу и **Представляется целесообразным принять в РОСФОНД оценку из ФОНД-2.2, поскольку она лучше других описывает сечение захвата.**

3. Сечения вне резонансной области

3.1. Полное сечение

На рис. 6 различные оценки полного сечения сравниваются с экспериментальными данными. На рис. 8б в более крупном масштабе изображены данные вблизи нижней границы рассматриваемой области. Оценка, принятая в JENDL-3.3 и в JEFF-3.1, представляется несколько заниженной в области 7 – 15 МэВ. Между двумя другими оценками трудно сделать выбор: они весьма близки.

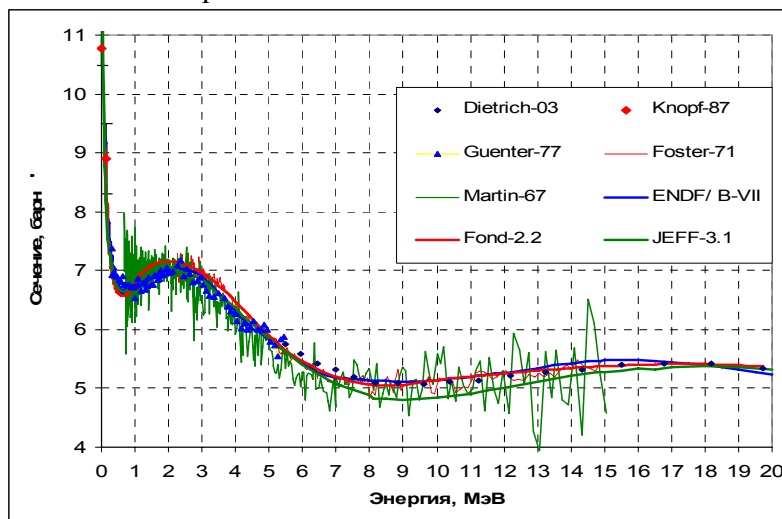


Рис.6а. Полное сечение

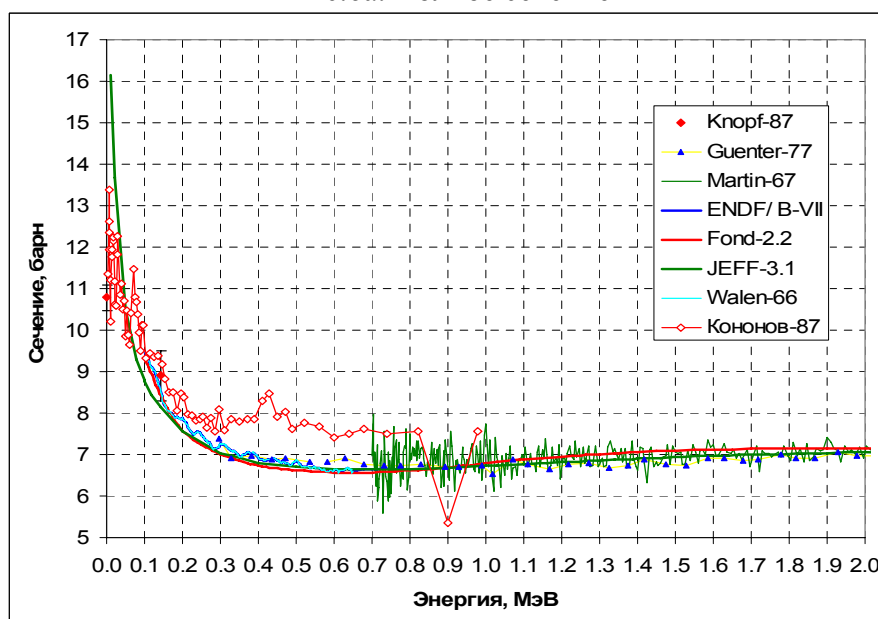


Рис.6б. Полное сечение

3.2. Сечение упругого рассеяния.

На рис. 7 сравниваются оцененные и измеренные сечения упругого рассеяния. Здесь некоторое преимущество имеет оценка JENDL-3.3.

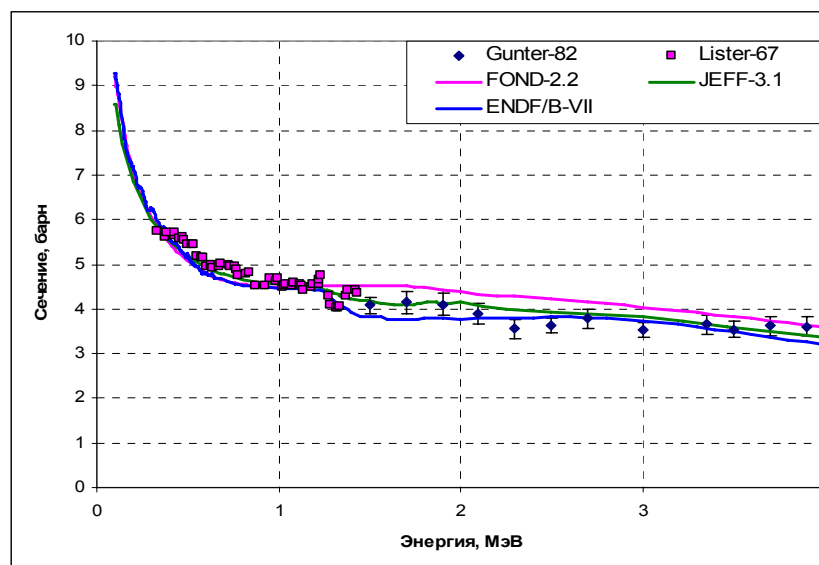


Рис.7. Сечение упругого рассеяния

3.3. Сечение захвата.

На рис.8 и оцененные и измеренные сечения захвата сравниваются друг с другом. В этом случае очевидно некоторое преимущество оценки из ФОНД-2.2.

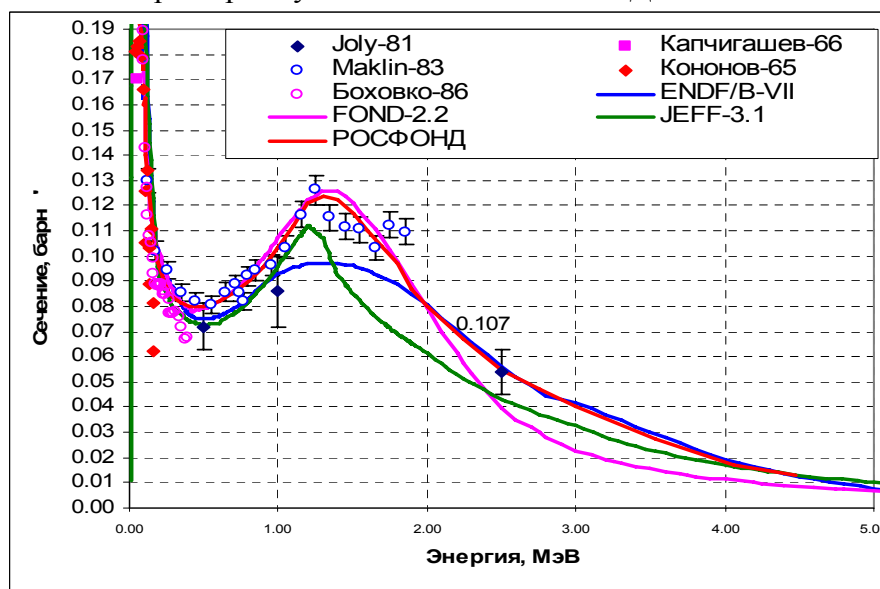


Рис. 8. Сечение радиационного захвата

3.4. Сечение неупругого рассеяния, реакций (n,2n), (n,3n), (n,α) и других.

Экспериментальных данных по сечению неупругого рассеяния не имеется.

Имеющиеся экспериментальные данные о сечениях других реакций сравниваются с оцененными на рис.10. и 11. Сечение реакции (n,2n) в ФОНД-2.2, очевидно завышено. То же можно сказать и о сечении реакции (n,3n).

Оценки сечения реакции (n,p), принятые в ФОНД-2.2 и в ENDF/B-VII, с одной стороны, и в JEFF-3.1 и JENDL-3.3 с другой различаются тем, что отдают предпочтение разным группам авторов. При 20 МэВ, где экспериментальные данные отсутствуют оценки различаются в 1.5 раза (JEFF-3.1 ниже).

Экспериментальные данные о реакции (n,α) отсутствуют. При 14.7 МэВ оцененные сечения варьируются от 1.5 до 2.5 миллибарн; при 20 МэВ – от 4 до 13 миллибарн (в EAF-2003 сечение этой реакции после 17 МэВ резко падает до 0.7 миллибарна при 20 МэВ).

Данные о сечении реакции (n,d) приводятся только в JEFF-3.1 и, конечно, в EAF-2003. Оценки очень различаются: в JEFF-3.1 к 20 МэВ сечение возрастает до 10 миллибарн, в EAF-2003 – только до 1 миллибарна.

В JENDL-3.3 дано также сечение реакции $(n,n'\alpha)$, достигающее при 20 МэВ 1.3 миллибарна. В EAF-2003 сечение этой реакции оценено при 20 МэВ в 6.5 миллибарн – считается, очевидно, что она конкурирует с реакцией (n,α) , обуславливая отмеченное выше снижение сечения последней.

При энергиях ниже 20 МэВ энергетически возможны также реакции (n,t) , $(n,n'd)$, $(n,n't)$ и $(n,2p)$. Оцененные сечения этих реакций приведены в EAF-2003. Все они, кроме сечения первой реакции, пренебрежимо малы. Сечение реакции (n,t) , при 20 МэВ согласно оценке EAF-2003 достигает 3 миллибарн.

3.5. Заключение

Проведенное рассмотрение привело к выводу, что вне резонансной области файл РОСФОНДа целесообразно формировать на основе JEFF-3.1, заменив в нем сечение захвата в области ниже 4.5 МэВ на оценку, близкую к принятой в РОСФОНД (см. красную кривую на рис. 8), добавив сечения реакций (n,t) и $(n,n'\alpha)$, взяв данные из EAF-2003. Сечение упругого рассеяния получить из баланса.

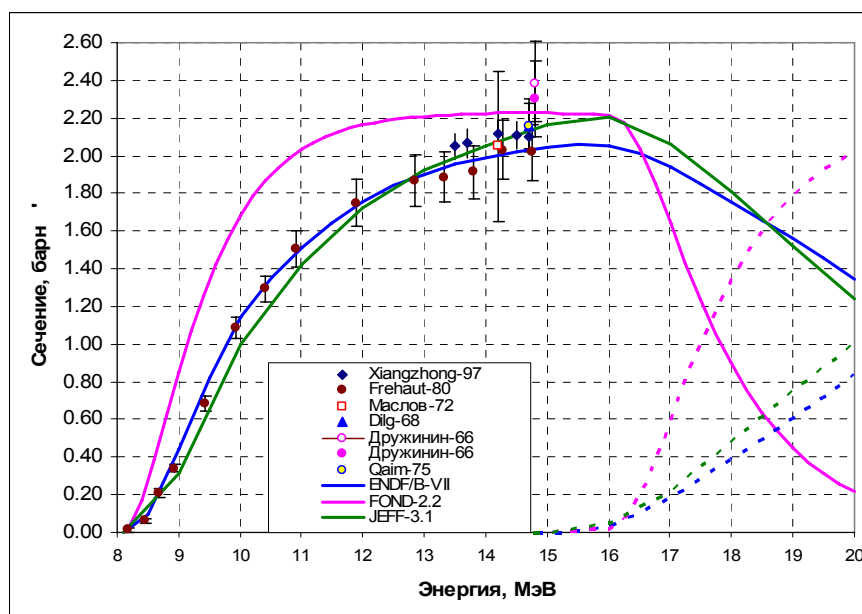


Рис.12. Сечения реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$

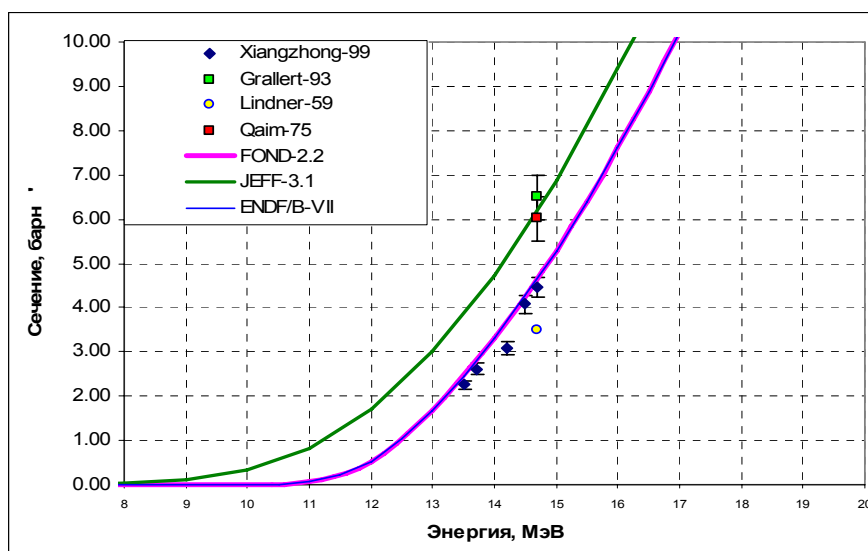


Рис. 13. Сечение реакции (n,p)

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов и образование гамма-квантов

Приняв в РОСФОНД оценки сечений основных реакций вне резонансной области из JEFF-3.1, естественно стремление принять из этой библиотеки и данные об энерго-угловых распределениях и об образовании фотонов в нейтронных реакциях, если что-либо не препятствует этому. Таких препятствий не просматривается. В JEFF-3.1 учитывается возбуждение 20 уровней ядра-мишени с энергиями до 1.87 МэВ. Возбуждение уровней, лежащих при более высокой энергии учитывается через возбуждение континуума уровней (которое в этой оценке имеет порог 1.87 МэВ). Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов и нейтронов неупруго рассеянных с возбуждением дискретных уровней, рассчитанные по теоретическим моделям, представлены в форме коэффициентов разложения по полиномам Лежандра.

Энергетические и угловые распределения реакций с непрерывным спектром нейтронов описываются секциями файла MF=6. Что касается образования фотонов, то оно учтено в JEFF-3.1 для реакций радиационного захвата, неупругого рассеяния, (n,2n) и (n,3n). Эти данные и принимаются в РОСФОНД.

5. Заключение

Для РОСФОНДа следует скомпилировать новый файл данных, основываясь в резонансной области на оценке из ФОНД-2.2, вне резонансной области – на оценке из JEFF-3.1, внося в нее коррективы и добавления, указанные выше в п. 3.5.

Ввести файл MF=9 с вероятностями образования изомерных состояний ^{178}Hf в реакции (n,n'alpha), ^{179}Hf в реакции (n,alpha) и ^{180}Ta в реакции (n,t), приняв данные, следующие из EAF-2003.

6. Автор рекомендации –

М.Н.Николаев.

74.5. Вольфрам-183

Содержание в естественной смеси 14.31%. Спин и четность – 1/2-. Достаточно полные наборы независимо оцененных данных содержатся:

в ФОНД-2.2 и БРОНД-2 – оценка Ottewite, Rose and Young из ENDF/B-IV, с пересмотренной в 1983 г. резонансной областью – разрешенные резонансы оценены Л.П.Абагян, средние резонансные параметры подобраны Г.Н.Мантуровым для описания данных по сечению захвата и полному сечению;

в ENDF/B-VIIb2 – оценка Chadwick, Young and Arthur 1996 г.;

в JENDL-3.3 и JEFF-3.1 – оценка Watanabe and Asami 1983 г.

1. Тепловая область и область разрешенных резонансов.

В таблице 1 сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы, рассчитанные на основе перечисленных выше оценок³. Там же приведены данные, рекомендованные Мухабхабом.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл.

| | $\sigma_{\text{tot}}(0.0253 \text{ eV})$ | $\sigma_{\text{el}}(0.0253 \text{ eV})$ | $\sigma_{\text{c}}(0.0253 \text{ eV})$ | RI_{c} | |
|------------|--|---|--|-----------------|---------|
| ENDF/B-VII | 13.424 | 3.418 | 10.006 | | 355.978 |
| FOND-2.2 | 15.985 | 5.437 | 10.548 | | 358.962 |
| JEFF-3.1 | 12.501 | 2.388 | 10.113 | | 334.430 |
| Мухабхаб | | 2.400 | 10.300 | | 337.000 |
| | | 0.600 | 0.200 | | 50.000 |

Как видно, все оценки хорошо согласуются с рекомендованными Мухабхабом тепловым сечением захвата и резонансным интегралом. Что касается сечения рассеяния, то в FOND-2.2 оно завышено по сравнению с рекомендацией Мухабхаба более, чем вдвое.

Область разрешенных резонансов в рассматриваемых оценках описывается по-разному. В FOND-2.2 даны параметры 102 s-резонансов; максимальная резонансная энергия – 3444 эВ, однако область разрешенных резонансов распространена только до 500 эВ (за ней начинается область неразрешенных резонансов). Ниже энергии 1-го резонанса (точнее, ниже 7 эВ) сечения в этой оценке заданы поточечно несмотря на то, что введен и резонанс при отрицательной энергии $E_0 = -5$ эВ.

В ENDF/B-VII приводятся параметры только 50 резонансов, максимальная резонансная энергия – 760 эВ. Область разрешенных резонансов простирается до 765 эВ, после чего следует область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 приводятся параметры 126 резонансов, последний резонанс лежит при энергии 2316 эВ (в ФОНДе этот резонанс имеет номер 101). Область разрешенных резонансов распространена до 2200 эВ; область неразрешенных резонансов отсутствует.

На рис. 1. приведена нарастающая сумма числа s-резонансов.

³ Для этой цели по программе NJOY рассчитывался детальный ход сечений в резонансной области и затем с помощью программы INTER рассчитывались нужные величины.

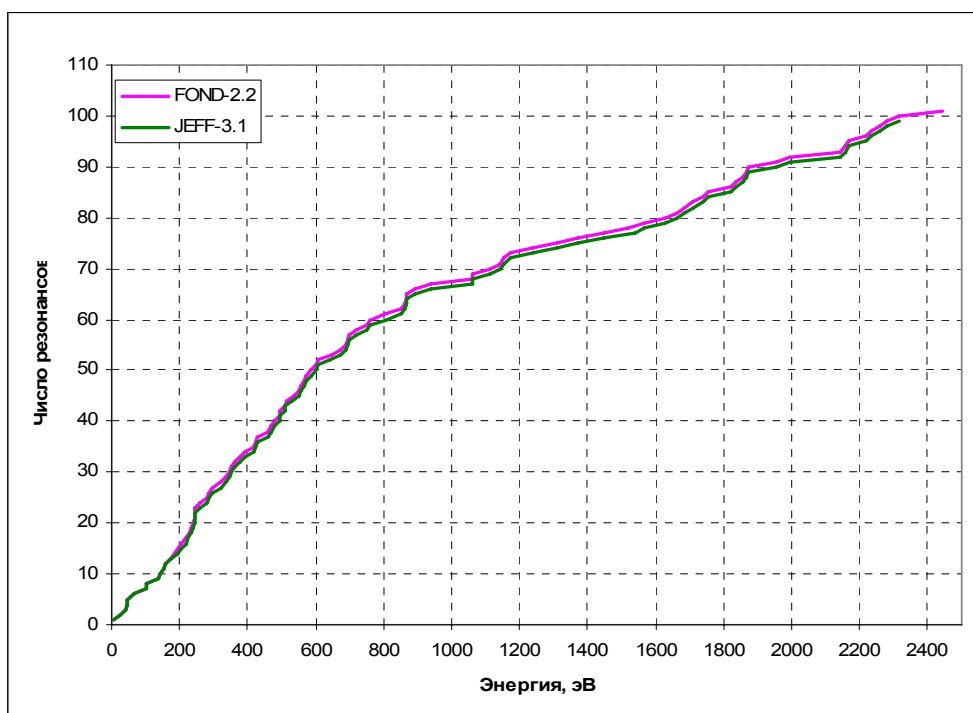


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

Данные ENDF/B-VII не приводятся поскольку до 760 эВ в двух других оценках наличествует не 50, а 59 -60 резонансов. Различие между оценками FOND-2.2 и JEFF-3.1 состоит лишь в том, что в первой из них наличествует “лишний” очень слабый резонанс при 184 эВ.

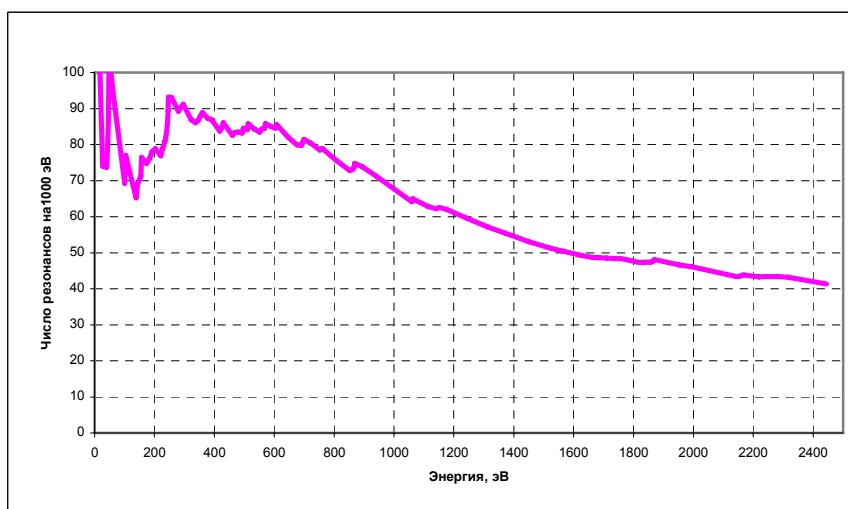


Рис.2. Среднее число резонансов на 1 кэВ.

Ниже 600 - 800 эВ очевидно наличие пропуска резонансов. На рис. 2 показана зависимость среднего числа резонансов, приходящихся на 1 кэВ, в зависимости от границы рассматриваемой области, на котором наличие пропуска уровней выше 600 эВ более очевидно.

На рис. 3. приведена нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин. Эта сумма нарастает практически линейно до 750 эВ, т.е. резонансы, пропущенные в интервале 600-750 кэВ, имели малые ширины, что позволяет распространить область разрешенных резонансов по крайней мере до 750 кэВ. В то же время, что пропуск резонансов до 2.2 кэВ очевидно существенен и распространение области разрешенных резонансов до этой энергии, как это сделано в JENDL-3.3 (и JEFF-3.1), совершенно не

обосновано. Из рис. 3 видно, что оценки нейтронных ширин в FOND-2.2 и JEFF-3.1, хотя и различаются, но не радикально (по крайней мере до 750 эВ).

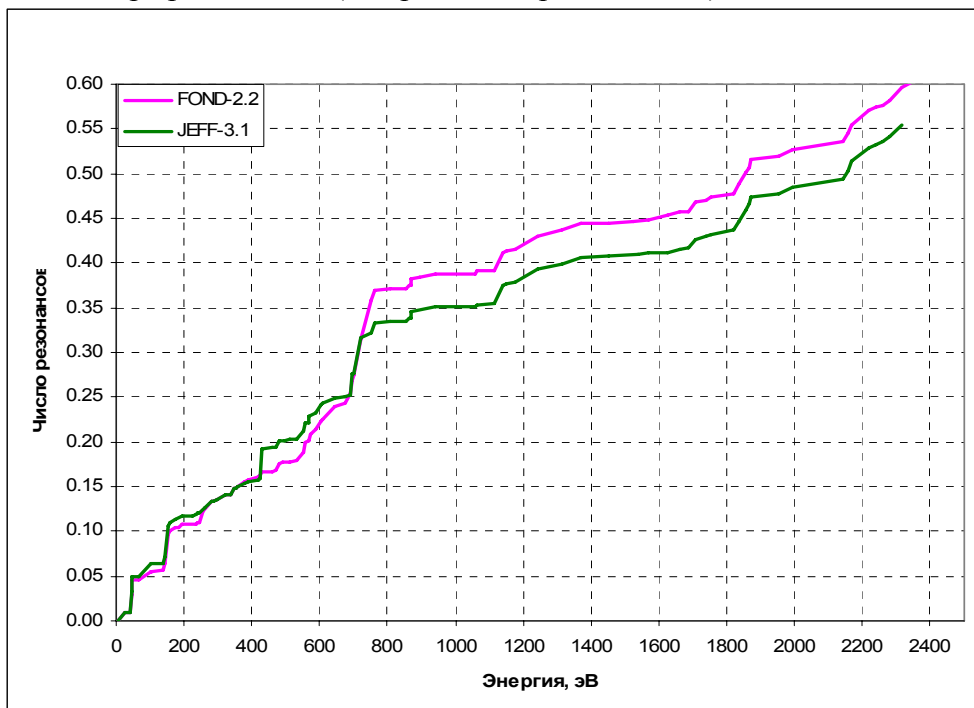


Рис. 3. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин.

Сравним распределение приведенных нейтронных ширин с теоретически ожидаемым распределением Портера –Томаса. Сравнение удобно проводить сравнивая число резонансов, попавших в 10-процентные квантили. Такое сравнение проводится на рис. 4 для различных рассматриваемых энергетических областей. При рассмотрении области до 750 эВ, наблюдаемое распределение удовлетворительно согласуется с ожидаемым при выборе средней приведенной нейтронной ширины, равной $0.006 \text{ эВ}^{1/2}$.

Если рассматривать область энергий до 2200эВ, то число резонансов в трех нижних квантилях сохраняется (т.е.таких резонансов выше 750 эВ не зарегистрировано). В то же время распределение приведенных ширин и в этом случае не слишком отличается от распределения Портера-Томаса, что, очевидно, и послужило основанием японским оценщикам для распространения области разрешенных резонансов до 2200 эВ.

Представляется целесообразным принять в РОСФОНДе границу области разрешенных резонансов равной 1000эВ. В этом интервале, как можно судить из приведенных графиков, пропуск не превышает 15% резонансов с малыми нейтронными ширинами, вклад которых в нейтронные сечения невелик. Резонансные параметры примем в соответствии с рекомендацией Л.П. Абагян, кроме связанного состояния, которое примем из JEFF-3.1, чтобы понизить сечение рассеяния при 0.0253 эВ. Нижнюю границу области неразрешенных резонансов примем при 10^{-5} эВ.

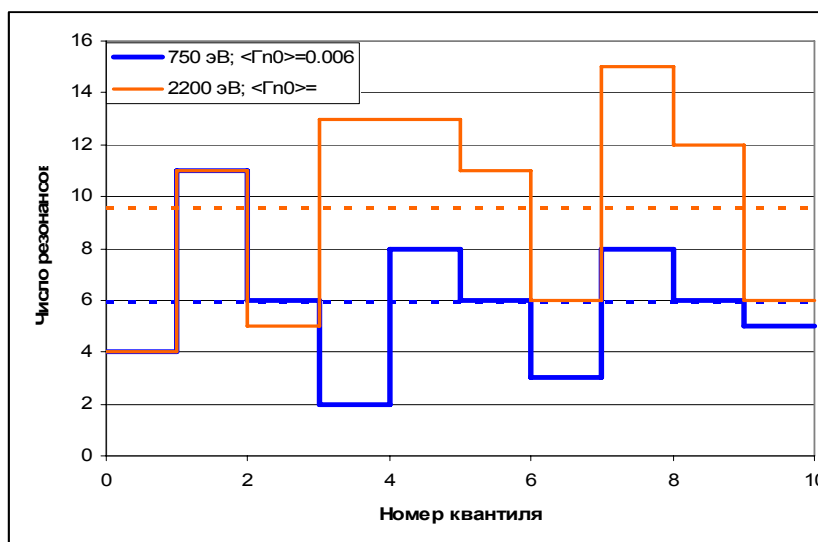


Рис.4. Распределение приведенных нейтронных ширин s-резонансов по квантилям распределения Портера-Томаса.

2. Область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 (=JENDL-3.3) область неразрешенных резонансов, как говорилось выше, не описывается; в FOND-2.2 она простирается до 100 кэВ (т.е. выше порога неупругого рассеяния, равного 46.6 кэВ), а в ENDF/B-VII - до 45 кэВ. Приводимые параметры рекомендуются не только для расчета резонансной самоэкранировки, но и самих сечений. В обеих оценках сечения описываются с учетом вкладов s-, p- и d –волн. Никаких плавных подложек к сечениям нет.

Сравнение средних параметров, подобранных для описания измеренных сечений, для выбора оценки смысла, видимо, нет. Сравним результаты расчетов, выполненных на основе этих параметров, с помощью программы NJOY, с экспериментальными данными в интересующей нас области энергий.

На рис. 5. оцененные данные по сечению захвата сравниваются с экспериментальными. Пунктиром проведены результаты расчетов по средним резонансным параметрам, приведенным в соответствующих библиотеках. На рис. 6

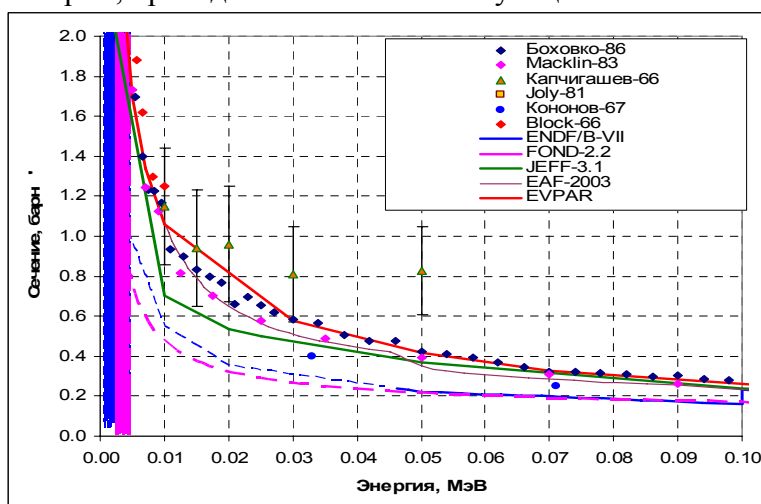


Рис.5. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов.

Проводится такое же сравнение по полному сечению. Видно, что во всех библиотеках сечение захвата переоценивается, а полное сечение недооценивается. Г.Н.Мантуровым с

помощью программы EVPAR⁴ были подобраны средние резонансные параметры, позволяющие описать совокупность имеющихся экспериментальных данных по сечению захвата и полному сечению. Полученные им результаты проведены красной линией. Она, несомненно, много лучше согласуется с результатами экспериментов и подобранные Мантуровым средние резонансные параметры и следует использовать в РОСФОНДе. Область неразрешенных резонансов целесообразно ограничить 45 кэВ. Заметим, что при этой энергии лучше других с красной кривой состыкуется оценка JEFF-3.1.

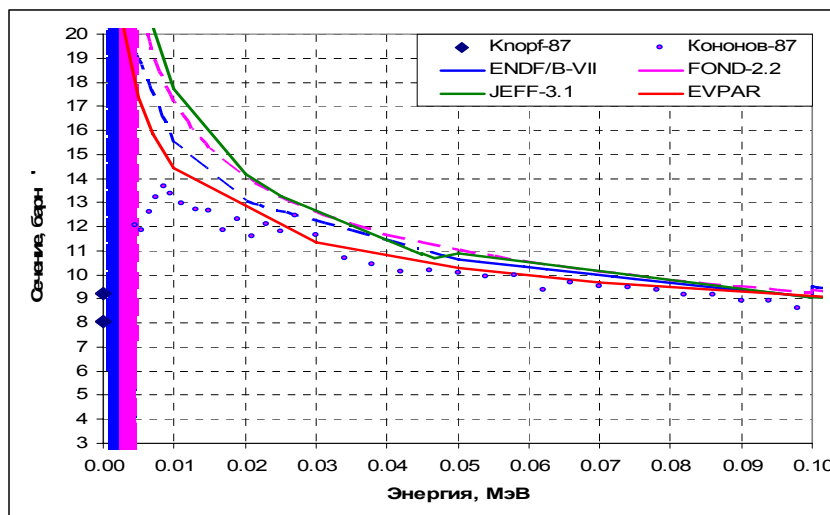


Рис. 6. Полное сечение в области неразрешенных резонансов

3. Сечения вне резонансной области

3.1. Полное сечение

На рис. 7 различные оценки полного сечения сравниваются с экспериментальными данными. На рис. 7б в более крупном масштабе изображены область, в которой имеются экспериментальные данные. Все оценки согласуются друг с другом, все они недооценивают данные Кононова 87 г. при энергии выше 300 кэВ. Надо заметить, что в EXFORe эти данные приводятся в виде пропусканий T через образец толщиной $n=0.0399$ ядер/барн. Сечение приведенное на рис. 8б получено как $-\ln T/n$. Изотопический состав образца не указан. Следует отметить, что в случае вольфрама-182, для которого имеются данные по полному сечению, полученные несколькими авторами, данные Кононова настолько же выше других, насколько в случае вольфрама-183 они выше оцененных данных. В связи с отмеченным не представляется целесообразным проводить переоценку полного сечения для обеспечения согласия с этими единственными данными, поведение которых вблизи 1 МэВ существенно отличается от результатов оценок, выполненных на основе оптической модели с параметрами, проверенными на других изотопах вольфрама.

В РОСФОНД принимается оценка JEFF-3.1.

⁴ Мантуров Г.Н. и др. ВАНТ. Сер. «Ядерные константы» выпю1 (50), с.50. М. ЦНИИАтоминформ, 1983.

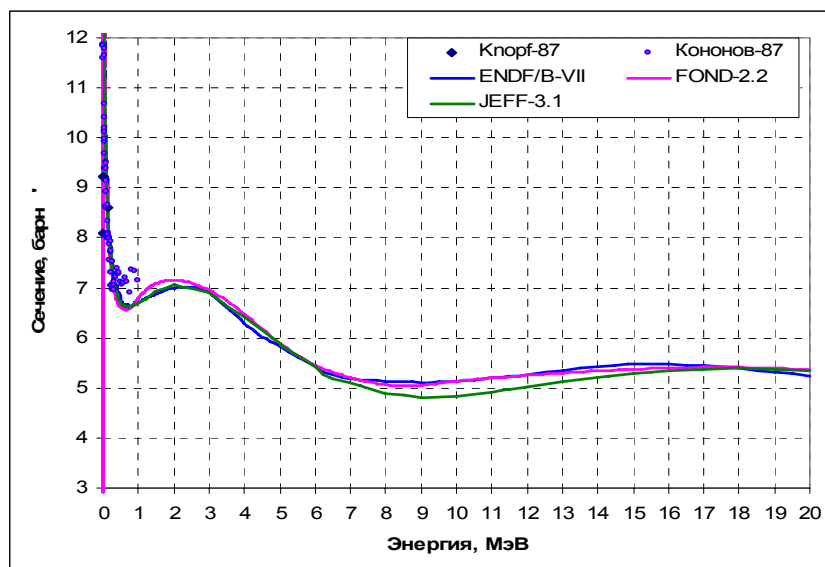


Рис.7а. Полное сечение

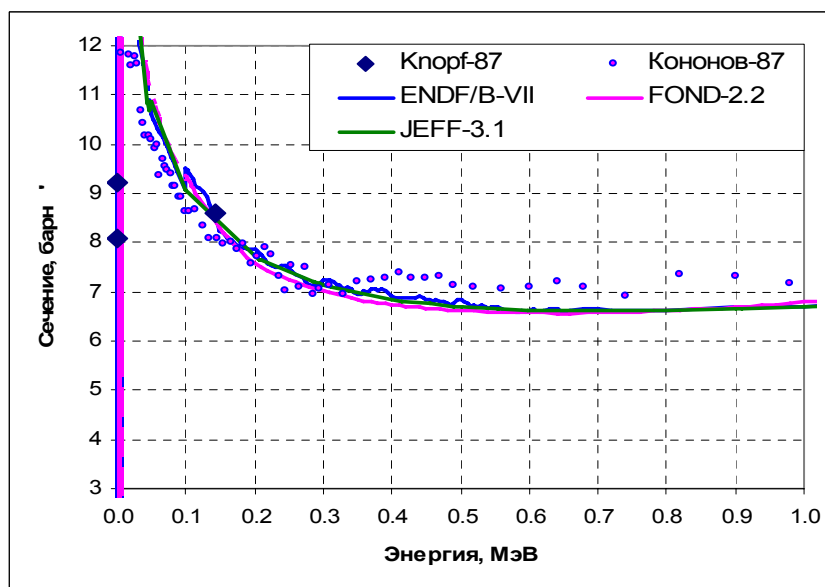


Рис.7б. Полное сечение

3.2. Сечение захвата.

На рис.8 и оцененные и измеренные сечения захвата сравниваются друг с другом. Данные Маклина не были учтены ни в одной оценке. Представляется целесообразным внести в оценку JEFF-3.1 коррективу (красная кривая на рис. 8) и в таком виде включить ее в РОСФОНД.

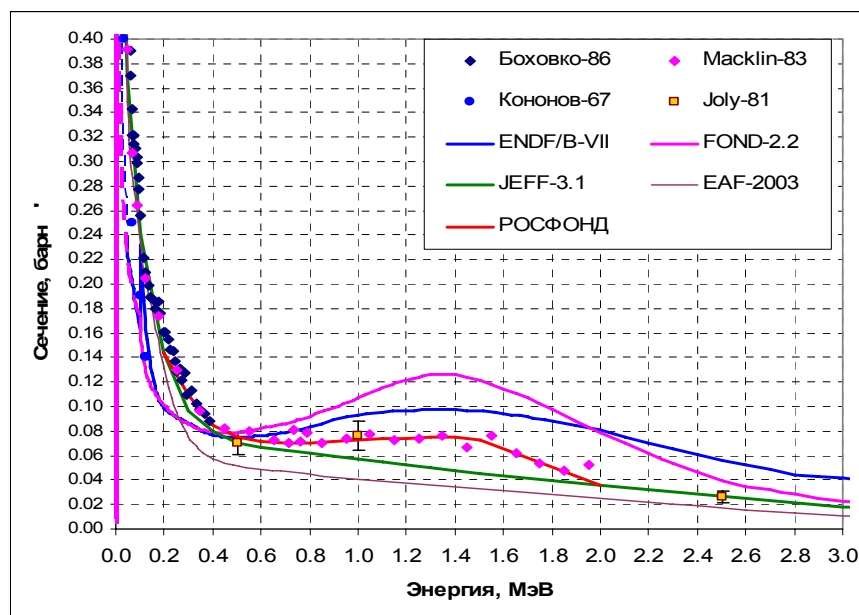


Рис. 8. Сечение радиационного захвата

3.4. Сечение неупругого рассеяния

Экспериментальных данных по сечению неупругого рассеяния на вольфраме-186 не имеется. Все оценки близки друг к другу. В РОСФОНД принимается оценка JEFF-3.1.

3.5. Сечение реакций $(n,2n)$, $(n,3n)$, (n,p) , (n,α) и других.

Имеющиеся экспериментальные данные о сечениях этих реакций сравниваются с оцененными на рис.9. и 10. Имеется экспериментальный результат для суммы реакций $(n,n'p)$ и (n,d) – см. рис.11. Приведенная на этом рисунке красная кривая проходит через точки, приведенные в JEFF-3.1, но к ним добавлены ещё и промежуточные для обеспечения приемлемой плавности. Для реакций (n,α) , $(n,n'\alpha)$, и $(n,3n)$ экспериментальные данные отсутствуют. Как видно, есть все основания принять в РОСФОНД сечения всех этих реакций из JEFF-3.1 (=JENDL-3.3). Сечение реакции $(n,n'p)$ будет сглажено так, как показано на рис.11.

Вообще говоря, в рассматриваемой области энергий возможны также реакции $(n,n'd)$, $(n,n't)$, и $(n,2p)$; оценки сечений этих реакций содержатся в EAF-2003. Сечения всех этих реакций при 20 МэВ не превышают нескольких микробарна. Учет их в библиотеке РОСФОНД едва ли целесообразен.

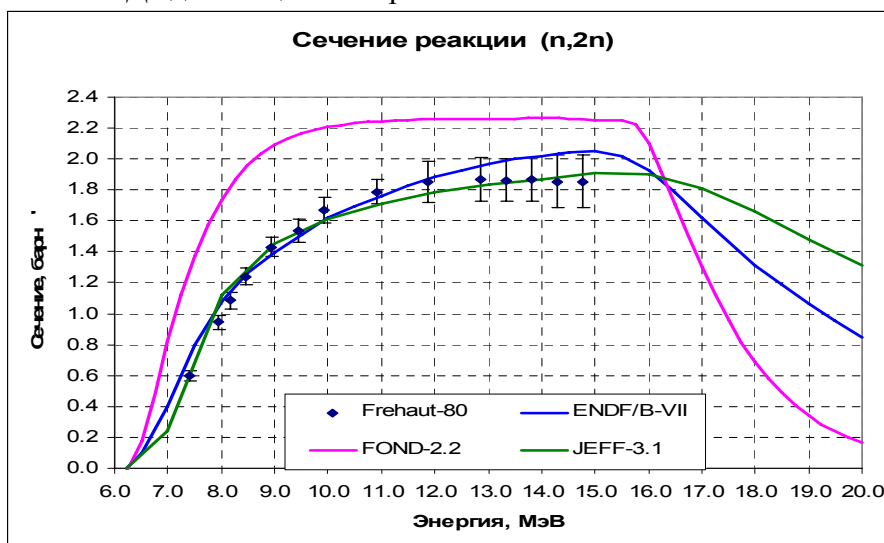


Рис.9. Сечения реакции $(n,2n)$

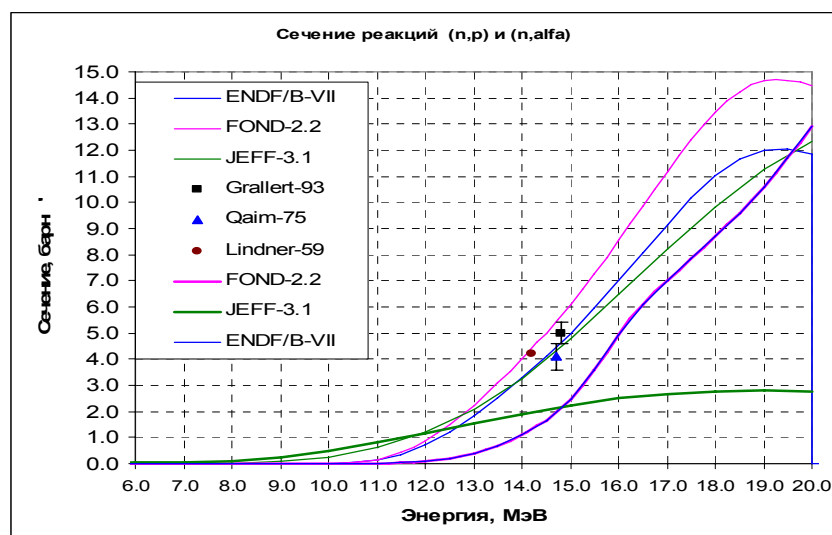


Рис. 10. Сечение реакций (n,p) и (n, α)

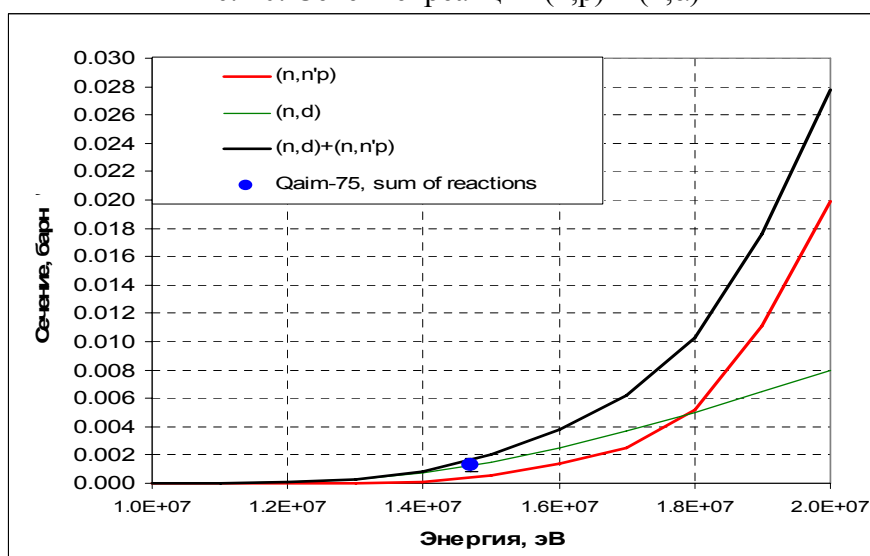


Рис.11. Сечения реакций (n,n'p), (n,d) и их суммы. Кривые – оцененные данные из JEFF-3.1.

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов и образование гамма-квантов

Приняв в РОСФОНД оценки сечений основных реакций вне резонансной области из JEFF-3.1, естественно стремление принять из этой библиотеки и данные об энерго-угловых распределениях и об образовании фотонов в нейтронных реакциях, если что-либо не препятствует этому. Таких препятствий не просматривается.

5. Заключение

Для РОСФОНДа следует скомпилировать новый файл данных, основываясь в области разрешенных резонансов на оценке из ФОНД-2.2, распространив эту область с 10-5 эВ до 1000 эВ и приняв параметры первого и отрицательного резонансов из JEFF-3.1; в области неразрешенных резонансов принять параметры, рекомендованные Г.Н. Мантуровым; вне резонансной области принять оценку из JEFF-3.1, внося небольшие коррективы в сечения захвата и реакции (n,n'p). Энерго-угловые распределения нейтронов и данные об образовании гамма-квантов взять из JEFF=3.1.

Ввести файл MF=9 с вероятностями образования изомерных состояний ^{179}Hf в реакции (n,n'alpha), приняв данные, следующие из EAF-2003.

6. Автор рекомендации –
М.Н.Николаев.

74.6. Вольфрам-184

Содержание в естественной смеси 28.43%. Спин и четность – 0^+ . Достаточно полные наборы независимо оцененных данных содержатся:

в ФОНД-2.2 и БРОНД-2 – оценка Ottewite, Rose and Young из ENDF/B-IV, с пересмотренной в 1983 г. резонансной областью – разрешенные резонансы оценены Л.П.Абагян, средние резонансные параметры подобраны Г.Н.Мантуровым для описания данных по сечению захвата и полному сечению;

в ENDF/B-VIIb2 – оценка Chadwick, Young and Arthur 1996 г.;

в JENDL-3.3 и JEFF-3.1 – оценка Watanabe and Asami 1983 г.

1. Тепловая область и область разрешенных резонансов.

В таблице 1 сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы, рассчитанные на основе перечисленных выше оценок⁵. Там же приведены данные, рекомендованные Мухабхабом.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл.

| | $\sigma_{\text{tot}}(0.0253 \text{ eV})$ | $\sigma_{\text{el}}(0.0253 \text{ eV})$ | $\sigma_{\text{c}}(0.0253 \text{ eV})$ | RI_{c} | |
|------------|--|---|--|-----------------|-------------|
| ENDF/B-VII | 6.047 | 4.297 | 1.749 | | 16.369 |
| FOND-2.2 | 6.617 | 4.783 | 1.833 | | 16.013 |
| JEFF-3.1 | 9.071 | 7.373 | 1.698 | | 16.017 |
| Мухабхаб | | 7.350 | 1.700 | | 14.700 |
| | | ± 0.017 | ± 0.100 | | ± 1.500 |

Как видно, все оценки несколько завышают резонансный интеграл по сравнению с рекомендацией Мухабхаба, который, помимо результатов измерений сечений захвата в резонансной области принимал во внимание и результаты непосредственных измерений резонансного интеграла, что могло явиться причиной занижения оценки из-за недоучета эффекта резонансной самоэкранировки.

Область разрешенных резонансов в рассматриваемых оценках описывается по-разному. В FOND-2.2 даны параметры 140 s-резонанса и 4 p-резонансов; максимальная резонансная энергия – 16450 эВ, однако область разрешенных резонансов распространена только до 2600 эВ (за ней начинается область неразрешенных резонансов). Ниже энергии 1-го резонанса сечения в этой оценке заданы поточечно.

В ENDF/B-VII приводятся параметры только 38 резонансов, максимальная резонансная энергия – 2621 эВ. Область разрешенных резонансов простирается до 2650 эВ, после чего следует область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 приводятся параметры 126 резонансов, максимальная энергия – 16450 эВ (как и в ФОНДе, где, однако ниже этой энергии описано на 14 резонансов больше).

⁵ Для этой цели по программе NJOY рассчитывался детальный ход сечений в резонансной области и затем с помощью программы INTER рассчитывались нужные величины.

Область разрешенных резонансов распространена до 15 кэВ; область неразрешенных резонансов отсутствует.

На рис. 1. приведена нарастающая сумма числа s-резонансов.

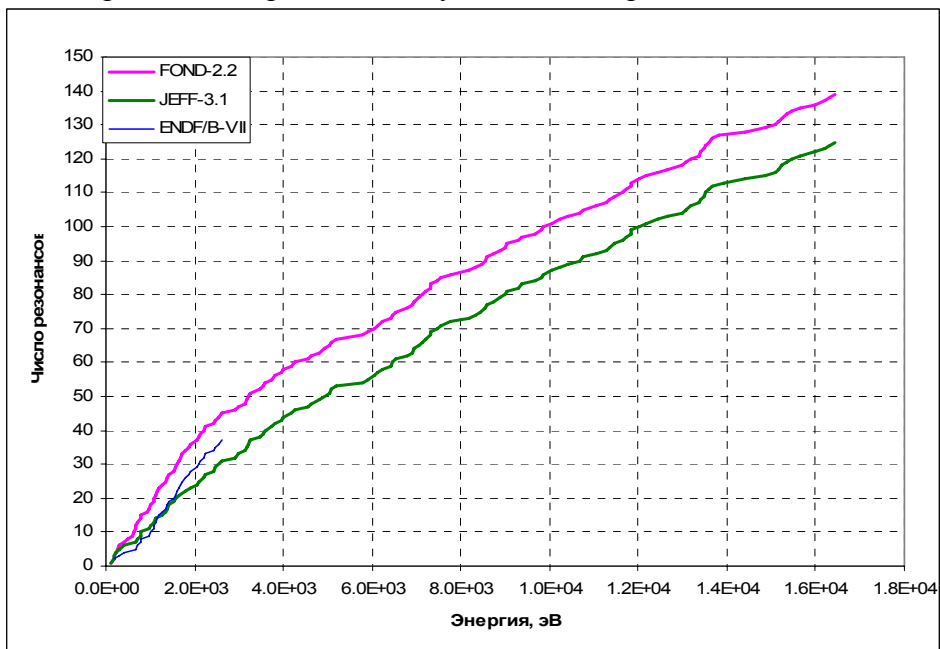


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

Наличие пропуска резонансов прослеживается во всех оценках; в ФОНД-2.2 этот пропуск минимален. Поэтому далее только эту оценку резонансных параметров и будем рассматривать. На рис. 2 показана зависимость среднего числа резонансов, приходящихся на 1 кэВ, в зависимости от границы рассматриваемой области.

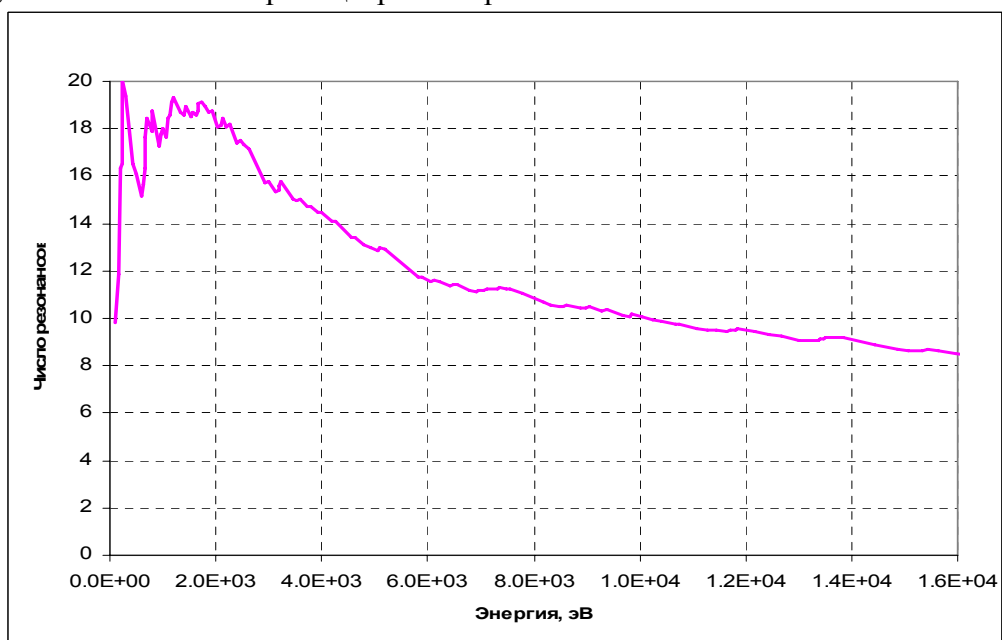


Рис.2. Среднее число резонансов на 1 кэВ.

Видно, что выше 2 кэВ это число начинает монотонно снижаться, что и свидетельствует о пропуске части резонансов. Однако в пределах области разрешенных резонансов, принятой в ФОНД-2.2 (2.6 кэВ) пропуск несущественен.

На рис. 3. приведена нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин. Эта сумма нарастает практически линейно до 4 кэВ, т.е. резонансы, пропущенные в интервале

2 – 4 кэВ, имели малые ширины, что позволяет, видимо, распространить область разрешенных резонансов до 4 кэВ. В то же время, что пропуск резонансов до 15 кэВ, видимо, существенен и обоснованность распространения области разрешенных резонансов до 15 кэВ, как это сделано в JENDL-3.3 (и JEFF-3.1), представляется сомнительной.

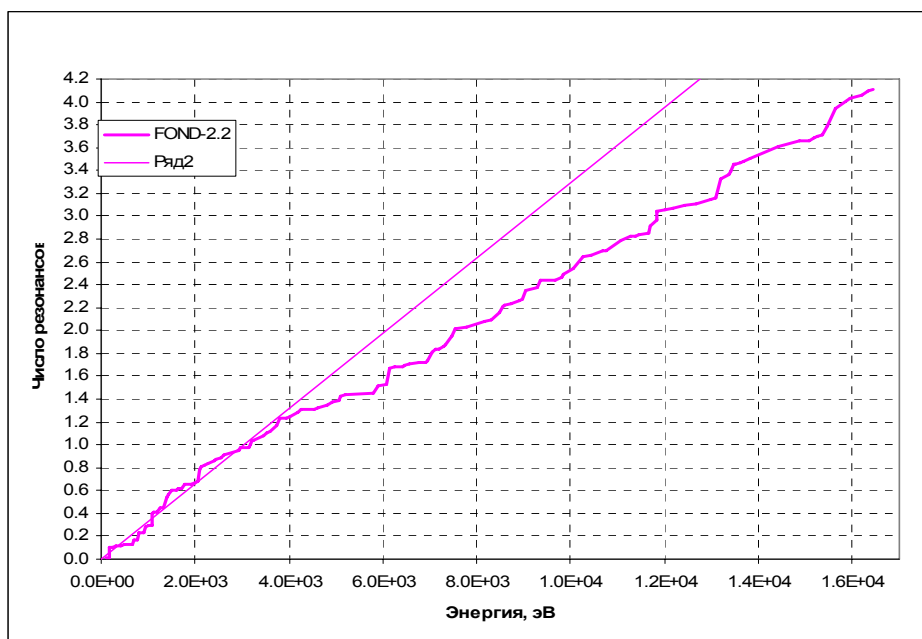


Рис. 3. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин.

Наличие пропуска резонансов с малыми ширинами ведет к возрастанию средней приведенной нейтронной ширины в зависимости от интервала усреднения (см. рис.4).

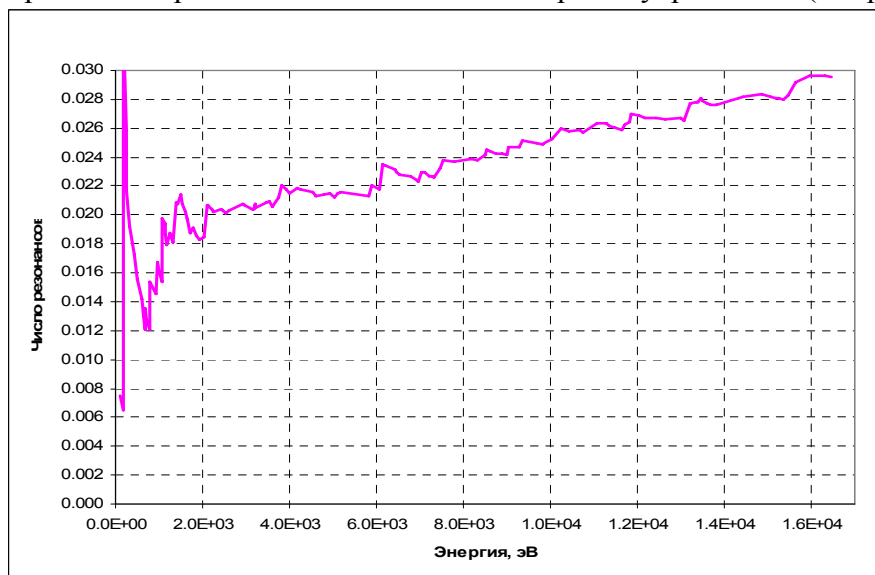


Рис. 4. Зависимость оценки средней приведенной нейтронной ширины от интервала усреднения.

Исходя из этого графика также можно заключить, что до 4 кэВ пропущены только слабые резонансы, а при более высоких энергиях пропускаются и сравнительно широкие. Этот вывод, однако, не подтверждается при сравнении распределения приведенных нейтронных ширин с теоретически ожидаемым распределением Портера –Томаса. Сравнение удобно проводить сравнивая число резонансов, попавших в 10-процентные квантили. Такое сравнение проводится на рис. 5 для различных рассматриваемых энергетических областей.

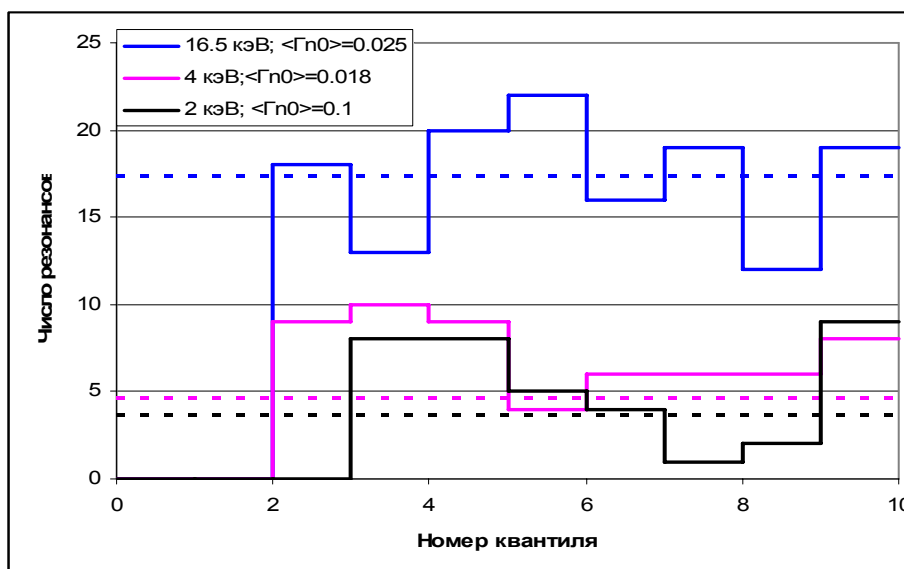


Рис.5. Распределение приведенных нейтронных ширин s-резонансов по квантилям распределения Портера-Томаса.

В каждом из интервалов средняя приведенная ширина выбиралась такой, чтобы в верхних квантилях, где пропуск маловероятен, отклонения наблюдаемых чисел резонансов от статистически ожидаемых имели бы разные знаки и не превосходили бы существенно статистически ожидаемые.

Видно, что характер расхождений оказывается одним и тем же и в области до 2 кэВ, и в области до 4 кэВ, и в области до 16.5 кэВ, хотя в последнем случае приходится принимать большее значение средней приведенной нейтронной ширины. Ни в каком энергетическом интервале не удастся непротиворечиво описать наблюдаемые нейтронные ширины распределением Портера-Томаса: в нижних квантилях во всех случаях наблюдается нехватка резонансов несмотря на снижение средней нейтронной ширины, принимаемой для более узких интервалов. Видимо, именно это обстоятельство побудило распространить область разрешенных резонансов до 15 кэВ (предполагая, что пропущенные резонансы не дают существенного вклада в средние нейтронные сечения).

Исходя из изложенного представляется целесообразным **включить в РОСФОНД резонансные параметры из оценки Л.П.Абагян, как наиболее полной, но расширить область разрешенных резонансов до 4 кэВ** (паллиативное решение).

2. Область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 (=JENDL-3.3) область неразрешенных резонансов, как говорилось выше, не описывается; в ENDF/B-VII и в FOND-2.2 она простирается до 100 кэВ (т.е. почти до порога неупругого рассеяния, 111,8 кэВ), причем приводимые параметры рекомендуются не только для расчета резонансной самоэкранировки, но и самих сечений. В обеих оценках сечения описываются с учетом вкладов s-, p- и d –волн. Никаких плавных подложек к сечениям нет.

Сравнение средних параметров, подобранных для описания измеренных сечений, для выбора оценки смысла, видимо, нет. Сравним результаты расчетов, выполненных на основе этих параметров, с помощью программы NJOY, с экспериментальными данными в интересующей нас области энергий.

На рис. 6. оцененные данные по сечению захвата сравниваются с экспериментальными. Пунктиром проведены результаты расчетов по средним резонансным параметрам. В свете всей совокупности экспериментальных данных оценка, принятая в ENDF/B-VII, представляется заниженной. В ФОНД-2.2 включена оценка,

выполненная с учетом всего набора имеющихся экспериментов, с точки зрения качества описания сечения захвата, очевидно, предпочтительнее.

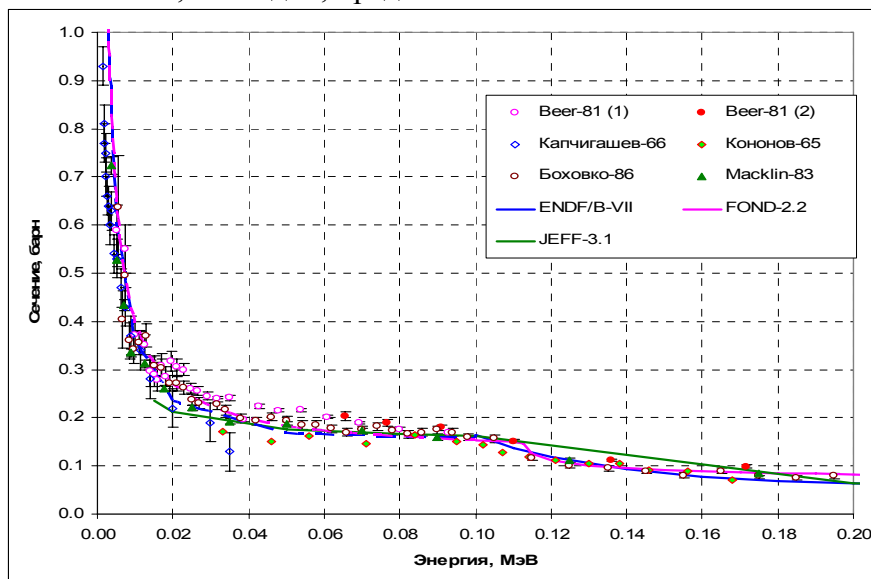


Рис.6. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов.

На рис. 7 проводится сравнение оцененных и измеренных данных по полному сечению. Экспериментальная информация весьма скудна. Данные Кононова в EXFORе приводятся в виде пропусканий T через образец толщиной $n=0.0431$ ядер/барн и приведенные здесь сечения получены как $-\ln(T)/n$, т.е. при низких энергиях данные занижены за счет самоэкранировки. При энергиях выше 60 кэВ эти искажения становятся несущественными и при 142 кэВ результаты этой работы идеально согласуются с гораздо более поздним измерением Кнопфа.

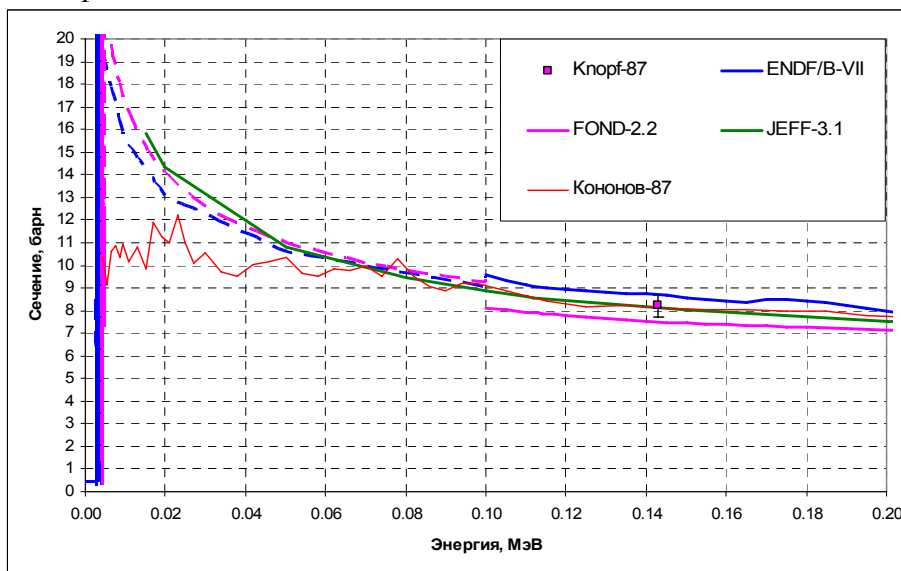


Рис. 7. Полное сечение в области неразрешенных резонансов

Расчеты по средним резонансным параметрам изображены пунктирными кривыми. Они близки друг к другу и согласуются с оценкой, принятой в JENDL-3.3 (=JEFF-3.1). Представляется целесообразным принять в РОСФОНД оценку из ФОНД-2.2, распространив область неразрешенных резонансов до 111.8 кэВ, т.е. до порога неупругого рассеяния.

3. Сечения вне резонансной области

3.1. Полное сечение

На рис. 8 различные оценки полного сечения сравниваются с экспериментальными данными. На рис. 8б в более крупном масштабе изображены данные вблизи нижней границы рассматриваемой области. Прежде всего видно, что оценка, принятая в JENDL-3.3 и в JEFF-3.1, наименее удачна во всех частях области. Данные Дитриха 2003 г., естественно, ни в одной оценке не учитывались. Приписываемая этим данным погрешность не превышает размера точек, изображенных на рис. 8а. Оценки ФОНД-2.2 и ENDF/B-VII достаточно близки и к новым данным Гюнтера и, естественно, к данным более ранних работ.

В низкоэнергетической части рассматриваемой области обе названные оценки плохо стыкуются с результатами расчета по средним резонансным параметрам. Представляется целесообразным в интервале от порога неупругого рассеяния до 0.7 МэВ принять кривую, изображенную на рис. 8 красной линией. Выше этой энергии решено принять оценку ENDF/B-VII, лучше согласующуюся с данными Гюнтера.

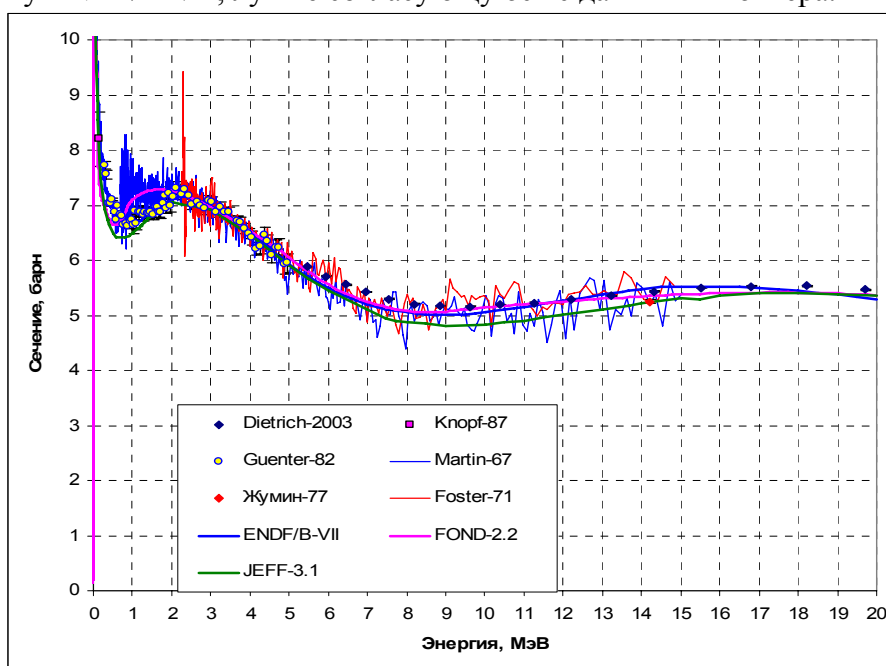


Рис.8а. Полное сечение

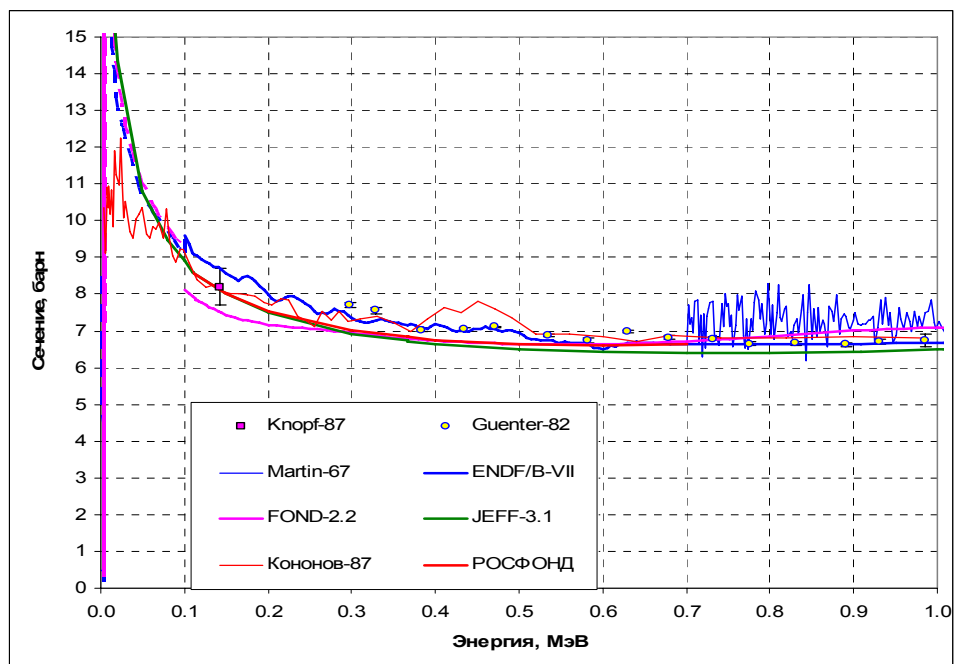


Рис.8б. Полное сечение

3.2. Сечение упругого рассеяния.

На рис. 9 сравниваются оцененные и измеренные сечения упругого рассеяния. Преимущество ENDF/B-VII перед более ранней американской оценкой, принятой в ФОНД-2.2, очевидно.

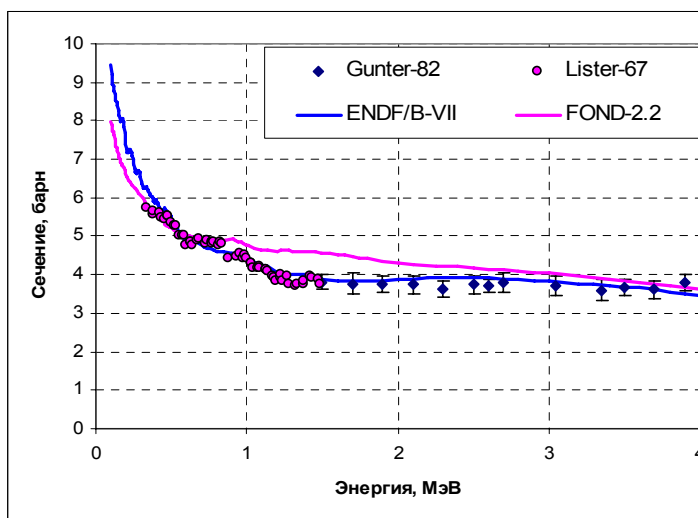


Рис.9. Сечение упругого рассеяния

3.3. Сечение захвата.

На рис.10 и оцененные и измеренные сечения захвата сравниваются друг с другом. В этом случае очевидно преимущество оценки из ФОНД-2.2.

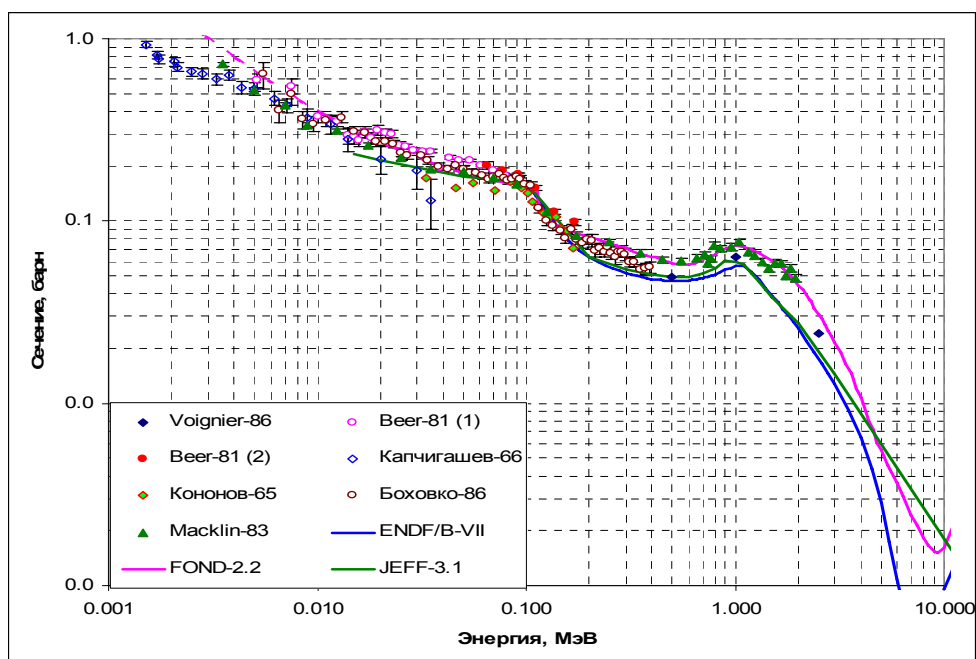


Рис. 10. Сечение радиационного захвата

3.4. Сечение неупругого рассеяния

Экспериментальных данных по сечению неупругого рассеяния на вольфраме-186 не имеется. Все оценки близки друг к другу и нет оснований не принять в РОСФОНД самую последнюю из них – оценку из ENDF/B-VII.

3.5. Сечение реакции (n,2n), (n,3n), (n, α) и другие.

Экспериментальные данные о сечениях этих реакций сравниваются с оцененными на рис.12. и 13. Как видно, есть все основания принять в РОСФОНД сечения этих реакций из ENDF/B-VII. В ENDF/B-VII приводится также сечение реакций (n,p) и (n,n'p), для которых экспериментальные данные отсутствуют. Вообще говоря, в рассматриваемой области энергий возможны также реакции (n,d), (n,t), (n,n' α), (n, ^3He), (n,n'd), (n,n't), и (n,2p); оценки сечений этих реакций содержатся в EAF-2003. Сечения всех этих реакций, кроме реакций (n,n' α) и (n, ^3He), при 20 МэВ не превышают микробарна. Учет их в библиотеке РОСФОНД едва ли целесообразен. Сечение экзотермической реакции (n,n' α) при 20 МэВ составляет по данным EAF-2003 1 миллибарн и лишь чуть ниже по оценке JENDL-3.3. Эту реакцию целесообразно включить в РОСФОНД (скомпенсировав это уменьшением сечения упругого рассеяния), приняв сечение и энерго-угловые распределения вторичных нейтронов из JENDL-3.3.

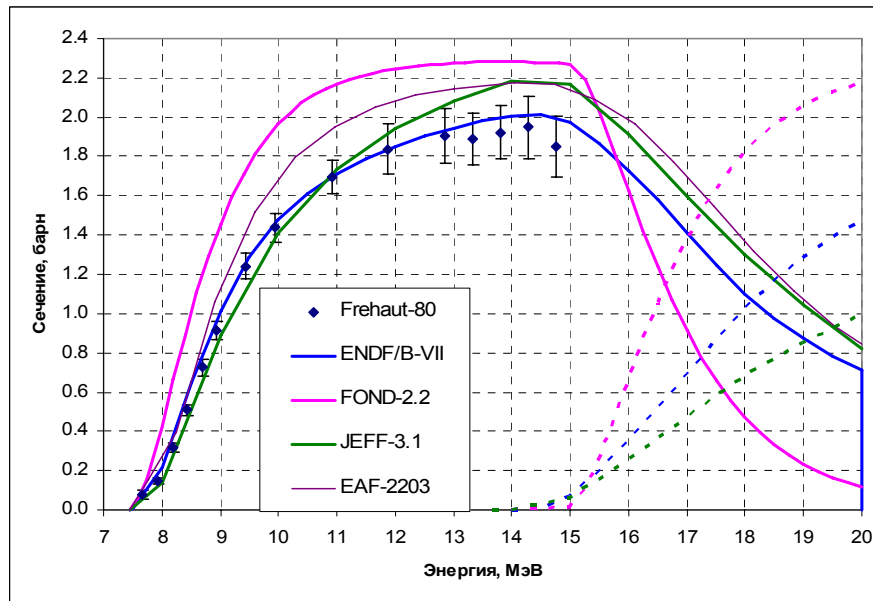


Рис.12. Сечения реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$

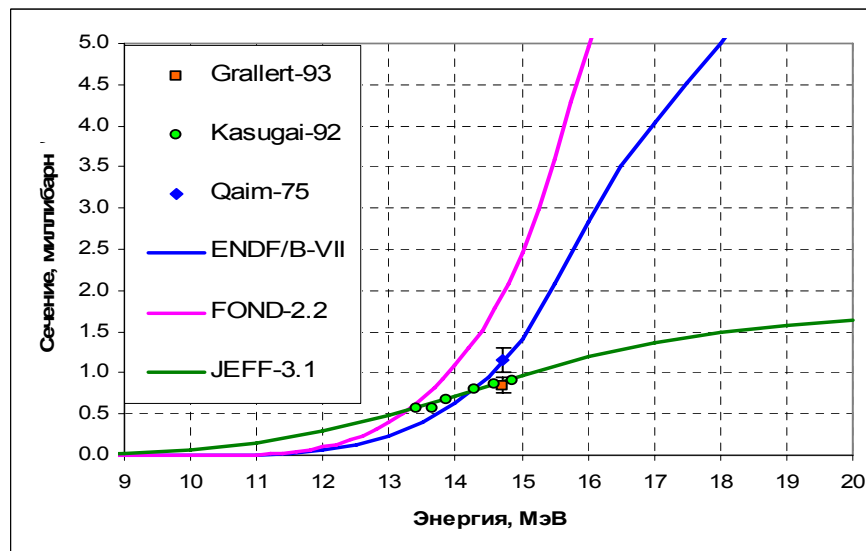


Рис. 13. Сечение реакции (n,α)

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов и образование гамма-квантов

Приняв в РОСФОНД оценки сечений основных реакций вне резонансной области из ENDF/B-VII, естественно стремление принять из этой библиотеки и данные об энерго-угловых распределениях и об образовании фотонов в нейтронных реакциях, если что-либо не препятствует этому. Таких препятствий не просматривается. В ENDF/B-VII учитывается возбуждение 18 уровней ядра-мишени с энергиями до 1.43 МэВ. Возбуждение не учтенных явно уровней приближенно учитывается через возбуждение континуума уровней (которое в этой оценке имеет порог -0.5 МэВ). При 1.6 МэВ вклад возбуждения континуума в сечении неупругого рассеяния составляет 5%.

В двух других рассматривавшихся нами оценках учтено возбуждение меньшего числа уровней ядра-мишени, т.е. на долю статистически описываемых процессов приходится больше.

Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов и нейтронов неупруго рассеянных с возбуждением дискретных уровней, рассчитанные по теоретическим моделям, представлены в форме коэффициентов разложения по полиномам Лежандра.

Энергетические и угловые распределения реакций с непрерывным спектром нейтронов в ENDF/B-VII рассматриваются как независимые и описываются файлами MF=4 и MF=5. В оценке принятой в JEFF-3.1, корреляции этих распределений учтены – они описываются секциями файла MF=6. Целесообразно в РОСФОНД включить энерго-угловые распределения нейтронов из JEFF-3.1 для всех реакций, кроме неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней, поскольку для этой реакции в JEFF-3.1 и в ENDF/B-VII пороги кардинально различаются и потому в РОСФОНДе придется сохранить то же описание, что и в ENDF/B-VII – с помощью файлов MF=4 и MF=5.

Что касается образования фотонов, то оно учтено в ENDF/B-VII для реакций радиационного захвата, неупругого рассеяния, (n,2n) и (n,3n). Эти данные и принимаются в РОСФОНД.

5. Заключение

Для РОСФОНДа следует скомпилировать новый файл данных, основываясь в резонансной области на оценке из ФОНД-2.2, вне резонансной области – на оценке из ENDF/B-VII. Угловые распределения рассеянных нейтронов взять из ENDF/B-VII, а энерго-угловые распределения нейтронов континуальных реакций (кроме MT=91) – из JEFF=3.1. Данные об образовании гамма-квантов принимаются такими, как в ENDF/B-VII.

6. Автор рекомендации –

М.Н.Николаев.

74.7. Вольфрам-185⁶

Радиоактивен. Спин и четность 3/2-. В результате бета-распада ($T_{1/2} = 75.1$ дн.) превращается в стабильный ^{185}Re . В реакторе этот изотоп образуется, главным образом, в реакции $^{184}\text{W}(n,g)$. Полных оценок нейтронных данных для ^{185}W неизвестно. Оценка сечений нейтронных реакций, основанная на теоретических расчетах и полуэмпирических систематиках, содержится в библиотеке EAF.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из последней версии библиотеки EAF – EAF-2003. Долгоживущих изомеров в реакциях на ^{185}W не образуется, поэтому все данные о сечениях образования конечных ядер в основном и изомерном состоянии в нейтронных реакциях, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

⁶ После завершения работы над изотопами вольфрама стала известна рекомендация Мухабхаба по выбору резонансных параметров для ^{185}W : 7 резонансов от 10.15 до 6609 эВ. Приводятся тепловое сечение 2.1 ± 0.3 б и резонансный интеграл 116б. Из принятого файла эти величины получаются большими: 3.3 б и 170 б соответственно. На чем основана рекомендация Мухабхаба неизвестно: в списке источников указание на какие-либо измерения сечений этого изотопа в резонансной области нет.

74.8. Вольфрам-186

Содержание в естественной смеси 28.43%. Спин и четность – 0^+ . Достаточно полные наборы независимо оцененных данных содержатся:

в ФОНД-2.2 и БРОНД-2 – оценка Ottewite, Rose and Young из ENDF/B-IV, с пересмотренной в 1983 г. резонансной областью – разрешенные резонансы оценены Л.П.Абагян, средние резонансные параметры подобраны Г.Н.Мантуровым для описания данных по сечению захвата и полному сечению;

в ENDF/B-VIIb2 – оценка Chadwick, Young and Arthur 1996 г.;

в JENDL-3.3 и JEFF-3.1 – оценка Watanabe and Asami 1983 г.

1. Тепловая область и область разрешенных резонансов.

В таблице 1 сравниваются тепловые сечения и резонансные интегралы, рассчитанные на основе перечисленных выше оценок⁷. Там же приведены данные, рекомендованные Мухабхабом.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл.

| | $\sigma_{\text{tot}}(0.0253 \text{ eV})$ | $\sigma_{\text{el}}(0.0253 \text{ eV})$ | $\sigma_c(0.0253 \text{ eV})$ | RI_c |
|------------|--|---|-------------------------------|--------------|
| ENDF/B-VII | 37.994 | 0.239 | 37.455 | 518.712 |
| FOND-2.2 | 38.345 | 0.089 | 38.257 | 528.599 |
| JEFF-3.1 | 40.384 | 0.934 | 39.450 | 528.402 |
| Мухабхаб | | 0.147 | 38.500 | 485.000 |
| | | ± 0.012 | ± 0.500 | ± 15.000 |

Как видно, все оценки несколько завышают резонансный интеграл по сравнению с рекомендацией Мухабхаба, который, помимо результатов измерений сечений захвата в резонансной области принимал во внимание и результаты непосредственных измерений резонансного интеграла, что могло явиться причиной занижения оценки из-за недоучета эффекта резонансной самоэкранировки.

Область разрешенных резонансов в рассматриваемых оценках описывается по-разному. В FOND-2.2 даны параметры 121 s-резонанса и 2 p-резонансов; максимальная резонансная энергия – 17340 эВ, однако область разрешенных резонансов распространена только до 4650 эВ (за ней начинается область неразрешенных резонансов). Ниже энергии 1-го резонанса сечения в этой оценке заданы поточечно.

В ENDF/B-VII приводятся параметры только 40 резонансов, максимальная резонансная энергия – 3158 эВ. В тепловой области введена ничтожно малая плавная подложка в сечение захвата. Область разрешенных резонансов простирается до 3200 эВ, после чего следует область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 приводятся параметры 102 резонансов, максимальная энергия – 17340 эВ (как и в ФОНДе, где, однако ниже этой энергии описано на 21 резонанс больше). Область разрешенных резонансов распространена до 15 кэВ; область неразрешенных резонансов отсутствует.

На рис. 1. приведена нарастающая сумма числа s-резонансов.

⁷ Для этой цели по программе NJOY рассчитывался детальный ход сечений в резонансной области и затем с помощью программы INTER рассчитывались нужные величины.

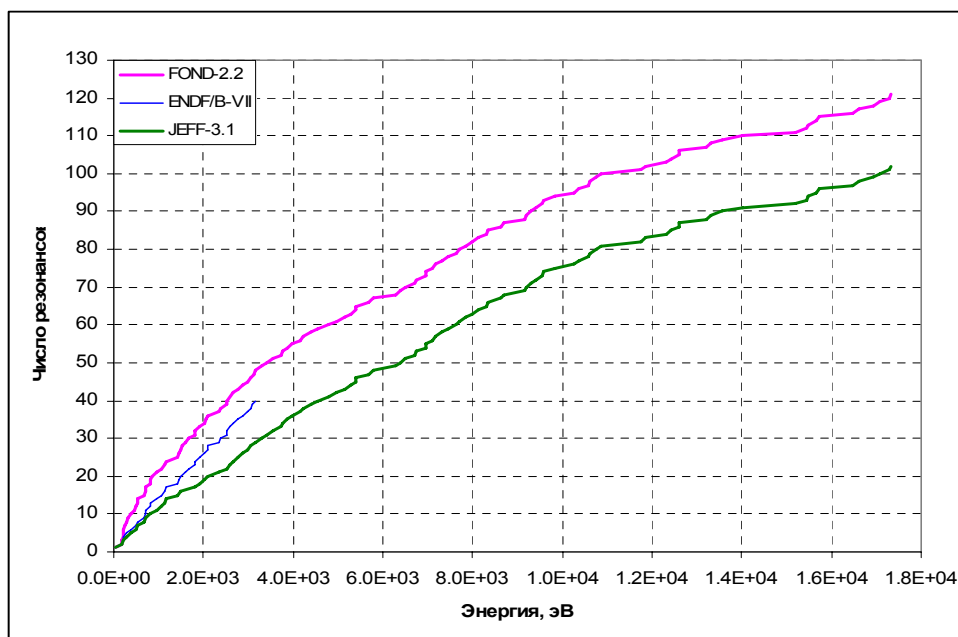


Рис.1. Нарастающие суммы числа резонансов

Наличие пропуска резонансов прослеживается во всех оценках; в ФОНД-2.2 этот пропуск минимален. Поэтому далее только эту оценку резонансных параметров и будем рассматривать. На рис. 2 показана зависимость среднего числа резонансов, приходящихся на 1 кэВ, в зависимости от границы рассматриваемой области.

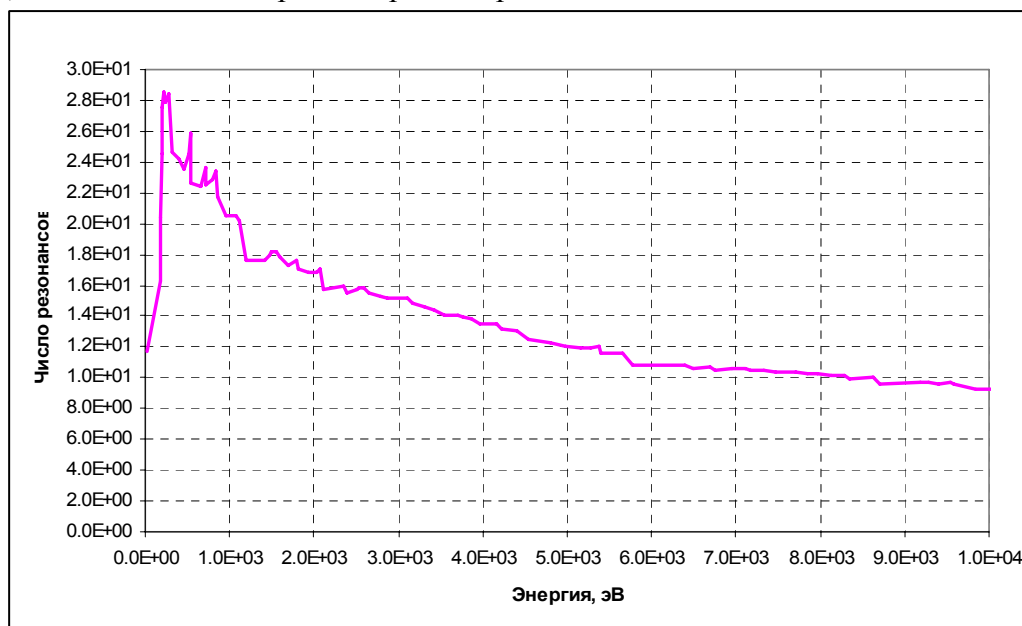


Рис.2. Среднее число резонансов на 1 кэВ.

Видно, что выше 0.5 кэВ это число начинает монотонно снижаться, что и свидетельствует о пропуске части резонансов. К границе области разрешенных резонансов, принятой в ФОНД-2.2 (4.65 кэВ) оказываются пропущенным примерно половина резонансов.

На рис. 3. приведена нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин. Судя по тому, что эта сумма нарастает практически линейно, пропущенные резонансы имели малые ширины. Несомненно, именно это обстоятельство и побудило распространить в JENDL-3.3 (и JEFF-3.1) область неразрешенных резонансов до 15 кэВ.

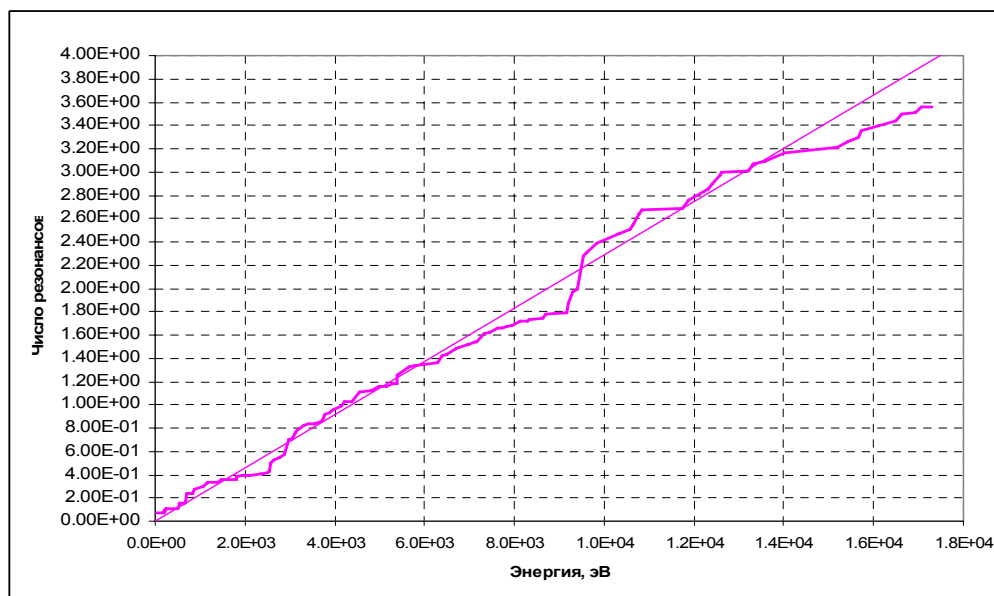


Рис. 3. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин.

Этот рост, однако, опережает рост числа резонансов, что приводит к возрастанию средней приведенной нейтронной ширины в зависимости от интервала усреднения (см. рис.4)

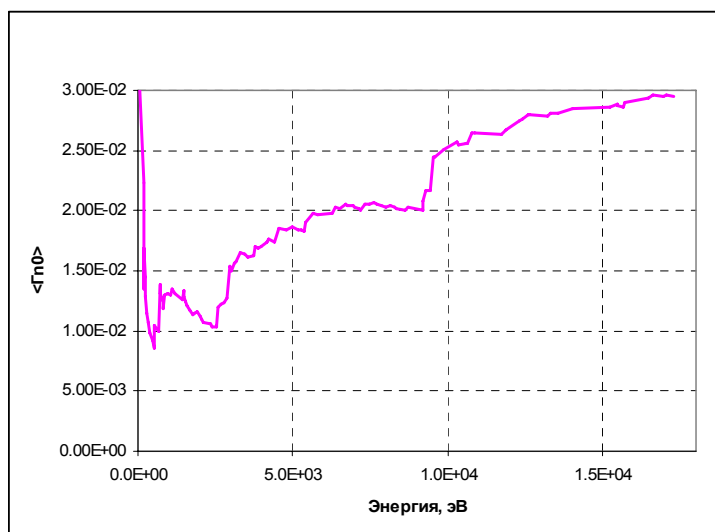


Рис. 4. Зависимость оценки средней приведенной нейтронной ширины от интервала усреднения.

Для того, чтобы уяснить, что за резонансы пропущены, целесообразно сравнить распределение наблюдаемых ширин с распределением Портера-Томаса. Сравнение удобно проводить сравнивая число резонансов, попавших в 10-процентные квантили. Такое сравнение проводится на рис. 5 для различных рассматриваемых энергетических областей. Для каждой из них подбиралось такая оценка средней приведенной нейтронной ширины, чтобы отклонения числа резонансов в 5 верхних квантилях (где пропуск резонансов маловероятен) от среднего значения знакопеременны и статистически оправданы (т.е. если ожидаемое число резонансов в квантиле равно n , то наблюдаемое не должно отличаться от него много более, чем на \sqrt{n}). Линии, соответствующие числам n , приведены на рис. 5 пунктиром. Если эти числа умножить на 10, получим ожидаемое число резонансов в рассматриваемом интервале. Если рассматриваемая область ограничена 4.65 кэВ (как в ФОНД-2.2), то ожидаемое число резонансов оказывается равным 56, тогда как реально в этом интервале наблюдается 59 резонансов. Распределение

достаточно близко к Портер-Томасовскому (не считая избытка узких резонансов, к которому еще вернемся ниже). Если рассматриваемую область распространить до 14 кэВ (почти как в JEFF-3.1), то для согласования с распределением Портера-Томаса хотя бы в верхних квантилях, необходимо принять более высокую оценку средней приведенной ширины. При этом в нижних квантилях (не считая первого), проявляется заметный дефицит резонансов. То, что наблюдаемое распределение лишь случайно отклоняется от теоретического, довольно маловероятно (в 2-х случаях из 10 расхождения достигают двух стандартных отклонений). Пропуск резонансов проявляется в том, что по оценке из рассматриваемого распределения их число должно быть равно 124, тогда как число наблюдаемых резонансов -110.

Если рассматривать область энергий до 9 кэВ, согласие с распределением Портера-Томаса улучшается; ожидаемый из этого рассмотрения пропуск составляет 5 резонансов из 89.

Смущающим обстоятельством является избыток резонансов, лежащих в первом квантиле, ширины которых менее 1.6% от средней ширины. Все эти резонансы (их 14) лежат ниже 2 кэВ. К ним можно добавить еще 2 узких резонанса, которые в данной оценке считаются р-резонансами. Они тоже лежат ниже 2 кэВ. Создается впечатление, что избыток узких резонансов обусловлен примесью р-резонансов, скрывающим пропуск узких резонансов (и р- и s-) при энергиях выше 2 кэВ.

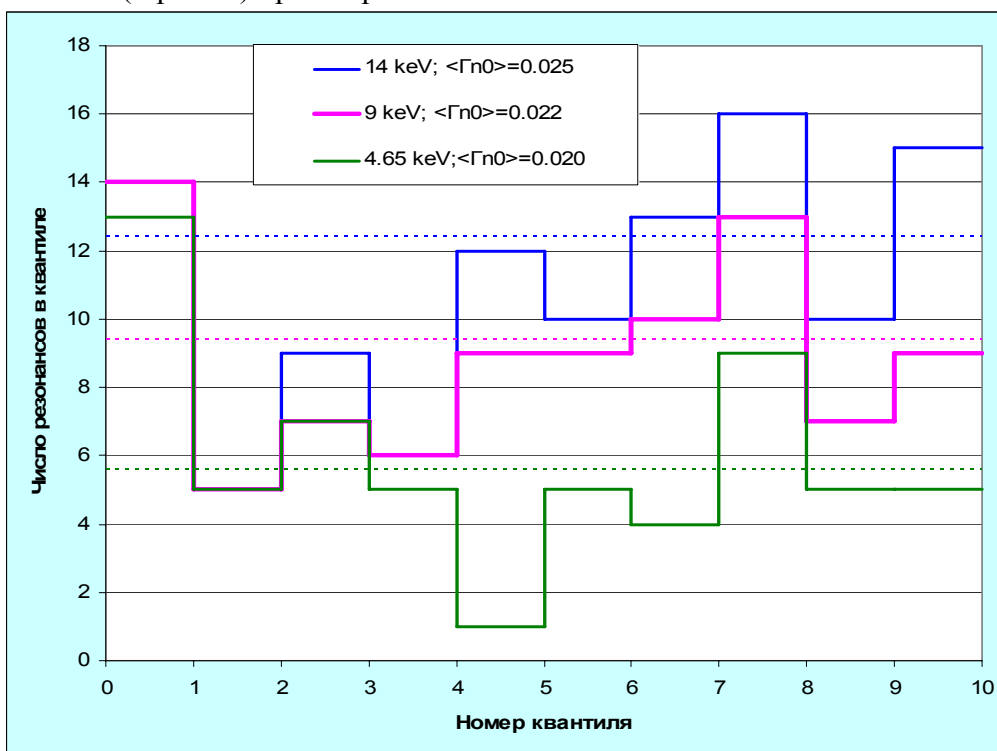


Рис. 5. Сравнение распределения приведенных нейтронных ширин с теоретическим.

Как бы то ни было, проведенное рассмотрение показывает, что расширение области разрешенных резонансов до 14- 15 кэВ, как это сделано в японской оценке, вполне оправдано: нет оснований полагать, что оценка сечений по средним резонансным параметрам позволит повысить точность расчета сечений за счет учета вклада пропущенных слабых резонансов.

Итак, представляется целесообразным **принять в РОСФОНД оценку резонансных параметров Л.П.Абагян, распространив область разрешенных резонансов до 15 кэВ.** Что касается области низких энергий, то поскольку она в этой оценке описывается поточечно, целесообразно, **подкорректировать ход сечения рассеяния, так, чтобы обеспечить согласие с оценкой Мухабхаба (см. рис.6).**

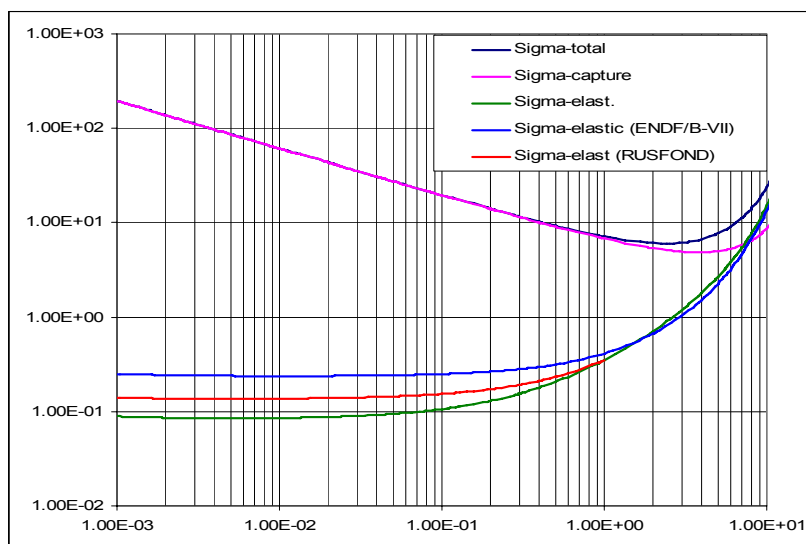


Рис.6. Ход сечений при низких энергиях.

2. Область неразрешенных резонансов.

В JEFF-3.1 (=JENDL-3.3) область неразрешенных резонансов, как говорилось выше, не описывается; в ENDF/B-VII и в FOND-2.2 она простирается до 100 кэВ (т.е. почти до порога неупругого рассеяния, 123 кэВ), причем приводимые параметры рекомендуются не только для расчета резонансной самоэкранировки, но и самих сечений. В обеих оценках сечения описываются с учетом вкладов s-, p- и d –волн.

Сравнение средних параметров, подобранных для описания измеренных сечений, для выбора оценки смысла, видимо, нет. Сравним результаты расчетов, выполненных на основе этих параметров, с помощью программы NJOY, с экспериментальными данными в интересующей нас области энергий.

На рис. 7. оцененные данные по сечению захвата сравниваются с экспериментальными. Пунктиром проведены результаты расчетов по средним резонансным параметрам. Тонким красным пунктиром приведены результаты ранних расчетов по программе EVPAR⁸, учитывавших только данные Боховко, Коновва (1965) и Капчигашева. Кривая показывает, что описание сечений в терминах средних резонансных параметров позволяет правдоподобно описать сечения далеко за границей области неразрешенных резонансов. В свете всей совокупности экспериментальных данных эта оценка, как и оценка, принятая в ENDF/B-VII, представляется заниженной. В ФОНД-2.2 включена оценка, выполненная с использованием той же программы EVPAR с учетом всего набора имеющихся экспериментов, и с точки зрения качества описания сечения захвата она, очевидно, предпочтительнее. Заметим, что несмотря на то, что ниже этой оценки лежит много большее число экспериментальных точек, чем над кривой, число независимо выполненных работ, в которых эти точки получены, с той и с другой стороны, примерно одинаковы. Низкие значения, полученные Боховко, подтверждаются данными Маклина и поддерживают еще более низкие значения, измеренные ранее Коновым. Высокие значения, полученные Стависким, подтверждены результатами Мискела и большинством результатов измерений сечения захвата при 24 кэВ.

⁸ Мантуров Г.Н. и др. ВАНТ. Сер. «Ядерные константы». Вып. 1 (50), с.50. М. ЦНИИатоминформ, 1983.

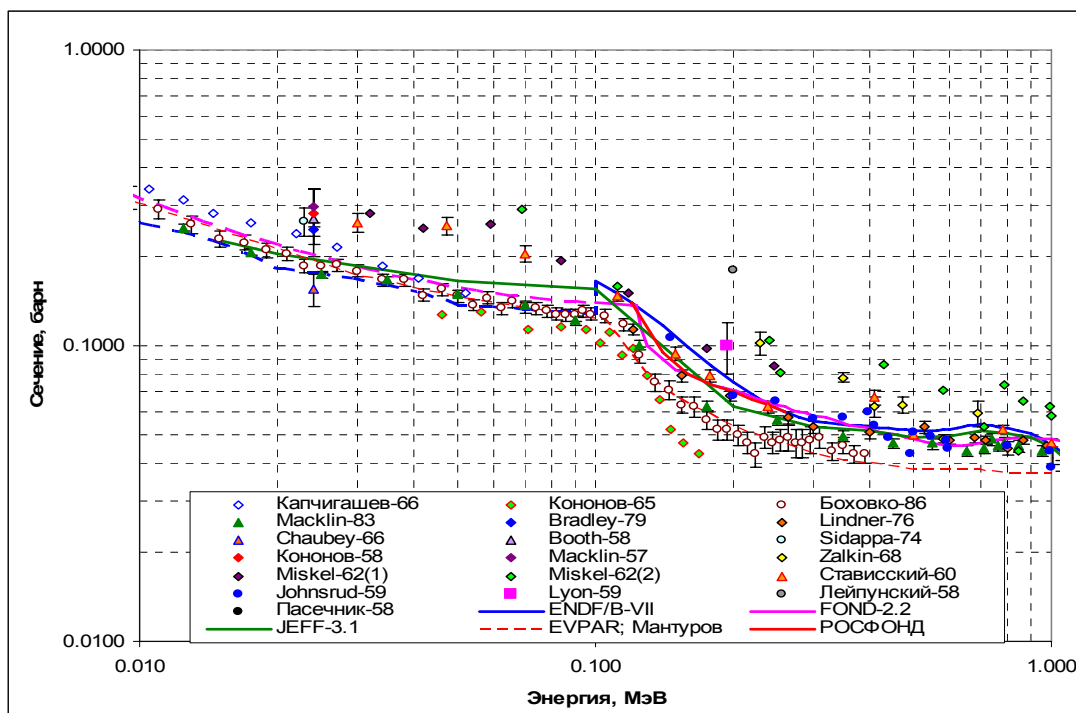


Рис.7. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов и выше.

На рис. 8а проводится сравнение оцененных и измеренных данных по полному сечению. Экспериментальная информация весьма скудна. Данные Бартоломи в EXFORе приводятся в виде пропусканий T через образец толщиной $n=0.0294$ ядер/барн и приведенные здесь сечения получены как $-\ln(T)/n$, т.е. при низких энергиях данные занижены за счет самоэкранировки. При энергиях выше 60 кэВ данные этой работы испытывают необъяснимые флуктуации (шириной в несколько кэВ), то возрастая до 50 барн и более, то проваливаясь до нуля (и ниже: пропускания превышают единицу!) а выше 200 кэВ среднее сечение оказывается равным 16-17 барнам, что противоречит результатам всех остальных измерений (см.также рис.9).

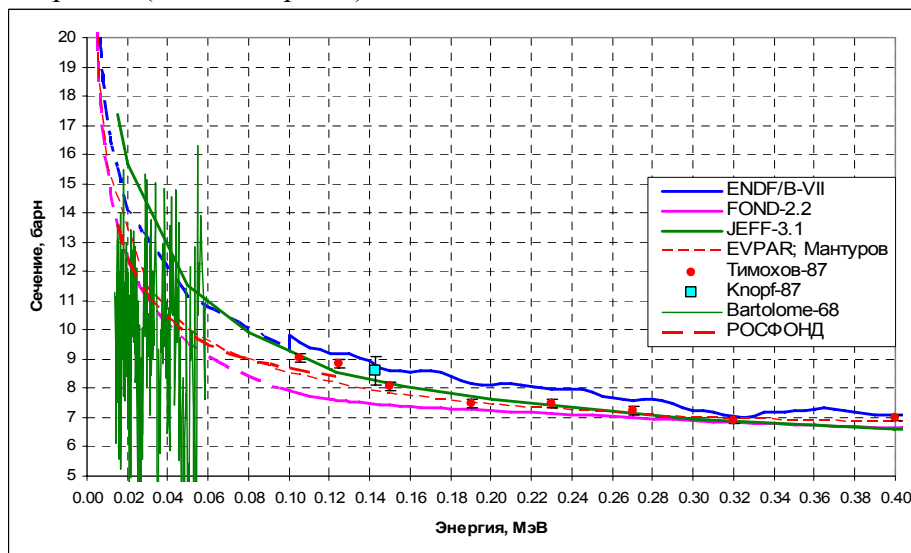


Рис. 8. Полное сечение в области неразрешенных резонансов

Оценка, принятая в ФОНД-2.2, при 10-15 кэВ представляется заниженной, примерно на 1 барн. Проведенное рассмотрение приводит к заключению, что в области неразрешенных резонансов в РОСФОНД целесообразно принять оценку средних резонансных параметров из ФОНД-2.2; границы области неразрешенных резонансов изменить – от 15 кэВ до 123 кэВ (порог неупругого рассеяния), чтобы “стык” сечения захвата на

верхней границе области неразрешенных резонансов с плавным сечением был естественным; в сечение упругого рассеяния **вести плавную подложку, возрастающую от нуля на нижней границе области до 1.0 барна на верхней ее границе.** Соответствующая кривая полного сечения изображена на рис. 8 толстой прерывистой линией.

3. Сечения вне резонансной области

3.1. Полное сечение

На рис. 8а различные оценки полного сечения сравниваются с экспериментальными данными. На рис. 8б в более крупном масштабе изображены данные вблизи нижней границы рассматриваемой области. Прежде всего видно, что оценка, принятая в JENDL-3.3 и в JEFF-3.1, наименее удачна во всех частях области. Данные Дитриха 2003 г., естественно, ни в одной оценке не учитывались. Приписываемая этим данным погрешность не превышает размера точек, изображенных на рис. 8а. При энергиях выше 5 МэВ ближе всего этим данным соответствует оценка, принятая в ФОНД-2.2. Однако при более низких энергиях эта оценка явно завышает полное сечение, поскольку во время ее проведения данные Гюнтера еще не были доступны. Представляется целесообразным при энергиях выше 4.5 МэВ внести в оценку ENDF/B-VII коррективу, обеспечивающую согласие с данными Дитриха, и после этого принять эти данные в РОСФОНД (красная кривая на рис. 8а). В интервале от 0.9 МэВ до 4.5 МэВ оценка полного сечения, принятая в ENDF/B-VII удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными и может быть принята в РОСФОНД. Заметим, что имеющиеся в этой области данные по сечению упругого рассеяния также удовлетворительно описываются оценкой ENDF/B-VII (см. ниже).

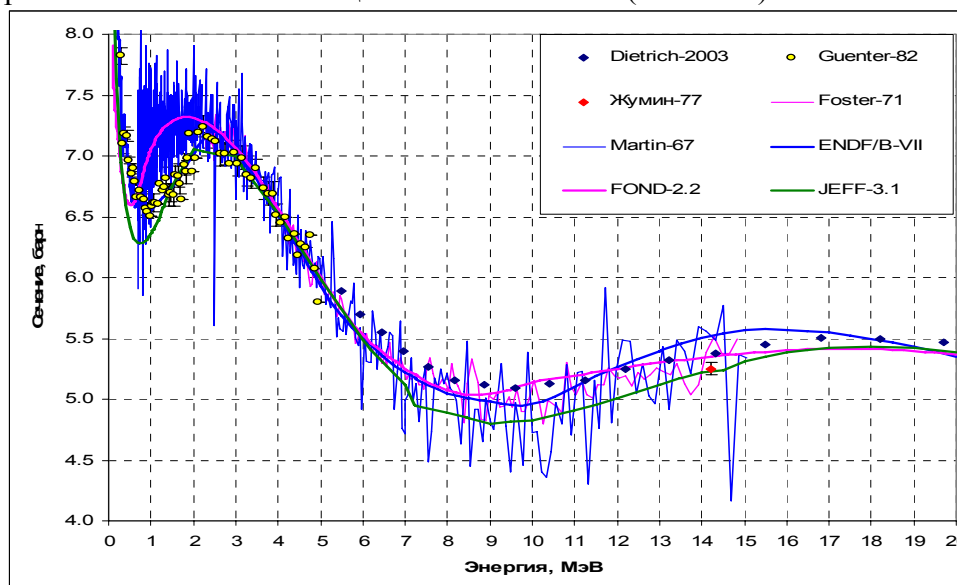


Рис.8а. Полное сечение

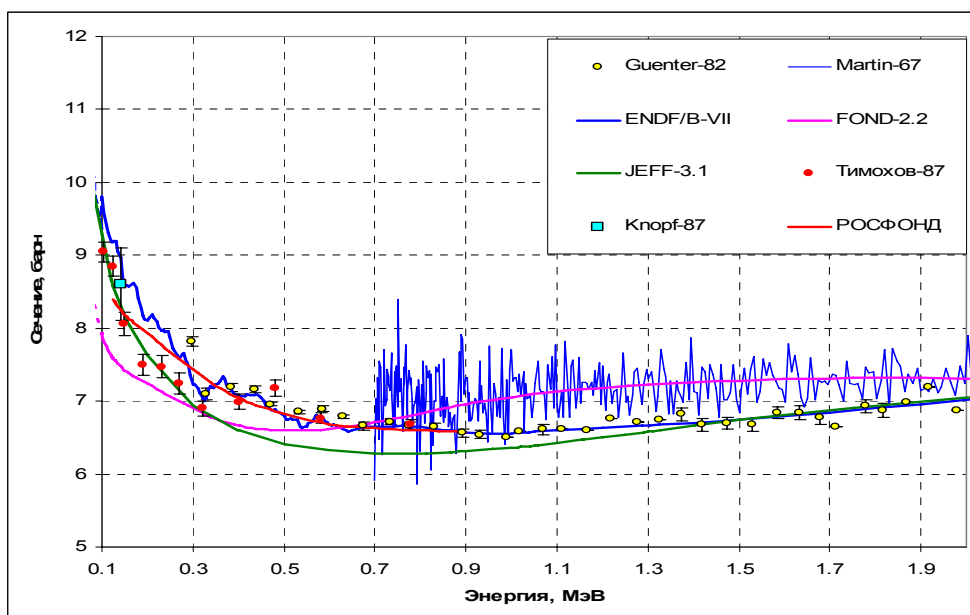


Рис.86. Полное сечение

Ниже 900 кэВ в оценку из ENDF/B-VII требуется внести коррективу для плавного состыкования с результатами расчетов по средним резонансным параметрам (красная кривая на рис.86). Структура, проявляющаяся в принятом в ENDF/B-VII полном сечении известными нам экспериментальными данными не оправдывается. Практической роли эта структура не играет и ее учет (даже если для того и существуют неизвестные нам экспериментальные основания) представляется излишним.

3.2. Сечение упругого рассеяния.

На рис. 9 сравниваются оцененные и измеренные сечения упругого рассеяния. Кривая, соответствующая сечению упругого рассеяния из РОСФОНДа есть разность между полным сечением, обсужденным выше, и сечениями захвата и неупругого рассеяния, которые будут рассмотрены ниже.

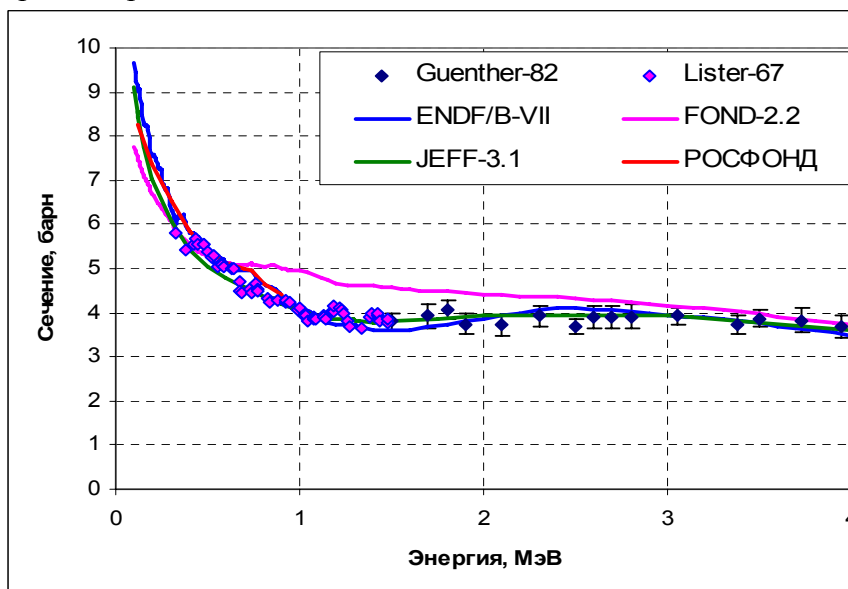


Рис.9. Сечение упругого рассеяния

3.3. Сечение захвата.

На рис.10 и оцененные и измеренные сечения захвата выше 1 МэВ сравниваются друг с другом. При этих энергиях целесообразность выбора оценки ENDF/B-VII очевидна. При энергиях ниже 300 кэВ сравнение оценок и экспериментальных данных показано на рис.7. Очевидно, принимая оценку ENDF/B-VII, целесообразно внести в нее коррективу для состыковки с областью неразрешенных резонансов (см. красную кривую на рис. 10б).

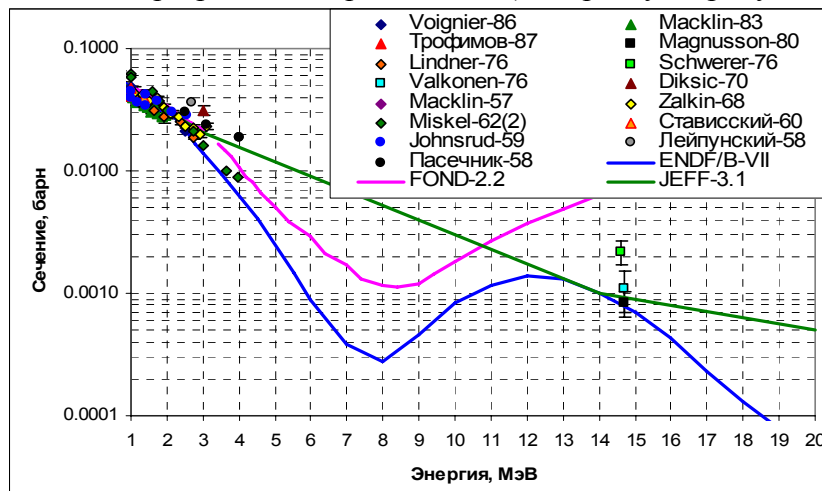


Рис. 10. Сечение радиационного захвата

3.4. Сечение неупругого рассеяния

Экспериментальных данных по сечению неупругого рассеяния на вольфраме-186 не имеется. На рис. 11 проводится сравнение оцененных данных. Все оценки близки друг к другу и нет оснований не принять в РОСФОНД самую последнюю из них – оценку из ENDF/B-VII.

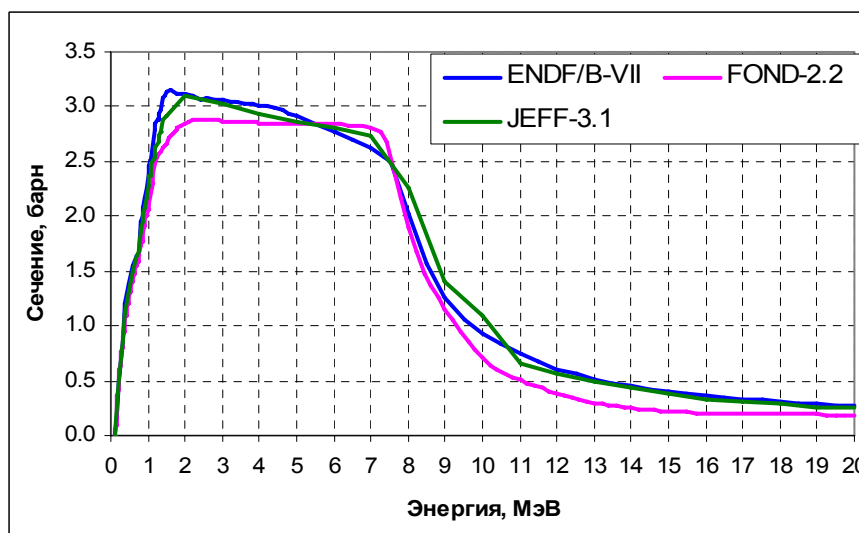


Рис.11. Оцененные сечения неупругого рассеяния.

3.5. Сечение реакции $(n,2n)$, $(n,3n)$, (n,α) и другие.

Экспериментальные данные о сечениях этих реакций сравниваются с оцененными на рис.12. и 13. Как видно, есть все основания принять в РОСФОНД сечения этих реакций из ENDF/B-VII. В ENDF/B-VII приводится также сечение реакций (n,p) и $(n,n'p)$, для которых экспериментальные данные отсутствуют. Вообще говоря, в рассматриваемой области энергий возможны также реакции (n,d) , (n,t) , $(n,n'\alpha)$, $(n,^3\text{He})$, $(n,n'd)$, $(n,n't)$, и $(n,2p)$; оценки сечений этих реакций содержатся в EAF-2003. Сечения первых двух из этих реакций при 20 МэВ составляют 5 - 6 миллибарн, т.е. они сравнимы с сечениями реакций (n,p) и (n,α) . Сечение экзотермической реакции $(n,n'\alpha)$ при 20 МэВ составляет по данным EAF-2003 0.1 миллибарна, а по оценке JENDL-3.3 – в 5 раз больше. Сечения всех этих трех реакций целесообразно включить в РОСФОНД (скомпенсировав это уменьшением сечения упругого рассеяния). Сечения остальных реакций $(n,^3\text{He})$, $(n,n'd)$, $(n,n't)$ и $(n,2p)$ - даже при 20 МэВ не превышают первых микробарн. Учет их в библиотеке РОСФОНД едва ли целесообразен.

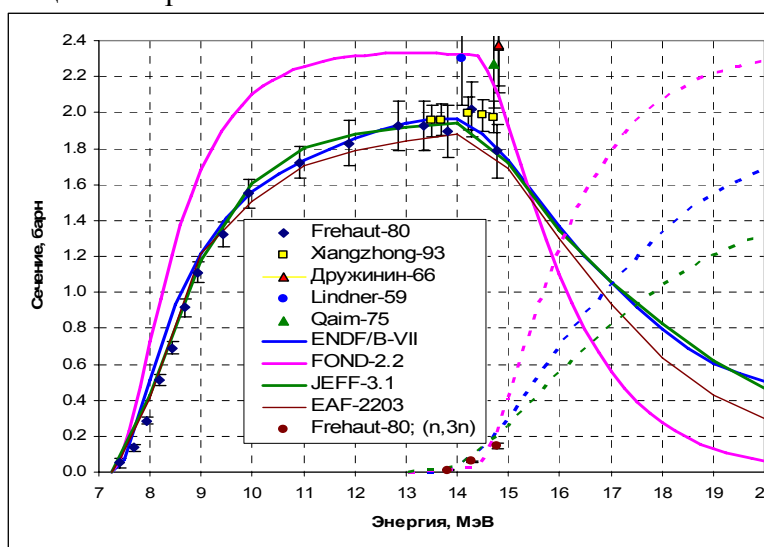


Рис.12. Сечения реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$

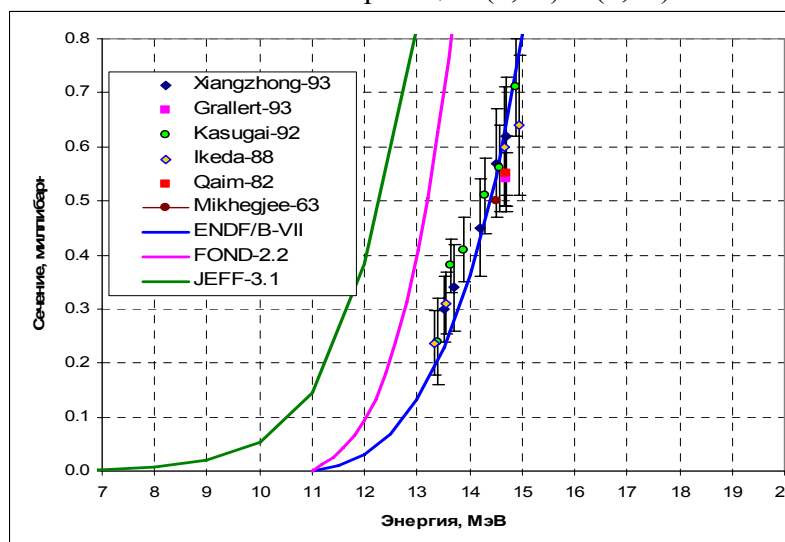


Рис. 13. Сечение реакции (n,α) в области, где имеются экспериментальные данные.

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов и образование гамма-квантов

Приняв в РОСФОНД оценки сечений основных реакций вне резонансной области из ENDF/B-VII, естественно стремление принять из этой библиотеки и данные об энерго-угловых распределениях и об образовании фотонов в нейтронных реакциях, если что-либо не препятствует этому. Таких препятствий не просматривается. В ENDF/B-VII учитывается возбуждение 18 уровней ядра-мишени с энергиями до 1.52 МэВ; первый уровень из числа перечисленных в ENSDF и не учтенный в ENDF/B-VII, лежит при энергии 1.17 МэВ. Все пропущенные уровни имеют высокие спины и их возбуждение нейтронами при энергиях до 1ю5 МэВ маловероятно. Тем не менее оно приближенно учитывается через возбуждение континуума уровней (которое в этой оценке имеет очень низкий порог –0.3 МэВ). При 2 МэВ и ниже вклад возбуждения континуума в сечении неупругого рассеяния составляет менее 0.2%.

В двух других рассматривавшихся нами оценках учтено возбуждение меньшего числа уровней ядра-мишени, т.е. на долю статистически описываемых процессов приходится больше.

Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов и нейтронов неупруго рассеянных с возбуждением дискретных уровней, рассчитанные по теоретическим моделям, представлены в форме коэффициентов разложения по полиномам Лежандра.

Энергетические и угловые распределения реакций с непрерывным спектром нейтронов в ENDF/B-VII рассматриваются как независимые и описываются файлами MF=4 и MF=5. В оценке, принятой в JEFF-3.1, корреляции этих распределений учтены – они описываются секциями файла MF=6. Целесообразно в РОСФОНД включить энерго-угловые распределения нейтронов из JEFF-3.1 для всех реакций, кроме неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней, поскольку для этой реакции в JEFF-3.1 и в ENDF/B-VII пороги кардинально различаются и потому в РОСФОНДе придется сохранить то же описание, что и в ENDF/B-VII – с помощью файлов MF=4 и MF=5.

Что касается образования фотонов, то оно учтено в ENDF/B-VII для реакций радиационного захвата, неупругого рассеяния, (n,2n) и (n,3n). Эти данные и принимаются в РОСФОНД.

5. Заключение

Для РОСФОНДа следует скомпилировать новый файл данных, основываясь в резонансной области на оценке из ФОНД-2.2, вне резонансной области – на оценке из ENDF/B-VII. Угловые распределения рассеянных нейтронов взять из ENDF/B-VII, а энерго-угловые распределения нейтронов континуальных реакций (кроме MT=91) – из JEFF=3.1. Данные об образовании гамма-квантов принимаются такими, как в ENDF/B-VII.

6. Автор рекомендации –

М.Н.Николаев.

74.9. Вольфрам-187

Радиоактивен. Спин и четность 3/2-. В результате бета-распада ($T_{1/2} = 23.72$ ч.) превращается в ^{187}Re , который обладает огромным ($5 \cdot 10^{10}$ лет) периодом полураспада в ^{187}Os . В реакторе этот изотоп может быть образован в реакции $^{186}\text{W}(n,\gamma)$. Полных оценок нейтронных данных для ^{187}W неизвестно. Экспериментальных данных нет. Оценка сечений нейтронных реакций, основанная на теоретических расчетах и полуэмпирических систематиках, содержится в библиотеке EAF.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из последней версии библиотеки EAF – EAF-2003. Сечения образования конечного ядра в основном и изомерном стояниях в реакции $(n,3n)$, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и сумму записать в соответствующую секцию файла MF=3. Файл MF=10 исключить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

74.10. Вольфрам-188

Радиоактивен. Спин и четность 0^+ . В результате бета-распада ($T_{1/2} = 69$ дн.) превращается в ^{188}Re , который с периодом ($T_{1/2} = 16.98$ ч.) распадается в стабильный ^{188}Os . В реакторе этот изотоп может быть образован в ничтожных количествах в результате двух последовательных захватов: $^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}(n,\gamma)^{188}\text{W}$. Полных оценок нейтронных данных для ^{187}W неизвестно. Экспериментальных данных нет. Оценка сечений нейтронных реакций, основанная на теоретических расчетах и полуэмпирических систематиках, содержится в библиотеке EAF.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить данные из последней версии библиотеки EAF – EAF-2003.

Автор заключения

Николаев М.Н.

75. РЕНИЙ

77.0 Общие замечания

В этом разделе описаны изотопы рения: два стабильных и семь радиоактивных изотопа с периодом полураспада более суток.

75.1. Рений-182.

Радиоактивен. Испытывая захват орбитального электрона распадается с периодом $T_{1/2}=64$ ч. в стабильный вольфрам-182. Образование этого нуклида в реакторе весьма маловероятно: единственными реакциями, ведущими к его образованию являются $^{184}\text{Os}(n,t)$ и $^{184}\text{Os}(n,n'd)$. Содержание ^{184}Os в природной смеси всего 0.02%.

Нейтронные сечения для рения-182 оценены исходя из теоретических соображений и содержатся в библиотеке EAF-2003 (оценка 2005 г.).

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из EAF-2003. Данные о сечениях реакций $(n,n'\alpha)$, $(n,n't)$ и $(n,^3\text{He})$, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям с образованием конечных ядер в основных и изомерных состояниях и включить полученные суммы в файл MF=3 сформировав там соответствующие секции.

Включить файл MF=9 с секцией MT=106 с вероятностью образования тантала-180 в основном и долгоживущем изомерном состояниях. Вероятности рассчитать по данным файла MF=10. Файл MF=10 исключить.

Автор рекомендации

Забродская С.В.

75.2. Рений-183.

Радиоактивен. Испытывая захват орбитального электрона распадается с периодом $T_{1/2}=71$ д. в стабильный вольфрам-183. Образование этого нуклида в реакторе весьма маловероятно: единственными реакциями, ведущими к его образованию являются $^{184}\text{Os}(n,d)$, $^{184}\text{Os}(n,n'p)$, $^{185}\text{Re}(n,3n)$ и $^{185}\text{Re}(n,2n)$, $^{184}\text{Re}(n,2n)$.

Нейтронные сечения для рения-183 оценены исходя из теоретических соображений и содержатся в библиотеке EAF-2003 (оценка 2005 г.).

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из EAF-2003. Данные о сечениях реакций $(n,2n)$, (n,p) , (n,α) и $(n,2p)$, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям с образованием конечных ядер в основных и изомерных состояниях и включить полученные суммы в файл MF=3 сформировав там соответствующие секции.

Включить файл MF=9 с секцией MT=102 с вероятностью образования рения-184 в основном и долгоживущем изомерном состояниях и секцией MT=107 с вероятностью образования тантала-180 в основном и долгоживущем изомерном состояниях. Вероятности рассчитать по данным файла MF=10. Файл MF=10 исключить.

Автор рекомендации

Забродская С.В.

75.3. Рений-184g.

Радиоактивен. Испытывая захват орбитального электрона распадается с периодом $T_{1/2}=38$ д. в стабильный вольфрам-184. Образование этого нуклида в реакторе возможно благодаря реакциям $^{185}\text{Re}(n,2n)$, $^{184}\text{Os}(n, p)$, $^{186}\text{Os}(n, t)$ и $^{186}\text{Os}(n, n'd)$.

Нейтронные сечения для рения-184g оценены исходя из теоретических соображений и содержатся в библиотеке EAF-2003 (оценка 2005 г.).

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из EAF-2003. Данные о сечениях реакций $(n,2n)$, (n,p) , (n,α) и $(n,2p)$, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям с образованием конечных ядер в основных и изомерных состояниях и включить полученные суммы в файл MF=3 сформировав там соответствующие секции.

Сформировать секцию 9/22 с вероятностями образования тантала-180 в основном и изомерном состояниях.

В файле MF=10 сохранить лишь секцию MT=4 с сечением образования долгоживущего изомера.

Автор рекомендации

Забродская С.В.

75.4. Рений-184m.

Радиоактивен. Испытывает захват орбитального электрона с распадом в стабильный стабильный вольфрам-184 (24.6%) или изомерный переход в основное состояние. Период полураспада $T_{1/2}=169$ дн. Образование этого изомера в реакторе возможно благодаря реакциям $^{185}\text{Re}(n,2n)$, $^{184}\text{Os}(n, p)$, $^{186}\text{Os}(n, t)$ и $^{186}\text{Os}(n, n'd)$.

Нейтронные сечения для рения-184m оценены исходя из теоретических соображений и содержатся в библиотеке EAF-2003 (оценка 2005 г.).

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из EAF-2003. Данные о сечениях реакций $(n,2n)$, (n,p) , (n,α) и $(n,2p)$, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям с образованием конечных ядер в основных и изомерных состояниях и включить полученные суммы в файл MF=3 сформировав там соответствующие секции.

Сформировать секцию 9/22 с вероятностями образования тантала-180 в основном и изомерном состояниях.

Перенести сечение образования основного состояния из файла MF=3 в файл MF=10.

Автор рекомендации

Забродская С.В.

75.5. Рений-185.

Содержание в естественной смеси 37.4%.

На данный момент в следующих библиотеках существуют оценки нейтронных данных для Re-185:

в **ENDF/B-7** и в **JEFF3.1**) - взята оценка L.W.Weston, P.G.Young, сделанная 1990 году (=ENDF/B-6 rel.4);

в **FOND2.2** – оценка W.B.Herderson, J.W.Zwick 1983 года, (= ENDF/B-5);

в **EAF2003** (JEFF3.0/A) - оценка Forrest, Кореску и др.2003 года ;.

В остальных библиотеках файлов для Re185 нет. Надо отметить, что в основу оценки ENDF/B-6 rel.4 положена версия файла из ENDF/B-5. В анализе оценка ENDF/B-5 она будет представлена, как библиотека FOND2.2. Поскольку оценка JEFF3.1 совпадает с ENDF/B-7, то на рисунках она отсутствует. Оценка EAF2003 является, как будет видно ниже, компиляцией оценок или версий ENDF/B-5 и ENDF/B-7.

На рис. 1 приводится полное сечение в тепловой области до 10 эВ. В EXFOR в этой области есть только один эксперимент В.П.Вертебного(1965). Как видно, в оценке ENDF/B-7 именно эти данные были взяты за основу.

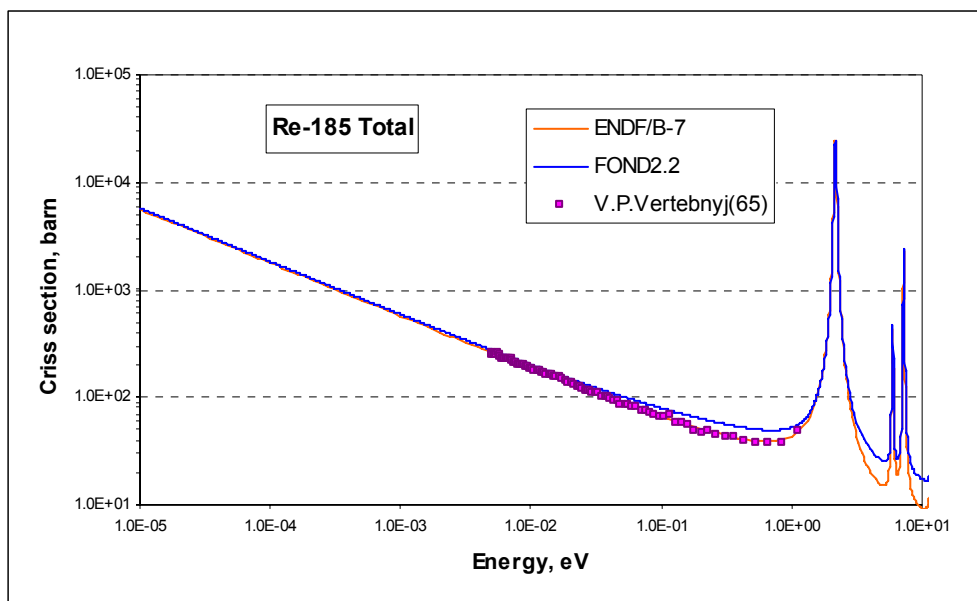


Рис.1. Полное сечение Re185

Область разрешенных резонансов в библиотеке ENDF/B-5 простирается до 100 эВ (30 резонансов из работы S.Friesenhahn(1967), последний – при 98.8 эВ). В ENDF/B-7 область разрешенных резонансов расширена до 2 кэВ (478 резонансов из компиляции Мухабхаба(1984), последний – при 1.999 кэВ). Большая детальность последней оценки очевидна. Смущающим обстоятельством является распространение области до энергии последнего разрешенного резонанса.

На рис. 2 приведены зависимости нарастающих сумм разрешенных резонансов с $J=2$ и $J=3$. Наличие существенного пропуска уровней в верхней части области разрешенных резонансов очевиден. На рис. 3 показаны зависимости среднего числа резонансов, приходящихся на 100 эВ, а на рис.4 – энергетическая зависимость оценки средней приведенной нейтронной ширины в зависимости от интервала усреднения. Неожиданным является ярко выраженная немонотонность этой зависимости немонотонность: выше 500 эВ средняя приведенная нейтронная ширина вместо

возрастания за счет пропуска слабых резонансов (как это наблюдается в интервале 250 - 500 эВ), наоборот, снижается.

На рис. 5 показаны распределения приведенных нейтронных ширин резонансов с энергиями до 500 эВ по 10%-м квантилям распределения Портера-Томаса.

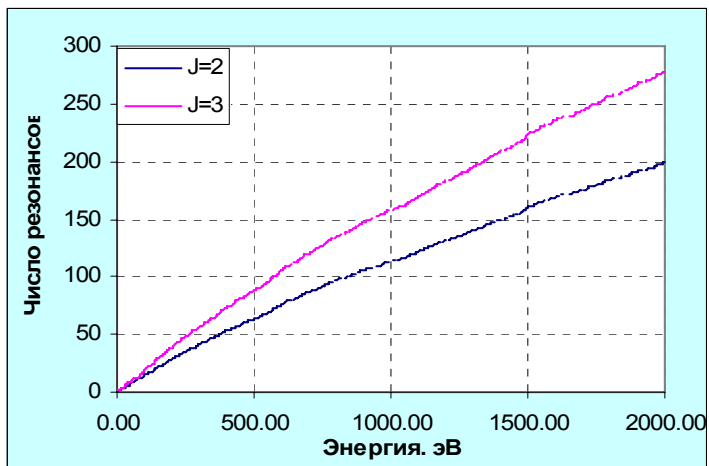


Рис.2. Нарастающие суммы s-резонансов

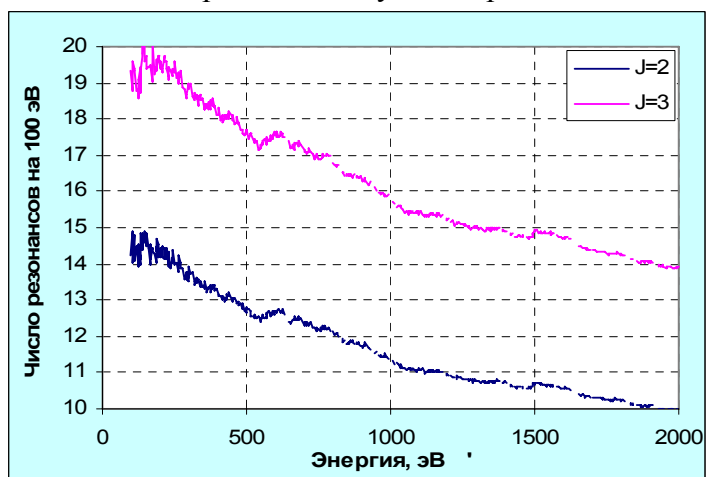


Рис.3. Энергетическая зависимость наблюдаемой плотности уровней

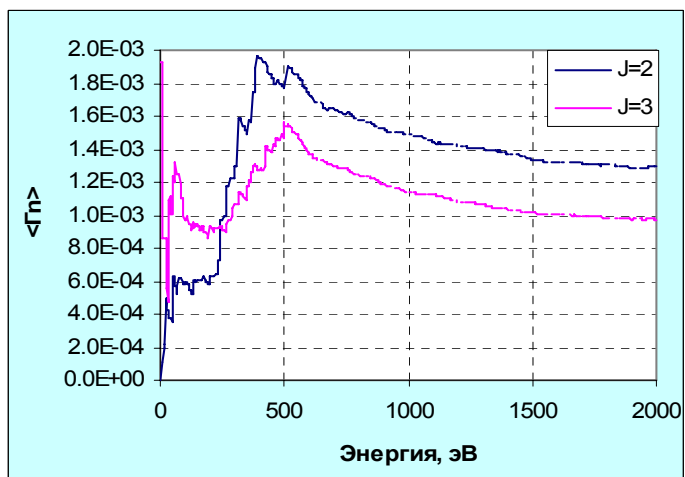


Рис.4а. Зависимость средней приведенной нейтронной ширины от интервала усреднения

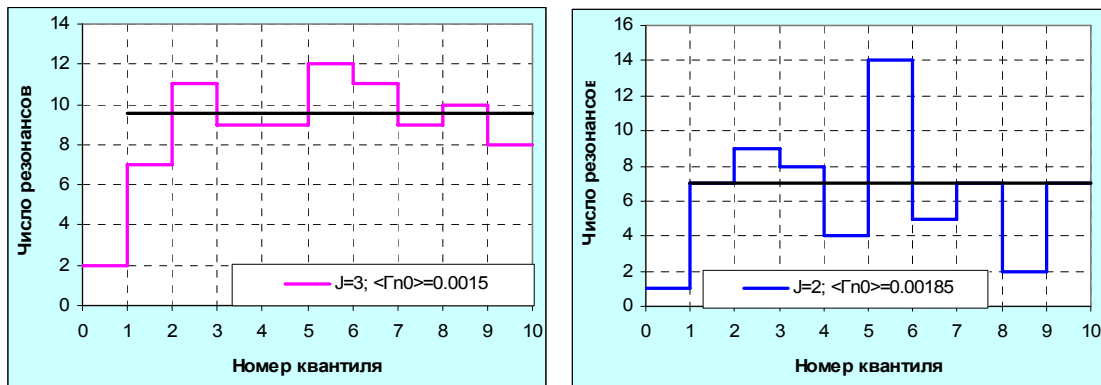


Рис.5. Распределение приведенных нейтронных ширин резонансов с энергиями ниже 500 эВ

Черными линиями показаны средние значения по 9 верхним квантилям. Как видно, отклонения от этих средних являются статистически ожидаемыми. Очевиден также резкий недостаток резонансов в первом квантиле, свидетельствующий о том, что и ниже 500 эВ около 10% резонансов пропущено. Это полностью согласуется с оценкой пропуска слабых резонансов в этой области, следующей из рис. 3. Силовые функции для резонансов с $J=2$ и $J=3$ из этих оценок получаются равными (в единицах 10^{-4}) 2.13 ± 0.04 и 2.11 ± 0.03 соответственно.

На рис. 6 показаны распределения приведенных нейтронных ширин резонансов, лежащих в интервале от 500 до 2000 эВ, полученные при тех же средних значениях. Эти распределения указывают на пропуск СИЛЬНЫХ резонансов, что противоречит здравому смыслу. Чтобы приблизить числа резонансов в двух верхних квантилях друг к другу требуется снизить средние приведенные нейтронные ширины в 3-5 раза (см. черные гистограммы на рис.6). При этом окажется, что пропущено значительно более половины резонансов.

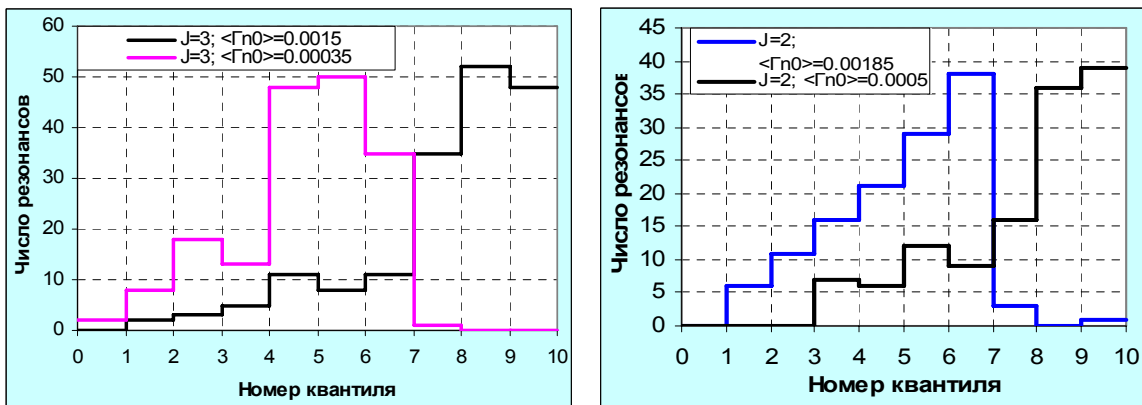


Рис.6. распределение приведенных нейтронных ширин резонансов с энергиями от 500 до 2000эВ.

Налицо противоречие¹, для разрешения которого требуется проведение специальной оценки, что выходит за рамки настоящей работы. В связи с изложенным полагаем, что верхняя граница области разрешенных резонансов должна быть установлена при 500 эВ.

Следует отметить, что единственным источником информации о параметрах резонансов при энергиях выше 500 эВ является работа Наменсона и др.², содержащая собственную оценку резонансных параметров, следующих из анализа проведенного эксперимента (EXFOR 10630). Все резонансы, лежащие при энергиях выше 500 эВ, присутствующие в оценке Мухабхаба и содержащиеся в ENDF/B-VII, содержатся и в

¹ Возможным объяснением может служить наличие значительного вклада р-резонансов в популяцию разрешенных уровней, в заметной степени компенсирующего пропуск слабых s-резонансов.

² A.I.Namenson et al. Nucl. Phys.A, v.266,p.83, 1976.

наборе Наменсона и в точности совпадают с ними по энергии. Однако оценки нейтронных ширин существенно различаются. На рис. 4б приведены нарастающие суммы ширин по данным Наменсона (спины резонансам приписаны те же, что и в оценке Мухабхаба). Столь очевидного пропуска уровней в этом случае не наблюдается. В то же время Наменсон отмечает еще 35 резонансных особенностей, которые он считает сдвоенными резонансами и для которых нейтронные ширины не им приводятся. В оценке Мухабхаба эти резонансы отсутствуют. Таким образом, вполне возможно что новая, более тщательная, обработка эксперимента Наменсона плюс статистический анализ резонансов позволят в будущем разрешить отмеченное выше противоречие.

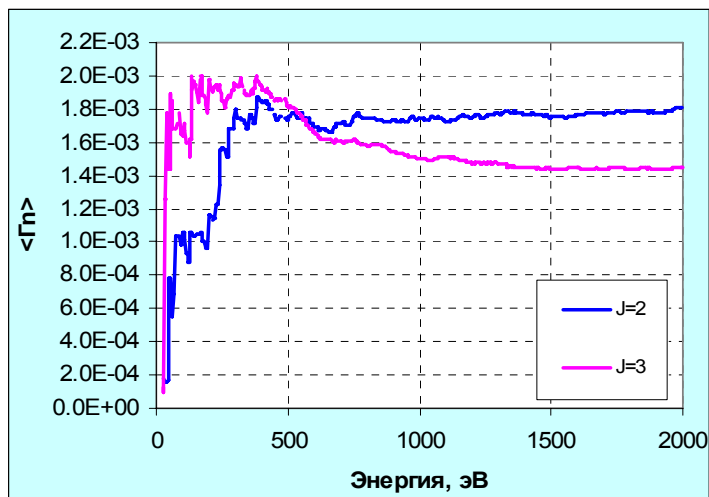


Рис.4б. Энергетические зависимости средних приведенных нейтронных ширин по данным Наменсона.

Область неразрешенных резонансов в ФОНД-2.2 (ENDF/B-V) простиралась от 100 эВ до 100 кэВ и учитывала вклады только s- и p-волн.

В ENDF/B-VII простирается только до 35 кэВ и учитывает вклады s-,p- и d-волн. Силовые функции для s-волны практически не зависят от спина и равны $2.33 \cdot 10^{-4}$, что лишь на 10% превышает сделанные выше оценки. Средние резонансные параметры предназначаются лишь для расчета факторов самоэкранировки. Использование их для расчета сечений ведет к существенному завышению как сечения захвата, так и сечения рассеяния. В связи с этим перенос нижней границы области неразрешенных резонансов на 500 эВ требовал определения сечений в файле MF=3 в интервале 500 -2000 эВ. Необходимость определения этих сечений побудила пересмотреть сечение захвата в области неразрешенных резонансов так, чтобы обеспечить согласие с экспериментальными данными (см. рис.11). Сечение упругого рассеяния проэкстраполировано от 2000эВ до 500 эВ. Полное сечение получено как сумма парциальных.

На рис.7 представлены экспериментальные данные по сечению захвата в тепловой области, которые не противоречат результатам оценок, кроме самого раннего эксперимента R.A.Karam(1963), который, однако, тоже отличается от оцененного значения гораздо меньше, чем на две погрешности.

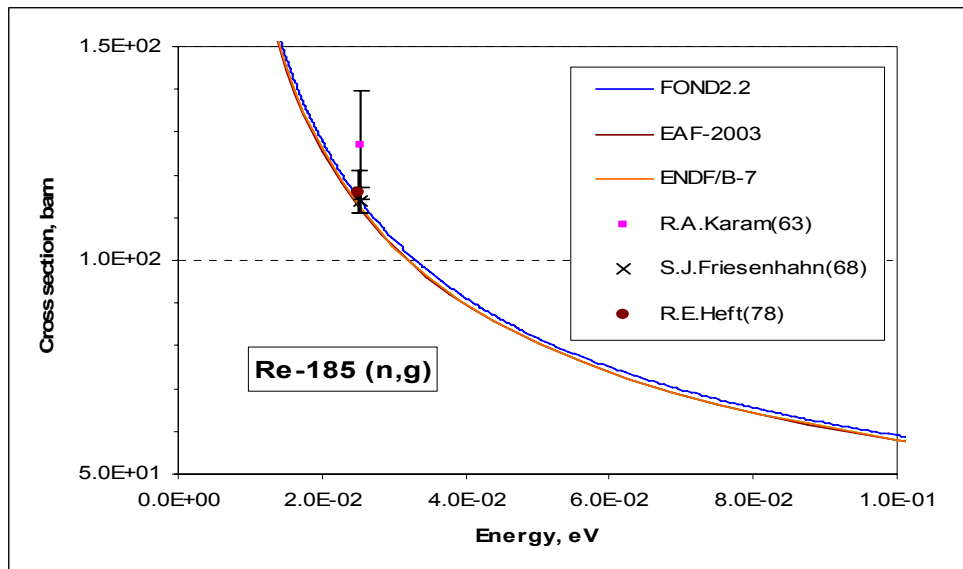


Рис.7 Сечение радиационного захвата Re185

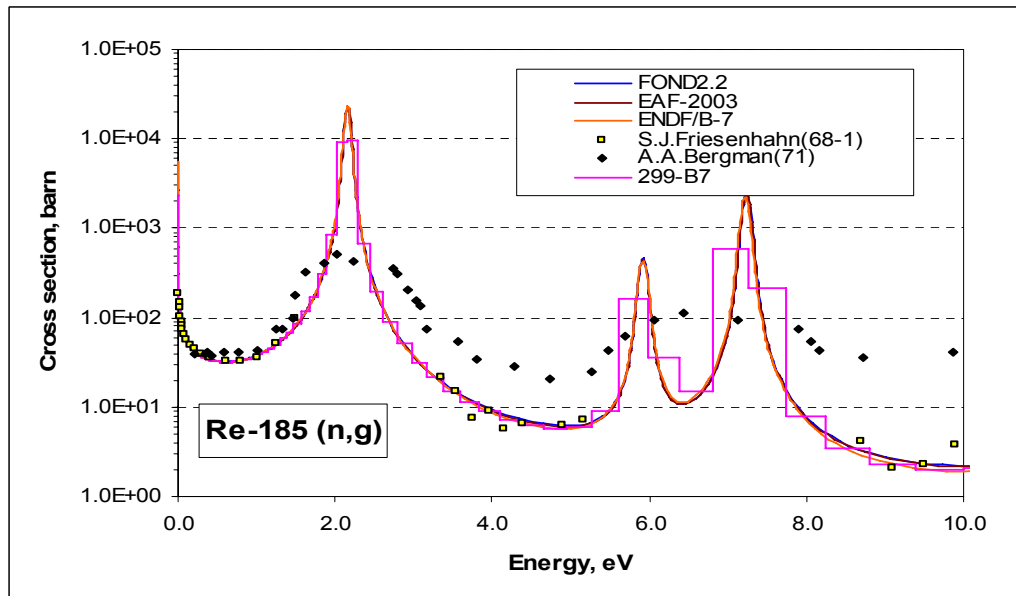


Рис.8 Сечение радиационного захвата Re185

Рис.8-10 относятся к области разрешенных резонансов.

Эта область в EXFOR представлена двумя экспериментами. Данные более раннего эксперимента S.Friesenhahn(1968) прекрасно согласуются с оценками в области до 10 эВ и в интервале 40-200 эВ. Эксперимент А.А.Бергмана(1971) в интервале до 10 эВ сильно уступает предыдущему в разрешении. При более высоких энергиях он демонстрирует хорошее согласие с оцененными данными. На рис. 3-5 для удобства сравнения с экспериментальными данными приводится еще результаты мультигрупповые (299 групп) сечения, рассчитанные по библиотеке ENDF/B-7 .

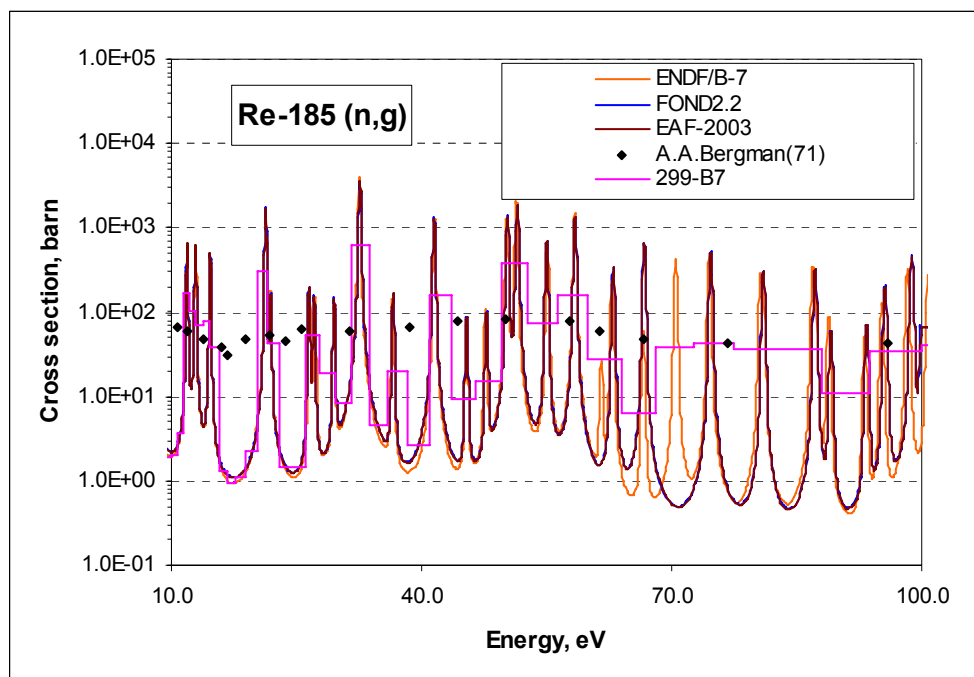


Рис.9 Сечение радиационного захвата Re185

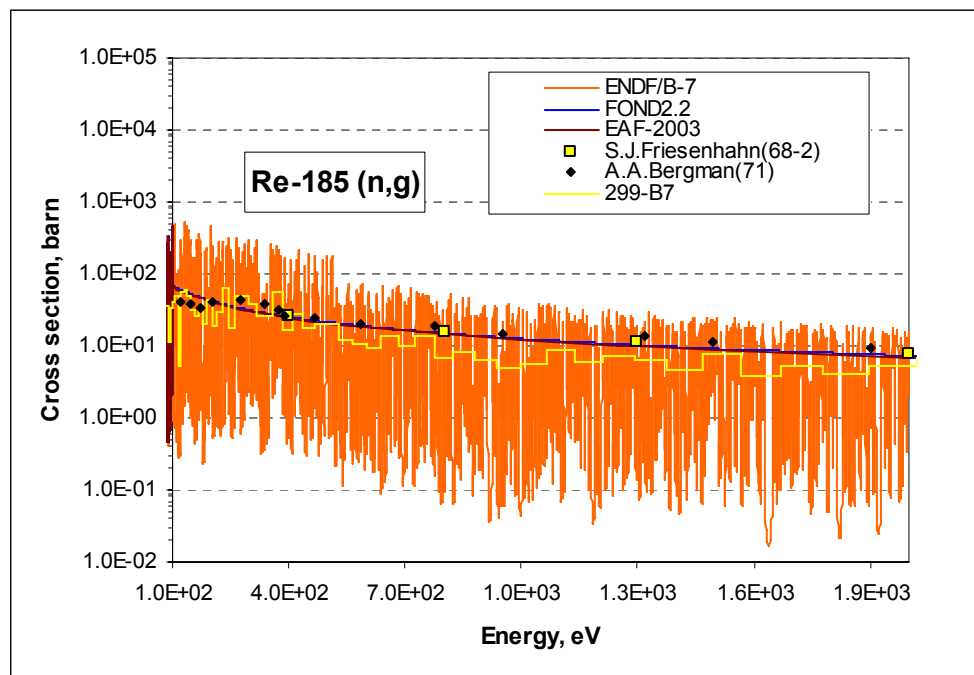


Рис.10 Сечение радиационного захвата Re185

В области неразрешенных резонансов все прежние оценки сечения радиационного захвата практически повторяют друг друга и дружно лежат ниже всех имеющихся экспериментальных данных (рис.11). Принятая в РОСФОНД кривая показана голубым цветом.

Выше 50 кэВ, где имеются экспериментальные данные нескольких авторов, наблюдается достаточно большой разброс их результатов вокруг оцененных значений (рис.12). Оценка ENDF/B-7, учитывающая помимо работ, принятых во внимание в оценке FOND-2.2, более поздние результаты Трофимова (1987 г.), выглядит предпочтительней. В этой области сечение, принятое в РОСФОНД, совпадает с оценкой ENDF/B-VII. При энергиях выше 3 МэВ экспериментальных данных по сечению захвата нет (рис.13). Преимущество оценки ENDF/B-VII в этой области состоит лишь в том, что она выполнена значительно позднее и, возможно, с более полным теоретическим обоснованием.

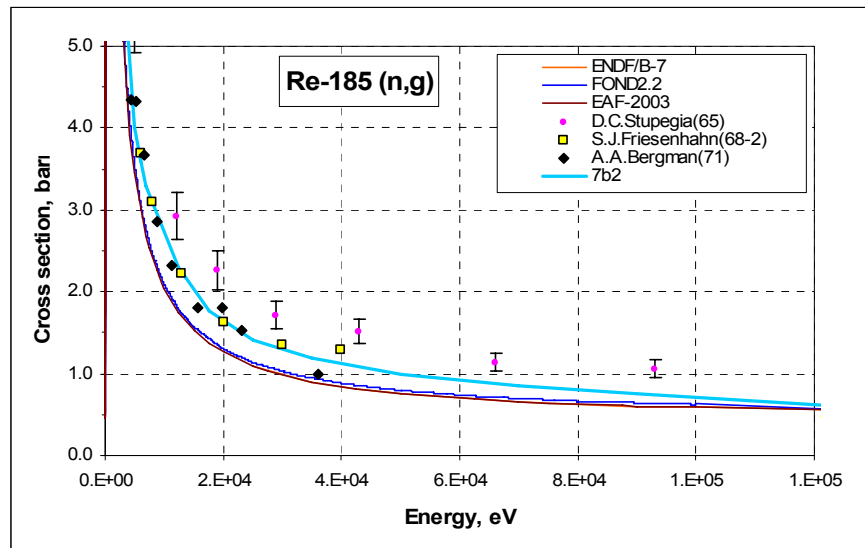


Рис.11 Сечение радиационного захвата Re185

Как видно из приведенных данных, оценка EAF-2003 совпадает с ENDF/B-7 до 20 МэВ. Таким образом, в то время как в резонансной области в EAF2003 взяты данные из ENDF/B-5, вне резонансной области приняты данные из ENDF/B-7.

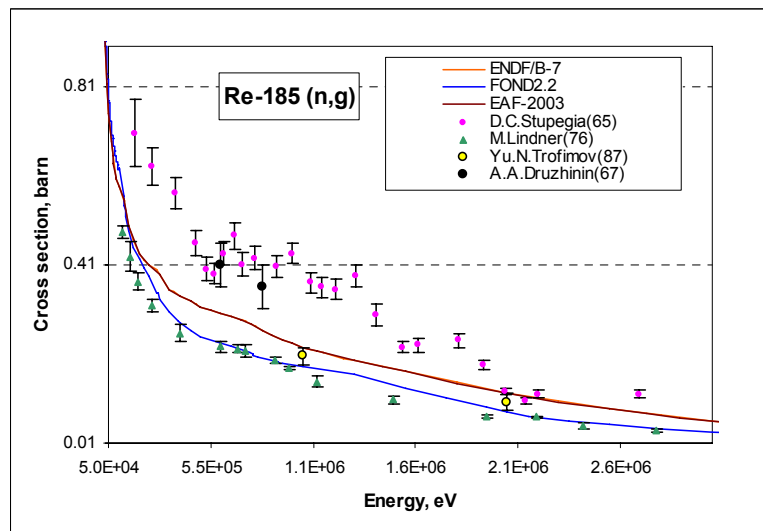


Рис.12 Сечение радиационного захвата Re185

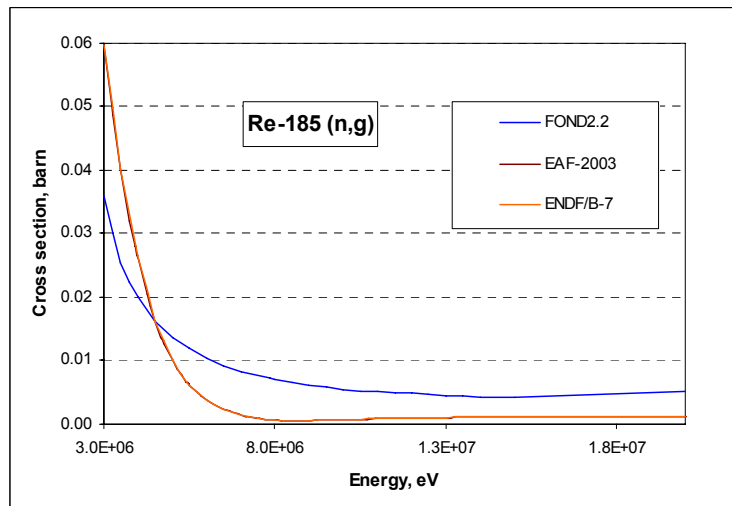


Рис.13 Сечение радиационного захвата Re185

На рис. 14 показано поведение полного сечения в той части области неразрешенных резонансов, которая перекрывается с областью разрешенных резонансов в ENDF/B-VIIb2. Как видно, принятое полное сечение здесь лежит посередине между оценками ФОНД-2.2. и ENDF/B-VIIb2.

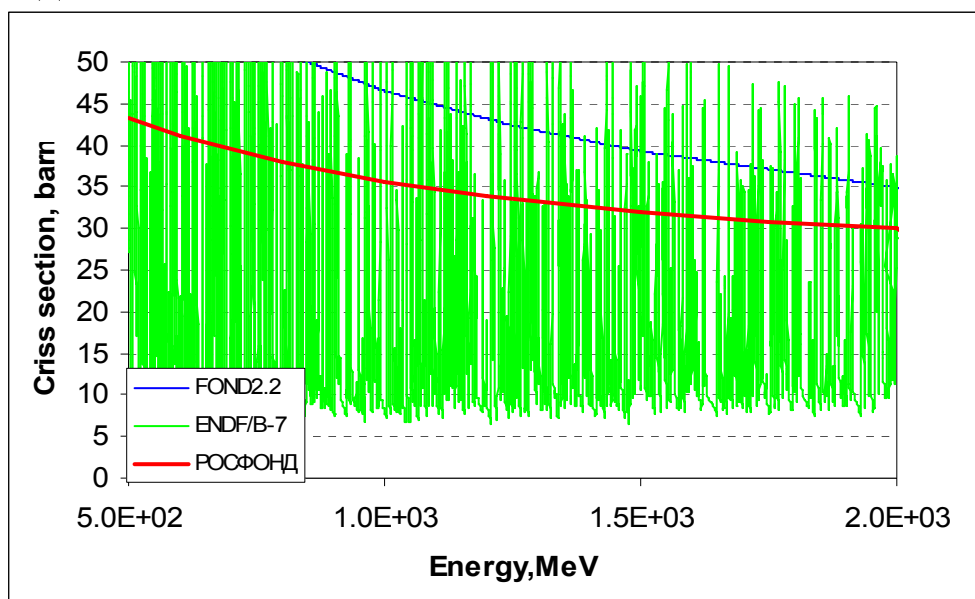


Рис.14. Полное сечение рения-185.

Заключение

На основании проведенного рассмотрения в РОСФОНД принимается файл Re185 из ENDF/B-7 со следующими изменениями.

1. Граница области разрешенных резонансов снижена до 500 эВ
2. Соответственно снижена граница области неразрешенных резонансов.
3. В интервале 500 эВ -125 кэВ принято пересмотренное сечение захвата. Соответственно изменено и полное сечение.

4. Включен файл MF=9 с данные о вероятностях образования изомерных долгоживущих изомерных состояний $^{186}\text{Re}^m$ в реакции (n,γ) и $^{185}\text{Re}^m$ - в реакции $(n,2n)$. Эти вероятности получены на основе сечений образования ядер-продуктов в основном и изомерном состояниях, приведенных в файле MF=10 библиотеки EAF-2003.

5. Исключен файл MF=33, содержащий оценку погрешностей сечения захвата, поскольку РОСФОНДе рекомендации по погрешностям сечений в настоящее время не даются и не обосновываются.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице. **Жирным шрифтом** выделены данные из ENDF/B-7. Как видно, отличия данных ENDF/B-7, принимаемых в РОСФОНД, от прежних данных (FOND-2.2) – невелики.

| | | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) |
|----------------------|----------|---------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 0.0253 эВ | ENDF/B-7 | 121.1 | 8.9 | | | | 112.2 |
| | EAF-2003 | | | | | | 112.0 |
| | FOND-2.2 | 134.7 | 20.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 114.0 |
| Резонансный интеграл | ENDF/B-7 | 2008.7 | 278.9 | | | | 1729.9 |
| | EAF-2003 | | | | | | 1708.7 |
| | FOND-2.2 | 2149.0 | 403.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1745.4 |
| | ENDF/B-7 | 6.787 | 4.238 | 2.360 | 7.05E-03 | 1.53E-05 | 0.181 |

| | | | | | | | |
|---------------------------------|----------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------|
| Спектр деления ^{235}U | ENDF/B-7 | 6.787 | 4.238 | 2.360 | 7.05E-03 | 1.53E-05 | 0.181 |
| | EAF-2003 | | | | | 1.53E-05 | 0.181 |
| | FOND2.2 | 6.804 | 4.733 | 1.918 | 5.32E-03 | 1.20E-05 | 0.147 |
| 14 МэВ | ENDF/B-7 | 5.32 | 2.69 | 0.44 | 2.19 | | 1.10E-3 |
| | EAF-2003 | | | | | | 1.10E-3 |
| | FOND-2.2 | 5.22 | 2.71 | 0.89 | 1.62 | | 4.34E-3 |

Автор отбора данных

Забродская С.В.

75.6. Рений-186g.

Радиоактивен. Испытывает бета-распад в ^{184}Os (92ю53%) или захват орбитального электрона с распадом в стабильный стабильный вольфрам-186 (7.47%). Период полураспада $T_{1/2}=3.7186$ дн. Образование этого изомера в реакторе происходит благодаря реакциям $^{184}\text{Re}(n,\gamma)$, $^{187}\text{Re}(n,2n)$, $^{186}\text{Os}(n,p)$, $^{187}\text{Os}(n,d)$.

Нейтронные сечения для рения-184m оценены исходя из теоретических соображение и содержатся в библиотеке EAF-2003 (оценка 2005 г.).

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из EAF-2003. Данные о сечениях реакций $(n,3n)$, (n,d) , $(n,n'\alpha)$, $(n,n'p)$, и $(n,n'd)$, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям с образованием конечных ядер в основных и изомерных состояниях и включить полученные суммы в файл MF=3 сформировав там соответствующие секции.

Сформировать секцию 9/17 с вероятностями образования рения-184 в основном и изомерном состояниях.

В файле MF=10 сохранить лишь секцию MT=4 с сечением образования долгоживущего изомера.

Автор рекомендации

Забродская С.В.

75.7. Рений-186m.

Радиоактивен. Испытывает изомерный переход в основное состояние. Период полураспада $T_{1/2}=2*10^5$ лет. Образование этого изомера в реакторе происходит благодаря реакциям $^{184}\text{Re}(n,\gamma)$, $^{187}\text{Re}(n,2n)$, $^{186}\text{Os}(n,p)$, $^{187}\text{Os}(n,d)$.

Нейтронные сечения для рения-184m оценены исходя из теоретических соображение и содержатся в библиотеке EAF-2003 (оценка 2005 г.).

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из EAF-2003. Данные о сечениях реакций $(n,3n)$, (n,d) , $(n,n'\alpha)$, $(n,n'p)$, и $(n,n'd)$, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям с образованием конечных ядер в основных и изомерных состояниях и включить полученные суммы в файл MF=3 сформировав там соответствующие секции.

Сформировать секцию 9/17 с вероятностями образования рения-184 в основном и изомерном состояниях.

Перенести сечение образования основного состояния из файла MF=3 в файл MF=10.

Файл MF=10 удалить.

Автор рекомендации

Забродская С.В.

75.8. Рений-187.

Содержание в естественной смеси 62.6%.

Ситуация с оценками для стабильного изотопа Re187 аналогична случаю с первым стабильным изотопом Re185:

в **ENDF/B-7**(ENDF/B-6 rel.4)- оценка L.W.Weston, P.G.Young, сделанная 1990 году;

в JEFF3.1 принята та же оценка;

в **FOND2.2** – оценка W.B.Herderson, J.W.Zwick 1983 года, которая была в версии ENDF/B-5;

в EAF2003 - оценка Forrest, Корецку и др.2003 года(JEFF3.0/A);

В остальных библиотеках файлов для Re187 нет. Отметим, что в основу оценок ENDF/B-7, JEFF3.1(ENDF/B-6 rel.4) была взята версия файла из ENDF/B-5. В анализе оценок она будет представлена, как библиотека FOND-2.2. Поскольку оценка JEFF3.1 совпадает с ENDF/B-7, то на рисунках она отсутствует. Оценка EAF2003 совпадает с FOND-2.2(ENDF/B-5), поэтому на графиках она также не приводится.

На рис. 1 приводится полное сечение в тепловой области (до 1.2 эВ). В EXFOR в этой области имеются данные эксперимента J.R.Dunning(1964) и В.П.Вертебного(1965). Как видно, оценка ENDF/B-7 почти точно проведена по экспериментальным точкам.

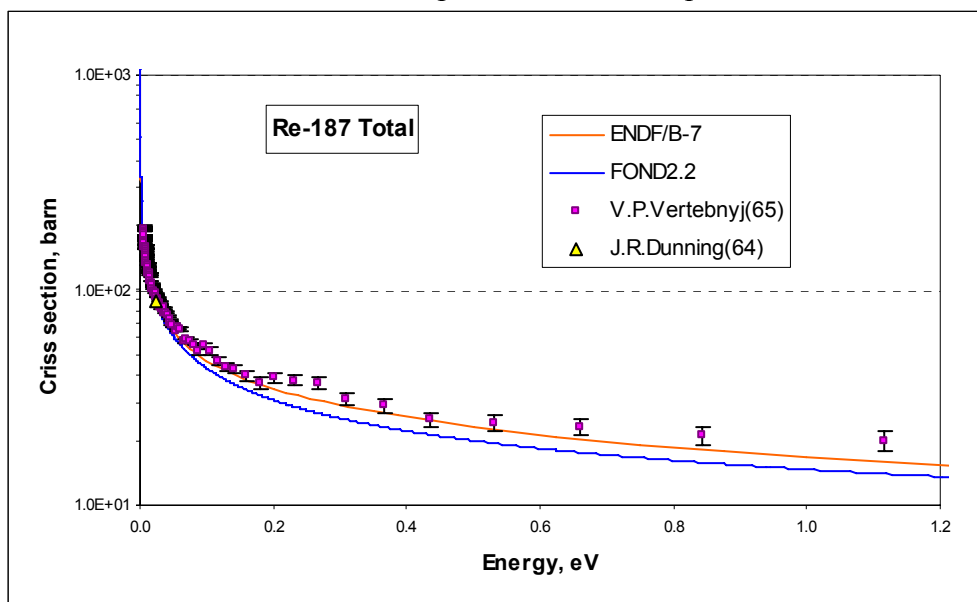


Рис.1 Полное сечение Re-187

Область разрешенных резонансов в библиотеке ENDF/B-5 простирается до 93.8 эВ, область неразрешенных резонансов тянется до 100 кэВ. В ENDF/B-7 границы совпадают с границами соответствующих областей изотопа для Re185, т.е область разрешенных резонансов простирается до 2 кэВ, а неразрешенных -до 35 кэВ. В ENDF/B-5 параметры

разрешенных резонансов были взяты из работы S.Friesenhahn(1967), в следующих версиях ENDF, включая ENDF/B-7, - из компиляции Мухабхаба(1984).

Ситуация с областью разрешенных резонансов в случае рения-187 в точности такая же, как в случае рения-185.

На рис. 2 приведены зависимости нарастающих сумм разрешенных резонансов с $J=2$ и $J=3$. Наличие существенного пропуска уровней в верхней части области разрешенных резонансов очевиден. На рис. 3 показаны зависимости среднего числа резонансов, приходящихся на 100 эВ, а на рис.4 – энергетическая зависимость оценки средней приведенной нейтронной ширины в зависимости от интервала усреднения. Неожиданным является ярко выраженная немонотонность этой зависимости: выше 600 эВ средняя приведенная нейтронная ширина вместо возрастания за счет пропуска слабых резонансов, наоборот, снижается.

На рис. 5 показаны распределения приведенных нейтронных ширин резонансов с энергиями до 600 эВ по 10%-м квантилям распределения Портера-Томаса.

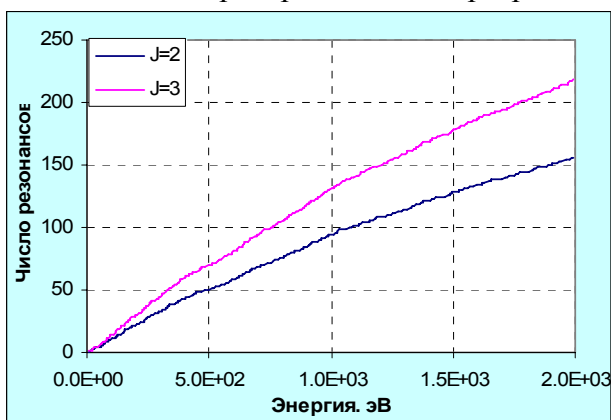


Рис.2. Нарастающие суммы s-резонансов

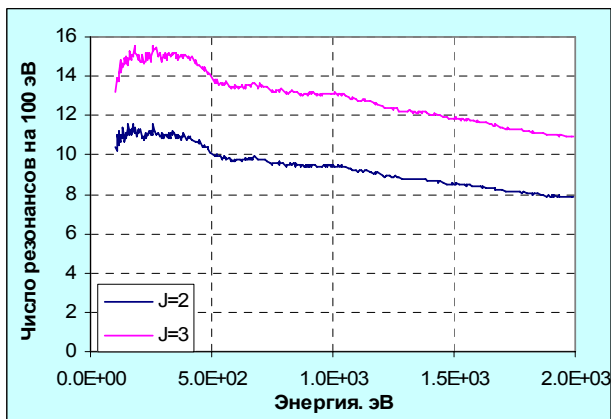


Рис.3. Энергетическая зависимость наблюдаемой плотности уровней

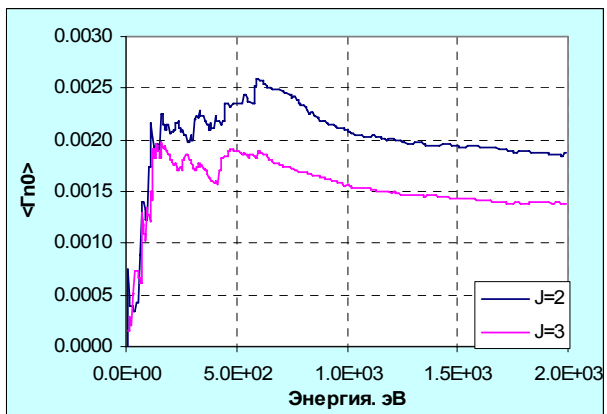


Рис.4. Зависимость средней приведенной нейтронной ширины от интервала усреднения

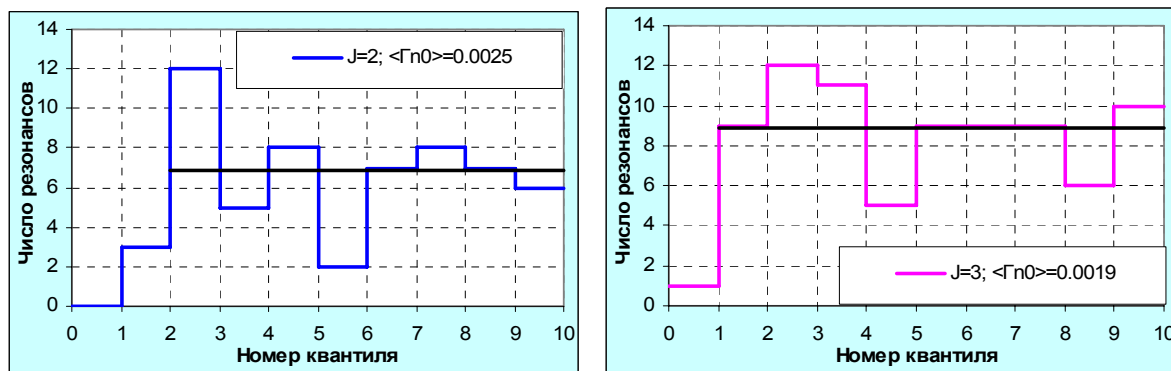


Рис.5. Распределение приведенных нейтронных ширин резонансов с энергиями ниже 600 эВ

Черными линиями показаны средние значения по 8 и, соответственно, 9 верхним квантилям. Как видно, отклонения от этих средних являются статистически ожидаемыми. Очевиден также резкий недостаток резонансов в первых квантилях, свидетельствующий о том, что и ниже 600 эВ около 10% резонансов пропущено. Это полностью согласуется с оценкой пропуска слабых резонансов в этой области, следующей из рис. 3. Силовые функции для резонансов с $J=2$ и $J=3$ из этих оценок получаются равными (в единицах 10^{-4}) 2.86 ± 0.04 и 2.81 ± 0.04 соответственно. Средние расстояния между уровнями – 8.73эВ и 6.75 эВ.

На рис. 6 показаны распределения приведенных нейтронных ширин резонансов, лежащих в интервале от 600 до 2000 эВ, полученные при тех же средних значениях. Эти распределения указывают на пропуск СИЛЬНЫХ резонансов, что противоречит здравому смыслу. Как и в случае рения-185, чтобы приблизить числа резонансов в двух верхних квантилях друг к другу требуется в несколько раз снизить средние приведенные нейтронные ширины. При этом окажется, что пропущено значительно более половины резонансов (см. гистограммы, нанесенные тонкими линиями).

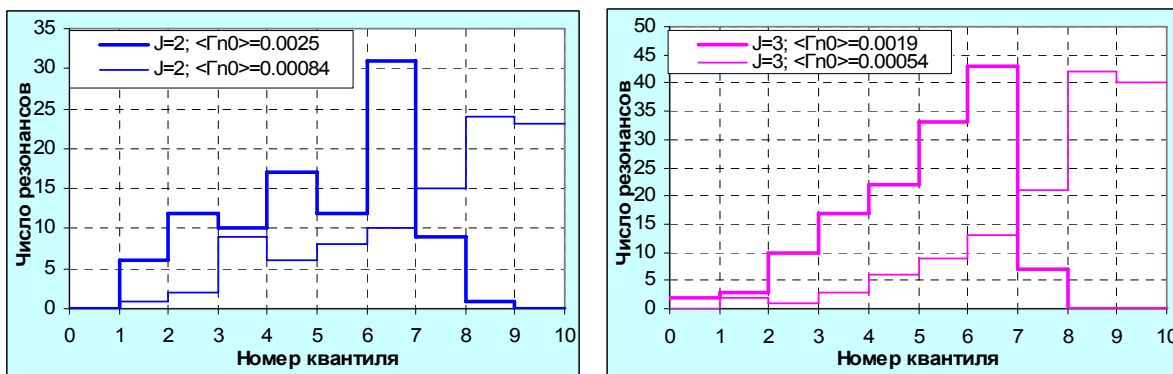


Рис.6. Распределение приведенных нейтронных ширин резонансов с энергиями от 600 до 2000эВ.

Налицо противоречие³, для разрешения которого требуется проведение специальной оценки, что выходит за рамки настоящей работы. В связи с изложенным полагаем, что верхняя граница области разрешенных резонансов должна быть установлена при 600 эВ.

Следует отметить, что как и в случае рения-185 единственным источником информации о параметрах резонансов при энергиях выше 600 эВ является работа Наменсона и др.⁴, содержащая собственную оценку резонансных параметров, следующих

³ Возможным объяснением может служить наличие значительного вклада p-резонансов в популяцию разрешенных уровней, в заметной степени компенсирующего пропуск слабых s-резонансов.

⁴ A.I.Namenson et al. Nucl. Phys.A, v.266,p.83, 1976.

из анализа проведенного эксперимента (EXFOR 10630). Все резонансы, лежащие при энергиях выше 600 эВ, присутствующие в оценке Мухабхаба и содержащиеся в ENDF/B-VII, содержатся и в наборе Наменсона и в точности совпадают с ними по энергии. Однако оценки нейтронных ширин существенно различаются. Кроме того, Наменсон отмечает еще 29 резонансных особенностей, которые он считает сдвоенными резонансами и для которых нейтронные ширины не им приводятся. В оценке Мухабхаба эти резонансы отсутствуют. Таким образом, вполне возможно, что новая, более тщательная, обработка эксперимента Наменсона плюс статистический анализ резонансов позволят в будущем разрешить отмеченное выше противоречие.

Область неразрешенных резонансов в ФОНД-2.2 (ENDF/B-V) простиралась от 93.8 эВ до 100 кэВ и учитывала вклады только s- и p-волн.

В ENDF/B-VII простирается только до 35 кэВ и учитывает вклады s-,p- и d-волн. Силовые функции для s-волны не зависят от спина и равны $2.88 \cdot 10^{-4}$, что весьма близко к сделанным выше оценкам. Средние резонансные параметры предназначаются лишь для расчета факторов самоэкранировки. Использование их для расчета сечений ведет к существенному завышению как сечения захвата, так и сечения рассеяния. В связи с этим перенос нижней границы области неразрешенных резонансов на 600 эВ требовал определения сечений в файле MF=3 в интервале 600 -2000 эВ. Энергетический ход сечений в этом интервале был принят таким, как в ФОНД-2.2, с такой перенормировкой, чтобы при 2 кэВ сечения совпадали с принятыми в ENDF/B-VII.

На рис.7-11 приводится сечение радиационного захвата для Re-187. На рис.7 представлены эксперименты в тепловой области. Видно, что предпочтение отдано более раннему эксперименту S.Friesenhahn(1968), хотя данные оценки ENDF/B-7 проходят чуть выше данных этого эксперимента.

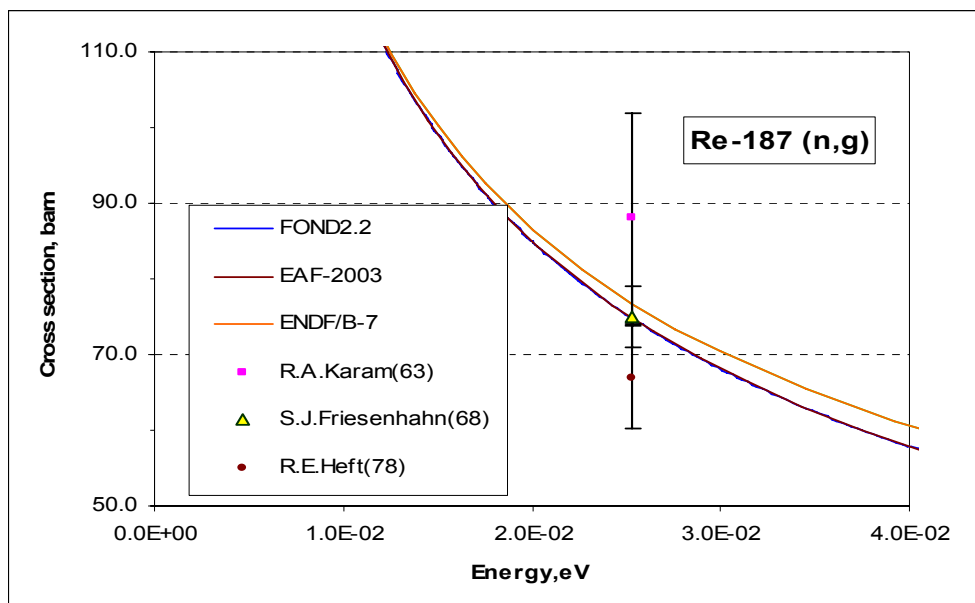


Рис.7. Сечение захвата Re-187.

В области энергий до 10 эВ в EXFOR были найдены два эксперимента. Их результаты показаны на рис.8. Данные эксперимента S.Friesenhahn(1968) совпадают с оценкой FOND2.2 и EAF2003. Данные А.А.Бергмана(1971), как и в случае с Re-185, трудно сравнивать с оценкой из-за низкого разрешения.

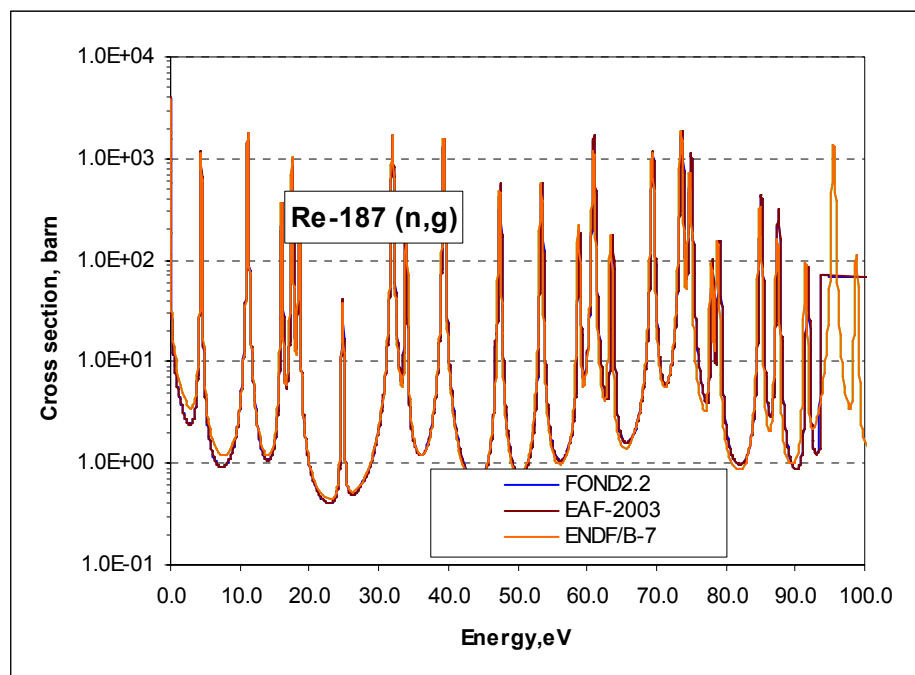


Рис.9. Сечение захвата Re-187.

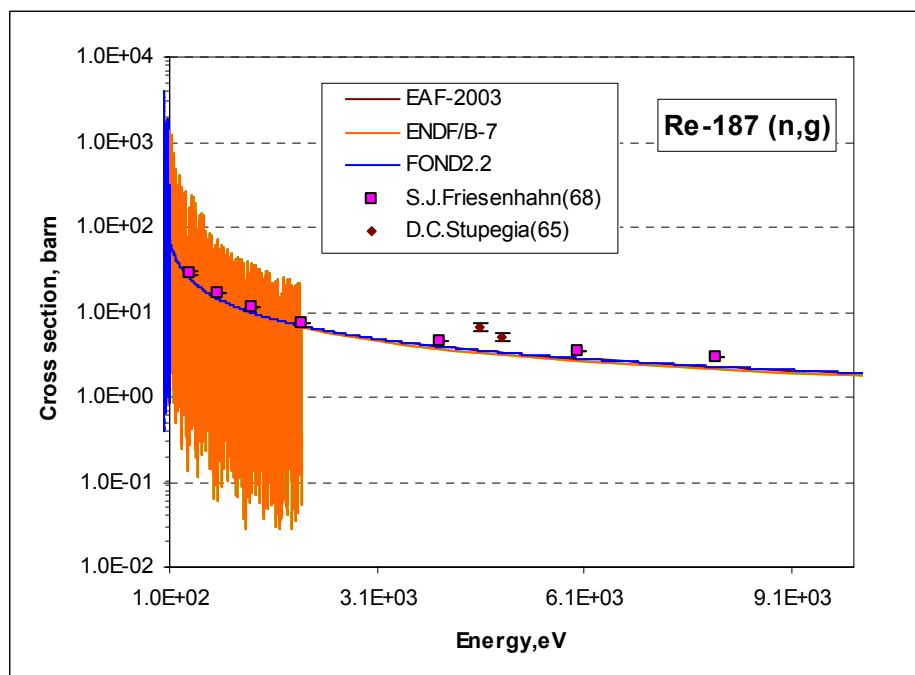


Рис.10. Сечение захвата Re-187.

На рис.9, 10 приводится поведение сечение радиационного сечении на Re-187 до 10 кэВ. До 100 эВ экспериментальных данных в EXFORе нет. Из этих рисунков видно различие границ разрешенных резонансов в оценках FOND2.2 и ENDF/B-7. Напомним, что в РОСФОНДе область разрешенных резонансов простирается только до 600 эВ, где данные совпадают с ENDF/B-VII.

В области выше 100 эВ имеются результаты экспериментов D.C. Stupegia(1965) и S.Friesenhahn(1968). Последний хорошо согласуется с оценками вплоть до 10 кэВ. При более высоких энергиях оцененные кривые лежат значительно ниже экспериментальных данных, полученных названными авторами. Основанием для этого, видимо, служат аналогичное расхождение, имеющее место для Re-185, где оно оправдывается результатами более поздних работ.

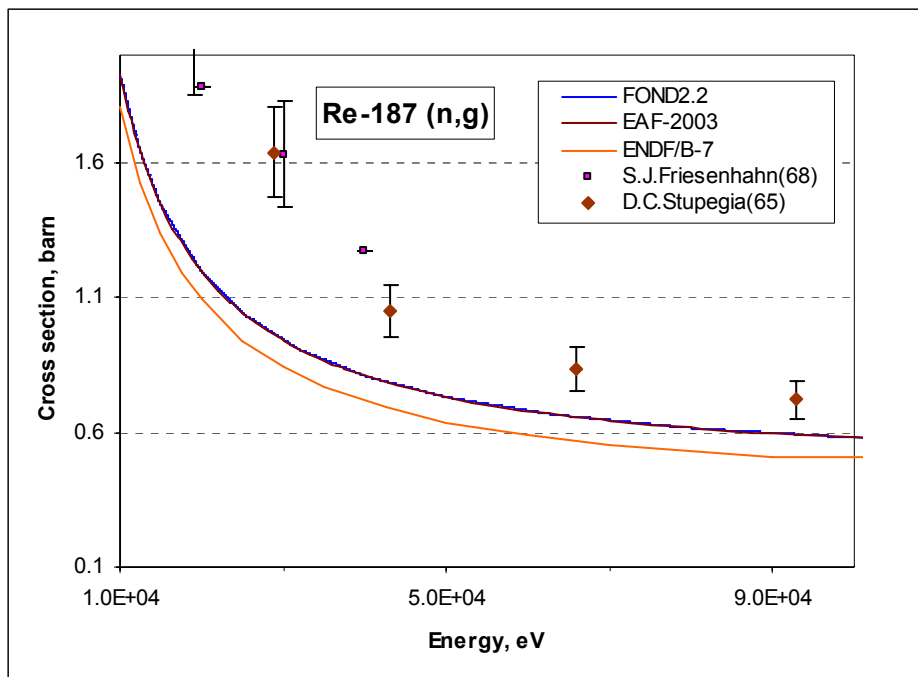


Рис.11 Сечение захвата Re-187

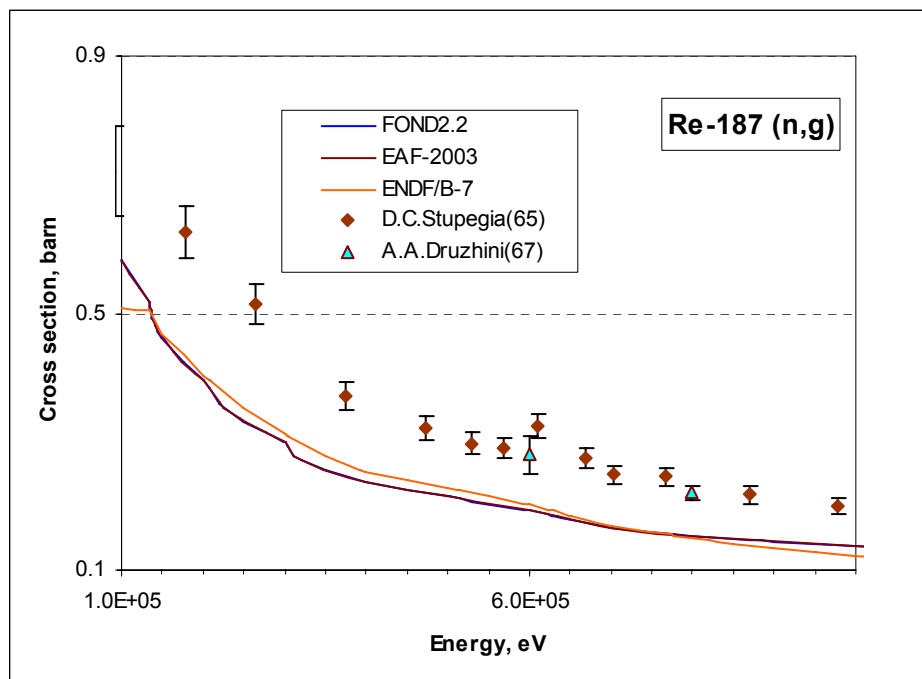


Рис.12 Сечение захвата Re-187

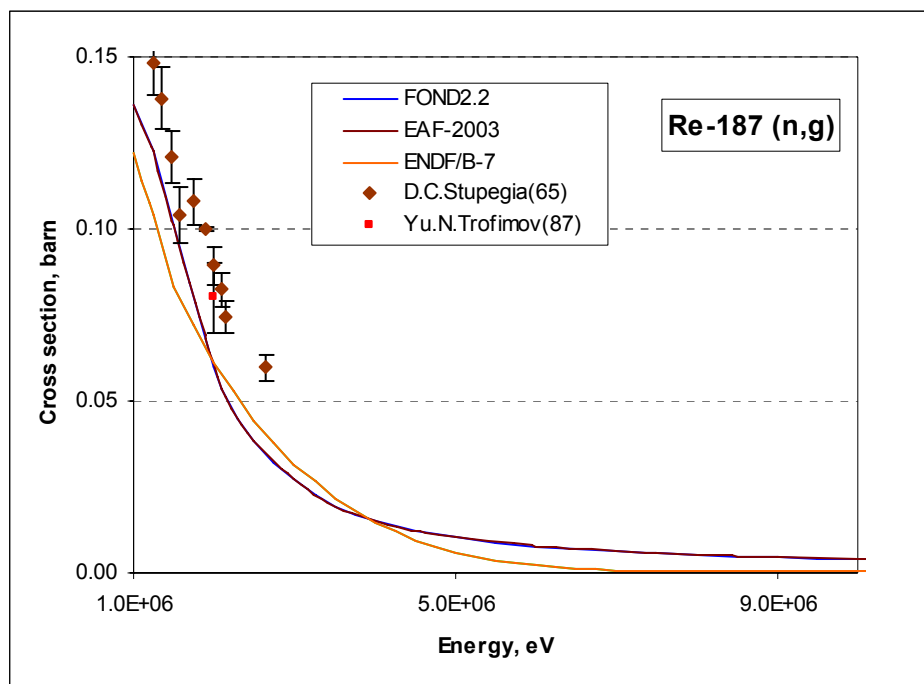


Рис.13

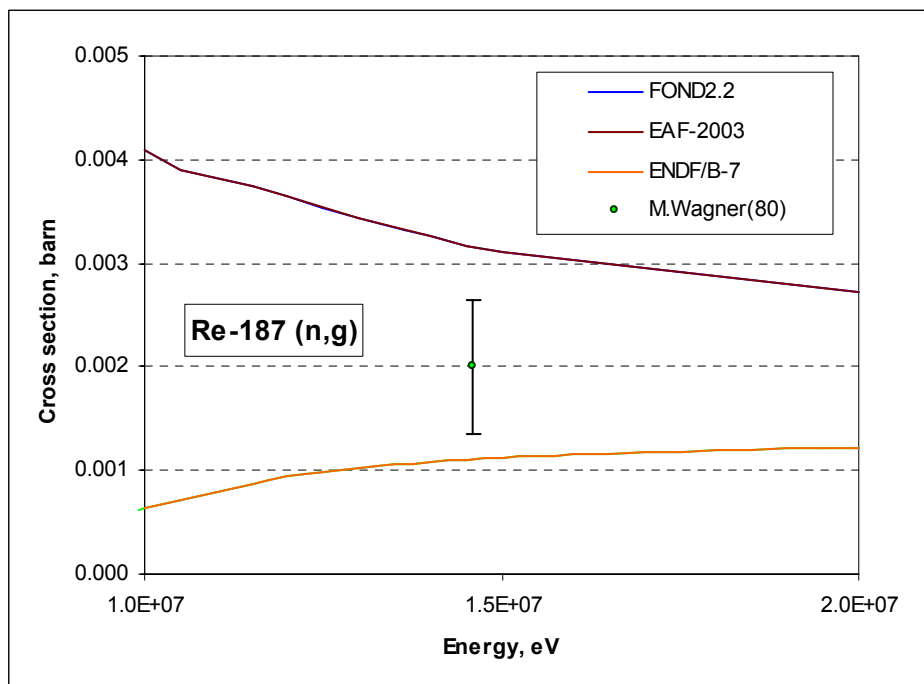


Рис.14

Заключение

На основании проведенного рассмотрения в РОСФОНД принимается файл Re-187 из ENDF/B-7 со следующими изменениями.

1. Граница области разрешенных резонансов снижена до 600 эВ
2. Соответственно снижена граница области неразрешенных резонансов.
3. В интервале 600 эВ - 2 кэВ в файле MF=3 приняты сечения захвата, полное сечение и сечение рассеяния, пропорциональные таковым из оценки ENDF/B-V, с такой перенормировкой, что значения сечений при 2 кэВ совпадают с таковыми из ENDF/B-VII.

4. Исключен файл MF=33, содержащий оценку погрешностей сечения захвата, поскольку РОСФОНДе рекомендации по погрешностям сечений в настоящее время не даются и не обосновываются.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице. **Жирным шрифтом** выделены данные из ENDF/B-7. Как видно, различия в рекомендуемых сечениях в случае рения-187 существенно выше, чем для рения-185. Это обусловлено появлением существенно новых данных в области разрешенных резонансов.

| | | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) |
|---------------------------------|----------|--------------|--------------|-------------|----------------|----------------|----------------|
| 0.0253 эВ | ENDF/B-7 | 86.7 | 10.0 | | | | 76.7 |
| | EAF2003 | | | | | | 74.9 |
| | FOND2.2 | 134.7 | 20.7 | | | | 114.0 |
| Резонансный интеграл | ENDF/B-7 | 530.9 | 237.2 | | | | 293.7 |
| | EAF2003 | | | | | | 286.6 |
| | FOND2.2 | 2149.0 | 403.6 | | | | 1745.4 |
| Спектр деления ^{235}U | ENDF/B-7 | 6.8 | 4.2 | 2.48 | 9.67E-3 | 3.14E-5 | 0.117 |
| | EAF2003 | | | | | 3.14E-5 | 0.120 |
| | FOND2.2 | 6.8 | 4.7 | 1.92 | 5.32E-3 | 1.20E-5 | 0.147 |
| 14 МэВ | ENDF/B-7 | 5.3 | 2.7 | 0.39 | 2.24 | 9.35E-4 | 1.08E-3 |
| | EAF2003 | | | | | 9.35E-4 | 3.27E-3 |
| | FOND2.2 | 5.2 | 2.7 | 0.89 | 1.62 | | 4.34E-3 |

Автор отбора данных

Забродская С.В.

75.9. Рений-189.

Радиоактивен. Испытывает бета-распад в ^{189}Os . Период полураспада $T_{1/2}=24.3$ ч. Образование этого изотопа в реакторе происходит благодаря реакциям $^{189}\text{Os}(n,p)$, $^{188}\text{Os}(n,d)$, $^{188}\text{Os}(n,n'p)$, $^{189}\text{Os}(n,t)$, $^{189}\text{Os}(n,n'd)$

Нейтронные сечения для рения-184m оценены исходя из теоретических соображение и содержатся в библиотеке EAF-2003 (оценка 2005 г.).

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из EAF-2003. Данные о сечениях реакции (n,2n), содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям с образованием конечных ядер в основных и изомерных состояниях и включить полученные суммы в файл MF=3, сформировав там соответствующую секцию.

Файл MF=10 исключить.

Автор рекомендации

Забродская С.В.

75.10. Рений природный.

Для естественного рения есть только одна оценка 1988 года в FOND2.2, полученная компиляцией двух оценок изотопов Re-185 и Re-187. Автор этой оценки – Николаев М.Н.

Область разрешенных и неразрешенных резонансов для натурального рения получена представлением этих областей последовательно сначала, для Re-185, затем – Re-187.

На рис.1-5 приводится полное сечение Re. Отметим, что экспериментальных данных в EXFOR оказалось больше, чем для отдельных изотопов. Причем энергетическая область, где проводились эксперименты, охватывает практически весь диапазон - от тепловой точки до 15 МэВ.

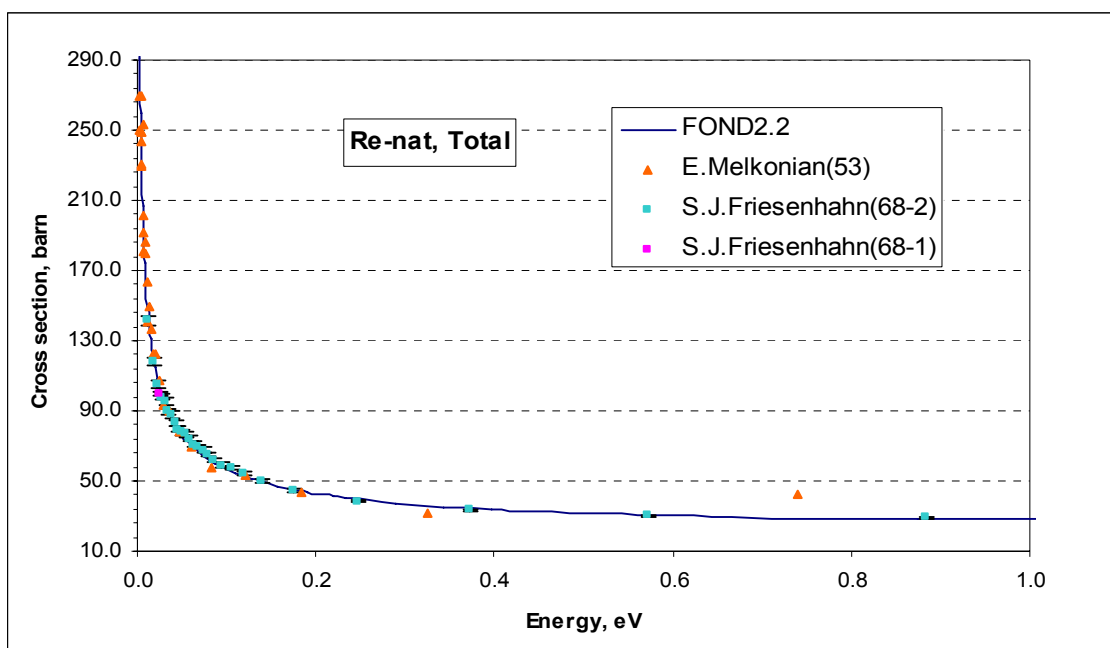


Рис.1

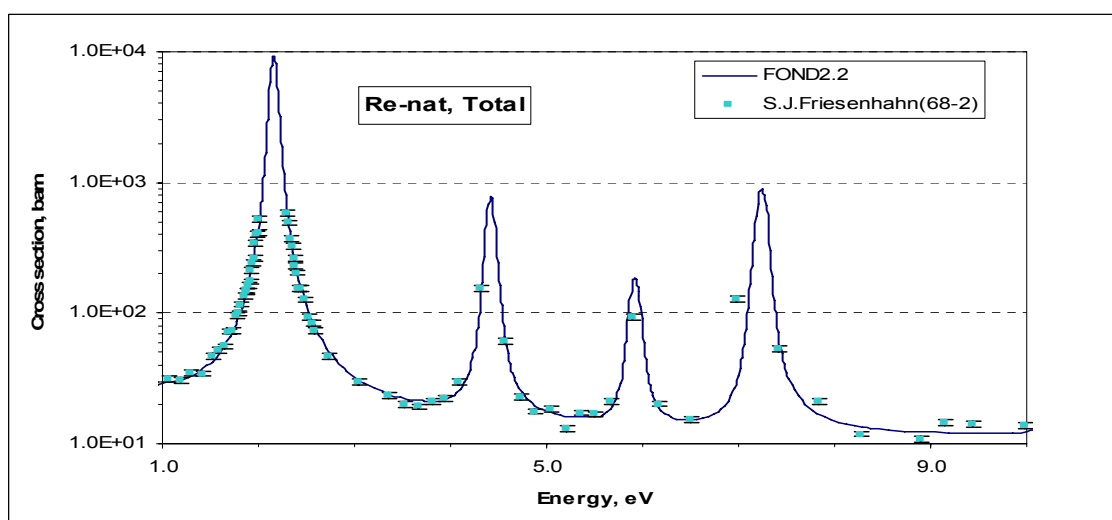


Рис.2

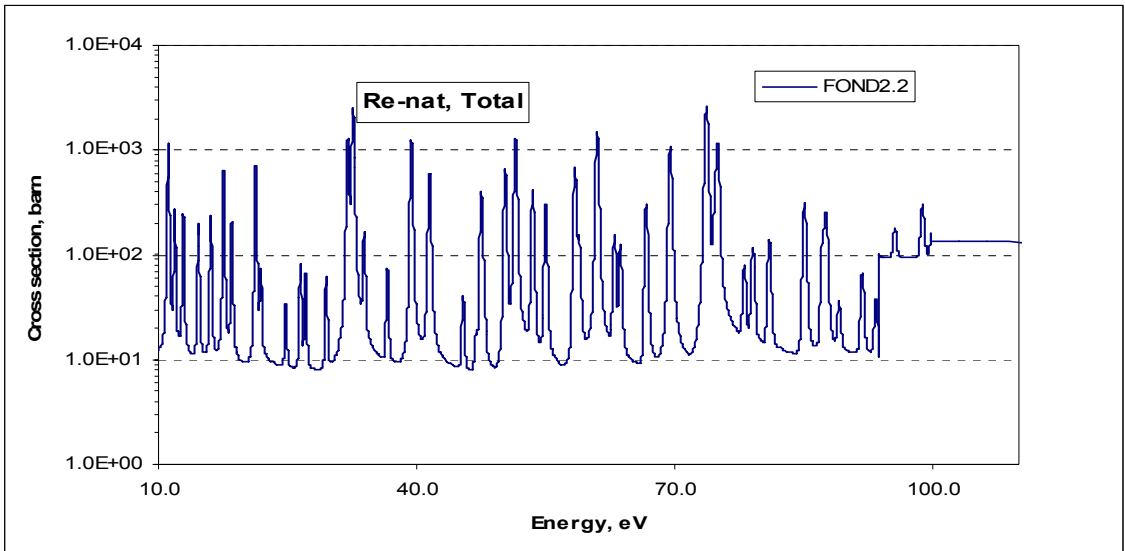


Рис.3

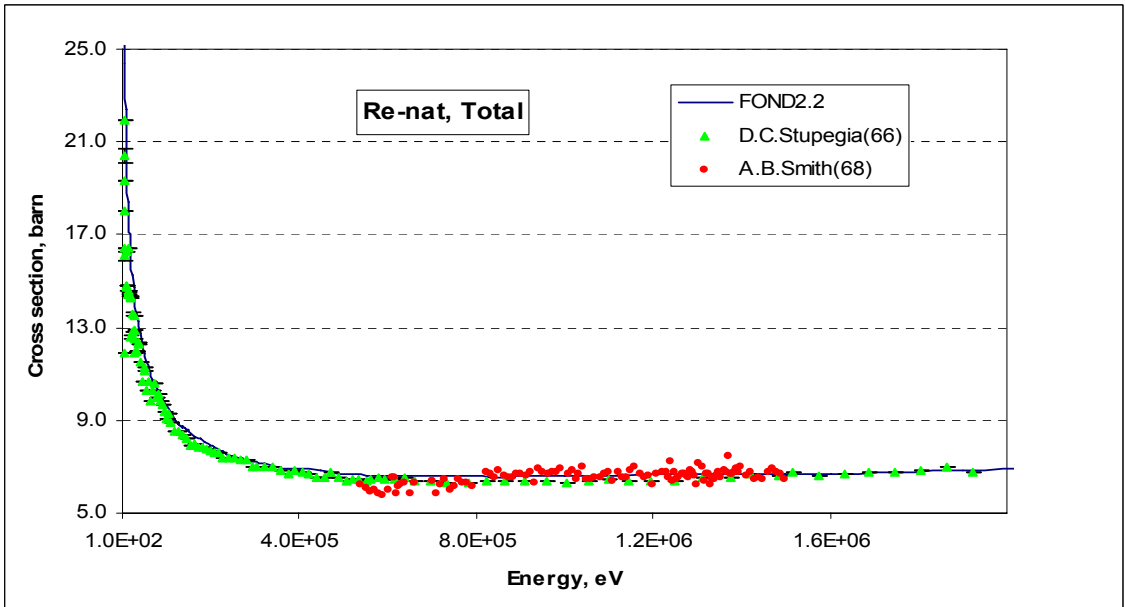


Рис.4

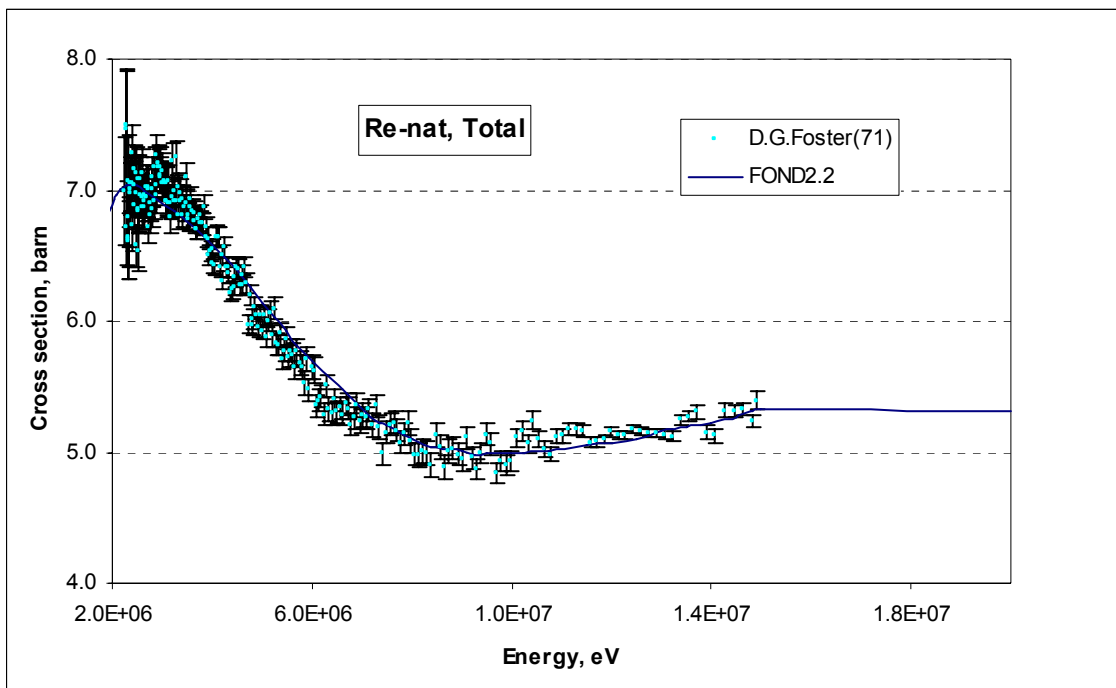


Рис.5

На всех рисунках наблюдается согласие расчетной кривой с экспериментальными данными.

На рис.6-11 приводится отдельно сечение радиационного захвата. Экспериментальных данных для этого сечения тоже довольно много. В тепловой области на рис.6 наблюдается хорошее согласие с экспериментами и в тепловой точке и дальше до 1 эВ.

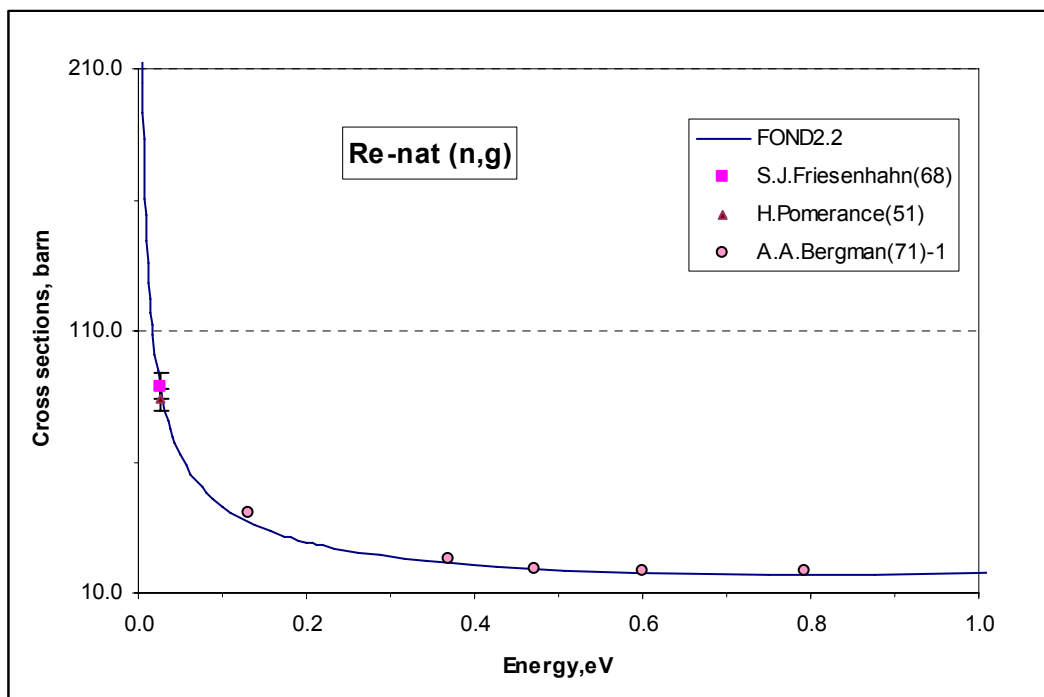


Рис.6

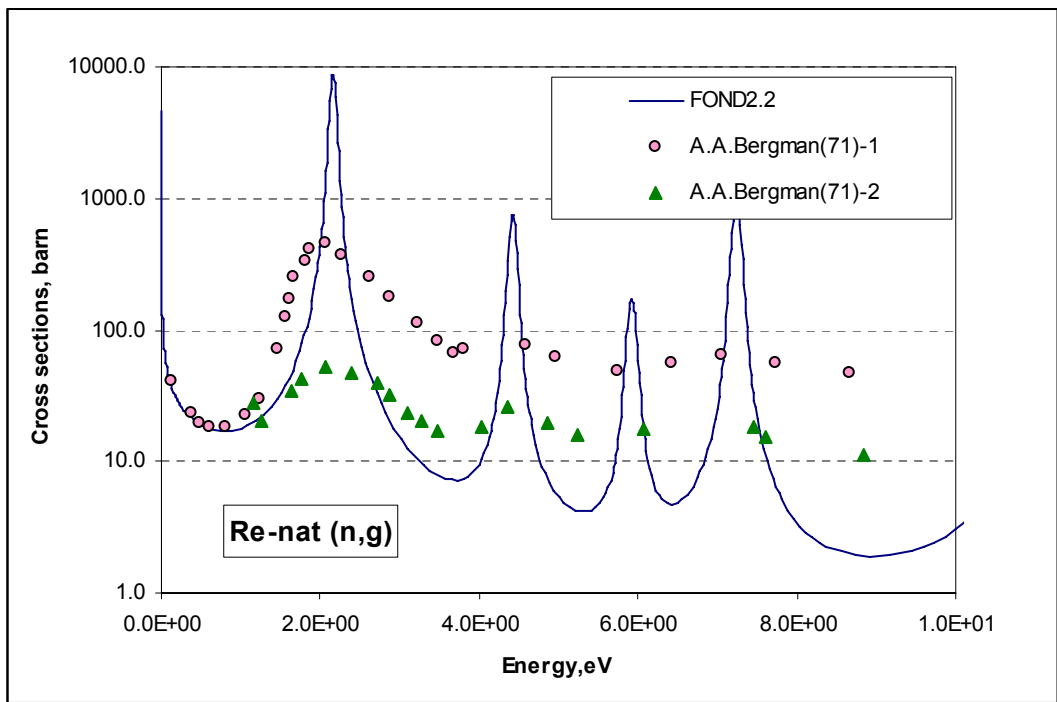


Рис.7

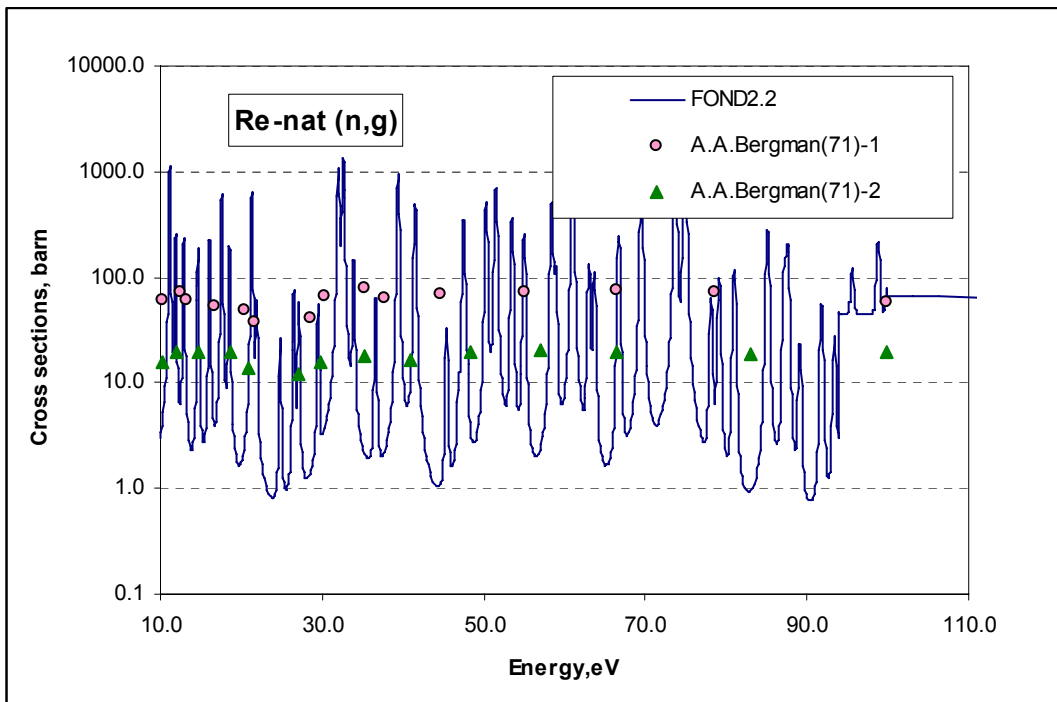


Рис.8

На рис.7,8 до 100 эВ есть два эксперимента А.А.Вегман(1971). Они проводились для образцов одного состава, но разной толщины. В первом толщина образца составляла $0.5e21$ атом/см², во втором – $14.5e21$ атом/см².

На рис. 9-11 до 20 МэВ приводится много экспериментов, но в качестве основного для оценки выбраны данные R.L.Maclin(1987).

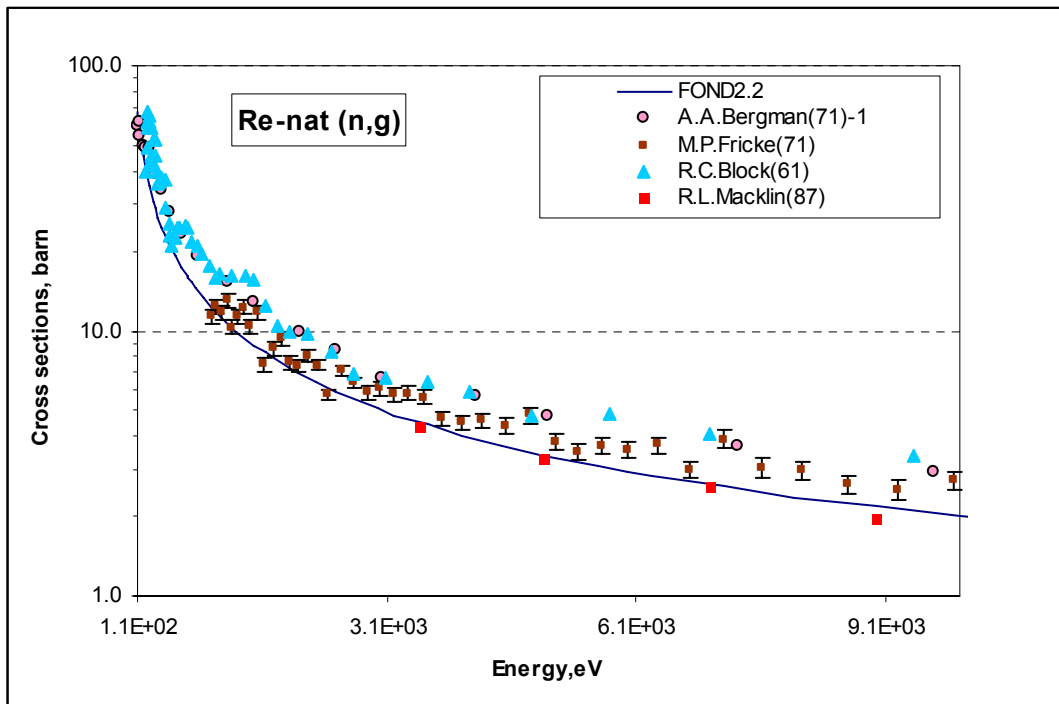


Рис.9

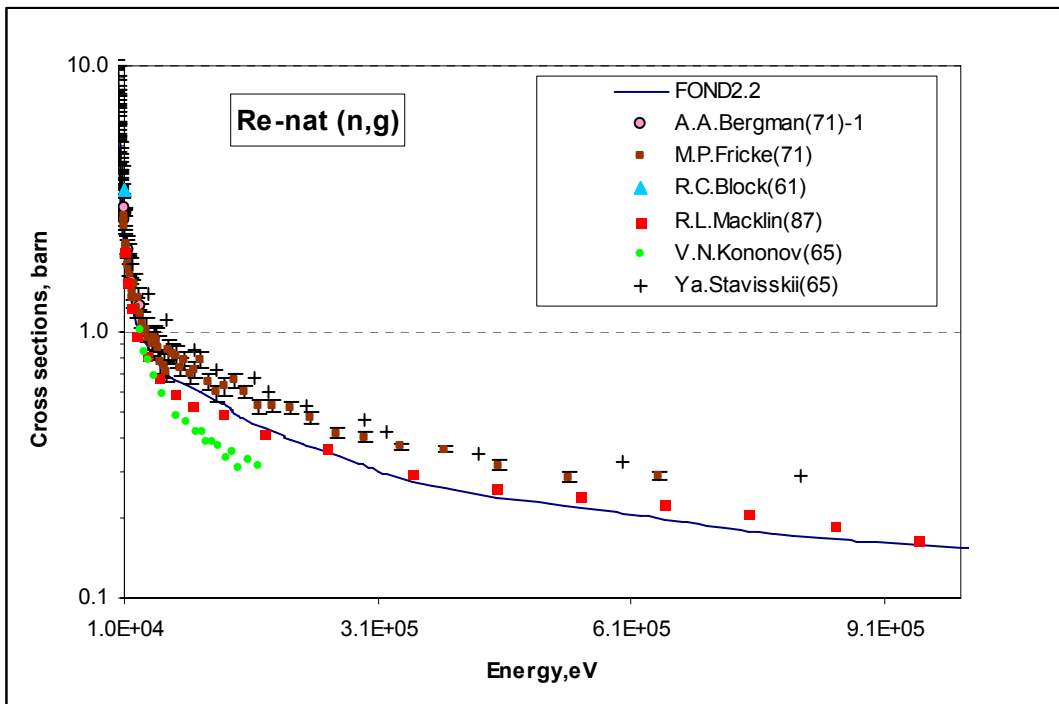


Рис.10

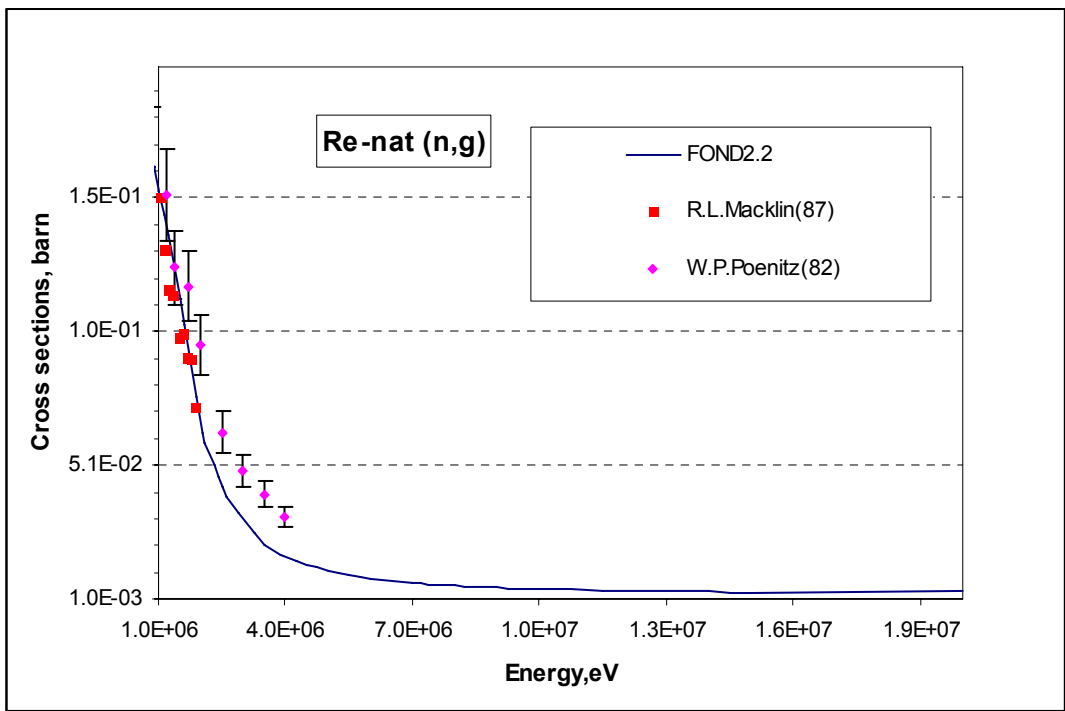


Рис.11

Заключение

Из анализа и сравнения данных оценки FOND2.2 и экспериментов можно сделать вывод, как о качественной и надежной оценки. Однако, для РОСФОНДа файлы изотопов было решено взять из ENDF/B-7, как более современные оценки. И на будущее естественно было бы получить натуральный материал из этих оценок.

На рис.12(а-с) приводится сравнение на мультигрупповом (299 групп) уровне полного сечения, полученного из файла Re-nat и его изотопов из ENDF/B-7. Видно, что есть значительные расхождения, особенно в области неразрешенных резонансов.

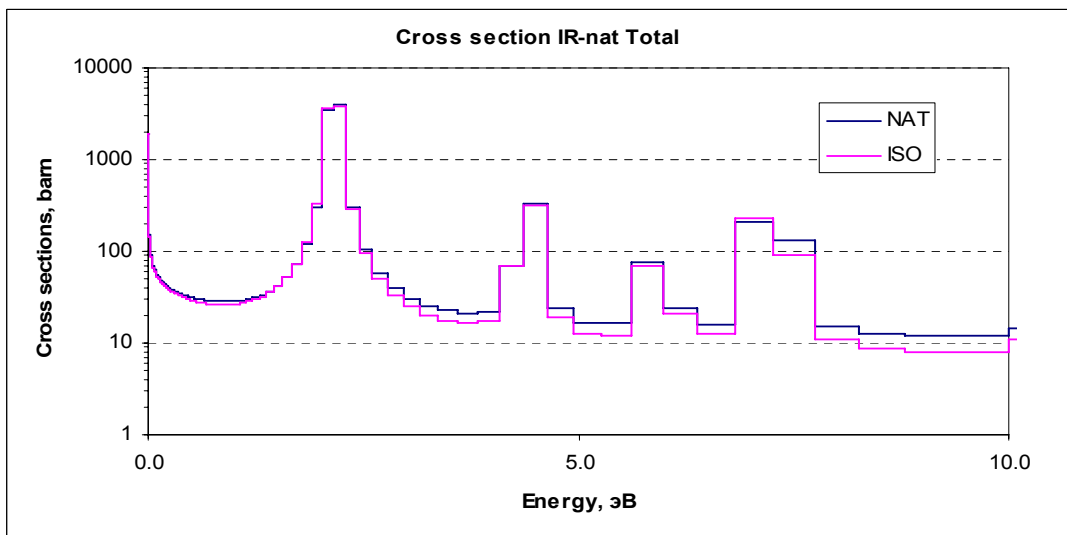


Рис.12а

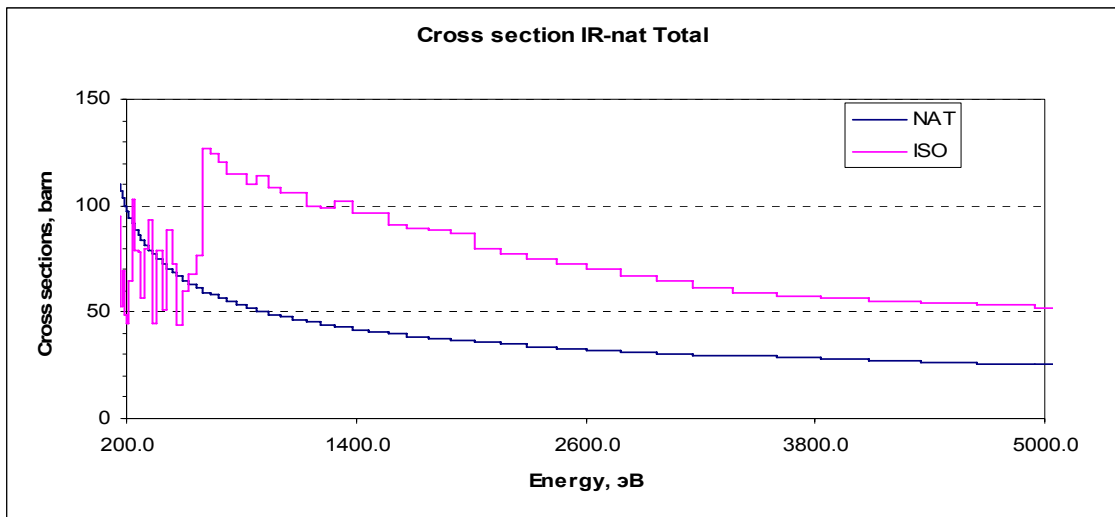


Рис.12b

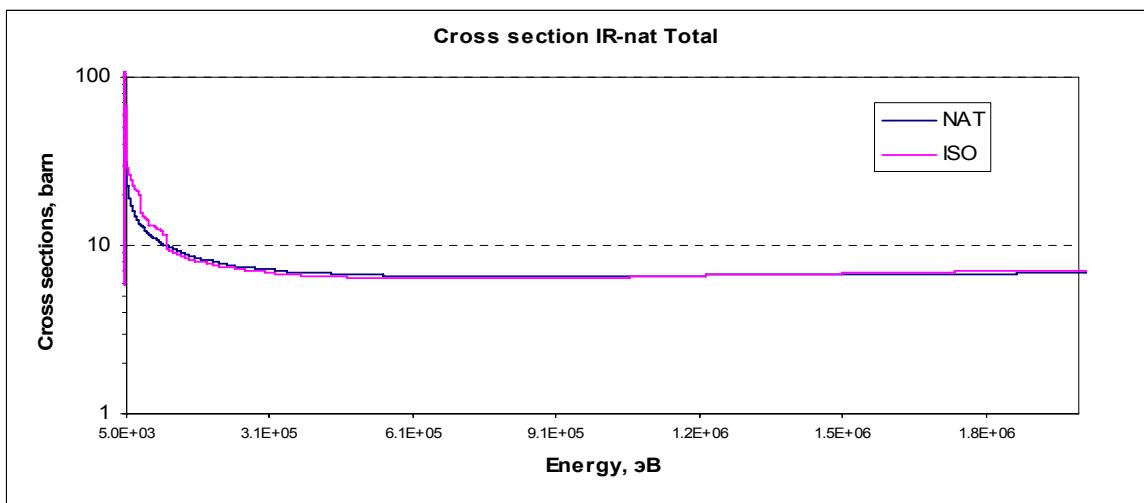


Рис.12c

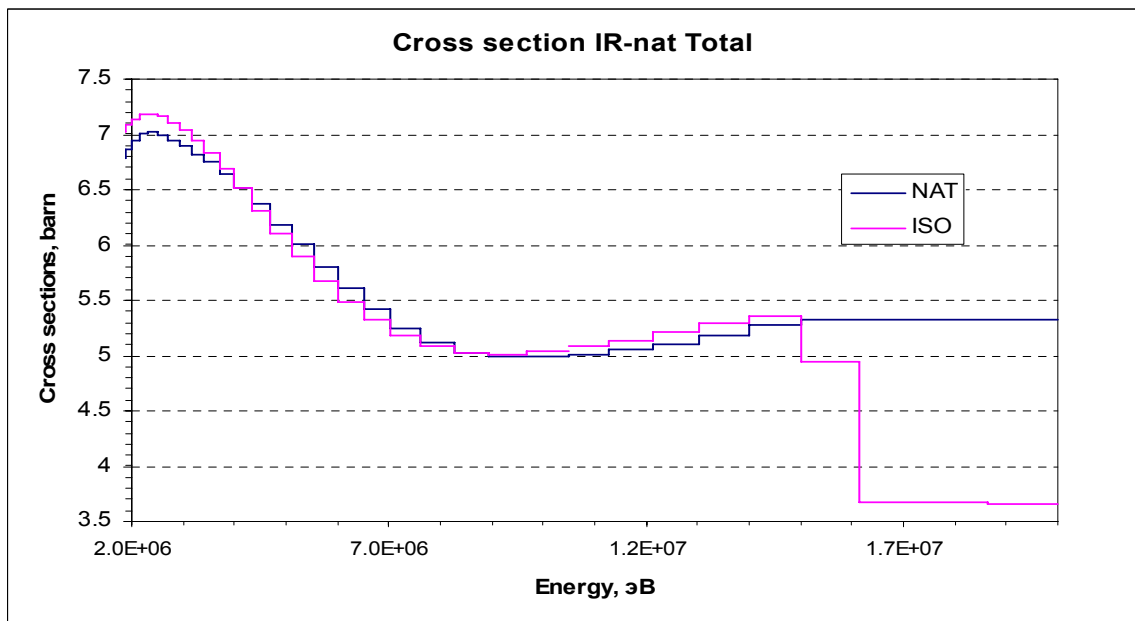


Рис.12d

Сечения основных реакций из FOND2.2 на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице.

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) |
|------------------------------------|--------|---------|-----------|--------|---------|----------------|
| 0.0253 эВ | 103.5 | 14.0 | | | | 89.4 |
| Резонансный интеграл | 1164.2 | 336.1 | | | | 828.0 |
| Спектр деления ^{235}U | 6.82 | 4.69 | 2.00 | 0.01 | 4.2E-05 | 0.13 |
| 14 МэВ | 5.23 | 2.71 | 0.88 | 1.60 | 0.04 | 3.7E-03 |

В РОСФОНД файл Re-nat не включается.

Автор рекомендации
Забродская С.В.

76. ОСМИЙ

В РОСФОНДе должны были бы быть приведены полные наборы нейтронных данных 7 стабильных изотопов осмия и данные о сечениях нейтронных реакций для 5 долгоживущих радиоактивных изотопов. К сожалению, в современных библиотеках нейтронных данных общего пользования нейтронные данные для отдельных изотопов отсутствуют, а для природного осмия существует лишь одна оценка Николаева М.Н. и Забродской С.В., выполненная в 1990 г для библиотека ФОНД-2.2, но принятая также и в JEFF-3.1.

76.1. Осмий-184

Содержание в естественной смеси 0.02%. Как отмечалось, полных оценок нейтронных данных не имеется. В ФОНД-2.2 содержалась оценка Николаева М.Н. и Забродской С.В. 1990 г. Оценка EAF-2003 представляется более надежной.

Заметим, что в файле данных для природного осмия содержится подсекция секции MT-151 файла MF-2 с описанием связанного состояния.

На рис. 1 оцененные сечения захвата сравниваются с единственным экспериментальным результатом.

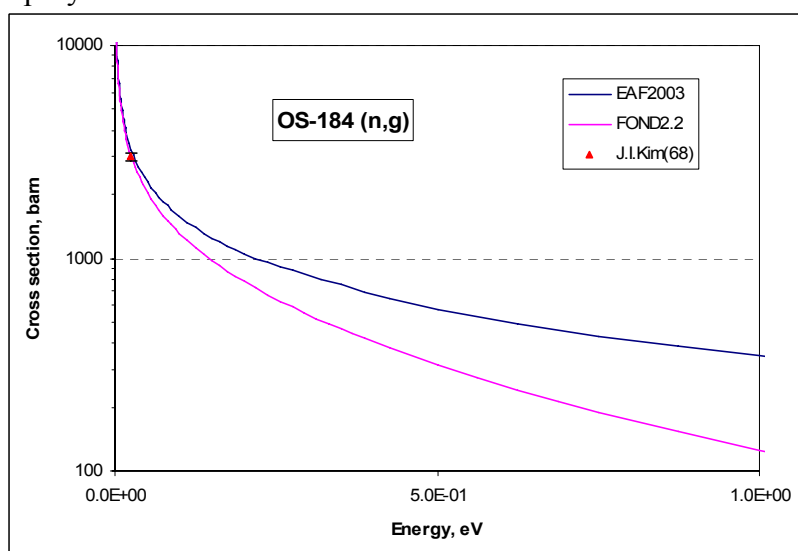


Рис.1. Сечение радиационного захвата.

Заключение

В РОСФОНД включается файл данных из EAF-2003, из которого исключены данные об образовании короткоживущих изомеров.

Авторы заключения

Забродская С.В. и Николаев М.Н.

76.2. Осмий-185

Радиоактивен ($T_{1/2}=93.6$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона превращается в стабильный ^{181}Ta . Полных оценок нейтронных данных не имеется. В ФОНД-2.2 содержалась оценка из EAF-3 1992 г. Оценка EAF-2003 представляется более надежной.

Заключение

В РОСФОНД включается файл данных из EAF-2003, из которого исключены данные об образовании короткоживущих изомеров.

Автор заключения

Николаев М.Н.

76.3. Осмий-186

Содержание в естественной смеси 1.59%. Как отмечалось, полных оценок нейтронных данных не имеется. В ФОНД-2.2 содержалась оценка Николаева М.Н. и Забродской С.В. 1990 г. Оценка EAF-2003 представляется более надежной.

Заметим, что в файле данных для природного осмия содержится подсекция секции MT-151 файла MF-2 с описанием связанного состояния и 128 резонансов с энергиями до 3354 эВ.

На рис. 1 оцененные сечения захвата сравниваются с экспериментальными данными, которые, очевидно, не учитывались при оценке. В РОСФОНДе введена коррекция сечения сечения захвата, показанная на рис. 1

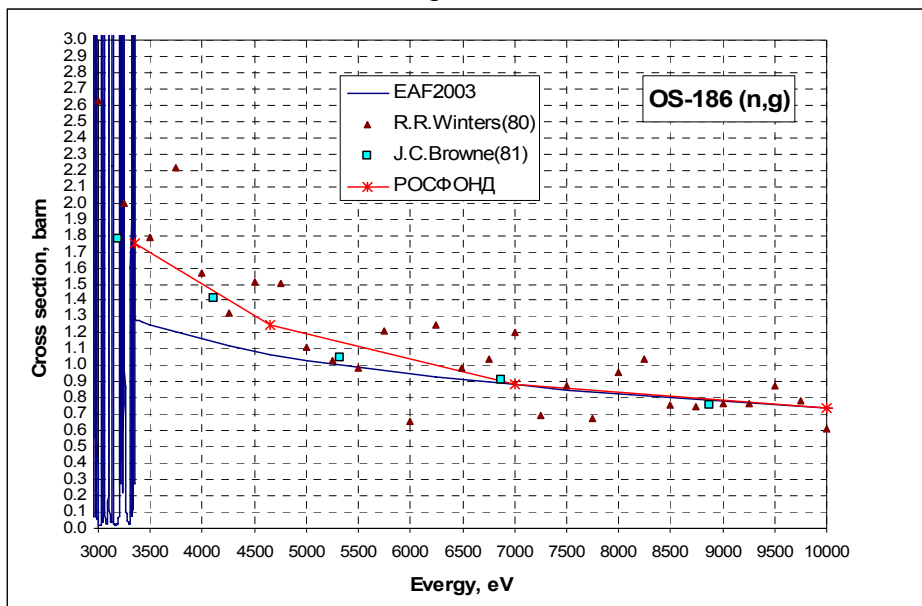


Рис.1а. Сечение радиационного захвата.

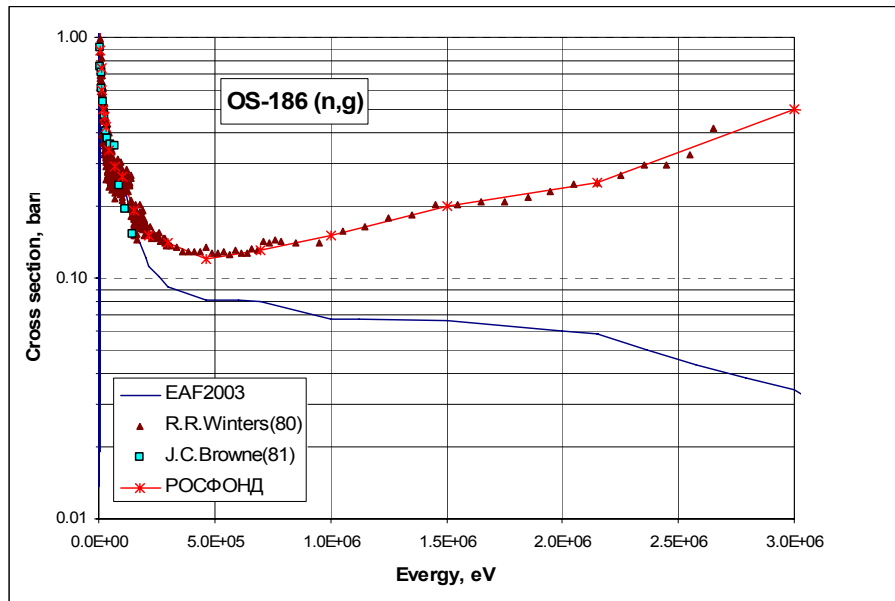


Рис.1б. Сечение радиационного захвата.

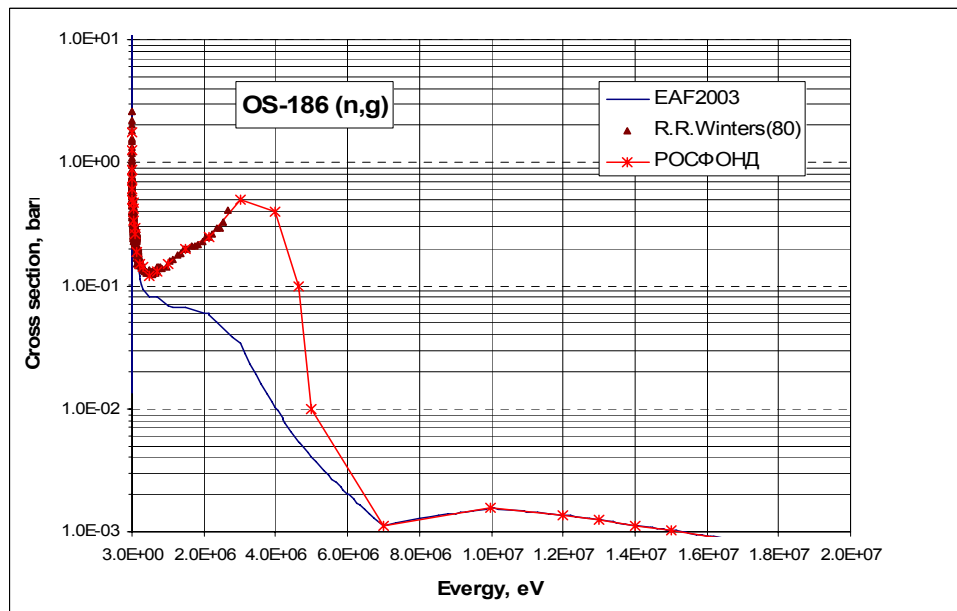


Рис.1в. Сечение радиационного захвата.

На рис. 2 Оцененное сечение реакции (n,2n) сравнивается с результатами экспериментов. Согласие можно считать удовлетворительным.

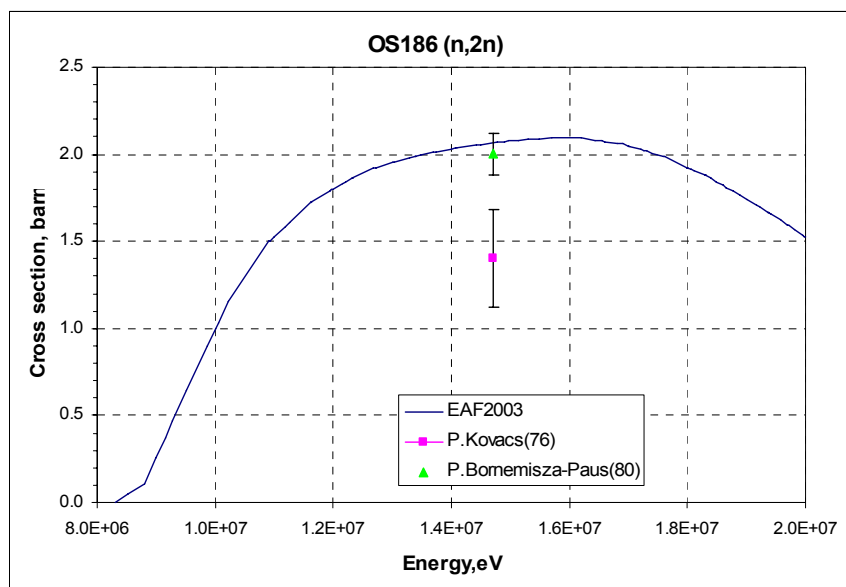


Рис. 2. Сечение реакции (n,2n)

Заключение

В РОСФОНД включается файл данных из EAF-2003, из которого исключены данные об образовании короткоживущих изомеров.

Авторы заключения

Забродская С.В. и Николаев М.Н.

76.4. Осмий-187

Содержание в естественной смеси 1.6%. Как отмечалось, полных оценок нейтронных данных не имеется. В ФОНД-2.2 содержалась оценка Николаева М.Н. и Забродской С.В. 1990 г. Оценка EAF-2003 представляется более надежной.

Заметим, что в файле данных для природного осмия содержится подсекция секции MT-151 файла MF-2 с описанием связанного состояния и 176 резонансов с максимальной энергией 989.1 эВ.

Вне резонансной области экспериментальных данных для этого изотопа осмия в EXFORe не обнаружено.

Заключение

В РОСФОНД включается файл данных из EAF-2003 с откорректированным сечением захвата, из которого исключены данные об образовании короткоживущих изомеров.

Авторы заключения

Забродская С.В. и Николаев М.Н.

76.5. Осмий-188

Содержание в естественной смеси 13.29%. Как отмечалось, полных оценок нейтронных данных не имеется. В ФОНД-2.2 содержалась оценка Николаева М.Н. 1990 г. Оценка EAF-2003 представляется более надежной.

Заметим, что в файле данных для природного осмия содержится подсеция секции MT-151 файла MF-2 с описанием связанного состояния и 101 резонанса с энергиями до 4959.3 эВ.

На рис. 1 оцененные сечения захвата сравниваются с экспериментальными данными, которые, очевидно, не учитывались при оценке. В РОСФОНДе введена коррекция сечения захвата, показанная на рис. 1

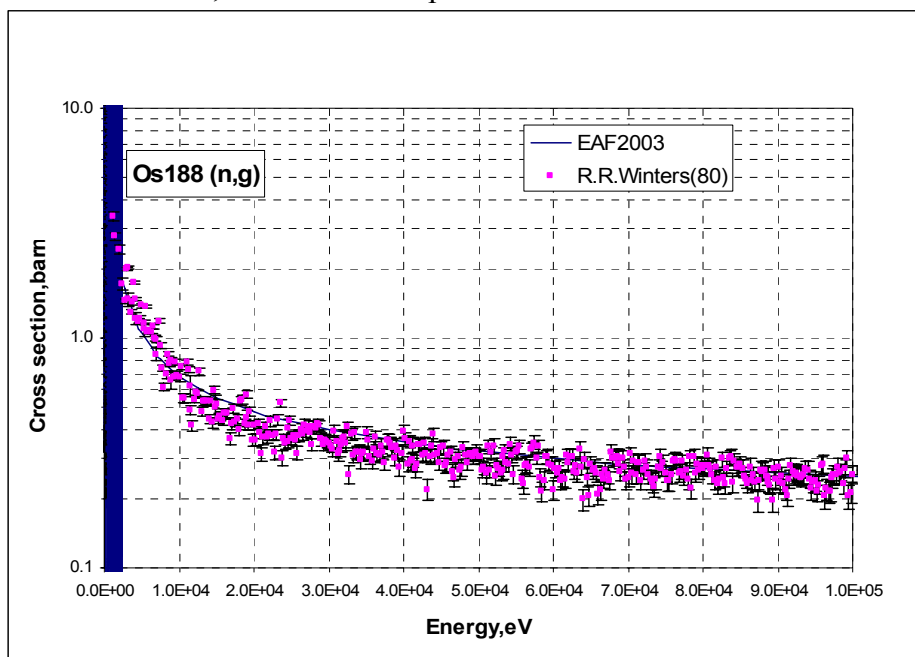


Рис.1а. Сечение радиационного захвата.

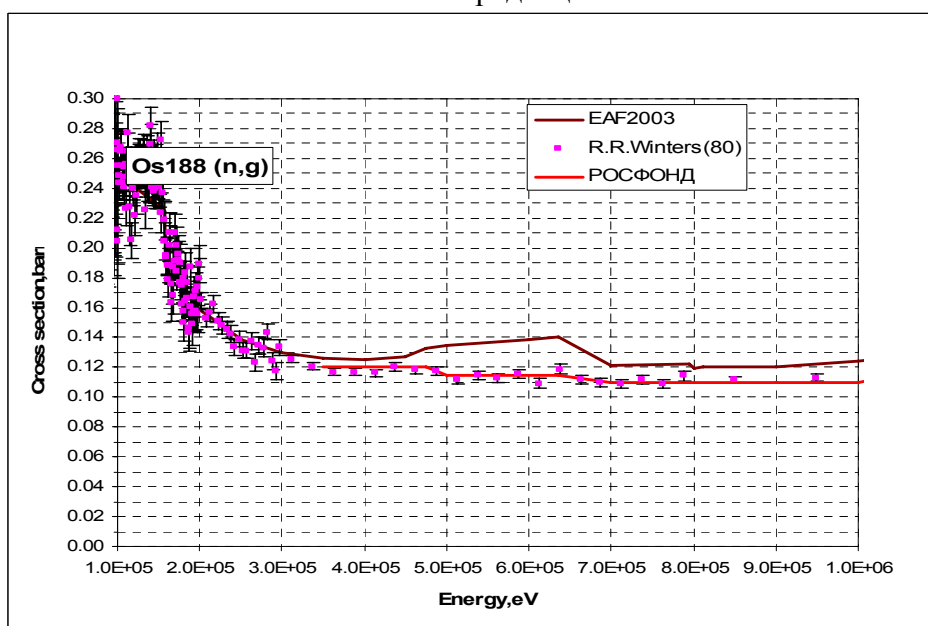


Рис.1б. Сечение радиационного захвата.

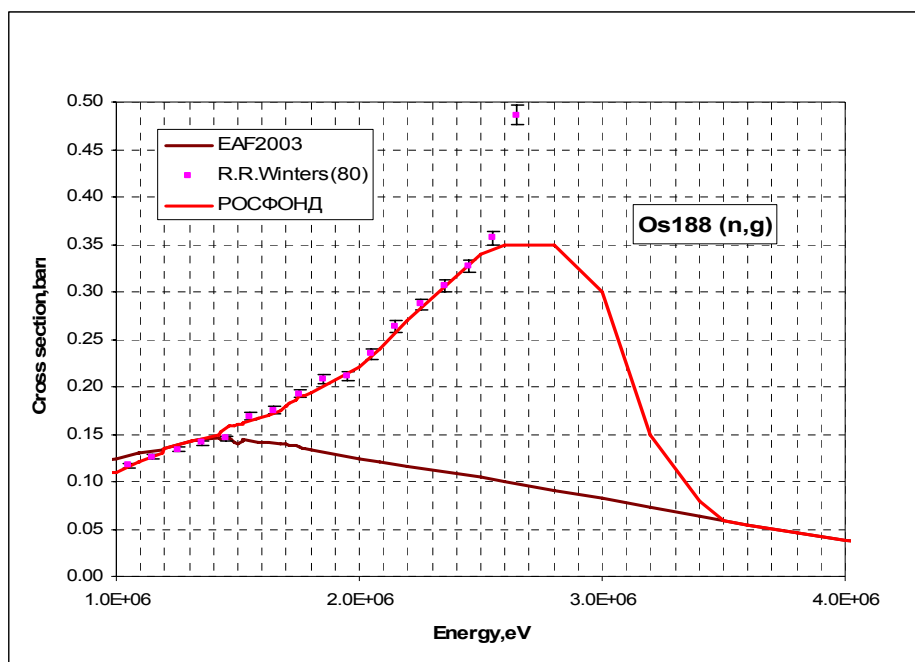


Рис.1в. Сечение радиационного захвата.

Заключение

В РОСФОНД включается файл данных из EAF-2003 с откорректированным сечением захвата, из которого исключены данные об образовании короткоживущих изомеров.

Авторы заключения

Забродская С.В. и Николаев М.Н.

76.6. Осмий-189

Содержание в естественной смеси 16.1%. Как отмечалось, полных оценок нейтронных данных не имеется. В ФОНД-2.2 содержалась оценка Николаева М.Н. 1990 г. Оценка EAF-2003 является более надежной.

Из рис.1 видно, что по сечению радиационного захвата наблюдается полное согласие двух оценок и экспериментальных данных J.C.Browne(1981).

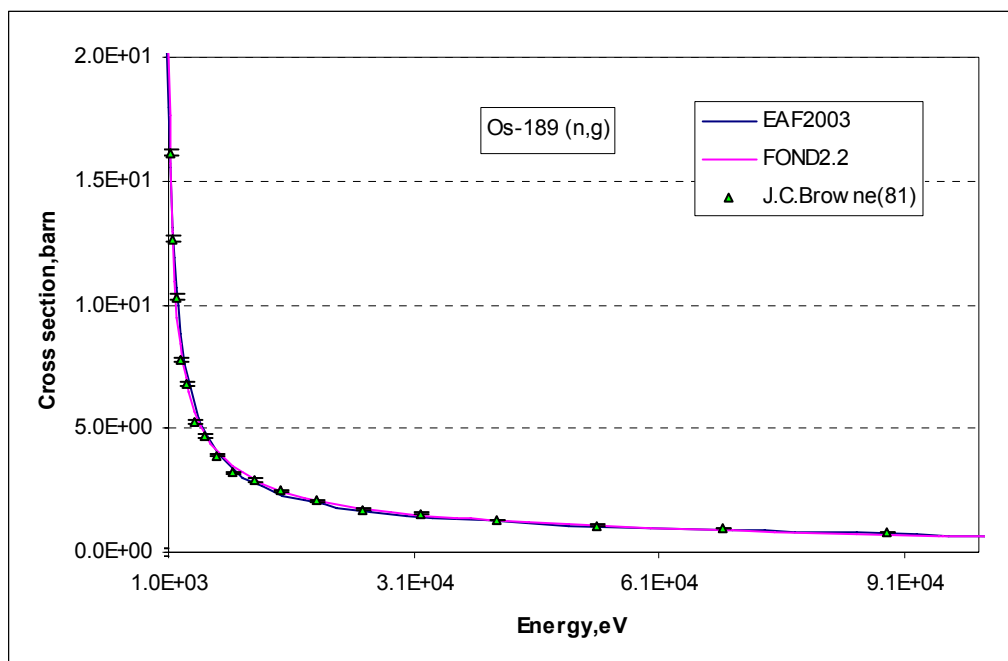


Рис.1. Сечение радиационного захвата.

Заключение

В РОСФОНД включается файл данных из EAF-2003, из которого исключены данные об образовании короткоживущих изомеров.

Авторы заключения

Забродская С.В. и Николаев М.Н.

MT = 4 суммарное сечение неупругого рассеяния

76.7. Осмий-190

Содержание в естественной смеси 26.4%. Как отмечалось, полных оценок нейтронных данных не имеется. В ФОНД-2.2 содержалась оценка Николаева М.Н. 1990 г. Оценка EAF-2003 является более надежной.

На рис.1 приведена область тепловой точки.

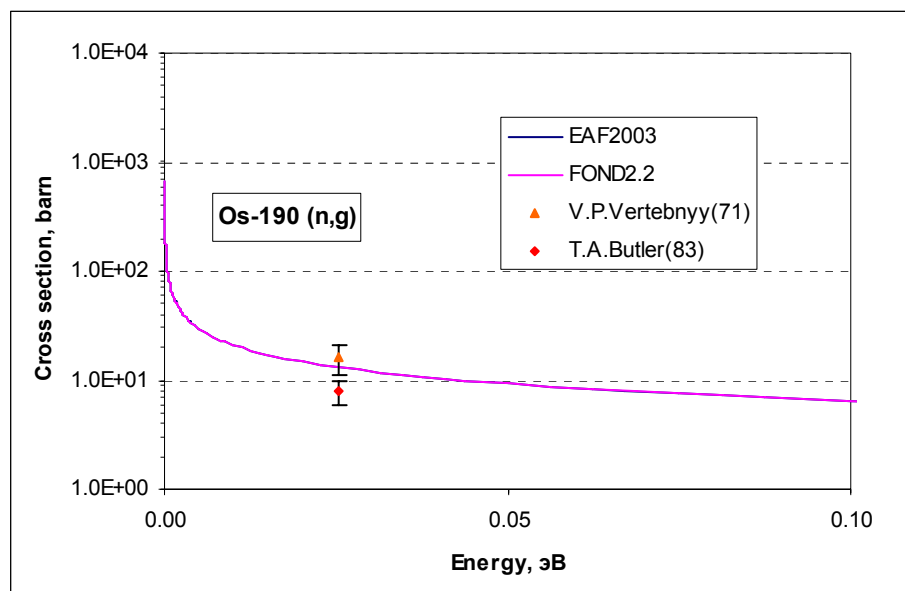


Рис.1. Сечение радиационного захвата.

Заключение

В РОСФОНД включается файл данных из EAF-2003, из которого исключены данные об образовании короткоживущих изомеров.

Авторы заключения

Забродская С.В. и Николаев М.Н.

76.8. Осмий-191

Радиоактивен ($T_{1/2}=15.4$ дн.). Испытывая β -распад в Ir^{191} . Полных оценок нейтронных данных не имеется. В ФОНД-2.2 содержалась оценка из EAF-3 1992 г. Оценка EAF-2003 представляется более надежной.

Заключение

В РОСФОНД включается файл данных из EAF-2003, из которого исключены данные об образовании короткоживущих изомеров.

Автор заключения

Забродская С.В. и Николаев М.Н.

76.9. Осмий-192

Содержание в естественной смеси 41.0%. Как отмечалось, полных оценок нейтронных данных не имеется. В ФОНД-2.2 содержалась оценка Николаева М.Н. 1990 г. Оценка EAF-2003 является более надежной.

На рис. 1 оцененные сечения захвата сравниваются с экспериментальными данными. Видно, что две оценки совпадают.

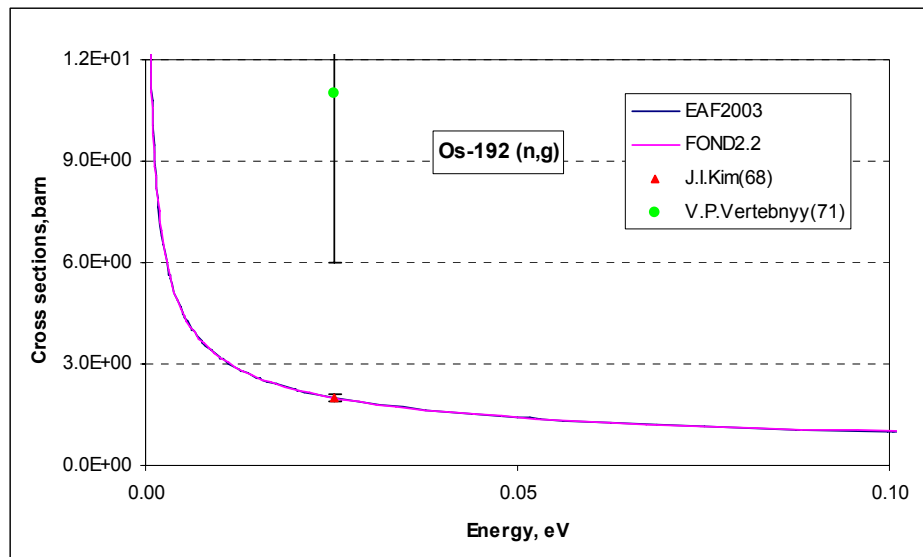


Рис.1а.Сечение радиационного захвата.

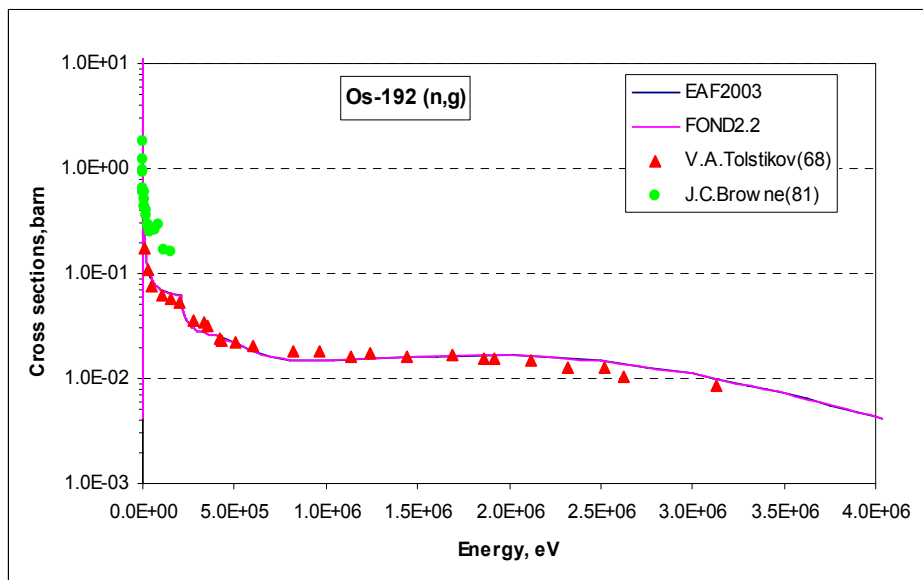


Рис.1б.Сечение радиационного захвата.

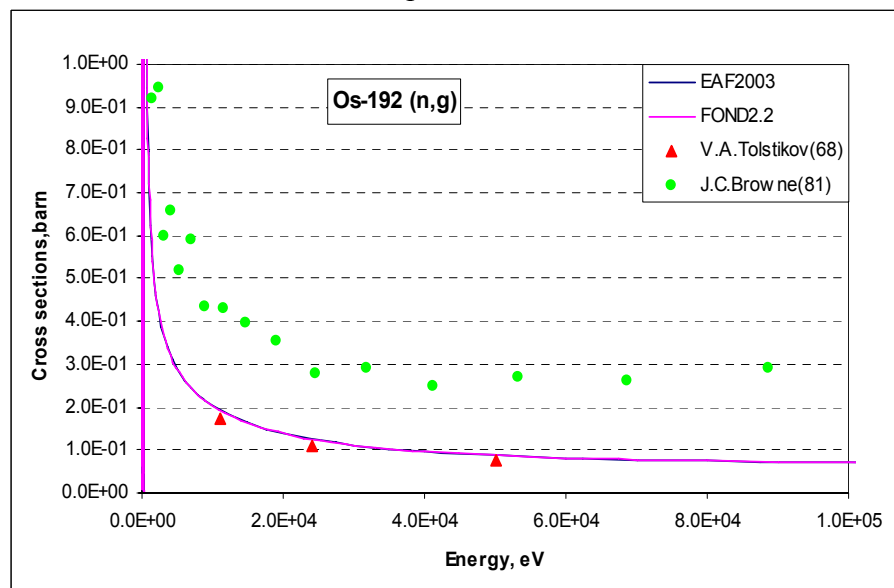


Рис.1с. Сечение радиационного захвата.

На рис.1с видно, что сильно расходятся экспериментальные данные В.А.Толстикова и J.C.Browne.

Заключение

В РОСФОНД включается файл данных из EAF-2003, из которого исключены данные об образовании короткоживущих изомеров.

Автор заключения

Забродская С.В. и Николаев М.Н.

76.10. Осмий-193

Радиоактивен ($T_{1/2}=1.25$ дн.). Испытывая β -распад в Ir^{193} . Полных оценок нейтронных данных не имеется. В ФОНД-2.2 содержалась оценка из EAF-3 1992 г. Оценка EAF-2003 представляется более надежной.

Заключение

В РОСФОНД включается файл данных из EAF-2003, из которого исключены данные об образовании короткоживущих изомеров.

Автор заключения

Забродская С.В. и Николаев М.Н.

76.11. Осмий природный

В оценке М.Н.Николаева и С.В.Забродской в секции резонансных параметров приводится информация о резонансах каждого из 7-ми стабильных изотопов и для каждого из них определена своя граница области разрешенных резонансов (см. табл. 1)

Таблица 1. Области разрешенных резонансов для стабильных изотопов осмия

| Изотоп | Содержание | Число наблюдавшихся резонансов | Связанное состояние | Граница области разрешенных резонансов | Максимальная энергия наблюдавшегося резонанса | Число «фиктивных» резонансов |
|---------------|------------|--------------------------------|---------------------|--|---|------------------------------|
| Os-184 | 0.02% | - | -1 эВ | 160 эВ | - | - |
| Os-186 | 1.59% | 128 | -8 эВ | 3360 эВ | 3354.эВ | 5 |
| Os-187 | 1.6% | 176 | -1.24 эВ | 990 эВ | 989.1 эВ | 5 |
| Os-188 | 13.29% | 101 | -100 эВ | 5000 эВ | 4959.3 | 5 |
| Os-189 | 16.21% | 21 | -5.25 эВ | 77 эВ | 75.2 эВ | 5 |
| Os-190 | 26.36% | 2 | -9.99 эВ | 150 эВ | 145 эВ | 4 |
| Os-192 | 40.93% | 2 | -92.9 эВ | 150 эВ | 127.5 эВ | 1 |

Резонансные параметры приняты в соответствии с известной рекомендацией Мухабхаба (1981), не изменившейся и в издании 2006 г. Приняты во внимание вклады нескольких дополнительных резонансов, лежащих за пределами области разрешенных резонансов. Параметры этих резонансов были выбраны из статистических соображений. Знание резонансных параметров позволило рассчитать вклады каждого изотопа в суммарные сечения при тепловой энергии. Полученные результаты приводятся в таблице

2 в сравнении с рекомендацией Мухабхаба. Как видно, принятые параметры хорошо воспроизводят рекомендованные данные.

Таблица 2. Сечения при 0.0253 эВ

| Изотоп | Сечение захвата по оценке | Сечение захвата по Мухабхабу | Сечение рассеяния по оценке | Сечение рассеяния по Мухабхабу |
|----------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Os-184 | 3002 | 3000±150 | 108 | - |
| Os-186 | 79 | 80±13 | 14.2 | 18±5. |
| Os-187 | 319 | 320±10 | 10.9 | 10.9±6. |
| Os-188 | 4.8 | 4.7±0.5 | 7.5 | 7.7±0.6 |
| Os-189 | 25.4 | 25±0.4 | 15.3 | 15.5±1.0 |
| Os-190 | 13.1 | 13.1±0.3 | 15.9 | 16.3±0.9 |
| Os-192 | 1.93 | 2.0±0.1 | 17.9 | 17.9±0.6 |
| Os -nat | 15.9 | 16.0±0.4 | 15.4 | 15.0±0.4 |

В интервале от верхней границы области разрешенных резонансов до 100 кэВ сечения каждого изотопа рассчитывались на основе средних резонансных параметров. Выше 100 кэВ нейтронные сечения были оценены на основе имеющихся (главным образом, для основных изотопов) скудных экспериментальных данных и результатов расчетов по теоретическим моделям.

На рис. 1. принятое в оценке полное сечение сравнивается с имеющимися экспериментальными данными.

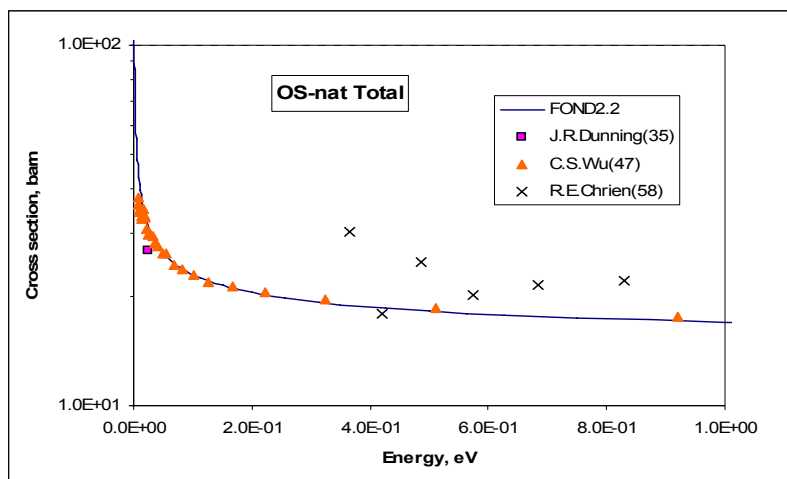


Рис.1а. Полное сечение

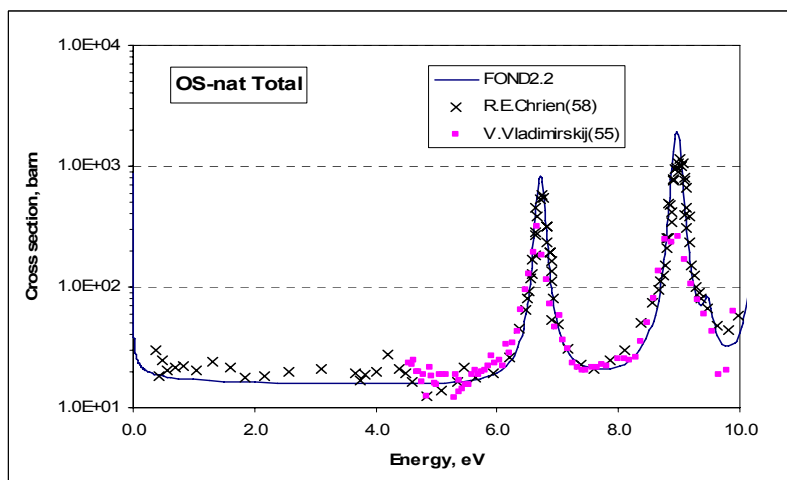


Рис.1б. Полное сечение

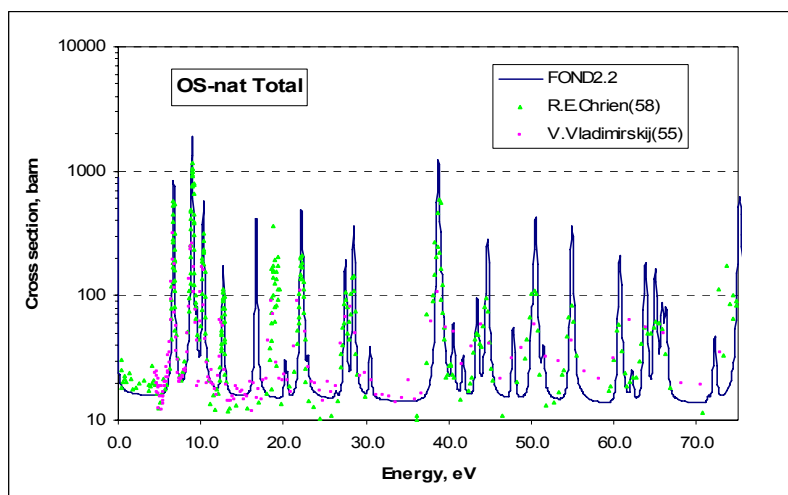


Рис.1в. Полное сечение

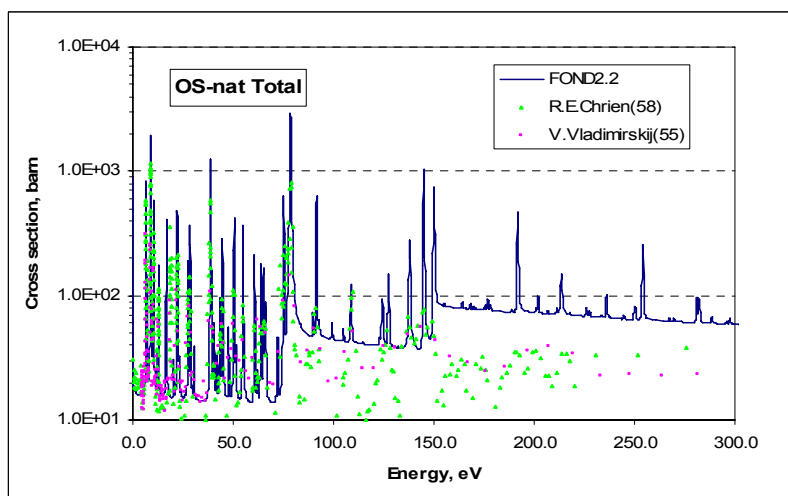


Рис.1 г. Полное сечение.

Видно, что до 77 эВ, т.е. в области, где резонансы всех изотопов разрешены согласно с измерениями полного сечения естественного осмия вполне удовлетворительно. При более высоких энергиях наблюдаются ступеньки в полном сечении, обусловленные статистическим описанием неразрешенных резонансов части изотопов, которое, возможно, не вполне удовлетворительно.

Рекомендация

В РОСФОНД не принимается единственная полная оценка нейтронных данных для природного осмия. Переоценка данных для осмия, несомненно, целесообразна.

Авторы рекомендации

Забродская С.В. и Николаев М.Н.

77. ИРИДИЙ

77.0 Общие замечания

В этом разделе описаны: два стабильных и семь радиоактивных изотопов иридия с периодом полураспада более суток.

77.1. Иридий-188.

Радиоактивен. Испытывая захват орбитального электрона распадается с периодом $T_{1/2}=13.2$ дн. в стабильный осмий-188. Образование этого нуклида в реакторе весьма маловероятно: единственными реакциями, ведущими к его образованию, являются $^{190}\text{Pt}(n,t)$ и $^{190}\text{Pt}(n,nd)$. Напомним, что содержание платины-190 в естественной смеси составляет лишь 0.01%.

Нейтронные сечения для иридия-188 оценены, исходя из теоретических соображений, и содержатся в библиотеке EAF-2003 (оценка 2005 г.).

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из EAF-2003. Данные о сечениях реакций $(n,3n)$, (n,α) и $(n,^3\text{He})$, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям с образованием конечных ядер в основных и изомерных состояниях и включить полученные суммы в файл MF=3, сформировав там соответствующие секции.

Включить файл MF=9 с секциями MT=22, 106 с вероятностями образования рения-184 и рения-186 в основных и долгоживущих изомерных состояниях. Вероятности рассчитать по данным файла MF=10. Сформировать файл MF=9 с секцией MT=22, содержащей вероятности образования. Файл MF=10 исключить.

Автор рекомендации

Забродская С.В.

77.2. Иридий-189.

Радиоактивен. Испытывая захват орбитального электрона, распадается с периодом $T_{1/2}=13.3$ дн. в стабильный осмий-189 (частично – через короткоживущий изомер). Образование этого нуклида в реакторе весьма маловероятно: единственными реакциями, ведущими к его образованию, являются $^{190}\text{Pt}(n,d)$ и $^{190}\text{Pt}(n,np)$. Напомним, что содержание платины-190 в естественной смеси составляет лишь 0.01%.

Нейтронные сечения для иридия-189 оценены, исходя из теоретических соображений, и содержатся в библиотеке EAF-2003 (оценка 2005 г.).

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из EAF-2003. Данные о сечениях реакций (n,p) , (n,α) и $(n,2p)$, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям с образованием конечных ядер в основных и изомерных состояниях, и включить полученные суммы в файл MF=3, сформировав там соответствующие секции.

Включить файл MF=9 с секцией MT=107 с вероятностями образования рения-186 в основном и долгоживущем изомерном состояниях. Вероятности рассчитать по данным файла MF=10. Файл MF=10 исключить.

Автор рекомендации

Забродская С.В.

77.3. Иридий-190г.

Радиоактивен. Испытывая захват орбитального электрона, распадается с периодом $T_{1/2}=11.78$ дн. в стабильный осмий-190. Образование этого нуклида в реакторе весьма маловероятно: единственными реакциями, ведущими к его образованию, являются $^{190}\text{Pt}(n,p)$. Напомним, что содержание платины-190 в естественной смеси составляет лишь 0.01%.

Нейтронные сечения для иридия-190 оценены, исходя из теоретических соображений, и содержатся в библиотеке EAF-2003 (оценка 2005 г.).

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из EAF-2003. Данные о сечениях реакций (n,inl), (n,na), (n,np), (n,p), (n,d) и (n, ^3He), содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям с образованием конечных ядер в основных и изомерных состояниях, и включить полученные суммы в файл MF=3, сформировав там соответствующие секции.

Включить файл MF=9 секцию MT=22 с вероятностями образования в основном и долгоживущем изомерном состояниях. Вероятности рассчитать по данным файла MF=10. Файл MF=10 исключить.

Автор рекомендации

Забродская С.В.

77.4. Иридий-191.

Содержание в естественной смеси 37.3%.

На данный момент существуют оценки Ir-191 в следующих библиотеках:
в FOND2.2 находится оценка М.Н. Николаева, С.В.Забродской 1993 года.
в ENDF/B-7 - оценка из ENDF/B-6 R.Q.WRIGHT, R.R.SPENCER, сделанная 1995 году.
в JEFF3.1 взята оценка из ENDF/B-7.
в EAF2003 - Forrest, Korecky, 2003 (JEFF3.0/A)

В остальных библиотеках файлов для Ir191 нет. Надо отметить, что оценка FOND2.2, была взята за основу во всех остальных библиотеках.

На рис. 1 приводится полное сечение в тепловой области. Видно, что все данные оценок совпадают и согласуются с экспериментальными данными из EXFOR. В тепловой точке – это давний эксперимент Н.Волотин(1959), в тепловой области – экспериментальные данные В.П.Вертебного(1980).

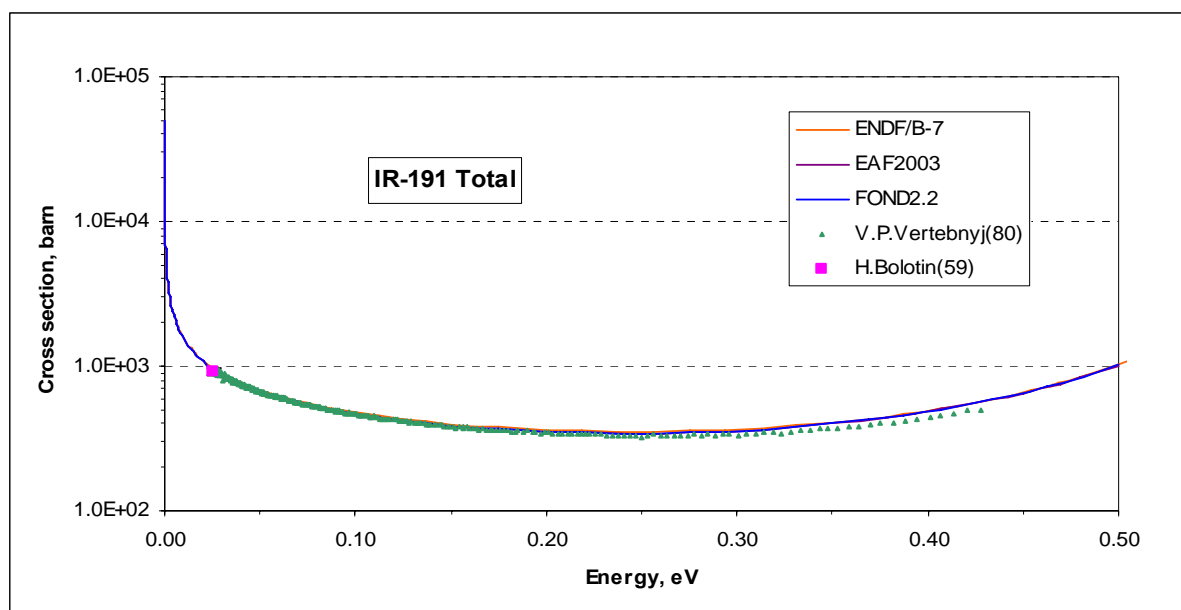


Рис.1 Полное сечение Ir-191

В оценке FOND2.2 до 160 эВ присутствует только область разрешенных резонансов. Параметры разрешенных резонансов для нее были взяты из работы Мухабхаба 1981года. Эта область вошла в оценку ENDF/B-7 без изменений. Но дополнительно была введена область неразрешенных резонансов до 10 КэВ.

На рис.2-9 приводится в деталях сечение радиационного рассеяния в сравнении с экспериментальными данными. На рис.2 представлены экспериментальные данные в тепловой точке, которые не противоречат друг другу и оцененному значению.

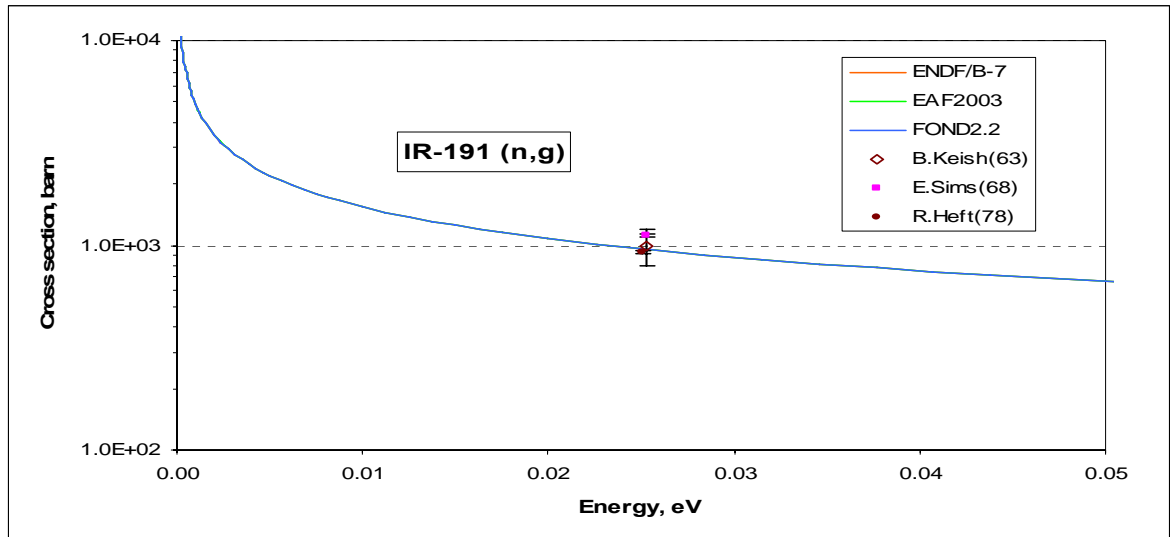


Рис.2

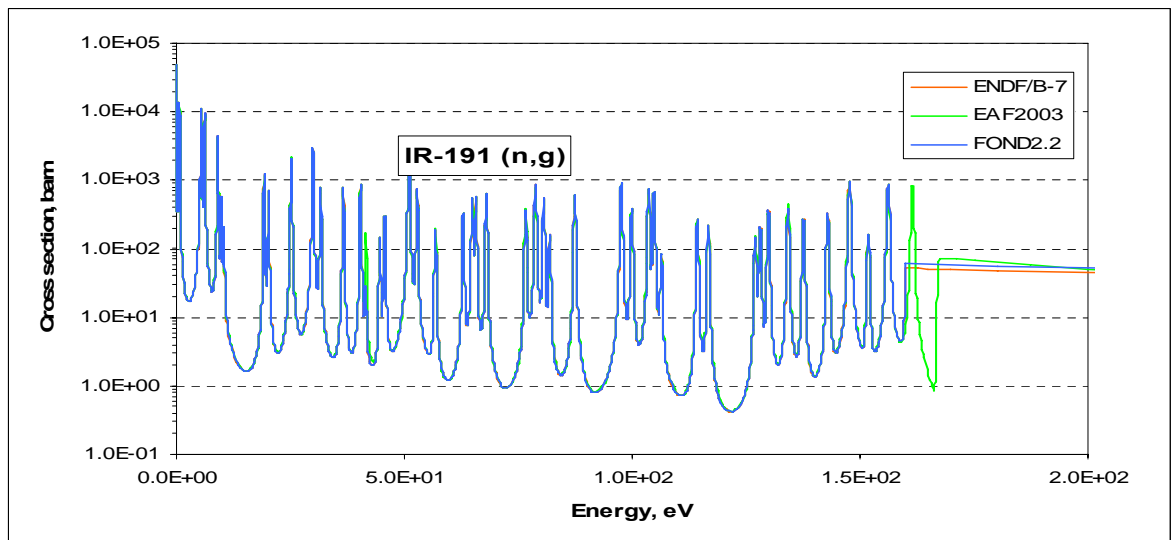


Рис.3

На рис.3 видна граница области разрешенных резонансов в 160 эВ. В этой области нет экспериментальных данных. Экспериментальные данные появляются от 3.5 кэВ, и основным экспериментом по полноте данных является эксперимент R.Macklin(1978). Измерения в этом эксперименте проводились до 1.95 МэВ. На рис.4 и 5 видно, что оцененные данные FOND2.2, ENDF/B-7 и EAF2003 хорошо согласуются с этим экспериментом в области до 100 кэВ. После 100 кэВ оценка EAF2003 резко уходит вниз до 1 МэВ.

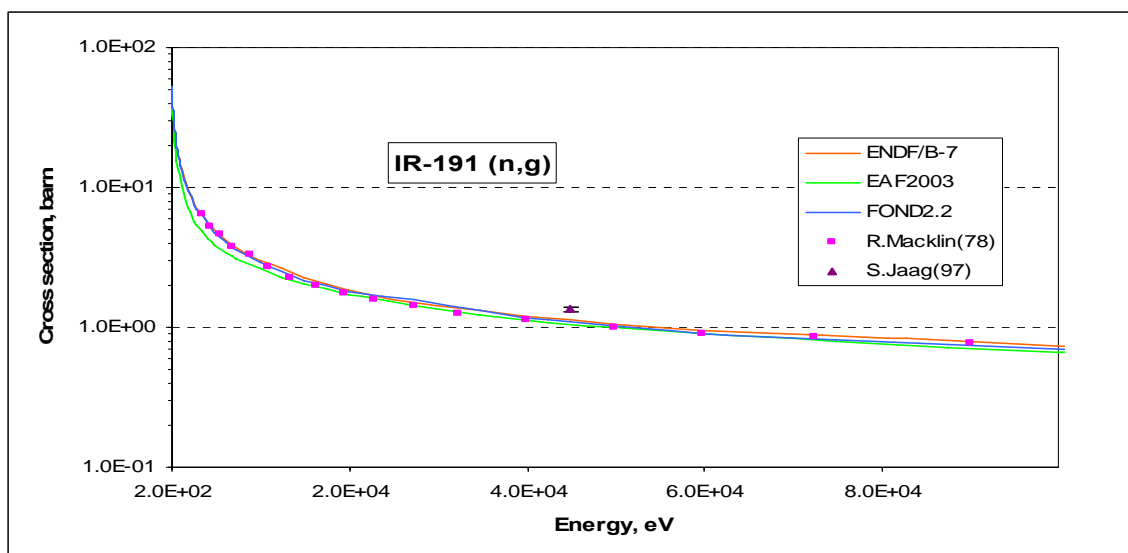


Рис.4

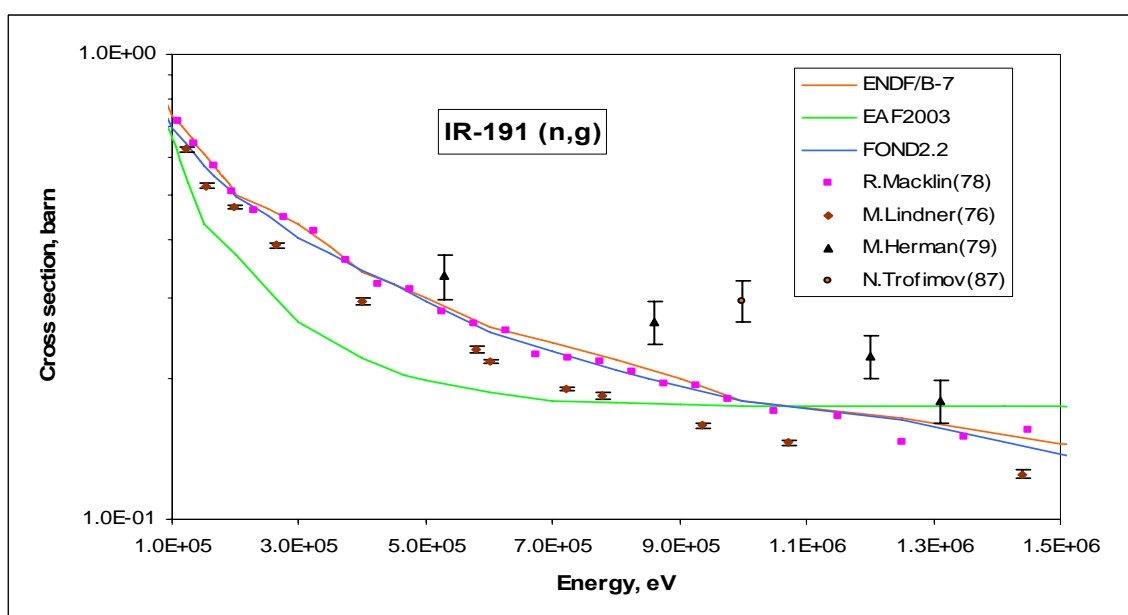


Рис.5

При энергии 1 МэВ начинается расхождение между библиотеками FOND2.2 и ENDF/B-7, которое сохраняется до 20 МэВ. Отметим, что при этом оценка ENDF/B-7 остается в согласии с экспериментом R.Macklin(1978)(рис.6).

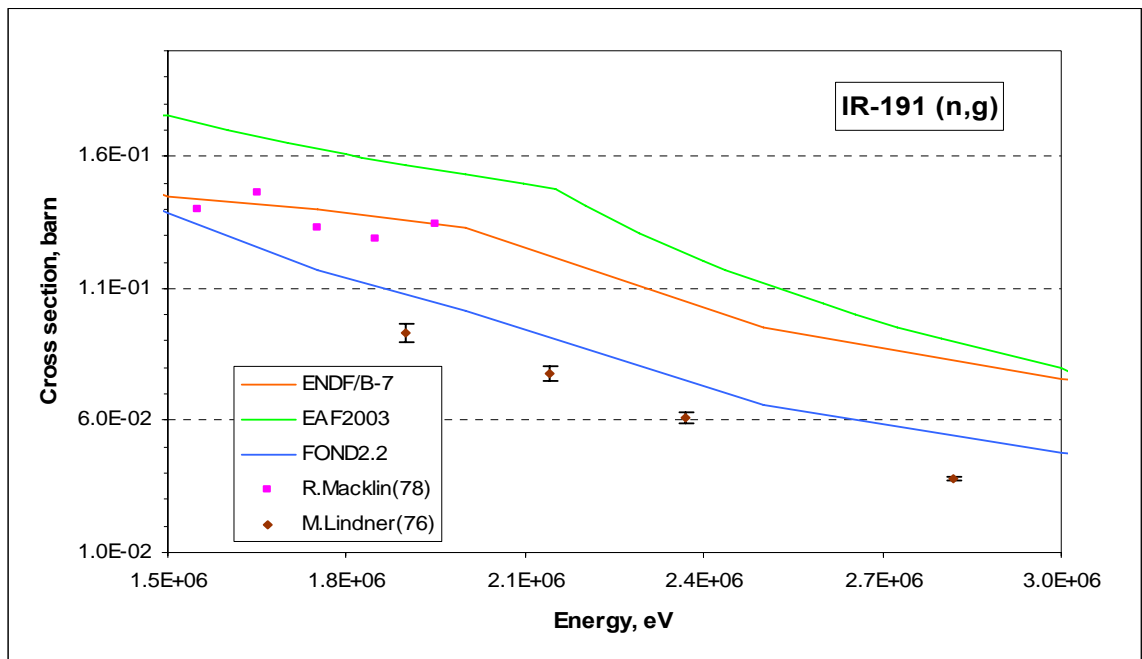


Рис.6

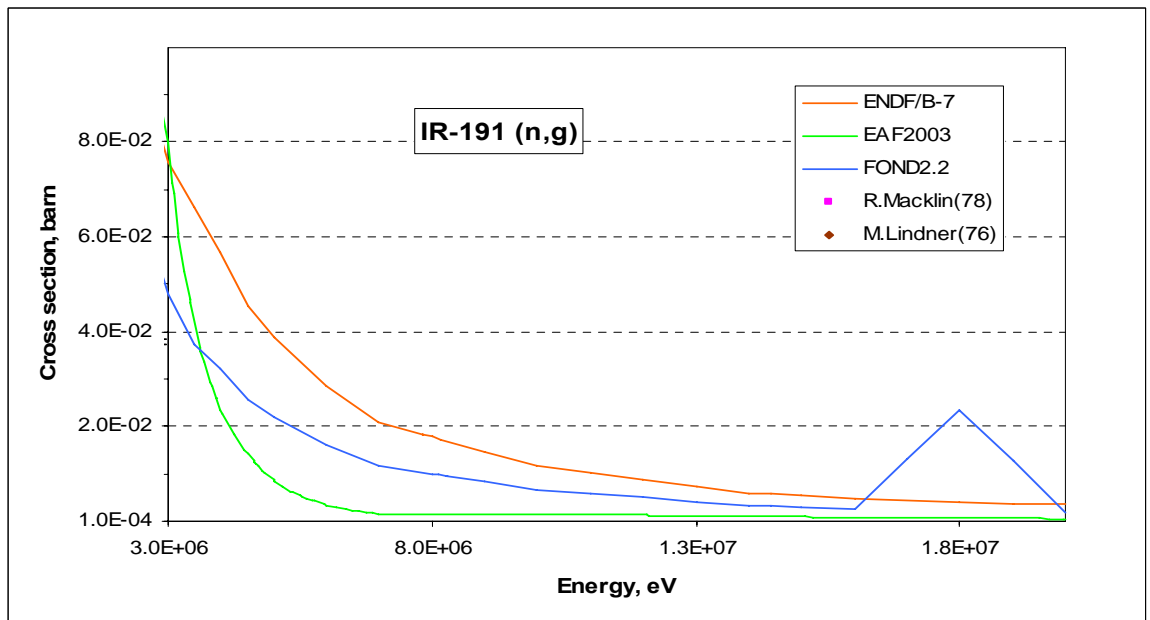


Рис.7

На рис. 7 в сечении захвата из оценки FOND2.2 наблюдается пик, обусловленный ошибкой.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка R.Q.WRIGHT, R.R.SPENCER 1995 (ENDF/B-VIIb1.2), как наиболее современная и полная оценка для Ir-191. В этот файл следует добавить данные об образовании иридия-192 в основном и в изомерных состояниях (MF=9, MT=102), используя для этого данные из соответствующей секции файла MF=10 EAF-2003.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице. **Жирным шрифтом** выделены данные из ENDF/B-7. Как видно, отличия данных ENDF/B-7, принимаемых в РОСФОНД, от прежних данных (FOND-2.2) – невелики.

| | | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) | (n,p) | (n,a) |
|---------------------------------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|---------|----------|
| 0.0253 эВ | ENDF/B-7 | 9.69E+02 | 1.40E+01 | | | | 9.55E+02 | | |
| | EAF-2003 | 9.55E+02 | | | | | 9.55E+02 | | |
| | FOND-2.2 | 9.55E+02 | | | | | 9.55E+02 | | |
| Резонансный интеграл | ENDF/B-7 | 3.86E+03 | 3.07E+02 | 1.37E-2 | | | 3.56E+03 | | |
| | EAF-2003 | 3.55E+03 | | | | | 3.55E+03 | | |
| | FOND-2.2 | 3.56E+03 | | | | | 3.56E+03 | | |
| Спектр деления ^{235}U | ENDF/B-7 | 6.67 | 4.01 | 2.47 | 6.42E-03 | 1.40E-05 | 0.19 | 8.92E-6 | 2.74E-05 |
| | EAF-2003 | | | | | 1.29E-05 | 0.16 | | |
| | FOND2.2 | | | | 5.78E-03 | 1.75E-05 | 0.17 | 1.27E-5 | 3.73E-05 |
| 14 МэВ | ENDF/B-7 | 5.21 | 2.79 | 0.20 | 2.20 | | 6.08E-03 | 4.20E-3 | 7.90E-03 |
| | EAF-2003 | | | | | | 1.14E-03 | | |
| | FOND-2.2 | | | | 2.45 | | 3.43E-03 | 4.24E-3 | 3.07E-03 |

Автор отбора данных

Забродская С.В.

77.5. Иридий-192g.

Радиоактивен. Испытывая изомерный переход с периодом $T_{1/2}=241$ год в радиоактивный иридий-192n.

Нейтронные сечения для иридия-192 оценены, исходя из теоретических соображений, и содержатся в библиотеке EAF-2003 (оценка 2005 г.).

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из EAF-2003. Данные о сечениях реакций содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям с образованием конечных ядер в основных и изомерных состояниях и включить полученные суммы в файл MF=3, сформировав там соответствующие секции.

Включить файл MF=9 с секциями MT= 17 и MT=102, с вероятностями образования иридия-190 и иридия-193 в основных и долгоживущих изомерных состояниях. Вероятности рассчитать по данным файла MF=10.

Исключить секцию MF=3/4, дублирующую данные секции MF=10/4.

77.6. Иридий-192n.

Радиоактивен. Испытывая захват орбитального электрона распадается с периодом $T_{1/2}=74.02$ суток в стабильный осмий-192.

Нейтронные сечения для иридия-192 оценены, исходя из теоретических соображений, и содержатся в библиотеке EAF-2003 (оценка 2005 г.).

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из EAF-2003. Данные о сечениях реакций, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям с образованием конечных ядер в основных и изомерных состояниях и включить полученные суммы в файл MF=3, сформировав там соответствующие секции.

Включить файл MF=9 секции MT=17, 102 с вероятностями образования иридия-190 и иридия-193 в основных и долгоживущих изомерных состояниях. Вероятности рассчитать по данным файла MF=10.

Исключить секцию MF=3/4, дублирующую данные секции MF=10/4.

77.7. Иридий-193g

Содержание в естественной смеси - 62.60%.

Заметим, что ситуация с данными для Ir-193 аналогична случаю с первым стабильным изотопом Ir-191.

Для Ir-193 существуют оценки тех же авторов в следующих библиотеках:
в FOND2.2 находится оценка М.Н. Николаева, С.В.Забродской 1993 года.
в ENDF/B-7 - оценка из ENDF/B-6 R.Q.WRIGHT, R.R.SPENCER, сделанная 1995 году.
в JEFF3.1 взята оценка из ENDF/B-7.
в EAF2003 - Forrest, Korecky, 2003 (JEFF3.0/A)

В остальных библиотеках файлов Ir193 нет. Оценка FOND2.2 была взята за основу во всех остальных библиотеках.

На рис.1 приводится полное сечение в тепловой области. Для Ir-193 в тепловой точке есть один эксперимент Н.Волотина(59), через который точно проходит оценка EAF2003. Следующий эксперимент В.П.Вертебного(1980) – более детальный и ближе к нему находится оценка ENDF/B-7.

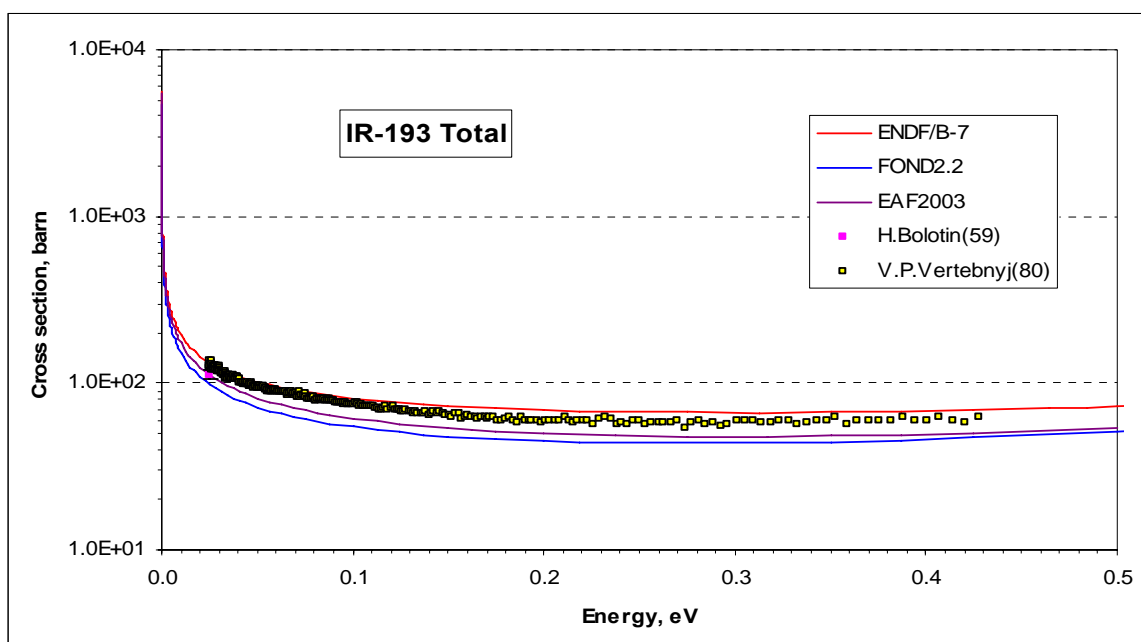


Рис.1

В FOND2.2 приводится только область разрешенных резонансов до 300 эВ. Параметры разрешенных резонансов были взяты из Мухабхаба 1981года. В ENDF/B-7 введена еще область неразрешенных резонансов до 10 кэВ.

На рис.2-9 приводится сечение радиационного захвата для Ir-193. На рис.2 в тепловой точке представлено много экспериментальных данных. В оценках были отданы предпочтение следующим оценкам: FOND2.2 – В.Keish(1963), ENDF/B-7, EAF2003 – R.E.Helf(1978).

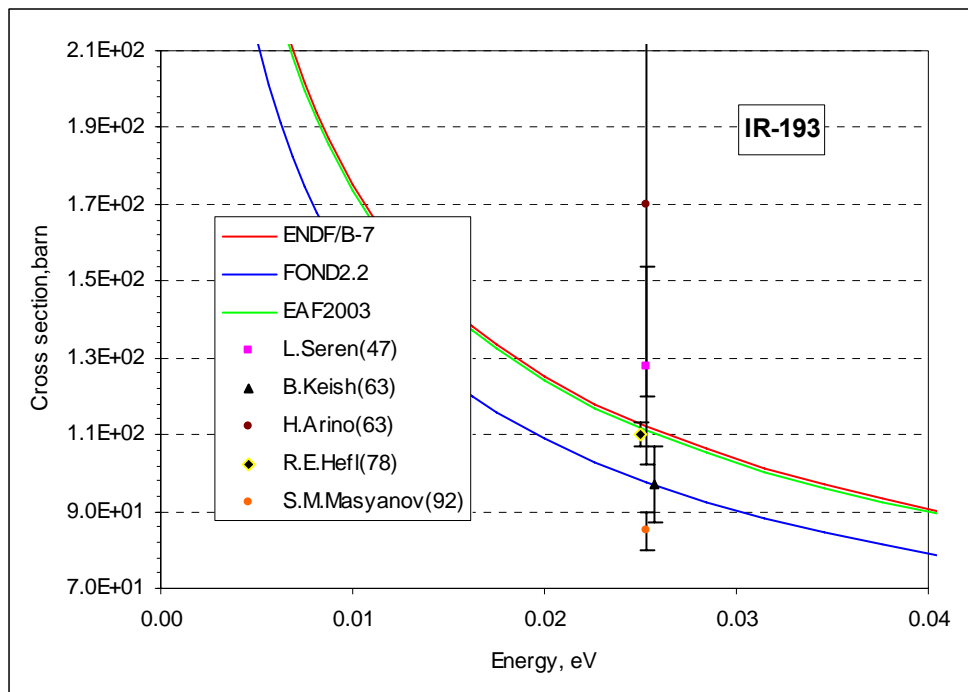


Рис.2

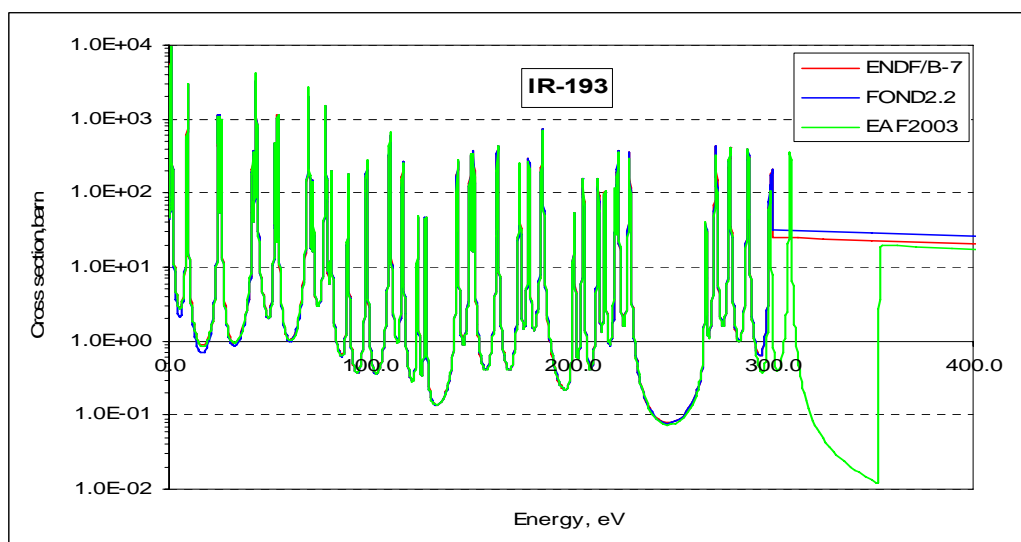


Рис.3

Дальше по энергии экспериментальных данных нет. На рис.3 видно, что в библиотеки EAF2003 область разрешенных резонансов увеличена до 350 эВ.

Как и для Ir-191 основным экспериментом является эксперимент L. Maclin(1978). Хотя, кроме этих данных, приводятся и другие эксперименты. Кривые всех оценок в основном практически повторяют друг друга в этой области и больших расхождений не наблюдается.

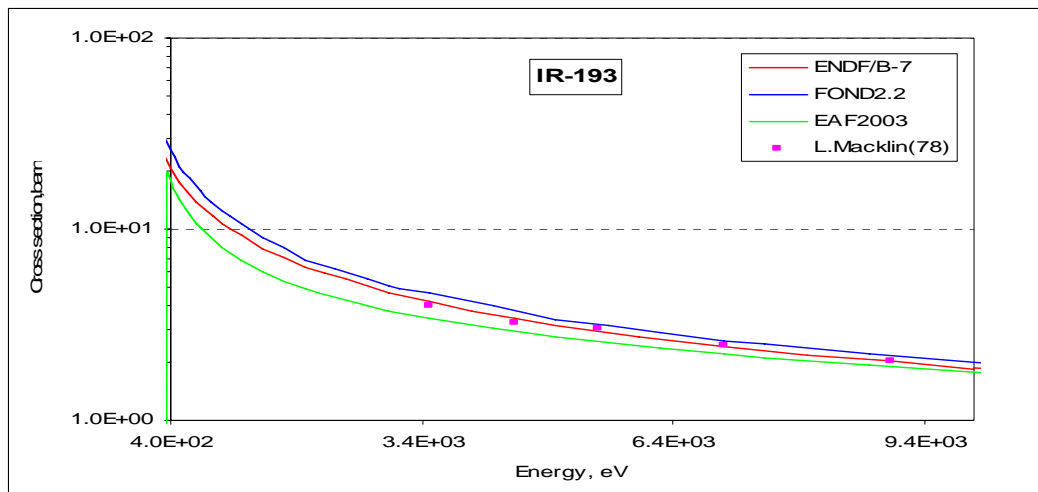


Рис.4

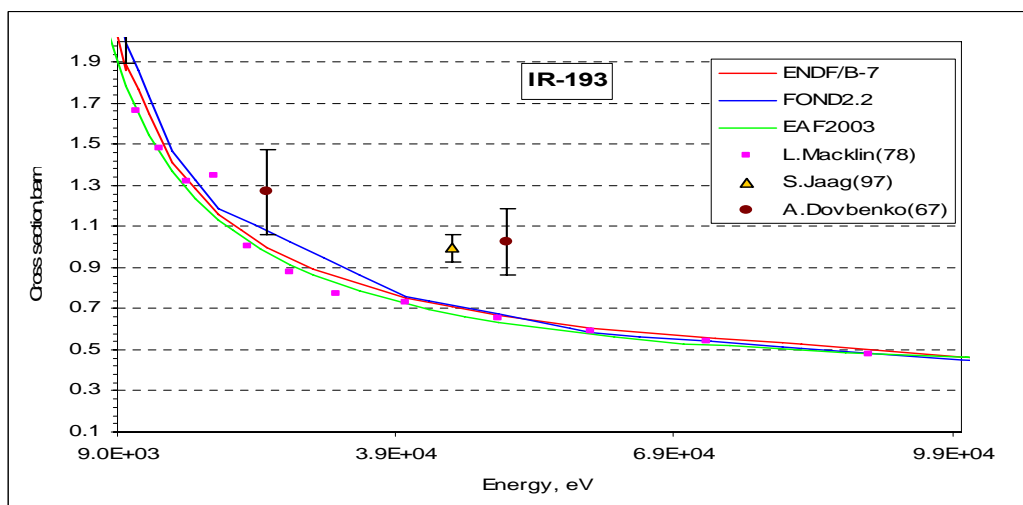


Рис.5

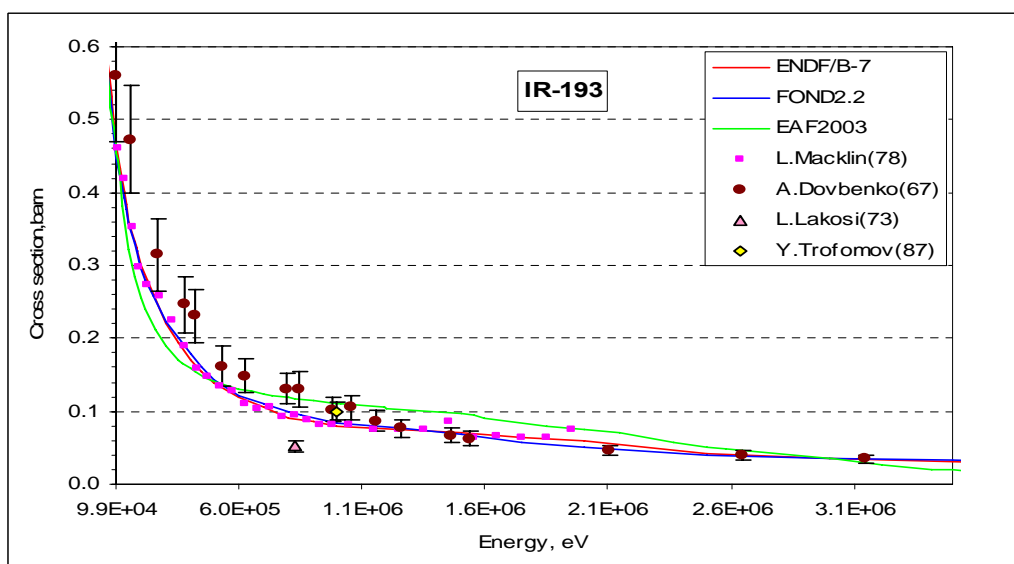


Рис.6

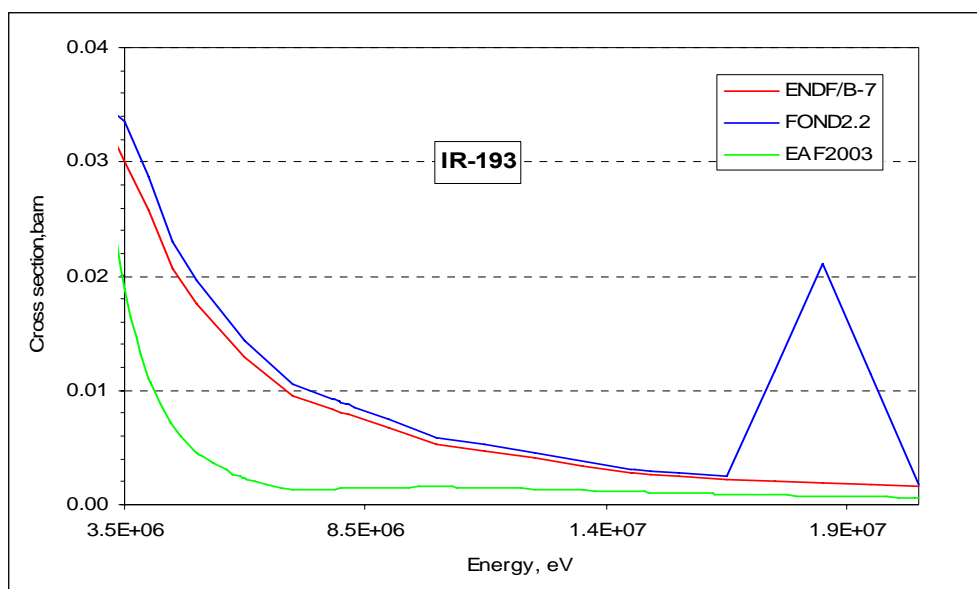


Рис.7

На рис. 7, как и в случае с Ir-191, наблюдается пик, связанный с форматной ошибкой введения данных.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка R.Q.WRIGHT, R.R.SPENCER 1995 (ENDF/B-VIIb1.2), как наиболее современная и полная оценка для Ir-193. В этот файл следует добавить данные об образовании иридия-192 и иридия-194 в основном и в изомерных состояниях (MF=9, MT=16 и MT=102), используя для этого данные из соответствующей секции файла MF=10 EAF-2003.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице. **Жирным шрифтом** выделены данные из ENDF/B-7. Как видно, отличия данных ENDF/B-7, принимаемых в РОСФОНД, от прежних данных (FOND-2.2) – невелики.

| | | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n,γ) | (n,p) | (n,a) |
|---------------------------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0.0253 эВ | ENDF/B-7 | 1.31E+02 | 1.94E+01 | | | | 1.12E+02 | | |
| | EAF-2003 | 1.11E+02 | | | | | 1.11E+02 | | |
| | FOND-2.2 | 9.75E+01 | | | | | 9.75E+01 | | |
| Резонансный интеграл | ENDF/B-7 | 1.68E+03 | 3.00E+02 | 3.10E-02 | | | 1.38E+03 | | |
| | EAF-2003 | 1.37E+03 | | | | | 1.37E+03 | | |
| | FOND-2.2 | 1.38E+03 | | 2.75E-03 | | | 1.38E+03 | | |
| Спектр деления ²³⁵ U | ENDF/B-7 | 6.67E+00 | 4.13E+00 | 2.44E+0 | 6.42E-03 | 1.40E-05 | 9.15E-02 | 8.92E-06 | 2.74E-05 |
| | EAF-2003 | | | | | | 9.80E-02 | | |
| | FOND2.2 | | | 5.25E-01 | 7.22E-03 | 6.79E-06 | 9.22E-02 | 7.61E-06 | 2.42E-05 |
| 14 МэВ | ENDF/B-7 | 5.21 | 2.80 | 0.20 | 2.20 | | 2.75E-03 | 4.20E-03 | 7.90E-03 |
| | EAF-2003 | | | | | | 1.15E-03 | | |
| | FOND-2.2 | | | 0.16 | 2.23 | | 3.06E-03 | 4.49E-03 | 1.10E-02 |

Автор отбора данных

Забродская С.В.

77.8. Иридий-193m

Долгоживущий изомер. Испытывая измерный переход с периодом $T_{1/2}=10.53$ д. переходит в основное состояние. В реакторах образуется в результате захвата нейтронов в иридии -192, неупругого рассеяния на иридии-193g и реакции (n,2n) на иридии-194m. В библиотеках общего назначения нейтронные данные для этого изомера отсутствуют. Лишь в библиотеке EAF-2003 содержатся данные о сечениях нейтронных реакций на этом изомере.

Сформировать файл MF=9 с секциями MT=17 и 102 с вероятностями образования иридия-192 и иридия-194 в основных и в изомерных состояниях

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из EAF-2003. Данные о сечениях реакций, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям с образованием конечных ядер в основных и изомерных состояниях и включить полученные суммы в файл MF=3, сформировав там соответствующие секции.

Автор рекомендации

Забродская С.В.

77.9. Иридий-194m

Долгоживущий изомер. Испытывая бета-распад с периодом $T_{1/2}=171$ д. превращается в основное состояние. В реакторах образуется в результате захвата нейтронов в иридии -193 и неупругого рассеяния на иридии-194g.

В библиотеках общего назначения нейтронные данные для этого изомера отсутствуют. Лишь в библиотеке EAF-2003 содержатся данные о сечениях нейтронных реакций на этом изомере.

Заключение

В РОСФОНД следует включить файл данных из EAF-2003. Данные о сечениях реакций, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям с образованием конечных ядер в основных и изомерных состояниях и включить полученные суммы в файл MF=3, сформировав там соответствующие секции.

Сформировать файл MF=9 с секциями MT=16 и MT=17 с вероятностями образования иридия-192 и иридия-193 в основных и изомерных состояниях. Сечение перехода в основное состояние перенести из файла MF=3 в файл MF=10.

Автор рекомендации

Забродская С.В.

77.10. Иридий природный

Для Ir-nat существует только одна оценка в FOND2.2., сделанная Николаевым М.Н. и др. в 1990 году.

Для полного сечения Ir-nat оказалось в EXFOR довольно много данных. На рис.1-6 они приведены в различных энергетических интервалах. На рис.1 в тепловой точке и области наблюдается полное согласие экспериментальных данных между собой и с оценкой.

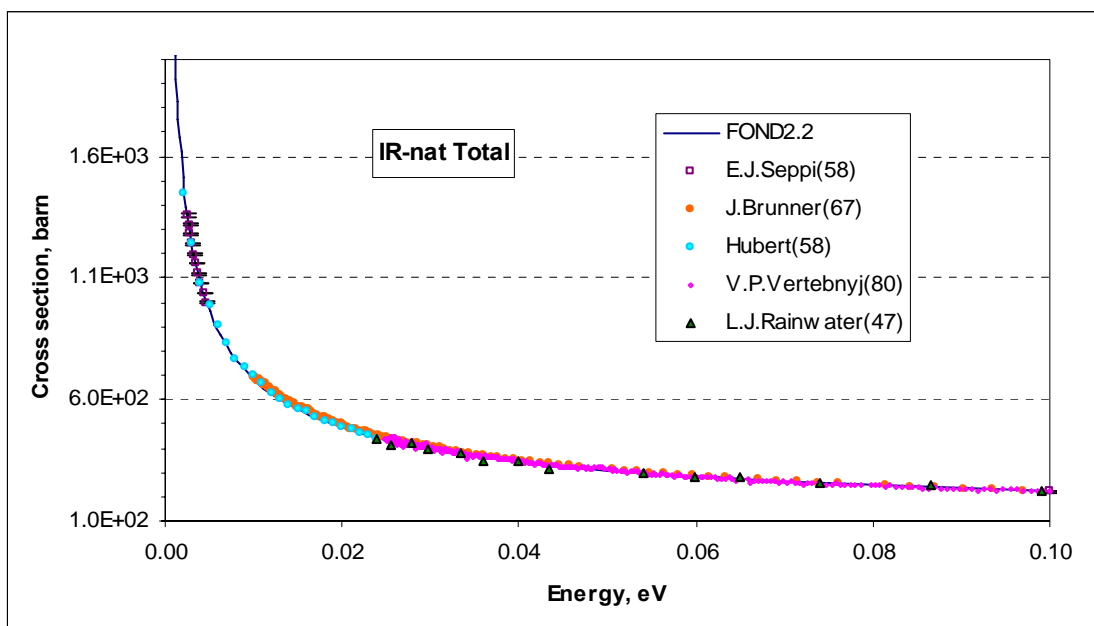


Рис.1

Последующие рисунки приведены без комментария для информации по экспериментальным данным, которые в основном не противоречат оценке.

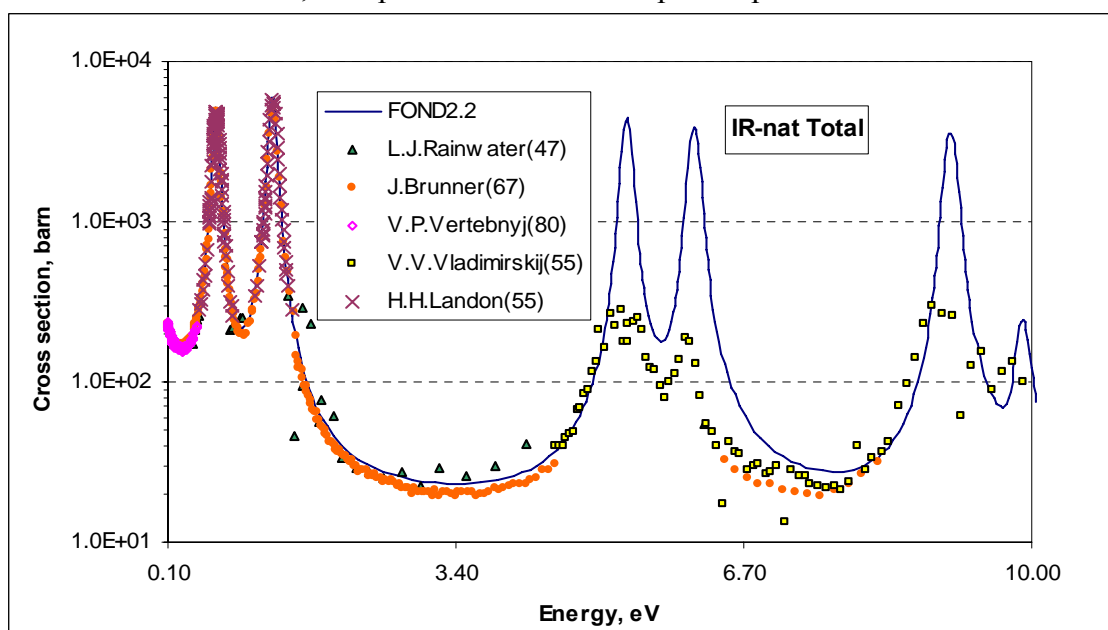


Рис.2

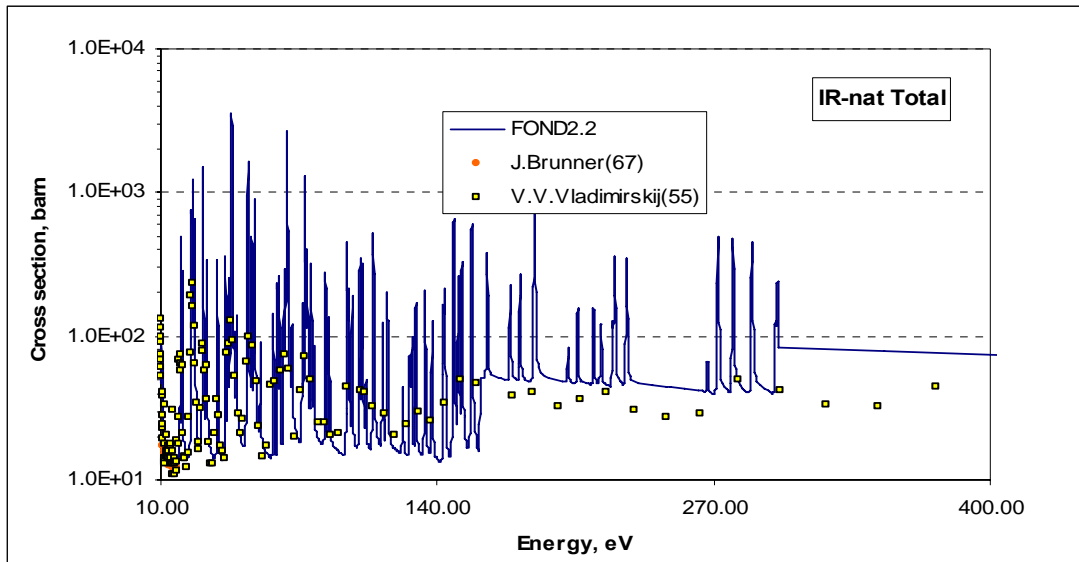


Рис.3

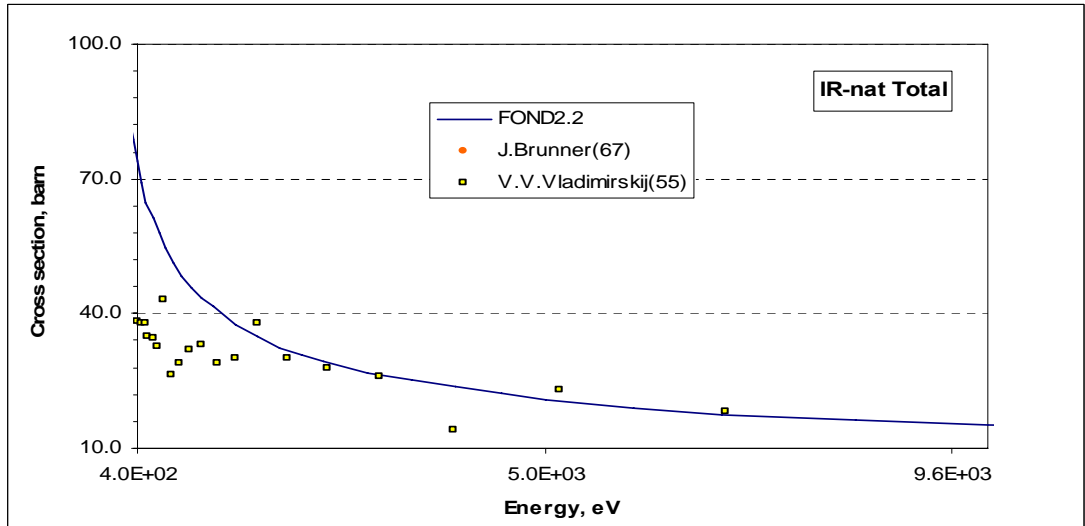


Рис.4

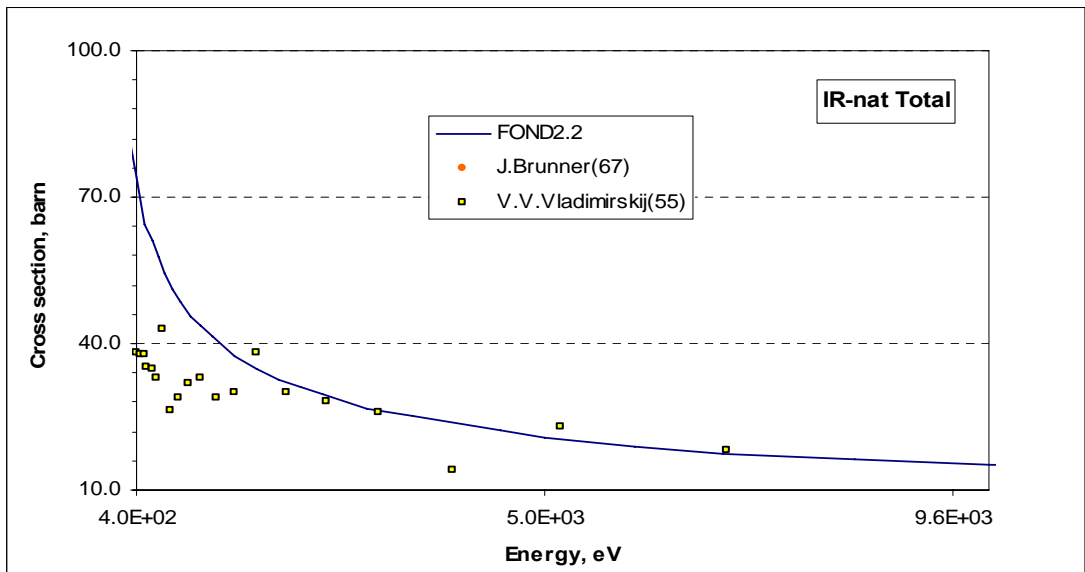


Рис.5

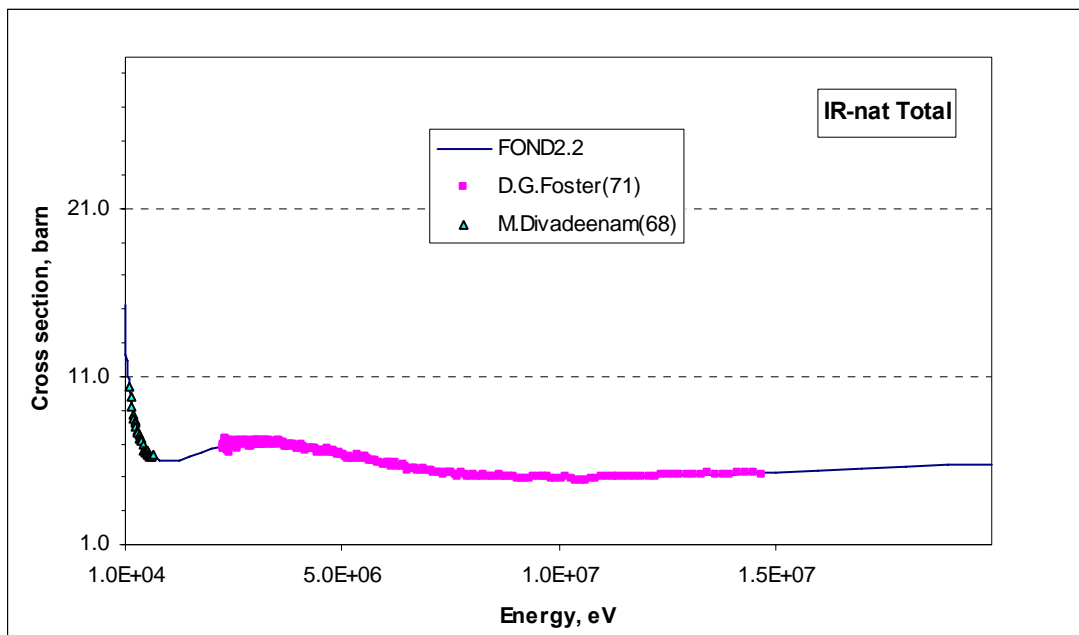


Рис.6

Область разрешенных резонансов для натурального иридия получена из соответствующих областей Ir-191 и Ir-193. Области неразрешенных резонансов нет.

На рис. 7-11 приводится сечение радиационного захвата для Ir-nat. Для этого сечения содержится намного меньше экспериментальных данных. В тепловой точке оценка проходит прямо через экспериментальную точку Н.Ромеранс(1951). В первой серии экспериментальных данных Д.Р.Попова(1962) первый резонанс пропущен.

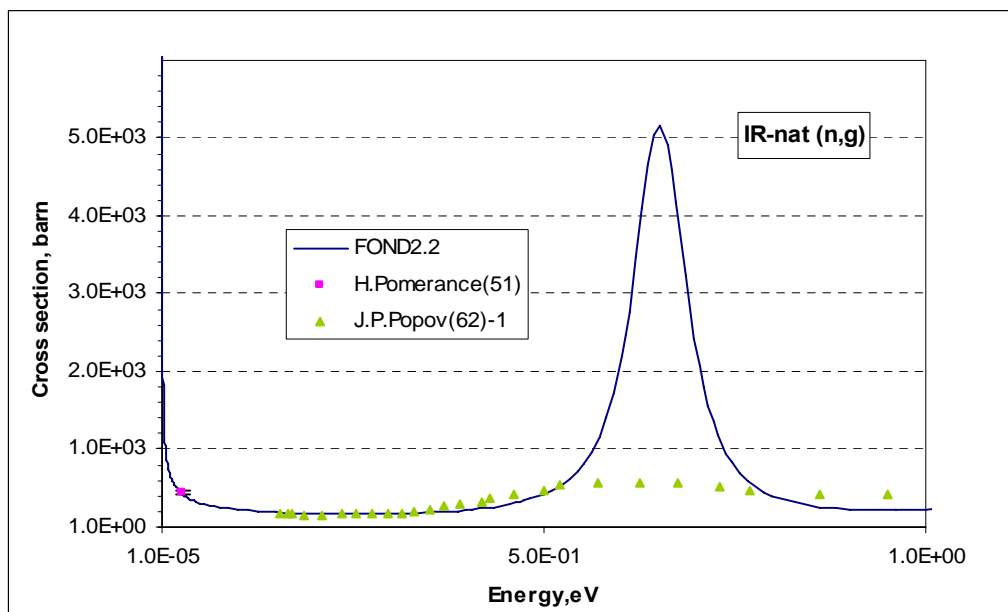


Рис.7

После 1 эВ на рис.8 видны экспериментальные точки второй серии Д.Р.Попова.

Две серии отличались толщинами пластин образцов. В первой серии (зеленый цвет) толщина была $6.3 \cdot 10^{21}$ атом/см², во второй – тоньше $0.7 \cdot 10^{21}$ атом/см².

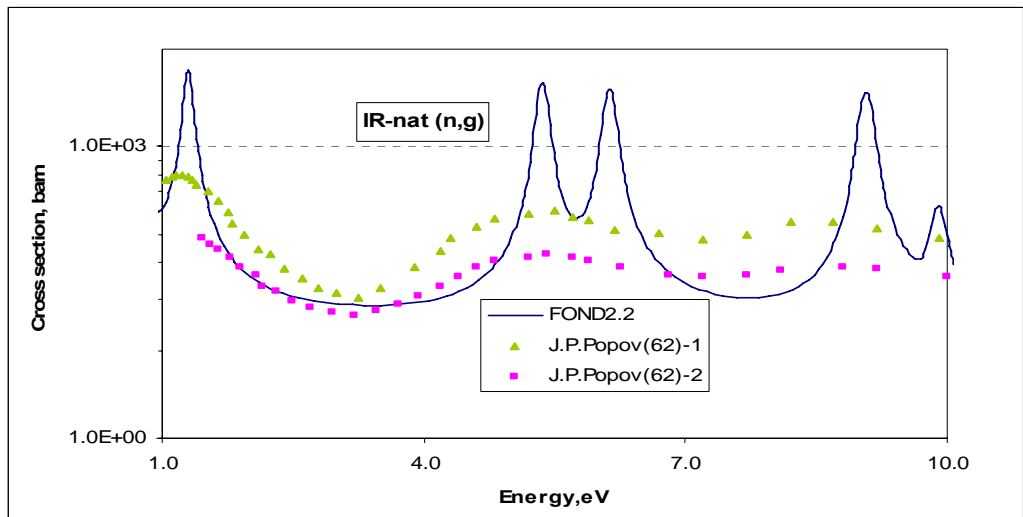


Рис.8

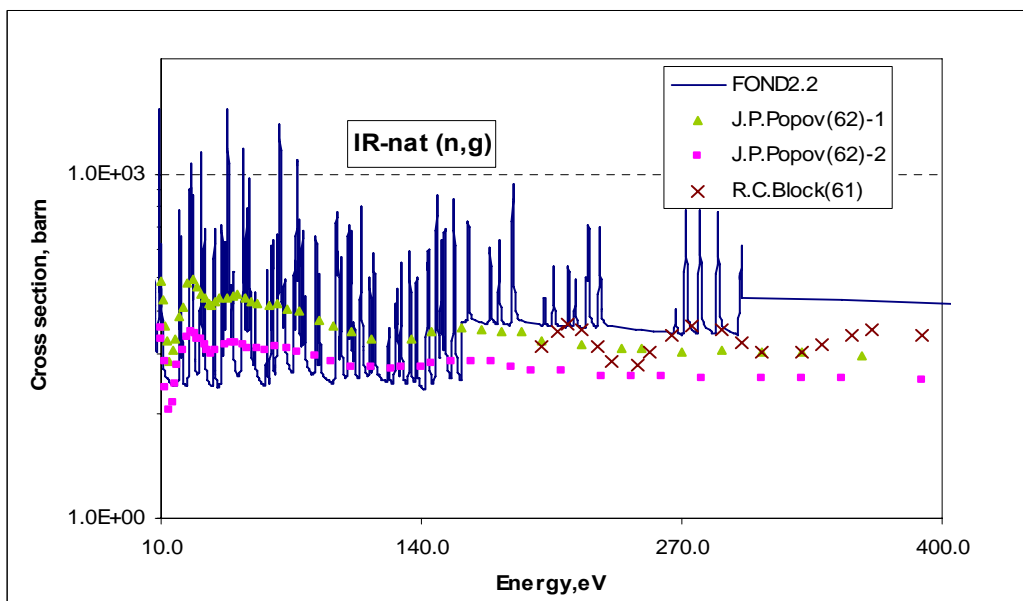


Рис.9

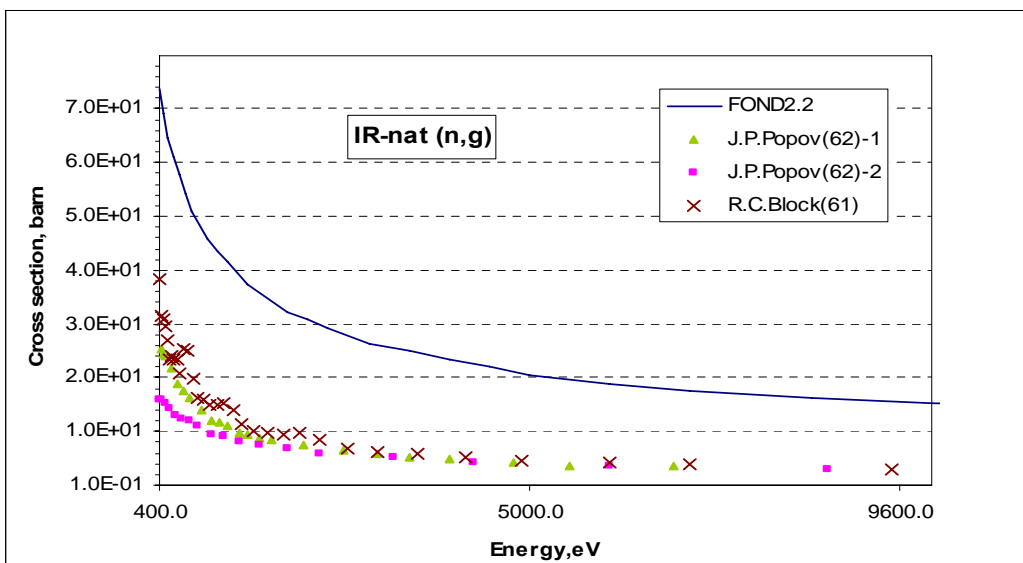


Рис.10

После 160 эВ (граница разрешенной области для Ir91) экспериментальные данные начинают удаляться от оценки вниз. Ту же тенденцию на рис.9-11 показывают экспериментальные данные R.C.Block(1961), S.Joly(1979).

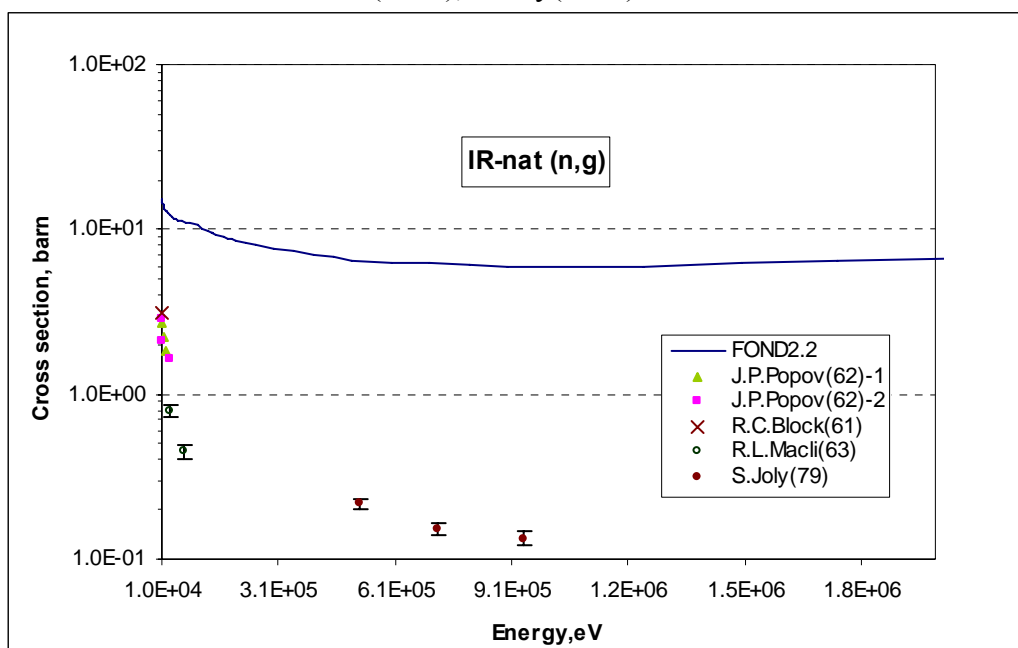


Рис.11

Заключение

Результатом анализа оценки FOND2.2 для Re-nat является вывод о включении в библиотеку РОСФОНД этого файла.

На будущее естественно было бы получить натуральный материал, полученный из современных оценок стабильных изотопов IR-191 и IR-193 из библиотеки ENDF/B-7. На рис.12 приводится сравнение полного сечения в 299-группах, полученных из файла натурального IR и описанных выше файлов стабильных изотопов IR-191 и IR-193. Видно, что больших расхождений нет и, следовательно, можно на данный момент пользоваться файлом Re-nat из FOND2.2., но в РОСФОНД его не включаем.

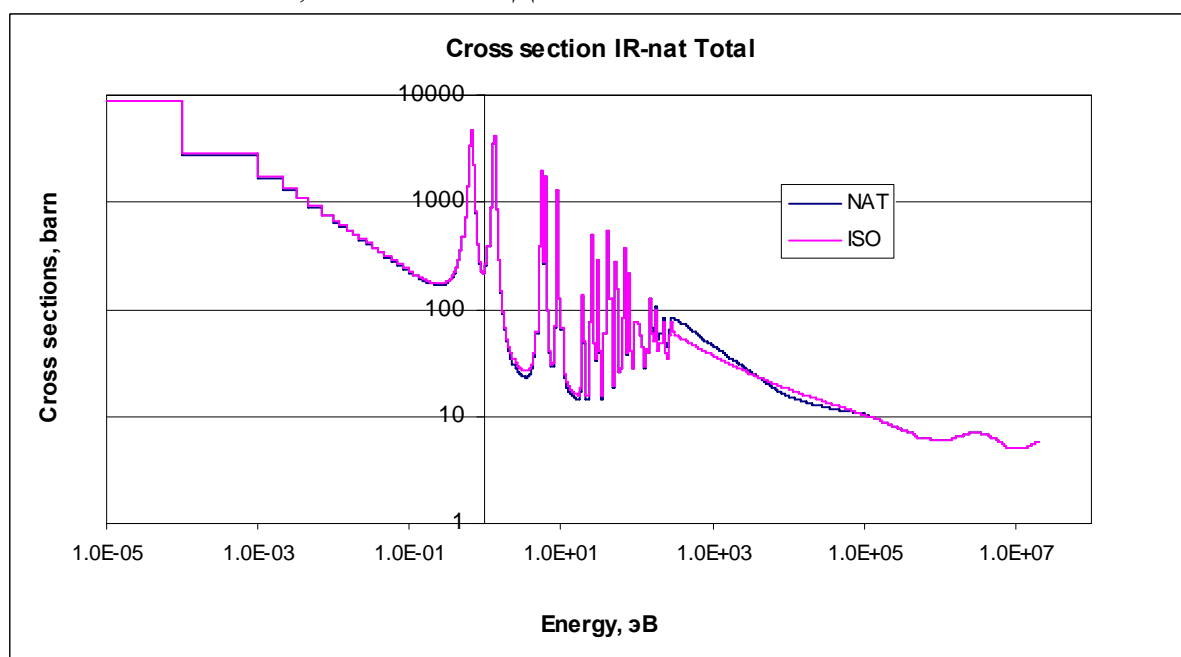


Рис.12

Сечения основных реакций из FOND2.2 на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице.

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,3n) | (n, γ) | (n,p) | (n,a) |
|---------------------------------|--------|---------|-----------|--------|---------|----------------|---------|---------|
| 0.0253 эВ | 432.0 | 14.7 | | | | 417.3 | | |
| Резонансный интеграл | 2507.3 | 313.2 | 2.5E-02 | | | 2194.1 | | |
| Спектр деления ^{235}U | 6.66 | 4.09 | 2.45 | 6.4E-3 | 1.40E-5 | 0.12 | 8.9E-06 | 2.7E-05 |
| 14 МэВ | 5.21 | 2.80 | 0.20 | 2.20 | | 3.2E-03 | 4.2E-03 | 7.9E-03 |

Автор отбора данных
Забродская С.В.

78. ПЛАТИНА

Полных файлов данных для изотопов платины нет ни в одной из известных библиотек. Для природной платины в ФОНД-2 включена оценка Хавертона (R.J.Hoverton) из библиотеки Ливерморской Лаборатории ENDL-84. Эта же оценка без изменений включена в JEFF-3.1. В других известных библиотеках данных для природной платины не имеется.

78.1. Платина-188

Радиоактивна ($T_{1/2}=10.2$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона превращается в иридий-188, а затем ($T_{1/2}=41.5$ дн.) в стабильный осмий-188. В реакторах может образовываться в ничтожных концентрациях за счет реакции $(n,3n)$ на ^{190}Pt , содержание которой в естественной платине 0.01%.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации не имеется.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить МАТ=7888.

Автор заключения

Николаев М.Н.

78.2. Платина-190

Содержание в естественной смеси 0.014%. Слабо радиоактивна: испытывает альфа-распад ($T_{1/2}=6.5 \cdot 10^{11}$ лет). в осмий-186, который далее медленно распадается ($T_{1/2}=6.5 \cdot 10^{11}$ лет) в стабильный вольфрам-182. Полных наборов оцененных нейтронных данных нет. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, с учетом имевшихся на момент оценки экспериментальных данных содержатся в библиотеке EAF-2003. На рис. 1. показана энергетическая зависимость сечения захвата.

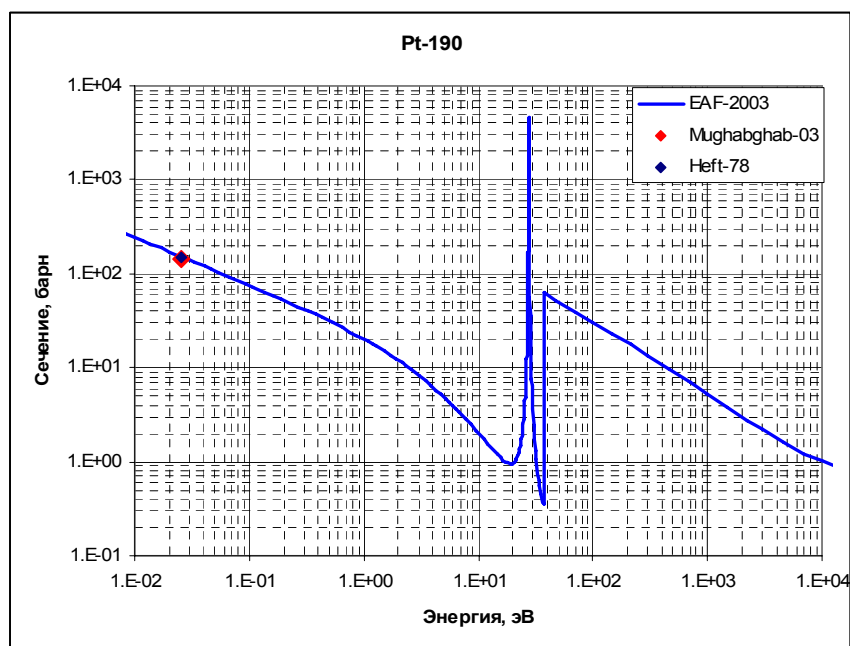


Рис.1. Сечение захвата

В тепловой области и в области первого резонанса оцененные данные соответствуют рекомендациям Мухабхаба 1984 г. Эти рекомендации целиком опирались на эксперимент Хефта. Несмотря на то, что новых данных не появилось (по крайней мере их нет в EXFORe) Мухабхаб в 2003 г. пересмотрел свою рекомендацию и понизил сечение захвата тепловых нейтронов с 152 барн до 142 барн. В EAF-2003 принято 153 барна. Что касается резонансного интеграла, то по Хефту он равен 67 барнам. В последней рекомендации Мухабхаб повысил это значение до 74 барн. Резонансный интеграл, следующий из оценки, много больше – он равен 157 барнам. Заметим, что резонансный интеграл, накопленный до минимума в сечении при 37.25 эВ в оценке равен 76.6 барна, т.е. совпадает с рекомендацией Мухабхаба. Поскольку экспериментальные данные, положенные в основу оценки резонансных параметров неизвестны, трудно сказать, насколько обоснована рекомендация Мухабхаба по резонансному интегралу и сколь значительно расхождение между этой рекомендацией и оценкой. Возможно, радиационная ширина резонанса была принята такой, чтобы вклад этого резонанса обеспечивал весь измеренный резонансный интеграл. В этом случае оценка завышает этот интеграл вдвое. Если же принять параметры первого резонанса в соответствии с рекомендацией Мухабхаба, то вклад резонансов при более высоких энергиях, оцененный в EAF-2003 представляется реалистичным.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить MAT=7890.

В дальнейшем целесообразно провести оценку всех нейтронных данных для платины-190, как и для остальных стабильных изотопов. При этом отмеченное противоречие в оценке резонансного интеграла захвата, возможно, удастся разрешить/

Автор заключения

Николаев М.Н.

78.3. Платина-191

Радиоактивна ($T_{1/2}=2.862$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона превращается в иридий-191. В реакторах может образовываться в малых концентрациях за счет реакции $^{192}\text{Pt}(n,2n)$ на ^{190}Pt , содержание которой в естественной платине 0.79%.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации не имеется.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить MAT=7891.

Автор заключения

Николаев М.Н.

78.4. Платина-192

Содержание в естественной смеси 0.79%. Полных наборов оцененных нейтронных данных нет. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, с учетом имевшихся на момент оценки экспериментальных данных содержатся в библиотеке EAF-2003. На рис. 1. показана энергетическая зависимость сечения захвата.

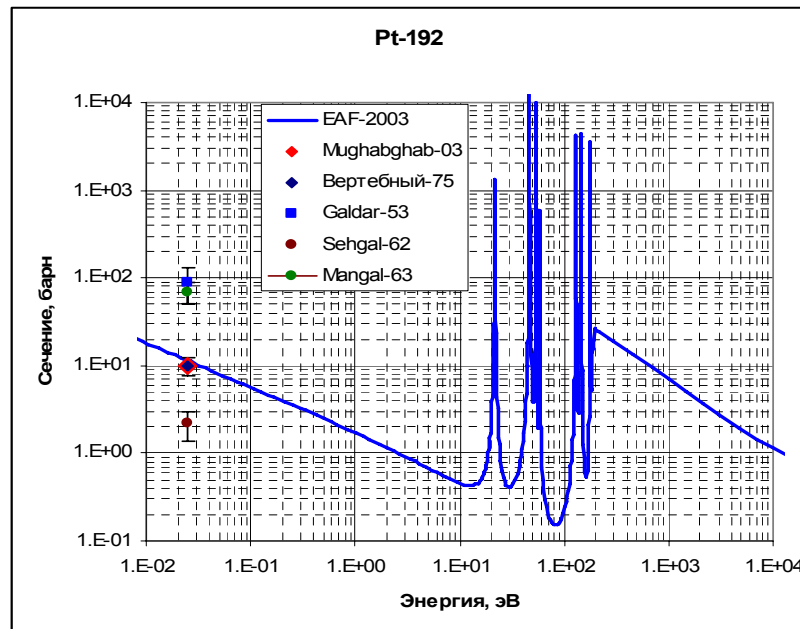


Рис.1. Сечение захвата

В тепловой области и в области первого резонанса оцененные данные соответствуют рекомендациям Мухабхаба 1984 г. Разброс экспериментальных данных огромен. Мухабхаб принял результат Вертебного. В резонансной структуре проявлено 7 первых резонансов, приведенных в атласе Мухабхаба. Их параметры соответствуют

измерениям Вертебного (1975). При более высоких энергиях почти все резонансы пропущены или их параметры не удалось определить. Резонансный интеграл, следующий из оценки, равен 161.3 барн, что заметно превышает рекомендованное Мухабхабом значение 115 ± 20 барн. Интеграл по области 7 разрешенных резонансов равен 122 барнам, т.о. различие обусловлено интерпретацией вкладов неразрешенных резонансов.

Имеются экспериментальные данные по сечению реакции $(n,2n)$ при 14.5 МэВ:

Hankla-72: 2.035 ± 0.15 барн;

Qaim-72: 2.026 ± 0.17 барн.

По оценке EAF-2003 это сечение равно 2.025 барна. Согласие отличное.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущих изомеров – $^{193}\text{Pt}^m$ и $^{192}\text{Ir}^n$ – перенести в файл MF=9. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить MAT=7890.

В дальнейшем целесообразно провести оценку всех нейтронных данных для платины-192, как и для остальных стабильных изотопов. При этом отмеченное противоречие в оценке резонансного интеграла захвата, возможно, удастся разрешить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

78.5. Платина-193

Радиоактивна ($T_{1/2}=50$ лет). Испытывая захват орбитального электрона превращается в иридий-193. В реакторах может образовываться в малых концентрациях за счет реакций $^{192}\text{Pt}(n,\gamma)$ и $^{194}\text{Pt}(n,2n)$.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации не имеется.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущих изомеров – $^{193}\text{Ir}^n$ и $^{194}\text{Ir}^m$ – перенести в файл MF=9. В файле MF=10 сохранить лишь сечение образования изомера ^{193}Pt при неупругом рассеянии.

Файлу присвоить MAT=7893.

Автор заключения

Николаев М.Н.

78.6. Платина-193m

Радиоактивна ($T_{1/2}=4.33$ дн.). Испытывает изомерный переход в основное состояние.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущих изомеров – $^{193}\text{Ir}^n$ и $^{194}\text{Ir}^m$ – перенести в файл MF=9. В файле MF=10 сохранить лишь сечение образования основного состояния ^{193}Pt при неупругом рассеянии.

Файлу присвоить МАТ=7813.

Автор заключения

Николаев М.Н.

78.7. Платина-194

Содержание в естественной смеси 32.967%. Полных наборов оцененных нейтронных данных нет. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, с учетом имевшихся на момент оценки экспериментальных данных содержатся в библиотеке EAF-2003. На рис. 1. показана энергетическая зависимость сечения захвата. В отличие от платины-192, в этом случае Мухабхаб существенно понизил рекомендованное им значение теплового сечения – с 1.44 барна до 0.58 барна. Рекомендованное им значение резонансного интеграла сохранилось – 3.1 ± 0.1 барна. Из оценки EAF-2003 и в этом случае следует более высокое значение – 9.64 барна.

На рис. 1б оцененные сечения захвата сравниваются с экспериментальными данными при более высоких энергиях. Оценка идет много выше результата Бира при 23.5 кэВ. Полученное им значение – 31 миллибарн – представляется чрезмерно заниженным. Устранение отмеченных расхождений – задача предстоящей в будущем оценки. В области 1 – 3 МэВ оцененная кривая проходит практически прямо по экспериментальным точкам Воинджера.

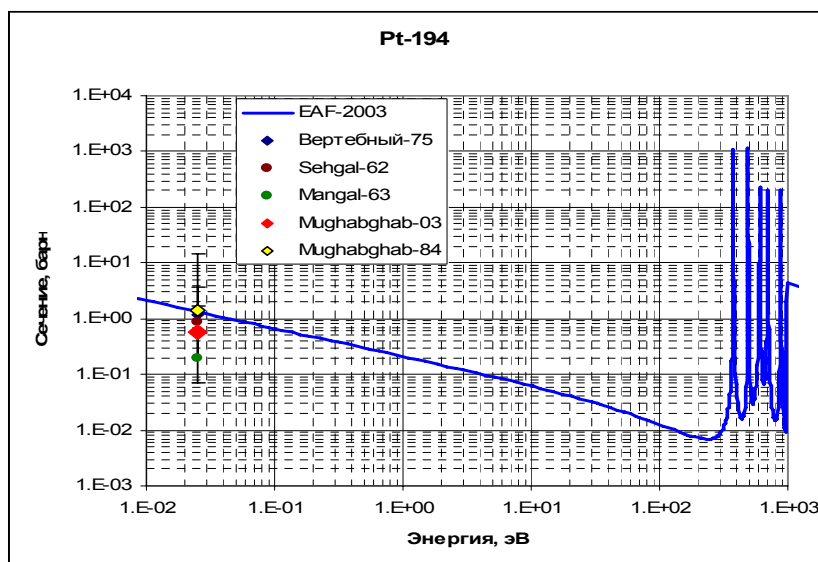


Рис.1а. Сечение захвата

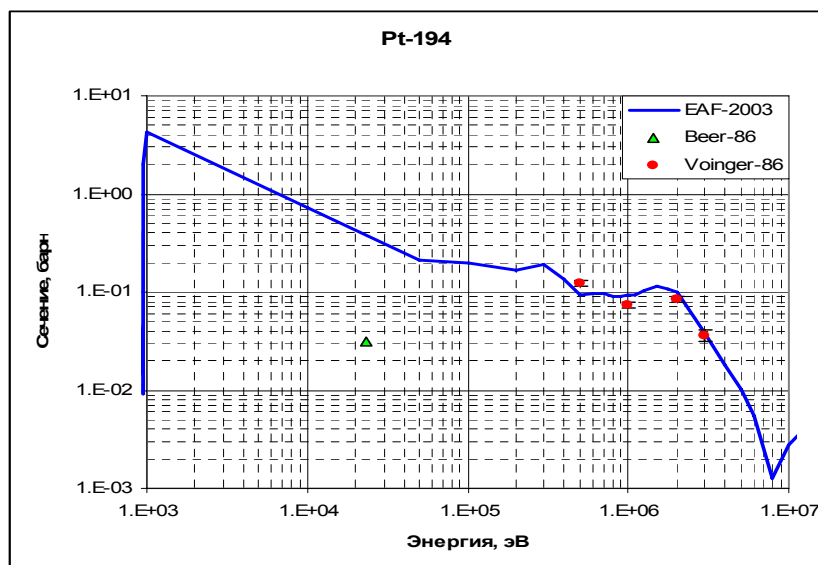


Рис.16. Сечение захвата

Имеются экспериментальные данные по сечению реакции (n,α) при 14.5 МэВ: Coleman-59: 1.26 ± 0.24 миллибарн; это заметно выше оцененного сечения при этой энергии - 0.8 миллибарн.

Имеются также данные по сечению реакции (n,p) при той же, примерно, энергии:

Hankla-72: 4.3 ± 0.6 миллибарн;

Qaim-77: 3.9 ± 0.5 миллибарн;

Coleman-59: 3.9 ± 0.4 миллибарн;

По оценке EAF-2003 это сечение равно 3.95 миллибарн. Согласие отличное.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущих изомеров – $^{193}\text{Pt}^m$, $^{195}\text{Pt}^m$, $^{192}\text{Ir}^n$, $^{193}\text{Ir}^m$ и $^{194}\text{Ir}^m$ – перенести в файл MF=9. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить MAT=7894.

В дальнейшем целесообразно провести оценку всех нейтронных данных для платины-194, как и для остальных стабильных изотопов. При этом отмеченные противоречия в оценке резонансного интеграла захвата, возможно, удастся разрешить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

78.8. Платина-195

Содержание в естественной смеси 33.832%. Полных наборов оцененных нейтронных данных нет. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, с учетом имевшихся на момент оценки экспериментальных данных содержатся в библиотеке EAF-2003. На рис. 1. показана энергетическая зависимость сечения захвата. Экспериментальные данные скудны, но хорошо согласуются друг с другом. Мухабхаб, правда, чуть изменил в 2003 г. свою рекомендацию по сравнению с предыдущей: с 27.5 на 28.5, т.е. ближе к результату Вертебного (30 ± 1.2 барна). Из оценки EAF-2003 следует 27.55 барна.

Резонансный интеграл по Мухабхабу равен 365 ± 50 барн, а из оценки- 374 барна.

Как видно из рис.1, в случае платины-195 учтены резонансы почти до 1 кэВ; их вклад в резонансный интеграл как раз и составляет рекомендуемые Мухабхабом 365 барн.

При энергиях выше 1 кэВ экспериментальных данных нет.

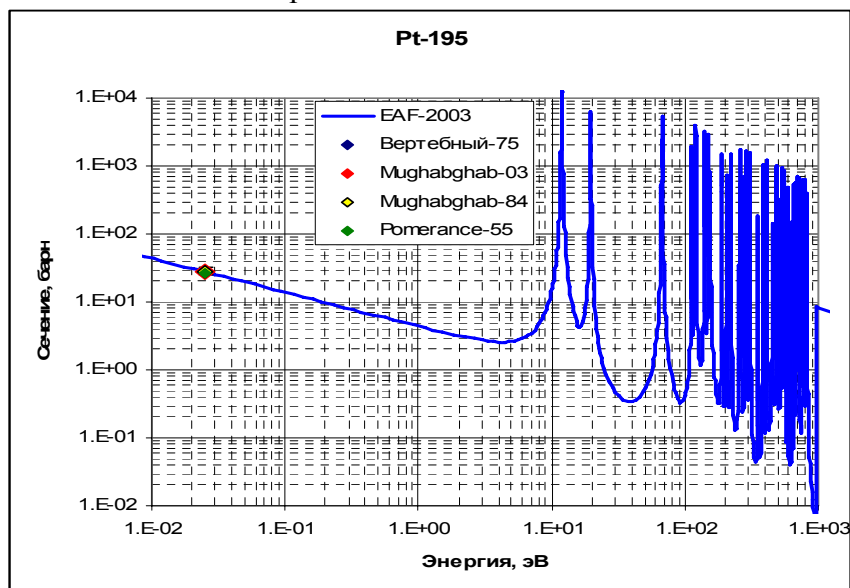


Рис.1. Сечение захвата

Имеются экспериментальные данные по сечению реакции (n,p) при 14.5 МэВ:
Coleman-59: 2.9 ± 0.3 миллибарн;
Qaim-77: 1.3 ± 0.2 миллибарн.
Это заметно ниже оцененного сечения при этой энергии 4.1 миллибарна.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущих изомеров – $^{193}\text{Pt}^m$, $^{195}\text{Pt}^m$, $^{192}\text{Ir}^n$, $^{193}\text{Ir}^m$ и $^{194}\text{Ir}^m$ – перенести в файл MF=9. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить MAT=7895.

В дальнейшем целесообразно провести оценку всех нейтронных данных для платины-195, как и для остальных стабильных изотопов. При этом отмеченные противоречия в оценке резонансного интеграла захвата, возможно, удастся разрешить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

78.9. Платина-195m

Радиоактивна ($T_{1/2}=4.02$ дн.). Испытывает изомерный переход в основное состояние.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации нет.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущих изомеров – $^{193}\text{Pt}^m$, $^{192}\text{Ir}^n$, $^{193}\text{Ir}^m$ и $^{194}\text{Ir}^m$ – перенести в файл MF=9. В файле MF=10 сохранить лишь сечение образования основного состояния ^{195}Pt при неупругом рассеянии.

Файлу присвоить МАТ=7815.

Автор заключения

Николаев М.Н.

78.10. Платина-196

Содержание в естественной смеси 25.242%. Полных наборов оцененных нейтронных данных нет. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, с учетом имевшихся на момент оценки экспериментальных данных содержатся в библиотеке EAF-2003. На рис. 1. показана энергетическая зависимость сечения захвата. Экспериментальные данные в тепловой точке расходятся друг с другом более, чем на оцененные погрешности. Из оценки EAF-2003 следует 0.71 барна, что согласуется с прежним усреднением данных Мухабхабом: 0.76 ± 0.19 барна. В 2003 г. Мухабхаб рекомендует уже иную цифру: 0.41 ± 0.19 барна, с которой оценка существенно расходится.

Резонансный интеграл по Мухабхабу равен 5.1 ± 0.3 барн, а из оценки следует 7.21 барна, из которых 5 барн определяются разрешенными резонансами.

При энергиях выше 10 кэВ экспериментальных данных немного. Результаты измерений при 24 кэВ в оценке проигнорированы.

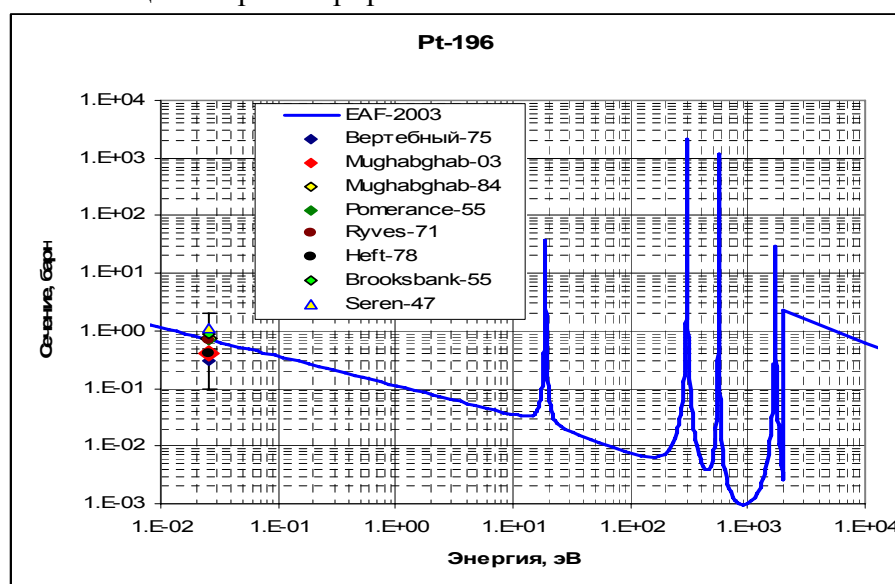


Рис.1а. Сечение захвата

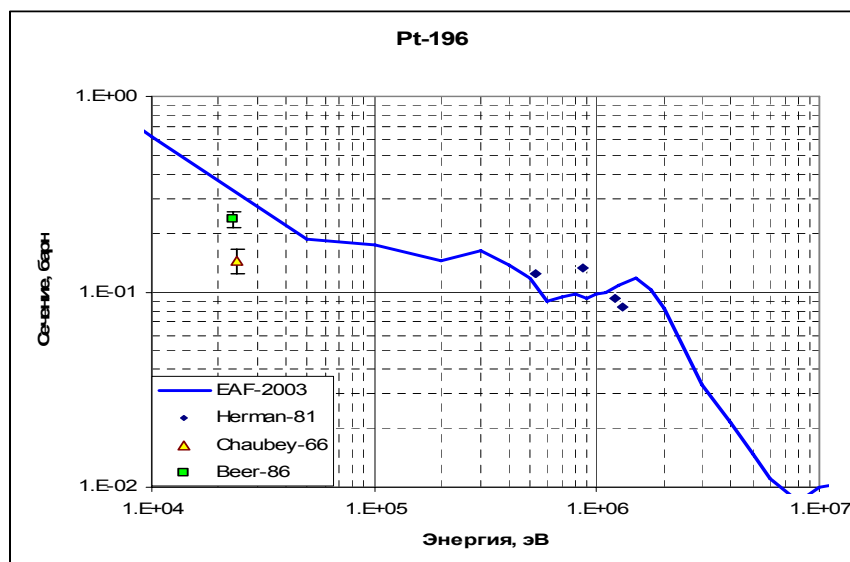


Рис.1б. Сечение захвата

Имеются экспериментальные данные по сечению реакции (n,α) при 14.5 МэВ: Coleman-59: 0.55 ± 0.1 миллибарн; это совпадает с оцененным сечением при этой энергии. Имеются также данные по сечению реакции (n,p) при той же, примерно, энергии: Vonach-66: 1.68 ± 0.25 миллибарн; По оценке EAF-2003 это сечение равно 1.3 миллибарн. Согласие приемлемое.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить. Данные об образовании долгоживущих изомеров $^{195}\text{Pt}^m$, $^{192}\text{Ir}^n$, $^{193}\text{Ir}^m$ и $^{194}\text{Ir}^m$ – перенести в файл MF=9.

Файлу присвоить MAT=7898.

В дальнейшем целесообразно провести оценку всех нейтронных данных для платины-198, как и для остальных стабильных изотопов. При этом отмеченные противоречия в оценке резонансного интеграла захвата, возможно, удастся разрешить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

78.11. Платина-198

Содержание в естественной смеси 7.163%. Полных наборов оцененных нейтронных данных нет. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, с учетом имевшихся на момент оценки экспериментальных данных содержатся в библиотеке EAF-2003. На рис. 1. показана энергетическая зависимость сечения захвата. Экспериментальные данные в тепловой точке прекрасно согласуются друг с другом. Из оценки EAF-2003 следует 3.44 барна, что согласуется с усреднением данных Мухабхабом: 3.66 ± 0.19 барна.

Резонансный интеграл по Мухабхабу равен 54 ± 4 барн, а из оценки, в отличие от более легких изотопов, даже ниже : 50.1 барна, т.е..

При энергиях выше 10 кэВ экспериментальные данные весьма разбросаны, наличие в части этих данных больших систематических погрешностей очевидно. Однако, можно считать, что оценка совокупности экспериментальных данных не противоречит.

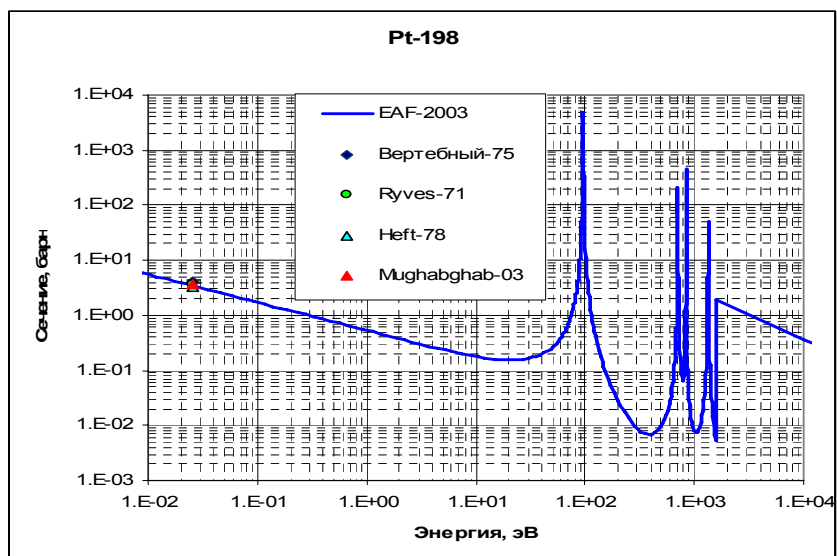


Рис.1а. Сечение захвата

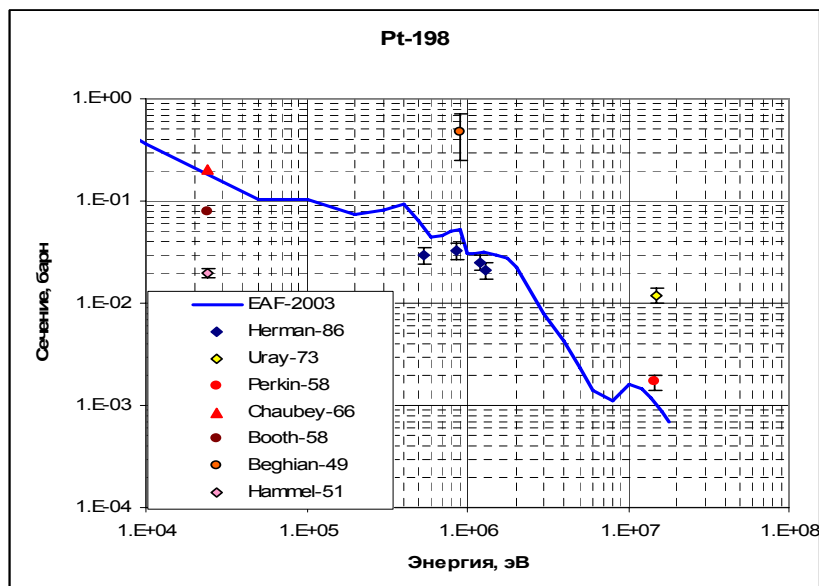


Рис.1б. Сечение захвата

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить МАТ=7898.

В дальнейшем целесообразно провести оценку всех нейтронных данных для платины-198, как и для остальных стабильных изотопов. При этом отмеченные противоречия в оценке резонансного интеграла захвата, возможно, удастся разрешить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

78.12. Платина-202

Радиоактивна ($T_{1/2}=44$ ч.). Испытывая бета-распад превращается в золото-202, а затем ($T_{1/2}=28$ с.) в стабильную ртуть-202. В реакторах может образовываться в ничтожных концентрациях за счет реакции ($n, {}^3\text{He}$) на ${}^{204}\text{Hg}$, содержание которой в естественной ртути 6.87%.

Полных наборов оцененных нейтронных не имеется. Оценки нейтронных сечений, выполненные путем теоретических расчетов, содержатся в библиотеке EAF-2003. Экспериментальных данных для их валидации не имеется.

Заключение

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить MAT=7802.

Автор заключения

Николаев М.Н.

78.13. Природная платина

Природная платина содержит 6 изотопов:

${}^{190}\text{Pt}$ – 0.014%;

${}^{192}\text{Pt}$ – 0.792%;

${}^{194}\text{Pt}$ – 32.967%;

${}^{195}\text{Pt}$ – 33.832%;

${}^{196}\text{Pt}$ – 25.242%;

${}^{198}\text{Pt}$ – 7.163%;

Имеющуюся единственную оценку легко раскритиковать: в ней не учтена достаточно детально резонансная структура сечений. Область разрешенных резонансов отсутствует, несмотря на то, что для всех основных изотопов известны резонансные параметры до 1 – 2 кэВ. Тем не менее, основные резонансные особенности сечений в оценке отражение нашли (см. рис.1а, б и в). Резонансы при 12эВ, 19 эВ, 67 эВ принадлежат платине-195; резонанс при 46 эВ – платине-192; при 94 эВ – платине-198.

Резонансная структура сечения рассеяния выражена слабее, чем это следует из резонансных параметров.

Тепловое сечение захвата согласно оценке равно 8.0 барн, что существенно ниже величины, оцененной Мухабхабом на основе совокупности экспериментальных данных для природной платины и данных для изотопов – 10.3 ± 0.3 барна. Занижен и резонансный интеграл: 111.5 барн вместо рекомендуемых Мухабхабом 140 ± 6 барн и 130.8 барн, получаемых в результате усреднения резонансных интегралов изотопов.

При занесении данных в РОСФОНД в сечение захвата следует внести коррективу, соответственно увеличив сечение в низкоэнергетической области, где оно подчиняется закону $1/v$. При внесении этой коррективы были устранены неоправданные флуктуации сечения рассеяния в низкоэнергетической области и, естественно, изменено полное сечение. Откорректировать резонансный интеграл много труднее: для этого следует менять не только сечение захвата, но и полное сечение, и сечение рассеяния в резонансной области. Между тем структура сечения рассеяния в резонансной области в оценке выражена существенно слабее, чем это следует из резонансных параметров. Очевидно, что требуется введение секции резонансных параметров, что означает оценку отдельных файлов для изотопов платины, поскольку границы областей разрешенных резонансов у разных изотопов существенно различны. Очевидно, создание этих файлов выходит за рамки настоящей работы.

Вне резонансной области полное сечение и сечение радиационного захвата сравниваются с имеющимися экспериментальными данными, соответственно, на рис. 2 и 3. Из рис. 2 видно. Что полное сечение в окрестности 1 МэВ явно недооценено. Что касается сечения захвата, то его оценка не противоречит имеющимся экспериментальным данным.

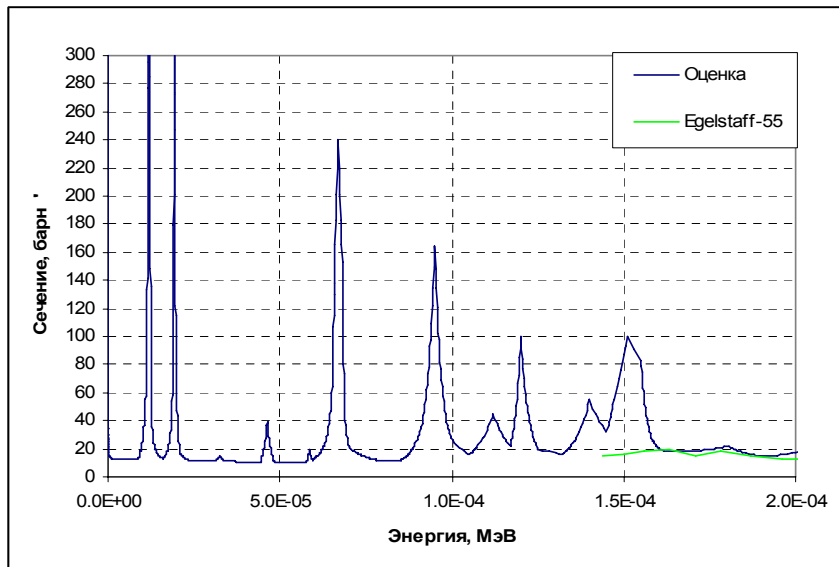


Рис.1а. Полное сечение в резонансной области.

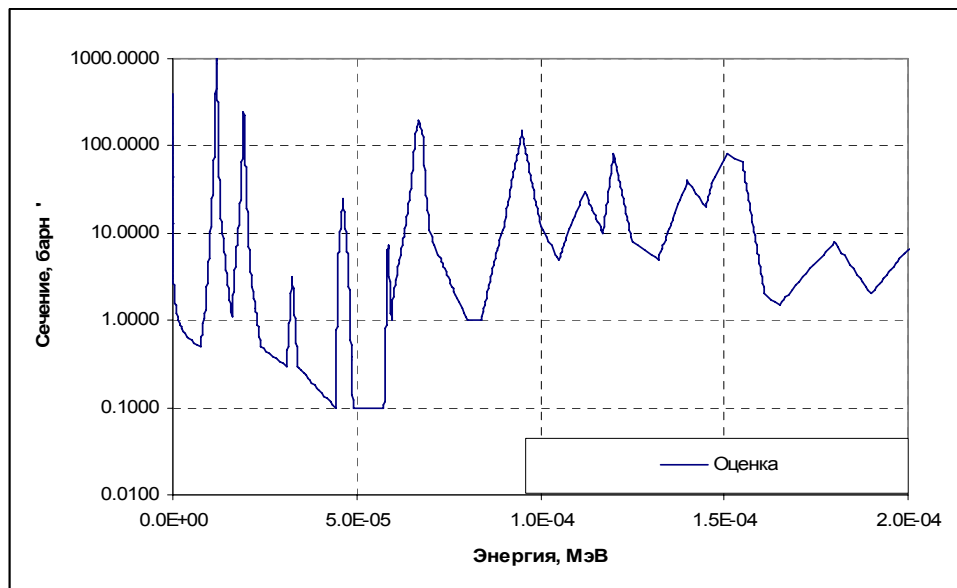


Рис.1б. Сечение захвата в резонансной области.

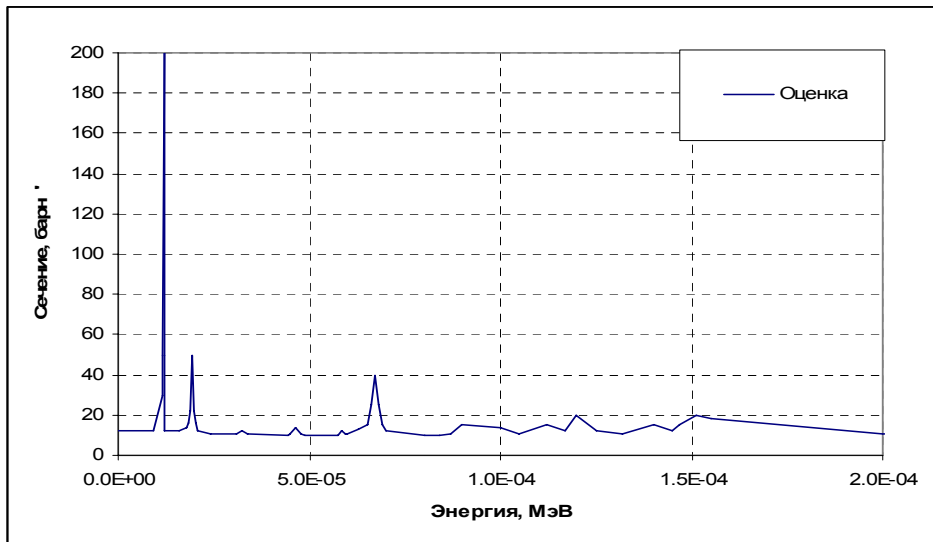


Рис.1в. Сечение рассеяния в резонансной области.

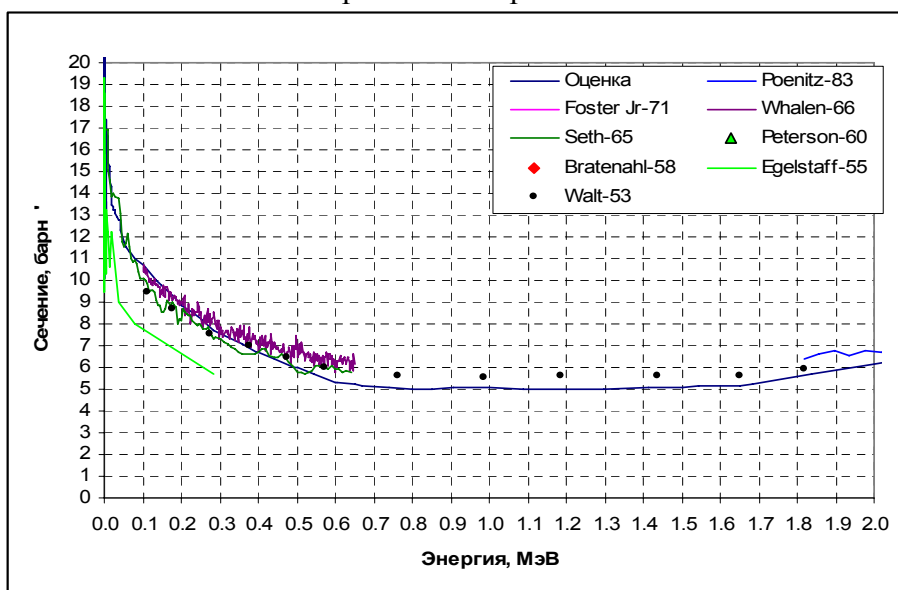


Рис.2а. Полное сечение

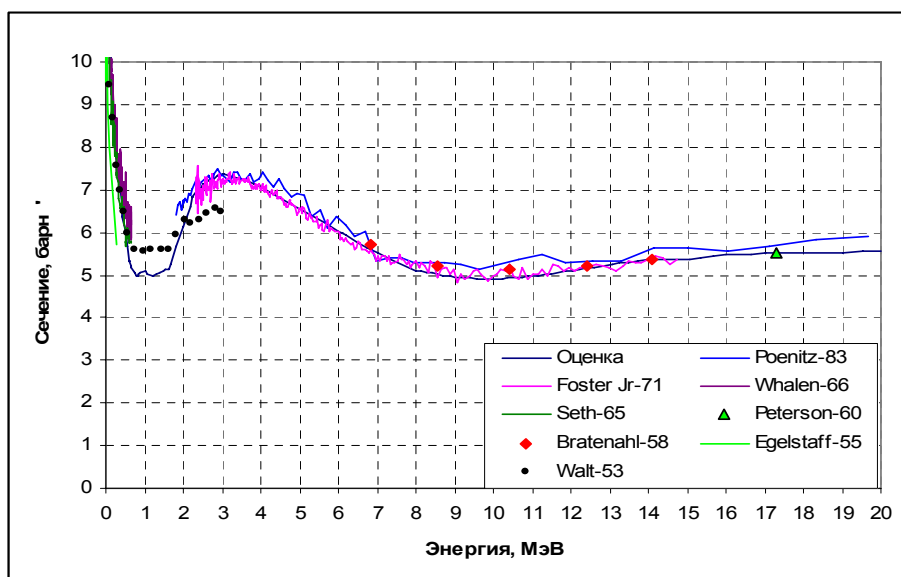


Рис.2б. Полное сечение

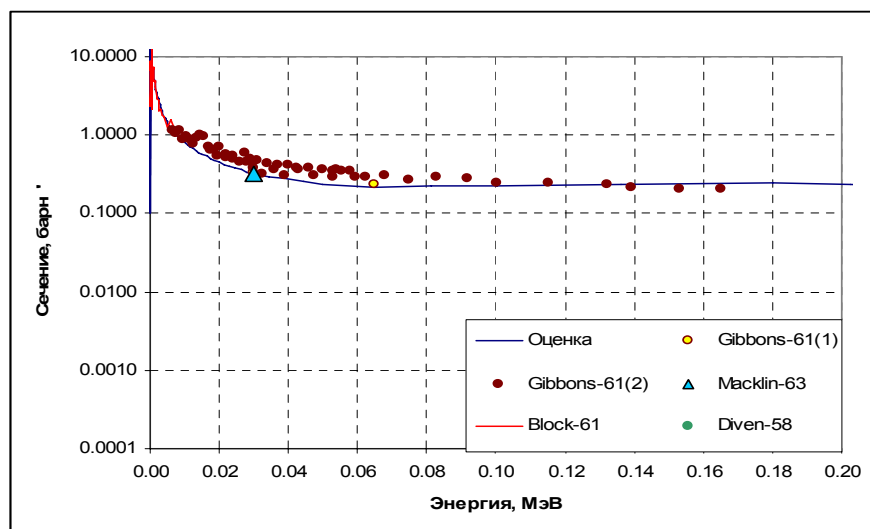


Рис. 3а. Сечение захвата.

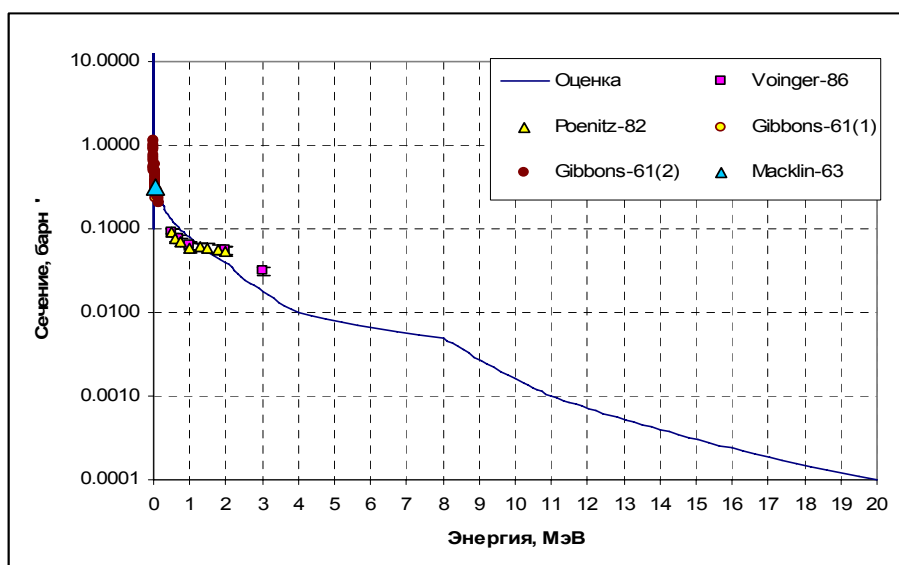


Рис.3б. Сечение захвата.

Сечение неупругого рассеяния в рассматриваемой оценке описывается возбуждением континуума уровней. Порог принят равным 150 кэВ. Экспериментальные данные по сечению неупругого рассеяния отсутствуют. Сечения других пороговых реакций, находящихся в файле, сравнивать с экспериментами смысла не имеет: это будет сделано ниже при обсуждении файлов для изотопов.

Заключение.

По необходимости в РОСФОНД следует включить оценку Хавертона, откорректированную указанным выше образом.

Выполнение полных оценок нейтронных данных для стабильных изотопов платины следует считать одной из первоочередных задач на будущее.

Автор заключения

Николаев М.Н.

79. ЗОЛОТО

79.1. Золото-194

Радиоактивно ($T_{1/2}=38.0$ ч.). Распадается путем захвата орбитального электрона в стабильную платину-194. Возможные пути образования в реакторе - тройная реакция $^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}(n,2n)^{195}\text{Au}(n,2n)^{194}\text{Au}$ (пара этих реакций может быть заменена реакцией $(n,3n)$ или $^{196}\text{Hg}(n,t)^{194}\text{Au}$. Может представлять интерес как источник долгоживущей ($T_{1/2}=50.0$ г.) платины-193, которая образуется в реакции $^{194}\text{Au}(n,d)$.

Полные файлы нейтронных данных для этого изотопа неизвестны. Оценка нейтронных сечений содержится в библиотеке EAF. Экспериментальные данные для их проверки отсутствуют.

Заключение.

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании изомеров ^{193}Pt и ^{192}Ir занести в файл MF=9. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить МАТ=7994.

Автор заключения

Николаев М.Н.

79.2. Золото-195

Радиоактивно ($T_{1/2}=186.1$ д.). Распадается путем захвата орбитального электрона в стабильную платину-195. Возможные пути образования в реакторе - двойная реакция $^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}(n,2n)^{195}\text{Au}$ (пара этих реакций может быть заменена реакцией $(n,3n)$) или $^{196}\text{Hg}(n,d)^{195}\text{Au}$. Может представлять интерес как источник долгоживущей ($T_{1/2}=50.0$ г.) платины-193, которая образуется в реакции $^{195}\text{Au}(n,t)$ или $^{195}\text{Au}(n,nd)$.

Полные файлы нейтронных данных для этого изотопа неизвестны. Оценка нейтронных сечений содержится в библиотеке EAF. Экспериментальные данные для их проверки отсутствуют.

Заключение.

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании изомеров ^{193}Pt , ^{195}Pt , ^{192}Ir , ^{194}Ir занести в файл MF=9. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить МАТ=7995.

Автор заключения

Николаев М.Н.

79.3. Золото-196

Радиоактивно ($T_{1/2}=6.2$ дн.). Распадается путем захвата орбитального электрона в стабильную платину-196 или (7.2%) путем бета-распада в стабильную ртуть-196. Возможные пути образования в реакторе - реакция $^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$ или $^{196}\text{Hg}(n,p)^{194}\text{Au}$. Полные файлы нейтронных данных для этого изотопа неизвестны. Оценка нейтронных сечений содержится в библиотеке EAF. Экспериментальные данные для их проверки отсутствуют.

Заключение.

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащиеся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании изомеров ^{195}Pt и ^{193}Ir , ^{192}Ir , ^{194}Ir занести в файл MF=9. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить МАТ=7994.

Автор заключения

Николаев М.Н.

79.4. Золото-197

Содержание в естественной смеси: 100%.

Спин основного состояния: $3/2^+$.

1. Файлы оцененных данных

Захват нейтронов в золоте является реакцией, используемой в качестве стандарта в измерениях нейтронных сечений. Координированная исследовательская программа МАГАТЭ по оценке международных стандартов в ноябре 2005 года распространила новую оценку сечения этой реакции, которая была принята в качестве международного стандарта.

Файл ^{197}Au в библиотеках JENDL-3.3, JEFF-3.0 и BROND-2 взят из библиотеки ENDF/B-VI. Независимую оценку представляет CENDL-2. Однако и в этой библиотеке захвата взято из ENDF/B-VI, которое до энергии нейтронов в 2.8 МэВ представляет собой сечение, рекомендованное группой по стандартам в 1991 году. На рисунке 1 показано сравнение полного сечения, сечений упругого и неупругого рассеяния из библиотеки CENDL-2 с сечениями из библиотеки ENDF/B-VI (JENDL-3.3, JEFF-3.0 и BROND-2). Очевидно, что отличия сечений в библиотеке CENDL-2 (к примеру, в полном неупругом рассеянии при энергии выше 14 МэВ) не приводят к улучшению оценки. Поэтому в дальнейшем, мы проведём сравнение экспериментальных данных с оценкой ENDF/B-VI и ENDF/B-VIIb2, отличающейся от ENDF/B-VI только сечением стандартной реакции $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$.

2. Тепловая и резонансная области.

Сравнение сечений в тепловой точке и резонансного интеграла захвата в последних оценках приведено в таблице 1. На рисунках 1 - 3 показаны результаты статистического анализа распределения уровней и нейтронных ширин уровней в области разрешённых резонансов при энергии ниже 5 кэВ с помощью программы REBUS. Все эти резонансы

относятся к s- волне. Существенного пропуска резонансов анализ не показывает. Вклад р- и d- резонансов в сечения мал из-за малой нейтронной ширины этих резонансов. Область неразрешённых резонансов отсутствует и выше 5 кэВ сечение задано как гладкое, что возможно, затруднит оценку самоэкранировку сечения (имеющего, несомненно, резонансную структуру в этой области) в толстом образце. Однако, в экспериментах практически всегда используются достаточно тонкие образцы и этот недостаток, в большинстве случаев, оказывается несущественным. В целом, оценка в области разрешённых резонансов может рассматриваться как удовлетворительная.

Таблица 1. Сечения при энергии 0.0253 эВ и резонансный интеграл захвата. Все сечения даны в барнах.

| Оценка | Полное | Упругое | Захват | Резонансный интеграл захвата |
|-------------------|--------|---------|------------|------------------------------|
| ENDF/B-VIIb2 | 106.57 | 7.91 | 98.66 | 1569. |
| Мугхабгхаб (2006) | | | 98.65±0.09 | 1550±28 |
| Стандарт (2006) | | | 98.66±0.14 | |

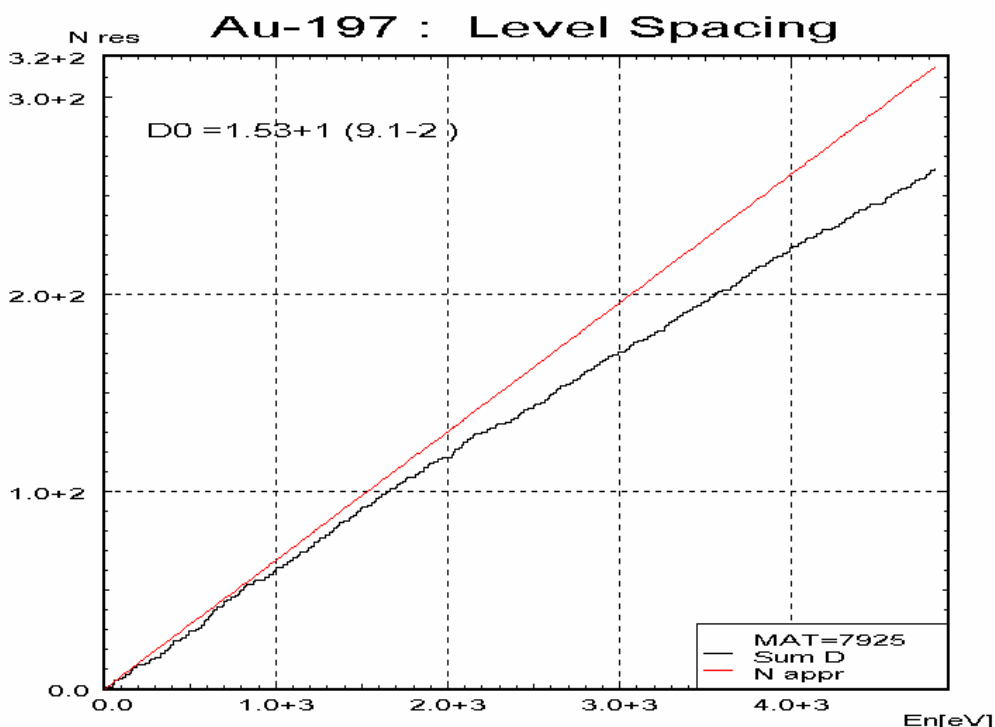


Рис. 1. Нарастающая сумма числа уровней для s- резонансов в библиотеке ENDF/B-VIIb2 в сравнении с результатом статистического анализа программой REBUS.

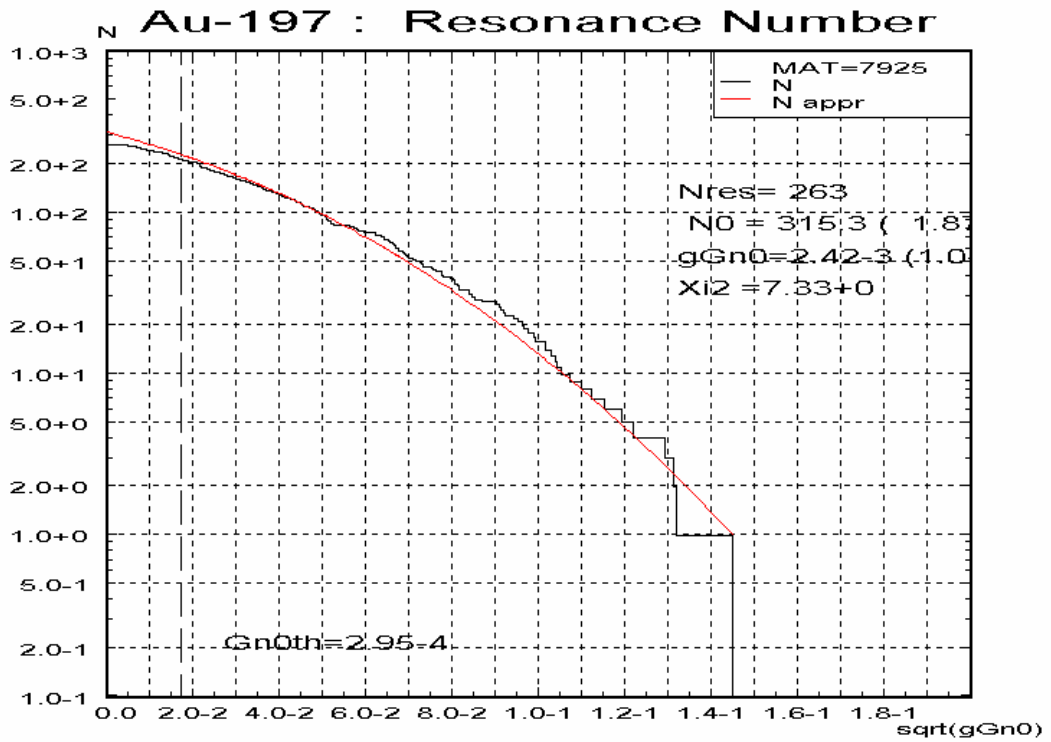


Рис. 2. Распределение приведённых нейтронных ширин из библиотеки ENDF/B-VIIb2 в сравнении с результатом их статистического анализа программой REBUS (распределение Портера-Томаса).

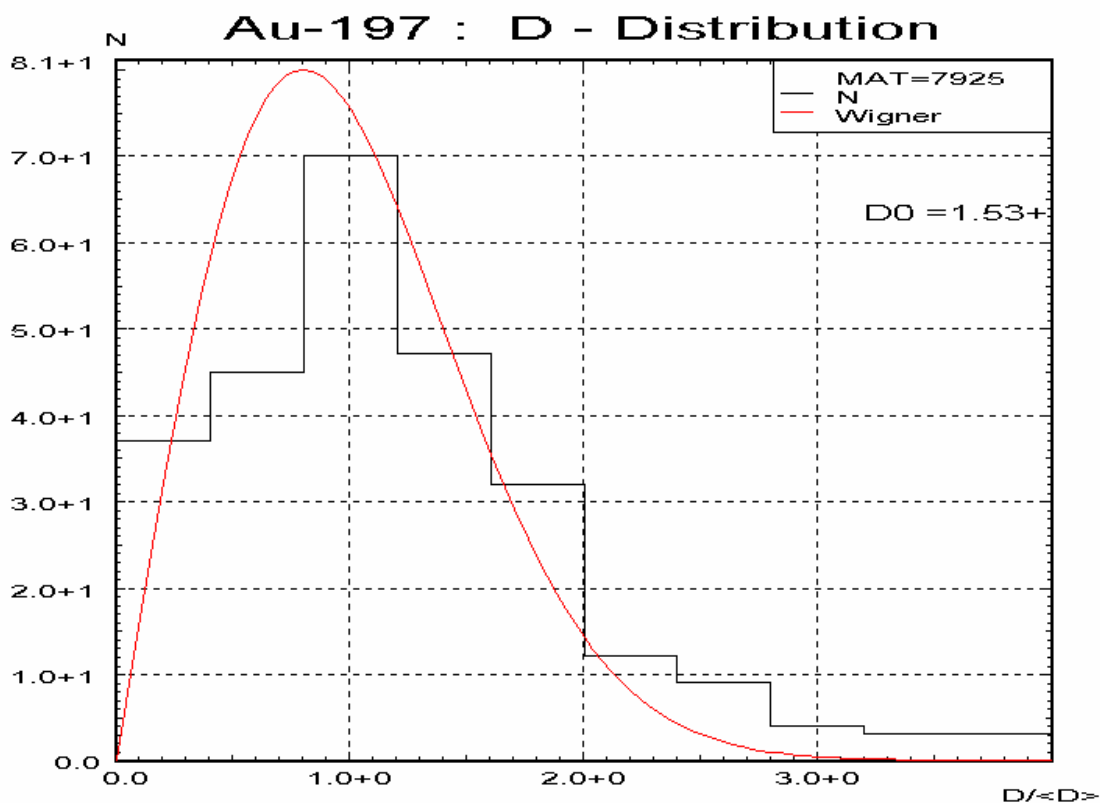


Рис. 3. Распределение расстояний между уровнями из библиотеки ENDF/B-VIIb2 в сравнении с результатом их статистического анализа программой REBUS (распределение Вигнера).

3. Область быстрых нейтронов

Область энергий нейтронов, в которой сечение представлено как гладкая функция энергии, начинается с 5 кэВ. На рисунках 4 - 7 показано сечение захвата для области энергий до 2.8 МэВ, где оно используется как стандарт и поэтому включено в ENDF/B-VIIb2 из файла стандарта. Сечение захвата существенно отличается от экспериментальных данных Маклина, часто используемого другими экспериментаторами как “стандарт”, относительно которого проводятся измерения. Основная причина различия, - серьезные проблемы в оценке эффективности гамма-детектора, использовавшегося Маклиным, из-за его сильной чувствительности к форме спектра регистрируемых гамма-квантов. Большие поправки, связанные с этой зависимостью, оценивались неточно, неоднократно пересматривались, что приводило к переоценке абсолютных сечений.

На рисунках 8 и 9 показано сравнение полного сечения и сечения реакции (n,2n) из библиотеки ENDF/B-VIIb2 с имеющимися экспериментальными данными. Возможно, что сечение реакции (n,2n) является несколько завышенным при энергии выше 14 МэВ.

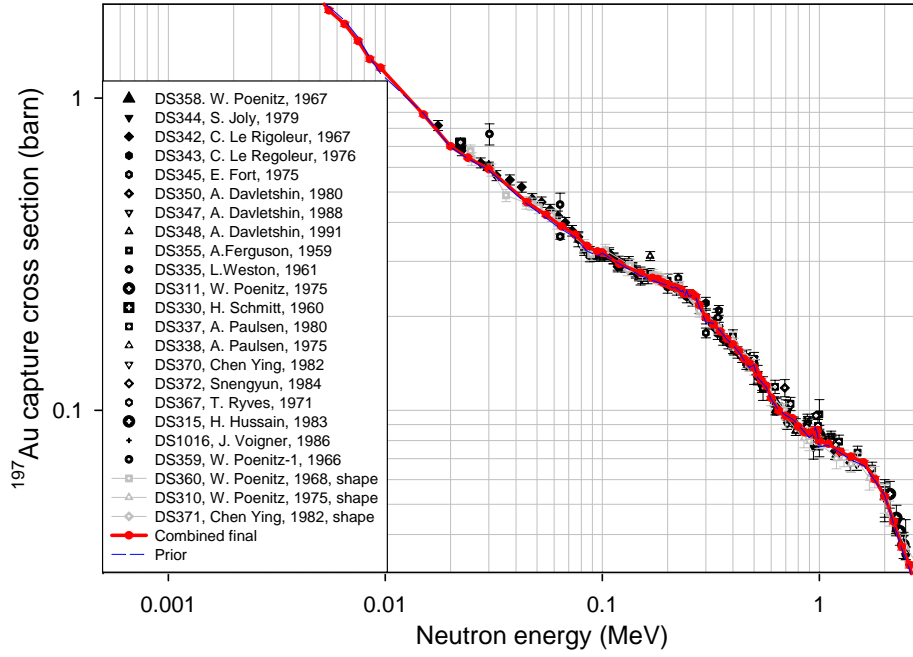


Рис. 4. Сечение захвата из библиотеки ENDF/B-VIIb2, показанное на рисунке сплошной толстой красной кривой (“combined final”) в сравнении с экспериментальными данными и оценкой ENDF/B-VI (пунктирная кривая, “prior”).

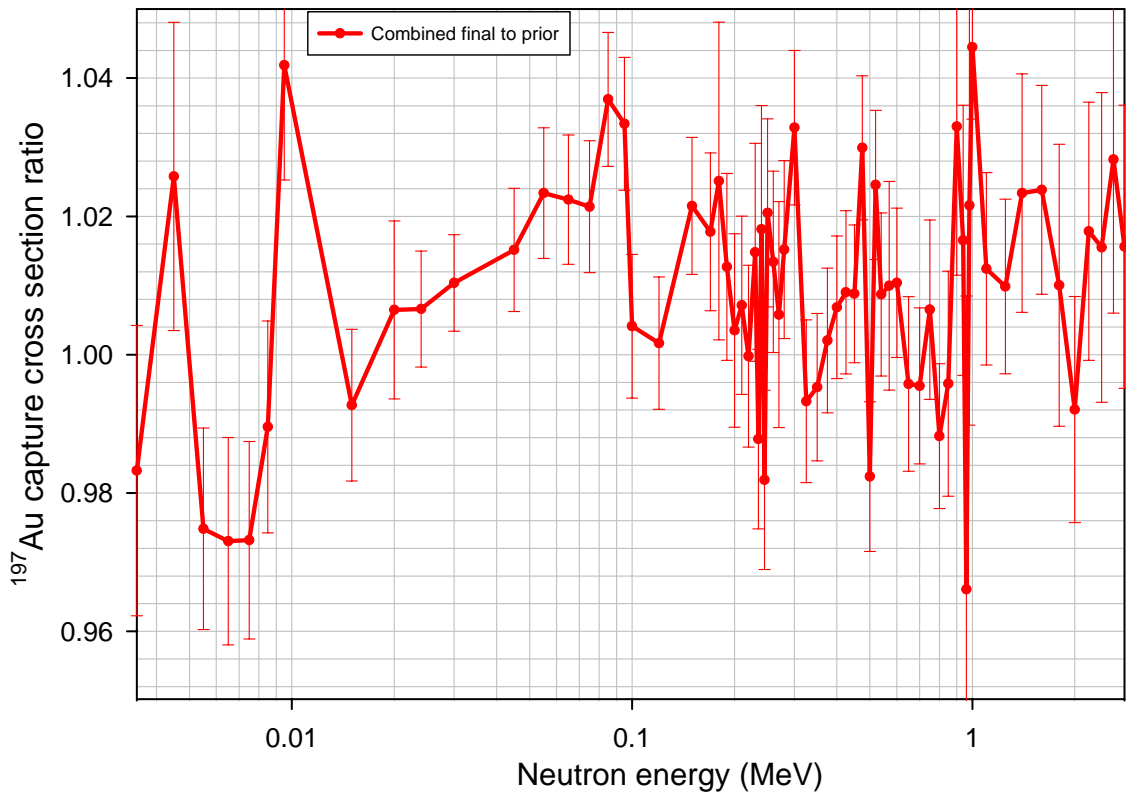


Рис. 5. Отношение сечения захвата из библиотеки ENDF/B-VIIb2 к оценке ENDF/B-VI. Приведённая ошибка – погрешность оценённого стандарта.

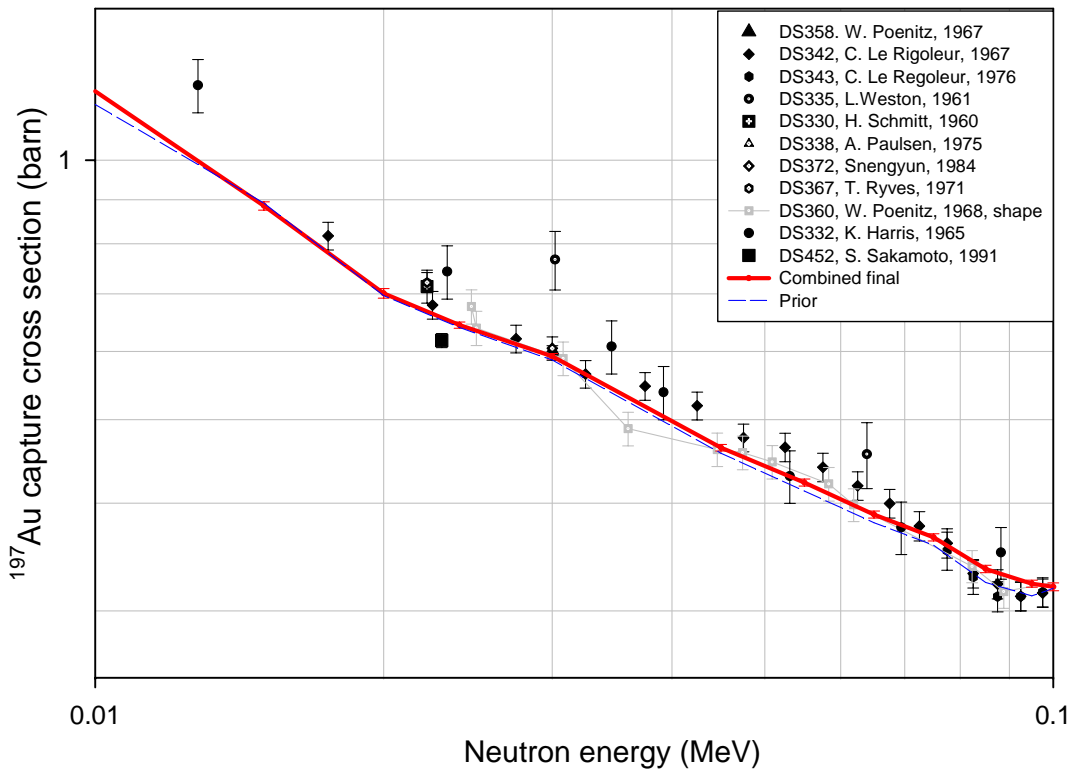


Рис. 6. Тоже что на рисунке 4 но для интервала энергий 0.01 – 0.1 МэВ.

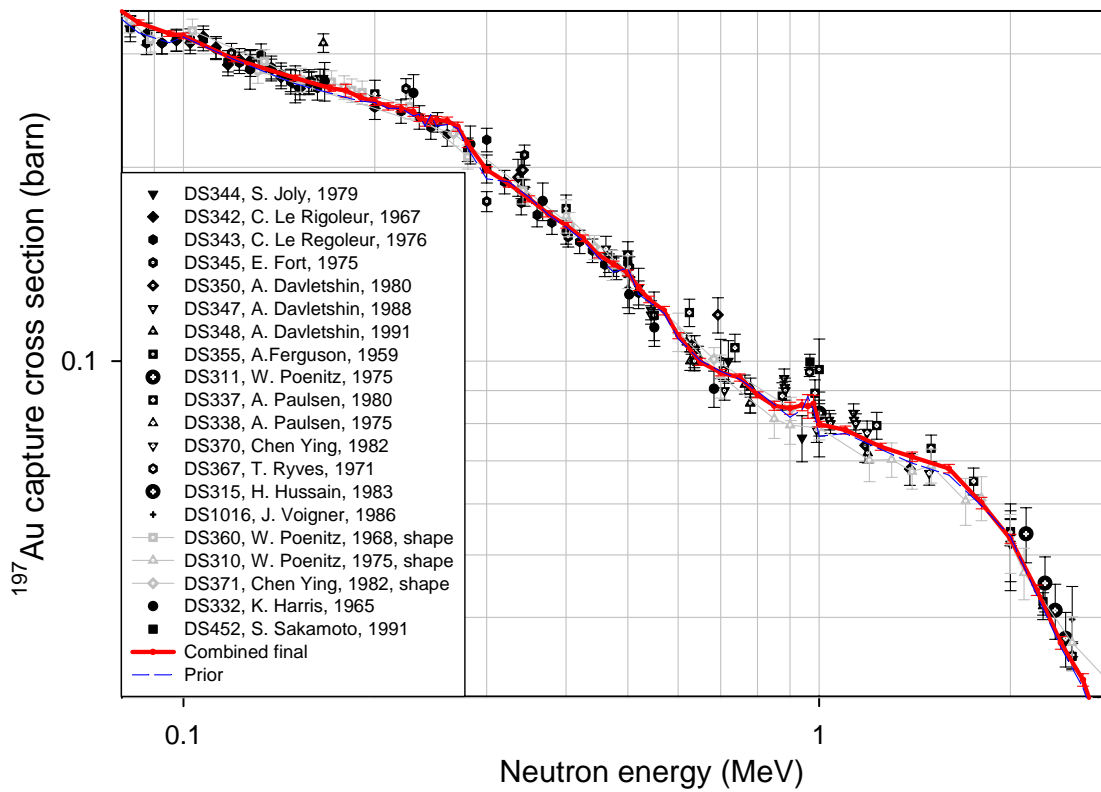


Рис. 7. Тоже что на рисунке 4 но для интервала энергий 0.1 – 2.8 МэВ.

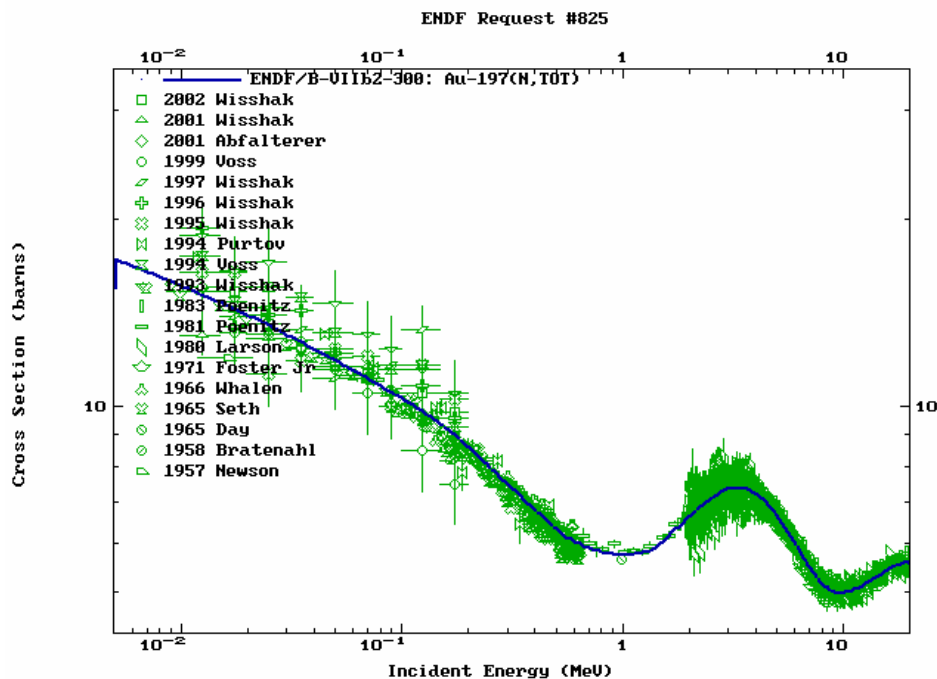


Рис. 8. Сравнение полного сечения из библиотеки ENDF/B-VIIb2 с имеющимися экспериментальными данными.

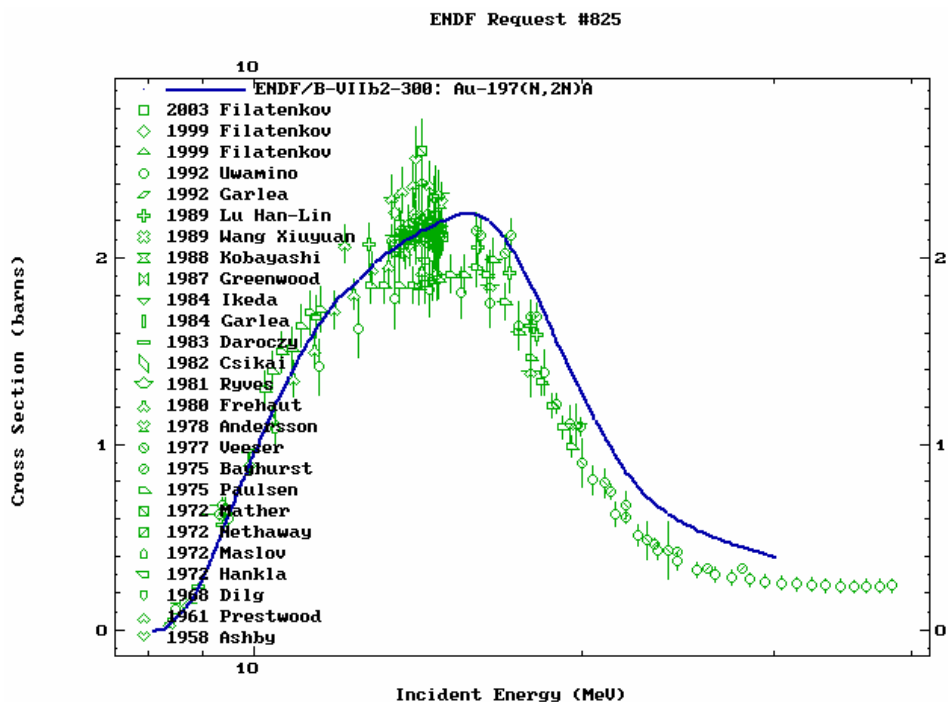


Рис. 8. Сравнение сечения (n,2n) из библиотеки ENDF/B-VIIb2 с имеющимися экспериментальными данными.

4. Заключение

Файл ^{197}Au из библиотеки ENDF/B-VIIb2 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД. Область представления данных следует сократить до 20 МэВ, в связи с чем данные о реакции (n,4n) удалить. Целесообразно дополнить файл данными о

сечениях реакций (n,t) и (n,nd) в результате которых образуется долгоживущий (4.02 дн.) изомер платины-195. Следует также ввести файл MF=9 с данными об образовании упомянутого изомера, изомерного состояния ^{198}Au при радиационном захвате и изомера ^{194}Ir (в реакции (n, α)). Необходимые данные взять из EAF-2003.

Авторы заключения

Проняев В.Г. и М.Н. Николаев (образование изомеров)

79.5. Золото-198g

Радиоактивно ($T_{1/2}=2.6943$ дн.). Испытывает бета-распад в стабильную ртуть-198. Используется для регистрации радиационного захвата в золоте (сечение этого процесса хорошо известно и рекомендовано в качестве стандарта).

Полные файлы нейтронных данных для этого изотопа неизвестны. Оценка нейтронных сечений содержится в библиотеке EAF. Экспериментально несколькими авторами измерено сечение радиационного захвата тепловых нейтронов, которое весьма велико – см. табл.1.

Таблица 1. Сечение захвата тепловых нейтронов по разным данным

| Автор | год | Значение при 0.0253эВ |
|-------------------------|------|-----------------------|
| P.Sherk | 1951 | 38 000 |
| R.E.Bell | 1955 | 26 000±1200 |
| F.Simpson ^{*)} | 1963 | 25 600±12 800 |
| M.J.Cabell | 1969 | 25 102±371 |
| V.Serment | 1970 | 28 300 |
| E.M.Gryntakis | 1976 | 26736±850 |
| S.Mughabghab | 1984 | 25100±370 |
| EAF-2003 | | 28 338 |

^{*)} Измерение полного сечения

В свете экспериментальных данных, представленных в таблице, оцененное в УФА-2003 сечение представляется несколько завышенным. Отмечая это, мы не считаем необходимым вносить в оценку изменения поскольку трудно представить себе ситуацию, в которой различие между оценками имело бы какое-либо практическое значение.

Заключение.

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, представленные в файле MF=10 сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Ввести файл MF=9 с данными об образовании иридия-194m.

Файлу присвоить МАТ=7998.

Автор заключения

Николаев М.Н.

79.6. Золото-198m

Радиоактивно ($T_{1/2}=2.30$ дн.). Испытывает изомерный переход в основное состояние.

Полные файлы нейтронных данных для этого изотопа неизвестны. Оценка нейтронных сечений содержится в библиотеке EAF. Экспериментальные данные о сечениях отсутствуют.

Заключение.

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, представленные в файле MF=10 сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Ввести файл MF=9 с данными об образовании иридия-194m. Сечение перехода в основное состояние переместить из файла MF=3 в файл MF=10.

Файлу присвоить MAT=7918.

Автор заключения

Николаев М.Н.

79.7. Золото-199

Радиоактивно ($T_{1/2}=3.139$ дн.). Испытывает бета распад в стабильную платину-199.

Полные файлы нейтронных данных для этого изотопа неизвестны. Оценка нейтронных сечений содержится в библиотеке EAF. Экспериментальные данные для их проверки отсутствуют.

Заключение.

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Сформировать файл MF=9 с секцией MT=16, содержащей вероятности образования золота-197 в основном и метастабильном состояниях. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить MAT=7999.

Автор заключения

Николаев М.Н.

80. РТУТЬ

80.0. Общие замечания

В библиотеке ФОНД-2.2 все нейтронные данные для 13 стабильных и долгоживущих изотопов ртути были приняты, главным образом, из библиотеки EAF-3. Полные файлы нейтронных данных для стабильных изотопов ртути отсутствовали. Для библиотеки РОСФОНД необходимо было отобрать полные нейтронные данные для 7-ми стабильных и 6-ти долгоживущих изотопов ртути. Главное внимание при анализе обращено на результаты оценки резонансных параметров, полного сечения взаимодействия, сечения радиационного захвата и сечения неупругого рассеяния нейтронов.

Все экспериментальные данные, используемые при сравнении с оцененными сечениями, были взяты из базы данных EXFOR-CINDA (версия 1.81, июнь 2005).

Радиоактивные изотопы.

Из 5-ти долгоживущих изотопов ртути – ^{194}Hg , ^{195}Hg , $^{195\text{m}}\text{Hg}$, ^{197}Hg , ^{203}Hg авторы библиотеки EAF в версии EAF-2003 данные по радиоактивному захвату нейтронов не пересматривали.

Для изотопа $^{197\text{m}}\text{Hg}$ в ФОНД-2.2 использовалась оценка ADL-3. В EAF-2003 находится оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

Стабильные изотопы.

Полные нейтронные данные для стабильных изотопов ртути имеются только в библиотеке JENDL-3.3 (оценка K.Shibata et al, 1997)..

В библиотеке JEF-3.1 используется та же оценка.

В ENDF.B-VII (beta 1.2 версия, ноябрь 2005) используется оценка JENDL-3.3, расширенная до 150 МэВ.

Кроме этого, в библиотеке CENDL-2.1 содержится оценка нейтронных данных для природной ртути, выполненная в 1993 году (Ma Gonggui, Zou Yiming).

80.1. Ртуть-194

Альфа-активна. $^{194}\text{Hg}(T_{1/2}=444. \text{ г}) \rightarrow ^{194}\text{Pt}$ (стабильный).

В ФОНД-2.2 – J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

На рисунке 1 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата пропорционально возросло. Все сечения реакций в EAF-2003 пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

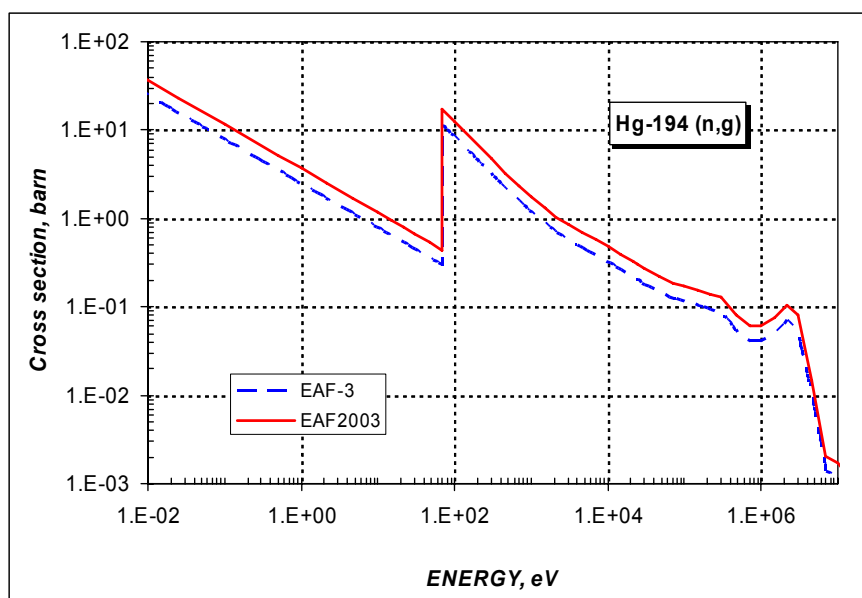


Рисунок 1 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Hg-194.

Сечение захвата тепловых нейтронов равно 23.274 барна.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1). Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Сформировать файл MF=9 с секцией MT=102 с вероятностями образования ртути-195 в основном и изомерном состояниях. Файлы MF=10 и MF=8 исключить.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

80.2. Ртуть-195m

Испытывает позитронный распад $^{195m}\text{Hg}(T_{1/2}=41.6 \text{ час}) \rightarrow ^{195}\text{Hg}(6.6 \text{ час})$
 $\rightarrow ^{195}\text{Au}(T_{1/2}=30.5 \text{ лет}) \rightarrow ^{195}\text{Pt}$ (стабильный).

В ФОНД-2.2 – оценка J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 3 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

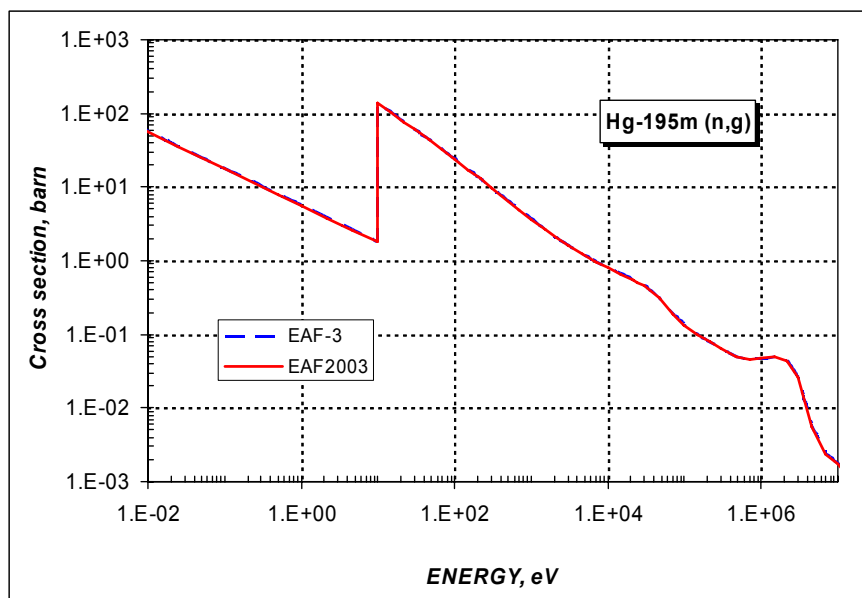


Рисунок 3 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Hg-195m. Сечение захвата тепловых нейтронов равно 35.59 барна.

Заклучение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1). Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущего изомера – $^{193}\text{Pt}^m$ – перенести в файл MF=9. Секцию MT=4 перенести из файла MF=3 в файл MF=10. Файл MF=8 исключить.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

80.3. Ртуть-196

Содержание в природной смеси ртути – 0.15 %.

В ФОНД-2.2 – оценка J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation) = ENDF/B-VIIb2 = JENDL-3.3 в области энергий до 20 МэВ.

Никаких экспериментальных данных, кроме измерений теплового сечения, в библиотеке EXFOR нет.

На рисунке 4 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из JENDL-3.3 с оценкой из ФОНД-2.2. Как видно, сечение радиационного захвата претерпело значительное изменение. Сечения основных нейтронных реакций в JENDL-3.3 описывается с помощью параметров разрешенных резонансов. Остальные сечения посчитаны на основе современных модельных параметров, полученных с более полным учетом систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

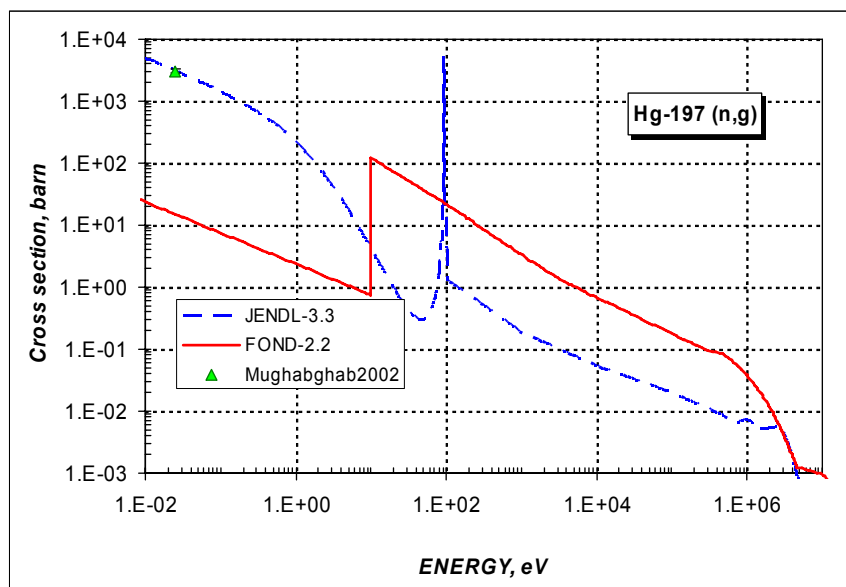


Рисунок 4 - Сечение радиационного захвата нейтронов на Hg-196.

Заключение

Учитывая полноту нейтронных данных для Hg-196 и согласие с экспериментальными данными, в РОСФОНД принимается оценка K.Shibata et al, 1997 (JENDL-3.3). Включить файл MF=9 с вероятностью образования $^{193}\text{Pt}^m$ и Hg-195m, используя данные из EAF-2003.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.Н.

80.4. Ртуть-197

Испытывает позитронный распад $^{197}\text{Hg}(T_{1/2}=64.14 \text{ час}) \rightarrow ^{197}\text{Au}$.

В ФОНД-2.2 – оценка J.Корецку, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kорецку, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 5 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

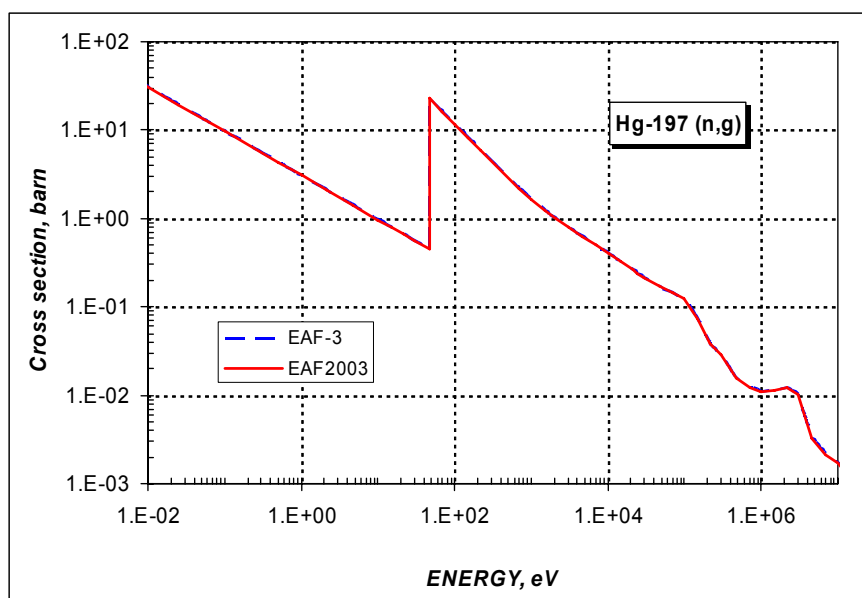


Рисунок 5 - Сечение радиационного захвата нейтронов на Hg-197.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1). Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании долгоживущих изомеров – Pt-193m, Pt-195m и Hg-195m – перенести в файл MF=9. Файлы MF=10 и MF=8 исключить.

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 35.59 барна.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

80.5. Ртуть-198

Содержание в естественной смеси 9.97 %.

В ФОНД-2.2 – оценка EAF-3.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная K.Shibata et al, 1997, в которой в области резонансных энергий заданы параметры разрешенных резонансов согласно компиляции Мухабхаба (1981). Оценка представляет собой полный набор нейтронных данных для расчета переноса нейтронов.

На рисунке 7 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок с имеющимися экспериментальными данными в области энергий 0.001 -10 МэВ.

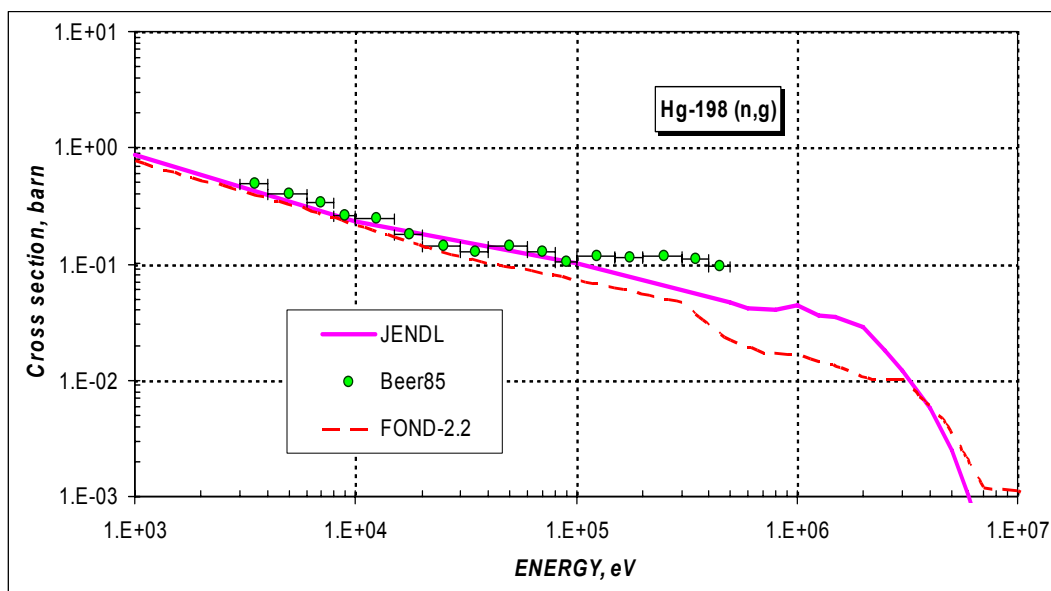


Рисунок 7 - Сечение радиационного захвата нейтронов на Hg-198.

Из представленного на рисунке 7 сравнения видно, что оценка Шибата и др. согласуется с экспериментальными данными группы Бира (1985 г.) несколько лучше, чем оценка Копеску (ФОНД-2.2=EAF-3), однако расхождения выше 100 кэВ остаются существенными. Заметим, что для более тяжелых изотопов, для которых также имеются данные Бира, согласие между ними и оцененными данными много лучше.

Заключение

Учитывая полноту нейтронных данных для Hg-198 и согласие с экспериментальными данными, в РОСФОНД принимается оценка K.Shibata et al, 1997 (JENDL-3.3). Включить файл MF=9 с данными об образовании долгоживущих изомеров— $^{195}\text{Pt}^m$ и $^{198}\text{Au}^m$, используя информацию из EAF-2003

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

80.6. Ртуть-199

Содержание в естественной смеси 16.87 %.

В ФОНД-2.2 – оценка EAF-3.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная K.Shibata et al, 1997, в которой в области резонансных энергий заданы параметры разрешенных резонансов согласно компиляции Мухабхаба (1981). Оценка представляет собой полный набор нейтронных данных для расчета переноса нейтронов.

На рисунке 8 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок с имеющимися экспериментальными данными в области энергий 0.001 -10 МэВ.

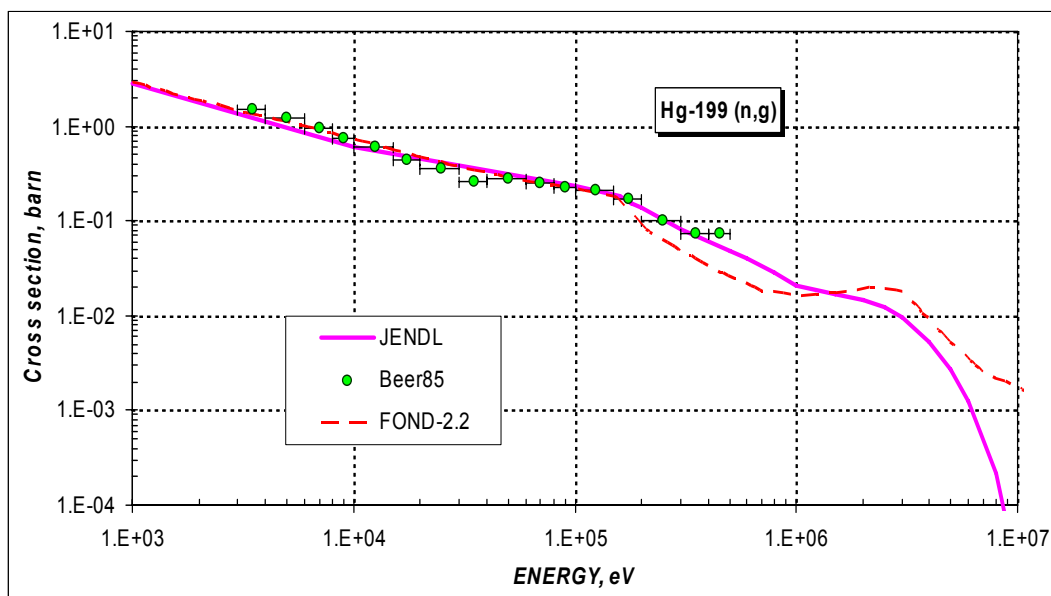


Рисунок 8 - Сечение радиационного захвата нейтронов на Hg-199.

Из представленного на рисунке 8 сравнения видно, что оценка Шибата и др. согласуется с экспериментальными данными группы Бира(1985 г.) в области энергий выше 100 кэВ несколько лучше, чем оценка Копеску (ФОНД-2.2=EAF-3).

Заключение

Учитывая полноту нейтронных данных для Hg-199 и согласие с экспериментальными данными, в РОСФОНД принимается оценка K.Shibata et al, 1997 (JENDL-3.3). Включить файл MF=9 с данными об образовании долгоживущих изомеров–Au-198m и Pt-195m, используя информацию из EAF-2003.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

80.7. Ртуть-200

Содержание в естественной смеси 23.10 %.

В ФОНД-2.2 – оценка EAF-3.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная K.Shibata et al, 1997, в которой в области резонансных энергий заданы параметры разрешенных резонансов согласно компиляции Мухабхаба (1981). Оценка представляет собой полный набор нейтронных данных для расчета переноса нейтронов.

На рисунке 8 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок с имеющимися экспериментальными данными в области энергий 0.001 -10 МэВ.

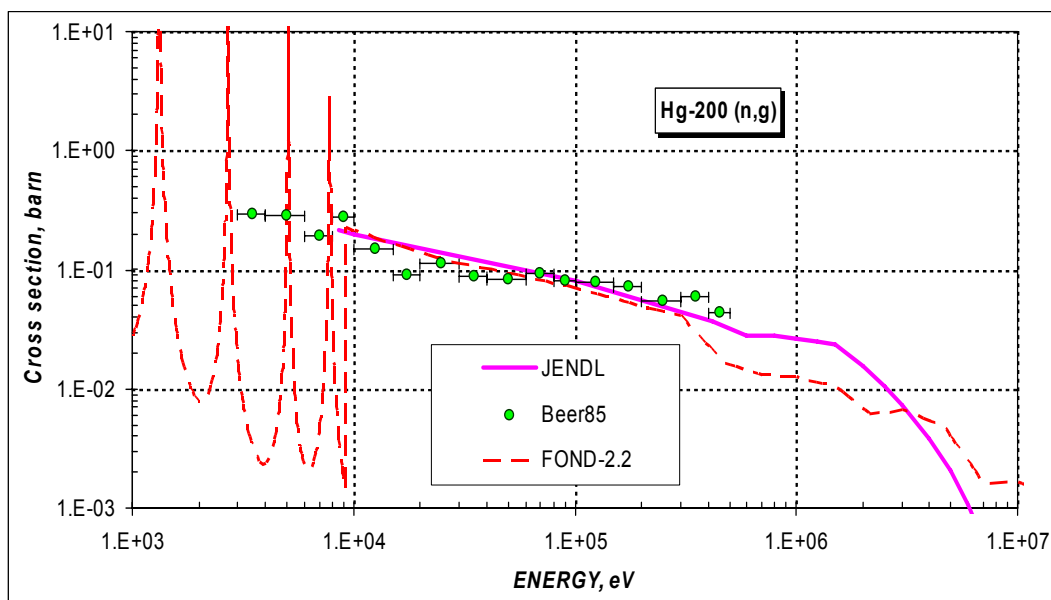


Рисунок 9 - Сечение радиационного захвата нейтронов на Hg-200.

Из представленного на рисунке 9 сравнения видно, что обе оценки хорошо согласуются с экспериментальными данными группы Бира(1985 г.).

Заключение

Учитывая полноту нейтронных данных для Hg-200 в РОСФОНД принимается оценка К.Шибата et al, 1997 (JENDL-3.3).

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

80.8. Ртуть-201

Содержание в естественной смеси 13.18 %.

В ФОНД-2.2 – оценка EAF-3.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная К.Шибата et al, 1997, в которой в области резонансных энергий заданы параметры разрешенных резонансов согласно компиляции Мухабхаба (1981). Оценка представляет собой полный набор нейтронных данных для расчета переноса нейтронов.

На рисунке 10 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок с имеющимися экспериментальными данными в области энергий 0.001 -10 МэВ.

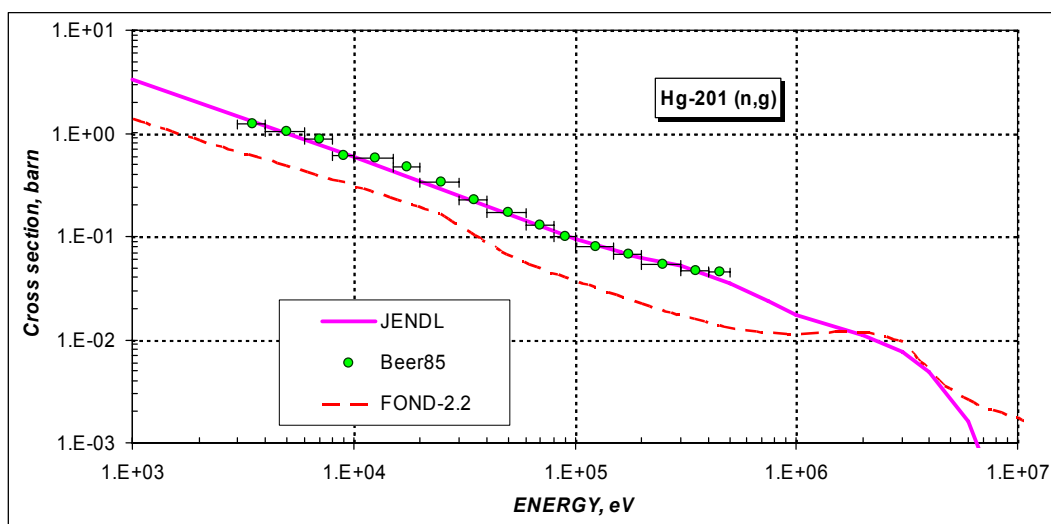


Рисунок 10 - Сечение радиационного захвата нейтронов на Hg-201.

Из представленного на рисунке 10 сравнения видно, что только оценка Шибата и др. согласуется с экспериментальными данными группы Бира(1985 г.). Оценка Копеску (ФОНД-2.2=EAF-3) занижена относительно эксперимента.

Заключение

Учитывая полноту нейтронных данных для Hg-201 и согласие с экспериментальными данными, в РОСФОНД принимается оценка K.Shibata et al, 1997 (JENDL-3.3).

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

80.9. Ртуть-202

Содержание в естественной смеси 29.86 %.

В ФОНД-2.2 – оценка EAF-3.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная K.Shibata et al, 1997, в которой в области резонансных энергий заданы параметры разрешенных резонансов согласно компиляции Мухабхаба (1981). Оценка представляет собой полный набор нейтронных данных для расчета переноса нейтронов.

На рисунке 11 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок с имеющимися экспериментальными данными в области энергий 0.001 -10 МэВ.

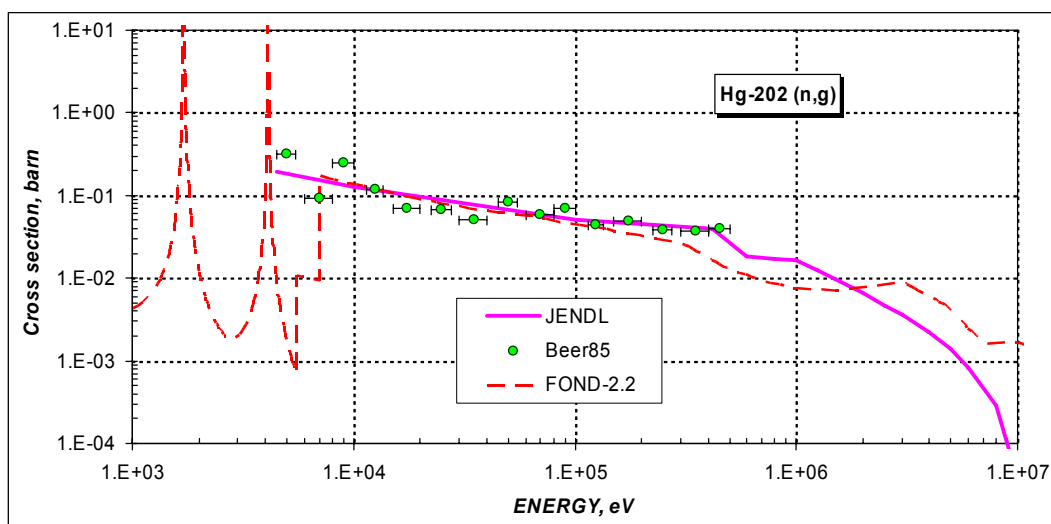


Рисунок 11 - Сечение радиационного захвата нейтронов на Hg-202.

Из представленного на рисунке 11 сравнения видно, что оценка Шибата и др. согласуется с экспериментальными данными группы Бира(1985 г.) в области энергий выше 100 кэВ несколько лучше, чем оценка Копеску (ФОНД-2.2=EAF-3).

Заключение

Учитывая полноту нейтронных данных для Hg-202 и согласие с экспериментальными данными, в РОСФОНД принимается оценка K.Shibata et al, 1997 (JENDL-3.3).

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

80.10. Ртуть-203

Испытывает β -распад $^{203}\text{Hg}(T_{1/2}=46.612 \text{ д}) \rightarrow ^{203}\text{Tl}$.

В ФОНД-2.2 – оценка J.Копеску, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Копеску, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 12 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

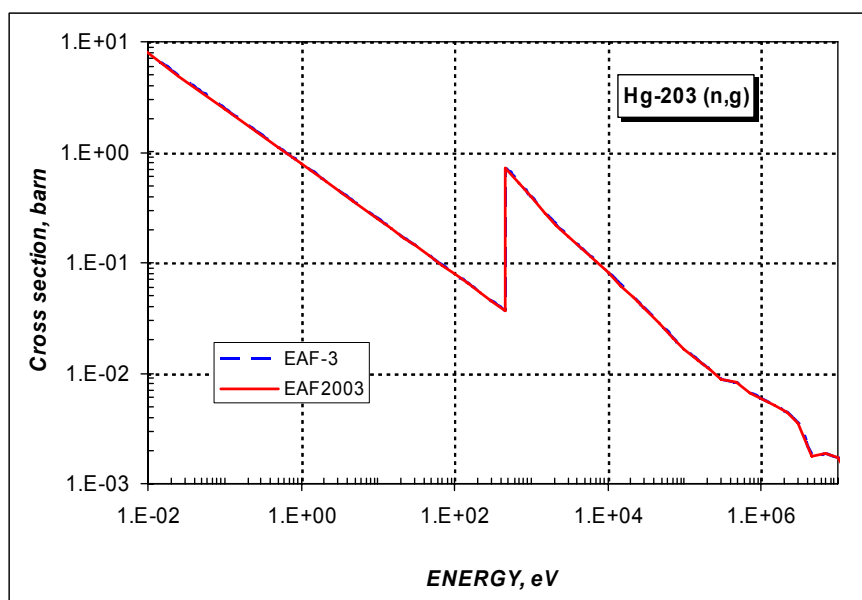


Рисунок 12 - Сечение радиационного захвата нейтронов на Hg-203. Сечение захвата тепловых нейтронов оно равно 4.948 барна.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1). Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=10 и MF=8 исключить.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

80.13. Ртуть-204.

Содержание в естественной смеси 6.87 %.

В ФОНД-2.2 – оценка EAF-3.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная K.Shibata et al, 1997, в которой в области резонансных энергий заданы параметры разрешенных резонансов согласно компиляции Мухабхаба (1981). Оценка представляет собой полный набор нейтронных данных для расчета переноса нейтронов.

На рисунке 11 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок с имеющимися экспериментальными данными в области энергий 0.001 -10 МэВ.

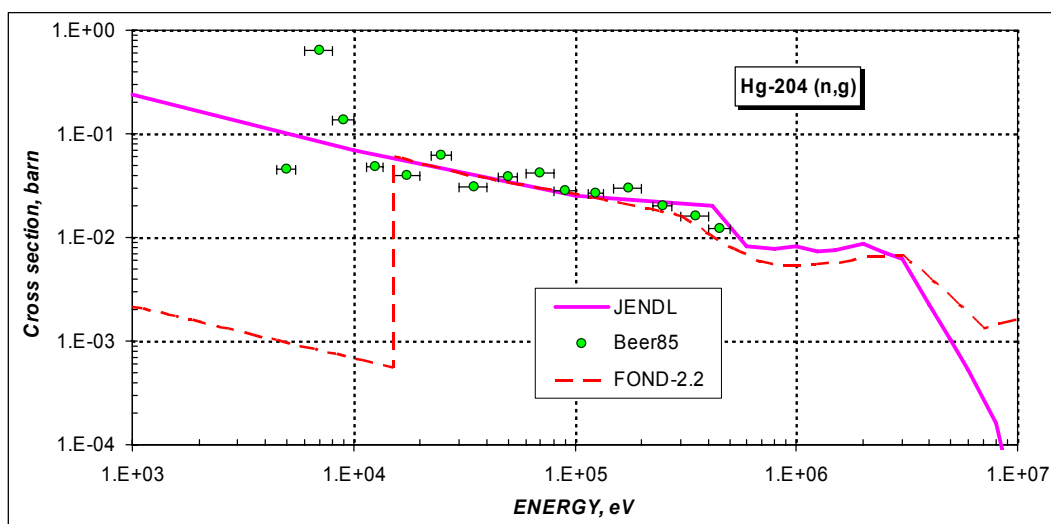


Рисунок 13 - Сечение радиационного захвата нейтронов на Hg-204.

Из представленного на рисунке 13 сравнения видно, что оценка Шибата и др. согласуется с экспериментальными данными группы Бира (1985 г.) в области энергий до 20 кэВ несколько лучше, чем оценка Копеску (ФОНД-2.2=EAF-3).

Заключение

Учитывая полноту нейтронных данных для Hg-204 и согласие с экспериментальными данными, в РОСФОНД принимается оценка K. Shibata et al, 1997 (JENDL-3.3).

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

80.14. Природная ртуть

В настоящем разделе приводятся результаты тестирования только для тех типов сечения, для которых в международной базе экспериментальной информации EXFOR имелись какие-либо наборы экспериментальных данных.

На рисунке 14 приведено сравнение оцененных сечений полного взаимодействия в области тепловых энергий 0.01 эВ - 10 эВ.

Полное сечение для природной смеси из оценки JENDL было подготовлено с помощью переработки нейтронных данных стабильных нуклидов посредством модулей MIXER из пакета прикладных программ PREPRO-2002, который доступен на сайте <http://www-nds.iaea.or.at/>

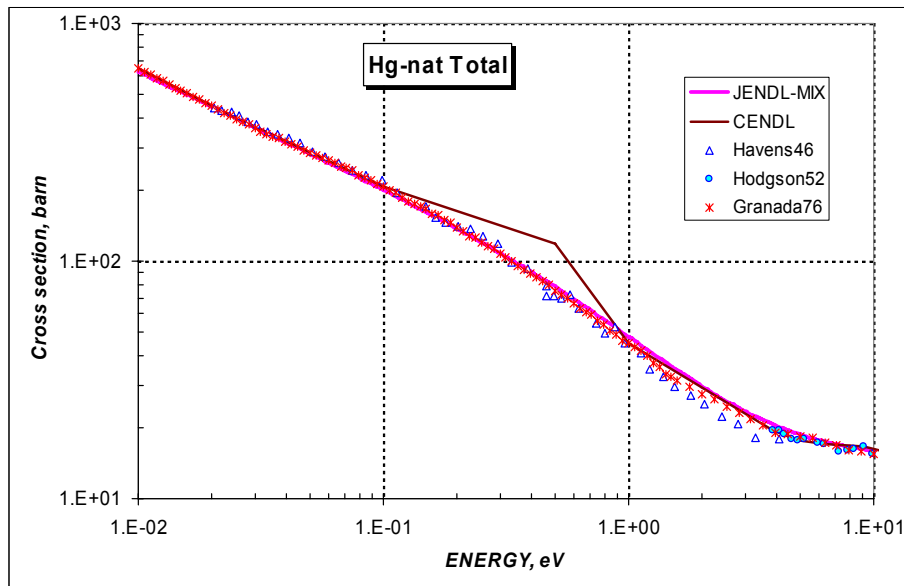


Рисунок 14 – Сравнение оцененных мультигрупповых сечений полного взаимодействия для Hg-nat в области энергий 0.01 эВ – 10 эВ.

Из приведенного на рисунке 14 сравнения видно, что в CENDL имеет место некорректное задание точек для интерполяции сечения в области тепловых энергий. Оценка JENDL хорошо согласуется с экспериментальными данными.

На рисунке 15 показано сравнение оцененных полных сечений с имеющимися экспериментальными данными в области резонансных и гладких сечений.

Из представленной на рисунке 15 информации видно, что

Оценка полного сечения оценки JENDL в интервале энергий от 10 до 400 эВ хорошо согласуется с экспериментальными данными, в то время, как оценка CENDL носит грубый характер описания резонансных уровней.

В области энергий выше 40 кэВ оценка JENDL начинает не соответствовать экспериментальным данным (особенно при описании сечения взаимодействия между резонансными уровнями). Сечение остается завышенным вплоть до энергии 1 МэВ.

Выше 1 МэВ обе оценки прекрасно согласуются, как со старыми, так и с новыми наборами экспериментальных измерений.

Выше 400 кэВ наблюдается большее число резонансных уровней, чем представлено в файлах оцененных нейтронных данных. Эти уровни довольно грубо описаны в оценке CENDL.

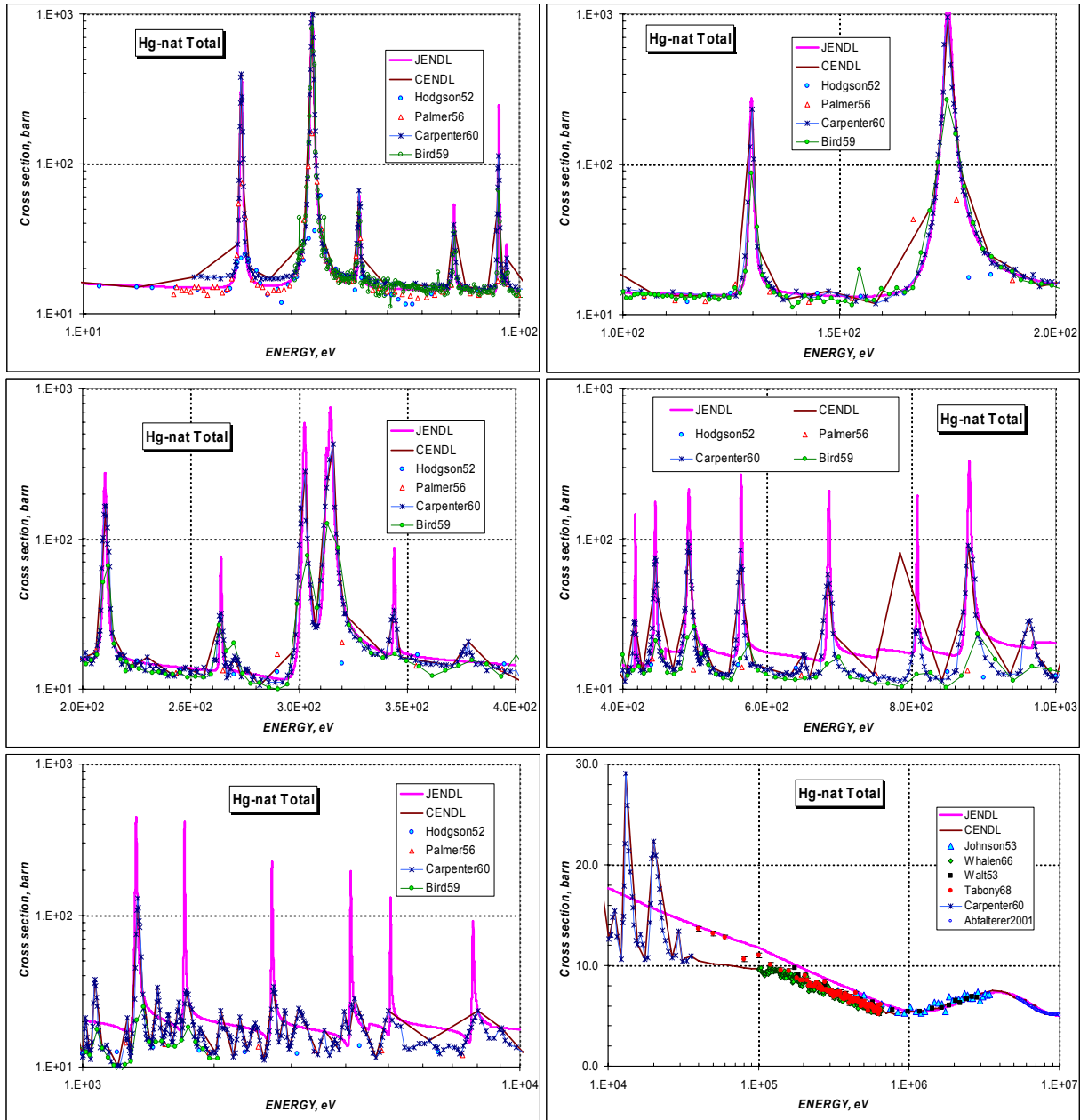


Рисунок 15 – Сравнение оцененных мультигрупповых сечений полного взаимодействия для Hg-nat в области энергий 10 эВ – 10 МэВ.

Следует отметить здесь, что и оценка CENDL и оценка JENDL в области резонансных энергий опираются на компиляцию BNL-325 (Мухабхаб, 1981). После 1980 года появилась работа группы H. Beer et al (1985), в которой приводятся результаты экспериментальных измерений сечений в виде параметров разрешенных резонансов для стабильных изотопов ртути. Разрешенные параметры идентифицированы в области энергий от ~ 3 кэВ до ~ 100 кэВ в зависимости от нуклида. Эта работа, вероятно, учтена в новой компиляции Мухабхаба, вышедшая в 2006 году. В настоящий момент новая компиляция нам недоступна.

Сравнение оцененных ²⁹⁹-мультигрупповых сечений радиационного захвата с имеющимися экспериментальными данными показано на рисунке 16 для области энергий от 0.1 эВ до 10 МэВ.

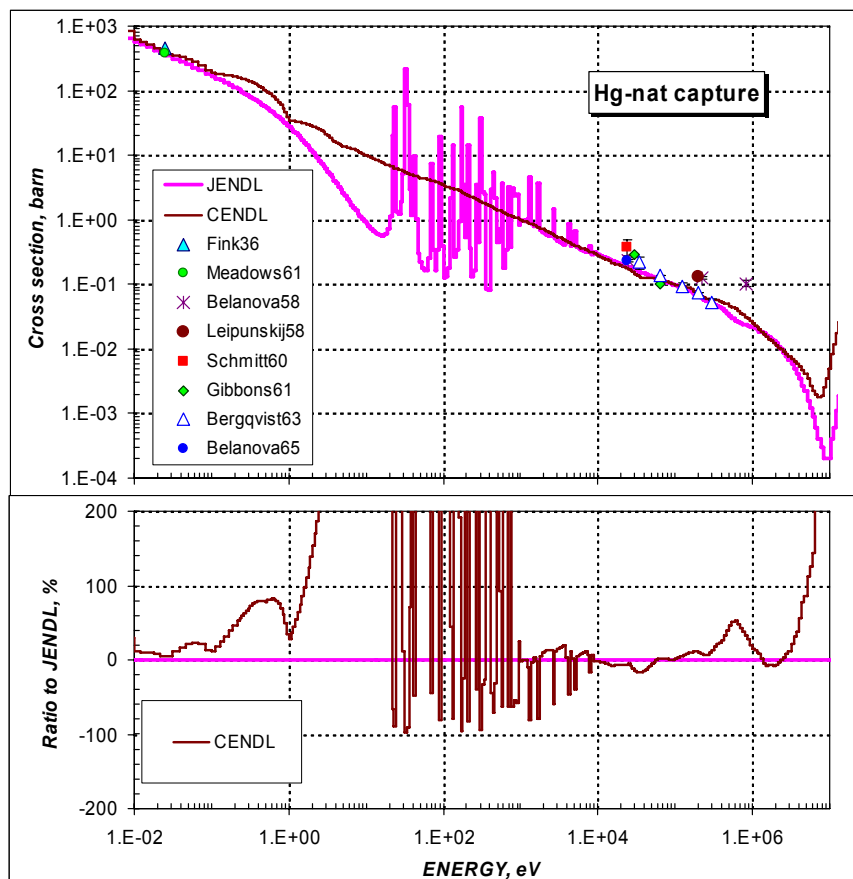


Рисунок 16 – Сравнение оцененных и экспериментальных данных для сечения радиационного захвата Hg-nat.

Из приведенного сравнения на рисунке 16 видно, что в тепловой области энергий в оценке CENDL, как в случае полного сечения, имеет место некорректное задание точек для интерполяции сечения; в области резонансных энергий оценка CENDL воспроизводит сечение радиационного захвата сглаженной кривой, которая достаточно хорошо воспроизводит усредненное сечение, практически не описывает резонансную самоэкранировку сечений; в области гладких сечений одинаковым образом согласуются с имеющимися немногочисленными экспериментальными данными.

Для сечения радиационного захвата были также посчитаны значения сечения в тепловой точке и резонансный интеграл на основе рассмотренных выше значений для стабильных изотопов. Они сравнивались со значениями, рекомендованными в компиляции Мухабхаба. Сравнение приведено в таблице 1.

Таблица 1. Резонансные свойства Hg-nat.

| Оценка | $\sigma_{\gamma}(2200)$, барн | I_{γ} , барн |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| JENDL | 370. | 88.2 |
| CENDL | 384. | 119. |
| Mughabgh | 372.3 ± 4.0 | $73. \pm 5.$ |

Из приведенной в таблице 1 информации видно, что оценка JENDL наилучшим образом согласуется с рекомендуемыми значениями Мухабхаба. В то время, как в оценке CENDL находятся завышенные значения.

И, наконец, в базе экспериментальных данных EXFOR имелись немногочисленная экспериментальная информация по сечению неупругого рассеяния нейтронов. На рисунке 17 представлено сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния и экспериментальных данных.

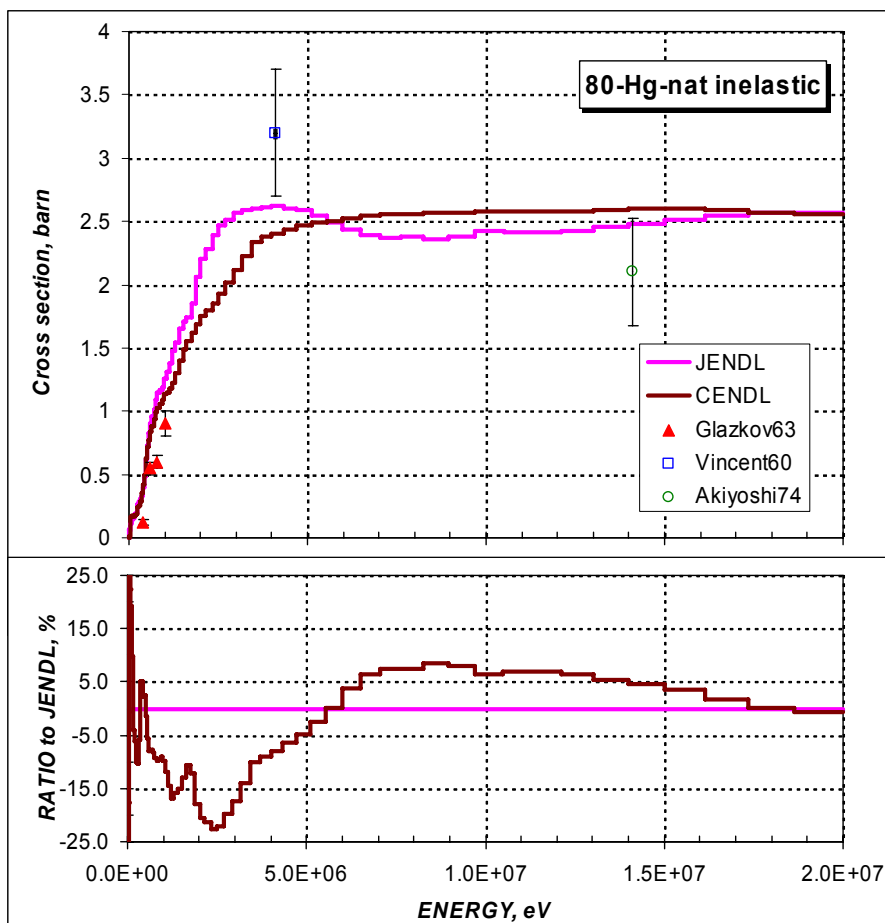


Рисунок 17 – Сравнение оцененных и экспериментальных данных для сечения неупругого рассеяния на Hg-nat.

Из представленной на рисунке 17 информации видно, что имеющиеся экспериментальные данные не позволяют определить наилучшую оценку сечения неупругого рассеяния.

Ниже, в таблице 2 сравниваются энергии уровней неупругого рассеяния нейтронов, используемые в рассматриваемых оценках. Энергии уровней (МэВ) идентифицированы с атомным весом нуклида, на котором происходит процесс неупругого рассеяния.

Из приведенных в таблице 2 данных видно, что в оценках совпадают лишь первых 11 уровней. Далее в CENDL наблюдаются пропуски уровней. Пропуск нарастает с ростом энергии. Выделенные желтым фоном уровни относятся к энергии континуума уровней.

Таблица 2 – Уровни неупругого рассеяния нейтронов для изотопов ртути

| 80-Hg-A | JENDL | CENDL | A | JENDL | CENDL | A | JENDL | CENDL | A | JENDL | CENDL | A | JENDL | CENDL |
|---------|---------------|--------|-----|---------------|---------------|-----|---------------|--------|-----|---------------|--------|-----|---------------|--------|
| A | E, MeV | E, MeV | A | E, MeV | E, MeV | A | E, MeV | E, MeV | A | E, MeV | E, MeV | A | E, MeV | E, MeV |
| 201 | 0.0016 | 0.0016 | 199 | 0.7504 | | 202 | 1.5756 | | 204 | 1.8414 | | 200 | 2.1270 | |
| 201 | 0.0263 | 0.0263 | 201 | 0.7660 | | 200 | 1.5934 | 1.5934 | 196 | 1.8450 | | 200 | 2.1279 | |
| 201 | 0.0321 | 0.0322 | 201 | 0.7662 | | 198 | 1.6124 | | 200 | 1.8458 | | 200 | 2.1355 | |
| 199 | 0.1584 | 0.1584 | 200 | 0.9472 | 0.9472 | 200 | 1.6309 | 1.6309 | 198 | 1.8472 | | 204 | 2.1408 | |
| 201 | 0.1675 | 0.1675 | 202 | 0.9597 | 0.9597 | 198 | 1.6356 | | 202 | 1.8513 | | 200 | 2.1438 | |
| 199 | 0.2082 | 0.2082 | 200 | 1.0293 | 1.0293 | 200 | 1.6414 | | 200 | 1.8515 | | 200 | 2.1514 | |
| 200 | 0.3679 | 0.3679 | 196 | 1.0362 | | 202 | 1.6432 | | 200 | 1.8568 | | 200 | 2.1895 | |
| 201 | 0.3846 | 0.3846 | 198 | 1.0485 | 1.0485 | 200 | 1.6590 | | 198 | 1.8588 | | 204 | 2.1908 | |
| 199 | 0.4035 | 0.4035 | 196 | 1.0609 | | 202 | 1.6782 | | 200 | 1.8829 | | 196 | 2.2626 | |
| 198 | 0.4118 | 0.4118 | 198 | 1.0877 | 1.0877 | 198 | 1.6833 | | 198 | 1.8993 | | 204 | 2.2628 | |
| 199 | 0.4139 | 0.4139 | 202 | 1.1197 | 1.1197 | 200 | 1.7067 | | 198 | 1.9014 | | 204 | 2.3004 | |
| 201 | 0.4145 | | 204 | 1.1283 | 1.1284 | 200 | 1.7183 | | 198 | 1.9097 | | 196 | 2.3460 | |
| 196 | 0.4260 | | 202 | 1.1822 | 1.1822 | 202 | 1.7248 | | 198 | 1.9108 | | 196 | 2.3596 | |
| 204 | 0.4365 | 0.4366 | 200 | 1.2541 | 1.2541 | 200 | 1.7309 | | 198 | 1.9110 | | 204 | 2.3961 | |
| 202 | 0.4396 | 0.4396 | 202 | 1.3116 | 1.3116 | 200 | 1.7343 | | 196 | 1.9215 | | 196 | 2.4552 | |
| 199 | 0.4555 | | 196 | 1.3189 | | 202 | 1.7459 | | 204 | 1.9477 | | 196 | 2.4955 | |
| 201 | 0.4644 | | 202 | 1.3479 | | 196 | 1.7568 | | 200 | 1.9626 | | 196 | 2.4960 | |
| 199 | 0.4923 | | 202 | 1.3898 | | 198 | 1.7600 | | 200 | 1.9723 | | 204 | 2.6753 | |
| 199 | 0.5325 | | 196 | 1.3906 | | 196 | 1.7753 | | 200 | 1.9743 | | 204 | 2.7241 | |
| 201 | 0.5430 | | 198 | 1.4015 | 1.4015 | 200 | 1.7756 | | 196 | 1.9787 | | 204 | 2.7267 | |
| 201 | 0.5473 | | 198 | 1.4194 | 1.4194 | 196 | 1.7850 | | 204 | 1.9890 | | 204 | 2.7603 | |
| 201 | 0.5530 | | 202 | 1.4570 | | 202 | 1.7885 | | 196 | 2.0123 | | 204 | 2.8128 | |
| 199 | 0.6380 | | 202 | 1.5088 | | 202 | 1.7940 | | 200 | 2.0491 | | 204 | 2.8130 | |
| 201 | 0.6454 | | 200 | 1.5152 | 1.5152 | 202 | 1.7943 | | 200 | 2.0613 | | | | |
| 199 | 0.6689 | | 202 | 1.5240 | | 196 | 1.8147 | | 196 | 2.0637 | | | | |
| 199 | 0.6959 | | 198 | 1.5485 | | 198 | 1.8158 | | 200 | 2.0743 | | | | |
| 199 | 0.7129 | | 202 | 1.5621 | | 204 | 1.8286 | | 204 | 2.0888 | | | | |
| 201 | 0.7330 | | 202 | 1.5647 | | 198 | 1.8325 | | 200 | 2.1143 | | | | |
| 199 | 0.7374 | | 200 | 1.5703 | 1.5703 | 198 | 1.8349 | | 200 | 2.1165 | | | | |
| 199 | 0.7500 | | 200 | 1.5737 | 1.5737 | 196 | 1.8408 | | 200 | 2.1269 | | | | |

Заключение

Принятые в РОСФОНД оценки K.Shibata et al, 1997 (JENDL-3.3) для стабильных изотопов ртути хорошо согласуются с имеющейся совокупностью экспериментальных данных для природной смеси.

Имеется возможность обновления параметров разрешенных резонансов для всех стабильных изотопов ртути на основе новых экспериментальных работ.

Нейтронные данные для стабильных изотопов следовало бы уточнены в области энергий от 500 эВ до 1 МэВ для лучшей согласованности с экспериментальными данными.

81. ТАЛЛИЙ

Таллий обладает двумя стабильными (^{203}Tl и ^{205}Tl) и четырьмя долгоживущими радиоактивными изотопами (^{200}Tl , ^{201}Tl , ^{202}Tl и ^{204}Tl). Ни для одного из этих изотопов в известных библиотеках не содержится полных файлов нейтронных данных. Однако для природного таллия был составлен полный файл нейтронных данных для китайской библиотеки CENDL-2, который без изменений был принят и в библиотеку JEFF-3.1. Других полных наборов оцененных данных для природного таллия неизвестно.

81.1. Природный таллий

Природный таллий содержит 29.524% ^{203}Tl и 70.476% ^{205}Tl . Единственный файл оцененных данных был составлен Чжоу Юмингом (Zhou Yiming) и Ма Гонггуи (Vf Gonggui) из сычуанского института ядерной науки и техники в 1993 г. Рассматриваемые ниже данные почерпнуты из библиотеки JEFF-3.1, в которую этот файл включен без изменений.

1. Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов распространена от 100 эВ до 50 кэВ. Сечения в этом интервале описываются параметрами разрешенных резонансов каждого из изотопов. Параметры резонансов взяты из известной компиляции Мухабхаба.

Таблица 1. Характеристики параметров разрешенных резонансов

| Изотоп | s-резонансы | | p-резонансы | |
|------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| | Число | Макс. энергия | Число | Макс. энергия |
| Таллий-203 | 68 | 45498 эВ | 17 | 12120эВ |
| Таллий-205 | 16 | 93000эВ | 15 | 81650 эВ |

Уже из приведенных данных видно, что заметная часть резонансов. По крайней мере таллия-203, в области разрешенных резонансов пропущена. Это более отчетливо видно из рис.1, на котором изображены нарастающие суммы резонансов.

Следует, однако, отметить, что резонансы таллия-203, идентифицированные как p-резонансы, имеют нейтронные ширины в среднем в 180 раз меньшие, чем s-резонансы, лежащие при энергиях ниже 12 кэВ. С ростом энергии нейтронные ширины p-резонансов нарастают пропорционально $E^{3/2}$, т.е. много быстрее, чем ширины p-резонансов (нарастающие пропорционально $E^{1/2}$). Тем не менее ясно, что вклад пропущенных p-резонансов в нейтронные сечения даже на границе области разрешенных резонансов будет много ниже вклада s-резонансов для этого изотопа.

Пропуск s-резонансов, судя по всему, явится более существенной причиной недооценки вклада таллия-203 в нейтронные сечения. Однако и этот фактор, вероятно, не слишком существен, поскольку пропускаются лишь самые узкие, слабые s-резонансы, о чем можно судить по приближенной линейности энергетической зависимости нарастающей суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов таллия-203 (см. рис.2).

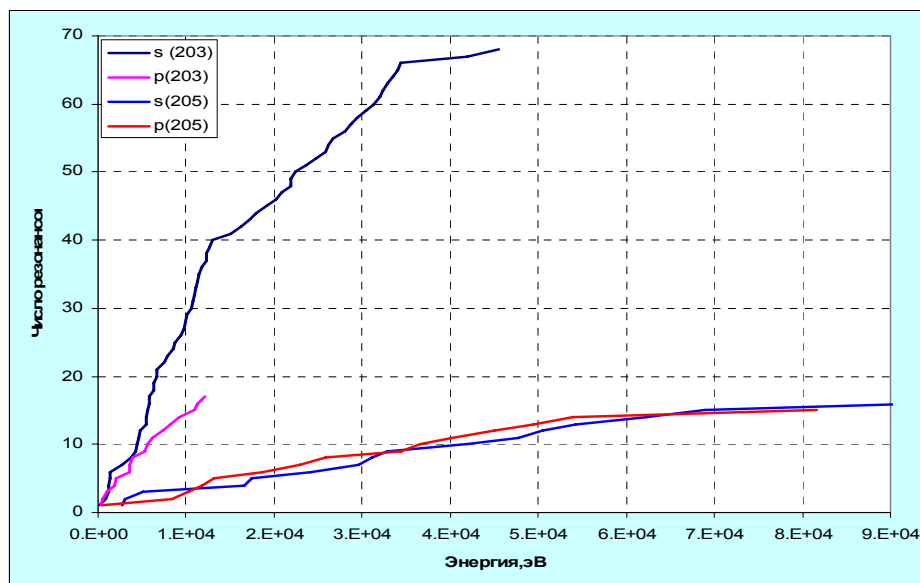


Рис.1. Нарастающие суммы s- и p-резонансов изотопов таллия.

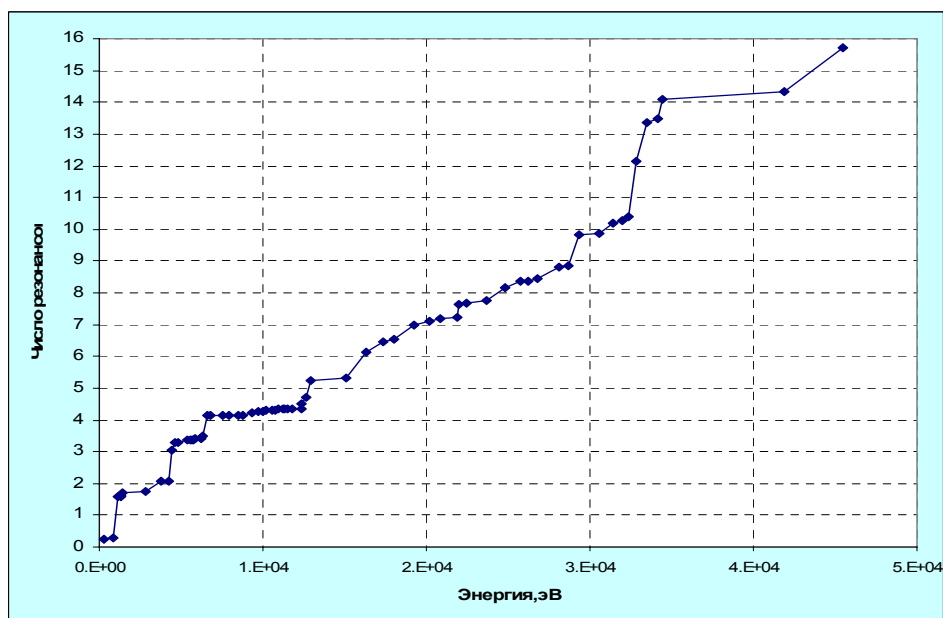


Рис.2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин s-резонансов таллия-203.

Что касается таллия-205, то для него пропуск уровней проявляется, как видно, из рис.1, лишь при энергиях выше 50 кэВ. Таким образом, определение верхней границы области разрешенных резонансов при 50 кэВ, представляется достаточно оправданным.

Что касается нижней границы, то она выбрана значительно ниже энергии первого резонанса любого из изотопов и детальное описание хода сечений ниже 100 эВ позволяет избежать подбора параметров связанных состояний для каждого из изотопов. Разумеется, тепловые сечения захвата и рассеяния точно согласуются с рекомендованными Мухабхабом для природного таллия: $\sigma_c=3.43$ барна (± 0.06); $\sigma_e=10.01$ барна (± 0.05) (в скобках указаны оцененные Мухабхабом погрешности). Резонансный интеграл, вытекающий из данных файла, равен 13.72 барна, т.е. близок к оценке Мухабхаба (12.9 ± 0.8 барна).

2. Сечения вне резонансной области

На рис. 3 оцененное полное сечение сравнивается с экспериментальными данными.

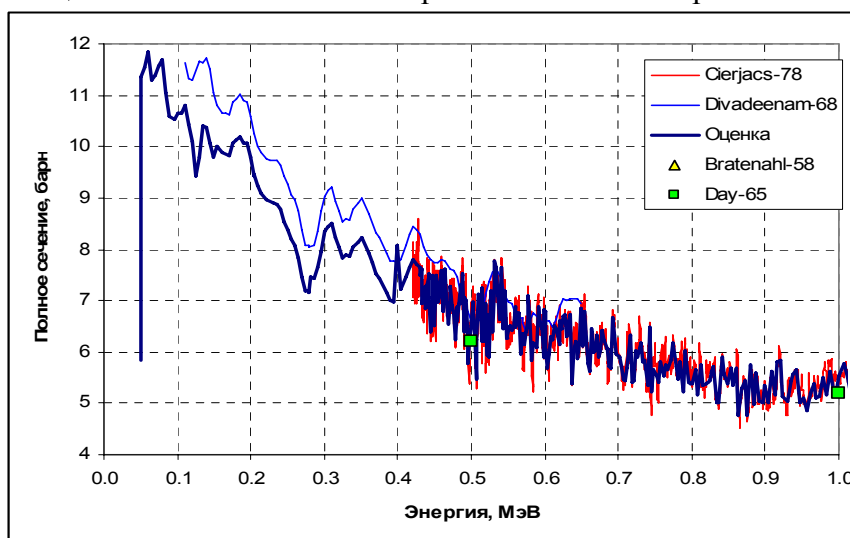


Рис.3а. Полное сечение

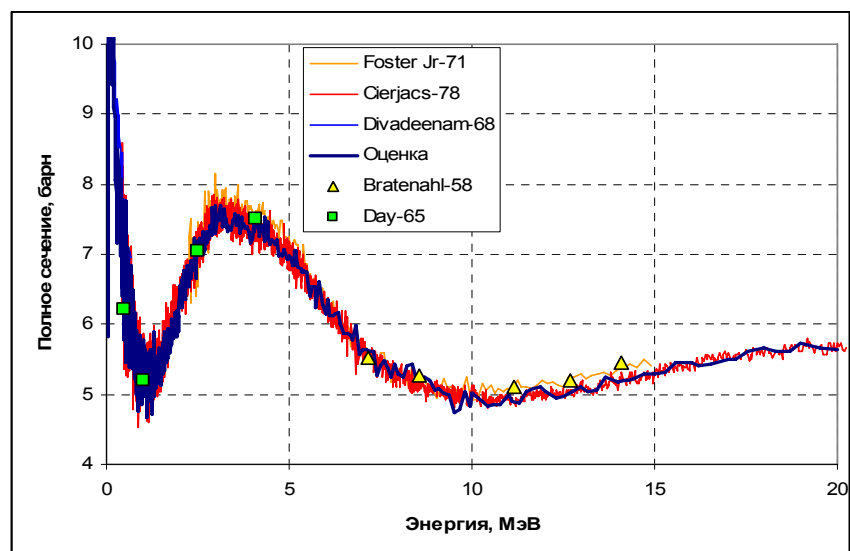


Рис.3б. Полное сечение.

Как видно, оценка полного сечения целиком опирается на результаты измерений. «Рябь» в сечении при высоких энергиях едва ли является оправданной, однако и практического значения она не имеет. При энергиях порядка сот кэВ данные Дивадинэма обоснованно перенормированы на результаты, полученные другими авторами. Причина систематической погрешности результата этого эксперимента состоит, вероятно, в недооценке толщины образца. При 50 кэВ в оценке полного сечения имеется «прыжок», обеспечивающий стык с сечением, рассчитанным по параметрам разрешенных резонансов. Целесообразность введения этого скачка сечений сомнительна, и в РОСФОНДе он присутствовать не будет.

На рис. 4. проводится сравнение данных по сечению радиационного захвата. При низких энергиях сечение захвата представляется неоправданно заниженным. В РОСФОНДе принимается более плавная кривая, также изображенная на рисунке. Поведение этого сечения также обосновывается имеющимися экспериментальными данными. Заметим. Что результаты Воинджера и Конкса имеются также и для отдельных изотопов, суммы по изотопам согласуются с данными для природной смеси и тем самым подтверждают их.

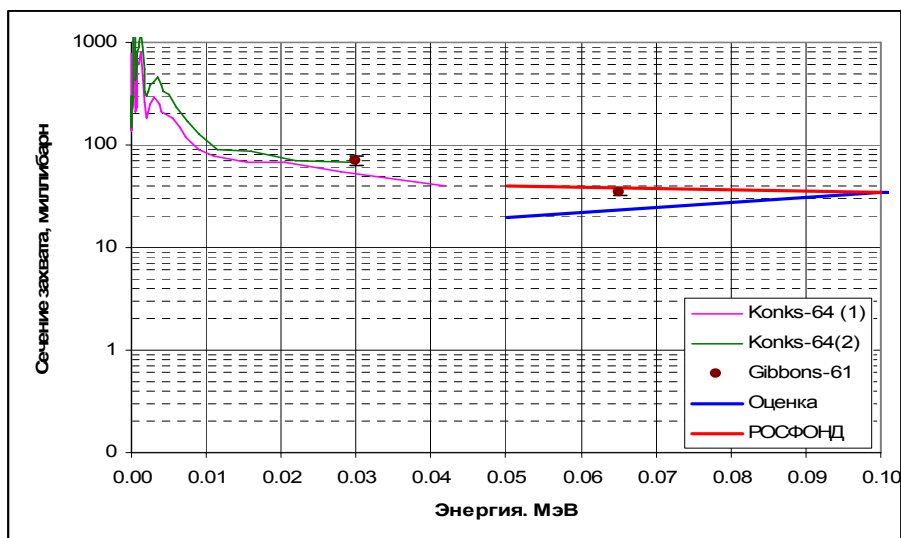


Рис.4а. Сечение захвата

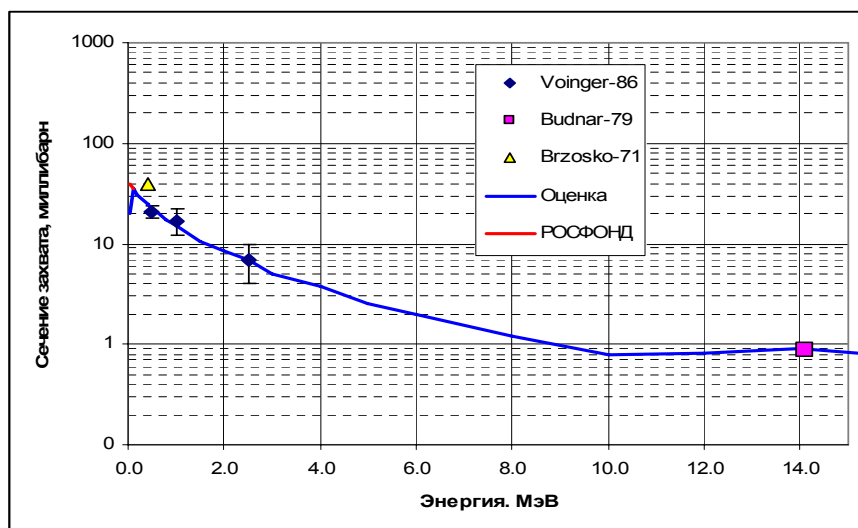


Рис. 4б. Сечение захвата.

Сечения реакций были получены путем теоретических расчетов с последующей перенормировкой полученных кривых на экспериментальные данные, когда таковые имелись (реакции $(n,2n)$, $(n,3n)$, (n,p) , (n,α)). Сечение упругого рассеяния получено из условия баланса.

3. Энерго-угловые распределения

Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов и нейтронов, рассеянных с возбуждением дискретных уровней получены в результате расчетов по теоретическим моделям. Угловые распределения реакций с континуальным спектром нейтронов приняты изотропными. Сами спектры получены расчетным путем.

Данные об образовании фотонов в нейтронных реакциях не приводятся.

Заключение.

В РОСФОНД следует принять рассмотренную выше китайскую оценку с небольшими коррекциями, отмеченными выше.

При первой возможности следовало бы выполнить полные оценки нейтронных данных для обоих стабильных изотопов, для которых имеется немало экспериментальных данных.

Автор заключения

Николаев М.Н.

81.2. Таллий-200

Радиоактивен ($T_{1/2}=26.1$ ч.). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в стабильный ^{200}Hg . Образование в реакторе возможно при облучении природного таллия лишь в результате трех последовательных реакций ($n,2n$) (или одной реакции ($n,3n$) и двух ($n,2n$) и т.п.), т.е. выход ничтожно мал, особенно учитывая короткие времена жизни промежуточных продуктов.

Полных наборов оцененных нейтронных данных, естественно, не имеется. Нейтронные сечения, оцененные теоретическим путем, содержатся в библиотеке EAF.

Заключение.

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, в которых долгоживущих изомеров в реакциях на таллии-200 не образуется, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании изомеров занести в файл MF=9. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить МАТ=8120.

Автор заключения

Николаев М.Н.

81.3. Таллий-201

Радиоактивен ($T_{1/2}=73.1$ ч.). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в стабильный ^{201}Hg . Образование в реакторе возможно при облучении природного таллия лишь в результате двух последовательных реакций ($n,2n$) или одной реакции ($n,3n$), т.е. выход ничтожно мал, особенно учитывая короткое время жизни промежуточного продукта – таллия-202.

Полных наборов оцененных нейтронных данных, естественно, не имеется. Нейтронные сечения, оцененные теоретическим путем, содержатся в библиотеке EAF.

Заключение.

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, в которых долгоживущих изомеров в реакциях на таллии-201 не образуется, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании изомеров занести в файл MF=9. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить МАТ=8101.

Автор заключения

Николаев М.Н.

81.4. Таллий-202

Радиоактивен ($T_{1/2}=12.53$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона, превращается в стабильный ^{202}Hg . Образование в реакторе возможно при облучении природного таллия в результате реакции $^{203}\text{Tl}(n,2n)$. Полных наборов оцененных нейтронных данных, естественно, не имеется. Нейтронные сечения, оцененные теоретическим путем, содержатся в библиотеке EAF.

Заключение.

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, в которых долгоживущих изомеров в реакциях на таллии-202 не образуется, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании изомеров занести в файл MF=9. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить МАТ=8102.

Автор заключения

Николаев М.Н.

81.5. Таллий-203

Содержание в естественной смеси 29.524%. Спин и четность $1/2^+$. Полных наборов оцененных нейтронных данных в известных библиотеках не содержится. Данные о нейтронных сечениях приведены в библиотеке EAF-2003.

Энергетическое поведение сечения захвата указывает на то, что при оценке была принята во внимание информация о резонансной структуре сечений (см.рис.1а), однако данные о резонансах, лежащих при энергиях выше 24 кэВ не учтены. Сравнение с данными Конкса в области разрешенных резонансов не показательно из за различия в разрешении.

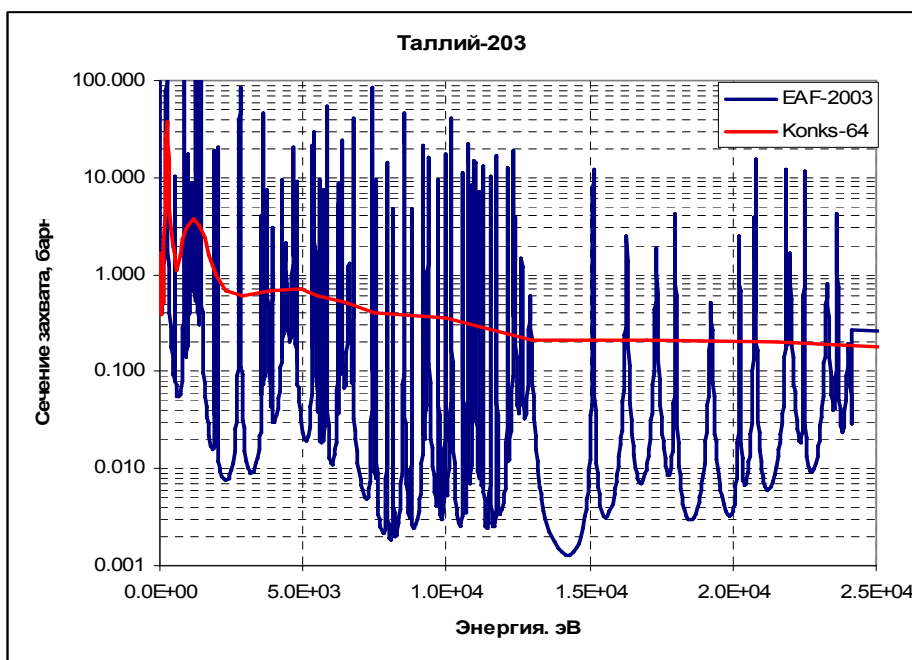


Рис. 1а. Сечение захвата.

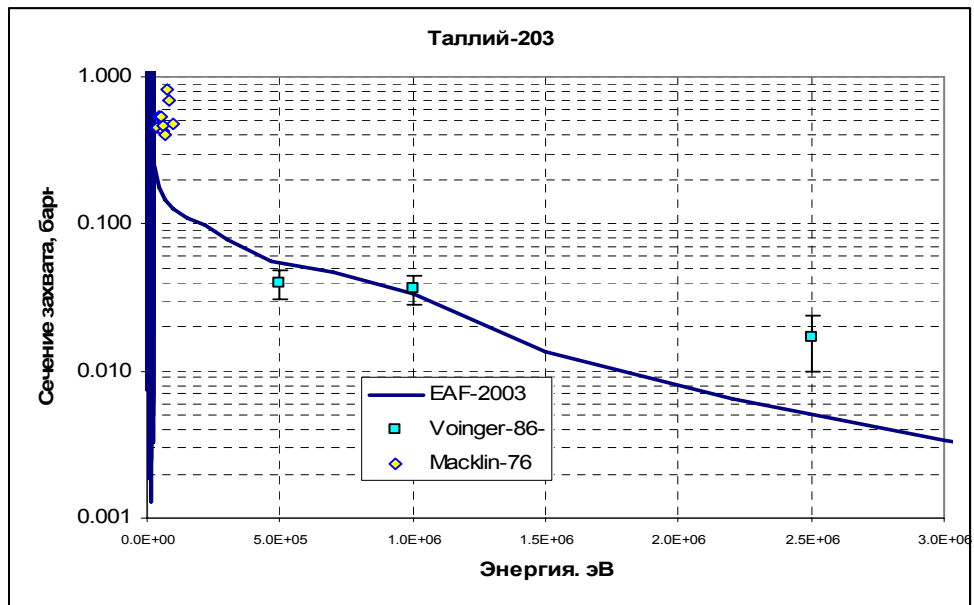


Рис.16. Сечение захвата

При более высоких энергиях оцененная кривая идет значительно ниже данных Маклина, находящаяся, по существу, в противоречии с результатом Конкса. Существенно и расхождение с результатом Воинджера при 2.5 МэВ. Между тем, оцененный спад сечения захвата при переходе от 1 до 2.5 МэВ представляется вполне естественным.

На рис. 2 – 5 приведено сравнение оцененных сечений пороговых реакций с имеющимися экспериментальными данными.

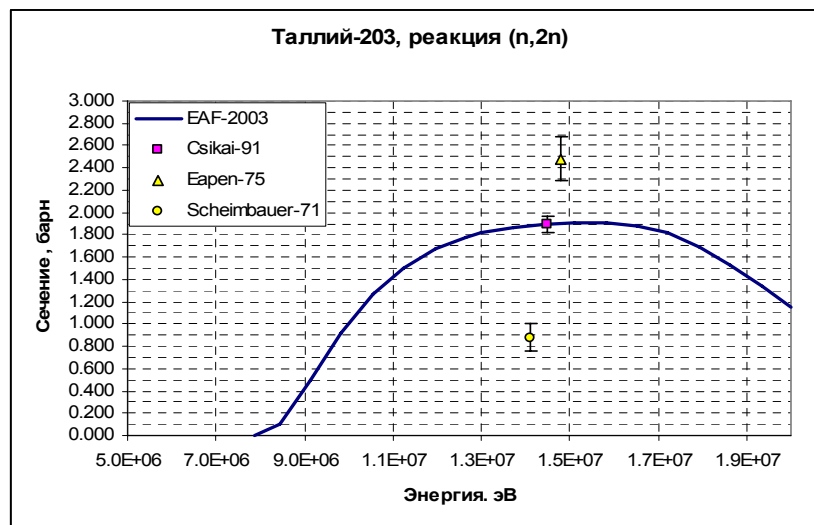


Рис.2. Сечение реакции (n,2n)

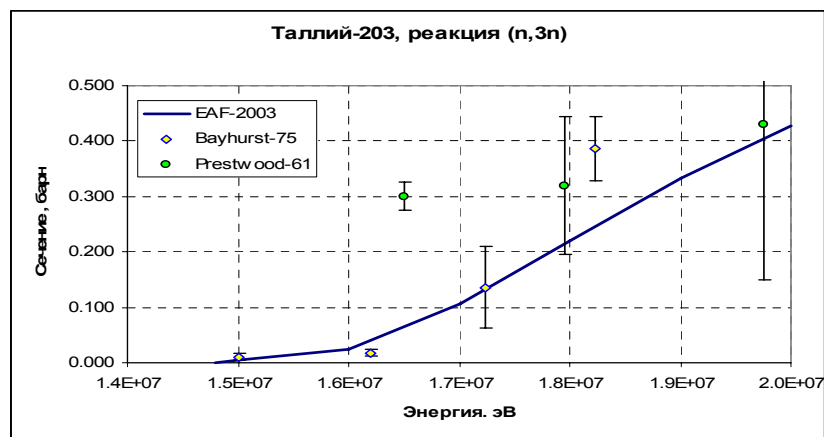


Рис.3. Сечение реакции (n,3n)

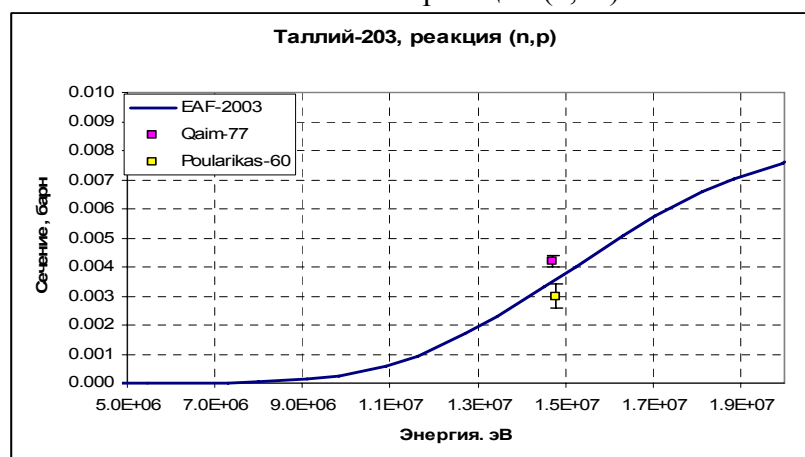


Рис.4. Сечение реакции (n,p)

Как видно, оцененные данные имеющимся экспериментальным данным не противоречат.

Заключение.

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, поскольку в них долгоживущих изомеров в реакциях на таллии-203 не образуется, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 опустить. Присвоить файлу MAT=8103.

Целесообразно выполнить оценку полного файла нейтронных данных для таллия-203, как это отмечалось в разделе 81.1.

Автор заключения

Николаев м.Н.

81.6. Таллий-204

Радиоактивен ($T_{1/2}=3.78$ г.). Испытывая, главным образом, бета-распад, превращается в стабильный ^{204}Pb . Образование в реакторе возможно при облучении природного таллия в результате реакций $^{203}\text{Tl}(n,\gamma)$ и $^{205}\text{Tl}(n,2n)$. Полных наборов оцененных нейтронных данных, естественно, не имеется. Нейтронные сечения, оцененные теоретическим путем, содержатся в библиотеке EAF.

Заключение.

Включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения всех реакций, содержащихся в EAF в файле MF=10, поскольку долгоживущих изомеров в реакциях на таллии-205 не образуется, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Данные об образовании изомеров занести в файл MF=9. Файл MF=10 опустить.

Файлу присвоить МАТ=8105.

Автор заключения

Николаев М.Н.

81.7. Таллий-205

Содержание в естественной смеси 70.476%. Спин и четность $1/2^+$. Полных наборов оцененных нейтронных данных в известных библиотеках не содержится. Данные о нейтронных сечениях приведены в библиотеке EAF-2003.

Энергетическое поведение сечения захвата указывает на то, что при оценке не была принята во внимание информация о резонансной структуре сечений (см.рис.1а): учтен только один первый резонанс. При более высоких энергиях оцененное сечение идет существенно выше совокупности экспериментальных данных (рис.1б).

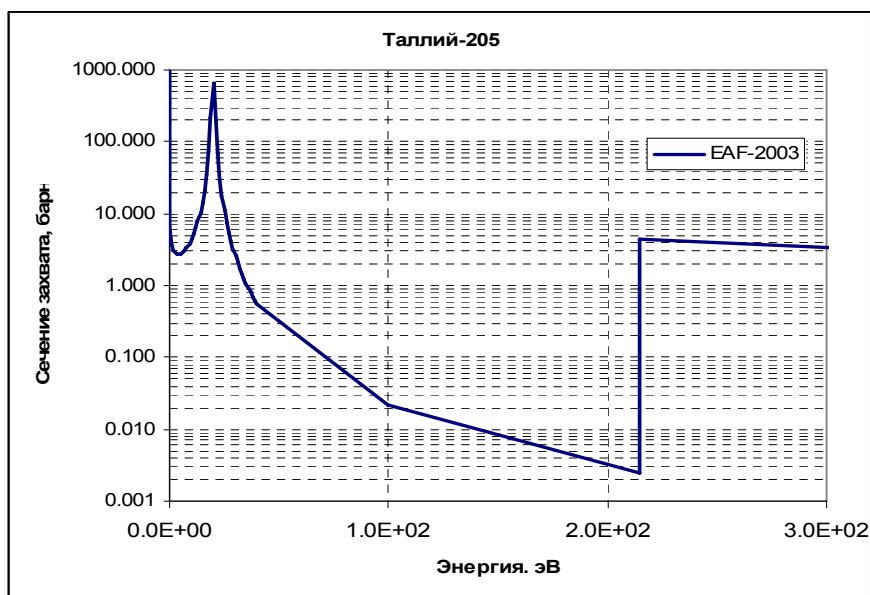


Рис. 1а. Сечение захвата.

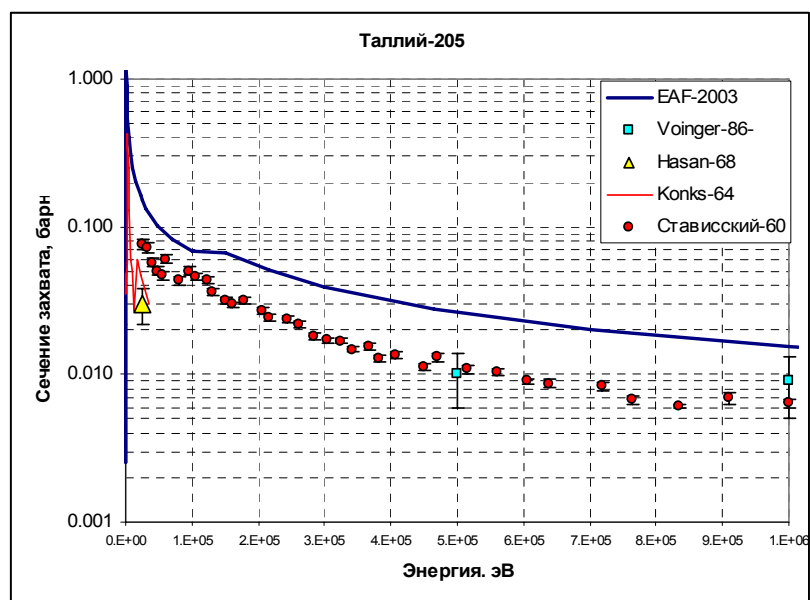


Рис.1б. Сечение захвата

При энергиях выше 1 МэВ также трудно сказать, что оцененное сечение захвата согласуется с экспериментальными данными (рис.1в).

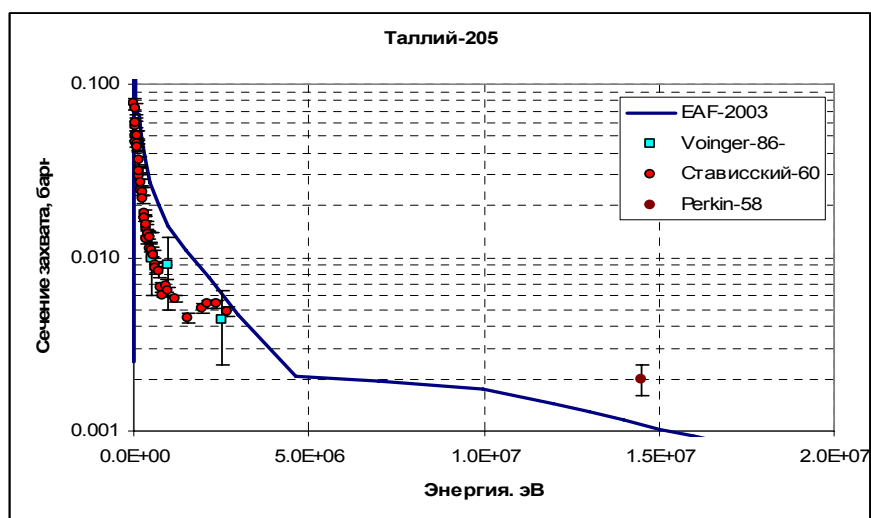


Рис.1в. Сечение захвата.

На рис. 2 – 5 приведено сравнение оцененных сечений пороговых реакций с имеющимися экспериментальными данными. Большой разброс экспериментальных данных

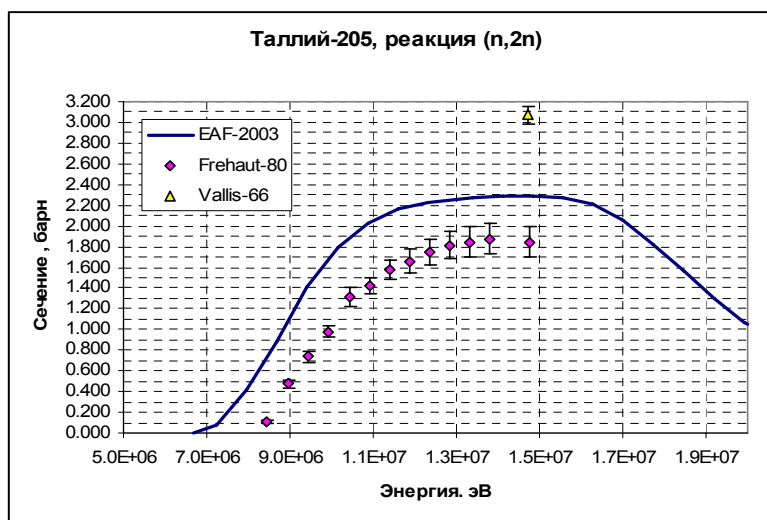


Рис.2. Сечение реакции (n,2n)

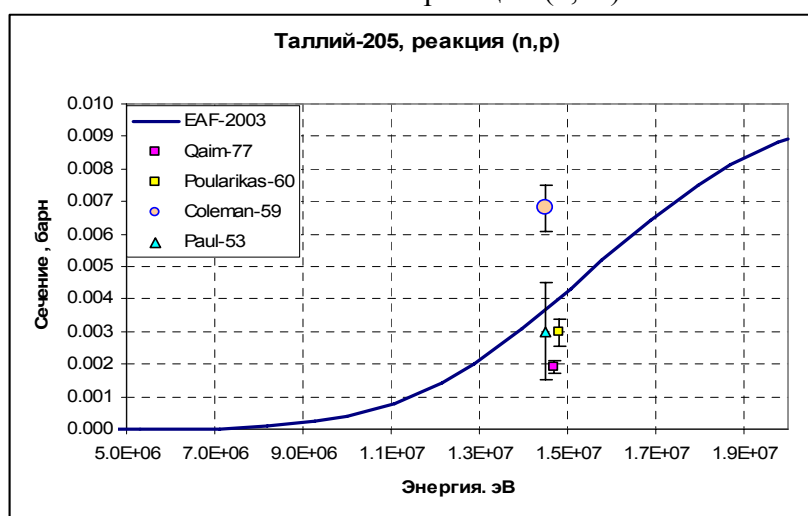


Рис.3. Сечение реакции (n,p)

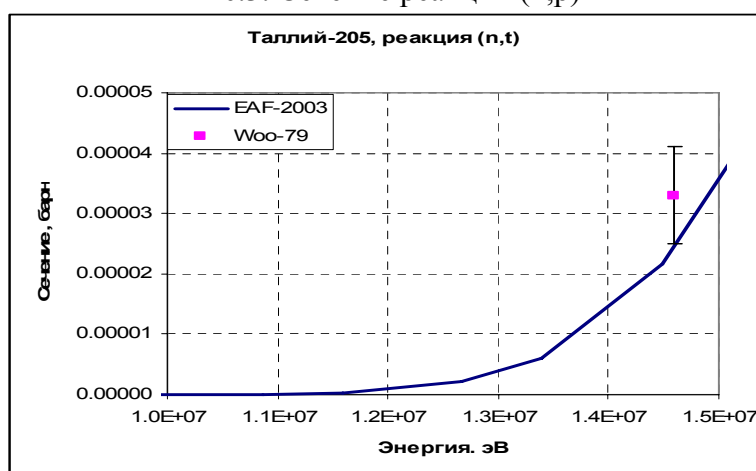


Рис.4. Сечение реакции (n,p)

Разброс экспериментальных данных по пороговым реакциям весьма велик и совокупности этих данных оцененные кривые не противоречат.

Заключение.

По необходимости придется включить в РОСФОНД файл данных из EAF-2003. Парциальные сечения реакции (n,2n), содержащиеся в EAF в файле MF=10, сложить по

подсекциям и суммы занести в соответствующую секцию файла MF=3. Файл MF=10 опустить. Присвоить файлу MAT=8105.

Было бы целесообразным пересмотреть в принятом файле, по крайней мере, данные по сечению захвата. Однако поскольку необходимость оценки полного файла нейтронных данных для таллия-205, отмеченная в разделе 81.1, очевидна, пересмотр данные только по одному сечению (для чего следует ввести в файл полную секцию резонансных параметров) в настоящей работе, в связи с жесткими сроками ее завершения, признан несвоевременным.

Автор заключения

Николаев М.Н.

82. СВИНЕЦ

В РОСФОНД включены данные для всех 4-х стабильных и 4-х долгоживущих радиоактивных изотопов свинца.

82.1. Свинец-202

Радиоактивен. ($T_{1/2}=5.25 \cdot 10^4$ лет).

Путем захвата орбитального электрона распадается в таллий-202, который, в свою очередь, тем же путем быстро ($T_{1/2}=12.23$ д) распадается в ртуть-202.

Источник – реакция $^{204}\text{Pb}(n,3n)$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений, основанная на теоретических расчетах и систематиках экспериментальных данных для других ядер.

Оцененные сечения захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл равны 7.9 барн и 4.2 барн.

Экспериментальных данных для проверки оцененных данных в EXFORe нет

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка нейтронных сечений из EAF-2003. Парциальные сечения реакций, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

82.2. Свинец-203

Радиоактивен. ($T_{1/2}=2.161$ д). Путем захвата орбитального электрона распадается в таллий-202.

Возможный путь образования – реакция $^{204}\text{Pb}(n,2n)$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений, основанная на теоретических расчетах и систематиках экспериментальных данных для других ядер.

Оцененные сечения захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл равны 9.9 барна. и 11.5 барна.

Экспериментальных данных для проверки оцененных данных в EXFORe нет.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка нейтронных сечений из EAF-2003. Парциальные сечения реакций, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

82.3. Свинец-204

Стабилен, содержание в естественной смеси (1.4±0.1)%

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для свинца-204:

ФОНД-2.2 = JENDL-3.3 – оценка М. Mizumoto, 1987, пересмотрена и существенно модифицирована в 1994 и дополнительно модифицирована в 2001;

БРОНД-2 – оценка Блохина и др., 1990;

JEFF-3.1 – оценка А. Koning, 2005;

ENDF/B-VII - данный изотоп не рассматривался ни в одной из версий ENDF/B.

1. Общие характеристики

1.1. $Z = 82$ -зарядовое число;

1.2. $A = 204$ (атомный вес);

1.3. $AWR = 202.221$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.1 Область разрешенных резонансов.

В JENDL-3.3 приняты верхняя граница области разрешенных резонансов 50 кэВ и радиус потенциального рассеяния $R_0 = 8.5$ фм. Параметры резонансов взяты на основе анализа данных [84Н]. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в JEFF-3.1.

Параметры нейтронных резонансов в БРОНД-2 взяты из компиляции Мухабхаба [84М]. Верхняя граница резонансной области принята равной 100 кэВ и радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 9.32$ фм. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров в обеих оценках рекомендовано приближение MLBW.

Радиационные ширины резонансов, использованные в оценках, показаны на рис. 1. Ширины большинства s-резонансов имеют близкие значения, но ширины p-резонансов отличаются весьма существенно. К сожалению, в БРОНД-2 для s-резонанса с энергией 32.00 кэВ содержится ошибка в радиационной ширине, вместо среднего значения ширины 650 мэВ стоит в 10 раз большее значение. Эта ошибка практически не влияет на расчеты полных нейтронных сечений, но отражается на расчетах сечений радиационного захвата нейтронов для близлежащих энергий.

Недавно Мухабхабом были пересмотрены параметры нейтронных резонансов [06М] на основе уточненных данных об эффективности нейтронных детекторов, использованных в измерениях нейтронных сечений [84Н], а также результатов более поздних измерений [03С]. Уточненные ширины приведены на рис. 1, и для большинства p-резонансов они существенно отличаются от использованных в обеих предыдущих оценках. В частности, уточненная средняя радиационная ширина p-резонансов 135 ± 25 МэВ [06М] оказывается более чем в два раза ниже значения 330 МэВ [84М], принятого в JENDL-3.3 для практически всех p-резонансов.

Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице вместе с соответствующими экспериментальными данными:

| Оценка | БРОНД-2 | JENDL-3.3=JEFF-3.1 | Эксп.: [84М] | [06М] |
|--|---------|--------------------|--------------|-------------|
| полное | 11.652 | 11.857 | | |
| упругое | 10.983 | 11.197 | | |
| захвата | 0.669 | 0.661 | 0.661±0.070 | 0.703±0.035 |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | 1.921 | 1.848 | 2.0±0.2 | 2.23±0.20 |

В пределах погрешности оценки согласуются с предыдущими экспериментальными данными о сечении радиационного захвата нейтронов и резонансном интеграле захвата [84М], но недавние уточнения экспериментальных данных требуют соответствующего уточнения резонансных параметров, включенных в оценки.

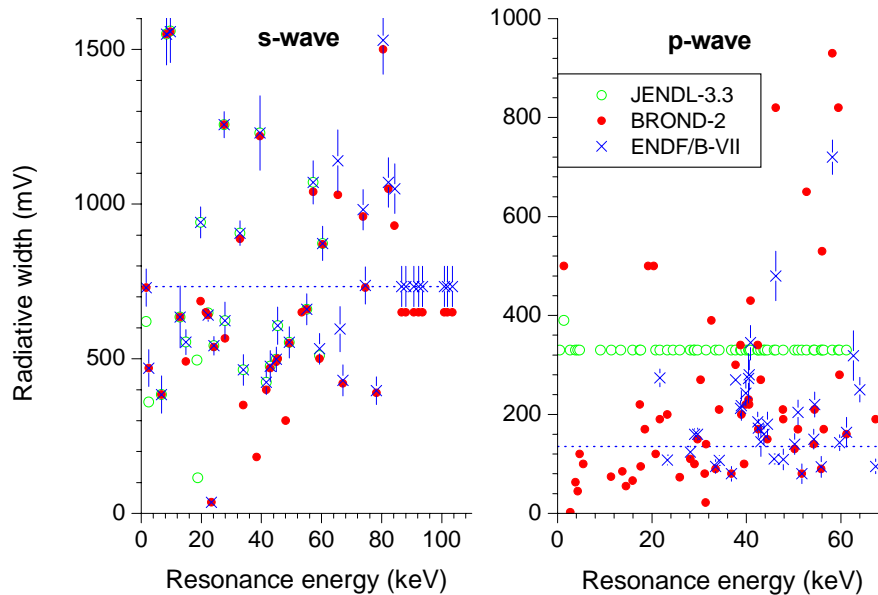


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках, пунктиром показаны средние значения ширины, принятые для резонансов с неизвестными ширинами

В оценках JENDL-3.3 и БРОНД-2 нет области неразрешенных резонансов. Однако, статистический анализ параметров резонансов, включенных в оценки, представляет интерес как для определения числа пропущенных резонансов и соответствующих погрешностей оцененных резонансных сечений, так и для анализа согласованности параметров плотности уровней и нейтронных силовых функций, используемых в оптической и статистической моделях для расчетов нейтронных сечений вне резонансной области.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и БРОНД-2, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширины резонансов. Можно видеть, что выше энергии 60 кэВ число p-резонансов в БРОНД-2 практически не растет, что указывает на необходимость уменьшения верхней границы области разрешенных резонансов до этой энергии.

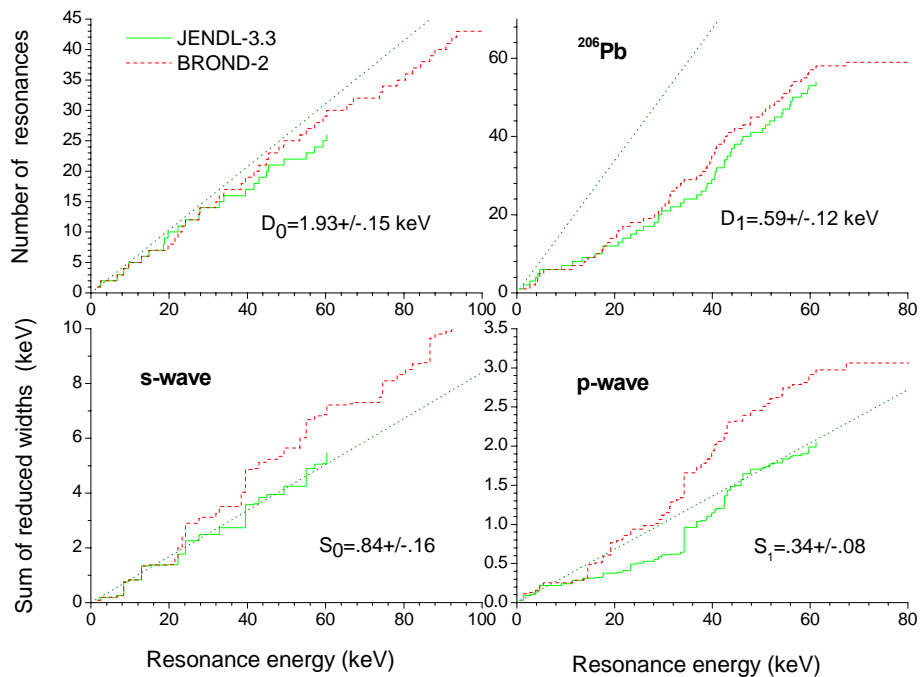


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках БРОНД-2 и JENDL-3.3

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа для набора резонансных параметров JENDL-3.3 представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в диапазоне энергий до 50 кэВ в наборе s-резонансов пропущено от 3 до 6 резонансов, тогда как для p-резонансов пропущено примерно 40 резонансов. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, равны $D_0 = (1.93 \pm 0.15)$ кэВ и $D_1 = (0.59 \pm 0.12)$ кэВ. Для нейтронных силовых функций в рамках данного анализа получены значения $S_0 = (0.84 \pm 0.16) \cdot 10^{-4}$ и $S_1 = (0.34 \pm 0.08) \cdot 10^{-4}$ для s- и p-резонансов, соответственно. В аналогичном анализе Мухабхаба, проведенном для уточненных параметров нейтронных резонансов [06M], получены значения $D_0 = (2.17 \pm 0.10)$ кэВ, $D_1 = (0.69 \pm 0.06)$ кэВ и $S_0 = (1.27 \pm 0.16) \cdot 10^{-4}$, $S_1 = (0.35 \pm 0.06) \cdot 10^{-4}$, которые с учетом погрешностей не сильно отличаются от результатов анализа параметров резонансов, содержащихся в JENDL-3.3. Отношение $D_0/D_1 = 3.1 \pm 0.4$ не противоречит статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, но погрешности определения D_1 достаточно велики ввиду значительного пропуска резонансов. Уточнения нейтронных силовых функций s-резонансов в новом наборе резонансных параметров [06M] может оказаться весьма важным для выбора параметров оптической модели, привлекаемой для расчетов нейтронных сечений в области энергий до 1-2 МэВ.

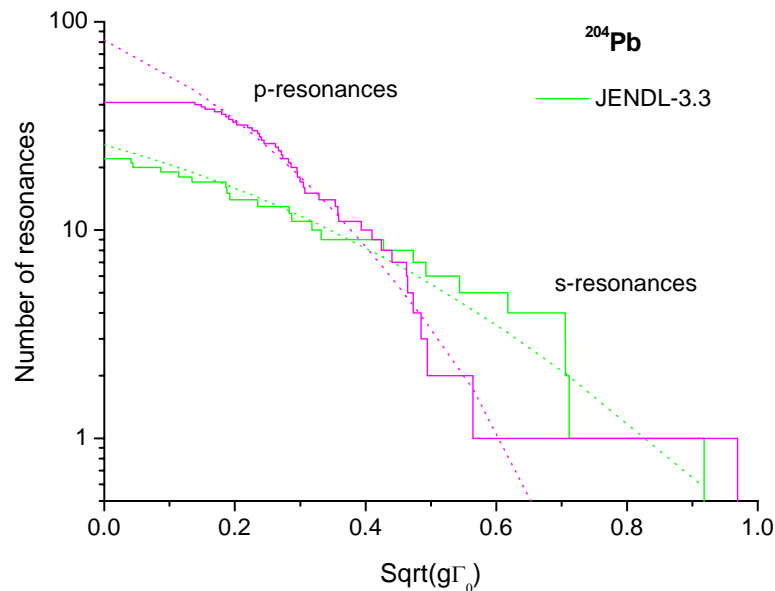


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов

На рис. 4 и 5 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для полных нейтронных сечений некоторые разногласия в нейтронных ширинах резонансов не выходят за пределы погрешностей экспериментальных данных, но для более высоких энергий в БРОНД-2 содержатся достаточно сильные резонансы, не подтвержденные в экспериментах по пропусканию и рассеянию нейтронов. Для сечений захвата нейтронов имеются только экспериментальные данные, усредненные по большому числу резонансов. Разногласия оценок в этом случае более существенные. В частности, в БРОНД-2 пропущен нижайший p-резонанс с энергией 480 эВ, примерно в 10 раз завышено сечение резонанса с энергией 32.00 кэВ и, несомненно, слишком мало учтено p-резонансов выше энергии 60 кэВ, что приводит к неоправданно низким сечениям радиационного захвата нейтронов в области энергий от 50 до 100 кэВ.

Учитывая отмеченные выше недостатки БРОНД-2, **на сегодняшний день JENDL-3.3 следует признать более надежной оценкой нейтронных сечений в диапазоне энергий нейтронов до 100 кэВ.** Однако, параметры большинства p-резонансов в JENDL-3.3 также существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов [06M], поэтому целесообразно дальнейшее уточнение оценки нейтронных сечений в области разрешенных резонансов.

84H D.J. Horen et al., Phys. Rev., C29, 2126 (1984).

84M S.Mughabghab, Neutron Cross Sections, Academic Press, NY,1984, part A.

03C R.F.Carlton, J.A.Harvey, N.W.Hill, Phys. Rev., C67 (2003) 024601.

06M S.Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY,2006.

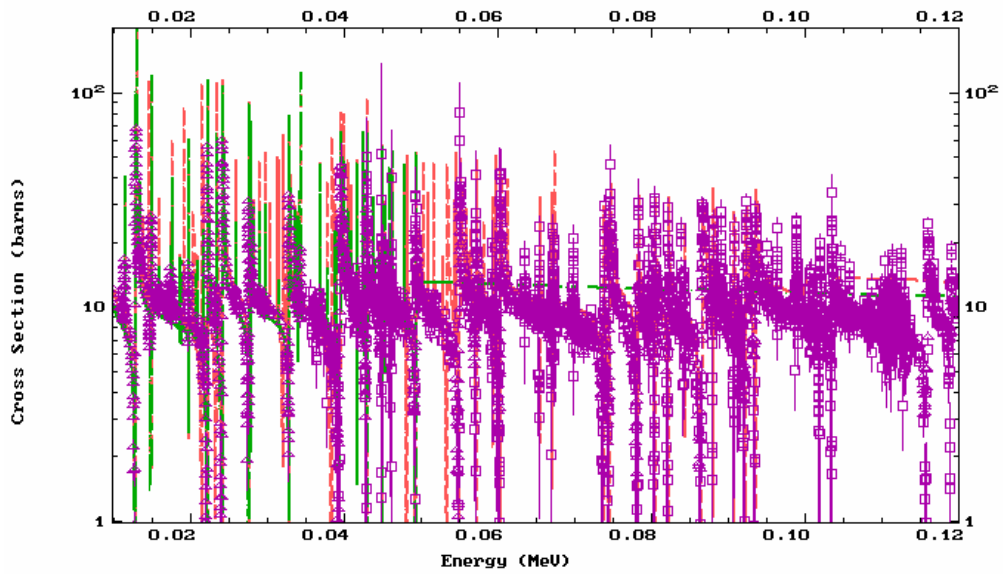
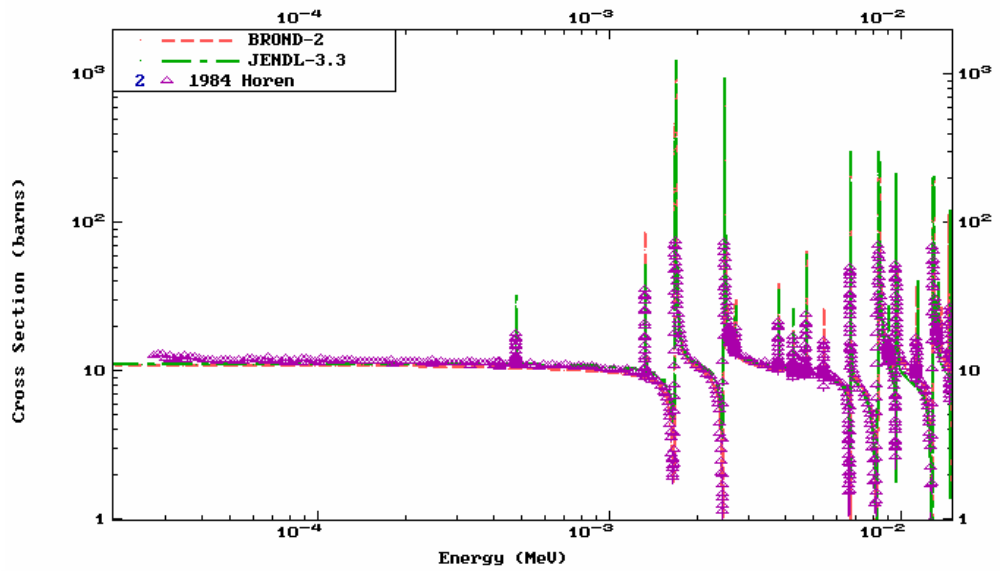
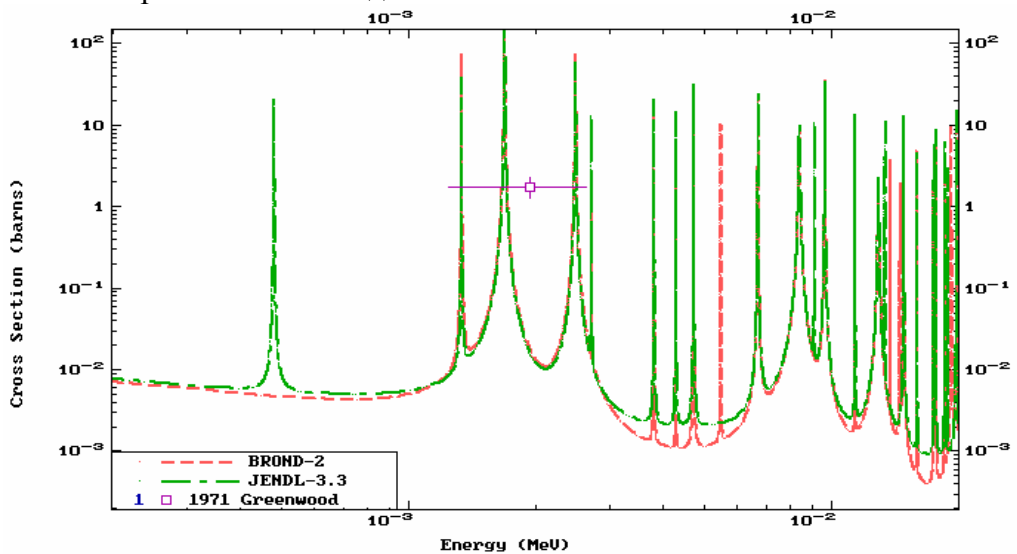


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными



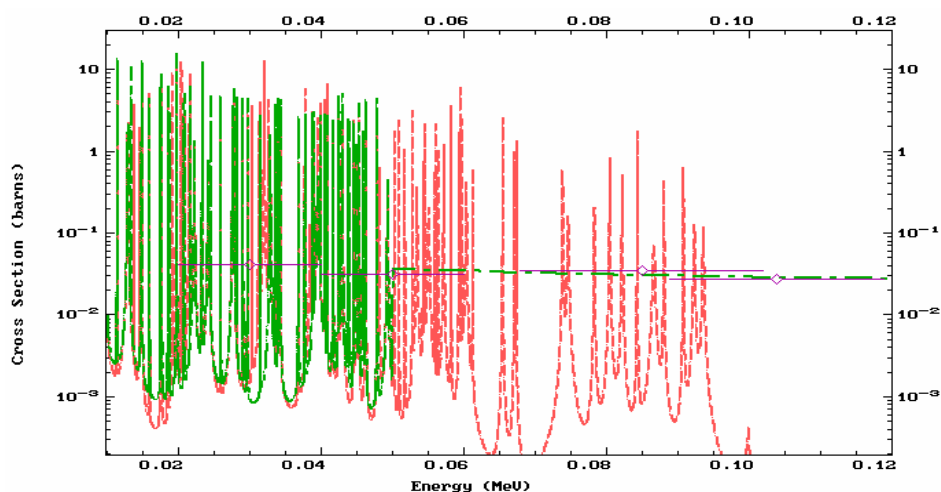


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области

3.1. Полные сечения (MT=1)

На рис. 6 показаны имеющиеся оценки полных нейтронных сечений в области энергий выше 100 кэВ в сравнении с экспериментальными данными. В дополнение к рассмотренным выше оценкам JENDL-3.3 и БРОНД-2 вне резонансной области для всех сечений имеется также недавняя оценка JEFF-3.1. Все оценки получены на основе расчетов по оптической модели, но параметры оптического потенциала в таких расчетах отличались весьма существенно. Тем не менее, все оценки полных сечений оказываются очень близкими. Они хорошо описывают экспериментальные данные выше энергии нейтронов 2.5 МэВ, но совершенно не учитывают достаточно сильную структуру полных сечений, проявляющуюся в экспериментальных данных [03С]. Отличия данных [84Н] в области энергий выше 1 МэВ от результатов более поздних измерений [03С] обусловлено погрешностями ранних измерений [84Н], и им не следует придавать какого-либо значения.

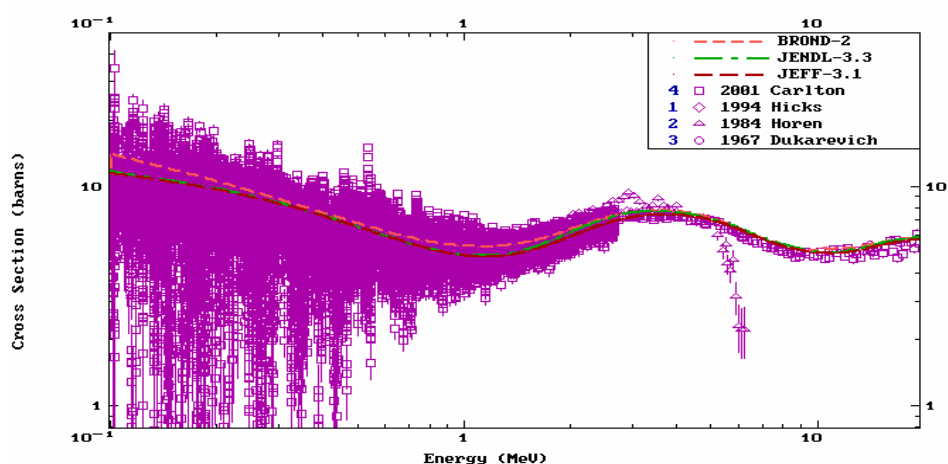


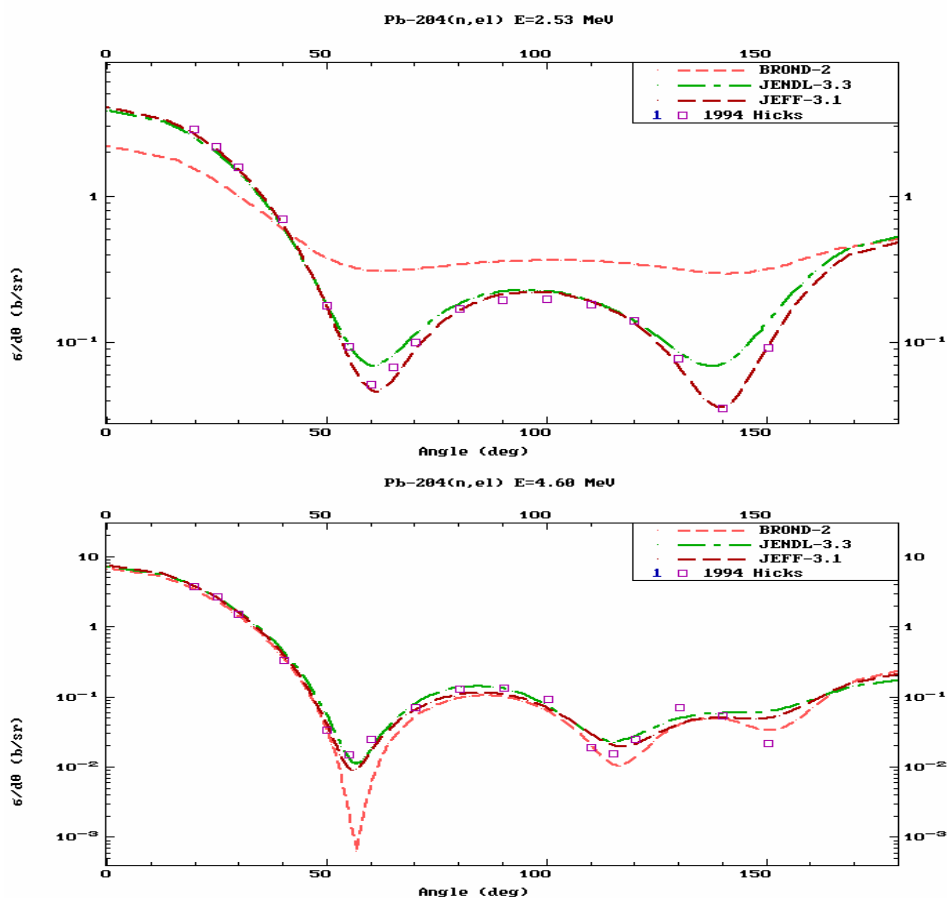
Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений ^{204}Pb в диапазоне энергий от 0.1 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. Прямых экспериментальных данных по интегральным сечениям упругого рассеяния нейтронов для изотопа ^{204}Pb нет. В этих условиях можно ожидать, что более корректной для сечений упругого рассеяния будет оценка, в которой достигнуто лучшее описание данных по угловым распределениям упруго рассеянных нейтронов.

На рис. 7 для трех энергий нейтронов показано сравнение оценок угловых распределений с соответствующими экспериментальными данными. Аналогичные результаты имеются также для ряда промежуточных и более высоких энергий. Анализ угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, как правило, осуществляется на основе расчетов по оптической модели, и оценки JENDL-3.3 и JEFF-3.1 хорошо описывают экспериментальные данные для всех трех энергий, тогда как БРОНД-2 также хорошо согласуется с данными при энергиях нейтронов выше ~ 4 МэВ, но дает слишком слабую дифракционную структуру угловых распределений при более низких энергиях, в частности, при энергии 2.53 МэВ (рис. 7).

Следует отметить, что при энергиях ниже 2.5 МэВ в экспериментальных данных важную роль играет промежуточная структура нейтронных сечений, подобная представленной на рис. 6 для полных сечений. В этих условиях сравнение оценок с экспериментальными данными будет оправданно только при усреднении соответствующих данных по широкому энергетическому интервалу, соответствующему условиям справедливости оптической модели. С учетом данного замечания оценки JENDL-3.3 и JEFF-3.1 для сечений и угловых распределений упруго рассеянных нейтронов следует признать одинаково надежными для всего диапазона энергий от 100 кэВ до 20 МэВ.



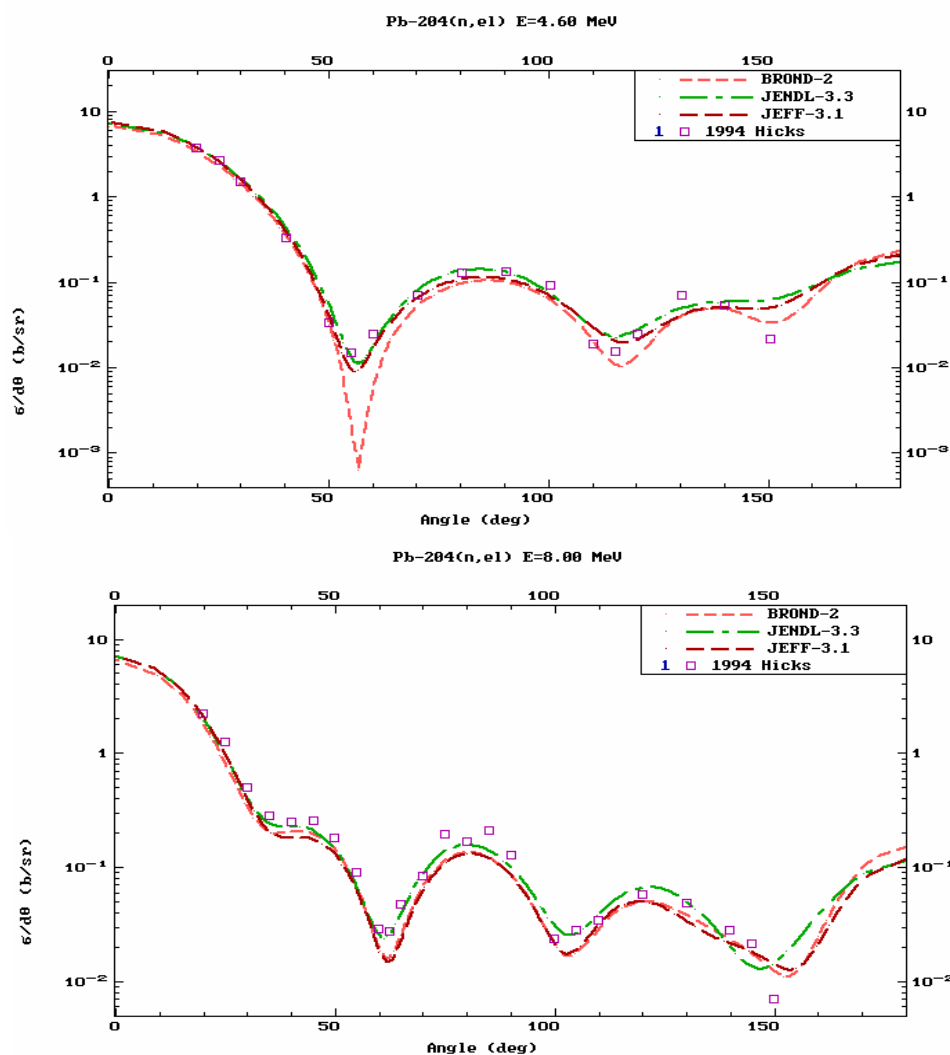


Рис. 7. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов при энергиях 2.53, 4.60 и 8.00 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

3.3. Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

В JENDL-3.3 рассматривается спектр 11 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в БРОНД-2 и JEFF-3.1 число учитываемых уровней увеличено до 24 и 21, соответственно. Так как при увеличении числа уровней соответствующим образом изменяется порог статистического описания уровней, так называемый континуум уровней, то различия в числе рассматриваемых уровней не должно заметно отражаться на оценках полного (интегрального) сечения неупругого рассеяния

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 8. Каких-либо экспериментальных данных для этого сечения нет. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели, а также различием моделей расчета вкладов прямых и предравновесных процессов, существенных для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Из сопоставления с расчетами для других изотопов свинца можно сделать вывод, что в области максимума сечений (~ 4 МэВ) БРОНД-2 предсказывает неоправданно высокие значения сечений. Оценки JENDL-3.3 и JEFF-3.1 для всех изотопов свинца дают

очень близкие значения сечений неупругого рассеяния выше энергии нейтронов 1.5-2 МэВ, и такое «универсальное» поведение сечения неупругого рассеяния для близлежащих изотопов является важным аргументом для выбора предпочтительной оценки. С позиций такого критерия оценки JENDL-3.3 и JEFF-3.1 для неупругого рассеяния выглядят более достоверными, чем БРОНД-2.

Асимметрия угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов, обусловленная прямыми и предравновесными процессами, учтена в оценках JENDL-3.3 и JEFF-3.1 для всех рассматриваемых уровней, а также для нейтронного рассеяния в континууме, тогда как в БРОНД-2 аналогичная асимметрия рассмотрена только для рассеяния на первых шести уровнях, а для более высоких уровней и континуума приняты изотропные угловые распределения. Надежных экспериментальных данных по угловым распределениям неупруго рассеянных нейтронов для ^{204}Pb нет, и справедливость оценок соответствующих угловых распределений подтверждается, главным образом, их подобием с аналогичными оценками для других изотопов свинца, где такие данные имеются.

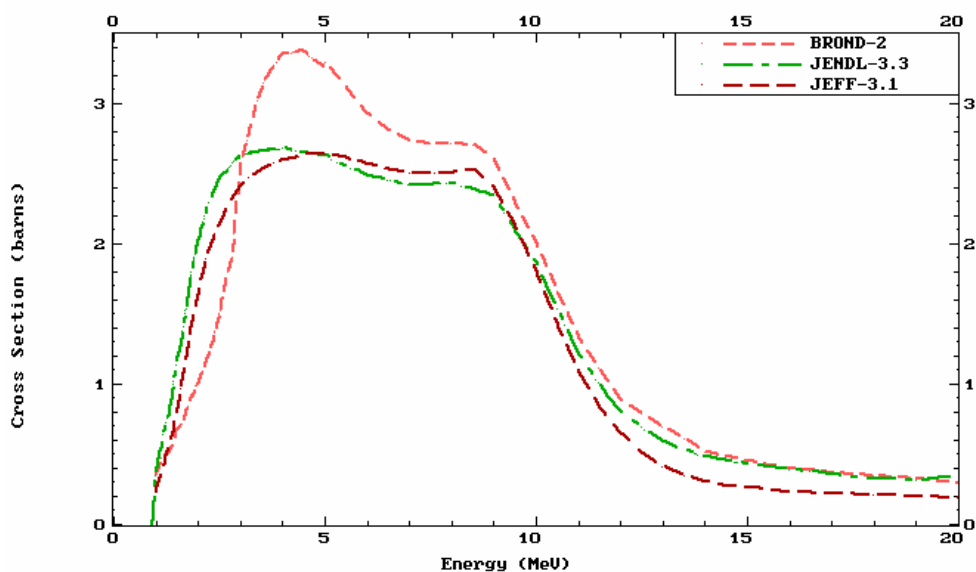


Рис. 8. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для ^{204}Pb

3.4 Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

На рис. 9 показаны оценки сечений радиационного захвата нейтронов с энергией выше 100 кэВ в сравнении с экспериментальными данными. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия обусловлены различиями моделирования плотности уровней в расчетах энергетической зависимости нейтронных и радиационных ширин. Оценка БРОНД-2, несомненно, дает слишком низкое сечение захвата нейтронов. JENDL-3.3 и JEFF-3.1 корректно описывают имеющиеся экспериментальные данные в области энергий нейтронов до 200 кэВ, но выше 10 МэВ JENDL-3.3 предсказывает слишком быстрое падение сечений захвата, противоречащее систематике сечений при энергии нейтронов 14 МэВ. Согласно систематике, основанной на модели прямого-коллективного захвата нейтронов, для всех тяжелых ядер сечение захвата 14-МэВных нейтронов близко к 1 мб [86Б]. Оценка JEFF-3.1 лучше других описывает ожидаемую энергетическую зависимость сечений захвата во всем диапазоне энергий нейтронов от 0.1 до 20, и ее следует признать предпочтительной.

Необходимо, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 2-3 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не являются сколь-либо существенными для анализа характеристик ядерных реакторов.

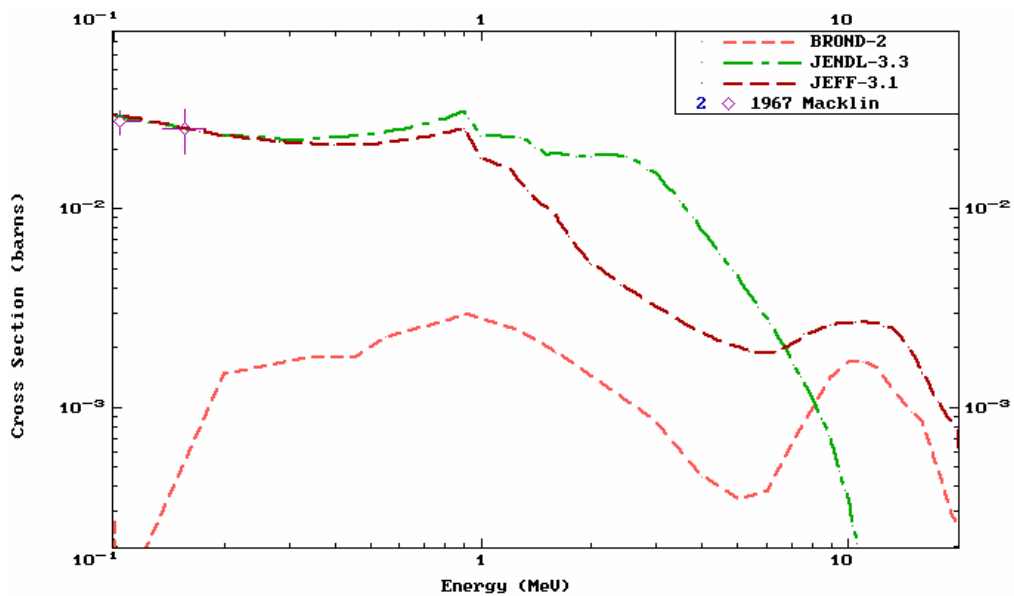


Рис. 9. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов ^{204}Pb в сравнении с экспериментальными данными

3.5. Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT= 17)

Экспериментальные данные о сечении реакций (n,2n) показаны на рис. 10 совместно с различными оценками. Все оценки хорошо согласуются между собой и с экспериментальными данными при энергиях нейтронов 13.5- 14.5 МэВ, но при более низких энергиях несколько предпочтительной выглядит JENDL-3.3. Однако, оптимальной для всего диапазона энергий нейтронов следует все же признать оценку JEFF-3.1 на основе подобия сечений реакции (n,2n) для всех изотопов свинца и висмута.

Экспериментальных данных о сечении реакций (n,3n) нет. Сечение этой реакции (n,3n) существенно только выше 16 МэВ, и оно примерно соответствует разности сечения реакции (n,2n) в максимуме и в любой из вышележащих энергетических точек. При энергии 20 МэВ сечение достигает значений 0.5 – 0.65 барна. Для согласованности, для сечения реакции (n,3n) следует принимать ту же оценку, что выбрана предпочтительной для (n,2n).

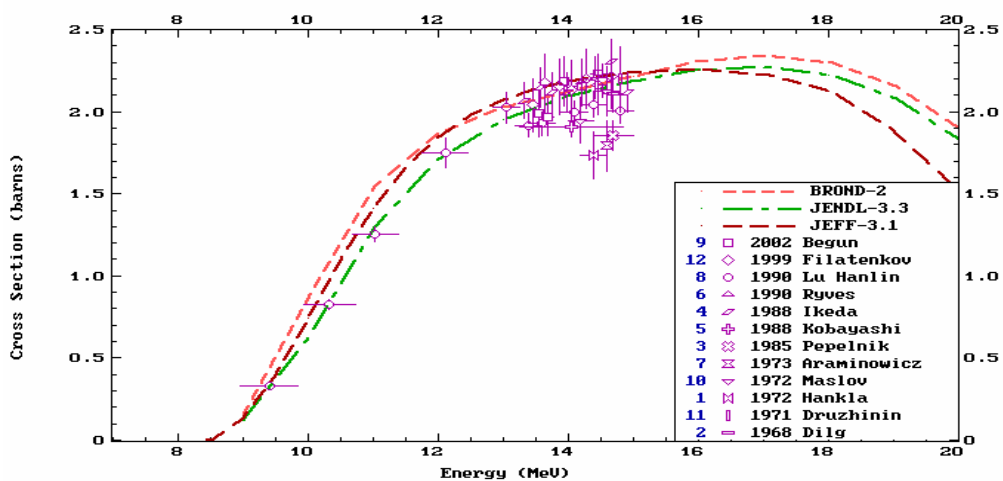


Рис.10. Оценки сечений реакции $^{204}\text{Pb}(n,2n)$

3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц

Реакции с вылетом заряженных частиц включены во все рассматриваемые оценки. Эти реакции существенны только в области энергий нейтронов выше 15 МэВ, и максимальное сечение таких реакций не превышает 30 мбарн. На рис. 11 показаны оценки сечений реакций (n,p) и (n, α), соответствующие наиболее высоким выходам заряженных частиц. Разногласия между оценками этих реакций сравнительно велики, и вряд ли оправдано предпочтение какой-либо из оценок без дополнительной информации.

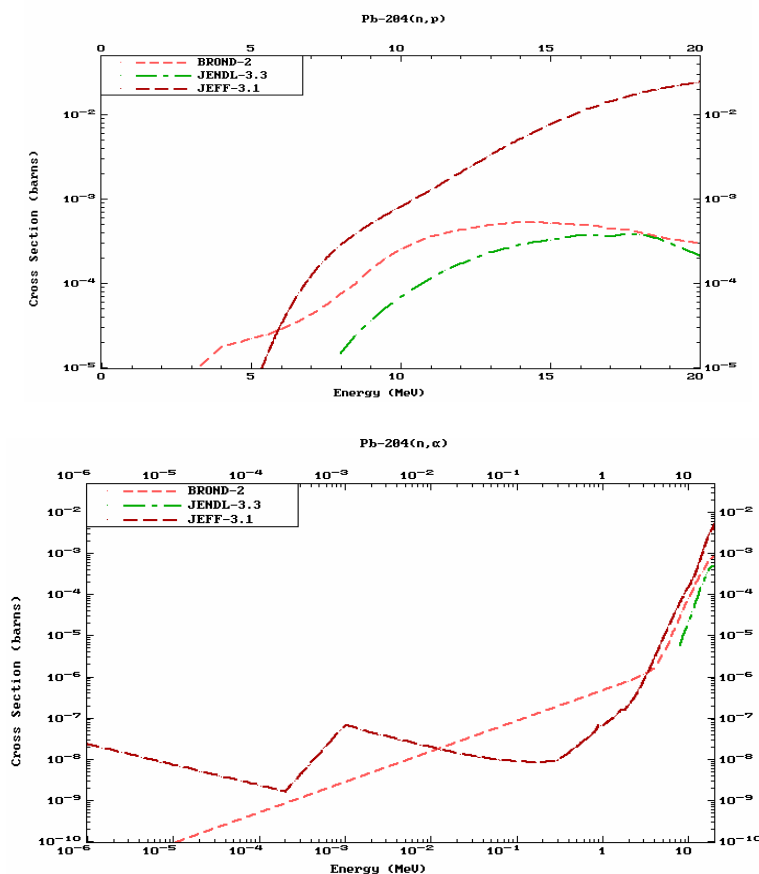


Рис.11. Оценки сечений реакции $^{204}\text{Pb}(n,p)$ и $^{204}\text{Pb}(n,\alpha)$

84Н D.J. Horen et al., Phys. Rev., C29, 2126 (1984).

86Б Т.С.Беланова и др., Радиационный захват нейтронов – Справочник, Энергоатомиздат, Москва, 1986.

03С R.F.Carlton, J.A.Harvey, N.W.Hill, Phys. Rev., C67 (2003) 024601.

4. Образование гамма-лучей

Оценки сечений образования и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата и неупругого взаимодействия нейтронов, содержатся во всех оценках. В БРОНД-2, однако, рассмотрение ограничивается дискретными гамма-переходами между низколежащими уровнями ядра-мишени. В оценках JENDL-3.3 и JEFF-3.1 представлена достаточно полная информация как о спектрах дискретных гамма-лучей, так и непрерывных спектрах гамма-излучения для всех каналов неупругого взаимодействия нейтронов с рассматриваемым изотопом свинца. Угловые распределения всех типов гамма-излучения в приняты изотропными.

Ввиду учета большего числа дискретных уровней ядра-мишени JEFF-3.1 дает более детальную информация о спектрах гамма-переходов, но результирующие интегральные выходы гамма-лучей оказываются достаточно близкими в обеих оценках.

5. Заключение

На основе проведенного рассмотрения оценок и имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что оценки JENDL-3.3 и JEFF-3.1 для большинства реакция оказываются весьма близкими, и некоторое предпочтение JEFF-3.1 может быть обусловлено несколько большим числом учитываемых дискретных уровней ядра-мишени и, по-видимому, более корректной оценкой сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 3-5 МэВ. Таким образом, для библиотеки РОСФОНД целесообразно в настоящее время принять оценку JEFF-3.1¹.

Следует однако, отметить, что параметры большинства резонансов в этой оценке, также как в других оценках, существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов, поэтому в ближайшем будущем необходимо дополнительное уточнение оценки нейтронных сечений в области разрешенных резонансов, включая уточнение сечений для тепловых нейтронов.

Автор заключения

А.В.Игнатюк

82.4. Свинец-205

Радиоактивен. ($T_{1/2}=1.25 \cdot 10^7$ лет). Путем захвата орбитального электрона распадается в таллий-205.

Источник – реакции $^{204}\text{Pb}(n,\gamma)$ и $^{206}\text{Pb}(n,2n)$.

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений, основанная на теоретических расчетах и систематиках экспериментальных данных для других ядер.

Оцененные сечения захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл равны 5 барн и 4 барна.

Экспериментальных данных для проверки оцененных данных в EXFORe нет

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка нейтронных сечений из EAF-2003. Парциальные сечения реакций, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

¹ Файлы MF=8 и MF=10 из оценки, включаемой в РОСФОНД, удаляются, поскольку в нейтронных реакциях на свинце-204 не образуется долгоживущих изомеров. – М.Н.Николаев.

82.5. Свинец-206

Стабилен, содержание в естественной смеси (24.1 ± 0.1)%

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для свинца-206:

ФОНД-2.2 = JENDL-3.3 – оценка M.Mizumoto, 1987, пересмотрена и существенно модифицирована в 1994 и дополнительно модифицирована в 2001;

БРОНД-3 – оценка Игнатюка и др., 2001;

ENDF/B-VI – оценка M.Chadwick et al., 1996; дополнительные уточнения в 1999;

JEFF-3.1 – оценка A.Koning, 2005; принята также в ENDF/B-VII.

1. Общие характеристики

1.1. $Z = 82$ -зарядовое число;

1.2. $A = 206$ (атомный вес);

1.3. $AWR = 204.205$ (отношение массы ядра к массе нейтрона).

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.2 Область разрешенных резонансов.

В оценке JENDL-3.3 граница области разрешенных резонансов выбрана равной 500 кэВ и принят радиус потенциального рассеяния $R_0 = 8.042$ фм. Нейтронные ширины резонансов взяты на основе анализа данных [79H, 79M], радиационные ширины – из компиляции Мугабгаба [84M].

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках ENDF/B-VI основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мугабгабом [84M] на основе анализа экспериментальных данных [79H, 81H]. Верхняя граница резонансной области принята равной 900 кэВ и радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 9.5$ фм. Оценка ENDF/B-VI для разрешенных резонансов включена без изменений в БРОНД-3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII).

Радиационные ширины резонансов, использованные в оценках, показаны на рис. 1. Ширины многих s- и p-резонансов, которые не были измерены экспериментально и которым были приписаны средние значения ширин, отличаются весьма существенно в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI.

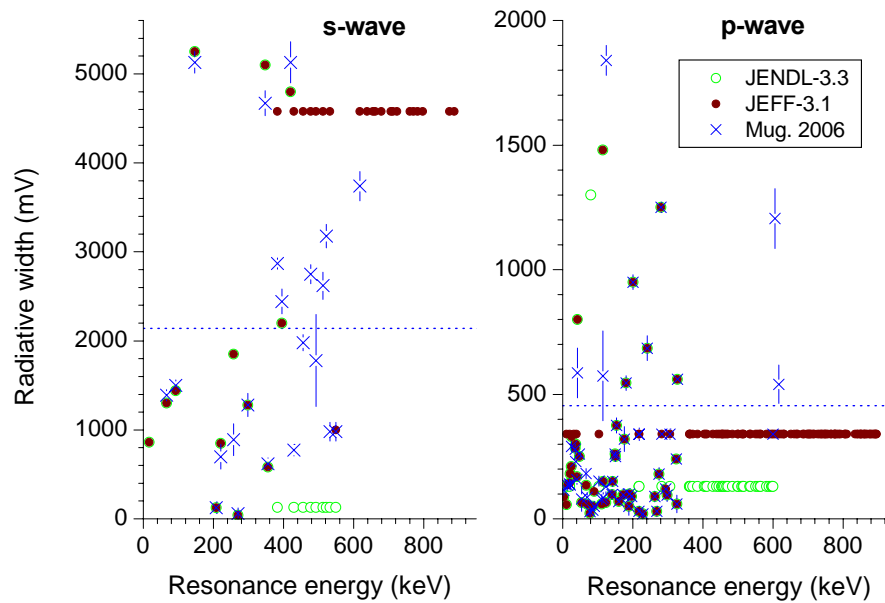


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках, пунктиром показаны уточненные значения средних ширин [06M]

Недавно Мугабгом были пересмотрены параметры нейтронных резонансов [06M] на основе уточненных данных об эффективности нейтронных детекторов, использованных в измерениях нейтронных сечений [81H], а также результатов новых измерений сечений пропускания и захвата нейтронов [05B]. Уточненные ширины приведены на рис. 1, и для большинства резонансов они существенно отличаются от использованных в обеих предыдущих оценках. В частности, для d-резонанса с энергией 493.96 кэВ уточненная ширина равна 0.351 ± 0.077 эВ вместо 12.5 эВ в предыдущих оценках, аналогично для s-резонанса с энергией 521.86 кэВ – 3.177 ± 0.132 вместо предыдущего значения 42.0 эВ. Столь же велики расхождения средних ширин: уточненная средняя радиационная ширина s-резонансов 2.14 ± 0.11 эВ [06M] оказывается более чем в два раза ниже значения 4.578 эВ, принятого в ENDF/B-VI для многих s-резонансов, и в 15 раз выше значения 0.13 эВ, принятого в JENDL-3.3 (рис. 1). Примерно такими же являются отличия средних радиационных ширин для p-и d-резонансов.

Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров во всех последних оценках рекомендовано приближении Рэйха-Мура. Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| Оценка | JENDL-3.3 | ENDF/B-VI=JEFF-3.1 | Эксп. [84M] | [06M] |
|------------------------------|-----------|--------------------|---------------------|---------------------|
| полное | 10.066 | 11.266 | | |
| упругое | 10.035 | 11.236 | | 10.85 ± 0.11 |
| захвата | 0.0306 | 0.0298 | 0.0306 ± 0.0008 | 0.0266 ± 0.0013 |
| резонансный интеграл захвата | | | | |
| выше 0.5 эВ: | 0.1108 | 0.1106 | 0.097 ± 0.014 | 0.123 ± 0.014 |

В пределах погрешности оценки согласуются с предыдущими экспериментальными данными о сечении радиационного захвата нейтронов и резонансном интеграле захвата [84M], но недавние уточнения экспериментальных данных требуют соответствующего уточнения резонансных параметров, включенных в оценки.

В оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI нет области неразрешенных резонансов. Однако, статистический анализ параметров резонансов, включенных в оценки, представляет интерес как для определения числа пропущенных резонансов и соответствующих погрешностей оцененных резонансных сечений, так и для анализа согласованности

параметров плотности уровней и нейтронных силовых функций, используемых в оптической и статистической моделях для расчетов нейтронных сечений вне резонансной области.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа для набора резонансных параметров ENDF/B-VI представлены на рис. 3.

Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов присутствует от 2 до 5 слабых резонансов, которые следовало бы отнести к p-резонансам. С другой стороны, в наборе p-резонансов пропущено, по-видимому, от 40 до 50 резонансов. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, равны $D_0=(32 \pm 5)$ кэВ и $D_1=(4.8 \pm 0.3)$ кэВ. Для нейтронных силовых функций в рамках данного анализа получены значения $S_0=(1.10 \pm 0.25) 10^{-4}$ и $S_1=(0.32 \pm 0.08) 10^{-4}$ для s- и p-резонансов, соответственно. В аналогичном анализе Мугабгаба, проведенном для уточненных параметров нейтронных резонансов [06M], получены значения $D_0=(37.1 \pm 5.5)$ кэВ, $D_1=(4.78 \pm 0.21)$ кэВ и $S_0=(1.06 \pm 0.26) 10^{-4}$, $S_1=(0.26 \pm 0.03) 10^{-4}$, которые с учетом погрешностей не сильно отличаются от результатов анализа параметров резонансов, содержащихся в ENDF/B-VI. Отношение $D_0/D_1=6.6 \pm 1.1$ отличается примерно в два раза от статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, и это может указывать на достаточно сильную зависимость плотности нейтронных резонансов от четности, но также может оказаться следствием более значительного пропуска резонансов, чем полученного в рамках представленного выше анализа. Уточнения нейтронных силовых функций резонансов в новом наборе резонансных параметров [06M] может оказаться весьма важным для выбора параметров оптической модели, привлекаемой для расчетов нейтронных сечений в области энергий до 5 МэВ.

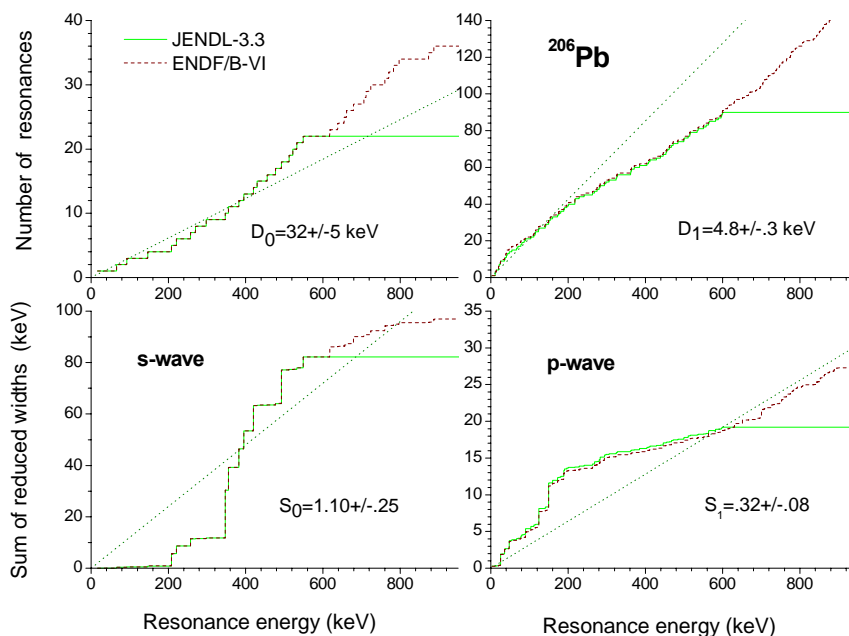


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и JEFF-3.1(=EFDF/B-VI)

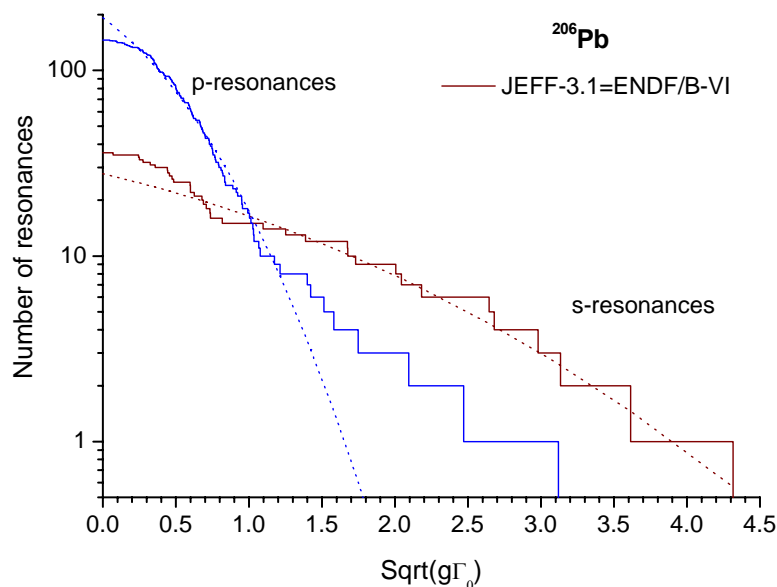


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов

На рис. 4 и 5 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для полных нейтронных сечений некоторые разногласия в нейтронных ширинах резонансов не выходят за пределы погрешностей экспериментальных данных. Для сечений захвата нейтронов имеются только экспериментальные данные, усредненные по большому числу резонансов. Разногласия оценок в этом случае проявляются, главным образом, в межрезонансных минимумах, и они обусловлены большими различиями средних радиационных ширин, принятых в оценках.

Учитывая более высокую верхнюю границу резонансной области **оценку ENDF/B-VI, включенную также в новые файлы JEFF-3.1(=ENDF/B-VII) на сегодняшний день следует признать предпочтительной для всего диапазона энергий нейтронов до 900 кэВ.** Однако, параметры большинства резонансов в этой оценке существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов [06M], поэтому в ближайшем будущем необходимо дополнительное уточнение оценки резонансных параметров.

79H D.J. Horen, J.A.Harvey, N.W.Hill, Phys. Rev., C20, 478 (1979).

79M M.Mizumoto et al., Phys. Rev., C19, 335 (1979).

81H D.J. Horen, J.A.Harvey, N.W.Hill, Phys.Rev., C24, 1961 (1981).

84M S.Mughabghab, Neutron Cross Sections, Academic Press, NY,1984, part B.

05B P.Borella, DS Thesis, Gent Univ., 2005.

06M S.Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY,2006.

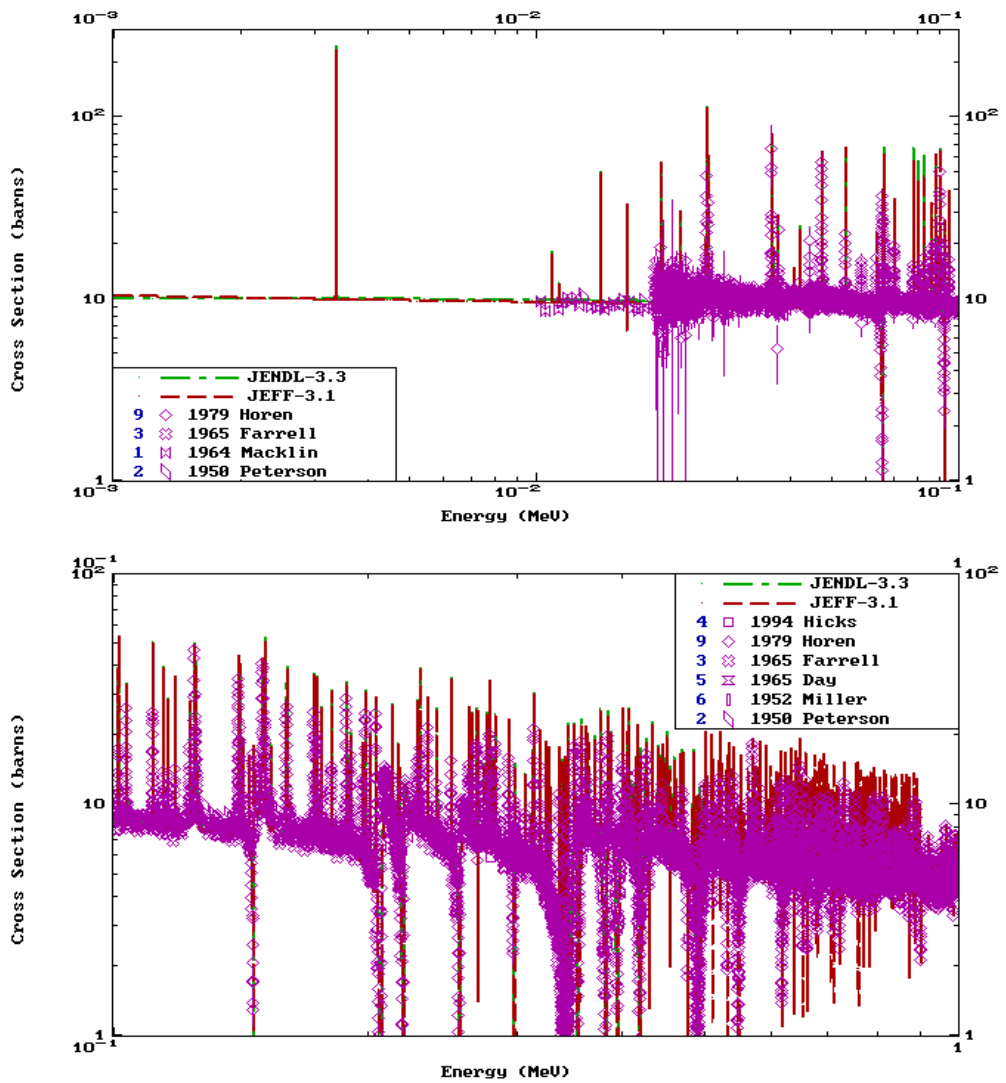


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

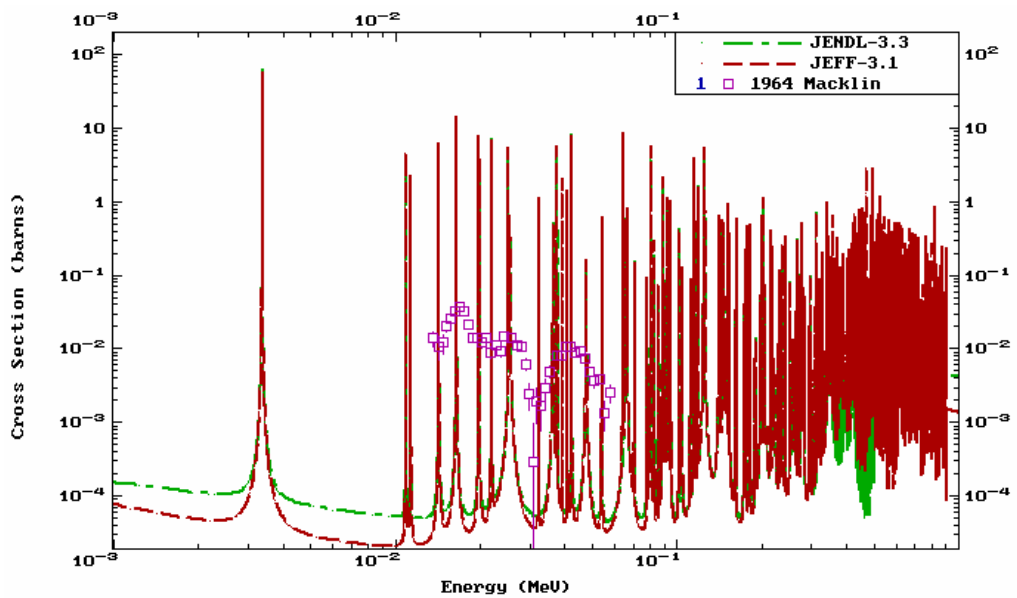


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

4. Нейтронные сечения вне резонансной области

3.1. Полные сечения (MT=1)

На рис. 6 показаны имеющиеся оценки полных нейтронных сечений в области энергий выше 900 кэВ в сравнении с экспериментальными данными. В дополнение к рассмотренным выше оценкам JENDL-3.3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII) вне резонансной области для всех сечений имеется также недавняя оценка БРОНД-3. Гросс-структура резонансо-подобных флуктуаций полных сечений, проявляющаяся в данных [79H], в несколько усредненной форме принята в качестве оценки полных сечений ENDF/B-VI в области энергий до 5 МэВ, и эта оценка сохранена без изменений также в БРОНД-3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII). В JENDL-3.3 для этого диапазона энергий принята бесструктурная оценка сечений, полученная на основе расчетов по оптической модели. Отличие данных [79H] в области энергий выше 2 МэВ от результатов остальных измерений, включая более поздние [94H], связано с проблемами нормировки данных по пропусканию нейтронов [79H], которые требуют уточнения эффективности детекторов в области быстрых нейтронов.

В БРОНД-3 и JEFF-3.1 результаты расчетов по оптической модели приняты в качестве оценки полных сечений только для энергий нейтронов выше 5 МэВ. Все оценки, основанные на расчетах по оптической модели, хорошо согласуются между собой, несмотря на имеющиеся разногласия параметров оптического потенциала. Эти разногласия оказываются существенными в области более низких энергий, когда оптическая модель используется для расчетов сечений неупругого взаимодействия нейтронов.

3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. Экспериментальные данные об интегральном сечении упругого рассеяния нейтронов показаны на рис. 7 в сравнении с имеющимися оценками. Структура сечений упругого рассеяния ниже 5 МэВ определяется аналогичной структурой полных нейтронных сечений (рис. 6). Экспериментальные точки при энергиях 7 и 8 МэВ [71H, 73E], заметно отклоняющиеся от оценок, имеют, видимо,

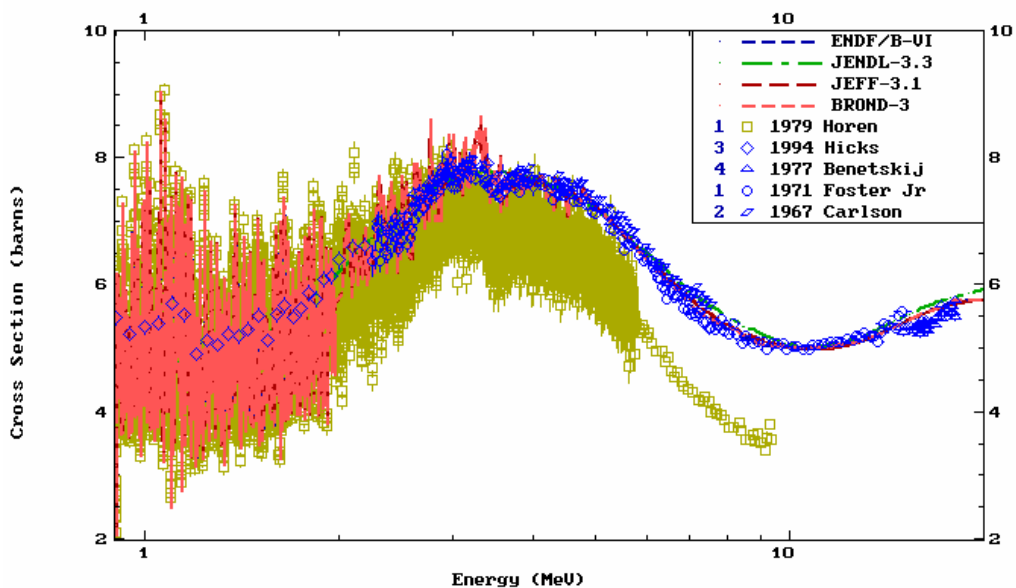


Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений ^{206}Pb в диапазоне энергий от 0.9 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

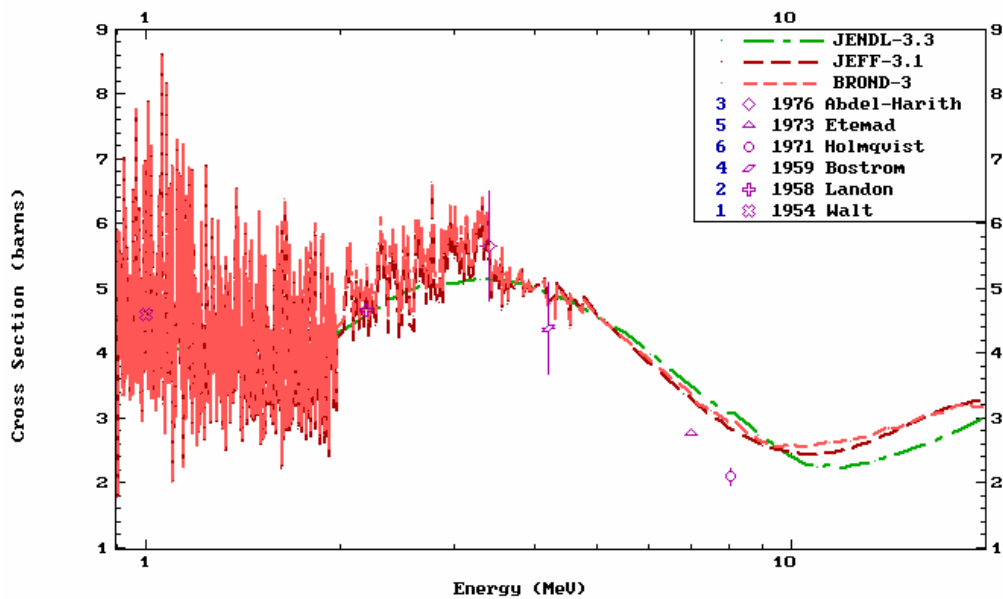


Рис. 7. Оценки сечений упругого рассеяния нейтронов на ^{206}Pb в диапазоне энергий от 0.9 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

значительно большие погрешности, чем указанные авторами. Это непосредственно следует из приведенного ниже рассмотрения экспериментальных данных по дифференциальным сечениям рассеяния нейтронов.

На рис. 8 для трех энергий нейтронов показано сравнение оценок угловых распределений с соответствующими экспериментальными данными. Аналогичные результаты имеются также для ряда промежуточных и более высоких энергий. Анализ угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, как правило, осуществляется на основе расчетов по оптической модели, и все оценки хорошо описывают имеющиеся экспериментальные данные. Для энергии нейтронов 7 МэВ данные работы [73E] под передними углами оказываются заметно ниже данных других авторов, и именно эти данные вносят определяющий вклад в интегральное сечение рассеяния, полученное в [73E]. Более детальные данные других авторов хорошо согласуются с оценками (рис.8), и это согласие снимает вопросы о расхождении оценок с измеренными интегральными сечениями

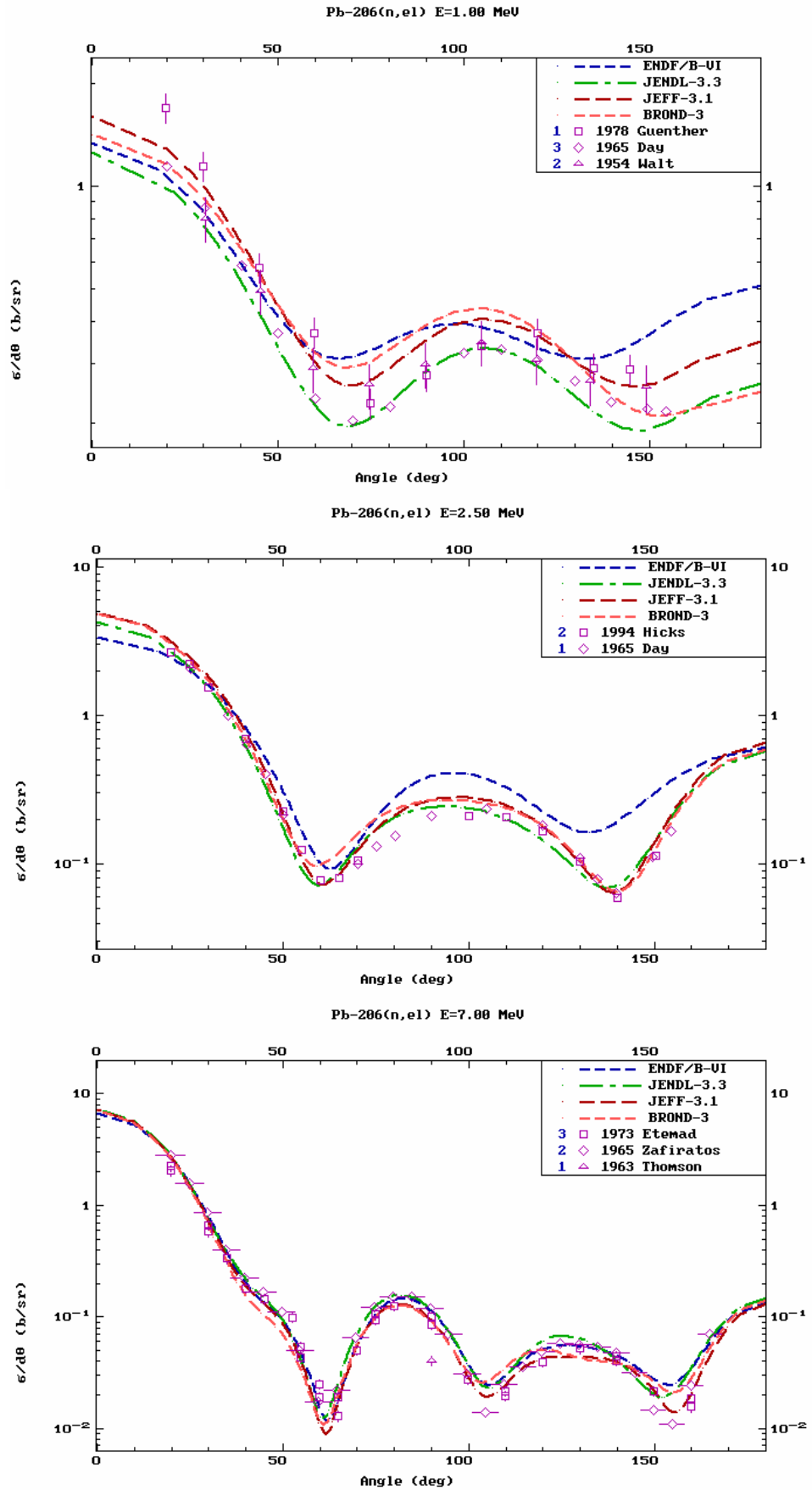


Рис. 8. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов при энергиях 1.00, 2.50 и 7.00 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

рассеяния. Аналогичное заключение возникает при анализе угловых распределений для энергии нейтронов 8 МэВ.

Следует отметить, что при энергиях ниже 2.5 МэВ в экспериментальных данных важную роль играет рассмотренная выше промежуточная структура нейтронных сечений. В этих условиях сравнение оценок с экспериментальными данными будет оправданно только при усреднении данных по широкому энергетическому интервалу, соответствующему условиям справедливости оптической модели.

3.3 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

В JENDL-3.3 рассматривался спектр 15 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в БРОНД-3 и JEFF-3.1 число учитываемых уровней увеличено до 24 и 25, соответственно, и в ENDF/B-VII учитывалось 39 уровней. Так как при увеличении числа уровней соответствующим образом изменяется порог статистического описания уровней, так называемый континуум уровней, то различия в числе рассматриваемых уровней не должно заметно отражаться на оценках полного (интегрального) сечения неупругого рассеяния

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 9. Каких-либо экспериментальных данных для этого сечения нет. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели, а также различием моделей расчета вкладов прямых и предравновесных процессов, существенных для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Все оценки дают весьма близкие значения сечений неупругого рассеяния, и лишь несколько завышенной в области энергий нейтронов до 4.5 МэВ можно считать JENDL-3.3.

Аргументы для такого заключения дает анализ функций возбуждения первого 2^+ -уровня, оценки которых приведены на рис. 10. Оценка JENDL-3.3 в области максимума значительно превышает другие оценки, и это обусловлено, по-видимому, слишком малой глубиной мнимой части оптического потенциала, использованного в соответствующих расчетах. Аналогичный дефект проявляется в JENDL-3.3 также для околопороговых участков функций возбуждения более высоких уровней.

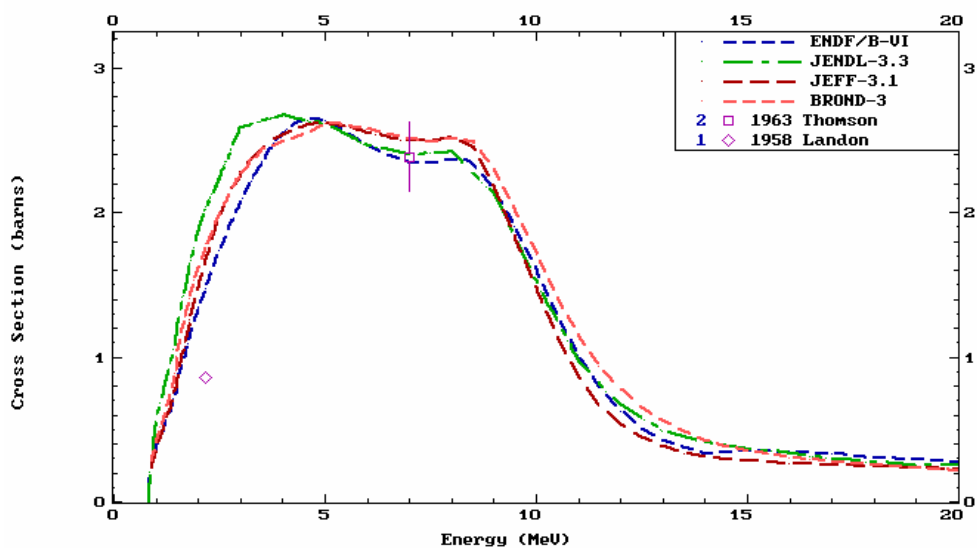


Рис. 9. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для ^{206}Pb

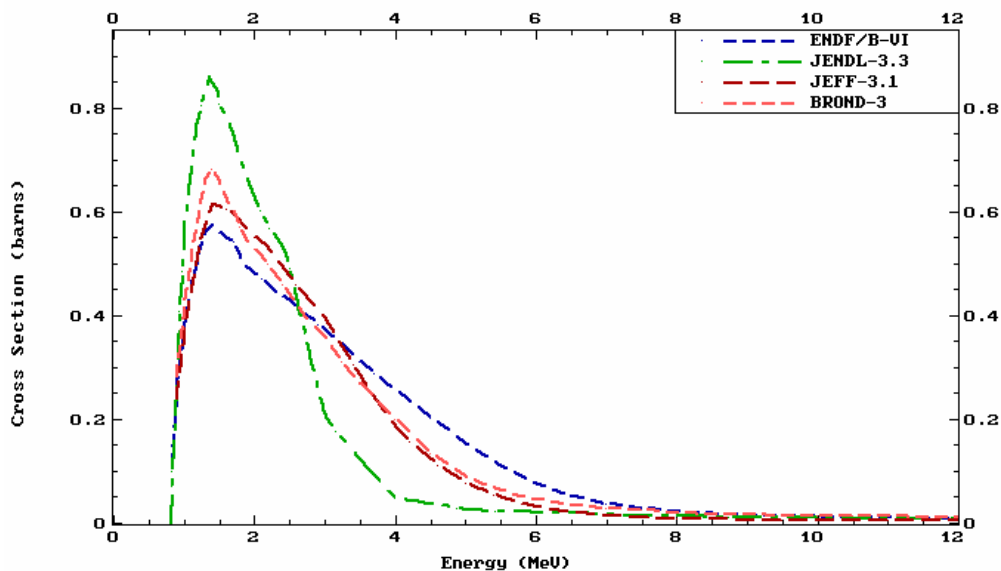


Рис. 10. Оценки сечения неупругого рассеяния нейтронов на первом 2^+ -уровне ^{206}Pb

Асимметрия угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов, обусловленная прямыми и предравновесными процессами, учтена во всех оценках для рассеяния на коллективных уровнях, а также для нейтронного рассеяния в континууме. Надежных экспериментальных данных по угловым распределениям неупруго рассеянных нейтронов для ^{206}Pb нет, и справедливость оценок соответствующих угловых распределений подтверждается, главным образом, их подобием с аналогичными оценками для ^{208}Pb и естественной смеси изотопов свинца, где такие данные имеются.

3.4 Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

На рис. 11 показаны оценки сечений радиационного захвата нейтронов с энергией выше 900 кэВ. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия обусловлены различиями моделирования плотности уровней в расчетах энергетической зависимости нейтронных и радиационных ширин. Экспериментальных данных вне резонансной области нет. Тем не менее, оценка JEFF-3.1 в области энергий до 7 МэВ следует признать заниженной. Если опираться на подобие энергетической зависимости сечений захвата для четно-четных изотопов свинца и значение 1.0 ± 0.3 мб [58L] для сечения захвата на ^{208}Pb при энергии нейтронов 2.5 МэВ, то для ^{206}Pb при той же следует ожидать сечения 2-6 мб. Эта грубая оценка согласуется с результатами расчетов, положенных в основу оценок ENDF/B-VI, JENDL-3.3 и БРОНД-3.

Для энергии нейтронов все оценки дают сечение захвата близкое к 1 мб, что хорошо согласуется с систематикой, основанной на модели прямого-коллективного захвата нейтронов [86Б]. Такая модель предсказывает энергетическую зависимость сечений захвата нейтронов с энергиями выше 10 МэВ, подобную оценкам ENDF/B-VI, JEFF-3.1 и БРОНД-3, но существенно противоречащую оценке JENDL-3.3.

Необходимо, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 2-3 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не являются сколь-либо существенными для анализа характеристик ядерных реакторов.

3.5. Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT= 17)

Экспериментальные данные о сечении реакций (n,2n) показаны на рис. 12 совместно с различными оценками. Оценку JENDL-3.3, несомненно, следует признать сильно завышенной. ENDF/B-VI и БРОНД-3 значительно лучше согласуются с экспериментальными данными, и это обусловлено, в первую очередь, более корректным учетом в соответствующих расчетах оболочечных эффектов в плотности уровней ядер, влияние которых в изотопах свинца является достаточно сильным [98I].

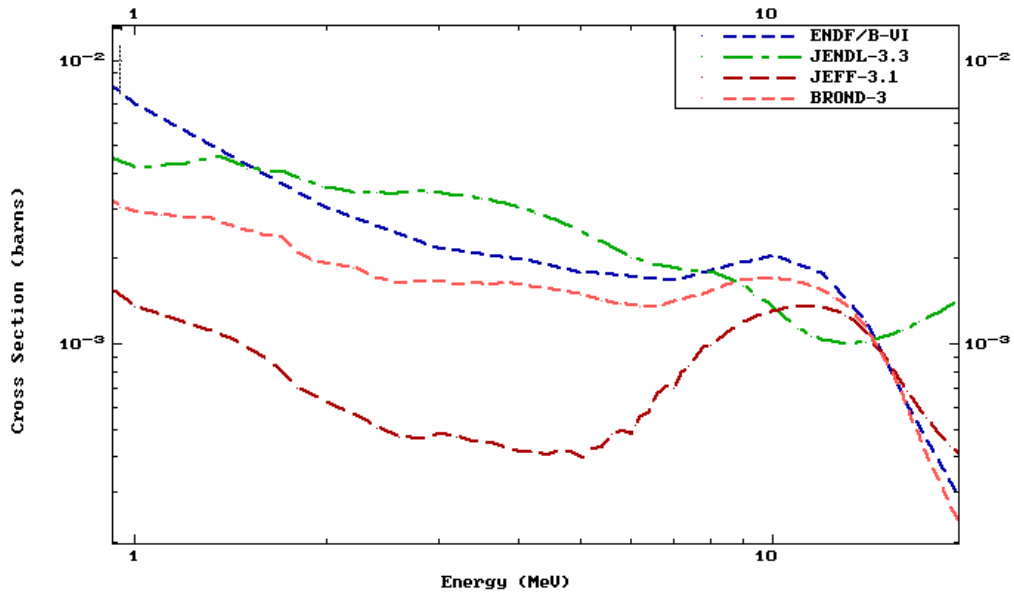


Рис. 11. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов ^{206}Pb

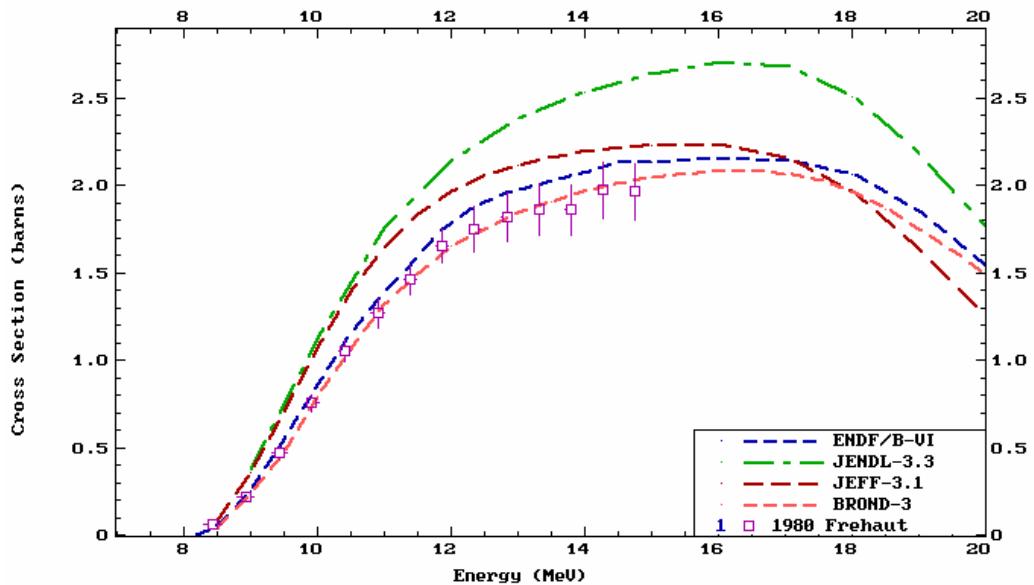


Рис.12. Оценки сечений реакции (n,2n) в сравнении с экспериментальными данными

Экспериментальных данных о сечении реакций (n,3n) нет. Сечение этой реакции существенно только выше 15 МэВ, и оно примерно соответствует разности сечения реакции (n,2n) в максимуме и в любой из вышележащих энергетических точек. При

энергии 20 МэВ сечение достигает значений 0.65 – 0.85 барна. Для согласованности, для сечения реакции (n,3n) следует принимать ту же оценку, что выбрана предпочтительной для (n,2n).

3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц

Реакции с вылетом заряженных частиц включены во все рассматриваемые оценки. Эти реакции существенны только в области энергий нейтронов выше 15 МэВ, и максимальное сечение таких реакций не превышает 30 мбарн. На рис. 13 показаны оценки сечений реакций (n,p) и (n,α), соответствующие наиболее высоким выходам заряженных частиц. Разногласия между оценками этих реакций сравнительно велики, и вряд ли оправдано предпочтение какой-либо из оценок без дополнительной информации.

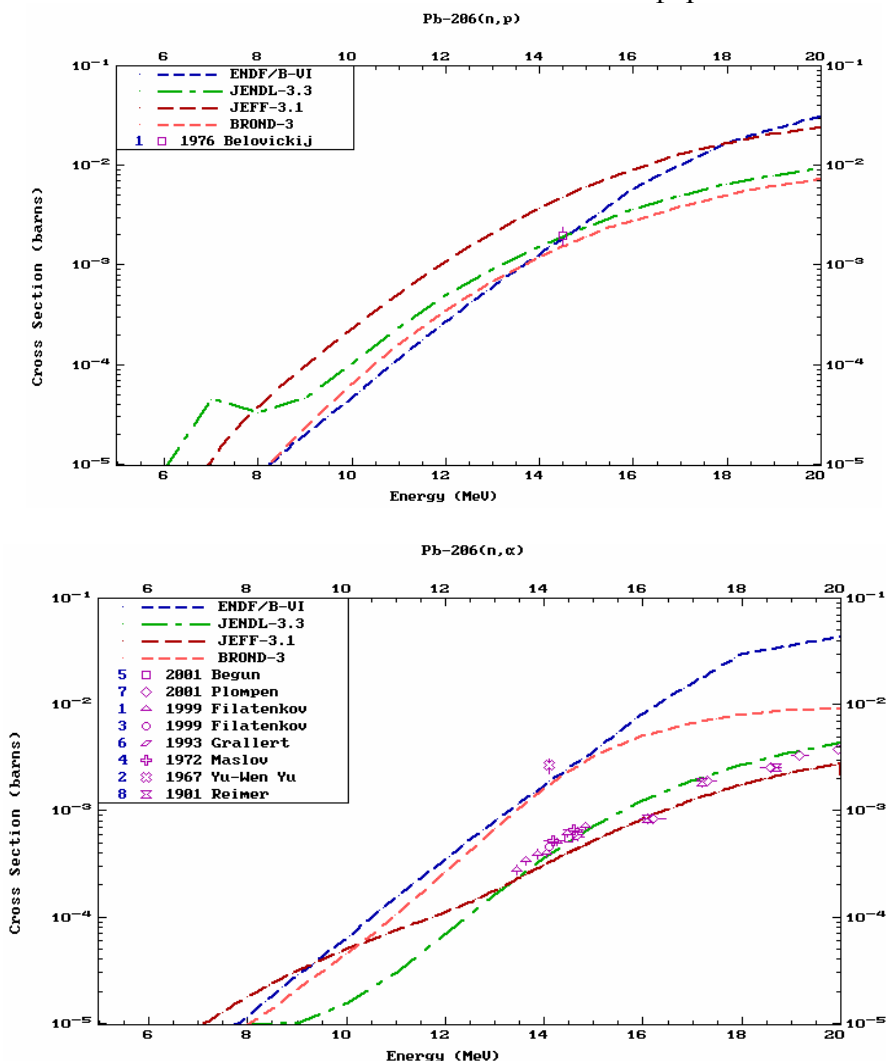


Рис.13. Оценки сечений реакции $^{206}\text{Pb}(n,p)$ и $^{206}\text{Pb}(n,\alpha)$

71H B.Holmqvist, T.Wiedling, Report AE-430 (1971).

73E M.A.Etemad, Report AE-482 (1973).

79H D.J. Horen, J.A.Harvey, N.W.Hill, Phys. Rev., C20, 478 (1979).

81H D.J. Horen, J.A.Harvey, N.W.Hill, Phys.Rev., C24, 1961 (1981).

86Б Т.С.Беланова и др., Радиационный захват нейтронов – Справочник, Энергоатомиздат, Москва, 1986.

98I A.V.Ignatyuk, In: Handbook for calculations of nuclear reaction data – Reference input parameter library. TECDOC-1034, IAEA, Vienna, 1998, ch. 5.

4. Образование гамма-лучей

Оценки сечений образования и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата и неупругого взаимодействия нейтронов, содержатся во всех оценках. В БРОНД-3 дискретные гамма-переходы между низколежащими уровнями ядрамишени рассмотрены лишь ниже порога контитуума, и для более высоких энергий представлены интегральные выходы гамма-лучей. В остальных оценках содержится более детальная информация как о спектрах дискретных гамма-лучей, так и непрерывных спектрах гамма-излучения для всех каналов неупругого взаимодействия нейтронов с рассматриваемым изотопом.

Угловые распределения всех типов гамма-излучения в приняты изотропными во всех оценках.

5. Заключение

На основе проведенного рассмотрения оценок и имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что оценку JENDL-3.3, по-видимому, нельзя признать удовлетворительной ни для полных нейтронных сечений ниже энергии 5 МэВ, ни для сечений неупругого рассеяния нейтронов и (n,xn) реакций. С другой стороны оценки ENDF/B-VI, БРОНД-3 и JEFF-3.1 (=ENDF/B-VII) для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений. Это свидетельствует об их достаточно высокой надежности и согласованности. Оценка JEFF-3.1 содержит много компонент ENDF/B-VI и ее преимущества перед другими оценками связано лишь с более детальным представлением спектров гамма-лучей и заряженных частиц. Для библиотеки РОСФОНД в настоящее время целесообразно принять оценку JEFF-3.1.

Следует однако отметить, что параметры большинства резонансов в этой оценке, также как в других оценках, существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов, поэтому в ближайшем будущем необходимо дополнительное уточнение оценки нейтронных сечений в области разрешенных резонансов, включая уточнение сечений для тепловых нейтронов. Такие уточнения вносятся в БРОНД-3, но эта работа сможет быть завершена лишь в 2007 г.

Автор заключения

А.В.Игнатюк

82.6. Свинец-207

Стабилен, содержание в естественной смеси (22.1±0.1)%

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для свинца-207:

ФОНД-2.2 = JENDL-3.3 – оценка M.Mizumoto, 1987, пересмотрена и существенно модифицирована в 1994 и дополнительно модифицирована в 2001;

БРОНД-3 – оценка А.В.Игнатюка и др., 2001;

ENDF/B-VI – оценка M.Chadwick et al., 1996; дополнительные уточнения в 1999;

JEFF-3.1 – оценка A.Koning, 2005; принята также в ENDF/B-VII.

1. Общие характеристики

1.1. $Z = 82$ -зарядовое число;

1.2. $A = 207$ (атомный вес);

1.3. $AWR = 205.198$ (отношение массы ядра к массе нейтрона).

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.3 Область разрешенных резонансов.

В оценке JENDL-3.3 граница области разрешенных резонансов выбрана равной 475 кэВ, и принят радиус потенциального рассеяния $R_0 = 9.53$ фм. Нейтронные ширины резонансов взяты на основе анализа данных [78H] и компиляции Мугабгаба [84M].

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках ENDF/B-VI основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мугабгабом [84M] на основе анализа тех же экспериментальных данных [78H]. Верхняя граница резонансной области также принята равной 475 кэВ, и радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 9.5$ фм. Оценка ENDF/B-VI для разрешенных резонансов включена без изменений в БРОНД-3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII).

Радиационные ширины резонансов, использованные в оценках, показаны на рис. 1. Ширины многих s- и p-резонансов, которые не были измерены экспериментально и которым были приписаны средние значения ширин, отличаются очень сильно в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI. В частности, в ENDF/B-VI для s-резонансов с неизвестными ширинами были приняты значения 15 эВ, тогда как в JENDL-3.3 для тех же резонансов – 0.11 эВ. Для p-резонансов аналогичных расхождения оказываются несколько меньшими, но они также превышают 4.5 раза (рис. 1).

Недавно Мугабгабом были пересмотрены параметры нейтронных резонансов [06M] на основе новых измерений сечений пропускания и захвата нейтронов [87K, 97M]. Уточненные ширины приведены на рис. 1, и для большинства резонансов они существенно отличаются от использованных в обеих предыдущих оценках. В частности, средняя радиационная ширина ширин: уточненная средняя радиационная ширина p-резонансов 0.38 ± 0.03 эВ [06M] оказывается примерно на 30% ниже значений, принятых в ENDF/B-VI для многих s-резонансов, и более чем в 3 раз выше значения 0.11 эВ, принятого в JENDL-3.3.

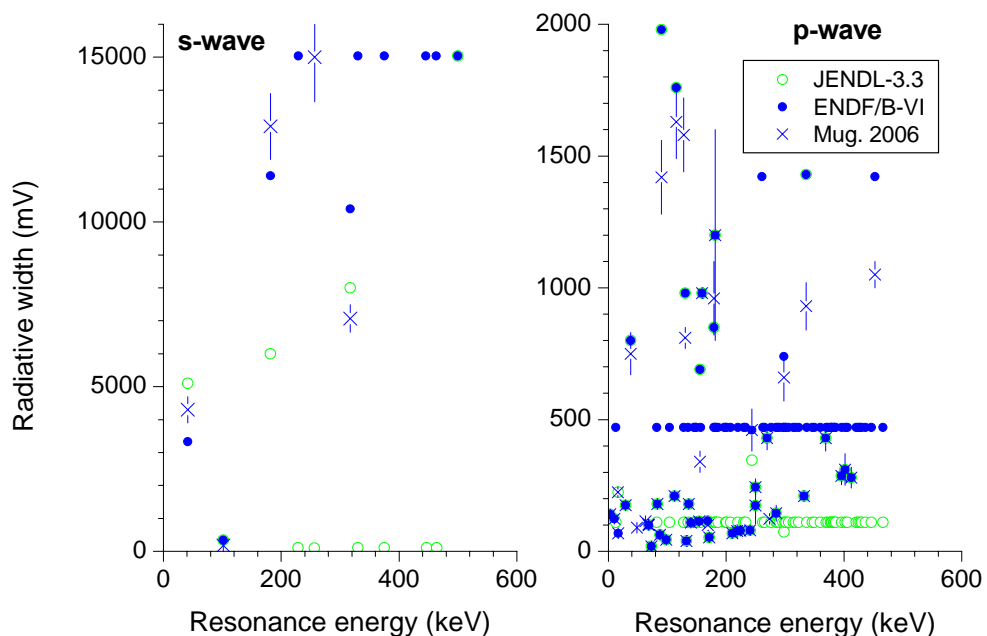


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках

Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров во всех последних оценках рекомендовано приближении Рэйха-Мура. Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| Оценка | JENDL-3.3 | ENDF/B-VI=JEFF-3.1 | Эксп. [84M] | [06M] |
|--|-----------|--------------------|----------------|----------------|
| полное | 11.966 | 11.459 | | |
| упругое | 11.254 | 10.747 | | |
| захвата | 0.712 | 0.711 | 0.712±0.010 | 0.622±0.014 |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | 0.391 | 0.392 | 0.39±0.01 cal. | 0.32±0.02 cal. |

В пределах погрешности оценки согласуются с предыдущими экспериментальными данными о сечении радиационного захвата нейтронов и резонансном интеграле захвата [84M], но недавние уточнения экспериментальных данных требуют соответствующего уточнения резонансных параметров, включенных в оценки.

В оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI нет области неразрешенных резонансов. Однако, статистический анализ параметров резонансов, включенных в оценки, представляет интерес как для определения числа пропущенных резонансов и соответствующих погрешностей оцененных резонансных сечений, так и для анализа согласованности параметров плотности уровней и нейтронных силовых функций, используемых в оптической и статистической моделях для расчетов нейтронных сечений вне резонансной области.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа для набора резонансных параметров ENDF/B-VI представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов пропущено не более одного резонанса, но число резонансов сравнительно мало, и статистическая погрешность определения среднего расстояния между резонансами достигает 25%. С другой стороны, в наборе p-резонансов пропущено, по-видимому, около 20 резонансов. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, равны $D_0=(48 \pm 9)$ кэВ и $D_1=(4.0 \pm 0.3)$ кэВ. Для нейтронных силовых функций в рамках данного анализа получены значения $S_0=(1.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$ и $S_1=(0.55 \pm 0.15) \cdot 10^{-4}$ для s- и p-резонансов, соответственно. В аналогичном анализе Мугабгаба, проведенном для уточненных параметров нейтронных резонансов [06M], получены значения $D_0=(30 \pm 4)$ кэВ, $D_1=(4.03 \pm 0.29)$ кэВ и $S_0=(0.76 \pm 0.31) \cdot 10^{-4}$, $S_1=(0.45 \pm 0.07) \cdot 10^{-4}$, которые с учетом погрешностей не сильно отличаются от результатов анализа параметров резонансов, содержащихся в ENDF/B-VI. Отношение $D_0/D_1 > 7.5$ отличается примерно в два раза от статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, и это может указывать на достаточно сильную зависимость плотности нейтронных резонансов от четности, но также может оказаться следствием более значительного пропуска резонансов, чем полученного в рамках представленного выше анализа.

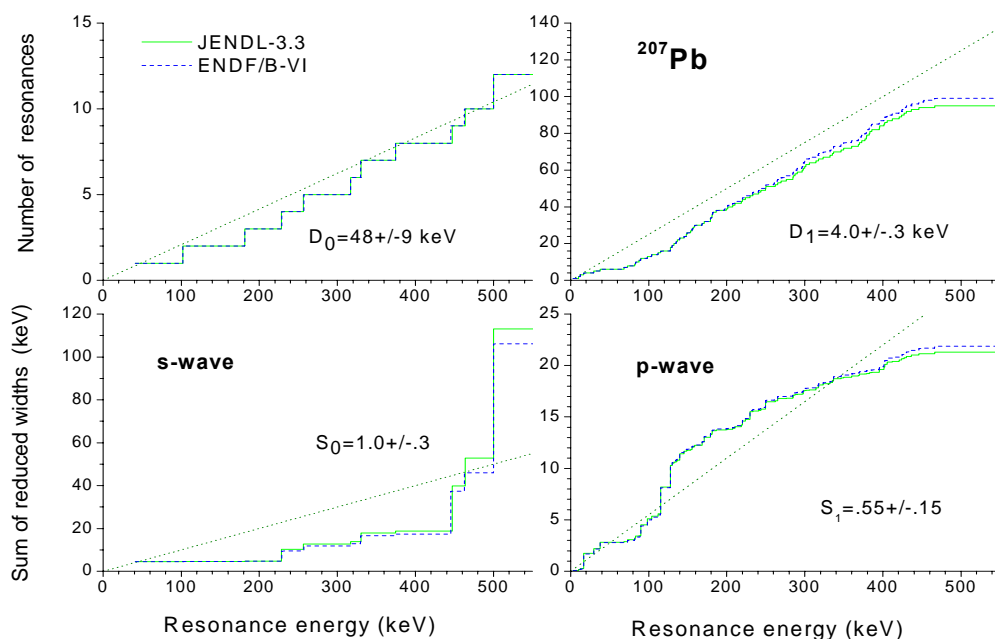


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI (=JEFF-3.1)

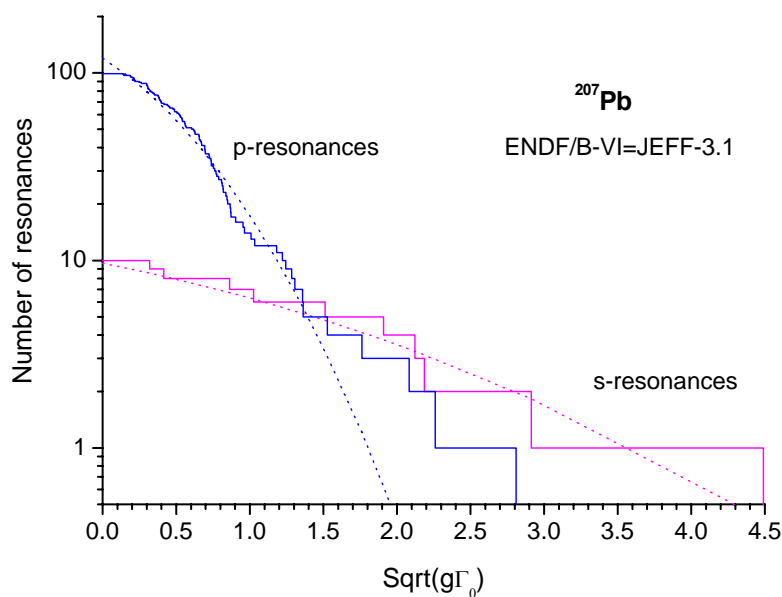


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов

На рис. 4 и 5 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для полных нейтронных сечений некоторые разногласия в нейтронных ширинах резонансов не выходят за пределы погрешностей экспериментальных данных. Для сечений захвата нейтронов имеются только экспериментальные данные, усредненные по большому числу резонансов. Разногласия оценок в этом случае проявляются, главным образом, в межрезонансных минимумах, и они обусловлены большими различиями средних радиационных ширин, принятых в оценках.

Учитывая неоправданно низкие значения радиационных ширин многих резонансов в JENDL-3.3, при формировании БРОНД-3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII) предпочтение было отдано оценке ENDF/B-VII. Однако, параметры многих резонансов в этой оценке существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов [06M], поэтому

в ближайшем будущем необходимо дополнительное уточнение оценки резонансных параметров.

78H D.J. Horen, J.A.Harvey, N.W.Hill, Phys. Rev. C18, 722 (1978)

84M S.Mughabghab, Neutron Cross Sections, Academic Press, NY,1984, part B.

87K R.Koehler et al., Phys. Rev. C35, 1646 (1987).

97M P.Mutti et al., Nuclear Data for Science and Technology (Trieste, 1997), Eds. G.Reffo, A.Ventura, C.Grandi, IPS, Bologna, 1997, part 2, p. 1584.

06M S.Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY,2006.

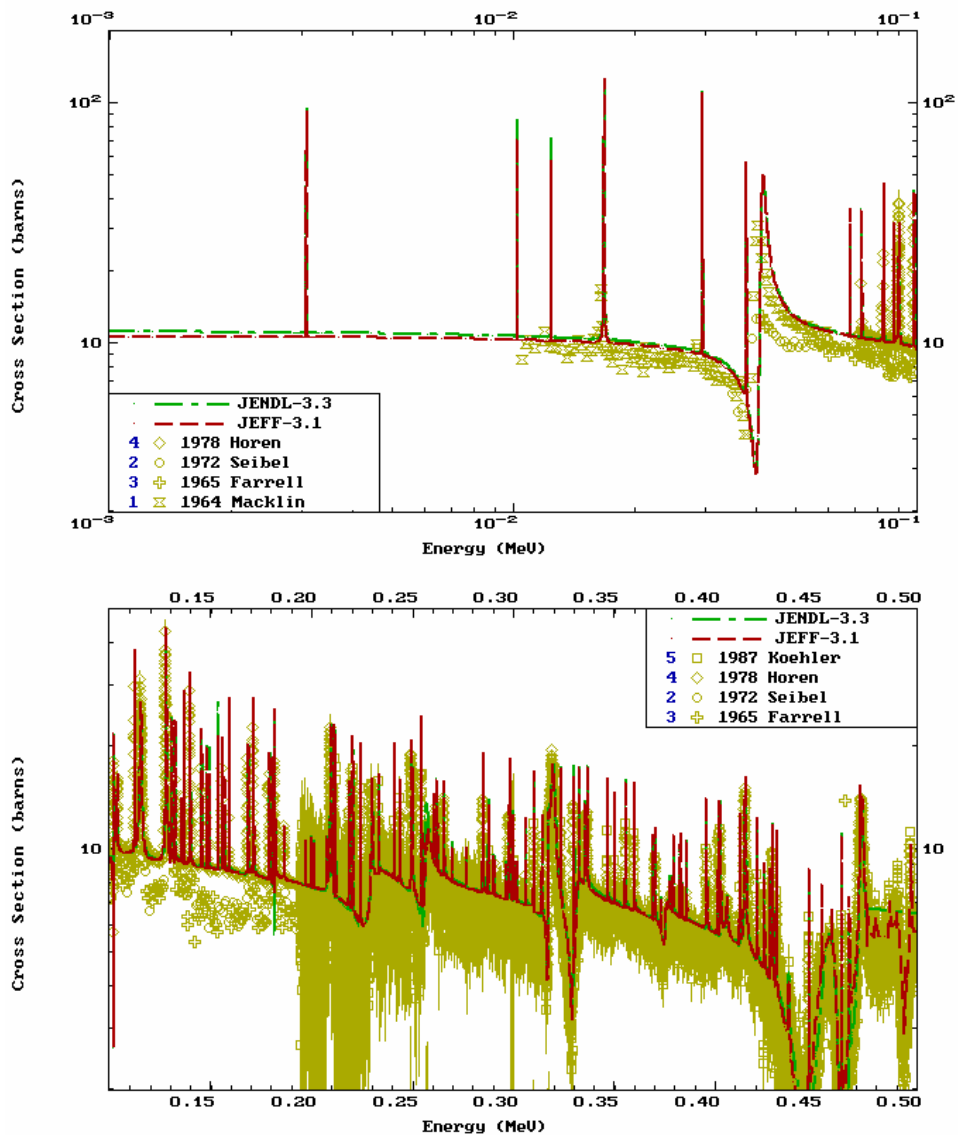


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

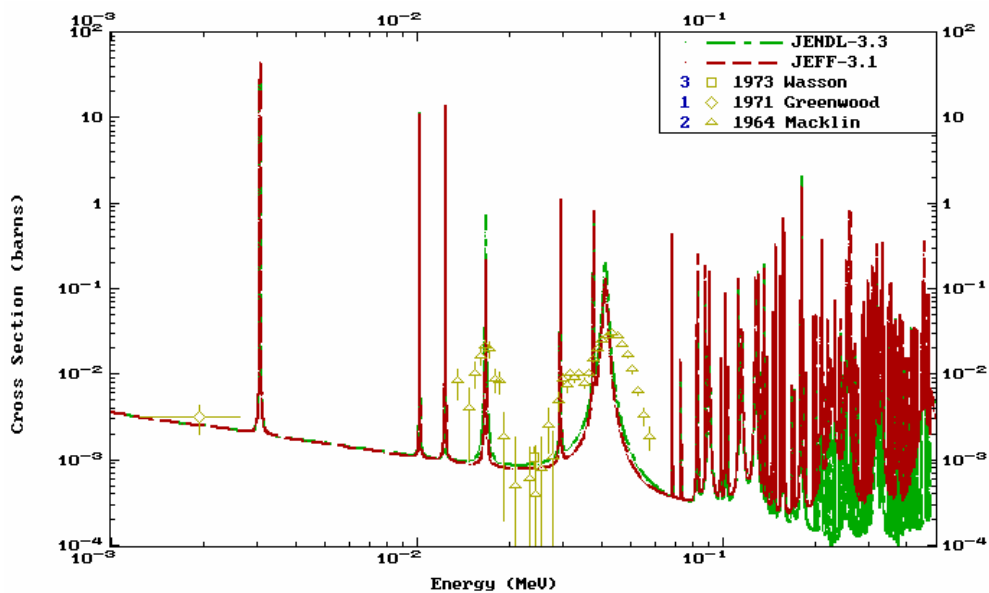


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

5. Нейтронные сечения вне резонансной области

3.1. Полные сечения (MT=1)

На рис. 6 показаны имеющиеся оценки полных нейтронных сечений в области энергий выше 475 кэВ в сравнении с экспериментальными данными. В дополнение к рассмотренным выше оценкам JENDL-3.3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII) вне резонансной области для всех сечений имеется также недавняя оценка БРОНД-3. Гросс-структура резонансо-подобных флуктуаций полных сечений, проявляющаяся в данных [78H, 87K], в несколько усредненной форме принята в качестве оценки полных сечений ENDF/B-VI в области энергий до 5 МэВ, и эта оценка сохранена без изменений также в БРОНД-3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII). В JENDL-3.3 для этого диапазона энергий принята бесструктурная оценка сечений, полученная на основе расчетов по оптической модели.

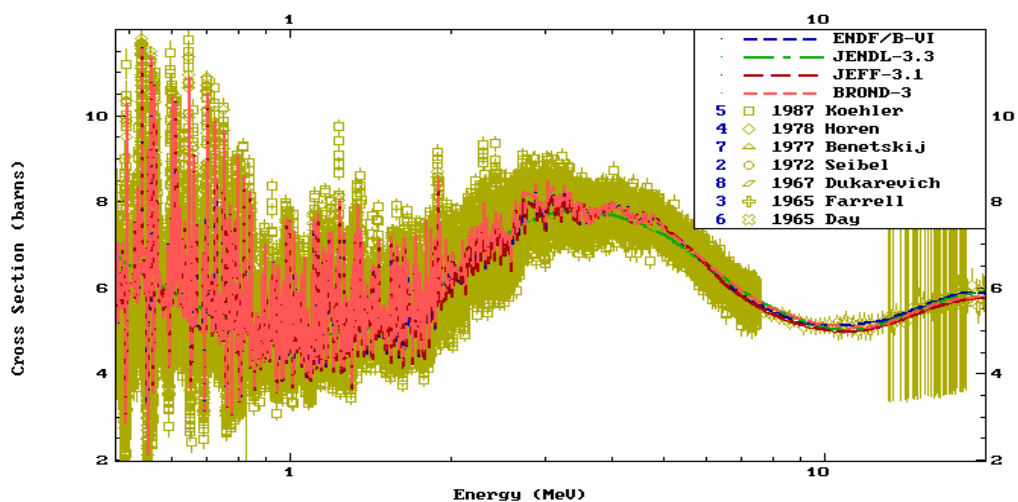


Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений ^{206}Pb в диапазоне энергий от 0.9 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

В БРОНД-3 и JEFF-3.1 результаты расчетов по оптической модели приняты в качестве оценки полных сечений только для энергий нейтронов выше 5 МэВ. Все оценки

основанные на расчетах по оптической модели, хорошо согласуются между собой, несмотря на имеющиеся разногласия параметров оптического потенциала. Эти разногласия оказываются существенными в области более низких энергий, когда оптическая модель используется для расчетов сечений неупругого взаимодействия нейтронов.

3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов (МТ=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. Прямых экспериментальных данных по интегральным сечениям упругого рассеяния нейтронов для изотопа ^{207}Pb нет. В этих условиях можно ожидать, что более корректной для сечений упругого рассеяния будет оценка, в которой достигнуто лучшее описание данных по угловым распределениям упруго рассеянных нейтронов.

На рис. 7 для трех энергий нейтронов показано сравнение оценок угловых распределений с соответствующими экспериментальными данными. Аналогичные результаты имеются также для ряда промежуточных. Анализ угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, как правило, осуществляется на основе расчетов по оптической модели, и все оценки хорошо описывают имеющиеся экспериментальные данные.

Следует отметить, что при энергиях ниже 2.5 МэВ в экспериментальных данных важную роль играет рассмотренная выше промежуточная структура нейтронных сечений. В этих условиях сравнение оценок с экспериментальными данными будет оправданно только при усреднении данных по широкому энергетическому интервалу, соответствующему условиям справедливости оптической модели.

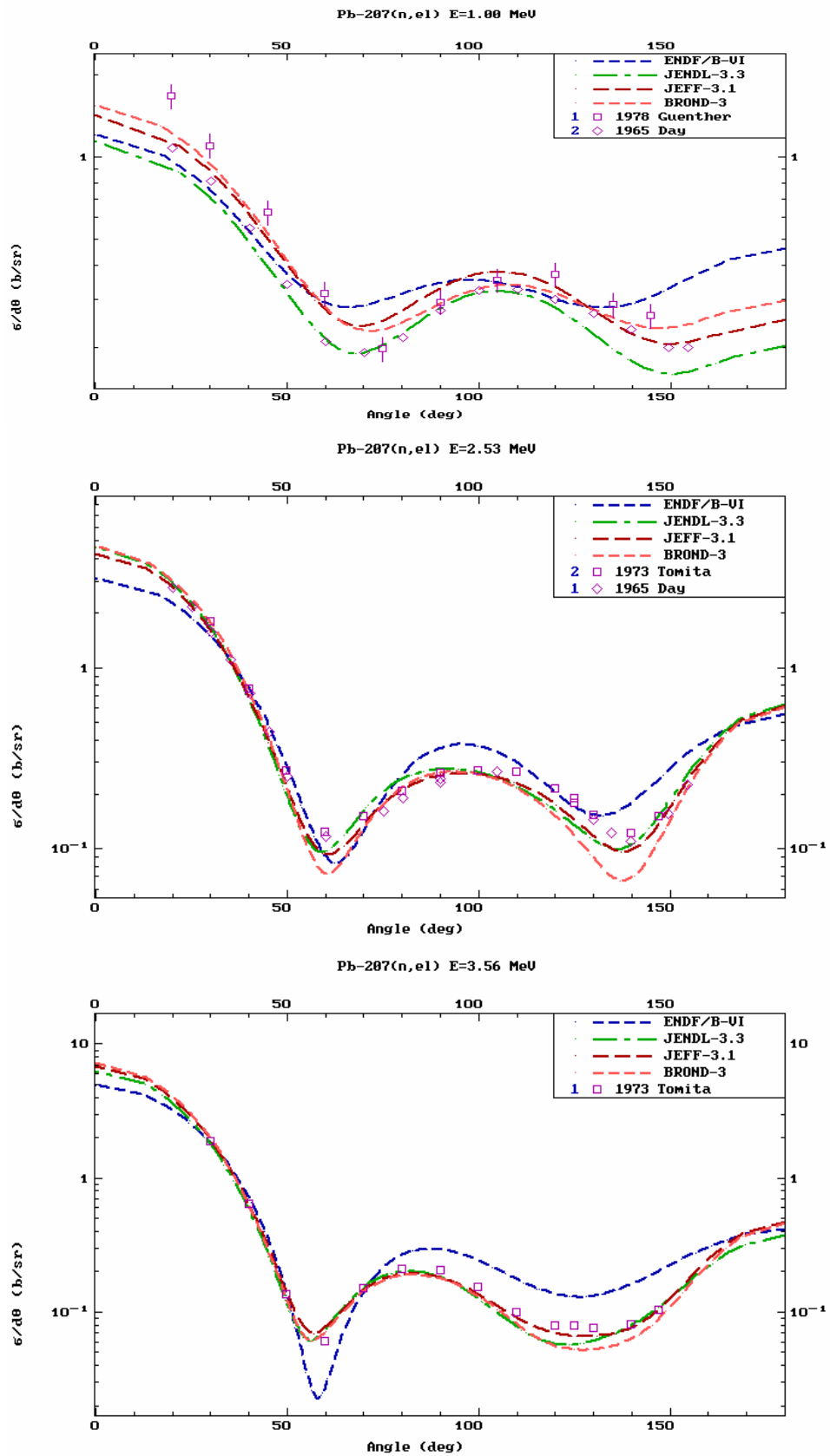


Рис. 7. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов при энергиях 1.00, 2.53 и 3.53 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

3.3 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

В JENDL-3.3 рассматривался спектр 8 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в ENDF/B-VI учитывалось 39 уровней, в БРОНД-3 – 40 уровней и в JEFF-3.1 – 20 уровней. Так как при увеличении числа уровней соответствующим образом изменяется порог статистического описания уровней, так называемый континуум уровней, то различия в числе рассматриваемых уровней не должно заметно отражаться на оценках полного (интегрального) сечения неупругого рассеяния.

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 8. Каких-либо экспериментальных данных для этого сечения нет. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели, а также различием моделей расчета вкладов прямых и предравновесных процессов, существенных для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Все оценки дают весьма близкие значения сечений неупругого рассеяния, и лишь несколько завышенной в области энергий нейтронов до 5 МэВ можно считать JENDL-3.3. Аргументы для такого заключения дает анализ функций возбуждения первого уровня, оценки которых приведены на рис. 9. Оценка JENDL-3.3 в области максимума существенно превышает другие оценки, и это обусловлено, по-видимому, слишком малой глубиной мнимой части оптического потенциала, использованного в соответствующих расчетах. Аналогичный дефект проявляется в JENDL-3.3 также для околопороговых участков функций возбуждения более высоких уровней.

Асимметрия угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов, обусловленная прямыми и предравновесными процессами, учтена во всех оценках для рассеяния на мультиплетах низколежащих коллективных уровнях, а также для нейтронного рассеяния в

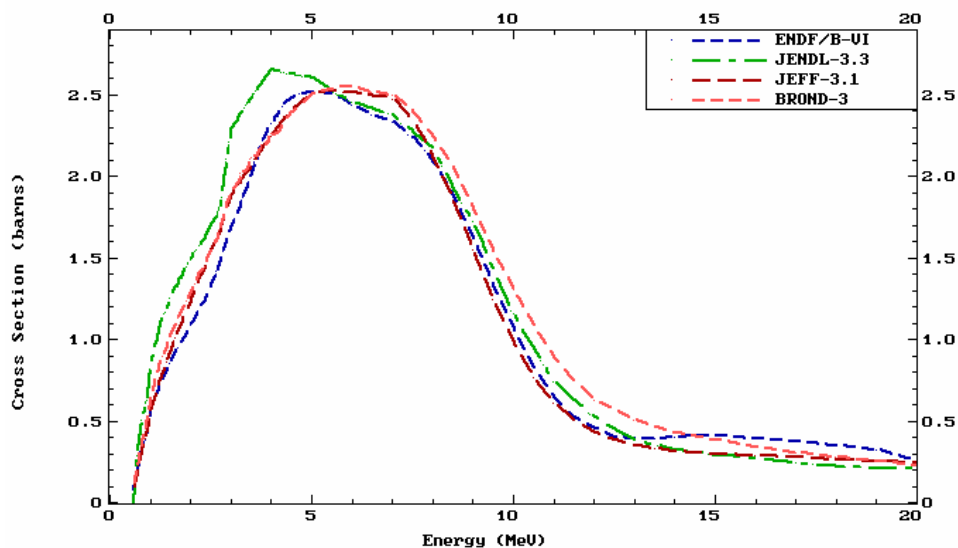


Рис. 8. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для ^{207}Pb

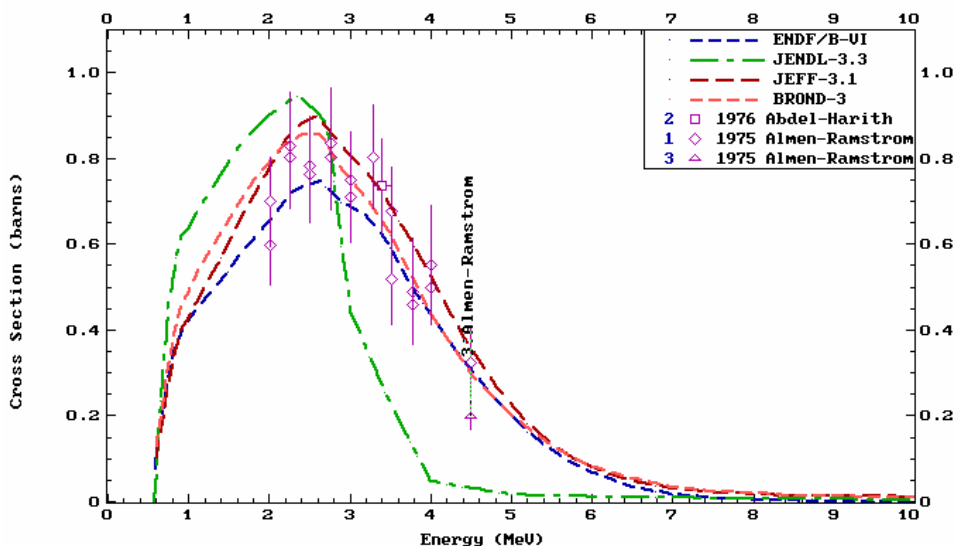


Рис. 9. Оценки сечения неупругого рассеяния нейтронов на первом уровне ^{207}Pb

континууме. Надежных экспериментальных данных по угловым распределениям неупруго рассеянных нейтронов для ^{207}Pb нет, и справедливость оценок соответствующих угловых распределений подтверждается, главным образом, их подобием с аналогичными оценками для ^{208}Pb и естественной смеси изотопов свинца, где такие данные имеются.

3.4 Сечение радиационного захвата нейтронов ($MT=102$).

На рис. 10 показаны оценки сечений радиационного захвата нейтронов выше 475 кэВ. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия обусловлены различиями моделирования плотности уровней в расчетах энергетической зависимости нейтронных и радиационных ширин. Экспериментальных данных вне резонансной области нет. Тем не менее, оценка JEFF-3.1 в области энергий до 7 МэВ следует признать заниженной. Если опираться на подобие энергетической зависимости сечений захвата для четно-четных изотопов свинца и значение 1.0 ± 0.3 мб [58L] для сечения захвата на ^{208}Pb при энергии нейтронов 2.5 МэВ, то для ^{207}Pb при той же следует ожидать сечения 4-7 мб. Эта грубая оценка согласуется с результатами расчетов, положенных в основу оценок ENDF/B-VI, JENDL-3.3 и БРОНД-3.

Для энергии нейтронов все оценки дают сечение захвата близкое к 1 мб, что хорошо согласуется с систематикой, основанной на модели прямого-коллективного захвата нейтронов [86Б]. Такая модель предсказывает энергетическую зависимость сечений захвата нейтронов с энергиями выше 10 МэВ, подобную оценкам ENDF/B-VI, JEFF-3.1 и БРОНД-3, но существенно противоречащую оценке JENDL-3.3.

Необходимо, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 2-3 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не являются сколь-либо существенными для анализа характеристик ядерных реакторов.

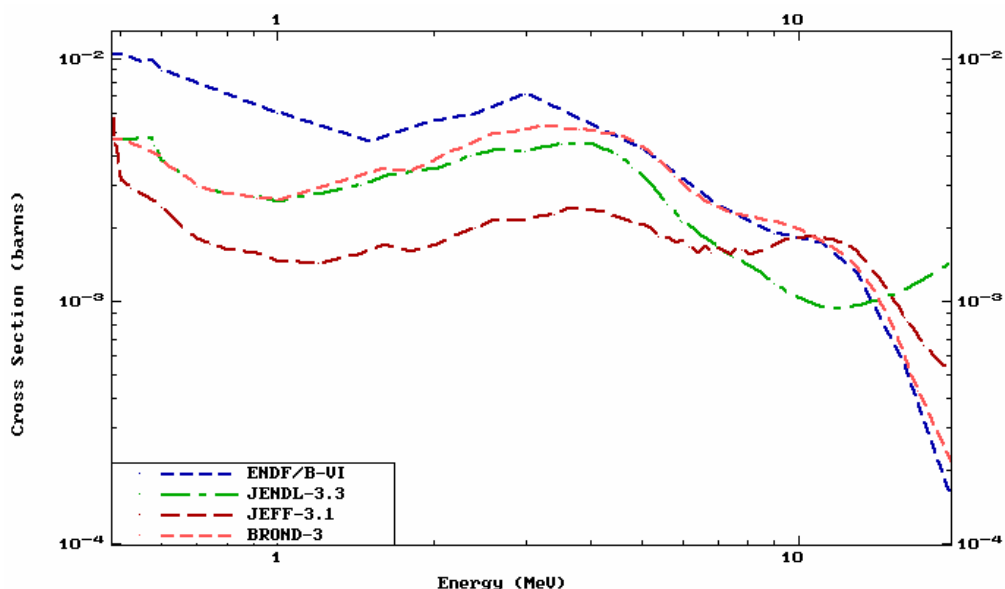


Рис. 10. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов для ^{207}Pb

3.5. Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT= 17)

Экспериментальные данные о сечении реакций (n,2n) показаны на рис. 11 совместно с различными оценками. Оценку JENDL-3.3, несомненно, следует признать сильно завышенной. ENDF/B-VI и БРОНД-3 значительно лучше согласуются с экспериментальными данными, и это обусловлено, в первую очередь, более корректным учетом в соответ-

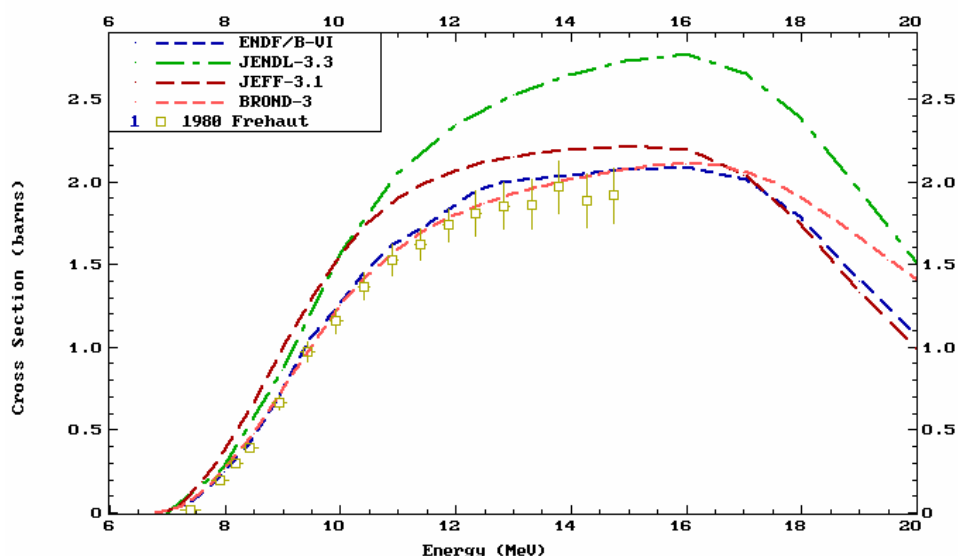


Рис.11. Оценки сечений реакции (n,2n) в сравнении с экспериментальными данными

ствующих расчетах оболочечных эффектов в плотности уровней ядер, влияние которых в изотопах свинца является достаточно сильным [98I].

Экспериментальных данных о сечении реакций (n,3n) нет. Сечение этой реакции существенно только выше 15 МэВ, и оно примерно соответствует разности сечения реакции (n,2n) в максимуме и в любой из вышележащих энергетических точек. При энергии 20 МэВ сечение достигает значений 0.75 – 1.15 барна. Для согласованности, для сечения реакции (n,3n) следует принимать ту же оценку, что выбрана предпочтительной для (n,2n).

3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц

Реакции с вылетом заряженных частиц включены во все рассматриваемые оценки. Эти реакции существенны только в области энергий нейтронов выше 15 МэВ, и максимальное сечение таких реакций не превышает 30 мбарн. На рис. 12 показаны оценки сечений реакций (n,p) и (n, α), соответствующие наиболее высоким выходам заряженных частиц. Разногласия между оценками этих реакций сравнительно велики, и вряд ли оправдано предпочтение какой-либо из оценок без дополнительной информации

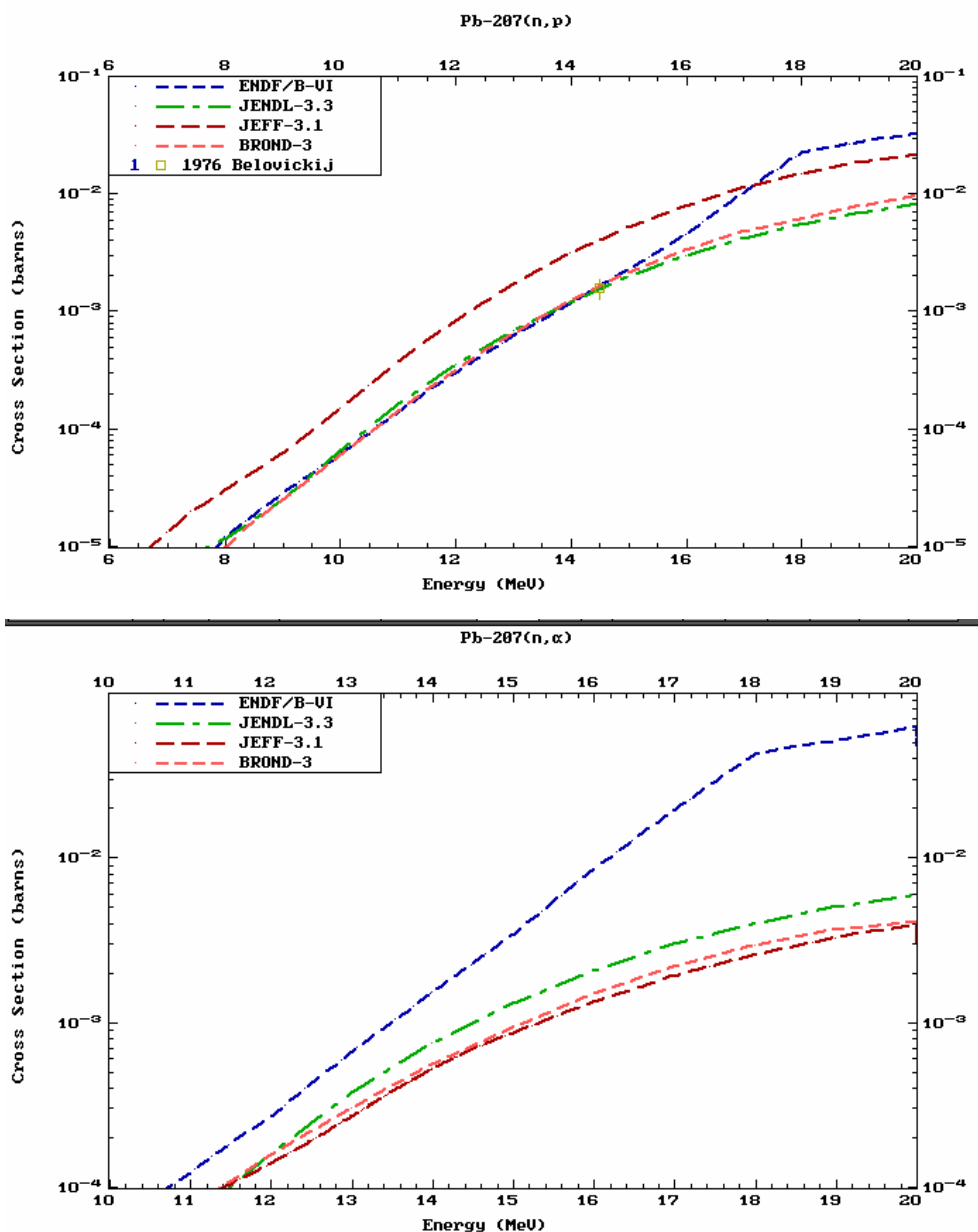


Рис.13. Оценки сечений реакции $^{207}\text{Pb}(n,p)$ и $^{207}\text{Pb}(n,\alpha)$

78H D.J. Horen, J.A.Harvey, N.W.Hill, Phys. Rev. C18, 722 (1978)

87K R.Koehler et al., Phys. Rev. C35, 1646 (1987).

86Б Т.С.Беланова и др., Радиационный захват нейтронов – Справочник, Энергоатомиздат, Москва, 1986.

98I A.V.Ignatyuk, In: Handbook for calculations of nuclear reaction data – Reference input parameter library. TECDOC-1034, IAEA, Vienna, 1998, ch. 5.

4. Образование гамма-лучей

Оценки сечений образования и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата и неупругого взаимодействия нейтронов, содержатся во всех оценках. В БРОНД-3 дискретные гамма-переходы между низколежащими уровнями ядрамишени рассмотрены лишь ниже порога контитуума, и для более высоких энергий представлены интегральные выходы гамма-лучей. В остальных оценках содержится более детальная информация как о спектрах дискретных гамма-лучей, так и непрерывных спектрах гамма-излучения для всех каналов неупругого взаимодействия нейтронов с рассматриваемым изотопом.

Угловые распределения всех типов гамма-излучения приняты изотропными во всех оценках.

5. Заключение

На основе проведенного рассмотрения оценок и имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что оценку JENDL-3.3, по-видимому, нельзя признать удовлетворительной ни для полных нейтронных сечений ниже энергии 5 МэВ, ни для сечений неупругого рассеяния нейтронов и (n,xn) реакций. С другой стороны оценки ENDF/B-VI, БРОНД-3 и JEFF-3.1 (=ENDF/B-VII) для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений. Это свидетельствует об их достаточно высокой надежности и согласованности. Оценка JEFF-3.1 содержит много компонент ENDF/B-VI, и ее преимущества перед другими оценками связано лишь с более детальным представлением спектров гамма-лучей и заряженных частиц. Для библиотеки РОСФОНД в настоящее время целесообразно принять оценку JEFF-3.1.

Следует однако отметить, что параметры большинства резонансов в этой оценке, также как в других оценках, существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов, поэтому в ближайшем будущем необходимо дополнительное уточнение оценки нейтронных сечений в области разрешенных резонансов, включая уточнение сечений для тепловых нейтронов. Такие уточнения вносятся в БРОНД-3, но эта работа будет завершена лишь в 2007 г.

Автор заключения

А.В.Игнатюк

82.7. Свинец-208

Стабилен, содержание в естественной смеси (52.4 ± 0.1)%

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для свинца-208:

ФОНД-2.2 = JENDL-3.3 – оценка M.Mizumoto, 1987, пересмотрена и существенно модифицирована в 1994 и дополнительно модифицирована в 2001;

БРОНД-3 – оценка А.В.Игнатьюка и др., 2001;

ENDF/B-VII – оценка M.Chadwick et al., 1996; дополнительные уточнения в 1999 и 2002, и еще раз уточнены сечения неупругих взаимодействий в 2006;

JEFF-3.1 – оценка A.Koning, 2005.

1. Общие характеристики

1.1. $Z = 82$ -зарядовое число;

1.2. $A = 208$ (атомный вес);

1.3. $AWR = 206.190$ (отношение массы ядра к массе нейтрона).

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.4 Область разрешенных резонансов.

В оценке JENDL-3.3 граница области разрешенных резонансов выбрана равной 1.0 МэВ, и принят радиус потенциального рассеяния $R_0 = 9.69$ фм. Нейтронные ширины резонансов взяты на основе анализа данных [86H] и компиляции Мугабгаба [84M].

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках ENDF/B-VI основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мугабгабом [84M] на основе анализа тех же экспериментальных данных [86H]. Верхняя граница резонансной области и радиус потенциального рассеяния приняты теми же, что в JENDL-3.. Оценка ENDF/B-VI для разрешенных резонансов включена без изменений в ENDF/B-VII и принята также в БРОНД-3 и JEFF-3.1.

Радиационные ширины резонансов, использованные в оценках, показаны на рис. 1. Ширины многих s- и p-резонансов, которые не были измерены экспериментально и которым были приписаны средние значения ширин, отличаются в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI весьма существенно. В частности, в ENDF/B-VI для s-резонансов с неизвестными ширинами были приняты значения 370 мэВ, тогда как в JENDL-3.3 для тех же резонансов – 180 мэВ. Для p-резонансов аналогичные значения ширин приняты равными 286 мэВ и 180 МэВ, соответственно (рис. 1).

Недавно Мугабгабом были пересмотрены параметры нейтронных резонансов [06M] на основе новых измерений сечений пропускания и захвата нейтронов [91C, 97M]. Уточненные ширины приведены на рис. 1, и для многих резонансов они заметно отличаются от использованных в обеих предыдущих оценках. В частности, средняя радиационная ширина ширин: уточненная средняя радиационная ширина p-резонансов 0.38 ± 0.03 эВ [06M] оказывается примерно на 30% ниже значений, принятых в ENDF/B-VI для многих s-резонансов, и более чем в 3 раз выше значения 0.11 эВ, принятого в JENDL-3.3.

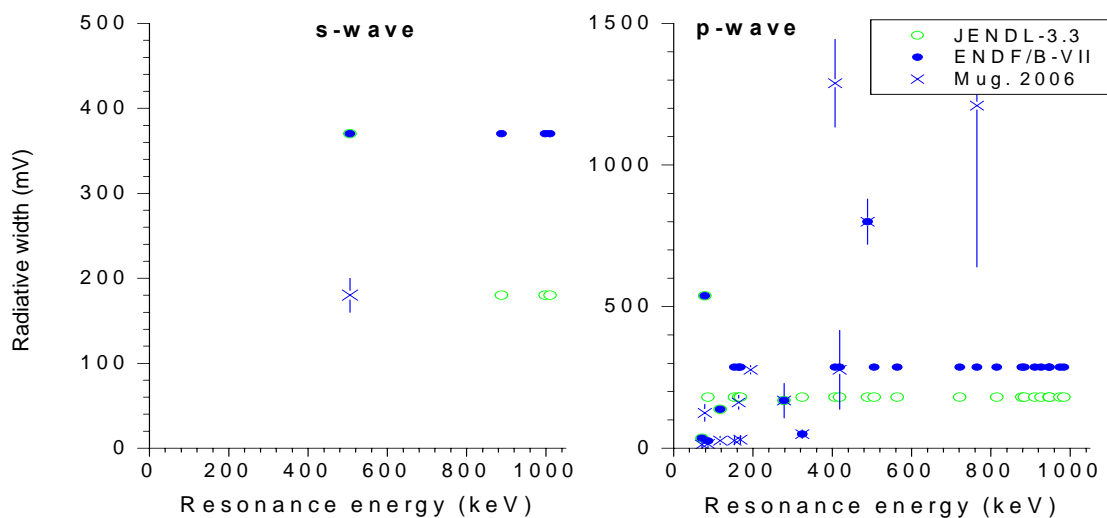


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках

Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров во всех оценках рекомендовано приближении Рэйха-Мура. Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| Оценка | JENDL-3.3 | ENDF/B-VI=ENDF/B-VII | Эксп. [84M] | [06M] |
|--|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| полное | 11.472 | 11.372 | | 11.50±0.15 |
| упругое | 11.471 | 10.371 | | 11.50±0.15 |
| захвата | $5.007 \cdot 10^{-4}$ | $4.920 \cdot 10^{-4}$ | $(0.49 \pm 0.03) \cdot 10^{-3}$ | $(0.23 \pm 0.02) \cdot 10^{-3}$ |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | $6.755 \cdot 10^{-3}$ | $5.026 \cdot 10^{-3}$ | $(2.0 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$ cal. | $(1.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$ cal. |

В пределах погрешности оценки согласуются с предыдущими экспериментальными данными о сечении радиационного захвата нейтронов и резонансном интеграле захвата [84M], но недавние уточнения экспериментальных данных требуют соответствующего уточнения резонансных параметров, включенных в оценки.

В оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI нет области неразрешенных резонансов. Однако, статистический анализ параметров резонансов, включенных в оценки, представляет интерес как для определения числа пропущенных резонансов и соответствующих погрешностей оцененных резонансных сечений, так и для анализа согласованности параметров плотности уровней и нейтронных силовых функций, используемых в оптической и статистической моделях для расчетов нейтронных сечений вне резонансной области.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа для набора резонансных параметров ENDF/B-VI представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов пропущено не более одного резонанса, но число резонансов сравнительно мало, и статистическая погрешность определения среднего расстояния между резонансами достигает 25%. С другой стороны, в наборе p-резонансов пропущено, по-видимому, около 20 резонансов. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, равны $D_0 = (48 \pm 9)$ кэВ и $D_1 = (4.0 \pm 0.3)$ кэВ. Для нейтронных силовых функций в рамках данного анализа получены значения $S_0 = (1.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$ и $S_1 = (0.55 \pm 0.15) \cdot 10^{-4}$ для s- и p-резонансов, соответственно. В аналогичном анализе Мугабгаба, проведенном для уточненных параметров нейтронных резонансов

[06M], получены значения $D_0=(30 \pm 4)$ кэВ, $D_1=(4.03 \pm 0.29)$ кэВ и $S_0=(0.76 \pm 0.31) 10^{-4}$, $S_1=(0.45 \pm 0.07) 10^{-4}$, которые с учетом погрешностей не сильно отличаются от результатов анализа параметров резонансов, содержащихся в ENDF/B-VI. Отношение $D_0/D_1 > 7.5$ отличается примерно в два раза от статистической оценки отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, и это может указывать на достаточно сильную зависимость плотности нейтронных резонансов от четности, но также может оказаться следствием более значительного пропуска резонансов, чем полученного в рамках представленного выше анализа.

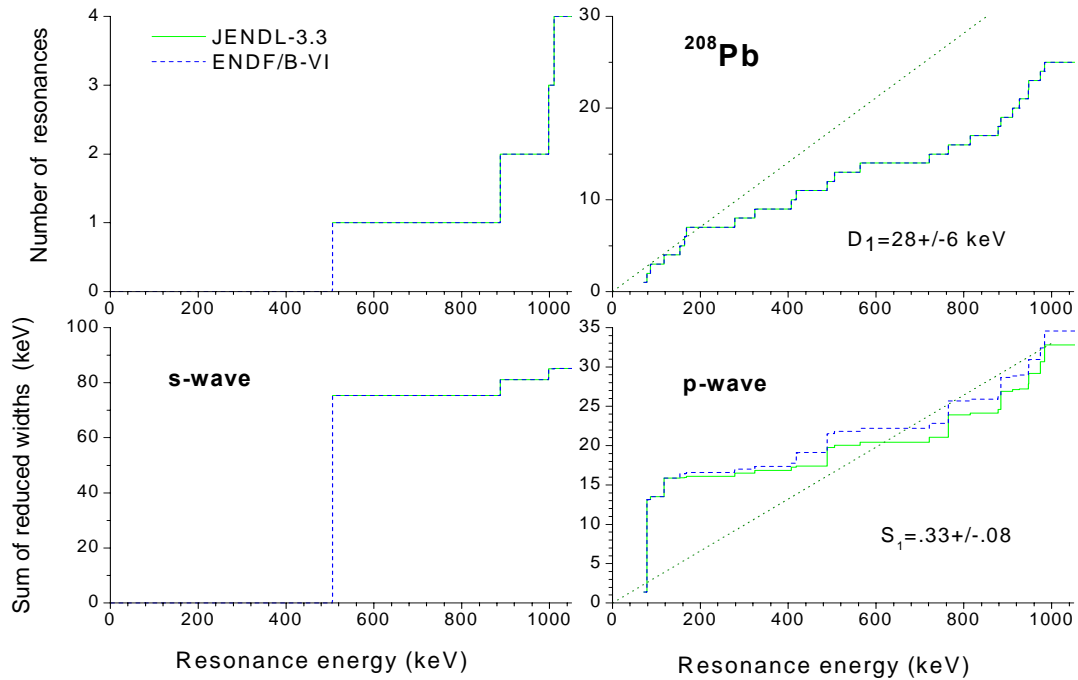


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI (=JEFF-3.1)

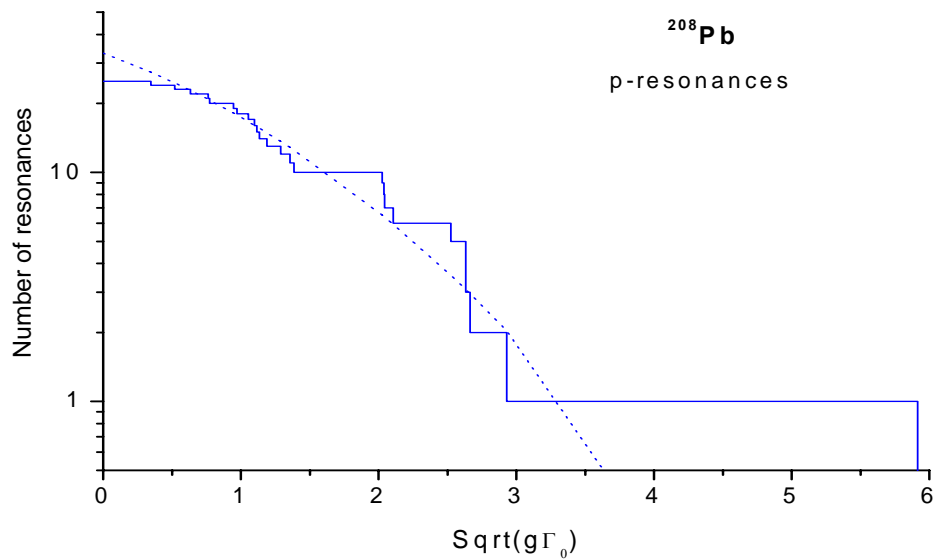


Рис. 3. Анализ пропуска p-резонансов

На рис. 4 показаны оценки полных нейтронных сечений для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для полных нейтронных

сечений некоторые разногласия в нейтронных ширинах резонансов не выходят за пределы погрешностей экспериментальных данных. Данные последних измерений [99Н] получены с достаточно плохим энергетическим разрешением, и для энергий ниже 1 МэВ их не следует принимать во внимание.

На рис. 5 показаны оценки сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для сечений захвата имеются только экспериментальные данные, усредненные по большому числу резонансов. Разногласия оценок в этом случае проявляются, главным образом, в межрезонансных минимумах, и они обусловлены большими различиями средних радиационных ширин, принятых в оценках.

Учитывая неоправданно низкие значения радиационных ширин многих резонансов в JENDL-3.3, при формировании БРОНД-3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII) предпочтение было отдано оценке ENDF/B-VI. Однако, параметры многих резонансов в этой оценке существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов [06М], поэтому в ближайшем будущем необходимо дополнительное уточнение оценки резонансных параметров.

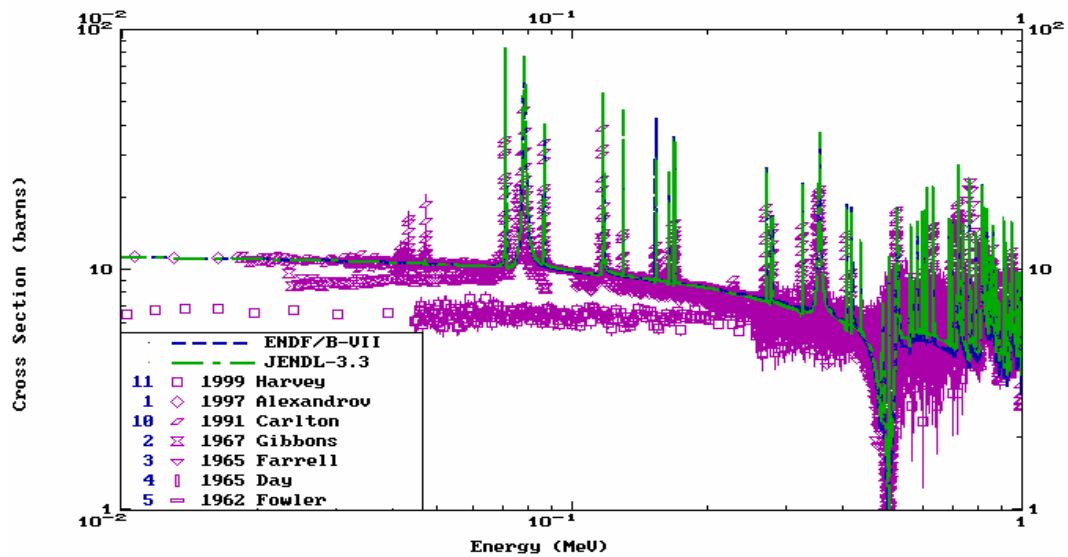


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

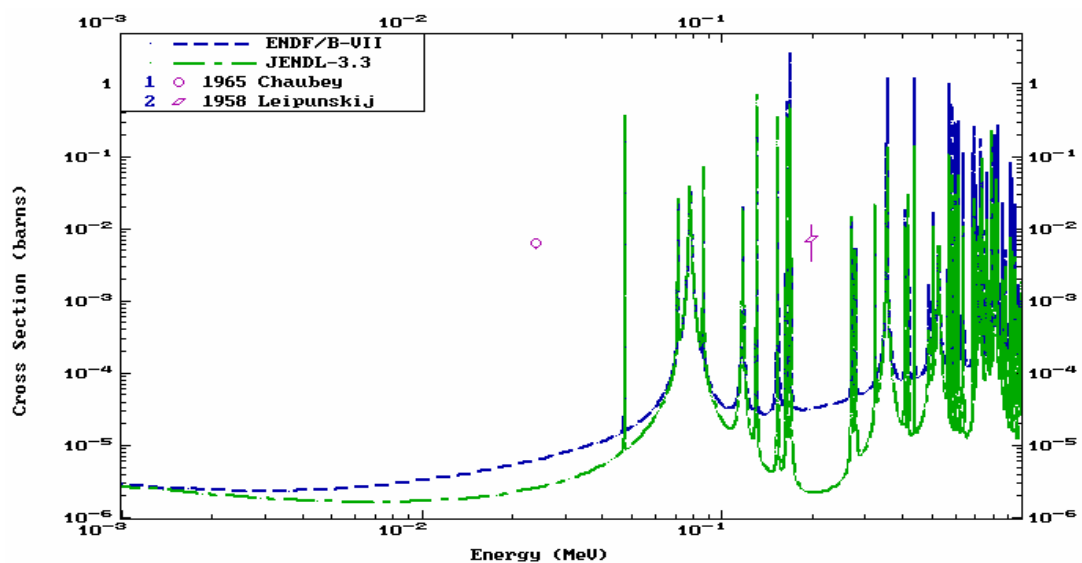


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

- 84M S.Mughabghab, Neutron Cross Sections, Academic Press, NY,1984, part B.
 86H D.J. Horen et al., Phys. Rev. C34, 420 (1986).
 91C R.F.Carlton et al., BAP, 36, 1349 (1991).
 97A Yu.A.Alexandrov et al., Report JINR-E3-213, 1997.
 97M P.Mutti et all.,DS Thesis, Gent Univ., 1997.
 99H J.A.Harvey, Exfor 13732 (1999)
 06M S.Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY,2006.

3. Нейтронные сечения вне резонансной области

3.1. Полные сечения (MT=1)

На рис. 6 показаны имеющиеся оценки полных нейтронных сечений в области энергий выше 1 МэВ в сравнении с экспериментальными данными. В дополнение к рассмотренным выше оценкам JENDL-3.3 и JEFF-3.1 (=ENDF/B-VII) вне резонансной области для всех сечений имеется также оценка БРОНД-3. Гросс-структура резонансоподобных флуктуаций полных сечений, проявляющаяся в данных [87H, 91C, 99H], в несколько усредненной форме принята в качестве оценки полных сечений ENDF/B-VI в

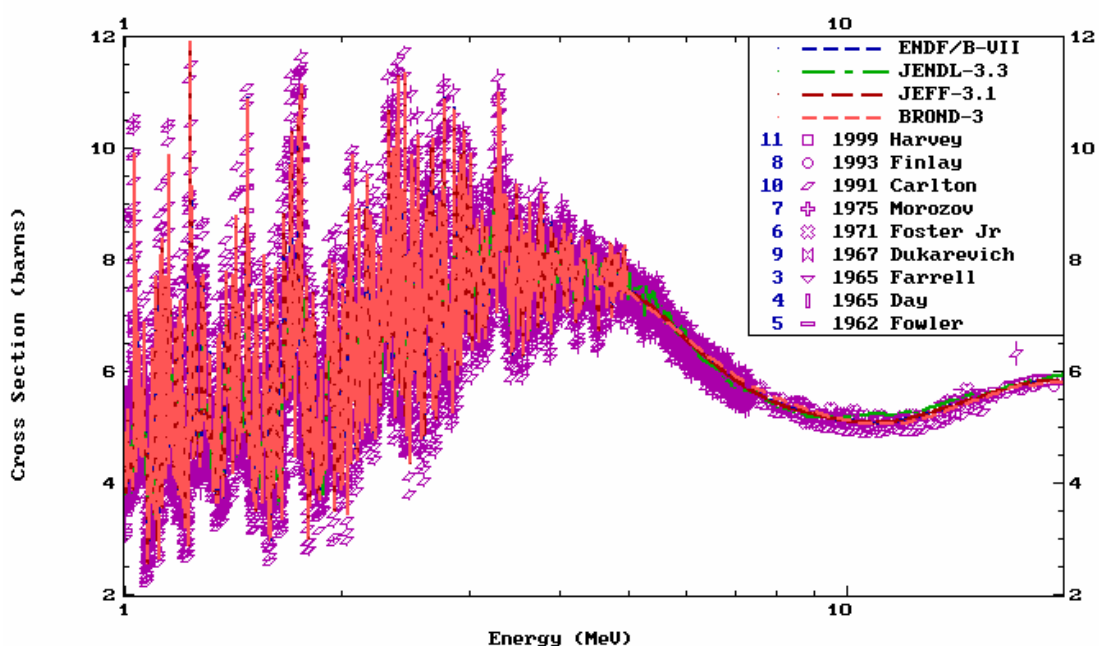


Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений ^{208}Pb в диапазоне энергий выше 1 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

области энергий до 5 МэВ, и эта оценка сохранена с незначительными изменениями в JENDL-3.3, БРОНД-3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII).

Во всех библиотеках выше 5 МэВ приняты в качестве оценки полных сечений результаты расчетов по оптической модели. Такие расчеты хорошо согласуются между собой, несмотря на имеющиеся разногласия параметров оптического потенциала. Эти разногласия потенциалов оказываются существенными в области более низких энергий,

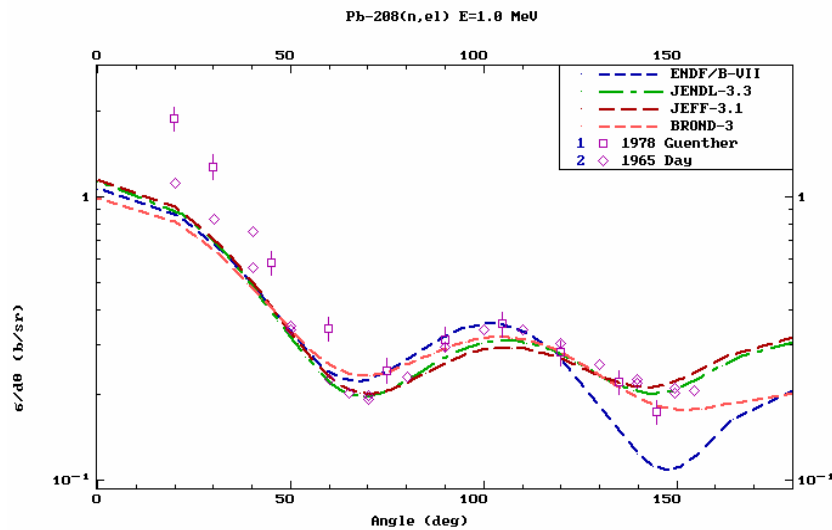
когда оптическая модель используется для расчетов сечений неупругого взаимодействия нейтронов.

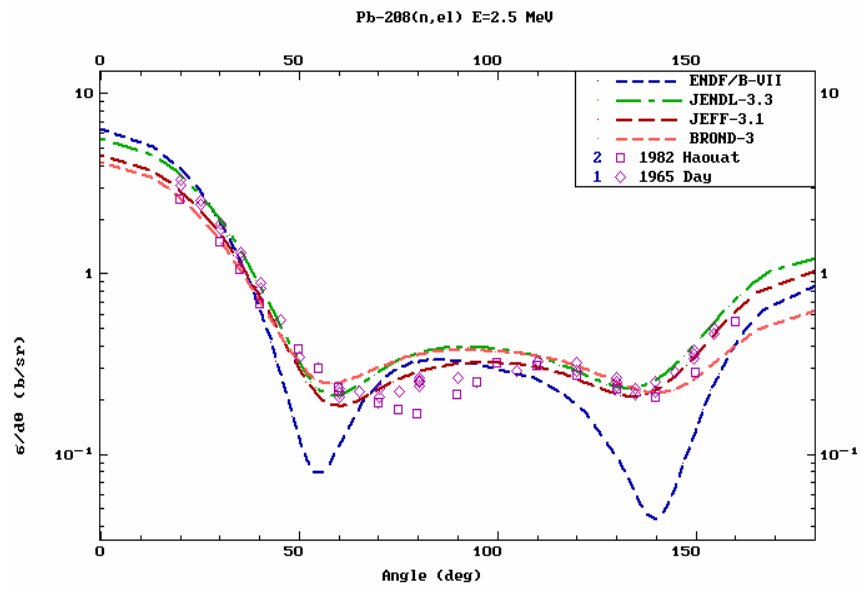
3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. Прямых экспериментальных данных по интегральным сечениям упругого рассеяния нейтронов для изотопа ^{208}Pb нет. В этих условиях следует ожидать, что более корректной для сечений упругого рассеяния будет оценка, в которой достигнуто лучшее описание данных по угловым распределениям упруго рассеянных нейтронов.

На рис. 7 для трех энергий нейтронов показано сравнение оценок угловых распределений с соответствующими экспериментальными данными. Аналогичные результаты имеются также для ряда промежуточных и более высоких энергий. Анализ угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, как правило, осуществляется на основе расчетов по оптической модели, и все оценки хорошо описывают имеющиеся экспериментальные данные.

Следует отметить, что при энергиях ниже 2.5 МэВ в экспериментальных данных важную роль играет рассмотренная выше промежуточная структура нейтронных сечений. В этих условиях сравнение оценок с экспериментальными данными будет оправданно только при усреднении данных по широкому энергетическому интервалу, соответствующему условиям справедливости оптической модели.





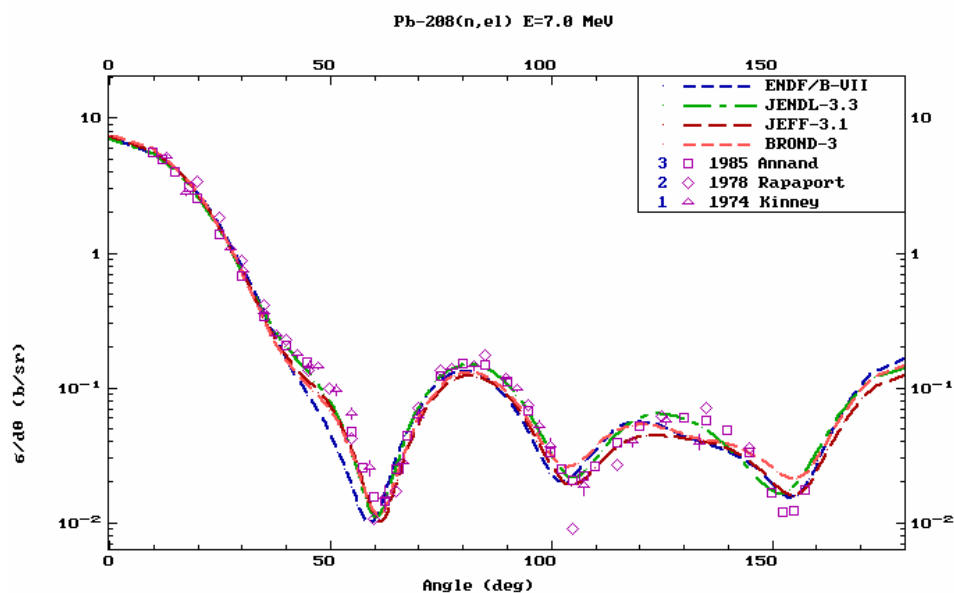


Рис. 7. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов при энергиях 1.0, 2.5 и 7.0 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

3.3 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

В JENDL-3.3 рассматривался спектр 8 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в ENDF/B-VI учитывалось 39 уровней, в БРОНД-3 – 40 уровней и в JEFF-3.1 – 20 уровней. Так как при увеличении числа уровней соответствующим образом изменяется порог статистического описания уровней, так называемый континуум уровней, то различия в числе рассматриваемых уровней не должно заметно отражаться на оценках полного (интегрального) сечения неупругого рассеяния.

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 8 вместе с имеющимися экспериментальными данными. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели, а также различием моделей расчета вкладов прямых и предравновесных процессов, существенных для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Все оценки дают весьма близкие значения сечений неупругого рассеяния, и лишь несколько странной кажется энергетическая зависимость оценки JENDL-3.3 в области энергий нейтронов от 5 до 8 МэВ.

Недостатки оценки JENDL-3.3 проявляются более явно при рассмотрении функций возбуждения дискретных уровней ядра-мишени. Для первого уровня оценки соответствующих сечений приведены на рис. 9 в сравнении с экспериментальными данными. Оценка JENDL-3.3 в области максимума существенно превышает другие оценки, и это обусловлено, по-видимому, слишком малой глубиной мнимой части оптического потенциала, использованного в соответствующих расчетах. В то же время, после максимума функция возбуждения JENDL-3.3 убывает значительно более резко, чем все другие оценки. Аналогичный дефект проявляется в JENDL-3.3 также для функций возбуждения более высоких уровней.

Асимметрия угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов, обусловленная прямыми и предравновесными процессами, учтена в большинатве оценок для рассеяния

на низколежащих коллективных уровнях, а также для нейтронного рассеяния в континууме.

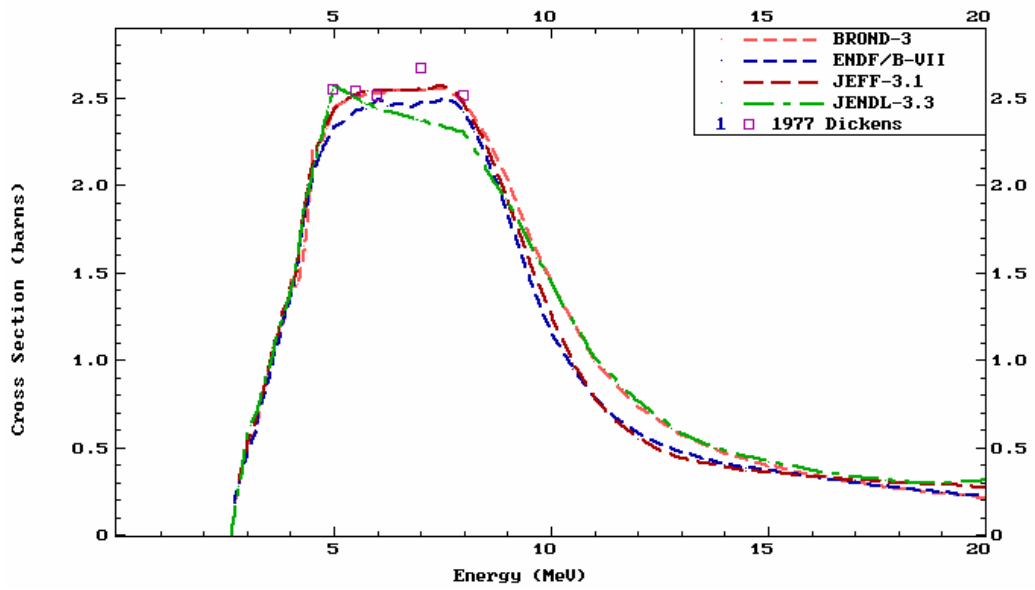


Рис. 8. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для ^{208}Pb в сравнении с экспериментальными данными

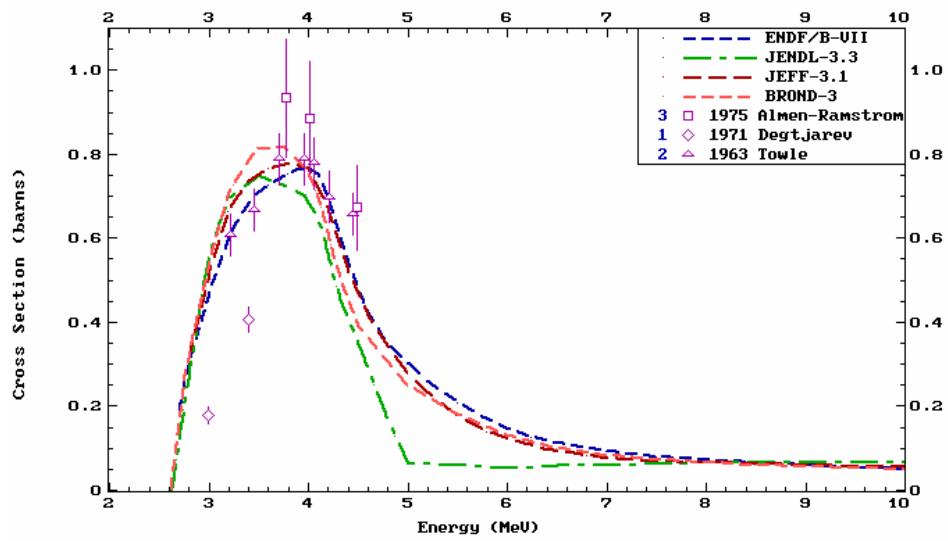


Рис. 9. Оценки сечения неупругого рассеяния нейтронов на первом уровне ^{208}Pb в сравнении с экспериментальными данными

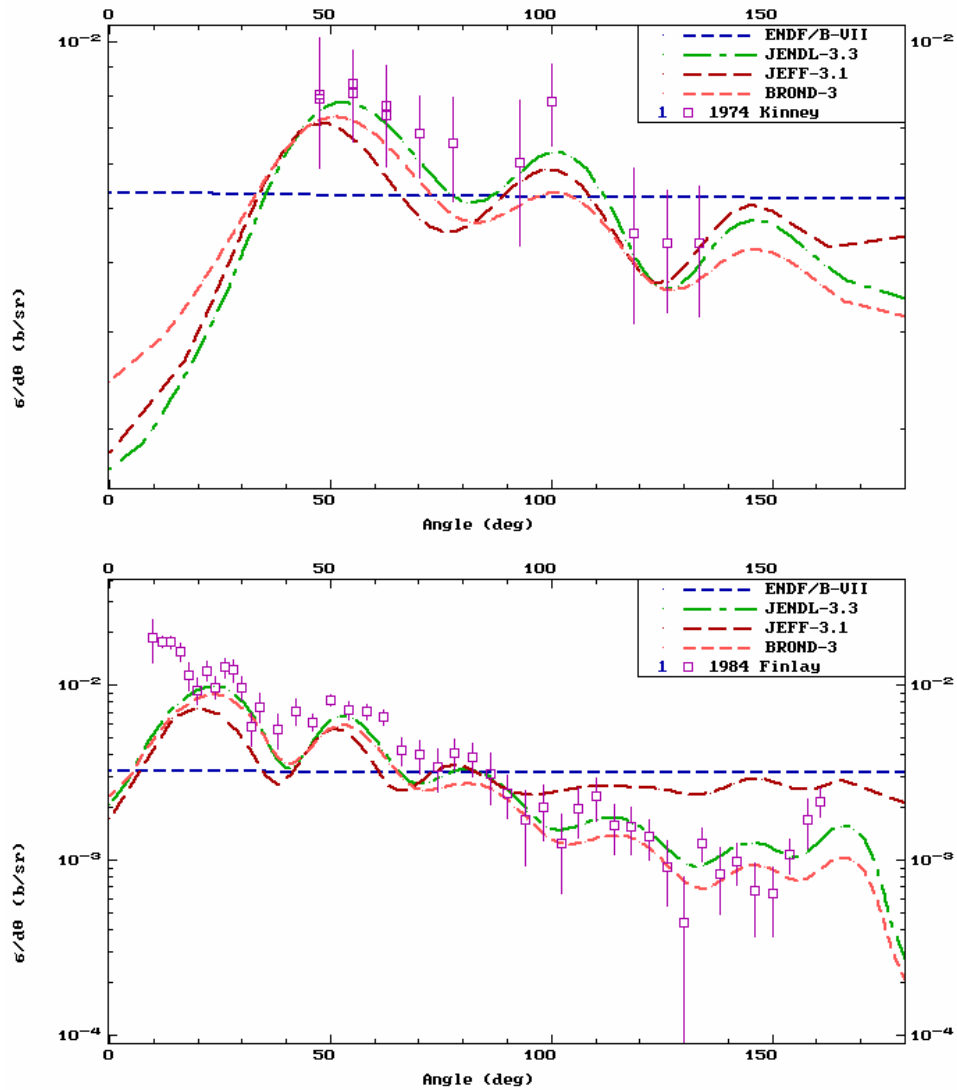


Рис. 10. Оценки угловых распределений рассеянных нейтронов первом 3^- уровне ^{208}Pb при начальных энергиях нейтронов 8.5 (вверху) и 20.0 МэВ (внизу) в сравнении с экспериментальными данными

Экспериментальных данных об угловых распределениях неупруго рассеянных нейтронов сравнительно мало. На рис. 10 показаны имеющиеся данные для энергий нейтронов 8.5 и 20.0 МэВ в сравнении с оценками. В ENDF/B-VII, также как в более ранней версии ENDF/B-VI, неупругое рассеяние на дискретных уровнях принято изотропным. Остальные оценки достаточно корректно воспроизводят наблюдаемые угловые распределения. Следует заметить, что превышение экспериментальных точек над оценками при малых углах, проявляющееся для энергии нейтронов 20 МэВ, по-видимому, связано с погрешностями выделения вклада упругого рассеяния нейтронов. Многочисленные данные по неупругому рассеянию протонов на нижайших коллективных уровнях свинца убедительно демонстрируют справедливость теоретических расчетов в описании формы угловых распределений для малых углов.

3.4 Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

На рис. 11 показаны оценки сечений радиационного захвата нейтронов вне резонансной области. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и они достаточно хорошо описывают не многочисленные экспериментальные данные. Данные при энергиях выше 7 МэВ подтверждают энергетическую зависимость, предсказанную моделью прямого-коллективного захвата нейтронов, и аналогичные

значения сечений захвата следует ожидать для всех тяжелых ядер при энергиях нейтронов выше 12-14 МэВ [86Б].

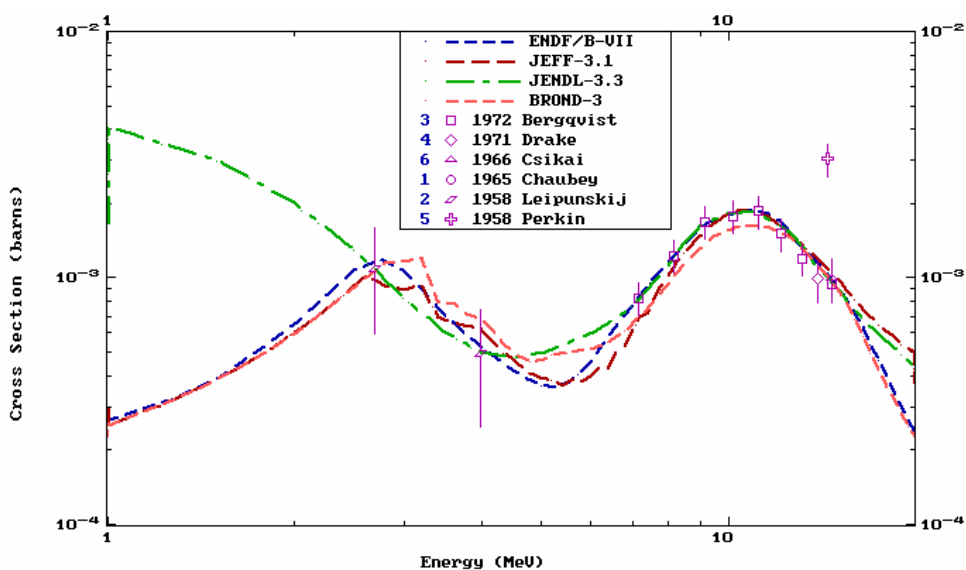


Рис.11. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов выше 1 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

3.5 Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT=17)

Экспериментальные данные о сечении реакции (n,2n) показаны на рис. 12 совместно с различными оценками. Оценку JENDL-3.3, несомненно, следует признать сильно завышенной. БРОНД-3 значительно лучше согласуется с экспериментальными данными [80F], и это обусловлено, в первую очередь, более корректным учетом в соответствующих расчетах оболочечных эффектов в плотности уровней ядер, влияние которых в изотопах свинца является достаточно сильным [98I]. Расхождение между данными двух измерений [80F] и [93S] дополнительной экспериментальной проверки, но в целом данные работы [80F] кажутся предпочтительными, так как аналогичные значения сечений реакции (n,2n) получены для всех изотопа свинца, и в случае ^{204}Pb значение сечения в максимуме 2.0-2.2 б подтверждено в нескольких независимых измерениях. Подобное «универсальное» значение сечения в максимуме подтверждается также результатами систематических теоретических расчетов.

Экспериментальных данных о сечении реакций (n,3n) нет. Сечение этой реакции существенно только выше 15 МэВ, и оно примерно соответствует разности сечения реакции (n,2n) в максимуме и в любой из вышележащих энергетических точек. При энергии 20 МэВ сечение достигает значений 0.90 – 1.15 барна. Для согласованности, для сечения реакции (n,3n) следует принимать ту же оценку, что выбрана предпочтительной для (n,2n).

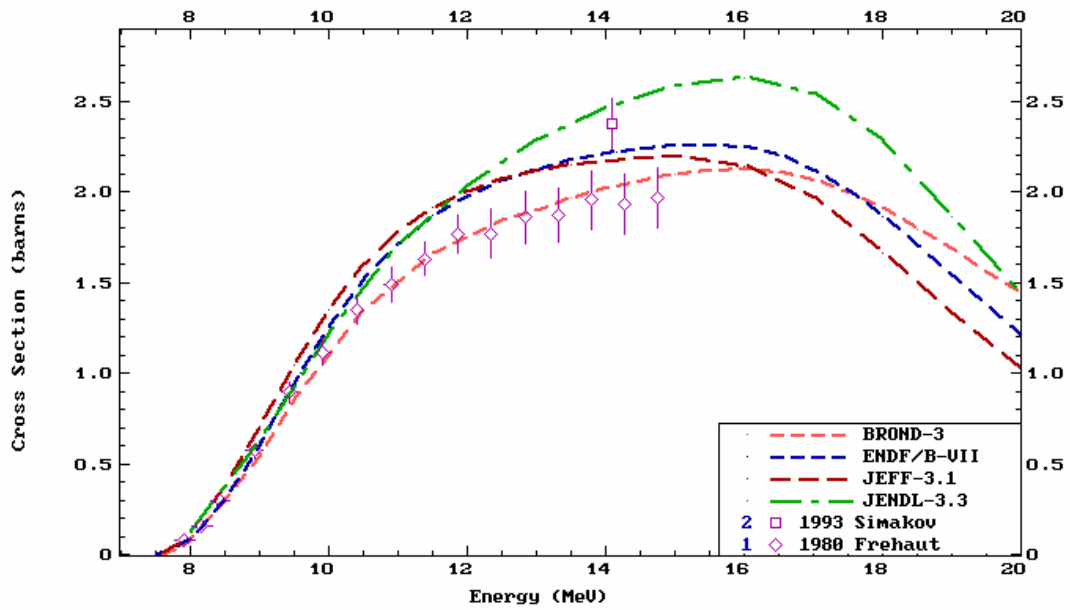


Рис.12. Оценки сечений реакции $^{208}\text{Pb}(n,2n)$ в сравнении с экспериментальными данными

3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц

Реакции с вылетом заряженных частиц включены во все рассматриваемые оценки. Эти реакции существенны только в области энергий нейтронов выше 15 МэВ, и максимальное сечение таких реакций не превышает 30 мбарн. На рис. 12 показаны оценки сечений реакций (n,p) и (n, α), соответствующие наиболее высоким выходам заряженных частиц, вместе с имеющимися экспериментальными данными. Для реакции (n,p) результаты недавних измерений хорошо согласуются с оценками JENDL-3.3 и JEFF-3.1 и несколько хуже с БРОНД-3 и ENDF/B-VII. Для реакции (n, α) экспериментальные данные весьма противоречивы, и вряд ли можно предпочесть какую-либо из оценок без дополнительной информации.

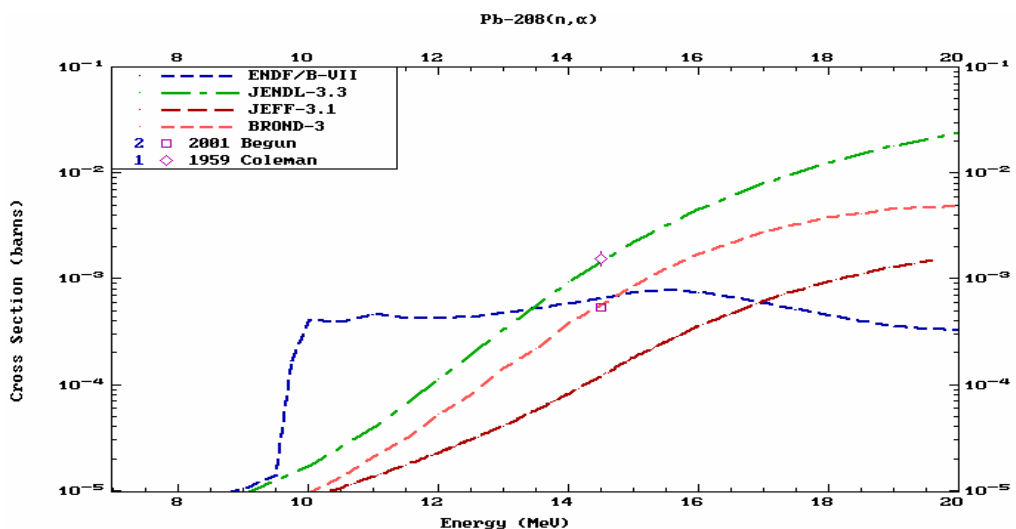


Рис.13. Оценки сечения реакции $^{207}\text{Pb}(n,p)$

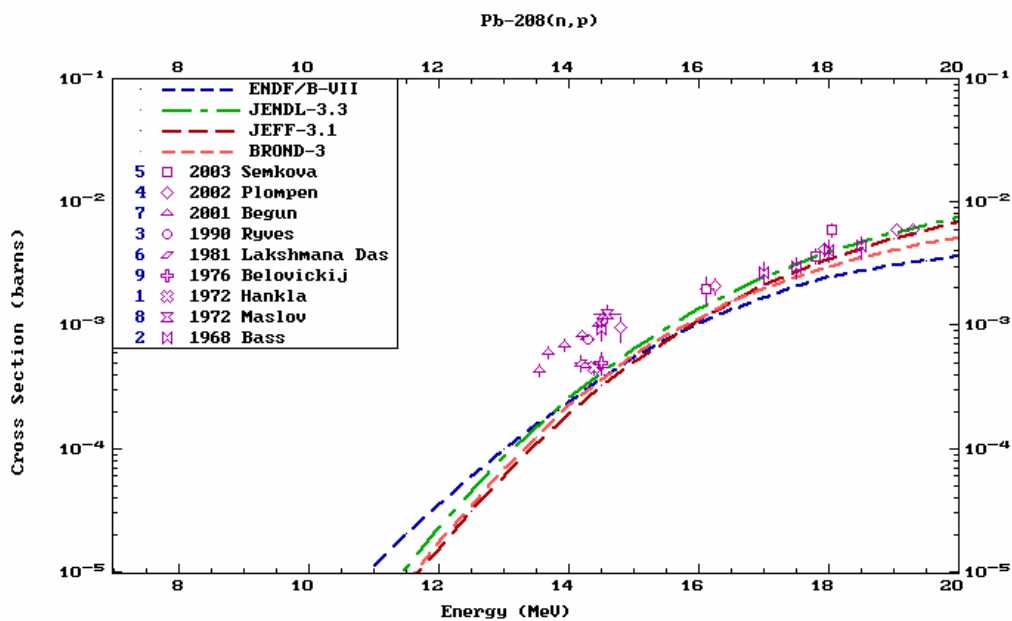


Рис.14. Оценки сечения реакции $^{207}\text{Pb}(n,\alpha)$

4. Образование гамма-лучей

Оценки сечений образования и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата и неупругого взаимодействия нейтронов, содержатся во всех оценках. В БРОНД-3 дискретные гамма-переходы между низколежащими уровнями ядер мишени рассмотрены лишь ниже порога континуума, и для более высоких энергий представлены интегральные выходы гамма-лучей. В остальных оценках содержится более детальная информация как о спектрах дискретных гамма-лучей, так и непрерывных спектрах гамма-излучения для всех каналов неупругого взаимодействия нейтронов с рассматриваемым изотопом.

Угловые распределения всех типов гамма-излучения приняты изотропными во всех оценках.

5. Заключение

На основе проведенного рассмотрения оценок и имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что оценку JENDL-3.3, по-видимому, нельзя признать удовлетворительной ни для сечений неупругого рассеяния нейтронов, ни для (n,xn) реакций. С другой стороны оценки БРОНД-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений. Это свидетельствует об их достаточно высокой надежности и согласованности. Оценка JEFF-3.1 содержит много компонент ENDF/B-VI, и ее преимущества перед другими оценками связано лишь с более детальным представлением спектров гамма-лучей и заряженных частиц. Для библиотеки РОСФОНД в настоящее время целесообразно принять оценку JEFF-3.1.

Следует однако отметить, что параметры большинства резонансов в этой оценке, также как в других оценках, существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов, поэтому в ближайшем будущем необходимо дополнительное уточнение оценки нейтронных сечений в области разрешенных резонансов, включая уточнение сечений для тепловых нейтронов. Такие уточнения вносятся в БРОНД-3, но эта работа будет завершена лишь в 2007 г.

Автор заключения

А.В.Игнатюк

82.8. Свинец-210

Радиоактивен. ($T_{1/2}=22.3$ г). Испытывает бета-распад в висмут-210 (вероятность альфа-распада в ртуть-206 – $1.9 \cdot 10^{-8}\%$). Висмут испытывает бета-распад в полоний-210 ($T_{1/2}=5.013$ д), а тот – альфа-распад в свинец-206 ($T_{1/2}=138.38$ д).

В реакторах может образовываться только в ничтожных количествах за цепочки реакций $^{208}\text{Pb}(n,\gamma)^{209}\text{Pb}(T_{1/2}=3.253 \text{ ч.}) (n,\gamma)^{210}\text{Pb}$ и как один из продуктов распада ^{233}U .

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений, основанная на теоретических расчетах и систематиках экспериментальных данных для других ядер.

Оцененные сечения захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл равны 0.5 барна и 0.2 барна.

Экспериментальных данных для проверки оцененных данных в EXFORe нет

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка нейтронных сечений из EAF-2003. Парциальные сечения реакций, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

83. ВИСМУТ

В РОСФОНД включены данные для шести радиоактивных и для единственного стабильного изотопа висмута.

83.1. Висмут-205

Радиоактивен ($T_{1/2}=15.31$ д). Испытывая позитронный распад или захват орбитального электрона превращается в свинец-205, который, в свою очередь путем захвата орбитального электрона медленно ($T_{1/2}=1.5 \cdot 10^5$ лет) распадается в таллий-205.

Заключение

В РОСФОНД вносятся оцененные данные о нейтронных сечениях из EAF-2003

Автор заключения

Николаев М.Н.

83.2. Висмут-206

Радиоактивен ($T_{1/2}=6.24$ д). Испытывая позитронный распад или захват орбитального электрона превращается в свинец-206,.

Заключение

В РОСФОНД вносятся оцененные данные о нейтронных сечениях из EAF-2003

Автор заключения

Николаев М.Н.

83.3. Висмут-207

Радиоактивен ($T_{1/2}=31.55$ лет). Испытывая позитронный распад или захват орбитального электрона превращается в свинец-207

Заключение

В РОСФОНД вносятся оцененные данные о нейтронных сечениях из EAF-2003

Автор заключения

Николаев М.Н.

83.4. Висмут-208

Радиоактивен ($T_{1/2}=2.68 \cdot 10^5$ лет). Испытывая , захват орбитального электрона превращается в свинец-208

Заключение

В РОСФОНД вносятся оцененные данные о нейтронных сечениях из EAF-2003

Автор заключения

Николаев М.Н.

83.5. Висмут-209

Содержание в естественной смеси -100%

В современных библиотеках , содержатся следующие оценки нейтронных данных для висмута:

ФОНД-2.2 и БРОНД-2 – оценка Блохина и др.. 1990.

ENDF/B-VII – оценка M.Chadwick, P.Young,A.Smith, 1998.

JENDL-3.3 – оценка N. Yamamoto, A. Zukeran, 1998.

LEFF-3.1 – оценка A.J.Koning, 2004

Наряду с перечисленными выше здесь рассматривается также оценка, выполненная для БРОНД-3.

1. Общие характеристики

1.1. $Z=83$ -зарядовое число;

1.2. $A=209$ (атомный вес);

1.3. $AWR =207.185$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);

1.4. Стабилен, содержание в естественной смеси 100%;

1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт |
|-----|-----------------|----------|---------------------------|--------------|
| 04 | n, n' | -0.8964 | | Bi-209 |
| 16 | (n,2n) | -7.4594 | 7.4954 | Bi-208 |
| 17 | (n,3n) | -14.3458 | 14.4150 | Bi-207 |
| 22 | (n,n α) | 3.1391 | 0 | Tl-205 |
| 28 | (n,np) | -3.7990 | 3.8173 | Pb-208 |
| 102 | n, γ | 4.6047 | 0 | Bi-210 |
| 103 | (n,p) | 0.1384 | 0 | Pb-209 |
| 107 | (n, α) | 9.6425 | 0 | Tl-206 |

2. Нейтронные сечения в резонансной области (MF=2).

2.1. Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мугабгом и др. [81M]. В JENDL-3.3 верхняя граница резонансной области принята равной 200 кэВ, радиус потенциального рассеяния выбран равным $R_0 = 6.68$ фм и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами приняты средние значения ширин 70 мэВ для s-резонансов и 34 мэВ для p-резонансов [81M]. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в CENDL-3 и также в JEFF-3.1. Следует отметить, что параметры p-резонансов известны только до энергии 100 кэВ, поэтому в JENDL-3.3 в диапазоне энергий от 100 до 200 кэВ вклад p-резонансов совершенно не представлен, и этот пропуск резонансов никак не учитывается ни в полных сечениях, ни в сечениях радиационного захвата нейтронов.

В ENDF/B-VI верхняя граница резонансной области принята равной 100 кэВ, что устраняет проблему пропуска большого числа p-резонансов. Параметры резонансов выбраны, в основном, в соответствии с компиляцией [81M], но радиус потенциального рассеяния несколько уменьшен до $R_0 = 6.6792$ фм и для резонансов с неизвестными радиационными ширинами приняты средние значения ширин 56.56 мэВ для s-резонансов и 39.646 мэВ для p-резонансов. Эти изменения отражают уточнения радиационных ширин, достигнутые на основе недавних измерений сечений радиационного захвата резонансных нейтронов на спектрометре в Гилле [97M].

Радиационные ширины резонансов, использованные в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, показаны на рис. 1. Можно видеть, что основные различия оценок связаны с уточнением средних радиационных ширин резонансов.

Рассчитанные сечения для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице совместно с имеющимися экспериментальными данными [84M, 03M]:

| оценка | JENDL-3.3 | ENDF/B-VI | Эксперимент |
|---|-----------|-----------|----------------|
| полное | 9.331 б | 9.334 б | |
| упругое | 9.298 б | 9.300 б | |
| захвата | 0.034 б | 0.034 б | .0338±0.0007 б |
| резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ: | 0.199 б | 0.206 б | .190±.020 б |

Обе оценки в пределах погрешности согласуются с экспериментальными значениями сечения радиационного захвата и резонансного интеграла захвата нейтронов.

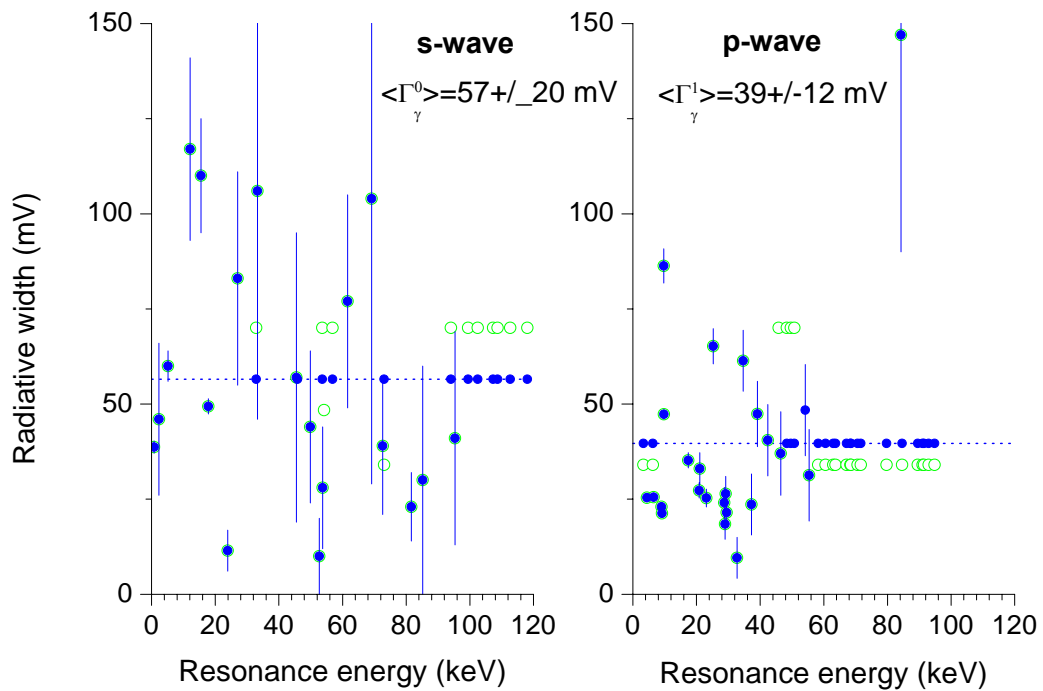


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3 (кружки) и ENDF/B-VII (сплошные точки), пунктиром показаны средние значения ширин, которые приняты для резонансов с неизвестными ширинами в ENDF/B-VII

2.2. Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0 = (3.8 \pm .3) \text{ кэВ}$, и для p-резонансов – $D_1 = (.20 \pm .05) \text{ кэВ}$. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (.57 \pm 0.08) 10^{-4}$ и $S_1 = (.24 \pm .04) 10^{-4}$.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов обычно привлекается анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Так как число резонансов и нейтронные силовые функции в рассматриваемых оценках очень близки (рис. 2), то мы ограничимся только анализом ENDF/B-VI резонансов, результаты которого представлены на рис. 3. Из анализа ширин можно сделать вывод, что из представленного набора s-резонансов 3 резонанса, по-видимому, следовало бы отнести к p-волне, тогда как в наборе p-резонансов пропущено около 40 слабых резонансов. Такие слабые резонансы не искажают приведенный выше анализ нейтронных силовых функций, но они заметно изменяют оценки среднего расстояния между резонансами.

Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, равны $D_0 = (4.45 \pm .35) \text{ кэВ}$ и $D_1 = (1.05 \pm .10) \text{ кэВ}$. Отношение $D_0 / D_1 = 4.2 \pm 0.8$ несколько превышает статистическую оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равную ~ 3 , но ввиду почти двукратного пропуска p-резонансов приведенная выше погрешность определения D_1 может оказаться несколько заниженной.

На рис. 4 и 5 оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для области разрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Имеется большое количество данных по полным нейтронным сечениям, и экспериментальные данные хорошо согласуются с обеими оценками. По сечениям радиационного захвата

экспериментальных данных значительно меньше, но при соответствующем усреднении резонансов оценки согласуются с результатами измерений средних сечений радиационного захвата нейтронов.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на примерно одинаковое описание основных нейтронных сечений в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI, набор параметров разрешенных нейтронных резонансов в **ENDF/B-VII** является **предпочтительным**, так как в нем нет пропуска большого числа р-резонансов в диапазоне энергий от 1 до 2 кэВ. Было признано **целесообразно включить этот набор в БРОНД-3 без каких-либо изменений**.

84M S.Mughabghab, Neutron Cross Sections, Academic Press, New York, 1984, part B.

97M P.Mutti, DrSci Thesis, Gent University, 1997.

03M S.Mughabghab, Report INDC(NDS)-440, IAEA, Vienna, 2003.

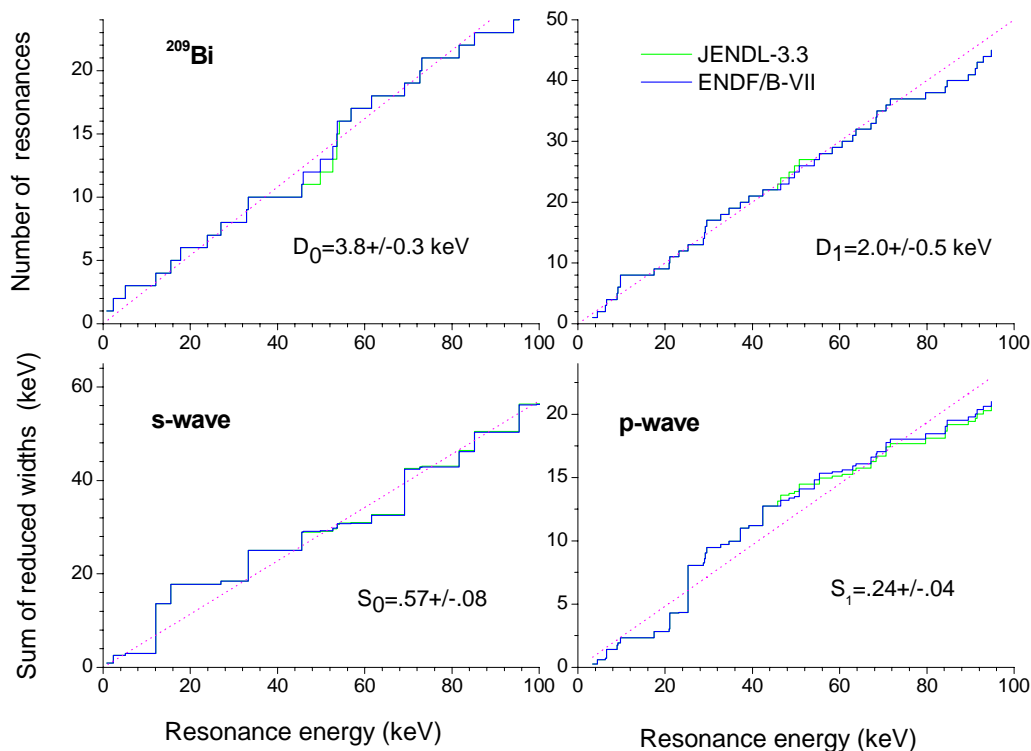


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII

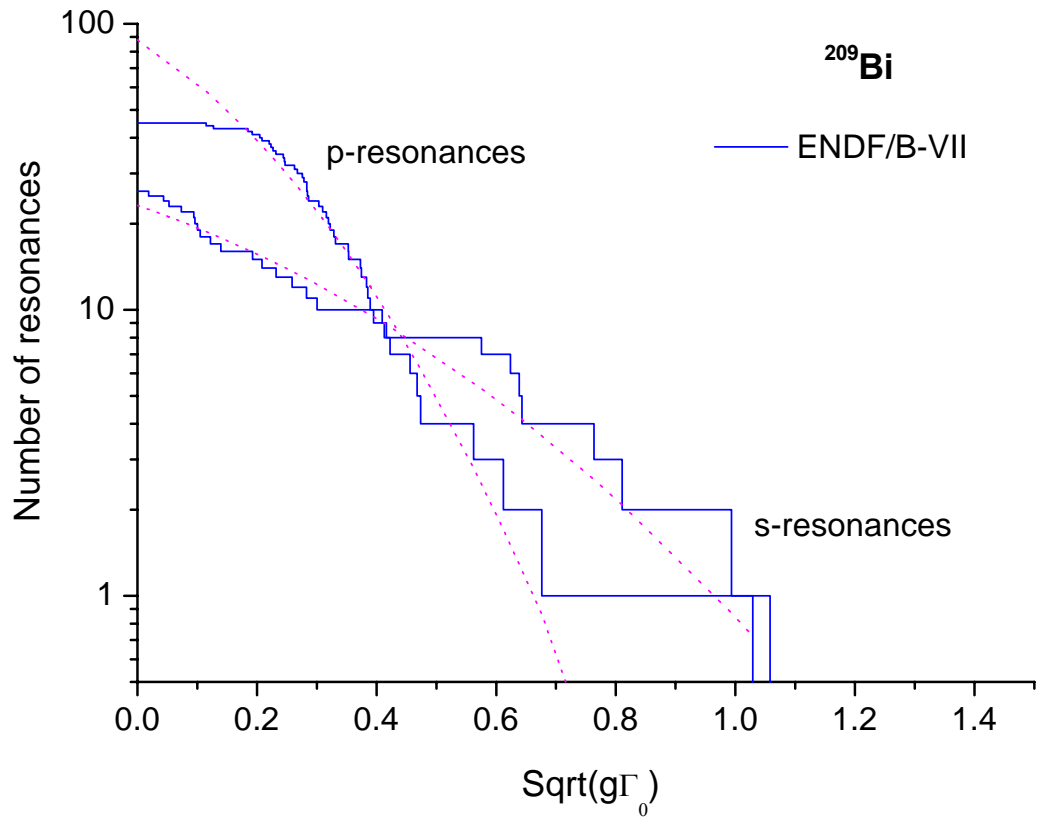


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов

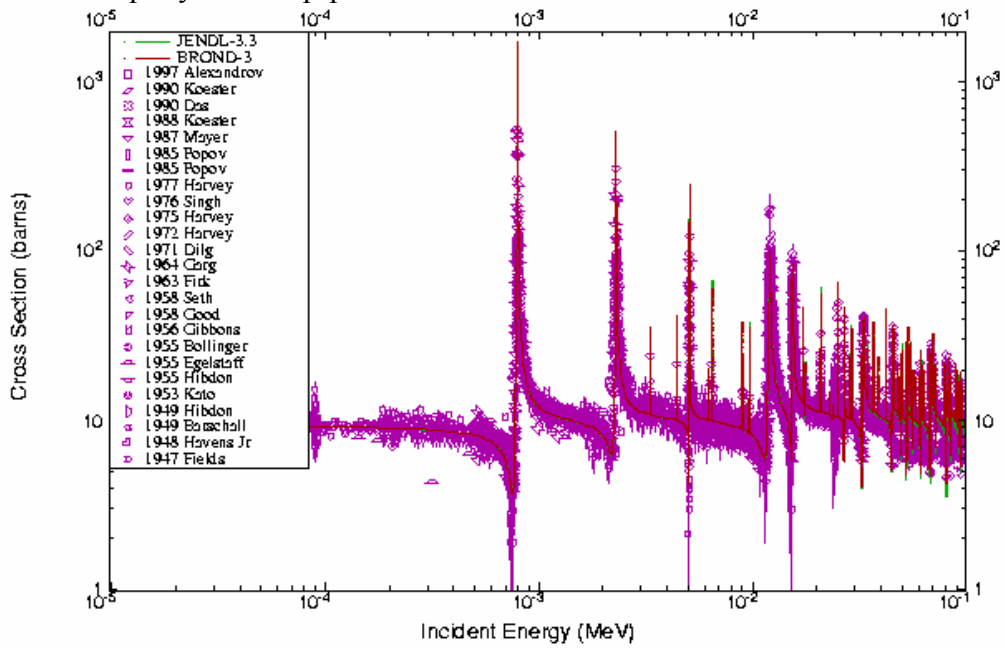


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

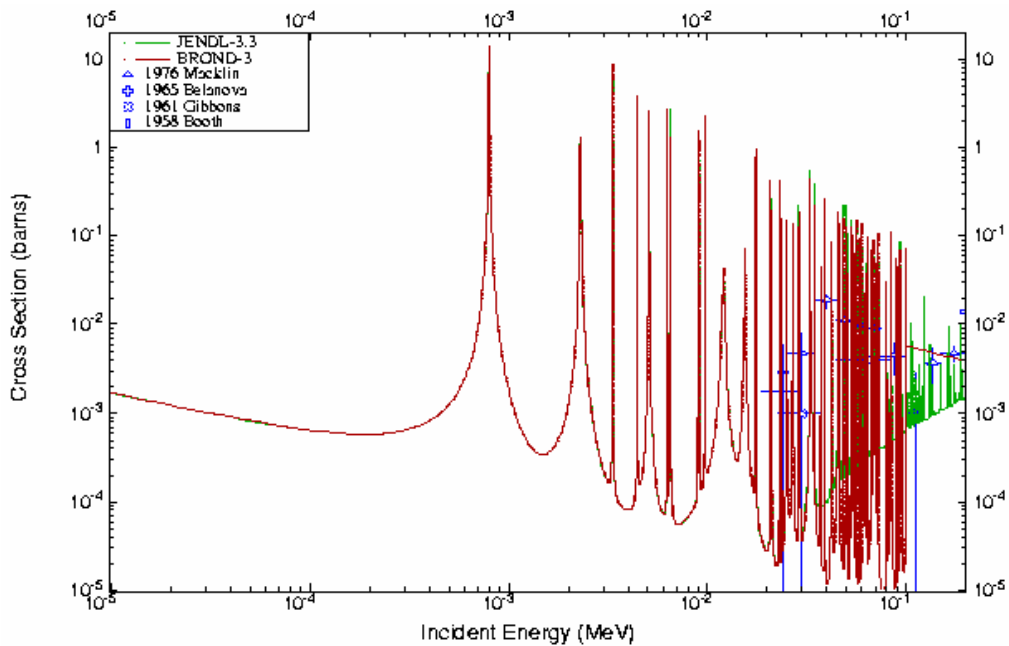


Рис. 5. Оценка сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области

3.1. Полное сечение (MT=1)

Резонансная структура полных нейтронных сечений сохраняется и выше области разрешенных резонансов вплоть до энергии 1.5 – 2.0 МэВ. На рис. 6 показана совокупность имеющихся экспериментальных данных в сравнении с оценками. Оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI получены непосредственным усреднением экспериментальных данных, и разногласия между ними сравнительно малы во всем рассматриваемом диапазоне энергий нейтронов. В BROND-3 принята оценка ENDF/B-VI. Результаты измерений [90D], выполненных с более высоким разрешением, чем предыдущие измерения, демонстрируют более сильные резонансные эффекты, чем учитываемые в оценках, но детальное воспроизведение наблюдаемых структур остается пока за рамками оценок.

Выше 2 МэВ резонансная структура сечений практически исчезает, и оценки обычно проводятся на основе оптической модели с параметрами потенциала, определенными из условий оптимального описания совокупности экспериментальных данных. Имеющиеся данные приведены на рис.7 совместно с оценками полных нейтронных сечений. Расхождения между данными различных авторов достаточно велики, также как погрешности многих данных. Поэтому при выборе параметров оптической модели в различных оценках проводится определенный отбор экспериментальных данных, который непосредственно отражается в разногласиях оценок. Оценка BROND-3 ориентировалась, в значительной степени, на результаты наиболее поздних измерений полных нейтронных сечений для ^{209}Bi [90D, 93F], а также на результаты недавних прецизионных измерений полных сечений для естественной смеси изотопов свинца [01A]. Так как различия полных сечений близлежащих ядер достаточно малы, то такая оценка полных сечений может оказаться более надежной, чем непосредственное описание более ранних экспериментальных данных для ^{209}Bi , погрешности которых существенно выше погрешностей, полученных в недавних измерениях. В оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI основное внимание также уделялось описанию данных [90D, 93F], поэтому согласие всех оценок в диапазоне энергий от 2 до 20 МэВ оказывается очень хорошим.

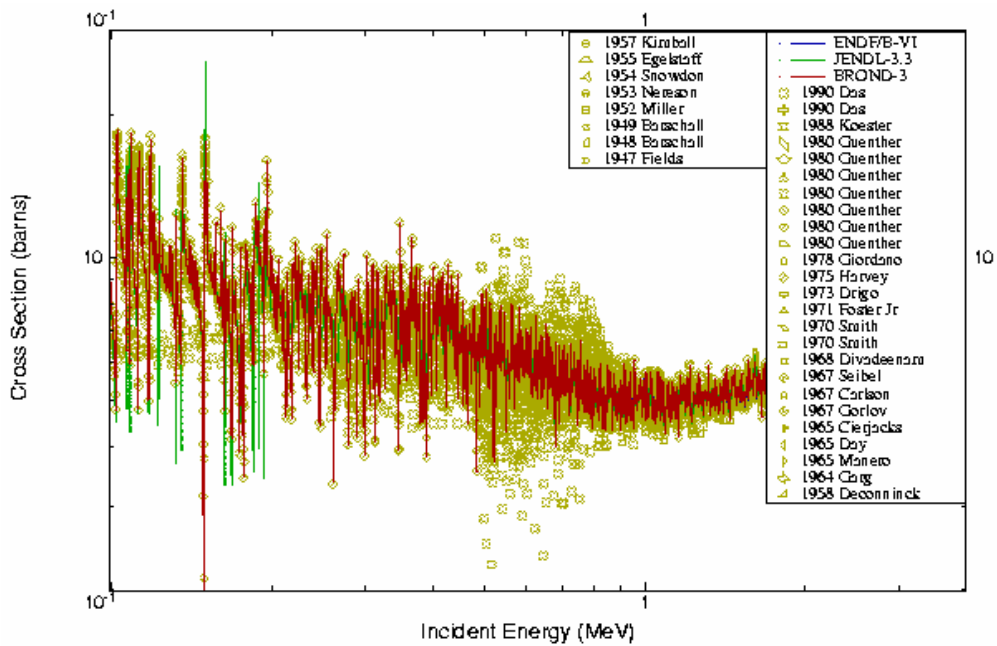


Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений ^{209}Bi в диапазоне энергий от 0.1 до 2 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

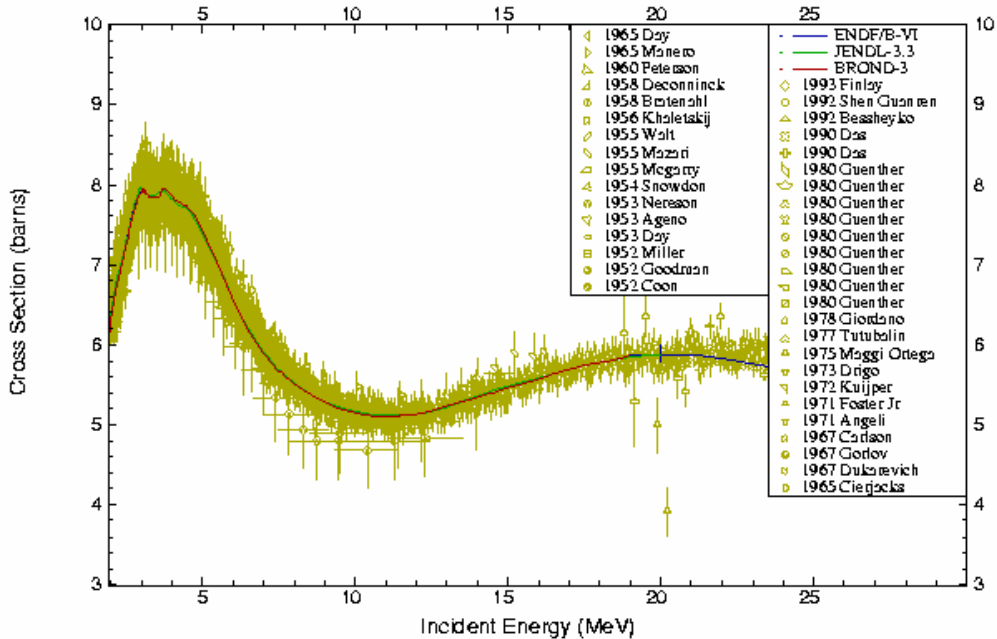


Рис. 7. Оценки полных нейтронных сечений ^{209}Bi в диапазоне энергий от 2 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов (MT=2)

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 8 показано сравнение различных оценок интегральных сечений упругого рассеяния. Следует отметить, что большинство измерений упругого рассеяния нейтронов выполнено со сравнительно

низким энергетическим разрешением? и в таких данных не проявляется резонансная структура сечений. Во всем диапазоне энергий оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VI почти совпадают, но оценка JENDL-3.3 заметно отличается при энергиях нейтронов выше 7 МэВ. Как будет показано ниже, эти расхождения обусловлены разногласиями оценок сечений неупругого рассеяния и (n,2n)-реакций.

Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов существенно не отличаются. На рис. 9 и 10 показано сравнение оценок с имеющимися экспериментальными данными для наиболее характерных энергий налетающих нейтронов. Отобраны энергии, для которых имеются результаты нескольких независимых измерений. Оценки достаточно хорошо воспроизводят основные закономерности изменения угловых распределений при увеличении энергии нейтронов, и расхождения оценок с экспериментом оказываются примерно такими же, как разногласия экспериментальных данных. Оценки ENDF/B-VI и БРОНД-3 оказываются весьма близкими практически во всем диапазоне энергий нейтронов до 20 МэВ, тогда как оценка JENDL-3.3 описывает угловые распределения нейтронов несколько хуже в дифракционных минимумах и для обратных углов.

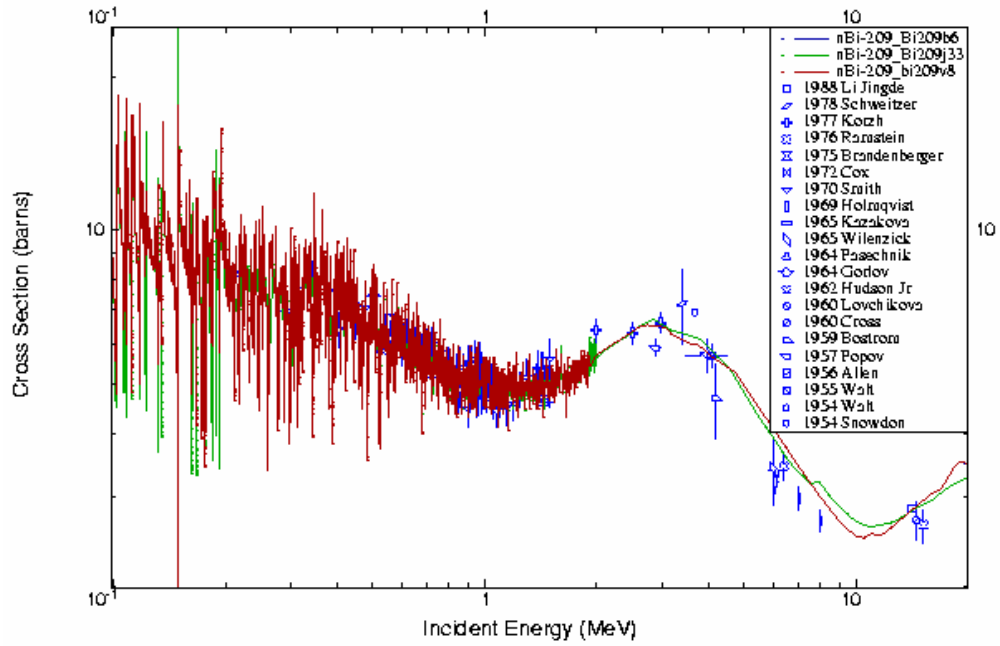


Рис. 8. Оценки интегральных сечений упругого рассеяния нейтронов для ^{209}Bi в диапазоне энергий от 0.1 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

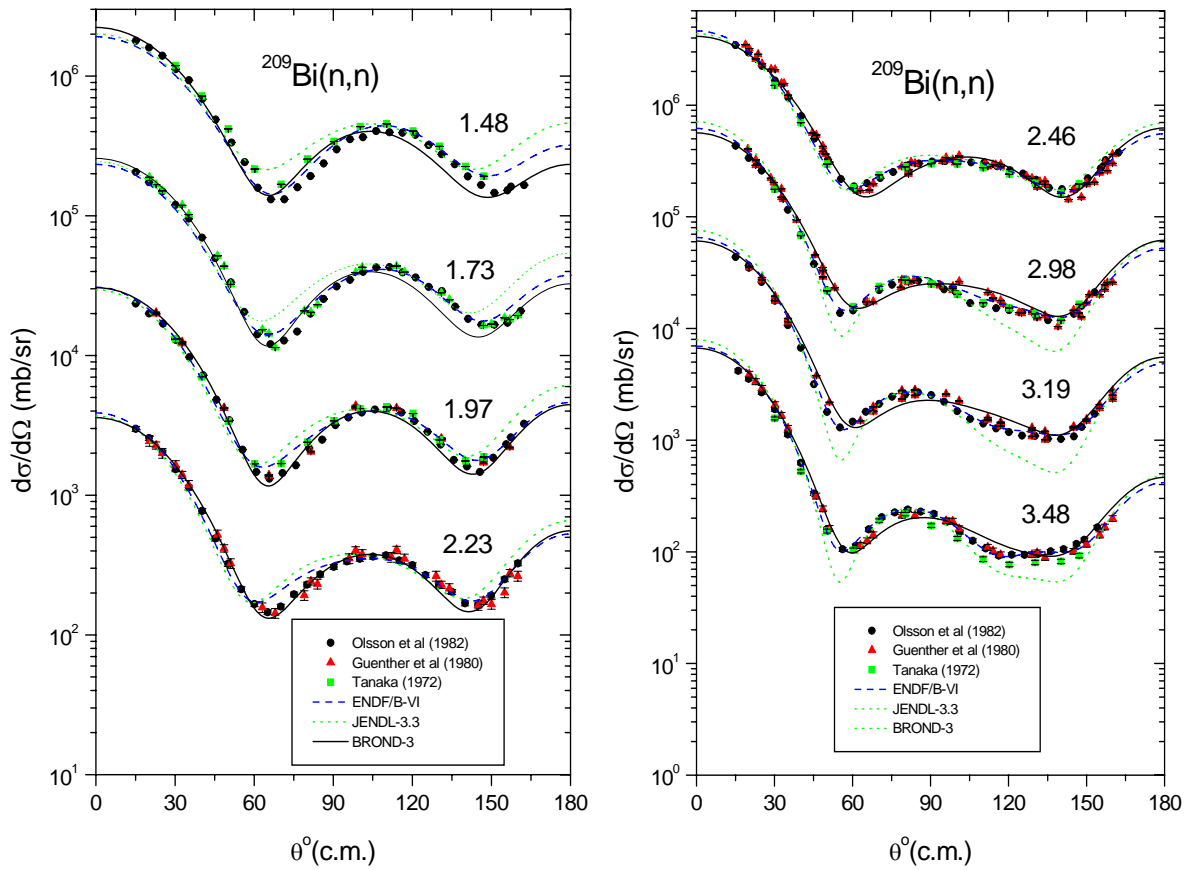


Рис. 9. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов в диапазоне энергий от 1.48 до 3.48 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

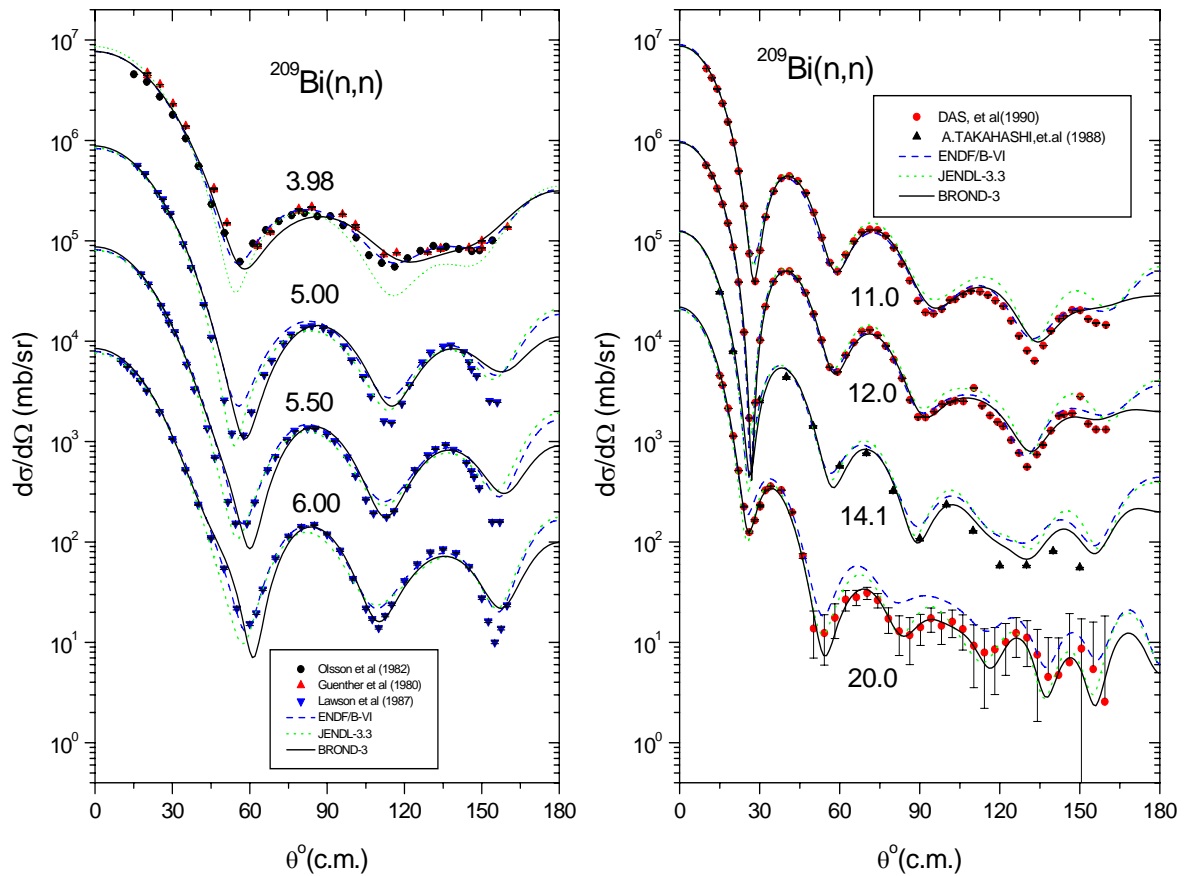


Рис. 10. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов в диапазоне энергий от 3.98 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

3.3 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведены схема низколежащих уровней ^{209}Bi , взятая из таблицы изотопов [98F] и использованная в оценке БРОНД-3:

| № | Энергия (МэВ) | спин-четность |
|----|---------------|---------------|
| gs | 0.0 | 9/2 - |
| 1 | 0.89600 | 7/2 - |
| 2 | 1.60900 | 13.2 + |
| 3 | 2.44300 | 1/2 + |
| 4 | 2.49282 | 3/2 + |
| 5 | 2.56416 | 9/2 + |
| 6 | 2.58307 | 7/2 + |
| 7 | 2.59990 | 11/2 + |
| 8 | 2.60092 | 13/2 + |
| 9 | 2.61731 | 5/2 + |
| 10 | 2.74105 | 15/2 + |
| 11 | 2.76661 | 3/2 + |
| 12 | 2.82619 | 5/2 - |
| 13 | 2.84514 | 1/2 + |
| 14 | 2.91657 | 1/2 + |
| 15 | 2.95587 | 3/2 + |

| | | |
|----|---------|--------|
| 16 | 2.98679 | 19/2 + |
| 17 | 3.03887 | 5/2 + |
| 18 | 3.09008 | 7/2 + |
| 19 | 3.11954 | 3/2 - |
| 20 | 3.13296 | 11/2 + |
| 21 | 3.13577 | 15/2 + |
| 22 | 3.15283 | 9/2 + |
| 23 | 3.15406 | 17/2 + |
| 24 | 3.15928 | 3/2 + |
| 25 | 3.16907 | 13/2 + |
| 26 | 3.19744 | 1/2 + |
| 27 | 3.21184 | 17/2 + |
| 28 | 3.22158 | 5/2 + |
| 29 | 3.26960 | 1/2 + |
| 30 | 3.31115 | 7/2 + |
| 31 | 3.35470 | 3/2 + |
| 32 | 3.36201 | 7/2 + |
| 33 | 3.37816 | 9/2 + |
| 34 | 3.39430 | 15/2 + |
| 35 | 3.40621 | 13/2 + |
| 36 | 3.45030 | 7/2 + |
| 37 | 3.46412 | 11/2 + |
| 38 | 3.46767 | 19/2 + |
| 39 | 3.48692 | 19/2 + |
| 40 | 3.49000 | 1/2 + |

В оценке JENDL-3.3 использовались такая же схема уровней, но рассмотрение ограничивалось 12 нижайшими уровнями, тогда как расчеты в ENDF/B-VI ограничивались 19 уровнями.

На рис. 11 показаны оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов на ^{209}Bi в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Различия в числе дискретных уровней, учитываемых в различных оценках, оказывает сравнительно малое влияние на расчеты интегрального сечения неупругого рассеяния, так как недостающие уровни обычно моделируются соответствующим непрерывным спектром. Поэтому основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели. Оценки JENDL-3.3 и БРОНД-3 достаточно близки в области максимума сечений неупругого рассеяния, тогда как ENDF/B-VI кажется несколько заниженной. Все оценки согласуются между собой и с экспериментальными данными при энергиях нейтронов выше 14 МэВ, где доминирующий вклад вносят прямые и предравновесные процессы.

На рис. 12 и 13 показаны оценки сечений возбуждения первых двух уровней ^{209}Bi при неупругом рассеянии нейтронов. Большая часть экспериментальных данных получена путем измерения выходов гамма-лучей, сопутствующих неупругому рассеянию нейтронов, и погрешности такой методики, связанные с дешифровкой спектра гамма-лучей при возбуждении многих уровней, достаточно велики. В частности, сечения выхода дискретных гамма-линий в измерениях Лашука и Садохина [94L] были получены относительно сечения неупругого рассеяния 1.2 МэВ нейтронов на ^{56}Fe с возбуждением 846 кэВ уровня. Для этой мониторинговой реакции при энергии налетающих нейтронов $E_n=1.2$ МэВ авторы эксперимента брали значение сечения 530 мб. Согласно новой оценке, выполненной Проняевым и др. [05P] сечение возбуждения 846 кэВ уровня в реакции $^{56}\text{Fe}(n,\gamma)^{56}\text{Fe}$ при $E_n=1.2$ МэВ равно 461.56 мб. Поэтому результаты измерений [94L] по сечениям выхода гамма-квантов нами были откорректированы на фактор $f=0.87087$.

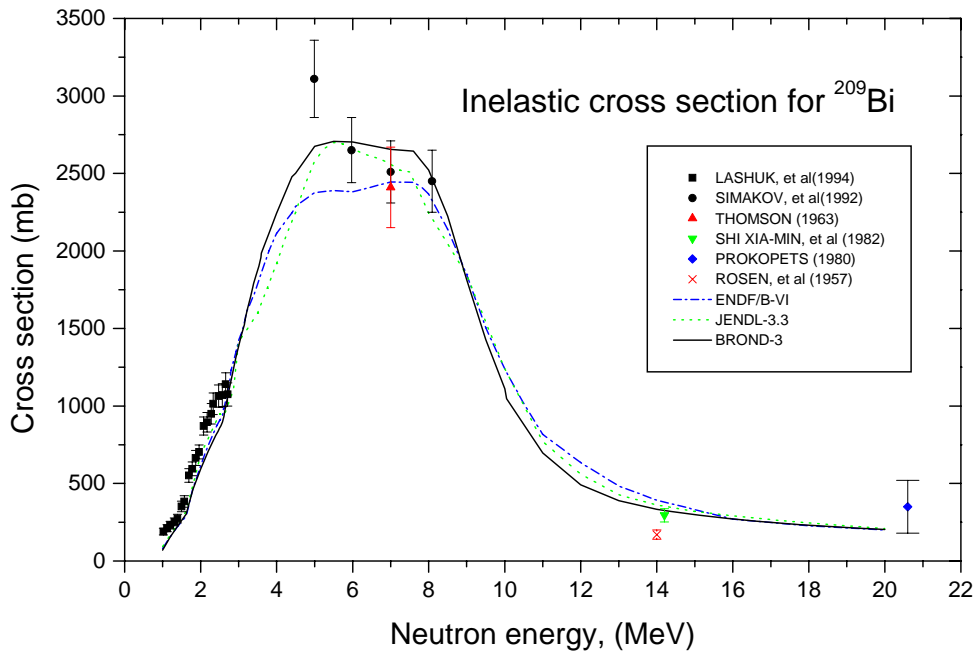


Рис. 11. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для ^{209}Bi в сравнении с экспериментальными данными

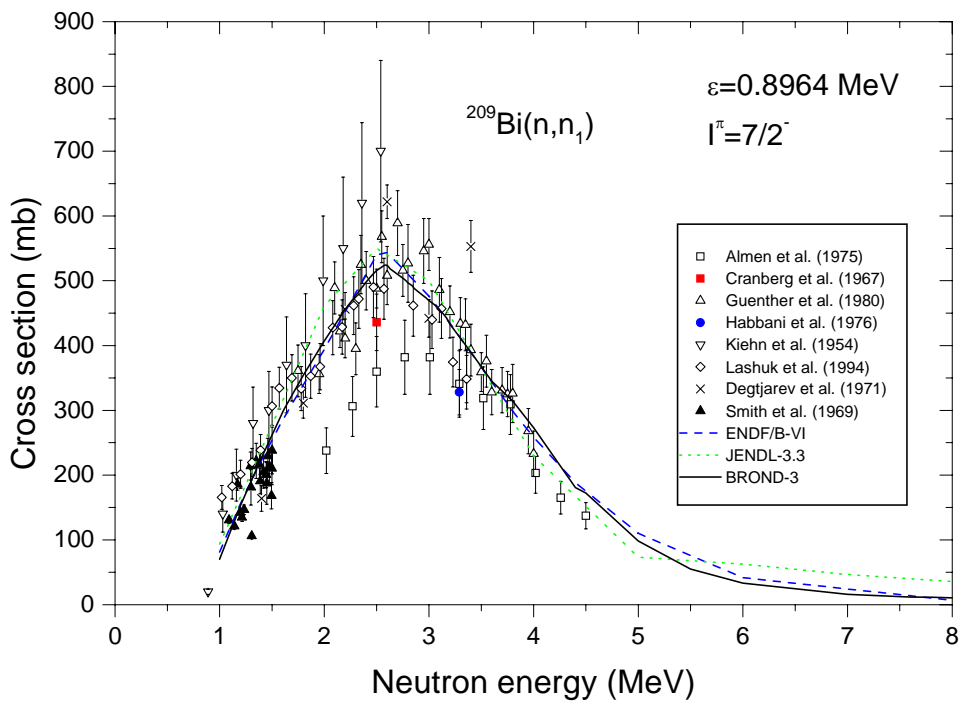


Рис. 12. Оценки сечения неупругого рассеяния нейтронов на первом уровне ^{209}Bi в сравнении с экспериментальными данными

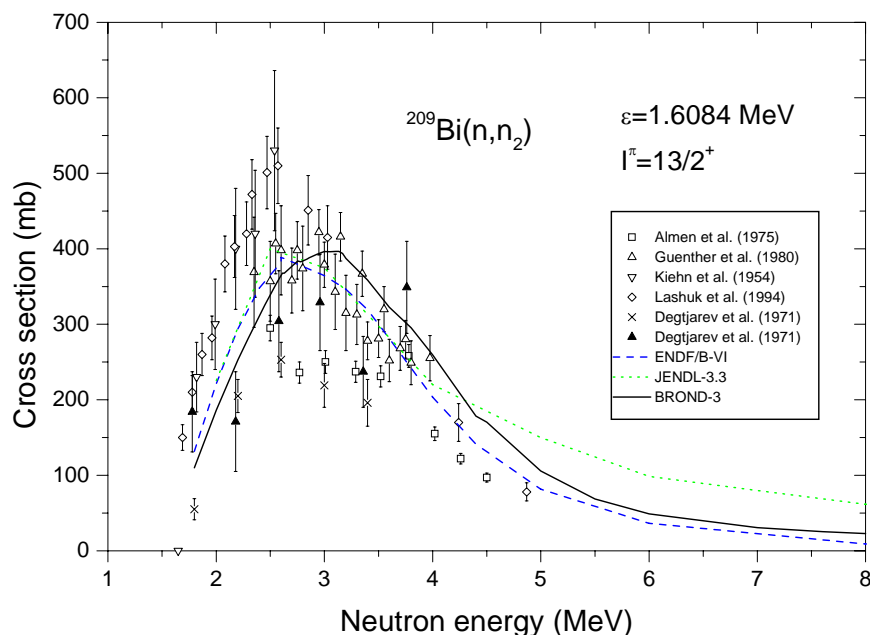


Рис. 13. Оценки сечения неупругого рассеяния нейтронов на втором уровне ^{209}Bi в сравнении с экспериментальными данными

Согласие всех оценок с экспериментальными данными по функциям возбуждения низколежащих уровней кажется удовлетворительным, учитывая достаточно большие погрешности и разногласия имеющихся данных.

На рис. 14 показаны оценки угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов с энергиями от 1.45 до 3.55 МэВ на первых двух уровнях ^{209}Bi . Анизотропия угловых распределений для рассматриваемых энергий сравнительно невелика, и все оценки достаточно хорошо согласуются между собой и с экспериментальными данными. Превышение экспериментальных данных над оценками для уровня $13/2^+$ при энергии нейтронов 2.02 МэВ обусловлено расхождениями в описании околопорогового поведения функций возбуждения этого уровня во всех оценках (см. рис.13). В настоящее время не видно, каким образом такое расхождение с экспериментом может быть устранено в теоретических расчетах. По-видимому, для разрешения имеющихся противоречий необходимы новые, более надежные измерения функций возбуждения данного уровня при околопороговых энергиях налетающих нейтронов.

3.4 Сечение реакции радиационного захвата (MT=102)

На рис. 15 показаны оценки сечений радиационного захвата нейтронов на ^{209}Bi в сравнении с экспериментальными данными [35-38]. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия в области энергий выше 1 МэВ обусловлено различными приближениями в описании конкуренции радиационных и нейтронных ширин на начальных этапах каскада гамма-переходов. В области энергий выше 8-10 МэВ во всех оценках рассматривается механизм прямого-коллективного захвата нейтронов, но приближения, привлекаемые для его описания, различаются весьма значительно.

В области энергий нейтронов ниже 1 МэВ оценки ENDF/B-VI и БРОНД-3 практически совпадают и хорошо согласуются с экспериментальными данными [37]. При энергиях налетающих нейтронов выше 1 МэВ БРОНД-3 хорошо описывает экспериментальные данные [86M], тогда как оценка ENDF/B-VI проходит значительно ниже этих данных.

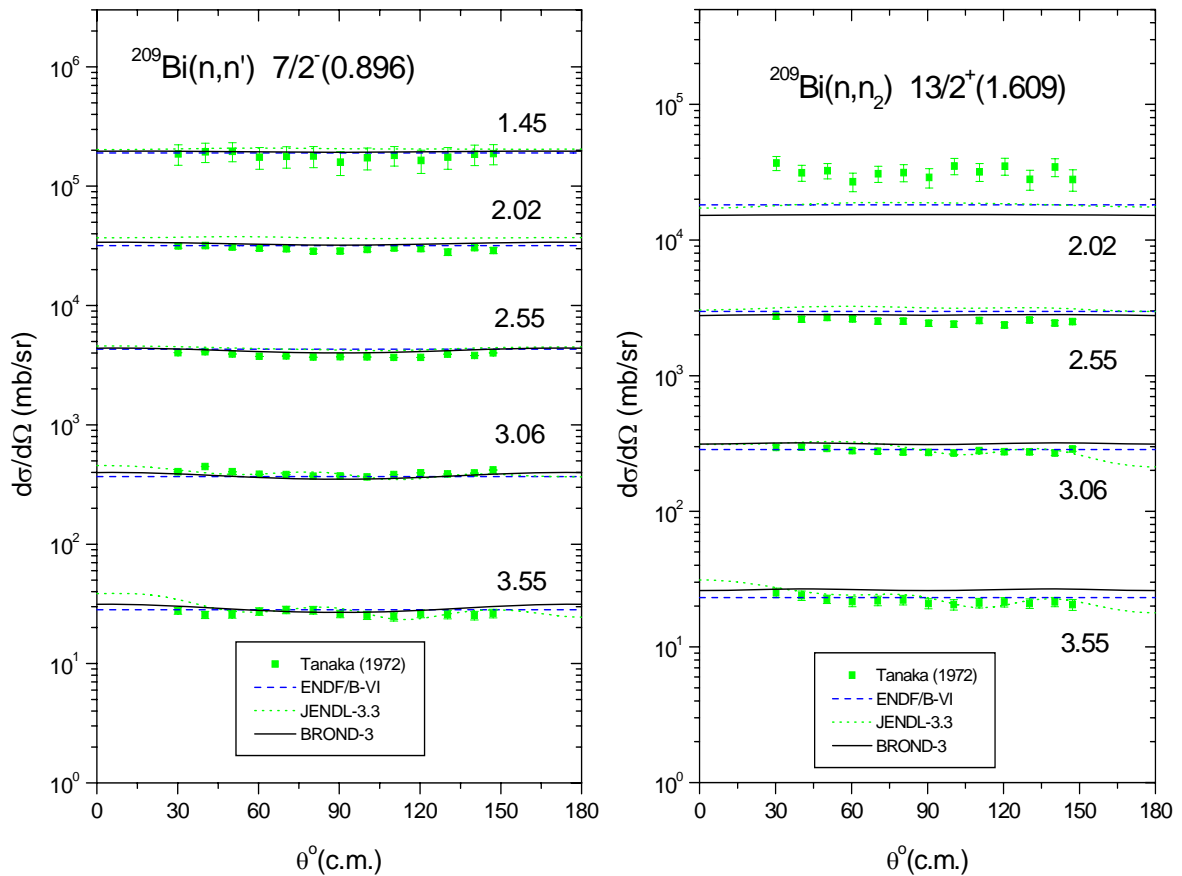


Рис. 14. Оценки угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов с энергиями от 1.45 до 3.55 МэВ на первом и втором уровнях ^{209}Bi в сравнении с экспериментальными данными

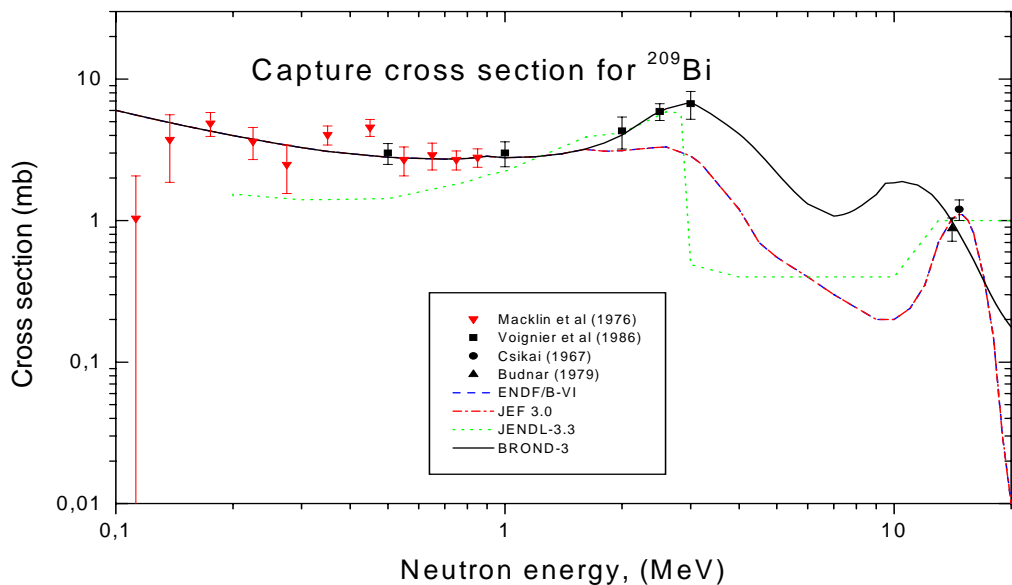


Рис. 15. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов ^{209}Bi в сравнении с экспериментальными данными [35-38]

Оценка JENDL-3.3 кажется существенно заниженной как при энергиях нейтронов ниже 1 МэВ, так и в диапазоне энергий от 3 до 10 МэВ. Следует, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 1 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не оказывает сколь-либо заметного влияния на расчеты характеристик ядерных реакторов.

3.5. Реакция (n,2n) (MT=16)

Экспериментальные данные о сечении реакции (n,2n) показаны на рис. 16 совместно с соответствующими оценками. Сечение реакции (n,2n) сравнительно велико, поэтому значительные разногласия его оценок могут быть очень существенны для большинства практических приложений. Из рисунка видно, что в целом все три рассматриваемые библиотеки дают практически одинаковое описание экспериментальных данных.

3. 6. Сечение реакции (n,3n) (MT= 17)

Оцененные и экспериментальные данные по функции возбуждения реакции $^{209}\text{Bi}(n,3n)$ показаны на рис.17. Из рисунка видно, что абсолютные значения имеющихся экспериментальных данных в широком диапазоне энергий рассеиваемых нейтронов воспроизводятся оценками BROND-3 и JENDL-3.3. Мы полагаем, что более предпочтительной является оценка BROND-3, так как она надежно воспроизводит экспериментальные данные в более широком энергетическом интервале.

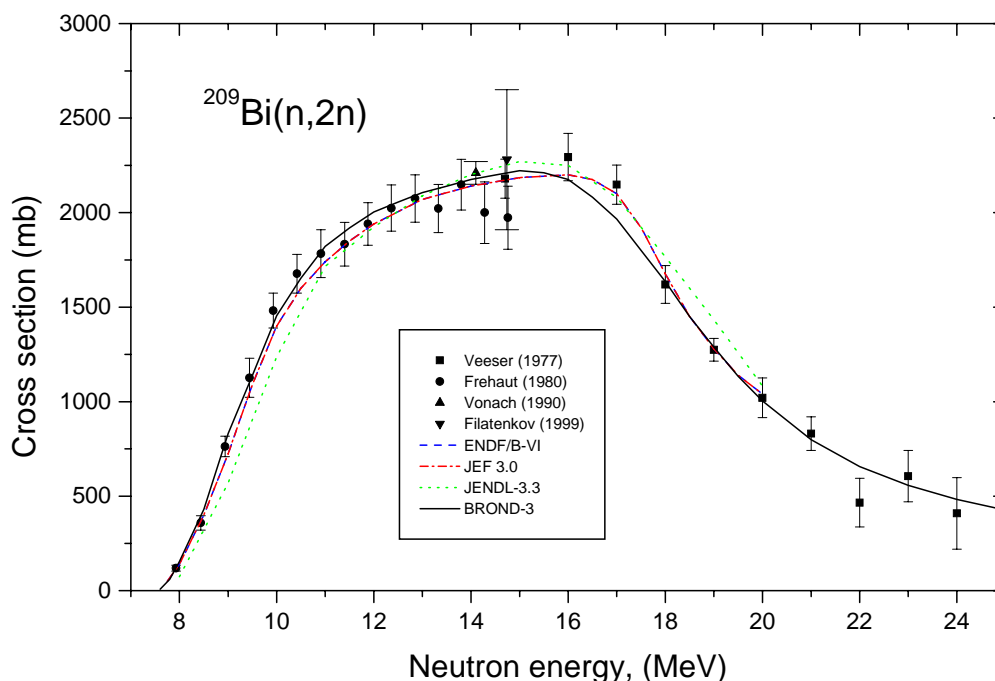


Рис.16. Сравнение оценок сечений реакции $^{209}\text{Bi}(n,2n)$ с экспериментальными данными

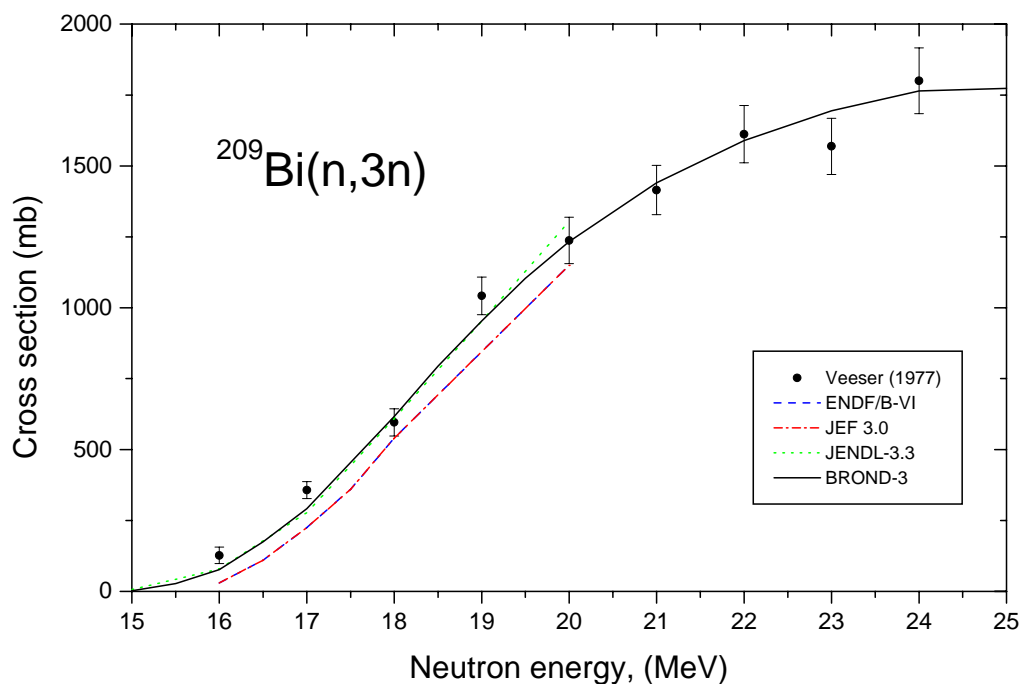


Рис.17. Сравнение оценок сечений реакции $^{209}\text{Bi}(n,3n)$ с экспериментальными данными

3.7. Реакции (n,p) (MT=103) и (n, α) (MT=107):

Реакции $^{209}\text{Bi}(n,p)$ и $^{209}\text{Bi}(n,\alpha)$ широко используются для дозиметрии нейтронов, поэтому для них, как правило, имеются большие наборы экспериментальных данных. Однако надежных экспериментальных данных для функции возбуждения реакции $^{209}\text{Bi}(n,p)$ в диапазоне энергий до 20 МэВ нет. По этой причине в качестве критерия пригодности оценок в более широкой области энергий мы использовали новые надежные экспериментальные данные из работы [10], полученные в диапазоне энергий нейтронов свыше 28 МэВ. На рис. 18 показаны данные измерений сечений реакции (n,p) в сравнении с оценками. Нетрудно видеть, что из всех рассматриваемых библиотек оценка сечения реакции (n,p), предлагаемая в BROND-3, наиболее адекватна надежным экспериментальным данным.

Аналогична ситуация с реакцией $^{209}\text{Bi}(n,\alpha)$. В процессе проведения оценок для библиотеки BROND-3 мы использовали предравновесную модель ядра, параметры которой для описания выхода составных частиц были подобраны по экспериментальным данным работы [10]. В итоге, удалось описать спектры и интегральные выходы α - частиц вплоть до энергий рассеиваемых нейтронов 96 МэВ. По этой причине, мы считаем, что оценка реакции $^{209}\text{Bi}(n,\alpha)$ из библиотеки BROND-3 в настоящий момент наиболее надежная (см. рис. 19).

4. Образование фотонов

В файлах JENDL-3.3 и ENDF/B-VI содержится достаточно полные оценки интегральных выходов и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата и неупругого взаимодействия нейтронов с ядром-мишенью. В JENDL-3.3 такая информация представлена в секциях MF=12, 13, 14 и 15, тогда как в ENDF/B-VI в секциях MF=12, 14 и 15 содержится только данные о гамма-лучах, обусловленных радиационным захватом нейтронов, а данные о множественности и спектрах гамма-лучей, сопровождающих неупругие процессы, включены в секцию MF=6. Угловые распределения всех типов гамма-излучения в обеих оценках приняты изотропными.

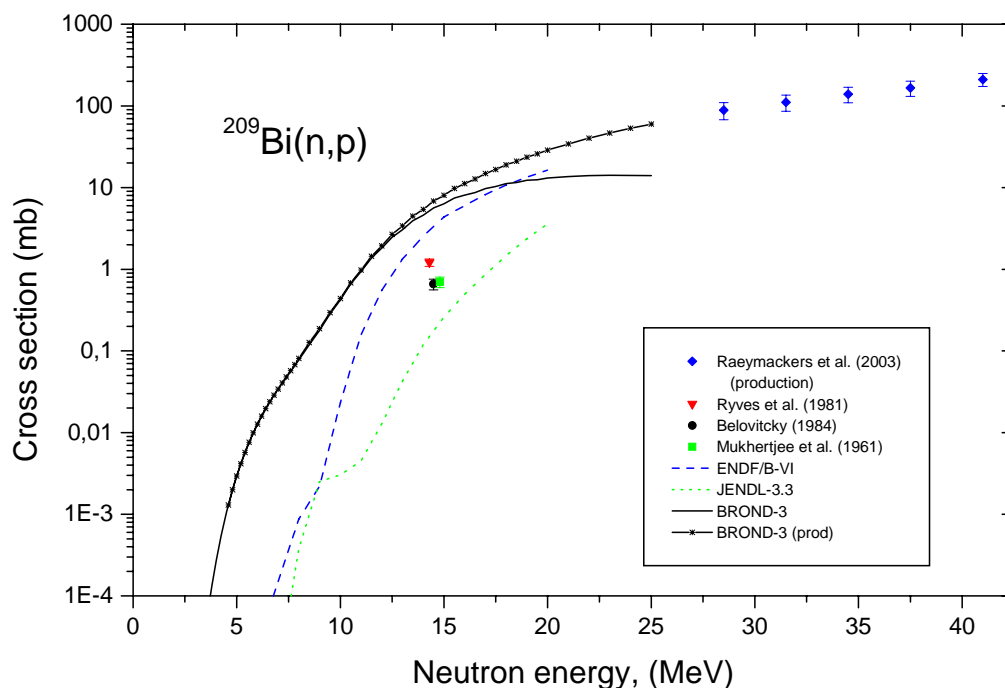


Рис.18. Сравнение оценок сечений реакции $^{209}\text{Bi}(n,p)$ с экспериментальными данными

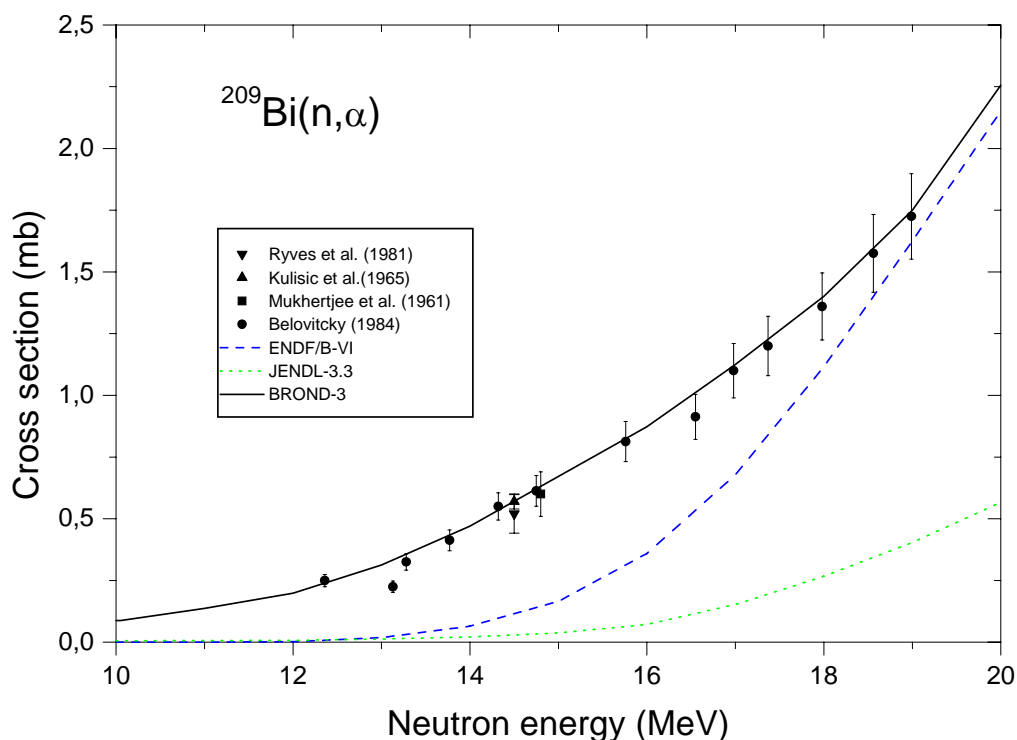


Рис.19. Сравнение оценок сечений реакции $^{209}\text{Bi}(n,\alpha)$ с экспериментальными данными

Оценки интегральных сечений образования гамма-лучей показаны на рис.20 в сравнении с экспериментальными данными. Данных по полному сечению гамма-производства не сравнительно немного [44N, 75W, 91H, 99G]. Во все экспериментальные данные нами была внесены поправки, учитывающая вклад в интегральное сечение сечения образования гамма-квантов низкоэнергетических гамма-лучей, не регистрируемых в эксперименте.

Такие поправки достаточно велики, и именно они определяют основную погрешность экспериментальных данных. На основе имеющихся данных можно сделать вывод, что оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI завышают на 20-30% интегральные выходы гамма-лучей практически во всем диапазоне энергий нейтронов выше 3-4 МэВ, тогда как БРОНД-3 достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными.

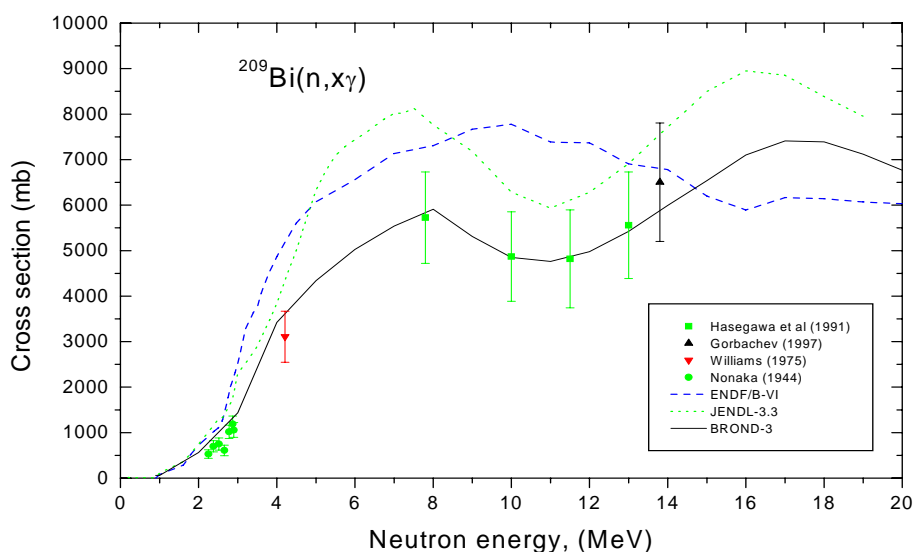


Рис. 20. Оценки интегральных сечений образования гамма-лучей при неупругом взаимодействии нейтронов с ^{209}Bi в сравнении с экспериментальными данными

Список литературы

1. W.P.Abfaltherer, F.B.Bateman, F.S.Dietrich, R.W.Finlay, R.C.Haight, and G.L.Morgan. "Measurement of neutron total cross sections up to 560 MeV " *Phys. Rev.* v. **C63**, (2001) 044608
2. E.Raeymackers, S.Benck, N.Nica, I.Slypen, J.P.Meulders, V.Corcalciuc, A.J.Koning, *Nucl. Phys.* v. **A726** (2003)210
3. A.V.Ignatyuk, In: Reference Input Parameter Library for Nuclear Model Calculations - Handbook, IAEA - TECDOC-1034, Vienna, 1998, ch. 5.
4. J. Kopecky, In: Reference Input Parameter Library for Nuclear Model Calculations - Handbook, IAEA - TECDOC-1034, Vienna, 1998, ch. 6.
5. S.Mughabghab, M.Divadeenam and N.Holden, "Neutron Cross Sections", v. Part B. Academic Press, New York, 1984.
6. J.A.Harvey, W.M.Good, N.W.Hill, J.L.Mitchell, R.M.Feezel ORNL-4743, 54, 1972
7. J.A.Harvey, W.M.Wilson, N.W.Hill (1975)
8. J.A.Harvey, H.Smith (1977)
9. U.N.Singh, J.Rainwater, H.I.Liou, G.Hacken, J.B.Garg PR C, 13, 124, 1976
10. D.G.Foster Jr, D.W.Glasgow. *Phys. Rev.*, v. **C3**, p.576 (1971).
11. R.K.Das and R.W.Finlay, *Phys. Rev.*, v. **C42**, p.1013 (1990).
12. I.A.Korzhet al UFZ **22**(1977)87
13. A.B.Smith et al., *Nucl. Sci. Eng* ,**41**(1970)63
14. B.Holmqvist et al AE-366(1969) *Nucl. Phys.* **62**(1965)511
15. M.V.Pasechnik et al AE **16**(1964)207
16. G.V.Gorlov et al DOK **158**(1964)574
17. C.I.Hudson et al *Phys. Rev.*, v. **128** (1962)1271
18. S.Tanaka, Y.Tomita, K.Ideno and S.Kikuchi, *Nucl. Phys.* **A179**(1972)513
19. A.B.Smith, P.T.Guenther, J.F.Whalen *Nucl. Sci. Eng* ,**75**(1980),69

20. N.Olsson, B.Holmqvist and E.Ramstrom, *Nucl. Phys.* **A385**(1982)285
21. R.D.Lawson, P.T.Guenther, A.B.Smith, *Phys Rev.*, v.**C36**, p.1298 (1987)
22. A.Takahashi, Y.Sasaki, and H.Sugimoto, Report JAERI-M-88-102,(1988).
23. R.Macklin, J.Halperin, *Phys. Rev.*, v.**C14** (1976)1389
24. J.Voignier,S.Joly,G.Grenier, *Nucl. Sci. Eng* ,**93**,(1986)43
25. M.Budnar, F.Cvelbar, E.Hodgson, et al R, INDC (Yug)-6(1979)
26. J.Csikai, G.Peto, M.Buczko, Z.Milligy, N.Eissa, *Nucl. Phys.* **A95**(1967)229
27. V.M.Gorbachev et al. Private communication, Obninsk, 1997
28. K.Hasegawa et al. Proceedings of an International Conference Nuclear Data for Science and Technology, Julich, 13-17 May 1991,p.329
29. G.H.Williams. Diss. Abstr.,**B36** (1975)790
30. I.J.Nonaka *JMJ* v.**26** (1944)66
31. А.И.Лашук, И.П.Садохин, ВАНТ, Ядерные константы, Вып.1 (1994)26
32. V.G. Pronyaev et al. *Physics Data* **13-8**(1995)50
33. Ю.Г.Дегтярев., В.Н.Протопопов, Изв. АН СССР, сер. физич., т.35 (1971)2341
34. E.Almen-Ramstrom. Report AE-503 (1975).
35. A.B.Smith, et al. Report ANL-7636, November 1969.
36. F.I.Habbani, A.H.Jiggins. *Nucl. Instrum. Meth.*, v. **134**(1976)545
37. S.P.Simakov, G.N.Lovchikova, V.P.Lunev, V.G.Pronyaev, N.N.Titarenko, A.M.Trufanov , Вып ВАНТ, Ядерные константы.4 (1992)74
38. D.B.Thomson, *Phys. Rev.*, v.**129** (1963) 2192
39. L.Rosen, L.Stewart , *Phys. Rev.*, v.**107** (1957),824
40. Shi Xia-Min, Shen Rong-Lin, Xing Jin-Qiang, et al *CNP*,**4**,(2)(1982)120
41. G.A.Prokopets, *Ядерная физика*, т. **32** (1980)37
42. L.R.Veeser, E.D.Arthur, P.G.Young, *Phys. Rev.*, v.**C16** (1977)1792
43. J.Frehaut, A.Bertin, R.Bois, J.Jary. In Proc. Symp. on Neutron Cross Sections from 10 – 50 MeV, Upton,L.I. (USA), May 1980,12
44. А.А.Филатенков, S.V.Chuvaev,V.N.Aksenov, V.A.Yakovlev, et al. RI-252,1999; , ВАНТ, Ядерные константы. Вып 2 (1996)8
45. T.B.Ryves, P.Kolkowski, A.C.Hooley, *J.Phys.* **G7**, (1981) 529
46. S.K.Mukherjee, A.K.Ganguly, N.K.Majumder *PPS*, **77**(1961)508
47. G.E.Belovickij, O.S.Presnjak, L.V.Sukhov C,75Kiev, 4,209,1976
48. P.Kulusic, N.Cindro, P.Strohal *Nucl. Phys.* **73**(1965),548

5. Заключение

5.1 Выводы. На основе проведенного рассмотрения оценок и имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что более достоверной в настоящее время является оценка БРОНД-3¹ (авторы оценки А.В.Игнатюк, К.И.Золотарев, В.П.Лунев, В.Н.Манохин, Г.Я.Тертычный, Н.Н.Титаренко). В нее включены те же параметры нейтронных резонансов, что и в ENDF/B-VI, но достигнуты определенные уточнения в описании сечений неупругого рассеяния нейтронов, сечений радиационного захвата нейтронов, выходов заряженных частиц и интегральных выходов гамма-лучей.

Авторы заключения

А.В.Игнатюк и Н.Н.Титаренко.

¹Оценка дополнена файлом MF=9 с секцией MT=102, содержащей вероятности образования висмута-210 в основном и в изомерном состояниях. – М.Николаев.

83.6. Висмут-210

Радиоактивен ($T_{1/2}=5.013$ д). Испытывает бета-распад в полоний-210(вероятность альфа-распада висмута-210 в таллий-206 равна $1.3 \cdot 10^{-6}\%$). Полоний-210, в свою очередь распадается ($T_{1/2}=138.38$ д) в свинец-206 путем альфа-распада.

Заключение

В РОСФОНД вносятся оцененные данные о нейтронных сечениях из EAF-2003. В файле MF=10 сохранена только секция MT=4. Остальные сечения свернуты по подсекциям и внесены в файл MF=3.

Автор заключения

Николаев М.Н.

83.7. Висмут-210m

Радиоактивен ($T_{1/2}=3 \cdot 10^6$ лет). Испытывает альфа-распад в таллий-206 $1.3 \cdot 10^{-6}\%$). Таллий-206, в свою очередь, испытывает бета-распад в свине-206 ($T_{1/2}=4.2$ мин).

Заключение

В РОСФОНД вносятся оцененные данные о нейтронных сечениях из EAF-2003. Все сечения в секциях файла MF=10 свернуть по подсекциям и перенести в файл. MF=3. Секцию MT=4 перенести из файла MF=3 в файл MF=4.

Автор заключения

Николаев М.Н.

84. ПОЛОНИЙ

В природе в ничтожных количествах присутствуют следующие изотопы полония - ^{210}Po ($T_{1/2}=138.376$ дн.), ^{214}Po ($T_{1/2}=164.3$ мкс.) и ^{218}Po ($T_{1/2}=3.08$ м.) – образующиеся в результате цепочки радиоактивных распадов ^{238}U ; ^{211}Po ($T_{1/2}=0.516$ с.) и ^{215}Po ($T_{1/2}=0.00178$ с.) образующиеся в цепочке распадов ^{235}U ; ^{212}Po ($T_{1/2}=3.64$ мкс.) и ^{216}Po ($T_{1/2}=0.15$ с.), образующиеся в цепочке распадов ^{232}Th . Таким образом, среди природных изотопов только ^{210}Po является долгоживущим.

Долгоживущий изотоп ^{210}Po ($T_{1/2}=138.376$ дн.) образуется также в реакторах, охлаждаемых свинцово-висмутовой эвтектикой: в результате реакции $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)$ образуется $^{210}\text{Bi}^g$, распадающийся с периодом 5.013 дн. в ^{210}Po . Радиационный захват нейтронов в этом изотопе ведет к образованию очень короткоживущего ^{211}Po , распадающегося в стабильный свинец-207.

Другими долгоживущими изотопами полония являются: ^{209}Po ($T_{1/2}=102$ г.), ^{208}Po ($T_{1/2}=2.898$ г.) и ^{206}Po ($T_{1/2}=8.8$ дн.). ^{209}Po образуется в реакторах, содержащих висмут, в результате реакции $(n,2n)$ на ^{210}Po . ^{208}Po образуется в результате реакций $^{210}\text{Po}(n,3n)$ и $^{209}\text{Po}(n,2n)$. ^{206}Po может образоваться только в результате реакции $^{208}\text{Po}(n,3n)$ т.к. ^{207}Po быстро (с периодом 5.8 ч.) распадается в ^{207}Bi , а тот – с периодом 33 года – в стабильный ^{207}Pb .

В РОСФОНД включаются данные для всех 4-х долгоживущих изотопов полония.

84.1. Полоний-206

Радиоактивен ($T_{1/2}=8.8$ дн.). Испытывает, в основном (94.55%), захват орбитального электрона с образованием ^{207}Bi , распадающегося ($T_{1/2}=6.24$ д.) в стабильный ^{207}Pb . С вероятностью 5.45% испытывает альфа-распад в долгоживущий ^{202}Pb ($T_{1/2}=5.25 \cdot 10^4$ лет.), распадающийся в ^{203}Tl , а затем ($T_{1/2}=12.23$ д.) – в стабильный изотоп ^{202}Hg .

Экспериментальные данные о взаимодействии с нейтронами отсутствуют.

Заключение.

Последняя оценка нейтронных сечений для этого изотопа содержится в EAF-2003. Она и принимается в РОСФОНД.

Автор заключения

М.Н.Николаев

84.2. Полоний-208

Радиоактивен ($T_{1/2}=2.898$ г.). Испытывает, в основном, альфа-распад в стабильный ^{204}Pb (94.55%), и с ничтожной вероятностью - захват орбитального электрона с образованием ^{208}Bi , распадающегося ($T_{1/2}=3.68 \cdot 10^5$ лет) в стабильный ^{208}Pb .

Экспериментальные данные о взаимодействии с нейтронами отсутствуют.

Заключение.

Последняя оценка нейтронных сечений для этого изотопа содержится в EAF-2003. Она и принимается в РОСФОНД.

Автор заключения

М.Н.Николаев

84.3. Полоний-209

Радиоактивен ($T_{1/2}=102$ г.). Испытывает, в основном, альфа-распад в долгоживущий ^{205}Pb ($T_{1/2}=1.5\cdot 10^7$ лет), и с ничтожной вероятностью - захват орбитального электрона с образованием стабильного ^{209}Bi .

Экспериментальные данные о взаимодействии с нейтронами отсутствуют.

Заключение.

Последняя оценка нейтронных сечений для этого изотопа содержится в EAF-2003. Она и принимается в РОСФОНД.

Автор заключения

М.Н.Николаев

84.4. Полоний-210

Радиоактивен ($T_{1/2}=138.376$ дн.). Испытывает альфа-распад в стабильный ^{206}Pb .

Последняя оценка нейтронных сечений для этого изотопа содержится в EAF-2003.

Единственным экспериментальным результатом, приведенным в EXFOR для этого изотопа полония является измерение сечения реакции $(n,2n)$ на спектре теплового реактора, равное 14 миллибарнам и ошибочно отнесенное к энергии 0.0253 эВ. В журнале «Атомная энергия», том 68, №3 за 1990 г., на который дается ссылка, указано, что упомянутое сечение относится к той части спектра нейтронов теплового реактора, в котором проводилась наработка полония-210 путем облучения висмута, которая лежит выше порога реакции $^{210}\text{Po}(n,2n)$. Качественно оценено, что эта часть составляет 1% от потока тепловых нейтронов, величина которого, тоже качественно, оценена в 10^{13} н/см²с. С учетом неопределенности величины потока нейтронов, лежащих выше порога реакции, авторы оценивают погрешность среднего сечения фактором 10 и в заключении указывают, что из их результатов следует, что обсуждаемое сечение лежит в пределах от 0.1 до 0.001 барна. Согласно оценке EAF-2003 среднее сечение реакции $^{210}\text{Po}(n,2n)$ на спектре деления равно 9.55 миллибарн. Отсюда следует, что сечение, усредненное по той части этого спектра, которая лежит выше порога реакции (7.66 МэВ), составляет 0.6 миллибарна, т.е. лежит в пределах погрешности экспериментальной оценки этой величины.

В справочнике Мухабхаба приводятся следующие оценки сечения захвата нейтронов в ^{210}Po , ведущих к образованию ^{211}Po : в изомерном состоянии ($T_{1/2}=25.2$ с.) – менее 0.5 миллибарна; в основном состоянии ($T_{1/2}=0.516$ с.) – менее 30 миллибарн. Оба результата почтены по активации: первый в работе Stoughton et al., Vienna, 1960, p.239; второй в работе Harperin et al. Nucl. Sci. Eng.,15, p217 (1963). Эти результаты указывают на то, что ^{211}Po не имеет состояний с энергией возбуждения, близкой к энергии связи нейтрона (4.55 МэВ) со спином и четностью $1/2+$, которые могли бы возбуждаться нейтронами низких энергий. Оцененное сечение захвата тепловых нейтронов в EAF-2003 равно 0.030 барн, находится в согласии с этими результатами. Поскольку и изомерное и основное состояния имеют очень короткие периоды полураспада и оба путем альфа распада превращаются в стабильный ^{207}Pb , в отдельном учете образования конечного ядра в изомерном состоянии нет нужды.

Заключение.

В РОСФОНД принимается оценка нейтронных сечений для ^{210}Po из EAF-2003.

Автор заключения

М.Н.Николаев

86. РАДОН

Лишь один изотоп радона имеет период полураспада более суток – радон-222, являющийся продуктом распада радия-226, т.е. входящий в цепочку распада урана-238.

86.1. Радон-222.

Радиоактивен ($T_{1/2}=3.825$ дн.). Испытывает альфа-распад в полоний-218 и далее до образования ^{206}Pb , предшественником которого является, как правило, достаточно долгоживущий ($T_{1/2}=138.38$ дн.) и весьма вредный ^{210}Po .

^{222}Rn - продукт распада радия-226. В ядерном топливе находится в радиоактивном равновесии с ураном-234 ($T_{1/2}=2.455 \cdot 10^5$ лет). Равновесная концентрация радона-222 меньше концентрации урана-234 в $\sim 2.4 \cdot 10^7$ раз, т.е. совершенно ничтожна. Тем не менее, захват нейтронов в радоне ведет к тому, что конечным продуктом цепочки распадов становится ^{207}Pb , предшественником которого является весьма короткоживущий ^{211}Po . Изложенное является достаточным основанием для внесения в библиотеку РОСФОНД данных о сечениях нейтронных реакций на радоне-222.

Полных оценок нейтронных данных для радона не имеется ни в одной из современных библиотек. В EAF-2003 содержатся оценки сечений основных нейтронных реакций, полученные путем теоретических расчетов. Энергетическое поведение сечения захвата показано на рис. 1.

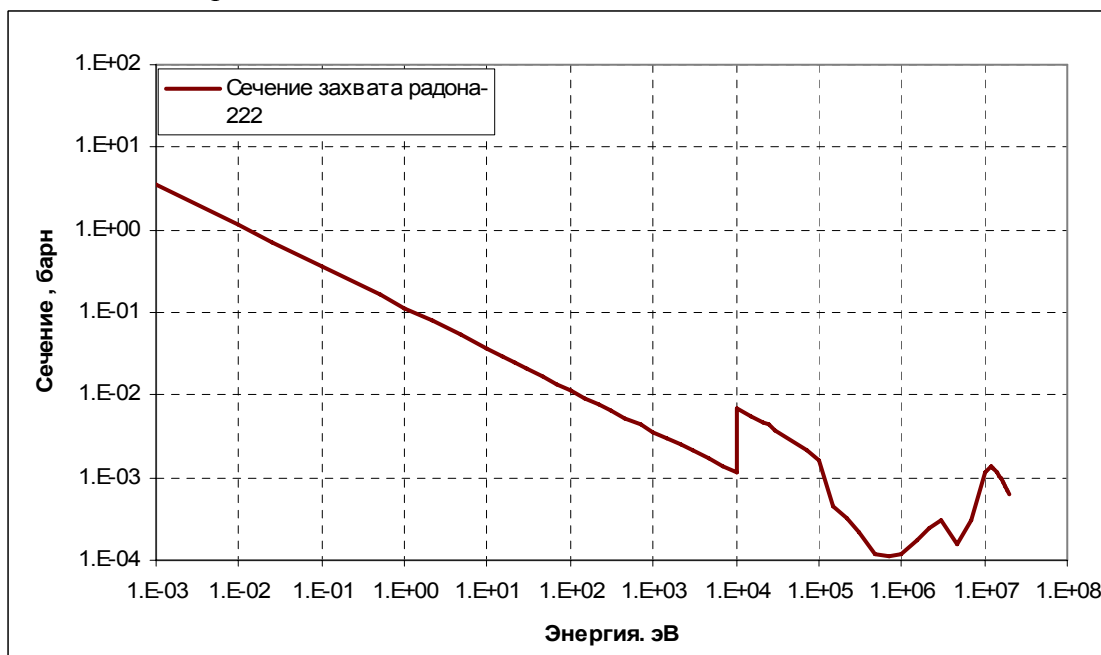


Рис. 1. Сечение захвата.

Оцененное сечение захвата тепловых нейтронов равно 0.72 барна в полном согласии с результатом единственного эксперимента Берга (Baerg-53), получившего 0.07 барна без указания погрешности. Оцененный резонансный интеграл равен 0.33 барна, т.е. полностью определяется вкладом $1/v$, что видно и из рис. 1.

Заключение

В РОСФОНД следует принять файл данных из EAF-2003

Автор заключения Николаев М.Н.

88.РАДИЙ

88.0. Общие замечания

Элемент №88 открыт супругами Кюри в 1898 г. в минерале, известном под названиями урановой смолки, смоляной обманки и настурана. Уже в ходе этой самой первой работы стало ясно, что новый элемент – аналог бария: при фракционном разделении компонентов активность накапливалась в бариевой фракции.

В название элемента №88, как и в названия галогенов, положено одно из самых очевидных его свойств. Слово radium («радий») происходит от латинского radius – «луч», так что дословно название этого элемента переводится как «излучающий», «лучистый».

Чем же важен и чем интересен радий?

«Изучение и использование радиоактивных свойств Ra сыграло огромную роль в исследовании строения атомного ядра и явления радиоактивности. Химические методы, разработанные при выделении из руд соединений Ra и изучении их свойств, легли в основу методов радиохимии».

В этих двух фразах, взятых из краткой энциклопедии «Атомная энергия», сосредоточено в самой общей форме то главное, чем интересен для нас радий, чем славен этот элемент. Можно утверждать, что если бы три четверти века назад не был открыт элемент радий, то вряд ли наш век называли бы атомным. Проследим же историю элемента №88 – историю его служения науке.

С годами, по мере развития ядерной физики и атомной техники, радий постепенно был отодвинут на второй план. Другие радиоактивные элементы и изотопы оказались более приемлемыми и для гамма-дефектоскопии, и для радиотерапии. (Кобальт-60, применяемый ныне для этих целей, намного дешевле и доступнее радия.)

Другие менее опасные излучатели пришли и в производство светящихся красок. Радий-бериллиевые и радон-бериллиевые источники нейтронов тоже постепенно сошли со сцены: появились более совершенные.

Лишь в качестве эталонов радиоактивности соли радия не утратили своих позиций. И еще – как источник радона.

Последнее большое событие в истории элемента №88 произошло в 1967 г. Практически одновременно в знаменитых лабораториях Дубны и Беркли были получены нейтроно-дефицитные изотопы радия с массовыми числами от 206 до 214. До этого времени были известны лишь изотопы с массовыми числами 213 и от 218 до 230.

Все эти изотопы оказались короткоживущими альфа-излучателями с периодами полураспада от 0,4 до 15 секунд. А самый долгоживущий изотоп радия – тот самый радий-226, который открыли супруги Кюри, «живет» 1617 лет, если, конечно, временем жизни изотопа считать период полураспада его ядер.

Для библиотеки РОСФОНД требовалось отобрать нейтронные данные для 5-ти долгоживущих изотопов радия: Ra-223 ($T_{1/2}=11.435$ дн.), Ra-224 ($T_{1/2}=3.66$ дн.), Ra-225 ($T_{1/2}=14.9$ дн.), Ra-226 ($T_{1/2}=1600$ лет) и Ra-228 ($T_{1/2}=5.75$ лет).

Все экспериментальные данные, используемые при сравнении с оцененными сечениями, были взяты из базы данных EXFOR-CINDA (версия 1.81, июнь 2005).

Во всех современных версиях библиотек, таких как ENDF/B-VIIb2, JEFF-3.1 и JENDL-3.3 для первых четырех нуклидов радия используется оценка N.Takagi (Токуо Institute of Technology, TIT), выполненная в августе 1988 года и по сей день, практически, не пересмотренная. Такое положение дел объясняется крайне небольшим количеством экспериментальных данных для полной оценки взаимодействия нейтронов с изотопами радия.

Что касается Ra-226, то в перечисленных выше библиотеках отсутствуют оцененные нейтронные данные; но в библиотеке EAF-2003 имеется оценка нейтронных сечений для него в неполном наборе.

88.1. Радий-223

Альфа активен ($T_{1/2}=11.435$ дн.). Источником этого изотопа в ядерном топливе является α -распад ^{231}Pa , ведущий к образованию ^{227}Ac , который испытывает бета-распад в ^{227}Th , α -распадающийся в ^{223}Ra .

В таблице 1 приводятся величины теплового сечения и резонансного интеграла для изотопов радия, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13).

Таблица 1 – Тепловые сечения и резонансные интегралы изотопов радия (барн).

| Нуклид | Оценка | Тепловое сечение ($E=0.0253$ эВ) | | | | Резонансный интеграл | |
|--------|--------|-----------------------------------|---------|---------|--------|----------------------|--------|
| | | Полное | Упругое | Деление | Захват | Деление | Захват |
| Ra-223 | JENDL | 143.1 | 12.4 | 0.70 | 130.0 | 0.767 | 472. |

В EXFORe содержатся результаты двух экспериментов по измерению сечения деления ^{223}Ra тепловыми нейтронами: Peterson-47: 100 барн; Jain-67: более 0.7 барн (возможно в 4 – 5 раз); и один эксперимент по измерению сечения захвата тепловыми нейтронами - Harbottle67: 125 ± 15 барн. По оценке Мухабхаба (1984) $\sigma_f=130 \pm 20$ барн; $\sigma_c=0.7 \pm 3$ барн. Видимо, величина, измеренная Петерсоном, содержит большую систематическую погрешность. Заметим, что и для нуклида Ac-227 между экспериментом Петерсона ($\sigma_f=2$ барна) и оцененной величиной ($\sigma_f=0.29$ мбарн) наблюдается сильное расхождение.

Энергетические зависимости сечений показаны на рисунке 1.

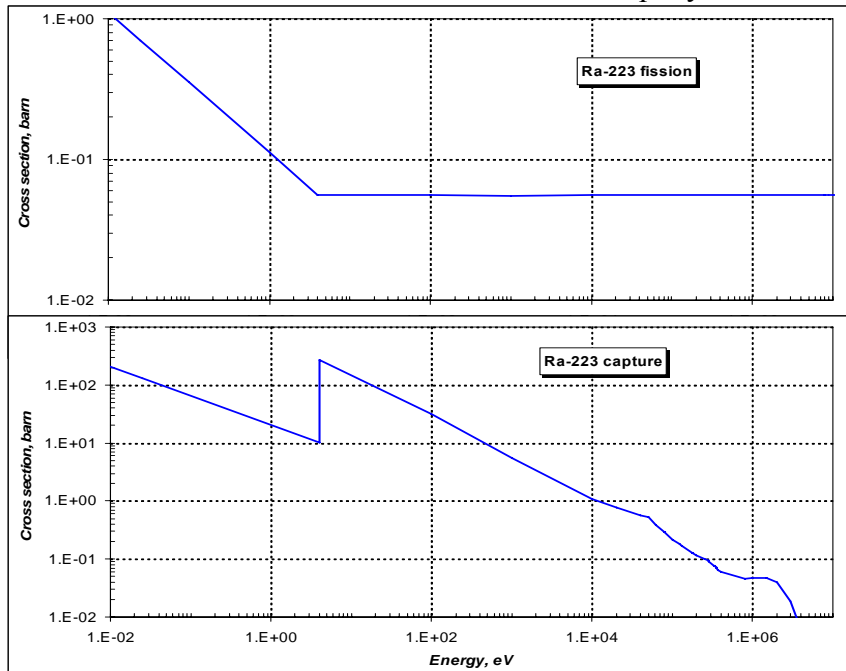


Рисунок 1 – Сечение деления и радиационного захвата на Ra-223.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку N.Takagi, 1988 (JENDL-3.3 = JEFF-3.1 = ENDF/B-VIIb2)).

Автор отбора данных
Кошечев В.Н.

88.2. Радий-224

Альфа активен ($T_{1/2}=3.6319$ дн.). Источником этого изотопа в ядерном топливе является α -распад ^{232}U , ведущий к образованию ^{228}Th , α -распадающегося в ^{224}Ra , а также распад тория-232, порождающего ^{228}Ra , превращающегося затем в ^{224}Ra (см. ниже раздел 88.5).

В таблице 2 приводятся величины теплового сечения и резонансного интеграла для изотопов радия, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13).

Таблица 2 – Тепловые сечения и резонансные интегралы изотопов радия (барн).

| Нуклид | Оценка | Тепловое сечение ($E=0.0253$ эВ) | | | | Резонансный интеграл | |
|--------|--------|-----------------------------------|---------|---------|--------|----------------------|--------|
| | | Полное | Упругое | Деление | Захват | Деление | Захват |
| Ra-224 | JENDL | 24.5 | 12.5 | - | 12.0 | - | 33.6 |

В EXFORе никаких экспериментальных данных не содержится.
По оценке Мухабхаба (1984) $\sigma_c=12\pm 0.5$ барн со ссылкой на работу Ваег-53.
Оцененное поведение сечения захвата показано на рисунке 2.

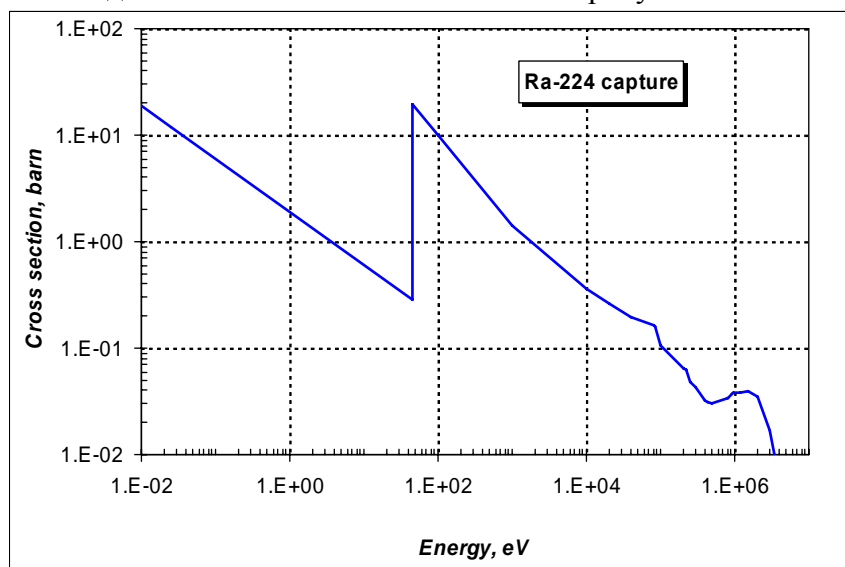


Рисунок 2 – Сечение радиационного захвата на Ra-224.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку N.Takagi, 1988 (JENDL-3.3 = JEFF-3.1 = ENDF/B-VIIb2)).

Автор отбора данных
Кошечев В.Н.

88.3. Радий-225

Радиоактивен ($T_{1/2}=14.9$ дн.). Испытывает бета-распад в ^{225}Ac . Источником этого изотопа в ядерном топливе является α -распад ^{233}U , ведущий к образованию ^{229}Th , α -распадающегося в ^{225}Ra .

В таблице 3 приводятся величины теплового сечения и резонансного интеграла для изотопов радия, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13).

Таблица 3 – Тепловые сечения и резонансные интегралы изотопов радия (барн).

| Нуклид | Оценка | Тепловое сечение ($E=0.0253$ эВ) | | | | Резонансный интеграл | |
|--------|--------|-----------------------------------|---------|---------|--------|----------------------|--------|
| | | Полное | Упругое | Деление | Захват | Деление | Захват |
| Ra-225 | JENDL | 112.4 | 12.4 | - | 100. | - | 617. |

В EXFORe никаких экспериментальных данных не содержится.

У Мухабхаба также нет никаких оценок сечений этого изотопа.

Оцененное поведение сечения захвата показано на рисунке 3.

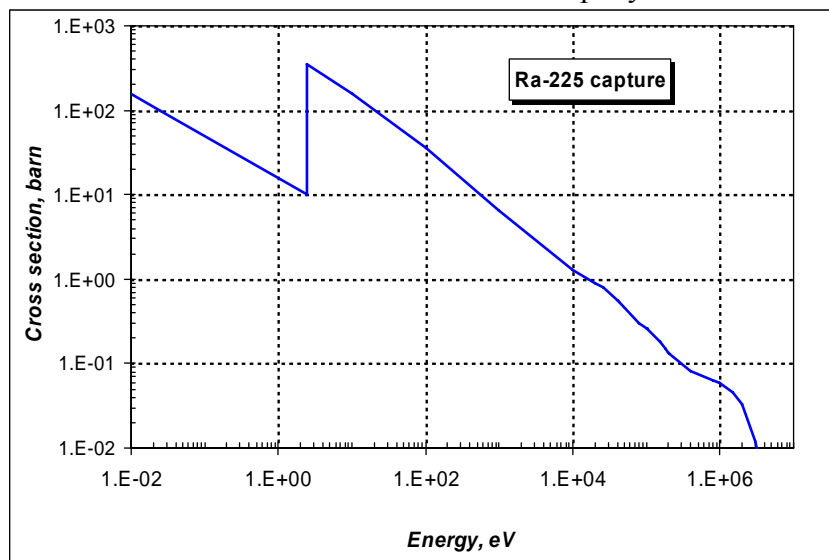


Рисунок 3 – Сечение радиационного захвата на Ra-225.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку N.Takagi, 1988 (JENDL-3.3 = JEFF-3.1 = ENDF/B-VIIb2)).

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

88.4. Радий-226

Наиболее долгоживущий изотоп ($T_{1/2}=1600$ лет). Испытывает бета-распад в ^{222}Rn . Источником этого изотопа в ядерном топливе является α -распад ^{234}U , ведущий к образованию ^{230}Th , α -распадающегося в ^{226}Ra .

В таблице 4 приводятся величины теплового сечения и резонансного интеграла для изотопов радия, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13).

Таблица 4 – Тепловые сечения и резонансные интегралы изотопов радия (барн).

| Нуклид | Оценка | Тепловое сечение ($E=0.0253$ эВ) | | | | Резонансный интеграл | |
|--------|--------|-----------------------------------|---------|---------|--------|----------------------|--------|
| | | Полное | Упругое | Деление | Захват | Деление | Захват |
| Ra-226 | JENDL | 22.61 | 9.82 | 7 мкб | 12.79 | 5.7 мкб | 282. |

Содержащиеся в EXFORе экспериментальные данные о сечении деления противоречивы:

Ames-47: $\sigma_f=0.11$ миллибарн;

Nakahara-74: $\sigma_f=0.46$ миллибарн;

Nakahara-76: $\sigma_f<0.007$ миллибарн;

Оценка, принятая Мухабхабом: $\sigma_f<0.05$ миллибарн. Как видно, оценка Такаги опирается на последний результат Накахары.

Содержащиеся в EXFORе экспериментальные данные о сечении захвата:

Peterson-49: $\sigma_f=19$ барн;

Hagemann-50: $\sigma_f=15$ барн;

Butler-53: $\sigma_f=23\pm 1$ барн;

Оценка, принятая Мухабхабом: $\sigma_c=12.8\pm 1.5$ барн.

Резонансный интеграл по оценке Мухабхаба равен 280 барн без указания погрешности.

Оцененное поведение сечения деления в сравнении с имеющимися экспериментальными данными показано на рисунке 4.

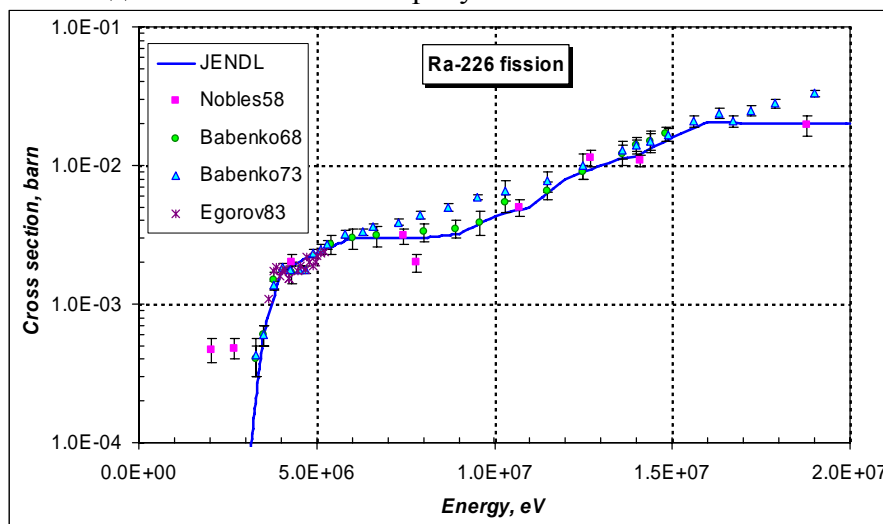


Рисунок 4 - Сечение деления на Ra-226

На рисунке 5 показана оцененная энергетическая зависимость сечения захвата. Как видно, резонансная структура сечений принята во внимание только до ~ 300 эВ. Между тем Известны параметры 33 резонансов с энергиями до 945 эВ и положения семи сильных уровней выше этой энергии.

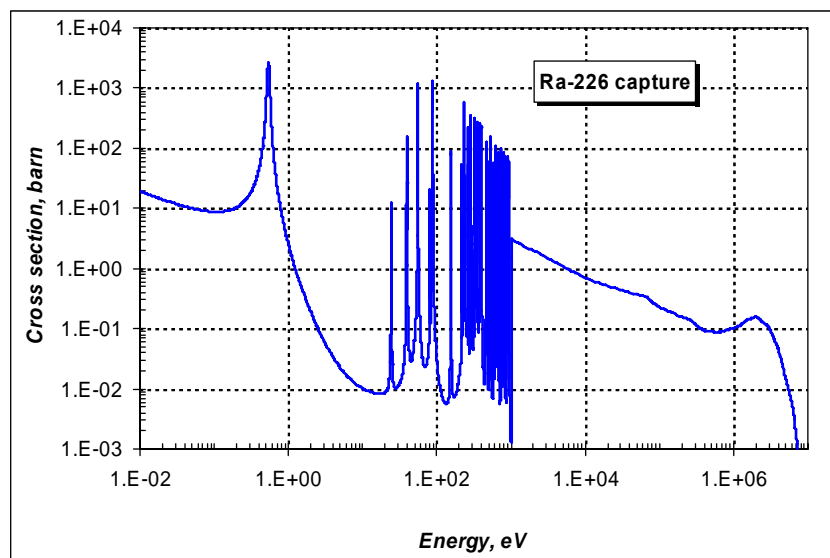


Рисунок 5 – Сечение радиационного захвата на Ra-226.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку N.Takagi, 1988 (JENDL-3.3 = JEFF-3.1 = ENDF/B-VIIb2)).

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

88.5. Радий-228

Радиоактивен ($T_{1/2}=5.75$ лет.). Испытывает бета распад в ^{228}Ac , который затем распадается в ^{228}Th , который, испытывая уже альфа-распад порождает ^{224}Ra . Источником этого изотопа в ядерном топливе является α -распад ^{232}Th .

Полных наборов оцененных нейтронных данных, как отмечалось, не имеется. Оцененные сечения нейтронных реакций содержатся в EAF-2003.

В таблице 5 приводятся величины теплового сечения и резонансного интеграла для изотопов радия, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13).

Таблица 5 – Тепловые сечения и резонансные интегралы изотопов радия (барн).

| Нуклид | Оценка | Тепловое сечение (E=0.0253 эВ) | | | | Резонансный интеграл | |
|--------|--------|--------------------------------|---------|---------|--------|----------------------|--------|
| | | Полное | Упругое | Деление | Захват | Деление | Захват |
| Ra-228 | JENDL | - | - | 2.00 | 36.0 | 0.926 | 16.08 |

В EXFORe приведены следующие экспериментальные данные:

Peterson-47: $\sigma_f < 2$ барн;

Derokas-52: $\sigma_c = 36 \pm 5$ барн.

Эти результаты приняты и Мухабхабом.

Оцененное поведение сечения захвата показано на рисунке 6.

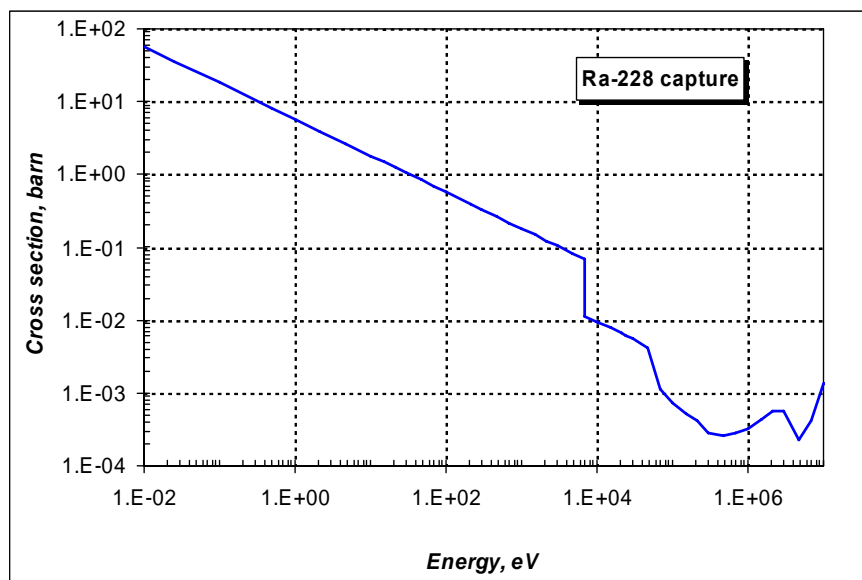


Рисунок 6 – Сечение радиационного захвата на Ra-228.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку нейтронных сечений из EAF-2003.

Автор отбора данных
Кощев В.Н.

89.АКТИНИЙ

89.0. Общие замечания

Есть лишь одна причина, по которой элемент №89 – актиний – интересует сегодня многих. Этот элемент, подобно лантану, оказался родоначальником большого семейства элементов, в которое входят все три кита атомной энергетики – уран, плутоний и торий. Это не заслуга актиния, но, тем не менее, его место в периодической системе особое.

Спустя десять лет после открытия актиния знаменитый английский физик Фредерик Содди остроумно систематизировал комплекс накопленной к тому времени информации об элементе №89. Вот он:

«Атомный вес – неизвестен; средняя продолжительность жизни – неизвестна; характер излучения – не испускает лучей; материнское вещество – неизвестно; исходным веществом, вероятно, является уран; продукт распада – радиоактиний».

То обстоятельство, что открытие элемента №89 в 1899 г. было все-таки признано свершившимся, часть историков науки объясняет некоторой причастностью к этому делу супругов Пьера и Марии Кюри и их непререкаемым авторитетом во всем, что связано с радиоактивностью.

В хронологической таблице открытия элементов актиний стоит сразу же после полония и радия. В октябре 1899 г. о нем сообщил французский химик Андрэ Дебьерн, один из немногих добровольных помощников Пьера и Марии Кюри. Осенью 1899 г. исследуя остатки урановой смолки, из которой уже были удалены и радий и полоний, молодой химик обнаружил слабое излучение. Значит, знаменитая смолка содержала еще один новый элемент? Такое предположение после открытия радия и полония казалось естественным и неоспоримым. Дебьерн предложил назвать этот элемент актинием (от греческого *ακτις* – «излучение, свет») по аналогии с радием. Были предприняты попытки выделить новый элемент, но они оказались безуспешными, и Дебьерн вместе с супругами Кюри сосредоточился на радии.

Спустя год с небольшим из такой же содержащей редкие земли фракции урановой смолки получил сильно излучающий раствор немецкий исследователь Ф. Гизель. Ему даже удалось (это стоило колоссального труда) освободить этот раствор от многих примесей, получить относительно чистый излучатель – по сути дела, первый препарат актиния. Но этого Гизель не знал: он считал, что открыл новый элемент, и назвал его эманием. Однако вскоре была доказана идентичность эмания и актиния, и новый элемент «не состоялся».

Самое необычное здесь то, что элемент, названный «излучающим» (так дословно переводится название «актиний»), в действительности не мог быть открыт по его излучению. Как теперь известно, самый долгоживущий природный изотоп актиния ^{227}Ac в подавляющем большинстве случаев распадается, испуская очень мягкие бета-лучи. Регистрирующая аппаратура, существовавшая на рубеже XIX и XX вв., не могла уловить это излучение. Нельзя было с ее помощью и зарегистрировать те редкие (примерно 1,2%) случаи, когда эти ядра распадались, испуская альфа-частицы. И Дебьерн и Гизель открыли элемент №89 не по его собственному излучению, а по излучению дочерних продуктов: по сути дела, они наблюдали излучение изотопа уже известного тория.

Актиний есть в природе. Он, точнее его главный и самый долгоживущий изотоп ^{227}Ac , образуется в процессе распада урана-235. Количество получающегося актиния настолько мало, что этот элемент определенно входит в десятку редчайших элементов Земли. Его содержание в земной коре определяется десятиллиардными долями процента. Подсчитано, что во всех земных минералах содержится лишь 2600 т актиния, а радия (сверхтрудность добычи которого известна) – примерно 40...50 млн т.

Извлечение актиния из природных источников (урановых минералов) еще больше осложняется его крайним сходством с элементами редкоземельного семейства. В настоящее время предпочтительным методом получения актиния считается облучение радия нейтронами. Здесь происходит вот что:



Очевидно, что разделить двухвалентный радий и трехвалентный актиний легче, чем выделить тот же актиний из смеси лантана и его аналогов. А период полураспада радия-227 невелик – всего 41 минута. Поэтому быстрее и дешевле всего (если здесь вообще уместно говорить о дешевизне) получать актиний из сверхдрагоценного радия. Именно этим путем получили чистые препараты элемента №89, на которых и были определены его основные свойства. Элементарный актиний оказался серебристо-белым металлом, довольно тяжелым (плотность чуть больше 10 г/см³) и весьма химически активным.

Практическое использование актиния ограничивается источниками нейтронов. Нейтроны в них образуются при облучении бериллия-9 альфа-частицами. А дают альфа-частицы дочерние продукты актиния-227. Есть основания полагать, что актиний-бериллиевые нейтронные источники отнюдь не самые лучшие и не самые экономичные из устройств такого назначения.

Науке, и, прежде всего, ядерной физике, изучение актиния дало многое. На актинии держится знаменитая актиноидная теория Г. Сиборга; не будь этого элемента, не было бы и этой теории. Элемент франций тоже не был бы открыт, если бы не актиний. Точнее, если бы актиний-227 не распался двояко и не превращался иногда (в среднем в 12 случаях из 1000) во франций-223. Изучение этого элемента еще принесет науке немало нового. Физики, например, до сих пор не могут объяснить, почему самый известный и самый изученный изотоп элемента №89 – актиний-227 имеет непостоянный период полураспада. Полученный из радия искусственным путем или образующийся при альфа-распаде чистого протактиния-231, он имеет период полураспада 21,8 года, а выделенный из актинийсодержащих минералов – намного меньше.

Для библиотеки РОСФОНД требовалось отобрать нейтронные данные для 3-х долгоживущих изотопов радия: Ac-225 ($T_{1/2}=10.0$ дн.), Ac-226 ($T_{1/2}=29.37$ час.) и Ac-227 ($T_{1/2}=21.773$ лет).

Все экспериментальные данные, используемые при сравнении с оцененными сечениями, были взяты из базы данных EXFOR-CINDA (версия 1.81, июнь 2005).

Во всех современных версиях библиотек, таких как ENDF/B-VIIb2, JEFF-3.1 и JENDL-3.3 для изотопов актиния используется оценка N.Takagi (Tokyo Institute of Technology, TIT), выполненная в августе 1988 года и по сей день, практически, не пересмотренная. Такое положение дел объясняется крайне небольшим количеством экспериментальных данных для полной оценки взаимодействия нейтронов с изотопами актиния.

Кроме перечисленных библиотек, содержащих полные файлы оцененных нейтронных данных, оценка нейтронных сечений некоторых реакций содержится в библиотеке EAF-2003, входящей составной частью библиотеки JEFF-3.1 (для решения активационных задач).

89.1. Актиний-225

Альфа активен ($T_{1/2}=10.0$ дн.). С вероятностью $6 \cdot 10^{-10}$ испускает частицы ^{14}C .

Источником этого изотопа в ядерном топливе является α -распад ^{233}U в ^{229}Th , α -распад которого ($T_{1/2}=7880$ лет), ведет к образованию ^{225}Ra ($T_{1/2}=14.8$ дн.), испытывающего бета-распад в ^{225}Ac .

В таблице 1 приводятся величины теплового сечения и резонансного интеграла для Ac-225, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13).

Таблица 1 – Тепловые сечения и резонансные интегралы Ac-225 (барн).

| Нуклид | Оценка | Тепловое сечение ($E=0.0253$ эВ) | | | | Резонансный интеграл | |
|--------|--------|-----------------------------------|---------|---------|--------|----------------------|--------|
| | | Полное | Упругое | Деление | Захват | Деление | Захват |
| Ac-225 | JENDL | 1012. | 12.4 | - | 1000. | - | 1626. |
| | EAF | | | 1.8 мб | 1000. | 0.83 мб | 1626. |

В EXFORе нет никаких данных по измерению сечения деления и сечения захвата ^{225}Ac . Расчеты сечений выполнены по различным систематикам и теоретическим моделям.

Сравнение оцененных сечений радиационного захвата на Ac-225 показано на рисунке 1.

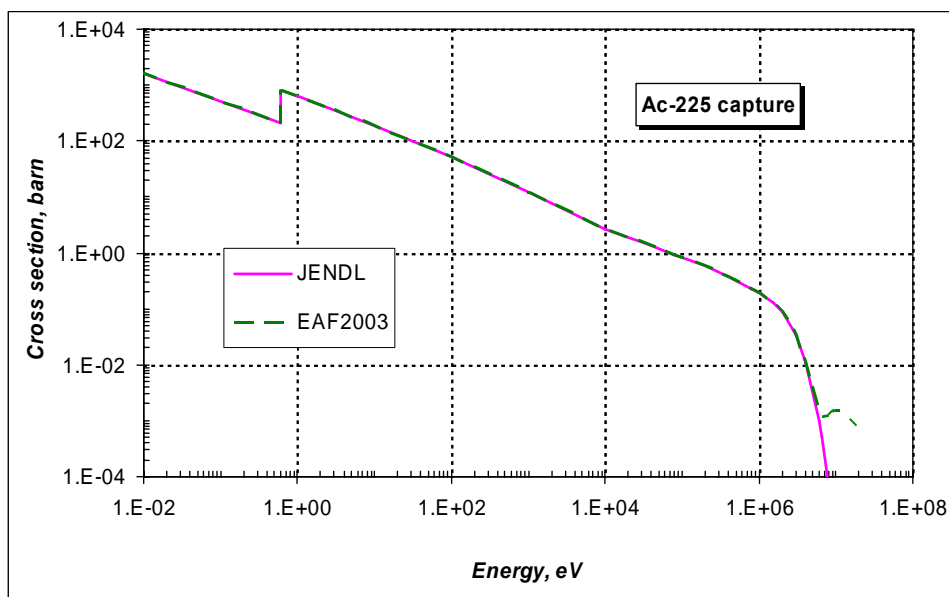


Рисунок 1 – Сечение радиационного захвата на Ac-225.

Как видно из рисунка 1 различия в сечении захвата между упомянутыми оценками проявляются в области энергий выше 6 МэВ, где используются различные модели расчета процесса радиационного захвата.

Из приведенной в таблице 1 информации следует, что сечение деления на Ac-225 в резонансной области энергий имеет небольшую величину \sim мбарн. Оно имеет пороговый характер (смотри рисунок 2) и при 10 – 20 МэВ сопоставимо с вкладом от реакций $(n,3n)$ и тем более $(n,4n)$, оценка для которых приводится в JENDL.

Как нам кажется, оценку N.Takagi следует дополнить данными о делении, используя информацию из библиотеки EAF-2003.

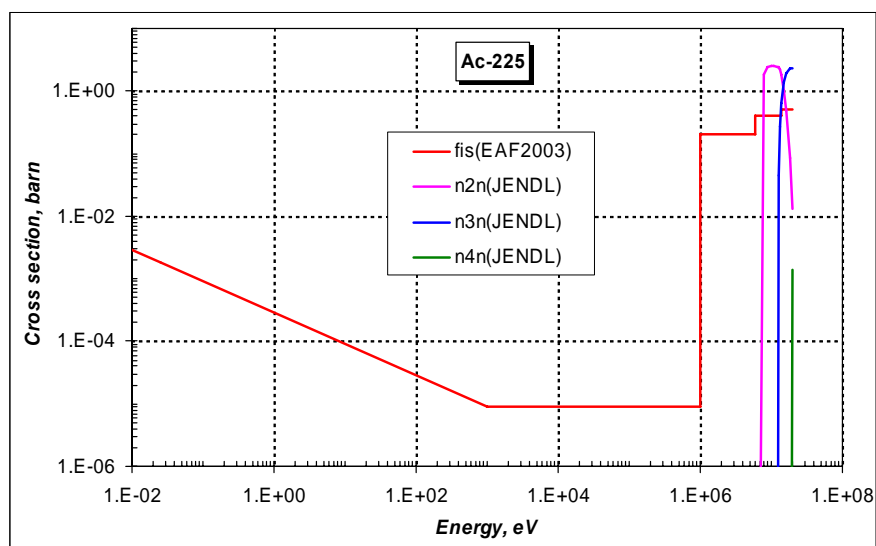


Рисунок 2 – Сечения пороговых реакций на Ac-225.

Заключение

Для Ac-225 принять в РОСФОНД оценку N.Takagi, 1988 (JENDL-3.3 = JEFF-3.1 = ENDF/B-VIIb2).

Дополнить оценку данными о процессе деления, используя информацию из библиотеки EAF-2003.

Спектр нейтронов деления принять таким же, как для актиния-227.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

89.2. Актиний-226

Период полураспада составляет чуть более суток ($T_{1/2} = 29.37$ час.). Ac-226 имеет сложный механизм распада: с вероятностью ~ 0.83 переходит в Th-226, с вероятностью ~ 0.17 превращается в Ra-226, и с вероятностью $6 \cdot 10^{-5}$, испустив альфа-частицу, превращается во франций-222.

Источником этого изотопа в ядерном топливе могут являться реакция (n,2n) на Ac-227 ($T_{1/2} = 21.77$ лет.) и радиационный захват нейтронов в Ac-226 ($T_{1/2} = 10.0$ дн.). Разумеется, накапливаемые концентрации всегда будут ничтожно малы.

В таблице 2 приводятся величины теплового сечения и резонансного интеграла для Ac-226 полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13).

Таблица 2 – Тепловые сечения и резонансные интегралы Ac-226 (барн).

| Нуклид | Оценка | Тепловое сечение (E=0.0253 эВ) | | | | Резонансный интеграл | |
|--------|--------|--------------------------------|---------|---------|--------|----------------------|--------|
| | | Полное | Упругое | Деление | Захват | Деление | Захват |
| Ac-226 | JENDL | 112. | 12.4 | - | 100. | - | 1679. |
| | EAF | - | - | 670. | 100. | 301. | 1679. |

В EXFORe нет никаких данных по измерению сечения деления и сечения захвата ^{226}Ac . Расчеты сечений выполнены по различным систематикам и теоретическим моделям.

Сравнение оцененных сечений радиационного захвата на Ас-226 показано на рисунке 3.

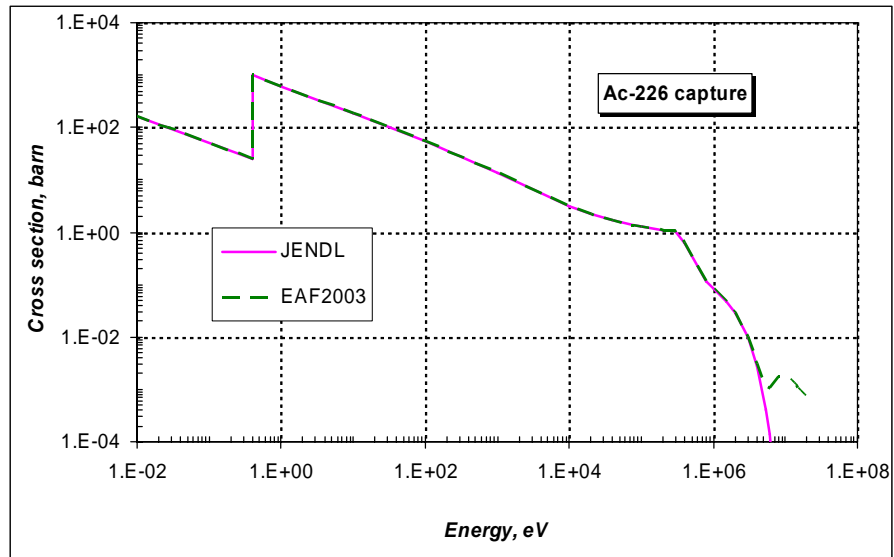


Рисунок 3 – Сечение радиационного захвата на Ас-226.

Как видно из рисунка 3 различия в сечение захвата между упомянутыми оценками, как и в случае с Ас-225, проявляются в области энергий выше 6 МэВ, где используются различные модели расчета процесса радиационного захвата.

Из приведенной в таблице 2 информации следует, что сечение деления на нечетно-четном изотопе Ас-226 в резонансной области энергий имеет заметную величину по сравнению даже с сечением захвата. Для сравнения на рисунке 4 приводятся энергетические зависимости сечения деления и пороговых реакций на Ас-226.

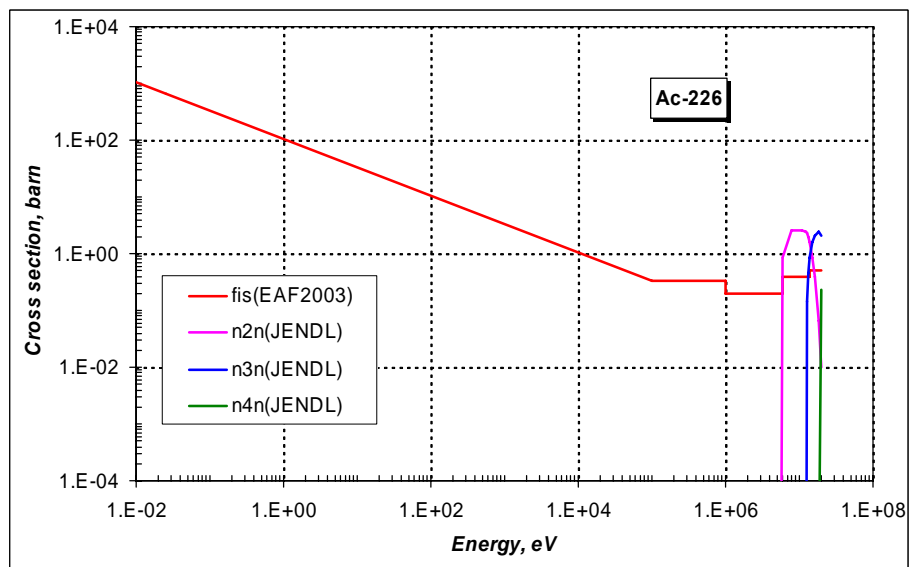


Рисунок 4 – Сечение деления и пороговых реакций на Ас-226.

Как нам кажется, оценку N.Takagi следует дополнить данными о делении, используя информацию из библиотеки EAF-2003, как это было предложено и для Ас-226.

Заключение

Для Ac-226 принять в РОСФОНД оценку N.Takagi, 1988 (JENDL-3.3 = JEFF-3.1 = ENDF/B-VIIb2).

Дополнить оценку данными о процессе деления, используя информацию из библиотеки EAF-2003.

Спектр нейтронов деления принять таким же, как для актиния-227.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

89.3. Актиний-227

Это самый долгоживущий изотоп актиния. Его период полураспада составляет $T_{1/2} = 21.773$ года. Ac-227 с вероятностью ~ 0.9862 переходит в Th-227 и с вероятностью ~ 0.0138 , испустив альфа-частицу, превращается во Fr-223.

Источником этого изотопа в ядерном топливе является главным образом альфа распад долгоживущего изотопа Pa-231.

В таблице 3 приводятся величины теплового сечения и резонансного интеграла для Ac-227, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13).

Таблица 3 – Тепловые сечения и резонансные интегралы Ac-227 (барн).

| Нуклид | Оценка | Тепловое сечение (E=0.0253 эВ) | | | | Резонансный интеграл | |
|--------|------------|--------------------------------|---------|----------------|--------------|----------------------|---------------|
| | | Полное | Упругое | Деление | Захват | Деление | Захват |
| Ac-227 | JENDL | 902. | 12.4 | 0.29 мб | 890. | 0.18 мб | 3287. |
| | EAF | - | - | 0.29 мб. | 887. | 0.18 мб | 1487. |
| | Mughabghab | - | - | ~ 0.29 мб | 890 ± 30 | - | 1660 ± 30 |

В EXFORe имеются некоторые данные по измерению сечения деления и сечения захвата ^{227}Ac , в основном для тепловой области энергии. Результатом анализа имеющихся экспериментальных данных в тепловой и резонансной области стали рекомендации, помещенные в известной компиляции Мухабхаба. Кроме, этого, в области энергий выше 1 МэВ имеется измерение сечения деления, выполненные группой Какса в 1978 году. Отметим, что оцененные сечения получены по различным систематикам и теоретическим моделям.

Сравнение оцененных сечений радиационного захвата на Ac-227 показано на рисунке 5.

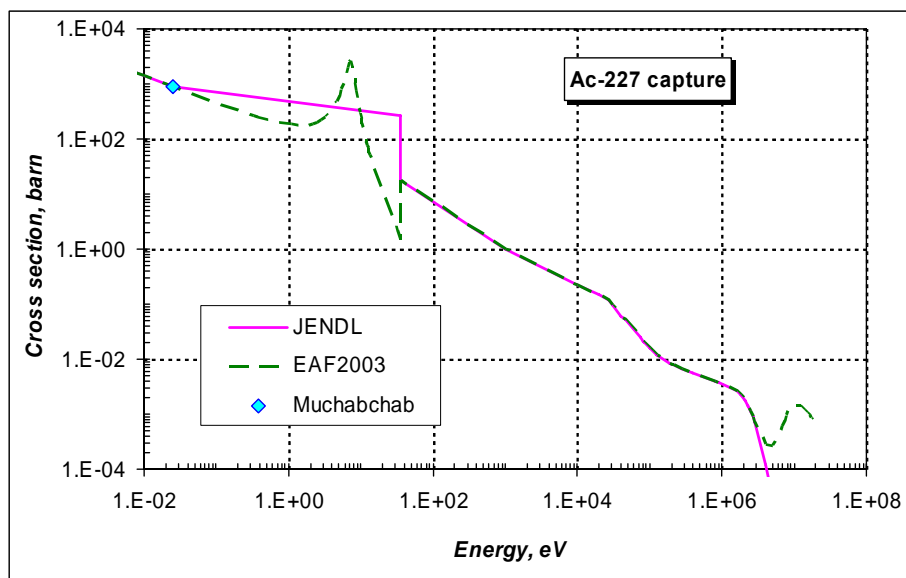


Рисунок 5 – Сечение радиационного захвата на Ac-227.

Как видно из рисунка 5 различия в сечении захвата между упомянутыми оценками проявляются не только в области энергий выше 6 МэВ, где используются различные модели расчета процесса радиационного захвата, как и в случае с Ac-225, но и в области тепловых сечений. В оценке EAF присутствует резонансный уровень, в то время как в оценке JENDL такой уровень отсутствует. При сравнении резонансных интегралов захвата оказывается, что оценка EAF лучше, чем JENDL согласуется с рекомендациями Мухабхаба (смотри табл.3). Что делает более предпочтительным использование оценки EAF для РОСФОНДА.

Из приведенной в таблице 3 информации следует, также, что сечение деления на нечетно-нечетном изотопе Ac-227 имеет пороговый характер. Как было отмечено выше, в МэВ-ой области энергий имеется экспериментальная работа, результаты которой использованы в обеих оценках. Для сравнения на рисунке 6 приводятся сравнение сечения деления Ac-227 с экспериментальными данными и рекомендациями Мухабхаба.

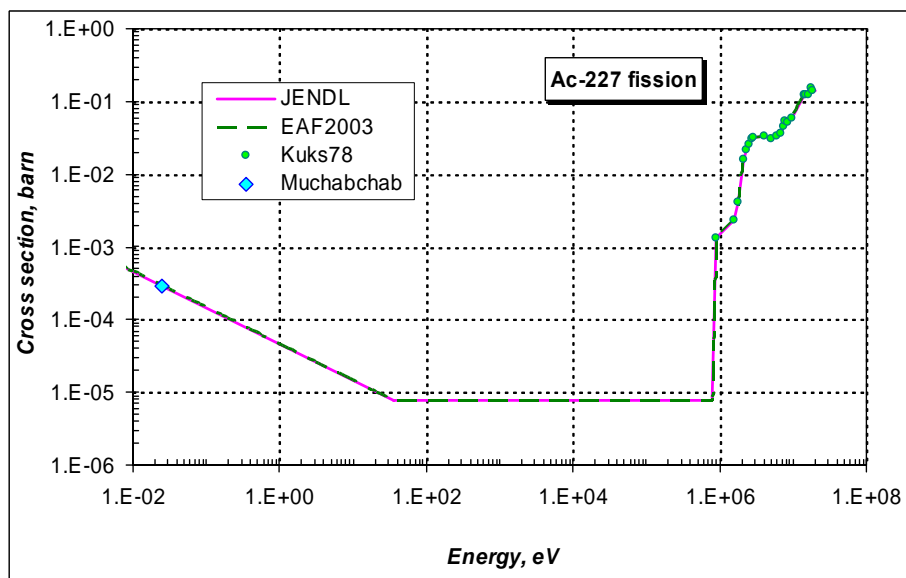


Рисунок 6 – Сравнение оцененных сечений деления Ac-227 с экспериментальными данными.

Заключение

Для Ac-227 принять в РОСФОНД оценку N.Takagi, 1988 (JENDL-3.3 = JEFF-3.1 = ENDF/B-VIIb2).

Для сечения захвата использовать оценку из библиотеки EAF-2003.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

90. ТОРИЙ

В библиотеке РОСФОНД представлены данные для природного тория и для 6 его долгоживущих изотопов.

90.1. Торий-227

Радиоактивен. ($T_{1/2}=18.72$ д). Испытывает альфа-распад в радий-223 и далее в результате цепочки альфа-распадов, а в конце и бета-распадов, превращается в свинец-207.

В современных библиотеках оцененных данных содержится одна полная оценка нейтронных данных для тория-227 N.Takagi, 1988: в JENDL-3.3, в JEFF-3.1, ENDF/B-VIIb2 и оценка R.A.Forrest, J. Kopecky для некоторых нейтронных сечений в активационной библиотеке EAF-2003.

На рисунке 1 показано сравнение сечения деления Th-227, принятого в библиотеках JENDL и EAF.

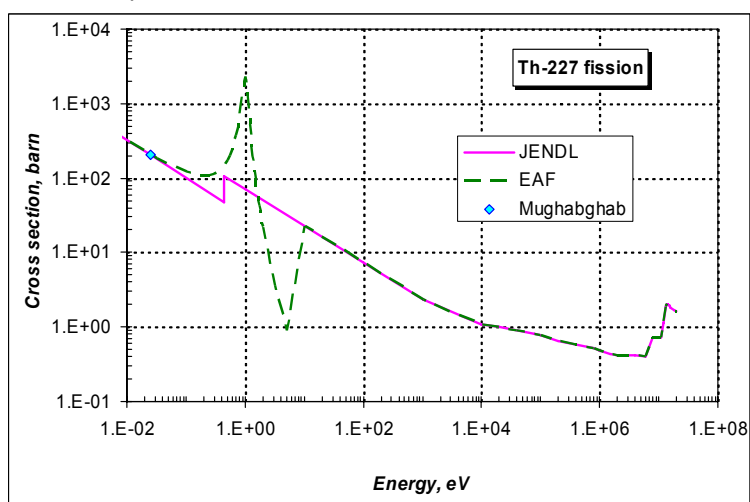


Рисунок 1 – Сравнение оцененных сечений деления Th-227.

На рисунке 2 показано сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов для Th-227.

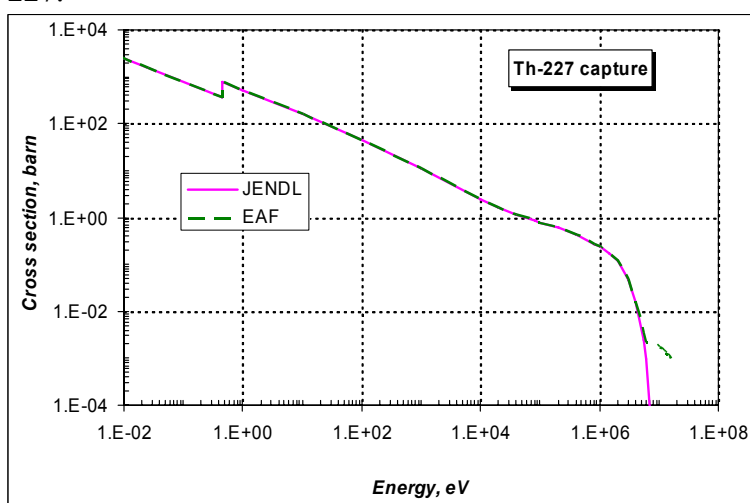


Рисунок 2 – Сравнение оцененных сечений радиационного захвата Th-227.

Из приведенного на рисунке 1 сравнения видно, что в оценке Forrestb и Корецку (EAF) имеется фиктивный резонанс, в то время, как в оценке Takagi сечение деления представляет собой гладкую функцию. Правомерность резонанса - сомнительна, особенно его “интерференционный минимум”, однако оценка Корецку выполнялась в более позднее время вкпе со всеми младшими актинидами и на основе единой систематики сечений. Именно поэтому замена сечения деления в JENDL оценкой Forrestb и Корецку, видимо, была бы целесообразной. Имеются всего две экспериментальные работы, в которых приводятся результаты измерения сечения деления в тепловой точке и на основе которых Мухабхаб в своей компиляции BNL-325 (1981 г.) приводит рекомендации для теплового сечения. Видно, что обе оценки согласуются в тепловой точке со значением Мухабхаба.

Согласно рисунку 2 сечения радиационного захвата Th-227 в обеих оценках практически совпадают, за исключением практически маловажной области энергий выше ~ 10 МэВ, где оценка Forrestb и Корецку представляется более закономерной. В оценке EAF-2003 приводятся также данные о сечениях реакций (n,p) и (n,alfa), отсутствующие в других оценках.

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из JENDL-3.3. Сечения деления и захвата откорректировать согласно оценке EAF-2003, включить данные о сечениях реакций с вылетом заряженных частиц и пересчитать полное сечение. Включить данные о выходах продуктов деления (оценка Ингланда (T.England) из ENDF/B-VI). Включить данные о запаздывающих нейтронах (8 групп) на основе данных JEFF-3.1, но с теми же спектрами, что и для урана-235.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

90.2. Торий-228

Радиоактивен. ($T_{1/2}=1.9131$ г). Испытывает альфа-распад в радий-224 и далее в результате цепочки альфа-распадов, а в конце и бета-распадов, превращается в свинец-208. Одним из промежуточных продуктов является таллий-208, испускающий при бета-распаде жесткое гамма-излучение.

В современных библиотеках оцененных данных содержится полная оценка N.Takagi (1988 г.) нейтронных данных в JENDL-3.3 и в JEFF-3.1. В оценке ENDF/B данные N.Takagi модифицированы R.Wright'ом в резонансной области энергий для версии VIIb2. Имеется еще и оценка R.A.Forrest, J. Корецку для некоторых нейтронных сечений в активационной библиотеке EAF-2003.

На рисунке 3 показано сравнение сечения деления Th-228, принятого в библиотеках ENDF/B-VIIb2 и EAF.

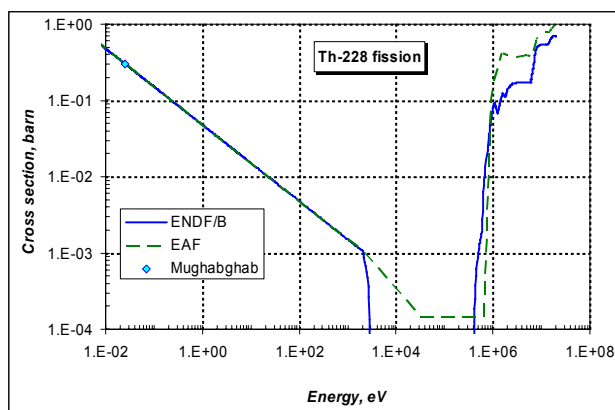


Рисунок 3 – Сравнение оцененных сечений деления Th-228.

Из приведенного на рисунке 3 сравнения видно, что сечение деления носит пороговый характер, и что оценка Forrestb и Корецку (EAF) отличается от оценки Takagi (JENDL) в области энергий выше 500 кэВ. Более подробно сравнение этих оценок представлено на рисунке 4.

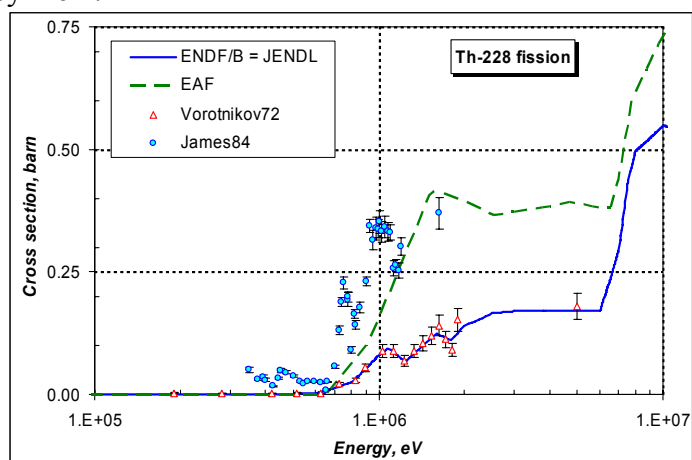


Рисунок 4 – Сравнение оцененных сечений деления Th-228 выше 100 кэВ.

В библиотеке EXFOR имеются две экспериментальные работы, в которых приводятся результаты измерения сечения деления в области энергий выше 500 кэВ. Это результаты группы Воротникова (1972 г.), и группы Джеймса (1984г.). Различия в сечениях вызваны тем обстоятельством, что Такаги проводит оценку сечения деления на основе данных группы Воротникова, а Forrestb и Корецку (EAF) за основу своей оценки взяли результаты измерений группы Джеймса. Исходя из соображений, что с все четно-четные изотопы тория имеют схожий характер сечения деления, а с ростом атомного номера величина первого “плато” понижается, можно предположить, что оценка Forrestb и Корецку (EAF) является более правдоподобной.

На рисунке 5 показано сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов для Th-228.

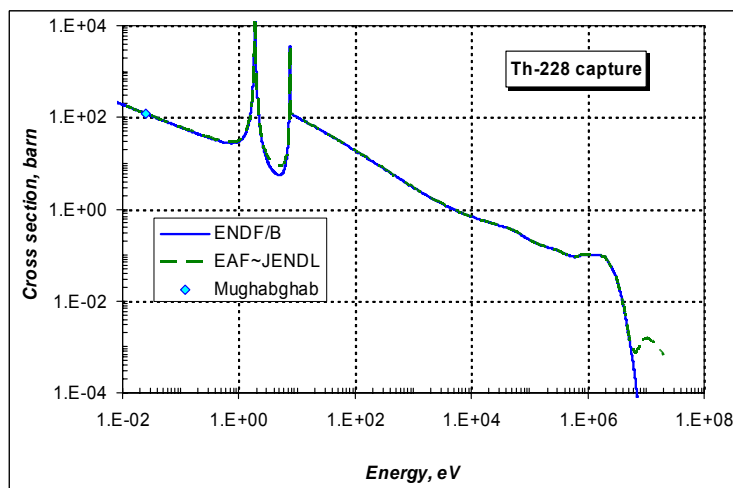


Рисунок 5 – Сравнение оцененных сечений радиационного захвата Th-228.

Согласно рисунку 5 сечения радиационного захвата Th-228 в обеих оценках практически совпадают, за исключением двух областей энергий, а именно: в области резонансных энергий и в области энергий выше ~ 6 МэВ. Никаких экспериментальных данных по измерению сечения радиационного захвата для Th-228 нет. Имеются только рекомендации Мухабхаба (BNL-325, 1981 г.). Поведение сечений в резонансной области энергий показано на рисунке 6.

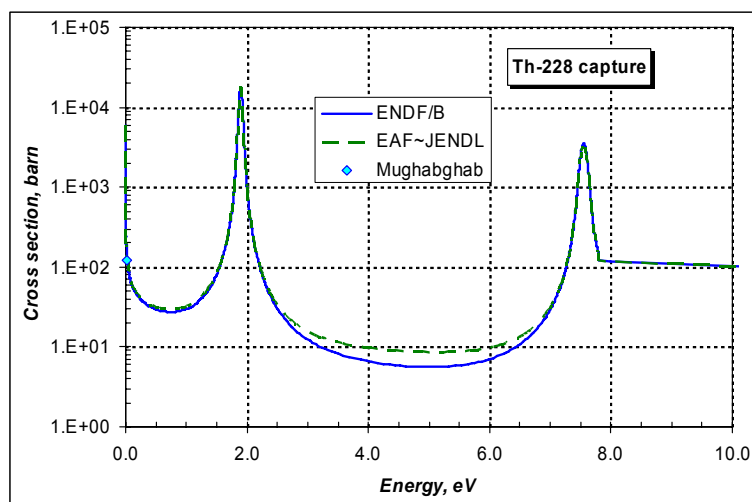


Рисунок 6 – Сечение радиационного захвата Th-228 в области энергий ниже 10 эВ.

Из рисунка 6 видно, что отличия в оценке определяются в межрезонансном диапазоне. Это различие вызвано тем обстоятельством, что для версии VIIb2 Райтом были добавлены 2 резонанса с энергией 9.363 эВ и 14.5 эВ, за границей области разрешенных резонансов, а для уравнивания вклада от этих резонансов в тепловое сечение им добавлен еще один резонанс с отрицательной энергией -10 эВ.

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из ENDF/B-VIIb2. Сечения деления и захвата откорректировать согласно оценке EAF-2003 и пересчитать полное сечение. Включить данные о запаздывающих нейтронах (8 групп) на основе данных JEFF-3.1, но с теми же спектрами, что и для урана-235.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

90.3. Торий-229

Радиоактивен. ($T_{1/2}=7880$ лет). Испытывает альфа-распад в радий-225, который, в свою очередь, путем бета-распада превращается в актиний-225 и далее в результате цепочки альфа-распадов, а в конце и бета-распадов, превращается в висмут-208.

В современных библиотеках оцененных данных содержится полная оценка нейтронных данных N.Takagi (1988 г.) - в JENDL-3.3 и в JEFF-3.1. В оценке ENDF/B данные N.Takagi модифицированы R.Wright'ом в резонансной области энергий для версии VIIb2. Имеется еще и оценка R.A.Forrest, J. Kopecky для некоторых нейтронных сечений в активационной библиотеке EAF-2003.

На рисунке 7 показано сравнение сечения деления Th-229, принятого в библиотеках ENDF/B-VIIb2 и EAF.

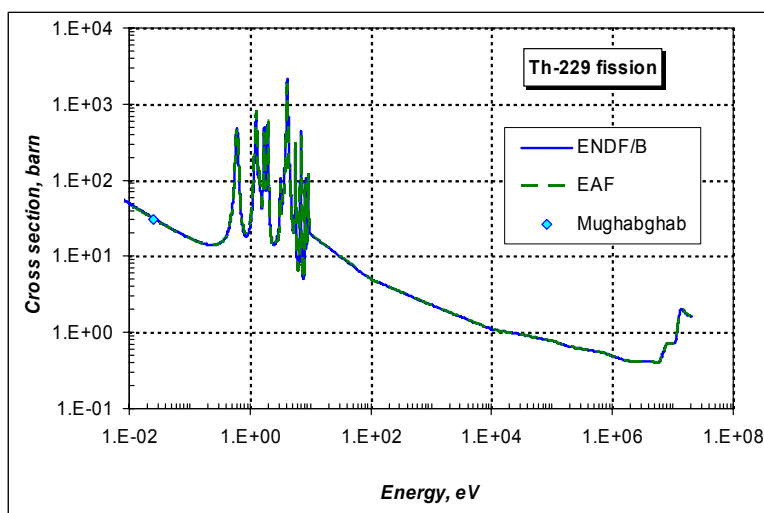


Рисунок 7 – Сравнение оцененных сечений деления Th-229.

Из приведенного на рисунке 7 сравнения видно, что сечения практически совпадают. Резонансная область энергий простирается до 10 эВ. Далее – область гладких сечений.

Имеется несколько наборов экспериментальных данных по измерению сечения деления Th-229. На рисунке 8 показано сравнение оцененных сечений с имеющимися экспериментальными данными в области энергий до 1 кэВ, а на рисунке 9 – аналогичное сравнение в области энергий выше 1 кэВ.

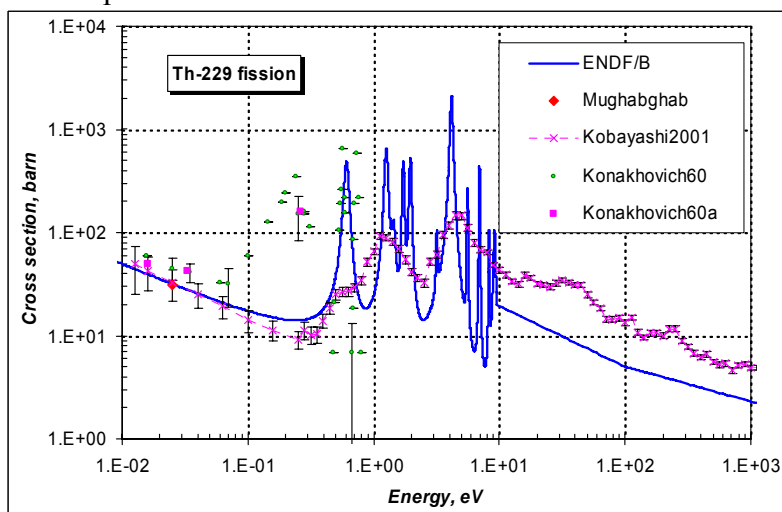


Рисунок 8 – Сравнение оцененных сечений деления Th-229 с экспериментальными данными в области энергий до 1 кэВ.

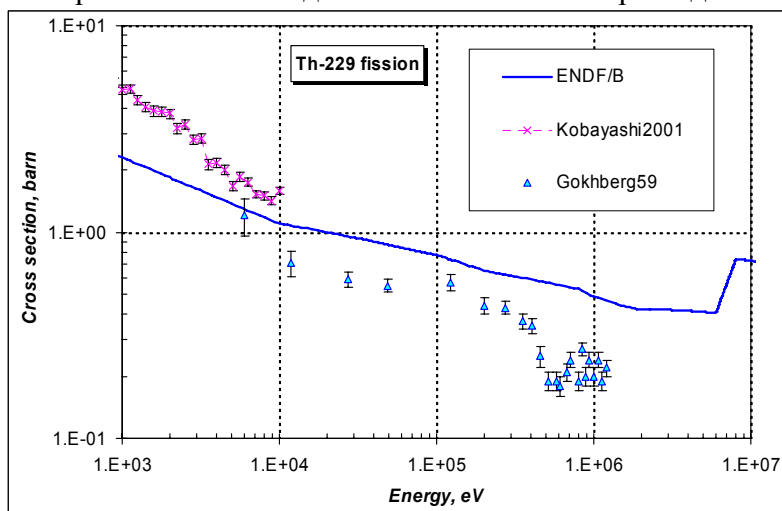


Рисунок 9 – Сравнение оцененных сечений деления Th-229 с экспериментальными данными в области энергий выше 1 кэВ.

Из приведенного на рисунке сравнения видно, что оцененное сечение не описывает экспериментальные данные в области энергий выше 10 эВ, т.е. в области гладких сечений.

О соответствии сечений и экспериментальных данных в области резонансных энергий из рисунка 8 и 9 сказать трудно. Здесь следует сравнивать интегральные характеристики, в частности, резонансный интеграл деления. В таблице 1 приводится сравнение резонансных характеристик с рекомендациями Мухабхаба.

Таблица 1 – Тепловые сечения и резонансные интегралы Th-229 (барн).

| Нуклид | Оценка | Тепловое сечение (E=0.0253 эВ) | | | Резонансный интеграл | |
|--------|---------|--------------------------------|----------|--------|----------------------|----------|
| | | Полное | Деление | Захват | Деление | Захват |
| Th-229 | ENDF/B | 105.1 | 31.6 | 63.4 | 443 | 1236 |
| | BNL-325 | | 30.8±1.5 | 61±6 | 466±75 | 1000±175 |

Из приведенной в таблице 1 информации видно, что оцененное сечение деления хорошо согласуется с рекомендациями Мухабхаба в пределах заявленной погрешности. Что касается сечения захвата, то оцененный резонансный интеграл захвата отклоняется от рекомендуемого Мухабхабом не намного более заявленной погрешности. Это является вполне приемлемым, поскольку никаких измерений сечения радиационного захвата на Th-229 нет.

В заключение, на рисунке 10 приведем сравнение оцененного сечения полного взаимодействия с единственным экспериментом Котэ, выполненным в 1961 году. Результаты эксперимента были использованы для определения резонансных параметров. Кроме эксперимента Котэ, для определения резонансных параметров были использованы результаты измерений групп Хохловича (1960 г.), Боллинджера (1963 г.) и Фелвинчи (1970 г.).

Из приведенного на рисунке 10 сравнения видно, что оцененное сечение из оценки ENDF/B хорошо согласуется и имеющимися экспериментальными данными.

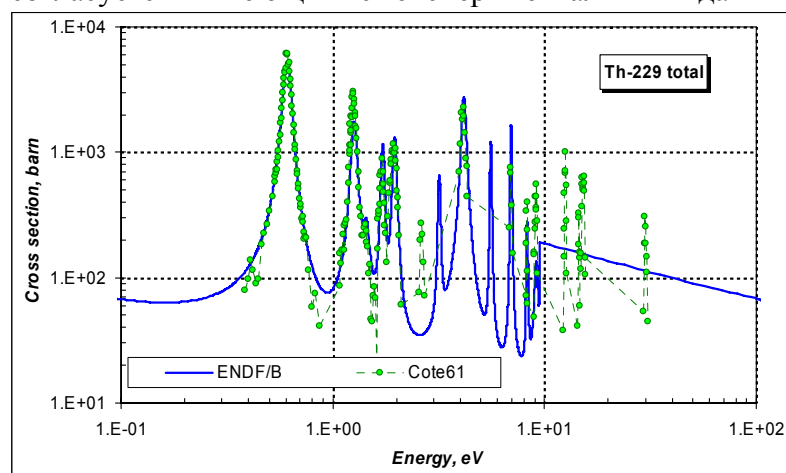


Рисунок 10 – Сравнение полного сечения Th-229 с экспериментальными данными.

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из ENDF/B-VIIb2, в котором сечение захвата выше 6 МэВ принято в соответствии с EAF-2003, где использовалась более совершенная модель расчета сечения, сечение деления выше 10 эВ откорректировано согласно экспериментальным данным Кобаяши. Полное

сечение получено как сумма парциальных. Включить данные о выходах продуктов деления (оценка Ингланда (T.England) из ENDF/B-VI). Включить данные о запаздывающих нейтронах (8 групп) на основе данных JEFF-3.1, но с теми же спектрами, что и для урана-235.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

90.4. Торий-230

90.4.1. Общие замечания

Радиоактивен. ($T_{1/2}=7.54 \cdot 10^4$ лет). Испытывает альфа-распад в радий-226, который далее в результате цепочки альфа-распадов, а в конце и бета-распадов, превращается в свинец-206.

В современных библиотеках оцененных данных, по существу, содержатся две полные оценки нейтронных данных для тория-230:

в JENDL-3.3 – оценка Ошава (T.Ohsawa), 1987,

в ENDF/B-VII – оценка Манна, 1977.

в JEFF-3.1 - оценка группы авторов (1982 г.) в основе, которой лежит оценка Манна (1977 г.).

Есть также оценка нейтронных сечений в EAF-2003, которая совпадает или близка к оценке Манна (1977 г.).

90.4.2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 0^+$.

2.2. Радиус рассеяния:

$R=8.3225$ (ENDF/B7); $R=10.925$ ферми(JENDL3.3)

2.3. Резонансные параметры

В ENDF/B – область разрешенных резонансов от 1.E-5 эВ – 251 эВ; в JENDL – область разрешенных резонансов от 1.E-5 эВ – 564 эВ. На рисунке 11 приводится сравнение суммы резонансов в зависимости от энергии.

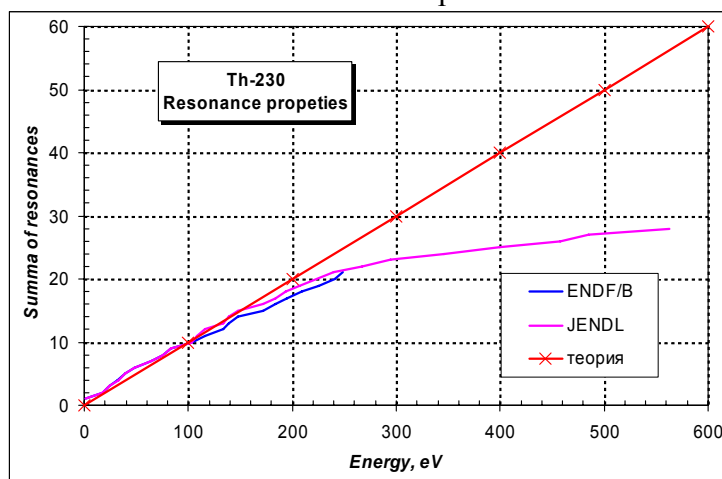


Рисунок 11 – Сравнение нарастающих сумм резонансов для Th-230.

Из приведенного на рисунке 11 сравнения видно, что до энергии 200 эВ в обеих оценках находится число резонансов близкое к теоретическому предсказанию. Далее начинается пропуск слабых резонансов, который увеличивается с ростом энергии. Так, в оценке JENDL в области энергий 500 эВ пропущено порядка двадцати резонансов. Их вклад в сечение радиационного захвата учитывается подложкой в файле гладких сечений, который составляет порядка нескольких десятков миллибарн.

В таблице 2 приводятся характеристики взаимодействия в тепловой и в резонансной областях энергии.

Таблица 2 – Тепловое сечение и резонансный интеграл для Th-230 (барн).

| Оценка | Взаимодействие | Тепловое сечение | Резонансный интеграл |
|------------|----------------|------------------|----------------------|
| ENDF/B-VII | полное | 29.0 | 1224. |
| | деление | 0.0 | 4.8 мбарн |
| | захват | 23.1 | 851. |
| JENDL-3.3 | полное | 32.3 | 1369 |
| | деление | 0.0 | 0.0 |
| | захват | 22.6 | 1039. |
| Мухабхаб | деление | <1.2 мбарн | - |
| | захват | 23.0±0.3 | 1007±35 |

Из приведенной в таблице 2 информации видно, что в тепловой области оценки ENDF/B-VII и JENDL-3.3 согласуются друг с другом и с рекомендациями Мухабхаба в пределах заявленной точности. В области резонансных энергий между оценками наблюдается расхождение в резонансном интеграле ~ 20%. С рекомендацией Мухабхаба согласуется оценка JENDL и расходится оценка ENDF/B.

2.4. Область неразрешенных резонансов отсутствует

Выводы:

Оценка резонансных параметров из JENDL является предпочтительнее, поскольку на ее наборе резонансных параметров восстановленные сечения лучше согласуются с рекомендациями Мухабхаба, чем сечения, полученные на основе оценки ENDF/B. В будущем целесообразно пополнить область разрешенных резонансов случайно расположенными фиктивными резонансами для учета пропущенных уровней.

90.4.3. Область гладких сечений: (MF=3)

В этой области энергий сечение деления носит пороговый характер. Сравнение оцененных сечений с имеющимися экспериментальными данными приводится на рисунке 12.

Из приведенного на рисунке 12 сравнения видно, что среди экспериментальных наборов данных имеются две совокупности, различающиеся между собой по величине сечения в области пика первого резонанса (~ 720 кэВ), и по величине сечения первого плато сечения в области энергий выше 1.0 МэВ. В комментариях для наиболее детальных экспериментальных данных Блонса (1980 г.) указывается, что измерение сечения проведено, главным образом, для определения формы кривой. В исследуемом образце содержание тория-230 было мало по сравнению с содержанием тория-232. Данные Muir'a

и Vesser'a (1973 г.) отличают то, что помимо измерения сечения деления в эксперименте измерялись и угловые распределения. В 1983 году группой Медоуза в EXFOR'e опубликованы результаты измерения сечения деления тория-230 относительно сечения деления урана-235, методика которых к тому времени считалась наиболее надежной. Учитывая эти факты, можно предположить, что оценка JENDL наиболее оптимально согласуется с экспериментальными данными в области энергий до 2 МэВ, а далее ее следовало бы поднять на уровень оценки ENDF/B. В этом случае улучшилось бы ее согласие с экспериментальными данными Медоуза.

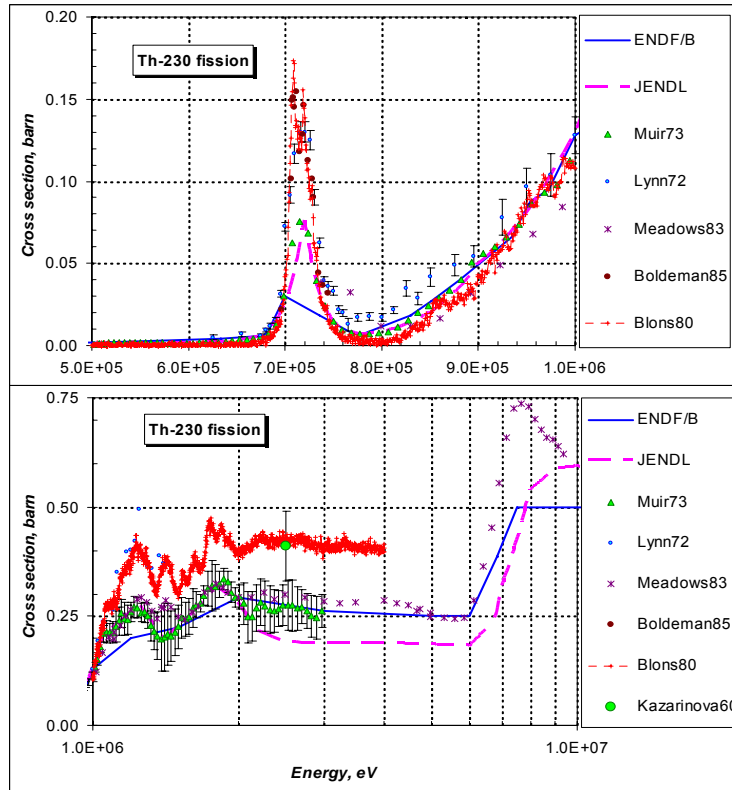


Рисунок 12 – Сравнение оцененных сечений деления Th-230 с экспериментальными данными в области энергий до 10 МэВ.

На рисунке 13 показано сравнение оцененных значений числа вторичных нейтронов на одно деление ядра тория-230. В обеих оценках за основу бралась систематика Хавертсона.

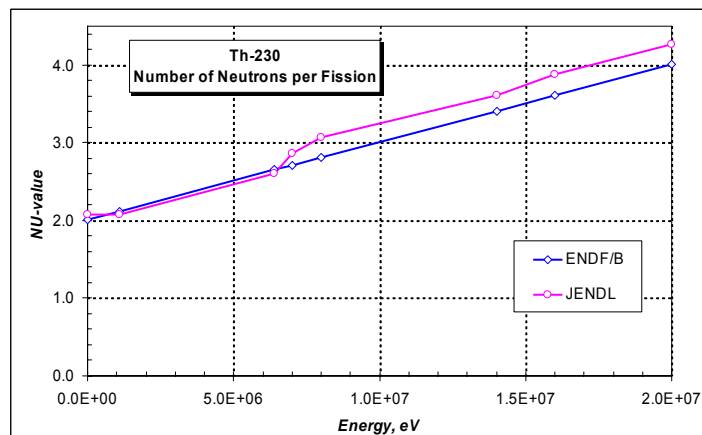


Рисунок 13 – Сравнение числа вторичных нейтронов деления для Th-230.

Отметим, что в оценке ENDF/B систематика Хавертона использовалась для оценки полного числа вторичных нейтронов деления, а в оценке JENDL – для оценки мгновенных нейтронов деления.

Сечение захвата для тория-230 известно намного хуже, чем сечение деления. На рисунке 14 показано сравнение между собой оцененных сечений радиационного захвата.

Экспериментальных измерений сечения радиационного захвата тория-230 в рассматриваемой области энергий нет. Поэтому, оценить степень надежности сечения, полученного в результате расчета по разным теоретическим моделям, представляется затруднительным. Отметим только, что в оценке ENDF/B расчет сечения радиационного захвата проводится Шентером и Манном по статистической модели, а в оценке JENDL наряду со статистической моделью привлекалась и оптическая модель, параметры для которой брались такими же, как и для тория-232. Как уже было видно и для других изотопов тория, в области энергий выше 6 МэВ оценка JENDL неоправданно занижает и без того низкое сечение радиационного захвата.

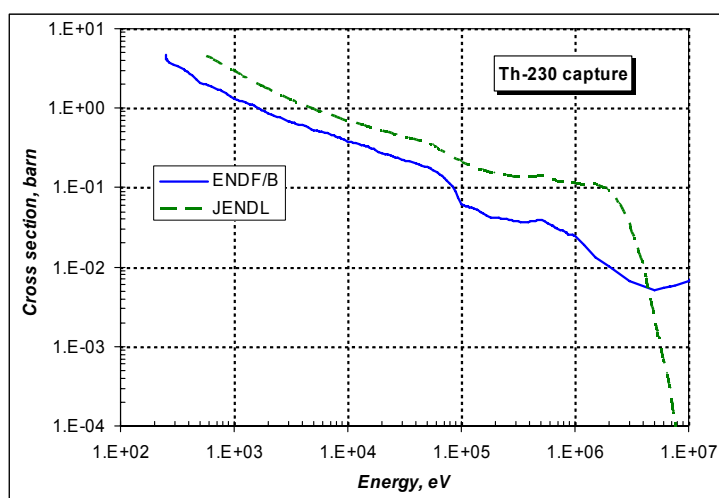


Рисунок 14 – Сравнение оцененных сечений радиационного захвата Th-230.

В конце, на рисунке 15 представлено сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния нейтронов. Для этого процесса взаимодействия, так же, отсутствуют какие либо экспериментальные данные.

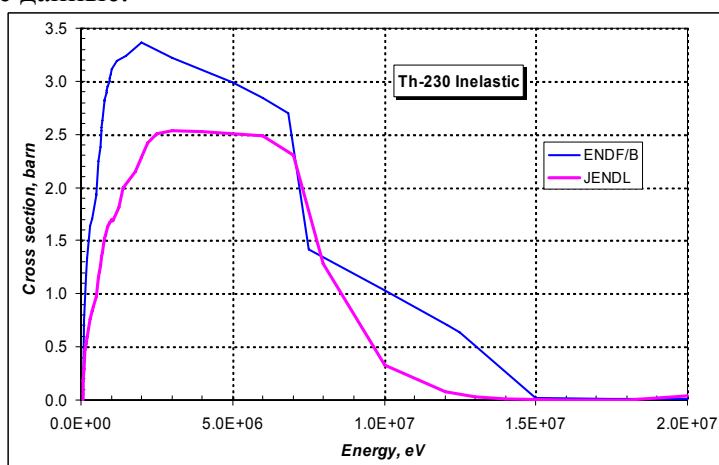


Рисунок 15 – Сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния на Th-230.

Для оценки процесса неупругого рассеяния в ENDF/B использовалась статистическая модель, в то время как в JENDL наряду со статистикой применялась и оптическая модель (как и в случае с радиационным захватом нейтронов).

Выводы:

На основе проведенного рассмотрения различных оценок нейтронных сечений и согласованности их с имеющимися экспериментальными данными следует, что для РОСФОНДА предпочтительнее использовать оценку JENDL.

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из JENDL-3.3. Сечение деления в области энергий выше 2 МэВ откорректировать согласно экспериментальным данным Медоуса и пересчитать полное сечение. Включить данные о выходах продуктов деления (В связи с отсутствием оцененных выходов продуктов деления для Th-230 принять оценку Ингланда (T.England) из ENDF/B-VI для Th-232). Включить данные о запаздывающих нейтронах (8 групп) на основе данных JEFF-3.1, но с теми же спектрами, что и для урана-235.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

90.5. Торий-231

Радиоактивен. ($T_{1/2}=25.5$ ч). Испытывает бета-распад в протактиний-231. Является продуктом альфа-распада урана-235. Источником может служить и реакция $^{232}\text{Th}(n,2n)$.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. Последняя оценка нейтронных сечений содержится в EAF-2003. Из нее следует:

$$\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})=10.8 \text{ барн}; R_{Ic}=16.1 \text{ барн}$$

$$\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})=100 \text{ барн}; R_{If}=449 \text{ барн}$$

Экспериментальных результатов для проверки оцененных данных не имеется.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку EAF-2003. Файл MF=8 удалить.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

90.6. Торий-232

Содержание в естественной смеси 100%

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие оцененные данные для тория-232:

JEFF-3.1 – оценка 2005 г., являющаяся компиляцией оценки минской группы и ENDF/B-VI.8 ;

JENDL-3.3 – оценка Ошава (T.Ohsawa) и др., 1987, с существенными модификациями в 1988, 1989, 1993 и 2001 гг.;

Минск 2001 – оценка В.М.Маслова и др., 2001;

БРОНД-3 – оценка А.В.Игнатюка и др., 2002; с существенными модификациями в 2004 и 2005 гг.;

ENDF/B-VII = NDS-2006 – новая оценка Секции ядерных данных МАГАТЭ и Мухабхаба (S.Muhaghab) и др., 2006.

Общие характеристики

- 1.1. $Z = 90$ -зарядовое число;
- 1.2. $A = 232$ (атомный вес);
- 1.3. $AW = 230.045$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = (1.405 \pm 0.006) 10^6$ лет, доминирует α -распад с вкладом $1.2 \cdot 10^{-8} \%$ спонтанного деления;

2 Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.1 Область разрешенных резонансов.

В JENDL-3.3 граница области разрешенных резонансов выбрана равной 3.5 кэВ, параметры резонансов взяты из компиляции [84M] и принят радиус потенциального рассеяния $R_0 = 10.01$ фм. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами были приняты значения 24.7 мэВ. Параметры отрицательного резонанса определены из условий описания рекомендованного сечения захвата тепловых нейтронов [84M]. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW.

В оценках JEFF-3.1 и Минск-2001 параметры разрешенных резонансов взяты из ENDF/B-VI. Они основаны на оценке резонансных параметров K.Olsen [84M] с верхней границей 4 кэВ и радиусом потенциального рассеяния 9.72 фм. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами были приняты значения 24.4 мэВ, а для вычисления нейтронных сечений - приближение MLBW., Чтобы достичь корректного описания наблюдаемых эпитепловых сечений было использовано 7 отрицательных резонансов

В 2004 г. В Ок-Ридже (ORELA) был выполнен новый анализ резонансных параметров на основе программы SAMMY с учетом всей совокупности экспериментальных данных по пропусканию и сечениям радиационного захвата нейтронов [04L]. Верхняя граница резонансов принята равной 4 кэВ и радиус потенциального рассеяния - 9.72 фм. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами принято значение 24.4 мэВ, и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении Рэйха-Мура. Параметры данного анализа были включены в оценку БРОНД-3 и NDS-2006 (=ENDF/B-VII).

Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

| Оценка | JENDL-3.3 | Минск-2001 | ENDF/B-VII(БРОНД-3) | Эксп. [06M] |
|-----------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------|
| полное | 11.472 | 20.35 | 20.35 | 20.95±0.12 |
| упругое | 11.471 | 12.95 | 13.02 | 13.55±0.08 |
| захвата | 7.40 | 7.40 | 7.34 | 7.35±0.03 |
| деления | $5.4 \cdot 10^{-5}$ | $1.18 \cdot 10^{-5}$ | $1.20 \cdot 10^{-5}$ | 0.052±0.040 |
| резонансный интеграл выше 0.5 эВ: | | | | |
| захвата | 85.0 | 85.9 | 84.2 | 83.3±1.5 |
| деления | 0.636 | .637 | 1.520 | -- |

Оценка ORELA, включенная в БРОНД-3 и ENDF/B-VII, наилучшим образом согласуется с экспериментальными данными, исключая данные по сечению деления тепловыми нейтронами, погрешность определения которого столь велика, что вряд ли здесь можно говорить о расхождении.

Граница области разрешенных резонансов – 4000 эВ.

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 1 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки ENDF/B-VI (=JEFF-3.1= Минск-2001) и ORELA (=ENDF/B-VII=БРОНД-3). Число s- резонансов примерно одинаково в обеих оценках, и линейному наклону числа резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0=16.6 \pm 0.2$ эВ. В то же время, отчетливо виден значительный пропуск в данных ORELA пропуск p-резонансов достаточно мал во всем диапазоне энергий до 4 кэВ, и линейному наклону нарастающей суммы резонансов соответствует значение $D_1=5.9 \pm 0.2$ эВ. Отношение $D_0/D_1=2.81 \pm 0.15$ в пределах погрешности согласуется со статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, и это свидетельствует о хорошей согласованности результатов анализа полного числа резонансов.

На рис. 1 представлены также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин s- и p-резонансов, включенных в рассматриваемые оценки. Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов обычно привлекают анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Так как это распределение уже использовалось в программе SAMMY при восстановлении параметров резонансов, то пропуск полученных резонансов не выходит за пределы статистической ошибки найденного числа резонансов. Наклону кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин соответствуют силовые функции $S_0=(0.84\pm 0.04) 10^{-4}$ и $S_0=(1.58\pm 0.10) 10^{-4}$.

На рис. 2 и 3 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для полных нейтронных сечений некоторые разногласия в нейтронных ширинах резонансов не выходят за пределы погрешностей экспериментальных данных.

Для сечений захвата нейтронов основная масса данных получена для сечений захвата, усредненных по многим резонансам (рис. 3). Разногласия оценок радиационных ширин проявляются, в основном, в межрезонансных минимумах, и различия оценок ниже первого резонанса обусловлено их ориентировкой на различные экспериментальные данные.

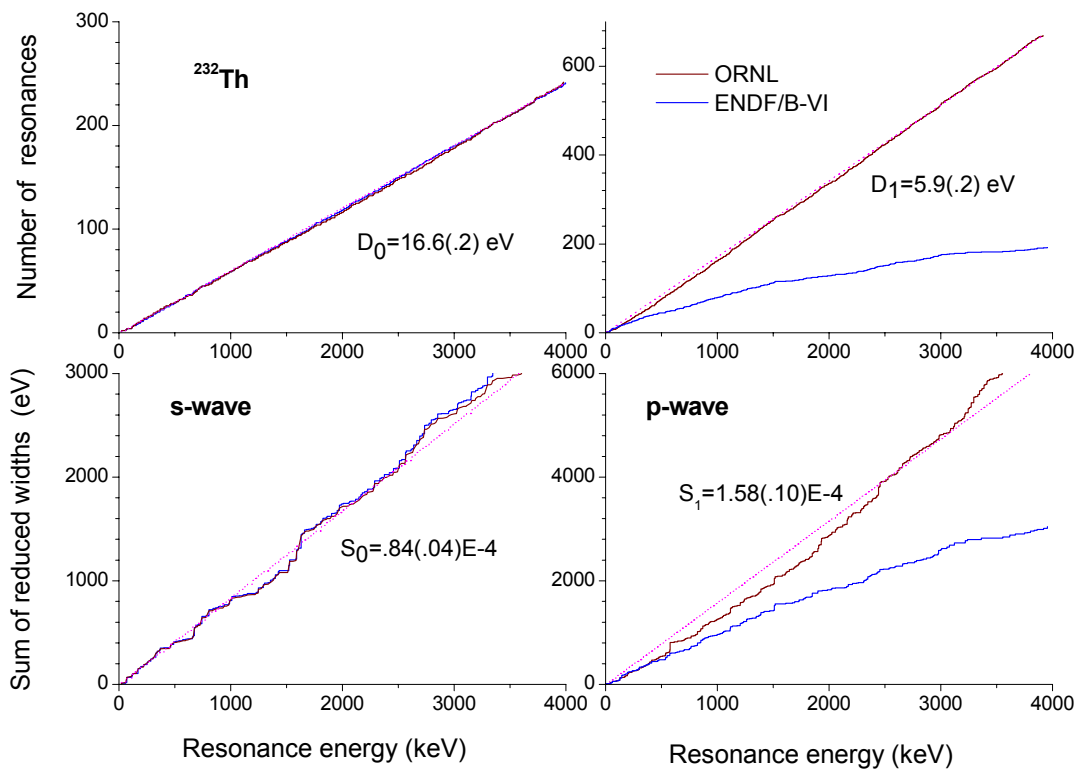


Рис. 1. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин в оценках ENDF/B-VI и ORELA

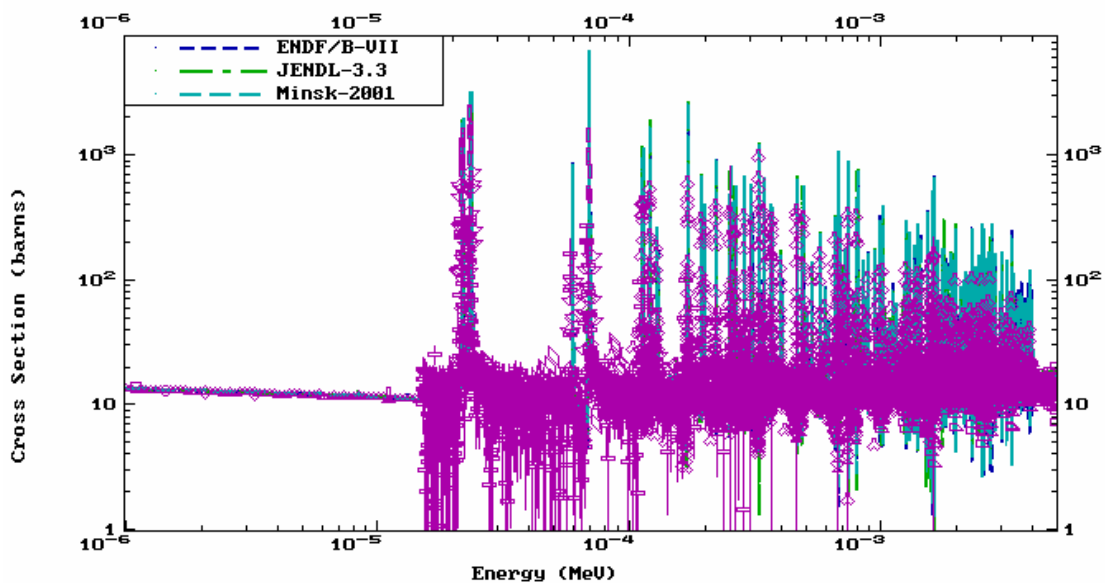


Рис. 2. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

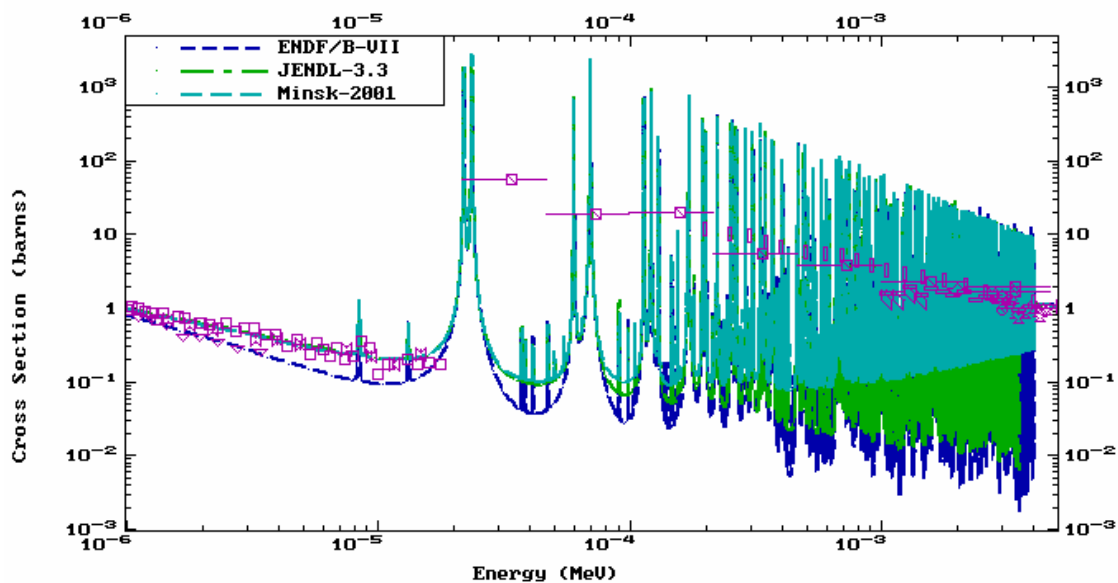


Рис. 3. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

2.3 Область неразрешенных резонансов:

Область неразрешенных резонансов включена во все оценки, и ее верхняя граница принята равной 50 кэВ в JENDL-3.3, БРОНД-3 и ENDF/B-VII и 150 кэВ в Минск-2001 (=JEFF-3.1). Во всех оценках нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и радиационные ширины определены из анализа разрешенных резонансов, S_2 и эффективный радиус получены на основе расчетов по оптической модели, и среднее расстояние между уровнями D_0 определено таким образом, чтобы оптимально воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов в рассматриваемом диапазоне энергий. Некоторые различия в выборе силовых функций и радиационных ширин в значительной степени компенсируются при подгонке расчетных сечений к одним и тем же экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов.

На рис. 4 и 5 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для области неразрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для полных сечений трудно отдать предпочтение какой-либо из оценок, так как все они в пределах погрешностей согласуются с экспериментальными данными. Однако, для сечений захвата оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII являются предпочтительными, так как они подогнаны к недавним экспериментальным данным [04A, 04B], измеренным с очень малой погрешностью ~ 2-3 %.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, в области разрешенных резонансов небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. Однако оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII, в которые включен новый набор резонансных параметров, полученных в 2005 г. в Ок-Ридже, следует признать более полными и согласованными. Эти же оценки являются предпочтительными и для области неразрешенных резонансов, так как их параметры подогнаны к прецизионным экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов, полученным в 2004 г. на нейтронных спектрометрах Гиля и ЦЕРН. Впрочем, оценка минской группы в области неразрешенных резонансов соответствует экспериментальным данным не хуже предыдущих оценок, хотя полное сечение и лежит менее, чем на 0.5 барна ниже ENDF/B-VII.

81O D.K. Olsen and R.W. Ingle, ORNL/TM-7661(ENDF-307),1981.

81M S.Mughabghab et al., Neutron Cross Sections, Academic Press, NY,1984, part B.

04A A.Aerts et al., Report DAPHIA-04-125 (2004).

04B K.Volev et al., Nuclear Data for Science and Techology (Santa Fe, 2004), 2005, p. 87.

04L L.C. Leal, H. Derrien, Proc. RCM on Data for Th-U Fuel Cycle (Vienna, December 2004), INDC(NDS)-0494, IAEA, Vienna

06M S.Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY,2006.

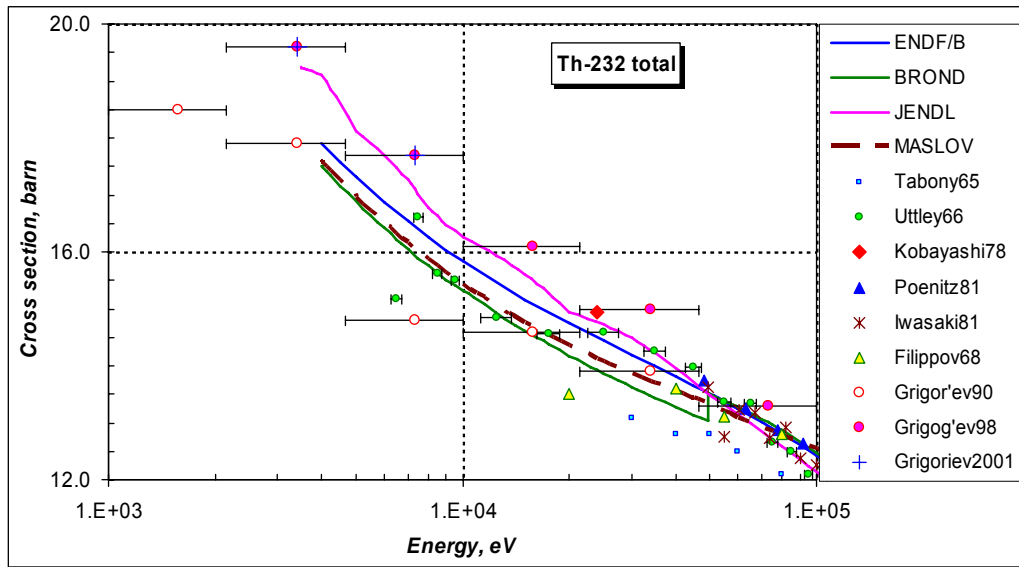


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

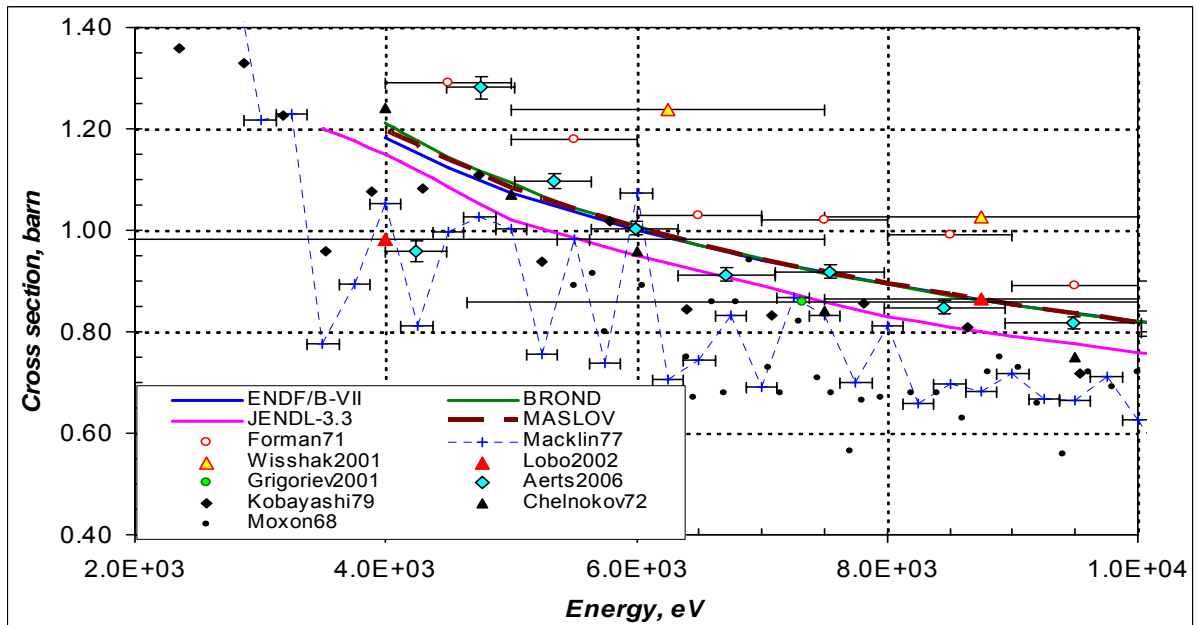


Рис.5а. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов. Результаты интервальных измерений снабжены горизонтальными «усами»

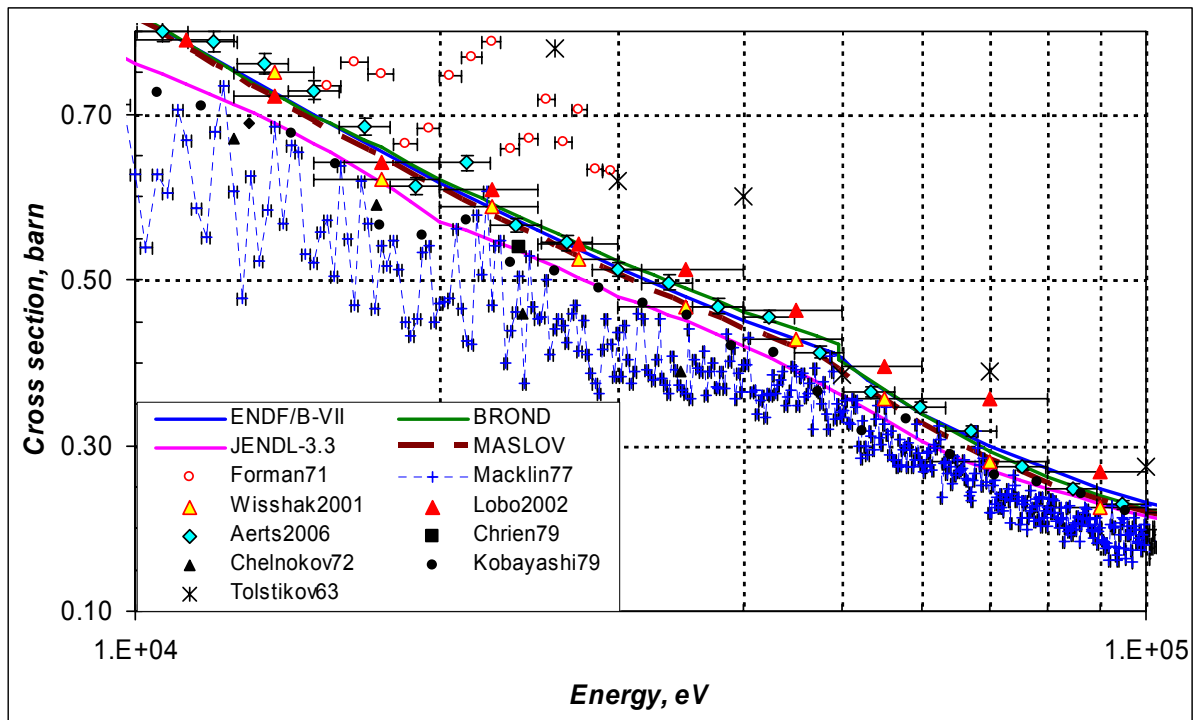


Рис.56. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов. Результаты интервальных измерений снабжены горизонтальными «усами»

3. Нейтронные сечения вне резонансной области

3.1. Полное сечение

Имеется достаточно много экспериментальных данных по полным нейтронным сечениям вне резонансной области. В последние годы были выполнены прецизионные измерения полных сечений ^{238}Th [01Ab], в которых достигнута погрешность данных менее 1%. Эти данные позволяют надежно определить параметры обобщенного оптического потенциала, который затем широко используется для расчетов сечений неупругих процессов, а также угловых распределений рассеянных нейтронов. Соответствующие расчеты были проведены для оценки БРОНД-3, и их результаты показаны на рис. 6 в сравнении с имеющимися экспериментальными данными и другими оценками сечений. Разногласия между различными оценками столь малы, что их трудно заметить на рисунке, но на основе статистических критериев описания данных можно показать, что оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII (=NDS-2001) обеспечивают наилучшую аппроксимацию экспериментальных данных с малыми погрешностями.

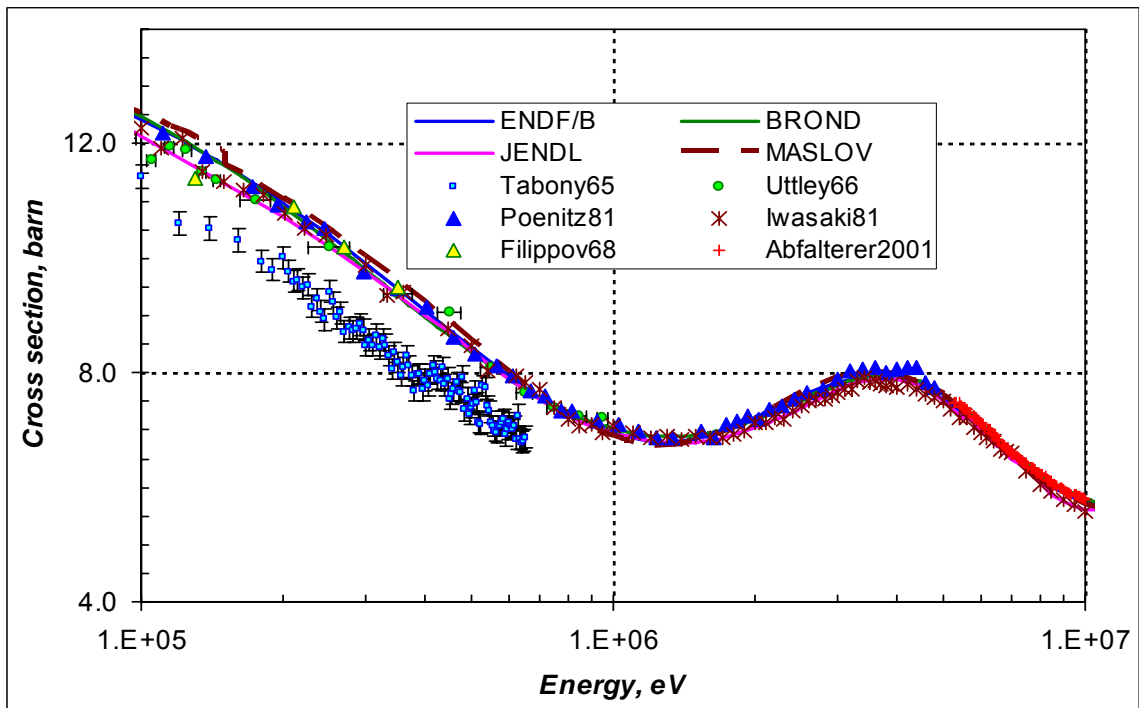


Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений вне резонансной области резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3.2. Упругое рассеяние и угловые распределения нейтронов

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 7 показано сравнение оценок интегральных сечений упругого рассеяния нейтронов с имеющимися экспериментальными данными. Все оценки согласуются с данными, но надо признать, что точность экспериментальных данных сравнительно не велика. В этих условиях можно ожидать, что более корректной для сечений упругого рассеяния будут оценка, в которой достигнуто лучшее описание данных по угловым распределениям упруго рассеянных нейтронов.

На рис. 8 для шести энергий нейтронов показано сравнение оценок угловых распределений с соответствующими экспериментальными данными. Аналогичные результаты имеются также для ряда промежуточных и более высоких энергий. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, как правило, осуществляются на основе расчетов по оптической модели, и можно видеть, что все рассматриваемые оценки хорошо описывают имеющиеся экспериментальные данные.

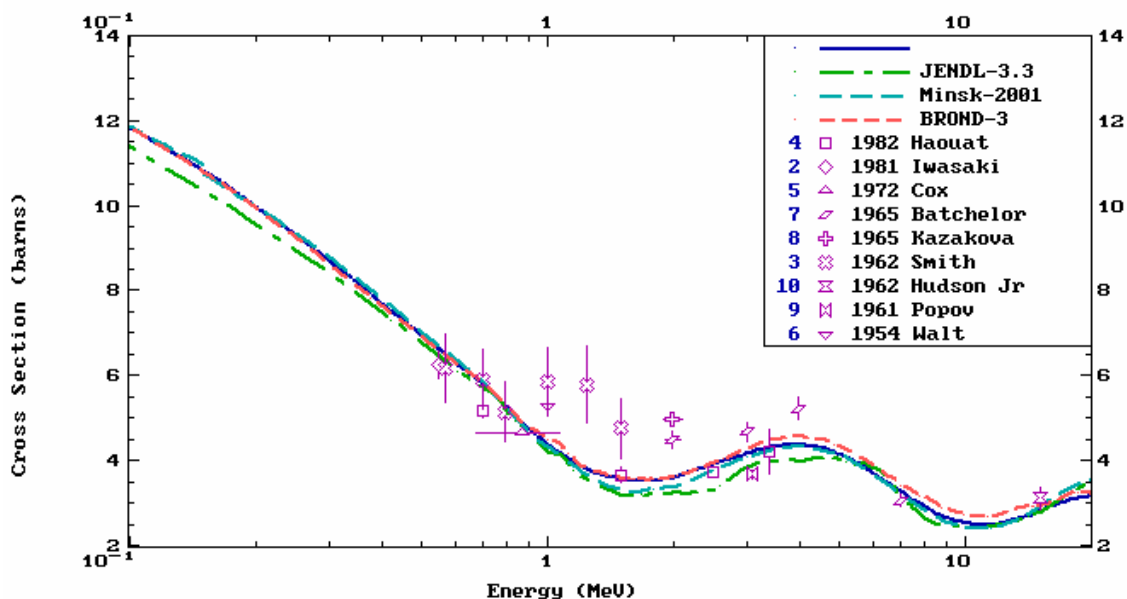


Рис. 7. Оценки сечений упругого рассеяния нейтронов в сравнении с экспериментальными данными

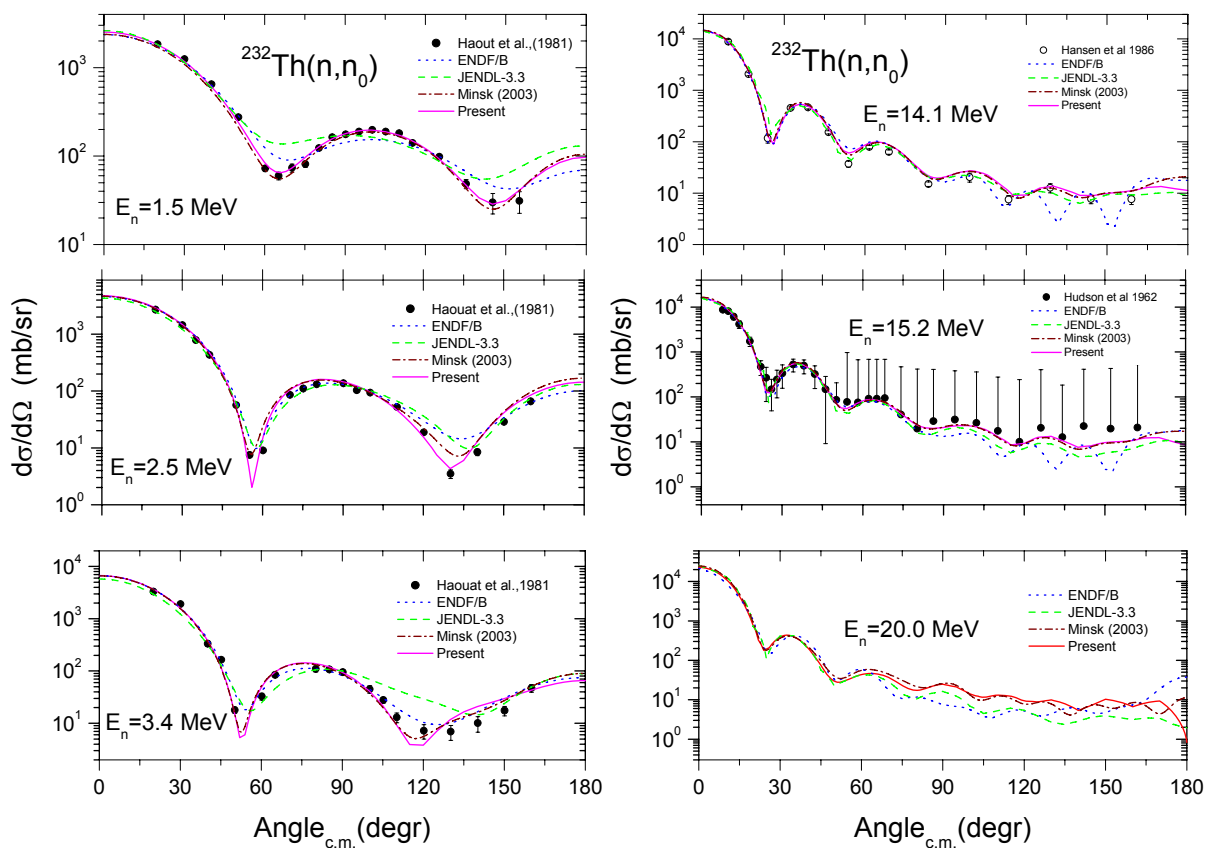


Рис. 8. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов при различных энергиях в сравнении с экспериментальными данными (Present = БРОНД-3)

3.3 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты, и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

В JENDL-3.3 рассматривался спектр 20 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в файле Минск-2001 учитывался 31 уровень, в БРОНД-3 - 40 уровней и в ENDF/B-VII – 39 уровней. Так как при увеличении числа уровней соответствующим образом изменяется порог статистического описания уровней, так называемый континуум уровней, то различия в числе рассматриваемых уровней не должно заметно отражаться на оценках полного (интегрального) сечения неупругого рассеяния.

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 9. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели, а также различием моделей расчета вкладов прямых и предравновесных процессов, существенных для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Оценки JENDL-3.3 и Минск-2001 представляются несколько завышенными как в области максимума, так и для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Оценки в БРОНД-3 и ENDF/B-VII дают очень близкие значения сечений во всем диапазоне энергий.

Экспериментальные данные по неупругому рассеянию нейтронов имеются также для рассеяния на нескольких низколежащих уровнях, но точность таких данных не очень велика. На рис. 10 и 11 показано сравнение оценок с экспериментальными данными по рассеянию нейтронов на первых двух уровнях. Для первого уровня все оценки удовлетворительно согласуются с данными, но разброс данных весьма значителен. Для энергий нейтронов выше 2 МэВ наиболее надежными являются данные [82Н], и БРОНД-3 лучше других оценок согласуется с этими данными.

Для второго уровня разброс экспериментальных данных еще более значителен, и в этих условиях трудно обосновать предпочтение какой-либо из оценок.

Для угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов все оценки учитывают вклад прямых процессов для уровней ротационной полосы, который приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов. На рис. 12 показаны оценки угловых распределений нейтронов, рассеянных на первом возбужденном уровне, в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Погрешности данных достаточно велики, и вряд ли можно обосновать на их основе какой либо выбор предпочтительной оценки.

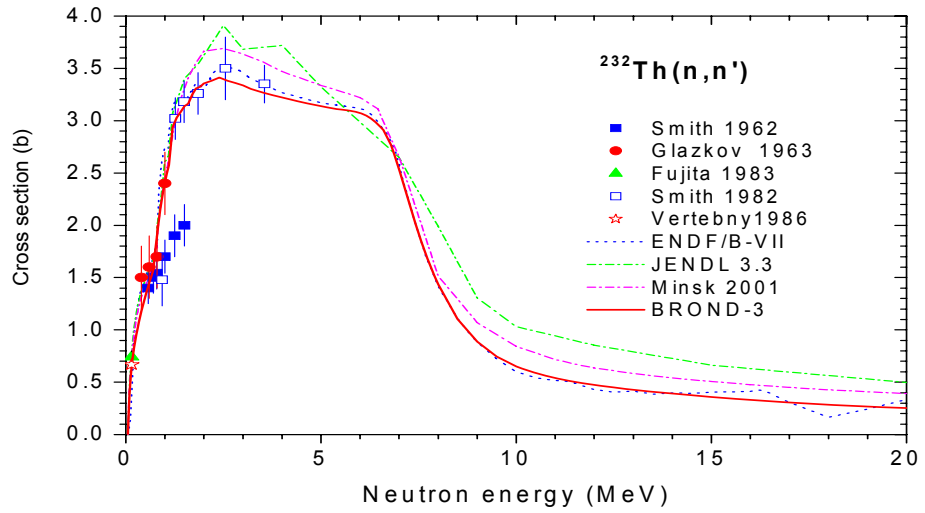


Рис. 9. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов в сравнении с экспериментальными данными

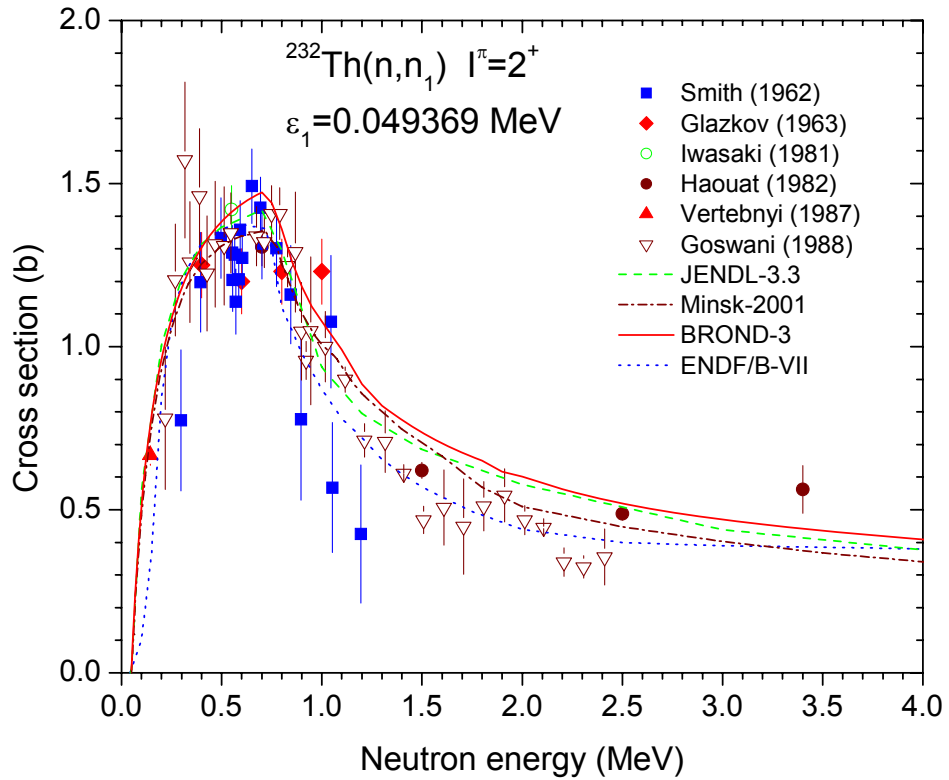


Рис. 10. Оценки сечения неупругого рассеяния нейтронов на первом возбужденном уровне ^{232}Th

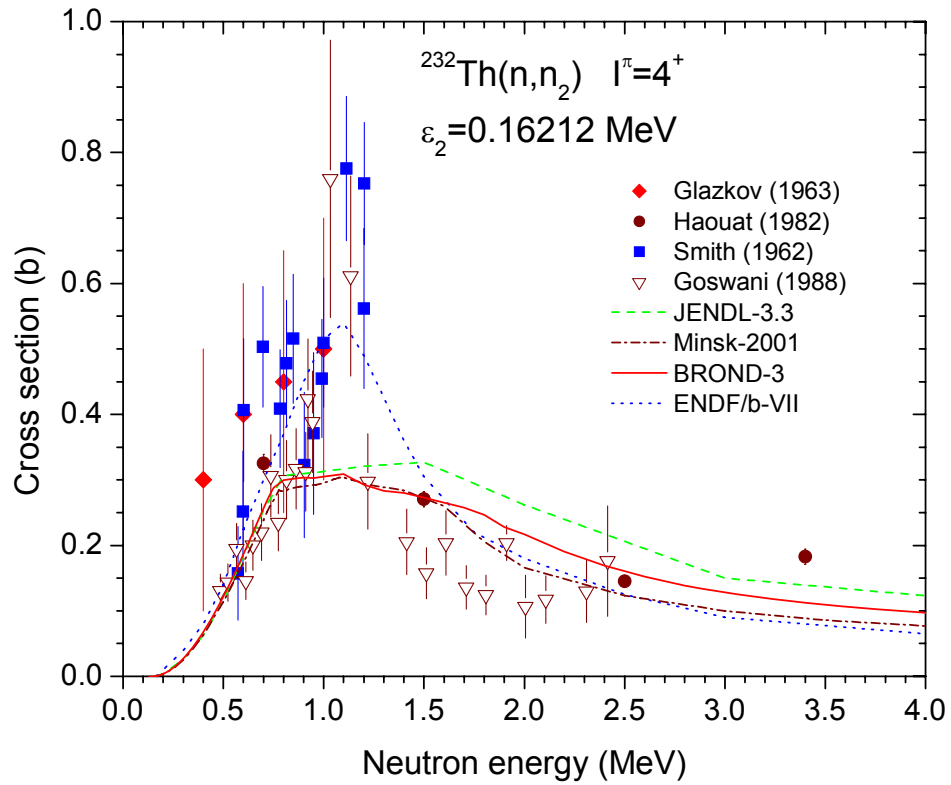


Рис. 11. Оценки сечения неупругого рассеяния нейтронов на втором уровне ^{232}Th

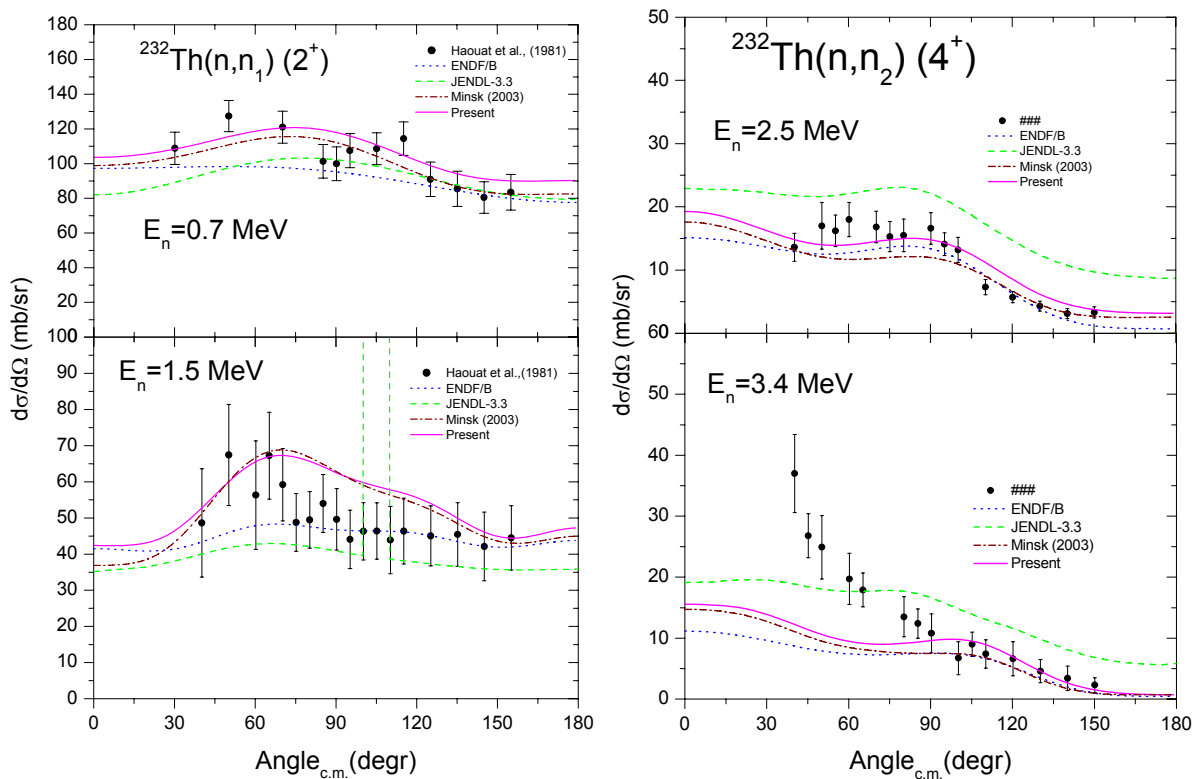


Рис. 12. Оценки угловых распределений рассеяния нейтронов на первом возбужденном уровне ^{232}Th при различных энергиях налетающего нейтрона (Present = БРОНД-3)

3.3. Сечение радиационного захвата нейтронов

Экспериментальные данные по сечению радиационного захвата нейтронов вне резонансной области весьма многочисленны, но разногласия между ними превышают требуемые точности оценки сечений захвата. На рис. 13 данные, имеющиеся в EXFORe, показаны в сравнении с оценками. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия в области энергий выше 400 кэВ обусловлено различными приближениями в описании конкуренции радиационных и нейтронных ширин на начальных этапах каскада гамма-переходов. В области энергий выше 8-10 МэВ во всех оценках рассматривается механизм прямого-коллективного захвата нейтронов, но приближения, привлекаемые для его описания, различаются весьма значительно. Следует, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 1 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не оказывает сколько-либо заметного влияния на расчеты характеристик ядерных реакторов.

Разногласия оценок в области энергий ниже 1 МэВ обусловлены выбором экспериментальных данных, которым отдано предпочтение при подборе модельных параметров в соответствующих расчетах. В увеличенном масштабе сравнение оценок с экспериментальными данными в диапазоне энергий от 100 кэВ до 1 МэВ показано на рис. 13, где приведены данные недавних измерений [04A, 04B], заявленные погрешности которых составляют всего 2-3 %, которые заметно расходятся с оценкой Минск-2001, но достаточно хорошо согласуются с БРОНД-3 и ENDF/B-VII. Однако если принять весьма высокую точность результатов Аэрста, то следовало бы описывать в оценке и проявившуюся в этих измерениях gross-структуру. Альтернативой является предположение, что эта структура является следствием не учтенных экспериментаторами погрешностей.

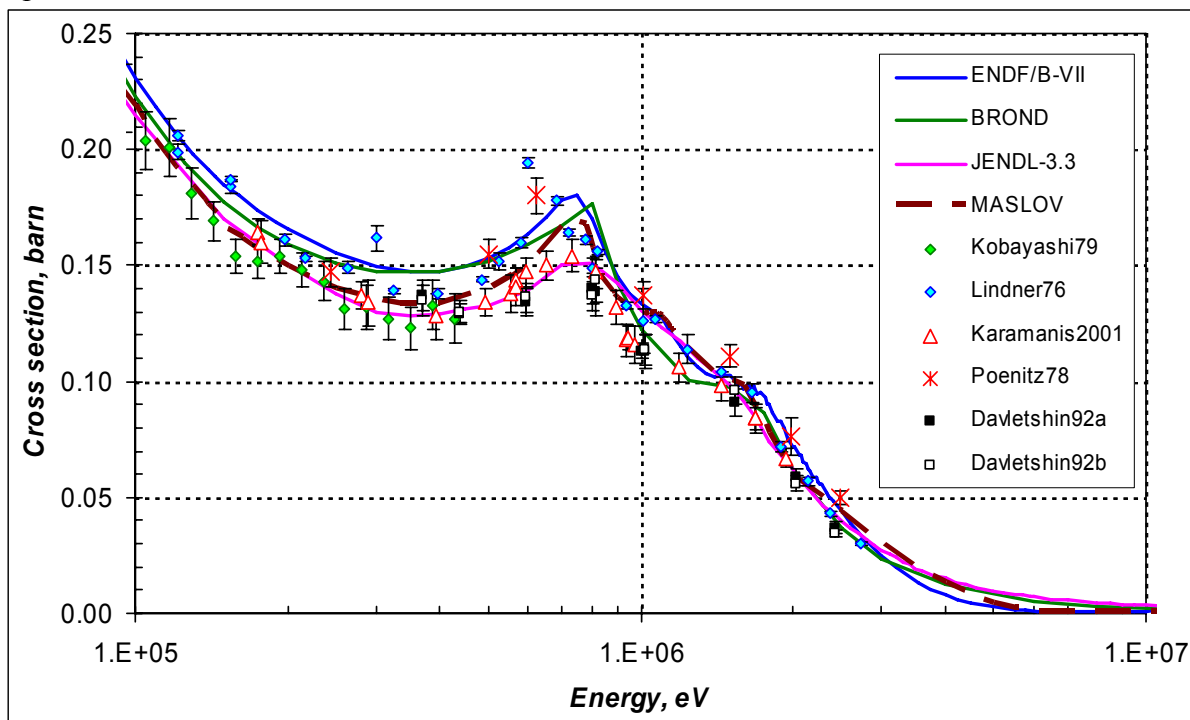


Рис. 13. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов вне резонансной области в сравнении с экспериментальными данными

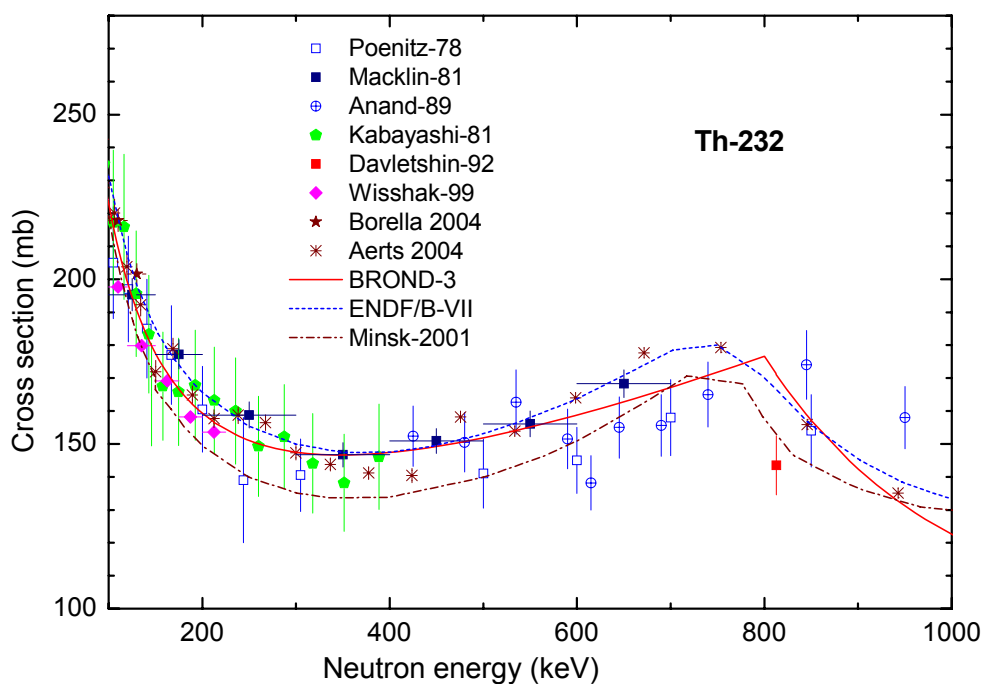


Рис. 14. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов в сравнении с экспериментальными данными для диапазона энергий от 100 до 1000 кэВ

3.5. Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT= 17)

Оценки сечений реакций (n,2n) показаны на рис. 15. Имеется достаточно много экспериментальных данных для этого сечения, и результаты измерений последних лет находятся в удовлетворительном согласии. Оценку JENDL-3.3 несомненно, следует признать заниженной во всем диапазоне энергий, но остальные оценки хорошо согласуются между собой и с экспериментальными данными.

Оценки сечений реакций (n,3n) показаны на рис. 16 в сравнении с единственной экспериментальной точкой. Все оценки находятся в удовлетворительном согласии, но без дополнительной информации вряд ли оправдано предпочтение любой из них.

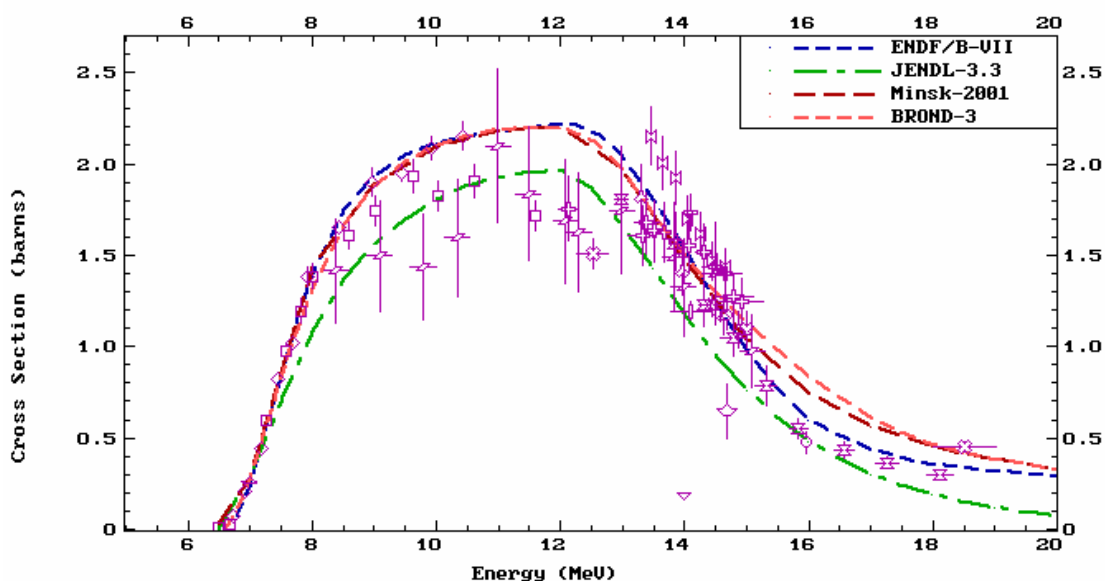


Рис. 15. Оценки сечений реакции (n,2n) в сравнении с экспериментальными данными

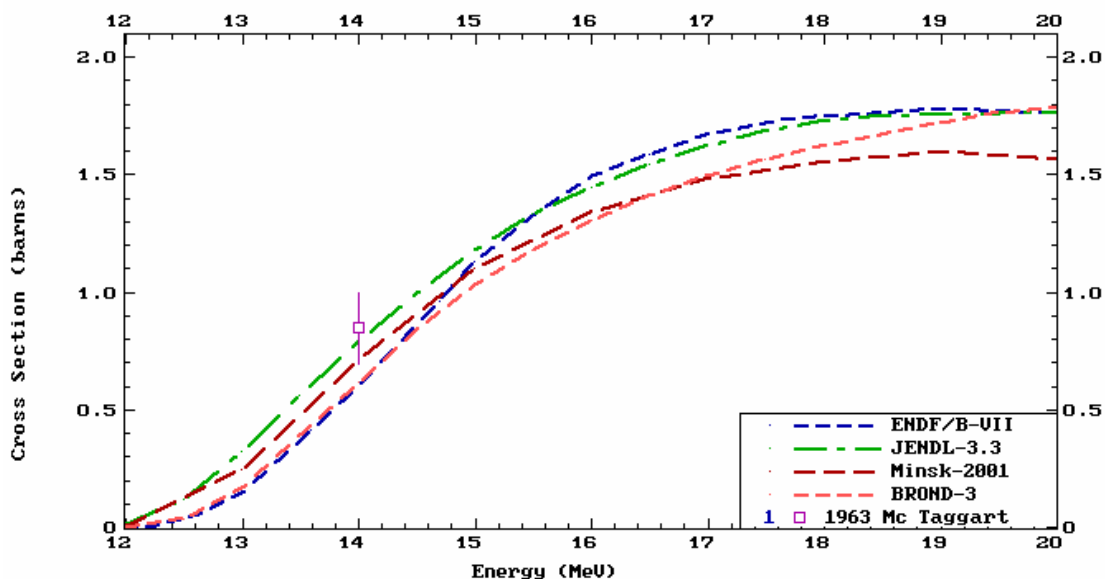


Рис. 16. Оценки сечений реакции $(n,3n)$ в сравнении с экспериментальными данными

3.7. Реакция деления

Для сечений деления имеется большой объем экспериментальных данных, и все оценки сечений деления оказываются достаточно близкими. Имеющиеся данные показаны на рис. 17 в сравнении с оценками. Для БРОНД-3, наряду с теоретическими расчетами в рамках оптико-статистической модели, был проведен полный статистический анализ всей совокупности экспериментальных данных, результаты которого приняты в качестве оценки БРОНД-3. На основе нового метода статистического учета систематических погрешностей экспериментальных данных были определены рекомендуемые погрешности оцененных сечений деления и определена ковариационная матрица погрешностей. Важной особенностью полученной ковариационной матрицы является достаточно большие значения далеких недиагональных элементов, отражающие корреляции рекомендуемых данных в широких энергетических интервалах.

На основе экспериментальных данных предпочесть какую-либо из оценок весьма трудно. ENDF/B-VII, вероятно, лучше описывает околопороговые структуры сечений деления, анализу которых было уделено специальное внимание. Оценка Минск-2001 кажется несколько завышенной в области первого плато сечения деления, что обусловлено выбором экспериментальных данных, на которые в первую очередь ориентировалась оценка. Оценка БРОНД-3 обеспечивает наилучшее статистическое описание всей совокупности данных с учетом их скорректированных погрешностей.

Наряду с сечениями деления одной из важнейших характеристик делящихся ядер является множественность нейтронов деления. Оценки числа вторичных нейтронов, испускаемых при делении ^{232}Th , приведены на рис. 18 совместно с имеющимися экспериментальными данными. Значительных расхождений в оценках нет, но ввиду достаточно высоких требований к точности оценки множественности нейтронов деления, для БРОНД-3 оценка была выполнена на основе статистического анализа всей совокупности экспериментальных данных.

01A W.P.Abfalterer et al. Phys. Rev. **C63** (2001) 044608.

04A A.Aerts et al., Report DAPHIA-04-125 (2004).

04B A.Borella et al., Nucl. Data for Science and Techology (Santa Fe, 2004), 2005, p. 87.

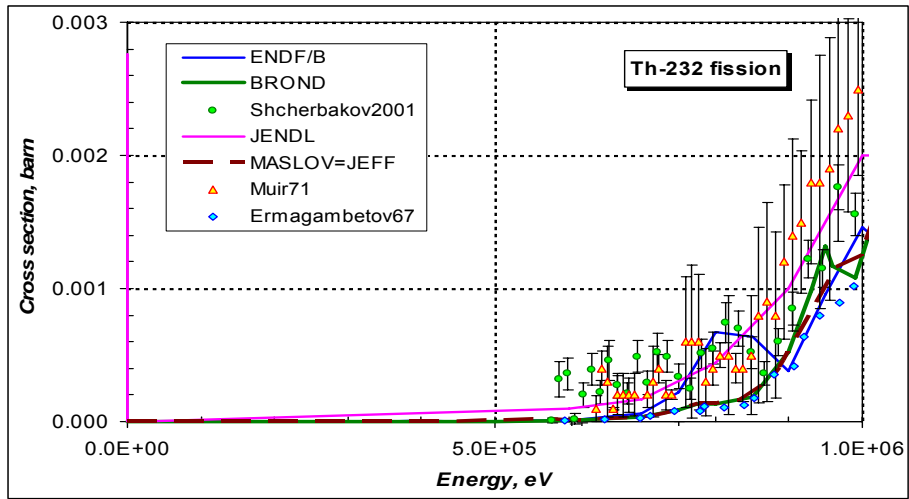


Рис. 17а Сечение деления ^{232}Th

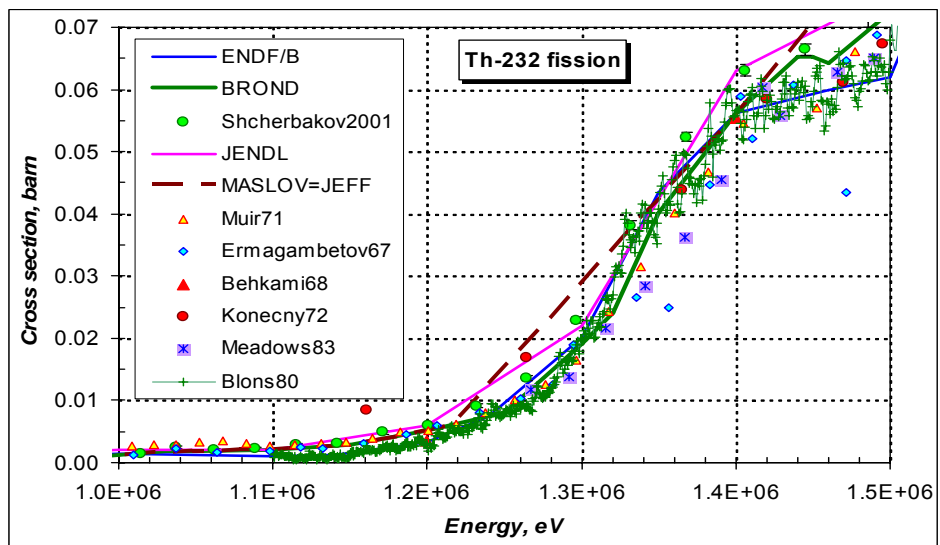


Рис. 17б Сечение деления ^{232}Th

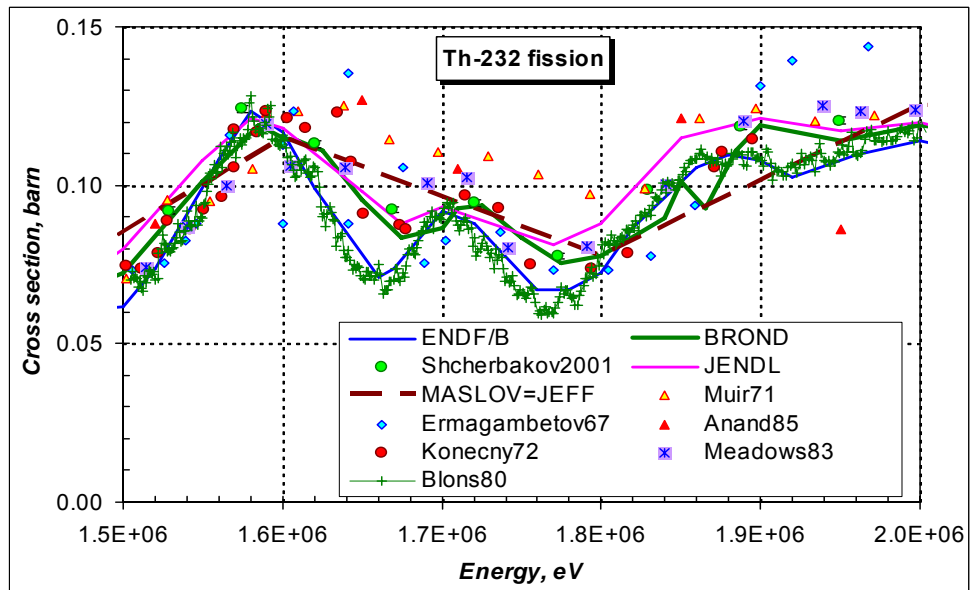


Рис. 17в Сечение деления ^{232}Th

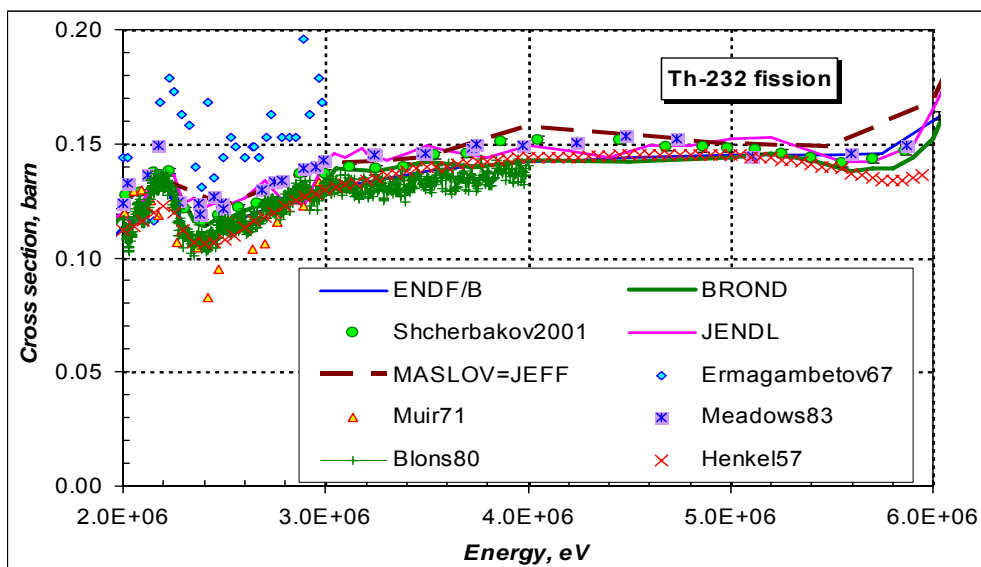


Рис. 17г Сечение деления ^{232}Th

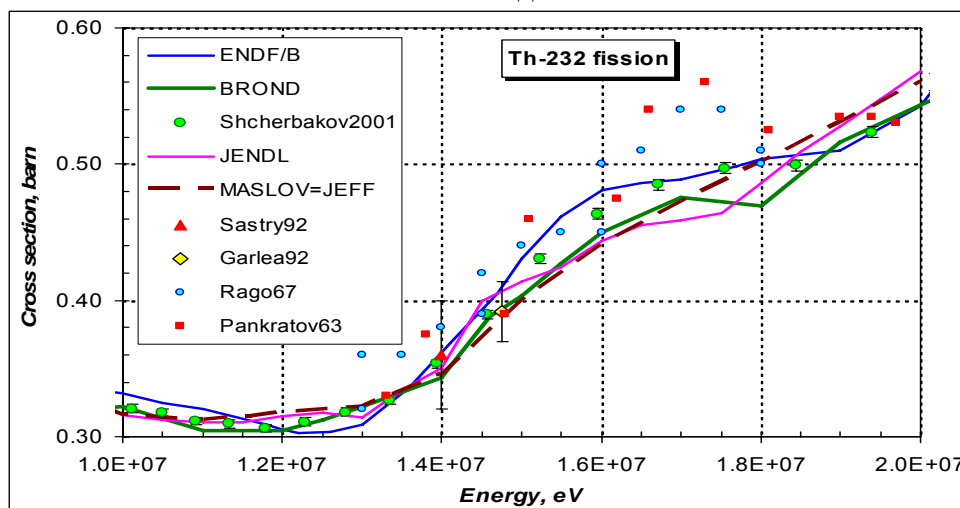


Рис. 17д. Сечение деления ^{232}Th

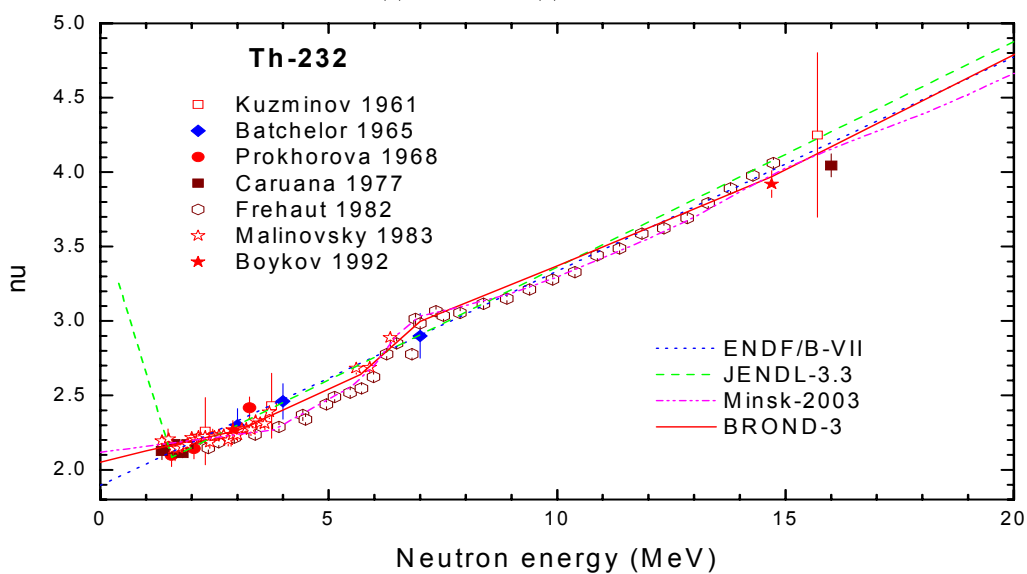


Рис. 18 Оценки среднего числа нейтронов деления в реакции $^{232}\text{Th}(n,f)$ в сравнении с экспериментальными данными

4. Образование фотонов (MF=12, 13, 14, 15)

В файлах JENDL-3.3 и Минск-2001 нет оценок выходов гамма-лучей. В БРОНД-3 содержатся оценки интегральных выходов и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата, неупругого рассеяния нейтронов и деления материнского ядра, а также деления изотопов тория, образующихся после испускания нейтронов. В ENDF/B-VII содержится более детальная информация как о спектрах дискретных гамма-лучей, так и непрерывных спектрах гамма-излучения для всех каналов неупругого взаимодействия нейтронов с рассматриваемым изотопом..

Угловые распределения всех типов гамма-излучения приняты изотропными в БРОНД-3 и в ENDF/B-VII.

5. Заключение

Из проведенного анализа следует, что оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII, в которые включен новый набор резонансных параметров, полученных в 2005 г. в Ок-Ридже, следует признать наиболее полными и согласованными. Эти же оценки являются предпочтительными для сечений радиационного захвата нейтронов в диапазоне энергий до 1 МэВ, так как они хорошо описывают прецизионные экспериментальные данные, полученные в 2004 г. на нейтронных спектрометрах Гиля и ЦЕРНа.

Для остальных сечений вне резонансной области оценки Минск-2001, БРОНД-3 и ENDF/B-VII хорошо согласуются как между собой, так и с экспериментальными данными. **Для библиотеки РОСФОНД в настоящее время целесообразно принять оценку БРОНД-3, которая** обеспечивает наилучшее статистическое описание всей совокупности данных о сечениях деления ядер и содержит погрешности оценок основных нейтронных сечений вместе с соответствующими ковариационными матрицами.

Автор рекомендации

А.В.Игнатюк.

Дополнение М.Н.Николаева

В файле, включаемом в РОСФОНД, данные о запаздывающих нейтронах должны быть представлены в 8-групповом представлении, принятом в JEFF-3.1 и в РОСФОНДе для всех делящихся ядер. Соответственно спектры групп запаздывающих нейтронов должны быть приняты такими же, как для урана-235 (с относительными выходами групп запаздывающих нейтронов, принятыми в JEFF-3.1).

Поскольку РОСФОНД ориентирован на расчеты не только нейтронных полей, но и на расчет образования радионуклидов в нейтронных реакциях, файл следует пополнить данными о выходах продуктов деления. Для последних, целесообразно принять оценку Миллса из JEFF-3.1.

90.7. Торий-234

Радиоактивен. ($T_{1/2}=24.10$ д). Испытывает бета-распад в протактиний-234m, который, в свою очередь распадается ($T_{1/2}=1.17$ мин) в уран-234. Является продуктом распада урана-238.

В современных библиотеках оцененных данных содержится одна полная оценка нейтронных данных для тория-227: в JENDL-3.3 – оценка Т.Оhsawa, 1987, принятая также в JEFF-3.1 и в ENDF/B-VIIb2. Имеется еще оценка R.A.Forrest, J. Кореску для нейтронных сечений в активационной библиотеке EAF-2003, которая сделана на основе сечений из библиотеки JENDL-3.1.

На рисунке 16 показано сравнение сечения деления Th-234, принятого в библиотеках JENDL и EAF.

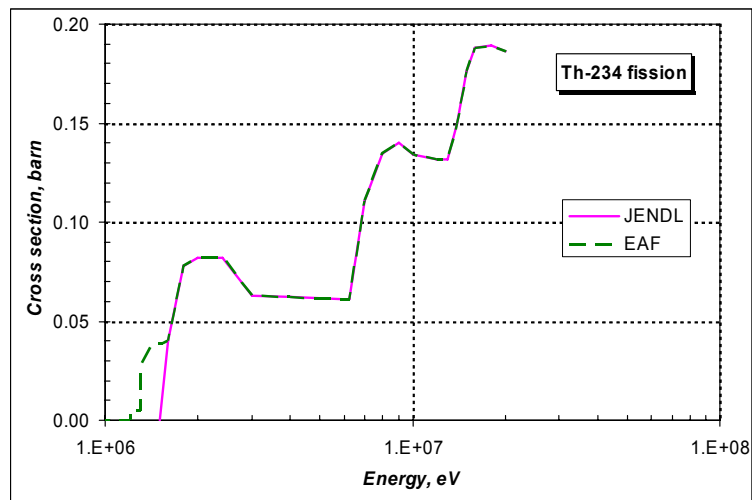


Рисунок 16 – Сравнение оцененных сечений деления Th-234.

Из приведенного на рисунке 16 сравнения видно, что в оценке Forrest и Кореску (EAF) порог реакции деления не такой как в оценке Takagi. Более того, в оценке EAF имеется подпороговое сечение деления, значение которого в тепловой точке совпадает с рекомендацией Мухабхаба. Выше энергии 1.6 МэВ обе оценки совпадают между собой.

На рисунке 17 показано сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов для Th-234.

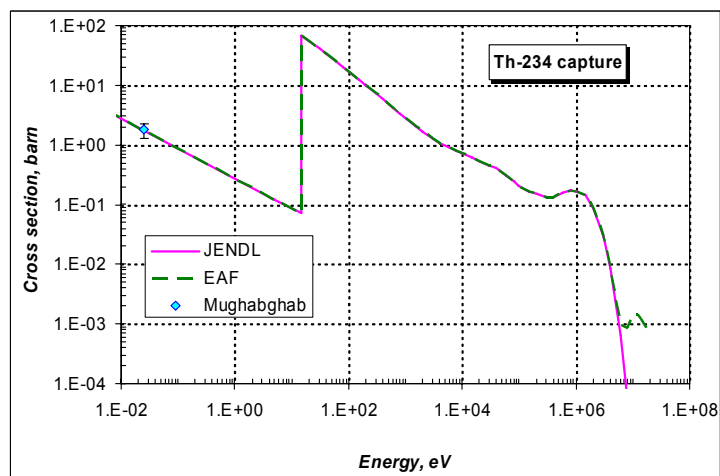


Рисунок 17 – Сравнение оцененных сечений радиационного захвата Th-234.

Согласно рисунку 17 сечения радиационного захвата Th-234 в обеих оценках практически совпадают, за исключением области энергий выше ~ 10 МэВ, где оценка JENDL, как обычно, резко занижает сечение.

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из JENDL-3.3. Сечение деления в области энергий ниже 1.6 МэВ и сечение захвата выше 6 МэВ откорректированы согласно оценке EAF-2003. Соответственно пересчитано полное сечение. Включены данные о запаздывающих нейтронах (8 групп) на основе данных JEFF-3.1, но с теми же спектрами, что и для урана-235. Включены данные о выходах продуктов деления (оценка Ингланда (T.England) из ENDF/B-VI).

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

91. ПРОТАКТИНИЙ

Протактиний обладает пятью долгоживущими изотопами, данные для которых должны быть представлены в библиотеке РОСФОНД.

91.1. Протактиний-229

Радиоактивен ($T_{1/2}=1.5$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона (98%) превращается в торий-229. В 2% испытывает альфа-распад в актиний-225.

Полных оценок нейтронных данных не имеется. Оценка нейтронных сечений содержится в EAF-2003. Экспериментальных данных для ее проверки нет.

Из этой оценки получены следующие значения тепловых сечений и резонансных интегралов:

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f |
|----------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| EAF-2003 | 17 | 96 | 3 | 1.4 |

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку сечений из EAF-2003. Файлу присвоить МАТ=9129.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

91.2. Протактиний-230

Радиоактивен ($T_{1/2}=17.4$ дн.). Испытывая захват орбитального электрона (91.6%) превращается в торий-230. в 8.1 % случаев испытывает бета-распад в уран-230.

Полных оценок нейтронных данных не имеется. Оценка нейтронных сечений содержится в EAF-2003. Экспериментальных данных для ее проверки нет.

Из этой оценки получены следующие значения тепловых сечений и резонансных интегралов:

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f |
|-------------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| EAF-2003 | 1500 | 685 | 1508 | 440 |
| Мухабхаб-84 | | | 1500±250 | |

Ссылку на источник данных Мухабхаб не дает.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку сечений из EAF-2003. Файлу присвоить МАТ=9130.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

91.3. Протактиний-231

Радиоактивен ($T_{1/2}=3.276 \cdot 10^4$ лет). Испытывает альфа-распад в актиний-227.

В JENDL-3.3 и в ENDF/B-VII содержится полная оценка нейтронных данных для этого изотопа, выполненная Ошава, Иноу и Накагавой (Т.Оshawa, (М.Иnou,Т.Nakagawa) в 1987 г. Оценка содержит область разрешенных резонансов (115 резонансов с максимальной энергией 117.6 эВ), простирающуюся до 115 эВ и область неразрешенных резонансов – до 40 кэВ.

В JEFF-3.1 содержится оценка координационной группы, выполненная в 1982 г. и перешедшая еще из ENDF/B-V. Оценка также содержит область разрешенных резонансов (31 резонанс с максимальной энергией 14.1 эВ), простирающуюся до 14.3 эВ и область неразрешенных резонансов – до 1 кэВ.

Оценка нейтронных сечений содержится также в EAF-2003.

Из упомянутых оценок получены следующие значения тепловых сечений и резонансных интегралов:

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f |
|----------------|-------------------------------|--------|-------------------------------|-------------|
| JENDL-3.3 | 200.6 | 594.9 | 0.020 | 0.059 |
| JEFF-3.1 | 226.9 | 600.2 | 0.010 | 0.012 |
| EAF-2003 | 200.9 | 593.4 | 0.020 | 0.059 |
| Мухабхаб-84 | 200.6±2.3 | 525±60 | 0.020±0.001 | |
| Kabajashi-01 | | | 0.025±0.001 | |
| Wagemans-78 | | | 0.020±0.001 | |
| Wagemans-77 | | | 0.019±0.0004 | |
| Grintakis-76 | | | 0.006±0.001 | 0.049±0.013 |
| Александров-72 | 260±13 | | | |
| Grintakis-76 | 201±20; 210±14 | | | |
| Kabajashi-74 | 201±6 | | | |
| Smith-56 | 200±15 | | | |
| Юрова-84 | 219±6 | | | |

Как видно, оценки JENDL-3.3 и EAF-2003 практически совпадают. Старая оценка, принятая в JEFF-3.1 за пределами погрешностей экспериментальных данных. В дальнейшем эта оценка рассматриваться не будет.

На рис.1 оцененные сечения деления (точно совпадающие в JENDL-3.3 и EAF-2003) сравниваются с наиболее полными и точными экспериментальными данными. Чрезвычайно большое расхождение в результатах измерений при 14.8 МэВ для своего разрешения требует дополнительных измерений. Данные Биргуля представляются заниженными. Результаты Платтерда указывают на большой (пожалуй, чрезмерно большой) вклад реакции (n,2nf).

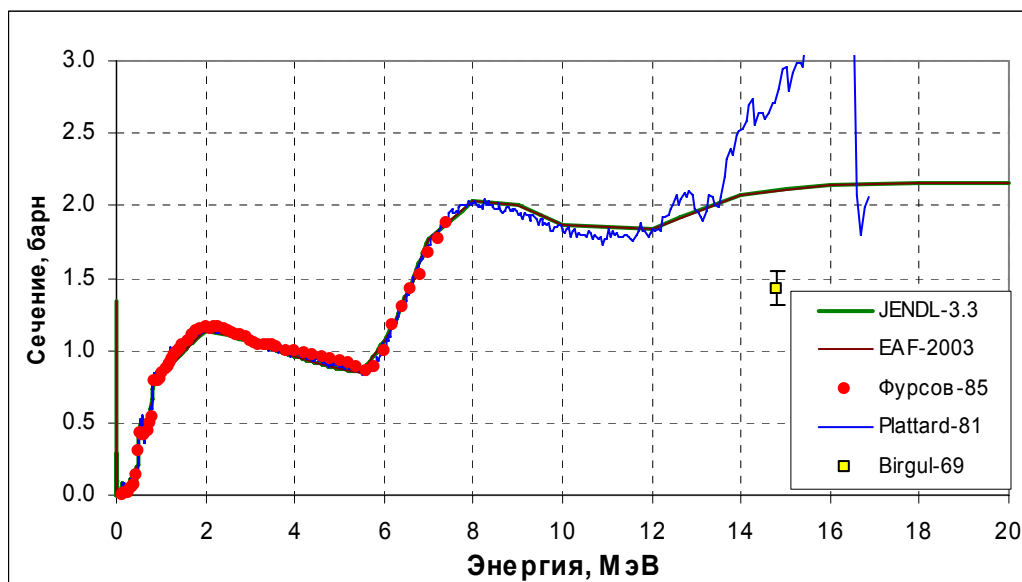


Рисунок 1 – Сравнение оцененных значений сечения деления Pa-231 с экспериментальными данными.

На рис. 2 сравниваются сечения захвата. В JENDL-3.3 сечение захвата положено равным нулю. Оценка этого сечения для быстрых нейтронов, принятая в EAF-2003 более правдоподобна. Экспериментальные данные отсутствуют.

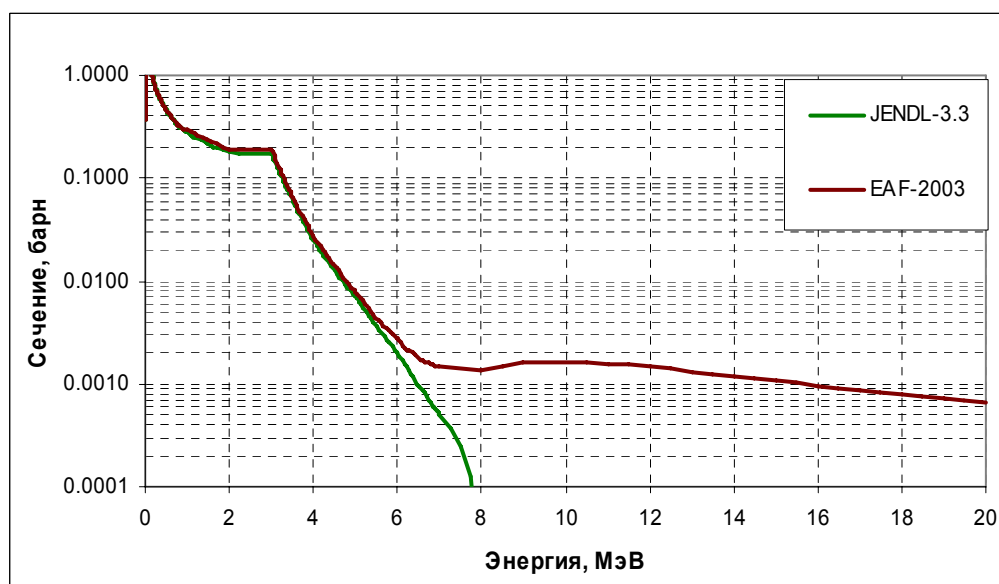


Рисунок 2 – Сравнение оцененных значений сечения захвата Pa-231.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку сечений из EAF-2003. Сечение захвата выше 4 МэВ принять таким, как в EAF-2003, соответственно сократив сечение упругого рассеяния. Выходы 8 групп запаздывающих нейтронов принять в соответствии с JEFF-3.1, а их спектры – такими же, как для урана-235. Файлу присвоить MAT=9130.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

91.4. Протактиний-232

Радиоактивен ($T_{1/2}=1.31$ д). Испытывает бета-распад в уран-232. С вероятностью $3 \cdot 10^{-3}$ процента распадается в торий-232.

В JENDL-3.3 и в ENDF/B-VII содержится полная оценка нейтронных данных для этого изотопа, выполненная Такаги (N.Takagi) в 1988 г.

В JEFF-3.1 содержится Райта и Такаги (R.Q.Wright, N.Takagi) выполненная в 1999 г.. Главное отличие – введение области разрешенных резонансов (12 резонансов с максимальной энергией 11.8 эВ) простирающейся до 10 эВ. Основой для ее введения явилось измерение Данона и др.¹. Область неразрешенных резонансов отсутствует.

Оценка нейтронных сечений содержится также в EAF-2003.

Из упомянутых оценок получены следующие значения тепловых сечений и резонансных интегралов:

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f |
|--------------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| JENDL-3.3 | 464 | 351 | 700 | 399.5 |
| JEFF-3.1 | 212.1 | 146.2 | 1517 | 863.6 |
| EAF-2003 | 460.7 | 283.6 | 723 | 999.4 |
| Мухабхаб-84 | 464±95 | 300±70 | 700±100 | |
| Абрамович-95 | | | 2000 | |
| Фомушкин-97 | | | 977±75 | |
| Андреев -02 | 655±69 | | | |
| Grintakis-76 | 464±95 | | | |

Как видно, оценки JENDL-3.3 и EAF-2003 очень близки. Оценка, принятая в JEFF-3.1, использует результаты измерений сечения деления, выполненные с хорошим разрешением и это ее важное достоинство. Не ясно, однако, причина более чем двукратного сокращения сечения захвата. В комментариях к файлу этот вопрос не обсуждается. Представляется целесообразным ввести в нижней части резонансной области плавную $1/v$ подложку для повышения теплового сечения захвата до 462 барн.

Для быстрых нейтронов экспериментальные данные отсутствуют и поэтому графики сечений в этой области не приводятся.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку сечений из JEFF-3.1. Ввести плавную подложку в полное сечение и сечение захвата ниже энергии первого резонанса(0.33 эВ), спадающую до нуля к 0.5 эВ. Выходы 8 групп запаздывающих нейтронов принять в соответствии с JEFF-3.1, а их спектры – такими же, как для урана-235. Файлу присвоить МАТ=9131.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

¹ Y. Danon, M.S. Moore, P.E. Koehler et al. Nucl.Sci.Eng.124, 482 (1996).

91.5. Протактиний-233

Радиоактивен ($T_{1/2}=27.0$ д). Испытывает бета-распад в уран-233.

В JENDL-3.3 и в ENDF/B-VII содержится полная оценка нейтронных данных для этого изотопа, выполненная Ошава, Иноу и Накагавой (Т.Оshawa, (М.Inou,Т.Nakagawa) в 1987 г. Оценка содержит область разрешенных резонансов, простирающуюся до 16.5 эВ и содержащую параметры 22 резонансов (включая связанное состояние) из компиляции Мухабхаба-84. Область неразрешенных резонансов простирается до 40 кэВ.

В JEFF-3.1 содержится оценка координационной группы, выполненная в 1982 г. и перешедшая еще из ENDF/B-V. В ней также содержится область разрешенных резонансов, но простирается она более широко – до 38.5 эВ и содержит параметры 34 резонансов с максимальной энергией 36.2 эВ. Больше число резонансов обусловлено данными неопубликованной работы Гарриса², которая Мухабхабом не учитывалась.

Оценка нейтронных сечений содержится также в EAF-2003.

Из упомянутых оценок получены следующие значения тепловых сечений и резонансных интегралов, приводимые вместе с экспериментальными данными EXFORa и рекомендациями Мухабхаба-84.:

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f |
|-------------|--------------------------------------|----------------|-------------------------------|---------|
| JENDL-3.3 | 40.0 | 862 | 0 | 0 |
| JEFF-3.1 | 41.4 | 855 | 0 | 0 |
| EAF-2003 | 41.5 | 854 | 0.10 | 0.045 |
| Мухабхаб-84 | 39.5±1.2 | 860±60 | | 3(calc) |
| Commor-70 | 39.5±1.2 | 857±35 | | |
| Commor-67 | | 846±43; 837±43 | | |
| Halperin-64 | 42±5 | 929±90 | | |
| Smith-55 | 68±6 | 670±75 | | |
| Katzin-53 | 55±6 | | | |
| Simpson-67 | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})=55\pm3$ | | | |

Как видим, в тепловой и эпитепловой области оценки сечений различаются существенно.

На рис.1 приведены нарастающие суммы числа резонансов, а на рис.2 – приведенных нейтронных ширин. Положения первых 21 резонанса совпадают. Но их нейтронные ширины в JEFF-3.1 больше, так что силовая функция возросла на 20%. Выше 17 эВ часть резонансов, очевидно, пропущена, однако, из рис. 2 следует, что пропущены только слабые резонансы: сумма приведенных ширин возрастает практически линейно в пределах естественного разброса ширин.

Проведенное рассмотрение приводит к выводу о предпочтительности оценки резонансных параметров, принятой в JEFF-3.1

На рис.3 проводится сравнение оцененных сечений деления с имеющимися экспериментальными данными. Приведенные здесь данные Товессона, взятые из EXFORa, сокращены в 1000 раз: предположено, что указанная в этой базе данных единица измерения сечения – барны – ошибочна и в действительности данные приведены в миллибарнах.

Результат Вон-Гунтена изображен условно: он получен на спектре нейтронов деления.

Полагая, что изображенные на рис.3 данные Товессона правильны, приходим к выводу о предпочтительности оценки сечения деления в JEFF-3.1

² Harris D.R. , WAPD-TM-814 (1969)

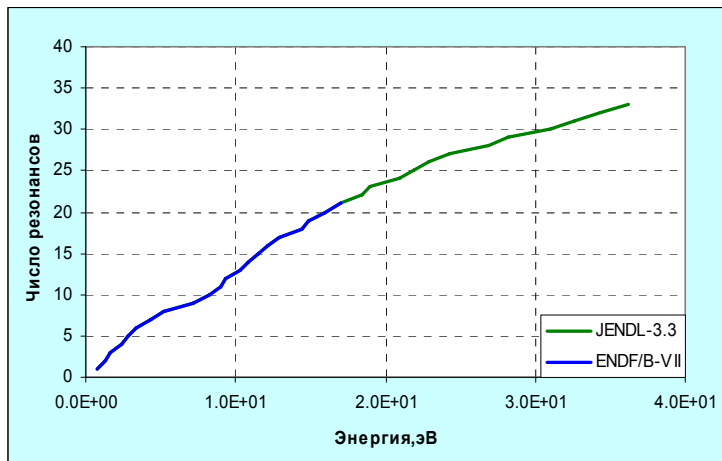


Рисунок 1 - Нарастающая сумма числа резонансов

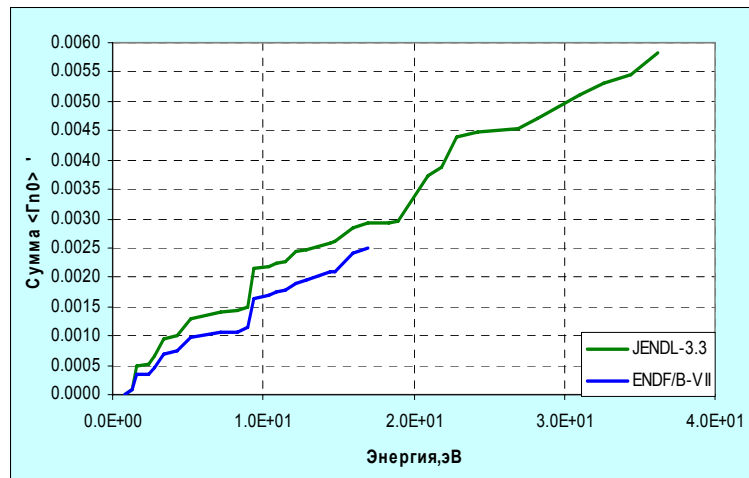


Рисунок 2 - Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин.

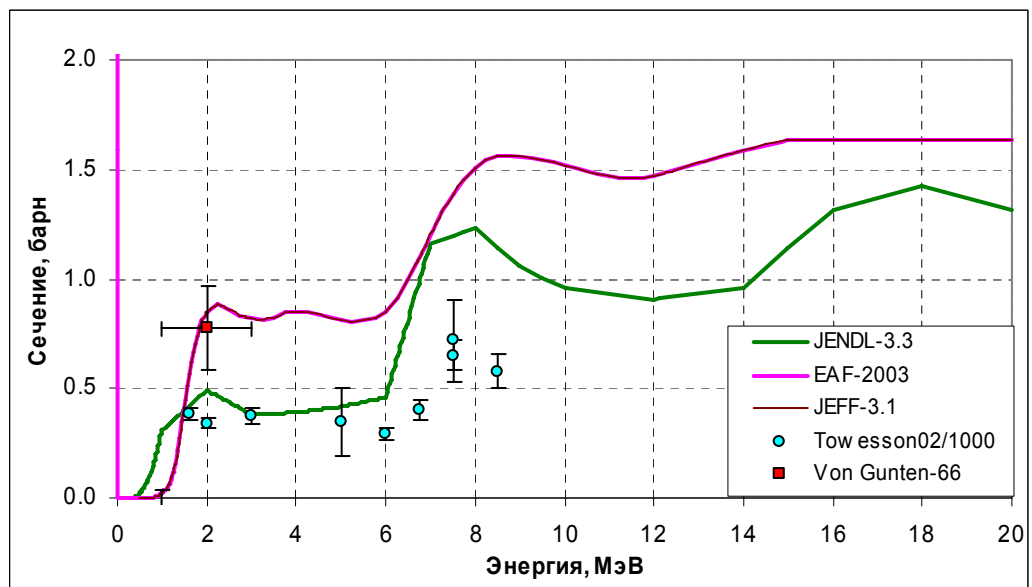


Рисунок 3 - Сечение деления Pa-233.

На рис.4 сравниваются оцененные сечения захвата. Экспериментальных данных нет. Ход сечения, оцененный в JEFF-3.1, представляется более естественным. Понятно, что именно эта оценка принята и в EAF-2003.

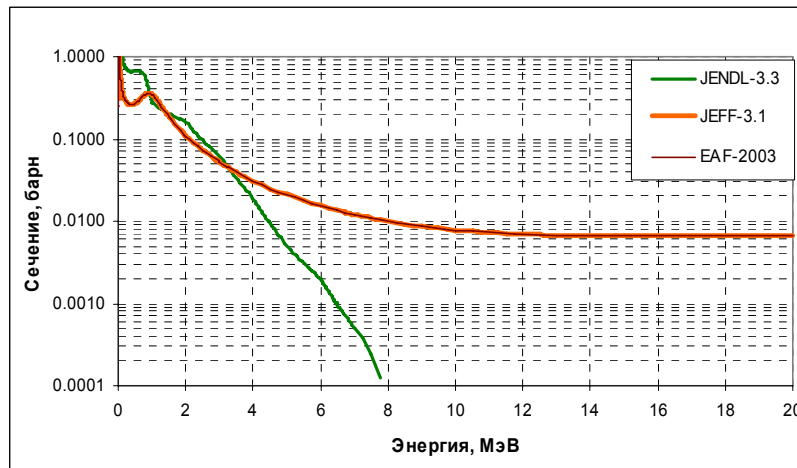


Рисунок 4 - Сечение радиационного захвата Ra-233.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку сечений из JEFF-3.1. Файлу присвоить МАТ=9133.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

92. УРАН

Помимо трех природных изотопов урана в РОСФОНД включены данные для урана-233, урана-236 и четырех гораздо менее долгоживущих изотопов- урана-230, урана-231, урана-232 и урана-237.

92.1. Уран-230

Радиоактивен. ($T_{1/2}=20.8$ д). Испытывает альфа-распад в торий-226. Последний в результате цепочки альфа-распадов, а в конце и бета-распадов, превращается в свинец-206.

В реакторе может образоваться в результате реакций $^{232}\text{U}(n,3n)$ и $^{233}\text{U}(n,4n)$.

Полных наборов нейтронных данных в современных библиотеках не содержится.

Данные о нейтронных сечениях, полученные на основе модельных расчетов и полуэмпирических систематик содержатся в библиотеке EAF-2003.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять оценку EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

92.2. Уран-231

Радиоактивен. ($T_{1/2}=4.2$ д). Распадается путем захвата орбитального электрона в протактиний-231 ($T_{1/2}=3.276 \cdot 10^4$ г). С вероятностью 0.1% испытывает альфа-распад в торий-227. Последний в результате цепочки альфа-распадов, а в конце и бета-распадов, превращается в свинец-207.

В реакторе может образоваться в результате реакций $^{232}\text{U}(n,2n)$ и $^{233}\text{U}(n,3n)$.

Полных наборов нейтронных данных в современных библиотеках не содержится.

Данные о нейтронных сечениях, полученные на основе модельных расчетов и полуэмпирических систематик содержатся в библиотеке EAF-2003.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять оценку EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

92.3. Уран-232

Радиоактивен. ($T_{1/2}=68.9$ д). Цепочка распадов урана-232 ведет к образованию таллия-208, испускающего при бета-распаде жесткое гамма-излучение (2.7 МэВ), существенно осложняющее радиационную обстановку при операциях с отработавшим топливом.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки данных для урана-232.

ФОНД-2.2 – оценка Т. Ohsawa, Т. Nakagawa, 1987.

ENDF/B-VII- оценка М. Chadwick, Р. Young, 2005

JENDL-3.3 – оценка Т. Ohsawa, Т Nakagawa, 1987

JEFF-3.1 – оценка Т. Mutsunobu, Т. Kawano, 2000.

Сравнение резонансных интегралов и тепловых сечений.

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f |
|-------------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| ENDF/B-VII | 75.2 | 181 | 76.8 | 383 |
| JENDL-3.3 | 74.9 | 173 | 76.7 | 364 |
| JEFF-3.1 | 72.1 | 317 | 77.1 | 419 |
| Мухабхаб-84 | 73.1±1.5 | 350±30 | 75.2±4.7 | 350±30 |

Большие расхождения в оценках резонансных интегралов захвата обусловлены отсутствием прямых экспериментальных данных.

Заключение

Несмотря на более позднюю дату оценки из ENDF/B-VII, ее преимущества перед оценкой из JEFF-3.1, если и имеются, то не очевидны. В частности в JEFF-3.1 в резонансной области использована оценка Дерриена 1994г., тогда как в ENDF/B-VII – использованы резонансные параметры Мухабхаба оцененные десятилетием раньше.

В РОСФОНД рекомендуется принять оценку из JEFF-3.1. Спектры 8-групп запаздывающих нейтронов заменяются на соответствующие спектры для урана-235. Выходы групп, разумеется, приведены в соответствие с JEFF-3.1.

В файл включаются также данные о выходах продуктов деления – из ENDF/B-VII¹ (в других библиотеках данных о выходах продуктов деления для урана-232 не содержится).

В дальнейшем желательно выполнить новую оценку нейтронных данных.

Автор заключения

Николаев М.Н.

¹ Т. R. England, B. F. Rider, ENDF-349, 1989.

92.4. Уран-233

Радиоактивен. ($T_{1/2}=1.592 \cdot 10^5$ лет). Альфа-распадается в торий-229 ($T_{1/2}=7880$ лет).
Является перспективным ядерным топливом (основой уран-ториевого топливного цикла)
В современных библиотеках содержатся следующие оценки данных для урана-233.

ФОНД-2.2 и БРОНД-2 – оценка Сухоручкина и Клепацкого, 1990.

ENDF/B-VII- оценка Young, Chadwick, Talou, Leal, Derrien, 2005.

JENDL-3.3 и JEFF-3.1 – оценка Т. Mutsunobu, Т. Kawano, 2000.

Кроме того, доступна недавняя (2005г.) оценка В. Маслова.

1. Область тепловых нейтронов и область разрешенных резонансов.

В таблице 1 приведены оцененные тепловые сечения и резонансные интегралы захвата и деления, а также число мгновенных нейтронов деления в сравнении с оценками экспериментальных данных Мухабхабом и Тельером, а также с согласованной оценкой тепловых сечений, выполненной международной группой по стандартам в 2005 г². В последней оценке учтены все различия в опорных величинах, использовавшихся при получении окончательных результатов.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансные интегралы.

| Источник | $\sigma_c(0.0253$ эВ) | RI_c | $\sigma_f(0.0253$ эВ) | RI_f | ν_t |
|--------------------|--------------------------|--------|-----------------------|--------|---------------|
| ФОНД-2.2 | 45.3 | 138.8 | 529.9 | 770.7 | 2.4925 |
| ENDF/B-VII | 45.2 | 140.6 | 531. | 765. | 2.5042 |
| JENDL-3.3 | 45.3 | 138.0 | 531. | 762. | 2.4877 |
| Маслов | 45.2 | 139.2 | 531. | 765. | 2.4930 |
| Мухабхаб-84 | 45.5±0.7 | 137±6 | 529.1±1.2 | 760±17 | 2.493±0.004 |
| Tellier1992 | 45.5±0.2 | 137±6 | 529.1±1.2 | 760±17 | |
| Стандарты- 2005 | 45.55±0.68 | | 531.2±1.3 | | 2.4968±0.0035 |

Как видим, расхождения в принятых оцененных данных по сечениям и резонансным интегралам не выходят за пределы оцененных погрешностей совокупности экспериментальных данных.

Описания области разрешенных резонансов существенно различаются.

В оценке Суховицкого и Клепацкого эта область простирается до 100 эВ, содержит 178 резонансов, энергия последнего – 124.12 эВ. В дальнейшем эта оценка рассматриваться не будет как явно устаревшая.

В оценке Митсуноби и Кавано граница области разрешенных резонансов -150 эВ. Даны параметры 190 резонансов с максимальной энергией 356.96 эВ

В оценке, принятой в ENDF/B-VII граница области разрешенных резонансов – 600 эВ; в этой области даны параметры 738 резонансов. Кроме того, заданы параметры 16 связанных состояний и 16 резонансов, лежащих выше этой области. Эта оценка принята и Масловым. Оценка резонансных параметров выполнена с учетом новых измерений полного сечения и сечения деления, выполненных с очень высоким разрешением на ускорителе ORELA в 1998 – 2000 г.г. с использованием известной программы SUMMY, описывающей совокупность экспериментальных данных методом наименьших квадратов на основе R-матричного формализма³.

² Данные сообщены участниками международной группы от России – В.Проняевым, С.Бадиковым и Е.Гаем

³ L. C. Leal, H. Derrien, J. A. Harvey, K. H. Guber, N. M. Larson and R. R. Spencer, R-Matrix Resonance Analysis and Statistical Properties of the Resonance Parameters of U-233 in the Neutron Energy Range from Thermal to 600 eV, ORNL/TM-2000/372, March 2001.

На рис.1 приведена нарастающая сумма числа резонансов, а на рис. 2 – нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин. Тонкими линиями проведены линейные аппроксимации к начальным участкам (до 400 эВ) этих кривых. Из рис. 2 можно сделать заключение, что пропуска резонансов в рассматриваемой области практически нет. Рис.2 показывает, что в интервале 400-500 эВ имеет место недобор приведенных нейтронных ширин, а затем, выше 500 эВ, сохраняется прежняя скорость нарастания суммы ширин. Недостаток резонансов с большими ширинами, конечно, не является свидетельством пропуска уровней, но вселяет сомнение в корректность определения резонансных параметров в указанном интервале. Несмотря на это **оценка резонансных параметров из ENDF/B-VII, безусловно, является наиболее полной и надежной и в РОСФОНД следует принять именно эту оценку.**

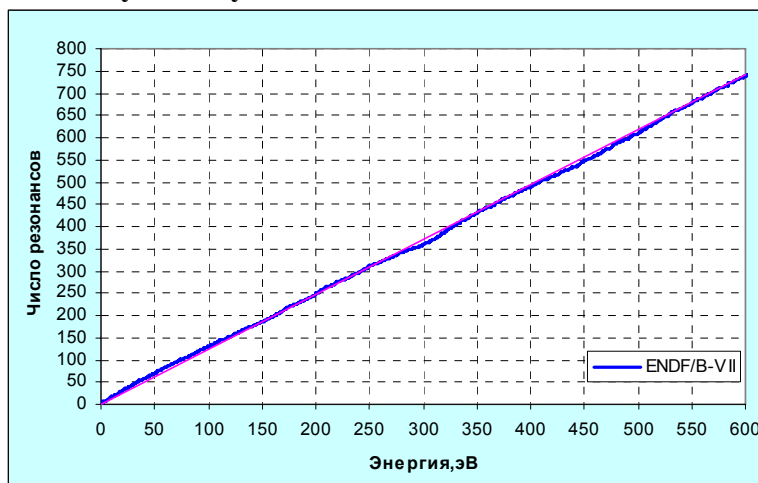


Рис.1. Нарастающая сумма числа резонансов

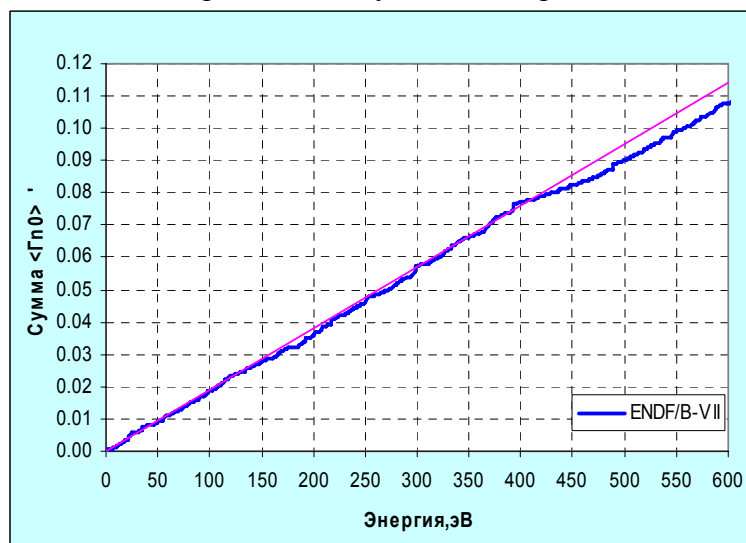


Рис.2. Сумма приведенных нейтронных ширин.

2. Область неразрешенных резонансов.

В ENDF/B-VII область неразрешенных резонансов простирается до 40 кэВ; структура сечений описывается параметрами s-, p- и d-волн; файл средних резонансных параметров рекомендован лишь для учета резонансной самоэкранировки сечений, сами средние сечения заданы в файле MF=3.

В JENDL-3.3 (а потому и в JEFF-3.1) область неразрешенных резонансов простирается лишь до 30 кэВ; заданы параметры только s- и p-волн, но эти параметры рекомендованы для расчета не только факторов самоэкранировки, но и средних сечений.

В оценке Маслова область неразрешенных резонансов простирается до порога неупругого рассеяния – 40.5246 кэВ. Заданы параметры s-, p- и d-волн, с помощью которых описываются и средние сечения. В этом очевидное преимущество оценки Маслова, однако, требуется рассмотреть как рассчитанные или заданные средние сечения согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

На рис. 3 оцененные данные по полному сечению сравниваются с экспериментальными данными. В JENDL-3.3 экспериментально установленная gross-структура полного сечения воспроизведена путем вариаций средних параметров – расстояний между резонансами и нейтронных ширин (для всех значений J и четности).

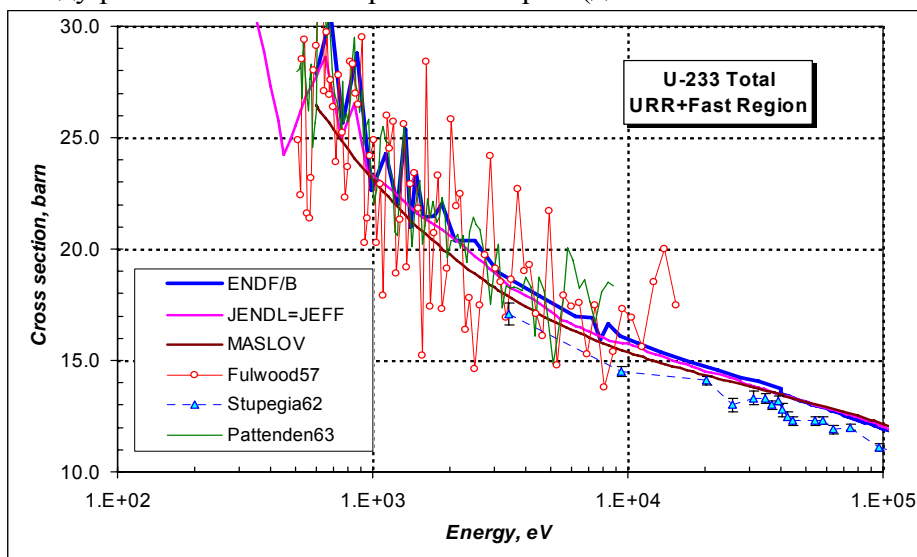


Рис.3. Полное сечение в области неразрешенных резонансов

Маслов этих искусственных вариаций не вводит и потому никакой структуры среднего сечения у него не проявилось. Вообще среднее сечение в этой оценке примерно на барн (~5%) ниже, чем в двух предыдущих, что, впрочем, не выходит за пределы разброса экспериментальных данных.

Рассмотрим теперь данные по парциальным сечениям. На рис. 4 с экспериментальными данными сравниваются оцененные сечения деления.

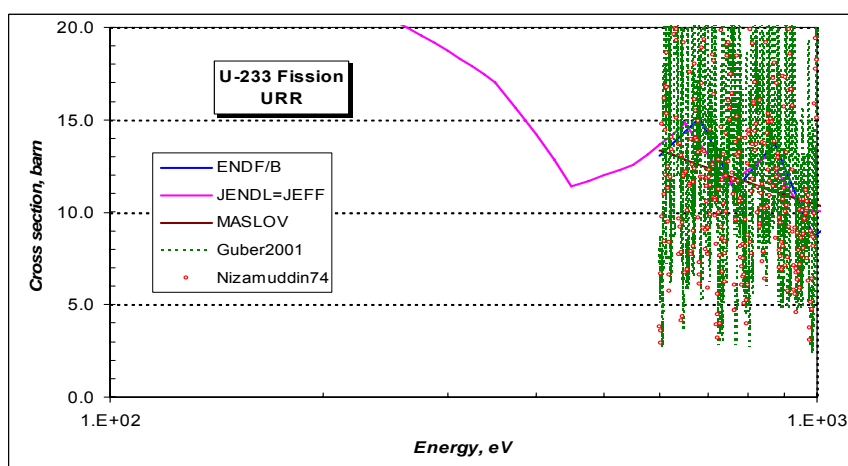


Рис.4а. Сечение деления в области неразрешенных резонансов

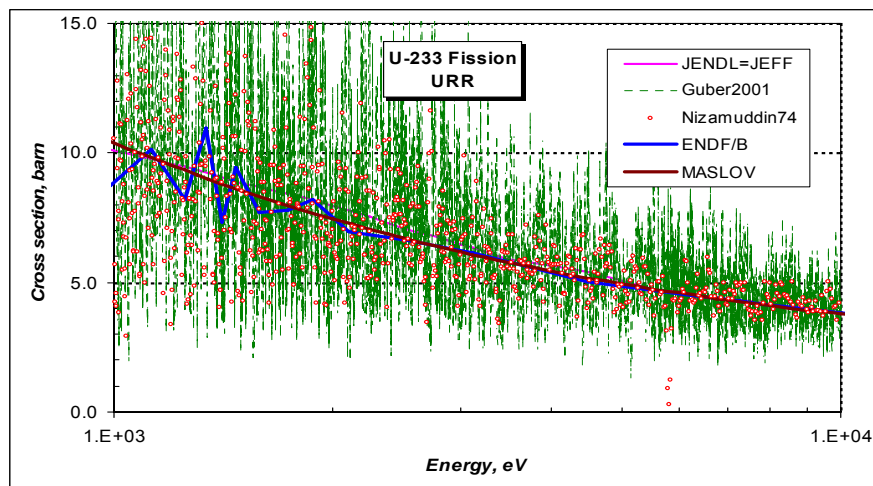


Рис.4б. Сечение деления в области неразрешенных резонансов

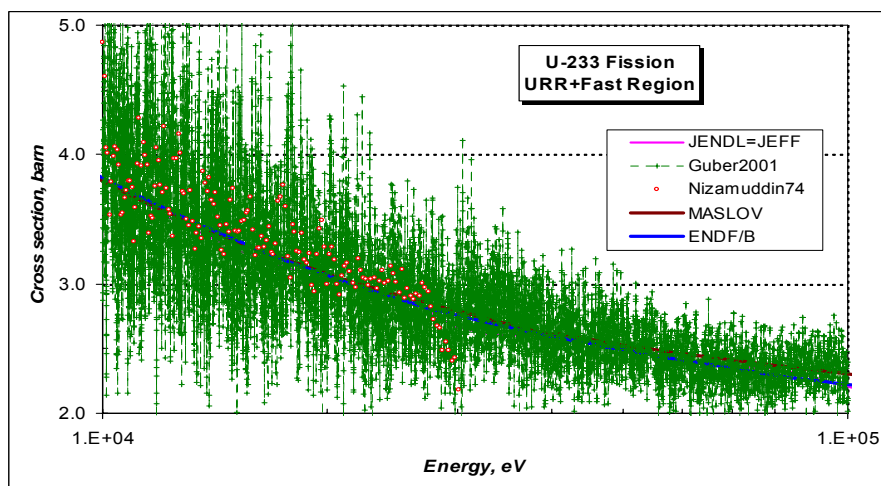


Рис.4в. Сечение деления в области неразрешенных резонансов

Представление данных в цитированных работах излишне подробно: разброс точек не отражает ни детальную резонансную структуру, для этого разрешение недостаточно, ни gross-структуру. На рис. 4г оцененные данные сравниваются с экспериментальными в узком диапазоне от 600 до 800 эВ. Экспериментальные данные были усреднены по подинтервалам и результаты усреднения представлены гистограммами. Как видно, gross-структура сечения деления, отображенная в оценках ENDF/B-VII и JENDL-3.3, лишь качественно отражает результаты измерений, не согласующихся между собой в деталях. Это ставит по сомнение целесообразность описания структуры сечения деления в этом энергетическом диапазоне.

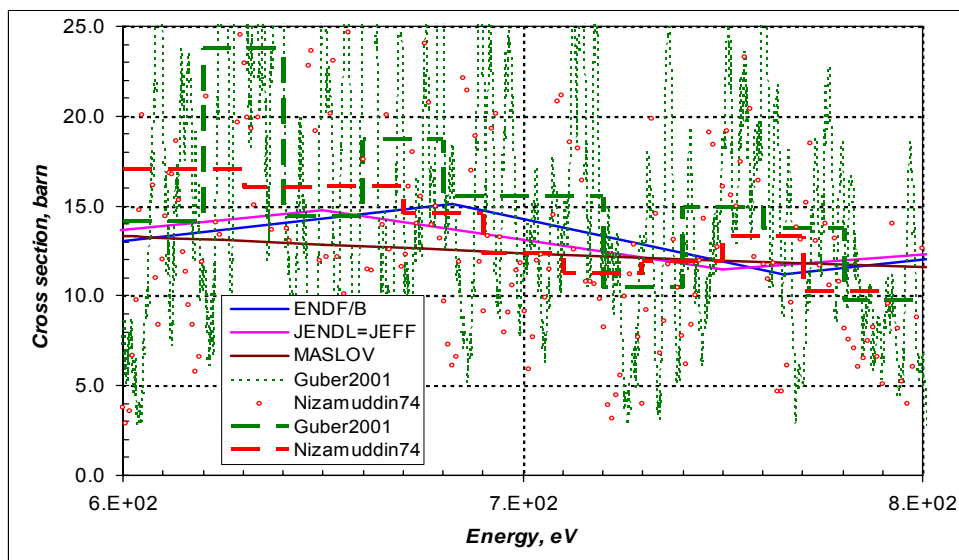


Рис.4г. Сечение деления в области неразрешенных резонансов

На рис.5 оценки сечения захвата сравниваются с данными Вестона, единственными имеющимися в EXFORe в области неразрешенных резонансов. Оценка, принятая в ENDF/B-VII, явно завышает сечение захвата. В описании файла ссылок на какие-либо дополнительные экспериментальные данные в этой области нет.

В связи со всем изложенным представляется целесообразным включить в РОСФОНД Масловскую оценку данных в области неразрешенных резонансов.

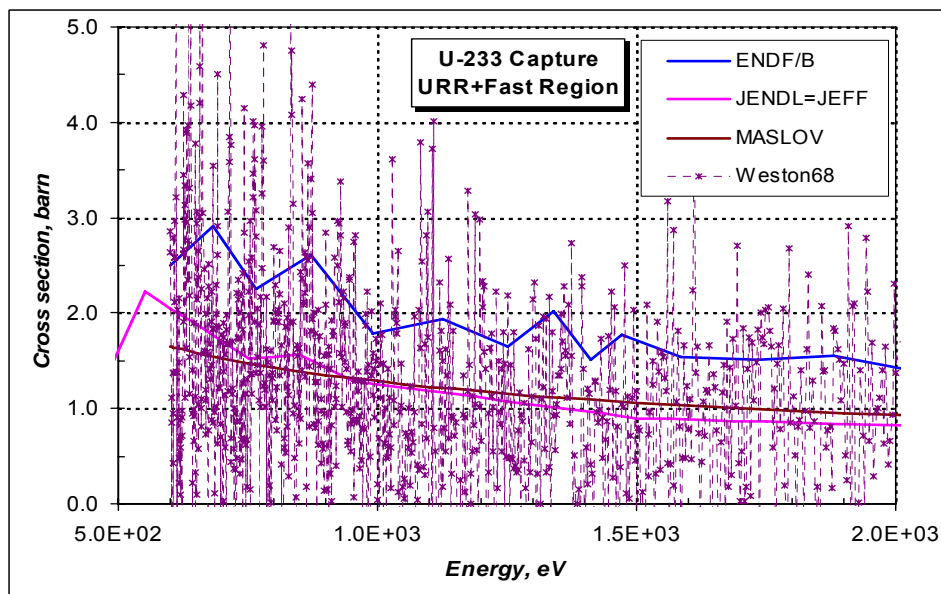


Рис.5. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов

3. Сечения вне резонансной области

На рис. 6. оценки полного сечения сравниваются с имеющимися экспериментальными данными. Расхождения между оценками существенно меньше разброса экспериментальных данных, так что можно констатировать, что все они равно хороши.

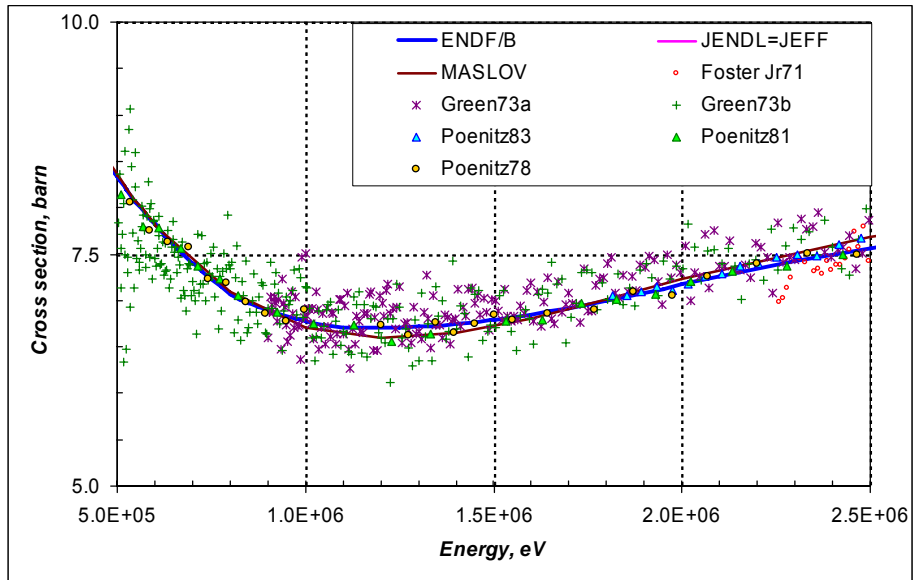


Рис.6а. Полное сечение.

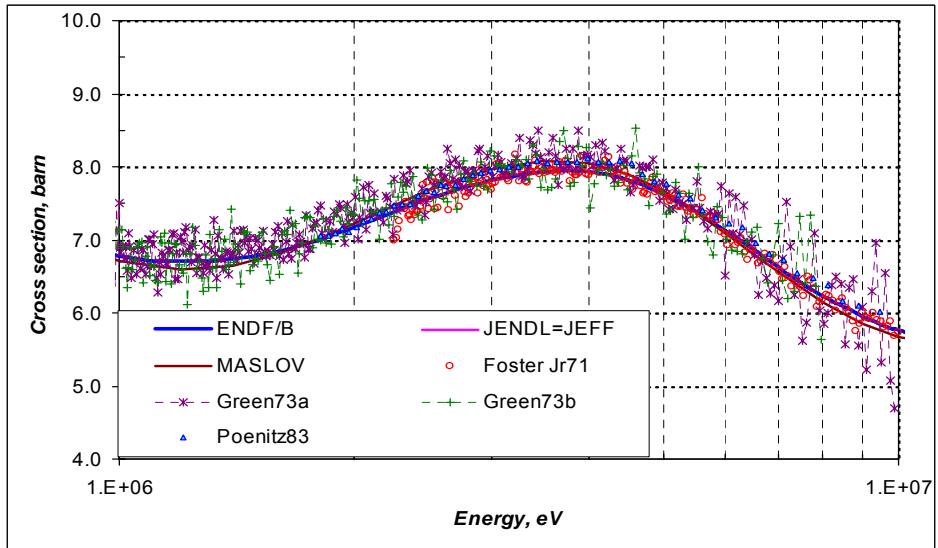


Рис.6б. Полное сечение.

На рис.7. с экспериментальными данными сравниваются оценки сечения деления. Здесь положение дел не столь хорошо: разброс экспериментальных данных

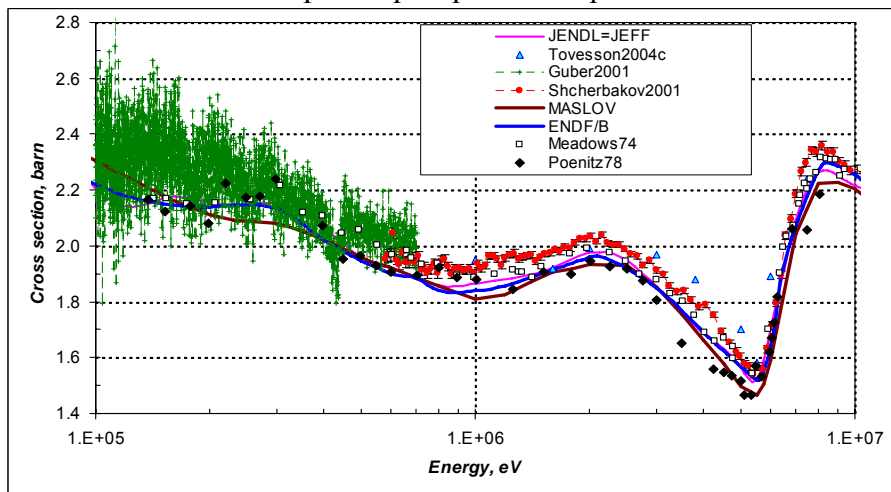


Рис.7а. Сечение деления

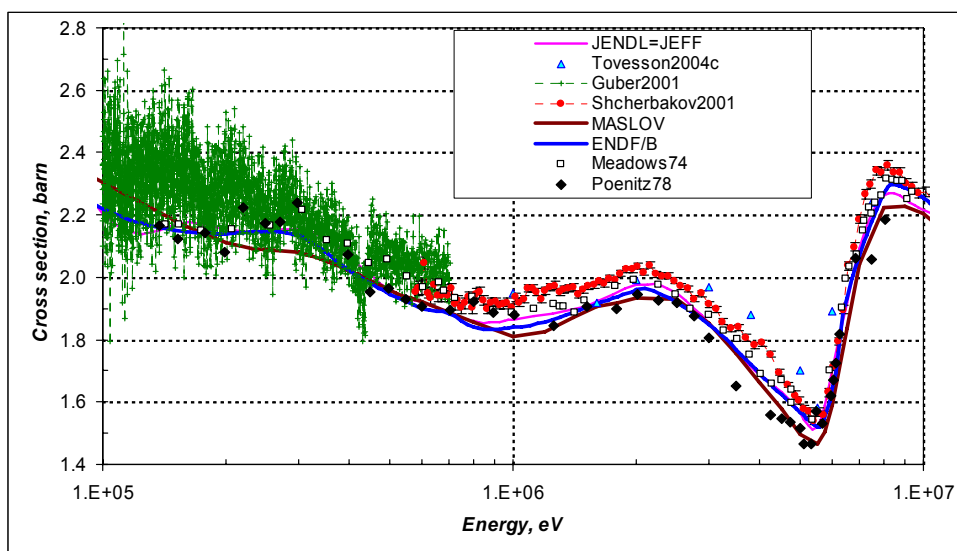


Рис.76. Сечение деления

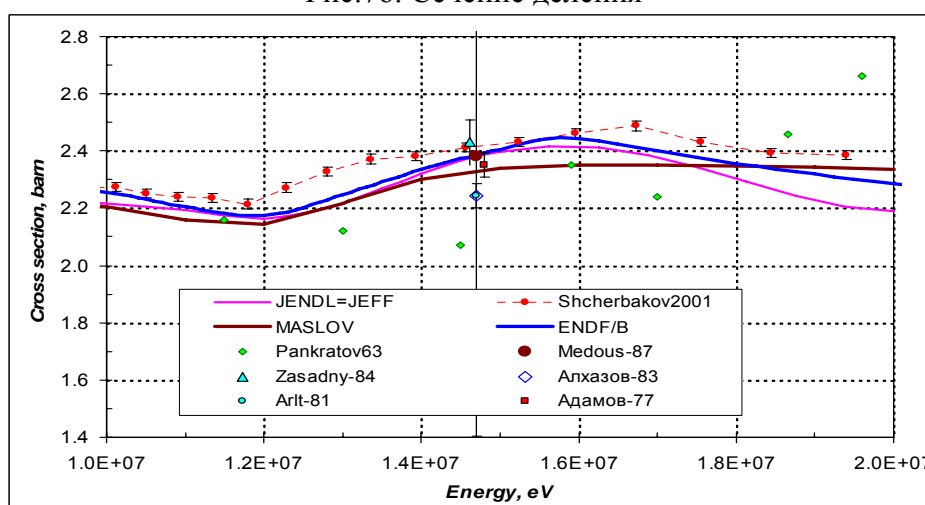


Рис.7в. Сечение деления.

Намного превышает приписанные им погрешности. В результате расхождения оцененных дванных от экспериментальных достигает в окрестностях 1 МэВ и 8МэВ $\pm 5\%$. Ниже 175 кэВ оценка Маслова лучше других согласуется с экспериментальными данными, выше имеет преимущество оценка ENDF/B-VII. Заметим, кстати, что при выполнении этой оценки результаты многочисленных измерений отношений сечений деления урана-233 и урана-235 нормировались на стандартное сечение деления урана-235, принятое в 2005 г. (и включенное в РОСФОНД).

На рис.8. с единственными экспериментальными данными Гопкинса сравниваются результаты оценок. Данные ENDF/B-VII идут прямо по экспериментальным точкам; две другие оценки отличаются от них на величину порядка погрешности.

Экспериментальные данные по неупругому рассеянию нейтронов на уране-233 отсутствуют. На рис.9 проводится сравнение результатов обсуждаемых оценок. Вблизи порога различия между ними весьма велики. Минимум в полном сечении неупругого рассеяния в оценке ENDF/B-VII лежит при 700 кэВ, т.е. как раз на принятом в этой оценке пороге неупругого рассеяния с возбуждением непрерывного спектра уровней. В двух других оценках этот порог на 100 кэВ ниже. Для уяснения ситуации на рис. 8 нанесено полное сечение неупругого рассеяния из файла урана-233 из ENDF/B-VI. Оно существенно ниже современных оценок, но как и в них никакого пика на пороге не наблюдается.

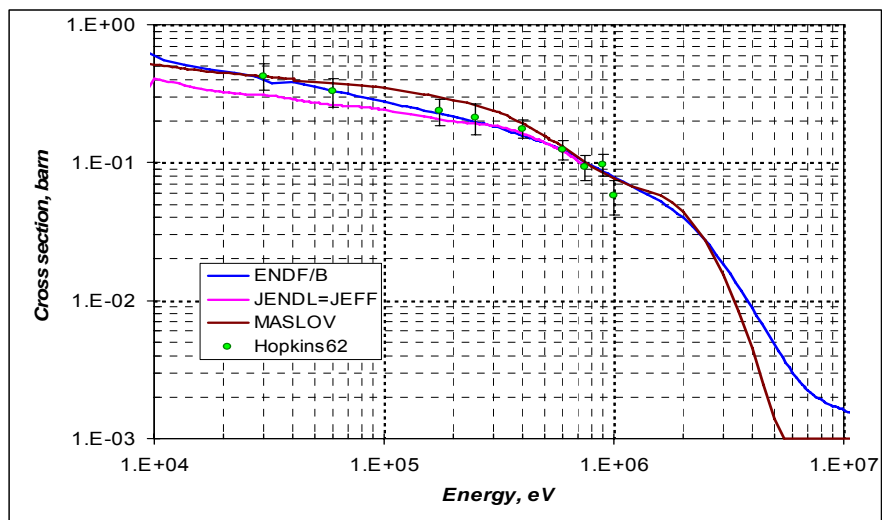


Рис.8. Сечение захвата

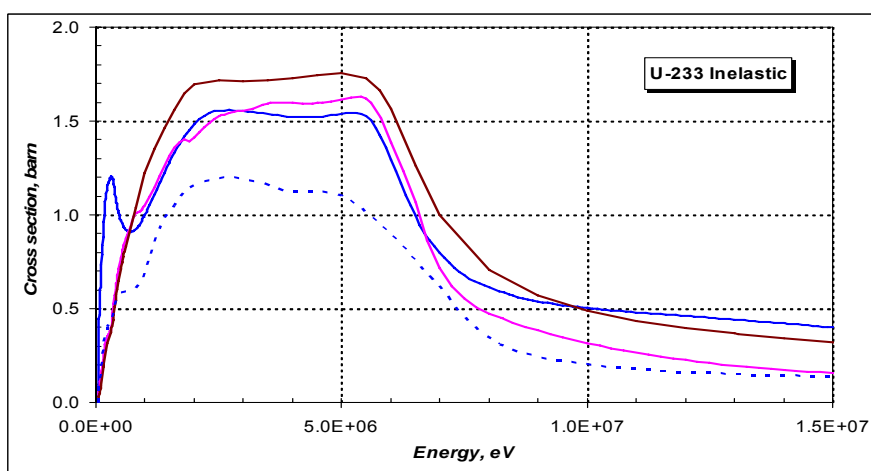


Рис.9. Полное сечение неупругого рассеяния

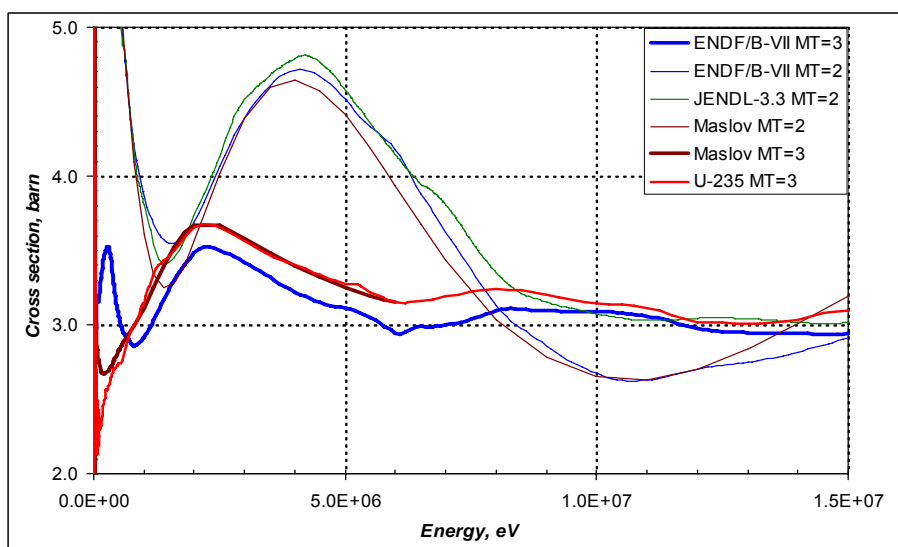


Рис.10. Сечения упругого рассеяния (MT=2) и суммарное сечение неупругих взаимодействий (MT=3)

На рис. 10 приведены оцененные сечения упругого рассеяния и суммарного сечения неупругих взаимодействий⁴. Видно, что аномалия в сечении неупругого рассеяния отразилась и в поведении суммарного сечения неупругих взаимодействий, которое существенно отличается от оценки Маслова. Наличие этой аномалии, не имеющей места для урана-235 (сечение неупругих взаимодействий для которого также приведено для сравнения на рис.10), порождает сомнения в корректности оценки, принятой в ENDF/B-VII.

На рис.11 приведены данные по сечениям реакций (n,2n) и (n,3n).

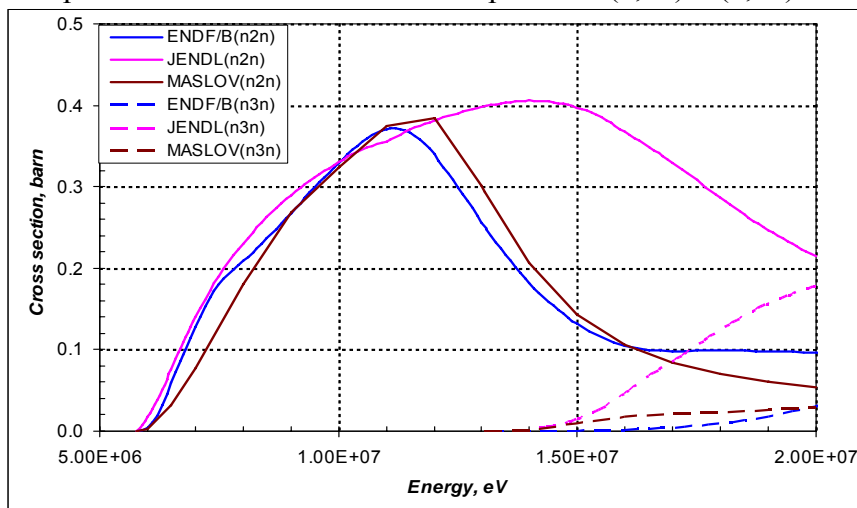


Рис.11. Сечения реакций (n,2n) и (n,2n).

Дифференциальных экспериментальных данных для этих реакций нет. Расхождения в оценках выше 16 МэВ велики. Косвенно в пользу оценки ENDF/B-VII говорит то, что она выполнялась вплоть до 30 МэВ, где роль реакций (n,xn) весьма существенна и, несомненно, расчет их сечений требовал от оценщиков повышенного внимания. Реакция (n,4n) около 19 МэВ. Её сечение даже при 20 МэВ составляет доли миллибарна.

При взаимодействии нейтронов с ураном-233 при всех энергиях возможны реакции (n,p) и (n, α). Из-за высокого кулоновского барьера сечения этих реакций малы: даже при 20 МэВ сечение первой из них по оценке EAF-2003 составляет 70 миллибарн; второй - 5 миллибарн. Тем не менее включить сечения этих реакций в РОСФОНД представляется целесообразным.

Подводя итоги сказанному выше, можно заключить, что в **РОСФОНД следует принять нейтронные сечения, оцененные Масловым**, которые, как правило, будучи близки к оценке из ENDF/B-VII, не обладают аномально высоким сечением неупругого рассеяния в области ниже 700 кэВ.

4. Числа вторичных нейтронов и их энерго-угловые распределения

4.1. Число нейтронов деления

Оцененные числа нейтронов деления урана-233 тепловыми нейтронами приведены в таблице 1. Величина, принятая в ENDF/B-VII превышает рекомендацию группы по стандартам (основанную на совместной оценке всех данных, зависящих от $\nu_p(^{233}\text{U})$) на три стандартных отклонения, приписанных этой величине. Это различие в точности равно вкладу запаздывающих нейтронов, принятому в этой оценке: $\nu_d=0.0074$. Таким образом

⁴ Сечение $MT=3$ в JENDL-3.3 не задано и его непросто получить, поскольку составляющие заданы на разных энергетических сетках. По этой же причине Масловское сечение $MT=3$ приведено только до порога реакции (n,2n).

при оценке данных для ENDF/B-VII величина, рекомендуемая международной группой по стандартам как ν_t , рассматривалась как ν_p .

Оценка JENDL-3.3 ниже рекомендованного значения на 2.6 стандартного отклонения. Оценка Маслова также ниже, но только на 1 стандартное отклонение. Представляется целесообразным принять в РОСФОНД величину, рекомендованную международной группой по стандартам, т.е. $\nu_t=2.4968$. Число запаздывающих нейтронов по оценке ENDF/B-VII при низких энергиях равно 0.0074; по оценке JENDL-3.3 – 0.00673 и практически столько же по Маслову – 0.00670. Если принять $\nu_d=0.0068$, то для ν_p получим «круглое» число -2.4900.

На рис. 12 приведены энергетические зависимости ν_p по разным оценкам в сравнении с экспериментальными данными. Все приведенные данные экспериментальные данные перенормированы либо на $\nu_p(^{252}\text{Cf})=3.7606$, либо на $\nu_p(^{233}\text{U};0.0253\text{эВ})=2.490$ в зависимости от использовавшегося монитора.

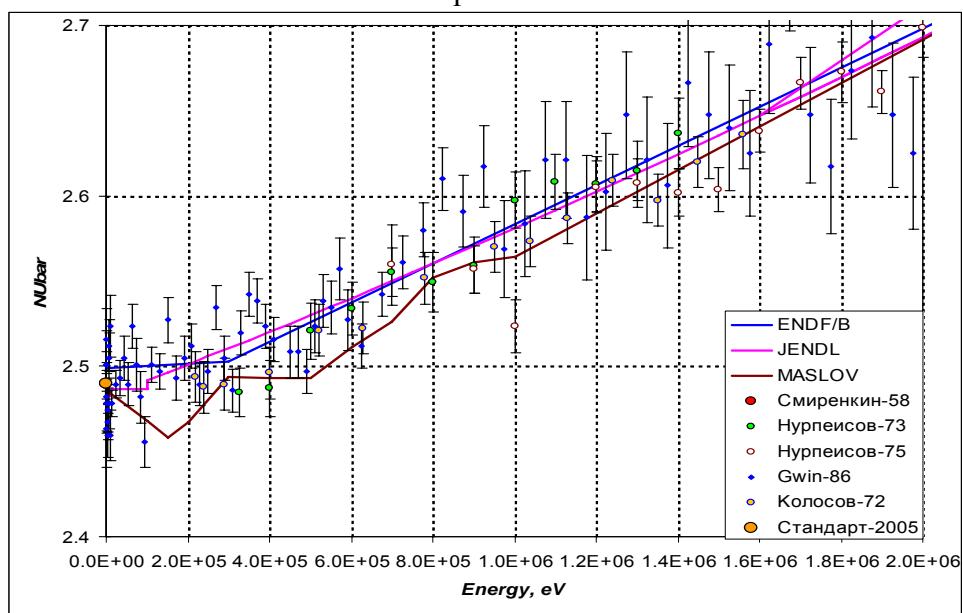


Рис.12а. Число мгновенных нейтронов деления.

Изломанный ход ν_p с энергией, принятый Масловым, экспериментальными данными не оправдывается. Вообще, до 1.5 МэВ принятое в этой оценке ν_p представляется заниженным.

При более высоких энергиях данные приведены на рис. 12б.

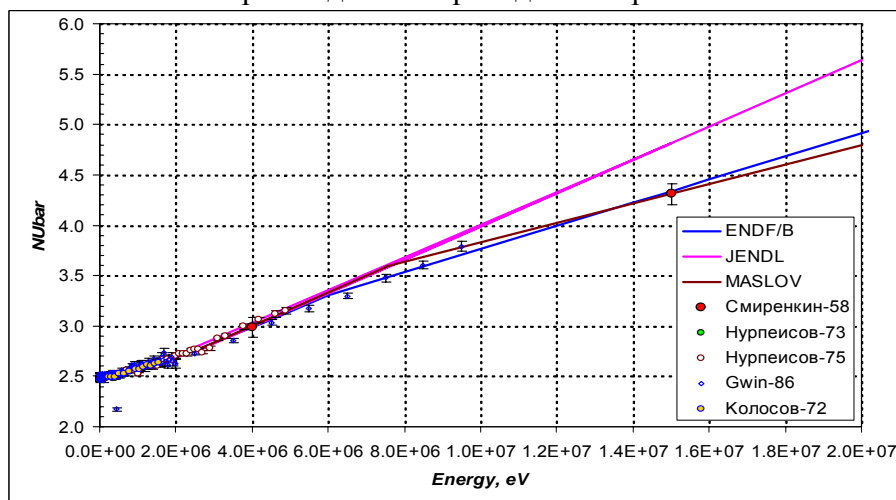


Рис.12б. Число мгновенных нейтронов деления.

В этой области оценка ENDF/B-VII представляется наилучшей. Её вполне можно принять и при более низких энергиях если заменить значение ν_p в тепловой области на 2.490 (см рис.12а).

На рис. 13 приведены оцененные энергетические зависимости ν_d . Для сравнения приведены таковые и для урана-235 и плутония-239. Сравнение показывает, что энергетическая зависимость ν_d , принятая в ENDF/B-VII ошибочна. Для такого ее поведения нет никаких физических оснований. Напротив, снижение ν_d с энергией, проявляющееся во всех других оценках, объясняется появлением дополнительных шансов деления. **В РОСФОНД целесообразно принять энергетическую зависимость ν_d из JENDL-3.3, перенормировав ее на принятое значение ν_d в тепловой области.**

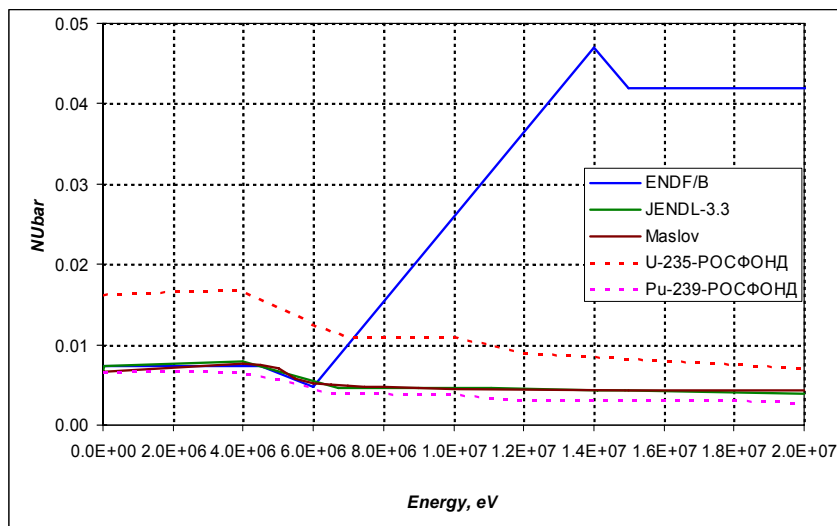


Рис.13. Энергетическая зависимость выхода запаздывающих нейтронов

4.2. Спектры нейтронов деления.

Спектры мгновенных нейтронов деления в рассматриваемых оценках описаны существенно по-разному. В ENDF/B-VII эти спектры заданы формой Уатта с параметрами $a(E')$ и $b(E')$, зависящими от энергии нейтронов E' , вызывающих деление:

$$\chi(E) = \frac{2\exp(-ab/4)}{\sqrt{\pi a^3 b}} \exp(-E/a) \operatorname{sh}\sqrt{bE}$$

Характер этой зависимости можно видеть из рис.14, на котором изображена зависимость средней энергии нейтронов деления $\langle E \rangle = a(3/2 + ab/4)$ как функция E' . В заголовочной секции утверждается, что спектры нейтронов деления приняты в соответствии с оценкой JENDL-3.3. Это, очевидно, не совсем верно, поскольку в оценке JENDL-3.3 спектры мгновенных нейтронов деления определены иначе, а именно - функциями, заданными в 164 точках при каждой из 7 начальных энергий. Аналогично определяются спектры деления и в оценке Маслова, но спектры задаются в 326 точках при каждой из 22 начальных энергий в интервале до 20 МэВ.

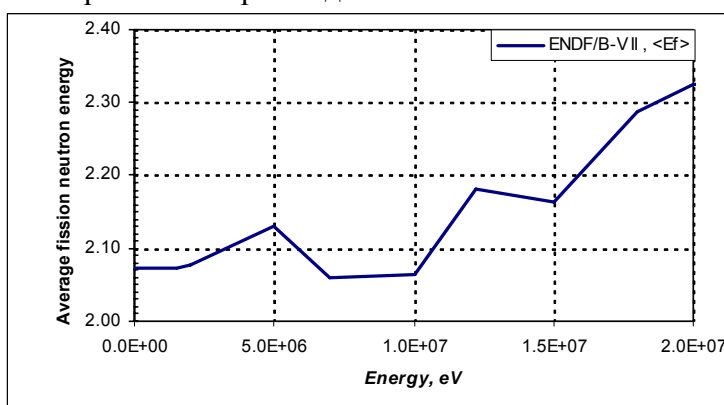


Рис.14. Энергетическая зависимость средней энергии нейтронов деления

О том, как получены спектры мгновенных нейтронов деления в описании файла JENDL-3.3 ничего не говорится. В описании файла Маслова сказано следующее:

«Спектры мгновенных нейтронов деления (СМНД) рассчитывались по полуэмпирической модели⁵. Спектры нейтронов испускаемых перед делением в $(n, n'f)$, $(n, 2nf)$ и $(n, 3nf)$ процессах рассчитывались по статистической модели Хаузера-Фецбаха с учетом предравновесных процессов. Качество описания проверялось на основе экспериментальных данных Старостов-83, Старостов-85, Lajtai-85, и Miura-02. Расчеты свидетельствуют о снижении средней энергии нейтронов деления при превышении порогов реакций $(n, n'f)$, $(n, 2nf)$ и $(n, 3nf)$. Спектры нейтронов, испускаемых осколками деления, рассчитывались как суперпозиция двух спектров Уатта, соответствующих легкому и тяжелому осколку, отличающихся параметрами, определяющими среднюю энергию. При этом учитывалось различие кинетических энергий осколков и зависимость этих энергий от момента, уносимого нейтронами, испускаемыми перед делением. Именно этот механизм и обусловил снижение средней энергии нейтронов деления при превышении порогов деления с предварительной эмиссией нейтронов.»

Приведенное обоснование вполне соответствует современному представлению о механизмах испускания нейтронов деления, а то, что оценка позволила описать и экспериментальные данные повышают их надежность. Правда, почти все спектры были измерены для деления тепловыми нейтронами и лишь данные Мюира получены при энергии 550 кэВ, лежащей все же существенно ниже порога реакции $(n, n'f)$. Как бы то ни было, **спектры, приведенные в Масловской оценке, представляются наиболее надежными.**

Обсудим теперь данные о запаздывающих нейтронах. В библиотеке РОСФОНД, как и в JEFF-3.1, принято универсальное 8-групповое представление данных о запаздывающих нейтронах определение групп одинаково для всех делящихся ядер: каждая из них включает в себя определенную группу предшественников с близкими периодами полураспада. Благодаря этому постоянные распада групп не зависят от делящегося ядра. Не зависят от делящегося ядра и спектры нейтронов каждой группы предшественников. Однако суммарный выход запаздывающих нейтронов и доли групп, понятно, зависят и от делящегося ядра и от энергии нейтронов, вызывающих деления.

Как и для других делящихся ядер, для урана-233 принимается их 8-групповая оценка из JEFF-3.1, со следующими, однако, исключениями.

1. Число запаздывающих нейтронов, испускаемых при делении тепловыми нейтронами, принято равным 0.00680 (в JEFF-3.1 оно равно 0.00673; в ENDF/B-VII- 0.00740, у Маслова – 0.00670). Энергетическая зависимость этого числа – такой, как в оценке JEFF-3.1 (см. рис. 13).
2. Спектры групп запаздывающих нейтронов приняты такими же, как и для урана-235 (см. ниже п. 92.235) и для всех других делящихся ядер. Однако выходы каждой из 8 групп приняты такими же, как в JEFF-3.1, т.е. на основе рекомендаций работы⁶.

4.3. Спектры и угловые распределения рассеянных нейтронов и нейтронов реакций (n, xn)

На рис.15 сравниваются оцененные значения первых трех моментов угловых распределений упруго рассеянных нейтронов. Оценки очень близки друг к другу. Все они получены расчетным путем. В EXFORe содержатся результаты лишь одной

⁵ Maslov V., Porodzinskij Yu., Baba M., Hasegawa A., Kornilov N., Kagalenko A., Teterova N.A. INDC(BLR)-..., IAEA, Vienna

⁶ Spriggs, Campbell and Pikaikin, Prg Nucl Eng 41,223(2002)

неопубликованной работы Наоаут-82, в которой измерялись угловые распределения нейтронов с энергией 0.7 и 1.5 МэВ. При этих энергиях отличить упруго рассеянные нейтроны от неупруго рассеянных на низколежащих уровнях весьма непросто. В кратком описании, данном в EXFORe процедура разделения этих процессов не описана, сказано лишь, что поправка на неупругое рассеяние, вводимая автором, составляла от 5 до 35% и при 0.7 МэВ и при 1.5 МэВ. Поскольку при названных энергиях расхождений в оценках нет, а эксперимент высокой надежностью не отличается, достаточно трудоемкое сравнение с ним сочтено излишним.

В РОСФОНД целесообразно включить оценку из ENDF/B-VII, занимающую, как правило, промежуточное положение.

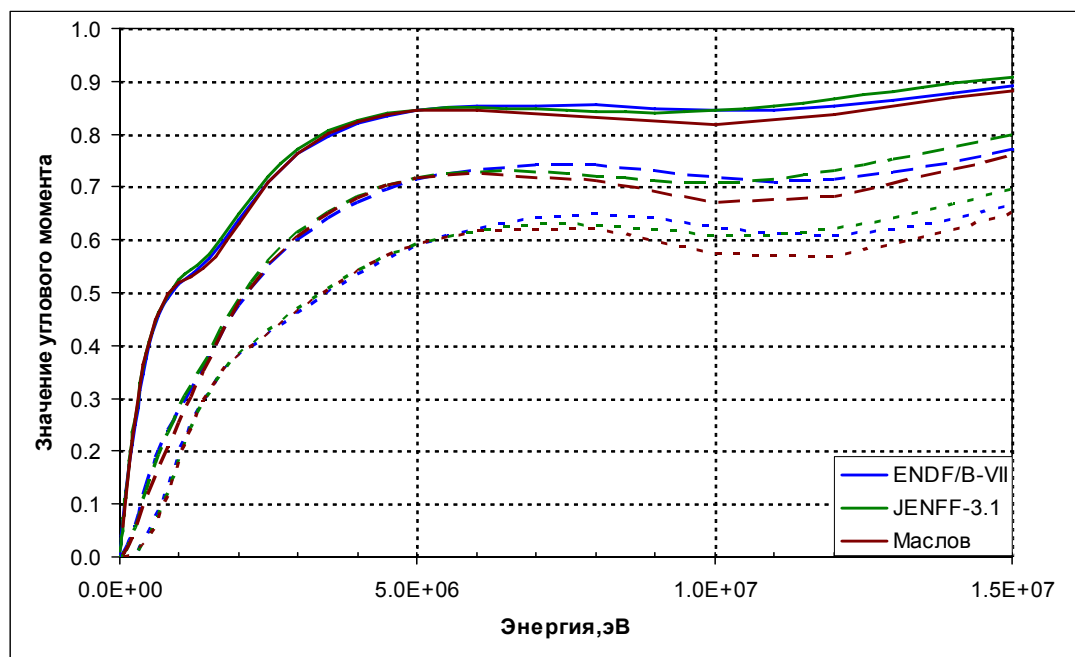


Рис.15. Угловые моменты распределения упруго рассеянных нейтронов: сплошные кривые – 1-й момент (средний косинус угла рассеяния), штриховые – 2-й момент, пунктирные – 3-й момент.

Что касается спектров неупруго рассеянных нейтронов, то ниже порога возбуждения континуума уровней они определяются полнотой учета возбуждаемых уровней ядра-мишени. В этом отношении оценка Маслова имеет определенное преимущество перед JENDL-3.3: в ней учтены все уровни, указанные в базе данных PCNUDAT 2, тогда как в JENDL-3.3 возбуждение части уровней с энергиями от 400 до 600 кэВ не описывается. В обеих оценках возбуждение континуума уровней описывается начиная с 600 кэВ, т.е. непосредственно вслед за областью дискретных уровней. Оценку, принятую в ENDF/B-VII, мы здесь не обсуждаем из-за порождаемых ею сомнений в корректности описания энергетического поведения суммарного сечения неупругого рассеяния (см. выше п.3). Спектры нейтронов, рассеянных с возбуждением континуума уровней

На рис.16 приведены спектры нейтронов, испытавших неупругое рассеяние с возбуждением континуума уровней ядра-мишени. Данные приводятся для начальных энергий 6 МэВ, 10 МэВ и 14 МэВ.

При 6 МэВ, т.е. ниже порога реакции (n,n'f) Масловский спектр существенно жестче остальных: очевидно, доля предравновесно испущенных нейтронов в нем выше.

При 10 МэВ оценки нейтронных спектров существенно различаются. В спектре, принятом в JENDL-3.3 нейтроны с энергиями ниже 3.7 МэВ вообще отсутствуют, т.е.

предполагается, что вслед за испусканием столь медленных нейтронов всегда следует деление. В оценке ENDF/B-VII “хвост” сравнительно медленных нейтронов наличествует, а в Масловской оценке на этом “хвосте” проявляется еще и максимум в области порядка 1 МэВ.

При 14 МэВ в спектре JENDL-3.3 нет нейтронов с энергией ниже 5 МэВ, но вероятность испускания нейтронов с энергиями 6 -8 МэВ существенно выше, чем в двух других оценках. Спектры ENDF/B-VII и Масловский выше 7 МэВ близки, но в Масловском спектре имеется длинный “хвост” медленных нейтронов. По каким-то причинам вслед за испусканием медленных нейтронов не происходит ни реакции (n,2n), ни деления.

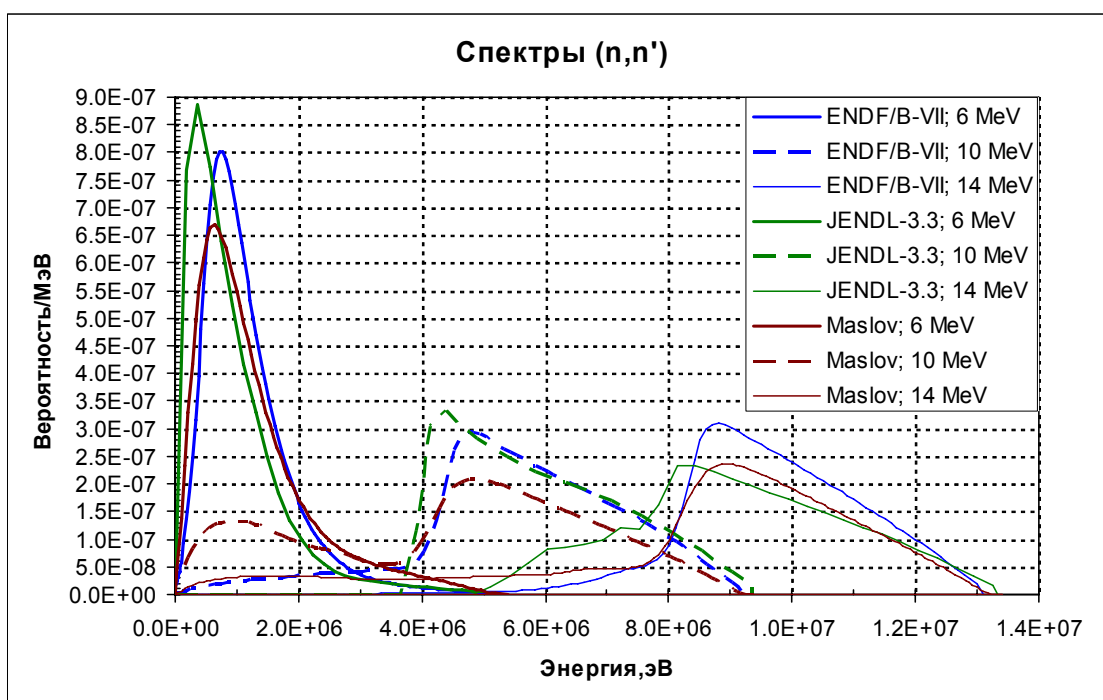


Рис.16. Сравнение спектров нейтронов, неупруго рассеянных с возбуждением континуума уровней.

На рис. 17 сравниваются оценки спектров нейтронов реакции (n,2n) для двух начальных энергий – 10 и 14 МэВ. Различия в оценках весьма велики, особенно при 14 МэВ. Расхождения указывают на неблагоприятное положение дел с оценкой спектров, а, стало быть, и сечений процессов, происходящих по разным каналам и разным образом (предравновесное испускание нейтронов и “обычное” испарение, деление после испускания одного-двух нейтронов тем или иным способом). Поскольку существенных различий в оценках суммарного сечения деления нет, происходит компенсация различий в оценке вкладов различных механизмов реакций.

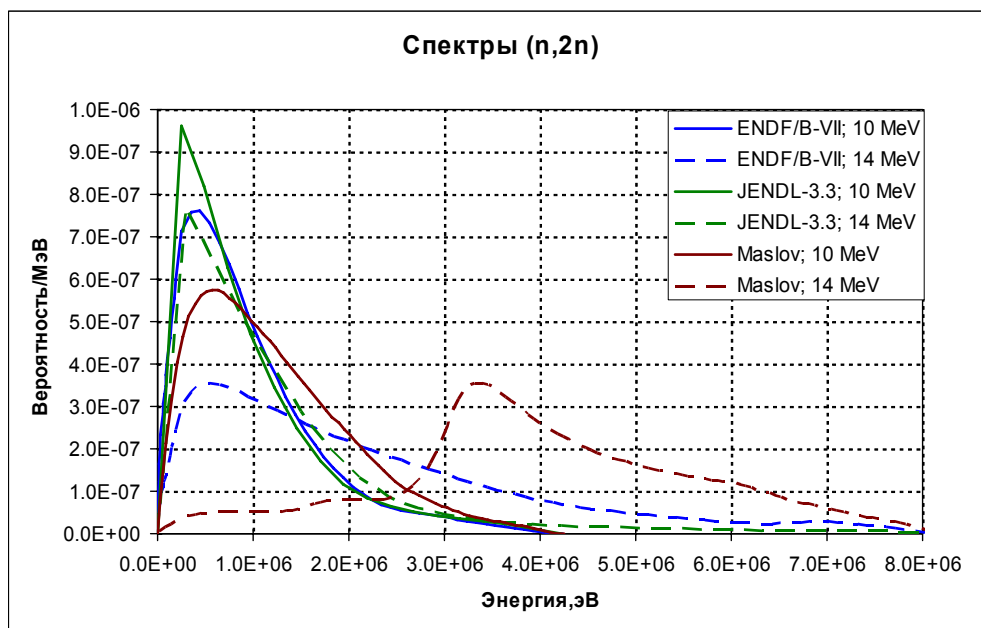


Рис.17. Сравнение спектров нейтронов из реакции (n,2n).

Из рассмотренного видно, что оценка спектров непрерывных реакций в ENDF/B-VII в некотором смысле промежуточна и это порождает соблазн выбрать ее для РОСФОНДа. Однако при дальнейшей валидации составного файла, в котором сечения взяты из одной оценки, а спектры – из другой, могут возникнуть проблемы. Поскольку сечения решено взять из, то следует и спектры принять в соответствии с этой оценкой.

Заметим, что данные о спектрах в ENDF/B-VII представлены (в отличие от двух других) в формате файла MF=6, т.е. спектры даются с учетом корреляций между энергией и углом рассеяния. Эта корреляция, однако, описывается упрощенно – по полуэмпирической систематике Калбаха-Манна. Кроме спектров нейтронов описываются и спектры ядер отдачи (в чем нет практического резона), а вот спектры фотонов, испускаемых в непрерывных процессах, не описываются. Это еще одно свидетельство неблагоприятности оценки, которое следует в дальнейшем, при пересмотре оценки, устранить.

5. Данные о рождении фотонов в нейтронных реакциях

Ни в Масловской оценке, ни в оценке JENDL-3.3 данные об образовании фотонов не приводятся. В JEFF-3.1 включены данные об образовании фотонов, взятые из ENDF/B-VI (оценка Стюарта и Вестона 1978 г.). В ENDF/B-VII с пересмотренными данными о гамма-излучении при радиационном захвате. Таким образом выбора оценок практически нет. Рассмотрим, на чем основаны имеющиеся оцененные данные.

Суммарное неупругое рассеяния : $MT=4$. Поскольку в оценке Стюарта и Вестона индивидуально учитывалось возбуждение лишь четырех первых уровней ядра-мишени, в спектре фотонов описаны переходы лишь между этими четырьмя уровнями. Спектр фотонов, образующихся при возбуждении континуума, описывается непрерывным спектром фотонов, который принят таким же, как для плутония-239⁷. Выше 1.09 МэВ множественность для $MT=4$ принята равной нулю. Возможность более корректного описания спектров фотонов, открывшаяся в связи с явным описанием значительно большего числа уровней (28 в ENDF/B-VII, 25 у Маслова, 25 в JENDL-3.3) нигде не реализована.

⁷ ENDF/B-VI.7, MAT=1399.

Фотоны, испускаемые при делении: множественность до 1.09 МэВ соответствует оценке Гофманов⁸; сами спектры приняты такими же как для плутония-239⁷. Выше 1.09 МэВ множественность принята равной нулю.

Множественность испускания фотонов при захвате ниже 1.09 МэВ произвольно принята равной 4.34. Спектр принят таким же, как для плутония-239 с корректировкой на различие энергий реакции.

Выше 1.09 МэВ приводится сечение образования фотонов при неупругих взаимодействиях (файл MF=13) и нормированный спектр (в файле MF=15) – такой же, как для плутония-239⁷.

В ENDF/B-VII множественность испускания фотонов при захвате и их спектры рассчитаны по программе GNASH. Все остальные данные приняты такими же, как описано выше, т.е. из ENDF/B-VI.7.

В РОСФОНД следует включить данные об образовании фотонов из ENDF/B-VII. При дальнейших пересмотрах файла и, особенно, в случае решения о включении файла MF=6 следует провести более корректный расчет фотонов, образуемых в нейтронных реакциях.

Заключение

На основании изложенного выше представляется целесообразным сформировать для РОСФОНДА комбинированный файл следующим образом.

1. Файлы MF=2 и MF=3 взять из оценки Маслова. В области разрешенных резонансов они, как отмечалось, совпадают.
2. Энергетическую зависимость нейтронов деления принять в соответствии с ENDF/B-VII, заменив значение при тепловой энергии на 2.4900 т.е. так, чтобы полное число нейтронов деления совпало с рекомендованной группой по стандартам значением 2.4968.
3. Включить данные о сечениях реакций (n,p) и (n,alfa) из EAF-2003. Соответственно уменьшить сечение упругого рассеяния, а в области разрешенных резонансов – ввести полное сечение, равное сумме (n,p) и (n,alfa).
4. Число запаздывающих нейтронов деления в тепловой точке принять равным 0.0068, а его энергетическую зависимость – в соответствии с оценкой JEFF-3.1. Принять также 8-групповое описание запаздывающих нейтронов из JEFF-3.1.
5. Спектры запаздывающих нейтронов принять такими, как для урана-235, а относительные выходы групп – в соответствии с JEFF-3.1.
6. Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов принять в соответствии с оценкой ENDF/B-VIIb2, остальные угловые распределения – в соответствии с оценкой Маслова.
7. Спектры мгновенных нейтронов деления и континуальные спектры других реакций принять в соответствии с оценкой Маслова.
8. Включить данные о выходах продуктов деления в соответствии с оценкой Р.Миллса (JEFF).
9. Данные об образовании фотонов в нейтронных реакциях принять в соответствии с ENDF/B-VII.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

⁸ D. C. Hoffmann and M. M. Hiffmann, Ann. Rev. Nucl. Sci. 24, 151 (1974)

92.5. Уран-234

Содержание в естественной смеси 0.0055%

Радиоактивен. ($T_{1/2}=2.455 \cdot 10^5$ лет). Альфа-распадается в торий-230 ($T_{1/2}=7.54 \cdot 10^4$ лет).

В современных библиотеках содержатся следующие оценки данных для урана-233.

ФОНД-2.2 – оценка Т.Оhsawa, М.Иnoue, Т.Нfкаgawa, 1987

ENDF/B-VII - оценка Young,Chadwick, 2005.

JENDL-3.3 – оценка Т.Watanabe, 1987

JEFF-3.1 – оценка Маслова, 2002.

В оценках, принятых в ENDF/B-VIIb2 и в JEFF-3.1 граница области разрешенных резонансов, содержащей 118 резонансов и одно связанное состояние, равна – 1500эВ. Положения резонансов в точности совпадают. Ширины резонансов, однако, различаются. В ENDF/B-VII они соответствуют данным Мухабхаба-84; у Маслова используется более поздняя оценка из JENDL-3.2.

На рис. 1 изображена нарастающая сумма числа резонансов, на рис. 2 – сумма приведенных нейтронных ширин. Из графиков можно заключить, что выше 900 эВ часть резонансов пропущена, но пропущенные резонансы имеют малые ширины и их пропуск не должен существенно сказываться на рассчитываемых сечениях.

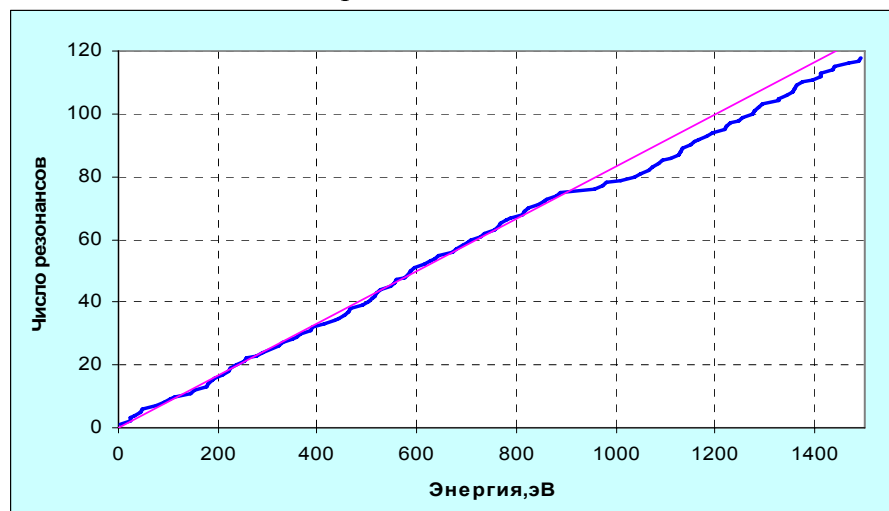


Рис.1. Нарастающая сумма числа резонансов

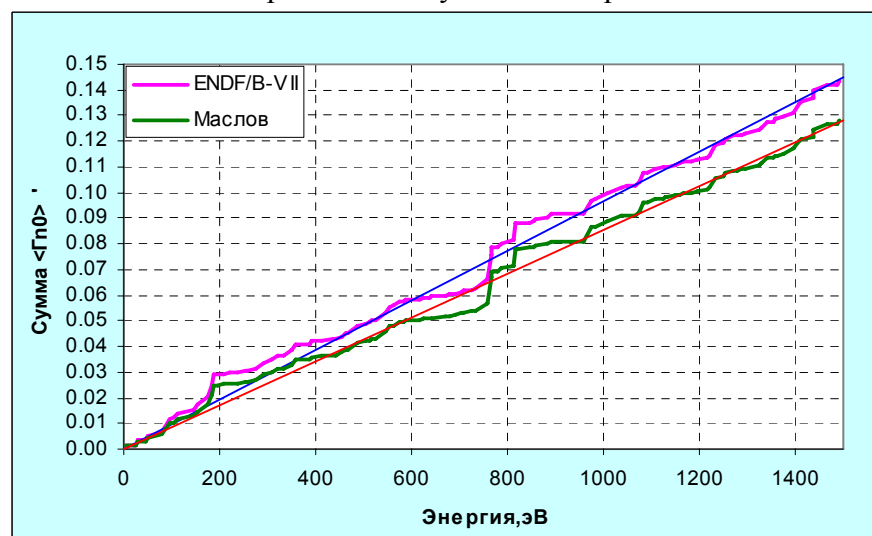


Рис.2. Сумма приведенных нейтронных ширин

Из рис. 2 видно, что в оценке Маслова нейтронные ширины приняты меньшими, чем в ENDF/B-VII (примерно на 12%). Радиационные ширины, напротив больше, в среднем на 45%. Делительные ширины практически совпадают.

В обеих оценках присутствуют области неразрешенных резонансов, описываемые параметрами s-, p- и d- волны. В оценке Маслова эти параметры сильно меняются с энергией, описывая гросс-структуру сечений. Результат виден из рис. 3 и 4, на которых сравниваются сечения захвата и деления выше области разрешенных резонансов.

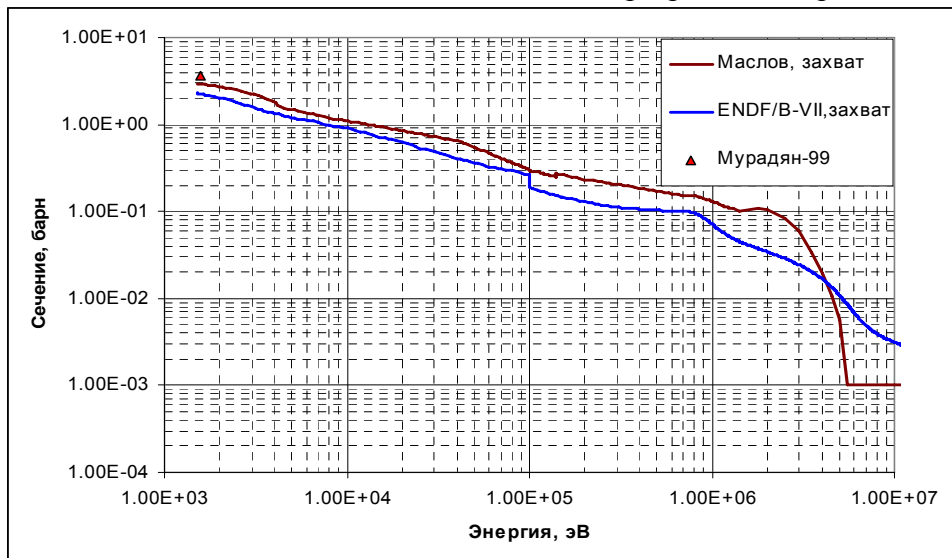


Рис.3. Сечение захвата

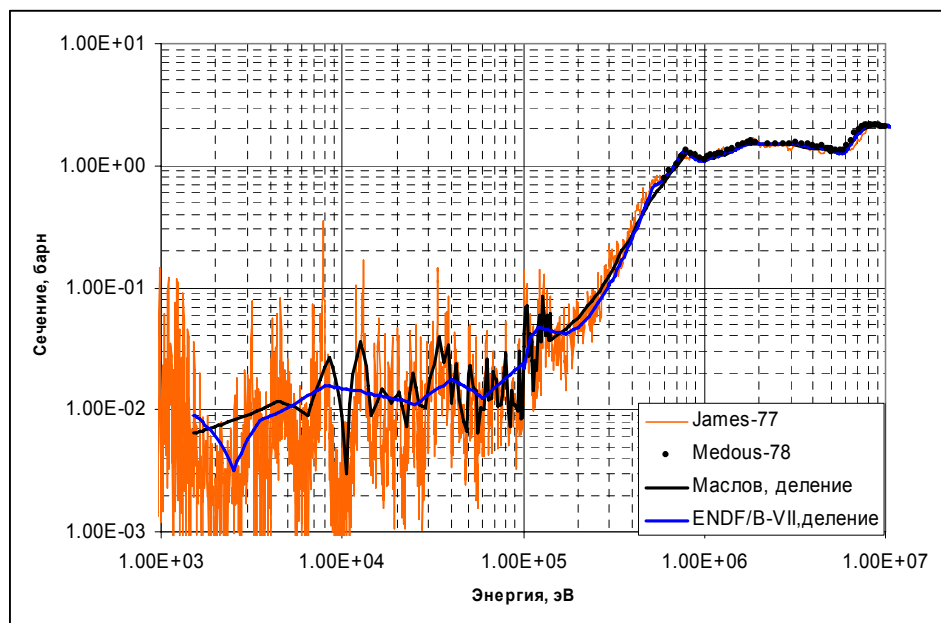


Рис.4. Сечение деления.

Повышенное в оценке Маслова сечение захвата оправдывается единственно имеющимся результатом Мурадяна. Отраженная в оценке Маслова структура подпорогового деления отражает результаты Джеймса.

Заключение

В РОСФОНД рекомендуется принять оценку Маслова из JEFF-3.1. Спектры 8 групп запаздывающих нейтронов следует принять такими же, как у урана-235. Выходы продуктов деления урана-234, содержатся в ENDF/B-VI (Ингланд и Ридер 1989) и в JEFF-3.1 (Миллз, 2005). Естественно принять последнюю оценку.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице

| | Total | Elastic | Inelastic | (n,2n) | (n,f) | (n, γ) |
|---------------------------------|--------|---------|-----------|--------|-------|----------------|
| 0.0253 эВ | 119.23 | 19.416 | | | 99.75 | 67.96 |
| Резонансный интеграл | | | | | 6.637 | 631.98 |
| Спектр деления ^{235}U | 7.516 | 4.430 | 1.812 | 0.003 | 1.170 | 0.101 |
| 14 МэВ | 5.857 | 2.819 | 0.533 | 0.523 | 1.978 | 0.001 |

Автор заключения

Николаев М.Н.

92.6. Уран-235

1. Общие характеристики

1.1. $Z=92$

1.2. $A=235.043929\pm 0.000002$

1.3. $A_w=233.0247898\pm 0.000002$

1.4. Содержание в естественной смеси: 0.72 ат%;
0.711 вес%

1.5. Перечень нейтронных реакций⁹

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт [*] |
|-----|----------------|------------|---------------------------|---------------------------|
| 16 | (n,2n) | -5.297481 | -5.320215 | ^{234}U |
| 17 | (n,3n) | -12.142136 | -12.194243 | ^{233}U |
| 37 | (n,4n) | -17.904189 | -17.981023 | ^{232}U |
| 19 | (n, f_1) | 193.72 | - | $\text{FP}+n+\gamma$ |
| 20 | (n, $n'f_2$) | 193.72 | 4.5 | $\text{FP}+n+\gamma$ |
| 21 | (n, $2nf_3$) | 193.72 | 9.5 | $\text{FP}+n+\gamma$ |
| 38 | (n, $3nf_4$) | 193.72 | 14.0 | $\text{FP}+n+\gamma$ |
| 102 | (n, γ) | 6.545451 | - | ^{236}U |
| 103 | (n,p) | -0.627081 | -0.6297716 | ^{235}Pa |
| 107 | (n, α) | 11.118858 | | ^{232}Th |

⁹ В рассматриваемой области энергий возможны и иные реакции с вылетом заряженных частиц- (n,d), (n,t), (n, ^3He) и др. - в том числе и экзоэнергетические, -(n,2 α), (n, $n\alpha$), - сечения которых, однако, весьма малы и в файле оцененных данных не приводятся.

1.6. Радиоактивность:

Период полураспада: $7.038 \cdot 10^8$ лет.

Вероятность альфа-распада: 0.99999998

Вероятность спонтанного деления: $2 \cdot 10^{-8}$

Энергия распада $Q_\alpha = 4.678$ МэВ; $Q_{sf} = 176.4$.

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Область разрешенных резонансов.

2.1.1. Обзор имеющихся оцененных данных

С точки зрения физики реакторов на тепловых и промежуточных нейтронах область разрешенных резонансов (в которую входит и область «тепловых» энергий) является наиболее важной. Два существенно разных набора резонансных параметров фигурируют в современных библиотеках оцененных нейтронных данных для урана-235. Оба этих набора были получены в Ок-Риджской Национальной Лаборатории Л.Лилом, Н. Ларсон и др. с помощью одной и той же программы обработки исходных экспериментальных данных – программы SUMMY, осуществляющей подбор параметров резонансной формулы Райха-Мура методом наименьших квадратов с тем, чтобы описать всю совокупность входных экспериментальных данных.

Первый из них¹⁰ был получен в 1988 г. и был включен в файл данных для урана-235 в библиотеке ENDF/B-VI (Revision 2), а затем и в библиотеки ФОНД-2.2 и CENDL-2. На основе этой оценки были составлены и 299-групповые константы БНАБ-93.

В 1997 г. Оценка была повторена с использованием более мощной ЭВМ, что позволило одновременно обрабатывать экспериментальные данные во всей области энергий ниже 2.5 кэВ (ранее эта область разбивалась на 11 интервалов). При этом анализировались экспериментальные данные тех же авторов (лишь данные Вестона и Тодда, ранее полученные авторами оценки в порядке частного сообщения, в 1997 г. были взяты со ссылкой на журнальную публикацию¹¹ и использованы некоторые дополнительные экспериментальные данные в области энергий ниже 4 эВ) Полученный в результате набор резонансных параметров¹² был включен в библиотеку ENDF/B-VI как “Revision 5”. Эти резонансные параметры, охватывающие область энергии до 2.25 кэВ, приняты в последних версиях всех библиотек: ENDF/B-VII, JEFF-3, JENDL-3.3¹³.

В 2004 г. в ФЭИ был выполнен расчетный анализ результатов наиболее надежных 56 критических экспериментов с растворами высокообогащенного урана (с концентрацией урана до 700 г/л), выполненных в различных лабораториях мира. Было обнаружено, что в более ранней оценке сечения радиационного захвата при энергиях выше 100 эВ слишком низки, что не позволяет описать совокупность данных по критичности. В то же время результаты расчетов, проведенных с использованием более поздней оценки (“Revision 5”), согласуются с экспериментальными данными в пределах погрешностей последних. Это заключение послужило решающим фактором в пользу

¹⁰ N.M.Larson, ORNL/TM-9719/R1,(1985); см. также N.M.Larson, F.G.Perey "Resonance Parameter Analysis with SAMMY," Int. Conf. Nuclear Data for Science and Tech., May 30-June 3, 1988, Mito, Japan.

¹¹ L.W.Weston and J.H.Todd, Nucl. Sci. Eng.,11. 415 (1992)

¹² L.C. Leal, H. Derrien, N.M. Larson, R.Q. Wright, "R-Matrix Analysis of 235U Neutron Transmission and Cross Sections in the Energy Range 0 eV to 2.25 keV," Oak Ridge National Laboratory report ORNL/TM-13516 (1997).

¹³ В JENDL-3.3 параметры приняты в соответствии с иной публикацией результатов той же оценки: Leal L.C. et al.: Nucl. Sci. Eng., 131, 230 (1999)

выбора оценки ENDF/B-VI, "Revision 5" для включения в библиотеку РОСФОНД. Эта оценка, как отмечалось, включена и в ENDF/B-VII.

Сечения при энергии нейтронов 0.0253 эВ, следующие из этой оценки, имеют значения:

$$\begin{aligned}\sigma_f &= 584.88 \text{ барн;} \\ \sigma_c &= 98.66 \text{ барн;} \\ \sigma_e &= 15.67 \text{ барн;} \\ v &= 2.4367.\end{aligned}$$

2.1.2. Резонансная формула Райха-Мура

Для описания энергетической зависимости сечений в области разрешенных резонансов использовалась формула Райха-Мура, несравненно более сложная известной формулы Брайта-Вигнера.

Для того, чтобы было ясно, как энергетическое поведение сечений связано с параметрами резонансов, приводимыми в файле оцененных данных, запишем использовавшуюся для этой цели формулу, учитывающую эффекты межрезонансной интерференции. В общем виде формула для сечения реакции γ в резонансах с определенным спином J и четностью имеет вид:

$$\sigma_{n\gamma} = \frac{\pi}{k^2} g_J |\delta_{n,\gamma} - U_{n,\gamma}|^2, \quad (1)$$

где g_J – статистический множитель, $U_{n,\gamma}$ – матрица столкновений:

$$U_{n,\gamma} = e^{-i(\phi_n + \phi_\gamma)} \left[2 \left((I - K)^{-1} \right)_{n,\gamma} - \delta_{n,\gamma} \right]. \quad (2)$$

Здесь ϕ_n и ϕ_γ – фазы рассеяния в нейтронном канале и в канале реакции γ (для захвата и деления равные нулю), $\delta_{n,\gamma}$ – символ Кронекера,

$$(I - K)_{n,\gamma} = \delta_{n,\gamma} - \frac{i}{2} \sum_k \frac{\Gamma_{n,k}^{1/2} \Gamma_{n,\gamma}^{1/2}}{E_k - E - i\Gamma_{\gamma,k}/2}. \quad (3)$$

Здесь суммирование ведется по всем состояниям k составного ядра с заданным спином J и четностью. Если определить матрицу

$$\rho_{n,\gamma} = \delta_{n,\gamma} - ((I - K)^{-1})_{n,\gamma}, \quad (4)$$

то энергетически независимости сечений будут иметь следующий вид.

Полное сечение:

$$\sigma_t(E) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{NLS} \sum_{s=|l-1/2|}^{l+1/2} \sum_{J=|j-s|}^{l+s} g_J \left[(1 - \cos 2\phi_1) + 2 \operatorname{Re}(\rho_{n,n} e^{-2i\phi_1}) \right]; \quad (5)$$

сечение упругого рассеяния:

$$\sigma_{nn}(E) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{NLS} \sum_{s=|l-1/2|}^{l+1/2} \sum_{J=|j-s|}^{l+s} g_J \left[2 - 2 \cos 2\phi_1 + 4 \operatorname{Re}(\rho_{n,n} e^{-2i\phi_1}) - 4 \operatorname{Re}(\rho_{n,n}) + 4 |\rho_{n,n}|^2 \right] \quad (6)$$

сечение поглощения (захвата и деления):

$$\sigma_{n,abs}(E) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{NLS} \sum_{s=|l-1/2|}^{l+1/2} \sum_{J=|j-s|}^{l+s} g_J \left[\operatorname{Re}(\rho_{n,n}) - |\rho_{n,n}|^2 \right]; \quad (7)$$

сечение деления (с учетом двух каналов):

$$\sigma_{nf}(E) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{NLS} \sum_{s=|l-1/2|}^{l+1/2} \sum_{J=|j-s|}^{l+s} g_J \left[|\rho_{n,f1}|^2 + |\rho_{n,f2}|^2 \right]. \quad (8)$$

Суммирование ведется по всем орбитальным моментам l (в случае рассматриваемой оценки учитываются только s-резонансы, образуемые при $l=0$) и по всем спиновым состояниям (в данном случае возможно образование состояний со спинами $7/2+1/2=4$ и $7/2-1/2=3$).

Приведенные формулы показывают сколь сложна и не очевидна связь между приводимыми в файле резонансными параметрами E_k , Γ_{nk} , $\Gamma_{\gamma k}$, Γ_{f1k} и Γ_{f2k} и нейтронными сечениями.

2.1.3. Общие характеристики области разрешенных резонансов

Спин и четность ядра-мишени: $7/2^-$

Радиус рассеяния: $R=0.9602 \cdot 10^{-12}$ см от энергии не зависит. Он используется только для расчета проникаемостей потенциального барьера и фаз рассеяния.

Резонансная формула: Райха-Мура.

Расчет анизотропии рассеяния по резонансным параметрам не предусматривается

Число орбитальных моментов – один (именно $l=0$, т.е. рассматриваются только s-резонансы)

Число систем резонансов с различными спинами J : два ($J=3$ и $J=4$)

Границы области разрешенных резонансов: от 10-5 эВ до 2250эВ

Число рассмотренных резонансов равно 3193; из них 14 ниже энергии связи нейтрона и 9 выше границы области разрешенных резонансов.

Число резонансов с $J=3$ равно 1449; из них 1433 в области от 0 до 2250 эВ.

Число резонансов с $J=4$ равно 1744; из них 1732 в области от 0 до 2250 эВ.

2.1.4. Детали оценки

Настоящая секция содержит перевод описания оценки резонансных параметров, приведенный в заголовочной секции файла данных для урана-235 из библиотеки ENDF/B-VI "revision 5".

Оценка резонансных параметров методом наименьших квадратов проводилась с учетом результатов интегральных экспериментов. В качестве входных параметров использовались тепловые сечения (деления, захвата и упругого рассеяния) и g- факторы Весткотта из файла нейтронных стандартов ENDF/B-6¹⁴, а также фактор τK_1 , оцененный Харди¹⁵. В таблице 1 названные параметры, полученные в результате подгонки только по результатам дифференциальных экспериментов, а затем и с учетом интегральных данных сравниваются с входными данными программы SAMMY

Таблица 1. Тепловые параметры.

| Параметр | Входное значение | Подгонка только по дифф. данным | Подгонка по дифф. и интегр. данным |
|-----------------|------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Сечение деления | 584.25±1.11 | 582.28 | 584.88 |

¹⁴ A. Carlson, W.P. Poenitz, G.M. Hale et al., "The ENDF/B-6 Neutron Cross Section Measurements Standards," National Institute of Standards and Technology report NISTIR-5177 (1993)

¹⁵ J. Hardy, Brookhaven National Laboratory, report BNL-NCS-51123 [ENDF-300] (1979) Sec. B.1.

| | | | |
|-------------------|---------------|--------|--------|
| Сечение захвата | 98.96±0.74 | 99.18 | 98.66 |
| Сечение рассеяния | 15.46±1.06 | 15.44 | 15.12 |
| g_f | 0.9771±0.0008 | 0.9743 | 0.9764 |
| g_a | 0.9789±0.0008 | 0.9774 | 0.9785 |
| g_y | | 0.9956 | 0.9910 |
| K1 | 722.70±3.90 | 717.48 | 722.43 |

Значение ν , полученное в результате подгонки под перечисленные параметры получилось равным 2.4367±0.0005.

В таблице 2 сечения деления и захвата, полученные программой SAMMY по подогнанным резонансным параметрам сравниваются с результатами непосредственных измерений.

Таблица 2.

Расчетные и экспериментальные значения интегралов от сечения деления

| Область энергий, эВ | | Расчет по рез. параметрам | Экспериментальные данные | | |
|---------------------|--------|---------------------------|--------------------------|----------|----------|
| от | до | | Shark88 | Weston84 | Weston92 |
| 0.5 | 20.0 | 910.4 | 929.9 | | |
| 20.0 | 60.0 | 1867.8 | 1882.8 | 1869.9 | |
| 60.0 | 100.0 | 954.0 | 968.0 | 954.2 | |
| 100.0 | 200.0 | 2032.7 | 2092.7 | 2089.5 | 2073.9 |
| 200.0 | 300.0 | 2062.2 | 2007.0 | 2060.0 | 2054.6 |
| 300.0 | 400.0 | 1280.8 | 1321.6 | 1297.1 | 1292.9 |
| 400.0 | 500.0 | 1333.2 | 1391.5 | 1351.8 | 1347.9 |
| 500.0 | 600.0 | 1489.2 | 1467.9 | 1499.2 | 1494.3 |
| 600.0 | 700.0 | 1126.6 | 1156.4 | 1134.1 | 1132.6 |
| 700.0 | 800.0 | 1088.7 | 1085.8 | 1093.3 | 1075.7 |
| 800.0 | 900.0 | 797.6 | 784.0 | 813.0 | 804.9 |
| 900.0 | 1000.0 | 724.4 | 723.9 | 738.2 | 721.4 |
| 1000.0 | 2000.0 | 7036.1 | | | 7054.2 |

Таблица 3.

Расчетные и экспериментальные значения интегралов от сечения захвата

| Область энергий, эВ | | Расчет по рез. параметрам | Экспериментальные данные | |
|---------------------|--------|---------------------------|--------------------------|---------|
| от | до | | deSaussure67 | Perez73 |
| 0.5 | 20.0 | 653.5 | 647 | 1057 |
| 20.0 | 60.0 | 1066.1 | 1084 | 504 |
| 60.0 | 100.0 | 490.2 | 477 | 1138 |
| 100.0 | 200.0 | 1158.8 | 1148 | 940 |
| 200.0 | 300.0 | 907.8 | 904 | 642 |
| 300.0 | 400.0 | 660.2 | 658 | 478 |
| 400.0 | 500.0 | 495.9 | 506 | 562 |
| 500.0 | 600.0 | 533.3 | 506 | 449 |
| 600.0 | 700.0 | 494.8 | 481 | 475 |
| 700.0 | 800.0 | 490.1 | 513 | 397 |
| 800.0 | 900.0 | 439.8 | 444 | 482 |
| 900.0 | 1000.0 | 504.2 | 542 | 463 |
| 1000.0 | 1100.0 | 509.6 | 522 | 332 |
| 1100.0 | 1200.0 | 413.7 | 395 | 267 |
| 1200.0 | 1300.0 | 340.4 | 372 | 225 |
| 1300.0 | 1400.0 | 304.1 | 304 | 254 |
| 1400.0 | 1500.0 | 355.7 | 301 | 1057 |
| 20.0 | 1500.0 | 9164.7 | 9046 | 8665 |

Резонансные интегралы деления и захвата, рассчитанные по оцененным резонансным параметрам равны, соответственно, 276.04 барн и 140.49 барн, что ведет к

величине альфа, равной 0.509, что прекрасно согласуется с данными интегральных экспериментов.

При оценке резонансных параметров учитывались данные следующих дифференциальных экспериментов.

1. Эксперименты Harvey88 по пропусканию на ускорителе ORELA на 18-метровой пролетной базе с образцом толщиной 0.03269 атомов/барн, охлажденным до 77К (от 0.4 до 68 эВ).
2. Эксперименты Harvey88 по пропусканию на ускорителе ORELA на 80-метровой пролетной базе с образцом толщиной 0.00233 атомов/барн, охлажденным до 77К (от 4 до 2250 эВ).
3. Эксперименты Harvey88 по пропусканию на ускорителе ORELA на 80-метровой пролетной базе с образцом толщиной 0.03269 атомов/барн, охлажденным до 77К (от 4 до 2250 эВ).
4. Измерения сечения деления Schark88 на ускорителе RPI на пролетной базе 8.4 м (от 0.02 до 20 эВ).
5. Измерения сечения деления и захвата deSaussure67 на ускорителе ORELA на пролетной базе 25.2 м (от 0.02 до 2250 эВ).
6. Измерения сечения деления и захвата Perez73 на ускорителе ORELA на пролетной базе 39м (от 0.01 до 100 эВ).
7. Измерения сечения деления Gwin84 на ускорителе ORELA на пролетной базе 25.6 м (от 0.01 до 20 эВ).
8. Эксперименты Spencer84 по пропусканию на ускорителе ORELA на 18-метровой пролетной базе с образцом толщиной 0.001486 атомов/барн (от 0.01 до 1.0 эВ).
9. Измерения сечения деления Wagemans88 на ускорителе GELINA на 18-метровой пролетной базе (от 0.001 до 1.0 эВ)
10. Измерения сечений поглощения и деления Gwin96 на ускорителе ORELA (от 0.01 до 4 эВ).
11. Измерения сечения деления Weston84 на ускорителе ORELA на 18.9-метровой пролетной базе (от 14 до 2250 эВ).
12. Измерения величины η Wartena87 на 8-метровой пролетной базе (от 0.0018 до 1.0 эВ).
13. Измерения величины η Weigmann90 на механическом прерывателе (от 0.0015 до 0.15 эВ)
14. Измерения сечения деления Weston92 на ускорителе ORELA на 86.5-метровой пролетной базе (от 100 до 2000 эВ).
15. Измерения сечения деления Moxon92 на ускорителе ORELA (от 0.01 до 50 эВ).

2.1.5. Ссылки на использовавшиеся экспериментальные работы.

| Указатель | Ссылка |
|--------------|---|
| Harvey88 | J.A. Harvey, N.W. Hill, F.G. Perey et al. , Nuclear Data for Science and Technology, Proc. Int. Conf. May 30-June 3, 1988, Mito, Japan. (Saikon Publishing, 1988) p. 115 |
| Schark88 | R.A. Schrack , "Measurement of the $^{235}\text{U}(n,f)$ Reaction from Thermal to 1 keV," Nuclear Data for Science and Technology, Proc. Int. Conf. May 30-June 3, Mito, Japan (Saikon Publishing, 1988) p. 101 |
| deSaussure67 | G. de Saussure, R. Gwin, L.W. Weston, and R.W. Ingle , "Simultaneous Measurements of the Neutron Fission and Capture Cross Section for ^{235}U for Incident Neutron Energy from 0.04 eV to 3 keV," Oak Ridge National Laboratory report ORNL/TM-1804 (1967) |
| Perez73 | R.B. Perez, G. de Saussure, and E.G. Silver , Nucl.Sci. Eng. 52, 46 (1973) |
| Gwin84 | R. Gwin, R.R. Spencer, R.W. Ingle, J.H. Todd, and S.W. Scoles , Nuc.Sci.Eng. 88, 37 (1984) |
| Spencer84 | R.R. Spencer, J.A. Harvey, N.W. Hill, and L. Weston , Nucl.Sci.Eng. 96, |

| | |
|------------|--|
| Wagemans88 | C. Wagemans, P. Schillebeeckx, A.J. Deruyter, and R. Barthelemy, "Subthermal Fission Cross Section Measurements for ^{233}U and ^{239}Pu ," Nuclear Data for Science and Technology, Proc. Int. Conf. May 30-June 3, Mito, Japan (Saikon Publishing, 1988) p. 91 |
| Gwin96 | R. Gwin, To be published in Nuclear Science Engineering |
| Weston84 | L.W. Weston and J.H. Todd, Nucl.Sci.Eng. 88, 567 (1984) |
| Wartena87 | J.A. Wartena, H. Weigmann, and C. Burkholz, report IAEA Tecdoc 491 (1987) p.123 |
| Weigmann90 | H. Weigmann, P. Geltenbort, B. Keck, K. Shrenckenbach, and J.A. Wartena, The Physics of Reactors, Proc. Int. Conf., Marseille, 1990, Vol.1 (1990) p. 133 |
| Weston92 | L.W. Weston and J.H. Todd, Nucl.Sci.Eng. 111, 415 (1992) |
| Moxon92 | M.C. Moxon, J.A. Harvey, and N.W. Hill, private communication, Oak Ridge National Laboratory (1992) |

2.1.6. Сравнение результатов различных оценок одних и тех же экспериментальных данных

Поскольку и в прежней оценке использовались те же самые исходные экспериментальные данные, представляет интерес сравнить результаты этих оценок. На рис. 1 проводится сравнение мультигрупповых сечений, рассчитанных на основе сравниваемых оценок. На графиках приводятся отклонения сечений рассчитанных по ENDF/B-VI(Rev.5) от сечений, рассчитанных по ENDF/B-VI(Rev.5) в процентах.

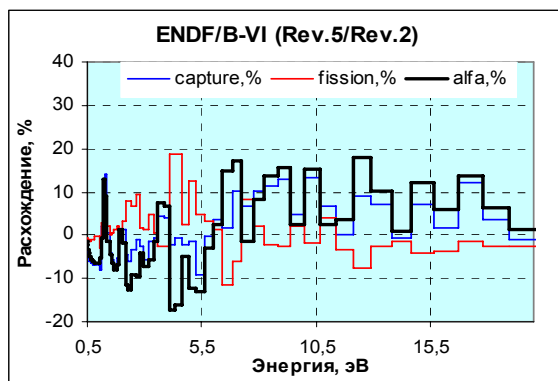


Рис.1а

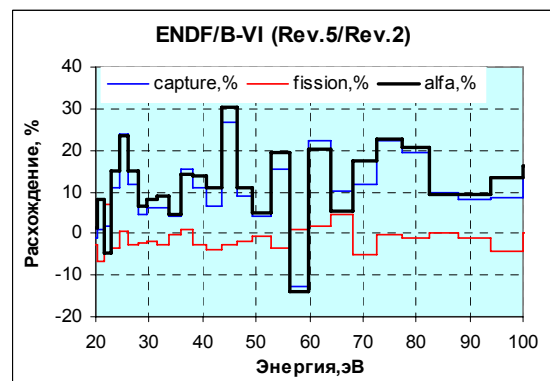


Рис.1б

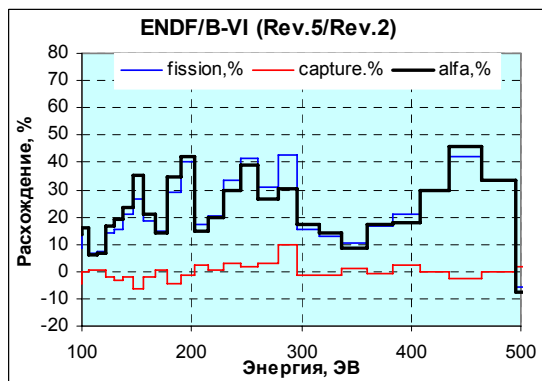


Рис.1в

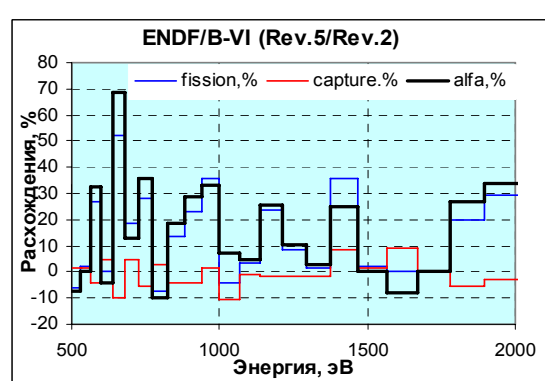


Рис.1 г.

Как видно, эффект переоценки оказался весьма существенным: сечение захвата и его отношение к сечению деления существенно возросли. Надо сказать, что именно это повышение резко снизило расчетно-экспериментальные расхождения в критичности

водных растворов высокообогащенного урана, сведя их до незначительного уровня. Причина столь большого изменения оцененных данных авторами оценки не разъяснялась.

Заметим в связи с этим, что в библиотеке JENDL-3.3, как отмечалось, принята та же (на первый взгляд) оценка тех же авторов, однако ссылки на источники данных различаются: в ENDF/B-VI (Rev.5) дана ссылка на Ок-Риджский отчет⁴, а в JENDL-3.3 – на журнальную публикацию⁵. На рис. 2 проводится сравнение мультигрупповых сечений, рассчитанных по данным ENDF/B-VI(Rev.5) и JENDL-3.3. Как видим, расхождения оценок, принятых в ENDF/B-VI(Rev.5) и в JENDL-3.3, хоть и невелики, но заметны. Практически точное совпадение результатов имеет место лишь при энергиях ниже 70 эВ.

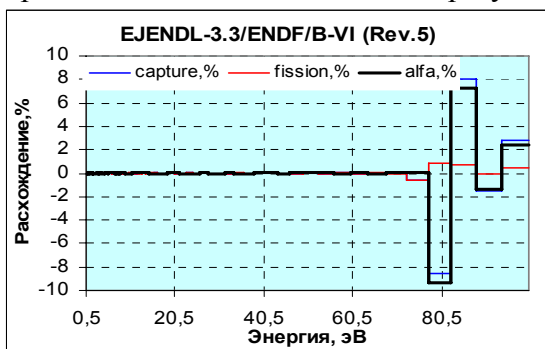


Рис. 2а

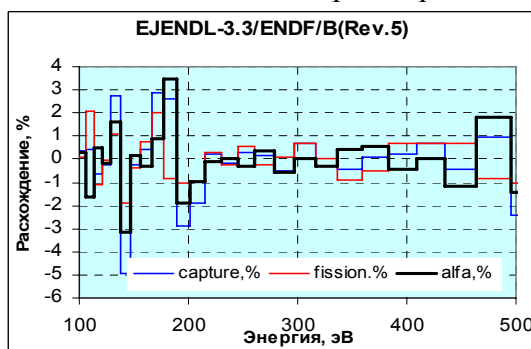


Рис. 2б

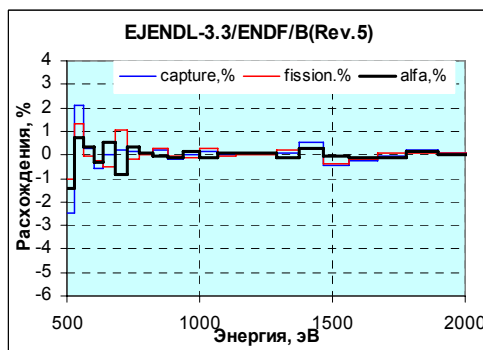
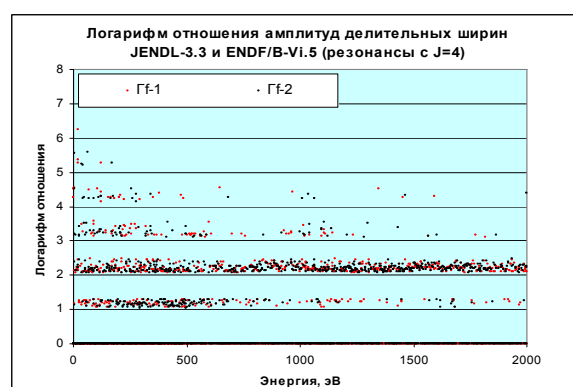
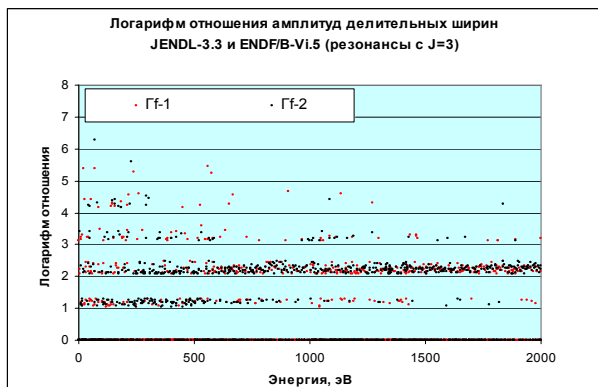


Рис. 2в.

Сравнение резонансных параметров из обсуждаемых оценок показывает, что число и положения резонансов, их нейтронные и радиационные ширины совершенно идентичны. Однако все делительные ширины, которым приписан отрицательный знак¹⁶ весьма существенно различаются, тогда как делительные ширины с положительным знаком в точности совпадают. На рис. 3 приведены значения десятичных логарифмов отношений отрицательных делительных ширин резонансов.



¹⁶ Знак делительной ширины определяется относительной фазой того из двух делительных каналов, к которому относится данная делительная ширина. Знак существенен в членах, описывающих межрезонансную интерференцию.

Рис.3а

Обращает на себя внимание тот факт, что логарифмы отношений делительных ширин группируются вокруг значений 1.1, 2.2, 3.3, 4.4, 5.5.

Отмеченные очень сильные различия в делительных ширинах и их слабое влияние на рассчитываемые сечения требуют объяснения (в области ниже 70 эВ, где сечения практически совпадают, делительные ширины, как видно из рис.3, также различаются на порядки).

Рис.3б

2.1.7. Статистические характеристики принятых параметров разрешенных резонансов. Пропуск слабых уровней

На рис. 4 показана энергетическая зависимость плотности уровней с $J=3$ и $J=4$. Плотность уровней выражена в числе резонансов, приходящихся на каждые 100 эВ.

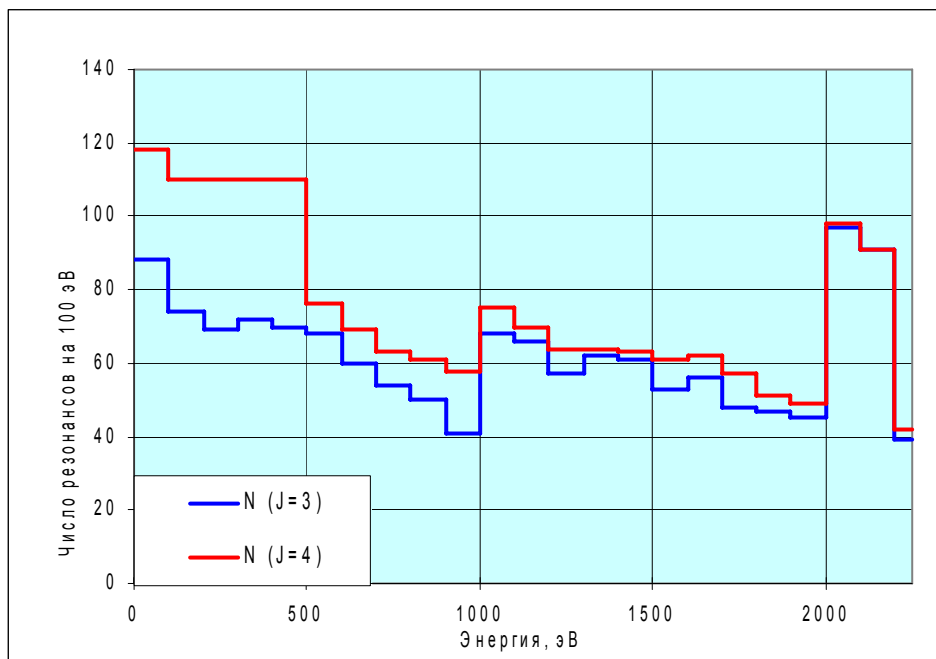


Рис.4 Энергетическая зависимость плотности уровней

Как видно, с увеличением энергии до 1000 эВ «наблюдаемая» плотность уровней монотонно падает, уменьшаясь вдвое. Затем следует скачок вверх примерно в полтора раза, а за ним снова монотонный спад примерно до прежнего уровня к 2000 эВ. При этой энергии плотность уровней вновь скачком увеличивается почти до первоначальной величины, после чего следует очередной спад, на этот раз весьма резкий. Из описания оценки, приведенного в разделе 2.1.4., причина наблюдаемой нерегулярности, свидетельствующей о подключению к анализу данных с лучшим энергетическим разрешением начиная с 1000 эВ и с 2000 эВ не ясна, однако сам факт резких изменений разрешения в использовавшихся при анализе дифференциальных данных очевиден.

На рис. 5 приведены распределения приведенных нейтронных ширин резонансов по 10%-м квантилям распределения Портера-Томаса (χ^2 –распределения с одной степенью свободы), которому они должны подчиняться при отсутствии пропуска резонансов и правильного определения спина и четности резонанса (т.е. отношения его к рассматриваемой популяции резонансных уровней). Приведенные нейтронные ширины отнесены к средней нейтронной ширине каждой из рассматриваемых систем уровней. Ожидаемые распределения изображены пунктирными или прерывистыми тонкими линиями. Пунктирные линии соответствуют оценке средней нейтронной ширины по интервалу 0 -500эВ; более высокие прерывистые – по интервалу 0 – 100 эВ, в котором наблюдаемая плотность резонансов выше (см. рис.1).

На рис.5а приводятся распределения приведенных ширин резонансов, лежащих при энергиях ниже 500эВ. Видно, что для резонансов с $J=3$ это распределение прекрасно согласуется с Портер –Томасовским. В случае резонансов с $J=4$ отличия распределения от Портер-Томасовского существенны: наблюдается избыток и резонансов с относительно низкими приведенными ширинами и с относительно большими (имеется в виду – относительно средней нейтронной ширины). Такой характер расхождений свидетельствует о засорении этой популяции резонансов, например, примесью относительно широких р-резонансов, которые удалось разрешить. Во всяком случае, из наблюдаемого распределения приведенных нейтронных ширин в этом интервале не следует, что часть резонансов пропущена.

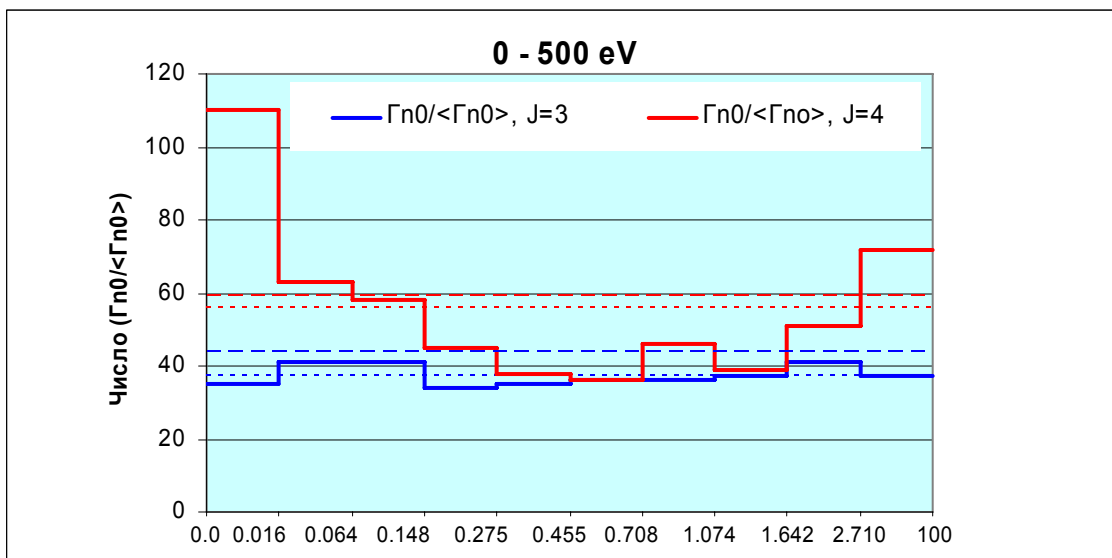


Рис.5а. Распределение приведенных нейтронных ширин.

В интервалах 500 – 1000 эВ и 1000 – 1500 эВ наблюдается совершенно иная картина (см. рис. 5б и 5в). Недосток резонансов с малыми приведенными нейтронными ширинами нейтронными становится очевидным. Для недостающих резонансов в этих интервалах составляет, примерно, 30%. Наконец, при энергиях выше 1500 эВ недостача резонансов становится просто разительной (см. рис. 5г).

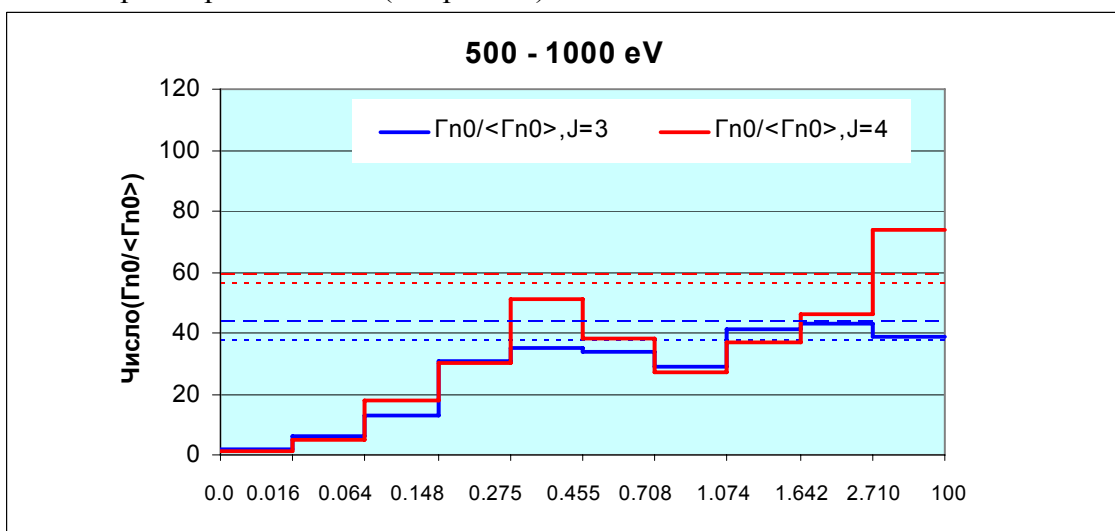


Рис.5б. Распределение приведенных нейтронных ширин.

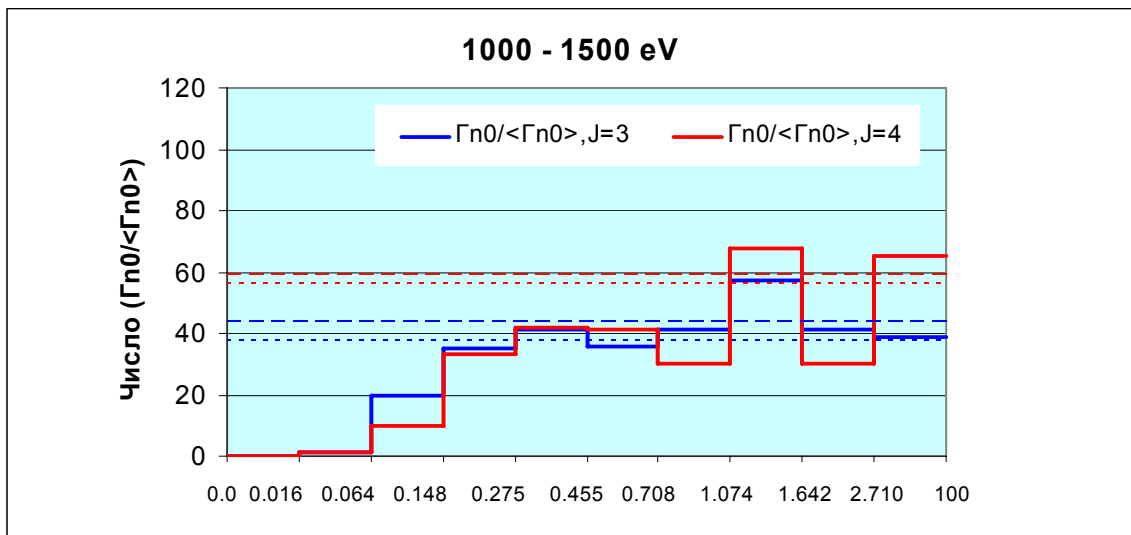


Рис.5в. Распределение приведенных нейтронных ширин.

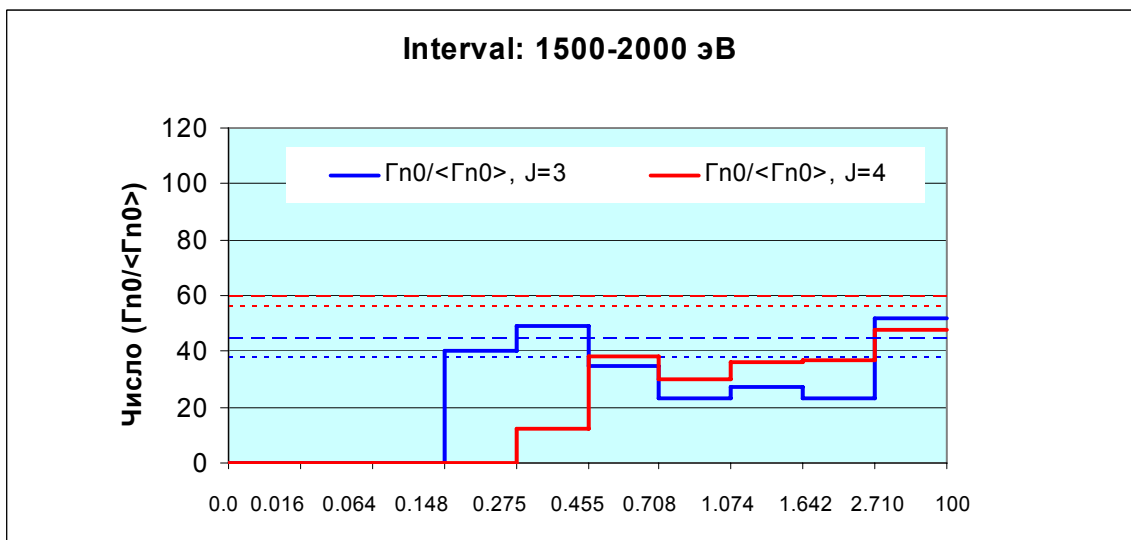


Рис.5г. Распределение приведенных нейтронных ширин.

2.1.8 Статистическое моделирование пропущенных резонансов

Дополним наборы s-резонансов, определенных в результате оценки экспериментальных данных, пропущенными резонансами так, чтобы для каждого из двух возможных спинов дополненная совокупность резонансов обладала ожидаемыми статистическими свойствами – Портер-Томасовским распределением приведенных нейтронных ширин и Вигнеровским распределением расстояний между резонансами.

Для решения задачи, прежде всего, требуется определить, какова должна быть плотность резонансов при отсутствии пропуска. В таблице 1 приводятся числа резонансов с $J=3$ и $J=4$, приходящихся на 100 эВ, усредненные по интервалам 0-100 эВ, 0-500 эВ и 2000 – 2100 эВ (где число наблюдавшихся резонансов снова резко возрастает – см. рис.4). Там же указаны значения этих чисел, следующие из различных оценок средних резонансных параметров.

Таблица 1. Среднее число резонансов в интервале 100 эВ

| Спин резонанса | Наблюдаемое число резонансов в интервале ¹⁷ | | | Оценки в области неразрешенных резонансов | | |
|-------------------|--|------------|----------------|---|------------|-----------|
| | 0 – 100 эВ | 0 – 500 эВ | 2000 – 2100 эВ | ENDF/B-VI | ENDF/B-VII | JENDL-3.3 |
| 3 | 88.0±4.9 | 74.6±2.0 | 97.0±2.3 | 102.7 | 94.5 | 93.9 |
| 4 | 118.0±5.7 | 111.6±2.5 | 98.0±2.3 | 124.7 | 114.8 | 120.7 |
| Итого | 206.0±7.5 | 186.2±3.2 | 195.0±3.3 | 227.4 | 209.3 | 214.6 |

Как видно, при оценках плотности уровней в области неразрешенных резонансов принимались значения, близкие к наблюдавшимся в интервале 0 – 100 эВ. Средние плотности уровней в интервале 0 – 500 эВ заметно ниже, что может указывать на пропуск 10 – 15% резонансов в интервале 100 – 500 эВ. Если бы это было так, то в распределении приведенных нейтронных ширин в первых двух 10-процентных квантилях резонансов не хватало бы. В действительности, как видно из рис. 5а, для резонансов с $J=3$ ничего подобного не наблюдается. Что касается резонансов с $J=4$, то в распределении их приведенных ширин в интервале 0 – 500 эВ, наблюдается даже избыток резонансов с малыми ширинами. Исходя из изложенного, было решено, что средние числа резонансов равны 80 для $J=3$ и 100 для $J=4$. Эти оценки являются, хотя, возможно, и осторожными, но представляются вполне приемлемыми.

Совокупности разрешенных резонансов в каждом из последовательных интервалов шириной по 100 эВ были пополнены дополнительными резонансами так, что число резонансов с $J=3$ в каждом интервале стало равным $N_3=80$, а число резонансов для спина $J=4 - N_4=100$ (см. рис.6).

Всем вновь введенным резонансам были приписаны нулевые делительные ширины¹⁸ и средние радиационные ширины, равные 0.042 эВ¹⁹. Что касается нейтронных ширин, то их следовало определить так, чтобы распределение приведенных нейтронных ширин известных и вновь вводимых слабых резонансов с одинаковым спином в совокупности согласовывалось с распределением Портера-Томаса $P_I(y)dy=(2\pi y)^{-1/2}exp(-y/2)dy$, где $y = \Gamma_n^0 / \langle \Gamma_n^0 \rangle$.

¹⁷Погрешности числа резонансов оценены исходя из вигнеровского распределения расстояний между резонансами с одним спином и независимым расположением резонансов с разными спинами на энергетической оси.

¹⁸Предполагается, что вклады пропущенных резонансов в сечение деления учтены благодаря некоторому завышению делительных ширин разрешенных резонансов.

¹⁹В оценке Лиля и др. разрешенным резонансам с малыми нейтронными ширинами в широких энергетических диапазонах (сотни эВ) приписаны одинаковые радиационные ширины, варьирующиеся от диапазона к диапазону от 0.039861 эВ до 0.043196 эВ. При энергиях выше 1000эВ всем подобным резонансам приписана радиационная ширина 0.42 эВ.

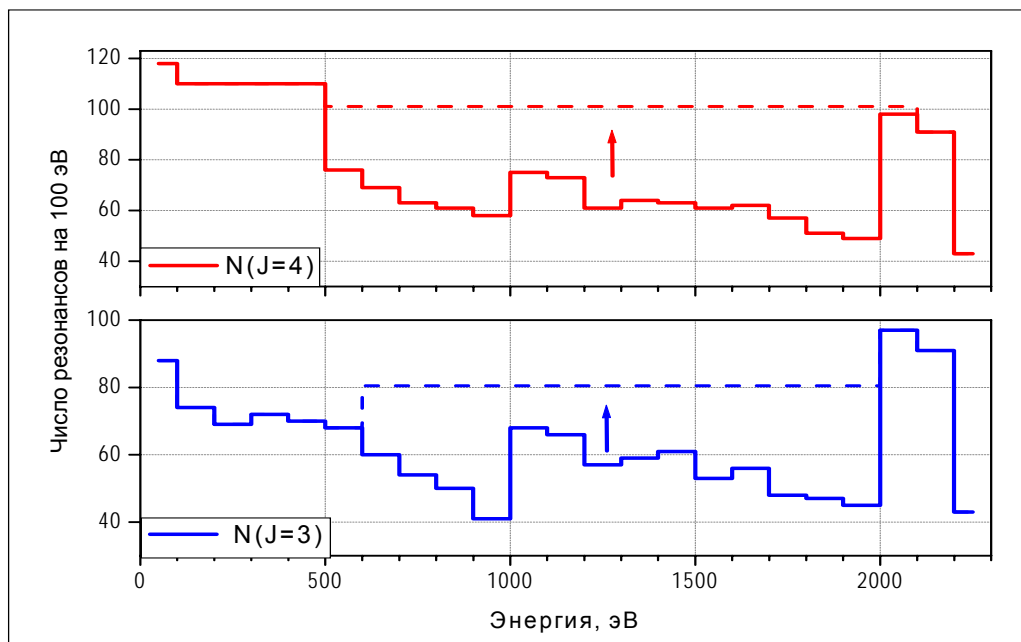


Рис. 6 Гистограмма энергетической зависимости плотности уровней ^{235}U до (сплошная) и после (пунктирная) внесения изменений для спина $J=3$ (график снизу) и спина $J=4$ (график сверху)

Конкретные положения дополнительных резонансов в каждом интервале были выбраны так, чтобы распределение расстояний между резонансами наилучшим образом соответствовало распределению Вигнера $P(x)dx = (\pi x/2) \exp(-\pi x^2/4) dx$, где $x = (E_\lambda - E_{\lambda-1}) / \langle D_J \rangle$ – отношение расстояния между двумя ближайшими резонансами с данным спином J к среднему расстоянию между ними (одинаковому во всех энергетических интервалах). Это было сделано с путем разбиения самых широких энергетических расстояний между двумя ближайшими резонансами в таком отношении, чтобы получившиеся в результате расстояния (D_λ^i) между отдельными резонансами подчинялись теоретическому распределению Вигнера. Такие процедуры выполнялись в каждом из интервалов шириной по 100 эВ,

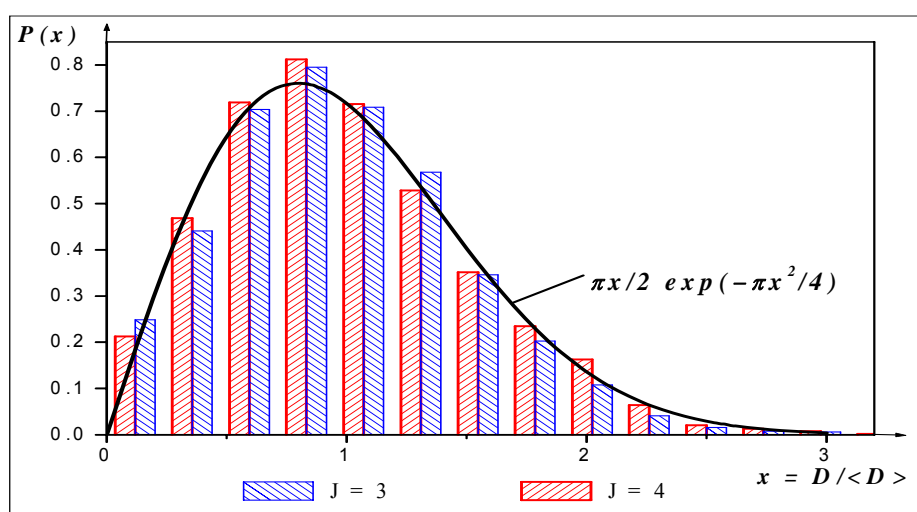


Рис. 7 Гистограммы распределения расстояний между уровнями для двух спинов ^{235}U после включения дополнительных резонансов в сравнении с распределением Вигнера

Значения средней нейтронной ширины $\langle \Gamma_n^0 \rangle$ для каждой из двух систем резонансов, оцененные путем усреднения по первым 500 эВ, равны 0.0001248 эВ и 0.0000935 эВ (с погрешностью 7.3% и 6.0% соответственно). Оценки этих же величин по суммам приведенных ширин по интервалу 0 – 2000 эВ

$$\langle \Gamma_n^0 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{K_J} \Gamma_{n,i}^0}{N_J^{полн}},$$

(K_J – число разрешенных резонансов в рассматриваемом интервале, $N_J^{полн}$ – оцененное полное число резонансов со спином J в том же интервале) привели к значениям 0.0001275 эВ и 0.0001061 эВ. Эти значения согласуются с предыдущими в пределах погрешностей поскольку не учтенные в суммах приведенных ширин вклады пропущенных резонансов малы: пропущенные резонансы обладают малыми нейтронными ширинами.

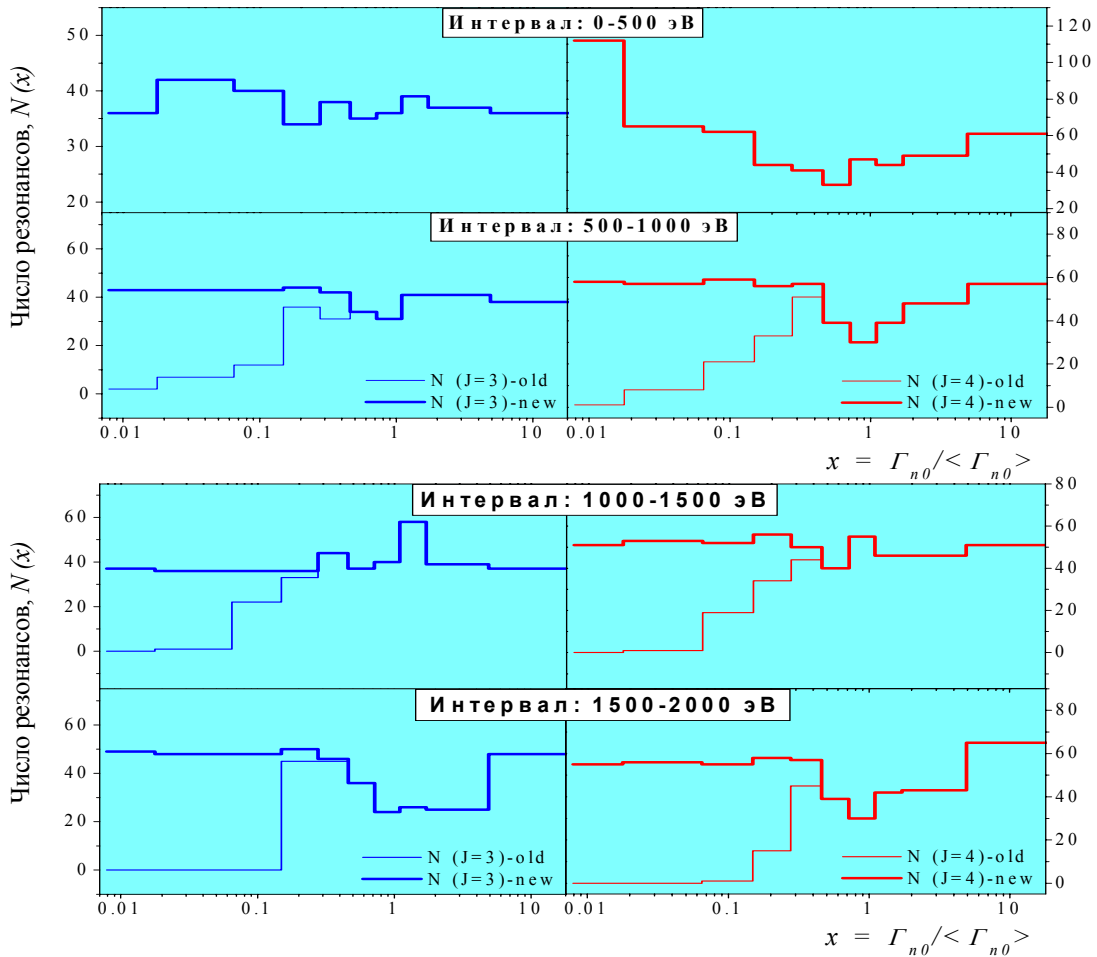


Рис. 8 Гистограммы распределения приведенных нейтронных ширин по 10% - м квантилям до (сплошная тонкая) и после (сплошная толстая) введения дополнительных резонансов

Нейтронные ширины вновь введенным резонансам приписывались следующим образом. Интервал 500 – 2000 эВ был разбит на три равные части. В каждой из них были построены распределения приведенных ширин разрешенных резонансов по 10-процентным квантилям. Ширины неразрешенных резонансов определялись путем случайной выборки из распределения Портера-Томаса в первых квантилях

(соответствующих малым ширинам), где число резонансов было меньше среднего. Когда “вакансии” в этих квантилях оказывались заполненными, приведенные нейтронные ширины всех неразрешенных резонансов оказывались определенными. Точно так же были определены приведенные нейтронные ширины пропущенных резонансов в интервале 2200 – 2250 эВ.

Распределения приведенных нейтронных ширин пополненных описанным выше образом наборов резонансов по 10-процентным квантилям распределения Портера-Томаса приведены на рис. 8. На рис. 7 приведены распределения ширин между этими резонансами по 10-процентным квантилям распределения Вигнера. Как видно из этих рисунков, пополненные совокупности резонансов с каждым из значений спинов, хорошо соответствуют теоретически ожидаемым распределениям.

Полученные результаты были использованы для модернизации оцененных нейтронных данных для материала МАТ=9228 (^{235}U) из библиотеки ENDF/B-VII. В ту часть секции МТ=151 файла MF=2, которая описывает область разрешенных резонансов, были включены “восстановленные” параметры неразрешенных резонансов. На основе модифицированного файла с помощью комплекса NJOY были получены²⁰ 299-групповые константы БНАБ-93.

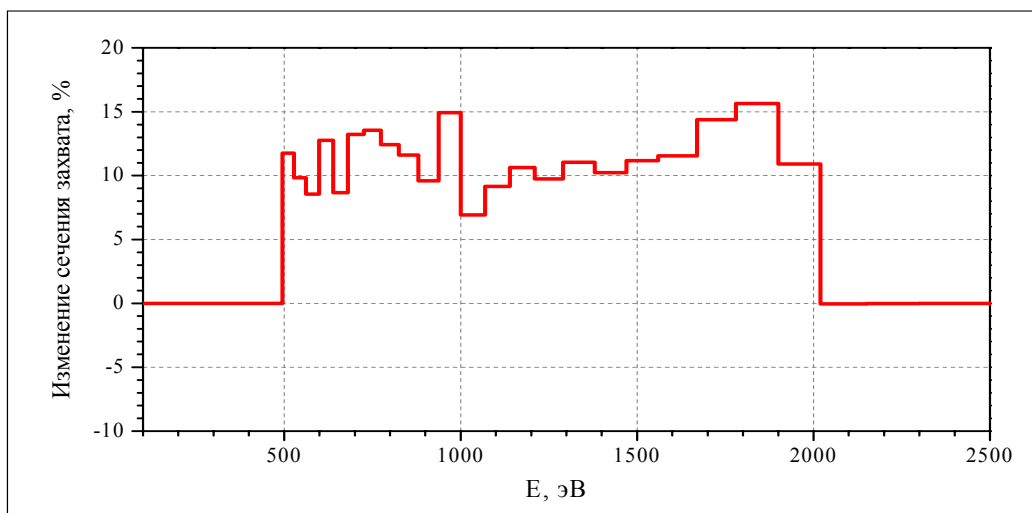


Рис.9. Увеличение сечения захвата урана-235 за счет учета вклада пропущенных слабых резонансов

На рис. 9 показано увеличение групповых сечений радиационного захвата, обусловленное учетом неразрешенных резонансов. Как видно, это увеличение не столь мало, чтобы им можно было заведомо пренебречь.

В РОСФОНД решено включить набор резонансов с искусственным дополнением пропущенных уровней.

²⁰ Расчет групповых констант был выполнен В. Н. Кошечевым.

2.2. Область неразрешенных резонансов

2.2.1. Обзор оцененных данных

В оценке ENDF/B-VI “Revision 2” область неразрешенных резонансов простирается от 2.25 кэВ до 25 кэВ. Приводимые средние резонансные параметры рекомендуется использовать только для учета резонансной самоэкранировки сечений; средние сечения приводятся в файле MF=3. Учитываются s-резонансы (со спинами 3 и 4 и отрицательной четностью, как и основное состояние урана-235) и p-резонансы (со спинами 2, 3, 4 и 5 и положительной четностью); плотности резонансов с одинаковыми спинами четностью, а также радиационные ширины этих резонансов считаются не зависящими от энергии; “конкурирующие ширины” приняты равными нулю, т.е. неупругое рассеяние в этой области резонансными параметрами не учитывается и, таким образом, самоэкранировке не подвержено.

В оценке ENDF/B-VI “Revision 5” (принятой, как отмечалось и в JEFF-3) область неразрешенных резонансов сохранена неизменной

В оценке, принятой в ENDF/B-VII, область неразрешенных резонансов пересмотрена. Сечение деления увеличено на 1%, а сечение захвата на столько же понижено. Средние резонансные параметры заметно изменены, но, как и прежде, они рекомендуются только для учета резонансной самоэкранировки сечений, которая в области неразрешенных резонансов урана-235 весьма слаба.

В оценке, принятой в JENDL-3.3, область неразрешенных резонансов простирается до 30 кэВ. Средние резонансные параметры рекомендуется использовать не только для учета резонансной самоэкранировки, но и для расчета собственно сечений захвата, деления, рассеяния и полного сечения. Для учета конкуренции со стороны неупругого рассеяния начиная с 14 кэВ приводится средняя ширина конкурирующих процессов. В то же время в области неразрешенных резонансов в файле MF=3 приводится нерезонансная «подложка», включающая вклад только неупругого рассеяния.

На рис. 6, 7, 8 проводится сравнение силовых функций, следующих из принятых в упомянутых оценках средних ширин и средних расстояний между уровнями.

Как видно, в новой оценке ENDF/B-VII силовая функция p-волны существенно увеличена, а радиационные и делительные силовые функции для всех систем резонансов довольно сильно понижены. Силовые функции, принятые в оценке JENDL-3.3 имеют промежуточные значения между принимавшимися в предыдущих двух оценках. Что касается рассчитанных на основе этих параметров сечений захвата и деления, то они отличаются от данных ENDF/B-VI(5) нерегулярно в ту и другую сторону (см. рис.9 - 12), однако так, что среднее по области от 494.5 эВ до 2154 эВ сечение деления оказывается на 2.3% ниже, а среднее сечение захвата - на 2.4% выше, чем в ENDF/B-VI. Значение величины α в области неразрешенных резонансов согласно японской оценке почти на 5% выше, чем по ENDF/B-VI(5) и на 7% выше оценки ENDF/B-VII. Для библиотеки РОСФОНД решено принять оценку из ENDF/B-VII, дающую для α чуть более низкое значение, чем в ENDF/B-VI (Rev.5).

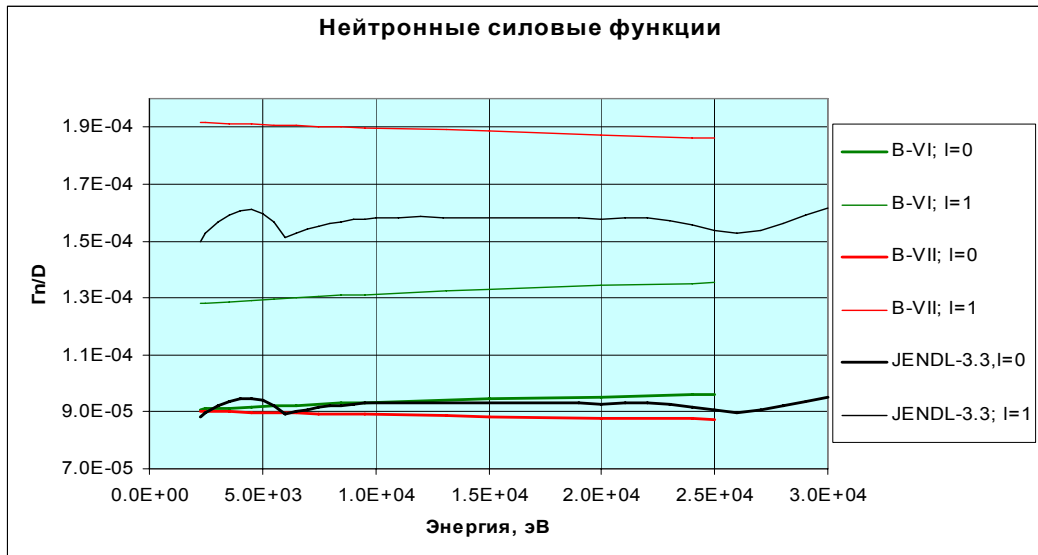


Рис.6. Нейтронные силовые функции, принятые в разных оценках

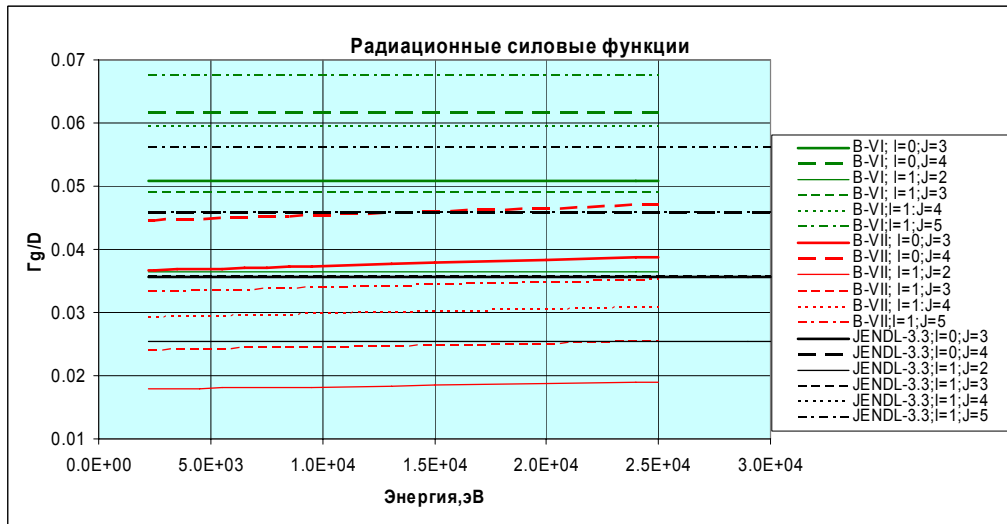


Рис.7. Радиационные силовые функции, принятые в разных оценках

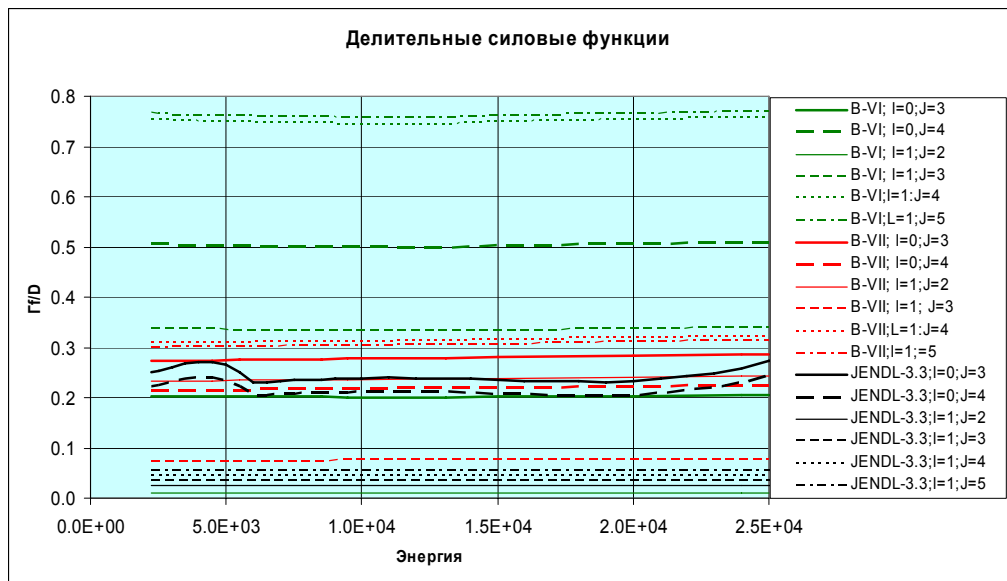


Рис. 8. Делительные силовые функции, принятые в разных оценках.

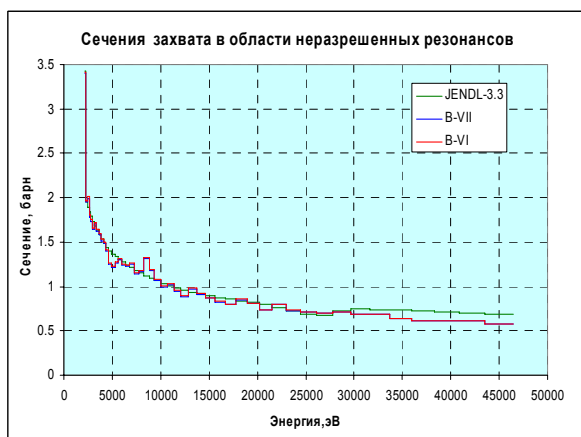


Рис. 9.

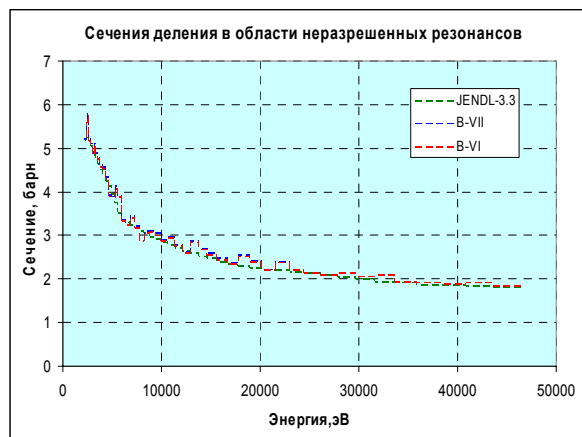


Рис. 10.

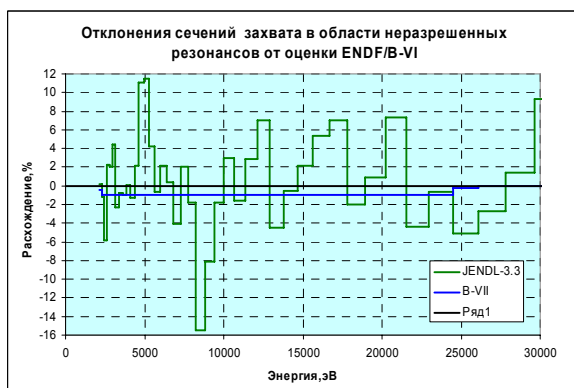


Рис. 11

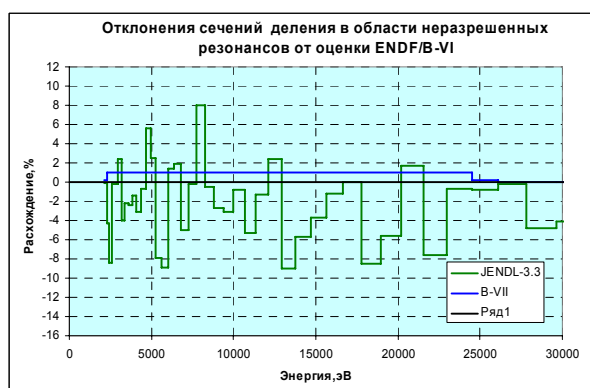


Рис. 12

Резонансная самоэкранировка сечений в области неразрешенных резонансов урана-235 столь слаба, что исследовать преимущества или недостатки представления структуры сечений в разных оценках не представлялось целесообразным.

2.2.2. Многоуровневая формула Брайта-Вигнера, используемая для описания сечений в области неразрешенных резонансов, отличается от хорошо известной одноуровневой формулы только учетом межрезонансной интерференции при расчете сечения упругого рассеяния нейтронов в р-резонансах. Это не порождает проблем в интерпретации результатов расчета сечений, и поэтому здесь приводить эту формулу сочли излишним.

3. Сечения нейтронных реакций

3.1. Полное сечение

В оценках ENDF/B-VI(Rev.5), ФОНД-2.2 и JEFF-3.1 принято одно и то же полное сечение. Полное сечение, принятое в ENDF/B-VII.0, при энергиях ниже 170 кэВ отличается от вышеупомянутого менее, чем на одну десятую процента; далее расхождение возрастает до -0.4% при 3 МэВ, затем сокращается до нуля при 8 МэВ и вновь возрастает до 1.2% при 20 МэВ. Отличия полного сечения, принятого в JENDL-3.3 также невелики. На рис. 13 - 15 оцененные полные сечения в области выше границы неразрешенных резонансов сравниваются с экспериментальными данными, полученными после 1970 г. Как видно, оценки ENDF/B-VI, ENDF/B-VII и JENDL весьма близки друг к другу и погрешности современных экспериментальных данных не позволяют отдать предпочтение какой-либо из них. **В РОСФОНД решено принять оценку ENDF/B-VII, главным образом потому, что остальные сечения оказываются целесообразным принять из этой библиотеки.**

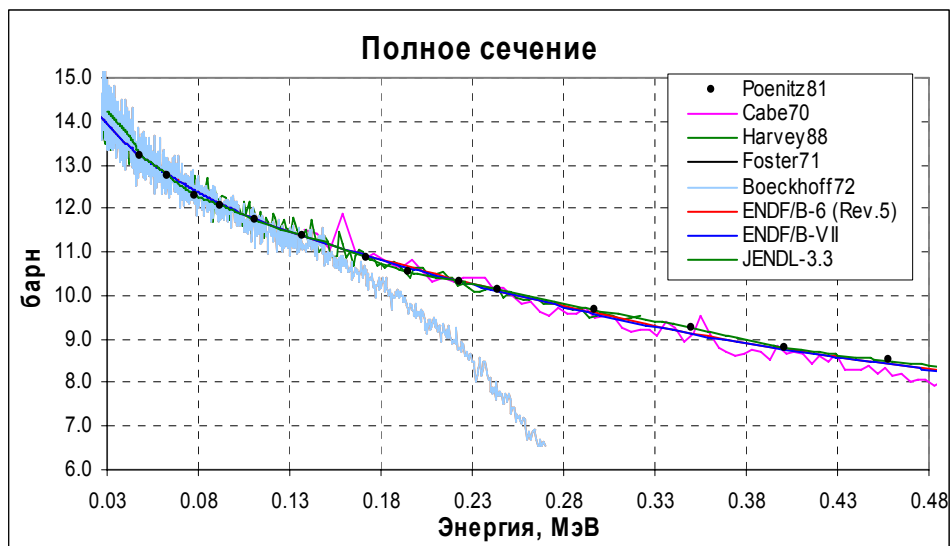


Рис.13.

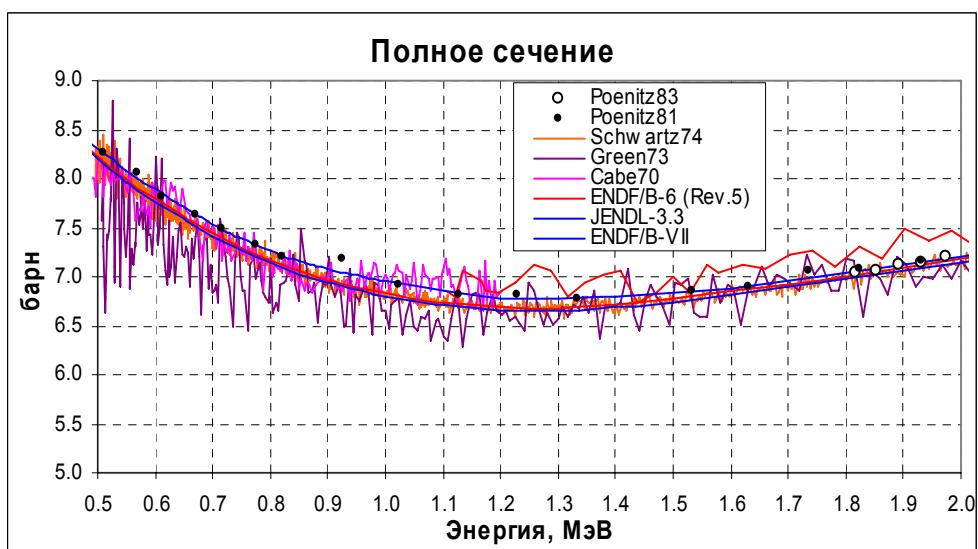


Рис. 14.

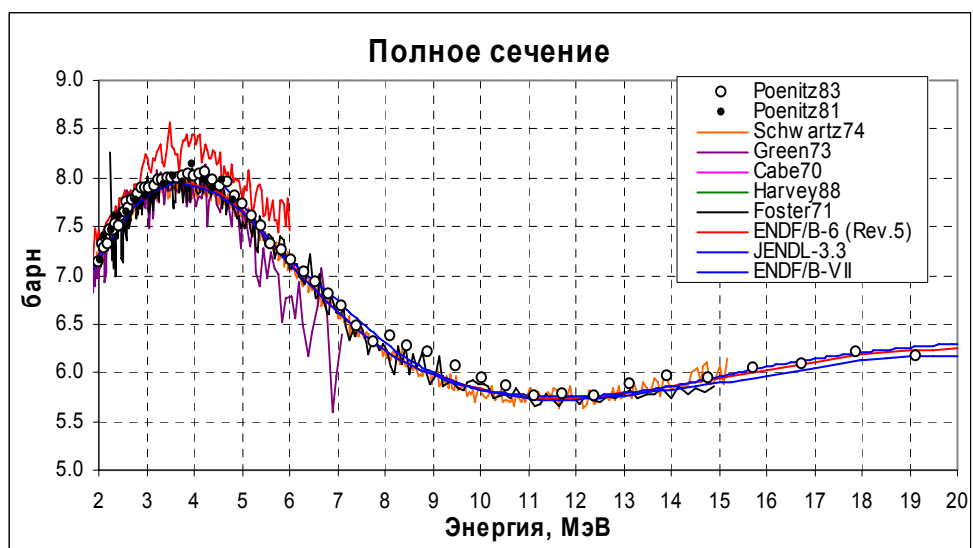


Рис.15.

Перечень цитированных экспериментальных работ

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, МэВ | | Число точек |
|---------------|-----------------|-----------------------|---------|-----------------------|-------|-------------|
| | | | | от | до | |
| Poenitz83 | W.P.Poenitz | ANL-NDM-80 | 12853 | 1.83 | 20.3 | 68 |
| Poenitz81 | W.P.Poenitz | NSE,78,333,8103 | 10935 | 0.048 | 4.81 | 47 |
| Schwartz74 | R.B.Schwartz | NSE,54,322,7407 | 10280 | 0.496 | 15.2 | 1680 |
| Green71 | L.Green | Knoxwill-71,1,325,197 | 10225 | 0.507 | 7.11 | 352 |
| Cabe70 | Cabe | CEA-R-4524,7711 | 20480 | 0.138 | 5.99 | 368 |
| Harvey88 | J.A.Harvey | Mito-88,115,8805 | 13632 | 0.0021 | 0.322 | 282 |
| Boeckenhoff72 | K.H.Boeckenhoff | LNE,26,91,7202 | 20134 | 0.006 | 0.27 | 4093 |
| Foster71 | D.G.Foster | PR/c,3,576,7102 | 10047 | 2.25 | 14.9 | 246 |

3.2. Сечение деления

В оценках ENDF/B-VI(Rev.5) и ENDF/B-VII.0 приняты одинаковые значения сечения деления везде, кроме

а) области неразрешенных резонансов (2.25 – 25 кэВ), в которой в ENDF/B-VII принято ровно на 1% более высокое сечение деления;

б) области энергий от 0.9 до 3.5Мэ, в которой сечение деления также повышено – до 3.4% при 1 МэВ;

в) в области энергий выше 14 МэВ, где повышение сечения деления достигает 5%.

На рисунках сравнения оцененных данных с экспериментальными данные ENDF/B-VII.0 приводятся только там, где они отличаются от ENDF/B-VI(Rev.5). Экспериментальные погрешности указаны только при низких энергиях. При высоких энергиях из-за большой плотности экспериментальных точек графическое изображение погрешностей не целесообразно; о точности экспериментальной информации в этой области можно судить по разбросу точек вокруг оцененных кривых.

На рис. 16 - 20 оцененные данные в области выше границы неразрешенных резонансов сравниваются с результатами экспериментов, приведенными в базе данных EXFOR. Как видно, в отличие от полного сечения, в оцененном в ENDF/B-VI сечении деления проявилась структура, полученная, как указано в кратком описании оценки, путем одновременного описания данных и по полному сечению, и по сечению деления, и по величине «альфа».

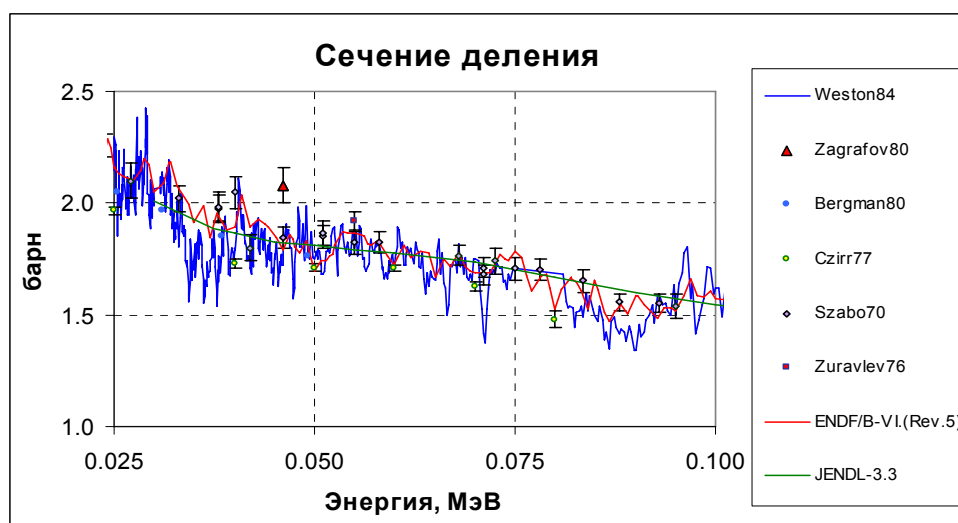


Рис.16.

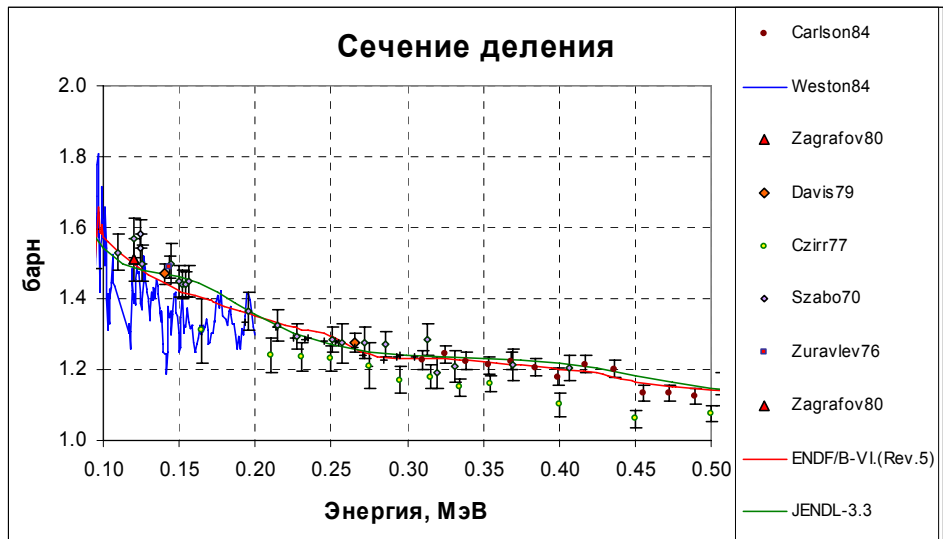


Рис.17.

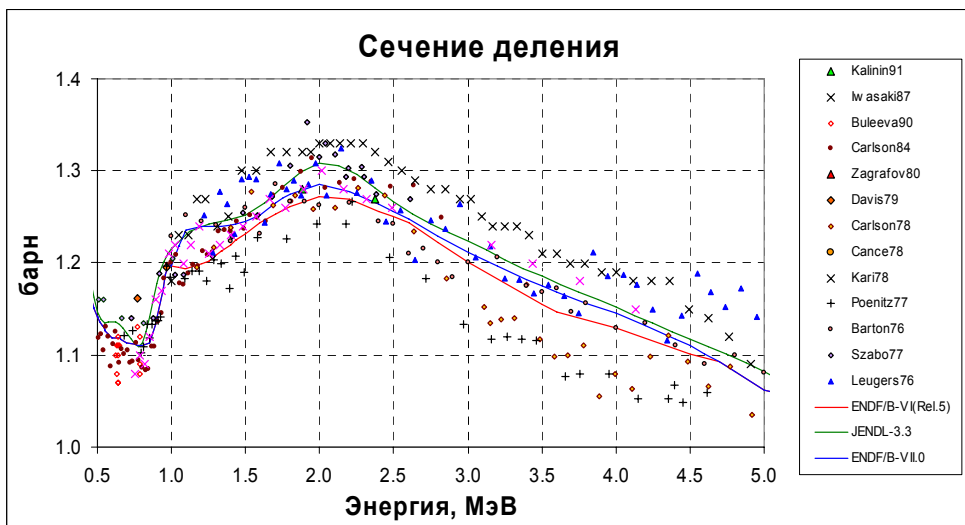


Рис.18.

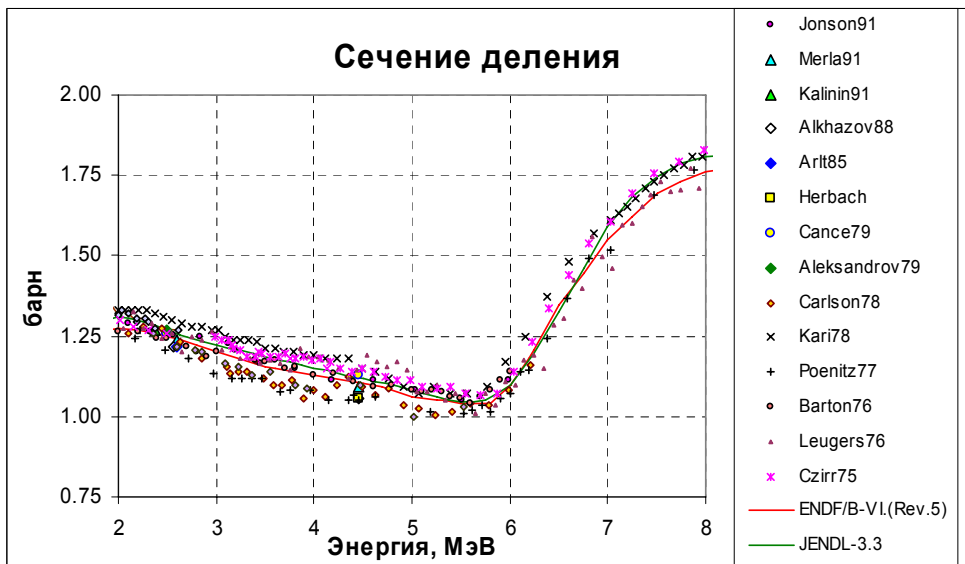


Рис.19.

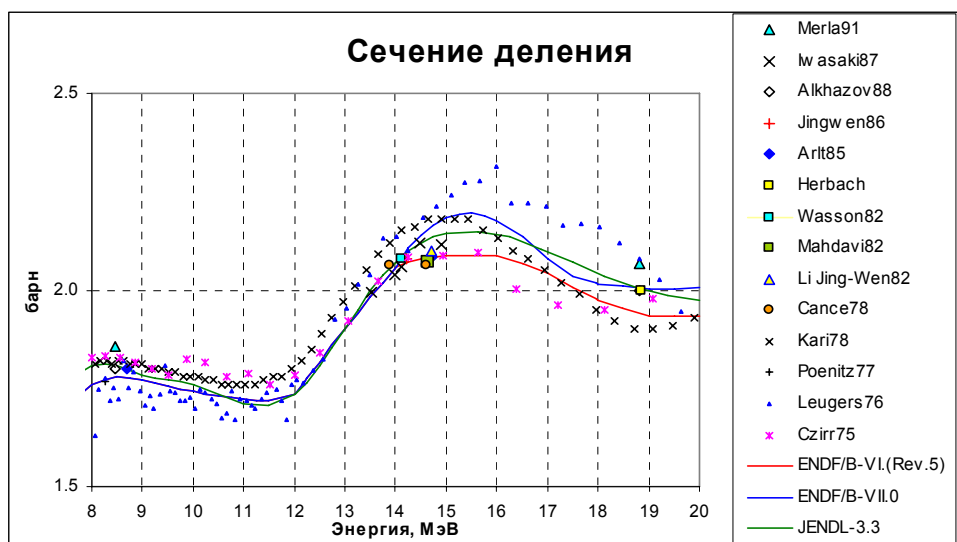


Рис.20.

Как видно, - в библиотеке JENDL-3.3 принято в среднем несколько более высокое сечение деления, чем в ENDF/B-VI(Rev.5). Экспериментальные данные, приведенные на рис. 14-17, не позволяют отдать предпочтение какой-либо из оценок.

В ENDF/B-VII.0 решено принять более высокое сечение деления, чем в ENDF/B-VI (Rev.5). Одним из поводов к этому послужило стремление точнее воспроизвести критичность голрой сферы из высокообогащенного урана (критсборка “Годива”) в расчетах по программе MCNP. Следует отметить, что расчеты по программе MMCKENO в 299-групповом приближении позволяют описать критичность этой и других аналогичных сборок с точностью до экспериментальных погрешностей с использованием оценки ENDF/B-VI(Rev.5) и переход к оценке ENDF/B-VII.0 ведет к появлению систематического расчетно-экспериментального расхождения. Дело в том, что при выполнении многогрупповых расчетов используется упрощенное описание спектра нейтронов деления, вполне пригодное для случая, когда доля делений под действием нейтронов с энергией выше 5 МэВ мала. В критических сферах из высокообогащенного урана-235 этой долей пренебрегать нельзя и требуется учитывать, что выше порога реакции (n,n’f) спектр деления заметно смягчается. В действующей системе константного обеспечения многогрупповых расчетов учет этого эффекта не предусмотрен. Таким образом, переход к оценке сечения деления из ENDF/B-VII.0 должен быть сопряжен с изменением методики описания спектров нейтронов деления в системах подготовки многогрупповых констант.

В библиотеке РОСФОНД решено учесть различие сечений деления в с оценках ENDF/B-VII.0 и ENDF/B-VI и при энергиях выше 14 МэВ принять первую из них. Это означает, что при использовании многогрупповых констант, подготовленных на основе этой оценки необходимо использовать еще не созданную усовершенствованную систему подготовки многогрупповых констант, иначе вместо уточнения переход к ныне рекомендуемому сечению при расчетах систем, подобных “Годиве” коэффициент размножения будет завышаться примерно на 0.3%. Впрочем, отмеченный недостаток проявится только при расчетах предельно жестких размножающих систем, подобных “Годиве”. При расчетах даже быстрых энергетических реакторов (не говоря уже о тепловых) доля делений под действием нейтронов с энергией выше 5 МэВ в несколько раз меньше и погрешность расчетного результата становится незначительной.

Как видно из рис. 20, ни одна из оцененных кривых не противоречит совокупности непосредственных измерений сечения деления быстрыми нейтронами.

Перечень цитированных экспериментальных работ

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, МэВ | | Число точек |
|---------------|-----------------|--|---------|-----------------------|---------------|-------------|
| | | | | от | до | |
| Jonson91 | R.G.Jonson | Prepr.ANL W.Carlson 91 | 12924 | 5.99 | 10.7 | 19 |
| Merla91 | K/Merla | | 22304 | 1.88 | 18.8 | 7 |
| Iwasaki88 | T.Iwasaki | Mito-88,87,8805 | 22091 | 13.5 | 14.9 | 5 |
| Buleeva90 | N.N.Buleeva | | 40968 | 0.624 | 0.785 | 13 |
| Alkhazov88 | I.D.Alkhazov | Mito-88,145,8805 | 41013 | 2.56 | 18.8 | 5 |
| Jingwen86 | Li Jing-Wen | | 30721 | 14.2 | | 1 |
| Arlt80 | R.Arlt | ZFK-410,122,8001 | 30558 | 2.6 | 8.7 | 2 |
| Herbash85 | C.M.Herbash | ZFK-592,152,86 | 30706 | 4.45 | 18.85 | 2 |
| Carlson82 | A.D.Carlson | Antwerpen-82,456,86 | 10987 | 0.31 | 2.82 | 67 |
| Weston88 | L.W.Weston | NSE,88,562,8412 | 12877 | 0.026 | 0.2 | 643 |
| Mandari82 | M.Mandari | Antwerpen-82,58,8209 | 10971 | 14.6 | | 1 |
| Aleksandrov79 | B.M.Aleksandrov | AE,46(6),416,7806 | 40546 | 2.5 | | 1 |
| Jingwen82 | Li Jing-Wen | Antwerpen-82,55,8209 | 30634 | 14.7 | | 1 |
| Davis78 | M.C.Davis | ANE,5,569,1978 | 10314 | 0.14 | 1.964 | 4 |
| Cance81 | M.Cance | CEA-N-2194,8105 | 21620 | 2.5 | 4.45 | 2 |
| Zagrafov80 | E.A.Zagrafov | Kiev-80,3,45,8009 | 40610 | 0.046 | 0.12 | 2 |
| Bergman80 | A.A.Bergman | | 70751 | 0.0001 | 0.015 | 68 |
| Carlson78 | A.D.Carlson | Harwell-78,880,7809 | 12848 | 1.171 | 6.203 | 37 |
| Cance78 | M.Cance | NSE,68,197,7811 | 20779 | 13.9 | 14.6 | 2 |
| Sierjacs78 | W.Sierjacs | Kfk-2673,7807 | 20786 | 1.0 | 21.2 | 124 |
| Poenitz77 | W.P.Poenitz | NSE,64,894,7712 | 10711 | 0.193 | 8.275 | 73 |
| Barton76 | D.M.Barton | NSE,60,369,7608 | 10346 | 1 | 6 | 41 |
| Czirr72 | J.B.Czirr | NSE,60,383,7608 | 10547 | 0.01 | 65 | 24 |
| Szabo70 | I.Scabo | Helsinki-70,1,229,7003 Knoxwill-71,2,573.7103 ANL-70,257,7010 ANL-76,208,7606 | 20567 | 0.0175 | 5.53 | 95 |
| Zhuravlev76 | K.D.Zhuravlev | | 40476 | 0.002 | 0.144 | 4 |
| Osterhage76 | W.W.Osterhage | | 20715 | 0.3 | 13 | 116 |
| Czirr75 | J.B.Czirr | NSE,57,18,7505 Wasington-75,2,617,7503 | 10428 | 2.99 0.754 | 20.1 4.129 | 61 24 |
| Leugers76 | B.Leugers | ANL-76,246,7606 | 20943 | 1.22 | 20.1 | 144 |

3.3. Сечение радиационного захвата.

Данных о сечении радиационного захвата (или о его отношении к сечению деления, величине “альфа”) значительно меньше, чем о сечении деления, особенно в рассматриваемой здесь области энергии, выше границы неразрешенных резонансов. Оцененные сечения сравниваются с имеющимися экспериментальными данными на рис. 21а и 22а; на рис. 23а приводятся только оцененные данные, т.к. при высоких энергиях экспериментальные данные отсутствуют. На рис. 21б, 22б и 23б приводятся энергетические зависимости величины “альфа”, следующие из рассматриваемых оценок.

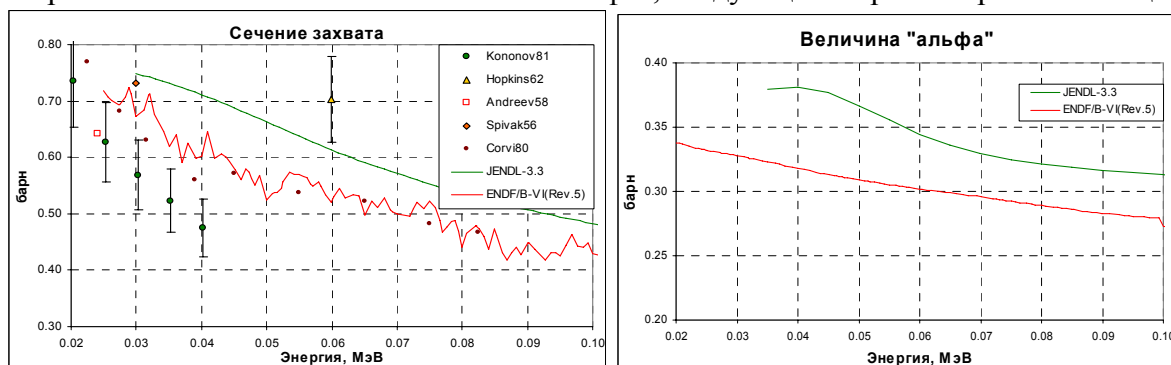


Рис.21а

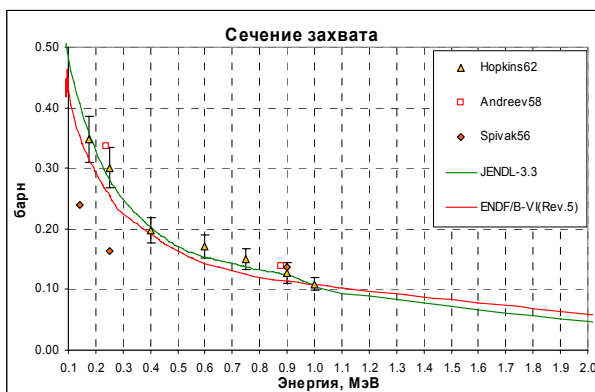


Рис.22а

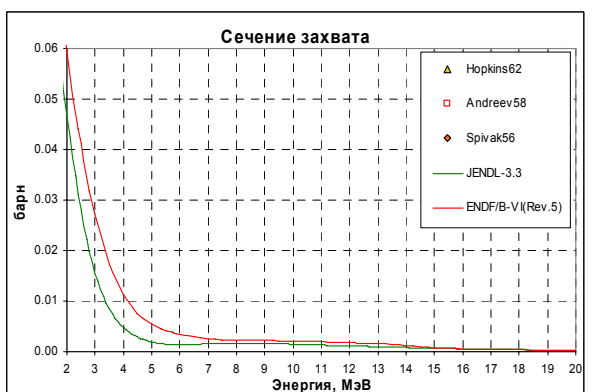


Рис.23а

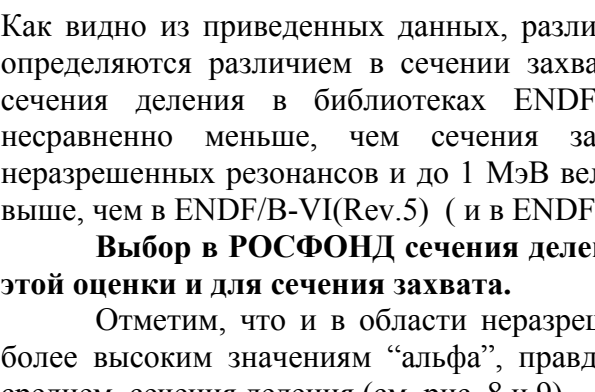


Рис.21б

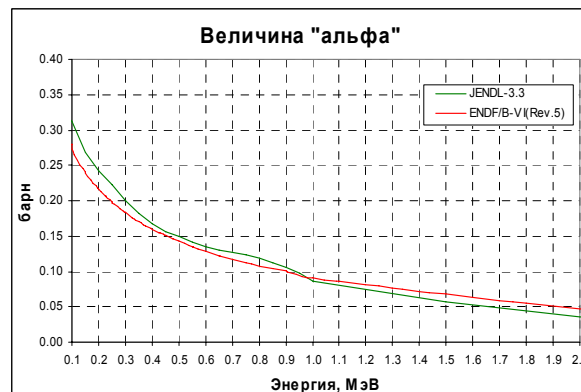


Рис. 22б

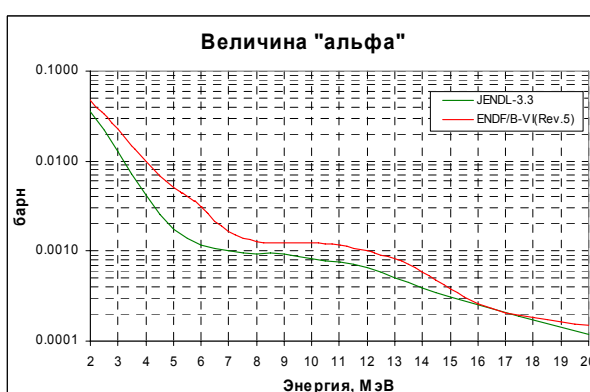


Рис. 23б

Как видно из приведенных данных, различия в величине “альфа” практически целиком определяются различием в сечении захвата. Это и естественно, поскольку оцененные сечения деления в библиотеках ENDF/B-VI (Rev.5) и JENDL-3.3 различаются несравненно меньше, чем сечения захвата. В интервале от границы области неразрешенных резонансов и до 1 МэВ величина “альфа” в оценке JENDL-3.3 на 10-15% выше, чем в ENDF/B-VI(Rev.5) (и в ENDF/B-VII.0, где принято то же сечение захвата).

Выбор в РОСФОНД сечения деления из оценки ENDF/B-VII определил выбор этой оценки и для сечения захвата.

Отметим, что и в области неразрешенных резонансов оценка JENDL-3.3 ведет к более высоким значениям “альфа”, правда, главным образом за счет более низкого, в среднем, сечения деления (см. рис. 8 и 9).

Перечень цитированных экспериментальных работ

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, МэВ | | Число точек |
|------------|--------------|-------------------------|---------|-----------------------|-------|-------------|
| | | | | от | до | |
| Perez73 | R.B.Perez | NSE,52,46,7309 | 10249 | 0.0002 | 0.01 | 180 |
| Muradyan77 | G.V.Muradyan | | 40550 | .00015 | 0.025 | 21 |
| Kononov81 | V.N.Kononov | AE,38(2),81,7502 | 40412 | 0.01 | 0.04 | 7 |
| Hopkins62 | J.C.Hopkins | NSE,12,169,1962 | 12331 | 0.03 | 1 | 9 |
| Andrejev58 | V.M.Andreev | AE,4,185,1958 | 40385 | 0.024 | 0.88 | 3 |
| Spivak56 | P.E.Spivak | | 40350 | 0.03 | 0.9 | 4 |
| Corvi80 | F.Corvi | NEANDS(E)-233(3),5,8203 | 21777 | 0.002 | 0.085 | 22 |

3.4. Сечение упругого рассеяния

Выбор оценки для сечения упругого рассеяния ниже порога неупругого рассеяния уже определен выбором оценок для полного сечения и сечений деления и захвата. Сечение упругого рассеяния определяется как разность между полным сечением и суммарным сечением неупругих взаимодействий и выше порога неупругого рассеяния. На рис. 24 показаны зависимости сечений основных процессов в области ниже 0.2 МэВ. Видно, что выше границы области неразрешенных резонансов (0.025 МэВ), структура сечений захвата и деления скомпенсирована структурой сечения упругого рассеяния, сохраняя гладкий ход полного сечения.

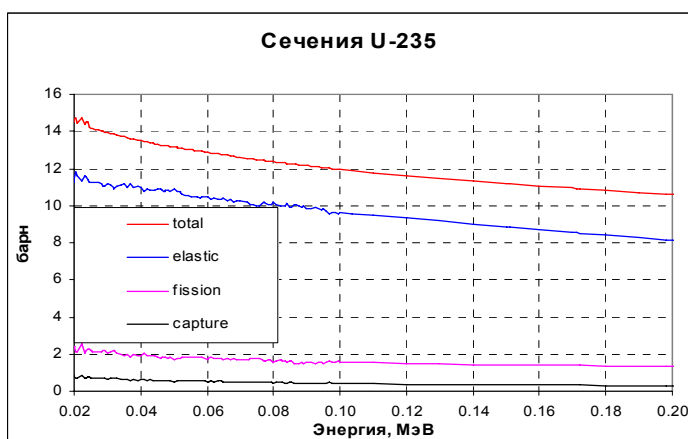


Рис.24

Во всех оценках, в том числе в файле РОСФОНД, сечение упругого рассеяния определяется как разность между полным сечением и суммарным сечением неупругих взаимодействий.

3.5. Сечение неупругого рассеяния.

В оценках ENDF/B-VI(Rev.5) и ENDF/B-VII.0 принята одна и та же оценка сечения неупругого рассеяния. В JENDL-3.3 сечение неупругого рассеяния принято заметно более низким, особенно в области 1 – 2 МэВ. Эта оценка, пожалуй, лучше согласуется с имеющимися экспериментальными данными (см. рис. 25). Однако, учитывая весьма большие трудности измерения сечения неупругого рассеяния и сопряженную с этим возможность систематических погрешностей, согласие с экспериментальными данными не может служить единственным критерием надежности оценки. Заметим, что потеря энергии при упругом рассеянии нейтронов на уране-235 при 1.5 МэВ достигает 25 кэВ. Вклад неупругого рассеяния на уровнях с энергией возбуждения ниже 50 кэВ при этой энергии превышает 0.3 барна (см. ниже рис.25) Низкие по сравнению с принятыми оценками данные Книттера и Андреева вполне могут объясняться не учетом вклада возбуждения низколежащих уровней. Таким образом, отказываться от оценки ENDF/B-VI нет достаточных оснований.

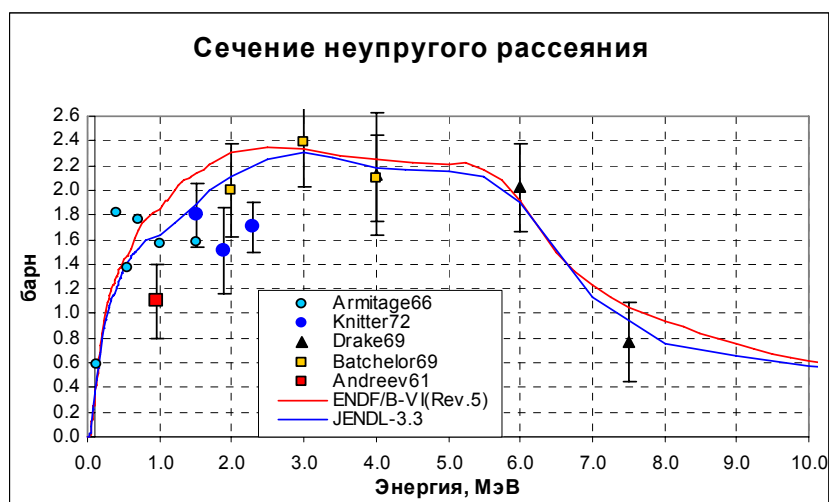


Рис.25

Рассмотрим теперь, возбуждением каких уровней урана-235 обусловлено неупругое рассеяние. В таблице 4 приведены схемы уровней, принятые в оценках ENDF/B-VI и JENDL-3.3. Заметим, что в последней оценке для каждого из первых 19 уровней существует файл MF=12, в котором приводятся энергии всех гамма-квантов, каскадно испускаемых при снятии возбуждения, в том числе и тех, которые испускаются непосредственно с возбужденного уровня. Из данных этих файлов были определены схемы распада каждого уровня, которые приведены в таблице 4. Выяснилось, что эти схемы в точности соответствуют справочным таблицам Nuclear Data Sheets, vol.40, №1, p.35 (1983). Совпадают с этой рекомендацией и энергии уровней. В оценке ENDF/B-VI(Rev/5) энергии первых 19 уровней хоть и не всегда в точности совпадают с рекомендованными, но весьма близки к ним, так что применимость к ним рекомендованных значений спина и четности и схем распада не вызывают сомнений.

Что касается уровней с энергиями возбуждения выше 368 кэВ, то в рассматриваемых оценках имеются отклонения от названных выше рекомендаций. Так, в оценке JENDL-3.3 учитывается возбуждение уровня с энергией 368.799 кэВ, а в оценке ENDF/B-VI(Rev.5) – возбуждение уровней с энергиями 430 кэВ и 438.5 кэВ. Эти уровни отсутствуют в рекомендованной схеме; согласно цитированному источнику они не наблюдались ни при альфа-распаде плутония-239, ни при радиационном захвате нейтронов в уране-234, ни при кулоновском возбуждении урана-235. Видимо, при оценке сечений неупругого рассеяния использовались иные источники информации. Уровню с энергией 430 кэВ при оценке приписана отрицательная четность, что следует из энергетического поведения сечения его возбуждения. Схем распада дополнительных уровней на найти не удалось. В связи с этим, **было решено исключить из оценки ENDF/B-VII сечения возбуждения уровней с энергиями 430 кэВ и 438.5кэВ, сложив их с сечением возбуждения уровня с энергией 445.7 кэВ и приписав суммарное сечение этому уровню.** Эта процедура сохраняет полное сечение неупругого рассеяния (см. Рис. 26) при энергиях выше 447.61 эВ. В узком интервале от 431.845 кэВ до 447.61кэВ опущенное суммарное сечение уровней с энергиями 430 кэВ и 438.5 кэВ не превышает $1.5 \cdot 10^{-5}$ барна. Тем самым всем трем уровням в дальнейшем будет приписана одна и та же, но вполне определенная схема распада.

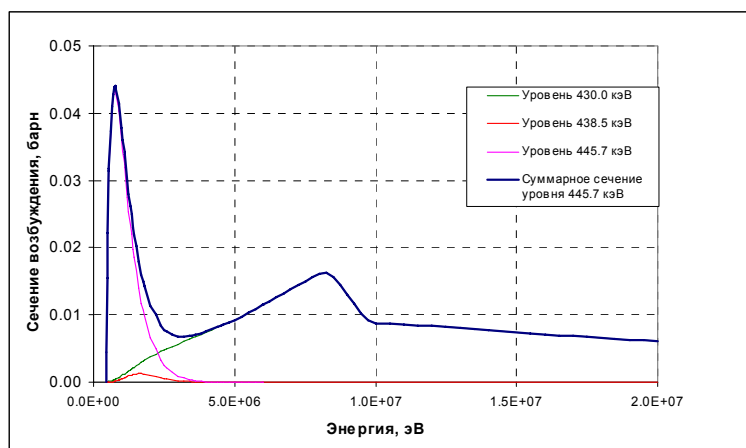


Рис.26. Объединение уровней с энергиями 430кэВ, 438.5 кэВ и 445.7 кэВ в один уровень, которому приписывается схема распада, соответствующая последнему из этих уровней.

На рис.27 – 29 приведены сечения возбуждения отдельных уровней и сечение возбуждения континуума уровней, лежащих при энергиях выше 0.5 МэВ.

Энергии, спины и четности и схемы распада уровней указаны в табл. 4. Для первых 19 уровней схемы и вероятности распада приняты такими же, как и в JENDL-3.3. Для уровней №20 - 24 приняты схемы распада, рекомендованные в Nuclear Data Sheets. Для уровней №25 -30 приняты схемы переходов, соответствующие таковым для близких по энергии уровней, наличествующих в упомянутом источнике:

- уровню № 25 (550 кэВ) приписана схема распада уровня 533.22 кэВ (9/2+);
- уровню №26 (650 кэВ) приписана схема распада уровня 658.9 кэВ (1/2-);
- уровню №27 (770 кэВ) приписана схема распада уровня 769 кэВ (1/2+);
- уровню №28 (900 кэВ) приписана схема распада уровня 905.3 кэВ;
- уровню №29 (1040 кэВ) приписана схема распада уровня 1038.4 кэВ;

Для уровней с энергиями 1085 кэВ, 1330 кэВ и 1430 кэВ схемы уровней не приписываются. Переходы с этих уровней при оценке спектра фотонов учитываются совместно с переходами при возбуждении континуума уровней (см. раздел 5.1)

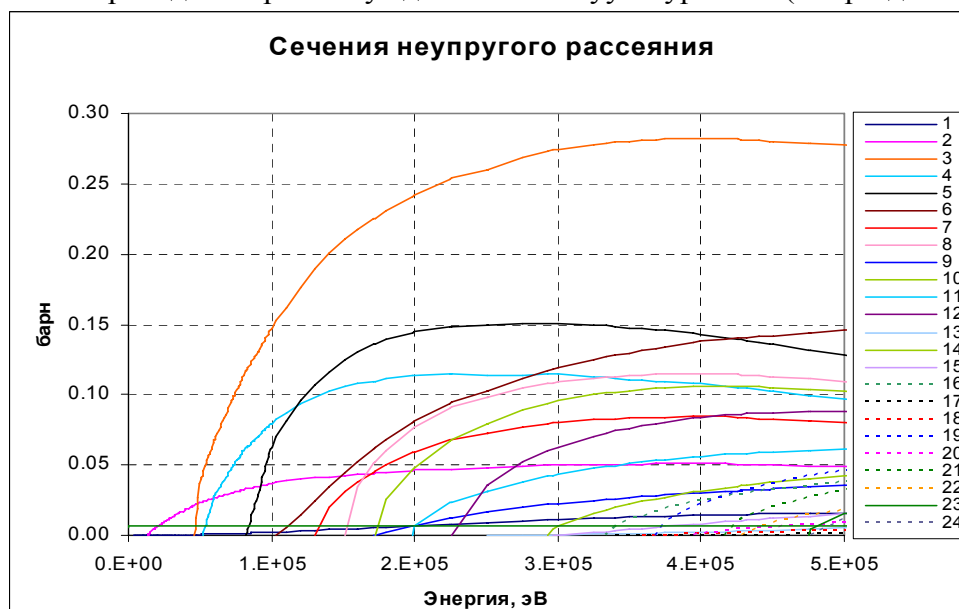


Рис.27 Сечения возбуждения отдельных уровней урана-235 при неупругом рассеянии (энергии уровней указаны в табл.4)

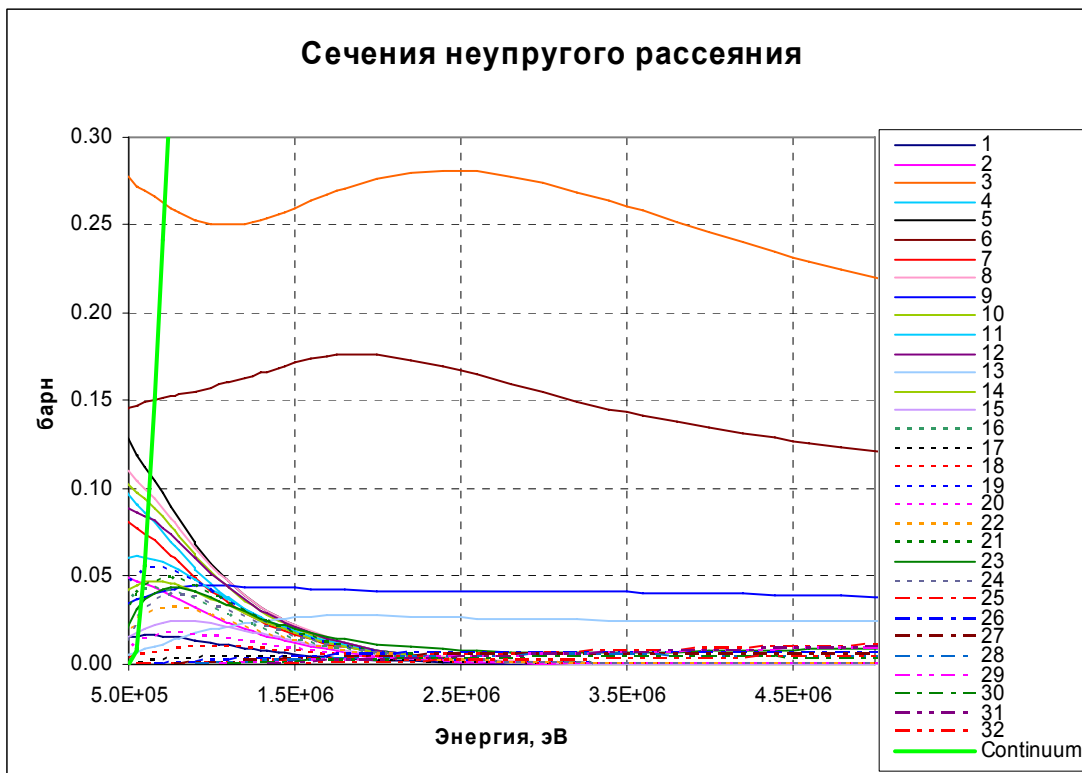


Рис.28 Сечения возбуждения отдельных уровней урана-235 при неупругом рассеянии (энергии уровней указаны в табл.4)

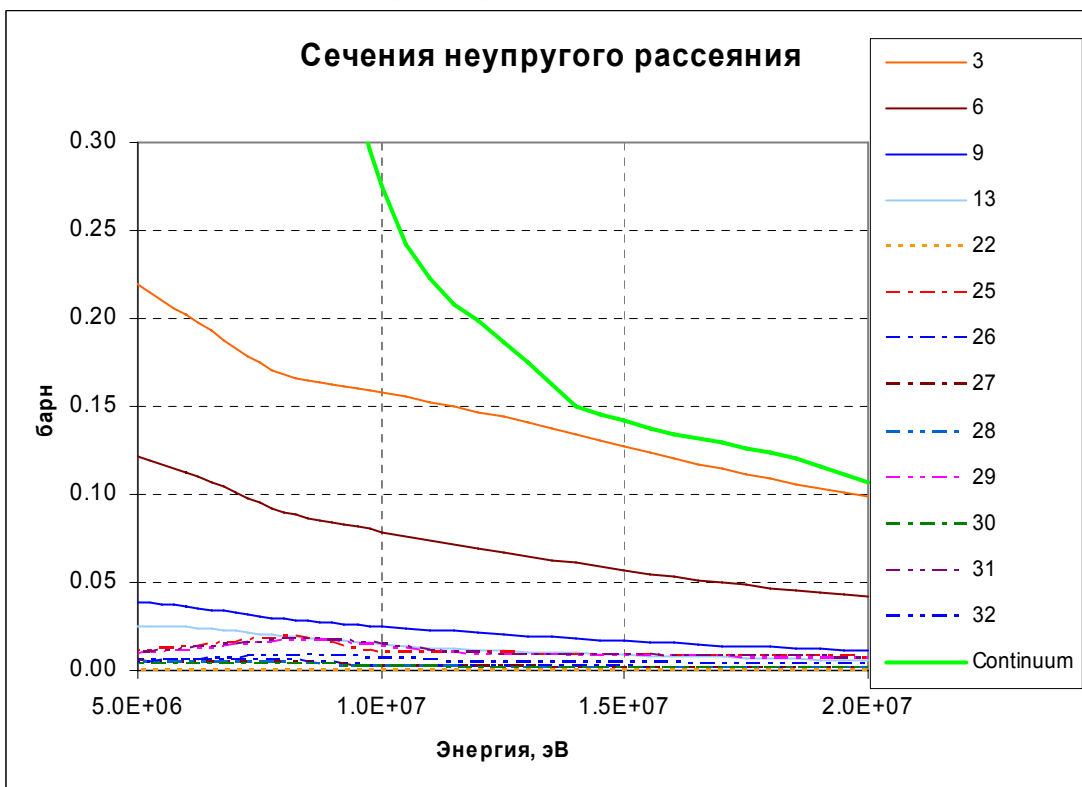


Рис.29. Сечения возбуждения отдельных уровней урана-235 при неупругом рассеянии (энергии уровней указаны в табл.4)

Таблица 4а. Схема уровней урана-235
(В принятой схеме уровней вероятности переходов для первых 19 уровней таковы же, как в JENDL/3.3)

| ENDF/B/VI (Rev.5=ENDF/B-VII.0) | | | | | JENDL-3.3 | | | |
|--------------------------------|-------|-----------------------|----------|---------|-----------------------|----------|----------|---------------------|
| № | Лт | Энергия уровня, эВ | Переходы | Еγ, эВ | Энергия уровня, эВ | Переходы | Еγ, эВ | Вероят- ность, % |
| 1 | 1/2+ | 76.8 | 1 → 0 | 76.8 | 77.0 | 1 → 0 | 77 | 100 |
| 2 | 3/2+ | 13040.0 | 2 → 1 | 12963.2 | 13040.0 | 2 → 1 | 12963 | 100 |
| 3 | 9/2- | 46200.0 | 3 → 0 | 46200 | 46203.9 | 3 → 0 | 46203.9 | 100 |
| 4 | 5/2+ | 51300.0 | 4 → 1 | 51223.2 | 51700.9 | 4 → 1 | 51623.9 | 72.46 |
| | | | 4 → 2 | 38260 | | 4 → 2 | 38660.9 | 27.54 |
| 5 | 7/2- | 81700 | 5 → 2 | 68660 | 81738.9 | 5 → 2 | 68698.9 | 68.03 |
| | | | 5 → 4 | 30400 | | 5 → 4 | 30038 | 31.97 |
| 6 | 11/2- | 103000 | 6 → 0 | 103000 | 103032 | 6 → 0 | 103032 | 17.01 |
| | | | 6 → 3 | 56800 | | 6 → 3 | 56828.1 | 82.99 |
| 7 | 5/2+ | 129300 | 7 → 0 | 129300 | 129297 | 7 → 0 | 129297 | 85.98 |
| | | | 7 → 2 | 116260 | | 7 → 2 | 116257 | 7.91 |
| | | | 7 → 4 | 78000 | | 7 → 4 | 77596.1 | 5.33 |
| | | | 7 → 5 | 47600 | | 7 → 5 | 47558.1 | 0.78 |
| 8 | 9/2+ | 150500 | 8 → 4 | 99200 | 150453 | 8 → 4 | 98752.1 | 96.15 |
| | | | 8 → 5 | 68800 | | 8 → 5 | 68714.1 | 3.85 |
| 9 | 13/2- | 170700 | 9 → 3 | 124500 | 170705 | 9 → 3 | 124501.1 | 27.01 |
| | | | 9 → 6 | 67700 | | 9 → 6 | 67673 | 72.99 |
| 10 | 7/2+ | 171400 | 10 → 0 | 171400 | 171388 | 10 → 0 | 171388 | 27.73 |
| | | | 10 → 2 | 158360 | | 10 → 2 | 158348 | 0.25 |
| | | | 10 → 3 | 125200 | | 10 → 3 | 125184.1 | 17.80 |
| | | | 10 → 4 | 120100 | | 10 → 4 | 119687.1 | 5.38 |
| | | | 10 → 5 | 89700 | | 10 → 5 | 89649.1 | 7.45 |
| | | | 10 → 7 | 42100 | | 10 → 7 | 42091 | 41.39 |
| 11 | 11/2+ | 197100 | 11 → 5 | 115400 | 197098 | 11 → 5 | 115359.1 | 44.44 |
| | | | 11 → 8 | 46600 | | 11 → 8 | 46645 | 55.56 |
| 12 | 9/2+ | 225400 | 12 → 0 | 225400 | 225417 | 12 → 0 | 225417 | 4.63 |
| | | | 12 → 3 | 179200 | | 12 → 3 | 179213.1 | 20.69 |
| | | | 12 → 4 | 174100 | | 12 → 4 | 173716.1 | 0.91 |
| | | | 12 → 5 | 143700 | | 12 → 5 | 143678.1 | 5.30 |
| | | | 12 → 6 | 122400 | | 12 → 6 | 122385 | 0.91 |
| | | | 12 → 7 | 96100 | | 12 → 7 | 96120 | 6.70 |
| | | | 12 → 10 | 54000 | | 12 → 10 | 54029 | 60.86 |
| 13 | 15/2- | 249100 | 13 → 6 | 146100 | 249130 | 13 → 6 | 146098 | 46.81 |
| | | | 13 → 9 | 78400 | | 13 → 9 | 78425 | 53.19 |
| 14 | 11/2+ | 291400 | 14 → 3 | 245200 | 291140 | 14 → 3 | 244936.1 | 7.07 |
| | | | 14 → 8 | 140900 | | 14 → 8 | 140687 | 15.28 |
| | | | 14 → 10 | 120000 | | 14 → 10 | 119752 | 14.00 |
| | | | 14 → 12 | 66000 | | 14 → 12 | 65723 | 63.65 |
| 15 | 13/2+ | 294700 | 15 → 8 | 144200 | 294654 | 15 → 8 | 144201 | 78.12 |
| | | | 15 → 11 | 97600 | | 15 → 11 | 97556 | 21.88 |
| 16 | 5/2+ | 332800 | 16 → 0 | 332800 | 332842 | 16 → 0 | 332842 | 35.21 |
| | | | 16 → 2 | 319760 | | 16 → 2 | 319802 | 0.35 |
| | | | 16 → 4 | 281500 | | 16 → 4 | 281141.1 | 15.28 |
| | | | 16 → 7 | 203500 | | 16 → 7 | 203545 | 40.60 |
| | | | 16 → 10 | 161400 | | 16 → 10 | 161454 | 8.56 |
| 17 | 17/2- | 338500 | 17 → 9 | 167800 | 338520 | 17 → 9 | 167815 | 59.17 |
| | | | 17 → 13 | 89400 | | 17 → 13 | 89390 | 40.83 |
| 18 | 15/2+ | 357300 | 18 → 11 | 160200 | 357300 | 18 → 11 | 160202 | 100 |
| 19 | 7/2+ | 367100 | 19 → 0 | 367100 | 367071 | 19 → 0 | 367071 | 29.80 |
| | | | 19 → 2 | 354060 | | 19 → 2 | 354031 | 0.21 |
| | | | 19 → 3 | 320900 | | 19 → 3 | 320867.1 | 18.03 |
| | | | 19 → 5 | 285400 | | 19 → 5 | 285332.1 | 0.61 |
| | | | 19 → 7 | 237800 | | 19 → 7 | 237774 | 4.90 |
| | | | 19 → 10 | 195700 | | 19 → 10 | 195683 | 35.79 |
| | | | 19 → 12 | 141700 | | 19 → 12 | 141654 | 10.66 |

Таблица 4б. Схема уровней урана-235

| ENDF/B/VI (Rev.5)=ENDF/B-VII.0 | | | | | | JENDL-3.3 |
|--------------------------------|------|----------------------------------|----------|---------------------|----------------|--------------------------------------|
| № | Лл | Энергия уровня, эВ | Переходы | E _γ , эВ | Вероятность, % | Энергия уровня, эВ |
| | | | | | | 368799 |
| 20 | 3/2+ | 393200 | 20→1 | 393123.2 | 46.90 | 393212 |
| | | | 20→2 | 380160 | 41.00 | |
| | | | 20→4 | 341900 | 8.54 | |
| | | | 20→7 | 263900 | 3.56 | |
| 21 | 9/2+ | 414800 | 21→3 | 368600 | 36.42 | 414762 |
| | | | 21→6 | 311800 | 10.67 | |
| | | | 21→10 | 243400 | 10.45 | |
| | | | 21→12 | 189400 | 34.34 | |
| | | | 21→14 | 123400 | 8.12 | |
| 22 | 5/2+ | 426700 | 22→0 | 426700 | 0.63 | 426746 |
| | | | 22→2 | 413660 | 39.35 | |
| | | | 22→5 | 375400 | 41.86 | |
| | | | 22→6 | 345000 | 14.65 | |
| | | | 22→7 | 297400 | 1.34 | |
| | | | 22→14 | 135300 | 2.18 | |
| | | 430000 | | | | |
| | | 438500 | | | | |
| 23 | 7/2+ | 445700 | 23→0 | 445700 | 30.32 | 445739 |
| | | | 23→3 | 399500 | 20.81 | |
| | | | 23→7 | 316400 | 45.25 | |
| | | | 23→10 | 274300 | 3.62 | |
| 24 | 7/2+ | 474300 | 24→0 | 474300 | 0.01 | 474300 |
| | | | 24→2 | 461260 | 0.52 | |
| | | | 24→3 | 428100 | 0.24 | |
| | | | 24→4 | 423000 | 27.39 | |
| | | | 24→5 | 392600 | 47.23 | |
| | | | 24→7 | 345000 | 9.45 | |
| | | | 24→8 | 323800 | 12.37 | |
| | | | 24→10 | 302900 | 1.13 | |
| | | | 24→12 | 248900 | 1.65 | |
| | | 500000 – порог континуума | | | | |
| | | | | | | 509919 |
| | | | | | | 533220 |
| 25 | | 550000 | 25→3 | 503800 | 0.04 | |
| | | | 25→4 | 498700 | 0.99 | |
| | | | 25→5 | 468300 | 31.50 | |
| | | | 25→8 | 447000 | 43.81 | |
| | | | 25→10 | 399500 | 2.03 | |
| | | | 25→11 | 352900 | 19.52 | |
| | | | 25→12 | 324600 | 0.90 | |
| | | | 25→14 | 258600 | 1.21 | |
| | | | | | | 608129 |
| | | | | | | 633089 |
| 26 | | 650000 | 26→1 | 649923 | 37.6 | 650000- порог контин. |
| | | | 26→2 | 636960 | 56.2 | |
| | | | 26→20 | 256800 | 6.2 | |

Таблица 4б. Продолжение

| ENDF/B/VI (Rev.5)=ENDF/B-VII.0 | | | | | |
|--------------------------------|----|--------------------|----------|---------|----------------|
| № | Лл | Энергия уровня, эВ | Переходы | Еγ, эВ | Вероятность, % |
| 27 | | 770000 | 27→1 | 769923 | 32.1 |
| | | | 27→2 | 756960 | 16.1 |
| | | | 27→7 | 640700 | 51.8 |
| 28 | | 900000 | 28→1 | 899923 | 22.0 |
| | | | 28→2 | 728600 | 31.3 |
| | | | 28→7 | 674600 | 46.7 |
| 29 | | 1040000 | 29→2 | 1026960 | 25.0 |
| | | | 29→22 | 613300 | 41.7 |
| | | | 29→24 | 565700 | 33.3 |
| 30 | | 1085000 | | | |
| 31 | | 1330000 | | | |
| 32 | | 1430000 | | | |

Перечень цитированных экспериментальных работ

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, МэВ | | Число точек |
|-------------|--------------|----------------------|---------|-----------------------|-----|-------------|
| | | | | от | до | |
| Armitage66 | B.H.Armitage | Paris-66,1,383,6601 | 21068 | 0.13 | 1.5 | 6 |
| Knitter72 | H.H.Knitter | ZP,257,108,7212 | 20394 | 1.5 | 2.3 | 3 |
| Drake69 | D.M.Drake | NP/A,133,108,6908 | 10016 | 4 | 7.5 | 3 |
| Batchelor69 | R.Batchelor | AWRE-O-55/69,6908 | 20036 | 2 | 4 | 3 |
| Andreev61 | V.M.Andreev | Neutron Fiz,287,6107 | 41217 | 0.9 | 1 | 1 |

3.6. Сечения реакций (n,xn)

На рис. 30 оцененные данные о сечении реакции (n,2n) сравниваются с имеющимися экспериментальными данными. Как видно, оценки, основанные на модельных расчетах, игнорируют экспериментальную величину, полученную Мазером при 14.1 МэВ. В ENDF/B-VII сечение этой реакции принято таким же, как в JENDL-3.3. Оно, как и сечение деления в области высоких энергий, превышает величины, принимавшиеся в ENDF/B-VI. **Коль скоро в РОСФОНД решено принять повышенное сечение деления из ENDF/B-VII.0, естественно и сечения конкурирующих с делением реакций в области выше порога реакции (n,2n) также принять такими же, какие приняты в ENDF/B-VII.0.** В случае реакции (n,2n) различия несущественны и оценка, принимавшаяся в ENDF/B-VI, прекрасно подтверждается экспериментом Фрею.

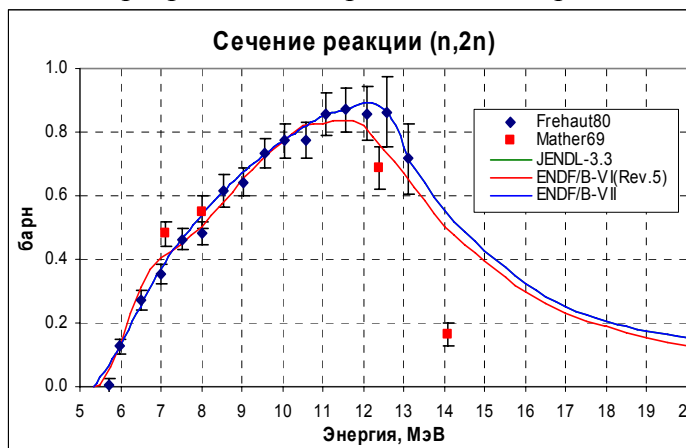


Рис.30

На рис. 31 оценки, принятые в современных библиотеках, сравниваются с экспериментальными данными по реакции (n,3n), а на рис. 32 – по реакции (n,4n). Как

видно, оценка, принятая в JENDL-3.3 целиком опирается на результаты измерений Веезера, оценка ENDF/B-VI лежит существенно выше, а оценка, принятая в ENDF/B-VII.0 занимает промежуточное положение.

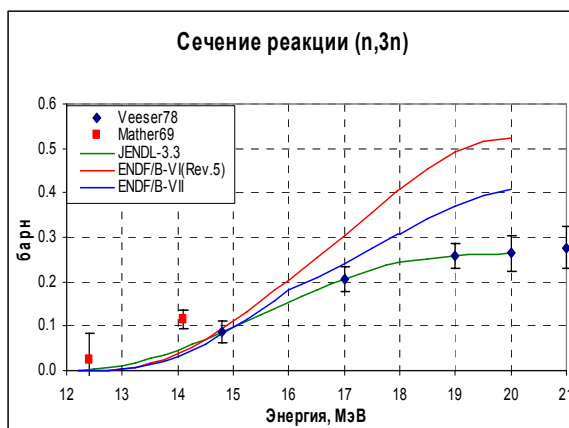


Рис.31

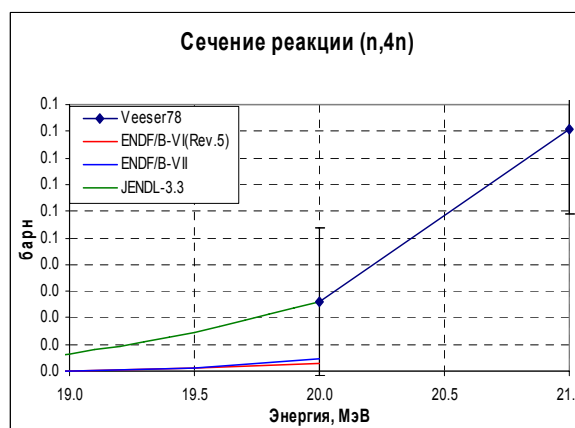


Рис.32

Что касается реакции (n,4n), то здесь расхождения оценок весьма велики. В JENDL-3.3 принята оценка, опирающаяся на эксперимент Веезера, тогда, как в ENDF/B приняты оценки, основанные, прежде всего, на модельных расчетах.

По соображениям, изложенным выше, в РОСФОНД принимаются те же оценки, что и в ENDF/B-VII.0.

Перечень цитированных экспериментальных работ

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, МэВ | | Число точек |
|-----------|-------------|----------------------|---------|-----------------------|------|-------------|
| | | | | от | до | |
| Frehaut80 | J.Frehaut | NSE,74,29,8004 | 21568 | 5.73 | 13.1 | 16 |
| Mather | D.S.Mather | AWRE-O-72/72,7211 | 20795 | 7.10 | 14.1 | 4 |
| Ve eser78 | L.R.Ve eser | Harwell-78,1054,7809 | 10795 | 14.8 | 21 | 5 |

3.7. Сечения реакций с вылетом заряженных частиц.

Из-за высокого кулоновского барьера сечения реакций с вылетом заряженных частиц на уране-235 малы и в современных библиотеках оцененных данных широкого назначения не приводятся. Однако, для того, чтобы пользователи имели представление о том, какой смысл имеют слова “сечения малы”, мы **решили ввести в РОСФОНД данные о сечениях важнейших реакций с вылетом заряженных частиц, почерпнув соответствующие данные из дозиметрической библиотеки EAF-99.** Принятые в ней оцененные данные для этих сечений получены на основе полуэмпирической систематики. Энергетический сечений реакций (n,p) и (n,α) показан на рис. 33. Экспериментальных данных, разумеется, нет.

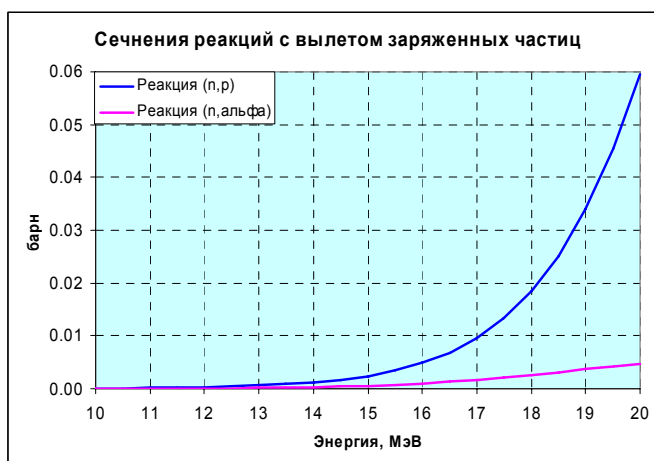


Рис.33

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

4.1. Анизотропия упругого рассеяния

Оценка угловых распределений упругого рассеяния основывается на расчетах по оптической модели, параметры которой подобраны так, чтобы описать полные сечения и угловые распределения упругого рассеяния не только на уране-235, но и на всех соседних ядрах. Непосредственных измерений угловых распределений упруго рассеянных нейтронов немного и во всех случаях измерялись не только упруго рассеянные нейтроны, но и нейтроны, неупруго рассеянные на нескольких низколежащих уровнях.

На рис. 34 оцененные угловые моменты дифференциального сечения упругого рассеяния, т.е. коэффициенты ω_n разложения

$$\sigma_e(E, \mu) = \frac{\sigma(E)}{4\pi} \left[1 + \sum_{n=1} (2n+1) A_n(E) P_n(\mu) \right],$$

сравниваются с экспериментальными данными Смита (Smith64). Следует отметить, что в обсуждаемых измерениях до 500 эВ регистрировались, кроме упруго рассеянных нейтронов, нейтроны, неупруго рассеянные на первых двух уровнях, Далее – до 1 МэВ – нейтроны, неупруго рассеянные на первых четырех уровнях, а при более высоких энергиях – нейтроны, неупруго рассеянные на первых восьми уровнях. Вклад неупруго рассеянных нейтронов был пренебрежимо мал только ниже 500 кэВ (менее 1%). К 1 МэВ этот вклад возрастал до 8.5%, а к 1.5 МэВ – до 14%. Не удивительно, что выше 1 МэВ расхождения между оцененными и измеренными данными заметно возрастают.

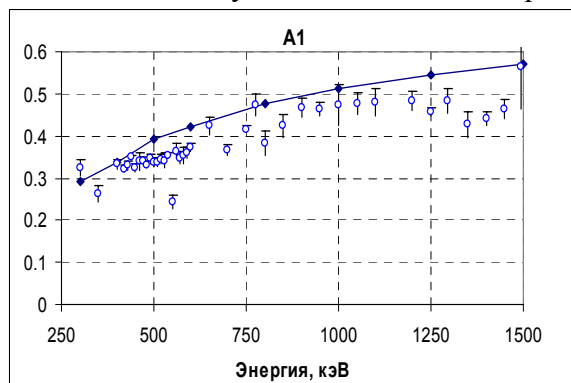


Рис.34 а

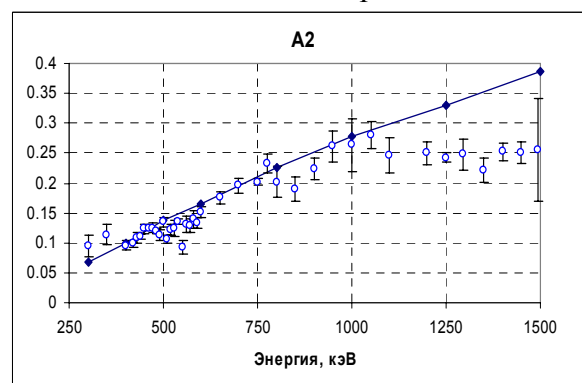


Рис. 34б

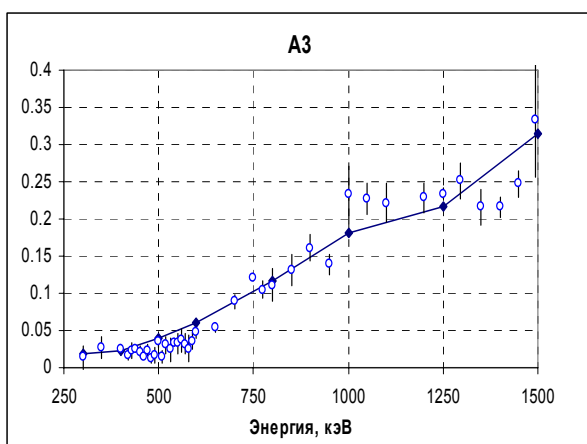


Рис.34в

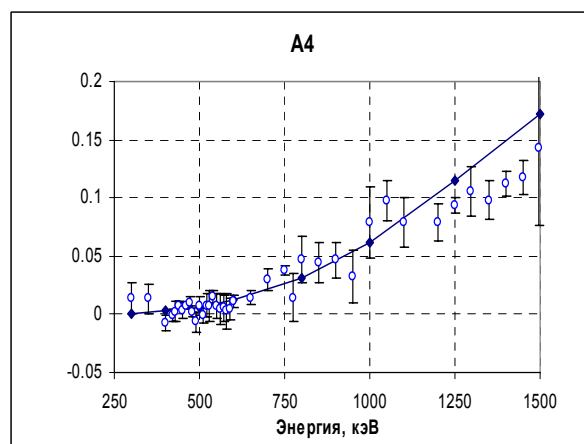


Рис. 34г.

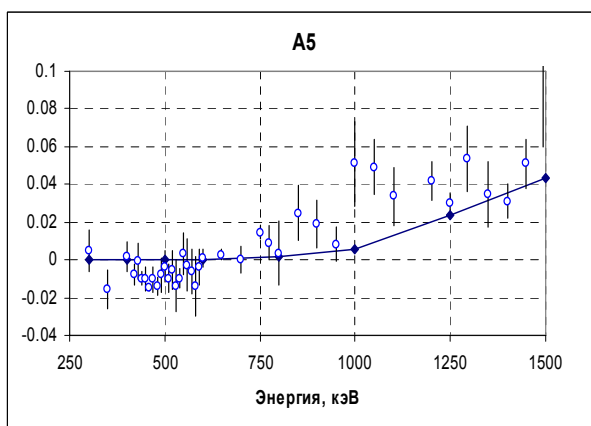


Рис. 34 д. Сравнение оцененных угловых моментов упругого рассеяния с экспериментальными

На рис. 35 оцененные угловые распределения в том же энергетическом диапазоне сравниваются с более ранней работой Аллена (Allen56). Как видно, при 1 МэВ расхождения в сечении в заднюю полуплоскость превышают экспериментальные погрешности.

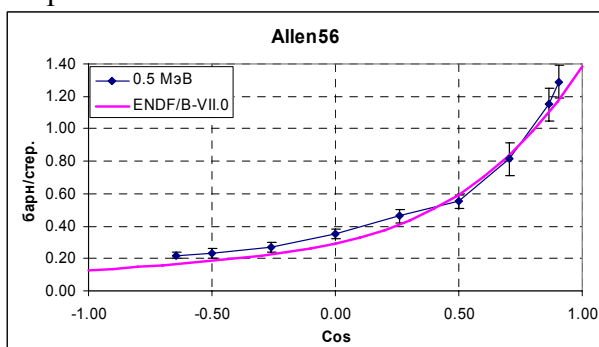


Рис.35 а

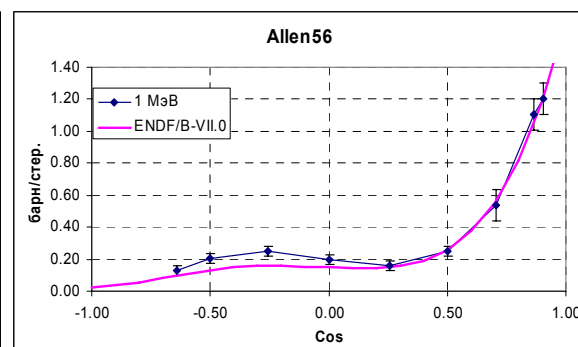


Рис.35б

Рис.35.Сравнение оцененных дифференциальных сечений рассеяния с измеренными Алленом

Таков же характер расхождений оцененных данных и с экспериментальными данными Книттера (Knitter72) при энергиях ниже 2 МэВ (см. рис. 36). Однако при более высоких энергиях столь систематического расхождения, указывающего, казалось бы, на искажение формы углового распределения за счет вклада неупругого рассеяния, уже не проявляется.

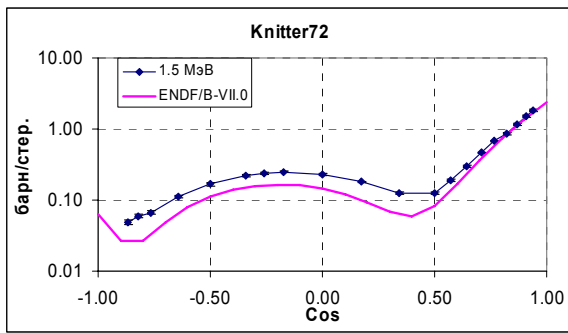


Рис.36а

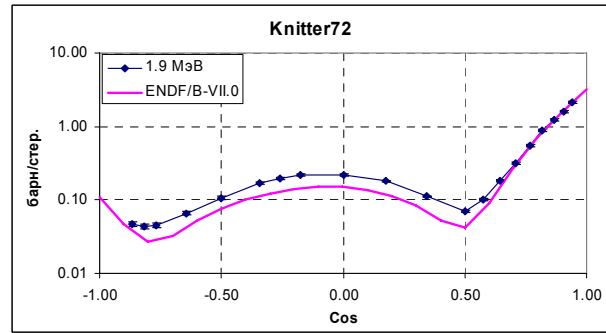


Рис.36б

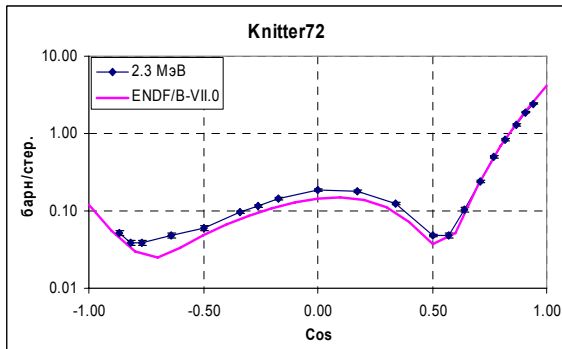


Рис.36в

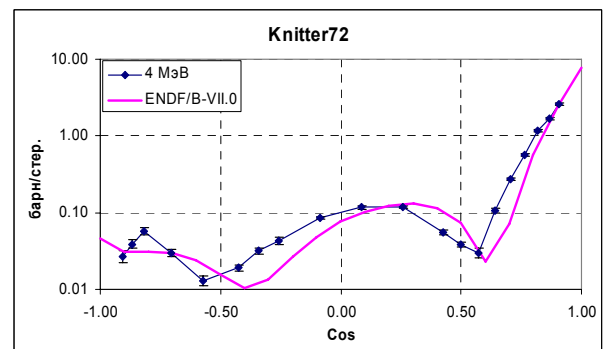


Рис. 36г.

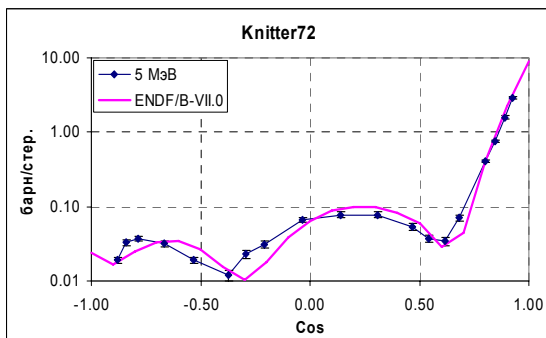


Рис.36д

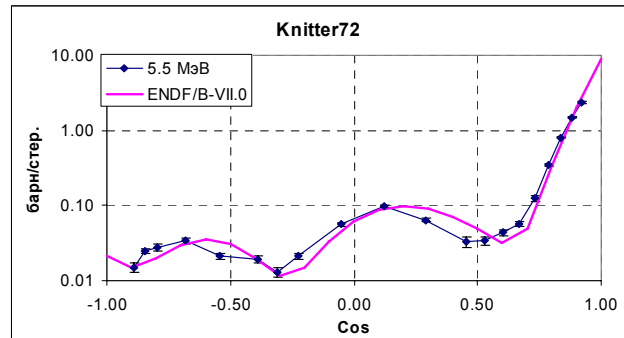


Рис. 36е

Рис. 36. Сравнение оцененных дифференциальных сечений с измерениями Книттера.

Обратим внимание на то, что при малых углах рассеяния, где вклад неупругого рассеяния пренебрежимо мал, оцененные данные прекрасно согласуются с данными Книттера. В то же время, между этими данными и результатами измерения рассеяния на относительно малые углы Морозовым и др. (Mozov68) имеется систематическое расхождение (см. рис.37).

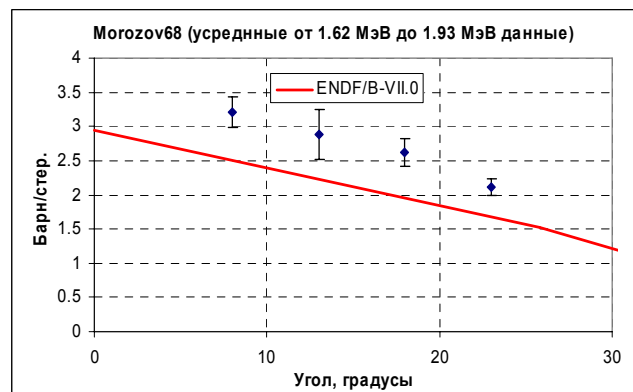


Рис. 37. Сравнение оцененных данных с измерениями Морозова.

В целом, учитывая ограниченность имеющейся экспериментальной информации и отсутствие кричащих противоречий между результатами измерений и оцененными

данными, можно признать принятую в РОСФОНД оценку угловых распределений упруго рассеянных нейтронов из ENDF/B-VII удовлетворительной.

Перечень цитированных экспериментальных работ

| Указатель | 1-й автор | Ссылка | № EXFOR | Диапазон энергии, МэВ | | Число точек по энергии | Число и диапазон углов, косинусов или число коэффициентов разложения |
|-------------|-------------|--------------------|---------|-----------------------|-------|------------------------|--|
| | | | | от | до | | |
| 77Morozov68 | V.M.Morozov | YF,46(5),1326,1987 | 40959 | 1.62 | 1.926 | 4 | 4 (8° - 23°) |
| Knitter72 | H.H.Knitter | ZP,257,108,7212 | 20394 | 1.5 | 5.5 | 7 | 20(-0.87 - 0.94) |
| Batchelor69 | R.Batchelor | AWRW-O-55/69,6908 | 20036 | 2 | 4 | 3 | 9(-0.71 - 0.87) |
| Allen56 | R.C.Allen | PR,104,731,56 | 12207 | 0.5 | 1 | 2 | 9(-0.96 - 0.91) |
| Smith64 | A. B. Smith | NSE,18,126,1964 | 10233 | 0.3 | 1.5 | 40 | 5 угловых моментов(P ₁ -P ₅) |

4.2. Характеристики нейтронов деления

4.2.1. Число нейтронов деления.

В таблице 5 приводятся значения числа нейтронов испускаемых при делении урана-235 тепловыми нейтронами, принятые в основных библиотеках оцененных данных в сравнении с оценкой, выполненной в 2004 г. рабочей группой МАГАТЭ по нейтронным стандартам²¹ при совокупном рассмотрении результатов измерений всех величин, зависящих от отношений величин $\nu(^{235}\text{U})$ (отношений величин ν для различных делящихся ядер, величин η , α , сечений деления и захвата и др.).

Как видно, различия между принимаемыми значениями ν лежат в пределах погрешности его экспериментального определения.

Таблица 5. Оцененные значения числа нейтронов деления ^{235}U тепловыми нейтронами

| Оценка | $\nu(^{235}\text{U})$ |
|------------------|-----------------------|
| ENDF/B-VI(Rev.2) | 2.432 |
| ENDF/B-VI(Rev.5) | 2.4367 |
| ENDF/B-VII.0 | 2.4367 |
| JENDL-3.3 | 2.43633 |
| CRP IAEA, 2004 | 2.4355±0.0023 |

На рис.38 приводятся различия между оценками энергетической зависимости числа мгновенных нейтронов деления, $\nu_{\text{prompt}}(E)$, принятыми в библиотеках ENDF/B-VI(Rev.2) и JENDL-3.3, а также оцененных в 1972 г. Ф. Манеро и В. Коньшиным²², - и данными, принятыми в ENDF/B-VI(Rev.5) и ENDF/B-VII.0. Заметим, что все расхождения, демонстрируемые для ν_{prompt} , в точности соответствуют и расхождениям в полном числе нейтронов деления.

²¹ Предварительные данные, любезно предоставленные В.Г.Проняевым.

²² F.Manero и V.A. Konshin, EXFOR № V0015, J. REA, 10, 637,7212.

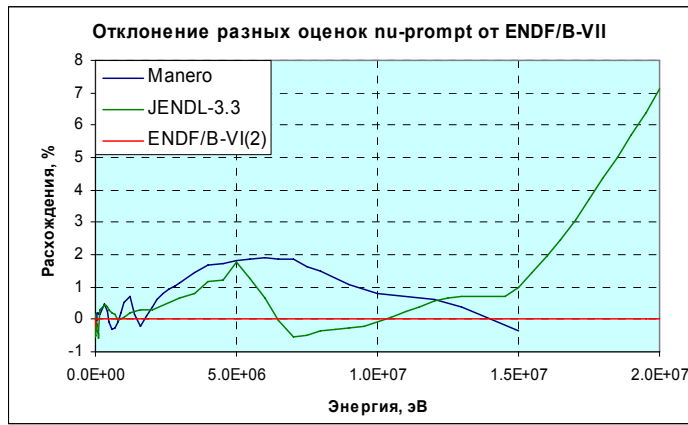


Рис. 38

На рис. 39 оцененные данные, принятые в ENDF/B-VII.0, сравниваются с экспериментальными данными последних лет. Как видно, при энергиях ниже 15 МэВ различия в оценках значительно меньше погрешностей и разброса экспериментальных данных. При более высоких энергиях в LENDL-3.3 приняты более высокие значения ν_{prompt} в соответствии с данными Howe-84. Эти данные противоречат не показанным на рисунке результатам измерения ν_{prompt} при более высоких энергиях и теоретическим представлениям об энергетической зависимости этой величины. Поэтому **никаких изменений в энергетическую зависимость ν_{prompt} , принятую в ENDF/B-VII, вводить не целесообразно.**

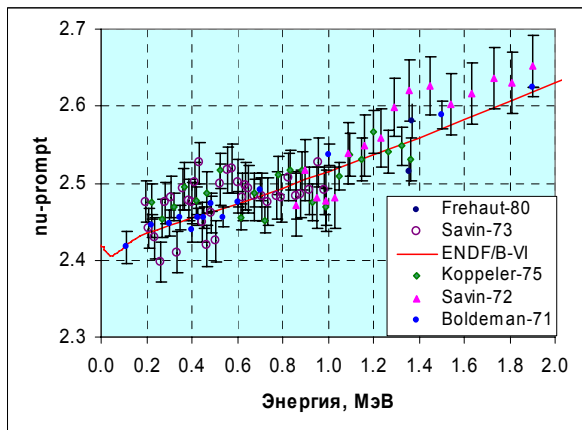


Рис. 38а

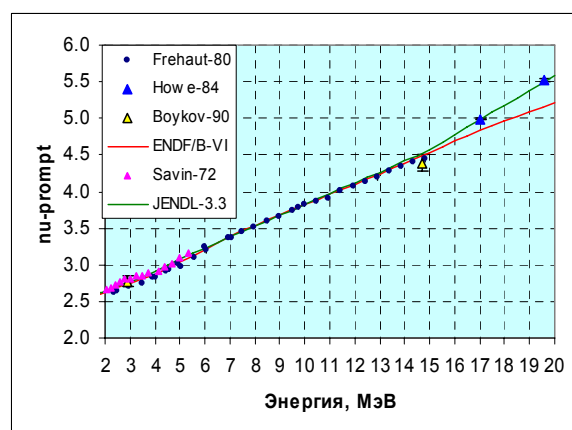


Рис. 38б

4.2.2. Спектр нейтронов деления.

Отметим, прежде всего, что в современной версии системы константного обеспечения многогрупповых расчетов реакторов и защиты БНАБ-93 с программой подготовки констант CONSYST, используются спектры нейтронов деления, рассчитываемые самой программой CONSYST на основе систематики, предложенной Ю.С.Хомяковым и др.²³ Согласно этой систематике спектры нейтронов деления описываются формой Уатта:

$$\chi(E) = \frac{2 \exp(-ab/4)}{\sqrt{\pi a^3 b}} \exp(-E/a) \operatorname{sh} \sqrt{bE}$$

Принято, что для любого ядра параметр $a=1.03$, а параметр b полностью определяется величиной ν : $b=0.858\nu-0.436$. В последствии выяснилось, что эта форма спектра в случае урана-235 ведет к недооценке среднего сечения деления урана-238 на спектре деления урана-235, и для устранения этого недостатка в системе подготовки констант CONSYST при расчете спектра нейтронов деления урана-235 делается корректировка параметра b : он увеличивается на 0.172. Благодаря этому средняя энергия нейтронов деления

²³ Хомяков Ю.С. и др. Оценка спектров нейтронов деления для применения в инженерных расчетах. Вопр. ат. науки и техн., сер. «Ядерные Константы», 1992, вып. 1, с.70.М. ЦНИИАИ.

$$\bar{E} = a(3/2 + ab/4)$$

возрастает с 1.98 МэВ до 2.03 МэВ, что приводит к согласию между измеренным средним сечением деления урана-238 на спектре деления и усредненным по спектру, но противоречит большинству экспериментальных оценок средней энергии нейтронов деления (их среднее равно 1.97 ± 0.02 МэВ¹¹). Исключение составляет эксперимент Юхансона²⁴ в котором средняя энергия нейтронов деления урана-235 тепловыми нейтронами найдена равной 2.03 ± 0.03 МэВ. Надо сказать, снижение средней энергии нейтронов деления до 1.98 МэВ влечет за собой и снижение коэффициента размножения на быстрых нейтронах за счет деления урана-238, что проявляется на коэффициенте размножения не только быстрых, но и тепловых реакторов. Поэтому не только в России, но и во всех зарубежных данных о спектрах деления, рекомендуемых для расчета реакторов, спектр деления принимается таким, чтобы средняя энергия нейтронов деления была близка к 2.03 МэВ. Именно такой спектр деления принят и в ENDF/B-VI и ENDF/B-VII: $\bar{E} = 2.033$ МэВ. Заметим, что противоречия в форме спектра деления урана-235 отмечались многократно. В Международный перечень потребностей в нейтронных данных WRENDA были внесены соответствующие запросы. Однако проблема до сих пор осталась нерешенной.

При решении вопроса о том, какие оцененные данные о спектре мгновенных нейтронов деления принять в РОСФОНД сомнений не возникало: **решено принять спектры, принятые в ENDF/B-VII.0.**

На рис.39 средняя энергия нейтронов деления, рассчитанная по данным ENDF/B-VII, сравнивается с таковой, рассчитываемой программой CONSYST, на основе описанного выше алгоритма. Для сравнения там же приводится зависимость от энергии нейтронов, вызывающих деление средней энергии нейтронов деления, рассчитывавшейся программой подготовки констант БНАБ-78²⁵. Как видно, различие средних энергий, принимаемых в БНАБ-93 и получаемых из ENDF/B-VII, весьма мало, если только энергия нейтронов, вызывающих деление, менее 6 МэВ. В энергетических реакторах эта область ответственна более, чем за 99.5% всех делений и при их расчете неточность приближения, используемого в БНАБ-93, не существенна.

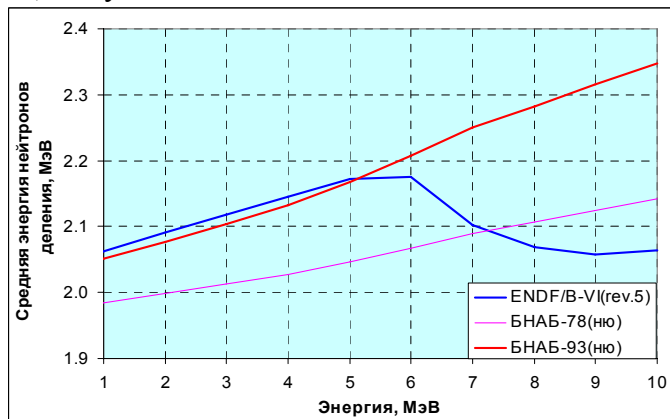


Рис.39

В критических системах типа “Годивы”, доля делений выше 6 МэВ составляет, примерно, 7% и неточность спектра нейтронов, образуемых при делении этими нейтронами, становится заметной и ведет к завышению коэффициента размножения примерно на 0.3%. В системе констант БНАБ-93 эта неточность компенсируется принятым (в соответствии с ENDF/B-VI) сечением деления. Как отмечалось в разделе 3.2., в ENDF/B-VII.0 для обеспечения удовлетворительного согласия с экспериментами на сборке “Годива” и на т других подобных сборках принято несколько повышенное сечение деления. Таким образом, при использовании данных РОСФОНД для расчета подобных

²⁴ Johanson P.I., Holmqvist B. Nucl. Sci. Eng., 62,4,695,1977.

²⁵ Абагян Л.П. и др. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. М. Энергоиздат, 1981. с.135.

предельно жестких систем необходимо принимать во внимание всю совокупность данных включая спектры нейтронов деления. Это потребует определенного усовершенствования системы констант БНАБ и программы CONSYST.

На рис. 40 и рис. 41 спектры деления ^{235}U тепловыми нейтронами из БНАБ-93 и ENDF/B-VII сравниваются между собой. Различия нельзя признать пренебрежимо малыми.

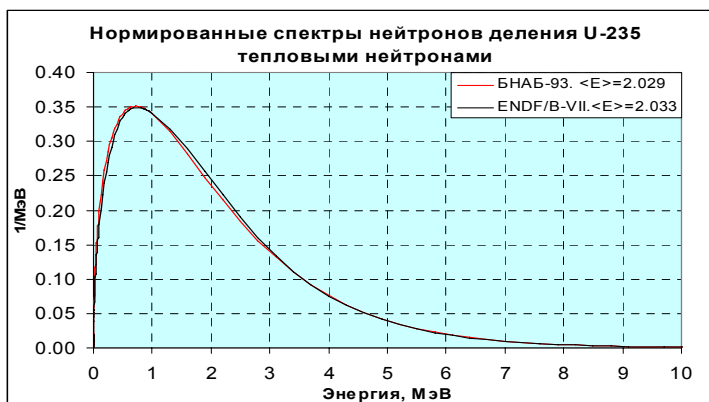


Рис.40

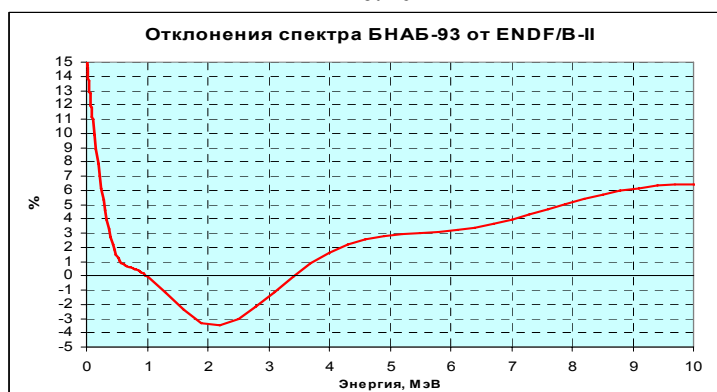


Рис.41

4.2.3. Запаздывающие нейтроны деления

4.2.1.1. Число запаздывающих нейтронов

На рис.42 показаны зависимости числа запаздывающих нейтронов на акт деления, принятые в разных оценках. Будучи в целом сходными, последние оценки более детально описывают энергетическую зависимость этого числа. При делении тепловыми нейтронами доля запаздывающих нейтронов снижена с 0.686% в ENDF/B-VI до 0.665 в JEFF-3 и до 0.651 в JENDL-3.3. Р 4-м МэВ доли запаздывающих нейтронов во всех оценках сравниваются (0.578%). При высоких энергиях доля запаздывающих нейтронов принимается заметно меньшей, чем ранее. Учитывая, что оценки JENDL-3.3 и, особенно, JEFF-3.3 предназначались не только для расчета ядерных реакторов, но и для расчета электроядерных устройств, где роль высоких энергий много выше, **решено принять в РОСФОНД данные из JEFF-3**

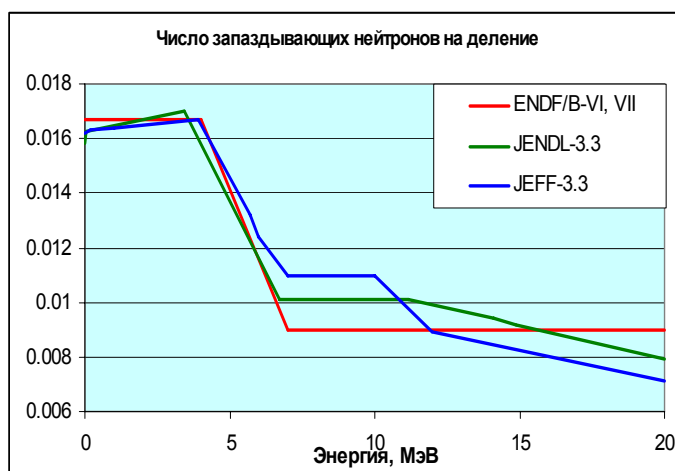


Рис. 42

4.2.3.2. Группы запаздывающих нейтронов и их параметры

До последнего времени в инженерных расчетах во всех странах использовалось предложенное Кипиным²⁶ 6-групповое описание распада совокупности предшественников запаздывающих нейтронов. Со временем уточнялись выходы этих групп, слегка варьировались их постоянные распада, большой прогресс был достигнут в определении спектров запаздывающих нейтронов. Однако сам 6-групповой подход сохранялся. Основной недостаток этого подхода состоял (и состоит) в том, что постоянные распада, подбираемые методом максимума правдоподобия для описания временной зависимости нейтронной активности образца делящегося вещества, облученного нейтронным импульсом, меняются при переходе от одного делящегося материала к другому. Поэтому для описания временного поведения нейтронной активности облученного топлива сложного нуклидного состава требуется принимать во внимание не 6, а много большее число групп запаздывающих нейтронов. Например, в быстром энергетическом реакторе, работающем в режиме рециклирующего топлива источником запаздывающих нейтронов будут являться деления ^{238}U , ^{235}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{241}Am , $^{242}\text{Am}^m$ и более высокие актиниды. Таким образом, число групп запаздывающих нейтронов достигает 60 и более. Современная вычислительная техника позволяет без труда учитывать такое число различных групп предшественников, однако подготовка данных для расчета требует знания эффективных вкладов изотопов в общий источник запаздывающих нейтронов, которое меняется в процессе перегрузок и в процессе выгорания. Учет всех этих вариаций в эксплуатационных условиях весьма затруднен и реально аппаратура реактиметров на реакторах атомных электростанций работает при раз и навсегда настроенных параметрах запаздывающих нейтронов, что ведет к некоторым (в настоящее время не определяющим) погрешностям в оценках эффектов реактивности.

Возможность упростить описание временной зависимости запаздывающих нейтронов в топливе сложного состава появилась в связи с разработкой и обоснованием группой специалистов из Лос-Аламосской лаборатории и из ФЭИ системы 8-групповых наборов параметров запаздывающих нейтронов, обеспечивающих описание всех тех экспериментов по запаздывающим нейтронам, которые послужили основой для выбора 6-групповых параметров, но при постоянных, не зависящих делящегося нуклида постоянных распада групп предшественников²⁷. От делящегося нуклида зависят лишь выходы этих групп. Таким образом, 8-групповое описание предшественников эквивалентно представлению, в котором при делении образуется только 8 различных продуктов деления, при распаде которых образуются эмиттеры запаздывающих

²⁶ G.R.Keepin et al. Phys. Rev.,107, №4, 1044, 1957.

²⁷ Spriggs,Campbel and Piksaikin,Prg Nucl Eng 41,223(2002)

нейтронов. В действительности, разумеется, большинство групп содержат вклады нескольких предшественников, важнейшие из которых представлены в таблице 7. 8-групповое описание запаздывающих нейтронов принято в библиотеке JEFF-3.

В таблице 6. проводится сравнение 6-групповых параметров запаздывающих нейтронов, используемых в российской системе константного обеспечения БНАБ-93, и рекомендуемых в библиотеках ENDF/B-VI, ENDF/B-VII и JENDL-3.3. в последней строке приведены средние значения постоянной распада, выход запаздывающих нейтронов на одно деление тепловыми нейтронами и их отношение.

Таблица 6 Параметры 6 групп запаздывающих нейтронов

| Группа | БНАБ-93 | | | ENDF/B-VI | | | ENDF/B-VII | | | JENDL-3.3 | | |
|---|-----------|--------|--------|-----------|---------|--------|------------|---------|--------|-----------|---------|--------|
| | λ | a | вклад | λ | a | вклад | λ | a | вклад | λ | a | вклад |
| 1 | 0.0127 | 0.038 | 0.0011 | 0.013336 | 0.03501 | 0.0010 | 0.012498 | 0.03515 | 0.0007 | 0.01244 | 0.033 | 0.0010 |
| 2 | 0.0317 | 0.213 | 0.0155 | 0.032739 | 0.18070 | 0.0013 | 0.031647 | 0.18405 | 0.0095 | 0.03054 | 0.146 | 0.0111 |
| 3 | 0.115 | 0.188 | 0.0497 | 0.12078 | 0.17251 | 0.0450 | 0.10035 | 0.15971 | 0.0262 | 0.1114 | 0.196 | 0.0542 |
| 4 | 0.311 | 0.407 | 0.2908 | 0.30278 | 0.38678 | 0.2528 | 0.30883 | 0.40573 | 0.2050 | 0.3014 | 0.395 | 0.2956 |
| 5 | 1.4 | 0.128 | 0.4117 | 0.84949 | 0.15859 | 0.2908 | 1.00597 | 0.15325 | 0.2522 | 1.134 | 0.115 | 0.3238 |
| 6 | 3.87 | 0.026 | 0.2312 | 2.853 | 0.06643 | 0.4091 | 4.9846 | 0.06211 | 0.5064 | 3.014 | 0.042 | 0.3143 |
| $\bar{\lambda}, \nu_d, \frac{\nu_d}{\bar{\lambda}}$ | 0.4353 | 0.0166 | 0.0381 | 0.4632 | 0.0167 | 0.0361 | 0.6113 | 0.0167 | 0.0273 | 0.4028 | 0.01585 | 0.0394 |

Таблица 7. Характеристики 8 групп запаздывающих нейтронов (JEFF-3).

| Группа | Предшественники | $T_{1/2}$, с | Эффективный выход | Выход для ^{235}U | $T_{1/2}$ для группы | λ для группы |
|--------|-----------------|---------------|-------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | Br-87 | 55.6 | 0.033 | 0.03278 | 55.6 | 0.01247 |
| 2 | I-137 | 24.5 | 0.178 | 0.15391 | 24.5 | 0.02829 |
| 3 | Br-88 | 16.3 | 0.111 | 0.09135 | 16.3 | 0.04253 |
| 4 | Br-89 | 4.38 | 0.101 | 0.19688 | 5.21 | 0.13304 |
| | I-138 | 6.46 | 0.046 | | | |
| | Rb-93 | 5.93 | 0.024 | | | |
| 5 | Rb-94 | 2.76 | 0.162 | 0.3308 | 2.37 | 0.29247 |
| | I-139 | 2.3 | 0.046 | | | |
| | As-85 | 2.08 | 0.107 | | | |
| | Y-98m | 2 | 0.088 | | | |
| 6 | Kr-93 | 1.29 | 0.005 | 0.09024 | 1.04 | 0.66649 |
| | Cs-144 | 1 | 0.007 | | | |
| | I-140 | 0.86 | 0.005 | | | |
| 7 | Br-91 | 0.542 | 0.017 | 0.08115 | 0.424 | 1.63478 |
| | Rb-95 | 0.384 | 0.049 | | | |
| 8 | Rb-96 | 0.203 | 0.017 | 0.02289 | 0.195 | 3.55460 |
| | Rb-97 | 0.17 | 0.005 | | | |

Как видно из таблицы, эффективные выходы, использовавшиеся при усреднении групповых значений периодов полураспада, отличны от выходов групп при делении урана-235 тепловыми нейтронами, которые приведены в таблице 7. Заметим, что среднее значение величины λ по данным таблицы 7 оказывается равным 0.40576, что близко к значению, следующему из данных JENDL-3.3, и существенно превышает величину, следующую из параметров, принятых в ENDF/B-VII. Выход запаздывающих нейтронов на деление тепловыми нейтронами в JEFF-3 принят равным 0.0162. $\frac{\nu_d}{\bar{\lambda}} = 0.0399$.

Для включение в РОСФОНД решено принять данные о запаздывающих нейтронах, принятые в JEFF-3. Разумеется, переход к этим данным для оценки безопасности ядерных реакторов должен быть предварен тщательной верификацией в экспериментах на критсборках.

4.2.3.3. Спектры запаздывающих нейтронов.

В отличие от постоянных распада и долей групп, спектры всех групп запаздывающих нейтронов во всех последних версиях библиотек ENDF/B и JENDL сохраняются неизменными. В библиотеке JEFF-3.0, в которой принято 8-групповое описание запаздывающих нейтронов, приняты оригинальные спектры всех 8 групп. На рис. 43а принятые в разных библиотеках спектры нейтронов, усредненные с весом групповых долей, сравниваются между собой. Сравнение проводится в многогрупповой форме, что позволило сравнить детальные спектры из файлов оцененных данных с принятыми в БНАБ-93. Как видно, последние два спектра хорошо согласуются друг с другом, тогда как спектр, свернутый по 8 группам существенно от них отличается.

Поскольку единственный или определяющий вклад в в первую группу запаздывающих нейтронов обусловлен бромом-87 (см. табл.6 и 7), для этой группы следовало ожидать хорошего согласия в форме спектра. Этого, однако, не наблюдается (см. рис. 43б).

Последние группы и в 6-групповом и в 8-групповом представлении характеризуются близкими значениями постоянных распада и не слишком различающимися выходами. Сравнение спектров для этих групп (рис. 43в) демонстрирует ту же картину, что и для всех групп вместе.

На рис. 43г. сравниваются спектры 4-й группы 6-группового представления и 5-й группы 8-группового представления. Постоянные распада и выходы этих групп также достаточно близки (см. табл. 6 и 7), характер расхождений таков же, как и в предыдущих случаях.

Источник данных о спектрах запаздывающих нейтронов, использованный при формировании библиотеки JEFF-3, нам неизвестен. Между тем, специалисты, предложившие 8-групповое представление, внимательно рассматривали²⁸ всю совокупность экспериментальных данных о спектрах запаздывающих нейтронов, включая недавние измерения на реакторе ИБР в Дубне и оценки, основанные на данных о выходах отдельных предшественников и расчетные оценки спектров испускаемых в результате их распада нейтронов. В цитированной работе приводятся в известном 16-групповом представлении Hansen&Roach спектры всех 8 групп запаздывающих нейтронов, оцененные В. М. Пиксайкиным на основе совокупности проанализированных экспериментальных данных. Эти спектры также приведены на рис. 43. Видно, что спектр, усредненный В.Пиксайкиным по всем группам, удовлетворительно согласуется с принимаемыми ныне суммарными спектрами. Никаких аномалий в области низких энергий в нем не наблюдается. Между тем, спектры первой группы различаются на удивление сильно. В спектре Пиксайкина, как и в спектре, принятом в JEFF-3, содержится гораздо меньше быстрых нейтронов, ценность которых в реакторах существенно повышена за счет чего они способны делить уран-238. Правда, в реакторах типа ВВЭР этот эффект компенсируется повышенной утечкой быстрых нейтронов.

²⁸ J. M. Campbell, G.D. Spriggs, Delayed Neutron Spectral Data for Hansen-Roach Energy Group Structure, LA-UR-99-2988, Rev. 0, June 15, 1999

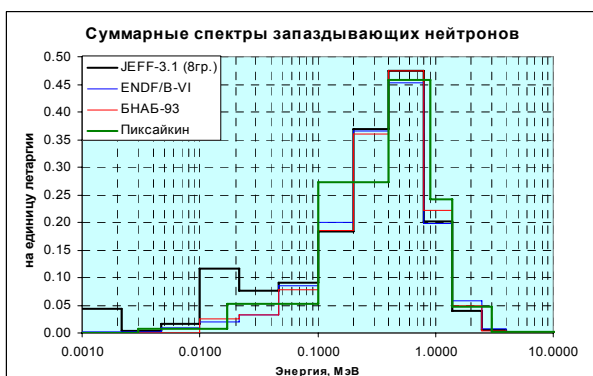


Рис.43а



Рис.43б

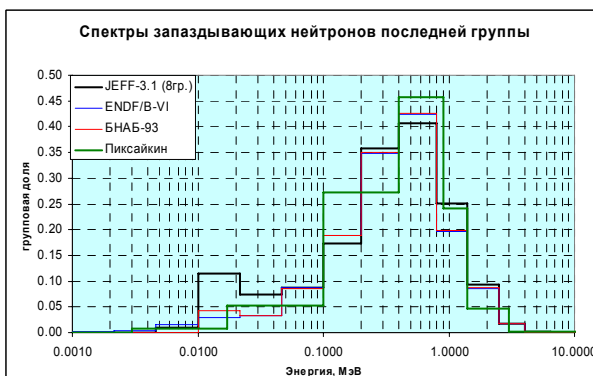


Рис.43в

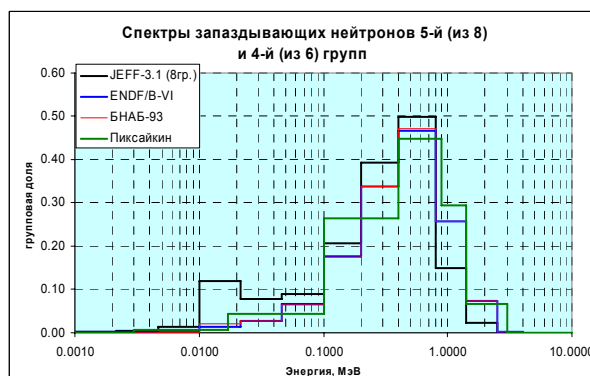


Рис. 43г

В последней и в промежуточной группах спектры Пиксайкина, как видно из рис. 43в и г, близки к общепринятым.

В создавшихся условиях нами решено не рекомендовать к включению в библиотеку РОСФОНД спектры из JEFF-3, а сконструировать спектры 8 групп запаздывающих нейтронов так, чтобы обеспечить приемлемое согласие суммарных спектров. Приемлемого согласия удастся добиться если:

- для первых трех групп принять спектры соответствующих трех групп 6-группового представления;
- спектры 4-й и 5-й групп принять одинаковыми и совпадающими со спектром 4-й группы 6-группового представления;
- спектру 6-й группы приписать спектр 5-й группы 6-группового представления;
- спектры 7-й и 8-й групп принять одинаковыми и совпадающими со спектром 6-й группы 6-группового представления.

На рис. 44 суммарный спектр, полученный в соответствии с описанной комбинацией с долями групп из таблицы 7 сравнивается со спектрами, принятыми в БНАБ-93 и в ENDF/B-VI (и др.) видно, что отличия между сконструированным спектром и суммарным спектром ENDF/B-VI, что и различия между БНАБ-93 и ENDF/B-VI. Представляется, что принятое представление спектров запаздывающих нейтронов приемлемо для того, чтобы приступить к верификации 8-группового набора параметров. В дальнейшем, при появлении обоснованных детальных оцененных данных эти спектры потребуются, конечно, заменить.

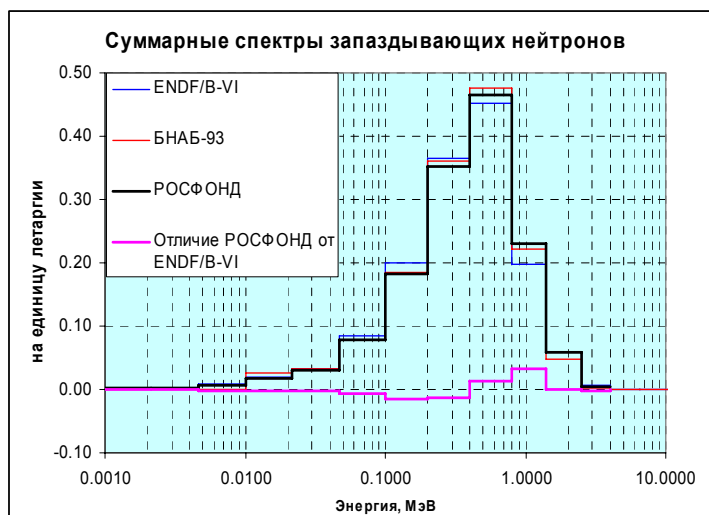


Рис. 44.

4.3. Спектры и угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов.

До 0.5 МэВ – т.е. до порога неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней – спектр нейтронов, неупруго рассеянных с возбуждением каждого из дискретных уровней однозначно определяется угловым распределением. Во всех библиотеках оценка формы угловых распределений нейтронов, неупруго рассеянных на дискретных уровнях урана-235, проведена на основе модельных расчетов. Она довольно сложна: при 20 МэВ в угловое распределение в системе центра инерции дают вклад члены разложения по полиномам Лежандра до 14-го – 20-го порядка (как отмечалось, все четные члены разложения равны нулю)

Угловое распределение на многих уровнях несимметрично относительно 90° . В частности, на рис. 45 показана энергетическая зависимость среднего косинуса угла рассеяния на уровне 46.2 кэВ ($J\pi=9/2^-$), вклад которого в полное сечение неупругого рассеяния достаточно велик (см. рис. 27 – 29). Угловое распределение нейтронов, неупруго рассеянных на континууме уровней в оценке ENDF/B-VI описывается по модели Калбаха-Манна (энерго-угловое распределение задается файлом MF=6). В оценке, принятой в JENDL-3.3, энергетическое и угловое распределения рассеяния на континууме уровней считаются независимыми.

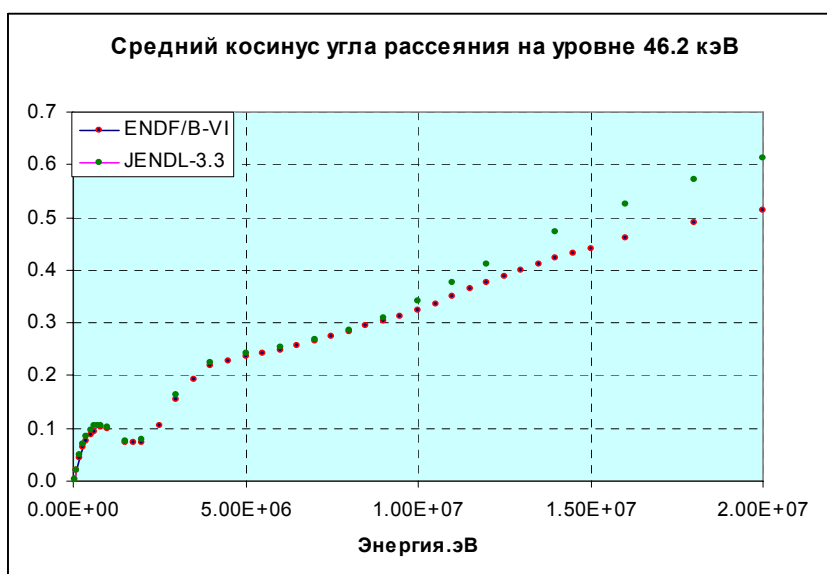


Рис.45.

На рис. 46 сравниваются спектры нейтронов, неупруго рассеянных на уране-235, принятые в оценках ENDF/B-VI и JENDL-3.3.

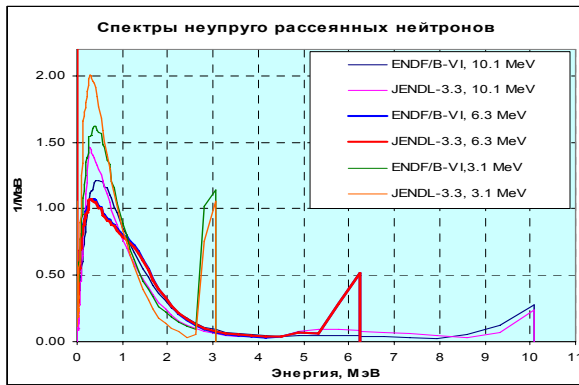


Рис.46а



Рис.46б

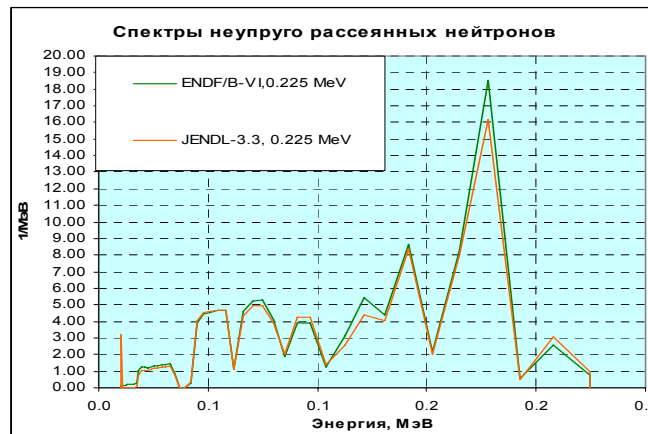


Рис. 46в

Максимальные различия наблюдаются вблизи порога неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней (с. рис.46б). Напомним, что в оценке ENDF/B-VI выше порога возбуждения континуума рассматриваются параллельно и возбуждение целого ряда дискретных уровней. Это объясняет форму спектра нейтронов с начальной энергией 1.45 МэВ, принятую в ENDF/B-VI. Причины аномально высокой вероятности перехода этих нейтронов в область 0.1 – 0.3 МэВ, наблюдаемой в оценке JENDL-3.3, не ясны.

Изложенное выше дает некоторое представление о точности знания энергоугловых распределений неупруго рассеянных нейтронов. Что касается отбора данных для библиотеки РОСФОНД, то после того, как в нее приняты сечения неупругого рассеяния на дискретных уровнях и на континууме в соответствии с ENDF/B-VII, целесообразность во включении в нее и данных по энерго-угловым распределениям из этой оценки сомнений не вызывает.

4.4. Энерго-угловые распределения нейтронов, испускаемых в реакциях (n,2n), (n,3n) и (n,4n)

В библиотеках ENDF/B-VI, JEFF-3 и ENDF/B-VII эти угловые распределения, рассчитанные по модели Хаузера-Фешбаха с учетом вклада предравновесных процессов, описываются по модели Калбаха-Манна и определяются файлами MF=6. Различие в параметрах этих распределений невелико. В РОСФОНДе решено сохранить те же распределения, что и в ФОНД-2.2, т.е. соответствующие ENDF/B-VII.

В JENDL-3.3 для этих реакций, как и для неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней, энергетические распределения приняты не зависящими от угловых.

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

В двух имеющихся независимых оценках образования фотонов в реакциях нейтронов с ураном-235 – ENDF/B-VII (совпадает с ENDF/B-VI) и JENDL-3 – описание этих процессов при энергиях ниже и выше определенной границы принципиально различается. В области не слишком высоких энергий независимо описывается испускание фотонов при радиационном захвате, при делении и при неупругом рассеянии на дискретных уровнях; при более высоких энергиях описывается испускание фотонов во всей совокупности неупругих взаимодействий. Граница между этими областями в ENDF/B-VII (и в ENDF/B-VI, и в JEFF-3) лежит при 1.09 МэВ, в JENDL-3 – при 370 кэВ. Выше этой границы определяется (файлом MF=13) сечение образования фотонов, представляющее собой произведение суммарного сечения неупругих взаимодействий (разности между полным сечением и сечением упругого рассеяния) на среднее число фотонов, испускаемых в этих взаимодействиях²⁹. Энергетический спектр этих фотонов описывается файлом MF=15. Угловые распределения испускаемых фотонов (определяемые файлом MF=14) при всех энергиях считаются изотропными.

5.1. Образование фотонов при неупругом рассеянии

В JENDL-3.3 для всех 19 уровней, лежащих ниже 0.37 МэВ (см. табл. 4) в файлах MF=12 с MT=51, 52, ..., 69 приводятся интенсивности всех гамма-линий, испускаемых при каскадном снятии возбуждения каждого из этих уровней. Эти интенсивности соответствуют вероятностям перехода между уровнями, приведенными в таблице 4.

В ENDF/B-VI совокупность этих спектров приводится в файле MF=12 для MT=4, т.е. интенсивности усреднены с весом сечений возбуждения всех тех уровней, в которых образуется каждая их рассматриваемых линий. При таком представлении линейчатых спектров фотонов восстановить схему распада возбужденных уровней, принятую за основу при составлении этих данных, чрезвычайно сложно.

В РОСФОНДе решено принять тот способ описания линейчатых фотонных спектров, который принят в JENDL-3.3, распространив его на все 26 уровней, лежащих ниже границы возбуждения континуума (0.5 МэВ). При этом использована схема переходов, приведенная в таблице 4. Испускание фотонов при возбуждении этих уровней файлами MF=12 распространено до 1.09 МэВ, т.е. до границы, начиная с которой испускание фотонов описывается с помощью файлов MF=13 и MF=15.

В интервале от 0.5 МэВ до 1.09 МэВ кроме перечисленных выше дискретных уровней возбуждается и континуум (MT=91). При 1 МэВ вклад этого процесса в полное сечение неупругого рассеяния достигает 30%. Для описания испускания фотонов в этом процессе введен файл MF=12 для MT=91, который отличается от файла MF=12 для MT=4 из ENDF/B-VI только областью, в которой множественность отлична от нуля (от границы возбуждения континуума до 1.09 МэВ). Таким образом, испускание фотонов при возбуждении континуума описано в соответствии с рекомендацией ENDF/B-VI.

5.2. Образование фотонов при делении

В обеих рассматриваемых оценках образование фотонов при делении рассматривается отдельно от других неупругих процессов только ниже определенной энергии (равной 0.37 МэВ в JENDL-3.3 и 1.09 МэВ в ENDF/B-VI и -VII). Множественность испускания фотонов задается файлом MF=12 и считается не зависящей

²⁹ Ниже указанной границы сечение образования фотонов в файле MF=13 полагается равным нулю.

от энергии в этом энергетическом интервале – 7.170 квантов на деление в ENDF/B-VII и 7.428 кванта на деление в JENDL-3.3. Энергетический спектр определяется файлом MF=15 для MT=18 и тоже считается от энергии нейтронов не зависящим. В ENDF/B-VI этот спектр задан с линейной интерполяцией между точками; средняя энергия фотонов – 0.9277 МэВ. Полная энергия, уносимая фотонами – 6.652 МэВ. В JENDL-3.3 спектр задан гистограммой, причем условие нормировки не выполняется (интеграл под спектром равен 0.764). Средняя энергия фотонов, вычисленная с перенормировкой спектра, равна 0.8848 МэВ что дает полную энергию, уносимую фотонами 6.572 МэВ, т.е. близкую к оцененной в ENDF/B-VII. В связи с некорректностью описания спектра фотонов деления в JENDL-3.3, в РОСФОНД решено принять оценку спектра фотонов, испускаемых при делении, из ENDF/B-VII несмотря на то, что в отличие от JENDL-3.3, где отмечается, что спектр принят в соответствии с экспериментальными данными³⁰, в заголовочной секции ENDF/B-VI о том, на чем основана принятая там оценка, ничего не говорится.

5.3. Образование фотонов при радиационном захвате.

В обеих рассматриваемых оценках образование фотонов при радиационном захвате при энергиях ниже 1.09 МэВ (в ENDF/B-VI) или 0.37 МэВ (в JENDL-3.3) описывается файлами MF=12 MF=15 для MT=102. В ENDF/B-VI множественность от энергии не зависит, а средняя энергия фотонов возрастает от 1.732 МэВ в тепловой области до 2.036 МэВ при энергии нейтронов 1.09 МэВ. При этом энергия, уносимая фотонами, изменяется от 6.459 МэВ до 7.549 МэВ. Это несколько противоречит энергии реакции, равной 6.545 МэВ, чему и должна равняться суммарная энергия фотонов при захвате тепловых нейтронов (в пренебрежении отдачей ядра при испускании фотона). При энергии нейтронов 1.09 МэВ в том же приближении энергия, уносимая фотонами, должна возрасти до 7.630 МэВ.

В JENDL-3.3 множественность в тепловой области принята равной 5.361, а при 0.37 МэВ – 5.675 что при средней энергии 1.22 МэВ обеспечивает требуемую суммарную энергию фотонов при всех энергиях.

В РОСФОНД решено принять спектры из ENDF/B-VII, а множественность в файле MF=12 для MT=102 подправлена так, чтобы суммарная энергия, уносимая фотонами, согласовалась с законом сохранения энергии. Для этого множественность при переходе от тепловой области к 1.09 МэВ снижается от 3.780 до 3.748.

5.4. Образование фотонов при неупругих взаимодействиях быстрых нейтронов

При энергиях выше 1.09 МэВ (в ENDF/B-VI) или 0.37 МэВ (в JENDL-3.3) для описания образования фотонов в нейтронных реакциях в файле MF=13 (MT=3) задается сечение образования фотонов (сечение неупругих взаимодействий, помноженное на множественность), а в файле MF=15 при MT=3 – спектры этих фотонов.

На рис.47 сравниваются принятые в упомянутых оценках сечения образования фотонов (в барнах) и их множественность (среднее число фотонов на акт неупругого взаимодействия). Расхождения, как видим, весьма велики, особенно при высоких энергиях. Следует рассмотреть, не компенсируется ли различие в множественности различием в спектрах фотонов.

И в ENDF/B-VI и в JENDL-3.3 файлом MF=15 определены фотонные спектры во всем энергетическом диапазоне от 10^{-5} эВ до 20 МэВ (т.е. включая область ниже граничной энергии, где сечение образования фотонов задано равным нулю). В обеих оценках спектры заданы в гистограммном представлении. К сожалению, в ENDF/B-VI (и в ENDF/B-VII, и в JEFF-3) эти спектры не нормированы (см. рис. 48).

³⁰ Verbinski V.V. et al.: Phys. Rev., C7, 1173 (1973)

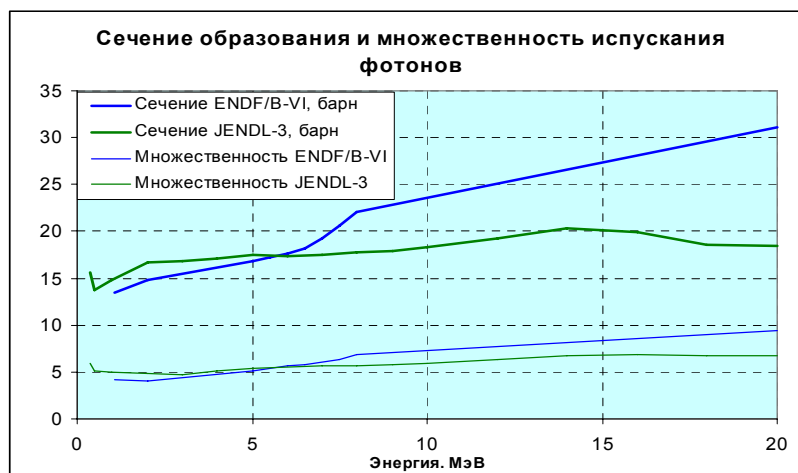


Рис. 47

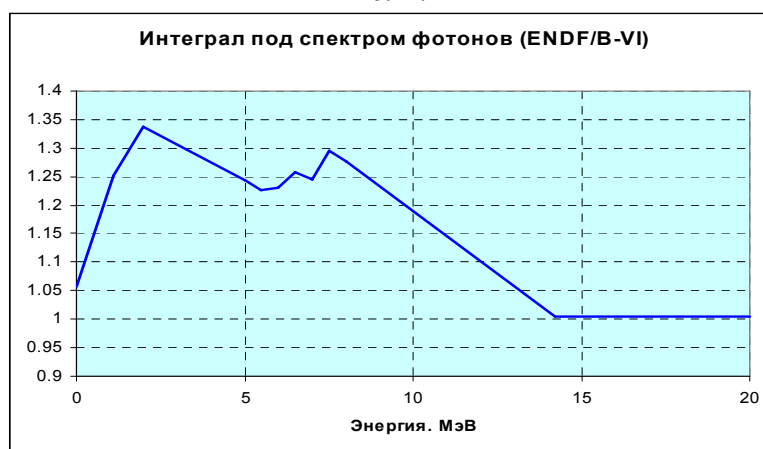


Рис. 48

На рис. 49 приведены энергетические зависимости средней энергии испускаемого фотона, рассчитанные на основе данных рассматриваемых оценок (в случае ENDF/B-VI и -VII, спектры фотонов при этом перенормировались на единицу), а на рис. 50 - суммарная энергия фотонов, испускаемых в акте неупругого взаимодействия.

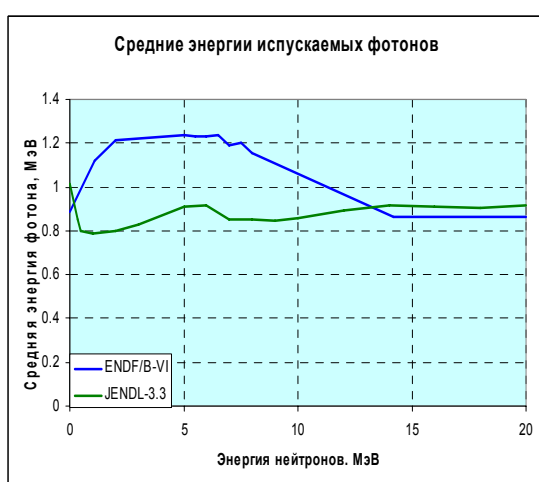


Рис. 49

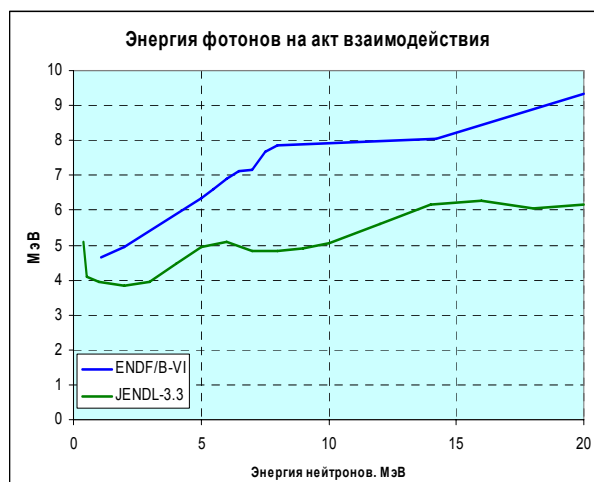


Рис. 50

Как видно, никакой компенсации расхождений не наблюдается.

В РОСФОНД решено принять оценку из ENDF/B-VII несмотря на то, что причины отмеченных больших различий выяснить не удалось.

Заметим, что имеющиеся скудные экспериментальные данные о сечении образования фотонов не надежны из-за трудности регистрации низкоэнергетических

фотонов, доля которых в спектре велика. Выше 5 МэВ эти данные лежат между кривыми, принятыми в сравниваемых оценках, касаясь их погрешностями. Ниже 5 МэВ расхождения ни одна из оценок не противоречит экспериментальным данным.

6. Образование радиоактивных продуктов.

Главнейшим процессом образования радиоактивных продуктов является деление. В библиотеках широкого пользования имеются три оценки независимых выходов продуктов деления – оценка Каваи 1992 г., оценка Т.Ингланда и Б.Райдера, выполненная в 1989г., используемая во всех последних версиях ENDF/B³¹, оценка Тасака 1990 г., используемая в JENDL-3³² и оценка Милса и др.³³, используемая с рядом уточнений, сделанных в 2005 г., в JEFF-3.1. **Решено включить в РОСФОНД данные о независимых и кумулятивных выходах продуктов деления из JEFF-3.1 (MF=1, MT=454 и MT=459).**

Радионуклиды образуются во всех нейтронных реакциях на уране-235: ²³⁶U (T_{1/2}=23.42 млн. лет) при радиационном захвате; ²³⁴U (T_{1/2}=0.246 млн. лет) в реакции (n,2n), ²³³U (T_{1/2}=0.159 млн. лет) в реакции (n,3n); ²³²U (T_{1/2}=68.9 лет) в реакции (n,4n).

В реакциях с вылетом заряженных частиц образуются: в реакции (n,p) - бета-активный ²³⁵Pa (T_{1/2}=24.5 мин); в реакции (n,α) - ²³²Th (T_{1/2}=1.405*10¹⁰ лет).

Торий и все изотопы урана, образующиеся в нейтронных реакциях на уране-235 распадаются только путем альфа-распада.

7. Погрешности нейтронных данных

Имеется целый ряд оценок погрешностей нейтронных данных для урана-235:

1. БНАБ-78³⁴: погрешности сечения деления, величин α и ν в 12-групповом представлении (11 групп выше 1 кэВ). Экспертная оценка.
2. ENDF/B-V: погрешности сечений деления, захвата и величины ν в формате файлов MF=31 и MF=33. Автор этой экспертной оценки R.W.Peele (ORNL). В ENDF/B-VI эти файлы включены не были. В ENDF/B-VII содержатся файлы погрешностей только для ν_{tot} и ν_{prompt} (автор не указан).
3. JENDL-3.3: в формате файлов MF=31, MF=33, MF=34 и MF=35 определены погрешности сечений всех реакций в области выше границы неразрешенных резонансов (включая сечения возбуждения отдельных уровней при неупругом рассеянии), погрешности угловых распределений упругого рассеяния и спектров нейтронов деления. Полнота информации свидетельствует о том, что оценка основана на модельном описании нейтронных данных.
4. JEFF-3.1 Содержатся только файлы погрешностей для ν_{tot} и ν_{prompt} (те же, что и в ENDF/B-VII).
5. Библиотека LUND погрешностей нейтронных данных системы INDEX³⁵: содержит 28-групповые ковариационные матрицы погрешностей для сечений деления, захвата, упругого и неупругого рассеяния и ν_{tot} включая кросс-корреляции между погрешностями сечений разных реакций. Экспертная оценка.

³¹ T.R. England, B.F. Rider, Evaluation and compilation of fission product yields, 1992, ENDF-349

³² Tasara K.: JAERI 1320 (1990).

³³ R.W.Mills (1995) "Fission Product Yield Evaluation", Thesis, The University of Birmingham, UK.

³⁴ Л.П.Абагян и др. Групповые константы для расчета реакторов. М. Энергоиздат, 1981.

³⁵ Мантуров Г.Н. Система программ и архивов ИНДЭКС. Вопр. Атомн. Науки и Техн. Серия «Ядерные Константы». Т. 59, 1984

6. Ковариационная матрица погрешностей сечений деления, захвата и v_{tot} в 30-групповом представлении, приписанная нейтронным данным для урана-235 из системы констант БНАБ-93 (на основе ENDF/B-VI (Rev.2)).
7. Оценка погрешностей, выполненная Дж.Пальмиотти и М. Сальваторесом³⁶, отличающаяся тем, погрешности всех реакций всех нуклидов в каждом из 5 энергетических диапазонов с границами при 1.35 МэВ, 180 кэВ, 9.1 кэВ и 4 эВ считаются полностью скоррелированными, а между диапазонами – полностью независимыми. Погрешности представлены в 17 группах, из которых 15 относятся к области ниже 20 МэВ.
8. Оценка погрешностей, выполненная (предварительно) международной рабочей группой по нейтронным стандартам³⁷

Уже тот факт, что в современных библиотеках отсутствуют полные данные о погрешностях нейтронных данных и их ковариациях говорит о том, что обоснованный выбор оценок погрешностей сделать весьма сложно. Для качественного сравнения упомянутых выше оценок на основе большинства из них были получены 30-групповые ковариационные матрицы и затем на их основе были рассчитаны погрешности сечений, усредненных по спектру нейтронов деления и погрешности резонансных интегралов. Были получены также оценки тепловых сечений. Ниже оценки этих погрешностей сравниваются друг с другом. Погрешности v оценивались для отношения среднего произведения $v\sigma_f$ к среднему значению σ_f без учета влияния погрешностей сечения деления на погрешность этого отношения.

Таблица 8. Оценки погрешностей средних сечений.

| Реакция | | БНАБ-78 | БНАБ-93 | LUND | ENDF/B-V | JENDL-3.3 | Palmiotti & Salvatores |
|---------|--|---------|---------|--------|----------|-----------|------------------------|
| MT=18 | $\langle\sigma\rangle$ | 1.96% | 1.35% | 1.92% | 1.95% | 0.29% | 4.47% |
| | RI | | 2.11% | 2.50% | 2.07% | 0.75% | 2.81% |
| | тепл. | | 0.76% | 0.20% | 0.30% | 0.13% | 0.99% |
| MT=102 | $\langle\sigma\rangle$ | 7.95% | 8.86% | 10.40% | 20.87% | 7.95% | 10.84% |
| | RI | | 9.68% | 5.95% | 9.83% | 1.31% | 4.52% |
| | тепл. | | 0.96% | 1.08% | 0.90% | 0.22% | 0.99% |
| MT=456 | $\langle v\sigma_f \rangle / \langle \sigma_f \rangle$ | 0.48% | 0.51% | 0.48% | 0.54% | 0.29% | 0.90% |
| | vRI_f / RI_f | | 0.45% | 0.40% | 0.66% | 0.75% | 0.48% |
| | тепл. | | 0.40% | 0.30% | 0.70% | 0.13% | 0.31% |
| MT=4 | $\langle\sigma\rangle$ | | | 10.05% | | 9.31% | 11.14% |
| | RI | | | 17.55% | | 55.96% | 13.63% |

Как видно, оценки погрешностей различаются в несколько раз. Столь большие различия обусловлены, главным образом, различием методик оценки. Так, низкие погрешности, принятые в JENDL-3.3, несомненно, обусловлены формальным подходом к оценке, основанном на оценке погрешностей параметрического модельного описания сечений. Различия в результатах оценок, выполненных экспертами на основе сравнения результатов, полученных разными авторами, согласуются между собой гораздо лучше. Из рассмотрения данных таблицы 7 можно заключить, что ковариационную матрицу погрешностей сечений, принятую в БНАБ-93, можно считать оптимальной, если понизить погрешность теплового сечения деления до 0.3%. Откорректированная таким образом

³⁶ G. Palmiotti, M. Salvatores. Proposal for Nuclear data Covariance Matrix, JEFDOC 1063 Rev.1, Jan.2005.

³⁷ Частное сообщение В.Проняева.

матрица, дополненная погрешностями сечений упругого и неупругого рассеяния из библиотеки LUND, приводится ниже.

В файле ENDF/B-VII содержатся оценки погрешностей величины числа вторичных нейтронов деления. Эти данные не анализировались, во первых, поскольку оценок погрешностей других нейтронных данных в этой библиотеке не содержится, а во вторых потому, что включение файлов погрешностей в РОСФОНД имеет смысл только в случае, если эти данные будут представлены для всех основных реакторных материалов и будут достаточно надежны. В настоящее время разброс мнений различных оценщиков о погрешностях нейтронных данных еще слишком велик и рекомендовать числовые данные о погрешностях пользователям представляется преждевременным. Для уточнения этих данных потребуется дополнительная работа, для выполнения которой достаточно располагать данными о погрешностях в групповой форме. [Файлы погрешностей в РОСФОНД не включаются.](#)

8. Валидация нейтронных данных по интегральным экспериментам.

8.1. Валидация по критическим экспериментам.

В работе³⁸ был осуществлен отбор достаточно детально описанных критических экспериментов с растворами высокообогащенного урана с концентрацией от 10 до 700 грамм на литр и выполнена оценка погрешностей их результатов и корреляций между ними. Позже этот набор был дополнен³⁹ критическими экспериментами с металлическими активными зонами из высокообогащенного урана с водяным или полиэтиленовым отражателем или без отражателя. Описания всех экспериментов были взяты из Международного Справочника по ядерной безопасности⁴⁰. В таблице 9 приводится перечень всех этих экспериментов с указанием страны и лаборатории, в которой выполнялся каждый из них. Идентификация экспериментов соответствует упомянутому Справочнику. Из всех растворных экспериментов, описания которых содержатся в справочнике, для валидации нейтронных данных урана-235 были отобраны лишь эксперименты с односвязными гомогенными активными зонами с водяным или полиэтиленовым отражателем или без отражателя. Анализ данных показал²⁵, что подавляющее большинство экспериментов, выполнявшихся с растворами, отравленным бором или гадолинием, содержат неидентифицированные погрешности, значительно (в четыре-шесть раз) превышающие погрешности экспериментов без поглотителей. Поэтому эксперименты с отравленными растворами не были рекомендованы для валидации.

Погрешности экспериментальных значений коэффициентов размножения были оценены, прежде всего из анализа вкладов тех составляющих погрешностей, которые содержались в описаниях экспериментов, а затем корректировались для устранения противоречий, порой имевшихся в оценках в оценках этих составляющих, и для учета составляющих погрешностей, не упомянутых в описаниях отдельных экспериментов.

К экспериментальной погрешности k_{eff} добавлялась погрешность, обусловленная неточностью знания нейтронных данных водорода, кислорода, фтора, азота и конструкционных материалов баков, из которых изготавливались критические сборки. Суммарная погрешность оценивалась как корень квадратный из суммы квадратов независимых составляющих погрешностей. Полные погрешности приведены в таблице 9 в скобках вслед за экспериментальными составляющими этих погрешностей. В следующем столбце приводятся расчетно-экспериментальные расхождения, также в процентах.

³⁸ Ivanova T.T. at al. Nucl. Sci. and Eng. **145**, 97 (2003).

³⁹ Иванова Т.Т. Оценка погрешностей расчетного предсказания критических систем с высокообогащенным ураном. Канд. диссертация, Обнинск, ФЭИ, 2004г.

⁴⁰ International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. NEA Nucl. Sci. Committee, Sept. 2004 Ed.

Расчеты k -eff выполнялись методом Монте-Карло по программе MMKKENO⁴¹ в 299-групповом приближении БНАБ по константам, полученным из файла данных РОСФОНД. Статистическая погрешность результатов расчета не превышала 0.1%. Подготовка 299-групповых констант БНАБ к расчету проводилась с помощью комплекса CONSYST⁴². Расчеты проводились также и по программе MCNP с детальным слежением за энергией нейтронов при розыгрыше нейтронных траекторий. При расчетах растворных систем статистически значимых расхождений между результатами этих расчетов обнаружено не было. Однако коэффициенты размножения металлических систем с жестким спектром при расчетах в 299-групповом приближении оказались завышенными на 0.2% за счет того, что в комплексе CONSYST не учитывалась зависимость спектра нейтронов деления от энергии нейтронов, вызывающих эти деления (см. раздел 4.2). Результаты, полученные по программе MCNP для металлических систем приводятся в таблице 9 в скобках. Заметим, что эти результаты с точностью до статистических погрешностей (менее 0.1%) совпадают с расчетами по программе MMKKENO с 299-групповыми константами, по файлу данных ENDF/B-VI(Rev.5), в котором не производилась корректировка сечения деления в области высоких энергий (см. раздел 3.2).

Таблица 9. Валидация нейтронных данных урана-235 по критическим экспериментам.

| Растворные размножающие системы | | | | | |
|---|---|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------|
| № | Идентификатор Международного Справочника | Конц. топлива (гУ/л) | Погр. k -eff, % | Расчетно-эксп. расхождение | Год |
| Рокки Флэкс, США. Цилиндры без отражателя | | | | | |
| 1 | HEU-SOL-THERM-001-001 | 145.68 | 0.43 (0.61) | 0.998 | 1976- 1977 |
| 2 | HEU-SOL-THERM-001-002 | 346.73 | 0.59 (0.74) | 0.993 | |
| 3 | HEU-SOL-THERM-001-003 | 142.92 | 0.41 (0.59) | 1.003 | |
| 4 | HEU-SOL-THERM-001-004 | 357.71 | 0.59 (0.74) | 0.997 | |
| 5 | HEU-SOL-THERM-001-005 | 54.89 | 0.42 (0.56) | 0.999 | |
| 6 | HEU-SOL-THERM-001-006 | 59.65 | 0.42 (0.57) | 1.001 | |
| 7 | HEU-SOL-THERM-001-007 | 137.4 | 0.41 (0.60) | 0.998 | |
| 8 | HEU-SOL-THERM-001-008 | 145.68 | 0.43 (0.61) | 0.997 | |
| 9 | HEU-SOL-THERM-001-009 | 357.71 | 0.59 (0.74) | 0.995 | |
| 10 | HEU-SOL-THERM-001-010 | 63.95 | 0.43 (0.57) | 0.993 | |
| Ок- Ридж, США. Сферы с отражателями и без них | | | | | |
| 11 | HEU-SOL-THERM-009-001 | 696.42 | 0.43 (0.58) | 1.000 | 1954 |
| 12 | HEU-SOL-THERM-009-002 | 543.05 | 0.38 (0.55) | 1.000 | |
| 13 | HEU-SOL-THERM-009-003 | 348.84 | 0.32 (0.52) | 1.002 | |
| 14 | HEU-SOL-THERM-009-004 | 213.19 | 0.28 (0.50) | 0.996 | |
| 15 | HEU-SOL-THERM-010-001 | 102.06 | 0.23 (0.46) | 0.999 | 1950-1960 |
| 16 | HEU-SOL-THERM-010-002 | 103.8 | 0.23 (0.45) | 1.000 | |
| 17 | HEU-SOL-THERM-010-003 | 109.42 | 0.23 (0.46) | 0.999 | |
| 18 | HEU-SOL-THERM-010-004 | 111.52 | 0.23 (0.46) | 0.996 | |
| 19 | HEU-SOL-THERM-011-001 | 53.017 | 0.24 (0.43) | 1.006 | 1954- 1957 |
| 20 | HEU-SOL-THERM-011-002 | 52.109 | 0.24 (0.43) | 1.002 | |
| 21 | HEU-SOL-THERM-012-001 | 22.0 | 0.26 (0.40) | 1.001 | 1958 |
| 22 | HEU-SOL-THERM-013-001 | 20.12 | 0.30 (0.42) | 0.997 | 1958 |
| 23 | HEU-SOL-THERM-032-001 | 109.6 | 0.30 (0.42) | 0.999 | 1950-60 |
| Ок-Ридж, США. Цилиндры без отражателя | | | | | |
| 24 | HEU-SOL-THERM-043-001 | 134.41 | 0.24 (0.49) | 0.996 | 1957-1963 |
| 25 | HEU-SOL-THERM-043-002 | 25.132 | 0.28 (0.42) | 1.006 | |
| 26 | HEU-SOL-THERM-043-003 | 19.992 | 0.29 (0.41) | 1.000 | |
| 27 | HEU-SOL-THERM-042-001 | 17.31 | 0.41(0.50) | 0.996 | |
| 28 | HEU-SOL-THERM-042-002 | 17.02 | 0.38(0.48) | 0.996 | |

⁴¹ Ссылка на MMKKENO

⁴² Ссылка на CONSYST

| Растворные размножающие системы | | | | | |
|--|---|----------------------------|----------------------|------------------------------|------------|
| № | Идентификатор Международного Справочника | Конц. топлива (гУ/л) | Погр. k-eff, % | Расчетно-эсп. расхождение | Год |
| 29 | HEU-SOL-THERM-042-003 | 15.27 | 0.32 (0.44) | 1.000 | 1950- 1960 |
| 30 | HEU-SOL-THERM-042-004 | 14.60 | 0.36 (0.47) | 1.001 | |
| 31 | HEU-SOL-THERM-042-005 | 14.06 | 0.36 (0.47) | 0.999 | |
| 32 | HEU-SOL-THERM-042-006 | 14.30 | 0.40 (0.50) | 1.000 | |
| 33 | HEU-SOL-THERM-042-007 | 13.96 | 0.38 (0.49) | 1.000 | |
| 34 | HEU-SOL-THERM-042-008 | 13.61 | 0.37 (0.48) | 1.001 | |
| ФЭИ, Россия. Цилиндры с отражателем | | | | | |
| 35 | HEU-SOL-THERM-027-001 | 136 | 0.41 (0.59) | 0.996 | 1961-1963 |
| 36 | HEU-SOL-THERM-028-001 | 76 | 0.23 (0.44) | 0.994 | |
| 37 | HEU-SOL-THERM-028-003 | 76 | 0.26 (0.46) | 0.995 | |
| 38 | HEU-SOL-THERM-028-005 | 76 | 0.32 (0.50) | 0.992 | |
| 39 | HEU-SOL-THERM-028-007 | 76 | 0.38 (0.53) | 0.995 | |
| 40 | HEU-SOL-THERM-028-009 | 76 | 0.36 (0.55) | 0.992 | |
| 41 | HEU-SOL-THERM-028-011 | 286 | 0.39 (0.57) | 0.994 | |
| 42 | HEU-SOL-THERM-028-013 | 286 | 0.47 (0.63) | 0.994 | |
| 43 | HEU-SOL-THERM-028-015 | 286 | 0.52 (0.66) | 1.000 | |
| 44 | HEU-SOL-THERM-028-017 | 286 | 0.55 (0.68) | 0.992 | |
| 45 | HEU-SOL-THERM-029-001 | 286 | 0.55 (0.68) | 0.997 | |
| 46 | HEU-SOL-THERM-030-001 | 76 | 0.39 (0.54) | 0.996 | |
| 47 | HEU-SOL-THERM-030-004 | 289 | 0.54 (0.67) | 0.996 | |
| 48 | HEU-SOL-THERM-035-001 | 37.51 | 0.31(0.43) | 0.999 | |
| 49 | HEU-SOL-THERM-035-005 | 74.87 | 0.32 (0.47) | 0.998 | |
| 50 | HEU-SOL-THERM-035-007 | 152.3 | 0.33 (0.49) | 1.000 | |
| 51 | HEU-SOL-THERM-025-001 | 51.2 | 0.27 (0.44) | 0.999 | 1987 |
| 52 | HEU-SOL-THERM-025-002 | 51.2 | 0.27 (0.44) | 0.999 | |
| 53 | HEU-SOL-THERM-025-004 | 53.3 | 0.29 (0.46) | 0.999 | |
| 54 | HEU-SOL-THERM-025-005 | 77.2 | 0.32 (0.49) | 1.000 | |
| 55 | HEU-SOL-THERM-019-001 | 447.3 | 0.41 (0.59) | 0.996 | 1987 |
| Металлические сферы с водородсодержащими отражателями и без отражателя. | | | | | |
| № | Идентификатор Международного Справочника | Отража- тель | Погр. k-eff, % | Расчетно-эсп. расхождение | Год |
| Лос-Аламос, США | | | | | |
| 56 | HEU-MET-FAST-001-001 | Без отр. | 0.14 (0.15) | | 1950 |
| 57 | HEU-MET-FAST-004-001 | Вод.отр. | 0.51 (0.54) | | 1976 |
| ВНИИЭФ, Россия. | | | | | |
| 60 | HEU-MET-FAST-018-001 | Без отр. | 0.17 (0.19) | | 1962 |
| 61 | HEU-MET-FAST-020-001 | Полиэт.отр. | 0.30 (0.31) | | |
| 62 | HEU-MET-FAST-031-001 | Полиэт.отр. и вставка | 0.60 (0.61) | | |
| ВНИИТФ, Россия. | | | | | |
| 58 | HEU-MET-FAST-008-001 | Без отр. | 0.19 (0.20) | | 1982-95 |
| 59 | HEU-MET-FAST-011-001 | Полиэт.отр. | 0.18 (0.21) | | 1986-95 |

Валидацию можно считать успешной, если расчетно-экспериментальные расхождения в среднем совпадают с оцененными полными экспериментальными погрешностями. На рис. 51 показана зависимость расчетно-экспериментальных расхождений от концентрации урана в растворе.

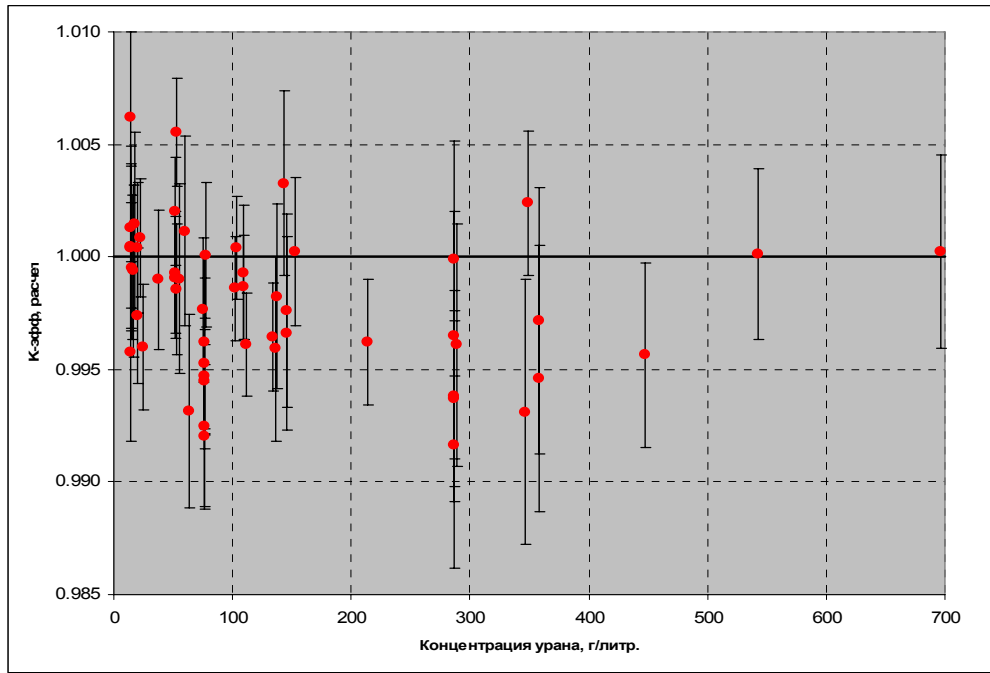


Рис.51. Расчетно-экспериментальныи расхождения в зависимости от концентрации высокообогащенного урана

Качественное согласие между расчетными и экспериментальными данными очевидно. Количественным критерием может служить величина

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^{59} \sum_{m=1}^{59} \Delta k_n W_{n,m}^{-1} \Delta k_m, \text{ где } \Delta k_m - \text{ приведенное в таблице 9 расчетно-}$$

экспериментальное расхождение, а $W_{n,m}^{-1}$ - элементы матрицы, обратной ковариационной

матрице погрешностей $W_{n,m} = \delta k_n \rho_{n,m} \delta k_m$. В последнем выражении δk_n - полные

погрешности экспериментальных данных, приведенные в таблице 9 в скобках, а $\rho_{n,m}$ -

коэффициенты корреляции между ними. Расчеты привели к значению критерия согласия

$\chi^2 = 1.05$ при ожидаемом значении 1 ± 0.08 , что свидетельствует о прекрасном

подтверждении принятых нейтронных данных результатами критических экспериментов.

В то же время необходимо отметить, что в использовавшемся для верификации наборе

критических экспериментов отсутствуют системы с концентрацией урана порядка

нескольких килограммов на литр, с которыми приходится иметь дело при переработке

ядерного топлива (влажные порошки оксидов урана). Эти системы обладают повышенной

чувствительностью к нейтронным сечениям урана в жесткой резонансной области, где,

как отмечено в разделе 2.1.7, надежность принятых нейтронных данных (особенно

сечения захвата) невысока. На рис. 52 и 53 приводятся зависимости чувствительностей

коэффициента размножения к сечениям деления и захвата урана-235 от концентрации

высокообогащенного урана в водном растворе уранил-нитрата. Чувствительности

приведены для четырех энергетических групп: 1-я группа – нейтроны, способные делить

урпан-238 – с энергией выше 1.4 МэВ; 2-я группа – нейтроны с энергиями, при которых

существенно неупругое рассеяние (0.1 - 1.4 МэВ); 3-я группа – область неразрешенных

резонансов (1 – 100 кэВ); 4-я группа – область разрешенных резонансов (0.46 эВ – 1 кэВ);

5-я группа – тепловая (ниже 0.46 эВ). Данные взяты из работы²⁶. Точками показаны

коэффициенты чувствительности для рассмотренных экспериментальных критических

конфигураций; кривыми – для сферических критических систем с толстым водяным

отражателем. Коэффициенты чувствительности представляют собой отношения

$$C_g = \frac{\delta k(\delta\sigma)/k}{\delta\sigma/\sigma},$$

где $\delta k(\delta\sigma)$ - изменение коэффициента размножения k при увеличении сечения σ на $\delta\sigma$.

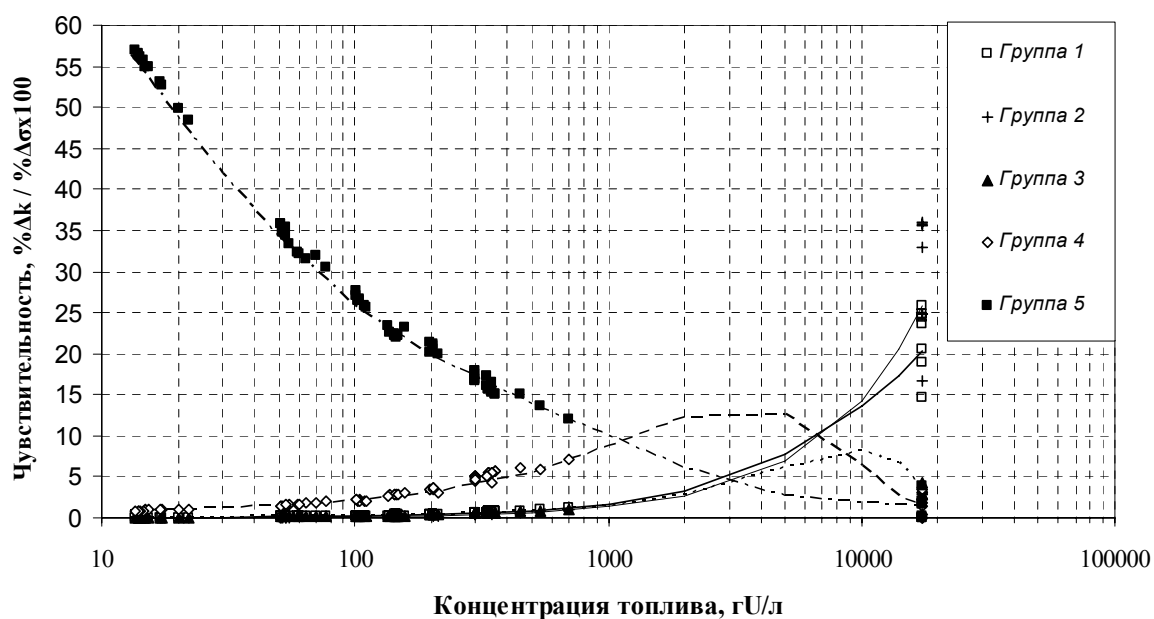


Рис.52. Зависимости коэффициентов чувствительности к сечению деления урана-235 от его концентрации в растворе.

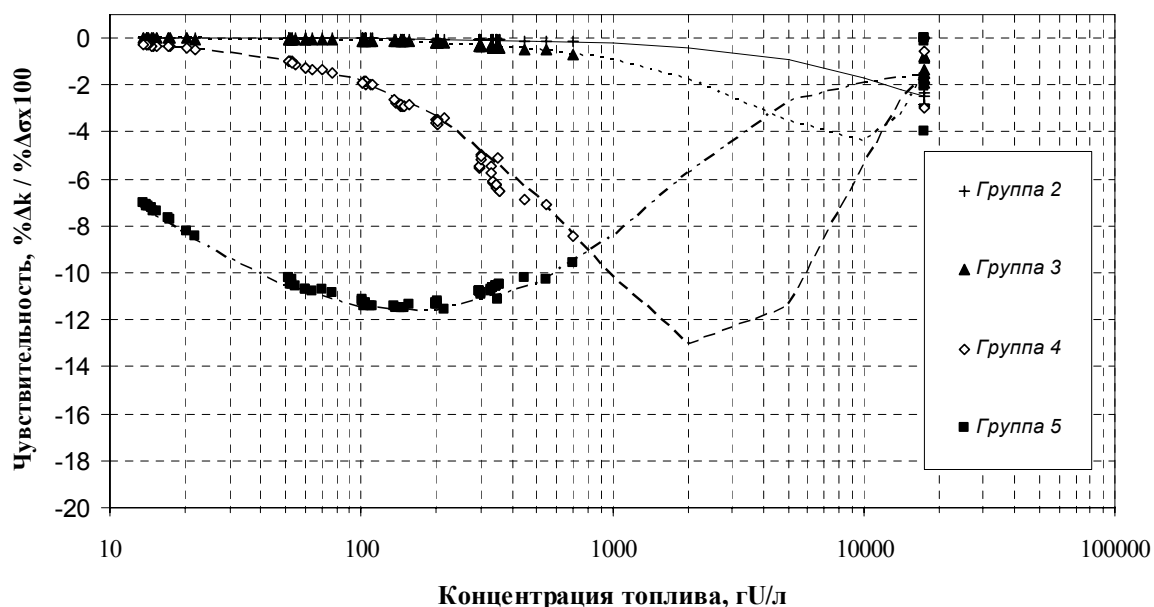


Рис.52. Зависимости коэффициентов чувствительности к сечению захвата урана-235 от его концентрации в растворе.

Существенное увеличение коэффициента чувствительности к сечениям захвата в резонансной области при рассмотрении систем с концентрациями порядка килограмм урана-235 на литр – очевидно. При анализе ядерной безопасности подобных систем следует предусматривать большие запасы на возможные расчетные погрешности в оценке коэффициента размножения.

8.2. Валидация величины “альфа” по экспериментам на реакторе БН-350.

Из материалов раздела 3.3 видно, что и оцененные и экспериментальные данные о сечении захвата быстрых нейтронов и его отношения к сечению деления (величине “альфа”) из различных источников существенно различаются. Целесообразно провести валидацию принятых сечений захвата и деления по результатам уникальных экспериментов по измерению величины “альфа” в различных частях активной зоны быстрого энергетического реактора БН-350. Было выполнено два измерения – в центральной части активной зоны – зоне малого обогащения (ЗМО) и в периферийной части активной зоны – зоне большого обогащения (ЗБО). Изменение изотопного состава урана в облучавшихся образцах (в частности, накопление ^{236}U) определялось как с помощью масс-спектрометра, так и с помощью альфа-спектрометра. Глубина выгорания определялась также двумя методиками – по накопившемуся ^{137}Cs и по изменению веса урана после очистки от продуктов деления. В качестве образцов использовался как материал штатных твелов. В ЗМО использовались также образцы высокообогащенного (95%) урана, облучавшихся в капиллярах, вставленных в межтвельные зазоры. Приводимые ниже результаты получены усреднением многих измерений⁴³. Расчеты выполнялись для бенчмарк-модели эксперимента, описанной в цитированной работе.

Получены следующие результаты:

ЗМО: эксперимент - 0.284 ± 0.008 ;
расчет – $0.281 (-1.0 \pm 2.8\%)$.

ЗБО: эксперимент - 0.241 ± 0.010 ;
расчет – $0.259 (+7.5 \pm 3.5\%)$.

Как видно, прекрасное согласие расчета с экспериментом в ЗМО несколько контрастирует с заметным расхождением в ЗБО. Однако и это расхождение превышает экспериментальную погрешность лишь вдвое. Среднее по двум экспериментам отношение расчетного значения “альфа” к измеренному оказывается равным 1.02 ± 0.2 . Таким образом, результаты интегрального эксперимента на БН-350 подтверждают принятые оцененные нейтронные данные для урана-235.

Заключение

9.1. Вывод. В РОСФОНД предлагается принять сформированную в процессе настоящего обзора модификацию файла данных из ENDF/B-VII В файл включаются также данные о выходах продуктов деления – из JEFF-3.1.

9.2 Авторы обоснования выбора оцененных нейтронных данных

Николаев М.Н., Павлова О.Н.

⁴³ Гончаров Р. К. и др. Оцененные результаты измерений отношений средних нейтронных сечений топливных ну кклидов в реакторе БН-350. Атомная Энергия, т.70. вып.2, с. 123, 1991.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 8. 30-групповая ковариационная матрица погрешностей сечения деления

| | Un.,% | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27-30 |
|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 1 | 0.8 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 1.0 | 72 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 1.0 | 82 | 82 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 1.3 | 84 | 80 | 94 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 2.0 | 83 | 80 | 90 | 96 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 1.8 | 81 | 77 | 89 | 91 | 92 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 1.8 | 79 | 76 | 87 | 89 | 89 | 88 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 1.5 | 74 | 71 | 82 | 84 | 85 | 82 | 82 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 3.0 | | | | | | | | | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 3.0 | | | | | | | | | 91 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 3.7 | | | | | | | | | 69 | 92 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 5.0 | | | | | | | | | 80 | 93 | 92 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 5.3 | | | | | | | | | 75 | 88 | 88 | 98 | 100 | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 5.8 | | | | | | | | | 68 | 82 | 82 | 93 | 98 | 100 | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 3.2 | | | | | | | | | 46 | 68 | 76 | 56 | 52 | 47 | 100 | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 3.1 | | | | | | | | | 47 | 68 | 77 | 56 | 54 | 49 | 92 | 100 | | | | | | | | | | | |
| 17 | 3.1 | | | | | | | | | 47 | 68 | 76 | 56 | 52 | 49 | 89 | 92 | 100 | | | | | | | | | | |
| 18 | 3.1 | | | | | | | | | 47 | 68 | 77 | 56 | 54 | 49 | 91 | 92 | 93 | 100 | | | | | | | | | |
| 19 | 2.8 | | | | | | | | | 43 | 62 | 69 | 51 | 49 | 43 | 81 | 82 | 82 | 85 | 100 | | | | | | | | |
| 20 | 2.6 | | | | | | | | | 38 | 55 | 62 | 46 | 43 | 40 | 73 | 74 | 74 | 75 | 83 | 100 | | | | | | | |
| 21 | 2.6 | | | | | | | | | 37 | 54 | 61 | 44 | 41 | 37 | 70 | 72 | 72 | 73 | 81 | 86 | 100 | | | | | | |
| 22 | 2.2 | | | | | | | | | 30 | 41 | 47 | 34 | 33 | 30 | 56 | 56 | 56 | 56 | 63 | 68 | 68 | 100 | | | | | |
| 23 | 2.2 | | | | | | | | | 30 | 43 | 49 | 36 | 34 | 31 | 56 | 57 | 57 | 57 | 64 | 68 | 68 | 82 | 100 | | | | |
| 24 | 1.2 | | | | | | | | | 23 | 33 | 37 | 27 | 25 | 23 | 43 | 43 | 43 | 43 | 49 | 52 | 52 | 62 | 62 | 100 | | | |
| 25 | 1.2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 21 | 100 | | |
| 26 | 0.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 21 | 75 | 100 | |
| 27-30 | 0.3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 21 | 50 | 70 | 100 |

Таблица 9. 30-групповая ковариационная матрица погрешностей сечения захвата

| | Un.,% | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27-30 | | |
|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-------|-----|-----|
| 1 | 50 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 50 | | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 50 | | | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 20 | | | | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 12 | | | | | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 12 | | | | | 100 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 9.7 | | | | | 79 | 79 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 9.3 | | | | | 73 | 73 | 79 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 8.9 | | | | | 66 | 66 | 73 | 77 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 8.5 | | | | | 55 | 55 | 65 | 70 | 81 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 8.3 | | | | | 49 | 49 | 53 | 62 | 74 | 81 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 7.8 | | | | | 26 | 26 | 26 | 26 | 34 | 54 | 73 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 7.4 | | | | | | | | | 8 | 35 | 55 | 74 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 7.4 | | | | | | | | | 8 | 17 | 45 | 71 | 74 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 8.0 | | | | | | | | | | | | | | | 100 | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 7.8 | | | | | | | | | | | | | | | 81 | 100 | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 9.6 | | | | | | | | | | | | | | | 64 | 68 | 100 | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 10.3 | | | | | | | | | | | | | | | 37 | 38 | 43 | 100 | | | | | | | | | | | |
| 19 | 12.8 | | | | | | | | | | | | | | | 23 | 25 | 20 | 86 | 100 | | | | | | | | | | |
| 20 | 12.8 | | | | | | | | | | | | | | | 23 | 25 | 20 | 83 | 88 | 100 | | | | | | | | | |
| 21 | 12.7 | | | | | | | | | | | | | | | 23 | 25 | 20 | 83 | 87 | 87 | 100 | | | | | | | | |
| 22 | 13.0 | | | | | | | | | | | | | | | 23 | 23 | 20 | 82 | 86 | 86 | 88 | 100 | | | | | | | |
| 23 | 12.6 | | | | | | | | | | | | | | | 23 | 25 | 20 | 85 | 88 | 88 | 89 | 93 | 100 | | | | | | |
| 24 | 6.9 | | | | | | | | | | | | | | | 23 | 25 | 20 | 82 | 86 | 86 | 86 | 85 | 87 | 100 | | | | | |
| 25 | 1.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 11 | 100 | | | |
| 26 | 1.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 11 | 11 | 100 | |
| 27-30 | 1.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 11 | 11 | 11 | 100 |

Таблица 10. 30-групповая ковариационная матрица погрешностей v

| | Un.,% | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27-30 | |
|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-------|-----|
| 1 | 1.6 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 0.8 | 97 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 0.6 | 90 | 98 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 0.5 | 77 | 90 | 97 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 0.4 | 58 | 76 | 87 | 97 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 0.4 | 41 | 62 | 77 | 90 | 98 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 0.4 | 30 | 52 | 68 | 84 | 95 | 99 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 0.4 | 23 | 46 | 63 | 80 | 93 | 98 | 100 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 33 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 33 | 33 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 33 | 33 | 33 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 33 | 33 | 33 | 33 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 100 | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 100 | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 100 | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 100 | | | | | | | | | | | |
| 18 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 100 | | | | | | | | | | |
| 19 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 100 | | | | | | | | | |
| 20 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 100 | | | | | | | | |
| 21 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 100 | | | | | | | |
| 22 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 100 | | | | | | |
| 23 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 100 | | | | | |
| 24 | 0.7 | 14 | 29 | 38 | 47 | 54 | 57 | 57 | 57 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 100 | | | | |
| 25 | 0.4 | 17 | 40 | 58 | 76 | 90 | 97 | 99 | 100 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 100 | | |
| 26 | 0.4 | 17 | 40 | 58 | 76 | 90 | 97 | 99 | 100 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 100 | 100 | |
| 27-30 | 0.4 | 17 | 40 | 58 | 76 | 90 | 97 | 99 | 100 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 100 | 100 | 100 |

Таблица 11. 30-групповая ковариационная матрица погрешностей сечения неупругого рассеяния

| | Un.,% | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 20 | 100 | | | | | | | | | |
| 2 | 20 | 0 | 100 | | | | | | | | |
| 3 | 20 | 0 | 0 | 100 | | | | | | | |
| 4 | 20 | 0 | 0 | 0 | 100 | | | | | | |
| 5 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | | | | | |
| 6 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | | | | |
| 7 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 69 | 100 | 100 | | | |
| 8 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 69 | 100 | 100 | | |
| 9 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 69 | 69 | 85 | 100 | |
| 10 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 50 | 69 | 100 |
| 11 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 50 | 69 | 69 |

92.5. Уран-236

Радиоактивен. ($T_{1/2}=2.342 \cdot 10^7$ лет). Испытывает альфа-распад в торий-232.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки нейтронных данных для урана-236.

ФОНД-2.2 – оценка F.M. Mann, R.E. Schenter, 1989

БРОНД-2.2 – Коньшин, Сухоручкин, Клепацкий, 1989

ENDF/B-VII – Young, Chadwik, MacFarlain at al, 2005

JENDL-3.3 - T.Yoshida, 1988

JEFF-3.1 – Lopez Juminez, Morillon, Romain, 2005

Из двух оценок, датируемых 2005 г., ENDF/B-VII имеет то преимущество, что в ней описывается область неразрешенных резонансов. Параметры разрешенных резонансов приняты, как описано в заголовочной секции файла, в соответствии с оценкой Манна и Шентера 1989 г. Новых экспериментальных с тех пор, насколько нам известно, не публиковалось. Эта же оценка принята и в ФОНД-2.2. Несколько странным представляется деление резонансов на две группы – s- и p-резонансы, причем всем p-резонансам приписан спин $J=1/2$. В JEFF-3.1 и JENDL-3.3 на основе на 12 лет более ранней оценки все эти резонансы рассматриваются как s-резонансы.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять файл оцененных данных из ENDF/B-VII, включив в него данные по запаздывающим нейтронам из JEFF-3.1. Спектры запаздывающих нейтронов принять такими же, как для урана-235. Полное число нейтронов деления получить как сумму мгновенных и запаздывающих. Область рассматриваемых энергий сократить до 20 МэВ. Включит данные по выходам продуктов деления из JEFF-3.1 (оценка Миллза 2005 г.).

В нижеследующей таблице сравниваются сечения, усредненные по стандартным спектрам (процедурой INTER). Как видно, расхождения в оцененных сечениях невелики.

| | | Total | Elastic | Inelastic | Fission | Capture | (n,2n) |
|---------------------------------|------------|-------|---------|-----------|---------|-----------|--------|
| 0.0253 эВ | ENDF/B-VII | | | | 0.047 | 5.13 | |
| | ФОНД-2.2 | | | | 0.047 | 5.13 | |
| | JEFF-3.1 | | | | 0.0613 | 5.295 | |
| | JENDL-3.3 | | | | 0.0613 | 5.295 | |
| | Мухабхаб | | | | 0.07 | 5.11±0.21 | |
| Резонансный интеграл | ENDF/B-VII | | | | 7.77 | 338 | |
| | ФОНД-2.2 | | | | 7.77 | 338 | |
| | JEFF-3.1 | 13.69 | 8.337 | | 7.72 | 346 | |
| | JENDL-3.3 | 13.69 | 8.337 | | 7.77 | 345 | |
| | Мухабхаб | | | | 7.8±1.6 | 360±15 | |
| Спектр деления ^{235}U | ENDF/B-VII | 7.63 | 4.60 | 2.35 | 0.576 | 0.0925 | 0.0082 |
| | ФОНД-2.2 | 7.538 | 4.316 | 2.550 | 0.574 | 0.089 | 0.010 |
| | JEFF-3.1 | 7.694 | 4.824 | 2.190 | 0.595 | 0.076 | 0.009 |
| | JENDL-3.3 | 7.700 | 4.767 | 2.231 | 0.586 | 0.107 | 0.010 |
| 14 МэВ | ENDF/B-VII | 5.79 | 2.75 | 0.563 | 1.61 | 0.0021 | 0.718 |
| | ФОНД-2.2 | 5.825 | 2.500 | 0.595 | 1.628 | 0.002 | 0.550 |
| | JEFF-3.1 | 5.851 | 2.772 | 0.459 | 1.626 | 0.003 | 0.817 |
| | JENDL-3.3 | 5.753 | 2.757 | 0.326 | 1.659 | 0.001 | 0.487 |

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

92.6. Уран-237

Радиоактивен. ($T_{1/2}=6.75$ д). Испытывает бета-распад в нептуний-237.

В современных библиотеках содержатся следующие оценки нейтронных данных для урана-236.

ФОНД-2.2 – оценка T.Nakagawa, 1993. Область разрешенных резонансов – до 200 эВ содержит 48 резонансов; область неразрешенных резонансов – до 30 кэВ.

ENDF/B-VII – P.G.Young, M.B.Chadwick, 2005. Область разрешенных резонансов – до 102.5 эВ содержит 19 резонансов; область неразрешенных резонансов – до 10 кэВ.

JENDL-3.3 - оценка T.Nakagawa, 1993, как и в ФОНД-2.2

JEFF-3.1 – Lopez Juminez, Morillon, Romain, 2005. В резонансной области – оценка T.Nakagawa, 1993. Вне резонансной области оценка P.G.Young, M.B.Chadwick.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять оценку JEFF-3.1. Дополнить ее данными о выходах продуктов деления из ENDF/B-VI. Спектры запаздывающих нейтронов принять такими же, как для урана-235. Ограничить рассматриваемую область 20 МэВ.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

92.7. Уран-238

1. Вводные замечания

При анализе были рассмотрены следующие оценки:

1. Оценка М. Н. Николаева и др. 1978 – 79 г.г., принятая в ФОНД-2.2.
2. Оценка Т. Накагава и др. 1987 – 2000 г.г., принятая в JENDJ-3.3.
3. Оценка М.Соверби и др. 1989г., принятая в JEF-2.2
4. Оценка Янга, Дерриена и др. 2004 -2005 г.г., принятая в ENDF/B-VII.
5. Оценка В.М. Маслова и др., 2001г. (в области разрешенных резонансов совпадающая с JENDL-3.3, которая, в свою очередь, совпадает с оценкой, принятой в JEF-2).
6. Оценка Лопец-Джименеза и др. 2005 г., принятая в JEFF-3.1, в области разрешенных резонансов совпадающая с ENDF/B-VII).

Кроме того, рассмотрена оценка Саблета и др. для библиотеки EAF-99, содержащая данные о сечениях реакций (n,p) и (n, α), отсутствующие в других оценках.

2. Тепловая область энергий.

Сечения в тепловой области во всех рассматриваемых оценках определяются резонансными параметрами. Сечения радиационного захвата и упругого рассеяния при 0.0253 эВ в разных оценках принимает следующее значение:

ФОНД-2.2: $\sigma_c = 2.710$ барна; $\sigma_t = 11.61$ барна

JENDL-3.3: $\sigma_c = 2.721$ барна; $\sigma_t = 12.10$ барна

JEF-2.2 : $\sigma_c = 2.72$ барна; $\sigma_t = 12.32$ барна

JEFF-3.1: $\sigma_c = 2.67$ барна; $\sigma_t = 12.17$ барна

ENDF/B-VII: $\sigma_c = 2.683$ барна; $\sigma_t = 11.98$ барна.

В оценке Маслова – как в JENDL-3.3.

Согласно рекомендациям Мухабхаба⁴⁴ $\sigma_c = 2.680 \pm 0.019$. Точно такое же значение и погрешность получены в эксперименте Пёница⁴⁵.

В рамках координационной исследовательской программы МАГАТЭ в 2005 г. была выполненная совместная согласованная оценка многих фундаментальных нейтронных данных, используемых в качестве стандартов. Для сечения захвата урана-238 этой группой получено значение 2.677 ± 0.012 барна, что согласуется с двумя последними из упомянутых оценок в пределах погрешности.

Следует отметить, что анализ зависимости расчетно-экспериментальных расхождений в критичности систем с низкообогащенным ураном от обогащения, выполненный в Японии, показал, что более низкое значение сечения захвата тепловых нейтронов ²³⁸U обеспечивает лучшее согласие результатов расчета с экспериментальными данными. С этой точки зрения данные JEFF-3.1 являются предпочтительными.

2. Область разрешенных резонансов.

Эта область простирается в ФОНД-2.2 до 4.65 кэВ для s-резонансов и до 2.15 кэВ для p-резонансов;

в JENDL-3.3 (а следовательно и в оценке Маслова и в JEF-2) – до 10 кэВ;

в JEF-2.2 – также до 10 кэВ;

в ENDF/B-VII (а следовательно и в JEFF-3.1) – до 20 кэВ.

Оценка Николаева и др., выполненная четверть века назад, в этой области энергий не конкурентноспособна, поскольку за истекшее время было выполнено несколько высокоточных измерений нейтронных сечений, легших в основу новых оценок.

В оценке, принятой в JENDL-3.1 резонансная область разбита на 10 интервалов, в пределах каждого из которых для параметризации сечений требуется использовать параметры фиктивных резонансов, лежащих за границами этих интервалов.

В JEF-2.2 этот недостаток преодолен, причем в первом подинтервале – до 1 кэВ параметры резонансов в точности сохранились прежними, а при более высоких энергиях небольшим изменениям подверглись лишь энергии резонансов.

Таким образом, по существу, сравнивать следует лишь оценки JEF-2.2 и ENDF/B-VII, последняя из которых выполнена существенно позже.

На рис. 1 и 2 сравниваются нарастающие суммы числа s-резонансов и нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин из этих двух оценок. Для сравнения приведены и данные JEFF-3.1.

На рис. 3 и 4 аналогичное сравнение проводится и для p-резонансов.

Видно, что данные ENDF/B-VII и JEFF-3.1 весьма близки.

Между оценками, принятыми в JEF-2.2 и в ENDF/B-VII имеют место различия, особенно заметные выше 8 кэВ. Полные числа резонансов, лежащих в интервале от 0 до 10 кэВ в обеих оценках практически совпадают (1602 в JEF-2.2 и 1603 в ENDF/B-VII), однако доля s-резонансов в JEF-2.2 несколько выше (29.5% против 29.1% в ENDF/B-VII). Эти различия проявляются в энергетических зависимостях оценок силовых функций $S_0 \approx \sum \Gamma_n^0 / E_{\max}$;

$S_1 \approx \sum g \Gamma_n^1 / 3E_{\max}$, изображенных на рис. 5 и 6. При $E_{\max} = 20$ кэВ получаем

$$S_0 = (1.026 \pm 0.024) \cdot 10^{-4}; \quad S_1 = (1.630 \pm 0.047) \cdot 10^{-4},$$

причем различия между результатами расчетов по параметрам, принятым в ENDF/B-VII и в JEFF-3.1, существенно меньше указанных статистических погрешностей, равных

⁴⁴ S.F.Mughabghab. Atlas of Neutron Resonances. Resonance Parameters and Thermal Cross sections. Z=1 – 100. ELSEVIER BV, 2006. p92-39.

⁴⁵ W.P.Poenitz, L.R.Fawcett Jr, D.L.Smith, Nucl. Sci. Eng, 78, 239, (1981)

$S/\sqrt{N/2}$, где N- число резонансов, давших вклад в сумму приведенных ширин. Оценки силовых функций по сумме приведенных ширин мало чувствительны к пропуску слабых резонансов. Тем не менее, целесообразно убедиться в том, что наблюдаемые приведенные ширины достаточно хорошо согласуются с ожидаемым для них распределением. В случае s- резонансов, имеющих один и тот же спин и четность, это χ^2 - распределение с одной степенью свободы (распределение Портера-Томаса). На рис.7 показано распределение числа резонансов с приведенными ширинами, лежащими в пределах 10-процентных квантилей этого распределения. Границы квантилей (граничные значения $\Gamma_n^0 / \langle \Gamma_n^0 \rangle$) указаны на оси абсцисс. Как видно, распределение приведенных ширин s-резонансов прекрасно совпадает с теоретически ожидаемым; оснований предполагать сколько-нибудь существенного пропуска уровней нет и, следовательно, среднее расстояние между этими уровнями равно

$$D(1/2^+) = 20000/897 = 22.30 \pm 0.35 \text{ эВ.}$$

$$\langle \Gamma_n^0 \rangle = 2.28610^{-3} \text{ эВ}^{1/2}.$$

Использовавшееся выше выражение для силовой функции р-волны получено в предположении, что плотность уровней пропорциональна $2J+1$, т.е. число уровней со спином $3/2$ вдвое превышает число уровней со спином $1/2$. Это соотношение, вообще говоря, не является строгим и то, что число зарегистрированных р-резонансов со спином $1/2$ (850) превышает половину числа зарегистрированных р-резонансов со спином $3/2$ (1565), само по себе не может служить свидетельством пропуска части уровней или некорректного определения спинов. О наличии или отсутствии пропуска уровней можно судить по распределениям приведенных нейтронных ширин р-резонансов со спинами $1/2$ и $3/2$. Эти распределения показаны на рис.8. Совершенно очевидно, что значительная часть узких резонансов, чьи приведенные ширины относятся к двум первым квантилям, пропущена. В то же время в третьем и более высоких квантилях признаков пропуска не наблюдается. Пропуск узких резонансов, разумеется, привел к завышению средних приведенных нейтронных ширин, что исказило распределение $\Gamma_n / \langle \Gamma_n \rangle$ и в верхних квантилях.

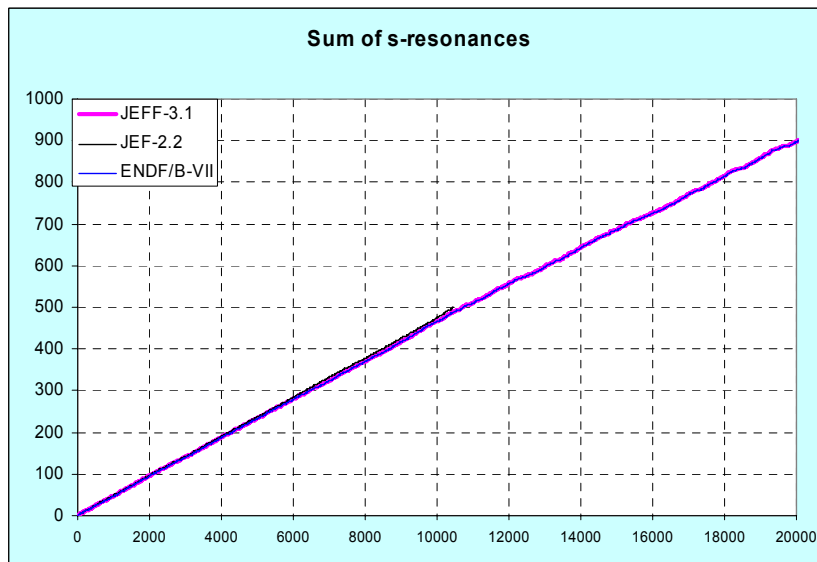


Рис. 1 Сравнение нарастающих сумм числа s-резонансов

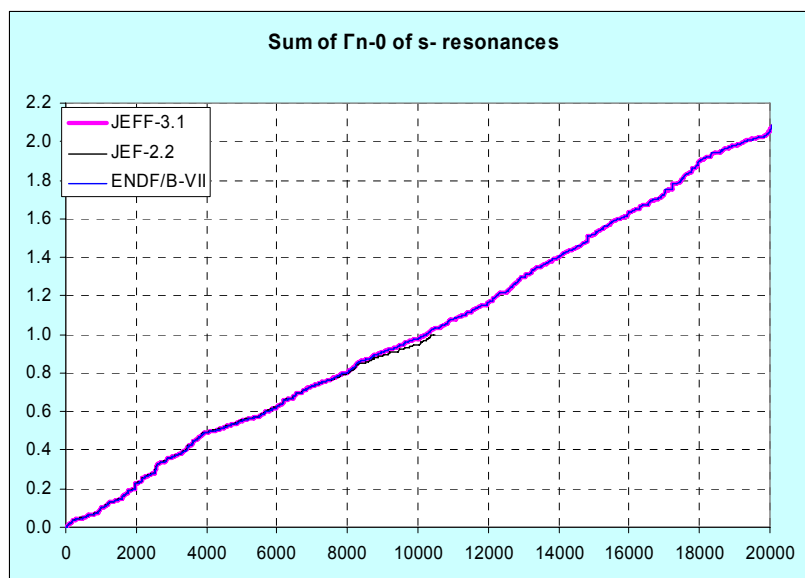


Рис. 2 Сравнение нарастающих сумм приведенных нейтронных ширин s-резонансов

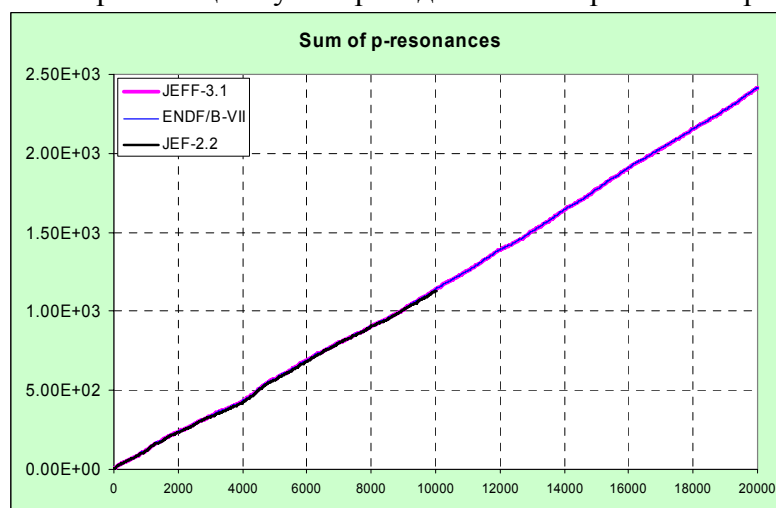


Рис. 3 Сравнение нарастающих сумм числа p-резонансов

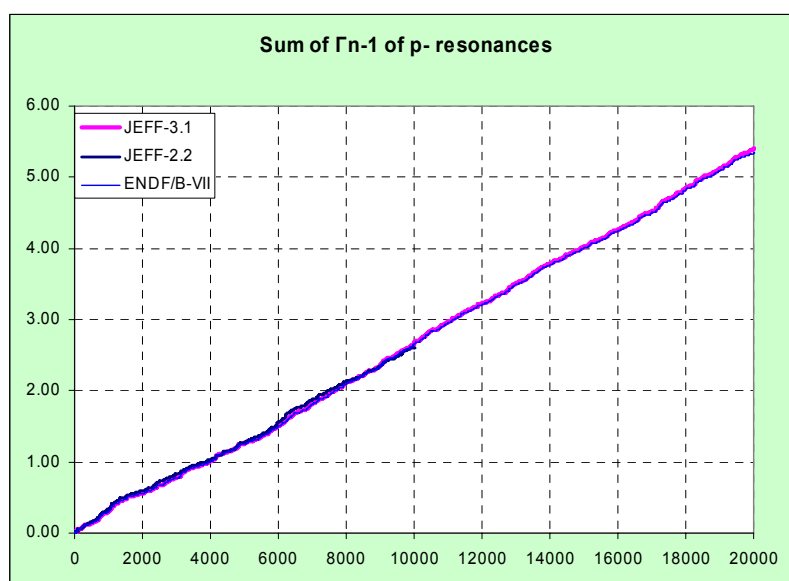


Рис. 4 Сравнение нарастающих сумм приведенных нейтронных ширин p-резонансов

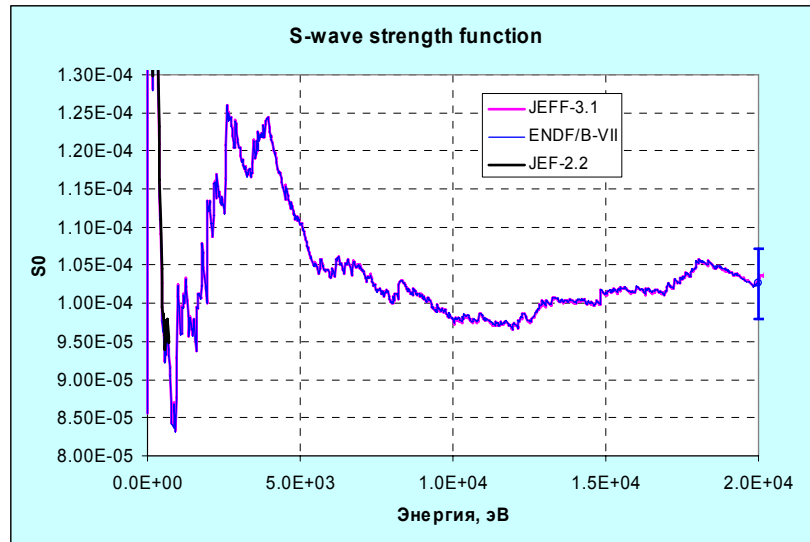


Рис.5. Силовая функция s-волны $(1.026 \pm 0.046) \cdot 10^{-4}$

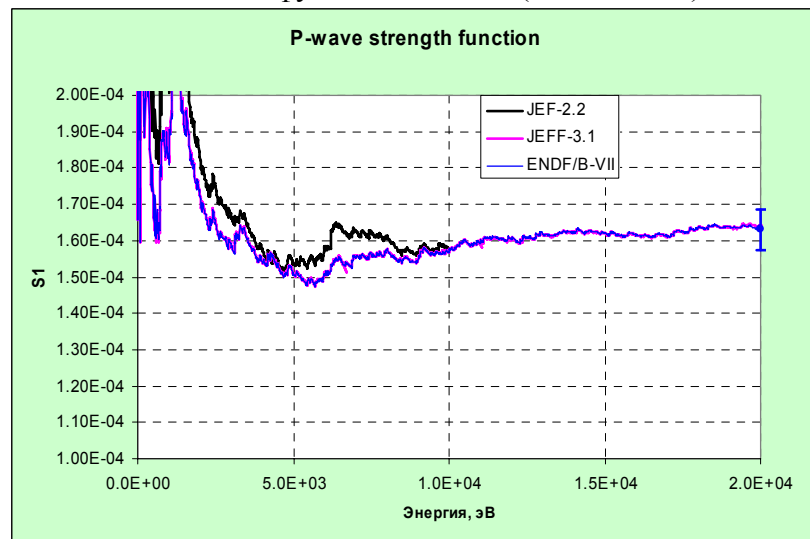


Рис.6. Силовая функция p-волны (1.630 ± 0.047)

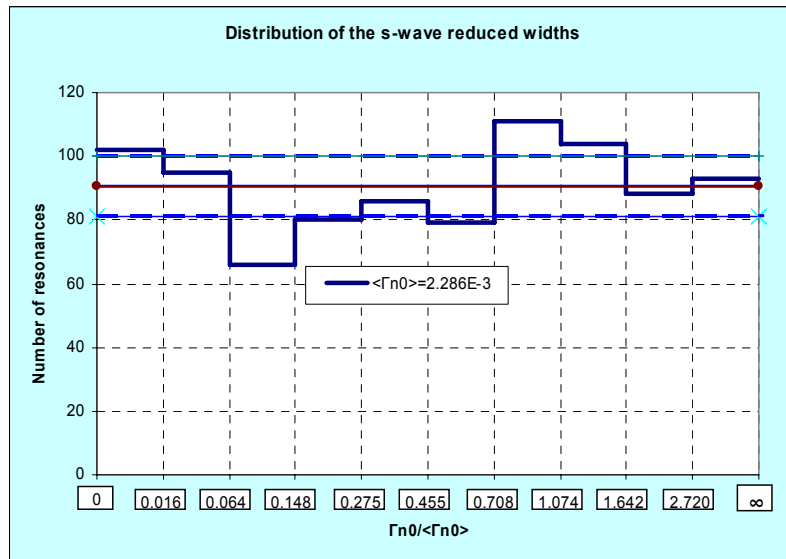


Рис.7. Распределение приведенных нейтронных ширин s-резонансов по 10%-м квантилям распределения Портера-Томаса

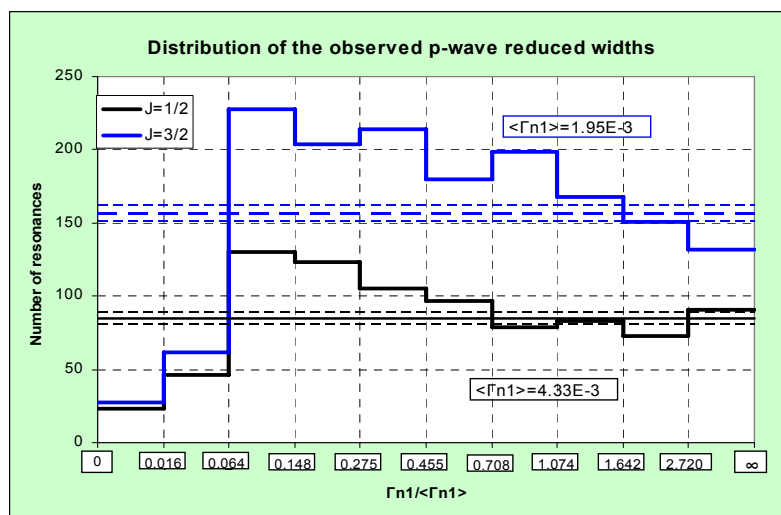


Рис.8. Распределение приведенных ширин р-резонансов по 10-процентным квантилям распределения Портера-Томаса

Учет пропуска слабых резонансов нами был выполнен в предположении, что в восьми верхних квантилях пропуск резонансов не существен. Средние приведенные ширины определялись из условия

$$\frac{10}{8} [N_{\text{obs}} - N(\Gamma_n^1 < 0.0642 \langle \Gamma_n^1 \rangle)] = \sum \frac{\Gamma_n^1}{\langle \Gamma_n^1 \rangle} - \sum \frac{\Gamma_n^1 (< 0.0642 \langle \Gamma_n^1 \rangle)}{\langle \Gamma_n^1 \rangle}$$

Здесь 0.0642 – нижняя граница 3-го квантиля. Вычитаемые в левой и правой частях равенства учитывают вклады зарегистрированных резонансов из первых двух квантилей.

На рис. 9 показаны распределения ширин р-резонансов, полученные при сниженных значениях <Γn1>. Снижение проводилось таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений чисел резонансов в квантилях с 3-го по 10-й от среднего по этим квантилям числа равнялась нулю.

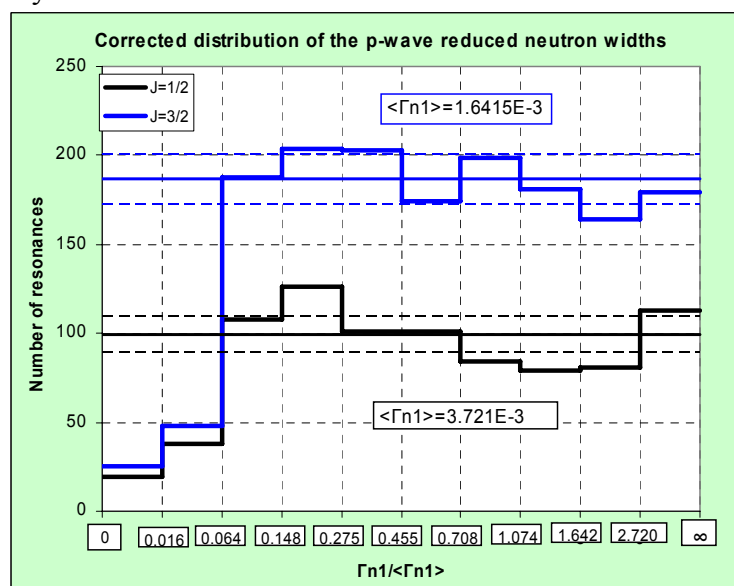


Рис.9. Распределение приведенных ширин р-резонансов с учетом пропуска слабых уровней

Недобор резонансов в первых двух квантилях составил для J=1/2 141 резонанс, а для J=3/2 300 резонансов. Средние расстояния между уровнями с учетом пропуска оказывается равным

$$D(1/2^-)=20.18\pm 0.09 \text{ эВ}; \quad D(3/2^-)=10.72\pm 0.03 \text{ эВ}^{46}.$$

Средние приведенные ширины равны, соответственно,

$$\langle \Gamma_n^1(1/2^-) \rangle = (3.72\pm 0.18) \cdot 10^{-3}; \quad \langle \Gamma_n^1(3/2^-) \rangle = (1.64\pm 0.06) \cdot 10^{-3}.$$

При оценке погрешностей учитывались только числа уровней, лежащих в 8-ми верхних квантилях. Силовые функции равны

$$s_{1,1/2} = (1.844\pm 0.097) \cdot 10^{-4}; \quad s_{1,3/2} = (1.531\pm 0.059) \cdot 10^{-4}.$$

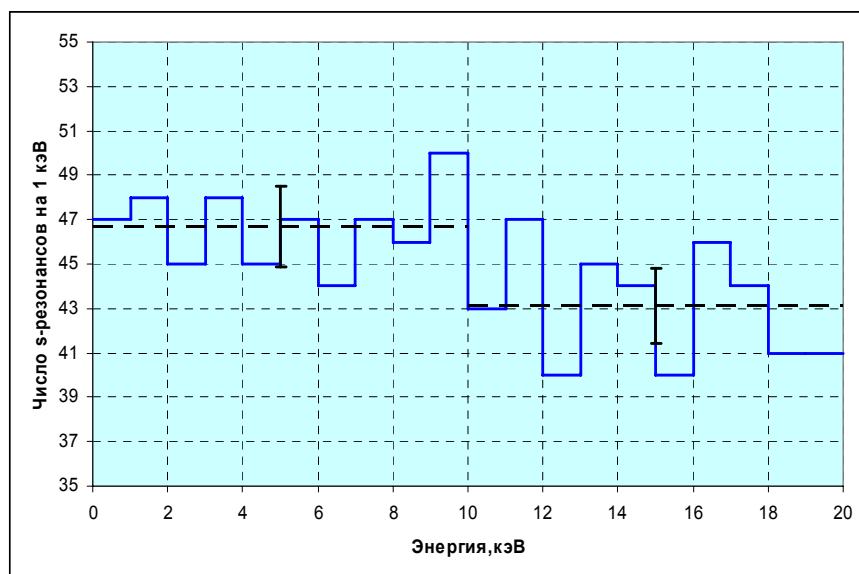
Силовая функция р-волны, оцененная как $S_1 = (s_{1,1/2} + 2s_{1,3/2})/3$, равна

$$S_1 = (1.635\pm 0.051) \cdot 10^{-4},$$

что практически совпадает с приведенной выше оценкой $S_1 \approx \sum g\Gamma_n^1/3E_{\max}$. Несколько большая погрешность обусловлена учетом эффекта пропуска уровней и погрешностью в среднем расстоянии между ними.

Из рис.1 и рис.3, на которых изображены нарастающие суммы числа резонансов, трудно судить об отклонении энергетических зависимостей этих сумм от прямых линий. На рис. 10 и 11 приведены зависимости наблюдаемых плотностей уровней с J^π , равными $1/2^+$, $1/2^-$ и $3/2^-$, выраженные в числе резонансов, приходящихся на 1 кэВ, в последовательных интервалах шириной по 1 кэВ. Пунктирными линиями показаны числа резонансов, приходящихся на 1 кэВ, усредненные по первым 10 интервалам (от 0 до 10 кэВ) и по следующим 10 интервалам (от 10 до 20 кэВ).

Как видно из рис.10, плотность s-резонансов после 10 кэВ несколько снижается: на первом десятке кэВ зарегистрировано 466 резонансов, на втором - 431 резонанс. Распределение расстояний между резонансами с одинаковыми спинами и четностью подчиняется распределению Вигнера, для которого стандартное отклонение равно $\sqrt{(4/\pi - 1)/N}$. Ожидаемое отклонение от среднего при среднем, равном ~ 450 , составляет ± 18 (или, в пересчете на 1 кэВ, ± 1.8 , что и показано на рис. 3а). Как видим, наблюдаемые числа резонансов на первом и на втором десятке кэВ отличаются от среднего на величину, близкую к ожидаемому случайному отклонению, т.е. слабое снижение наблюдаемой плотности s-резонансов на втором десятке кэВ не является основанием для предположения о пропуске части резонансов. Как отмечалось выше, для такого предположения не дает основание и рассмотрение распределения приведенных нейтронных ширин.



⁴⁶ Относительная погрешность среднего расстояния между резонансами связана с числом зарегистрированных резонансов с соответствующим спином и четностью N соотношением $\sqrt{4/\pi - 1}/\sqrt{N}$

Рис.10. Энергетическая зависимость наблюдаемой плотности s-резонансов.

На рис. 11 приведены наблюдаемые плотности р-резонансов со спином 1/2 и со спином 3/2. Как видно, в отличие от s- резонансов, в этих случаях наблюдаемая плотность уровней несколько возрастает при переходе от первого десятка кэВ ко второму. Для резонансов со спином 1/2, это возрастание существенно меньше статистической неопределенности; для резонансов со спином 3/2, несколько ее превосходит. Заметим, что судя по распределениям приведенных нейтронных ширин доля пропущенных р-резонансов на первом десятке кэВ практически совпадает с долей пропущенных резонансов во всей области разрешенных резонансов.

Изложенное показывает, что в области ниже 20 кэВ нет столь существенного пропуска нейтронных резонансов, который мог бы заметно повлиять на величину рассчитываемых по параметрам этих резонансов нейтронных сечений.

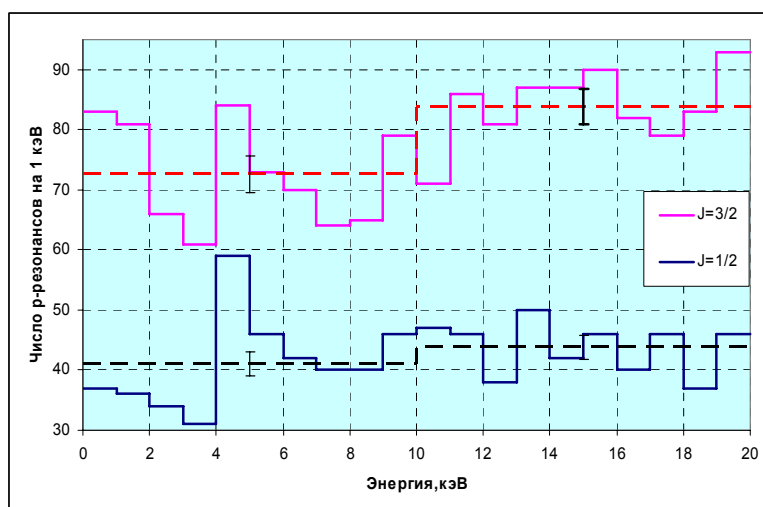


Рис.11 . Энергетические зависимости наблюдаемых плотностей р-резонансов

Что касается радиационных ширин, то для большинства резонансов они приняты равными 23 мэВ ровно. Исключение составляют 202 s-резонанса, и 170 р-резонансов, которым приняты иные значения радиационной ширины (в среднем 24.1 ± 17.2 мэВ и 26.6 ± 10.7 мэВ соответственно). Следует отметить, что все эти исключения повлекли за собой увеличение резонансного интеграла всего на 0.12%. Радиационные силовые функции оказываются равными

$$S_{\gamma,0} = (10.7 \pm 1.3) \cdot 10^{-4}; \quad S_{\gamma,1} = (28.1 \pm 3.6) \cdot 10^{-4}$$

Погрешности обусловлены разбросом радиационных ширин, указанных в файле ENDF/B-VII.

Резонансные интегралы равны:

ФОНД-2.2 – 274.6 барна;

JENDL-3.3 – 276.4 барна;

JEFF-3.1 – 274.7 барна;

ENDF/B-VII – 275.3 барна.

По оценке Мухабхаба¹ резонансный интеграл захвата равен 277 ± 3 барна, чему не противоречит ни одно из перечисленных значений резонансных интегралов из библиотечных данных. Вклад области разрешенных резонансов (от 0.465эВ до 20кэВ) составляет 274.7 эВ, т.е. 99.8%. Пропуск слабых р-резонансов практически не сказывается на величине резонансного интеграла.

На рис.12 сравниваются отклонения полных сечений, рассчитанных по резонансным параметрам, принятым в различных оценках от сечений, рассчитанных на основе данных ENDF/B-VII; на рис.13 такое же сравнение проводится для сечения захвата.

Сравнение проводится на уровне мультигрупповых констант, полученных из сравниваемых файлов с помощью программы NJOY. Кроме данных JENDL-3.3 приводятся также данные из оценки Маслова, которые хоть и не существенно, но все же отличаются от данных JENDL-3.3.

Как видно, в JENDL-3.3 радиационный захват выше не только в тепловой, но и в резонансной области.

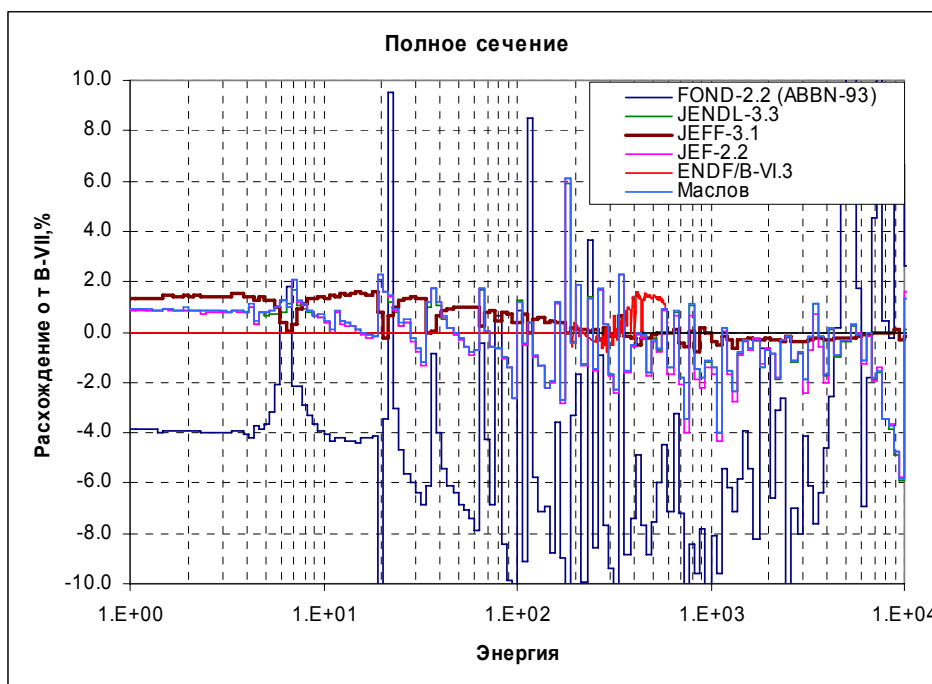


Рис. 12. Отклонения полного сечения от такового из ENDF/B-VII в области разрешенных резонансов.

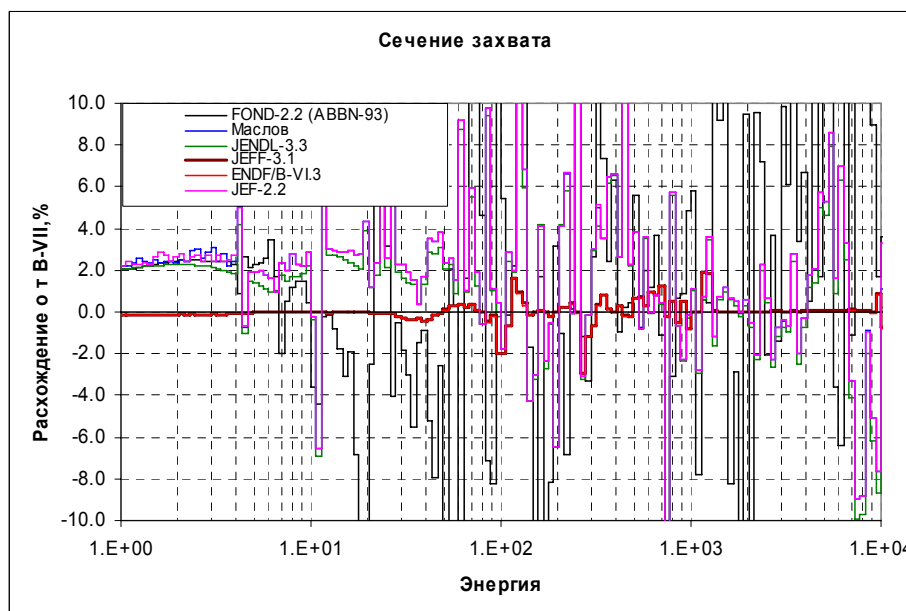


Рис. 13. Отклонения сечения захвата от такового из ENDF/B-VII в области разрешенных резонансов.

Поскольку оценка, принятая в ENDF/B-VII выполнена позднее и учитывала результаты ряда новых экспериментальных работ⁴⁷, и, к тому же, обеспечивает

⁴⁷ F. Gunsing, K. Athanassopoulos, and F. Corvi, Phys. Rev. C, 56, Num 3 (1997);
B. E. Crawford et al., Phys. Rev. C, 58, Num 2 (1998)

приемлемую величину сечения захвата тепловых нейтронов, в РОСФОНД включены резонансные параметры именно из этой оценки.

4. Область неразрешенных резонансов.

В оценке ENDF/B-VII эта область простирается от 20 до 149.0288 кэВ (т.е. до порога неупругого рассеяния с возбуждением второго уровня ^{238}U); средние резонансные параметры рекомендуются лишь для расчета факторов резонансной самоэкранировки; усредненные по резонансам сечения, приведенные в файле MF=3, соответствуют оценке Frohner'a, выполненной в 1988 г.

В оценке JEFF-3.1 область неразрешенных резонансов простирается от 20 до 300 кэВ; средние резонансные параметры также рекомендуются лишь для расчета факторов резонансной самоэкранировки; усредненные по резонансам сечения приведенные в файле MF=3, соответствуют более поздней оценке Frohner'a, выполненной в 1993 г.⁴⁸

В оценке Маслова область неразрешенных резонансов простирается от 10 до 150 кэВ; средние резонансные параметры рекомендуются для расчета сечений упругого рассеяния, радиационного захвата и деления (сечение неупругого рассеяния и его вклад в полное сечение задаются в файле MF=3).

В оценке JENDL-3.3 область неразрешенных резонансов также простирается от 10 до 150 кэВ; средние резонансные параметры рекомендуются для расчета сечений упругого рассеяния и радиационного захвата (сечения неупругого рассеяния и деления и их вклад в полное сечение задаются в файле MF=3).

В оценке ФОНД-2.2. область неразрешенных резонансов простирается до 200 кэВ. средние резонансные параметры рекомендуются для расчета сечений упругого рассеяния и радиационного захвата (сечения неупругого рассеяния и деления и их вклад в полное сечение задаются в файле MF=3).

Во всех оценках сечения описываются с учетом вкладов резонансов со спинами и четностями $1/2^+$ (s-волна), $1/2^-$ и $3/2^-$ (p-волна), $3/2^+$ и $5/2^+$ (d-волна).

На рис. 13, 14 и 15 сравниваются нейтронные и радиационные силовые функции, на основе которых рассчитываются нейтронные сечения в области неразрешенных резонансов.

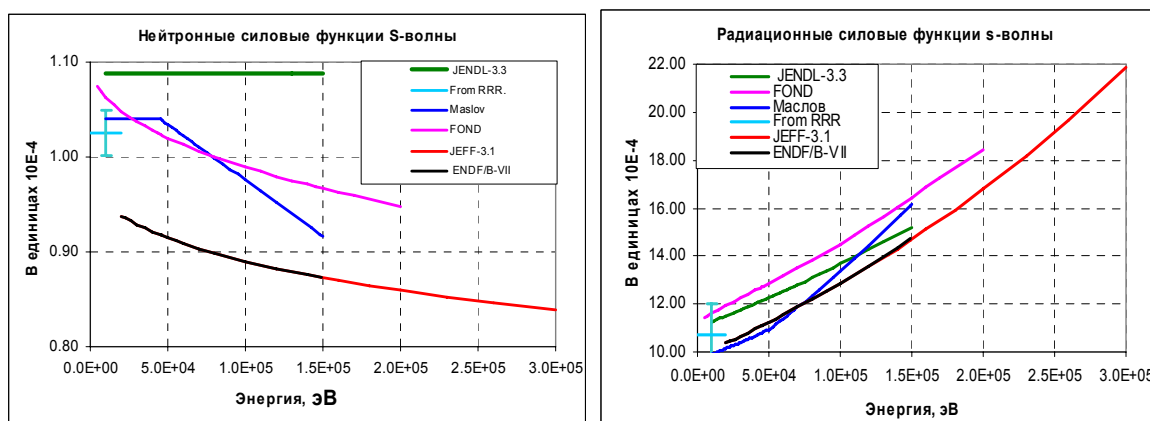


Рис. 13. Силовые функции s- волны

Из приведенных данных видно, что разницей в оценках средних резонансных параметров достаточно велик. Можно констатировать, что описание совокупности

⁴⁸ F.H. Frohner, "Evaluation of the Unresolved Resonance Range of $^{238}\text{U} + n$, Part II: Differential Data tests", NSE: 111, 404-414, (1992).

накопленных к настоящему времени данных о нейтронных сечениях в области неразрешенных резонансов в терминах средних резонансных параметров для s-, p- и d-волн не позволило оценщикам прийти к согласованному набору параметров. Частично это рассогласование, вероятно, обусловлено, различием в тех наборах экспериментальных данных, которые использовались для определения параметров. Так, например, оценка средних резонансных параметров М.Николаевым и др. производилась путем подбора методом наименьших квадратов таких средних резонансных параметров, которые позволяли бы описать одновременно как сечения захвата, упругого и неупругого рассеяния, так и анизотропию упругого рассеяния. Именно потребность описания данных по анизотропии упругого рассеяния привело к тому, что силовая функция d-волны в этой оценке оказалась столь большой.

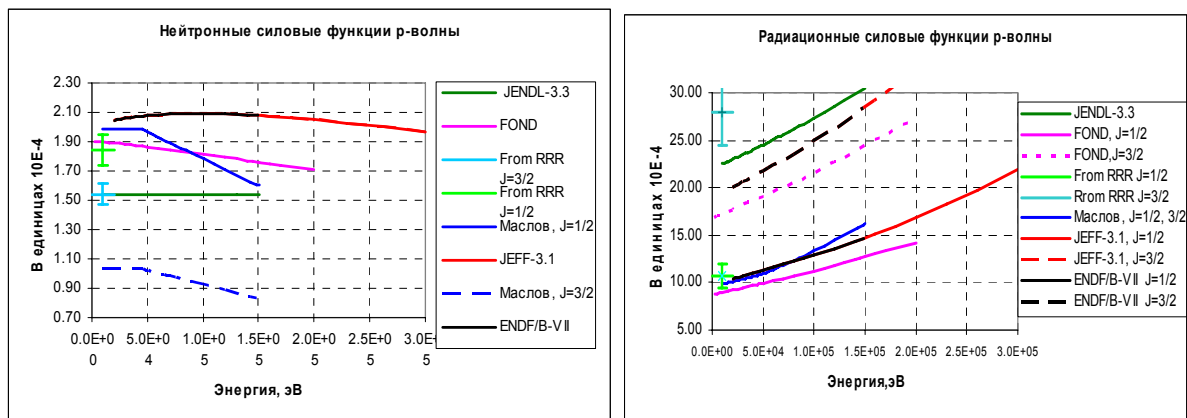


Рис. 14. Силовые функции p-волны

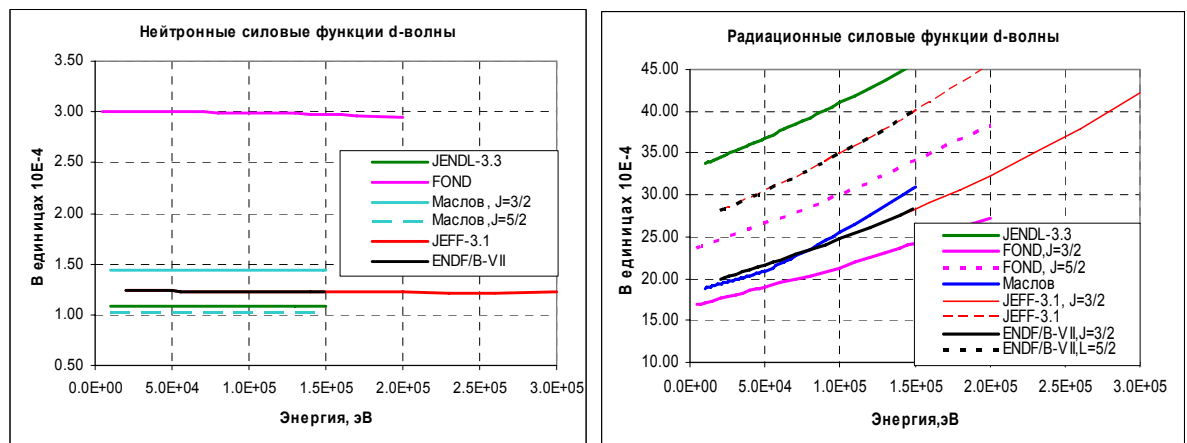


Рис. 15. Силовые функции d-волны.

В описаниях всех других оценок об учете данных по угловым распределениям при оценке средних резонансных параметров не упоминается. Другой причиной могло явиться различие в числе подбираемых параметров расчетной модели: в большинстве оценок спиновой зависимостью нейтронных силовых функций пренебрегалось, а в японской оценке и радиационные силовые функции считались не зависящими от спина.

Итак, наборы средних резонансных параметров, с помощью которых описывается структура сечений в области неразрешенных резонансов, существенно различны. Рассмотрим, как это сказалось на усредненных по резонансам сечениях.

На рис. 16 полные сечения, полученные в разных оценках в области неразрешенных резонансов, сравниваются с данными ENDF/B-VII.

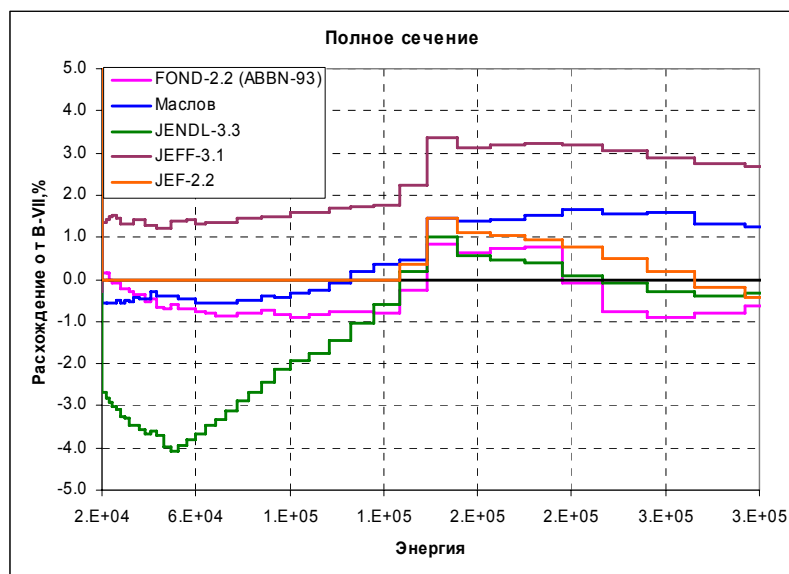


Рис. 16. Отклонения полного сечения из разных оценок от такового из ENDF/B-VII в области неразрешенных резонансов.

Чтобы выбрать из рассматриваемых оценок наиболее надежную сравним их с экспериментальными данными. На рис. 17 оцененные данные сравниваются с экспериментальными данными Харви, усредненными по интервалам шириной 10 кэВ (непосредственные данные Харви слишком детальны для того, чтобы по ним можно было судить об их соответствии оцененным данным, усредненным по широким энергетическим интервалам). Приводятся только результаты измерений с тонким образцом, т.к. самоэкранировка сечений при использовании образца толщиной 0.1748 яд./барн оказалась существенной даже при столь высоком разрешении, которое имело место в эксперименте Харви. Приводятся также и результаты измерений других авторов.

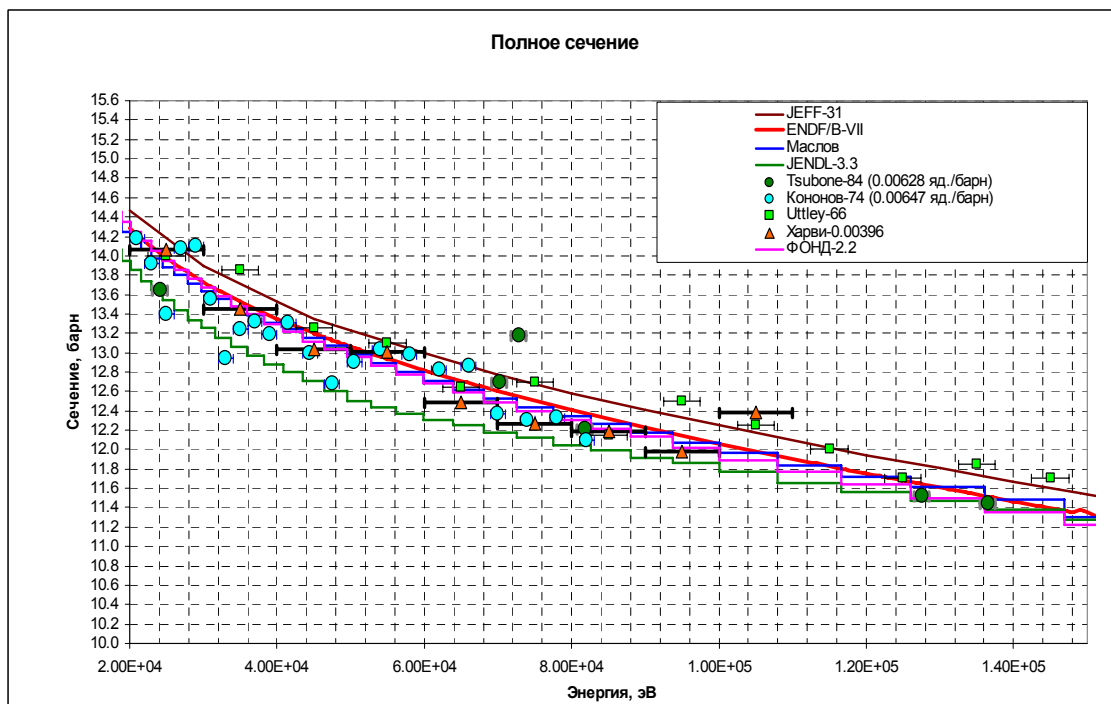


Рис.17. Полное сечение в области неразрешенных резонансов

Оценки ENDF/B-VII и JEFF-3.1, в которых средние резонансные параметры рекомендуются только для оценок резонансной самоэкранировки, представлены кривыми, определенными в соответствующих файлах. Для всех остальных библиотек приведены

многогрупповые сечения, рассчитанные по средним резонансным параметрам с помощью программы NJOY-98.

Из рис. 17 видно, что полное сечение, рассчитанное по принятым в JENDL-3.3 резонансным параметрам, лежит ниже подавляющего большинства экспериментальных данных. Сечение, принятое в JEFF-3.1, напротив, представляется завышенным. Авторы оценки, видимо, придали подавляющий вес результатам измерений Аттли, лежащим систематически выше данных всех других авторов, проводивших измерения с достаточно тонкими образцами. Полные сечения, принятые в трех остальных оценках столь близки друг к другу, что отдать предпочтение одной из них на основе сравнения с экспериментальными данными невозможно.

На рис. 18 показаны отклонения сечений радиационного захвата от результатов оценки, принятой в ENDF/B-VII. Обращает на себя внимание аномалия, имеющая место на пороге неупругого рассеяния. Причина этой аномалии заключается в том, что в отличие от оценок, принятых в JENDL-3.3, ФОНД-2.2 и от оценки Маслова, в ENDF/B-VII (как и в JEFF-3.1) сечение захвата рекомендуется рассчитывать не по приведенным в файле средним резонансным параметрам, а по данным, приведенным в файле MF=3.

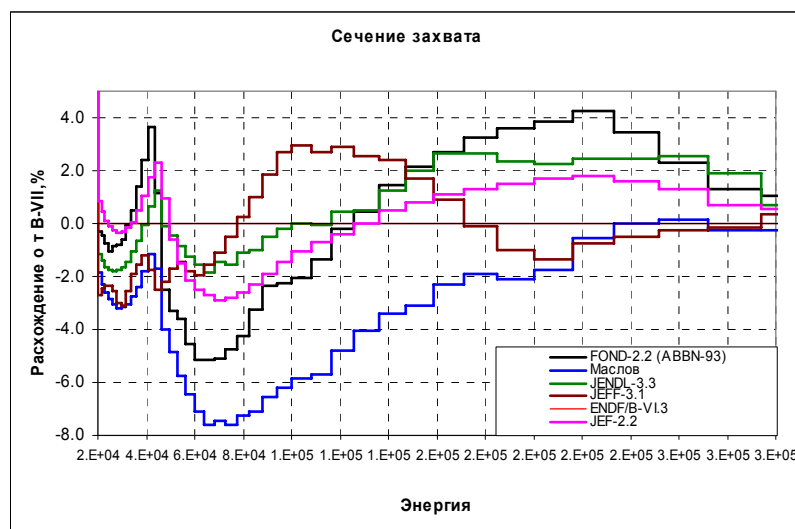


Рис. 18. Отклонения оцененных сечений захвата от оценки, принятой в ENDF/B-VII.

На рис. 19 приведено отличие сечений захвата, рассчитанных по средним резонансным параметрам из ENDF/B-VII от таковых, рассчитанных по данным файла MF=3. Как видно, величина и характер этого отличия подобны приводимым на рис. 18.

На рис. 20 оцененные сечения захвата сравниваются с экспериментальными данными. Оценки ENDF/B-VII и JEFF-3.1, в которых средние резонансные параметры рекомендуются только для оценок резонансной самоэкранировки, как и выше, представлены кривыми, определенными в соответствующих файлах. Для всех остальных библиотек приведены многогрупповые сечения, рассчитанные по средним резонансным параметрам с помощью программы NJOY-98. Приводится также кривая зависимости сечения захвата от энергии, рассчитанная по параметрам неразрешенных резонансов из JEFF-3.1 (до 150 кэВ совпадающими с принятыми в ENDF/B-VII).

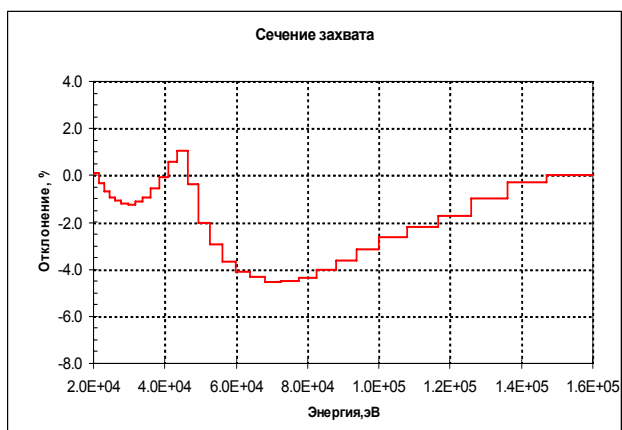


Рис.19. Отклонение сечения захвата, рассчитанного по данным файла MF=2, от рассчитанного по данным MF=3 для МАТ=9228 ENDF/B-VII.

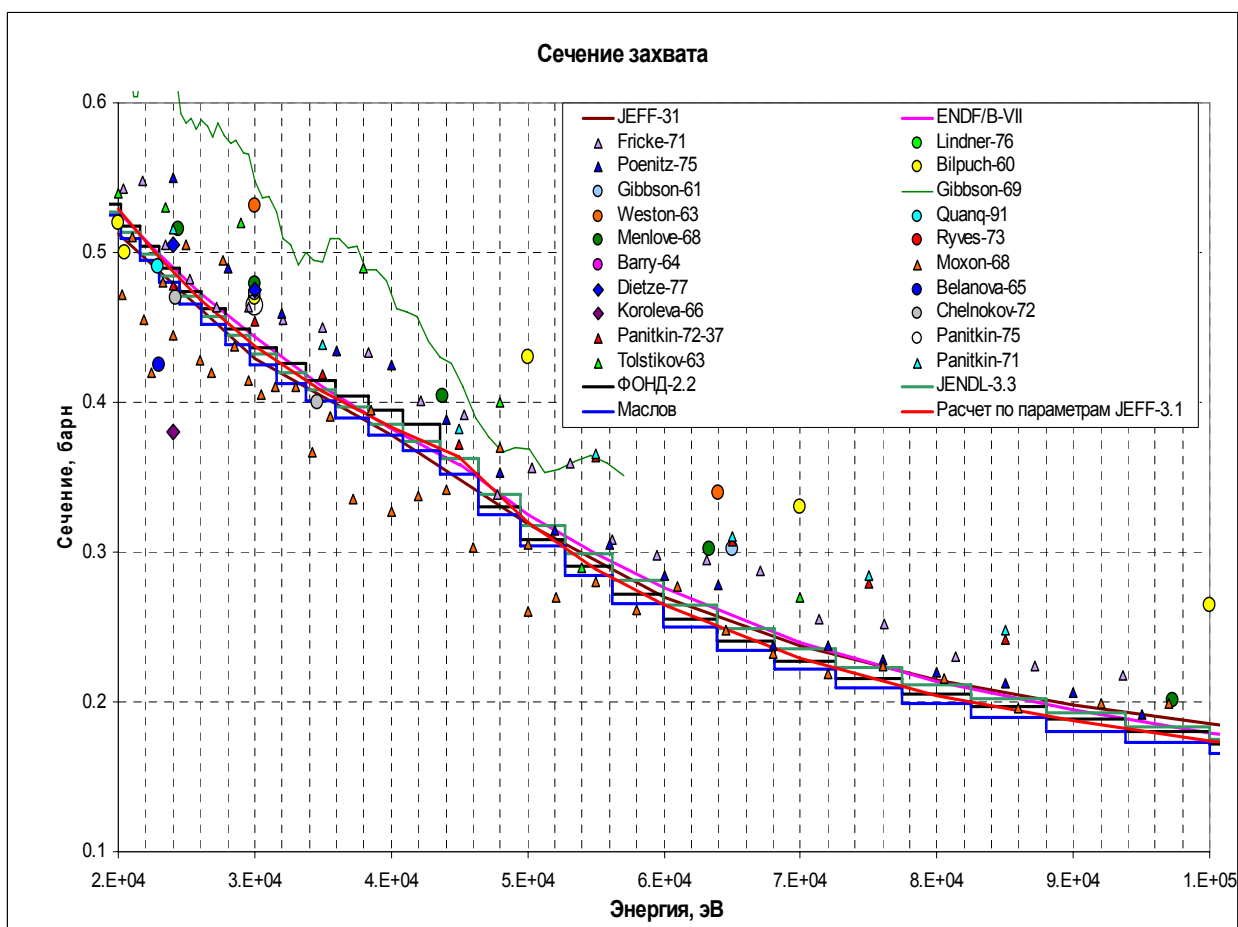


Рис.20а. Сравнение оцененных и экспериментальных данных по сечению захвата.

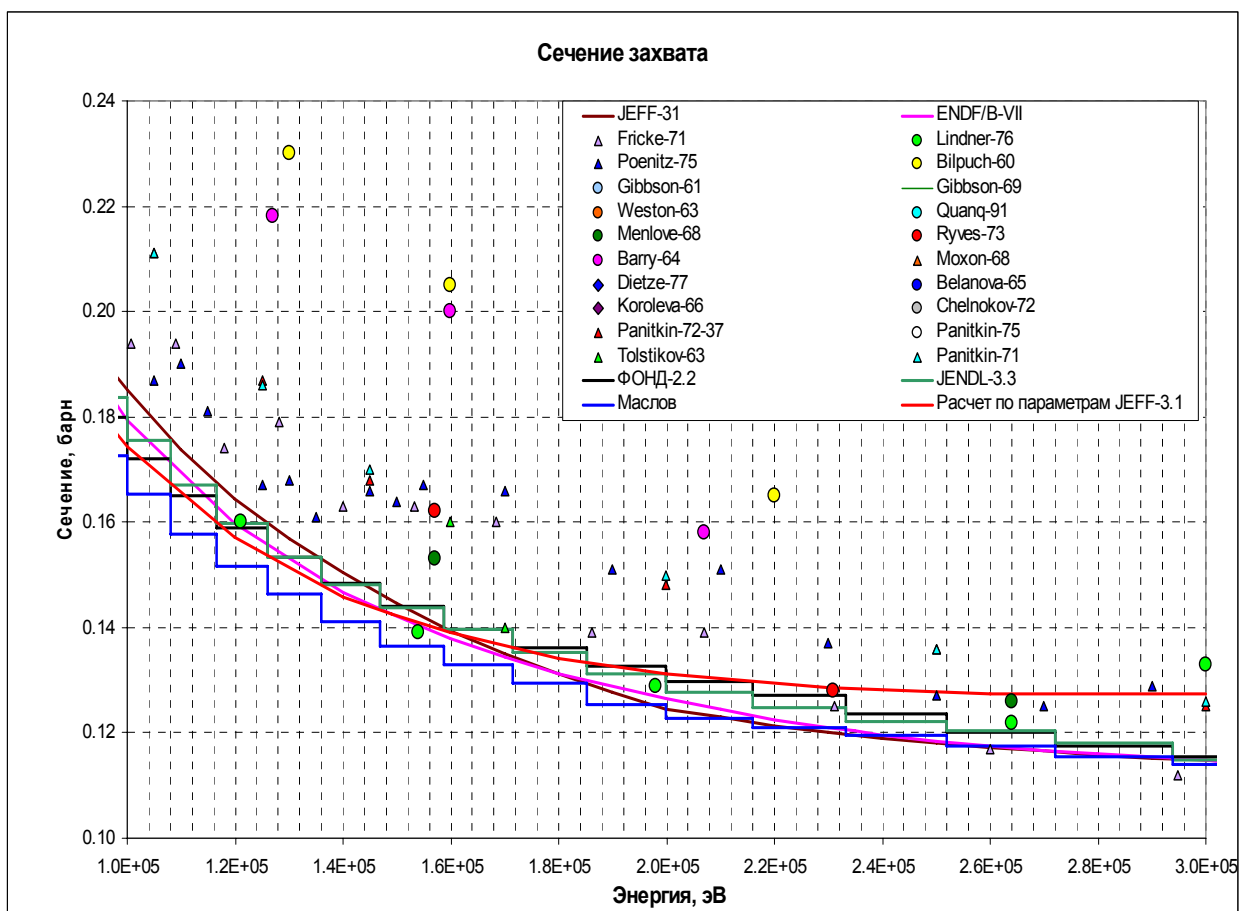


Рис.206. Сравнение оцененных и экспериментальных данных по сечению захвата.

Во всех случаях, когда сечения рассчитаны по средним резонансным параметрам, скорость снижения сечения захвата с энергией при приближении к 40 кэВ становится заметно меньшей. Это обусловлено увеличением вклада d -волны. В оценке ФОНД-2.2, где силовая функция d - волны принята большей, чем во всех остальных оценках, этот “выбег” особенно заметен. При энергии 41.6 кэВ скорость спада сечения захвата с энергией вновь резко увеличивается за счет конкуренции с неупругим рассеянием. В оценках ENDF/B-VII и JEFF-3.1, в которых энергетический ход сечений не связан жестко со средними резонансными параметрами, обсуждаемая особенность в ходе сечения захвата смазана.

Видно, что хорошо воспроизводя сечения, принятые в различных оценках до 120 кэВ, средние резонансные параметры переоценивают сечение захвата при более высоких энергиях.

На рис. 21 приведены энергетические зависимости сечения неупругого рассеяния в соответствии с разными оценками.

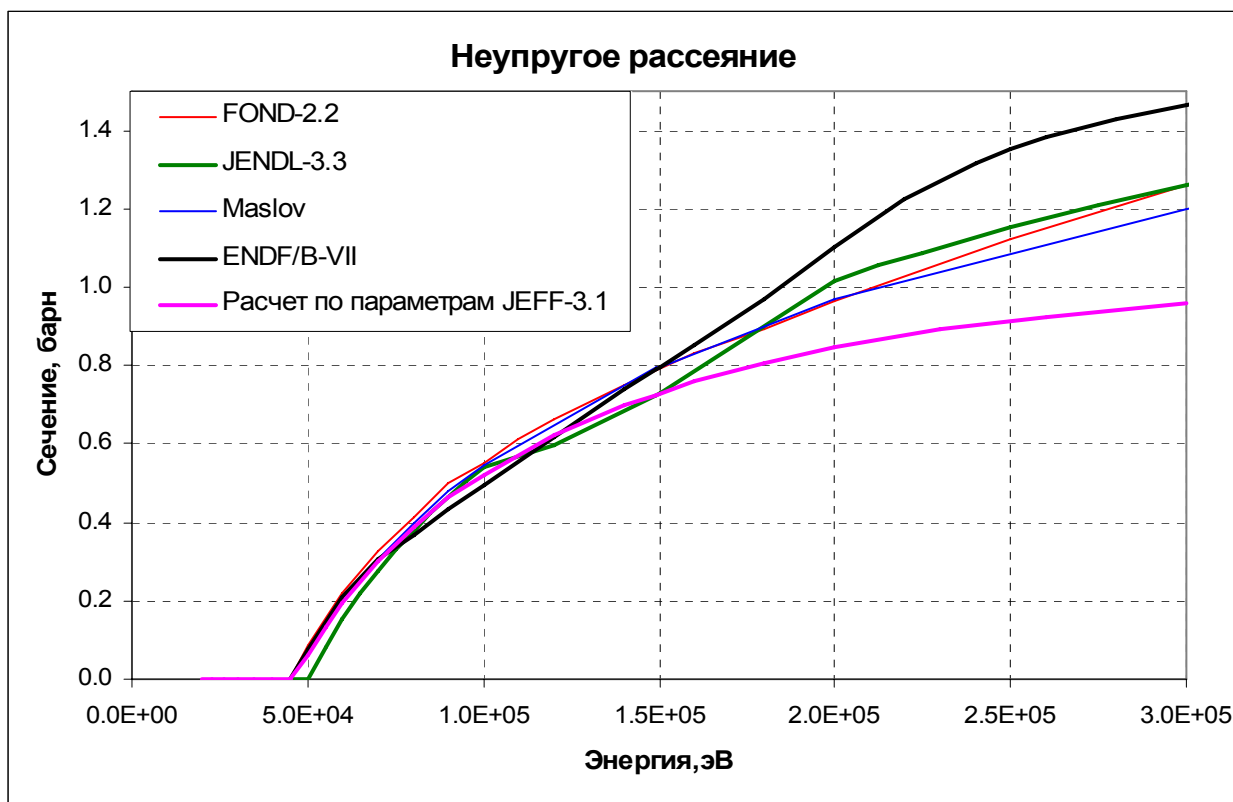


Рис.21 Оценки сечения возбуждения 1-го уровня ^{238}U

Обращает на себя внимание аномальное поведение сечения вблизи порога в японской оценке. Это обстоятельство и резко заниженное в этой оценке полное сечение не позволяют принять ее в РОСФОНД. Остальные оценки вблизи порога ведут себя близко друг к другу. На рис. 13 приведено также сечение неупругого рассеяния, рассчитанное по параметрам неразрешенных резонансов из JEFF-3.1 (до 150 кэВ они совпадают с данными ENDF/B-VII). Видно, что до 120 кэВ эти параметры прекрасно воспроизводят сечения, принятые в других оценках, но при более высоких энергиях недооценка сечения неупругого рассеяния становится весьма существенной.

Рассмотрим теперь как влияет выбор параметров неразрешенных резонансов на факторы самоэкранировки. На рис. 22 проводится сравнение факторов самоэкранировки при сечении разбавления 1 барн (что соответствует смеси урана-238 с 5% водорода). Факторы самоэкранировки определены следующим образом:

$$f_t = \langle 1/(\sigma_t + \sigma_0) \rangle / \langle 1/(\sigma_t + \sigma_0)^2 \rangle;$$

$$f_c = \langle \sigma_c / (\sigma_t + \sigma_0) \rangle / \langle 1/(\sigma_t + \sigma_0) \rangle.$$

Угловые скобки означают усреднение по возможным значениям сечений при рассматриваемой энергии. σ_0 - сечение разбавления.

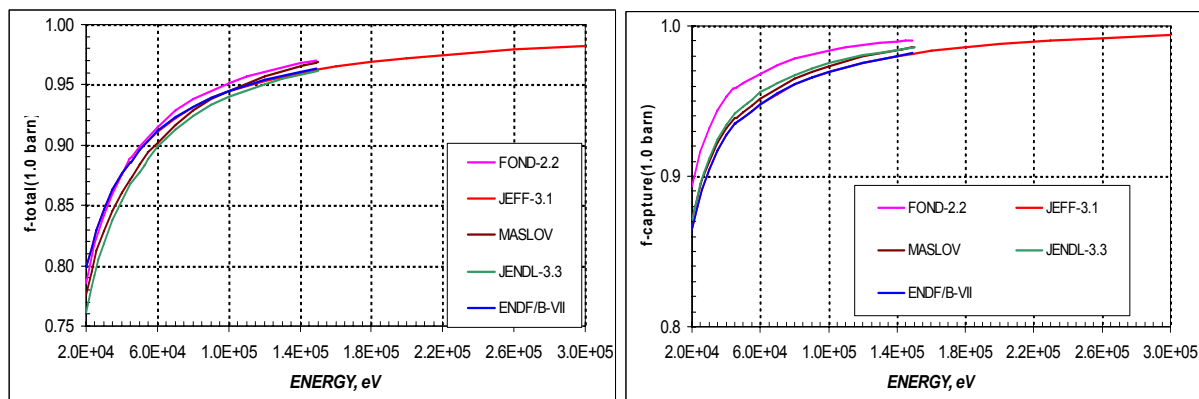


Рис.22. Факторы резонансной самоэкранировки полного сечения урана-238 и сечения захвата (слева) при разбавлении 1 барн.

Как видно, различия в факторах самоэкранировки сравнительно невелики. Максимальное расхождение в факторе самоэкранировки сечения захвата имеет место для параметров ФОНД-2.2. Оно составляет +3% в низкоэнергетической части области, что частично компенсирует расхождение в средних сечениях захвата см. рис.10). Расхождение в факторе самоэкранировки полного сечения в случае оценки Маслова близка к -3% и еще более усиливает расхождение, наблюдающееся в средних сечениях (см. рис.8).

Рис. 22 показывает, что в среде с очень высокой концентрацией урана-238 резонансная самоэкранировка даже при 300 кэВ составляет около 1%. Отсюда следует, что область неразрешенных резонансов следует продлить, по крайней мере, до 300 кэВ, как это сделано в JEFF-3.1.

С учетом изложенного рекомендуется принять в РОСФОНД те же границы области неразрешенных резонансов и те же средние резонансные параметры, что и в JEFF-3.1. Параметры, приведенные в файле MF=2, использовать только для расчета факторов самоэкранировки, поскольку во всей области неразрешенных резонансов – до 300 кэВ с помощью этих параметров не удастся реалистично описать энергетическое поведение всех нейтронных сечений.

Что касается неэкранированных сечений, задаваемых в файле 3, то и полное сечение и сечение захвата решено принять такими же, как в ENDF/B-VII. Сечение неупругого рассеяния, принятое в ENDF/B-VII, как видно из рис.21, выше порога возбуждения второго уровня идет заметно выше всех других оценок. Ниже выбор оценки сечения захвата будет подробно обоснован. Здесь же достаточно отметить, что в области неразрешенных резонансов для сечения возбуждения 1-го уровня принимается оценка из ФОНД-2.2, тогда как сечения возбуждения остальных уровней приняты такими же, как в ENDF/B-VII.

Сечение деления в области неразрешенных резонансов весьма мало (см. рис. 23). Оно принимается таким же, как в ENDF/B-VII.

Сечение упругого рассеяния определяется из условия баланса.

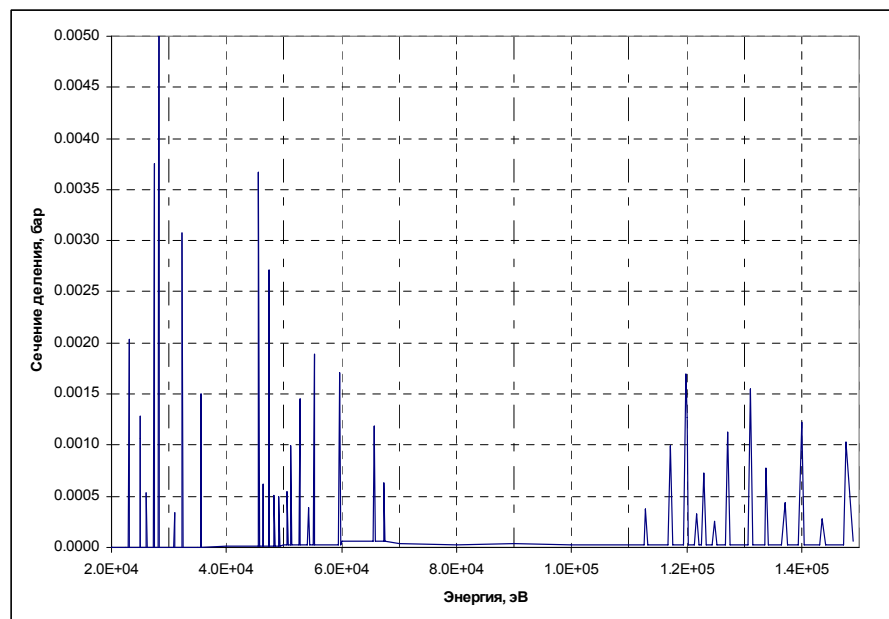


Рис. 23. Сечение деления в области неразрешенных резонансов

5. Нейтронные сечения вне резонансной области

5.1. Полное сечение

На рис. 24 оцененные значения полного сечения сравниваются с экспериментальными данными. Отметим, что полное сечение в ENDF/B-VI было основано на оценке Фрэнера, в которой полное сечение определялось на основе статистического анализа экспериментальных данных с учетом корреляций погрешностей. В ENDF/B-VII полное сечение было слегка (не более, чем на 1.7%) откорректировано в области выше 6 МэВ для лучшего согласия с вновь появившимися данными Абфальтерера.

В JEFF-3.1 принято полное сечение, рассчитанное по оптической модели, параметры которой подобраны по данным не только для урана-238, но и для других актинидов с хорошо известными сечениями.

В JENDL-3.3 при оценке полного сечения использовались как непосредственно экспериментальные данные, так и результаты расчетов на основе модели связанных каналов. Усовершенствованный вариант этой модели использовался и в оценке Маслова и др., что позволило согласованно описать полное и парциальные сечения.

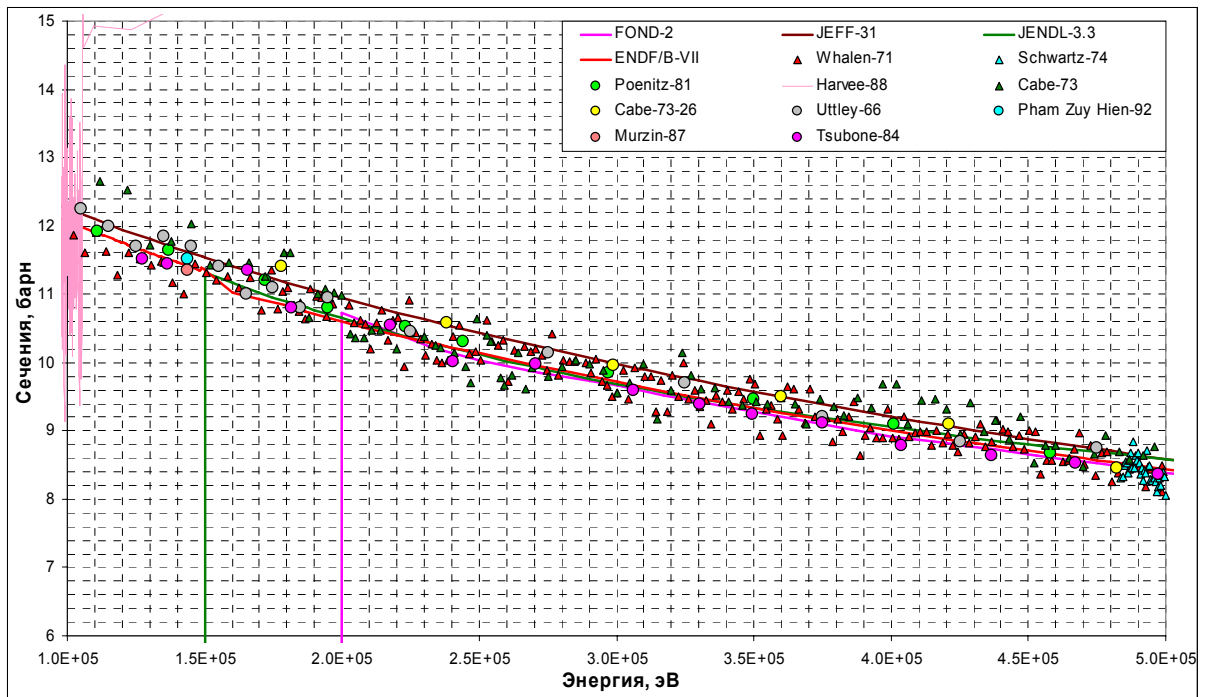


Рис. 24а Сравнение оцененных и измеренных полных сечений

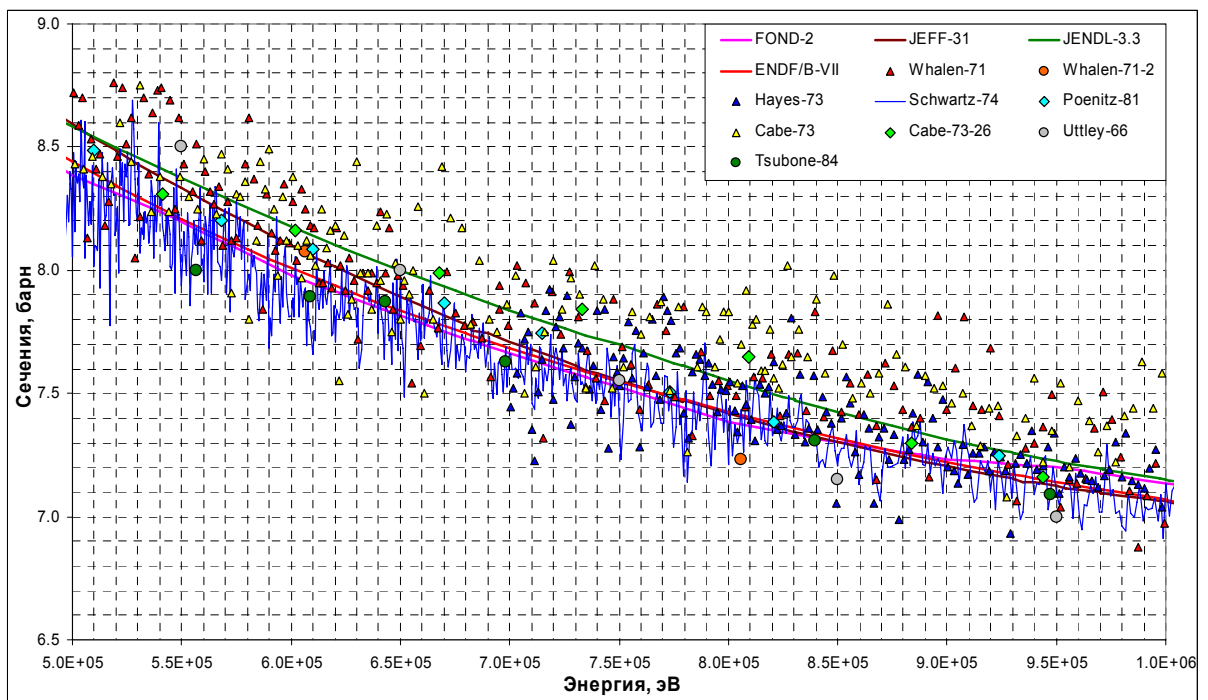


Рис. 24б Сравнение оцененных и измеренных полных сечений

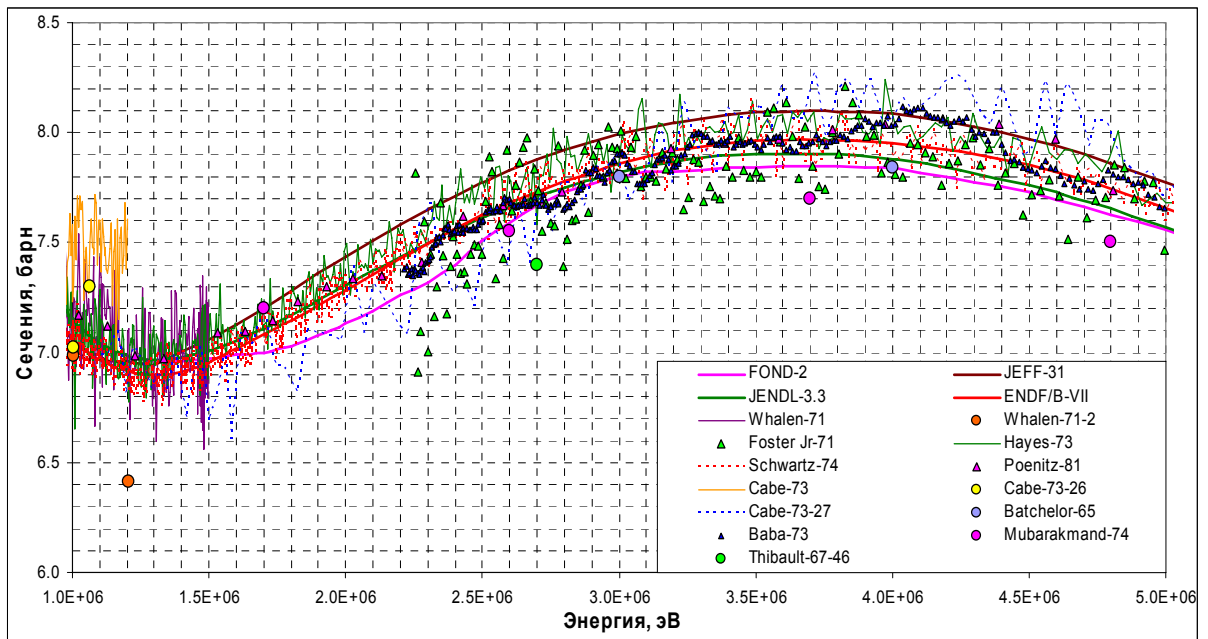


Рис. 24в Сравнение оцененных и измеренных полных сечений

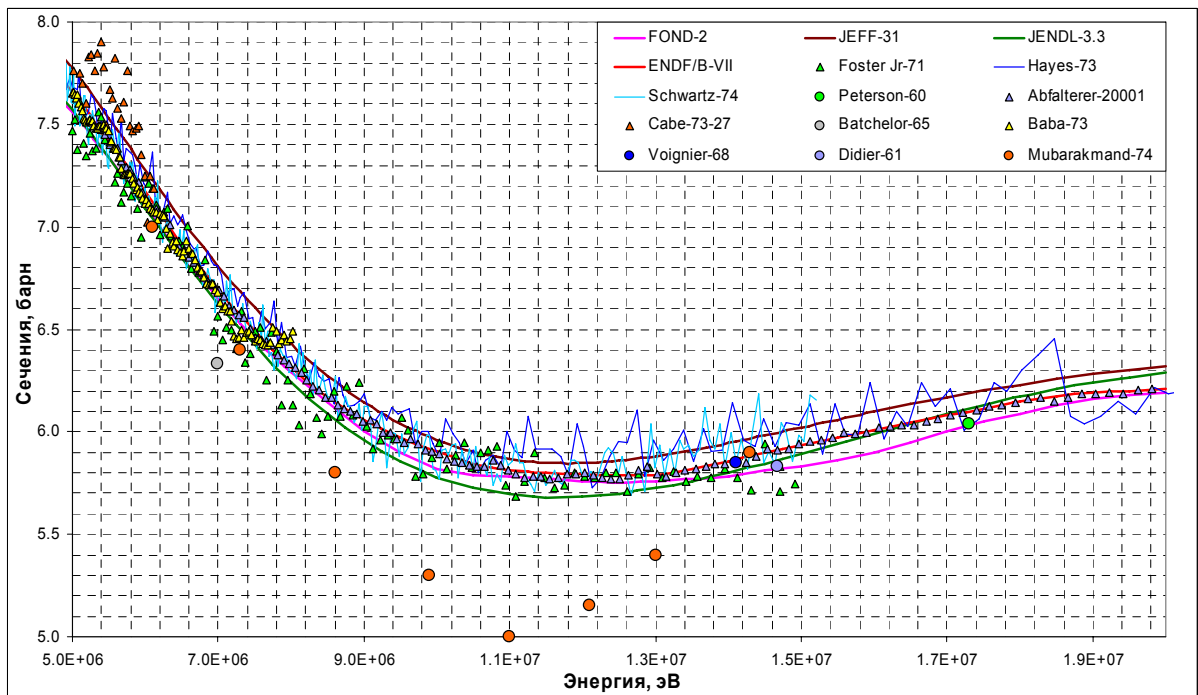


Рис. 24г Сравнение оцененных и измеренных полных сечений

На рис.25 расхождения между значениями полного сечения, принятыми в различных библиотеках показано более наглядно. Из совокупности приведенных данных явствует, что оснований для какого-либо пересмотра данных, принятых в ENDF/B-VII нет. Заметим, что на границе области неразрешенных резонансов (совпадающей с порогом неупругого рассеяния на втором уровне) полное сечение, принятое в ENDF/B-VII, отличается от рассчитанного по средним резонансным параметрам, взятым из ФОНД-2.2 (и рекомендованным для включения в РОСФОНД) менее, чем на 0.5%. Таким образом, никакой специальной подложки в полное сечение для согласования с результатами расчетов по резонансным параметрам вводить не требуется.

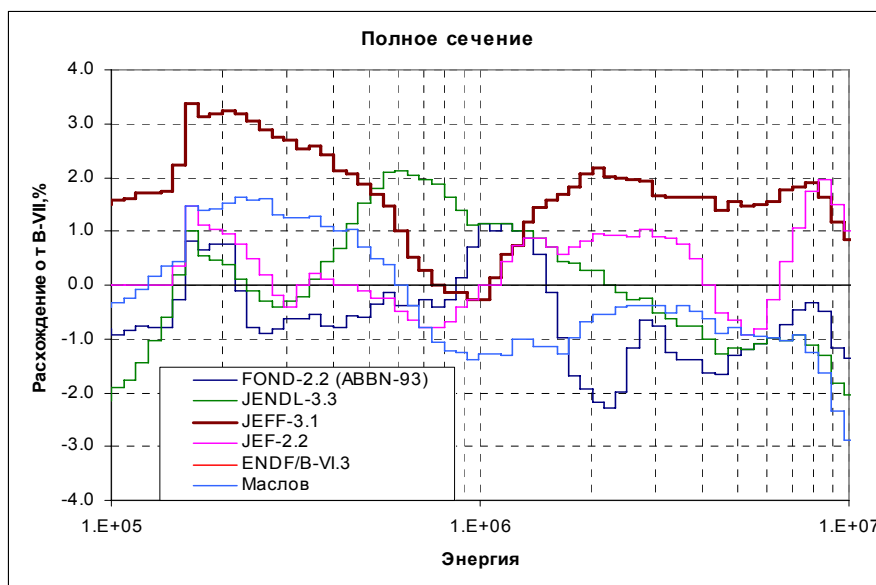


Рис. 25. Расхождения в оцененных полных сечениях.

5.2. Сечение радиационного захвата.

Выше области неразрешенных резонансов вклад сечения радиационного захвата в полное сечение составляет менее 2%. Таким образом, выбор значений сечения захвата может производиться независимо от выбора значений полного сечения. На рис.26 оцененные значения сечения захвата сравниваются с результатами измерений, приведенными в базе данных EXFOR.

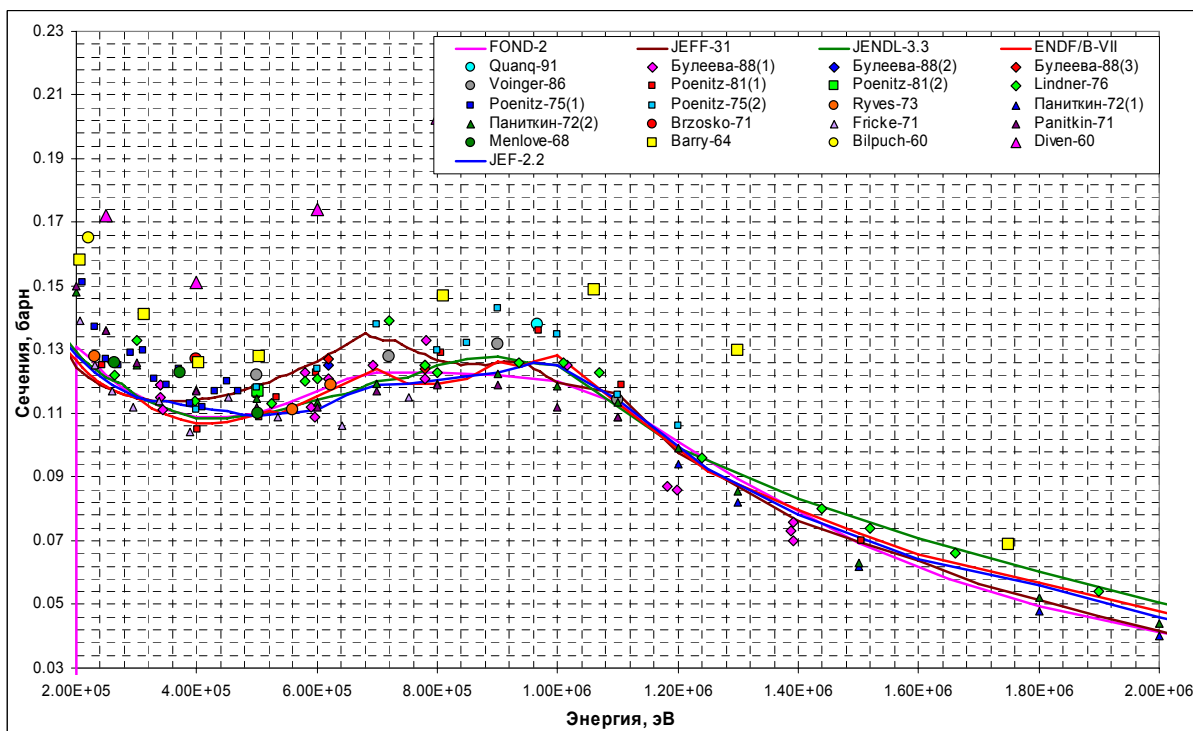


Рис.26а. Сравнение оцененных и измеренных сечений захвата

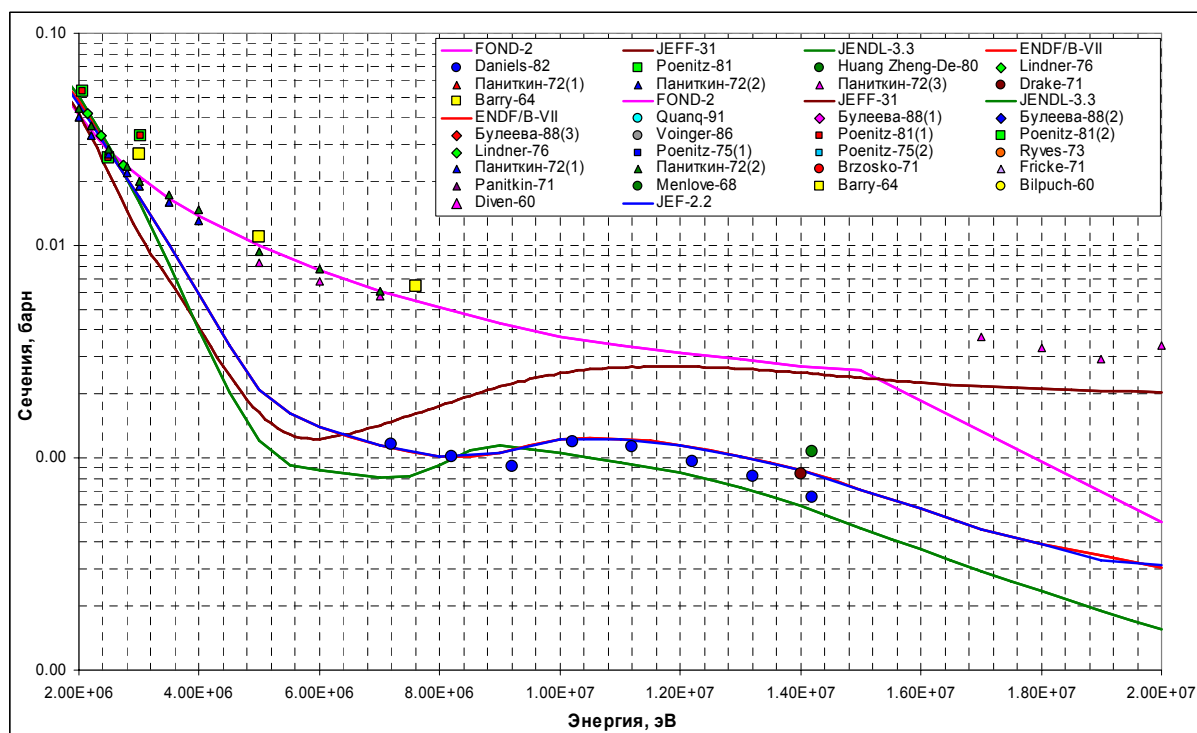


Рис.266. Сравнение оцененных и измеренных сечений захвата

Как видно, при энергиях ниже 2 МэВ ни одна из оценок не противоречит имеющимся экспериментальным данным. Правда сечение, принятое в JEFF-3.1, в интервале 0.4 – 0.8 МэВ идет заметно выше всех других оценок, что трудно оправдать имеющимися экспериментальными данными. Обращает на себя внимание и структура сечения захвата, проявляющаяся в оценках ENDF/B-VII и JEFF-3.1 в интервале 0.6 – 0.8 МэВ. На рис. 16 эта структура сравнивается со структурой сечения неупругого рассеяния, дающего в рассматриваемой области энергии определяющий вклад в сечение неупругих взаимодействий. Довольно резкое увеличение сечения неупругого рассеяния при 680 кэВ вполне объяснимо: здесь открывается возможность неупругого рассеяния с возбуждением 5-го уровня ²³⁸U, имеющего энергию 680 кэВ. Это,

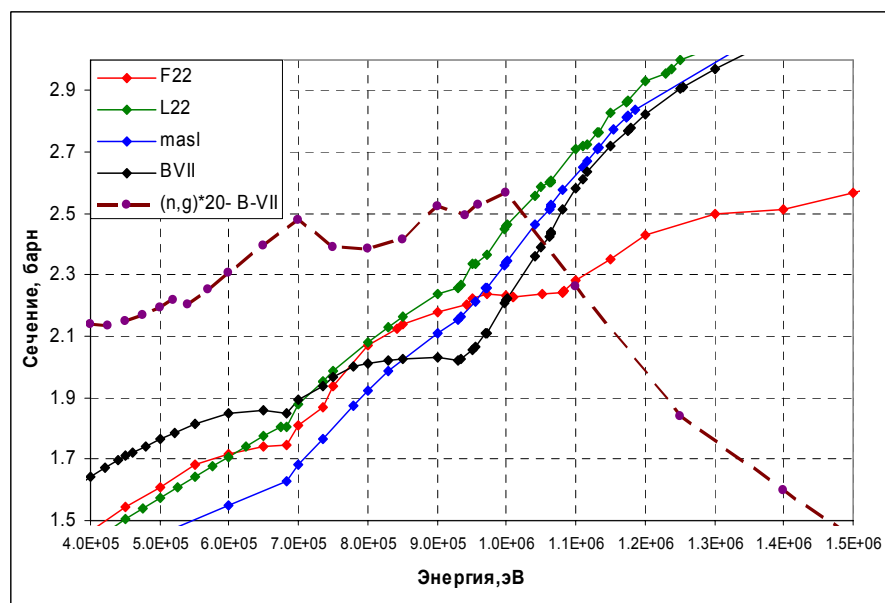


Рис.27. Сравнение структур сечения неупругого рассеяния и захвата (умножено на 20).

несомненно, должно привести к снижению сечения захвата, что и наблюдается в оценке ENDF/B-VII. Спад сечения захвата при 900 кэВ также коррелирует с открытием новых каналов неупругого рассеяния, а спад при энергиях выше 1 МэВ – также и конкуренцией со стороны деления. Таким образом, структура сечения захвата, проявившаяся в оценке ENDF/B-VII, хотя и не основана на экспериментальных данных, представляется физически оправданной.

При энергиях выше 3 МэВ, оценки ENDF/B-VII, JEF-2.2 и JENDL-3.3 опираются на экспериментальные данные Дрейка, Дениелса и Хуанг Дзэнг-Де. Все эти результаты получены путем регистрации гамма-лучей захвата. Как видно, подтверждая друг друга, они лежат существенно ниже результатов Паниткина и Толстикова, в которых измерения велись с помощью активационной методики в весьма плохих фоновых условиях (фон составлял до 80% общего счета). Ранние результаты Барри также были получены с помощью активационной методики. Как видно из рис. 14а, эти результаты лежат значительно выше совокупности других данных и при более низких энергиях, и едва ли могут рассматриваться как подтверждение данных Паниткина-Толстикова. Поэтому опора при оценке на данные, полученные по гамма-лучам захвата представляется оправданной.

Заметим, что при выполнении оценки для ФОНД-2.2 эти данные не могли быть учтены т.к. они еще не были получены. Естественно, что оценка опиралась на данные Паниткина-Толстикова.

Ход сечения захвата быстрых нейтронов, принятый в JEFF-3.1 представляется непоследовательным: при энергиях 4 – 6 МэВ активационные данные игнорируются и кривая энергетической зависимости сечения направлена к данным Дениелса. Однако затем ход кривой достаточно резко меняется и к 17 МэВ сечение возрастает до значений, близких к результатам Паниткина.

Изложенное показывает, что оценка сечения захвата, принятая в ENDF/B-VII, является наиболее убедительной и может быть рекомендована для включения ее в РОСФОНД.

5.3. Сечение деления.

На рис. 28 оцененные значения сечения деления сравниваются с результатами измерений. Как видно, все оценки, кроме JEFF-3.1 очень хорошо согласуются друг с другом и находятся в согласии с результатами измерений. Причины отличия JEFF-3.1 от этой группы оценок трудно понять: экспериментальными данными их объяснить затруднительно.

Заметим, что сечение деления урана-238 в рассматриваемой нами версии ENDF/B-VII согласовано с оценкой сечения деления, выполненной в 2005 г. в рамках координационной программы МАГАТЭ по нейтронным стандартам.

На рис. 29 проводится сравнение результатов измерений отношений сечений ^{238}U и ^{235}U с оцененными данными из ENDF/B-VII. Отметим, что сечение деления ^{235}U из этой библиотеки принято и в РОСФОНД. Из рис. 29а видно, что при оценке сечения деления для ^{238}U вблизи порога опирались на измерения отношения сечений, выполненные Беренсом. Результаты этой работы согласуются с более ранними данными Сериякса, но лежат несколько выше результатов других авторов. Предпочтение, отданное данным Беренса, оправдывается превосходным согласием сечения деления с результатами прямых измерений (см. рис. 17а). Таким образом, есть все основания принять в РОСФОНД оценки сечения деления из ENDF/B-VII.

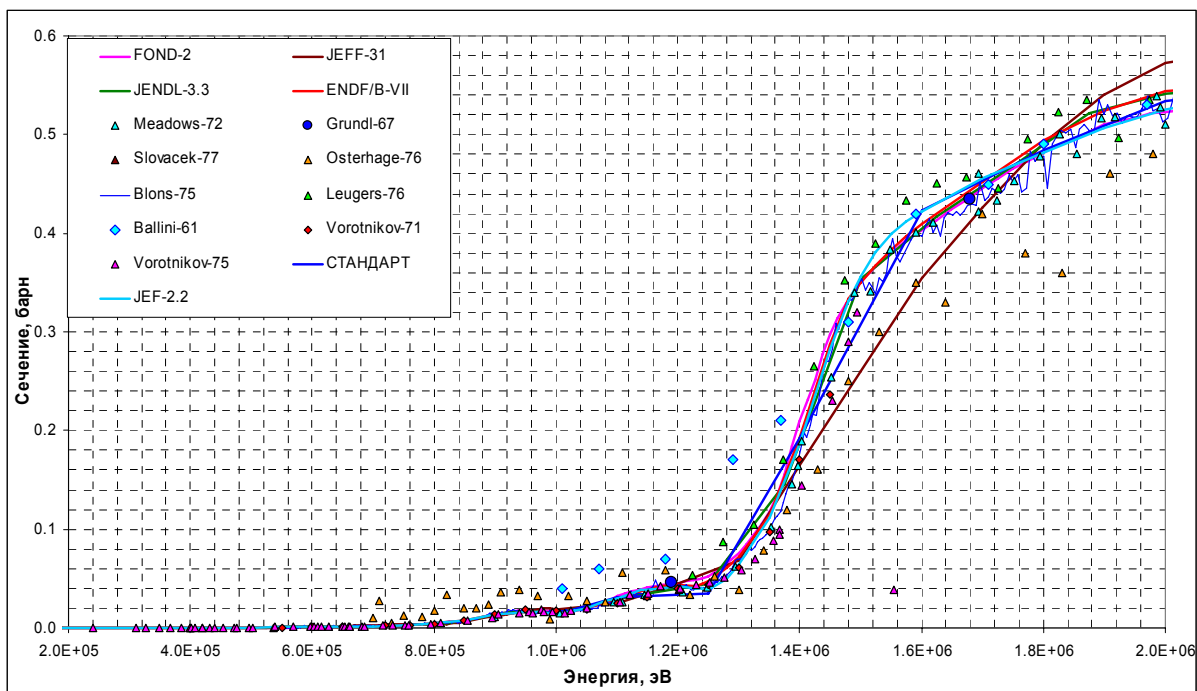


Рис. 28а. Сравнение оцененных и измеренных значений сечения деления ^{238}U

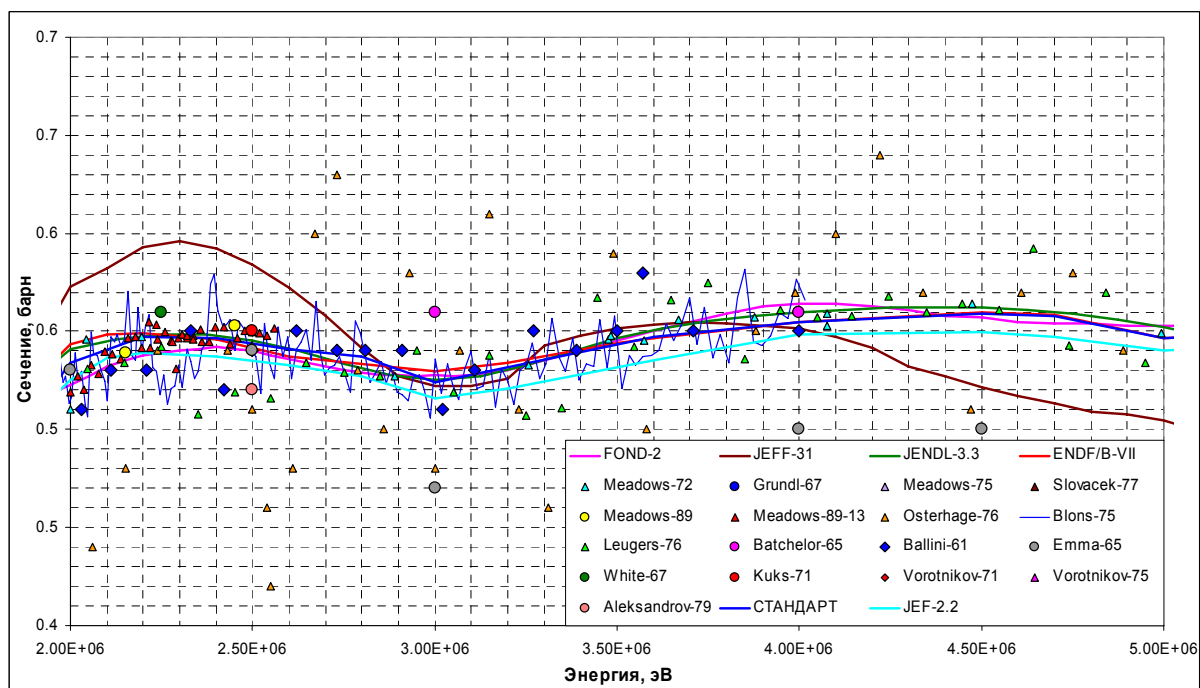


Рис.28 б. Сравнение оцененных и измеренных значений сечения деления ^{238}U

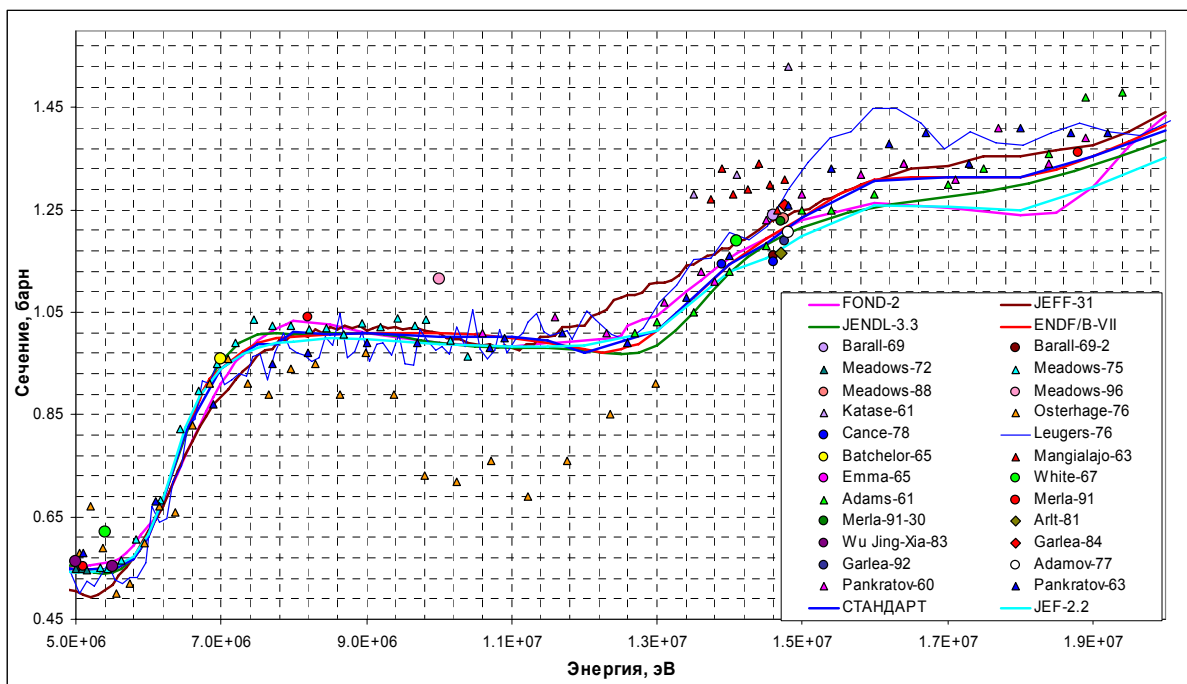


Рис.28 в. Сравнение оцененных и измеренных значений сечения деления ^{238}U

В области 8 -12 МэВ отношение сечений из ENDF/B-VII представляется несколько завышенным относительно экспериментальных данных (при 10 МэВ – на 3 -4% - см. рис. 17в и 18б). В дальнейших версиях РОСФОНДа это несоответствие (не существенное с точки зрения инженерных расчетов) желательно устранить. К сожалению, ход сечения деления, предложенный экспертами МАГАТЭ, заданный на слишком грубой сетке, не решает эту проблему.

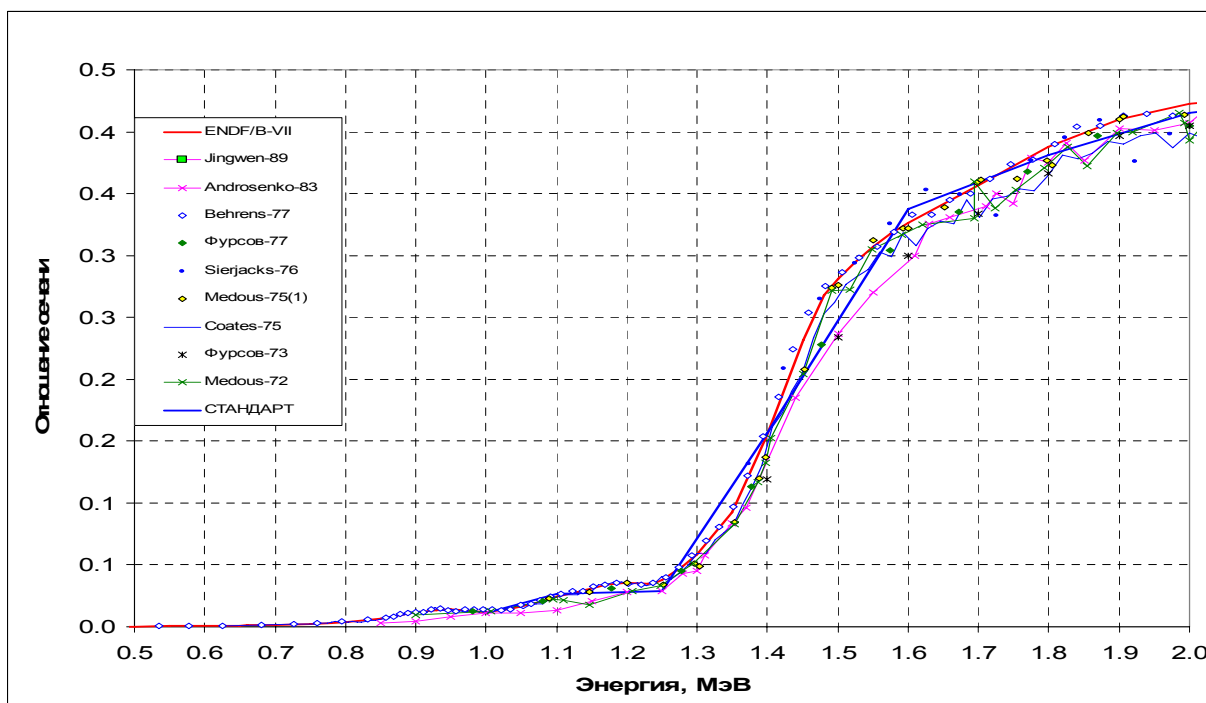


Рис.29а. Сравнение оцененных и измеренных отношений сечения деления ^{238}U к сечению деления ^{235}U

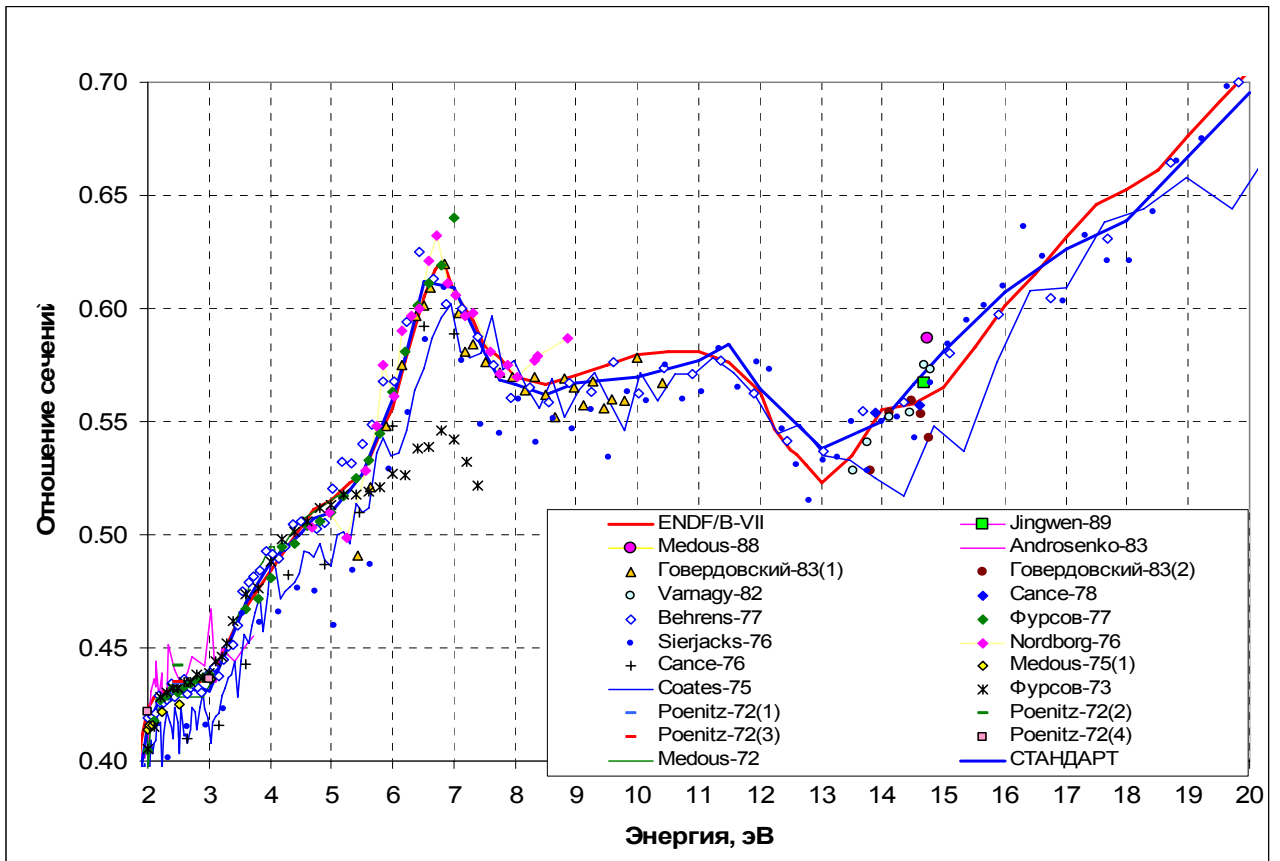


Рис.29б. Сравнение оцененных и измеренных отношений сечения деления ^{238}U к сечению деления ^{235}U

На рис. 30 наряду с полным сечением деления приведены сечения парциальных реакций $(n,n'f)$, $(n,2nf)$ и $(n,3nf)$ – в соответствии с оценкой ENDF/B-VII. Не будучи практически значимыми сами по себе, эти вклады позволяют понять причины, по которым полное сечение деления испытывает резкие подъемы при ~ 6 , ~ 12 и ~ 18 МэВ.

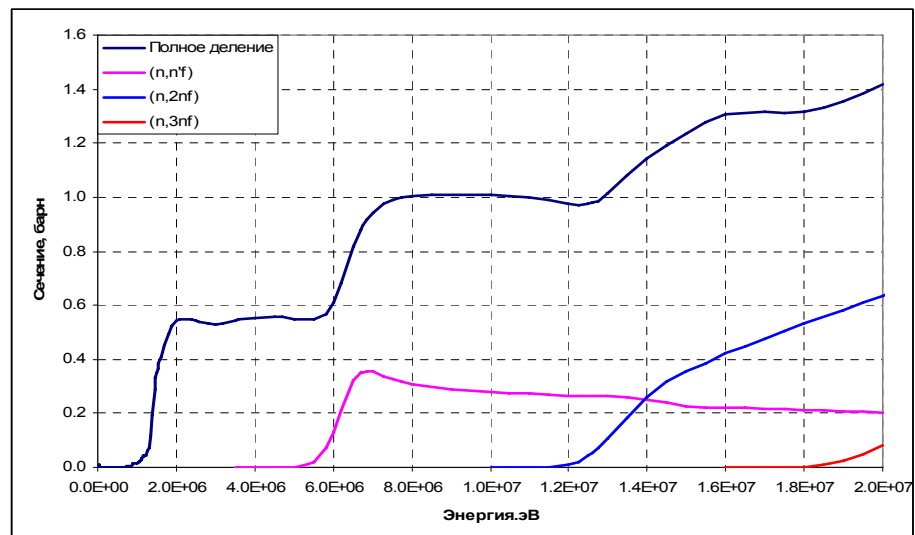


Рис.30. Парциальные вклады в сечение деления (данные ENDF/B-VII)

5.4. Сечение неупругого рассеяния.

Во всех обсуждаемых оценках сечение неупругого рассеяния описывается суммой сечений возбуждения отдельных уровней ^{238}U и возбуждением континуума уровней. Схемы уровней принятые при оценке и границы области возбуждения континуума несколько различаются. Об этих различиях можно судить по таблице 1, в первом столбце которой приводятся в порядке возрастания энергии уровней, встречавшиеся хотя бы в одной оценке, а в остальных строках – номера, приписанные этим уровням в соответствующих оценках. Отсутствие номера означает, что данный уровень в оценке не описывается. Номера уровней, энергии которых лежат ниже границы возбуждения континуума в данной оценке, набраны жирным шрифтом. Энергии уровней, описанных во всех оценках, также набраны жирным.

Таблица 1. Схемы уровней ^{238}U , принятые в различных оценках

| Энергия, МэВ | ENDF/B-VII | JEFF-3.1 | JENDL-3.3 | Маслов | Энергия, МэВ | ENDF/B-VII | JEFF-3.1 | JENDL-3.3 | Маслов |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.0449 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1.1689 | | 27 | 21 | 26 |
| 0.1484 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1.17 | 22 | | 22 | 27 |
| 0.3072 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1.209 | | 28 | | |
| 0.5183 | 4 | 4 | | 4 | 1.2242 | | | 23 | |
| 0.6801 | 5 | 5 | 4 | 5 | 1.2326 | | | 24 | |
| 0.7319 | 6 | 6 | 5 | 6 | 1.25 | 23 | 29 | | |
| 0.7757 | 7 | 7 | | 7 | 1.2692 | | | 25 | |
| 0.8267 | 8 | 8 | 6 | 8 | 1.2785 | | | 26 | |
| 0.9257 | 9 | 9 | 7 | 9 | 1.2858 | | | 27 | |
| 0.9308 | 10 | 10 | 8 | 10 | 1.44 | 24 | 30 | | |
| 0.9502 | 11 | 11 | 9 | 11 | 1.59 | 25 | | | |
| 0.9663 | 12 | 12 | 10 | 12 | 1.75 | 26 | 31 | | |
| 0.9673 | 13 | 13 | 11 | 13 | 1.85 | 27 | | | |
| 0.993 | 14 | 14 | | 14 | 1.95 | 28 | 32 | | |
| 0.9975 | 15 | 15 | 12 | 15 | 2.15 | 29 | 33 | | |
| 1.0373 | 16 | 16 | 13 | 16 | 2.3 | 30 | 34 | | |
| 1.0566 | 17 | 17 | 14 | 17 | 2.39 | 31 | | | |
| 1.0595 | 18 | 18 | 15 | 18 | 2.4928 | 32 | 35 | | |
| 1.0603 | 19 | 19 | 16 | 19 | 2.94 | 33 | 36 | | |
| 1.0765 | 20 | 20 | | 20 | 3.189 | 34 | 37 | | |
| 1.1057 | 21 | 21 | 17 | 21 | 3.388 | 35 | 38 | | |
| 1.107 | | 22 | | | 3.538 | 36 | 39 | | |
| 1.1126 | | | 18 | 22 | 3.637 | 37 | | | |
| 1.127 | | 23 | 19 | 23 | 3.737 | 38 | | | |
| 1.1283 | | 24 | 20 | 24 | 3.837 | 39 | | | |
| 1.1503 | | 25 | | 25 | 3.909 | 40 | | | |
| 1.1675 | | 26 | | | | | | | |
| Порог континуума (МэВ): | | | | | | 1.1126 | 1.21 | 1.29 | 1.18 |

Из таблицы видно, что в ENDF/B-VII ниже границы континуума не пропущено ни одного уровня, описанного в какой-либо оценке. Возбуждение не описываемых явно в этой оценке уровней с энергиями в интервалах от 1.1057 до 1.17 МэВ, от 1.17 до 1.25 МэВ, от 1.25 до 1.44 МэВ и других не описанных явно уровней учтено в сечении возбуждения континуума. Таким образом, по полноте учета схемы уровней оценка ENDF/B-VII практически не уступает другим, явно описывающим возбуждение уровней с энергиями от 1.1057 до 1.17 МэВ, но не всех, а только части.

На рис. 31 показаны вклады первых 11 уровней в полное сечение неупругого рассеяния (по данным ENDF/B-VII)

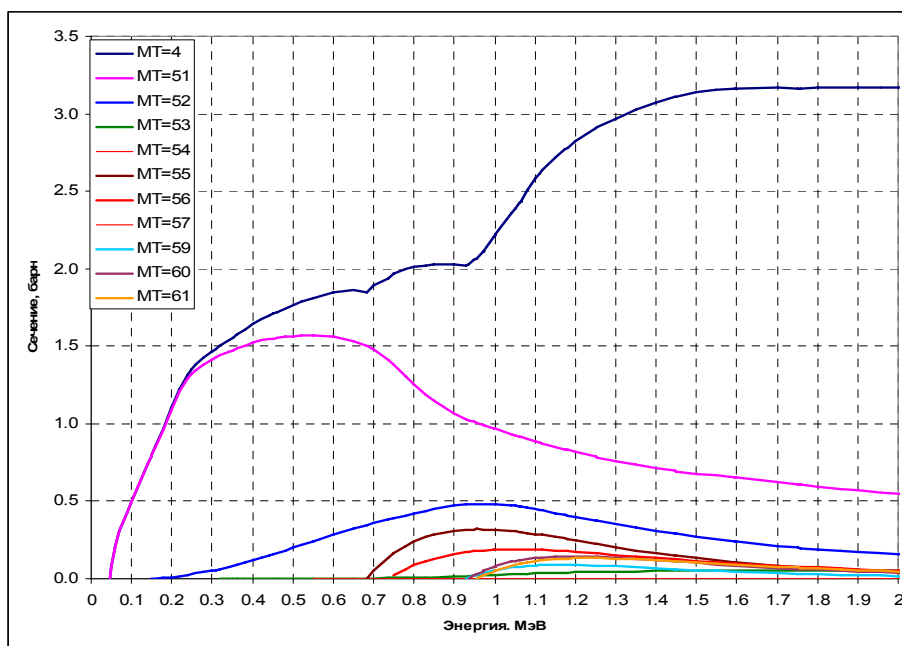


Рис. 31. Вклады неупругого рассеяния на первых уровнях в полное сечение неупругого рассеяния.

На рис. 32 оценки значений полного сечения неупругого рассеяния сравниваются между собой. Как видно, оценка, принятая в ENDF/B-VII, в интервале 200 -600 кэВ весьма заметно превышает другие современные оценки, а в окрестности 900 кэВ, наоборот, лежит ниже их. В связи с этим сравним оцененные сечения неупругого рассеяния с измеренными (рис. 22).

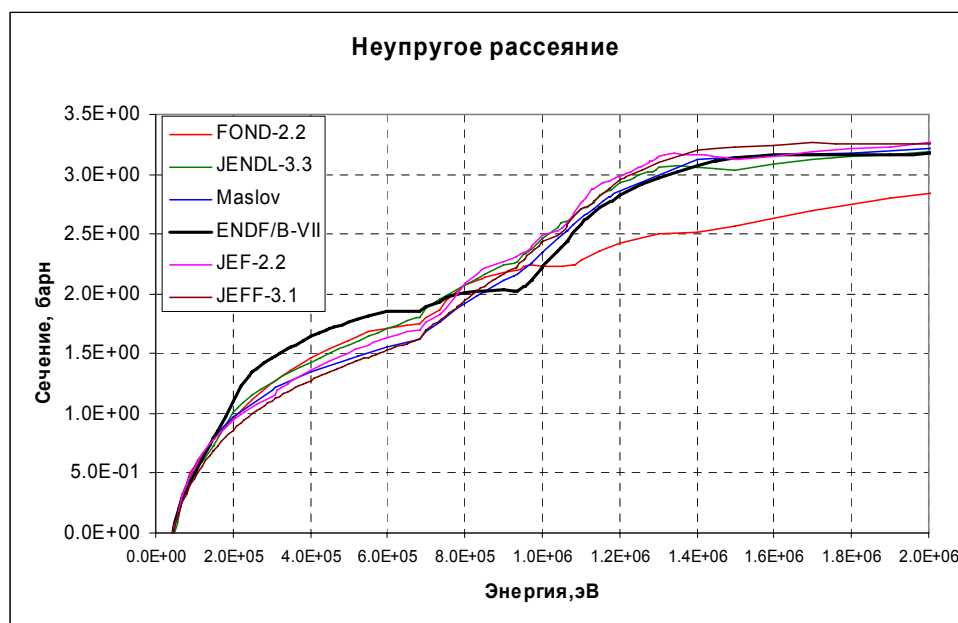


Рис.32а. Сравнение оцененных значений сечения неупругого рассеяния

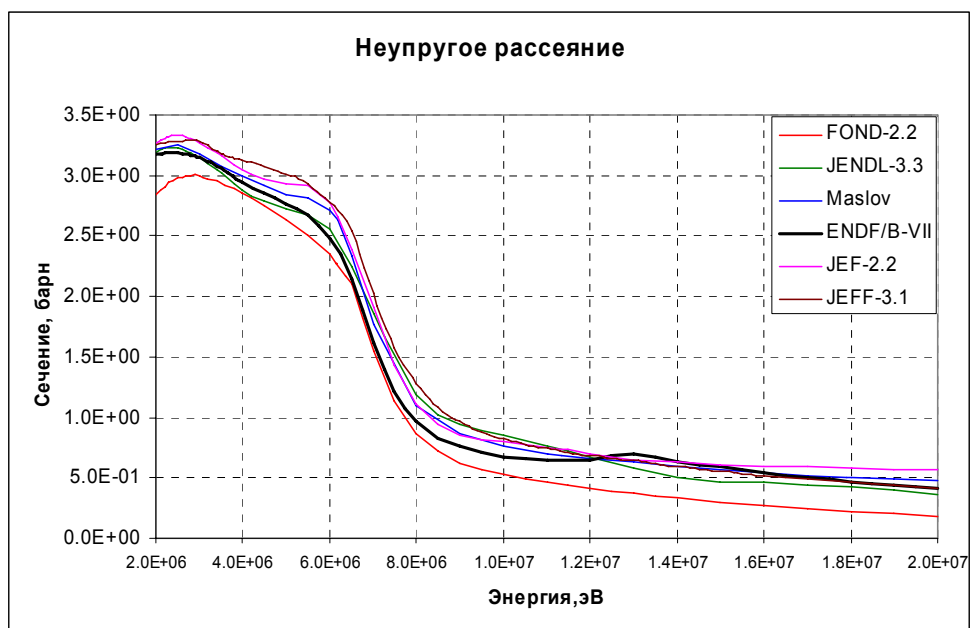


Рис.326. Сравнение оцененных значений сечения неупругого рассеяния

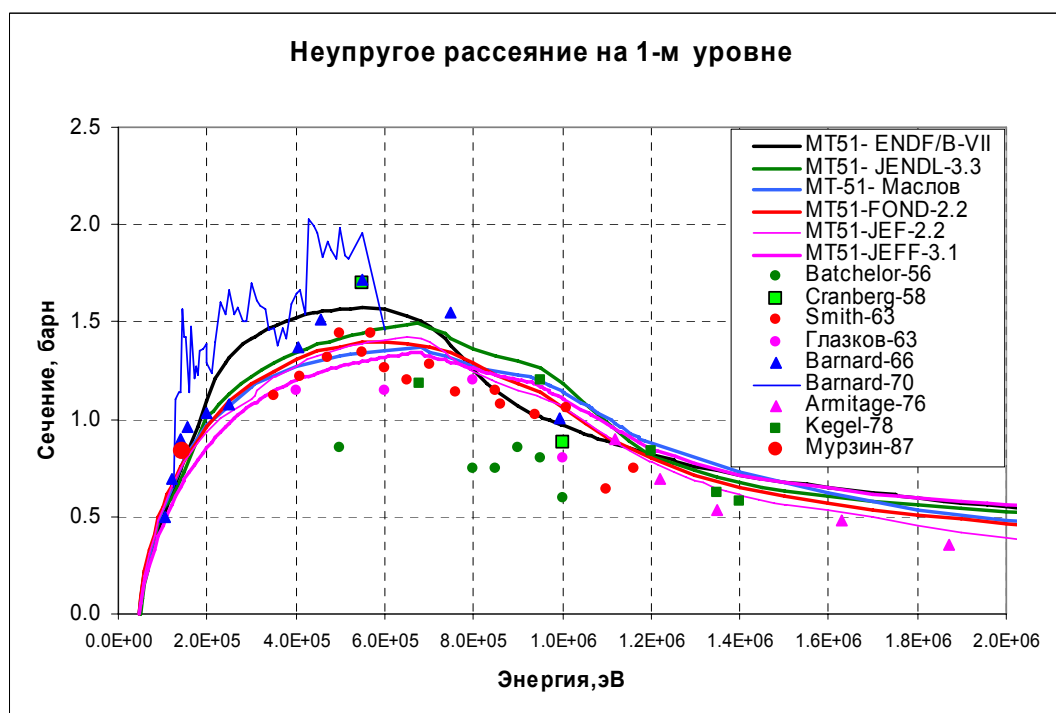


Рис.33а. Неупругое рассеяние с возбуждением 1-го (2+) уровня

Из данных, представленных на рис. 33, видно, что отличия поведения сечения неупругого рассеяния в оценке ENDF/B-VII от других оценок обусловлены большим весом, который был придан данным Барнарда 1970 г. Как и в других современных оценках, сечения неупругого рассеяния на первых трех уровнях ротационной полосы проводились путем теоретических расчетов по оптической модели с учетом связи каналов, так что различия в результатах оценки отражают скорее различия в принятых параметрах модели, чем в методологии оценки. Резкий подъем полного сечения неупругого рассеяния при 0.7 МэВ, проявляющийся во всех оценках, обусловлен открытием каналов возбуждения 5-го и 6-го уровней (см. рис.19). Следующий резкий подъем примерно пр 0.9 МэВ обусловлен открытием каналов возбуждения целой группы уровней (см. табл. 1). В этой области результаты различных оценок заметно различаются.

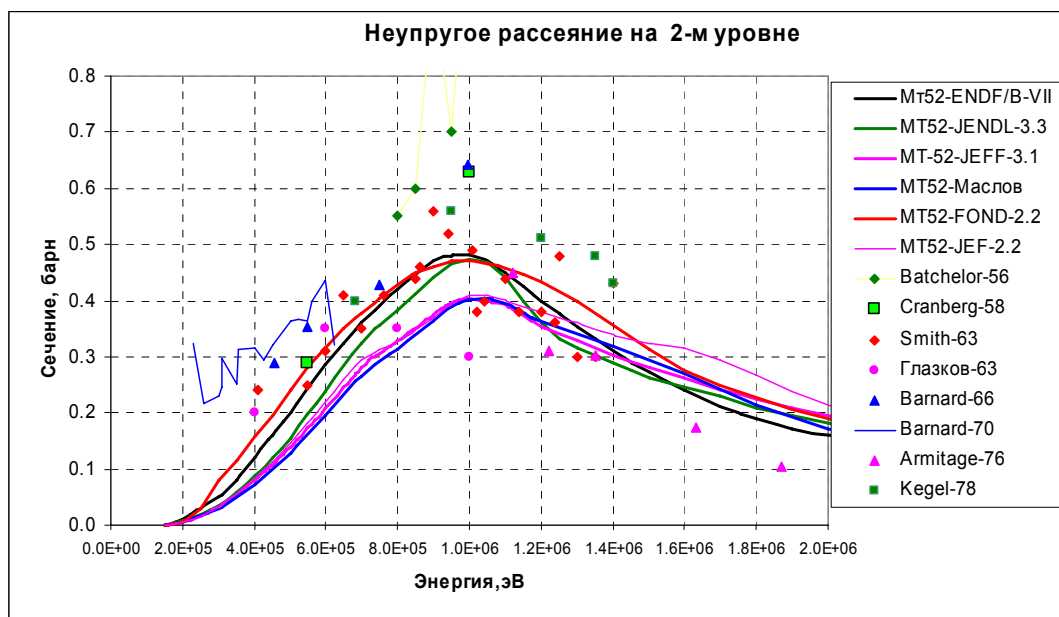


Рис. 33б. Неупругое рассеяние с возбуждением второго (4+) уровня.

Экспериментальные данные не позволяют отдать предпочтение какой-нибудь одной из оценок. Учитывая, что средние резонансные параметры в области неразрешенных резонансов приняты в соответствии с оценкой ФОНД-2.2; что эти параметры были получены исходя из требования описания сечения неупругого рассеяния на первом уровне ^{238}U ; что ход сечения возбуждения этого уровня в области энергий ниже 800 кэВ лежит между результатами других оценок, а при 800 кэВ совпадает с оценкой ENDF/B-VII (см. рис. 22а) – учитывая всё это решено включить в РОСФОНД сечение возбуждения первого уровня в области от порога до 800 кэВ из ФОНД-2.2. Что касается сечений возбуждения более высоколежащих уровней и сечения возбуждения первого уровня при энергиях выше 800 кэВ, то их решено принять в соответствии с оценкой ENDF/B-VII. Заметим, что сечение увода нейтронов под порог деления ^{238}U , рассчитанное по данным ENDF/B-VII, превышает таковое, рассчитанное по данным ФОНД-2.2 всего на 2.4%. Сечения увода, рассчитанные по данным других библиотек, отличаются от данных ФОНД-2.2 сильнее: JEFF-3.1 на +7.8%, Маслов – на +3.4%, JENDL-3.3 – на -10.6%, ENDF/B-VI.7 – на -10.4%. Сечение увода, полученное из ФОНД-2.2 было верифицировано на основе данных интегральных экспериментов и согласие с ним является аргументом в пользу выбора оценки сечения неупругого рассеяния из ENDF/B-VII.

5.5. Сечения реакций (n,xn).

3.5.1 Сечение реакции (n,2n)

Образующийся в результате этой реакции ^{237}U испытывает бета-распад с периодом 6.75 дней, что позволяет применять для измерения сечения активационный метод. На рис. 34 оцененные значения сечения реакции $^{238}\text{U}(n,2n)$ сравниваются с результатами экспериментов, выполненных за последние 35 лет. Экспериментальные погрешности, как правило, меньше разброса данных и потому не приводятся. По разброс результатов оценки позволяет судить о точности современного знания рассматриваемого сечения. Данные ENDF/B-VII с точки зрения соответствия экспериментальным данным представляются наиболее оправданными. Важно и то, что оценка этого сечения выполнена согласованно с уже принятой оценкой сечения деления.

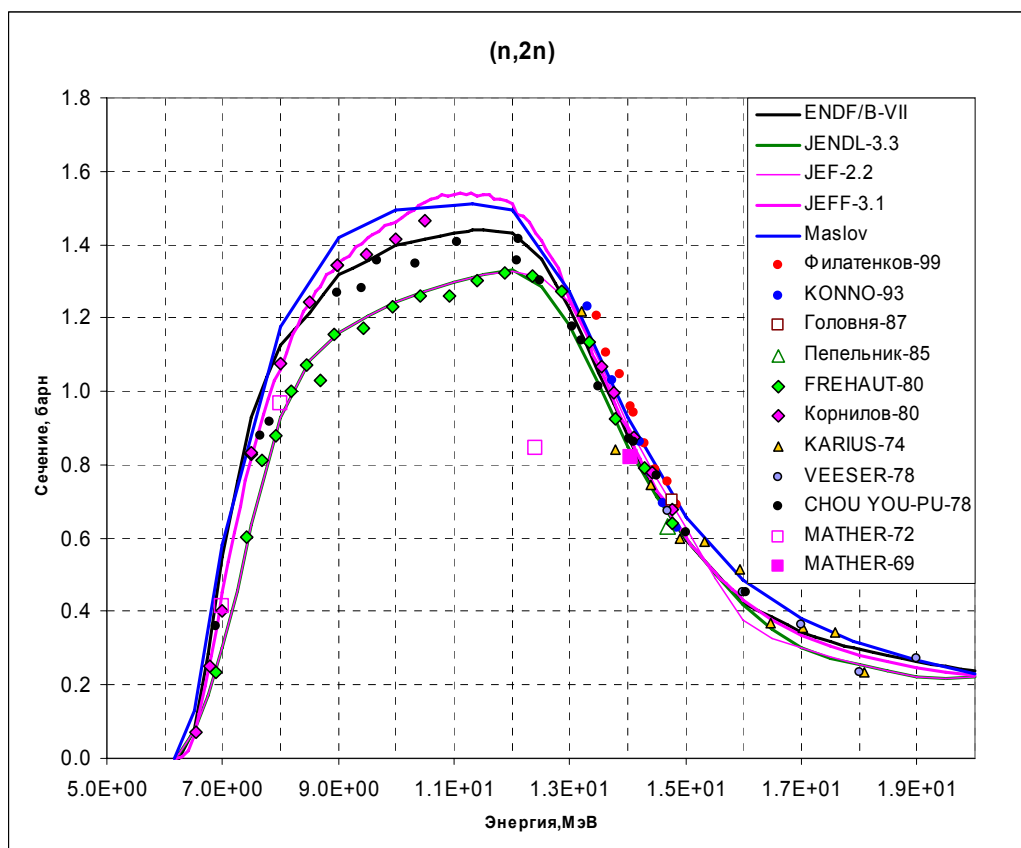


Рис. 34. Сечение реакции (n,2n)

3.5.2 Сечение реакции (n,3n)

Измерение сечения этой реакции намного сложнее, поскольку образующийся в результате ^{236}U обладает очень низкой активностью (период полураспада 23.415 млн. лет). Основной метод регистрации – по множественности нейтронов с достаточно сложным отделением от вклада деления. На рис. 35 дано сравнение результатов оценок с имеющимися в базе данных EXFOR экспериментальными данными. Как видно, и в этом случае оценка ENDF/B-VII приемлемо согласуется с экспериментальными данными и ее целесообразно принять в библиотеку РОСФОНД.

5.5.3 Сечение реакции (n,4n)

Сечение этой реакции отлично от нуля лишь на границе рассматриваемого энергетического диапазона. На рис. 36 оцененные данные сравниваются с единственным экспериментом, данные которого содержатся в базе EXFOR. Оценка ENDF/B-VII, совпадающая с JEFF-3.1, вполне приемлема и в этом случае.

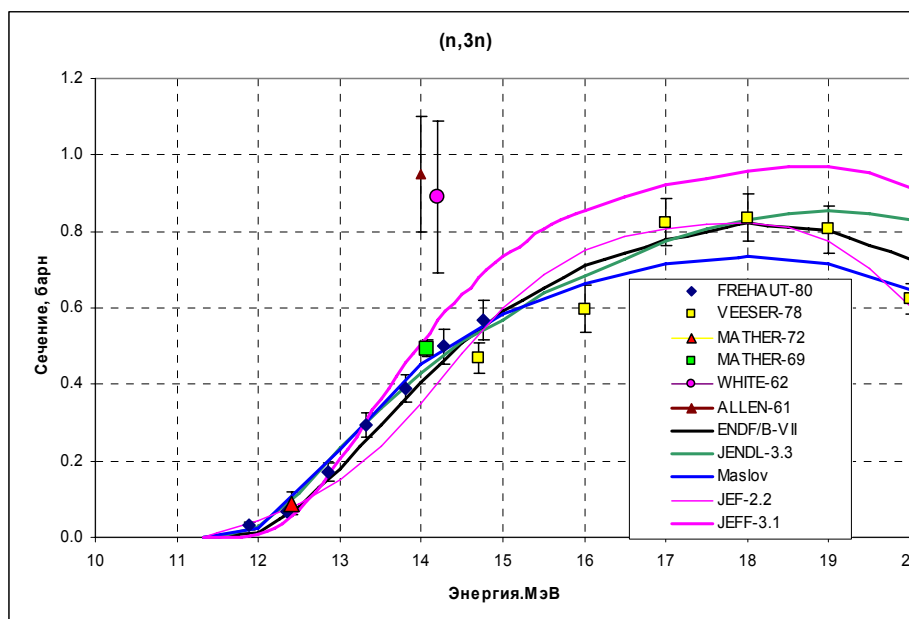


Рис.35. Сечение реакции (n,3n)

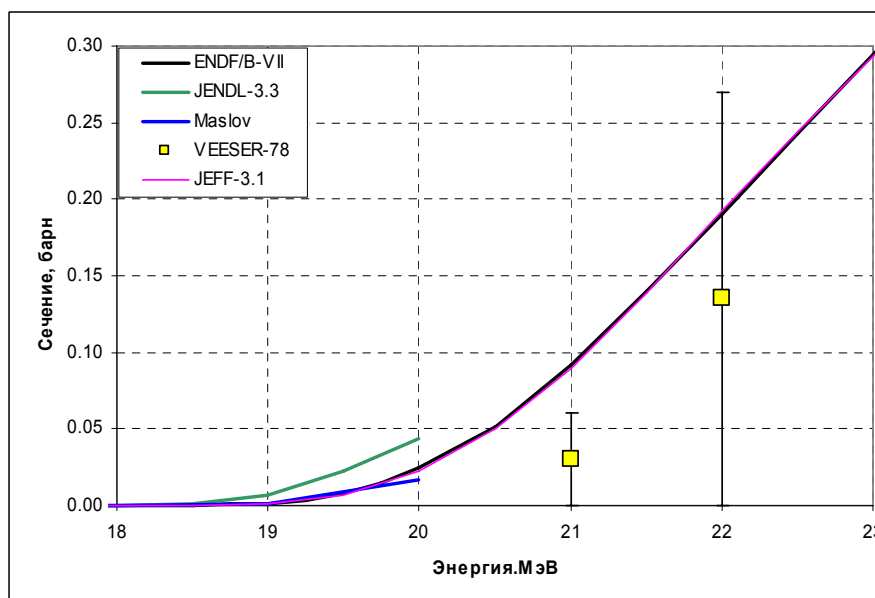


Рис. 36. Сечение реакции (n,4n)

5.6. Сечения реакций с вылетом заряженных частиц.

Из за высокого кулоновского барьера сечения реакций с вылетом заряженных частиц малы. Реакция $^{238}\text{U}(n,\alpha)^{235}\text{Th}$ экзоэнергетична; тем не менее, ее сечение даже при энергиях выше 10 МэВ измеряется миллибарнами. Не намного больше и сечение реакции $^{238}\text{U}(n,p)^{238}\text{Pa}$. Продукты этих реакций бета-активны с периодами полураспада 7.1 мин и 2.3 мин, что позволило определить сечения методом активации. Однако экспериментальные данные скудны (см. рис.26 и 27). Оцененные данные о сечениях этих реакций содержатся лишь в библиотеках EAF-99 и EAF-2003. На рис. 37 и 38 они сравниваются с имеющимися экспериментальными данными. Различия между EAF-99 и EAF-2003 касается только поведения сечения (n,α) в области низких энергий (см. рис. 39). В РОСФОНД решено включить эти оценки из EAF-2003, несколько изменив ход сечения реакции (n,α) в области промежуточных энергий (см. рис.28) и соответственно уменьшив сечение упругого рассеяния.

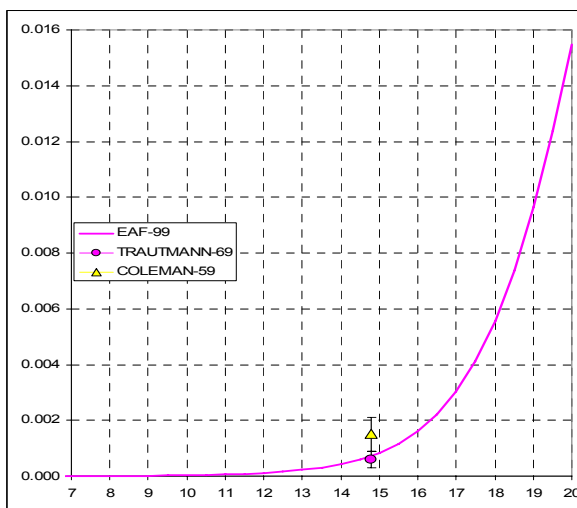


Рис. 37. Сечение реакции (n, α)

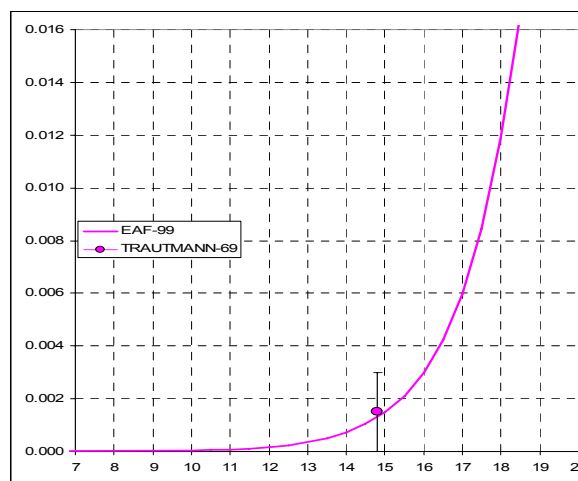


Рис. 38. Сечение реакции (n,p)

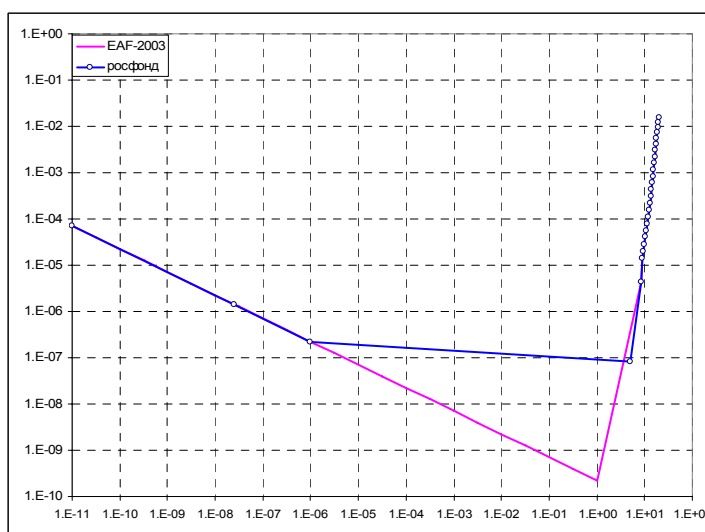


Рис.39. Поведение сечения реакции(n, α) при низких энергиях.

6. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

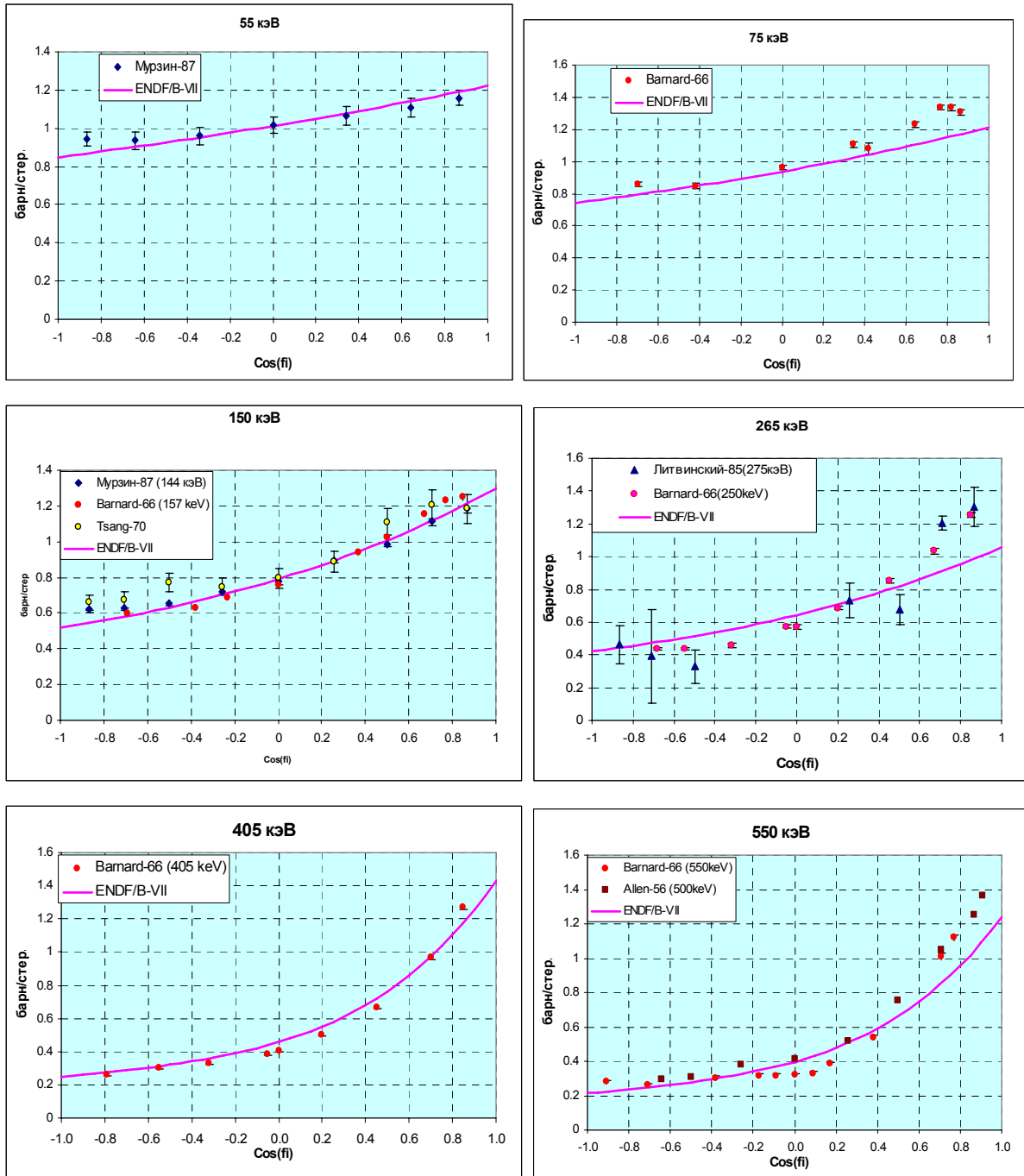
6.1. Анизотропия упругого рассеяния

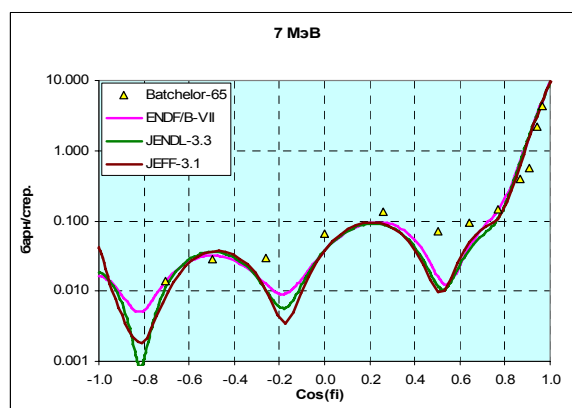
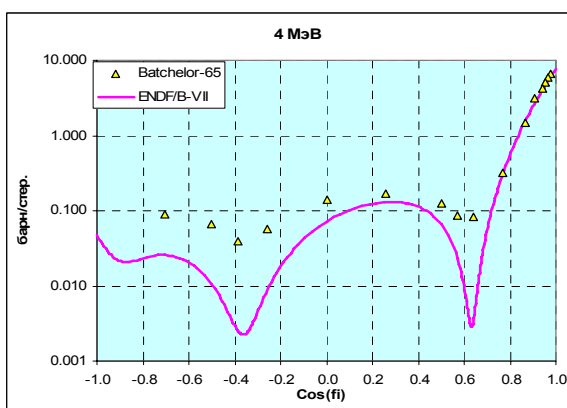
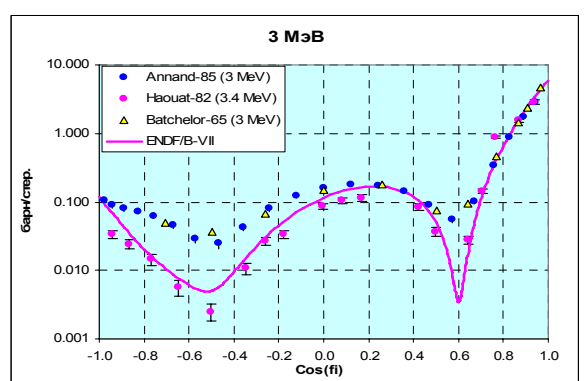
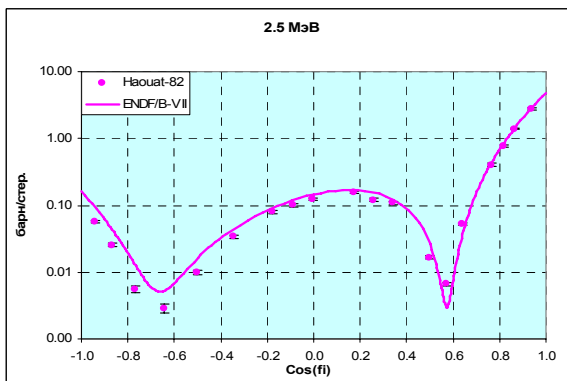
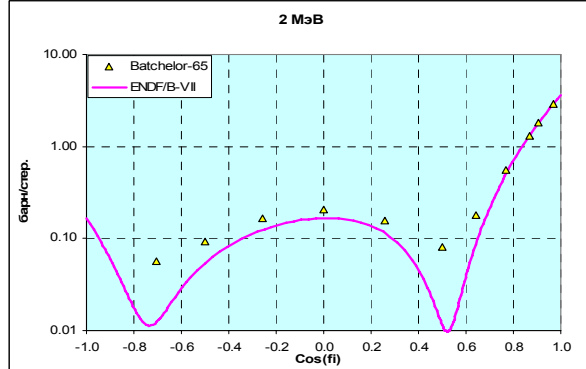
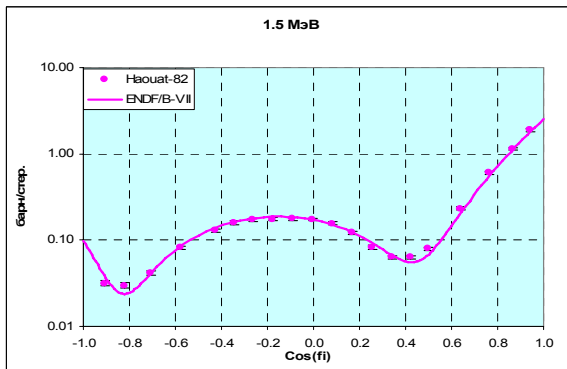
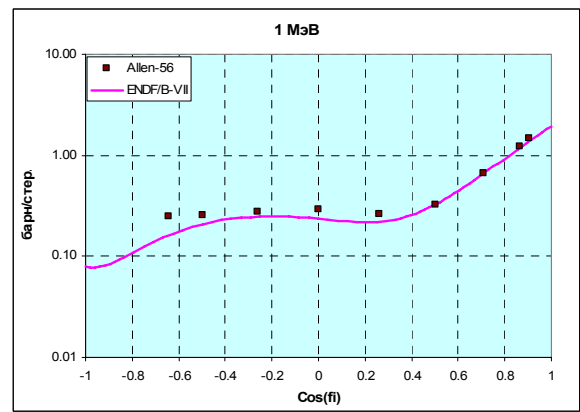
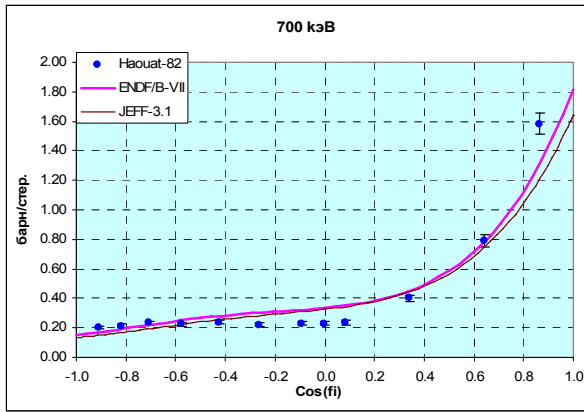
Анизотропия упругого рассеяния на уране-238 велика и ее учет имеет существенное практическое значение поскольку существенно сказывается на альbedo урановых экранов быстрых реакторов, на прохождении нейтронов через их толщу и т.п. На серии рисунков 40 приводятся результаты измерений дифференциального сечения упругого рассеяния в сравнении с оценкой ENDF/B-VII и, при некоторых энергиях, с другими оценками. При сравнении следует иметь в виду, что при измерениях сечения при высоких энергиях достаточно трудно отделить упругое рассеяние от неупругого рассеяния на первых уровнях. Можно ожидать, что в экспериментальные данные неупругое рассеяние на первых уровнях (гораздо более изотропное, чем упругое рассеяние) дает заметный вклад. Наблюдаемые расхождения между экспериментальными и оцененными данными именно на это и указывают.

Как видно из приведенных графиков, между экспериментальными и оцененными данными имеется приемлемое согласие. Результаты разных оценок различаются заметно, но отдать предпочтение какой-либо из оценок на основе экспериментальных данных не представляется возможным. Расхождения в результатах оценки едва ли могут сказаться на

расчетах переноса нейтронов в уране. Во всяком случае, проведенное сравнение оцененных данных при высоких энергиях позволяют представить себе масштаб этих расхождений.

В РОСФОНД решено включить оценку угловых распределений упруго рассеянных нейтронов из ENDF/B-VII.





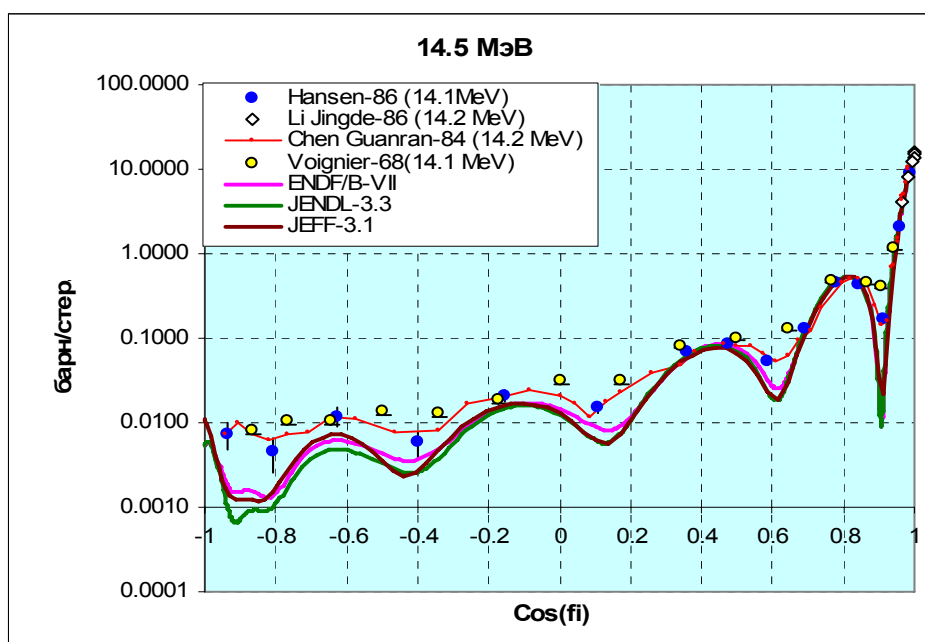


Рис. 40. Измеренные и оцененные дифференциальные сечения упругого рассеяния

6.2. Угловые распределения и спектры неупругого рассеяния

Экспериментальные данные по анизотропии неупругого рассеяния весьма скудны и оцененные данные базируются на результатах расчетов по теоретическим моделям нейтронных реакций. Результаты этих расчетов, как увидим ниже, существенно различаются.

На рис.41 приведены экспериментальные данные по анизотропии неупругого рассеяния нейтронов с энергией 144 кэВ. При этой энергии возбуждается лишь самое низкоэнергетическое возбужденное состояние. Наряду с экспериментальными данными приводятся и оцененные. Как видно, расхождения оценок весьма заметны, но единственный вывод, который можно сделать из сравнения с экспериментальными данными, это то, что анизотропия рассеяния в оценке Маслова, очевидно, неоправданно сильна.

На серии рисунков 42 сравниваются угловые распределения нейтронов с энергией 9 МэВ, неупруго рассеянных с возбуждением нескольких первых уровней ^{238}U . На первом из них, рис.42а, сравниваются оценки угловых распределений трех самых нижних уровней (относящихся к ротационной полосе, спины и четности которых достоверно известны). Как видим, расхождения в оценках невелики.

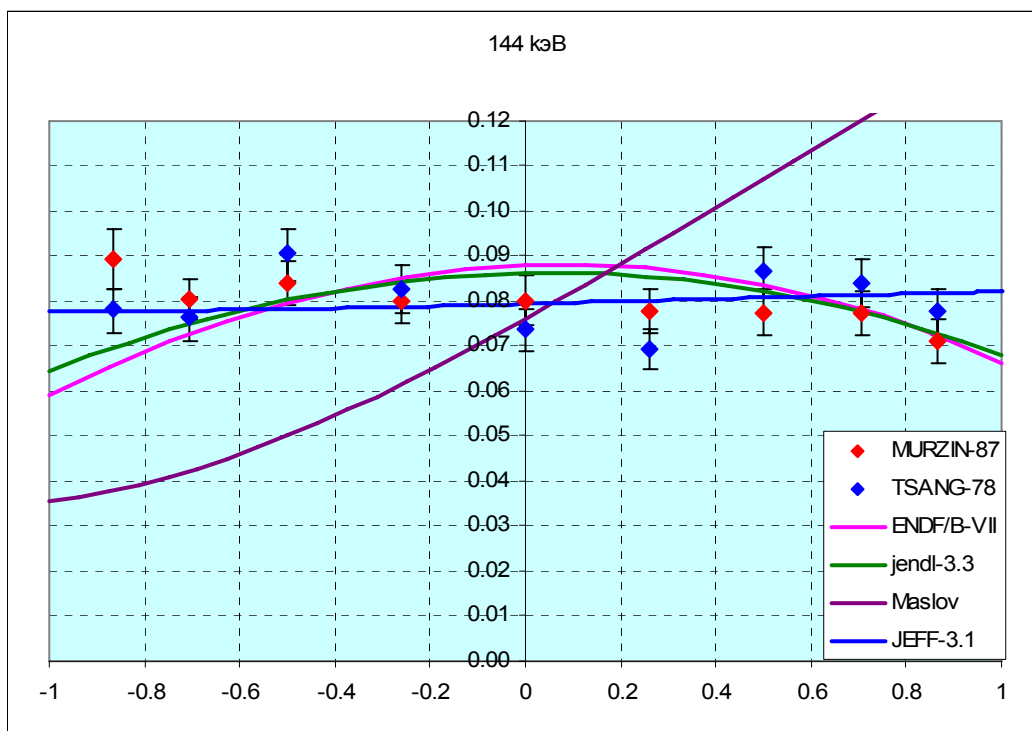


Рис. 41. Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов с энергией 144 кэВ

На рис. 42б сравниваются оцененные угловые распределения нейтронов, испытывающих неупругое рассеяние с возбуждением следующих 8-ми уровней. Для всех этих уровней в ENDF/B-VII принимаются одинаковые угловые распределения. В оценке Маслова одинаковые распределения приняты только для некоторых из рассматриваемых уровней, а в оценке JENDL-3.3 все угловые распределения различны. Как видим, оценки Маслова и JENDL-3.3 “выются” вокруг простого углового распределения, принятого в ENDF/B-VII, не систематично отклоняясь от нее как в ту, так и в другую сторону. Включение в РОСФОНД данных по анизотропии неупругого рассеяния из ENDF/B-VII представляется оправданным.

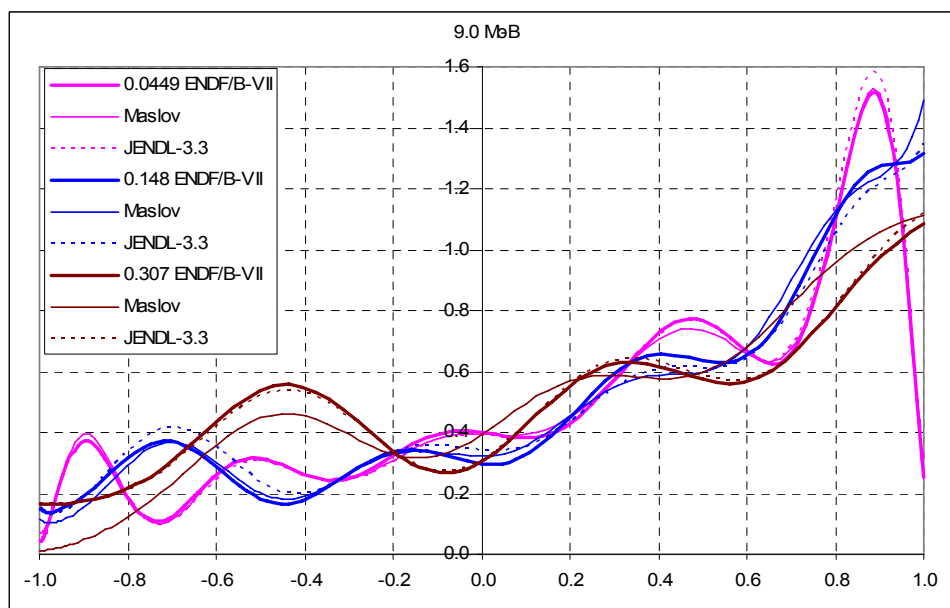


Рис. 42а

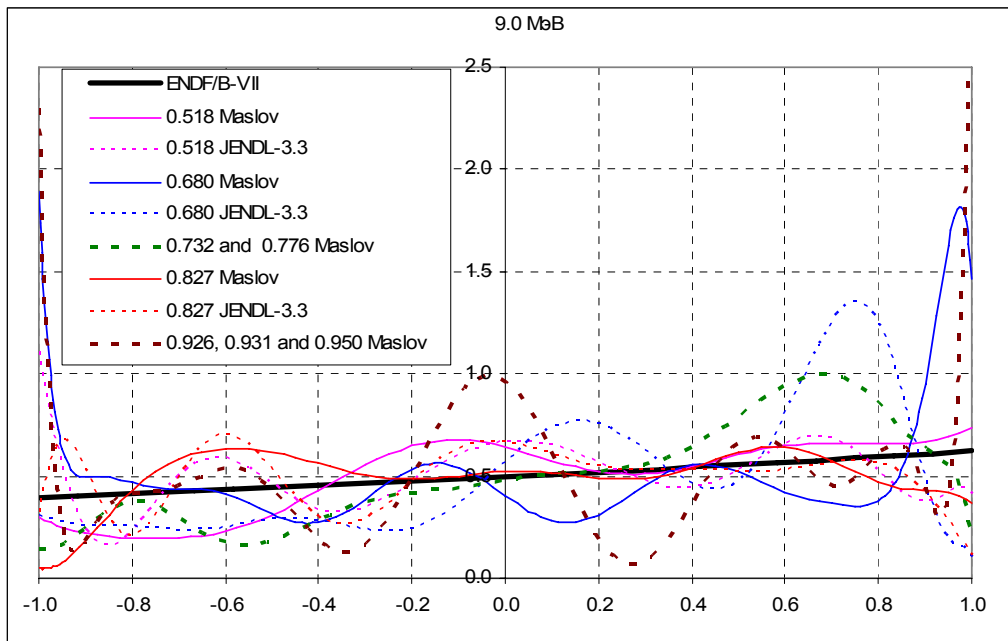
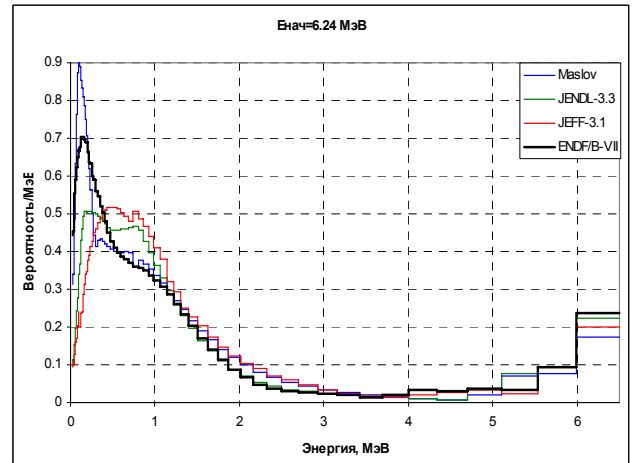
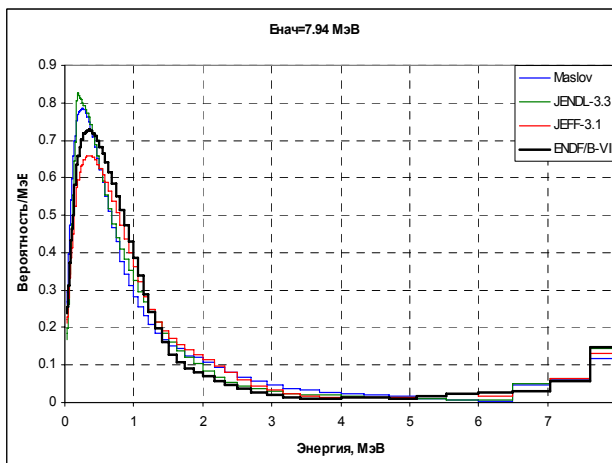
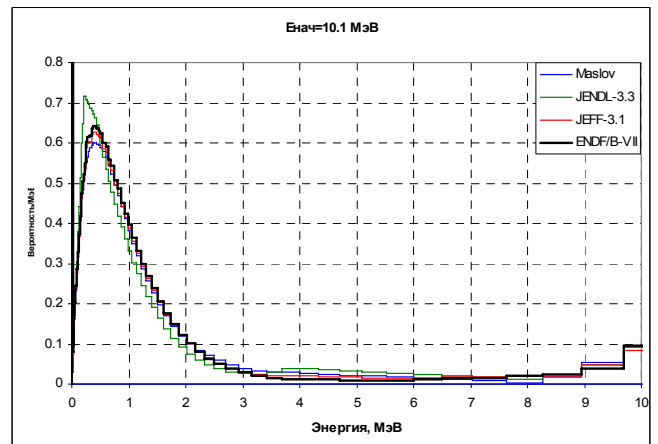
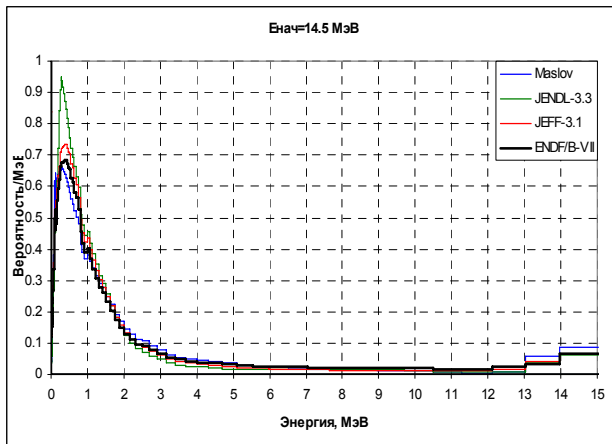


Рис.426

6.3. Спектры неупруго рассеянных нейтронов.

На серии рисунков 43 приведены спектры неупруго рассеянных нейтронов, рассчитанные на основе разных файлов оцененных нейтронных данных.



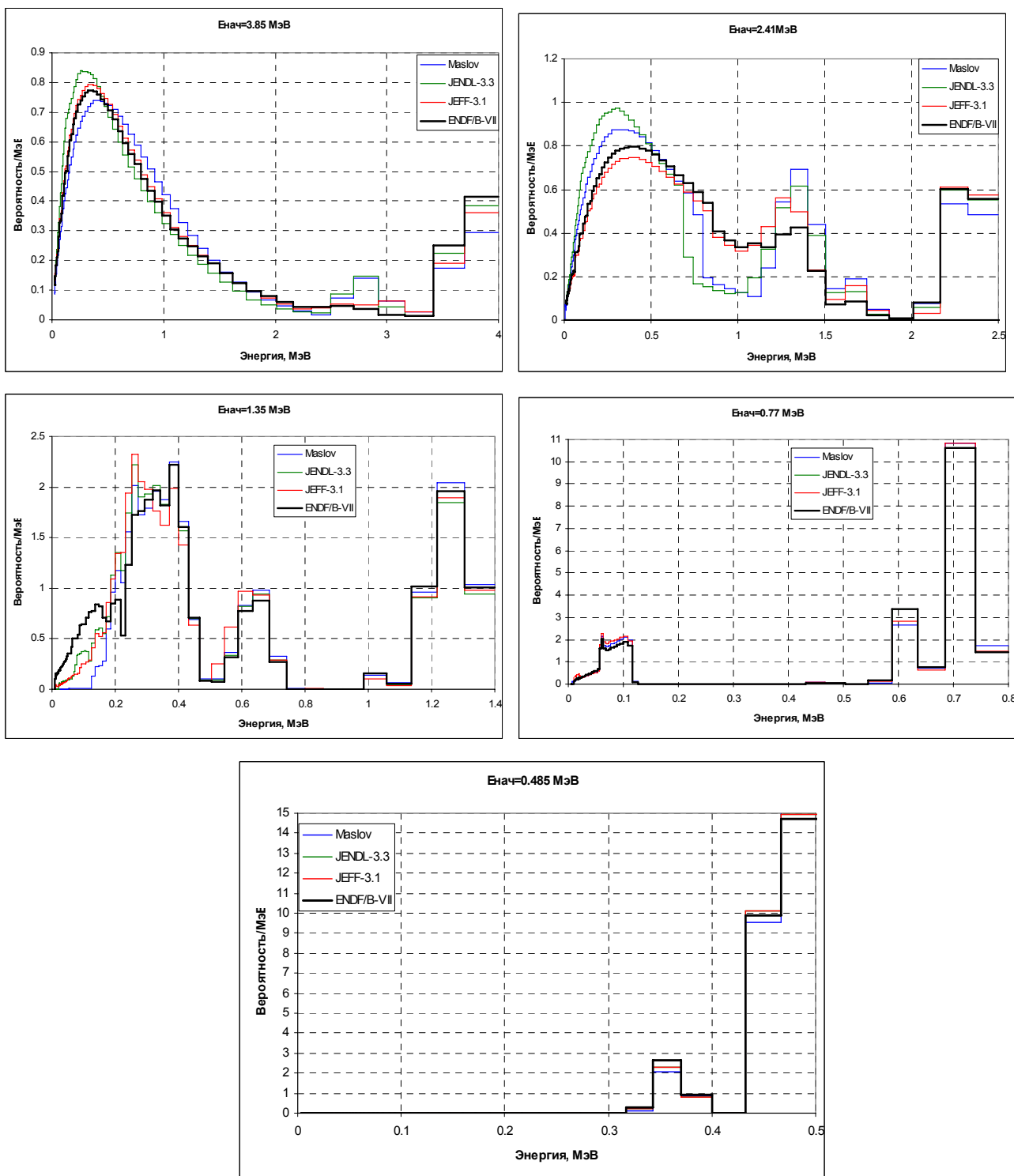


Рис.43. Спектры нейтронов различных энергий, испытавших неупругое рассеяние.

Как видно, максимальное различие оцененных спектров наблюдается при 6 МэВ, где согласно оценкам JEFF-3.1 и JENDL-3.3, возбуждение континуума уровней имеет меньшую вероятность, чем это следует из оценок ENDF/B-VII и оценки Маслова. При всех энергиях спектры нейтронов, следующие из оценки ENDF/B-VII, занимают промежуточное положение. Нет оснований не принять эту оценку спектров в РОСФОНД.

6.3. Энерго-угловые распределения нейтронов, испускаемых в реакциях (n,2n), (n,3n) и (n,4n)

В библиотеках ENDF/B-VI, JEFF-3 и ENDF/B-VII эти угловые распределения, рассчитанные по модели Хаузера-Фешбаха с учетом вклада предравновесных процессов, описываются по модели Калбаха-Манна и определяются файлами MF=6. Различие в параметрах этих распределений невелико. В РОСФОНДе решено сохранить те же распределения, что и в ФОНД-2.2, т.е. соответствующие ENDF/B-VII.

6.4. Характеристики нейтронов деления

4.4.1. Число мгновенных нейтронов деления.

На рис. 44, энергетические зависимости числа мгновенных нейтронов деления сравниваются между собой и с экспериментальными данными из EXFOR. Оценки ENDF/B-VII и JENDL-3.3 очень близки друг к другу практически во всем рассматриваемом диапазоне энергий. Маслов принял те же значения ν_{prompt} , что и в JENDL-3.3. При энергии 3 МэВ принимаемые в них значения ν_{prompt} лежат существенно ниже большинства экспериментальных данных и оправдываются лишь результатами Фрео (1980). Оценка JEFF-3.1 в этой области энергий, как и оценка ФОНД-2.2 проходят через большинство экспериментальных точек и представляются более оправданными. При энергиях ниже эффективного порога деления урана-238, т.е. ниже 1.4 МэВ, оценки ν_{prompt} из ENDF/B-VII и JENDL-3.3 представляются неоправданно завышенными. Столь высокие значения оправдываются лишь двумя последними точками эксперимента Фрео и последней точкой эксперимента двумя последними точками эксперимента Фрео и последней точкой эксперимента Нурпеисова.

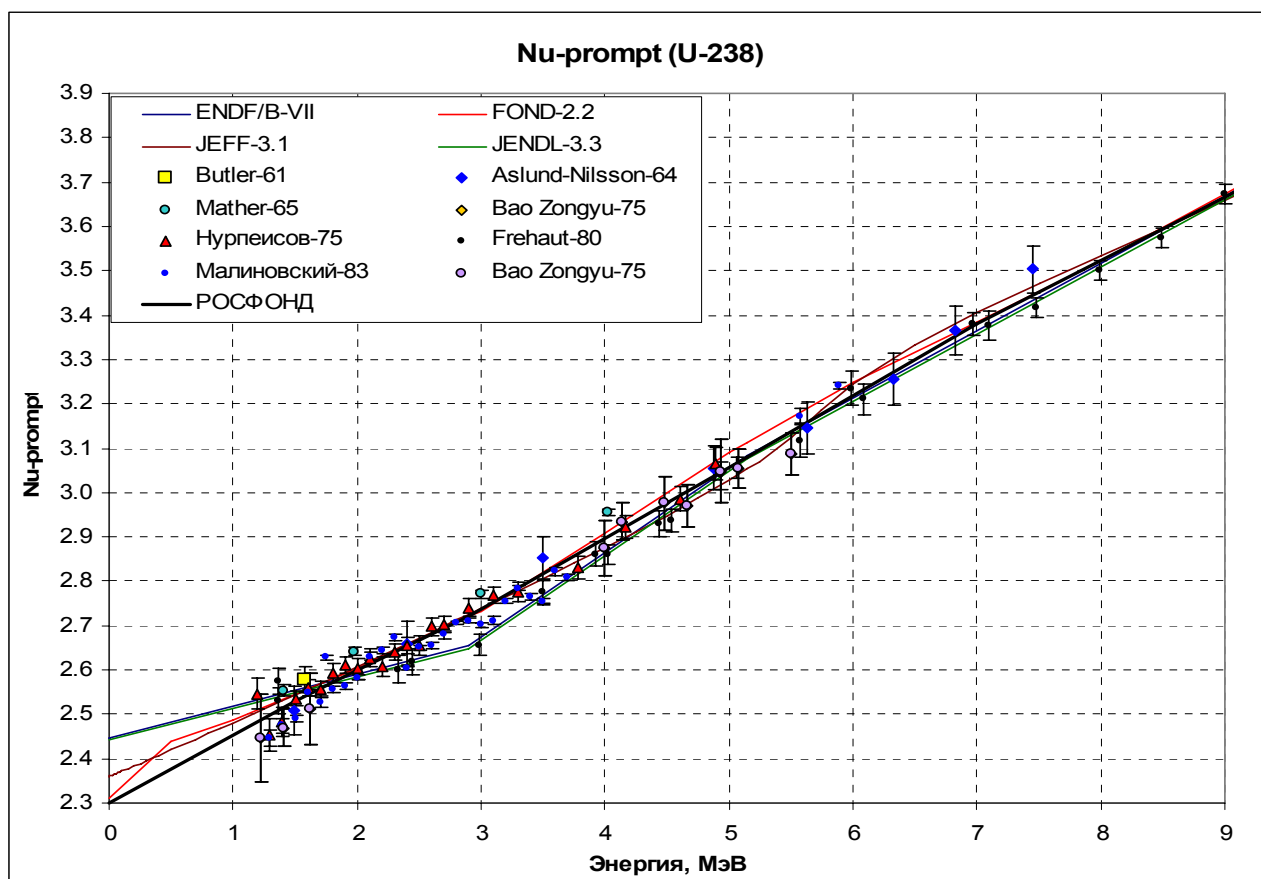


Рис.44а. Энергетическая зависимость числа мгновенных нейтронов деления

При этом причем предыдущие точки этого эксперимента, как и данные Бао Дзонгджу, данные Малиновского и данные Аслунд-Нильсона, указывают на гораздо более быстрый спад ν_{prompt} с уменьшением энергии нейтронов (более детально это видно на рис. 44б)

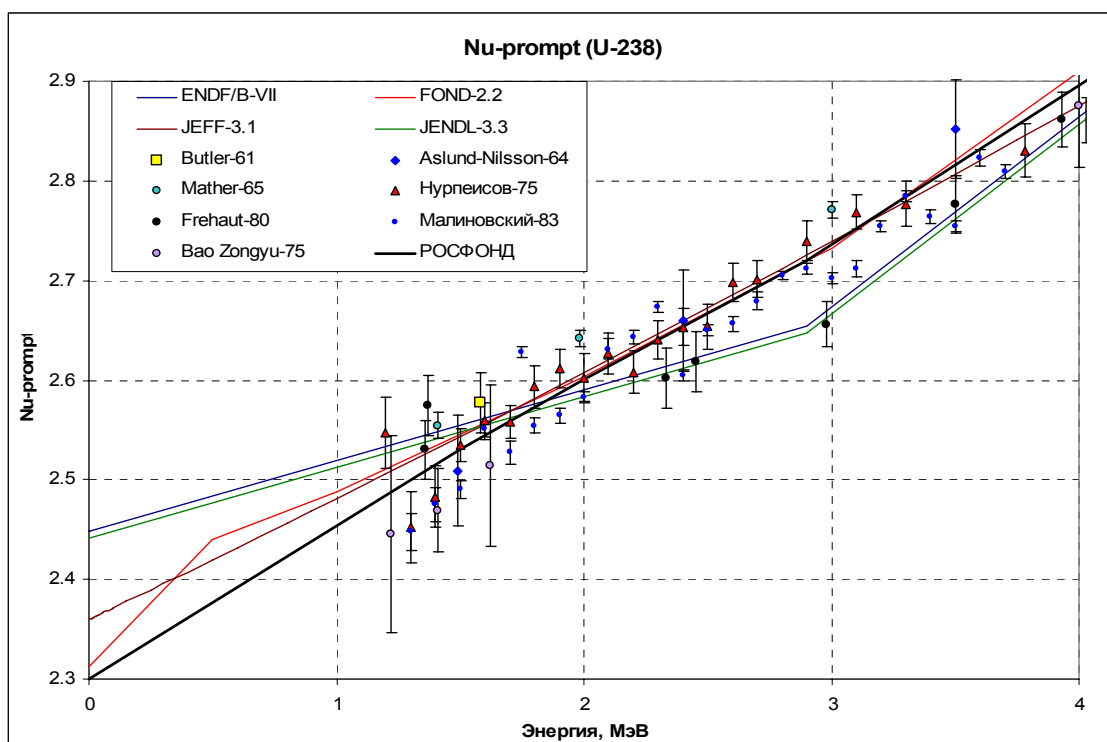


Рис.44б. Энергетическая зависимость числа мгновенных нейтронов деления вблизи порога деления ^{238}U

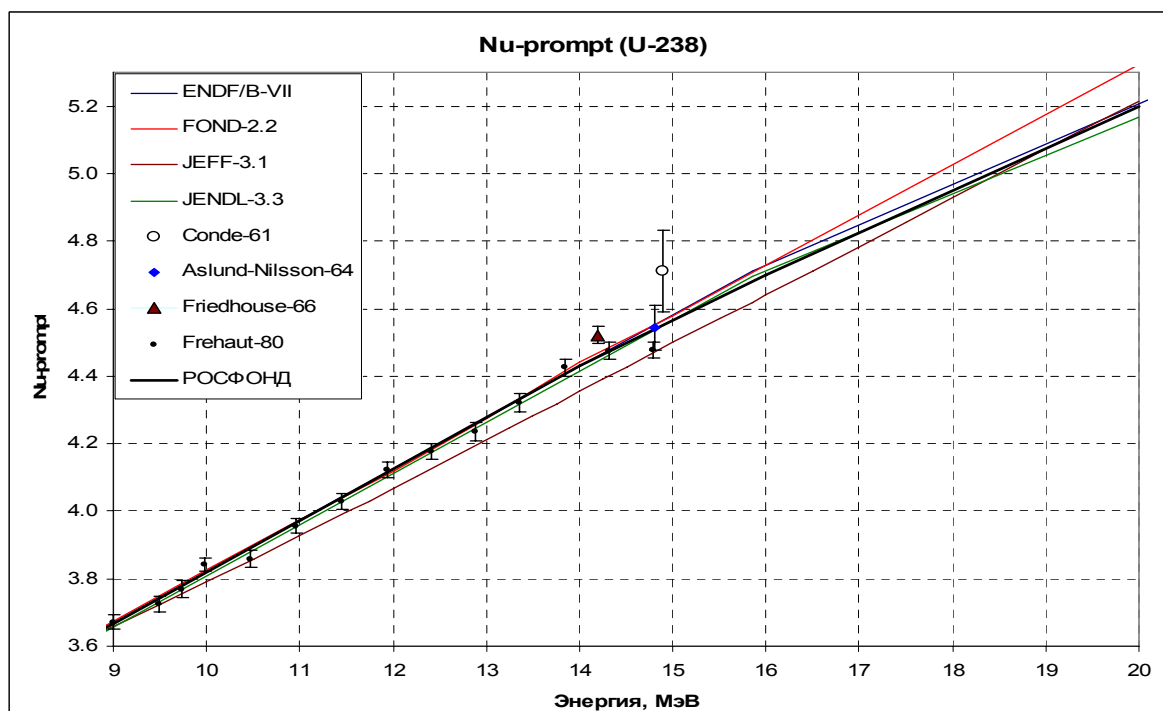


Рис.44в. Энергетическая зависимость числа мгновенных нейтронов деления

При энергии 9 МэВ различные оценки ν_{prompt} пересекаются. Сравнение оценок при более высоких энергиях показано на рис. 44в.

Анализ расхождений между оцененными и измеренными значениями ν_{prompt} привел к выводу о целесообразности включить в РОСФОНД некоторую усредненную оценку, изображенную на рис. 44 черной линией. При энергиях выше 9 МэВ эта оценка практически совпадает с оценками ENDF/B-VII и JENDL-3.3 (см. рис.44в). В интервале 5 – 9 МэВ различия между этими оценками и принимаемой усредненной оценкой также незначительны (см. рис. 44а). В интервале 2 – 5 МэВ принимаемая оценка близка к

таковой из библиотеки JEFF-3.1, однако, при более низких энергиях она спадает несколько круче (см. рис. 446) по причинам обсужденным выше.

4.4.2. Энергетические спектры мгновенных нейтронов деления.

На рис. 45 показаны зависимости средней энергии нейтронов деления от энергии нейтронов, вызывающих деления, следующие из спектров нейтронов деления, принятых в современных оценках. Эти спектры были рассчитаны по модели Медлунда-Никса с параметрами, учитывающими вклады реакций $(n, n'f)$, $(n, 2nf)$ и $(n, 3nf)$. Красной линией приведена зависимость средней энергии спектра деления, рассчитываемого на основе принятой в системе констант БНАБ-93 параметризации:

$$\chi(E) = \frac{2 \exp(-ab/4)}{\sqrt{\pi a^3 b}} \exp(-E/a) \operatorname{sh} \sqrt{bE},$$

где $a=1.03$, а $b=0.858v-0.436$. Средняя энергия таким образом определенного спектра (спектра Уатта) равна $\langle E \rangle = a(3/2 + ab/4)$.

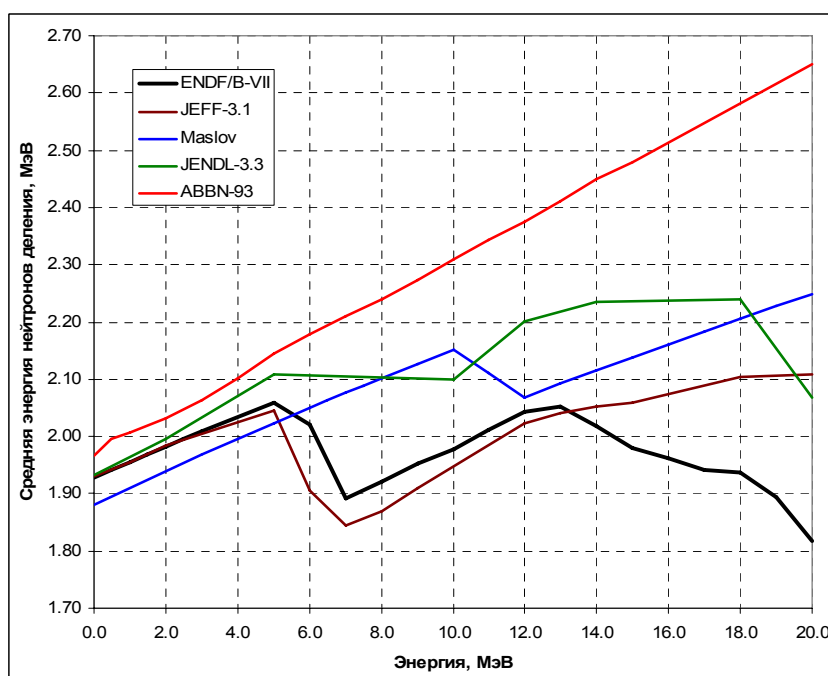


Рис. 45. Энергетическая зависимость средней энергии нейтронов деления.

Как видим, разброс данных даже современных оценок довольно велик. Заметим, что учет современных данных о спектрах нейтронов деления может быть достаточно существенным. Например в среде из урана с 5.56% урана-235 (которой $k_{\infty}=1$), переход от принятой в БНАБ-93 параметризации к современным формам спектра деления влечет за собой снижение среднего сечения деления урана-238 на 0.37%. Это эффект замены спектра со средней энергией, изображенной красной кривой, к спектру деления со средней энергией, изображенной черной кривой. Из этой оценки следует, что от того, какая из современных оценок спектра деления буде выбрана, среднее сечение деления урана-238 и размножение нейтронов в средах, содержащих уран-238 в высоких концентрациях будет зависеть уже слабо. Тем не менее, этот выбор следует сделать.

На серии рисунков 46 спектры деления, принятые в ENDF/B-VII, сравниваются с экспериментальными данными из EXFOR.

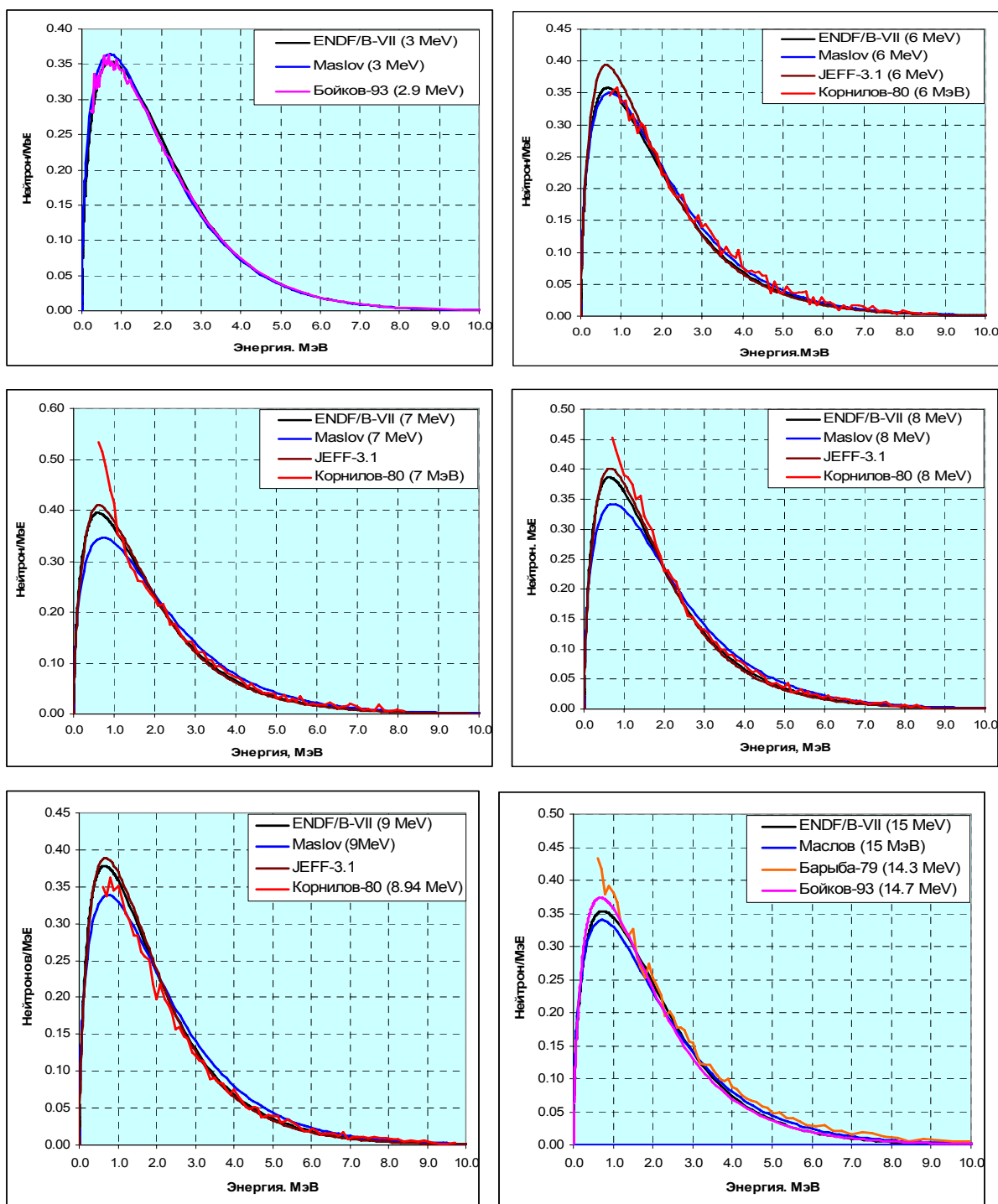


Рис.46. Сравнение оцененных и измеренных спектров мгновенных нейтронов деления.

Как видно, масловские спектры при энергиях выше 6 МэВ оказываются слишком жесткими. Из рис. 45 ясно, что спектры, принятые в JENDL-3.3 близки к Масловским и потому на рис. 46 не приводятся. Спектры из оценок JEFF-3.1 и ENDF/B-VII близки друг к другу. При энергиях 3 МэВ и 15 МэВ они практически не различимы. Сравнение с экспериментом при 6 МэВ, позволяет отдать предпочтение оценке ENDF/B-VII, которая и рекомендуется в РОСФОНД. При энергиях выше 15 МэВ спектры, согласно этой оценке, существенно смягчаются. Насколько это обосновано покажут эксперименты, выполненные при энергиях порядка 20 МэВ. Основанием для смягчения спектра при этих энергиях является включение реакции $(n,3nf)$. В других современных оценках влияние этой реакции почему-то не проявляется на форме спектра.

6.4.3. Группы запаздывающих нейтронов и зависимость их выхода от энергии.

В библиотеке РОСФОНД принято 8-групповое представление совокупности предшественников запаздывающих нейтронов, рекомендованное в работе⁴⁹, принятое также и в библиотеке JEFF-3.1.

На рис. 47 приведены энергетические зависимости выхода запаздывающих нейтронов при делении, полученные в разных оценках в сравнении с экспериментальными данными.

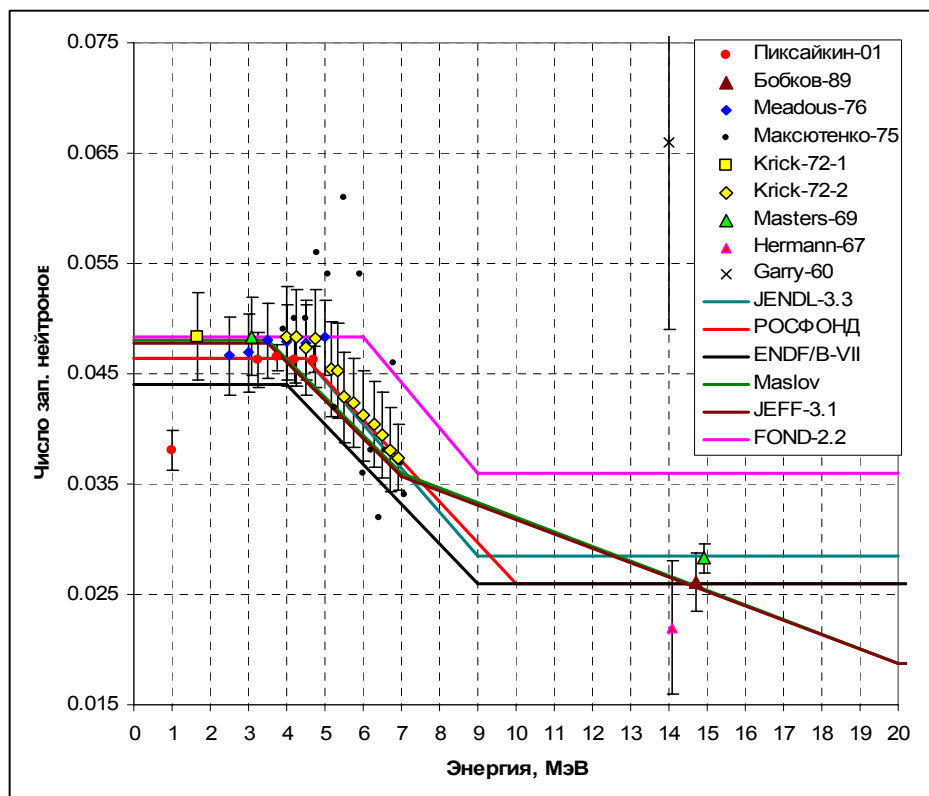


Рис. 47. Зависимость числа запаздывающих нейтронов от энергии нейтронов, вызывающих деление.

Наилучшее согласие с совокупностью экспериментальных данных при энергиях до 7 МэВ демонстрирует оценка JENDL-3.3. При 14 МэВ принимаемое в ней значение числа запаздывающих нейтронов, пожалуй, слегка завышено. Поэтому в РОСФОНД решено принять значение этого числа таким, как во всех остальных оценках (см. рис. 47.).

6.4.4. Полное число нейтронов деления.

Полное число нейтронов деления определено как сумма чисел мгновенных и запаздывающих нейтронов, оцененных выше. Ниже дана сводная таблица этих чисел. Жирным шрифтом отмечены значения, указанные в соответствующих секциях файла MF=1.

| Энергия, МэВ | ν_{prompt} | ν_{delay} | ν_{total} |
|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| $1.0 \cdot 10^{-11}$ | 2.3000 | 0.0463 | 2.3463 |
| $2.53 \cdot 10^{-8}$ | 2.3000 | 0.0463 | 2.3463 |
| 2.00 | 2.6000 | 0.0463 | 2.6463 |

⁴⁹ G.D.Spriggs, J.M.Campbell, V.M.Piksaikin. An 8-Group Delayed Neutron Model Based on Consistent Set of Half-Lives. OECD/NEA Work Party on Delayed Neutrons. 98-1619, March 28, 1999.

| | | | |
|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 2.90 | 2.7200 | 0.0463 | 2.7663 |
| 4.50 | 2.9760 | 0.0463 | 3.0223 |
| 5.15 | 3.0800 | 0.0439 | 3.1239 |
| 7.00 | 3.3800 | 0.0371 | 3.4171 |
| 9.00 | 3.6650 | 0.0297 | 3.6947 |
| 10.00 | 3.8180 | 0.0260 | 3.8440 |
| 14.00 | 4.4300 | 0.0260 | 4.4560 |
| 16.00 | 4.7000 | 0.0260 | 4.7260 |
| 20.00 | 5.2000 | 0.0260 | 5.2260 |

7. Образование фотонов в нейтронных реакциях

В библиотеке JEFF-3.1 приняты те же данные об образовании фотонов в нейтронных реакциях, что и в ENDF/B-VII, а именно:

- Для реакций $(n,2n)$, $(n,3n)$, $(n,4n)$ и неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней образование фотонов описывается в специальных подсекциях соответствующих секций файла MF=6. Эти данные оценены на основе статистической модели. Оценка ENDF/B-VII для этих реакций принимается и в РОСФОНД.
- Образование фотонов при делении и радиационном захвате описывается заданием множественности образующихся квантов в соответствующих секциях файла MF=12 и нормированными спектрами, заданными в файле MF=15.

Число фотонов, образующихся при делении, принято равным 8.18 вне зависимости от энергии нейтронов, вызывающих деления, что несколько выше принимающегося для урана-235 (7.17 квантов на деление). Спектр фотонов деления в ENDF/B-VII не зависит от энергии нейтронов, вызывающих деление, тогда как в JENDL-3.3 такая зависимость хоть и описывается, но практически не существенна. На рис. 48 проводится сравнение этих спектров. Для примера приведен сравнительно хорошо известный спектр фотонов деления урана-235 тепловыми нейтронами (в описании JENDL-3.3 указывается, что оценка спектра фотонов для деления урана-238 основана на измерениях этого спектра при делении урана-235). Средние энергии фотонов в приведенных спектрах существенно отличны: в ENDF/B-VII - 0.772 МэВ, в JENDL-3.3 – 0.692 МэВ. Суммарные энергии фотонов деления отличаются еще сильнее – 6.317 МэВ в ENDF/B-VII и 4.958 МэВ в JENDL-3.3. Заметим, что в секции MT=458, содержащей составляющие энерговыделения при делении в ENDF/B-VII приводится энергия мгновенных фотонов, равная 6.53 МэВ, что близко к данным следующим из описания испускания фотонов в этом файле. В файле JENDL-3.3 секция MT=458 отсутствует. Для деления урана-235 в секции MT=458 указывается еще большая энергия -6.97 МэВ. Таким образом, данные JENDL-3.3 представляются противоречивыми и в РОСФОНД решено принять данные ENDF/B-VII, принятые и в JEFF-3.1. Вместе с тем необходимо отметить оставшееся несоответствие в суммарной энергии мгновенных фотонов деления, следующих из секций MT 18 файлов MF=12 и MF=15 и секции MT-458 файла MF=1.

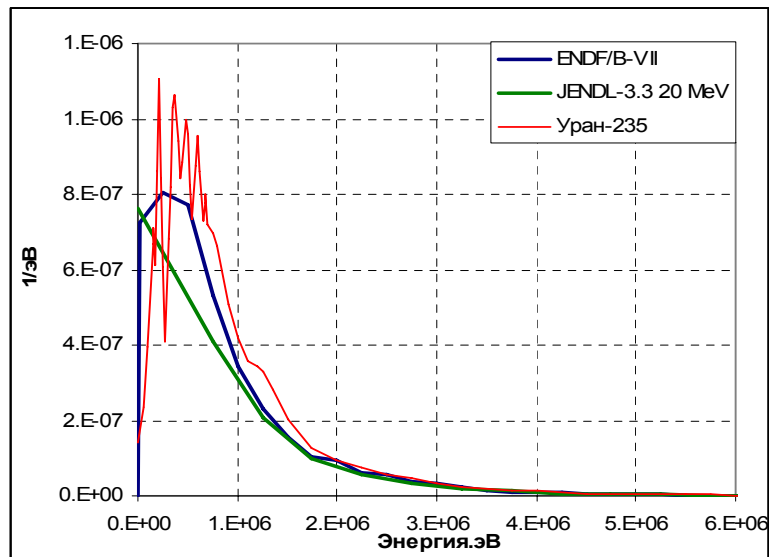


Рис. 48. Сравнение спектров мгновенных фотонов деления.

Число фотонов, образующихся при радиационном захвате в оценке ENDF/B-VII линейно возрастает от 4.33 при нулевой энергии до 22.28 при 20 МэВ (скорость роста 0.798 кванта/МэВ). В оценке JENDL-3.3 число фотонов возрастает от 3.6 при нулевой энергии до 9.347 при энергии 0.935 МэВ (скорость роста близка: 0.734 кванта/МэВ). Спектры фотонов в этих двух оценках приведены на рис. 49. В JENDL-3.3 учитывается энергетическая зависимость спектра фотонов, однако она весьма слаба: средняя энергия фотонов возрастает от 1.040 МэВ при нулевой энергии до 1.080 при 0.935 МэВ. Средняя энергия фотонов в спектре, принятом в ENDF/B-VII, равна 1.112 МэВ. В результате полная энергия, уносимая фотонами, образующимися при захвате теплового нейтрона, в JENDL-3.3 оказывается равной 3.745 МэВ, что значительно ниже энергии реакции (4.8065 МэВ); согласно данным ENDF/B-VII эта энергия равна 4.819 МэВ, т.е. даже превышает энергию реакции. Противоречие между оценками устраняется, если предположить, что в оценке JENDL-3.3 примерно 17% фотонов низких энергий (ниже, примерно, 100 кэВ) имеет высокую вероятность внутренней конверсии. При таком подходе, однако, необходим учет энерговыделения за счет конверсионных электронов, что не предусматривается форматом представления нейтронных данных в ENDF/B-VI. Поэтому в библиотеку РОСФОНД целесообразно включить оцененные данные из ENDF/VII, внося, однако коррекцию в множественность испускаемых фотонов, обеспечивающую сохранение энергии: множественность должна меняться от 4.138 при нулевой энергии до 21.638 кванта на захват при энергии 20 МэВ.

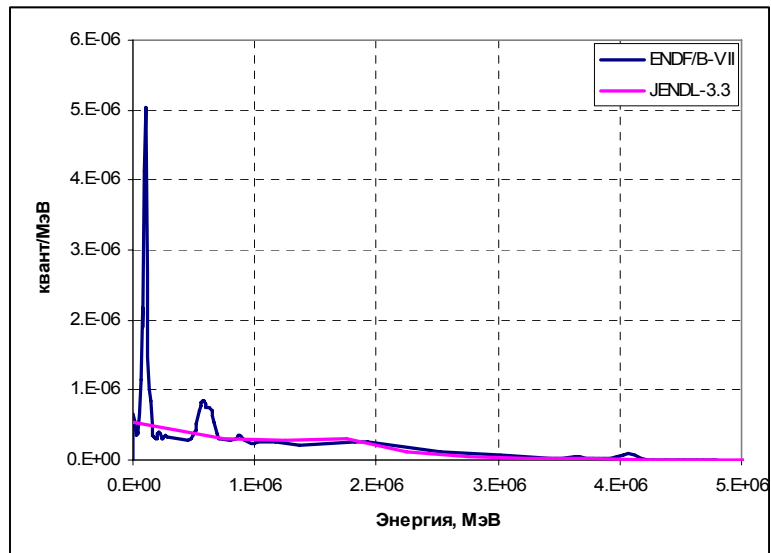


Рис. 49. Спектры фотонов радиационного захвата.

- Образование фотонов при прочих неупругих процессах. Как следует из вышеизложенного “прочими неупругими процессами” являются лишь неупругое рассеяние на дискретных уровнях и реакции с вылетом заряженных частиц. В ENDF/B-VII последние реакции не учитываются, и следовало бы ожидать, что в файле будут содержаться данные об образовании фотонов при неупругом рассеянии на отдельных уровнях. Однако, в действительности там приводятся данные для суммарного сечения неупругих взаимодействий (MT=3). В файле MF=13 приводится сечение образования фотонов при неупругих взаимодействиях, отличное от нуля лишь выше порога 1-го уровня. Таким образом, ясно, что вклад радиационного захвата и деления в образование фотонов при энергиях ниже этого порога в этом файле не учитывается. Однако, неясно, вклады каких именно реакций учитываются в файле MF=13 выше порога.

В связи с изложенным решено описать в РОСФОНДе образование фотонов при неупругом рассеянии на дискретных уровнях в явной форме – с помощью секций MT=51 – 90 в файле MF=12, в которых указываются множественности образования дискретных фотонов, соответствующие схеме уровней урана-238, содержащейся в справочнике PCNUDAT⁵⁰. При этом для уровней с энергиями выше 1.17 МэВ, представляющих группы реальных уровней урана-238, использованы схемы переходов для того представителя группы, для которого вероятности переходов известны наиболее детально. В секциях MT=51 – 90 файла MF=14 описаны угловые распределения фотонов, принятые изотропными для всех фотонов.

8. Образование радиоактивных продуктов.

Главнейшим процессом образования радиоактивных продуктов является деление. В библиотеках широкого пользования имеются две оценки независимых выходов продуктов деления – оценка Каваи 1992 г.⁵¹ и оценка Т.Ингланда и Б.Райдера, выполненная в том же году⁵². Сравнительного анализа данных этих двух оценок не проводилось. Поскольку в системе констант БНАБ-93 используются данные последней оценки, а в библиотеках ФОНД-2.2 и БРОНД-2 секции с выходами продуктов деления,

⁵⁰ PCNUDAT Version 2.8., by Robert Kinsey (NNDC(BNL,USA). IAEA, NDS, March 2000

⁵¹ M/ Kawai et al. J.Nucl.Sci.Technol. 29, 195 (1992)

⁵² T.R. England, B.F. Rider, Evaluation and compilation of fission product yields, 1992, ENDF-349

отсутствуют, решено включить в РОСФОНД данные о выходах продуктов деления из ENDF/B-VI (MF=1, MT-454) перенесенные еще из ENDF/B-III.

Радионуклиды образуются во всех нейтронных реакциях на уране-238:

- ^{239}U , образующийся при радиационном захвате, распадается путем бета-распада с периодом $T_{1/2}=23.5$ мин в ^{239}Np , который с периодом $T_{1/2}=2.355$ дня распадается путем бета-распада в долгоживущий ^{239}Pu ($T_{1/2}=2.411 \cdot 10^4$ лет);
- ^{237}U , образующийся в реакции (n,2n), распадается путем бета-распада с периодом $T_{1/2}=6.77$ дня в долгоживущий ^{237}Np ($T_{1/2}=2.144 \cdot 10^6$ лет);
- в реакции (n,3n) образуется долгоживущий ^{236}U ($T_{1/2}=2.342 \cdot 10^7$ лет);
- в реакции (n,4n) образуется долгоживущий ^{235}U ($T_{1/2}=7.038 \cdot 10^8$ лет);
- в реакции (n,p) образуется ^{238}Pa , распадающийся путем бета-распада с периодом $T_{1/2}=2.3$ мин в тот же ^{238}U ($T_{1/2}=4.468 \cdot 10^9$ лет);
- ^{225}Th , образующийся в реакции (n, α), распадается путем бета-распада с периодом $T_{1/2}=7.1$ мин в ^{235}Pa , который с периодом $T_{1/2}=24.2$ мин дня распадается путем бета-распада в долгоживущий ^{235}U ($T_{1/2}=7.038 \cdot 10^8$ лет).

Плутоний и все долгоживущие изотопы урана, образующиеся в нейтронных реакциях на уране-238 распадаются только путем альфа-распада.

9. Валидация нейтронных данных по интегральным экспериментам.

9.1. Валидация сечения увода под порог деления урана-238.

Сечение увода нейтронов деления урана-235 тепловыми нейтронами под порог деления урана-238 определяется следующим образом:

$$\sigma_{\text{rem}} = \frac{\int_0^{\infty} \chi^{235}(E) * \sigma_f^{238}(E) * \sigma_{\text{rem}}^{238}(E) dE}{\int_0^{\infty} \chi^{235}(E) * \sigma_f^{238}(E) dE}$$

где

$$\sigma_{\text{rem}}(E) = \sigma_c(E) + \sigma_e(E) \int_{(1-\alpha)E}^E \left[1 - f_e(E \rightarrow E') \frac{\sigma_f^{238}(E')}{\sigma_f^{238}(E)} \right] + \sigma_{\text{in}}(E) \int_0^E \left[1 - f_{\text{in}}(E \rightarrow E') \frac{\sigma_f^{238}(E')}{\sigma_f^{238}(E)} \right] + \sigma_f(E) \int_0^E \left[1 - v(E)\chi(E \rightarrow E') \frac{\sigma_f^{238}(E')}{\sigma_f^{238}(E)} \right]$$

Последний член дает отрицательный вклад в сечение увода.

Сечение увода, вычисленное по данным РОСФОНДа, равно 1.849 барна. Вклад деления в это сечение составляет -0.252 барна.

Прямым путем определения сечения увода является измерение пропускания нейтронов деления через тонкую урановую сферу с помощью камеры деления с ураном-238:

$$T = \exp(-\bar{d}\sigma_{\text{rem}}),$$

где \bar{d} - средний путь, проходимый нейтроном деления, способным делить уран-238 в сфере. Для тонкой сферы \bar{d} весьма близко к толщине сферического слоя; отличие принимается во внимание с помощью расчетных поправок. Этим методом были получены следующие результаты: 1.75 ± 0.1 барна⁵³ и 1.83 ± 0.1 барна⁵⁴

⁵³ Okrent D., Avery R. and Hummel N.N. Int. Conf. Geneva-55, v.5, p. 419.

⁵⁴ Bondarenko I.I. and Kovalev V.P. IAEA Seminar on Physics of Fast and Intermediate Reactors, Vienna, 1961, v.2, p. 159.

Другой путь состоит в измерении отношения $D = \overline{\sigma_f^{238}} / \overline{\sigma_{rem}^{238}}$, определяющего число делений, производимым нейтроном деления урана-235, попавшим в бесконечную среду из урана-238. Здесь $\overline{\sigma_f^{238}}$ - среднее сечение деления урана-238 на спектре деления урана-235 тепловыми нейтронами, равное, согласно современным данным 0.309 барна. Величина D определялась непосредственно в эксперименте с источником нейтронов деления в центре толстой урановой сферы⁵⁵. После введения поправок на утечку нейтронов из сферы на деления урана-235, содержащегося в материале сферы из естественного урана, было получено $D=0.1703\pm 0.065$. Отсюда следует $\overline{\sigma_{rem}^{238}}=1.82\pm 0.07$. Результаты каждого из перечисленных измерений и их среднее, равное 1.80 ± 0.05 барна, согласуются в пределах погрешностей с сечением увода, следующим из оцененных данных.

9.2. Валидация оценки по критичности быстрых критсборок.

Валидация нейтронных данных для урана-238 проводилась также путем сравнения результатов расчета критических параметров для размножающих систем, спектр нейтронов в которых формировался преимущественно ураном-238. К этим системам отнесены:

1. гомогенная среда из металлического урана с обогащением 5.56% с $k_{\infty}=1$ (SCHERZO-5.56⁵⁶);
2. 3 гетерогенные системы из высокообогащенного и обедненного урана с $k_{\infty}\approx 1$ отличающиеся гетерогенной структурой при почти одинаковом среднем составе (сборки БФС-35⁵⁷);
3. 3 гетерогенные системы из высокообогащенного урана с двуокисью обедненного урана с $k_{\infty}\approx 1$ отличающиеся гетерогенной структурой при почти одинаковом среднем составе (БФС-33¹⁴);
4. критическая система с активной зоной из урана с обогащением ~10% и отражателем из обедненного урана (BIGTEN⁵⁸).

Расчеты критичности проводились методом Монте-Карло по программе MCNP-5 с учетом детальной энергетической зависимости сечений, определенных файлами РОСФОНД.

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных значений $k_{эфф}$ приведены в нижеследующей таблице. Поскольку составы всех трехборок БФС-35 и свех трехборок БФС-33 были весьма близки, для них приводятся средние отклонения с соответствующими погрешностями.

Как видно, результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными в пределах погрешностей последних.

⁵⁵ Николаев М.Н., Голубев В.И., Бондаренко И.И. Деление урана-238. ЖЭТФ, 34, 1956. с.752.

⁵⁶ Darrouzet M., Chaudat J.P., Fisher E.A. et al. Studies of Unit K_{∞} Lattices in Metallic Uranium assemblies ZEBRA-8H, SNEAC-8, ERMINE and HARMONIE UK. - In: International Symposium on Physics of Fast Reactors. Proceedings. V.I. Tokio, 1973, p.537

⁵⁷ International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. Vol.IV, MIX-MISC-FAST-001.

⁵⁸ International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. Vol.III, IEU-MET-FAST-007

Экспериментальные и расчетные значения коэффициента размножения.

| Критсборка | E=k-эксп. | C=k-расчетн.. | C/E |
|--------------------|---------------|---------------|----------------------|
| SCHERZO-5.56 | 1±0.005 | 0.9976±0.0002 | 0.9976±0.005 |
| БФС-35-1 | 0.9736±0.0071 | 0.9709±0.0002 | 0.9972±0.00071 |
| БФС-35-2 | 1.0050±0.0057 | 0.9986±0.0002 | 0.9939±0.0057 |
| БФС-35-3 | 0.9956±0.0059 | 0.9909±0.0002 | 0.9953±0.0059 |
| Среднее для БФС-35 | | | 0.9952±0.0043 |
| БФС-33-1-1 | 0.9656±0.0054 | 0.9656±0.0002 | 1.0000±0.0054 |
| БФС-33-1-3 | 0.9692±0.0055 | 0.9649±0.0002 | 0.9956±0.0055 |
| БФС-33-2-1 | 0.9967±0.0039 | 0.9998±0.0002 | 1.0033±0.0039 |
| Среднее для БФС-33 | | | 1.0005±0.0034 |
| BIGTEN | 1.0045±0.0013 | 1.0051±0.0002 | 1.0006±0.0013 |

10. Заключение

В РОСФОНД предлагается принять сформированную в процессе настоящего обзора модификацию файла данных из ENDF/B-VII

Авторы обоснования выбора оцененных нейтронных данных

Николаев М.Н., Кощев В.Н.

93.1. Нептуний-234

Радиоактивен. ($T_{1/2}=4.4$ д). В результате захвата электрона превращается в ^{234}U .

В современных библиотеках оцененных данных не содержится полной оценки нейтронных данных для нептуния-234. Имеется лишь оценка R. A. Forrest, J. Кореску и J-Ch Sublet нейтронных сечений в активационной библиотеки EAF-2003.

На рисунке 1 показана энергетическая зависимость сечения деления и радиационного захвата нептуния-234.

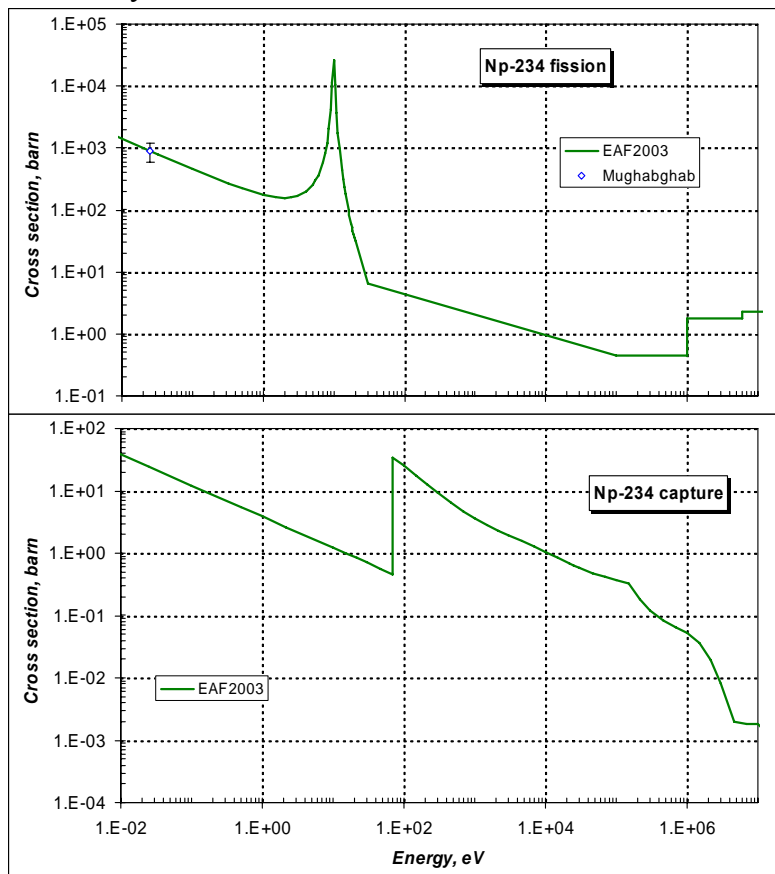


Рисунок 1 – Сечение деления и радиационного захвата на Np-234.

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из EAF-2003.

Автор отбора данных
Кошеев В.Н.

93.2. Нептуний-235

Радиоактивен. ($T_{1/2}=369.1$ д). Как правило, в результате захвата электрона превращается в U-235, но с вероятностью $2.6E-3\%$ испытывает альфа-распад в протактиний-231.

В современных библиотеках оцененных данных содержится одна полная оценка нейтронных данных для нептуния-235: в JENDL-3.3 – оценка Т.Nakagawa, 1995, принятая также в JEFF-3.1, ENDF/B-VIIb2, и оценка нейтронных сечений R. A. Forrest, J. Koresky и J-Ch Sublet в EAF-2003.

На рисунке 2 показана энергетическая зависимость сечения деления нептуния-235, а на рисунке 3 – сечение радиационного захвата на Np-235.

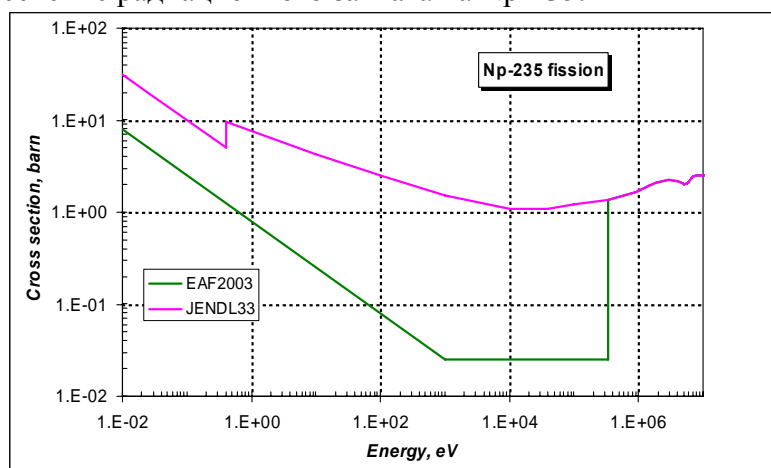


Рисунок 2 – Сечение деления Np-235.

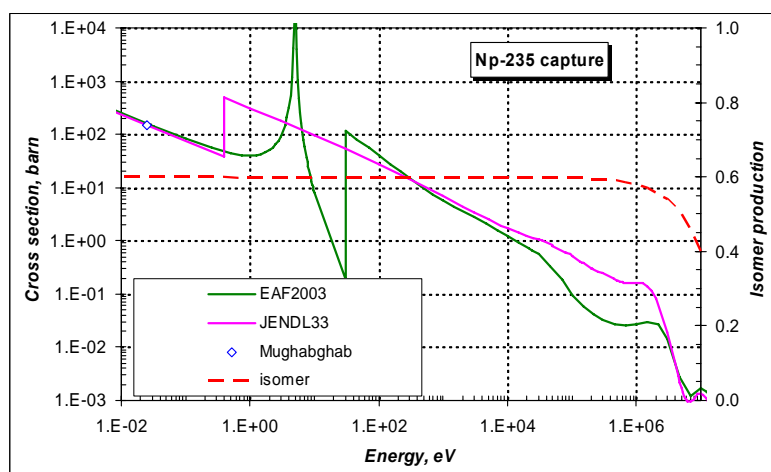


Рисунок 3 – Сечение радиационного захвата Np-235 и вероятность образования Np-236m.

Из приведенного на рисунке 2 сравнения сечения деления видно, что оценка Forrest и др. более реально отражает характер порогового сечения нечетно-нечетного изотопа нептуния-235, чем оценка Nakagawa.

Что касается сечения радиационного захвата, то согласно сравнению, приведенному на рисунке 3 видно, что авторы оценок используют различный подход к описанию сечения. Подход группы R. A. Forrest, J. Koresky и J-Ch Sublet представляется более убедительным.

В результате захвата нейтронов ядром нептуния-235 может образовываться изотоп Np-236m, который является основным источником накопления U-232 в урановом топливе.

Вероятность его образования показана на рисунке 3 пунктирной кривой. В оценке T.Nakagawa информация об образовании изомера Np-236 отсутствует и это ее существенный недостаток.

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из JENDL-3.3.

Нейтронные данные следует модифицировать следующим образом.

Использовать для сечения деления и радиационного захвата оценку R. A. Forrest, J. Kopecky и J-Ch Sublet, а полное сечение пересчитать с учетом выполненных изменений.

В секцию гладких сечений следует добавить составляющие захвата нейтронов – сечения реакции (n,p) и (n,a).

Следует добавить данные о выходах запаздывающих нейтронов (8 групп – на основе оценки JEFF-3.1); их спектры принять такими же, как для урана-235.

Следует, также, добавить информацию об образовании изомера Np-236m в результате радиационного захвата нейтронов, которую можно взять из активационной библиотеки EAF-2003.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

93.3. Нептуний-236

Радиоактивен. ($T_{1/2}=1540$ лет). В ~87% захватывая электрон Np-236 превращается в U-236; с вероятностью в ~ 13%, испытывая β -распад, превращается в Pu-236, и с вероятностью 0.16%, испытывая альфа-распад, превращается в протактиний-232.

В современных библиотеках оцененных данных содержится две полные оценки нейтронных данных для нептуния-236: в JENDL-3.3 – оценка T.Nakagawa (1993), принятая также в JEFF-3.1, оценка R. Q. Wright (1999), выполненная на основе оценки T.Nakagawa, и оценка нейтронных сечений R. A. Forrest, J. Kopecky и J-Ch Sublet в EAF-2003.

На рисунке 4 показана энергетическая зависимость сечения деления нептуния-236.

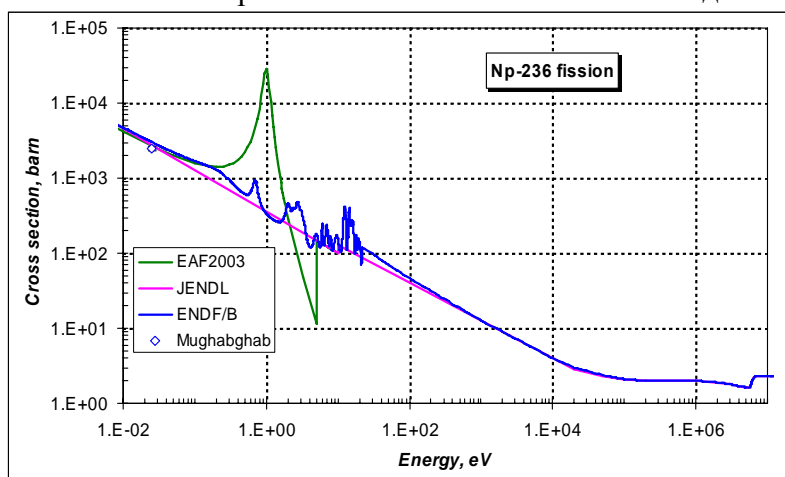


Рисунок 4 – Сечение деления Np-236.

Из приведенного на рисунке 4 сравнения видно, что выше 1 кэВ все оценки согласуются друг с другом. Все различия между оценками находятся в области энергий ниже 1 кэВ. Как уже отмечалось выше (п.93.2) различия между JENDL3.3 и EAF2003 объясняются различным подходом к описанию сечения. Что касается оценки Wright'a,

находящуюся в ENDF/B-VIIb2, то в ней используется набор резонансных параметров полученных группой Данона в 1995 году. На рисунке 5 показано сравнение оцененных сечений деления с имеющимися экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 5 сравнения видно, что оценка Wright'a согласуется с совокупностью экспериментальных данных наилучшим образом.

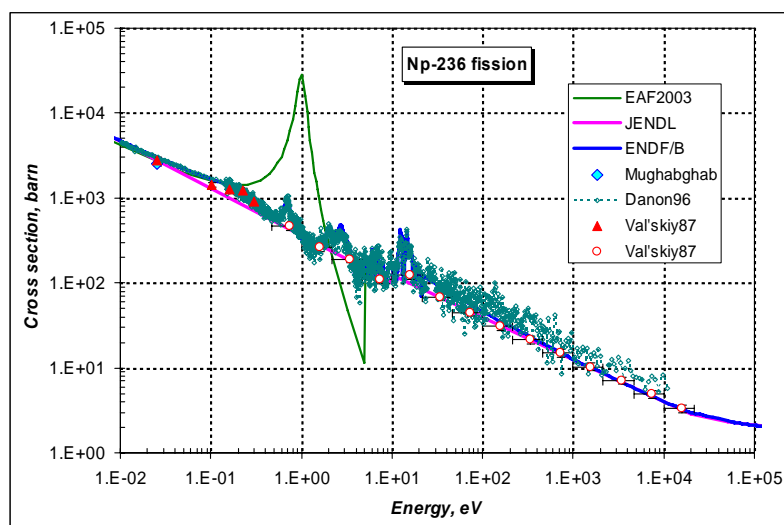


Рисунок 5 – Сравнение оцененных сечений деления Np-236 с экспериментальными данными.

На рисунке 6 показано сравнение оцененных сечений радиационного захвата Np-236. Экспериментальные данные здесь отсутствуют. Из приведенного на рисунке 6 сравнения видны различия в оценке сечения захвата между различными теоретическими подходами. Более обоснованной представляется оценка из ENDF/B.

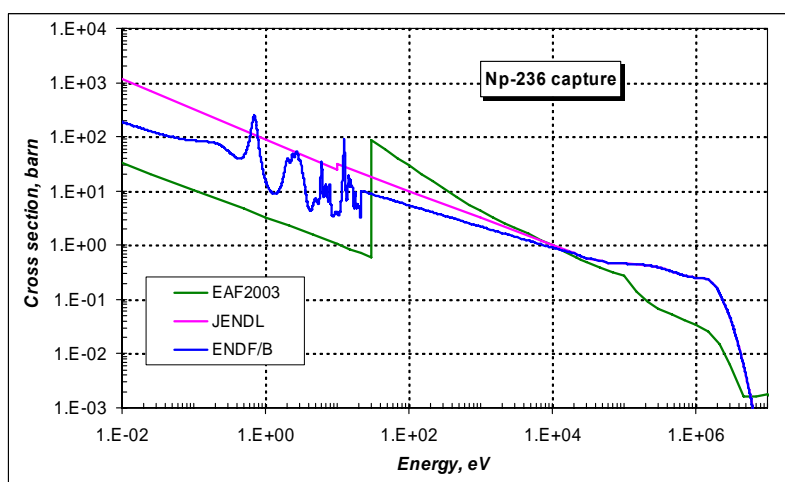


Рисунок 6 – Сечение радиационного захвата Np-236.

На рисунке 7 показано сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния нейтронов Np-236. Экспериментальные данные здесь также отсутствуют. Согласно оценке R. A. Forrest, J. Кореску и J-Ch Sublet в результате неупругого рассеяния нейтронов образуется изомер Np-236m. Следовательно, это сечение следует также задать в секции образования изомеров (MF=10, MT=4), поскольку ни в JENDL, ни в ENDF/B эти данные не приводятся.

Далее, на рисунке 8 показано сравнение различных оценок образования вторичных нейтронов при делении. Из приведенного на рисунке 8 сравнения видно, что оценка из ENDF/B представляется более обоснованной.

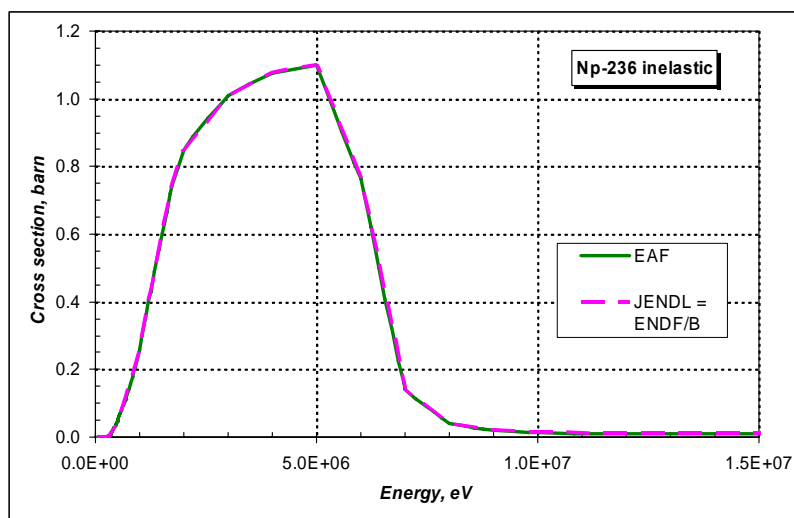


Рисунок 7 – Сечение неупругого рассеяния на Np-236.

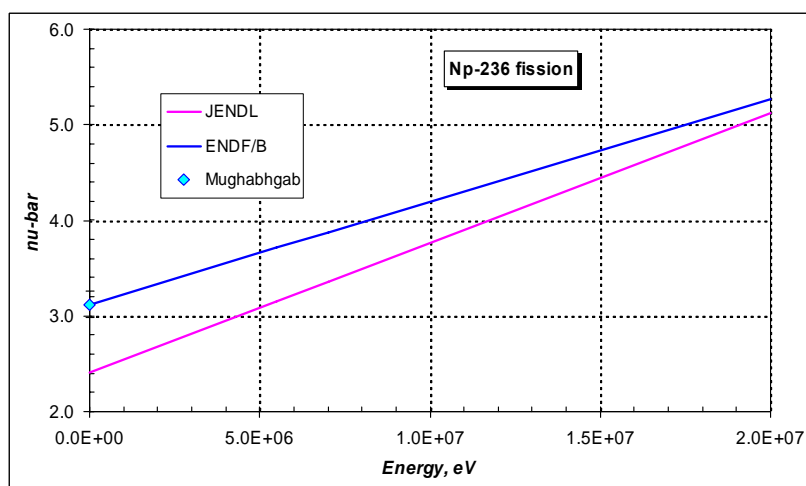


Рисунок 8 – Число вторичных нейтронов при делении Np-236.

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из ENDF/B-VIIb2.

Следует добавить информацию об образовании изомера Np-236m (секция MF=10, MT=4). Следует также добавить данные о выходах запаздывающих нейтронов (8 групп – на основе оценки JEFF-3.1); их спектры принять такими же, как для урана-235.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

93.4. Нептуний-237

Радиоактивен. ($T_{1/2}=2.144 \cdot 10^6$ лет). Испытывает альфа-распад в Pa-233, который далее в результате цепочки альфа-распадов, а в конце и бета-распадов превращается в висмут-209.

Оценки сечений нептуния-237 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3, БРОНД-3 и JEFF-3.1.

В западноевропейской библиотеке JEFF-3.1 приняты данные библиотеки JENDL-3.3.

Оценка БРОНД-3 выполнена в 1996 году, в 2001 выполнена ревизия файла.

Оценка ENDF/B-VII выпущена в 2006 году. По сравнению с версией файла ENDF/B-VI содержит существенное повышение сечения деления в области 150 эВ-1 МэВ, что привело к устранению расхождений данных файла ENDF/B-VI с данными JENDL-3.3 и БРОНД-3.

JENDL-3.3 – оценка T.Nakagava, 1988; существенно модифицирована в 1999 году и еще раз уточнена в 2001 году, по ряду основных сечений содержит данные из БРОНД-3.

93.4.1. Общие характеристики

1.1. $Z = 93$ -зарядовое число;

1.2. $A = 237$ (атомный вес);

1.3. $AW = 235.0120$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);

1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 2.144(11)E+6$ лет, доминирует α -распад с вкладом 2E-10% спонтанного деления;

1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих порог реакции до 20 МэВ приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Нейтронные реакции на Np-237 (порог ниже 20 МэВ).

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог}}$, МэВ | Ядро-продукт [*] |
|-----|---------|---------|--------------------------|---------------------------|
| 4 | n,n' | -.0331 | .03324 | Np-237 |
| 16 | n,2n | -6.621 | 6.649 | Np-236 |
| 17 | n,3n | -12.311 | 12.363 | Np-235 |
| 18 | деление | 196.37 | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 5.488 | 0 | Np-238 |

93.4.2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов ограничена энергией 150 эВ в оценке ENDF/B-VII и энергией 500 эВ в оценке JENDL-3.3. Экспериментальные данные о параметрах разрешенных резонансов простираются до 600 эВ [1]. Статистические методы анализа резонансов, развитые в ФЭИ, позволяют определить средние параметры нейтронных резонансов и, при необходимости, оценить согласованным образом средние параметры пропущенных слабых резонансов. Результаты анализа кумулятивного числа наблюдаемых s-резонансов показаны на рис. 9. Сравнение было проведено для версий ENDF/B-VI и JENDL-3.2, однако последующий анализ показал, что новые версии указанных библиотек основаны на тех же данных. Оценки числа пропущенных резонансов для области энергий до 200 эВ и 600 эВ представлены на рис. 10. Можно видеть, что пропуск резонансов становится существенным начиная с энергии 150 эВ. Однако, пропущенными оказываются только слабые резонансы с ширинами примерно в 5-10 раз ниже средних. Резонансы с ширинами, близкими к средним или превышающими их, идентифицированы без заметного пропуска вплоть до энергии 600 эВ. Так как именно эти резонансы вносят доминирующий вклад в нейтронные сечения, то область разрешенных резонансов в

оценке БРОНД-3 была распространена до 600 эВ, и средний вклад пропущенных слабых резонансов учтен путем добавления соответствующих подложек сечений в файле MF=3.

С учетом поправки на пропуск резонансов получены значения среднего расстояния между резонансами $D_0 = 0.57 \pm 0.03$ эВ, нейтронной силовой функции $S_0 = (0.97 \pm 0.07) 10^{-4}$ и средней радиационной ширины $\Gamma_\gamma = 40.0 \pm 1.2$ мэВ. Эти значения средних параметров нейтронных резонансов использовались для оптико-статистических расчетов сечений в области неразрешенных резонансов.

Для резонансной области энергий сравнение оценок полных нейтронных сечений, сечений упругого рассеяния, деления и радиационного захвата нейтронов показано на рис. 11-14. В оценке БРОНД-3 значительное внимание было уделено анализу делительных ширин резонансов и устранению противоречий в описании промежуточной структуры усредненных сечений деления в области энергий нейтронов выше 100 эВ. В анализ были включены новые экспериментальные данные, полученные на нейтронном спектрометре в Лос Аламосе [2, 3] и на импульсном реакторе ОИЯИ в рамках сотрудничества ОИЯИ-ФЭИ [4]. Выбранные параметры нейтронных резонансов достаточно хорошо воспроизводят наблюдаемые изменения сечений деления.

Сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в сравнении экспериментальными данными [1] приведены в нижеследующей таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение резонансных свойств Np-237.

| | БРОНД-3 | ENDF/B-VII | JENDL-3.3 | Эксперимент, барн |
|-----------------|---------|------------|-----------|-------------------|
| σ_{tot} | 190.2 | 196.2 | 175.79 | - |
| σ_f | 0.0221 | 0.0180 | 0.0204 | 0.020 ± 0.002 |
| σ_γ | 176.0 | 181.2 | 161.71 | 175.9 ± 2.9 |
| I_f | 6.952 | 6.815 | 6.90 | 6.9 ± 1.0 |
| I_γ | 642.3 | 652.8 | 657.0 | 640 ± 50 |

Как видно из таблицы 2 данные оценки БРОНД-3 хорошо согласуются с экспериментальными данными.

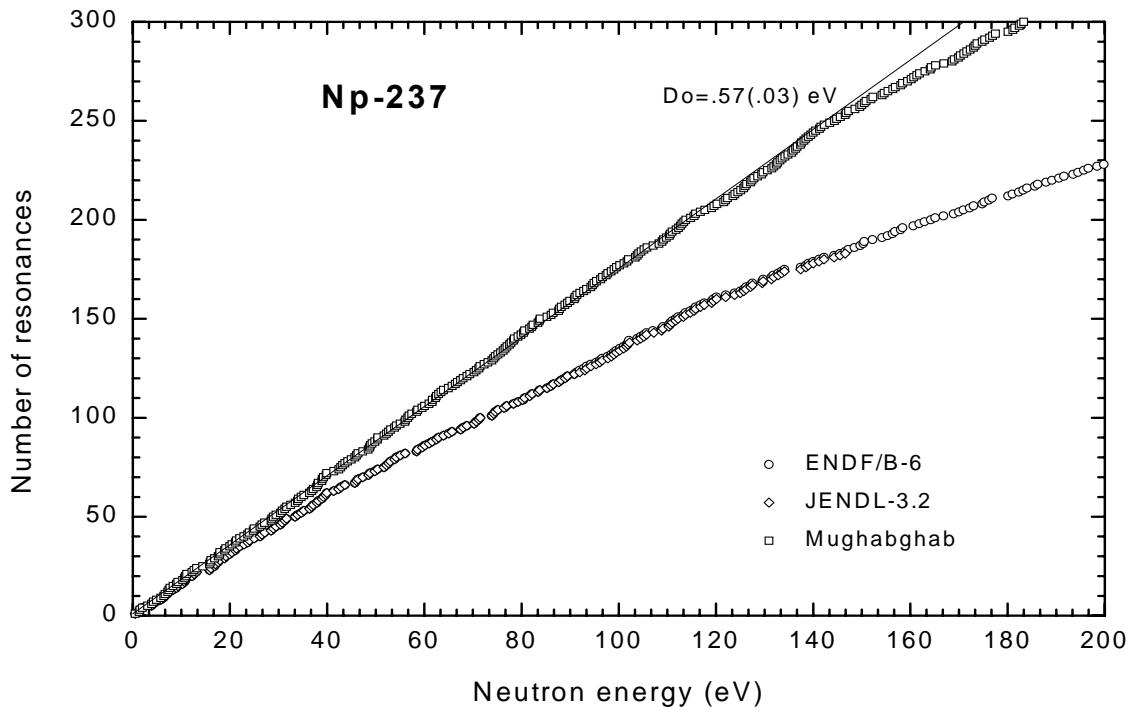


Рисунок 9 - Энергетическая зависимость числа s-резонансов.

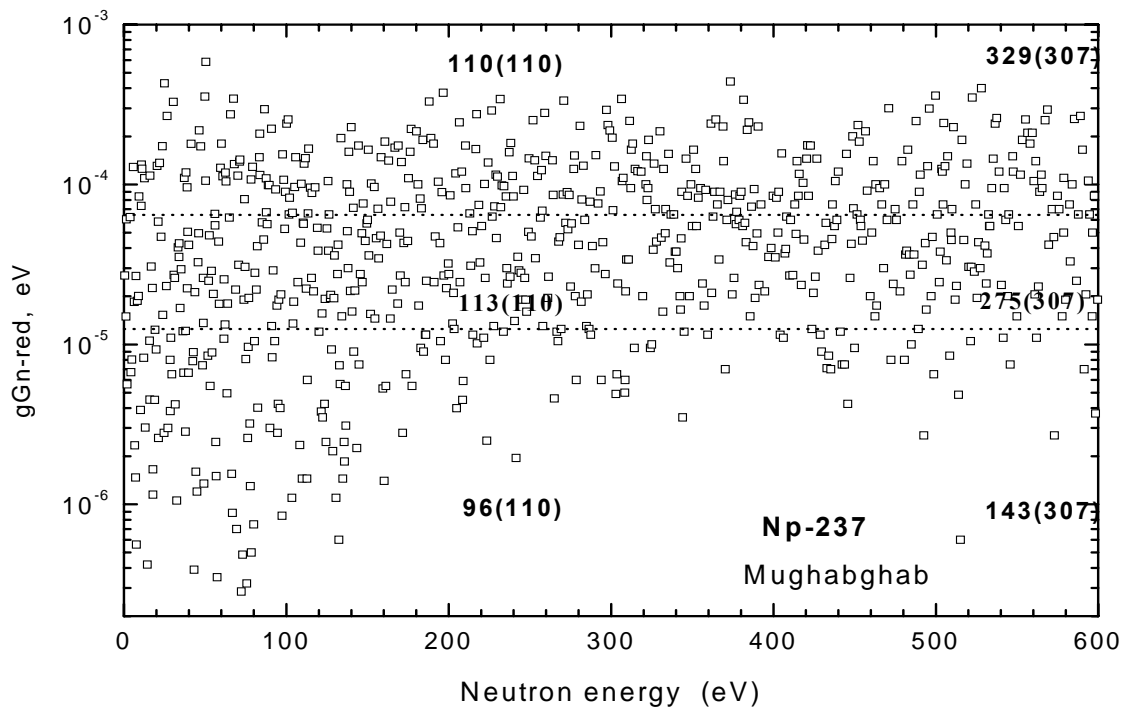


Рисунок 10 - Распределение приведенных нейтронных ширин резонансов.

93-Np-237(N,TOT),SIG

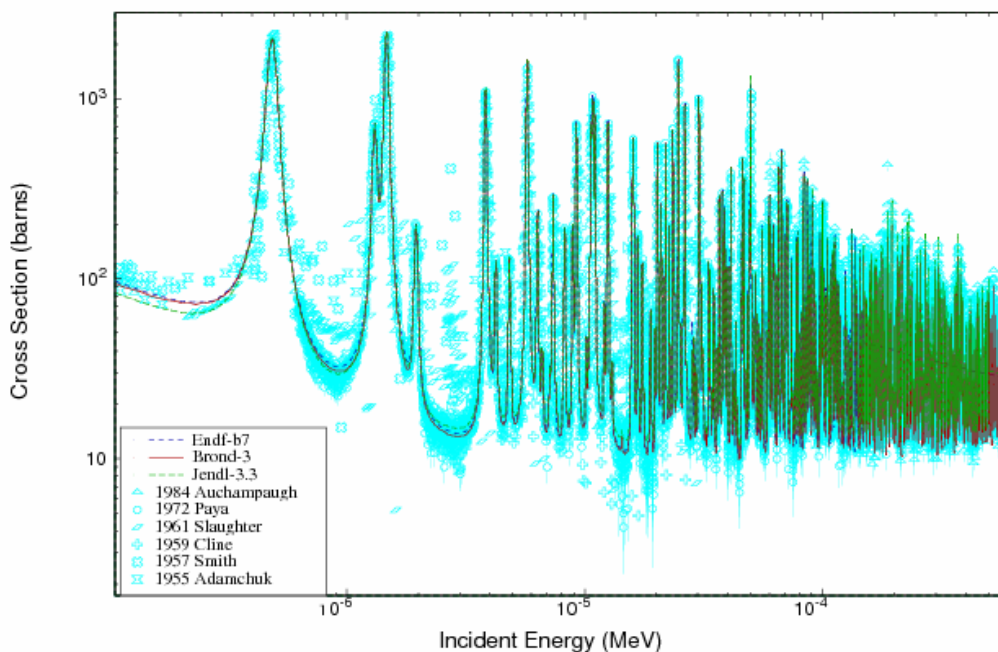


Рисунок 11- Экспериментальные данные о полных нейтронных сечениях ^{237}Np в области энергий разрешенных резонансов в сравнении с различными оценками.

93-Np-237(N,EL),SIG

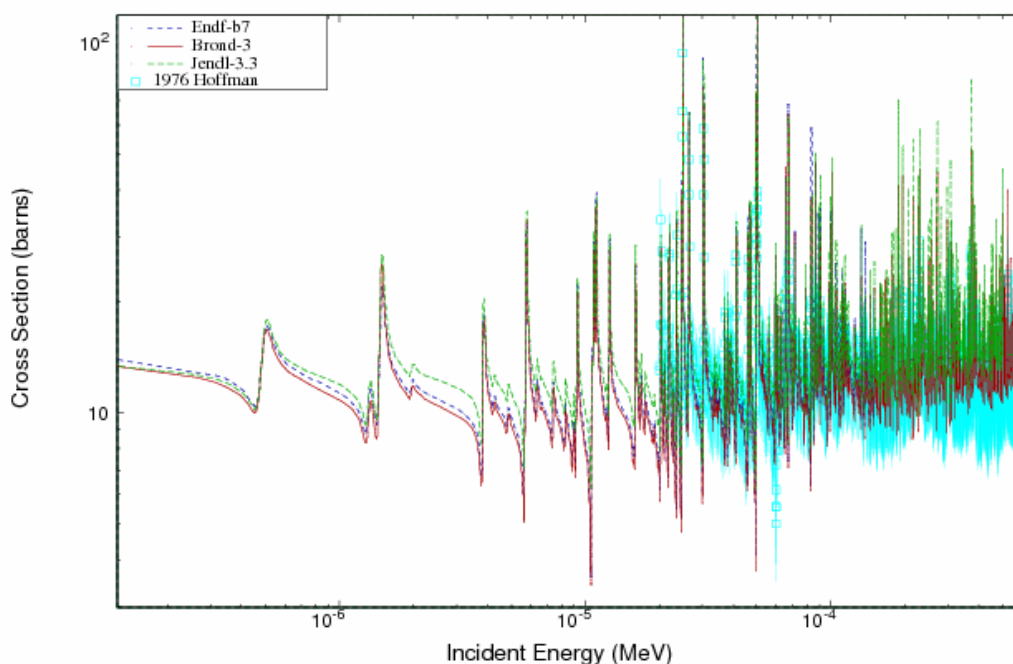


Рисунок 12 - Экспериментальные и оцененные данные о нейтронных сечениях упругого рассеяния ^{237}Np в области энергий разрешенных резонансов.

93-Np-237(N,G),SIG

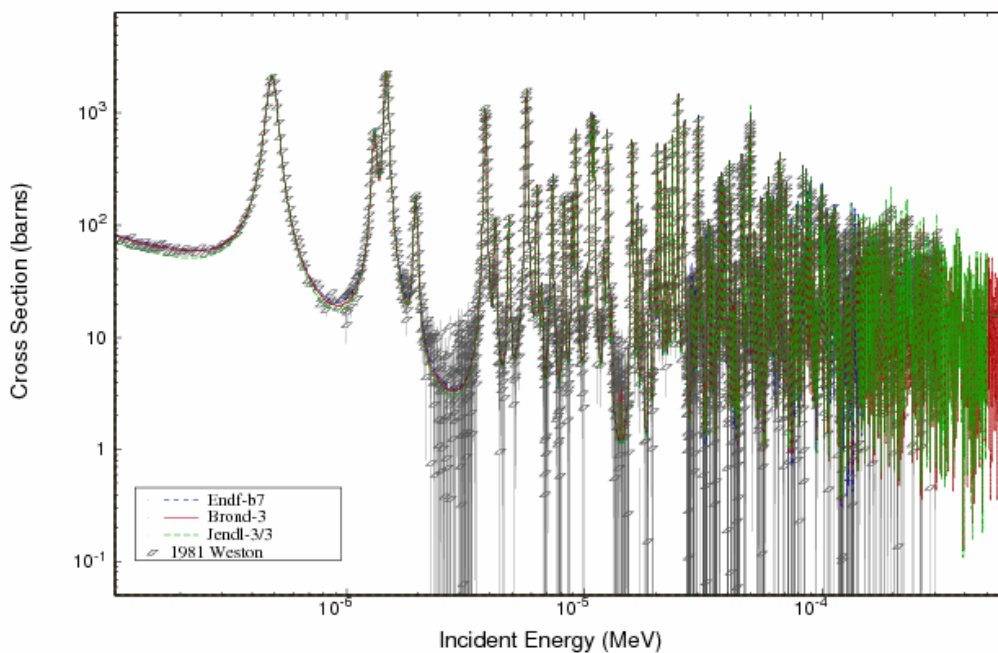


Рисунок 13 - Экспериментальные данные о сечениях радиационного захвата нейтронов ^{237}Np в энергий разрешенных резонансов в сравнении с различными оценками.

93-Np-237(N,F),SIG

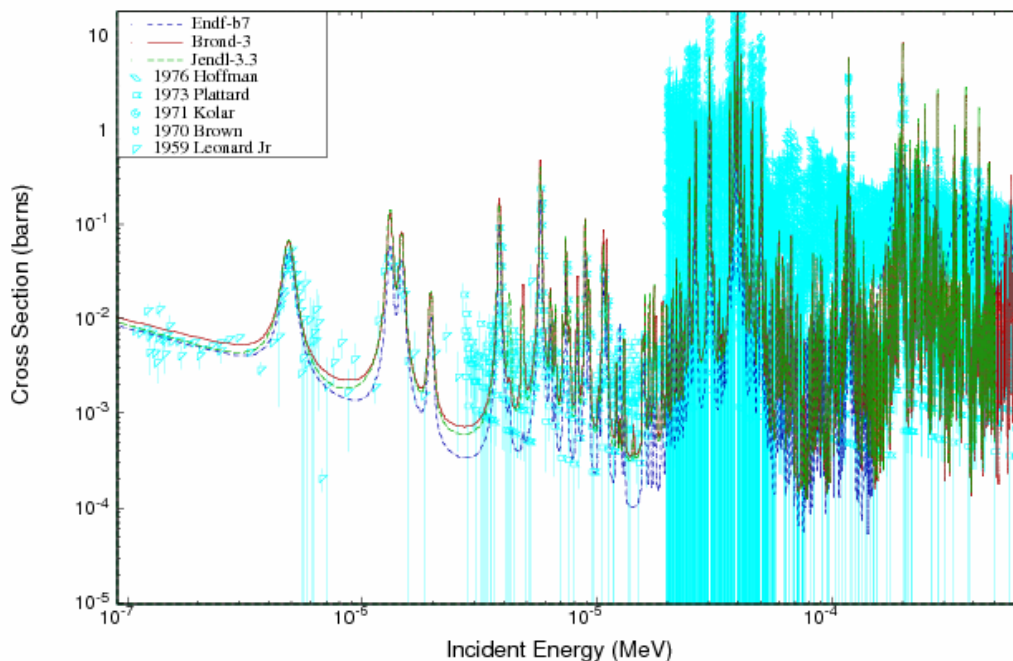


Рисунок 14 - Экспериментальные данные о сечениях деления ^{237}Np в области энергий разрешенных резонансов в сравнении с различными оценками.

Область неразрешенных резонансов

В файлах БРОНД-3 и ENDF/B-VII нет области неразрешенных резонансов.

В JENDL-3.3 содержится область неразрешенных резонансов с верхней границей: 35 кэВ. На рисунке 15 представлены экспериментальные данные о сечениях деления в области 600 эВ – 40 кэВ в сравнении с оценками. Между оценками нет существенных

разногласий, и флуктуации сечений, включенные в оценку ENDF/B-VII, лишь очень упрощенно отражают резонансные изменения сечений в области неразрешенных резонансов.

93-Np-237(N,F),SIG

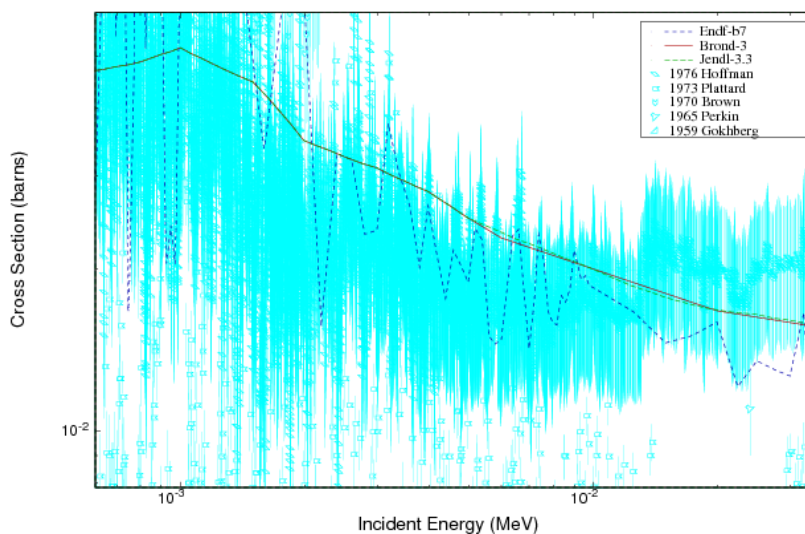


Рисунок 15 - Экспериментальные данные о сечениях деления в области энергий 600 эВ – 40 кэВ в сравнении с различными оценками.

На рис. 16 и 17 представлены экспериментальные и оцененные данные по полному сечению и сечению радиационного захвата. Как видно, все оценки мало различаются.

93-Np-237(N,TOT),SIG

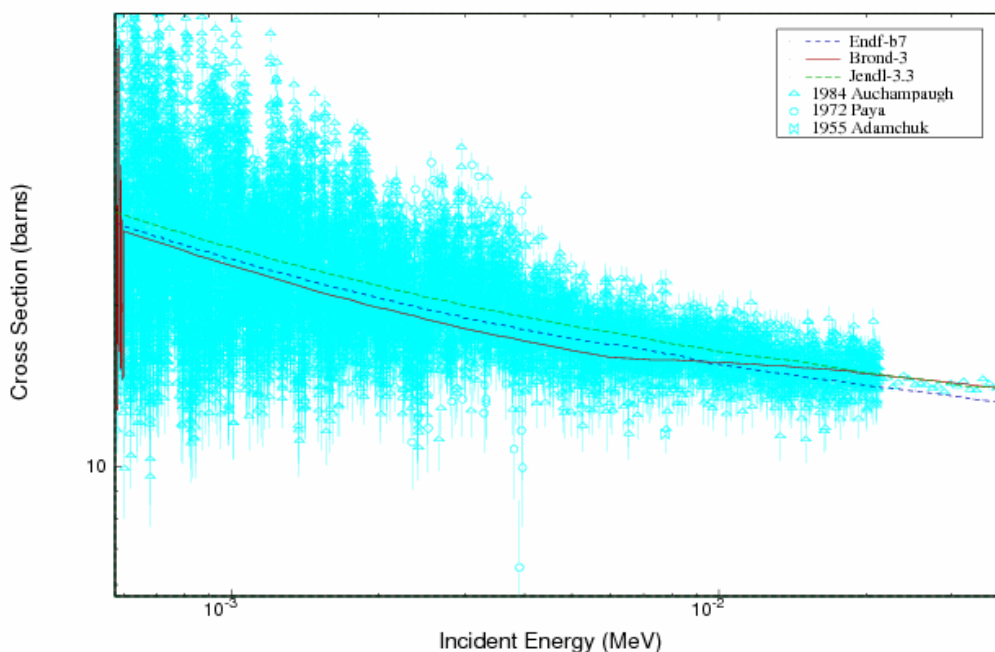


Рисунок 16 - Экспериментальные данные о полных сечениях в области энергий 600 эВ – 40 кэВ в сравнении с различными оценками.

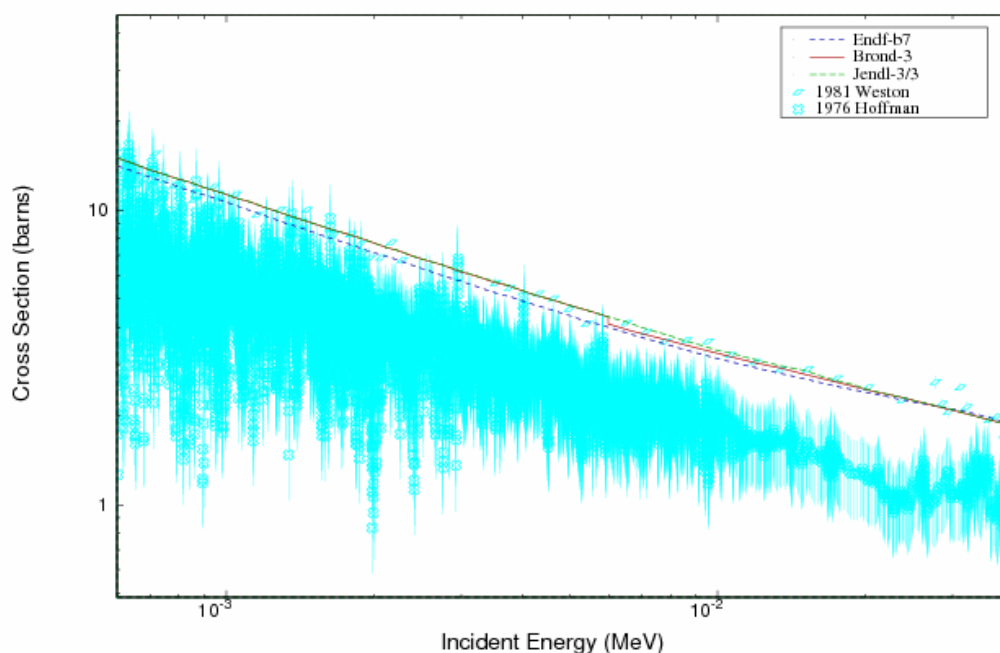


Рисунок 17 - Экспериментальные данные о сечениях радиационного захвата в области энергий 600 эВ – 40 кэВ в сравнении с различными оценками.

93.4.3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

Полное сечение (MT=1)

Оценка полного нейтронного сечения вне резонансной области обычно основаны на расчетах по оптической модели ядерных реакций с параметрами потенциала, выбранного на основе экспериментальных данных для соседних ядер (см. рис.18). Анализ этих данных в рамках метода связанных каналов был проведен во многих лабораториях и набор оптических параметров деформированной оптики были определены и широко используются для оценки сечений всех минорных актинидов. Эти параметры дают примерно одни и те же полные сечения, но заметно различающиеся сечения поглощения. Эти различия значительны для энергий нейтронов выше 10 МэВ и приводят к расхождению в сечениях деления и реакции (n,2n).

Следует отметить, что в JENDL-3 для полного нейтронного сечения и сечения упругого рассеяния принята оценка БРОНД-3. В пределах экспериментальных ошибок все оценки согласуются с имеющимися данными.

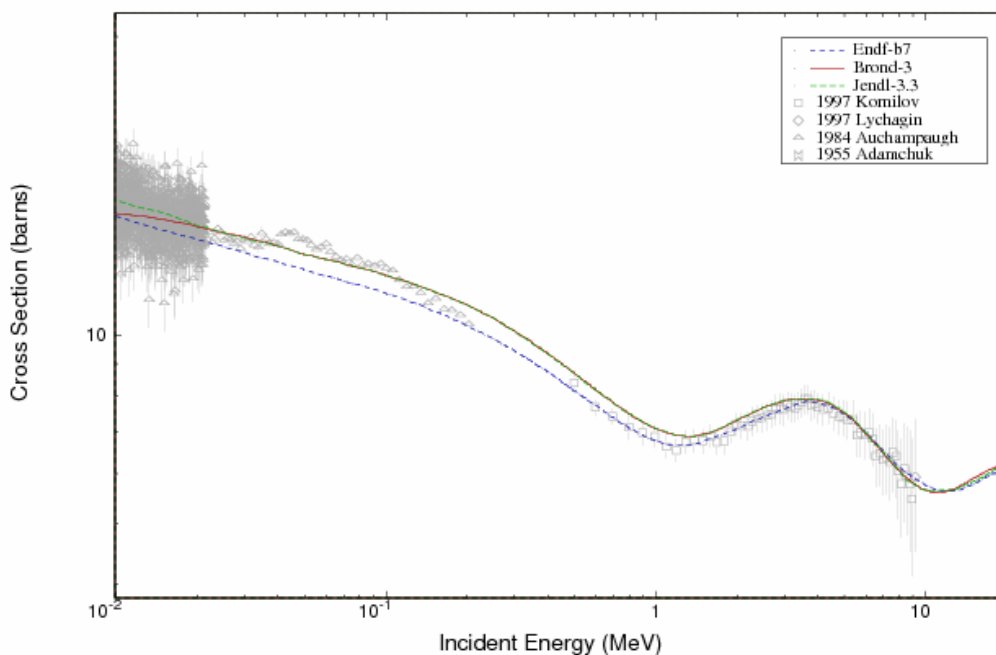


Рисунок 18 - Оценки полных нейтронных сечений ^{237}Np в сравнении с экспериментальными данными.

Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Сечение упругого рассеяния получено как разница полного сечения и суммы всех неупругих сечений. На рисунке 19 показано сравнение разных оценок. Кривые БРОНД-3 и JENDL-3.3 совпадают, так как в JENDL-3.3 принята оценка БРОНД-3. Разногласия оценок БРОНД-3 и ENDF/B-VII достаточно малы и обусловлены, в основном, различием сечений неупругого рассеяния, принятых в оценках.

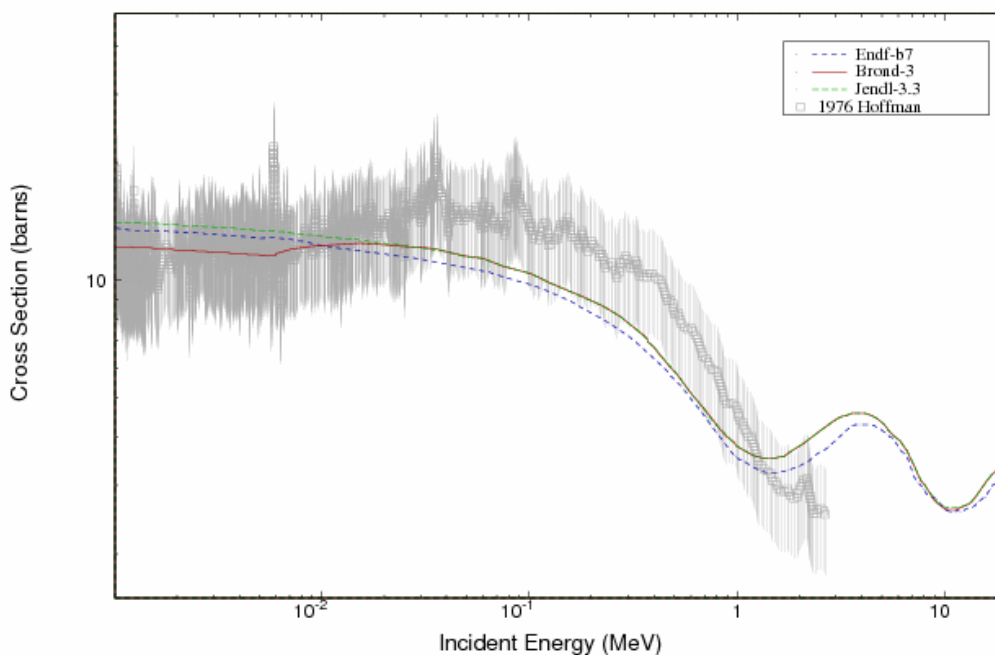


Рисунок 19 - Оценки сечений упругого рассеяния нейтронов в сравнении с экспериментальными данными

Сечение неупругого рассеяния (МТ=4).

На рисунке 20 показаны оцененные полные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек. Оценки БРОНД-3 включена в JENDL-3.3, поэтому они совпадают. Оценка ENDF/B-VII лежит заметно выше во всем диапазоне энергий выше 2 МэВ.

В БРОНД-3 расчеты выполнены по оптической модели с деформированным оптическим потенциалом. Статистические расчеты с коэффициентами проницаемости, соответствующими деформированному оптическому потенциалу, дают более реалистические предсказания функций возбуждения низколежащих уровней, чем аналогичные расчеты со сферической оптической моделью. Обобщенная оптическая модель позволяет также описать вклад прямых процессов при возбуждении низколежащих коллективных уровней.

Так как полученные оценки интегральных сечений упругого и неупругого рассеяния нейтронов оказываются достаточно близкими к оценкам ENDF/B-VI, то для угловых распределений упруго и неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 была принята оценка ENDF/B-VI (=ENDF/B-VII).

Экспериментальных данных по сечению неупругого рассеяния для Np-237 нет, поэтому трудно сделать обоснованный выбор между оценками БРОНД-3(≡JENDL-3.3) и ENDF/B-VII без дополнительной информации.

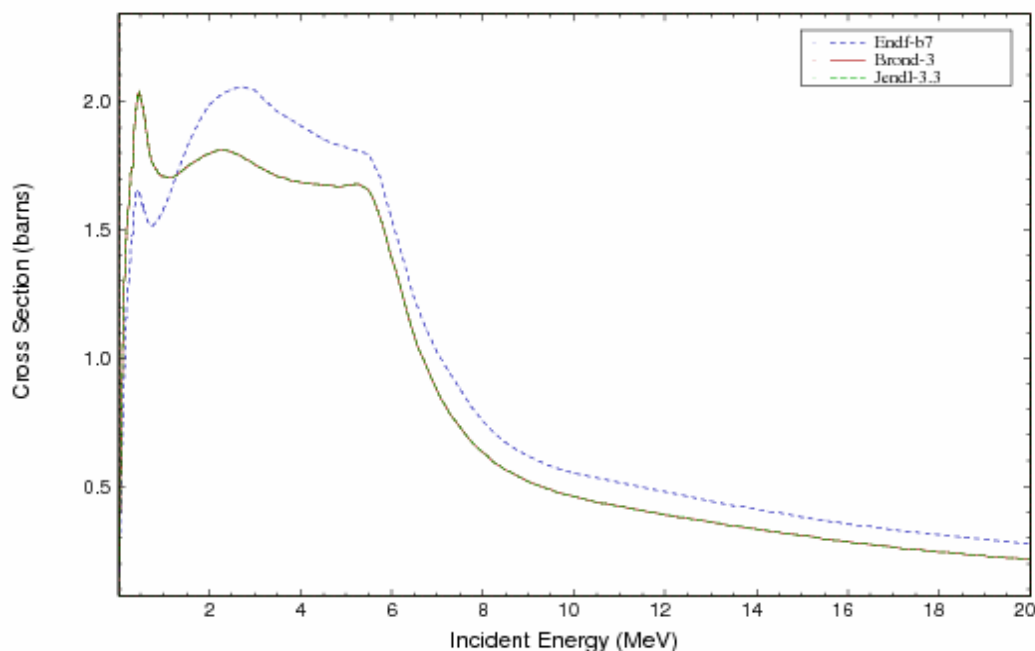


Рисунок 20 - Оценки сечений полного неупругого рассеяния нейтронов.

Сечение деления (MT=18)

На рис. 21-22 показано сравнение оценок БРОНД-3 с оценками ENDF/B-VII и JENDL-3.3. Оценке БРОНД-3 следует отдать предпочтение, поскольку она лучше соответствует систематическим тенденциям в поведении энергетической зависимости сечений деления, указанные в работе /5/. Кроме того, авторами этой оценки был проведен тщательный анализ и перенормировка экспериментальных сечений на новые стандартные и справочные данные, а полученные скорректированные данные были аппроксимированы методом Паде-аппроксимации/6/. На основе нового метода статистического учета систематических погрешностей экспериментальных данных уточнены рекомендуемые погрешности оцененных данных и определены ковариационные матрицы погрешностей.

При вычислении погрешностей оценки учитывались данные всех проанализированных экспериментальных работ. Была получена также корреляционная матрица групповых сечений, которая включена в секцию MT=33 полного файла оцененных нейтронных сечений.

Результаты тестировки оцененных сечений деления Np-237 по результатам интегральных измерений сечений деления для различных нейтронных спектров показали, что для спектров нейтронов теплового деления U-235 и спонтанного деления Cf-252 оценка сечений БРОНД-3 хорошо согласуется с экспериментальными данными. В пределах погрешности оценка согласуется также с данными интегральных измерений сборки Sigma-Sigma. Для сборки CFRMF измеренные сечения деления оказываются ниже значений, вычисленных для любой из оценок сечений деления. Это, по-видимому, указывает на необходимость более тщательного анализа погрешностей экспериментальных данных CFRMF.

93-Np-237(N,F),SIG

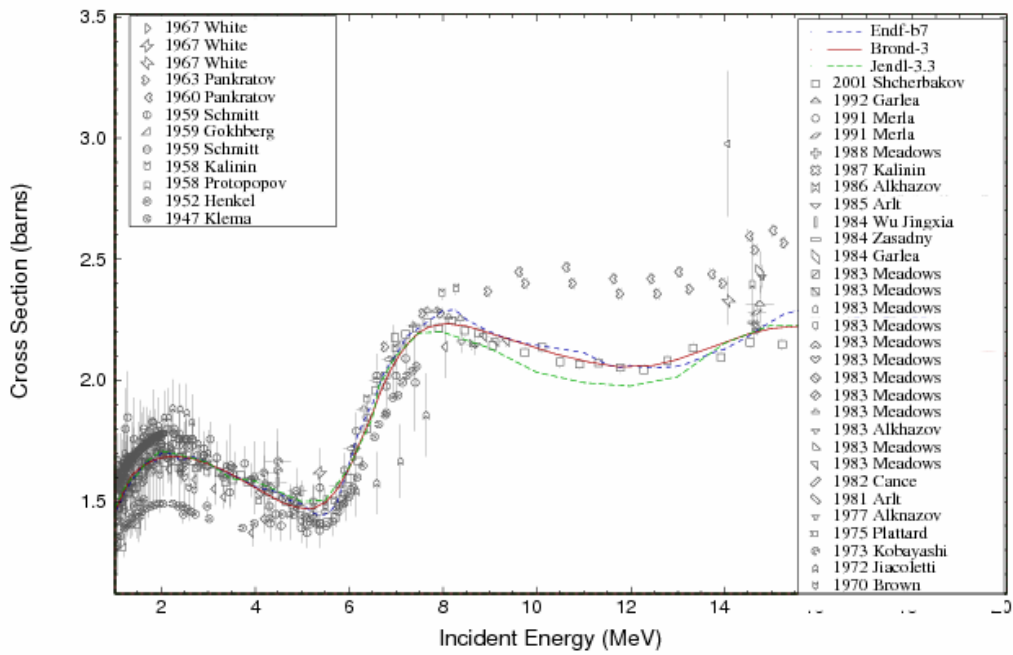


Рисунок 21 - Оценки сечений деления ^{237}Np в сравнении с экспериментальными данными.

93-Np-237(N,F),SIG

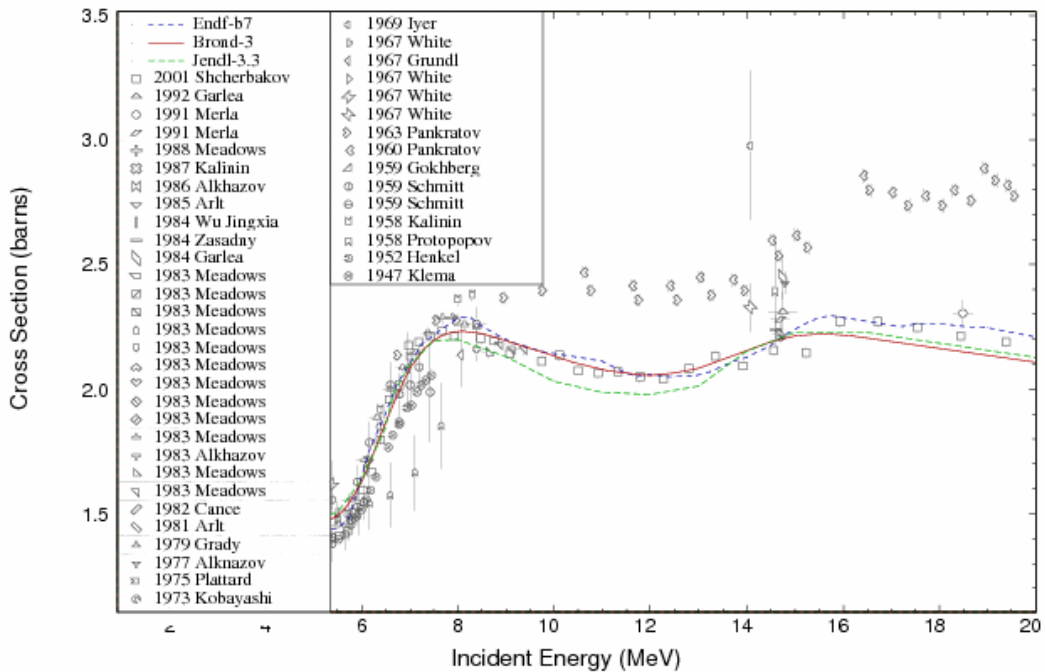


Рисунок 22 - Оценки сечений деления ^{237}Np нейтронами в сравнении с экспериментальными данными

Оценки сечений других реакции, ν_p и ν_d

Для числа мгновенных нейтронов деления ν_p были взяты значения, рекомендованные в работе /7/. Они на 2% ниже значений, принятых в оценке ENDF/B-VI для энергий нейтронов ниже 4 МэВ, но расхождение оценок убывает при увеличении энергий нейтронов (см.рис.23). Выше 14 МэВ обе оценки совпадают.

Для числа запаздывающих нейтронов ν_d взята оценка, основанная на новых экспериментальных данных об энергетической зависимости ν_d /15/ (см. рис.24).

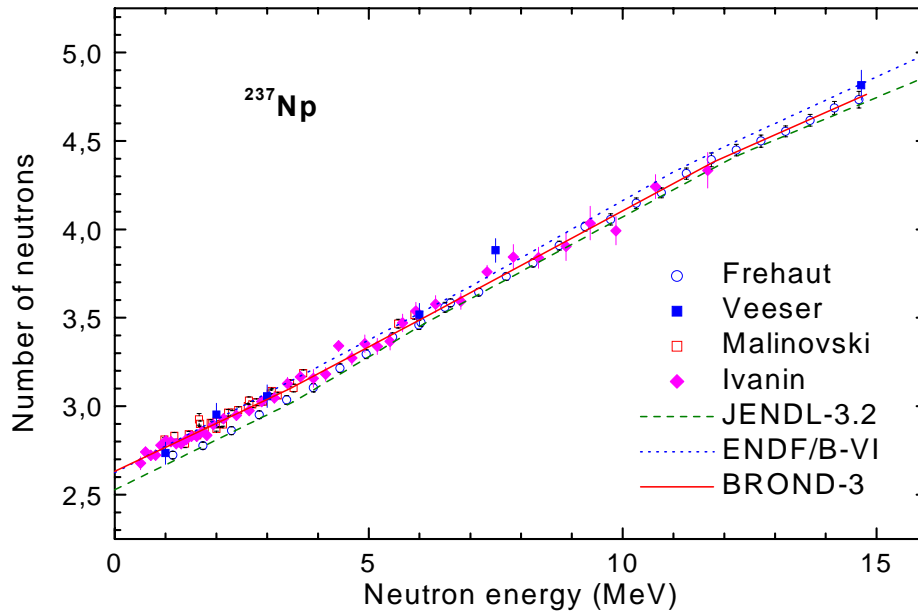


Рисунок 23 - Экспериментальные данные о числе вторичных нейтронов при делении ^{237}Np в сравнении с оценками ENDF/B-VI (пунктир), JENDL-3.2 (штриховая кривая) и БРОНД-3 (сплошная кривая)

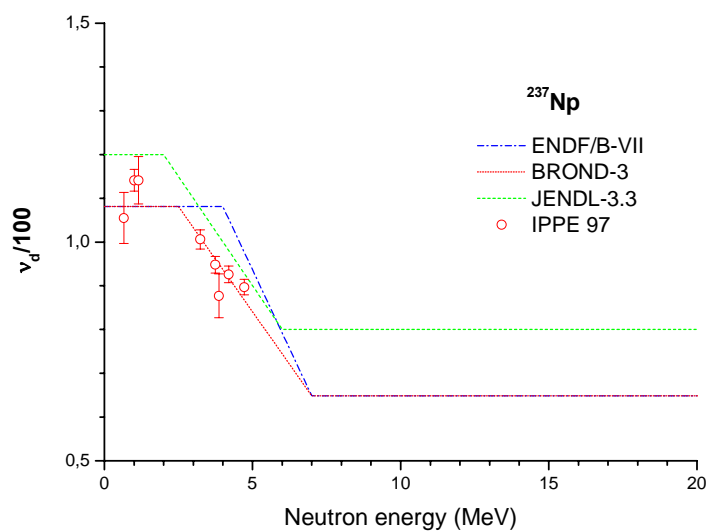


Рисунок 24 - Оценки числа запаздывающих нейтронов в сравнении с экспериментальными данными.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102)

На рисунке 25 приведены оценки сечений радиационного захвата.

Для БРОНД-3 был проведен анализ всей совокупности экспериментальных данных по сечениям радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 600 эВ. На основе анализа структуры погрешностей экспериментальных данных были оценены статистические и систематические погрешности измерений и определены средние коэффициенты корреляции каждого набора данных. Оцененная кривая была получена методом статистической аппроксимации экспериментальных данных с обоих типов погрешностей.

Для энергий нейтронов выше 2.5 МэВ оценка БРОНД-3 проведена на основе статистических расчетов с учетом эмпирической систематики сечений захвата нейтронов с энергиями выше 14 МэВ. В JENDL-3.3 принята оценка из БРОНД-3. Как видно из сравнения, оценка ENDF/B-VII при энергии 4-20 МэВ лежит заметно выше.

93-Np-237(N,G),SIG

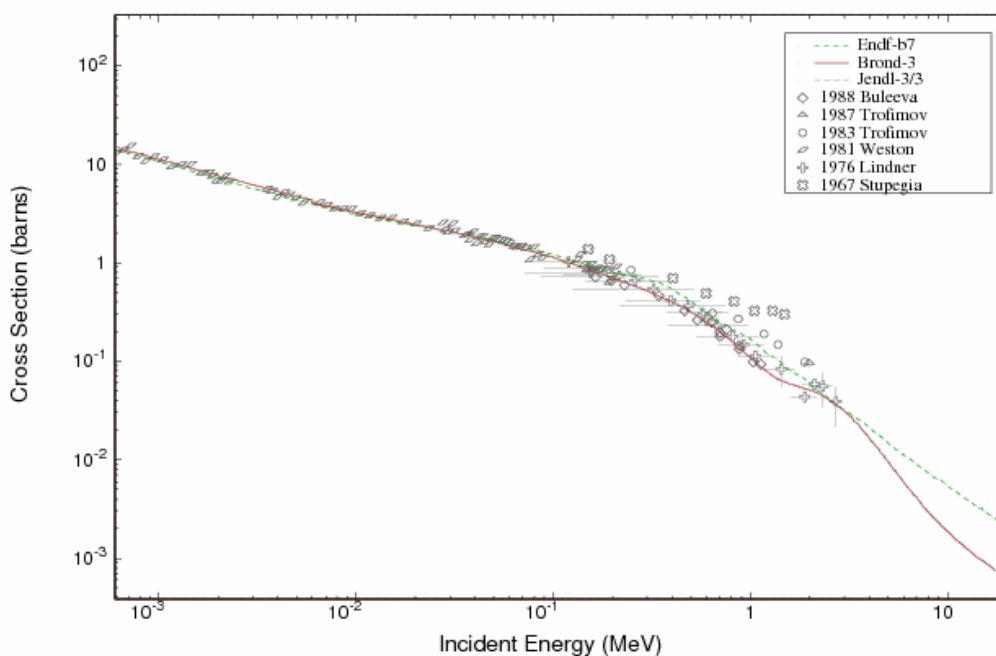


Рисунок 25 - Оценки сечений радиационного захвата нейтронов ^{237}Np в сравнении с экспериментальными данными.

Сечение реакций (n,2n) и (n,3n) (MT=16, 17).

Оценки сечений (n,2n) и (n,3n) реакций были сделаны на основе статистических расчетов, согласованных с рассмотренной выше оценкой сечений деления и сечений поглощения нейтронов. На рисунке 26 даны оценки реакции (n,2n). Экспериментальные данные имеются в основном для реакции (n,2n) с образованием короткоживущего изомера Np-236 [8-12]. Эти данные преобразованы к полному сечению реакции (n,2n) с использованием теоретического значения изомерного отношения, полученного в работах [13,14]. Принимая во внимание погрешности оценок изомерного отношения, согласие экспериментальных данных с рекомендуемой оценкой следует считать вполне удовлетворительным. Пунктирной линией на рисунке 26 показаны оцененные значения вероятности образования изомера Np-236m.

На рисунке 27 даны оценки реакции (n,3n), экспериментальных данных нет. Различие оценок БРОНД-3 и ENDF/B-VII можно объяснить разницей в сечениях деления в

этой области, но расхождение оценки БРОНД-3 с оценкой JENDL-3.3 аргументировано объяснить не представляется возможным.

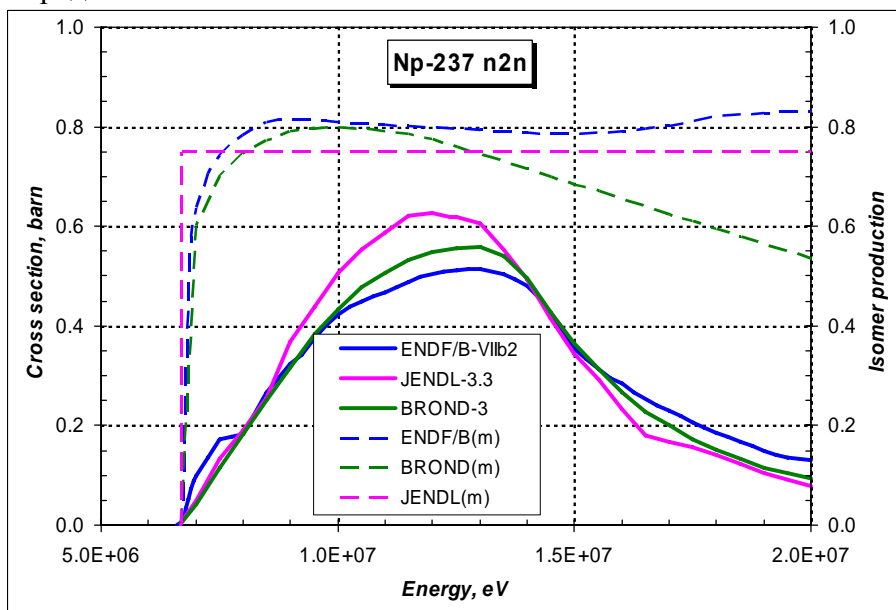


Рисунок 26 - Оценки сечений реакций (n,2n).

93-Np-237(N,3N),SIG

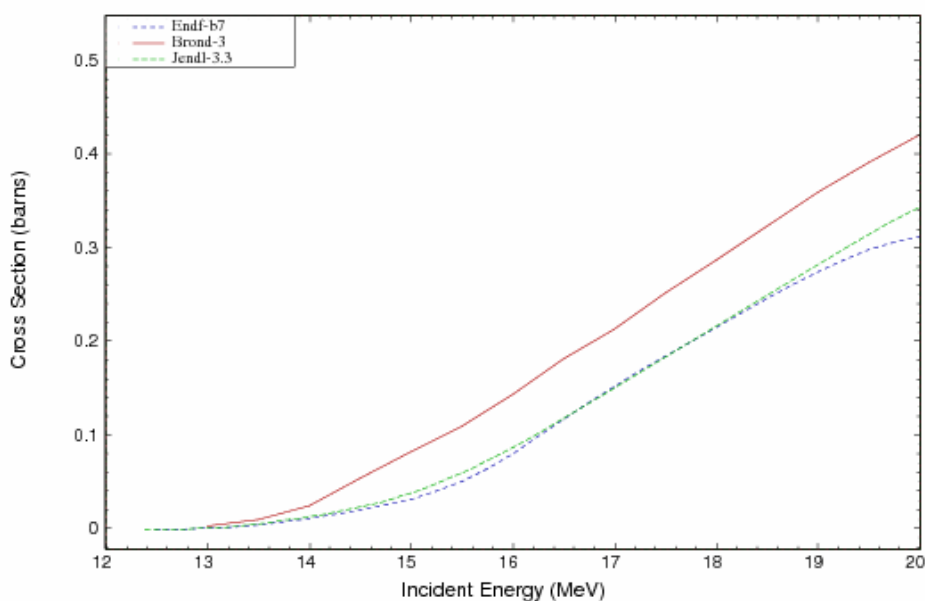


Рисунок 27 - Оценки сечений реакций (n,3n).

ЛИТЕРАТУРА

1. S.F.Mughabghab Neutron Cross Sections. N.Y.-London, Academic Press, 1984, v.1B.
2. J.Kimura. Nucl. Sci. Tech., 1993, v. 30, p.863.
3. A.D.Carlson et al. In: Proc. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, (Gatlinburg, 1994). Oak Ridge, 1994, v.1, p. 40.
4. A.A. Goverdovski et al. Sov. J. Nucl. Phys., 1995, v.58, p.27.
5. А.И.Блохин, В.Н.Мамохин, С.М.Насырова, Препринт ФЭИ-2620, 1997.
6. S.A.Badikov Preprint FEI-1686, Obninsk, 1985.

- S.A.Badikov, K.I.Zolotarev. In: Proc. Spec. Meeting on Evaluation and Processing of Covariance Data (Oak Ridge, 1992). Paris, OECD, 1993, p. 105.
7. V.V.Malinovski, M.Z.Tarasko, B.D.Kuzminov. VANT, Ser. Nuclear Constants, 1985, is. 1, p. 25.
 8. J.Perkin, R.Coleman. Nucl.Energy, 1961, v.14, p. 69.
 9. I. Landrum, R.Nagle, M.Linder. Phys.Rev., 1970, v. C8, p. 1938.
 10. K.Lindeke et al. Phys.Rev., 1975, v. C12, p. 1507.
 11. E.A.Gromova et al. Atomnaya Energiya, 1983, v. 54, p. 108.
 12. N.V.Kornilov et al. Atomnaya Energiya, 1985, v. 58, p. 117.
 13. D.Gardner, M.Gardner, R.Hoft. Report UCAR-100062-83/1, p. 51.
 14. A.V.Ignatyuk et al. Atomnaya Energiya, 1987, v. 63, p.110.
 15. V.M.Piksaikin et al. Int. Conf. Nucl. Data for Science & Technology, Trieste, 1997, p.485.

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в области разрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных, и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. Оценки БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений. Это свидетельствует об их достаточно высокой надежности и согласованности. **Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку БРОНД-3.** В настоящее время нет каких-либо экспериментальных данных, указывающих на необходимость уточнения этой оценки. В файл включаются также данные о выходах продуктов деления – из ENDF/B-VII¹

Авторы отбора данных

Игнатюк А.В. и Манохин В.Н.

93.5. Нептуний-238

Радиоактивен. ($T_{1/2}=2.117$ д.). Испытывает бета-распад в плутоний-238, который затем после альфа-распада превращается в уран-234.

В современных библиотеках оцененных данных содержится две полные оценки нейтронных данных для нептуния-238:

- оценка Т.Nakagawa (1993), принятая в JENDL-3.3 а также в ENDF/B-VIIb2;
- и оценка, выполненная координационной группой для проекта JEFF-3 на основе JEF-2.2.

Имеется также оценка нейтронных сечений R. A. Forrest, J. Kopecky и J-Ch Sublet в активационной библиотеке EAF-2003.

На рисунке 28 показано сравнение энергетической зависимости сечения деления нептуния-238 с имеющимися экспериментальными данными.

¹ T.R.England, B.F.Rider, ENDF-349, 1989.

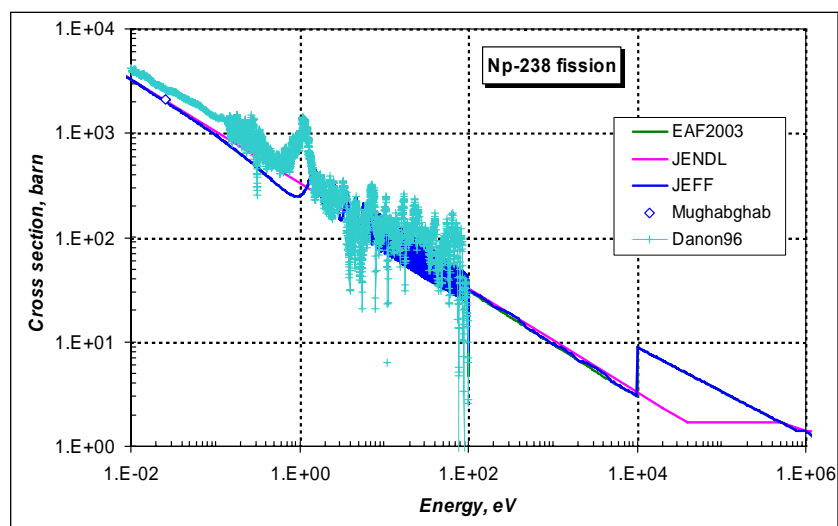


Рисунок 28 – Сравнение оцененных сечений деления Np-238 с экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 28 сравнения видно, что обе оценки не описывают эксперимент Дэнона, выполненный в 1996 году. Вероятно, обработка эксперимента с целью получения набора резонансных параметров затянулась по причине сильного различия значения сечения в тепловой точке (см. таблицу 3).

Таблица 3. Сравнение сечения деления при энергии $E=0.0253$ эВ.

| | |
|--------------|----------------|
| Spencer69 | 2070 ± 30 |
| Abramovich95 | 2110 ± 740 |
| Fomushkin97 | 2110 ± 75 |
| Danon96 | 2638 ± 58 |

Наблюдаемая резонансная структура в оценке JEFF в области энергий до 100 эВ выполнена расчетным путем с использованием средних резонансных параметров, получаемых на основе систематики. От 100 эВ до 10 кэВ приводится область неразрешенных резонансов. Выше 10 кэВ данные взяты из библиотеки ENDL-84. Отметим, что выше 10 кэВ и начинаются значительные различия в оценке сечения деления.

Что касается оценки сечения деления из JENDL, то в тепловой области кривая ориентирована на экспериментальное значение Спенсера69. Далее до 20 кэВ поведение пропорционально $1/V$. От 20 кэВ до 6.6 МэВ оценка проведена на основе экспериментальных данных Britt&Wilhelming(1979), эти результаты, в настоящее время нам недоступны. Выше 6.6 МэВ используется упрощенная формула Бычкова.

Учитывая тот факт, что в области энергий выше 20 кэВ кривая JENDL проведена с учетом экспериментальных данных, предпочтение для РОСФОНДА следует отдать именно этой оценке сечения деления.

На рисунке 29 показано сравнение оцененных сечений радиационного захвата Np-238. Экспериментальные данные здесь отсутствуют. Из приведенного на рисунке 6 сравнения видны различия в оценке сечения захвата между различными теоретическими подходами. Как видно, в настоящее время нет возможности указать наиболее надежную оценку сечения радиационного захвата нейтронов на нептунии-238.

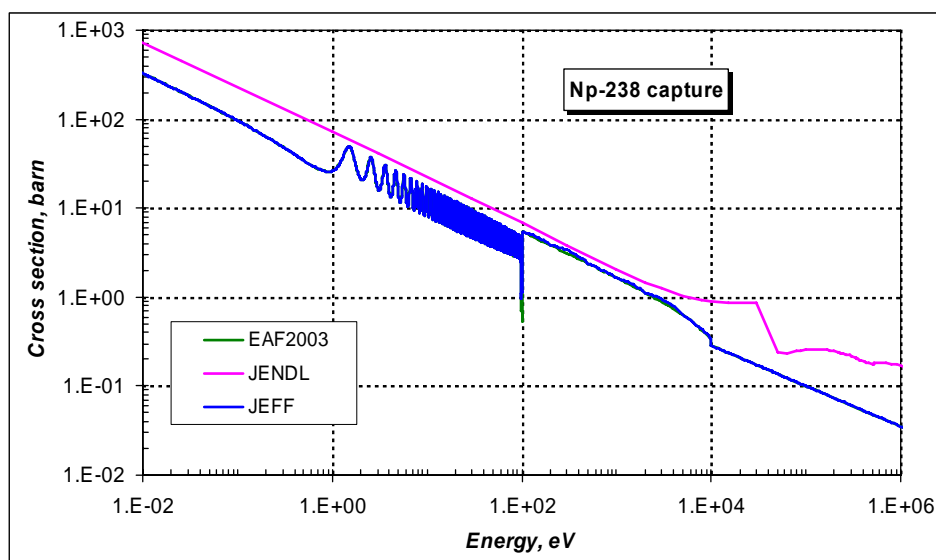


Рисунок 29 – Сечение радиационного захвата Np-238.

На рисунке 30 показано сравнение оцененных значений вторичных нейтронов деления. Отметим, что в JEFF оценка полного числа нейтронов деления выполнена по полуэмпирической формуле Гордеевой и Смиреникина, пересмотренную в 1972 году Коньшиным. Для запаздывающих нейтронов используется оценка Wilson и England для 8-ми групп. В оценке JENDL полное число нейтронов деления получено как сумма мгновенных и запаздывающих нейтронов, которые в свою очередь получены на основе систематик.

Энергетическая зависимость одна и та же, а исходное тепловое значение – разное, которое не согласуется с рекомендацией Мухабхаба. К рекомендованному значению ближе оценка T.Nakagawa. Её и следует предпочесть для РОСФОНДА.

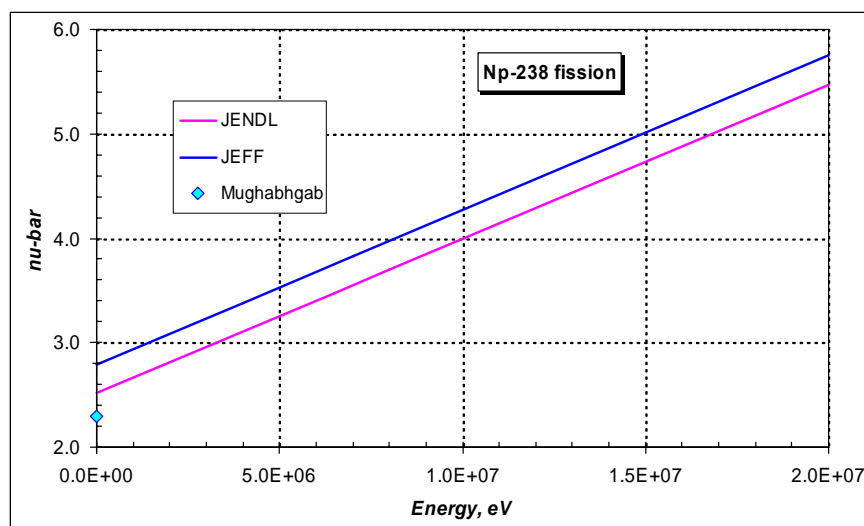


Рисунок 30 – Число вторичных нейтронов при делении Np-238.

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных из библиотеки JENDL-3.3.

Добавить информацию об образовании изомера Np-236m, образующего при реакции $(n,3n)Np-237m$. В файл включаются также данные о выходах продуктов деления – из ENDF/B-VII

Автор отбора данных

93.6. Нептуний-239

Радиоактивен. ($T_{1/2}=2.3565$ д). Испытывает бета-распад в плутоний-239.

В современных библиотеках оцененных данных содержится две полные оценки нейтронных данных для нептуния-239. В JENDL-3.3 находится оценка Y.Kanda (1976), выполненная для библиотеки JENDL-3. В ENDF/B-VIIb2 положена оценка Wright (1988), выполненная для ENDF/B-V на основе данных JENDL-2. Эта оценка принята также в JEFF-3.1. Имеется еще оценка нейтронных сечений в активационной библиотеке EAF-2003.

На рисунке 31 показано сравнение энергетической зависимости сечения деления нептуния-239.

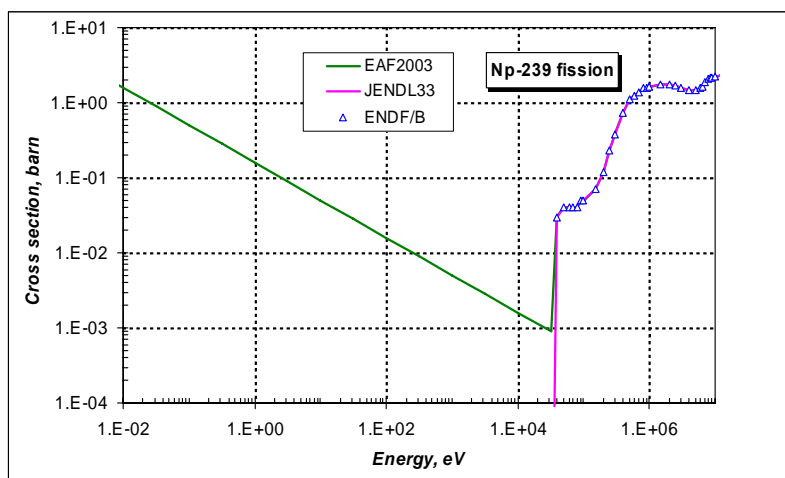


Рисунок 31 – Сравнение оцененных сечений деления Np-239.

Из приведенного на рисунке 31 сравнения видно, что все оцененные кривые согласовано описывают пороговый характер сечения деления. Однако, подпороговое деление наблюдается только в оценке EAF2003, что является более корректным, но не существенным фактором.

На рисунке 32 показано сравнение оцененных значений вторичных нейтронов деления. Экспериментальные данные и рекомендация Мухабхаба отсутствуют.

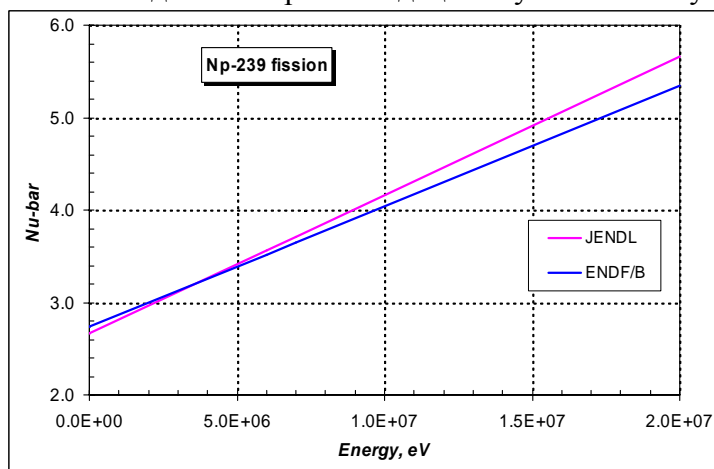


Рисунок 32 – Число вторичных нейтронов при делении Np-239.

В оценке JENDL полное число нейтронов деления получено как сумма мгновенных и запаздывающих нейтронов, которые в свою очередь получены на основе систематик. В оценке ENDF/B полное число вторичных нейтронов деления взято таким же, как и для Np-237 (ENDF/B-IV).

Из приведенной на рисунке 32 информации видно что, оцененные значения полного числа вторичных нейтронов между собой согласуются достаточно хорошо. Однако в оценке JENDL они приводятся по составляющим – мгновенные и запаздывающие, и это обстоятельство делает предпочтительной оценку JENDL в качестве выбора для РОСФОНДА.

На рисунке 33 показано сравнение оцененных сечений радиационного захвата Np-239. Экспериментальные данные здесь отсутствуют. Из приведенного на рисунке 33 сравнения видны различия в оценке сечения захвата между различными теоретическими подходами. Более обоснованной представляется оценка из ENDF/B. Там же приводится кривая образования изомера Np-240m в результате радиационного захвата нейтронов (пунктирная линия).

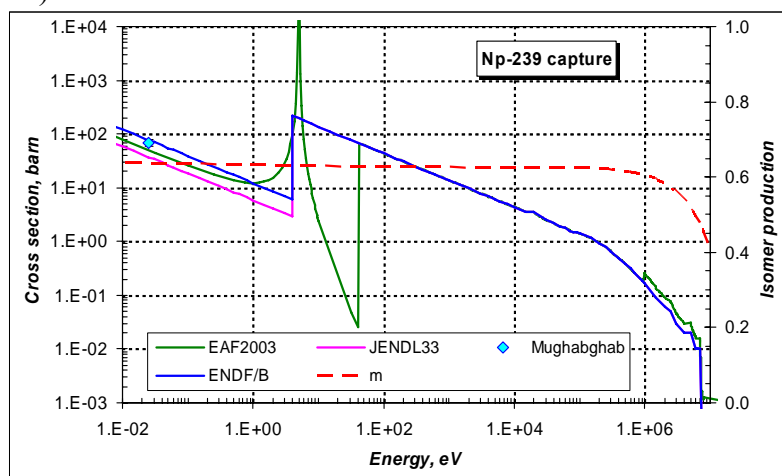


Рисунок 33 – Сравнение оцененных сечений радиационного захвата Np-239.

Из приведенного на рисунке 33 сравнения видно, что оценка Wright (ENDF/B) отличается от JENDL в тепловой области (ниже 4 эВ), ориентируясь на рекомендованное значение Мухабхаба в тепловой точке. Далее эти оценки совпадают. В оценке EAF2003 присутствует искусственный резонанс, согласно методике разработанной R. A. Forrest, J. Korescky и J-Ch Sublet. В тепловой точке сечение из EAF не согласуется с рекомендацией Мухабхаба. Таким образом, оценка сечения радиационного захвата нейтронов из ENDF/B является наиболее предпочтительной. Использование данных об образовании изомера Np-240m не представляется важным, поскольку и Np-240 ($T_{1/2}=7.22$ м) и Np-240m ($T_{1/2}=61.9$ м) испытывают β_- распад в Pu-240.

Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из JENDL-3.3.

Модифицировать оценку сечения деления в области подпорогового деления в области энергий ниже 40 кэВ путем включения оценки сечения деления R.A.Forrest, J.Korescky и J-Ch Sublet из EAF-2003.

Полное сечение пересчитать как сумму парциальных сечений.

Следует также добавить данные о выходах запаздывающих нейтронов (8 групп – на основе оценки JEFF-3.1); их спектры принять такими же, как для урана-235.

Автор отбора данных

Кошеев В.Н.

94. ПЛУТОНИЙ

94.1. Плутоний-236

Альфа-активен. ($T_{1/2}=2.858$ г) Вероятность спонтанного деления $8.5 \cdot 10^{-8}\%$.

Цепочка альфа распадов ведет к образованию урана-232, а затем – таллия-208.

В ФОНД-2.2 – оценка Mann, Shenter, Benjamin, McCrossen, 1978.

В ENDF/B-VII- оценка R.Wright, T.Nojuyama, 1995

В JENDL-3.3 и LEFF-3.1 – оценка O.Jawamoto, 2002.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка O.Jawamoto, 2002 со следующими изменениями:

1. Файл MF=8 исключен;
2. В файл MF=5 добавлена секция MT=455 со спектрами запаздывающих нейтронов, принятыми такими же, как для плутония-238.

Включить данные о спектрах запаздывающих нейтронов (8 групп), приняв их такими же, как для плутония-238.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

94.2. Плутоний-237

Радиоактивен. ($T_{1/2}=45.2$ д) Испытывает захват орбитального электрона образуя нептуний-237.

В ФОНД-2.2, ENDF/B-VII b Oуaa-3.1 – оценка Mann, Shenter, 1978.

В JENDL-3.3 – T.Nakagawa, B.Konshin, 1995

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка T.Nakagawa, B.Konshin, 1995 из JENDL-3.3 со следующими изменениями:

1. в MF=1 MT=455 включены данные о запаздывающих нейтронах из JEFF-3.1 (8 групп);
2. в MF=5 Mt=455 включены спектры запаздывающих нейтронов такие же, как для плутония-239.
3. Файл MF=8 удален.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

94.3. Плутоний-238

Альфа-активен. ($T_{1/2}=87.74$ г) Распадается в уран-234. Вероятность спонтанного деления $1.86 \cdot 10^{-7}\%$

В ФОНД-2.2 – оценка Е.Суховицкого и А.Клепацкого, 1987

ENDF/B-VII = оценка Mann, Shenter, Alter, Danton 1978.

В JENDL-3.3 – Maslov, 1997

В JEFF-3.1 – оценка Т.Кавакита, Т.Накагава, 1989 из JENDL-2

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Маслова из JENDL-3.3 со следующими изменениями:

1. Выход запаздывающих нейтронов принимается в соответствии с рекомендацией JEFF-3.1.
2. Соответственно откорректировано полное число нейтронов деления.
3. Спектры запаздывающих нейтронов (8 групп) приняты такими же, как для урана-235.
4. Добавлена секция MF=1, MT=458 из JEFF-3.1
5. Добавлен файл MF=8 с MT=454 и MT=459 из ENDF/B-VI.

Автор отбора данных

Николаев М.Н.

94.4. Плутоний-239

1. Общие характеристики

1.1. $Z = 94$ -зарядовое число;

1.2. $A = 239$ (атомный вес);

1.3. $AW = 236.9986$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);

1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2}=2.411 \cdot 10^4$ лет, доминирует α -распад в уран-235с вкладом $3.1 \cdot 10^{-10}\%$ спонтанного деления;

1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт |
|-----|---------|----------|---------------------------|--------------|
| 4 | n,p' | -0.0079 | 0.0079 | Pu-239 |
| 16 | n,2n | -5.6462 | 5.6700 | Pu-238 |
| 17 | n,3n | -12.6461 | 12.6994 | Pu-237 |
| 37 | n,4n | -18.5268 | 18.6050 | Pu-236 |
| 18 | деление | 193.733 | | FP |
| 102 | n,g | 6.5342 | | Pu-240 |
| 103 | n,p | 0.0598 | | Np-239 |
| 107 | n,alfa | 11.7900 | | U-236 |

2. Обзор современных оценок нейтронных данных для плутония

2.1. Общая характеристика сравниваемых оцененных данных

В современных библиотеках содержатся следующие оценки нейтронных данных плутония-239:

В **ФОНД-2.2** – оценка Kawai, Yoshida, Hida, 1989+ Abagyan, 1997.

В **JENDL-3.3** – оценка Kawai, Yoshida, Hida, 1987 (реvisions 1989, 1993, 2000, 2001 г.г.)

ENDF/B-VI.7 – оценка Young, Weston, Poenitz, 1989, revisions -1993, 1997

ENDF/B-VII - оценка Talou, Chadwick, Madland, Young, (данные ENDF/B-VI.7, ревизованные в 2000, 2002, 2003 и 2004 г.г.)

В **JEFF-3.1** – оценка Romain, Morillon, Dos Santos, Uzarrolde, 2005

Проведем качественное сравнение этих оценок.

1) **ФОНД-2.2** Эта оценка принята за основу при получении групповых констант Pu-239 в библиотеках БНАБ-93.1 и БНАБ-93.2. Та же оценка была использована в РИЦ «Курчатовский институт» в расчетах по программе MCU-REA/2 .

Как отмечалось выше, за основу был принят файл, скомпилированный Каваи, Йошида и Нида в 1987 году для библиотеки JENDL-3.0. К моменту, когда этот файл был принят в библиотеку ФОНД-2.0., в него был внесен ряд изменений: в 1988 г. были внесены небольшие изменения в энергетическую зависимость ν , пересмотрены параметры разрешенных резонансов, изменено сечение реакции $(n,2n)$, а в 1989г. были частично изменены параметры в области неразрешенных резонансов.

В версии библиотеки ФОНД-2.2. ниже 215 эВ принята оценка нейтронных сечений и числа вторичных нейтронов $\nu(E)$, выполненная Л.П.Абагян (РИЦ "КИ"). В области энергий до 5 эВ нейтронные данные заданы поточечно; выше – до 215 эВ - сечения описываются с помощью многоуровневого формализма Брейта-Вигнера, а затем вплоть до 1 кэВ - сечения описываются формулой Райха-Мура. Окончательная редакция резонансных параметров основана на частном сообщении Ж.Де-Соссюра (1988).

Область неразрешенных резонансов простирается до 30 кэВ; s- и p-волновые силовые функции и средние делительные ширины подобраны так, чтобы описать оцененные средние нейтронные сечения. Полное сечение ниже 7 МэВ сохранено таким, как в JENDL-2, т.е. основано на экспериментах, выполненных в 1964-1974г.г. Выше 7 МэВ полное сечение принято в соответствии с экспериментом Пёнитца и др.¹. Сечение упругого рассеяния равно разности между полным сечением и сечением неупругих взаимодействий.

Сечения неупругого рассеяния на 18-ти уровнях с энергиями от 7.86 кэВ до 511.84кэВ получены на основе расчета по модели связанных каналов с использованием параметров оптического потенциала, предложенных Е.Д.Артуром². Сечение неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней рассчитывалось по статистической модели с учетом флуктуационных и интерференционных эффектов и конкуренции со стороны реакций деления, $(n,2n)$, $(n,3n)$ и $(n,4n)$. Сечения трех последних реакций рассчитывались по программе GNASH. Детали расчета изложены в описании файла.

¹ Potnitz W.P. et al: Nucl. Sci. Eng., 78, 333 (1981).

² Arthur E.D. et al.: Nucl. Sci. Eng., 88, 56 (1984)

Сечение деления ниже 50 кэВ принято на основе экспериментов Гейзера и др.³ и Вагеманса⁴ и др., а при более высоких энергиях – на основе данных Канда и др.⁵. Сечение захвата ниже 1 МэВ получено путем умножения величины α , принимавшейся в JENDL-2, на принятую в данном файле оценку сечения деления. Выше 1 МэВ сечение захвата рассчитывалось по статистической модели.

Угловые распределения упруго и неупруго рассеянных нейтронов рассчитывались по статистической модели. Угловые распределения нейтронов реакций (n,2n), (n,3n) и (n,4n) приняты изотропными в системе центра инерции.

2) JENDL-3.3 Принятая оценка отличается от версии JENDL-2, взятой за основу в ФОНД-2.2, следующим.

1. В 1993 г. пересмотрены параметры разрешенных резонансов на основе оценки Дерриена⁶. Область разрешенных резонансов продлена до 2.5 кэВ.

2. В 2000 г. Шибата изменил данные о запаздывающих нейтронах деления, внес изменения в сечения деления и захвата и в спектры нейтронов, испускаемых при неупругом рассеянии с возбуждением континуума уровней и в реакциях (n,2n) и (n,3n).

3. В 2001 г. спектры мгновенных нейтронов деления были заменены оценкой Кавано⁷

3) ENDF/B-VI.7 В области разрешенных резонансов принята та же оценка, что и в JENDL-3.3. Область неразрешенных резонансов, как и во всех ранее рассмотренных оценках простирается до 30 кэВ. Оценка в этой области представляется более обоснованной экспериментальными данными, чем в японских оценках. V_{prompt} принято близким к оценке Форта и др.⁸. Параметры запаздывающих нейтронов – на основе оценки Брэди и Ингланда⁹. Сечение деления принято на основе оценки, выполненной группой по стандартам с небольшими корректировками. В оценке сечений других реакций широко использовались теоретические расчеты с параметрами, подобранными для лучшего описания имевшихся экспериментальных данных.

4) ENDF/B-VII За основу принята оценка из ENDF/B-VI.7 со следующими изменениями.

1. В 2000 г. внесены изменения в сечение реакции (n,2n) для учета дополнительных экспериментальных данных.

2. В 2002 г. Пересмотрено сечение деления при энергиях выше 0.85 МэВ.

3. В 2003 г. слегка изменено $V_{\text{prompt}}(E)$ и обновлены все данные по запаздывающим нейтронам.

4. В 2004 г. число дискретных уровней, возбуждаемых при неупругом рассеянии увеличено до 40 (подобно тому, как это было сделано в случае урана-238) и принято сечение деления в соответствии с оценкой группой по стандартам. Внесены небольшие изменения в $V_{\text{prompt}}(E)$.

³ Gayther D.B.: Conf. 1975 Washington, 2, 560 (1975)

⁴ Wagemans C. et al.: Ann. Nucl. Energy, 7, 495 (1980)

⁵ Kanda Y. et al.: Conf. 1985 Sfnta Fe, 2, 1567 (1986)

⁶ Derrien H.: J. Nucl. Sci. Technol., 30, 845 (1993)

⁷ Kawano T. et al.: Phys. Rev., C63, 034601 (2001)

⁸ E. Fort et al., Nuc.Sci.Eng. 99, 375 (1988)

⁹ M.C. Brady and T.R. England, Nucl.Sci.Eng. 103, 129 (1989)

Использовались нейтронные данные, относящиеся к релизу 7, как наиболее полной версии библиотеки ENDF/B-VI [22]. В основе - оценка Янга, Вестона, Пенитца, выполненная в 1989 году. В 1993 году в области разрешенных резонансов (1.Е-5 эВ ÷ 2.5 кэВ) принята оценка Дерриена (ORNL) и Накагавы (JAERI), в которой область разрешенных резонансов расширена до 2.5 кэВ. В области ниже 1 кэВ резонансные параметры несколько изменились за счет учета новых экспериментальных данных [23]. Резонансные параметры в интервалах 1÷2 кэВ и 2÷2.5 кэВ определялись (как и при более низких энергиях) по программе SUMMY, независимо в каждом интервале. В области неразрешенных резонансов от 2.5÷4.0 кэВ использованы расчеты по статистическим программам FISINGA из Кадараша, а от 4.0÷30 кэВ использовались параметры оптической модели Лагранжа и Мадлэнда. В 1997 году данные претерпели незначительную корректировку. Оценка ν_p выполнена на основе оценки Форта [24]. Сечения при энергиях выше 30 кэВ оценены Янгом, Мак-Ферлэйном и Артуром на основе теоретических расчетов, базирующихся на совокупности имеющихся экспериментальных данных и на принятых для ENDF/B-VI стандартах [25].

4) JEFF-3.1=JEFF-3.0 Так же, как и в библиотеках ENDF/B-VII и JENDL-3.3, в области разрешенных резонансов принята оценка Дерриена и Накагавы. Данные в области неразрешенных резонансов – те же, что и в ENDF/B-VII. ν_{prompt} ниже 650 кэВ принято на основе оценки Форта⁸, при более высоких энергиях применены модельные расчеты¹⁰ с несколько измененными параметрами модели. Все сечения в области выше 30 кэВ получены на основе модельных расчетов с параметрами, подобранными для описания имеющихся экспериментальных данных.

Изложенное показывает, что оценки, принятые в современных библиотеках, с нейтронно-физической точки зрения представляются более обоснованными, чем оценка, принятая в библиотеке ФОНД-2.2, и качественных различий между ними не усматривается. В этих условиях при выборе оценки для включения в РОСФОНД, особенно важно обратить внимание на то, как различные варианты нейтронных данных позволяют описать интегральные эксперименты.

2. 2 Влияние выбора варианта оцененных данных на результаты расчета характеристик, измеренных в основных интегральных экспериментах

Было проверено влияние принимаемых констант плутония на значения величины $\alpha = \langle \sigma_c \rangle / \langle \sigma_f \rangle$, измеренные в центральной части активной зоны реактора БН-350 и в модуле из МОХ-топлива, вставленном в активную зону БН-350. Сравнение результатов расчета дается в табл.1.

Таблица 1 - Сравнение экспериментальных и расчетных значений величин α

| | Эксперимент | БНАБ-93.2 | ENDF/B-6R7 | JENDL-3.3 | JEFF-3.0 |
|-------------|--------------------|-----------|------------|-----------|----------|
| Центр АЗ | 0.275±0.007 | 0.274 | 0.265 | 0.274 | 0.278 |
| МОХ- модуль | 0.229±0.006 | 0.232 | 0.223 | 0.233 | 0.237 |

Как видно, все рассмотренные библиотеки удовлетворительно описывают экспериментальные данные.

¹⁰ G.Vladuca, A.Tudora., Ann.Nuc.Energy. 28, 689 (2001).

С тем, чтобы не повторять огромное количество расчетов, и для упрощения процедуры анализа влияния нейтронных данных из различных библиотек на результаты расчетов различных бенчмарк-моделей, были отобраны наиболее характерные модели. По спектральным свойствам они охватывают тепловую, резонансную и быструю области энергетического спектра нейтронов. К ним относятся следующие эксперименты:

- PU-MET-FAST-001/01, голая плутониевая сфера (Jezebel);
- PMF011/01, плутониевая сфера в толстом водяном отражателе;
- PST024/06, бак 107x107x37 см с раствором плутония 412 г/л;
- PST001/04, сфера с раствором нитрата плутония 132 г/л;
- PST012/05, бак 130x130x66 см с раствором нитрата плутония 13г/л.

Все три последних конфигурации – в толстом водяном отражателе.

В табл.2 приведены результаты расчета k_{eff} , полученные для перечисленных бенчмарк-моделей по различным системам констант. Расчеты выполнялись по программе MCNP-5 с использованием детальных энергетических зависимостей сечений, сгенерированных непосредственно из библиотек FOND-2.2, ENDF/B-VI.7, ENDF/B-VII, JEFF-3.1 и JENDL-3.3. Константы для всех сопутствующих нуклидов брались из ENDF/B-VII. В таблице приводится средняя энергия нейтронов, вызывающих деление в активной зоне каждой размножающей системы. В отдельном столбце приводится погрешность экспериментального определения коэффициента размножения (равного во всех случаях строго единице). Статистическая погрешность результатов расчета во всех случаях равнялась 0.02%.

Таблица 2 - Влияние констант Pu-239 на расчетно-экспериментальное расхождение (в процентах) в коэффициенте размножения

| Бенчмарк | $\langle E_T \rangle$, эВ | Δk эксп. | FOND-2.2 (± 0.02) | ENDF/B-VI.7 (± 0.02) | ENDF/B-VII (± 0.02) | JEFF-3.1 (± 0.02) | JENDL-3.3 (± 0.02) |
|-----------|----------------------------|------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| PMF01/ 01 | $1.28 \cdot 10^6$ | 0.20 | -0.19 | -0.43 | 0.03 | -0.01 | -0.36 |
| PMF11/ 01 | $8.23 \cdot 10^4$ | 0.10 | -0.16 | -0.23 | 0 | -0.24 | -0.29 |
| PST24/ 06 | 22.8 | 0.62 | -0.58 | 0.19 | 0.25 | 0.18 | 0.36 |
| PST01/ 04 | 0.281 | 0.50 | -1.09 | 0.06 | 0.05 | 0 | 0.24 |
| PST12/ 05 | 0.0552 | 0.58 | 0.28 | 0.9 | 0.89 | 0.87 | 1.08 |

Как видно, наилучшее согласие с экспериментальными данными обеспечивается при использовании констант плутония-239 из ENDF/B-VII. Исключением является сборка PST-12/05 с самым мягким нейтронным спектром, для которой все наборы данных, кроме FOND-2.2, дают превышение к-эфф над экспериментальной единицей, превышающее погрешность эксперимента.

Напомним, что во всех современных оценках область энергий разбивается на три части – область разрешенных резонансов – до 2.5 кэВ; область неразрешенных резонансов – до 30 кэВ и область быстрых нейтронов – выше 30 кэВ. Поскольку в области быстрых нейтронов не предполагается таких расхождений, которые затруднили бы выбор оцененных данных для РОСФОНДа, рассмотрение будет начинаться с этой области.

3. Сечения и ν в области быстрых нейтронов.

3.1. Полное сечение

На рис. 1 оцененные данные по полному сечению плутония сравниваются с экспериментальными данными, приведенными в EXFOR. Заметим, что в JENDL-3.3 и в FOND-2.2 полные сечения в этой области энергий совпадают.

Погрешности большинства экспериментальных данных не приводятся: о их величине можно судить по разбросу экспериментальных точек (которые находятся в узлах соединяющих их линий).

Из рис. 1а следует, что в области выше 5 МэВ полное сечение, принятое в ENDF/B-VII лучше других согласуется с совокупностью экспериментальных данных. Оценка JEFF-3.1 в этой области неоправданно занижена, а данные, принятые в JENDL-3.3 (и в FOND-2.2) опираются целиком на результаты работы Пёница. Как ни высока репутация этого экспериментатора, пренебрегать результатами более ранних работ, нам кажется, оснований нет.

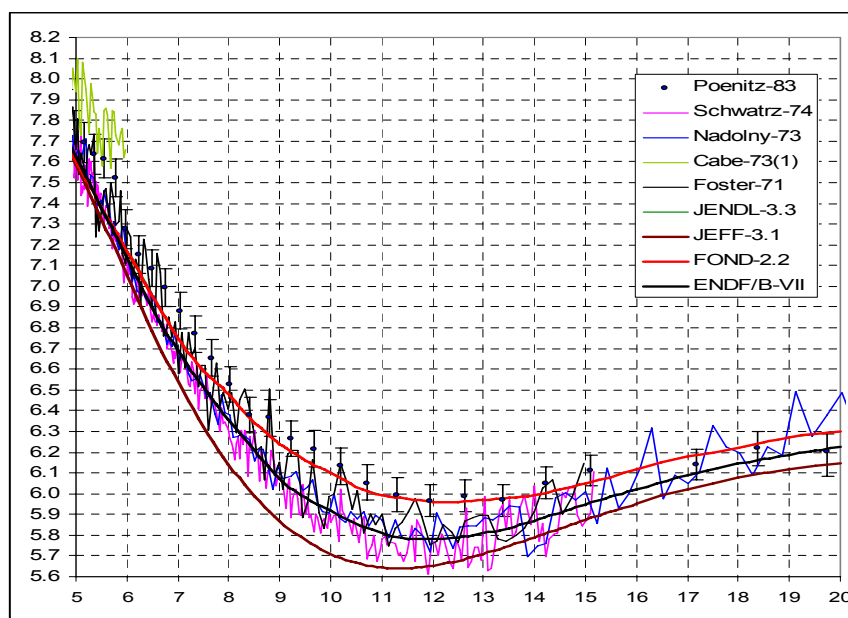


Рис. 1а. Полное сечение в интервале 5 – 20 МэВ

Рис. 2б показывает, что в интервале 2 – 5 МэВ, данные Пёница, наоборот, игнорируются всеми оценками. Если исходить только из имеющихся экспериментальных данных, то при энергиях ниже, примерно, 3.5 МэВ оценка JEFF-3.1 выглядит наиболее убедительно. Это впечатление сохраняется до 0.4 -0.5 МэВ, где обе эти оценки практически совпадают (см. рис. 1 в и 1 г). При более низких энергиях оценка ENDF/B-VII снова выглядит предпочтительнее.

Имея в виду, что оценка ENDF/B-VII лучше других описывает интегральные эксперименты, при выборе данных по полному сечению не представляется целесообразным составлять некую новую оценку из комбинации имеющихся.

При энергиях ниже 5 МэВ для принятия в РОСФОНД с равным основанием можно рекомендовать как данные ENDF/B-VII, так и данные JEFF-3.1; при энергиях выше 5 МэВ, данные ENDF/B-VII представляются предпочтительными.

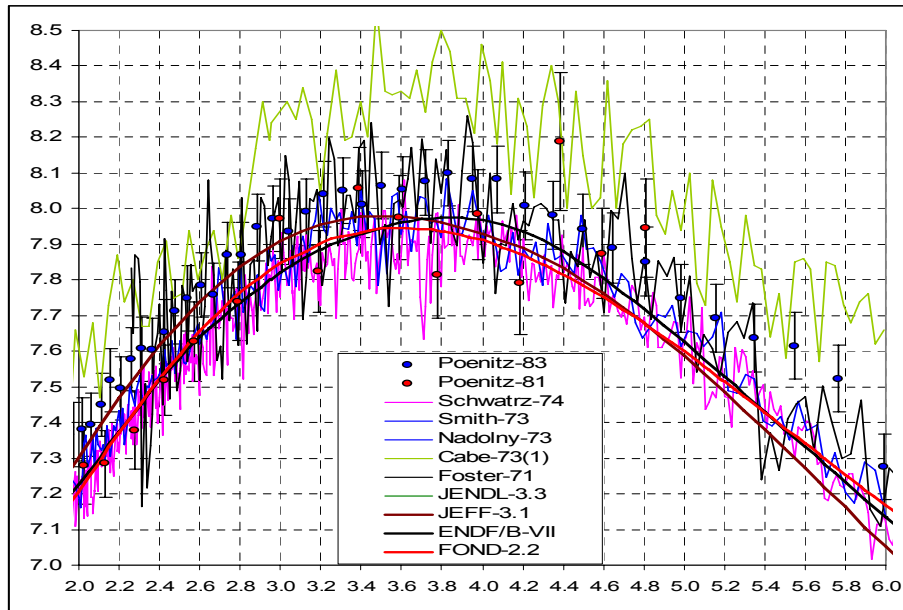


Рис. 1б. Полное сечение в интервале 2 – 6 МэВ

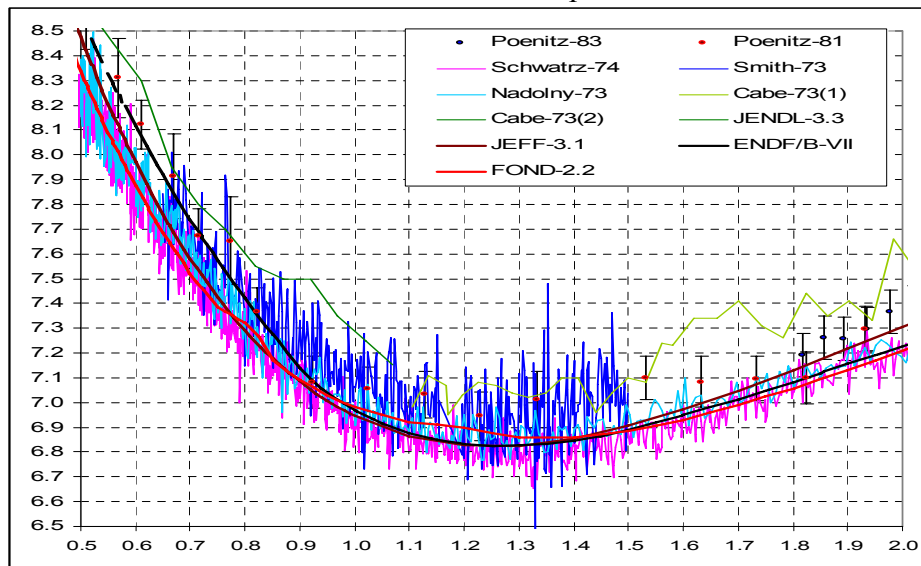


Рис. 1в. Полное сечение в интервале 0.5 – 2 МэВ

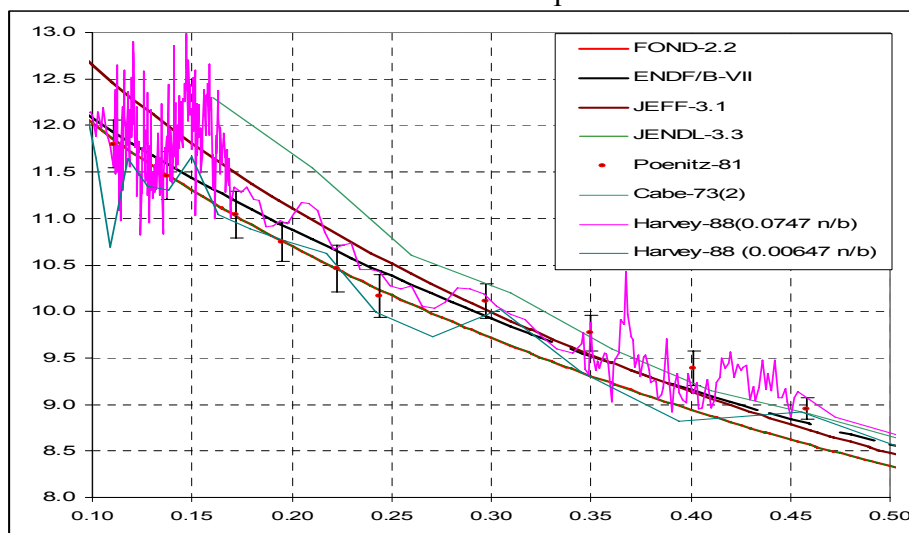


Рис. 1г. Полное сечение в интервале 0.1 – 0.5 МэВ

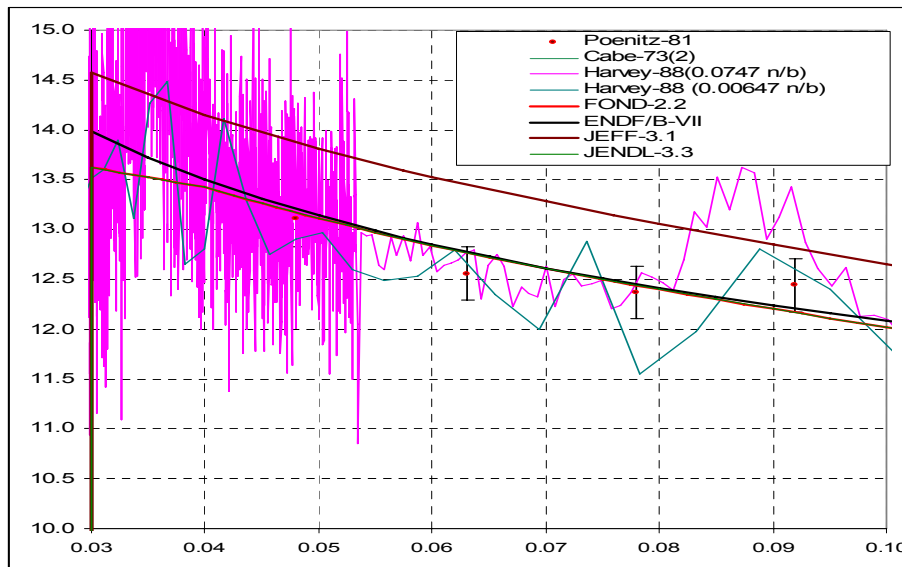


Рис. 1д. Полное сечение в интервале 0.3 – 0.1 МэВ

3. 2.Сечение деления.

На рис. 2 оцененные сечения деления сравниваются с экспериментальными данными, полученными после 1975 г. и занесенными в EXFOR. На рис. 3 проведено такое же сравнение отношения сечений деления плутония-239 и урана-235. Здесь, однако, данные приводятся только для ENDF/B-VII. Напомним, что сечение деления урана-235 в библиотеках РОСФОНД и ENDF/B-VII совпадают.

Из рис. 2 ясно, что абсолютные измерения сечения деления плутония-239 слишком разбросаны для того, чтобы можно было отдать предпочтение той или иной из рассматриваемых оценок. Не позволяют это сделать и данные по отношениям сечений. Это и естественно, поскольку все эти экспериментальные данные оценщикам были прекрасно известны. Исключением является интервал от 0.5 до 1 МэВ (рис. 2б), где оценка, принятая в JEFF-3.1, представляется завышенной, а наблюдающиеся в ней осцилляции –неоправданными.

Как правило, при оценках учитывались также результаты измерений отношений сечений деления и других изотопов к сечению деления урана-235 и оценки проводились на основе совокупного анализа всех имеющихся данных. Расхождение оценок может служить мерой погрешности современных оцененных данных (вероятно, оптимистической).

Представляет интерес сравнить сечения деления плутония, усредненные по спектру деления урана-235. Для ENDF/B-VII сечение, усредненное по спектру Максвелла с температурой 1.35 МэВ, равно 1.7858 барн. ENDF/B-VI.7 дает на 0.40% *ниже*; ФОНД-2.2 и JENDL-3.3 соответственно на 0.35 и на 0.38% *выше*; JEFF-3.1 – выше только на 0.07%. Можно заключить, что точность знания этого среднего сечения составляет, примерно, 0.4%.

Для принятия в РОСФОНД с равным основанием можно рекомендовать как данные ENDF/B-VII, так и данные JEFF-3.1.

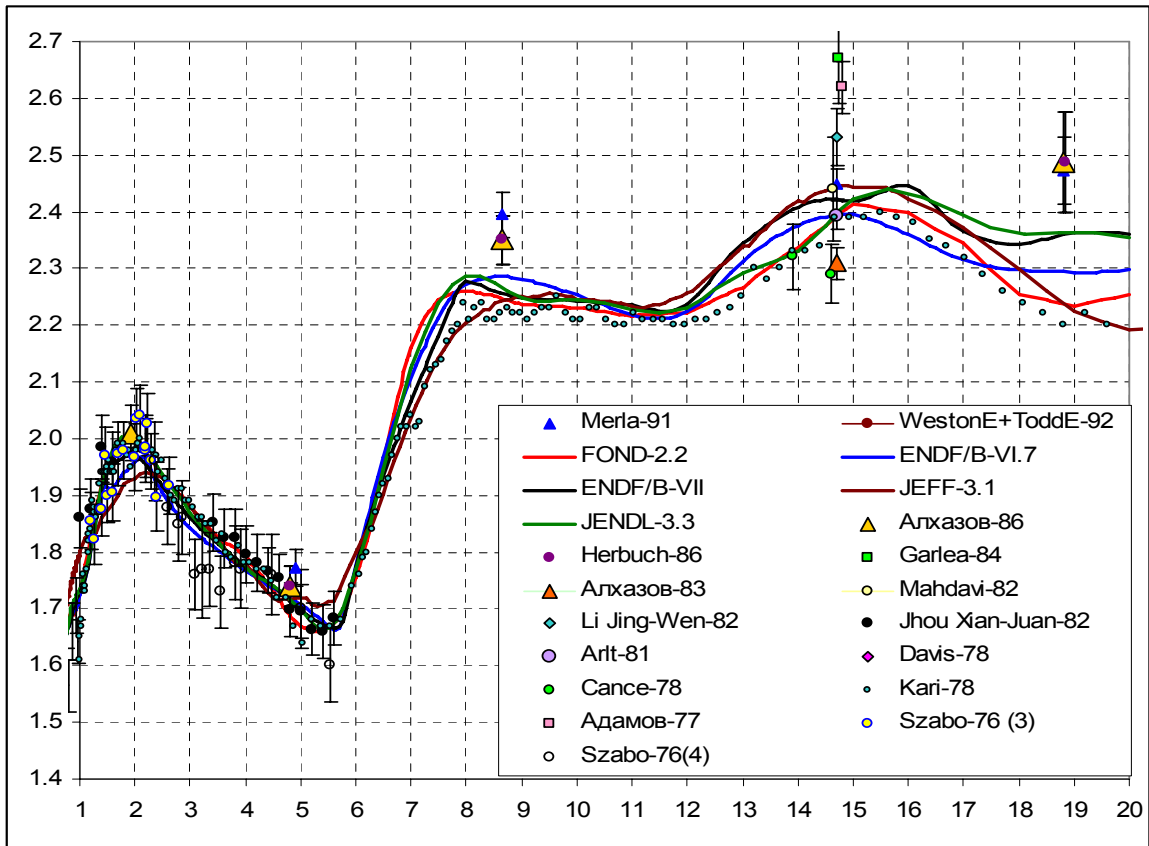


Рис. 2 а. Сечение деления выше 1 МэВ

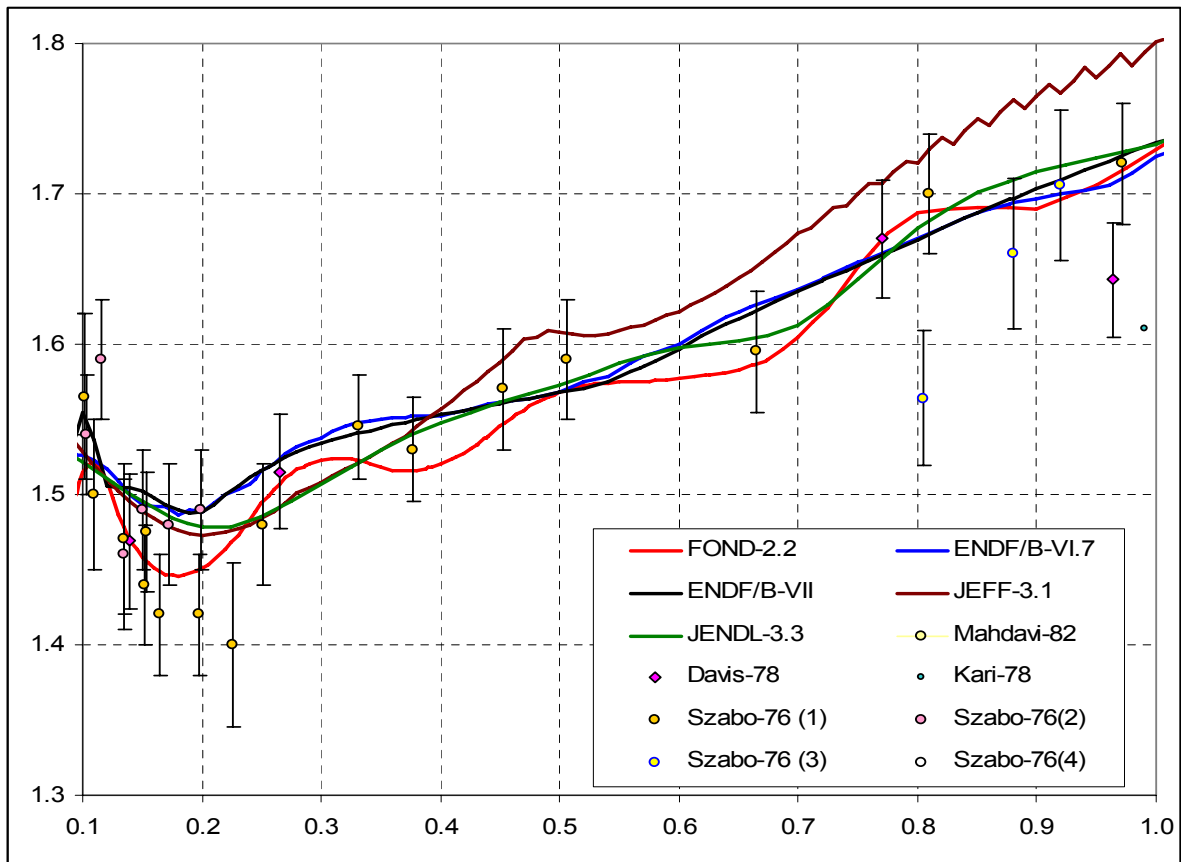


Рис. 2б. Сечение деления от 0.1 до 1 МэВ

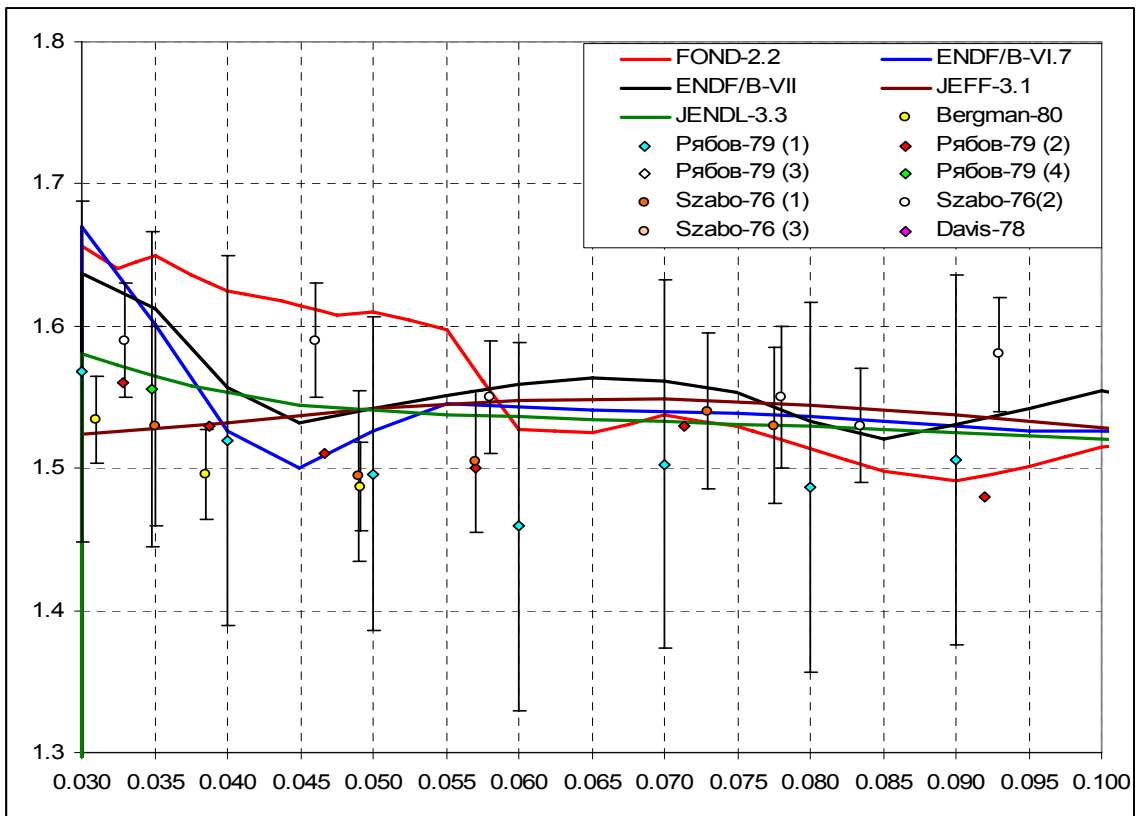


Рис. 2с. Сечение деления от 30 до 100 кэВ

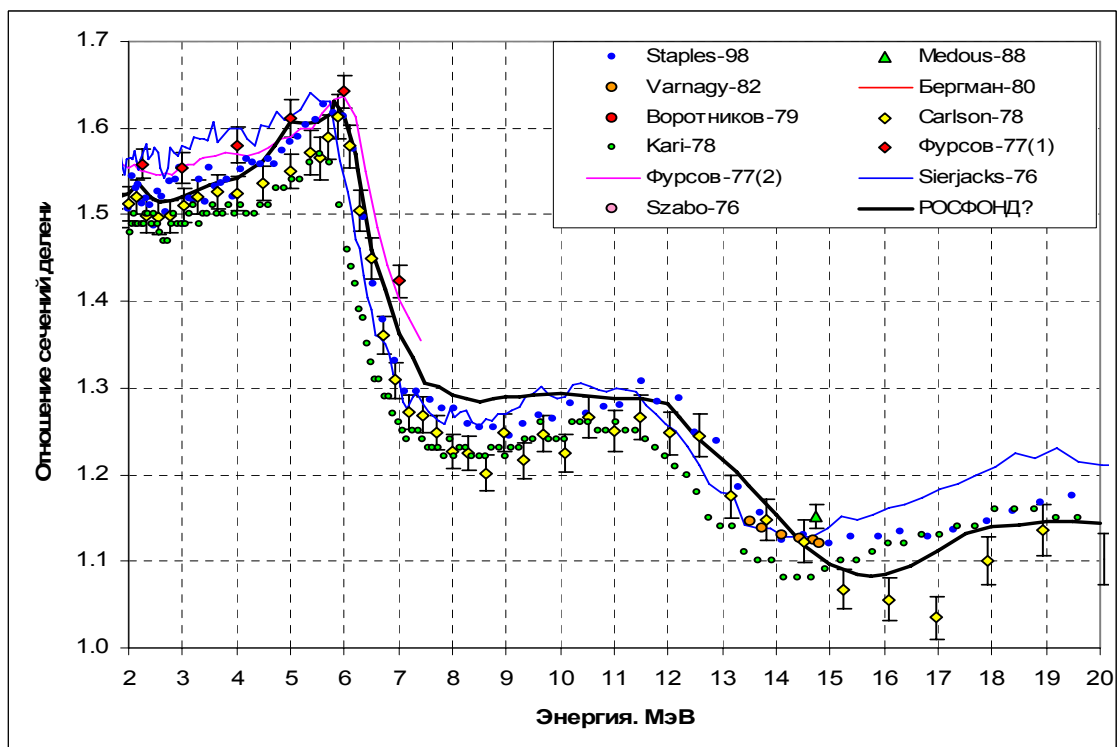
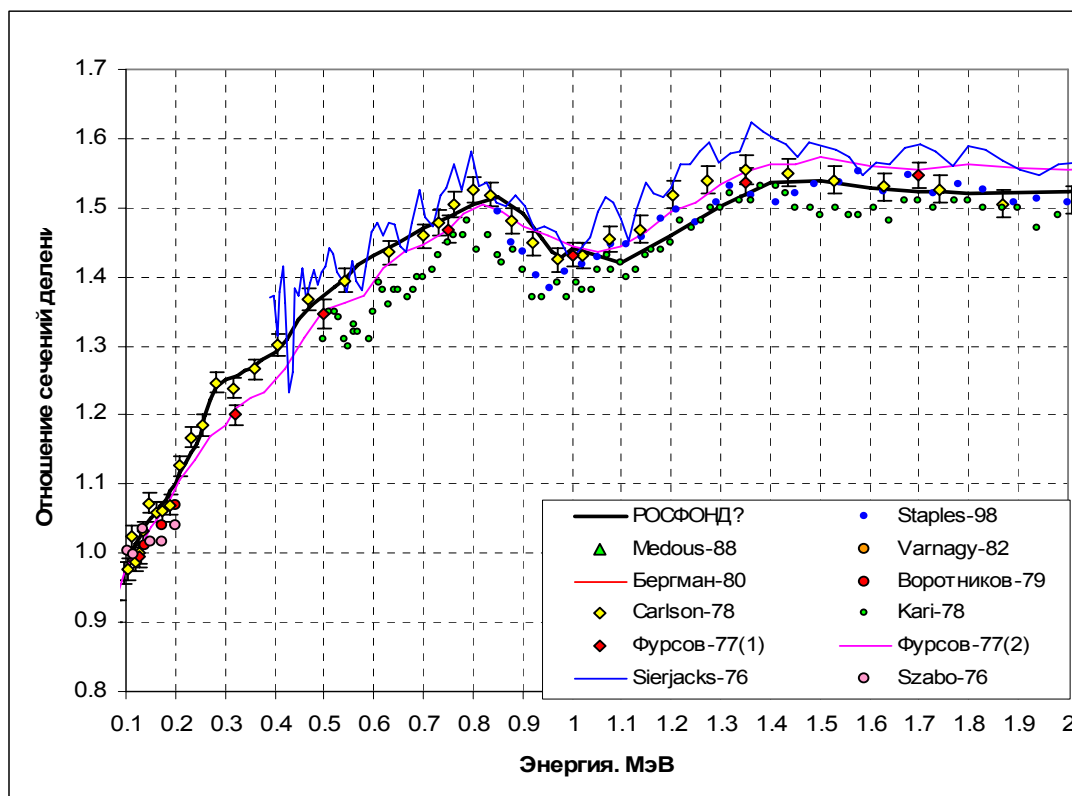


Рис. 3а. Отношение сечений деления Pu-239 и U-235 выше 2 МэВ



3. 3. Энергетическая зависимость числа мгновенных нейтронов деления.

Различия в оценках доли запаздывающих нейтронов деления невелики (см. ниже) и поскольку сама эта доля мала, здесь достаточно рассмотреть лишь энергетическую зависимость числа мгновенных нейтронов деления, поскольку в подавляющем большинстве экспериментов измерялись именно мгновенные нейтроны. На рис. 4 оцененные данные сравниваются между собой и с результатами экспериментов.

Как видно из приведенных на графиках данных, имеющиеся в наличии экспериментальные данные не позволяют отдать предпочтение той или иной оценке: разброс между ними, как правило, значительно меньше разброса экспериментальных данных и их погрешностей. В то же время обращает на себя внимание область энергий ниже 1 МэВ, где принимаемые ныне оценки V_{prompt} , представляются несколько завышенными относительно большинства экспериментальных данных. Сказанное лучше иллюстрируется рис. 5, на котором приведены отличия оцененных и экспериментальных данных от оценки, принятой в ENDF/B-VII. Приведены результаты лишь тех экспериментов, в которых V_{prompt} измерялось при многих энергиях и которые поэтому позволяют судить об энергетическом поведении этой величины. Рис. 5а показывает, что отклонения от ENDF/B-VII как в ту, так и в другую сторону на величину, достигающую до процента, вполне оправдываются экспериментальными данными, однако, следует признать, что в оценках FOND-2.2 JEFF-3.1 это сделано не наиболее убедительным образом. Рис. 5б показывает, что значение V_{prompt} в интервале 0.5 – 1 МэВ, действительно, скорее всего, принято слишком высоким.

Изложенное дает основание для переоценки V_{prompt} . Отмечая целесообразность такой переоценки, мы, однако, не решились ее выполнить, поскольку такая переоценка

требует более детального изучения всех условий выполнения каждого из рассматриваемых экспериментов, тщательной оценки погрешностей и корреляций между ними, сравнения с отличиями в экспериментальных и оцененных ν_{prompt} для других делящихся ядер. Выполнение этой оценки выходит за рамки настоящей работы, целью которой является отбор для библиотеки РОСФОНД наиболее надежных из *имеющихся* оцененных данных (с уточнениями, введение которых не ставит под угрозу выполнение всей работы в установленный срок). **В этих условиях для принятия в РОСФОНД с равным основанием можно рекомендовать как данные ENDF/B-VII, так и данные JEFF-3.1.**

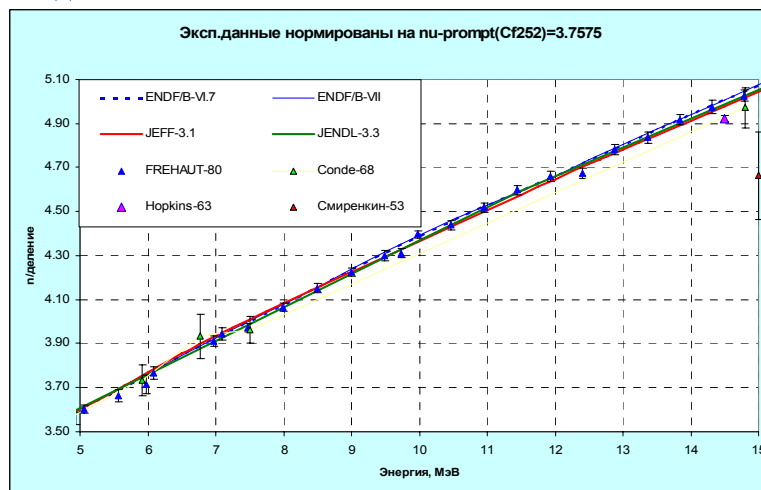


Рис. 4а. Энергетическая зависимость ν_{prompt} выше 5 МэВ.

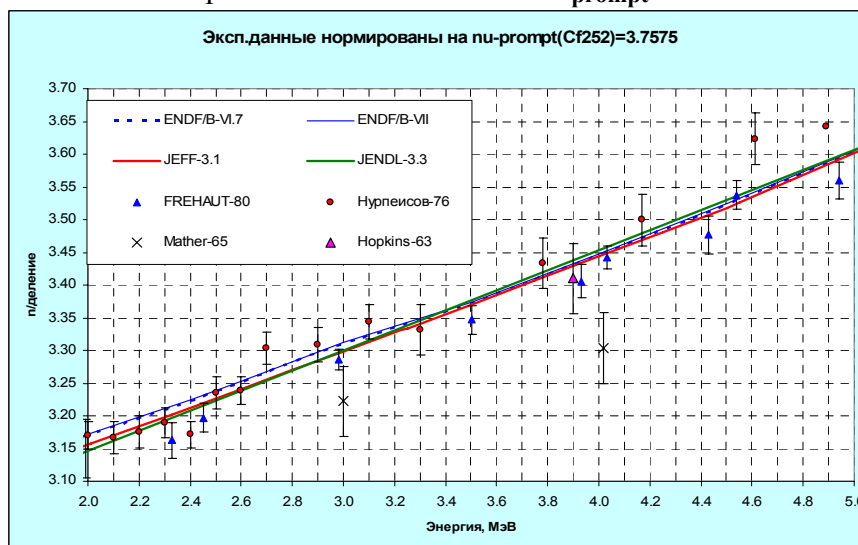


Рис. 4б. Энергетическая зависимость ν_{prompt} от 2 до 5 МэВ.

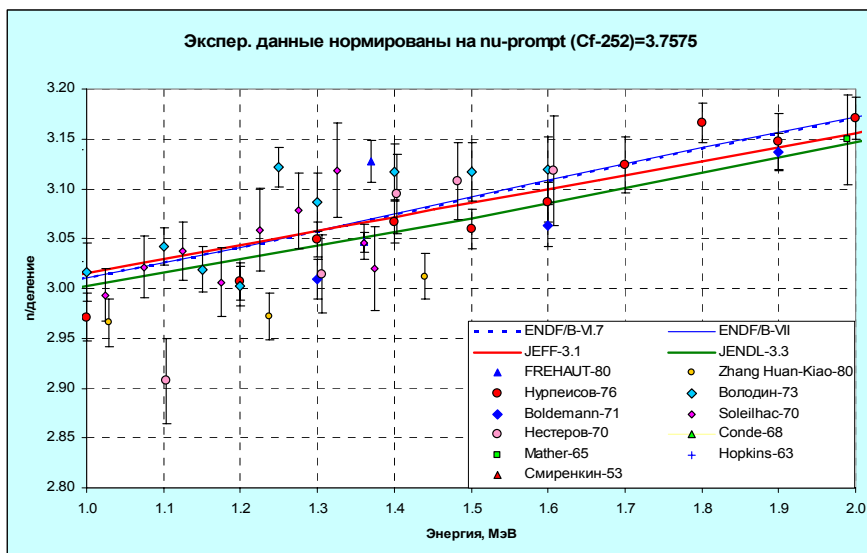


Рис. 4в. Энергетическая зависимость ν_{prompt} от 2 до 5 МэВ.

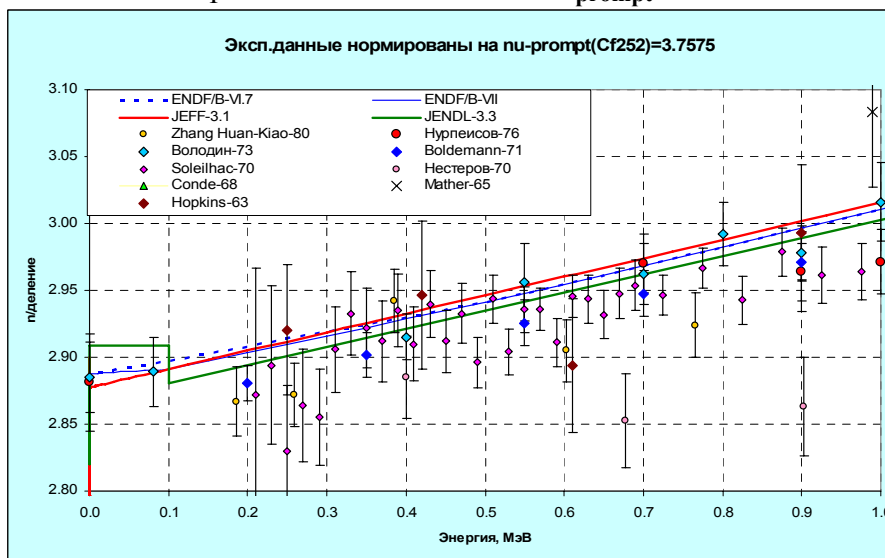


Рис. 4г. Энергетическая зависимость ν_{prompt} от 2 до 5 МэВ.

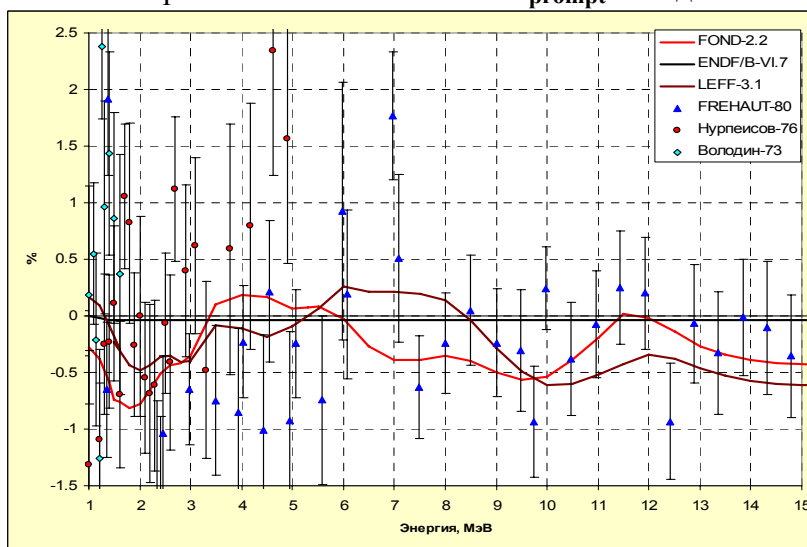
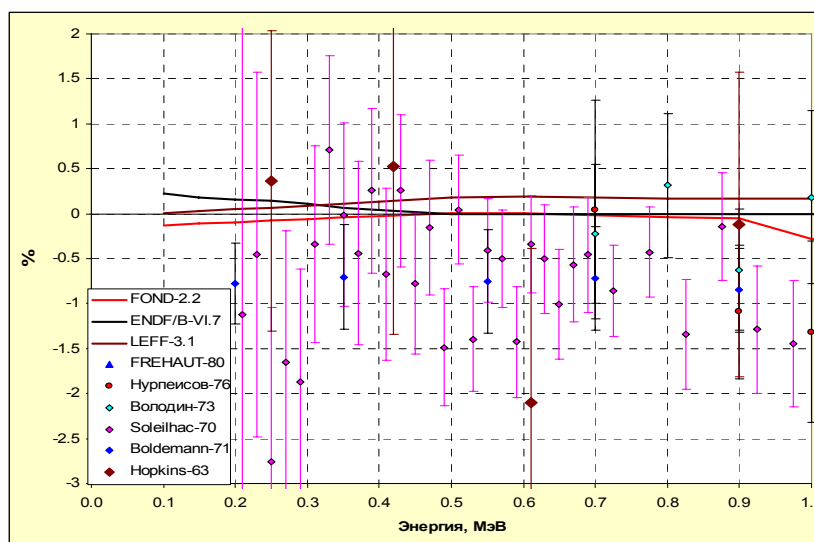


Рис. 5а. Отношение ν_{prompt} к оценке ENDF/B-VII выше 1 МэВ.



5б. Отношение V_{prompt} к оценке ENDF/B-VII ниже 1 МэВ.

3. 4. Суммарное сечение неупругих взаимодействий.

На рис. 6а суммарные сечения неупругих взаимодействий из оценок ENDF/B-VII и JEFF-3.1 сравниваются между собой. На рис. 6б в том же масштабе приведены полные сечения из этих оценок.

Обращают на себя внимание осцилляции в суммарном сечении неупругих взаимодействий, наблюдаемые в оценке ENDF/B-VII, наличие которых представляется довольно сомнительным. “Зазубрина” в суммарном сечении неупругих взаимодействий наблюдается и в оценке JEFF-3.1, однако она единична и имеет меньший масштаб.

Из сравнения данных рис. 6а и 6б видно, что расхождения в суммарном сечении неупругих взаимодействий и в полном сечении выше 4 МэВ имеют один и тот же знак, а в интервале 6 – 14 МэВ – и одинаковую величину. Ниже 4 МэВ более высокое суммарное сечение неупругих взаимодействий в ENDF/B-VII почти целиком скомпенсировано сечением упругого рассеяния (полные сечения здесь очень близки).

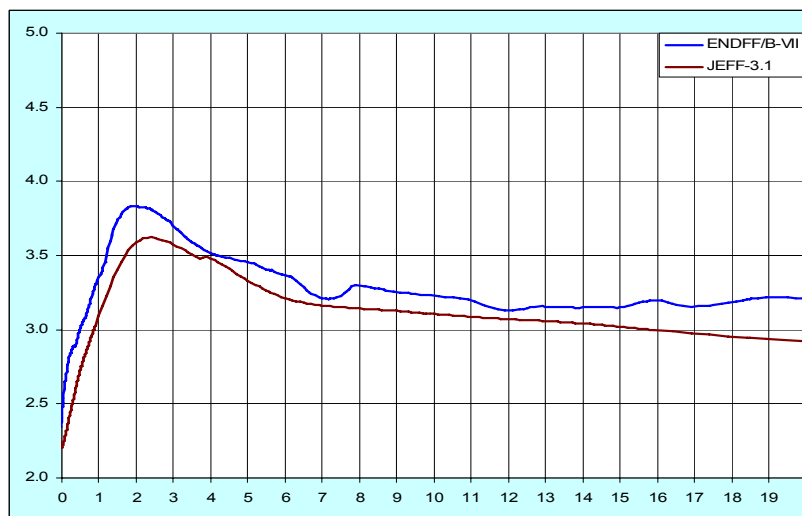


Рис. 6а. Суммарное сечение неупругих взаимодействий.

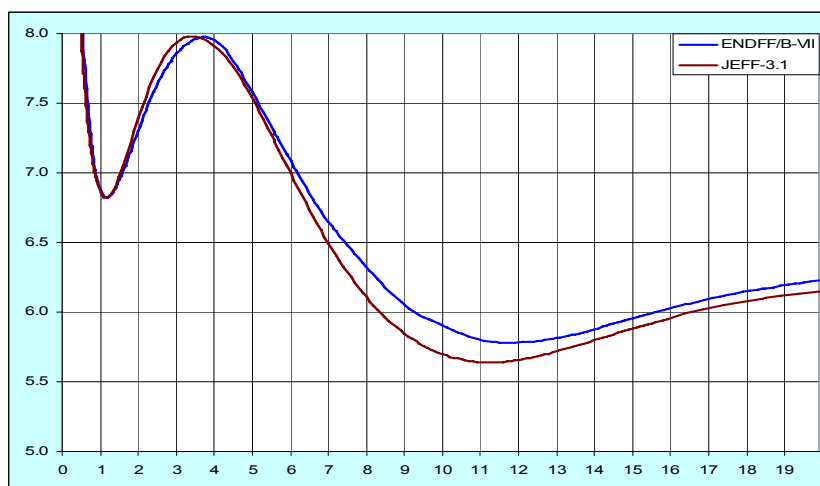


Рис. 6б. Полное сечение

3.5. Сечение неупругого рассеяния.

На рис. 7 оцененные значения неупругого рассеяния сравниваются между собой и с имеющимися весьма скудными экспериментальными данными. На том же рисунке тонкими линиями приведены оцененные сечения неупругого рассеяния с возбуждением континуума уровней. В последнем случае данные ENDF/B-VI.7 и ENDF/B-VII в точности совпадают.

Обращает на себя внимание то, что полное сечение неупругого рассеяния в ENDF/B-VII систематически превышает все остальные оценки, примерно, на 0.1 барна. Это расхождение в сильной степени коррелирует с расхождением в суммарном сечении неупругих взаимодействий (практически полностью объясняя его масштаб, но не структуру).

Провал в сечении неупругого рассеяния при 11 – 12 МэВ, наблюдаемый в оценке JENDL-3.3, разумному истолкованию, вероятно, не поддается. Эту оценку принимать в РОСФОНД, очевидно, нецелесообразно. В сущности, выбор можно делать только между данными ENDF/B-VII и JEFF-3.1, включающими самые последние по времени оценки.

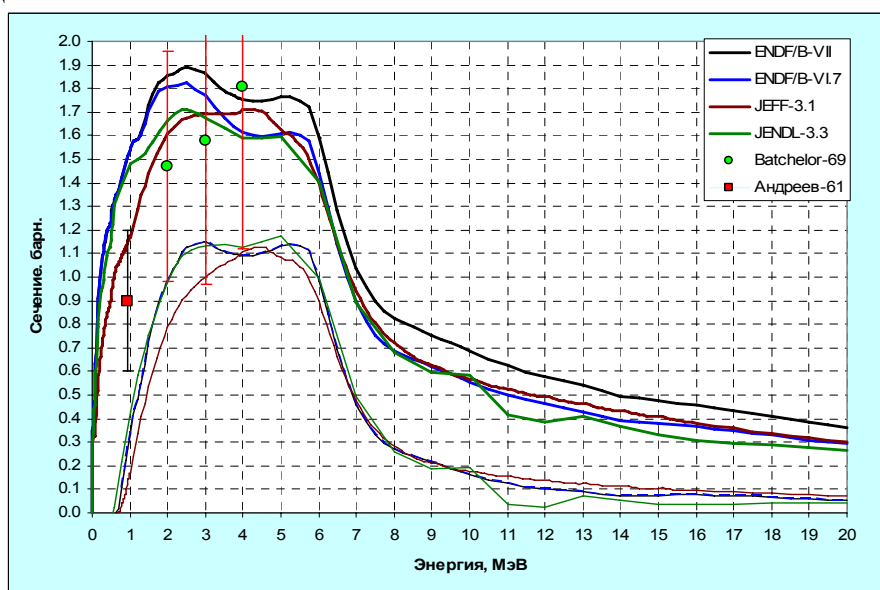


Рис. 7. Полные сечения неупругого рассеяния и сечения возбуждения континуума уровней ядра-мишени (тонкие линии)

Смушающим обстоятельством является сильное повышение сечения неупругого рассеяния при переходе от ENDF/B-VI.7 к ENDF/B-VII. Это изменение столь существенно сказывается на критических экспериментах с металлической активной зоной, что сохранение приемлемого качества описания этих экспериментов могло быть осуществлено только путем компенсации изменения сечения неупругого рассеяния другими факторами. Как будет видно из дальнейшего, одним из важнейших таких факторов является пересмотр данных об анизотропии упругого рассеяния.

Из проведенного рассмотрения невозможно отдать предпочтение одной из оценок. Следует внимательно рассмотреть, как различаются спектры нейтронов, испытавших неупругое рассеяние, что и будет сделано ниже (см. раздел 4.2)

3. 6. Сечения реакций (n,2n) и (n,3n)

Оцененные сечения реакций (n,2n) и (n,3n) сравниваются между собой на рис. 8. Сечение реакции (n,4n) (порог – 18.59 МэВ) даже при 20 МэВ по всем оценкам составляет доли миллибарна и потому на рис. 8 не приводится. Сечения реакции (n,3n) в ENDF/B-VI.7 и в ENDF/B-VII совпадают.

Как видно, понижение сечения реакции (n,2n) на 0.1 барна при переходе к ENDF/B-VII произошло, главным образом, за счет неупругого рассеяния.

Понижение сечения реакции (n,2n) в районе 14 МэВ при переходе от ENDF/B-VI.7 к ENDF/B-VII кроме соображений, возникших при подборе модельных параметров, обосновывается недавними высокоточными данными Лаутхеда (определялся Pu-238 в облученном масс-сепарированном Pu-239).

Оценки ENDF/B-VII и JEFF-3.1 близки друг к другу. Поведение кривой из ENDF/B-VII представляется более естественным.

Экспериментальных данных по реакции (n,3n) не имеется. Оценка, принятая в ENDF/B-VII, возможно, и высоковата, однако практическое значение этой реакции в расчетах и реакторов и термоядерных систем невелико и, вообще говоря, можно принять любую из оценок. Ясно, однако, что решение о выборе оценки сечения реакций (n,2n) и (n,3n) должно приниматься согласованно с выбором оценки для сечения неупругого рассеяния.

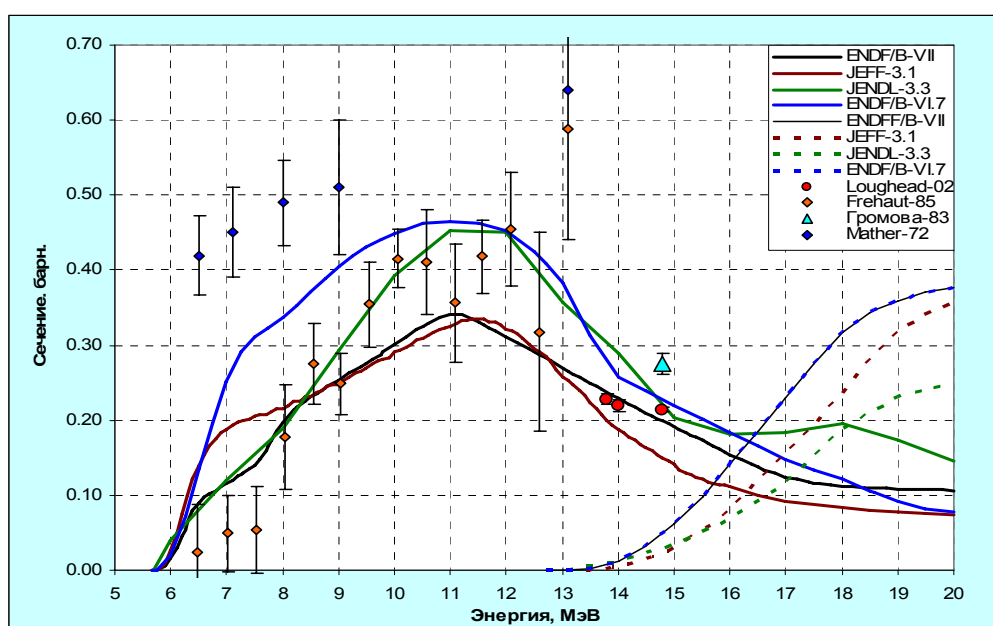


Рис.8. Сечения реакций (n,2n) и (n,3n)

3. 7. Сечение радиационного захвата.

В рассматриваемой области энергий радиационный захват невелик и практически малосущественен. Сравнение оцененных данных друг с другом и с экспериментальными данными проводится на рис.9.

В интервале 0.7 – 5 МэВ сечение захвата, принятое в ENDF/B-VII представляется заниженным. В остальном оцененные данные весьма близки друг к другу и согласуются с результатами экспериментов.

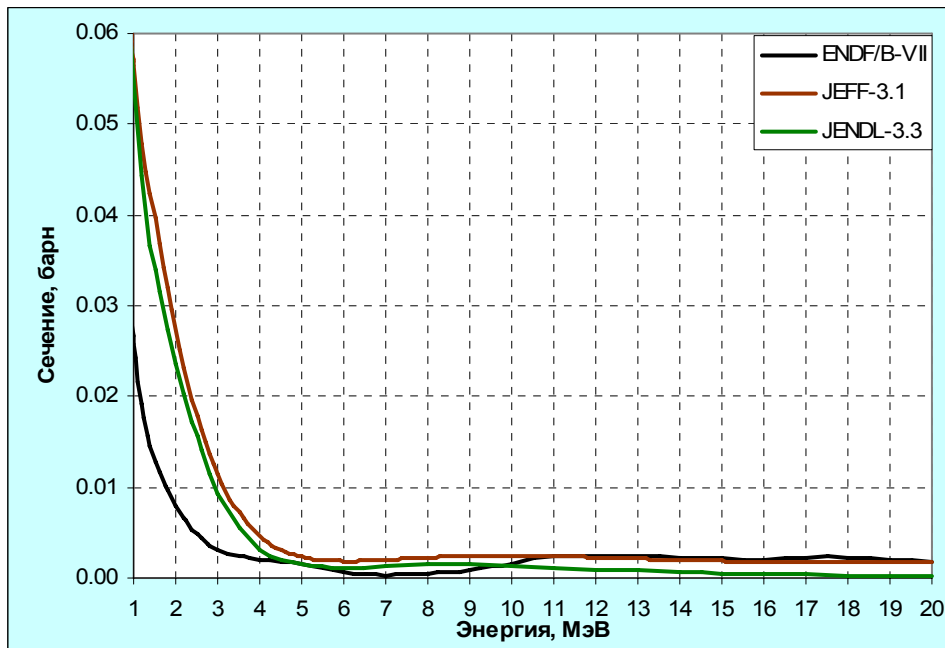


Рис. 9а. Сечение захвата выше 1 МэВ.

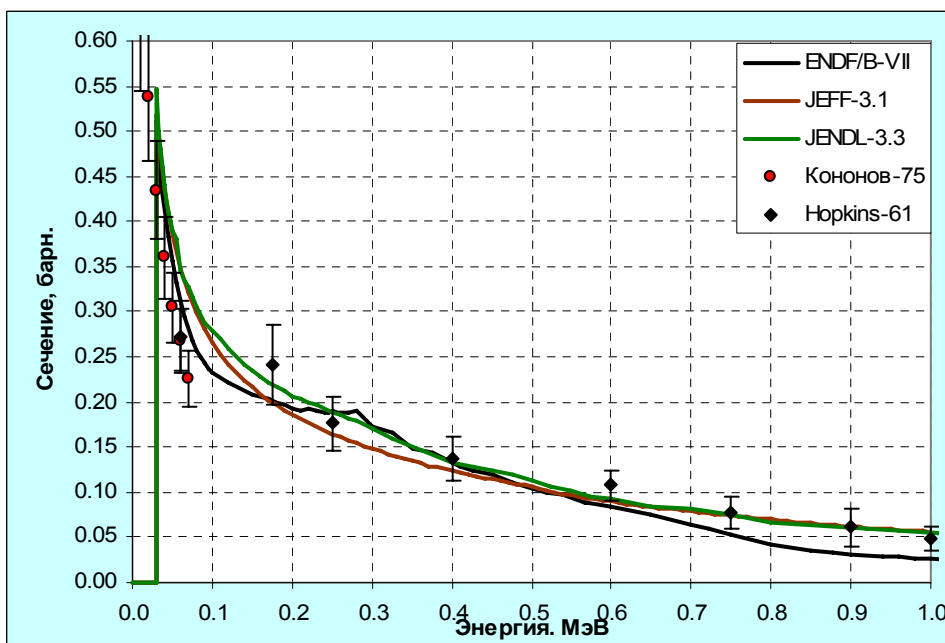


Рис. 9б. Сечение захвата ниже 1 МэВ.

3. 8. Сечения реакций (n,p) и (n,α). Реакция (n,4n).

Сечения этих реакций малы и потому в основных библиотеках оцененных данных не приводятся. В этом, однако, есть непоследовательность: сечение реакции (n,4n) еще меньше, но считается, что ее сечение в библиотеке должно быть приведено. В РОСФОНД будут включены сечения реакций (n,p) и (n,α), значения которых, полученные расчетным путем, взяты из EAF-2003. На рис. 10 поведение сечений этих реакций сравнивается с сечением реакции (n,4n).

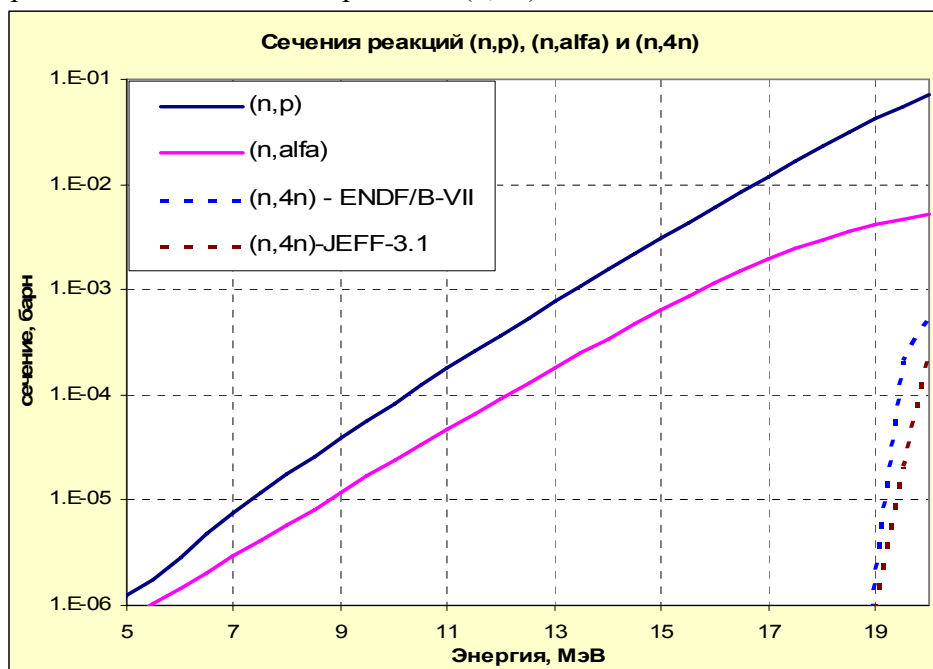


Рис. 10. Сечения реакций (n,p), (n,α) и (n,4n).

4. Энерго-угловые распределения быстрых нейтронов.

4.1. Спектры нейтронов деления.

На рис. 11 сравниваются энергетические зависимости средних энергий спектров нейтронов деления, от энергии нейтронов, вызывающих деления, принятые в оценках ENDF/B-VII и JEFF-3.1, а также зависимость, принимаемая в системе констант БНАБ-93. Напомним, что в этой системе констант спектр деления определяется формой Уатта

$$\chi(E) = \frac{2 \exp(-ab/4)}{\sqrt{\pi a^3 b}} \exp(-E/a) \operatorname{sh} \sqrt{bE},$$

параметры которой однозначно связываются с числом нейтронов ν , испускаемых при делении: $a=1.03$; $b=0.858\nu-0.436$. При этом средняя энергия равна

$$\bar{E} = a(3/2 + ab/4).$$

Как видно из рис. 11, эта зависимость удовлетворительно согласуется по средней энергии с современными оценками (лишь на 1.4% ниже), но существенно превышает среднюю энергию нейтронов деления выше порога реакции (n,n'f).

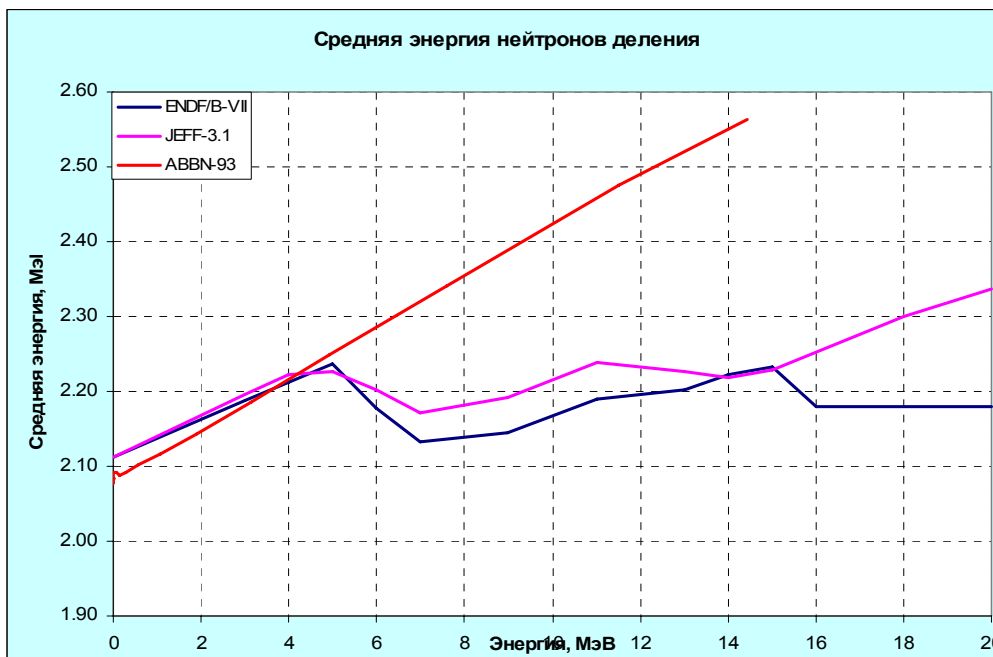


Рис. 11. Средние энергии нейтронов деления

Оцененные спектры основаны на модели Медлонда-Никса с параметрами, подобранными под имеющиеся экспериментальные данные с учетом теоретических представлений о влиянии второго, третьего и четвертого шансов деления на форму спектра. Различие результатов оценки отражает неопределенность как в этих представлениях, так и в самих экспериментальных данных (нормировка которых, как правило, достаточно сложна, т.к. требует экстраполяции на области энергий, в которых измерения не проводились, а во многих случаях и параметризации опорного спектра, относительно которого проводились измерения). **Для принятия в РОСФОНД с равным основанием можно рекомендовать как оценку ENDF/B-VII, так и оценку JEFF-3.1.**

4.2. Запаздывающие нейтроны деления.

В библиотеке РОСФОНД решено перейти к универсальному 8-групповому описанию запаздывающих нейтронов, подобно тому, как это сделано в JEFF-3.1. Поэтому данные о выходах групп запаздывающих нейтронов приняты в соответствии с этой оценкой. 8 групп запаздывающих нейтронов определены таким образом, что константы распада для них и энергетические спектры не зависят от делящегося ядра (в чем и проявляется универсальность 8-группового представления и его преимущество перед традиционным 6-групповым).

4.3. Спектры неупруго рассеянных нейтронов и реакций (n,xn).

Ниже будут сравниваться лишь две наиболее современные оценки, принятые в ENDF/B-VII и в JEFF-3.1. Методики проведения оценок весьма близки друг к другу, тем не менее, как отмечалось в разделах 3.5 и 3.6, и суммарные сечения неупругого рассеяния и реакций (n,2n) и (n,3n) оказались существенно различными.

Таблица 3. Схемы уровней плутония-239.

| № ур. | PCNUDAT-2 | | ENDF/B-VII | JEFF-3.1 |
|-------|----------------------|-----------------|------------|----------|
| | Энергия | Спин и четность | Энергия | Энергия |
| 1 | 7.861 | 3/2+ | 7.861 | 7.86 |
| 2 | 57.275 | 5/2+ | 57.276 | 57.3 |
| 3 | 75.706 | 7/2+ | 75.706 | 76.7 |
| 4 | 163.76 | 9/2+ | 163.76 | 163.8 |
| 5 | 192.81 | 11/2+ | 192.81 | 192.8 |
| 6 | 285.46 | 5/2+ | 285.46 | 285.5 |
| 7 | 318.1 | 13/2+ | 318.1 | 318.1 |
| 8 | 330.125 | 7/2+ | | 330.1 |
| 9 | 358.1 | 15/2 | 345 | 358.1 |
| 10 | 387.41 | 9/2+ | | 387.4 |
| 11 | 391.587 | 7/2- | 389.5 | 391.6 |
| 12 | 434 | 9/2- | 431.5 | 434 |
| 13 | 462 | 11/2+ | 457 | 462 |
| 14 | 469.8 | 1/2- | | 469.8 |
| 15 | 487 | 11/2- | 476 | 487 |
| 16 | 492.1 | 3/2- | 490 | 492.2 |
| 17 | 505.5 | 5/2- | 505.5 | 505.5 |
| 18 | 511.84 | 7/2+ | | 511.8 |
| 19 | 519.2 | 19/2+ | | 519.2 |
| 20 | 538 | | 525 | 538 |
| 21 | 556.1 | 7/2- | 556.1 | 556.1 |
| 22 | 565 | 9/2+ | | 565 |
| 23 | 570.1 | 19/2+ | 574 | 571.1 |
| 24 | 583 | 9/2- | | 583 |
| 25 | 620 | 15/2- | 627 | 620 |
| 26 | 634 | 11/2+ | | 634 |
| | Граница континуума → | | 634 | 659.9718 |
| 42 | 933.3 | 1/2,3/3 | 939 | |
| 45 | 1017 | 1/2- | 1001 | |
| 52 | 1126.6 | 27/2+ | 1136 | |
| 54 | 1174.2 | | 1170 | |
| 59 | 1261 | 5/2,3/2 | 1250 | |
| 67 | 1437 | | 1440 | |
| | | | 1590 | |
| 72 | 1749 | 33/2+ | 1750 | |
| 73 | 1845.6 | 35/2+ | 1850 | |
| | | | 1950 | |
| | | | 2150 | |
| | | | 2300 | |
| | | | 2390 | |
| | | | 2390 | |
| | | | 2492.8 | |
| | | | 2940 | |
| | | | 3189 | |
| | | | 3388 | |
| | | | 3538 | |
| | | | 3637 | |
| | | | 3737 | |
| | | | 3838 | |

В таблице 3 приведены схемы уровней плутония-239, принятые во внимание при расчетах неупругого рассеяния. Там же приведены энергии, спины и четности уровней из одной из современных оценок данных по структуре ядер¹¹.

Как видно из таблицы, в JEFF-3.1 учтены все известные уровни плутония, лежащие ниже принятой в этой оценке границы континуума. В ENDF/B-VII при практически той же границе континуума, схема уровней ниже этой границы

¹¹ База данных PCNUDAT-2 (07.2000)

существенно упрощена. Зато введено много уровней выше границы континуума, конкурирующих с возбуждением непрерывного спектра конечных состояний. Некоторые из этих уровней достаточно близко соответствуют уровням схемы, приведенной в PCNUDAT, большинство же введены формально.

Сечения возбуждения уровней первой ротационной полосы (с 1-го по 5-й плюс 7-й) в обеих оценках рассчитывались по оптической модели с учетом связи каналов и вклада процессов, идущих через составное ядро. Детали расчета сечений возбуждения более высоколежащих уровней несколько отличались.

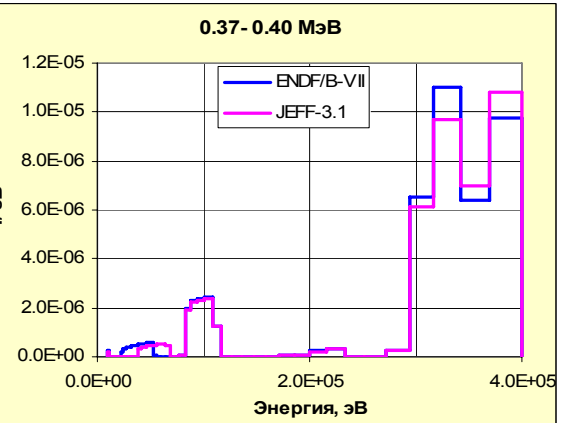
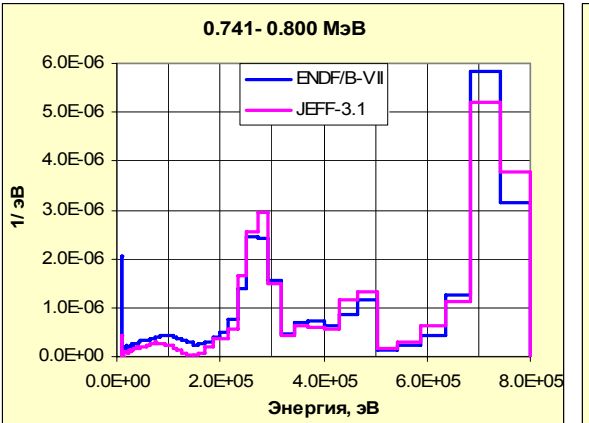
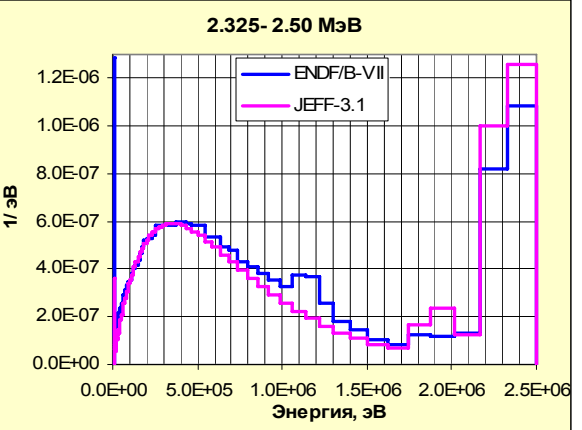
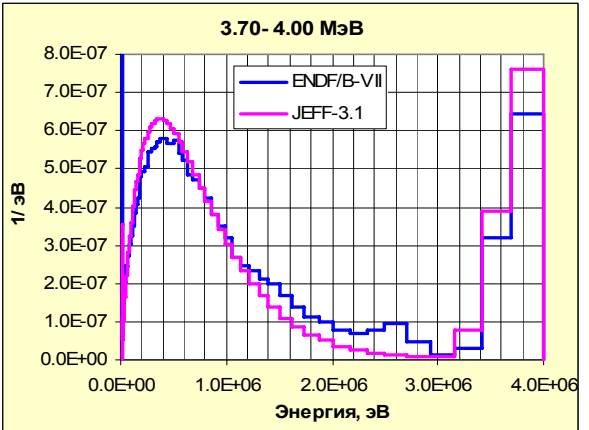
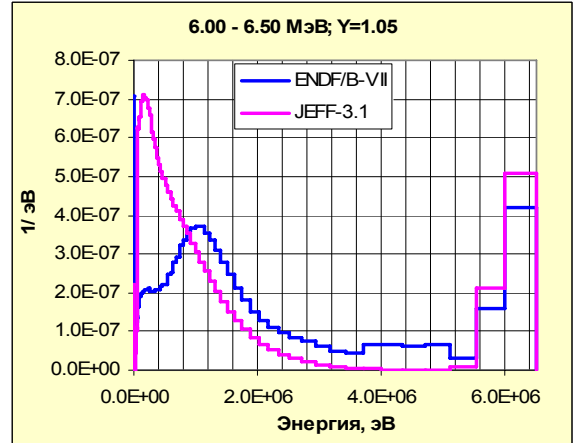
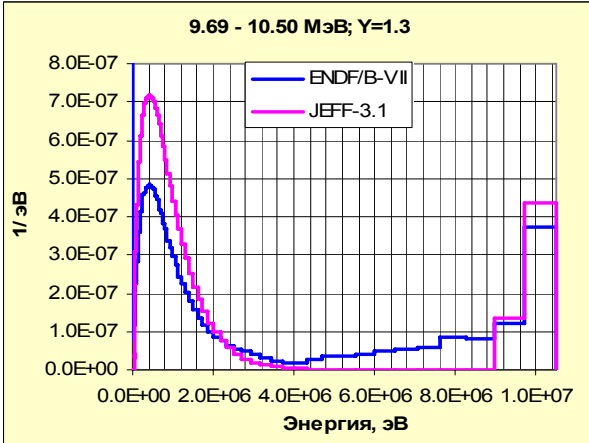
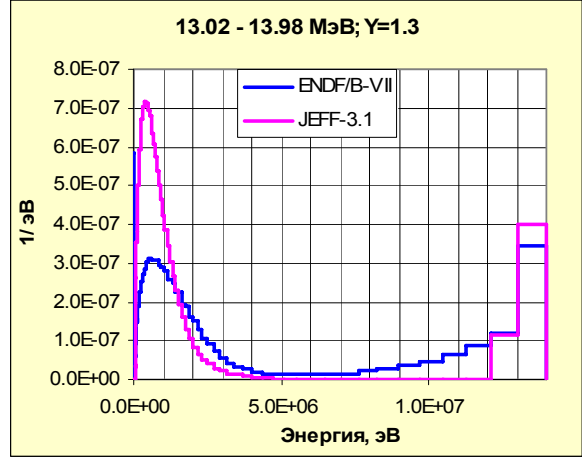
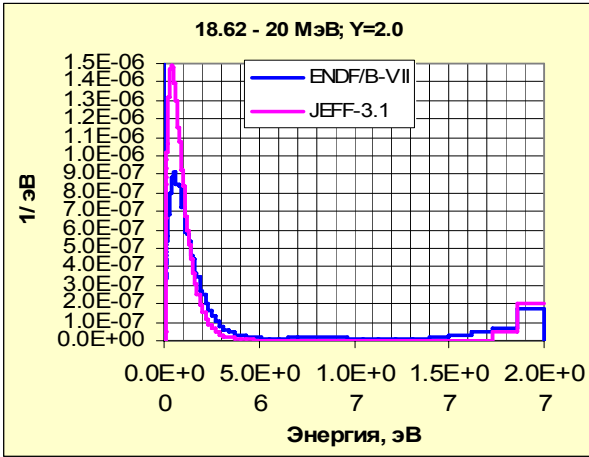
Сечение возбуждения непрерывного спектра при неупругом рассеянии и сечение реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$ в обеих оценках рассчитывались по модели Хаузера-Фешбаха с учетом предравновесных процессов. При этом в оценке ENDF/B-VII принимались во внимание выделенные дискретные уровни. Детали учета этих уровней не сообщаются.

Обсуждать здесь различия в деталях теоретических расчетов едва ли целесообразно, поскольку, несомненно, что при принятии оценки и в том и в другом случае решающее значение имело качество описания критичности металлических плутониевых сфер, которое в обеих оценках весьма высоко (см. таблицу 2). В случае плутониевой металлической сферы с водяным отражателем JEFF-3.1 дает превышение расчетного значения над экспериментальной единицей на 0.24%, что в 2.4 раза превышает экспериментальную погрешность. С другой стороны эта погрешность представляется неоправданно оптимистичной: во всех случаях, когда исследовалось несколько подобных критсборок, погрешность, приписываемая экспериментаторами коэффициенту размножения (согласующаяся со среднеквадратичным разбросом данных) оказывается не менее 0.2%. Поэтому расхождение в 0.24% не представляется чрезмерным.

При прочих равных условиях оценка неупругого рассеяния в JEFF-3.1 представляется более убедительной: ниже области возбуждения континуума в этой оценке учтены все уровни без исключения, а плотность уровней выше этой границы уже достаточно высока, чтобы статистический подход был оправдан.

Что касается реакций $(n,2n)$, $(n,3n)$ и $(n,4n)$, то в ENDF/B-VII энерго-угловые распределения нейтронов этих реакций заданы в файле 6, т.е. учитываются корреляции между энергией нейтрона и углом его вылета. Учет этих слабых корреляций ведется на основе систематики Калбаха-Манна. В JEFF-3.1 энергетические спектры нейтронов, испускаемых в этих реакциях, считаются независимыми от угловых распределений, которые приняты изотропными. Ни в одной из оценок фотоны, испускаемые в рассматриваемых нейтронных реакциях, не определены. В JEFF-3.1 образование фотонов вообще не описывается, в ENDF/B-VII определено испускание фотонов в сумме по всем неупругим взаимодействиям, кроме деления и при делении. Преимущество использования файла MF=6 для описания энерго-угловых распределений всех продуктов реакций в ENDF/B-VII, таким образом, не реализовано.

Детальное сравнение спектров неупруго рассеянных нейтронов довольно мало что дает для понимания существа различий в оценках этого процесса, принятых в ENDF/B-VII и в JEFF-3.1. тем не менее, на серии рисунков 12, такое сравнение проводится. Данные представлены в мультигрупповой форме. Приведенные спектры нормированы на множественность нейтронов, испускаемых в сумме процессов $(n,2n)$, $(n,3n)$ и при неупругом рассеянии. Начальная энергия нейтронов и множественность Y (в случаях отличия ее от единицы) указываются в заголовках рисунков.



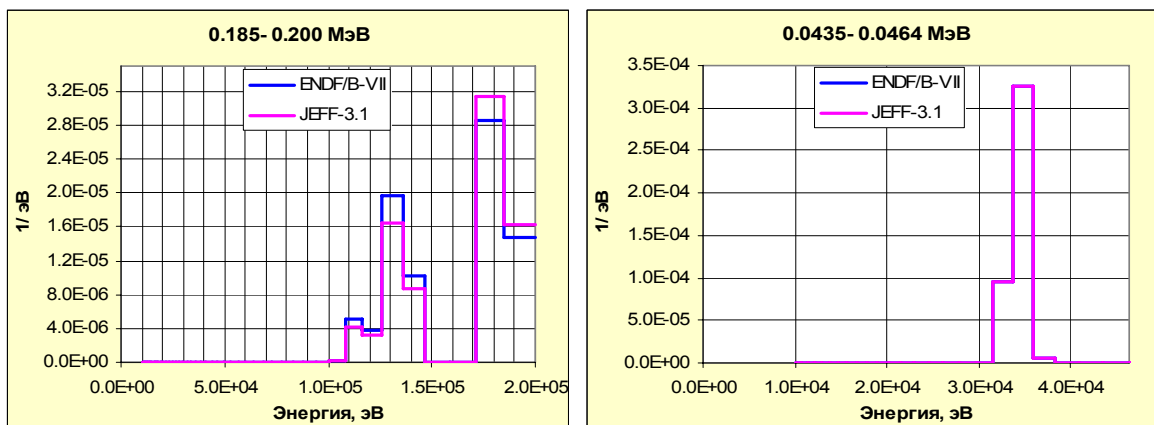


Рис. 12. Сравнение спектров неупруго рассеянных нейтронов.

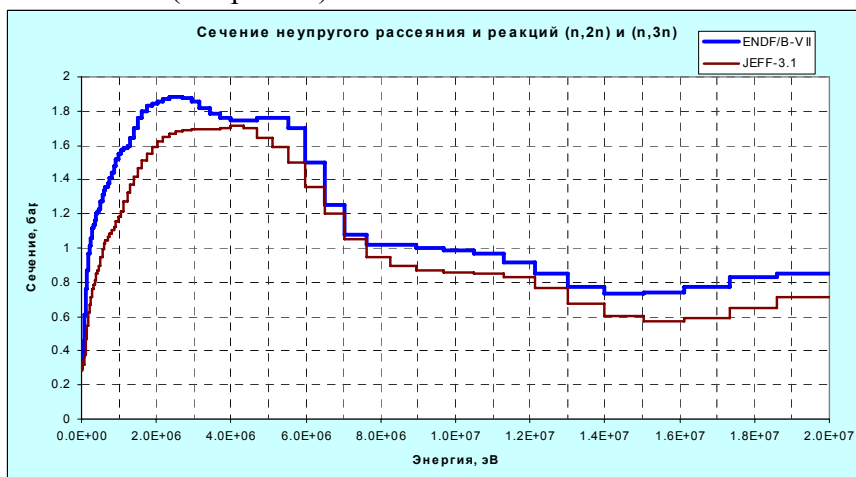
На спектрах нейтронов с энергиями около 4-х и 2.5 МэВ в оценке ENDF/B-VII заметны выбросы при энергиях примерно на 1.2 МэВ ниже начальной. Это, очевидно, влияние искусственно введенных уровней при энергиях выше порога континуума.

Из рис. 12 видно, что при энергиях выше 4 МэВ, где полное сечение плутония сравнительно низко, спектры неупруго рассеянных нейтронов, принятые в JEFF-3.1, значительно мягче, чем в американской оценке, и это в какой-то степени компенсирует более низкие сечения неупругого рассеяния. При энергиях ниже 1 МэВ, формы спектра сближаются, а вблизи порога, где возбуждается только первый уровень плутония-239, спектры, естественно, становятся идентичными.

Для качественного сравнения данных о спектрах неупруго рассеянных нейтронов и нейтронов реакции (n,2n) и (n,3n) на рис. 13а и 13б приведены суммарные сечения этих реакций в сравниваемых оценках и соответствующие “замедляющие способности”, определенные как произведение сечения на среднее приращение латаргии при рассеянии (при этом вклад нейтронов реакции (n,2n) учитывается дважды, а реакции (n,3n) – трижды).

Как видно из рис. 13, несмотря на то, что сечение неупругого рассеяния в JEFF-3.1 ниже, замедляющая способность неупругого рассеяния при энергиях выше 1 МэВ заметно выше, чем в ENDF/B-VII. Благодаря этому нейтроны в результате неупругого рассеяния быстрее теряют энергию, попадают в область энергий с большим полным сечением (см. рис.1), в которой вероятность утечки из размножающей системы снижается.

Заметим, что среднее приращение латаргии при неупругом рассеянии достаточно велико (см. рис.13).



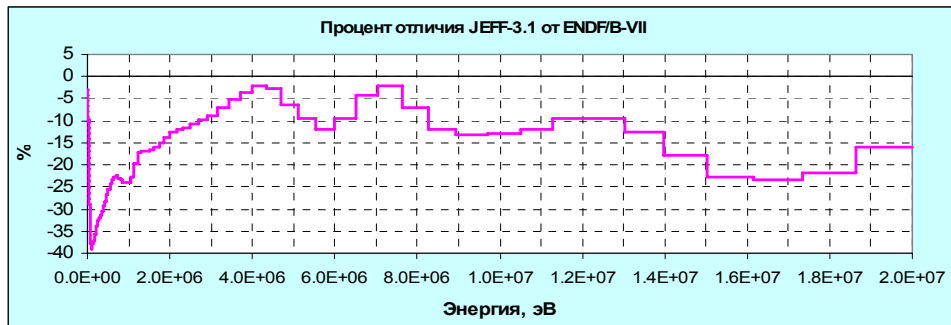


Рис. 13а

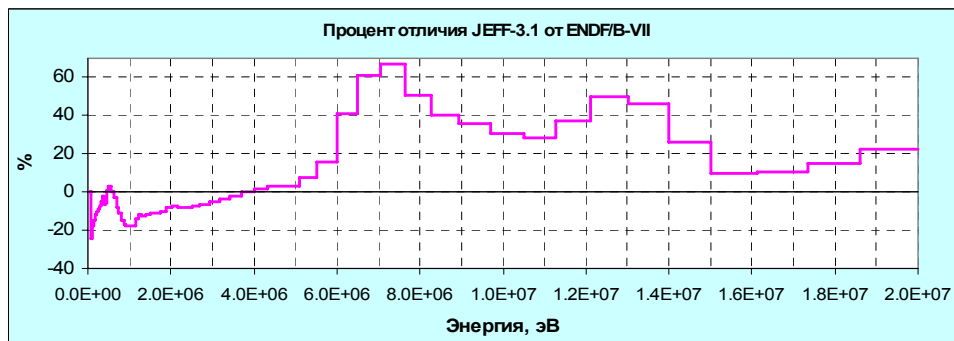
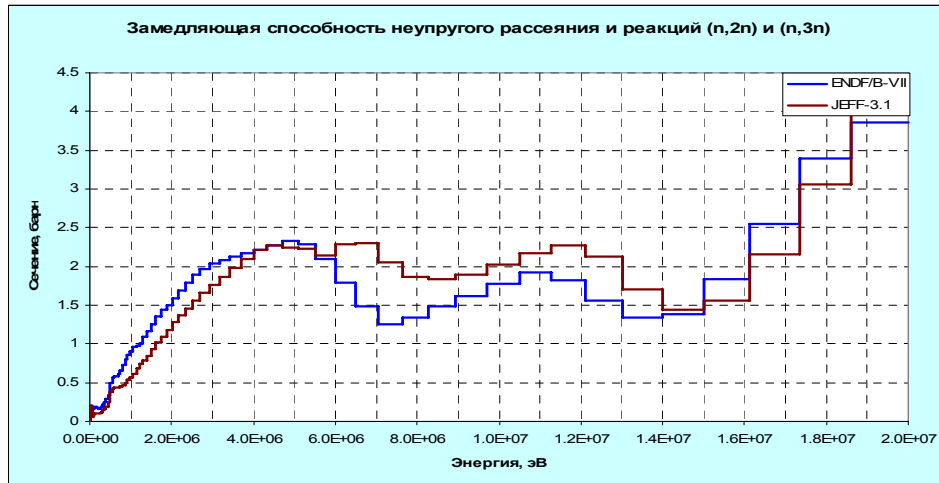


Рис. 13б

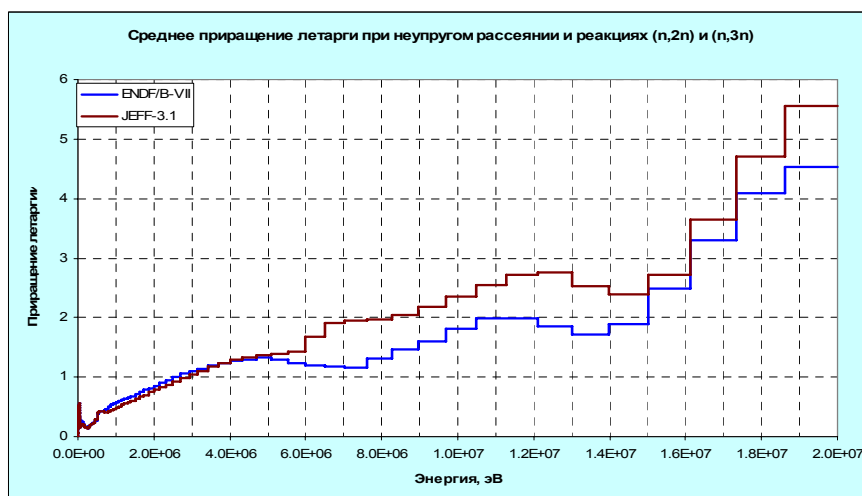


Рис. 14. Среднее приращение летаргии при неупругих взаимодействиях.

4.4. Анизотропия упругого рассеяния.

На рис. 15 сравниваются средние косинусы угла упругого рассеяния, рассчитанные по угловым распределениям, принятым в оценках ENDF/B-VII и JEFF-3.1. Как видно, в широком энергетическом интервале от нескольких сот электронвольт и до МэВ'а средний косинус угла упругого рассеяния согласно оценке JEFF-3.1, значительно ниже, чем это принимается в ENDF/B-VII. Это приводит к существенному повышению транспортного сечения ($\sigma_{tr} = \sigma_t - \mu_e \sigma_e$) – см. рис.16, т.е к заметному снижению утечки нейтронов средних энергий из плутония. Экспериментальных данных, позволяющих провести валидацию оцененных значений среднего косинуса угла упругого рассеяния на плутонии-239 нейтронов с энергиями ниже 1 МэВ, не имеется. Можно, однако, полагать, что анизотропия упругого рассеяния на плутонии-239 должна быть близка к анизотропии упругого рассеяния на уране-238. На рис. 15 приведено расхождение между μ_e для урана-238 и μ_e для плутония-239 из оценки ENDF/B-VII. Как видно, это расхождение близко к тому, что наблюдается между μ_e , оцененному в JEFF-3.1 и ENDF/B-VII. Это служит аргументом в пользу JEFF-3.1.

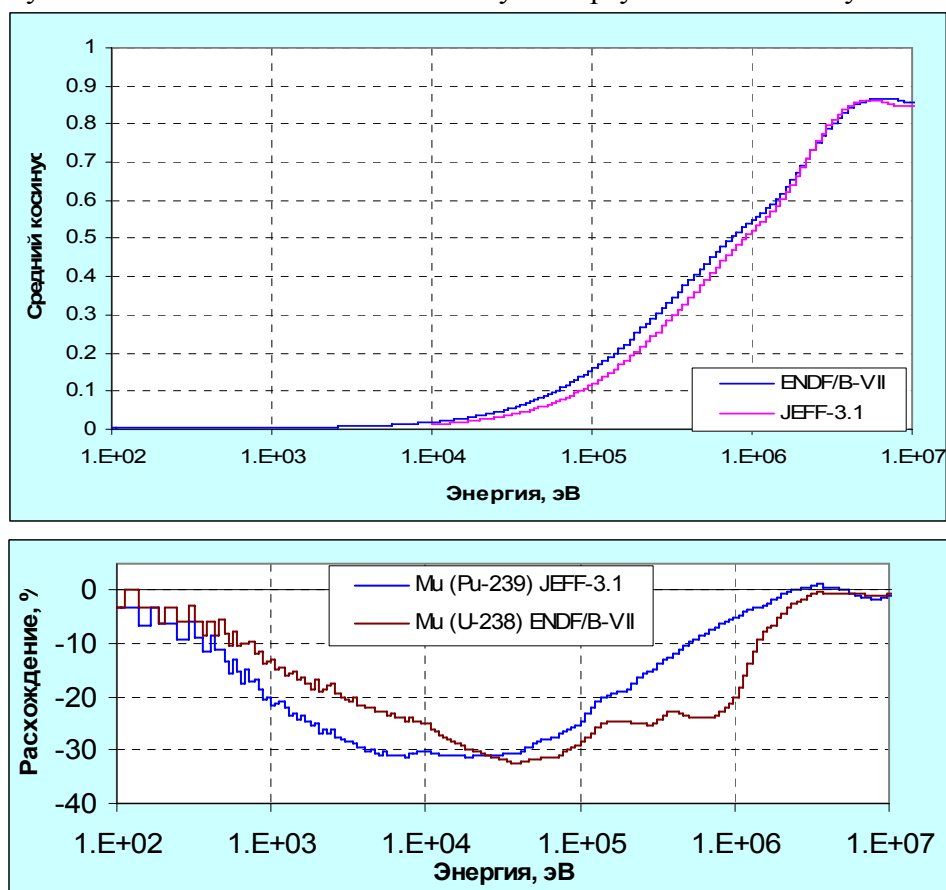


Рис.15. Средний косинус угла упругого рассеяния и различие между его оценками

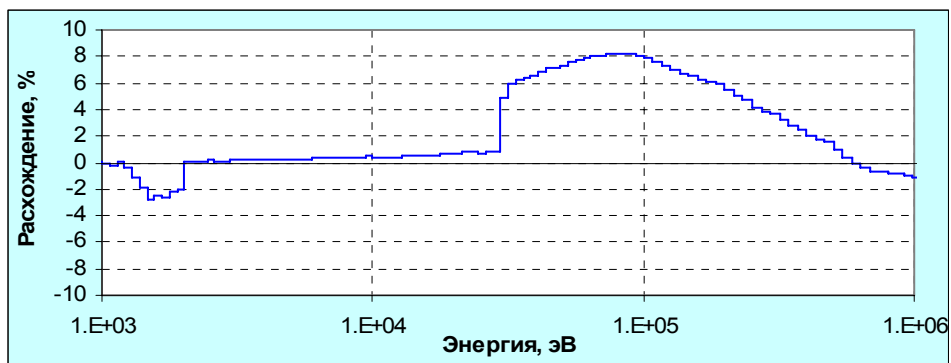


Рис.16. Различие между оцененными значениями транспортного сечения

Различия в характере анизотропии рассеяния нейтронов достаточно высоких энергий, где имеются экспериментальные данные (правда, не очень надежные, поскольку упругое рассеяние практически не отличимо от неупругого рассеяния с возбуждением низколежащих уровней) не велики. Об этом говорит и близость оцененных значений среднего косинуса угла рассеяния при энергиях, равным нескольким МэВ'ам.

Изложенное показывает, что оценка анизотропии упругого рассеяния в JEFF-3.1, как и оценка неупругого рассеяния, выглядит более обоснованной.

Как видно из таблицы 2, обе сравниваемых оценки практически с одинаковой точностью описывают критичность голой плутониевой сферы. Анализ показывает что это достигнуто благодаря тому, что отличие в оценках сечения неупругого рассеяния компенсируется отличием в анизотропии рассеяния. В связи с этим, несмотря на то, что полное сечение для области выше 5 МэВ в ENDF/B-VII представляется более обоснованным, повышать сечение упругого рассеяния, принятое в JEFF-3.1 так, чтобы получить полное сечение таким, как в ENDF/B-VII, опасно, т.к. это чревато потерей отмеченной компенсацией погрешностей.

Таким образом в области быстрых нейтронов в РОСФОНД целесообразно включить данные JEFF-3.1 целиком.

5. Сечения и ν в области неразрешенных резонансов.

В ENDF/B-VII и в JEFF-3.1 в области неразрешенных резонансов принята одна и та же оценка, в которой все сечения, кроме сечения неупругого рассеяния, полностью описываются средними резонансными параметрами. Сечение неупругого рассеяния (и обусловленный им вклад в полное сечение) задается как нерезонансная подложка в файле MF=3 а в средних резонансных параметрах ширина, соответствующая конкурирующим процессам (неупругому рассеянию) положена равной нулю. Это, разумеется, несколько искажает характер резонансной структуры сечений. Несколько различаются и величины сечения неупругого рассеяния (см. рис.17). Область неразрешенных резонансов простирается от 2.5 кэВ до 30 кэВ.

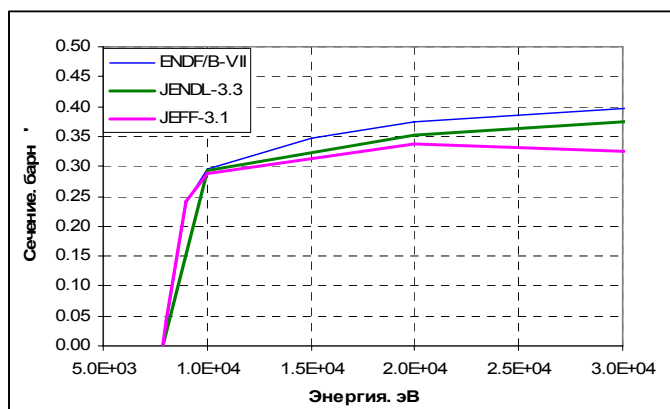


Рис.17. Сечение возбуждения первого уровня плутония-239 в области неразрешенных резонансов.

В JENDL-3.3 ширина, соответствующая неупругому рассеянию приводится, хотя, разумеется, само сечение неупругого рассеяния задается в файле MF=3. Границы области неразрешенных резонансов – те же, что и в ENDF/B-VII.

На рис. 18 - 20 приведены энергетические зависимости средних резонансных параметров из сравниваемых оценок.

Оцененные плотности уровней в обеих оценках близки (см. рис.11). Зависимость плотности уровней от их четности отсутствует. Плотности уровней со спинами $J=0$ и $J=1$ пропорциональны $2 \cdot J + 1$, но для уровней со спином $J=2$ эта закономерность нарушается.

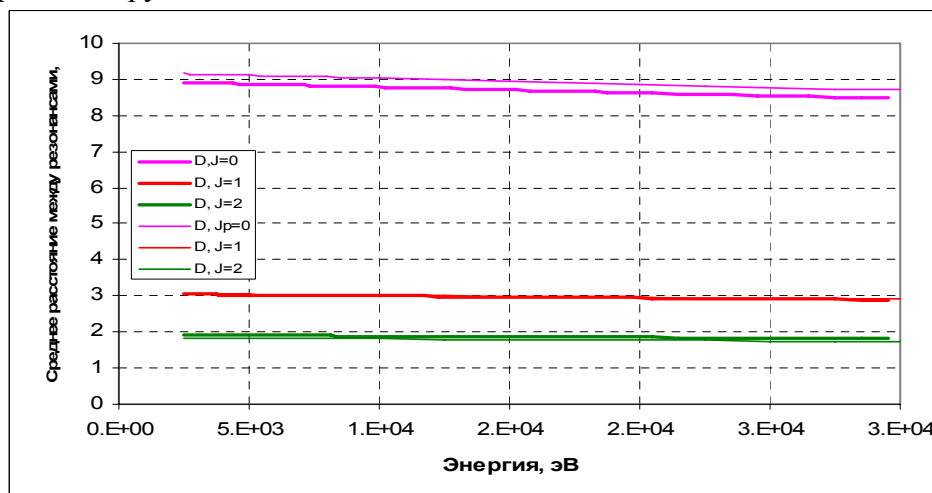


Рис. 11. Энергетические зависимости средних расстояний между резонансами с одинаковым спином и четностью. Толстые линии – оценка ENDF/B-VII, тонкие – JENDL-3.3.

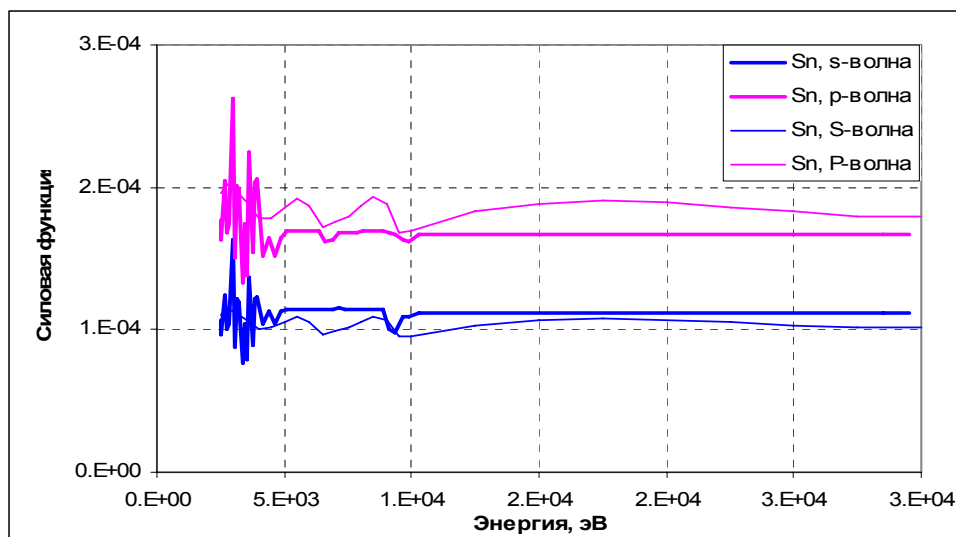


Рис. 18. Нейтронные силовые функции. Толстые линии – оценка ENDF/B-VII, тонкие – JENDL-3.3.

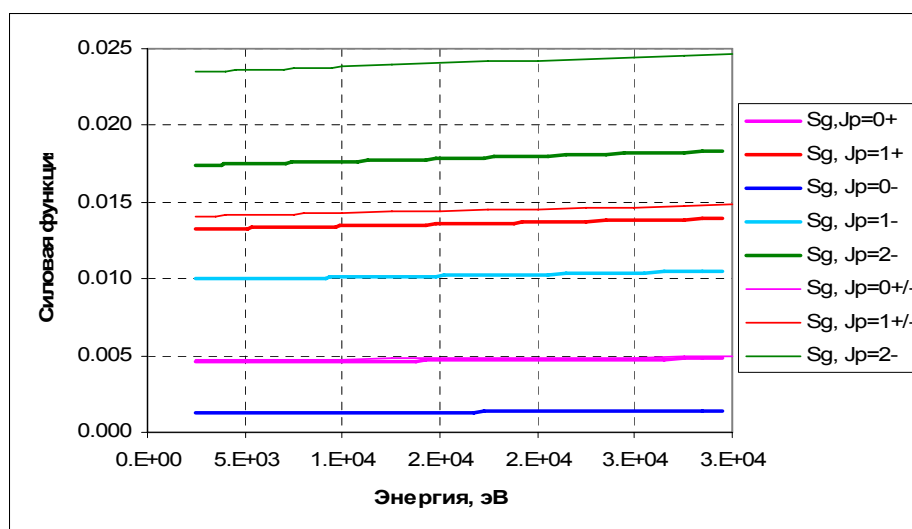


Рис. 19. Радиационные силовые функции. Толстые линии – оценка ENDF/B-VII, тонкие – JENDL-3.3.

Нейтронные силовые функции в оценке ENDF/B-VII имеют сложную структуру с целью более детально описать наблюдаемые флуктуации нейтронных сечений. В JENDL-3.3 вклад р-волны более высок, а s-волны – соответственно ниже.

Радиационные силовые функции в оценке ENDF/B-VII существенно зависят от четности, тогда как в оценке JENDL-3.3 эта зависимость отсутствует и радиационные функции близки к тем, что приняты в ENDF/B-VII для уровней с положительной четностью. Исключением является силовая функция для уровней со спином $J=2$, которая в JENDL-3.3 принята значительно более высокой.

Делительные силовые функции для $J=0^-$ в обеих оценках приняты равными нулю. Описание наблюдаемой структуры сечения деления в области неразрешенных резонансов в обеих оценках осуществляется путем введения структуры в делительную силовую функцию для $J=0$ с положительной четностью. Однако сделано это существенно по-разному.

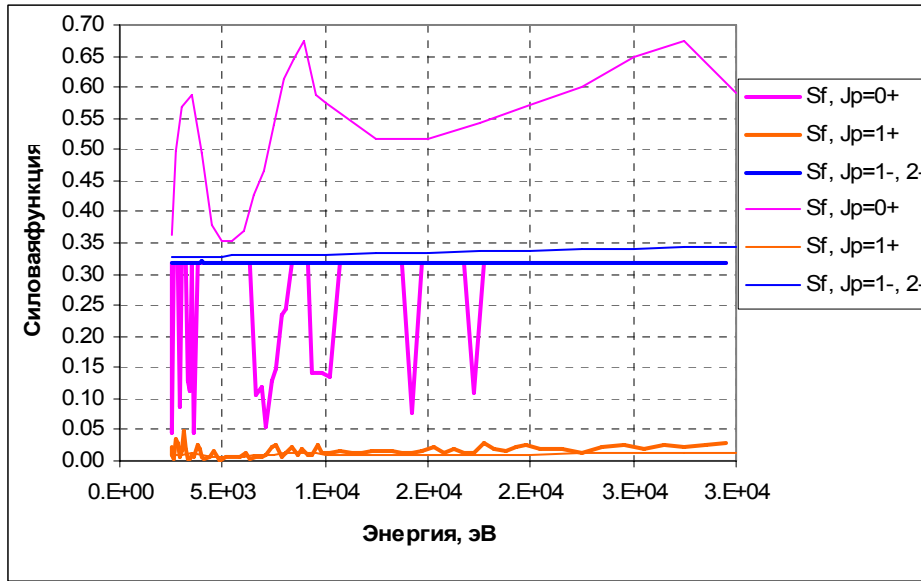


Рис.20. Делительные силовые функции. Толстые линии – оценка ENDF/B-VII, тонкие – JENDL-3.3.

На основе рассмотрения способов параметризации сечений в рассматриваемой области энергий трудно сделать определенное заключение. Непросто придти к нему и сравнивая сечения, рассчитанные по средним резонансным параметрам, с экспериментальными данными. Примером может служить рис. 21, где такое сравнение проводится для сечения деления. В случае сечения захвата сказать что-либо определенное еще сложнее.

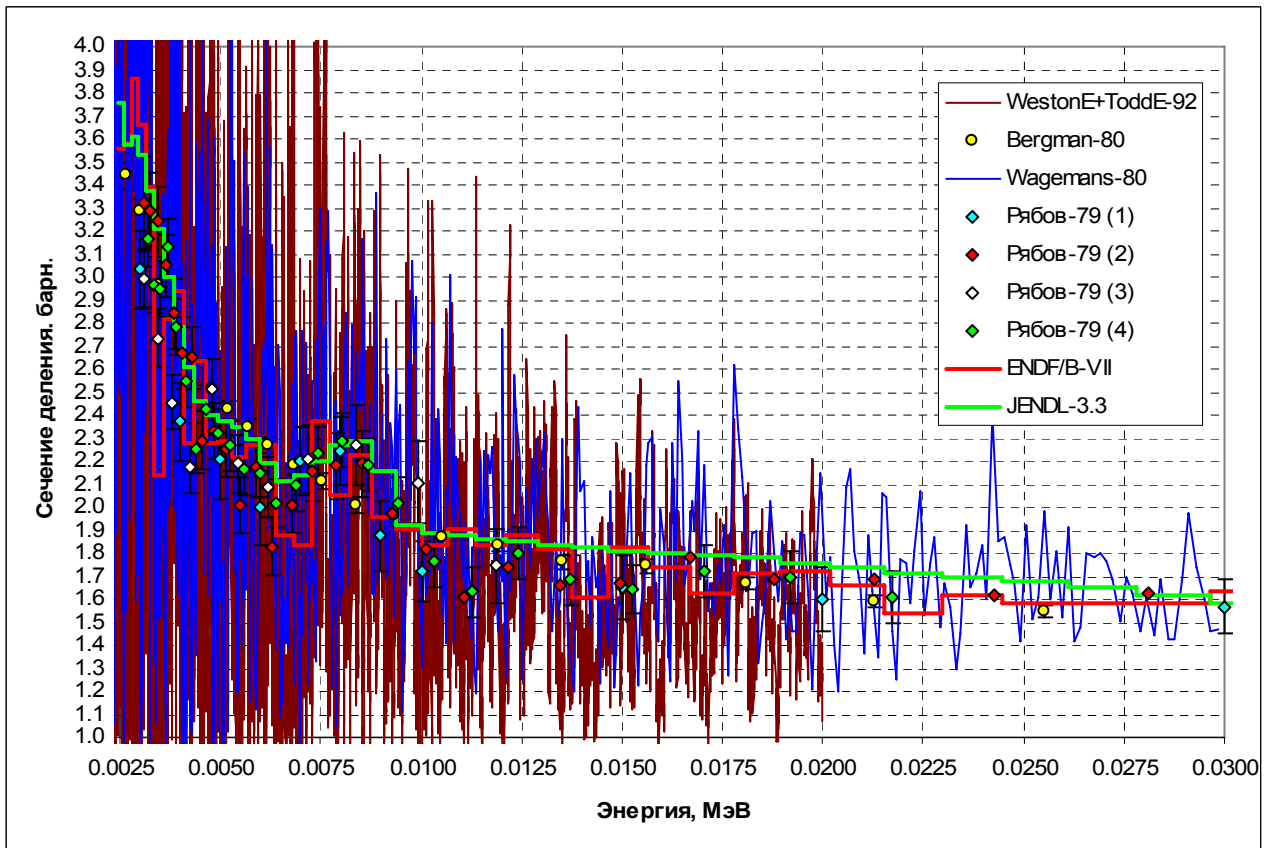


Рис. 21. Сечение деления в области неразрешенных резонансов

На рис. 22 приводятся отклонения сечений деления, захвата, величин α и ν из оценок JENDL-3.3 и ENDF/B-VII. Заметим, что в рассматриваемой области энергий данные ФОНД-2.2 совпадают с JENDL-3.3, а данные JEFF-3.1 – с данными ENDF/B-VII (кроме небольших различий в ν – см. рис.22). В интервалах 2.5 -10 кэВ; 10 – 20 кэВ и 20 – 30 кэВ расхождения данных JENDL-3.3 от данных ENDF/B-VII составляют:

- в сечении деления: 5.1%, 3.1% и 4.2%;
- в сечении захвата: 2.1%, 0.6% и 2.9%;
- в альфа: -1.6%, -3.4% и -1.0%.
- в η : 2.2%, 2.0% и 1.1%.

Учитывая, что в оценке ENDF/B-VII все же учтена некоторая дополнительная информация, а именно результаты измерений полного сечения ниже 4 кэВ, выполненных с высоким разрешением в Сакле, и что эта оценка без изменений включена в 2005 г. в JEFF-3.1, представляется целесообразным включить эту оценку и в РОСФОНД.

Некоторые детали методики оценки излагаются в текстовой части файла.

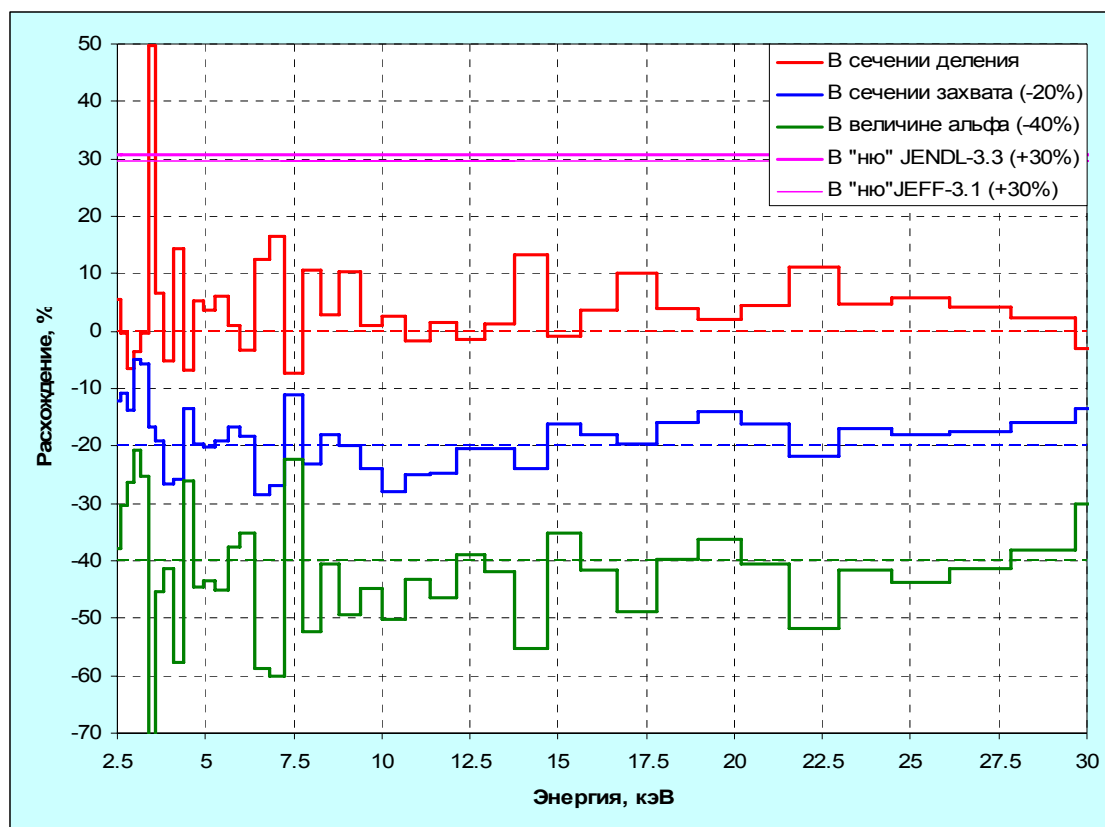


Рис.22. Отклонение оцененных данных JENDL-3.3 от таковых из ENDF/B-VII. Чтобы избежать наложения кривых данные для сечения захвата и величин “альфа” и “ню” смещены. Величины смещений приведены в подписях к данным.

6. Область разрешенных резонансов.

В библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и JEFF-3.1 содержится одна и та же оценка параметров разрешенных резонансов, авторами которой являются H.Derrien и T.Nakagawa. Область разрешенных резонансов разделена на три части – до 1 кэВ; от 1 кэВ до 2 кэВ и от 2 кэВ до 2.5 кэВ. Средние расстояния между резонансами в этих областях составляют 2.5 эВ, 2.3 эВ и 2.5 эВ, т.е. столь явного пропуска уровней, какой

имел место в случае урана-235¹², в данном случае не наблюдается. Совокупный анализ данных экспериментов по пропусанию, по измерению сечений деления и поглощения, а также сечений, рекомендованных группой стандартов¹³ был выполнен с помощью известной программы SUMMY. Сравнение сечений при энергии 0.0253 эВ приведено в табл. 4. В этой же таблице даны значения тепловых сечений, рекомендованных международной группой по стандартам в 2005 г.¹⁴

Таблица 4. Сечения и ν в “тепловой” точке.

| Величина | ENDF/B-VIIb1.2 ¹⁾ | ENDF/B-VIIb1.2 ²⁾ | Стандарт 1997 | Стандарт 2005 |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|---------------|
| σ_f , барн | 747.64 | 747.69 | 747.99±1.87 | 750.00±1.82 |
| σ_c , барн | 271.10 | 270.66 | 271.43±2.14 | 271.50±2.14 |
| σ_e , барн | 7.97 | 7.99 | 7.88±0.97 | 7.80±0.96 |
| ν | 2.87777 | 2.879 | | 2.8836±0.0046 |

¹⁾Результат, полученный программой SUMMY, и приведенный в 451-й секции файла

²⁾Результат, полученный программой NJOY при обработке того же файла.

Как видно, принятые в оценке значения согласуются в пределах погрешностей и с последними рекомендациями, полученными путем совместной оценки сечений всех реакций, используемых в качестве нейтронных стандартов, однако степень согласия несколько хуже. Различия между результатами расчетов сечений по программам SUMMY и NJOY обусловлен различием алгоритма учета эффектов теплового движения (приводимые данные относятся к температуре 297 К)

Как бы то ни было, оснований для выбора какой-либо иной оценки параметров разрешенных резонансов, кроме общепринятой оценки Дерьена и Накагавы, не имеется.

Отличительной чертой современных оценок $\nu_{\text{prompt}}(E)$ в резонансной области является учет резонансной структуры. Резонансная зависимость ν_{prompt} обусловлена двумя факторами: во первых, зависимостью этой величины от каналов деления, вклады которых в разных резонансах различны, а во-вторых от наличия процесса $(n,\gamma f)$ – деления, происходящего после испускания одного- двух фотонов, унесших не слишком большую энергию.

Оценки ν_{prompt} в ENDF/B-VII и в ENDF/B-VI в резонансной области совпадают оценка основана на экспериментальных данных Форта¹⁵. В JEFF-3.1 для ν_{prompt} принята более поздняя оценка авторами которой являются E.Fort и B. Morillon. Как и в ENDF/B-VII? ниже 650 эВ эта оценка опирается на экспериментальные данные Форта, однако результаты оценки заметно различаются: в JEFF-3.1 резонансная структура выражена сильнее (см. ниже рис. 23). При более высоких энергиях оценка опирается на полуэмпирическую модель, разработанную в Лос-Аламосе и усовершенствованную в работе Владука и Тедоры¹⁶. Отмечается однако, что принятые параметры несколько отличаются от рекомендованных в цитированной работе.

Экспериментальные данные Форта до сих пор не включены в базу данных EXFOR. Однако энергетическая зависимость ν_{prompt} отмечалась экспериментаторами и ранее, но не принималась во внимание при оценке (см.рис.23).

¹² См. главу 92. УРАН в настоящем сборнике обоснований.

¹³ Poenitz et al. ANL/NDM-139 [ENDF-358], 1997.

¹⁴ В.Г.Проняев. Частное сообщение.

¹⁵ E/Fort et al. Nucl. Sci. Eng., 99,375 (1988)

¹⁶ G.Vladuc, A.Tudora. Ann. Nucl. Energy, 28, 689 (2001).

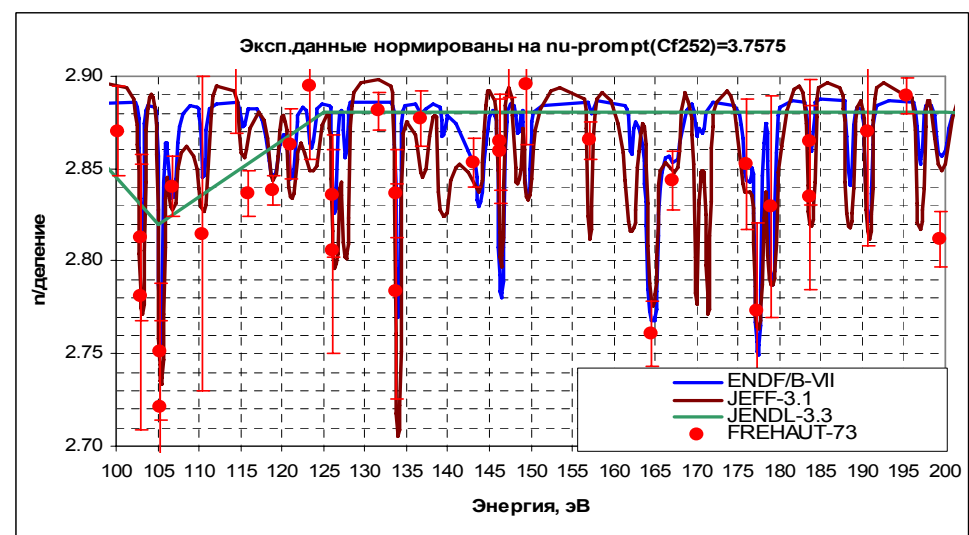
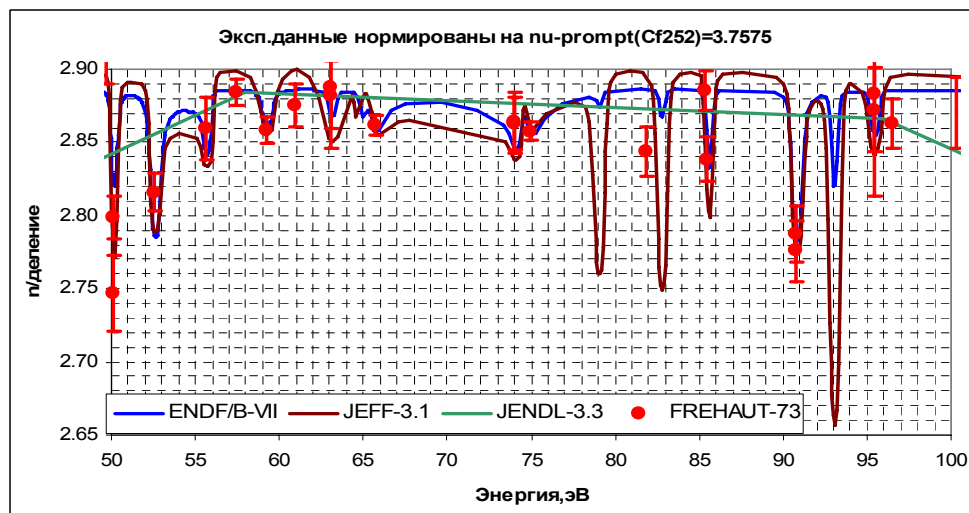
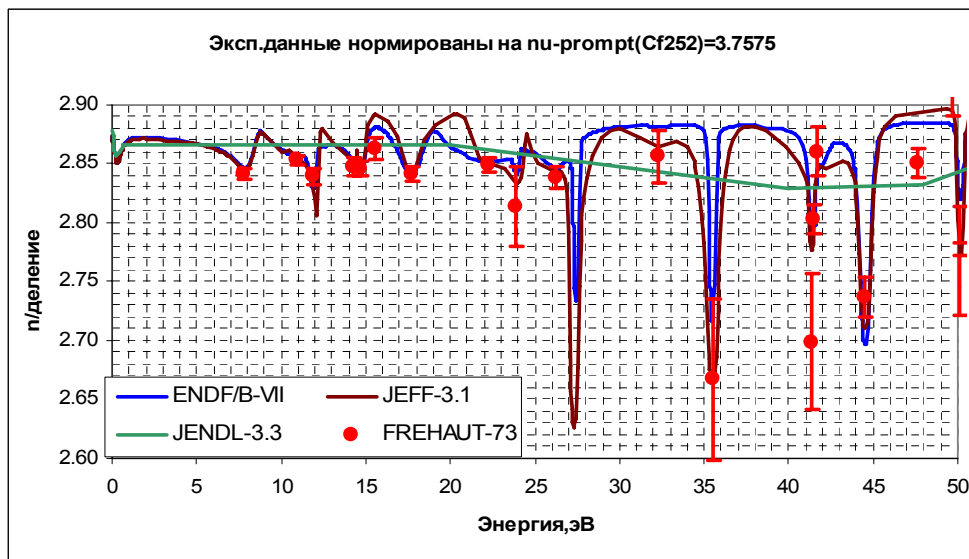


Рис. 23. Поведение ν в области разрешенных резонансов.

Из приведенных на рис. 23 данных видно, что имеются все основания учесть в библиотеке РОСФОНД резонансную структуру ν . Причины наблюдаемых различий в

значениях ν , принятых в ENDF/B-VII и в JEFF-3.1 не ясны. **Поскольку оценка, принятая в JEFF-3.1 выполнена позже, она представляется предпочтительней.**

Смущающим является лишь то обстоятельство, что оценка JEFF-3.1, как и оценка, ENDF/B-VII, существенно завышает коэффициент размножения разбавленных растворов высокообогащенного урана (см. пример в последней строке таблицы 1). Этому недостатка лишена оценка, принятая в FOND-2.2, которая, однако, не может быть рекомендована в РОСФОНД из за имеющихся в ней неоправданных скачков в энергетической зависимости ν (один из них виден на рис. 4г).

Заметим, что влияние констант плутония-239 на утечку нейтронов из разбавленных водных растворов мало. Определяющим является влияние констант ^{239}Pu на k_{∞} , которое, в свою очередь, для разбавленных растворов со средней энергией нейтронов, вызывающих деления порядка 0.05 эВ, определяется величиной $\eta = \nu \sigma_f / (\sigma_f + \sigma_c) = \nu / (1 + \alpha)$.

На рис. 24 показаны различия в величине η между различными оценками (относительно оценки ENDF/B-VII). Для оценки ФОНД-2.2 даны отдельные вклады в отличие η за счет отличия в ν и в $1 + \alpha$.

Как видно, различия между данными JEFF-3.1 и ENDF/B-VII совершенно несущественны. JENDL-3.3 дает чуть большее значение η , благодаря чему использование этой оценки завышает k_{∞} разбавленных растворов еще чуть сильнее, чем ENDF/B-VII (см. табл.1). Константы ФОНД-2.2 позволяют лучше описать критичность разбавленных растворов, но недопредсказывают k_{∞} для растворов с более высокой концентрацией плутония, что и не удивительно, если обратить внимание на снижение η при энергиях ниже 0.2 эВ. Интересно отметить, что основной причиной различия в η является различие в сечениях деления и захвата, а не в ν .

Очевидно, имеется возможность так пересмотреть оценку сечений в области низких энергий, чтобы описать критичность и высококонцентрированных и разбавленных растворов плутония.

Это становится очевидным, если сравнить расхождения в оценках величины η (рис.24) и чувствительности к этой величине коэффициентов размножения растворов разной концентрации (рис. 25). Видно, что эти чувствительности существенно различны по величине и по форме энергетической зависимости, что и обеспечивает возможность оптимальной корректировки сечений. Очевидно, эта процедура должна производиться путем вариации резонансных параметров, т.е с использованием программы SUMMY. При этом могут быть наложены и условия сохранения тепловых значений нейтронных сечений, рекомендуемых группой по стандартам.

Отмечая возможность и желательность совершенствования оцененных данных для плутония-239, выполнение этой переоценки выходит далеко за рамки настоящей работы.

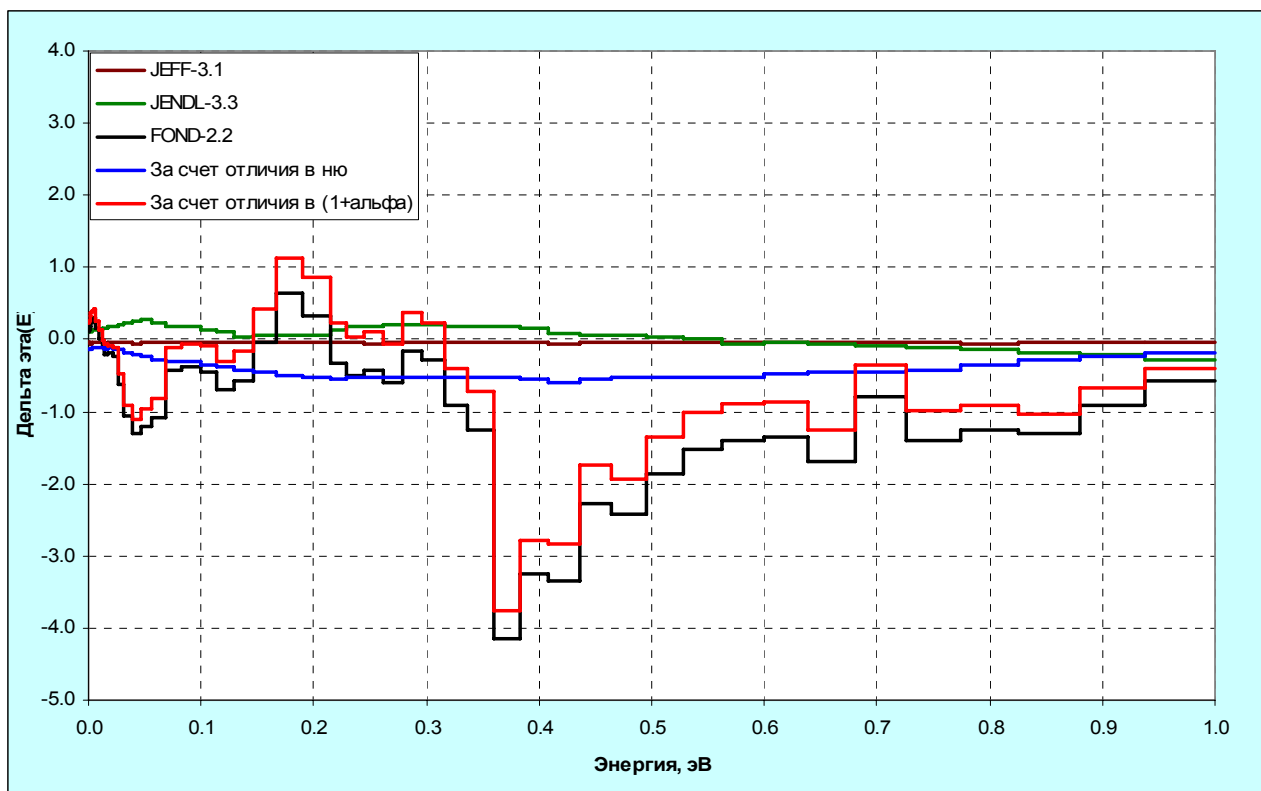


Рис.24. Отличия в величине η между различными оценками.

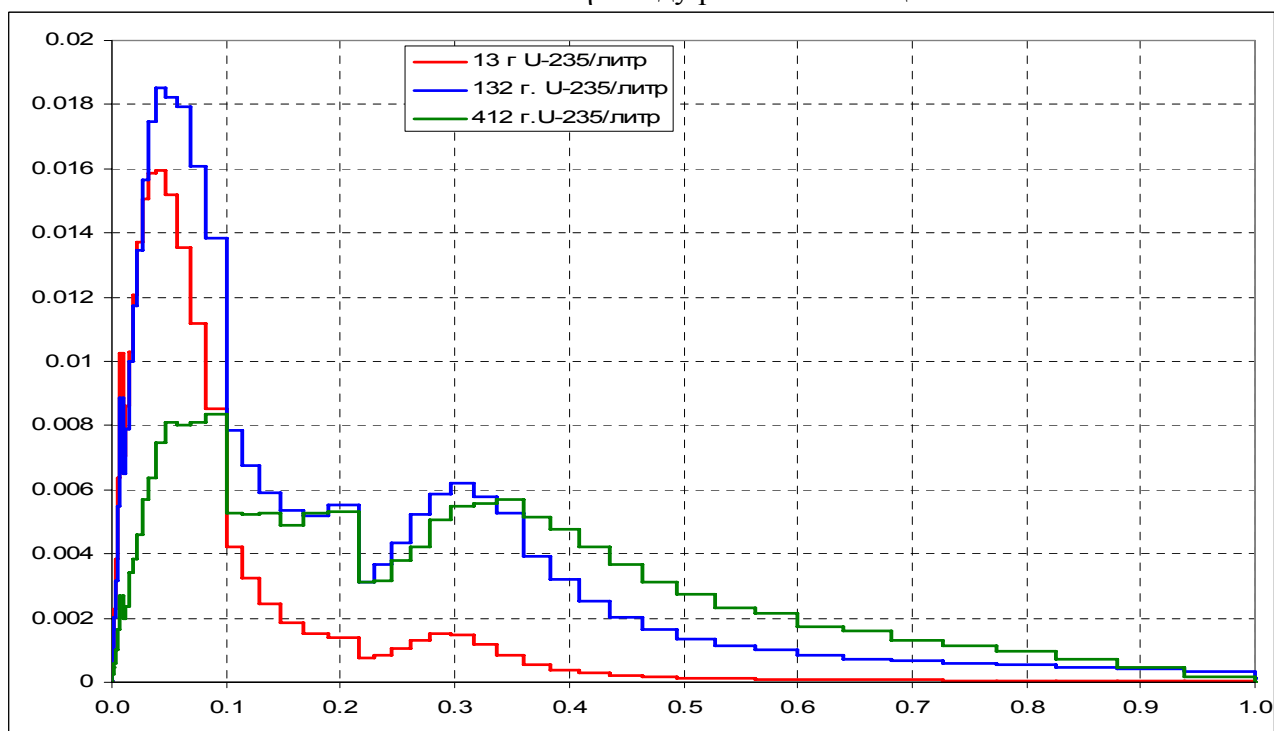


Рис.25. Чувствительности коэффициентов размножения к величине η при энергиях ниже 1 эВ.

7. Образование фотонов в нейтронных реакциях.

В JEFF-3.1 данных образовании фотонов в нейтронных реакциях не содержится. В ENDF/B-VII сохранены прежние (из ENDF/B-VI) данные, представленные для суммарных реакций: $MT=3$, $MT=4$, $MT=18$ и, разумеется, для $MT=102$. В JENDL-3.3 данные об образовании фотонов представлены отдельно для неупругого рассеяния с возбуждением отдельных уровней, с возбуждением континуума уровней, для реакций $(n,2n)$, $(n,3n)$ и т.д. Таким образом, эти данные могут быть использованы только совместно с оценкой сечений.

Данные об образовании фотонов в нейтронных реакциях из ENDF/B-VII могут быть использованы совместно с оценками сечений из любой другой библиотеки.

8. Заключение.

На основании проведенного рассмотрения рекомендуется включить в РОСФОНД оцененные данные из библиотеки JEFF-3.1, дополнив их данными об образовании фотонов из ENDF/B-VII. Спектры принятых восьми групп запаздывающих нейтронов принять такими же, как и для урана-235 и всех остальных делящихся ядер. В файл вводятся также данные о выходах продуктов деления из библиотеки ENDF/B-VI (оценка 1992 г.). Приводятся сечения реакций (n,p) и (n,α) в соответствие с оценкой EAF-2003. Введены соответствующие коррекции: ниже 10 кэВ – в суммарное сечение неупругих взаимодействий, а выше – сечение упругого рассеяния.

В дальнейшем целесообразно переоценить параметры резонансов плутония, ближайших к энергии связи, с целью обеспечения лучшего согласия между расчетными и экспериментальными критическими параметрами плутониевых растворов. Следует также надежнее разобраться с оценками сечения и спектров неупругого рассеяния нейтронов, используя, возможно, экспериментальные данные о спектрах нейтронов, испускаемых сборкой Jesebel.

9. Авторы отбора оцененных данных

Николаев М.Н. и. Кощев В.Н.

94.5 Плутоний-240

В современных библиотеках оцененных данных для плутония-240 содержатся следующие оценки:

В ФОНД-2.2 и БРОНД-2 – оценка Коньшина, Суховицкого и Анципова, 1980.

В ENDF/B-VII – оценка L.Weston, E.Arthur, 1986

В JENDL-3.3 – оценка T.Murata, T.Kawano, T.Nakagawa, 2000/

В JEFF-3.1 – оценка BOULAND, Derrien, Morillon, Romain, 2004.

В данном обзоре наряду с упомянутыми выше рассматривается новая оценка, выполненная для библиотеки БРОНД-3.

1. Общие характеристики

1.1. $Z = 94$ -зарядовое число;

1.2. $A = 240$ (атомный вес);

1.3. $AW = 237.9920$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);

1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 6564(11)$ лет, доминирует α -распад с вкладом $5.7 \cdot 10^{-6}\%$ спонтанного деления;

1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт |
|-----|---------|----------|---------------------------|------------------|
| 4 | n,n' | -.04282 | .04300 | Pu-240 |
| 16 | n,2n | -6.5336 | 6.5608 | Pu-239 |
| 17 | n,3n | -12.1800 | 1.2232 | Pu-238 |
| 18 | деление | 194.295 | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 5.2415 | 0 | Pu-241 |

1.7. Радиоактивность: Наиболее полный анализ оценок основных характеристик радиоактивного распада Pu-240 был выполнен А.Николсом в 1971 г. и его результаты включены в библиотеки JEF-2.2 и FENDL/D-2. Ниже приведены средние энергии различных видов излучения:

```

MEAN GAMMA ENERGY   = 0.0285  KEV
ALPHA ENERGY        = 5155.5952  KEV
RECOIL ENERGY       = 87.4204  KEV
MEAN X-RAY ENERGY   = 1.3340  KEV
MEAN AUGER ELECTRON ENERGY = 2.4215  KEV
MEAN CONVERSION ELECTRON ENERGY= 8.6948  KEV
SPON. FISSION GAMMA ENERGY = 0.0004  KEV
SPON. FISSION NEUTRON ENERGY = 0.0002  KEV
SPON. FISSION FRAGMENT ENERGY = 0.0099  KEV
SPON. FISSION NUBAR  = 2.1510
EFFECTIVE Q VALUE    = 5255.9106  KEV

```

Соответствующие спектры испускаемых частиц содержатся в указанных выше библиотеках.

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

2.1 Область разрешенных резонансов.

В настоящее время имеются параметры разрешенных нейтронных резонансов вплоть до энергии 5.7 кэВ [84M]. В оценку БРОНД-2, выполненную в 1985 г., были включены резонансы лишь до энергии 1 кэВ. В оценку ENDF/B-VI, выполненную в 1986 г., включены резонансы до 5.7 кэВ с параметрами, рекомендованными в работах [74W, 84W]. В 1996 г. на основе программы SAMMY был выполнен более полный резонансный анализ всей совокупности экспериментальных данных [96B]. В отличие от предыдущих анализов, основанных на формализме многоуровневого Брейта-Вигнера, в программе SAMMY использован формализм Рейха-Мура, который обеспечивает более корректное описание интерференции резонансов в условиях сильных флуктуаций делительных ширин, обусловленных двугорбой природой барьеров деления.

Посредством программы SAMMY был проведен согласованный анализ данных по полному нейтронному сечению [60B], данных по пропусканию [95H] и данных по сечению деления [60L] в области энергий от 0.02 до 1.5 эВ с целью получить сечения для тепловых нейтронов (0.0253 эВ) и параметры резонанса при энергии 1.056 эВ,

вклад которого в резонансный интеграл захвата нейтронов составляет более 90%. Полученные параметры этого резонанса оказались очень близки к значениям, полученным ранее в работе [87S] и использованным в оценках JEF-2 и ENDF/B-VI. Для энергии 0.0253 эВ были получены следующие значения сечений:

| | SAMMY | ENDF/B-VI | JENDL-3.2 | 84Mug |
|------------|----------|-----------|-----------|---------------|
| Total | 288.66 b | 288.6 b | 291.9 b | |
| Scattering | 2.67 b | .096 b | 2.66 b | 1.64 (.09) b |
| Capture | 285.93 b | 287.6 b | 289.1 b | 289.5 (1.4) b |
| Fission | 0.059 b | .064 b | 0.059 b | .056 (.030) b |

В диапазоне энергий от 10 эВ до 5700 эВ был проведен анализ экспериментальных данных по пропусканию для двух образцов различной толщины при энергиях от 20 до 700 эВ и одного образца при энергиях от 20 до 5700 эВ [68K], а также данных по сечениям деления [84W]. Для данных по пропусканию была выполнена тестировка нормализации, а также поправок на фон и экспериментальное разрешение. В сравнении данными, включенными в предыдущие файлы, было получено существенно большее число резонансов, в частности, в области энергий выше 1500 эВ. Эти дополнительные резонансы имеют сравнительно малые нейтронные ширины, и их можно идентифицировать только в данных по сечениям деления при условии малых фонов или при анализе статистических флуктуаций экспериментальных данных по пропусканию. Учет таких слабых резонансов приводит к более реалистичному определению среднего расстояния между резонансами для всей области разрешенных резонансов и позволяет избежать введения «подложки» резонансных сечений вблизи верхней границы резонансов. Сравнение нейтронных силовых функций и среднего числа резонансов в файле ENDF/B-VI и настоящей оценке представлено в следующей таблице:

| Диапазон энергий эВ | Силовые функции | | Число резонансов | |
|---------------------|-----------------|-----------|------------------|-----------|
| | SAMMY | ENDF/B-VI | SAMMY | ENDF/B-VI |
| 0- 500 | 1.089 | 1.102 | 42 | 36 |
| 500-1000 | 1.049 | 1.027 | 42 | 33 |
| 1000-1500 | 1.021 | 1.008 | 45 | 32 |
| 1500-2000 | 1.221 | 1.167 | 39 | 26 |
| 2000-2500 | 0.993 | 0.911 | 40 | 25 |
| 2500-3000 | 1.041 | 0.948 | 36 | 21 |
| 3000-3500 | 0.731 | 0.628 | 37 | 17 |
| 3500-4000 | 0.661 | 0.539 | 34 | 16 |
| 4000-4500 | 1.215 | 0.952 | 35 | 18 |
| 4500-5000 | 1.032 | 0.896 | 31 | 18 |
| 5000-5700 | 1.206 | 1.047 | 44 | 25 |

Низкие значения силовых функций в области энергий от 3 до 4 кэВ (~22% ниже средних значений) не связаны с каким-либо пропуском резонансов. Они отражают локальные флуктуации силовых функций, аналогичные наблюдаемым для U-238 и других ядер.

Средние значения сечений радиационного захвата нейтронов для соответствующих интервалов энергий в сравнении с результатами предыдущих оценок приведены в таблице:

| Энергии эВ | Weston [77W] | SAMMY | B-VI | JEF-2.2 | JENDL-3.2 |
|------------|--------------|-------|-------|---------|-----------|
| | b | b | b | b | b |
| 0.02- 1.5 | | 5922 | 5930 | 5897 | 5652 |
| 1.5- 50 | | 56.85 | 56.83 | 55.34 | 57.33 |
| 50- 100 | | 49.96 | 48.40 | 48.57 | 48.71 |

| | | | | | |
|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| 100- 200 | | 23.30 | 24.64 | 25.57 | 25.64 |
| 200- 300 | 8.710.61 | 7.27 | 7.41 | 9.07 | 9.08 |
| 300- 400 | 10.270.72 | 7.93 | 7.89 | 9.92 | 9.94 |
| 400- 500 | 6.600.46 | 6.01 | 5.97 | 7.02 | 7.03 |
| 500- 600 | 7.140.50 | 6.22 | 5.91 | 7.15 | 7.16 |
| 600- 700 | 5.090.36 | 4.44 | 4.64 | 4.65 | 4.65 |
| 700- 800 | 2.630.18 | 2.04 | 1.64 | 3.31 | 3.31 |
| 800- 900 | 6.630.46 | 5.70 | 5.25 | 5.31 | 5.31 |
| 900-1000 | 5.530.39 | 5.75 | 5.47 | 6.15 | 6.15 |
| 1000-1500 | 3.500.25 | 3.13 | 2.89 | 3.46 | 3.46 |
| 1500-2000 | 3.030.21 | 2.52 | 2.24 | 3.05 | 3.05 |
| 2000-3000 | 2.420.17 | 1.90 | 1.54 | 2.40 | 2.40 |
| 3000-4000 | 1.890.13 | 1.20 | 1.29 | 1.89 | 1.90 |
| 4000-5000 | 1.670.12 | 1.13 | 1.55 | 1.76 | 1.75 |
| 5000-5700 | | 0.95 | 1.54 | 1.60 | 1.60 |
| 0.02- 200 | | 81.76 | 82.09 | 81.99 | 80.73 |
| 200-5000 | 3.02 | 2.42 | 2.37 | 3.03 | 3.03 |

Приведенные выше средние значения сечений были вычислены в NEA Data Bank с программой NJOY-94.0. В оценках JEF-2 и JENDL-3 сечения в области энергий от 200 до 5000 эВ были нормализованы к экспериментальным данным [77W]. Средние сечения захвата настоящей оценки и оценки ENDF/B-VI ниже на 25% и 27%, соответственно. Следует отметить, что при проведении оценки ENDF/B-VI Вестон не включил в рассмотрение свои собственные данные [88W].

Средние значения сечений деления, вычисленные в NEA Data Bank, приведены ниже:

| Энергии эВ | SAMMY mb | B-VI mb | JEF-2.2 mb | JENDL-3.2 mb |
|---------------|-------------|------------|---------------|-----------------|
| 0.02- 1.5 | 1649 | 1170 | 1140 | 1048 |
| 1.5- 50 | 91 | 94 | 381 | 94 |
| 50- 100 | 74 | 76 | 346 | 76 |
| 100- 200 | 46 | 50 | 337 | 50 |
| 200- 300 | 52 | 53 | 222 | 53 |
| 300- 400 | 15 | 18 | 228 | 18 |
| 400- 500 | 47 | 49 | 188 | 49 |
| 500- 600 | 20 | 23 | 185 | 21 |
| 600- 700 | 54 | 54 | 208 | 66 |
| 700- 800 | 879 | 905 | 1020 | 938 |
| 800- 900 | 698 | 615 | 693 | 613 |
| 900-1000 | 86 | 80 | 155 | 75 |
| 1000-1500 | 206 | 199 | 257 | 147 |
| 1500-2000 | 316 | 297 | 422 | 312 |
| 2000-3000 | 210 | 181 | 332 | 242 |
| 3000-4000 | 75 | 74 | 116 | 6 |
| 4000-5000 | 60 | 50 | 88 | 67 |
| 5000-5700 | 150 | 145 | 91 | 124 |
| 1.5 -5700 | 159.5 | 149 | 228 | 158 |

В интервале энергий от 1.5 до 700 эВ значения сечений деления в оценке JEF-2.2 существенно выше, чем в других оценках. В целом, новая оценка согласуется с результатами ENDF/B-VI и JENDL-3.2. Обращает на себя внимание противоречивость оценки JENDL-3.2 в интервале энергий от 3000 до 4000 эВ.

Резонансные интегралы захвата и деления сравниваются в следующей таблице:

| | SAMMY b | B-VI b | JEF-2.2 b | JENDL-3.2 b | Mug84 |
|---------|------------|-----------|--------------|----------------|------------|
| Capture | 8481 | 8494 | 8445 | 8102 | 8100 (200) |
| Fission | 3.16 | 2.46 | 3.52 | 2.29 | 8.8 |

Отличие значений интеграла захвата в оценке JENDL-3.2 от остальных оценок обусловлено низким значением нейтронной ширины резонанса 1.056 эВ.

Сравнение результатов настоящей оценки с JEF-2.2 демонстрирует существенное уменьшение сечений захвата и деления в области разрешенных резонансов, которое согласуется с тенденциями, обнаруженными при тестировка файлов библиотеки JEF-2.2 [94F].

Параметры разрешенных нейтронных резонансов, полученные посредством программы SAMMY, включены в новые оценки JENDL-3.3 и JEFF-3.0 с различными верхними границами области разрешенных резонансов. Радиус потенциального рассеяния в оценке ENDF/B-VI был принят равным 8.88 фм [84M] и на основе анализа SAMMY увеличен до 9.42 фм в оценках JENDL-3.3 и JEFF-3.0.

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 1 представлена энергетическая зависимость числа s-резонансов, включенных в оценки ENDF/B-VI и JENDL-3.3 (=JEFF-3.0). Отчетливо виден значительный пропуск резонансов в оценке ENDF/B-VI уже при достаточно низких энергиях (< 1000 эВ), следствием которого является завышенное значение среднего расстояния между резонансами $D_0=14.1$ эВ, оцененное по низкоэнергетическому участку нарастающей суммы резонансов. В данных JENDL-3.3 (=JEFF-3.0) пропуск резонансов начинается лишь при энергиях выше 3000 эВ, и линейному участку нарастающей суммы резонансов соответствует значение $D_0=(12.2 \pm 0.2)$ эВ. Учитывая пропуск резонансов, в оценке JENDL-3.3 верхняя граница разрешенных резонансов принята равной 2700 эВ, тогда как в JEFF-3.0 при тех же резонансах верхняя граница принята равной 5700 эВ.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов, включенных в рассматриваемые оценки. Так как основной вклад в сумму ширин вносят «сильные» резонансы с большими значениями ширин, то пропуск «слабых» резонансов приводит к сравнительно небольшим искажениям кумулятивной суммы ширин и, соответственно, к достаточно малому отличию нейтронных силовых функций $S_0=(1.07 \pm 0.05) \cdot 10^{-4}$, определяемых по линейному участку нарастающей суммы приведенных ширин.

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов часто привлекают анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа для двух указанных выше границ разрешенных резонансов представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что независимо от выбора верхней границы в рассматриваемом наборе резонансов присутствует около 20 «лишних» слабых резонансов, которые не соответствуют распределению Портера-Томаса в области малых ширин и которые, по-видимому, следует отнести к р-резонансам.

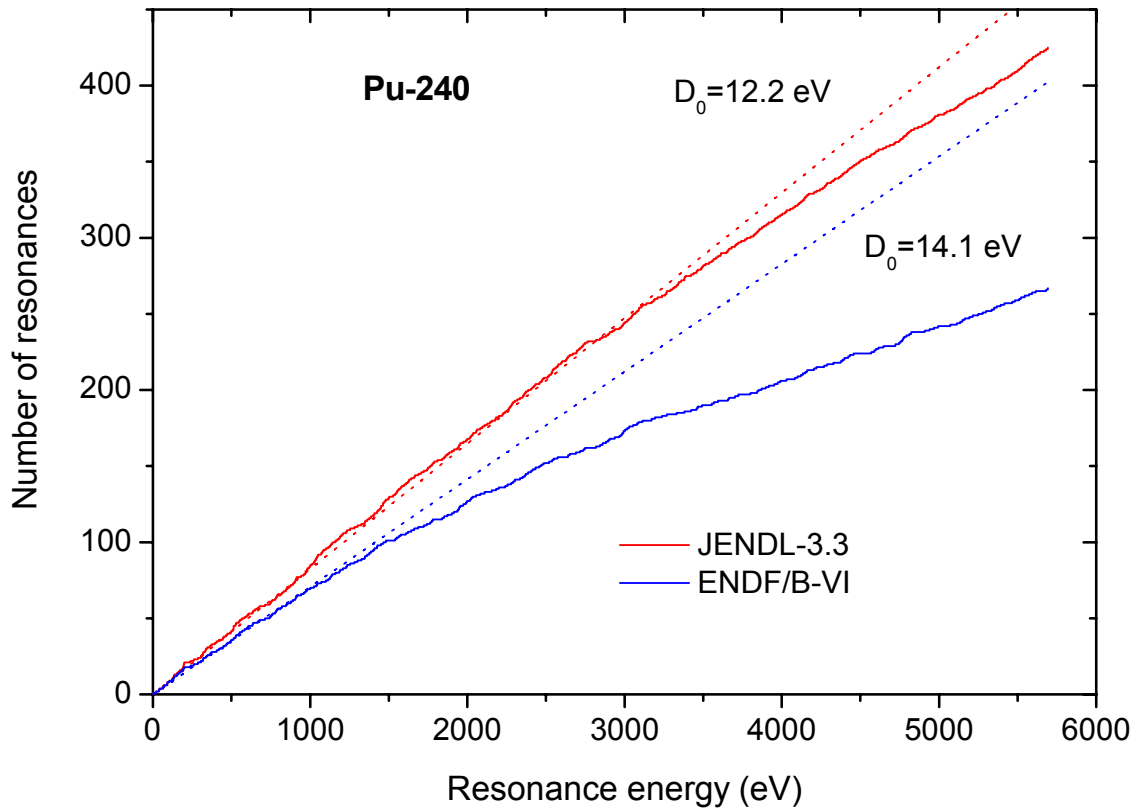


Рис. 1. Энергетическая зависимость числа резонансов в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI

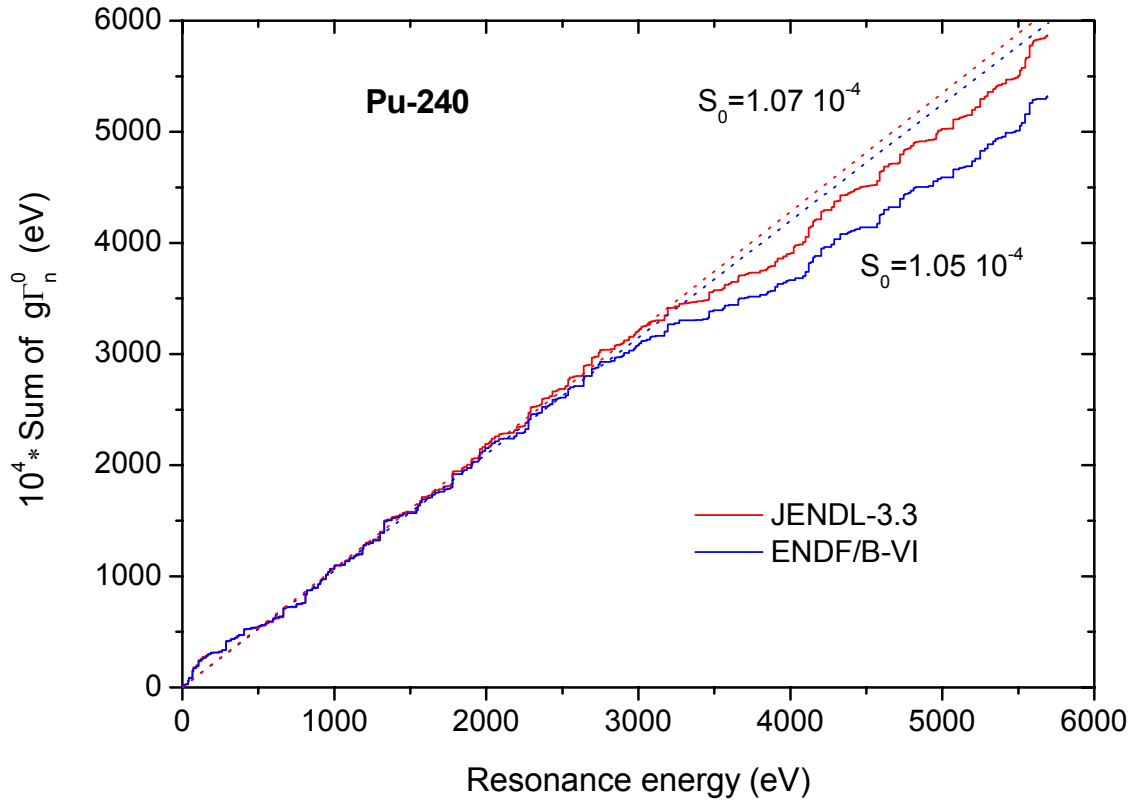


Рис. 2. Кумулятивная сумма приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI

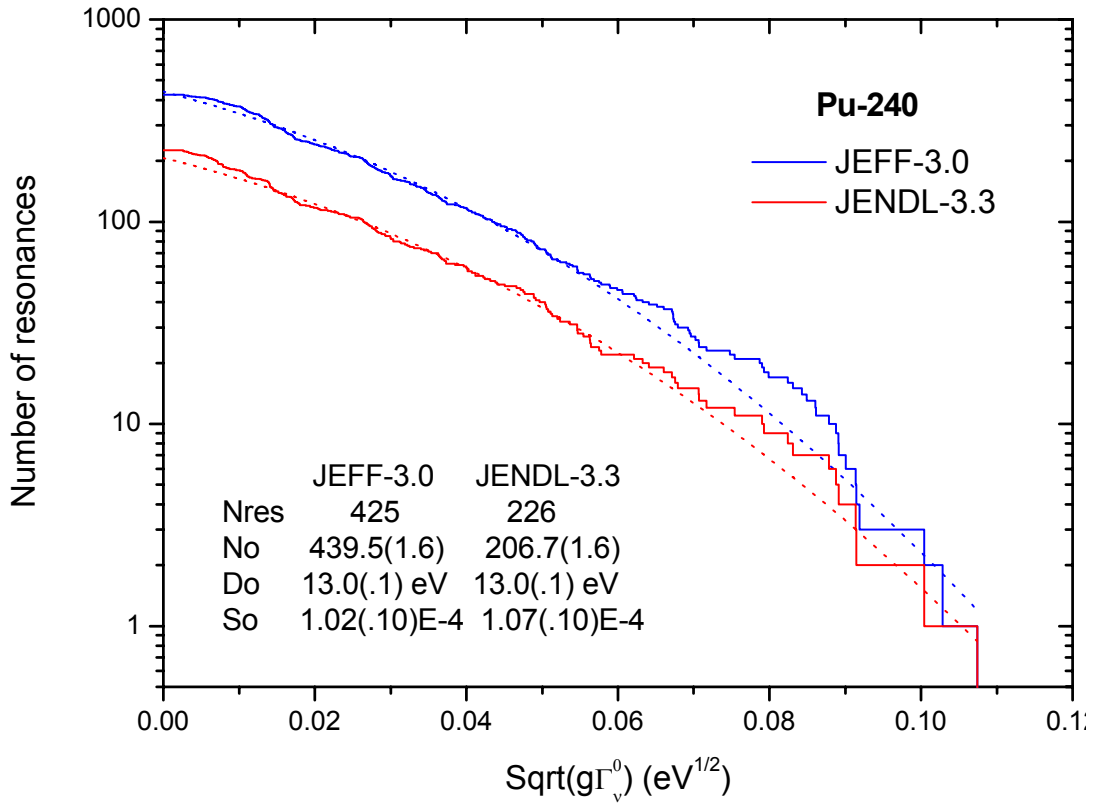


Рис. 3. Анализ пропуска резонансов в оценках JEFF-3.0 и JENDL-3.3

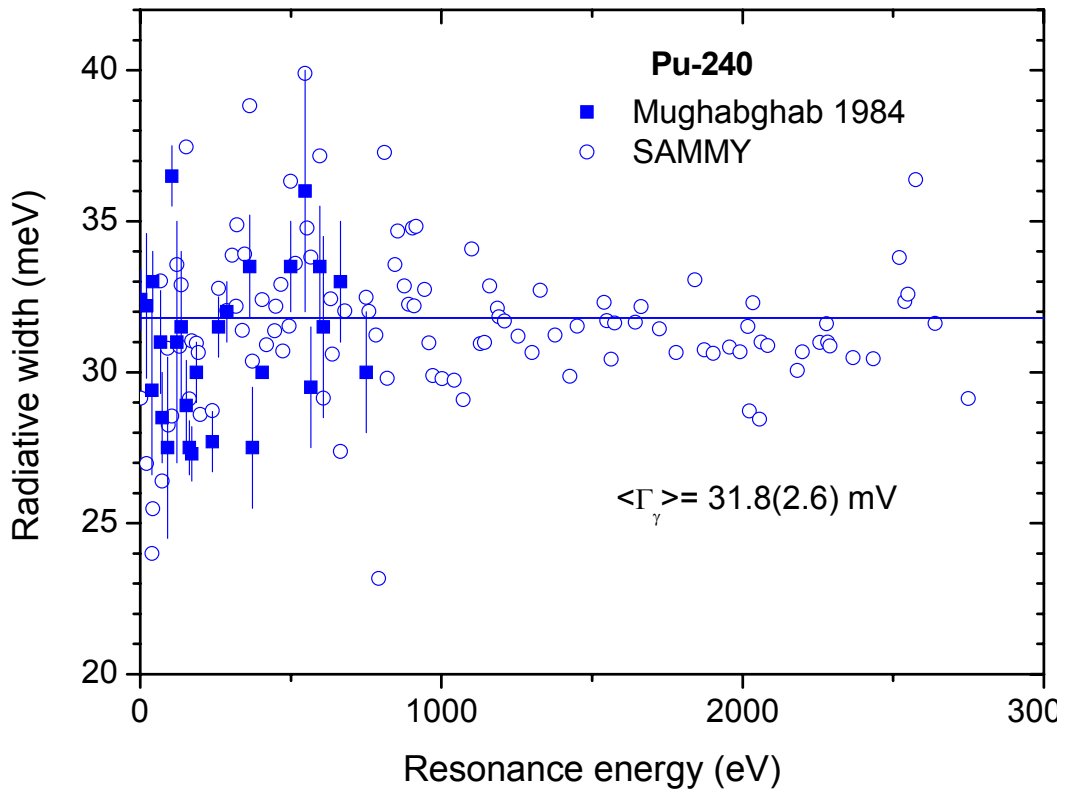


Рис. 4. Радиационные ширины нейтронных резонансов, полученные в предыдущем [84M] и новом анализе экспериментальных данных

Учет возможного вклада р-резонансов увеличивает погрешности определения средних параметров s-резонансов, и на основе анализа всей совокупности данных оптимальными следует признать значения $D_0 = (13.0 \pm 0.2)$ эВ и $S_0 = (1.07 \pm 0.10) 10^{-4}$.

Полные радиационные ширины надежно определены лишь для сравнительно небольшого числа низколежащих резонансов. Имеющаяся совокупность данных представлена на рис. 4, и ей соответствует среднее значение радиационной ширины $\langle \Gamma_\gamma \rangle = (31.8 \pm 2.6)$ мВ. Значение 31.8 мВ принято в оценках JENDL-3.3 и JEFF-3.0 для всех резонансов с неизвестными радиационными ширинами. В оценке ENDF/B-6 использовалось несколько более низкое значение 30.6 эВ.

На основе проведенного статистического анализа резонансов верхняя граница разрешенных резонансов 2.7 кэВ, принятая в оценке JENDL-3.3, кажется более оправданной, чем более широкая область разрешенных резонансов в ENDF/B-6 и JEFF-3.0. В соответствии с данным заключением, **в БРОНД-3 была включена без каких-либо изменений оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов с верхней границей 2.7 кэВ.**

2.3 Область неразрешенных резонансов:

Верхняя граница области неразрешенных резонансов во всех последних оценках простирается до энергии ~ 40 кэВ, которая близка к порогу неупругого рассеяния нейтронов. Так как формат ENDF/B допускает использование только формул одноуровневого Брейта Вигнера, то различие между оценками определяется только принятыми значениями средних расстояний между нейтронными резонансами, нейтронными силовыми функциями и параметризацией делительных ширин.

Во всех оценках включена сумма орбитальных моментов для s-, p- и d-волн, и использованные значения радиусов потенциального рассеяния, расстояний между s-резонансами и нейтронных силовых функций при энергии нейтронов 5.7 кэВ приведены в следующей таблице:

| Оценка | R_s фм | D_0 кэВ | S_0 10^{-4} | S_1 10^{-4} | S_2 10^{-4} | Γ_γ мВ |
|-----------|-------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| ENDF/B-VI | 8.88 | 13.1 | 1.20 | 2.30 | 1.24 | 31.0 |
| JENDL-3.3 | 9.50 | 12.0 | 1.04 | 2.02 | 2.08 | 28.0 |
| JEFF-3.0 | 9.0988 | 13.175 | 1.075 | 1.865 | 1.031 | 30.78 |

При этом в оценке ENDF/B-VI приведенные выше параметры приняты независимыми от энергии, тогда как в JENDL-3.3 и JEFF-3.0 учтены энергетические изменения D_0 и соответствующие изменения средних нейтронных ширин, а также небольшие изменения радиационных ширин. Во всех оценках средние делительные ширины зависят от энергии не монотонно, и флуктуации ширин в какой-то мере отражают промежуточные структуры, наблюдаемые в сечениях деления ядер [68M, 84W].

Следует отметить, что в оценке JEFF-3.0 параметры неразрешенных резонансов приведены только для расчетов резонансной блокировки сечений, тогда как сами сечения даны непосредственно в секции MF=3. В оценках ENDF/B-VI и JENDL-3.3 вся совокупность нейтронных сечений определяется приведенными параметрами резонансов и нет каких-либо добавочных сечений (подложек) в секции MF=3.

На рис. 5, 6 и 7 рассмотренные выше оценки для области разрешенных и неразрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Так как параметры разрешенных резонансов получены непосредственно из экспериментальных данных, то хорошее согласие оценок и данных в диапазоне энергий до 5.7 кэВ является вполне естественным. В диапазоне энергий от 5.7 до 40 кэВ данные по сечениям радиационного захвата нейтронов измерены лишь в одной

работе [77W], и все оценки воспроизводят эти данные. Для сечений деления разногласия оценок в области неразрешенных резонансов весьма существенны, но погрешности экспериментальных данных здесь столь велики, что преимущество какого-либо из оценок вряд ли можно обосновать (рис. 7). Для полных нейтронных сечений в области неразрешенных резонансов экспериментальных данных нет, и различия в приведенных выше радиусах потенциального рассеяния и силовых функциях d -волны приводит расхождению между оценками $\sim 7\%$ для энергии нейтронов 40 кэВ. Экспериментальные данные по полным нейтронным сечениям имеются при энергиях выше 100 кэВ (см. следующий раздел), эти данные хорошо согласуются с энергетической зависимостью оценки JENDL-3.3, тогда как в оценку JEFF-3.0 пришлось ввести скачкообразное 10% увеличение полного сечения на верхней границе области неразрешенных резонансов, чтобы устранить противоречия с экспериментальными данными при энергиях выше 100 кэВ.

Проведенный анализ показал, что для области неразрешенных резонансов оценка JENDL-3.3 является оптимальной, и она включена в БРОНД-3 с расширением верхней границы области неразрешенных резонансов до энергии 42.98 кэВ, соответствующей порогу неупругого рассеяния нейтронов.

60B R.C.Block et al., Nucl. Sci. Eng. **8**,112(1960).

60L B.R.Leonard et al., Hanford Report Series 67219,4 (1960).

68K W.Kolar et al., J.Nucl.Energy, **22** (1968) 299.

68M E.Migneko and J.P.Theobald, Nucl. Phys., **A112**, (1968) 603.

74W H.Weigmann,G.Rohr and F.Poortmans. Proc.Conf. on Resonance Parameters of Fertile Nuclei and 239-Pu, Sacley, NEANDC(E) 163U (1974).

77W L.W.Weston et al., Nucl. Sci. Eng., **63** (1977) 143.

84M S.F.Mughabghab, Neutron Cross Sections, Academ Press, NY, 1984, v. 1, p. B.

84W L.W.Weston and J.H.Todd, Nucl. Sci. Eng., **88** (1984) 567.

86O D.K.Olsen et al., Nucl. Sci. Eng., **94** (1986) 102.

87S R.Spencer et al., Nucl. Sci. Eng., **96** (1987) 318.

88W L.W.Weston et al.,ORNL-TM-10386 (1988).

94F E.Fort et al., Gatlinburg Conference,Tennessee,May 9-16,1994

95H J.H.Harvey,Private communication at ORNL (1995).

97B O.Bouland et al.: Nucl. Sci. Eng., **127** (1997) 105.

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3, 4, 5, 6)

3.1. Полное сечение

В последние годы были выполнены прецизионные измерения полных нейтронных сечений ^{238}U [01Ab]. Эти данные позволяют надежно определить параметры обобщенного оптического потенциала, с помощью которого можно рассчитать полные нейтронные сечения близлежащих ядер. Так как различия полных сечений близлежащих ядер достаточно малы, то такая оценка полных сечений может оказаться более надежной, чем непосредственное описание более ранних экспериментальных данных, погрешности которых существенно выше погрешностей, полученных для ^{238}U . Мы провели соответствующие расчеты полных нейтронных сечений ^{240}Pu , и их результаты показаны на рис. 8 в сравнении с имеющимися экспериментальными данными и другими оценками этих сечений. Разногласия между различными оценками невелики, но проведенные расчеты наилучшим образом описывают совокупность экспериментальных данных во всем диапазоне энергий нейтронов. Полученная в

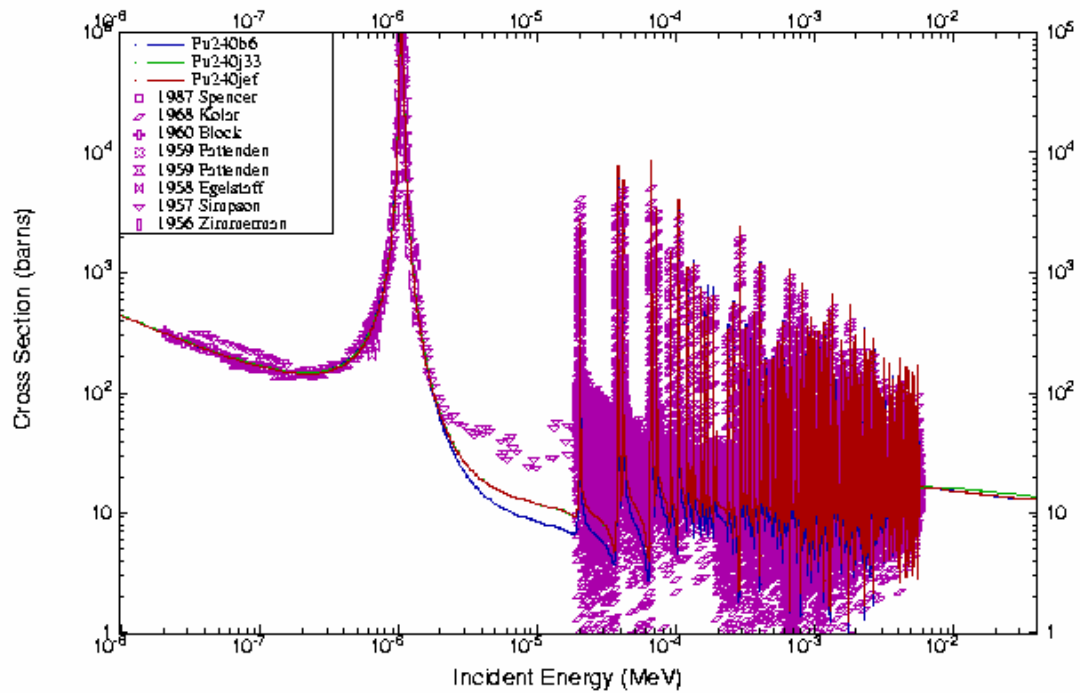


Рис. 5. Экспериментальные данные о полных нейтронных сечениях в области энергий до 40 кэВ в сравнении с различными оценками

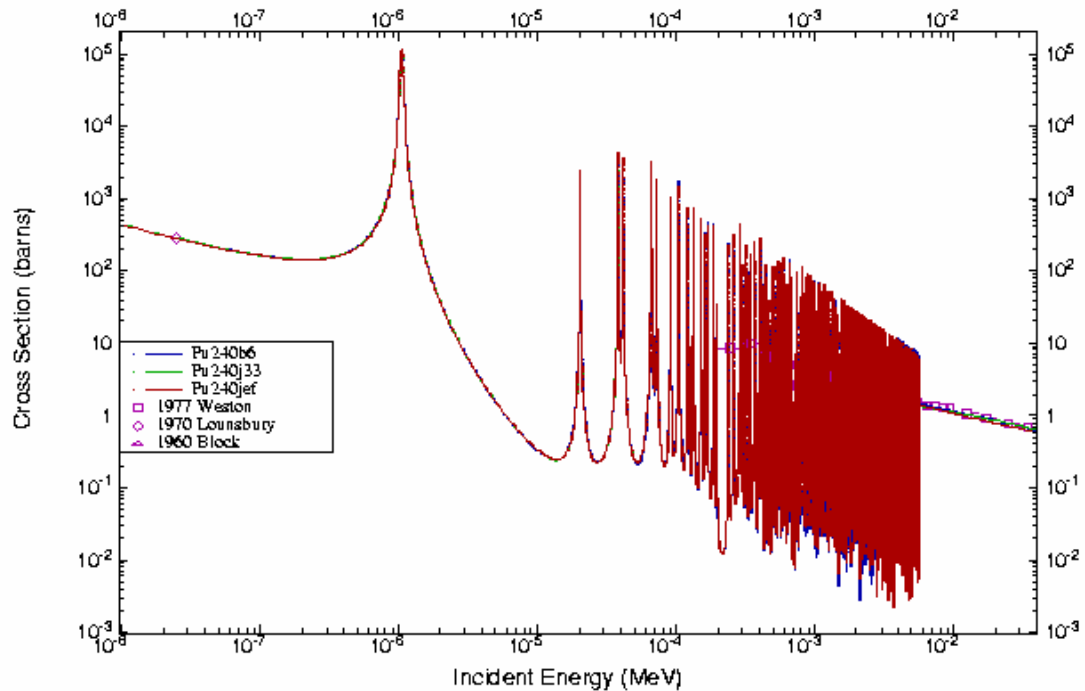


Рис. 6. Экспериментальные данные о сечениях радиационного захвата нейтронов в области энергий до 40 кэВ в сравнении с различными оценками

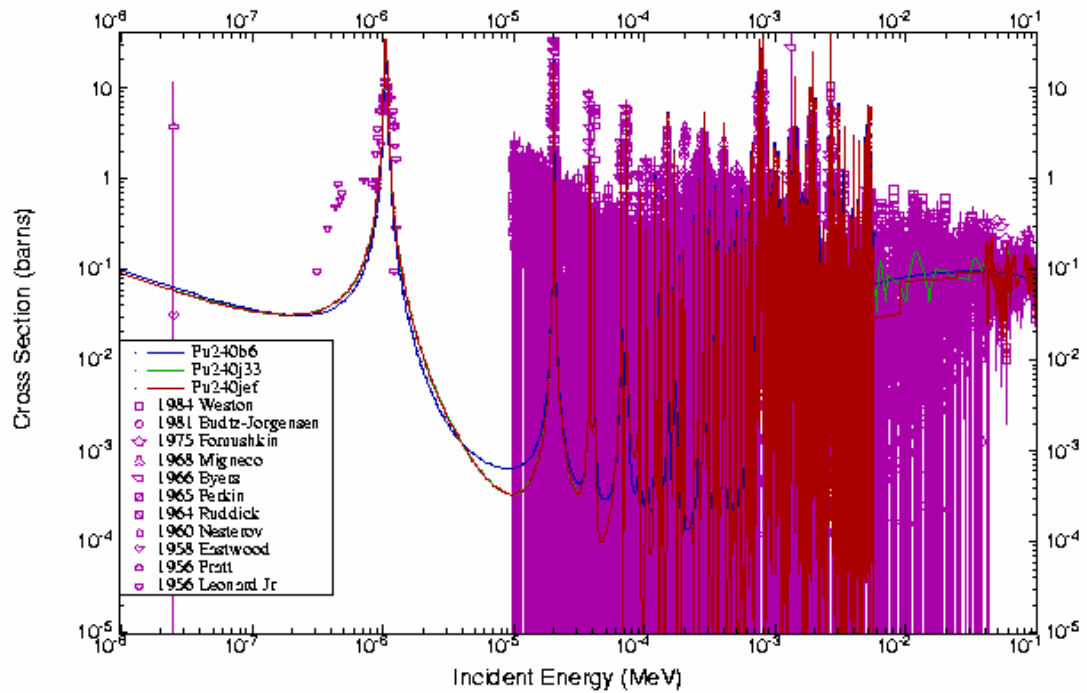


Рис. 7. Экспериментальные данные о сечениях деления ^{240}Pu в области энергий до 40 кэВ в сравнении с различными оценками

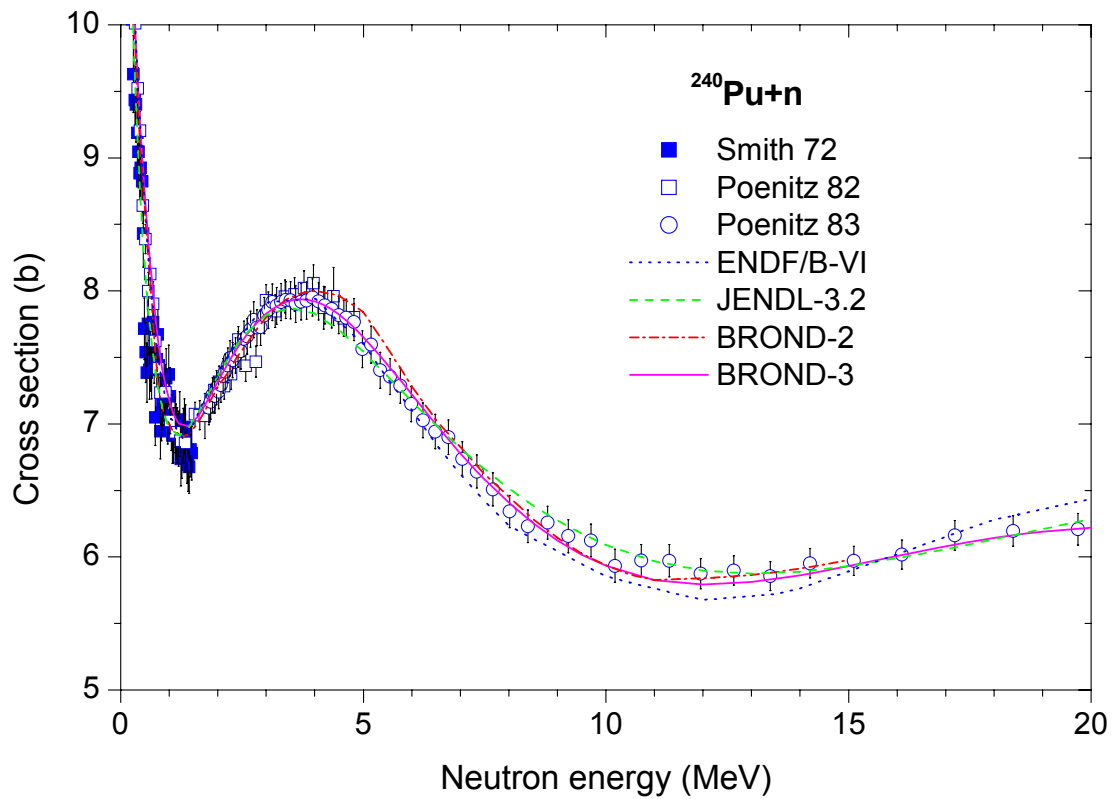


Рис. 8. Оценки полных нейтронных сечений ^{240}Pu в сравнении с экспериментальными данными

расчетах кривая была принята в качестве новой оценки БРОНД-3, и найденный оптический потенциал был использован для расчетов сечений и угловых распределений упруго и неупруго рассеянных нейтронов.

3.2. Упругое рассеяние и угловые распределения нейтронов

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 9 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния с экспериментальными данными. Измерения интегрального сечения упругого рассеяния и соответствующих угловых распределений нейтронов было выполнено только в одной работе [72S], и для энергий нейтронов ниже ~ 600 кэВ экспериментальные данные хорошо согласуются со всеми оценками. Однако выше этой энергии экспериментальные данные наряду с упругим рассеянием содержат также вклад от неупругого рассеяния нейтронов на низколежащих коллективных уровнях, который искажает как интегральные сечения, так и угловые распределения упруго рассеянных нейтронов. Поэтому во всех оценках предполагается, что расчеты угловых распределений упругого рассеяния нейтронов на основе оптической модели с параметрами потенциала, полученными из описания более достоверных экспериментальных данных для близлежащих ядер, являются более надежными, чем прямые данные работы [72S].

В ENDF/B-VI угловые распределения были взяты на основе расчетов для ядра Pu-242 [78M], в JENDL-3.3 и JEFF-3.0 была сохранена более ранняя оценка JENDL-1, основанная на расчетах со сферической оптической моделью. Для БРОНД-3 расчеты угловых распределений были выполнены с деформированным оптическим потенциалом, хорошо описывающим экспериментальные данные для U-238 во всем диапазоне энергий нейтронов от ~ 100 кэВ до 20 МэВ.

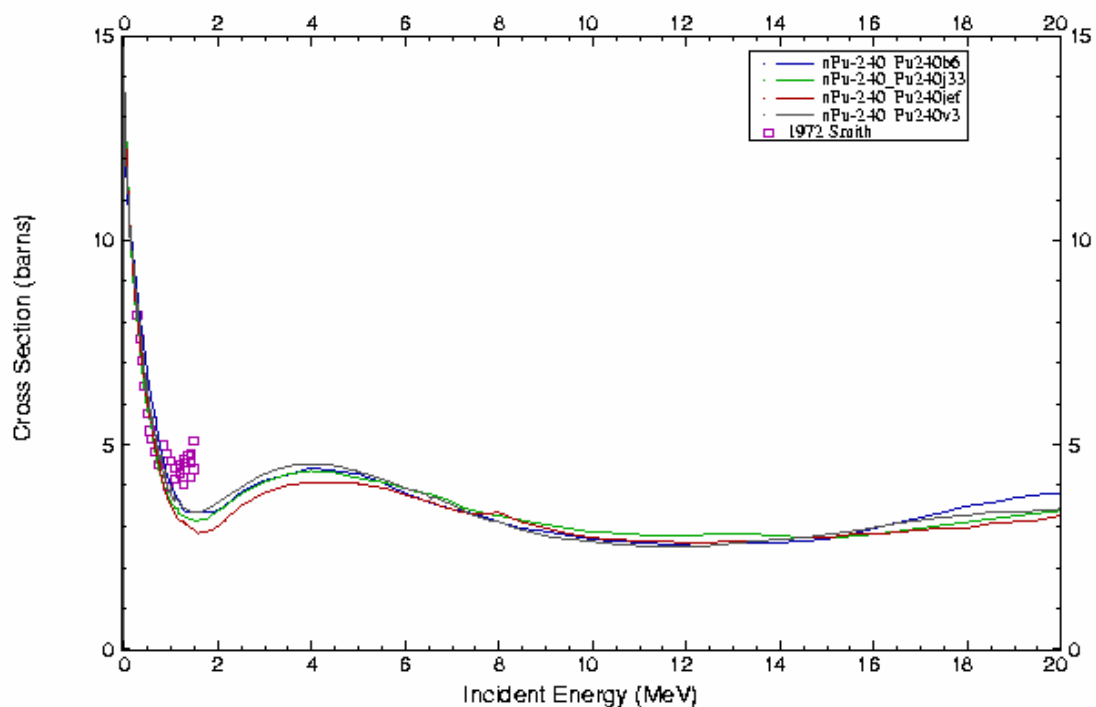


Рис. 9. Оценки сечений упругого рассеяния нейтронов в сравнении с экспериментальными данными

3.3. Сечение радиационного захвата нейтронов

Экспериментальные данные по сечению радиационного захвата нейтронов получены только в одной работе [77W], и все оценки привязаны к этим данным (рис. 10). Оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия в области энергий выше 400 кэВ обусловлено различными приближениями в описании конкуренции радиационных и нейтронных ширин на начальных этапах каскада гамма-переходов. Оценка БРОНД-3 получена на основе расчетов по программе GNASH, в которой описание радиационных ширин тестировано по сечению радиационного захвата нейтронов на U-238, измеренного до энергий ~ 3 МэВ. В области энергий выше 8-10 МэВ во всех оценках рассматривается механизм прямого-коллективного захвата нейтронов, но приближения, привлекаемые для его описания, различаются весьма значительно. Следует, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 1 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не оказывает сколь-либо заметного влияния на расчеты характеристик ядерных реакторов.

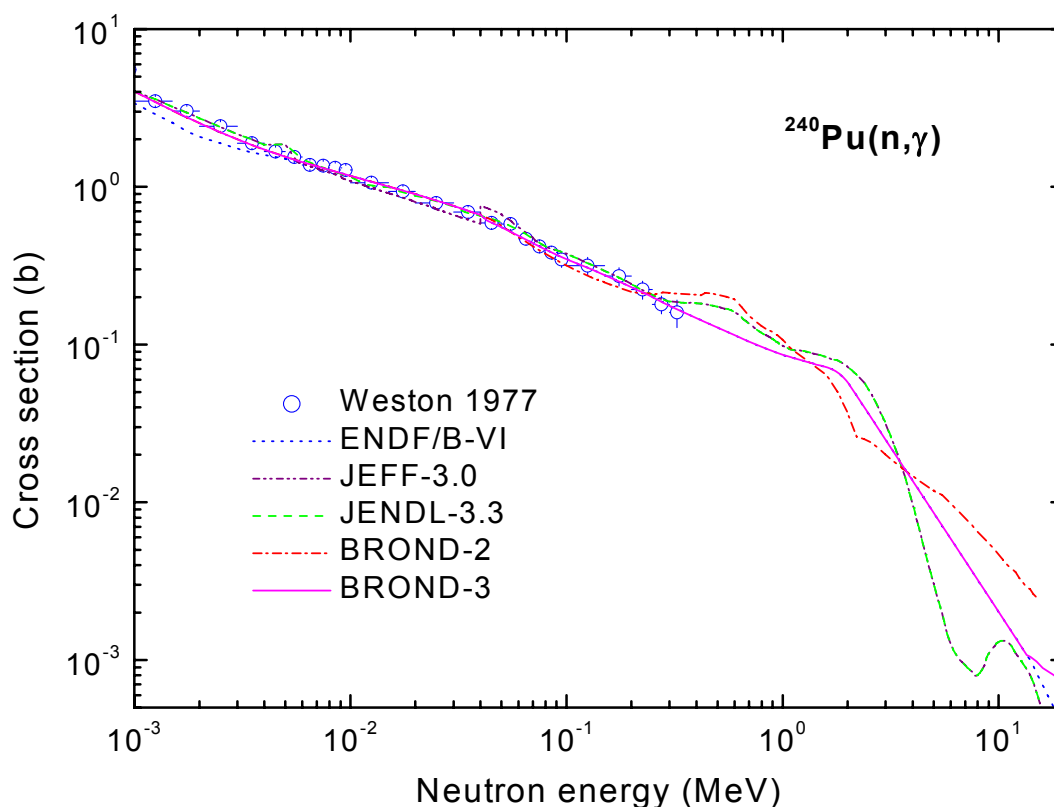


Рис. 10. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов ^{240}Pu в сравнении с экспериментальными данными

3.4 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

Ниже приведены схемы низколежащих уровней ^{240}Pu , используемые в различных оценках (спектр уровней в JEFF-3.0 практически тот же, что и в JENDL-3.3) :

| № | ENDF/B-VI | | JENDL-3.3 | | BROND-3 | |
|------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|
| | Энергия МэВ | J π | Энергия МэВ | J π | Энергия МэВ | J π |
| G.S. | 0.0 | 0 + | 0.0 | 0 + | 0.0 | 0 + |
| 1 | 0.0428 | 2 + | 0.04282 | 2 + | 0.04282 | 2 + |
| 2 | 0.1417 | 4 + | 0.14168 | 4 + | 0.14168 | 4 + |
| 3 | 0.294 | 6 + | 0.2943 | 6 + | 0.2943 | 6 + |
| 4 | 0.498 | 8 + | 0.4975 | 8 + | 0.4975 | 8 + |
| 5 | 0.597 | 1 - | 0.5974 | 1 - | 0.5974 | 1 - |
| 6 | 0.649 | 3 - | 0.6489 | 3 - | 0.6489 | 3 - |
| 7 | 0.742 | 5 - | 0.7423 | 5 - | 0.7423 | 5 - |
| 8 | 0.8607 | 0 + | 0.8607 | 0 + | 0.7514 | 10 + |
| 9 | 0.900 | 2 + | 0.9003 | 2 + | 0.8607 | 0 + |
| 10 | 0.938 | 1 - | 0.9381 | 1 - | 0.9003 | 2 + |
| 11 | 0.959 | 2 - | 0.9589 | 2 - | 0.9381 | 1 - |
| 12 | 0.993 | 4 + | 0.9922 | 4 + | 0.9589 | 2 - |
| 13 | 1.002 | 3 - | 1.0019 | 3 - | 0.9922 | 4 + |
| 14 | 1.031 | 3 + | 1.0305 | 3 + | 1.0019 | 3 - |
| 15 | 1.038 | 4 - | 1.0375 | 4 - | 1.0305 | 3 + |
| 16 | 1.076 | 4 + | 1.0762 | 4 + | 1.0375 | 4 - |
| 17 | 1.0897 | 0 + | 1.0895 | 0 + | 1.0762 | 4 + |
| 18 | 1.116 | 5 - | 1.1156 | 5 - | 1.0895 | 0 + |
| 19 | 1.1375 | 2 + | 1.1320 | 2 + | 1.0900 | cont |
| 20 | 1.140 | cont | 1.1370 | 2 + | | |
| 21 | | | 1.1615 | 6 - | | |
| 22 | | | 1.1775 | 3 + | | |
| 23 | | | 1.2325 | 4 + | | |
| 24 | | | 1.2408 | 2 - | | |
| 25 | | | 1.2820 | 3 - | | |
| 26 | | | 1.3087 | 5 - | | |
| 27 | | | 1.4108 | 0 - | | |
| 28 | | | 1.4200 | cont | | |

Так как выше уровня с энергией 1.0895(0⁺) имеются неопределенности идентификации спинов уровней, в оценку БРОНД-3 включено несколько меньшее число дискретных уроаней, чем в оценки JEFF-3.0 и JENDL-3.3. Небольшое различие в числе дискретных уровней и соответствующих границах непрерывного спектра не влияет сколь-либо заметным образом на результаты расчетов интегральных сечений и спектров неупруго рассеянных нейтронов.

Экспериментальные данные по неупругому рассеянию нейтронов имеются только для первых трех уровней [72Sm], по интегральному сечению данных нет. Сравнение интегральных сечений показано на рис. 11. Оценка БРОНД-3 согласуется с ENDF/B-VI и JENDL-3.3, и расхождения с предыдущей оценкой БРОНД-2 обусловлено погрешностями оптического потенциала, используемого в этой оценке. Оценка JEFF-3.0 проходит существенно выше всех других оценок в области энергий нейтронов до 6 МэВ, и это расхождение обусловлено сделанной в оценке перенормировкой расчетов для трех нижайших уровней. Эта перенормировка будет обсуждена несколько ниже.

На рис. 12, 13 и 14 показано сравнение оценок с экспериментальными данными по рассеянию нейтронов на трех нижайших уровнях. Для первого уровня все оценки достаточно хорошо согласуются с данными [72Sm]. Однако для второго уровня согласие с экспериментальными данными уже не столь хорошее (рис. 13), а для третьего уровня большинство оценок расходится с экспериментом (рис. 14). В этой связи следует отметить большие погрешности экспериментальных данных и

значительные флуктуации экспериментальных точек при энергиях нейтронов выше 1 МэВ. Как уже отмечалось выше, в данном эксперименте разделение вкладов упругого рассеяния и неупругого рассеяния на низжайших уровнях, по-видимому, не было достаточно надежным. Поэтому данные для третьего уровня представляются существенно завышенными.

Следует сказать, что значительно более надежные экспериментальные данные по рассеянию нейтронов имеются для U-238 [03M], и их анализ подтверждает достаточно высокую достоверность оптико-статистических расчетов в описании сечений возбуждений ротационных уровней четно-четных ядер. Поэтому нет оснований ожидать заметных отличий сечений в максимуме для рассеяния на U-238 и Pu-240. Данные для Pu-240 по рассеянию на первом и втором уровнях, в целом, подтверждают такое подобие сечений. Однако, для третьего уровня данные [72Sm] более чем в три раза превосходят аналогичные данные U-238. Учитывая противоречия данных [72Sm], в оценке ENDF/B-VI расхождению с ними не придавалось какого-либо значения. В то же время, в оценке JEFF-3.0, основанной на аналогичных ENDF/B-VI оптико-статистических расчетах [77L], было принято решение перенормировать рассчитанные функции возбуждения низжайших уровней на экспериментальные данные. Такая перенормировка устраняет разногласия с данными [72Sm], но она приводит данными к завышенным значениям интегральных сечений неупругого рассеяния, показанным на рис. 11. Оценка JEFF-3.0 для сечений неупругого рассеяния нейтронов была включена также в JENDL-3.2, но в более поздней оценке JENDL-3.3 от каких-либо перенормировок расчетов отказались и предпочли более низкие значения сечений рассеяния на третьем уровне.

Оценка БРОНД-3 для упругого и неупругого рассеяния нейтронов полностью основана на теоретических расчетах, протестированных на экспериментальных данных для U-238, и при переходе к Pu-240 сечений рассеяния нейтронов изменялись лишь за счет различий в сечениях деления этих ядер.

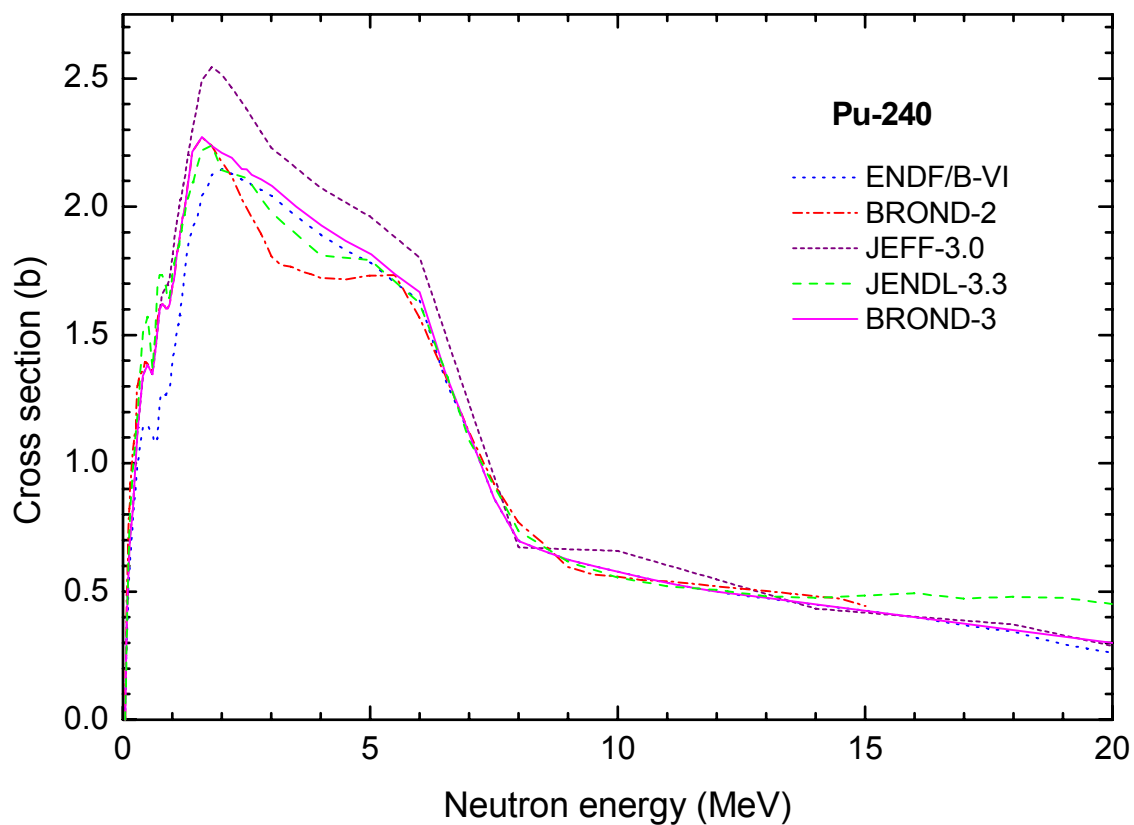


Рис. 11. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов на ^{240}Pu

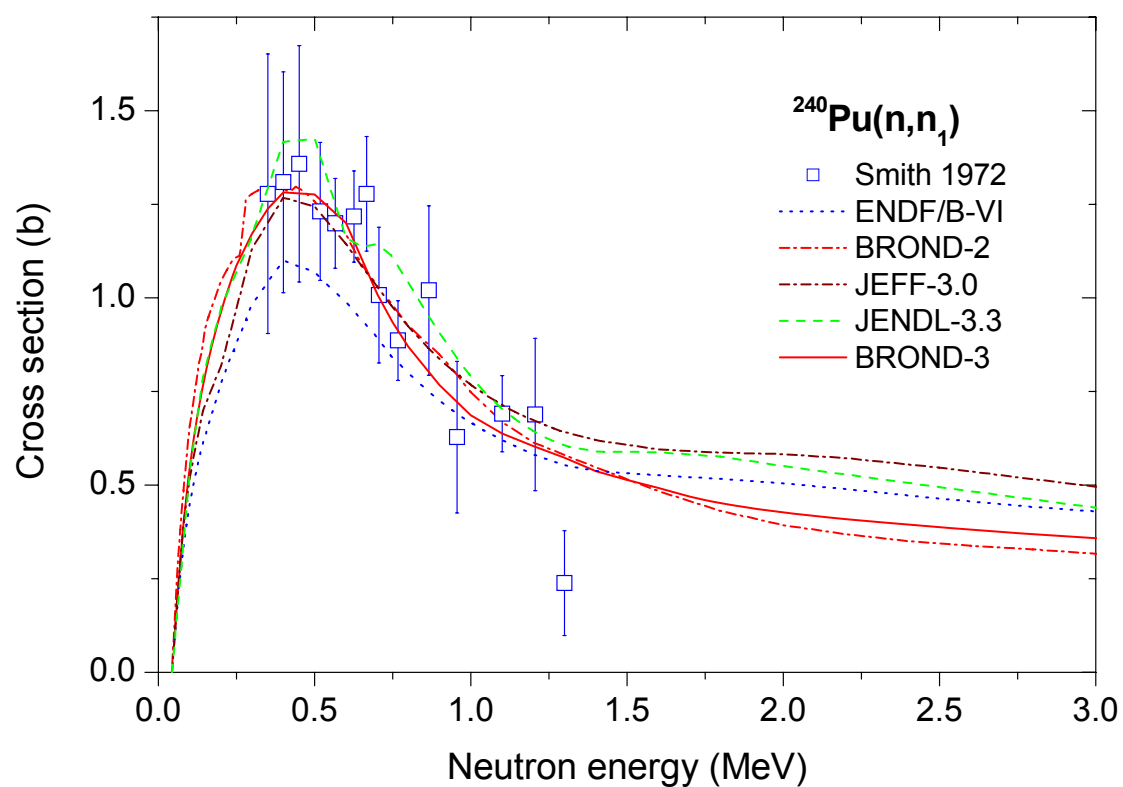


Рис. 12. Оценки сечения неупругого рассеяния нейтронов на первом возбужденном уровне ^{240}Pu

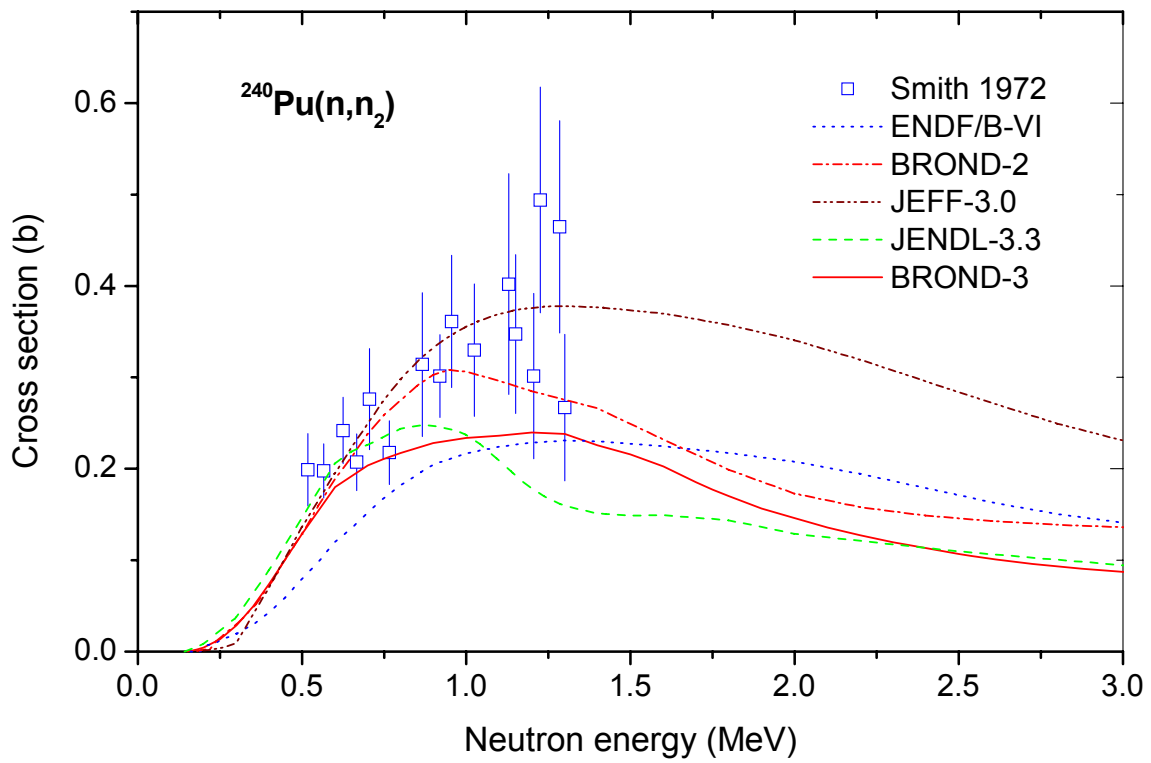


Рис. 13. Оценки сечения неупругого рассеяния нейтронов на втором уровне ^{240}Pu

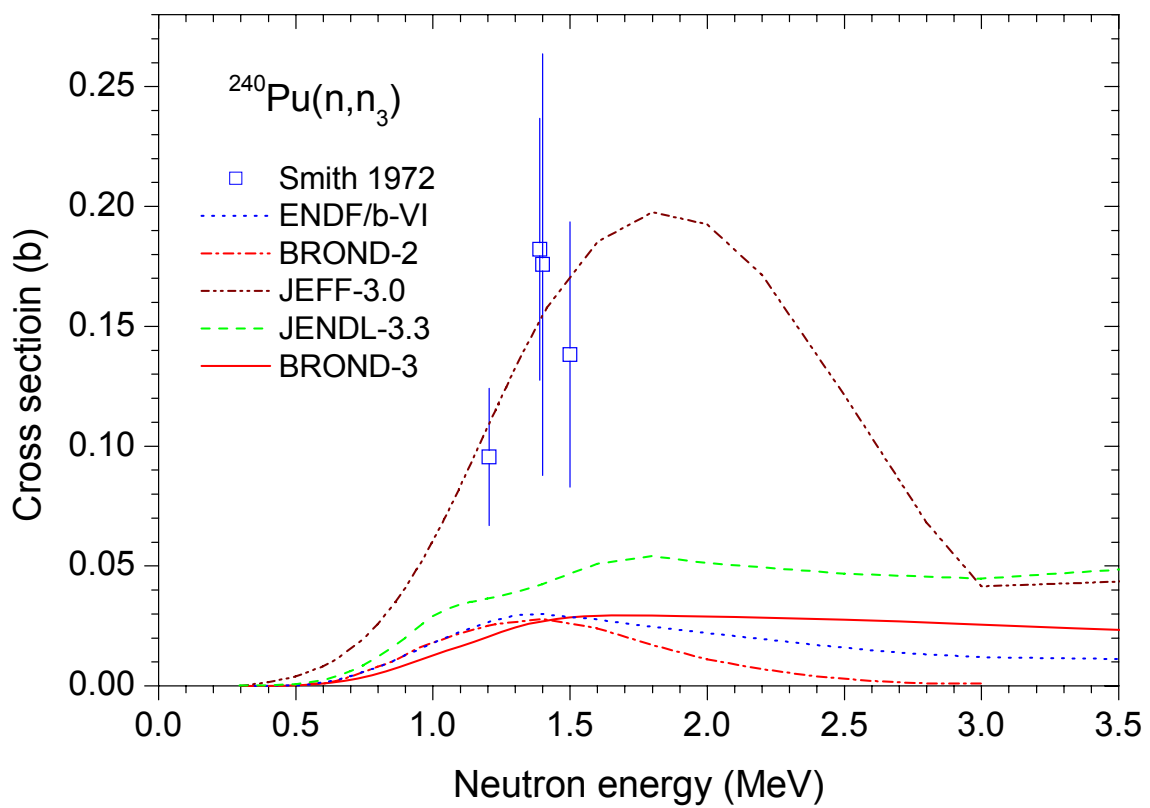


Рис. 14. Оценки сечения неупругого рассеяния нейтронов на третьем уровне ^{240}Pu

Для угловых распределений рассеянных нейтронов все оценки учитывают вклад прямых процессов для уровней ротационной полосы, который приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов. Для рассеяния на более высоких не коллективных уровнях в ENDF/B-VI принято изотропное угловое распределение, тогда как в остальных оценках учтена небольшая анизотропия угловых распределений нейтронов, обусловленная предравновесными процессами. Для БРОНД-3 расчеты соответствующих распределений сделаны на основе программы GNASH.

3.5. Реакция (n, 2n) и (n, 3n):

Имеющиеся оценки интегральных сечений этих реакций показаны на рис. 15, и разногласия между оценками обусловлены, в основном, расхождениями в определении вкладов предравновесных процессов. Оценки ENDF/B-VI, JENDL-3.3 и БРОНД-3 достаточно хорошо согласуются между собой. Экспериментальных данных по реакциям (n, 2n) и (n, 3n) на ^{240}Pu нет.

3.7. Реакция деления

Для сечений деления имеется большой объем экспериментальных данных, и все оценки сечений деления оказываются достаточно близкими. Новые экспериментальные данные [90I, 98S], полученные за последние десятилетия, хорошо согласуются с предыдущими оценками вплоть до энергии нейтронов 15 МэВ и требуют определенного уточнения лишь рекомендуемые сечения выше этой энергии. Мы провели полный статистический анализ всей совокупности экспериментальных данных, результаты которого приняты в качестве оценки БРОНД-3, приведенной на рис. 16 совместно с предыдущими оценками. На основе нового метода статистического

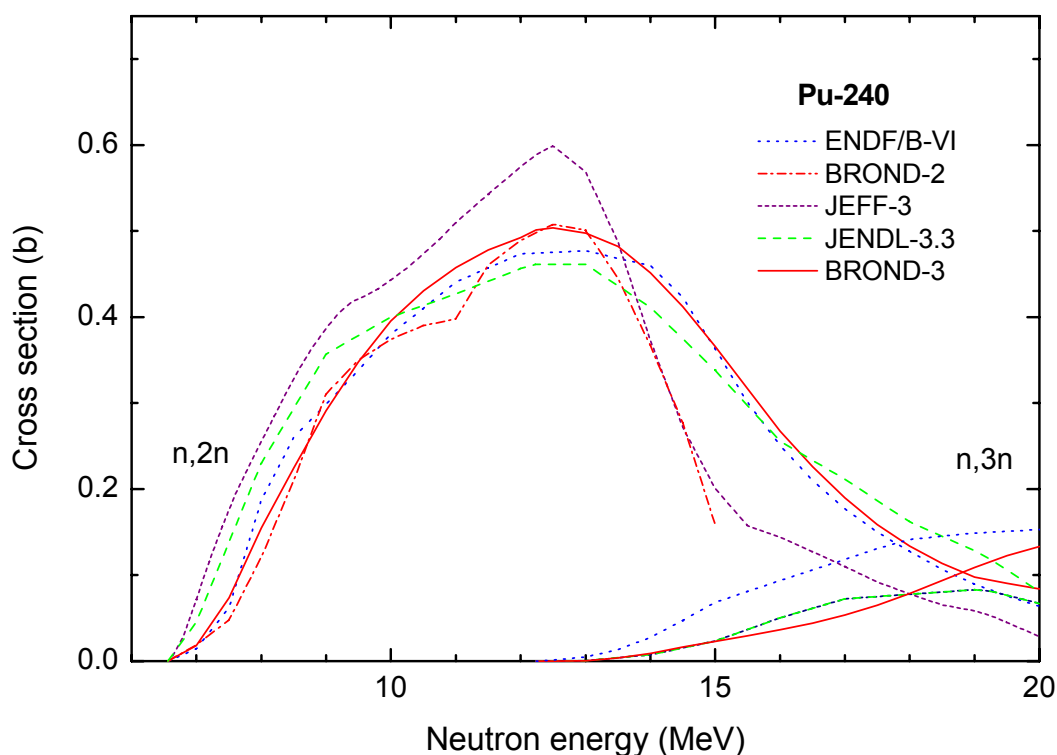


Рис. 15. Оценки сечений реакций (n,2n) и (n,3n)

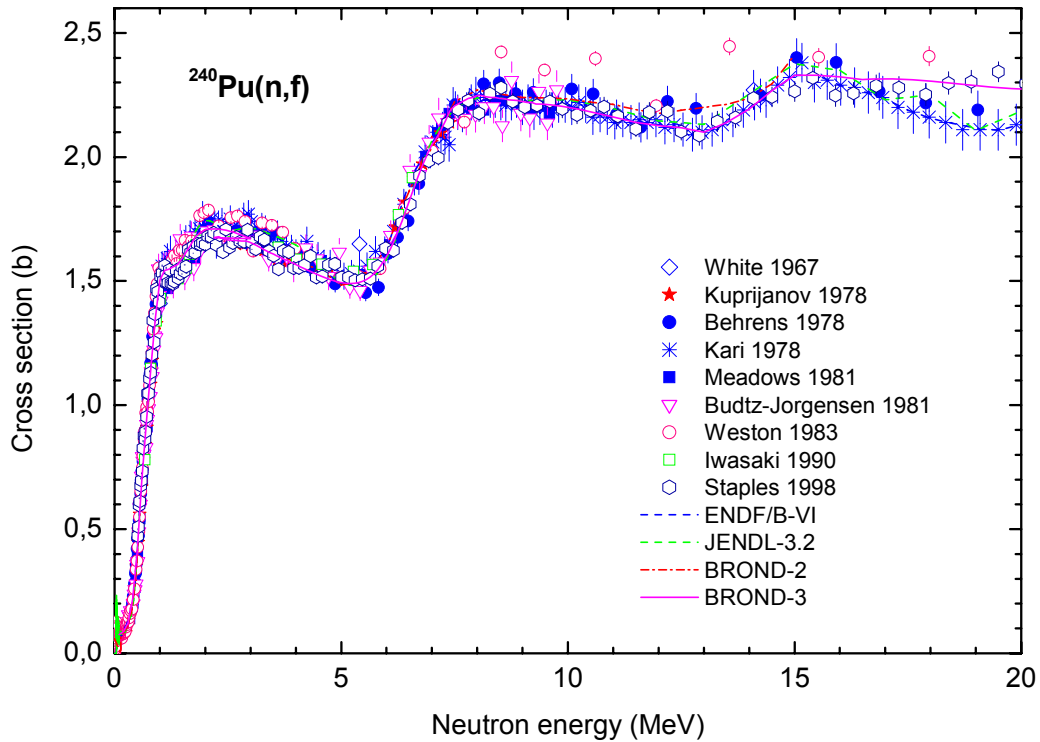


Рис. 16. Оценки сечений деления ^{240}Pu нейтронами в сравнении с экспериментальными данными

учета систематических погрешностей экспериментальных данных уточнены рекомендуемые погрешности оцененных сечений деления и определена ковариационная матрица погрешностей. Важной особенностью полученной ковариационной матрицы является достаточно большие значения далеких недиагональных элементов, отражающие корреляции рекомендуемых данных в широких энергетических интервалах.

Наряду с сечениями деления одной из важнейших характеристик делящихся ядер является множественность нейтронов деления. Оценки числа вторичных нейтронов, испускаемых при делении ^{240}Pu , приведены на рис. 17 совместно с имеющимися экспериментальными данными. Значительных расхождений в оценках нет, но ввиду достаточно высоких требований к точности оценки множественности нейтронов деления, для БРОНД-3 оценка была выполнена на основе статистического анализа всей совокупности экспериментальных данных, включая результаты последних измерений [94K], не учитываемых в предыдущих оценках.

На основе модели Мэдланда-Никса [82M] для БРОНД-3 выполнена новая оценка спектров нейтронов деления. Энергетическая зависимость средней энергии полученных спектров показана на рис. 18 в сравнении с другими оценками. Согласие новой оценки с ENDF/B-VI и JENDL-3.3 достаточно хорошее для области энергий, соответствующих первому плато сечения деления, но при более высоких энергиях в оценке БРОНД-3 учтено уменьшение средней энергии нейтронов при эмиссионном делении. Очевидно, что влияние эмиссионного деления не учитывалось в предыдущих оценках спектров нейтронов деления, и поэтому новую оценку следует считать более реалистичной.

На рис. 19 показаны оценки числа запаздывающих нейтронов деления. Все оценки опираются на единственную экспериментальную точку [82B], и для расчетов изменения выходов запаздывающих нейтронов выше порога эмиссионного деления привлекается эмпирическая систематика выходов запаздывающих нейтронов [75T]

- 72S A.B.Smith et al., Nucl. Sci. Eng., **47**, (1972) 19.
 75T R.J. Tuttle, Nucl. Sci. Eng., **56**, (1975) 37.
 77W L.W.Weston et al., Nucl. Sci. Eng., **63** (1977) 143.
 78M D.G.Madland and P.G.Young, Report BNL 50991 (1978), p. 189.
 78L C.L.Lagrange and J.Jary. Report NEANDC(E) 198"L" (1978).
 82B G.Benedetti et al.: Nucl. Sci. Eng., **80** (1982) 379.
 82M D.G.Madland, J.R.Nix J.R. Nucl. Sci. Eng., **129** (1998) 149.
 90I T.Iwasaki et al. Nucl. Sci. Tech., **27** (1990) 885.
 94K Yu.A.Khohlov et al. Nucl. Data for Science and Technology (Gatlinburg, 1994), Ed. J.Dickens, ORNL, 1994, p.272.
 98S P.Staples et al. Nucl. Sci. Eng., **129** (1998) 213.
 01A W.P.Abfolterer et al. Phys. Rev. **C63** (2001) 044608.
 03M V.M.Maslov et al. Report IAEA(BEL)-0014, Vienna, 2003.

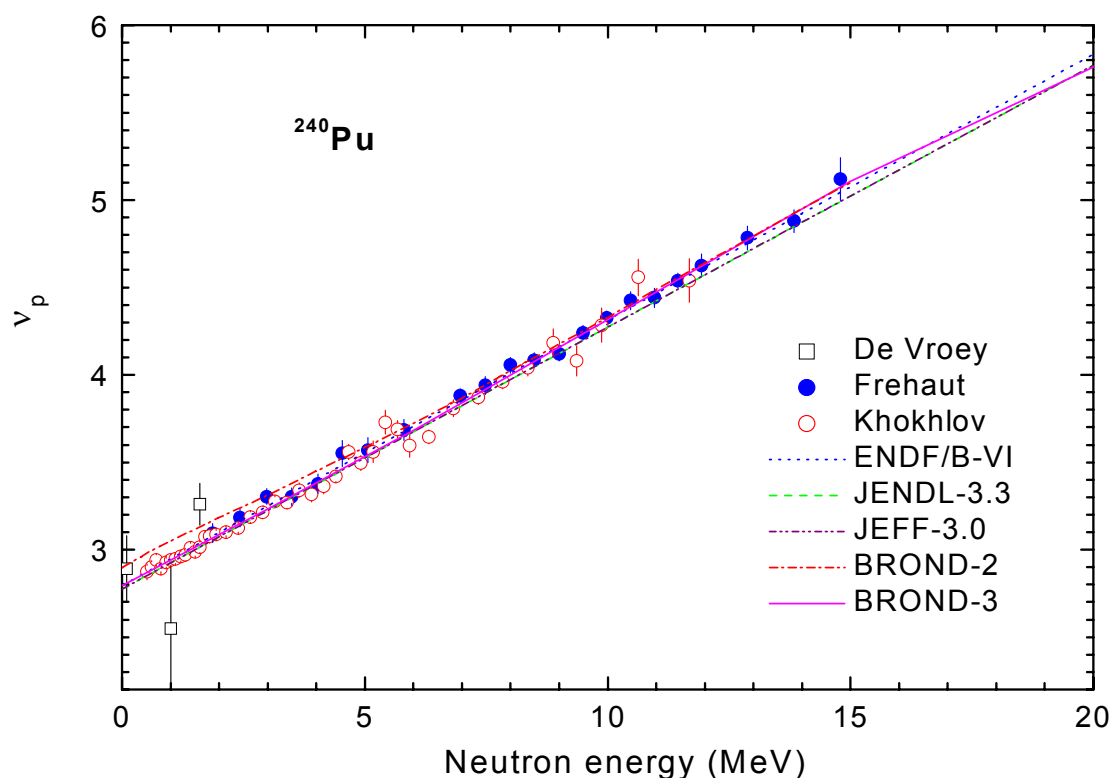


Рис. 17. Оценки среднего числа нейтронов деления в реакции $^{240}\text{Pu}(n,f)$ в сравнении с экспериментальными данными

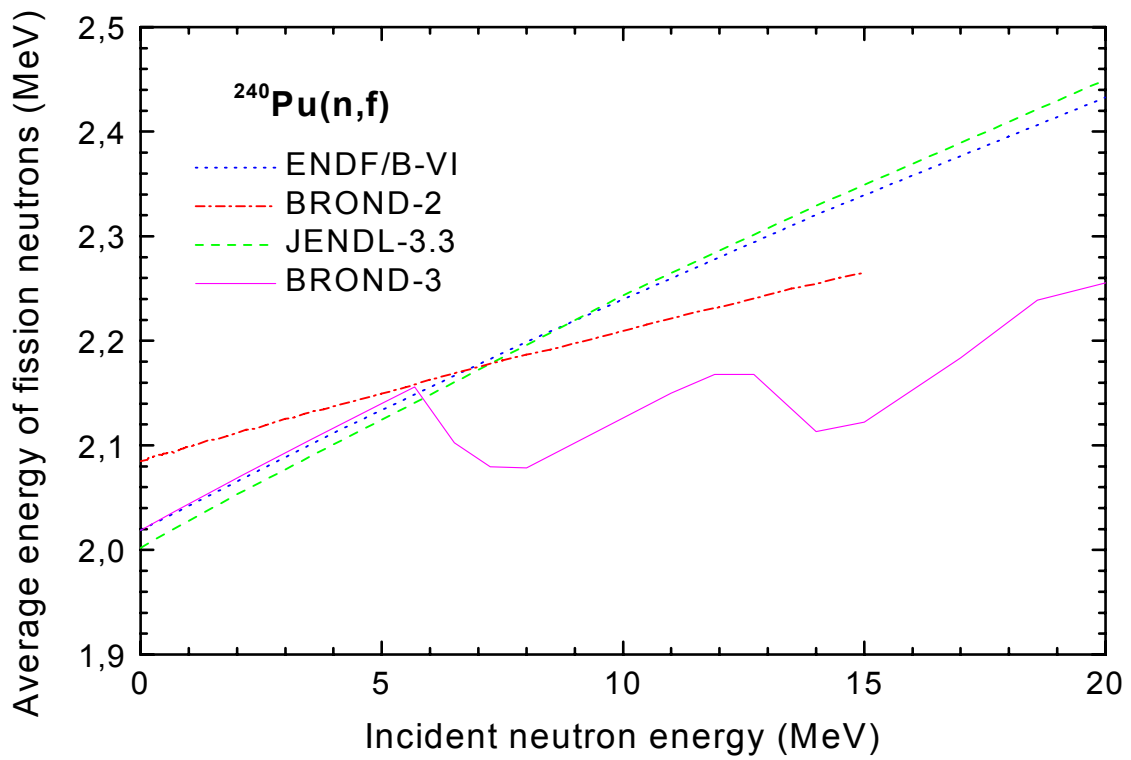


Рис. 18. Оценки средней энергии нейтронов деления в реакции $^{240}\text{Pu}(n,f)$

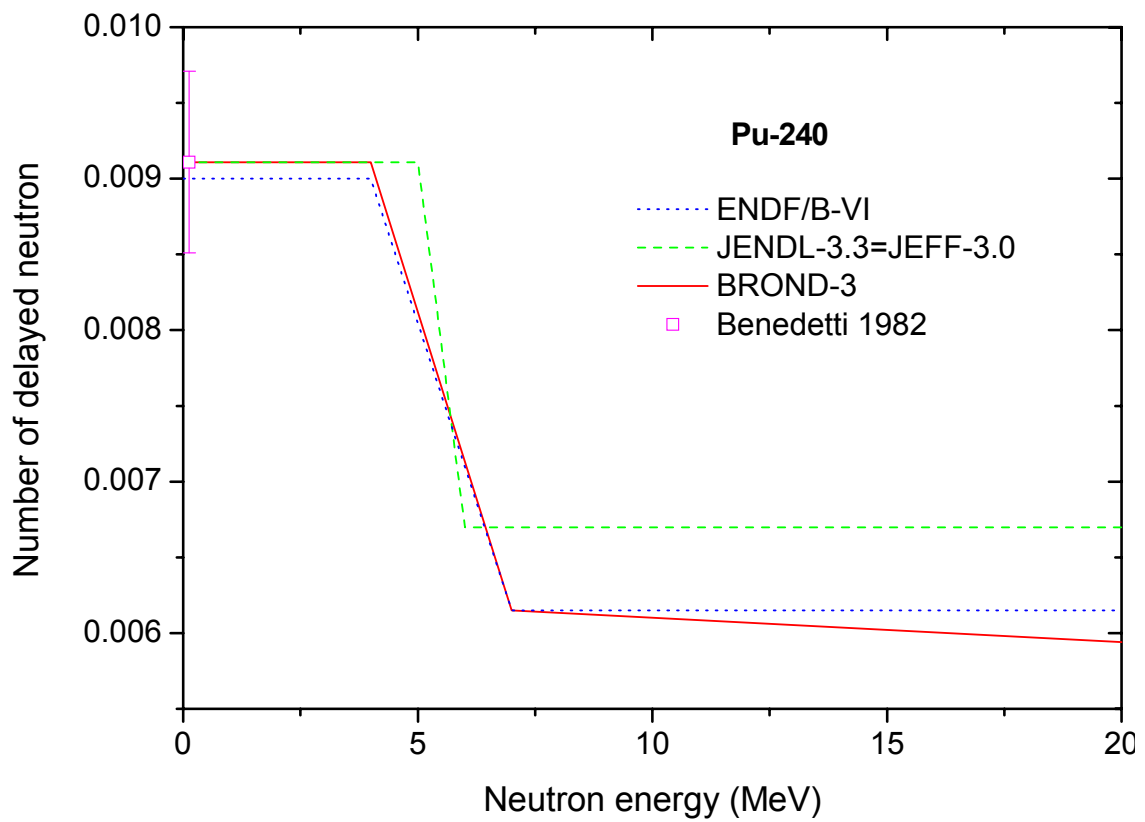


Рис. 19. Оценки числа запаздывающих нейтронов в реакции $^{240}\text{Pu}(n,f)$

4. Образование фотонов (MF=12, 13, 14, 15)

В БРОНД-3 уточнены оценки интегральных выходов и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата, неупругого рассеяния нейтронов и деления материнского ядра, а также деления изотопов плутония, образующихся после испускания нейтронов. Новая оценка интегральных выходов гамма-лучей не сильно отличается от оценки ENDF/B-VI (рис. 19). Следует отметить, что в файлах JENDL-3.3 не содержится данных по выходам гамма-лучей, а в файле JEFF-3.0 включены только оценки выходов гамма-лучей, сопутствующих реакциям неупругого рассеяния и (n,xn) реакций, но нет данных о гамма-лучах, связанных с делением ядер, которые доминируют в интегральных выходах гамма-лучей.

5. Заключение

5.1. В РОСФОНД предлагается включить оценку, выполненную для библиотеки БРОНД-3.

При включении внесены следующие изменения:

- 1. Максимальная энергия ограничена 20 МэВ.**
- 2. В файл MF=1, MT=455 внесены данные для 8 групп запаздывающих нейтронов из JEFF-3.1.**
- 3. Спектры запаздывающих нейтронов приняты такими же, как для урана-235.**
- 4. Секции MT=5 в MF=3 и MF=6 удалены**
- 5. Секции MT=16, 17, 102 в файле MF=8 удалены**
- 6. В файл MF=8 включены выходы продуктов деления MT=454 and MT459 из JEFF-3.1**

5. 2 Авторы оценки БРОНД-3,

А.В.Игнатюк, Е.В.Гай, В.П.Лунев, Н.Н.Титаренко, Ю.Н.Шубин

94.6.Плутоний-241

1.Общие характеристики

1.1. $Z = 94$ -зарядовое число;

1.2. $A = 241$ (атомный вес);

1.3. $AW = 236.9986$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);

1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2}=2.411 \cdot 10^4$ лет, доминирует β -распад в америций-235; вероятность α -распада в уран-237 $2.45 \cdot 10^{-3}\%$; вероятность спонтанного деления $2.4 \cdot 10^{-14}\%$.

1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт |
|-----|---------|-----------|---------------------------|--------------|
| 4 | n,n' | -0.004195 | 0.0042126 | Pu-241 |
| 16 | n,2n | | | Pu-240 |
| 17 | n,3n | | | Pu-239 |
| 37 | n,4n | | | Pu-238 |
| 18 | деление | | | FP |
| 102 | n,g | | | Pu-242 |
| 103 | n,p | | | Np-241 |
| 107 | n,alfa | | | U-238 |

2. Общая характеристика рассматриваемых оцененных данных

В современных библиотеках содержатся следующие оценки нейтронных данных плутония-239:

В **BROND-2** и **FOND-2.2** – оценка Г.В.Анципова, В.А.Коньшина и др., 1979 г.

В **JENDL-3.3** – за основу принята оценка из JENDL-3.2 (1993г.) со следующими изменениями, сделанными Накаждима и Кавано в 2000г.:

пересмотрены сечения деления и захвата и. соответственно – сечение упругого рассеяния;

пересчитаны непрерывные спектры нейтронов неупругого рассеяния, реакций (n,2n) и (n,3n);

пересмотрены спектры запаздывающих нейтронов.

В **JEFF-3.1** – за основу принята та же оценка из JENDL-3.2 с заменой резонансных параметров на более позднюю оценку Derrien & Courcelle (2002г.); запаздывающие нейтроны описываются в универсальном 8-групповом представлении.

В **ENDF/B-VII.b2** – оценка Weston, Wright, Derrien at al., 2003 г. Данные для области разрешенных резонансов – те же, что и в JEFF-3.1.

Первая из перечисленных оценок устарела и далее рассматриваться не будет.

3. Нейтронные сечения в тепловой области и в резонансных областях резонансов.

3.1. Тепловая область и область разрешенных резонансов.

Во всех рассматриваемых оценках область разрешенных резонансов простирается до 300 эВ.

В JENDL-3.3 в этой области заданы параметры 236 s-резонансов; кроме того введено 7 резонансов за пределами этой области – 4 связанных состояния и 3 резонанса при энергиях выше 300 эВ (первый из них – реальный).

В ENDF/B-VII и JEFF-3.1 кроме резонансов, описанных в оценке JENDL-3.3, введен еще один слабый резонанс при энергии 0.15 эВ и соответственно изменены параметры ближайших к нему резонансов.

В таблице 1 сравниваются сечения реакций при энергии 0.0253 эВ, следующие из перечисленных оценок и указанные в заголовочных секциях соответствующих файлов. В той же таблице приводятся результаты оценки этих сечений, полученные в 2005 г. группой экспертов МАГАТЭ, занимавшихся оценкой данных для нейтронных стандартов, в результате совместного анализа совокупности экспериментальных данных для основных топливных материалов, золота, бора-10 и лития-6¹⁷. Наконец, в той же таблице приводятся результаты независимой оценки тепловых сечений, полученные в 2003 г. Л.П.Абагян. В двух последних оценках приводятся и погрешности оцененных данных. В таблице 1 приведены также значения числа вторичных нейтронов деления и величины α и η , полученные из приведенных данных о сечениях и ν . Погрешности этих величин получены с учетом корреляций погрешностей сечений и ν , оцененных группой по стандартам.

Таблица 1. Тепловые константы

| Величина | ENDF/B-VIIb2 | JENDL-3.3 | Стандарт | Л.П.Абагян |
|------------|--------------|-----------|---------------|-------------|
| σ_f | 1012.2 | 1012.3 | 1014.0±6.6 | 1012.3±6.1 |
| σ_c | 363 | 361.5 | 361.8±5.0 | 365±5 |
| σ_e | 11.3 | 11.1 | 12.13±2.6 | 11.7±10 |
| σ_t | 1386.5 | 1384.9 | 1387.9±8.5 | 1389±8 |
| α | 0.359 | 0.357 | 0.357±0.014 | 0.361±0.014 |
| ν | 2.9453 | 2.9313 | 2.9479±0.0054 | |
| η | 2.168 | 2.160 | 2.173±0.036 | |

Прежде всего, обращает на себя внимание то, что независимые оценки погрешностей прекрасно согласуются между собой¹⁸. Различия в оцененных данных существенно меньше этих погрешностей, т.е. не существенны.

Весьма важно, конечно, что значения, приводимые в библиотеках оцененных данных, получены из содержащихся в них резонансных параметров. **Поскольку в ENDF/B-VII (и в JEFF-3.1) использована более поздняя, уточненная оценка резонансных параметров, именно эту оценку и целесообразно принять в РОСФОНД.**

Для того, чтобы оценить надежность принятых данных целесообразно рассмотреть статистические свойства параметров разрешенных резонансов. На рис. 1

¹⁷ Частное сообщение В.Г.Проняева.

¹⁸ Кроме погрешности сечения рассеяния, которую Л.П.Абагян сама не оценивала. Приведенная погрешность σ_c получена как корень квадратный из суммы квадратов погрешностей полного сечения, сечений деления и захвата.

показаны нарастающие суммы числа резонансов со спинами $J=2$ и $J=3$. Пунктиром проведены хорды, стягивающие изображенные кривые. Как видно, в обоих случаях кривые почти во всей энергетической области лежат над этими хордами, что указывает на то, что к концу области разрешенных резонансов накопилось заметное количество пропущенных резонансов. Сплошными тонкими линиями проведены касательные к начальным участкам кривых нарастающих сумм. Предполагая, что на этих участках пропуск уровней несущественен, находим, что к концу интервала пропущено менее 5% резонансов с $J=2$ и несколько более 13% резонансов с $J=3$. Этот результат представляется естественным, поскольку нейтронные ширины резонансов с $J=3$ в среднем почти вдвое меньше нейтронных ширин резонансов с $J=2$ и, следовательно, вероятность пропуска этих резонансов должна быть выше. Средние расстояния между резонансами со спинами $J=2$ и $J=3$ составляют по этой оценке 2.7 эВ и 2.0 эВ; их отношение равно 0.74, что близко к обратному отношению величин $(2J+1)$: $5/7=0.714$.

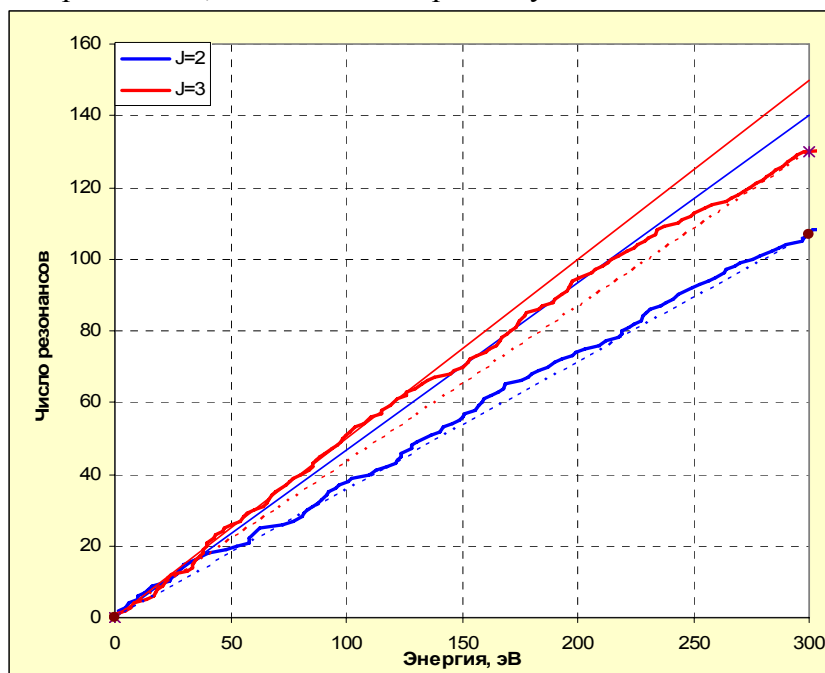


Рис.1. Нарастающие суммы числа разрешенных s-резонансов.

На рис. 2. изображены нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин и проведенные через них линии тренда. Как видно, отклонения от этих линий не носят систематического характера (пропуск резонансов с малыми нейтронными ширинами практически не сказывается на этих нарастающих суммах) и по ним можно оценить нейтронные силовые функции. Они оказываются равными $1.55 \cdot 10^{-4}$ для $J=2$ и $0.96 \cdot 10^{-4}$ для $J=3$.

Для оценки средних нейтронных ширин целесообразно рассмотреть их распределения относительно средних значений. Для каждого из рассматриваемых семейства резонансов это распределение есть χ^2 -распределение с одной степенью свободы. Верхние границы 10% квантилей этого распределения лежат при значениях отношения приведенной нейтронной ширины к среднему значению, равных 0.016; 0.064; 0.148; 0.274; 0.455; 0.708; 1.074; 1.642; 2.71; ∞ . На рис. 3 в форме гистограмм приведены распределения приведенных нейтронных ширин по этим квантилям, полученные при различных предположениях о величине средних приведенных нейтронных ширин. Максимальное значение приведенной нейтронной ширины получено в предположении об отсутствии пропуска резонансов. Розовые гистограммы получены в предположении об отсутствии пропуска резонансов.

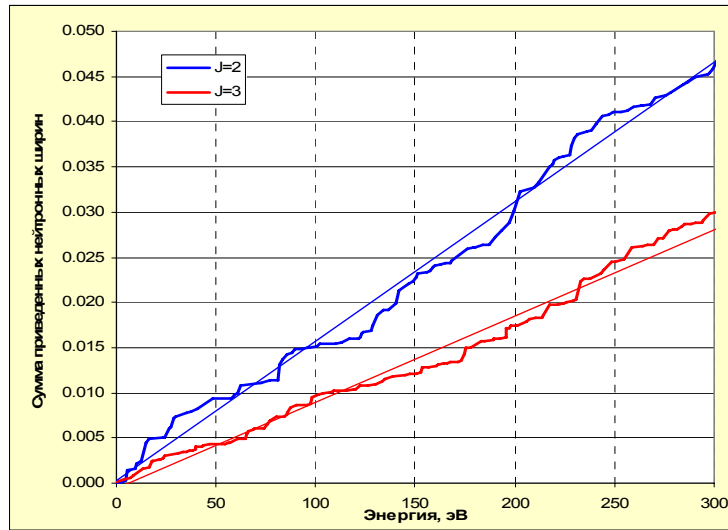


Рис. 2. Нарастающие суммы приведенных нейтронных ширин.

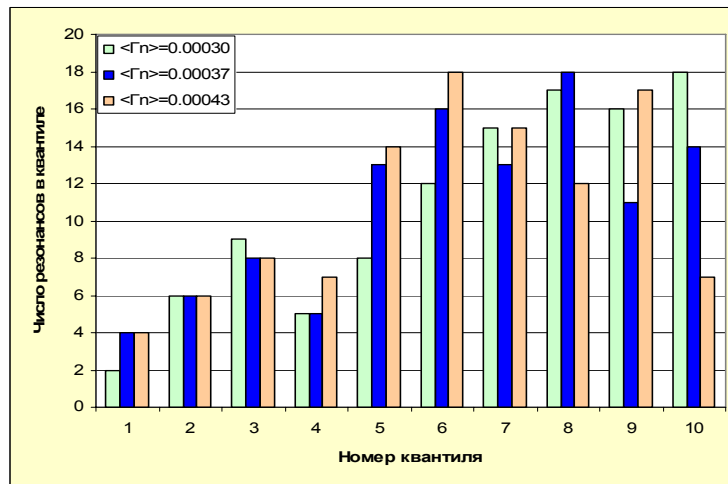


Рис. 3а. Распределения приведенных нейтронных ширин резонансов с $J=2$ при различных предположениях о величине средней приведенной ширины.

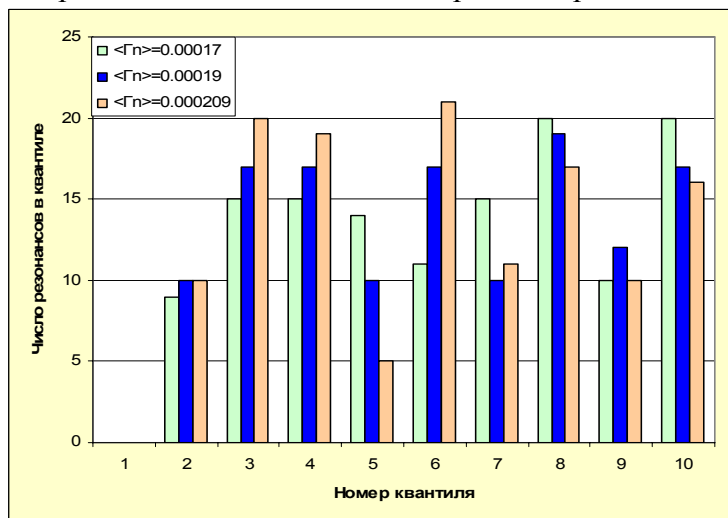


Рис. 3б. Распределения приведенных нейтронных ширин резонансов с $J=3$ при различных предположениях о величине средней приведенной ширины.

Как видно, при этом предположении в квантилях, содержащих самые широкие резонансы их число оказывается ниже среднего, что свидетельствует о том, что принятая средняя ширина завышена в результате пропуска слабых резонансов. Бледно-зеленые гистограммы получены при слишком низкой средней ширине: числа резонансов с большими ширинами оказываются избыточными. Синие гистограммы соответствуют максимально равномерному распределению приведенных нейтронных ширин по квантилям, содержащим наиболее широкие резонансы, вероятность пропуска которых мала.

Оценка пропуска резонансов из рассмотрения распределений приведенных ширин показывает, что число пропущенных резонансов с $J=3$ близко к 13%, что прекрасно согласуется с оценкой пропуска по нарастающей сумме этих резонансов. Однако подбор средней приведенной ширины резонансов с $J=2$ для обеспечения согласия с распределением Портера-Томаса приводит к выводу о пропуске 24% резонансов. Это противоречит оценке, сделанной выше на основе рассмотрения нарастающей суммы. Кроме того, поскольку нейтронные ширины резонансов с $J=2$ в среднем в два с лишним раза превышают нейтронные ширины резонансов с $J=3$, трудно допустить, что вероятность пропуска первых из них больше, чем вторых. Правда, в интервале до 50 эВ, нарастание числа резонансов со спином $J=2$, действительно, происходит в темпе на 24% более высоким, чем при более высоких энергиях (см. рис.4, на котором изображены начальные участки кривых, приведенных на рис.1). Если принять, что штриховая линия, изображенная на рис. 4, соответствует реальной плотности резонансов с $J=2$, то число таких резонансов, пропущенных во всей области разрешенных резонансов, достигнет 24% в полном согласии с выводом о пропуске уровней, следующем из анализа распределения приведенных нейтронных ширин. Однако отношение средних расстояний между уровнями с $J=3$ и $J=2$ станет равным 0.89, что противоречит обычному предположению о пропорциональности плотности уровней $2J+1$. Таким образом, допущение о большом пропуске резонансов с $J=2$ ведет сразу к двум противоречиям.

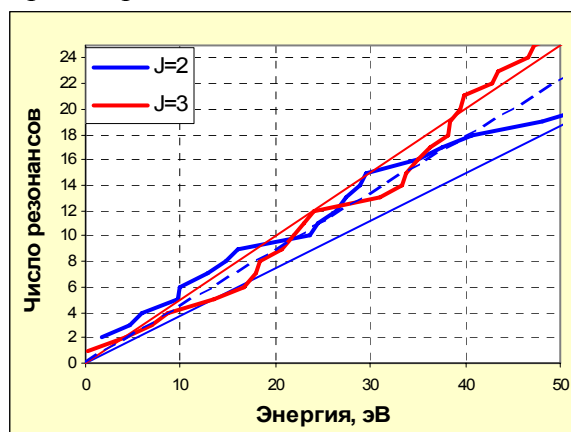


Рис.4. Начальный участок кривых из рис.1

Более естественным объяснением является предположение о погрешностях в установлении спинов резонансов. Если части резонансов со спином 3, лежащих во 2-м и 3-м квантилях распределения ширин (см. рис. 3б) приписать спин равный 2, они попадут в 3-й и 4-й квантили распределения резонансов со спином 2 и существенно сократят долю пропущенных резонансов. Конечно, доля пропущенных резонансов с $J=3$ возрастет, что и естественно, поскольку они обладают, в среднем, меньшими нейтронными ширинами. Поведенное рассмотрение показывает, что вероятный пропуск резонансов в области до 300 эВ составляет порядка 20%. Этот пропуск,

однако, не должен сказаться на величине сечений, рассчитываемых по принятым параметрам, т.к. сами параметры получены из условия описания измеренных сечений. Вклад пропущенных резонансов в сечения деления и захвата должен был при этом компенсироваться соответствующим увеличением делительных и радиационных ширин разрешенных резонансов, соседних с пропущенными. Поэтому отмечая наличие пропуска, мы не считаем необходимым вносить в оцененные данные корректировку на основе статистических соображений (например, путем случайной расстановки фиктивных слабых резонансов взамен пропущенных или учета их в нерезонансной подложке).

3.2. Область неразрешенных резонансов.

В ENDF/B-VIIb2 простирается до порога неупругого рассеяния (принятого в этой оценке равным 40.2 кэВ). Приводятся данные для s- и p-волн. Данные файла MF=2 рекомендуются для расчета всех сечений, а не только для расчета факторов самоэкранировки. Никакой подложки к сечениям в области неразрешенных резонансов в файле MF=3 не задается

В JEFF-3.1 и LENDL-3.3 используется одна и та же оценка средних параметров неразрешенных резонансов, распространяющаяся от 300 эВ до 30 кэВ. Данные приводятся только для s- и p-волн. Данные файла MF=2 рекомендуются для расчета всех сечений, а не только для расчета факторов самоэкранировки. К сечениям деления и захвата (и, разумеется, к полному сечению) в интервале от 15 до 30 кэВ в файле MF=3 задаются подложки. При 30 кэВ подложка к сечению деления превышает 5% от полного сечения деления, а к сечению рассеяния 1% от полного сечения захвата.

На рис. 5 мультигрупповые полные сечения, рассчитанные по оцененным средним резонансным параметрам³, сравниваются с результатами измерений Харви и Сименса (единственным экспериментом по измерению полного сечения в этой области энергий, содержащемся в EXFOR). В той части интервала, где экспериментальное разрешение столь высоко, что это затрудняет сравнение данных, желтой гистограммой приведены экспериментальные данные, усредненные по достаточно широким интервалам.

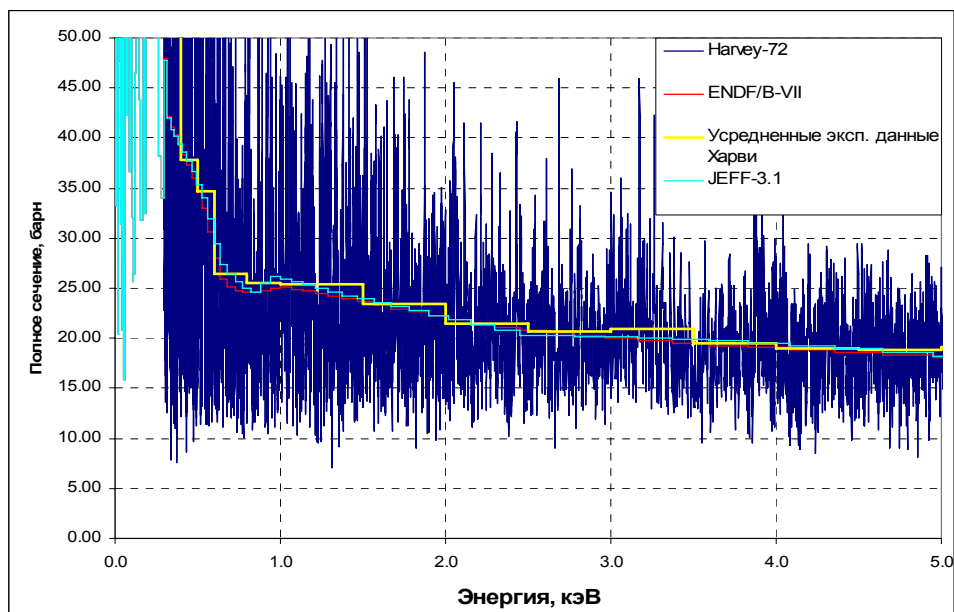


Рис.5а. Полное сечение в области неразрешенных резонансов

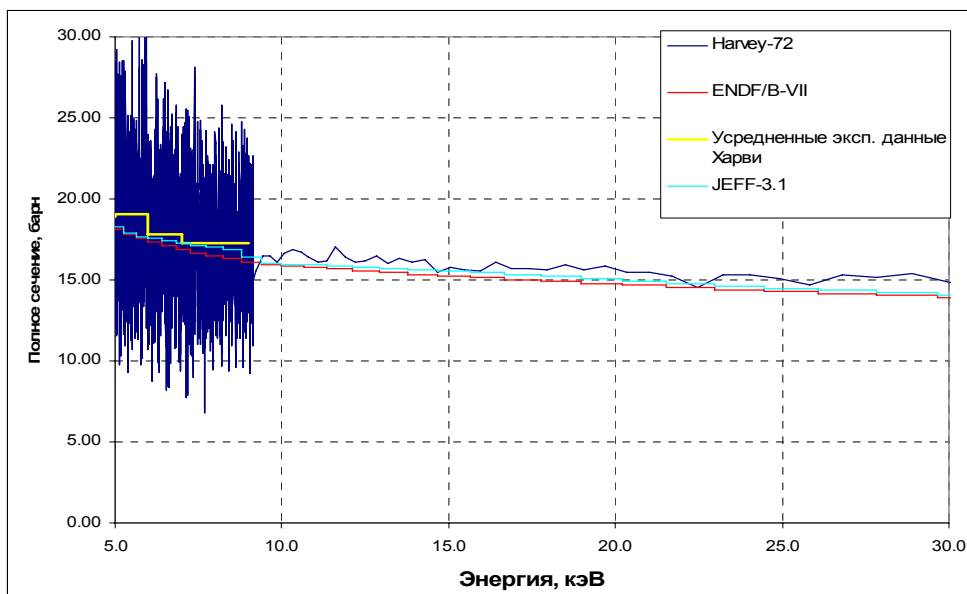


Рис. 5б. Полное сечение в области неразрешенных резонансов

Как видно, выше 5 кэВ оцененные полные сечения идут заметно ниже экспериментальных данных, приведенных в EXFORe. Причина этого расхождения в описании оценки не указывается. Возможно, авторы оценки располагали какими-то дополнительными экспериментальными данными; возможно – имели информацию о необходимости пересмотра экспериментальных данных. Практически наблюдаемое расхождение не очень значимо. Важно как согласуются с экспериментом сечения деления и захвата.

На рис. 6 мультигрупповые сечения деления, рассчитанные по оцененным средним резонансным параметрам¹⁹, сравниваются с экспериментальными данными, усредненными по достаточно широкому интервалам.

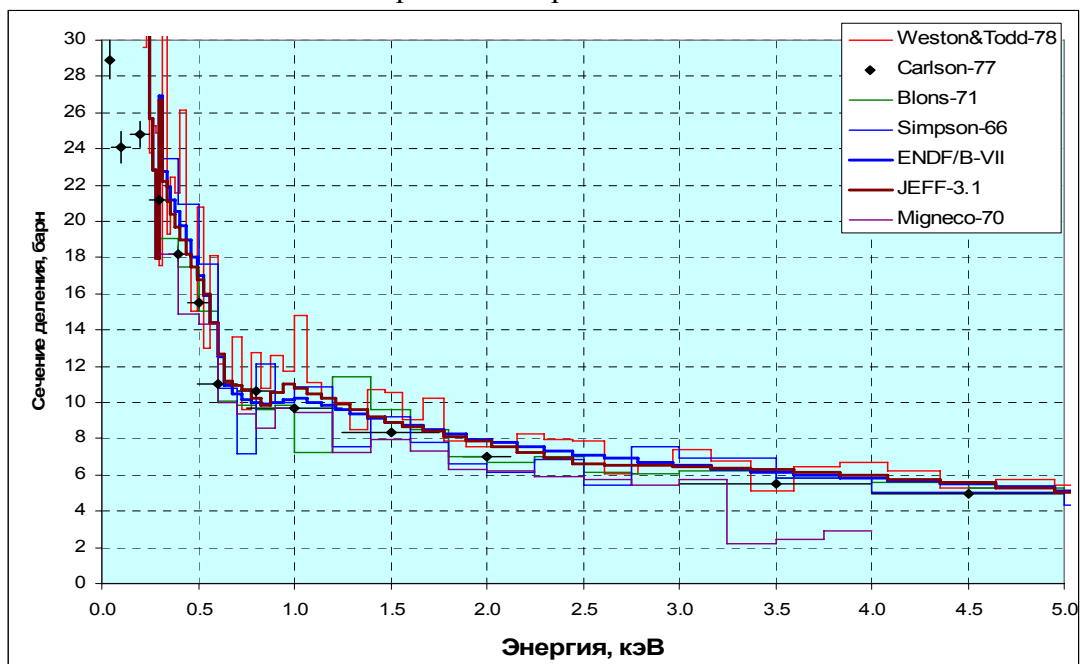


Рис.6а. Сечение деления в области неразрешенных резонансов

¹⁹ К результатам расчета по параметрам JEFF-3.1, естественно, добавлена нерезонансная подложка из файла 3.

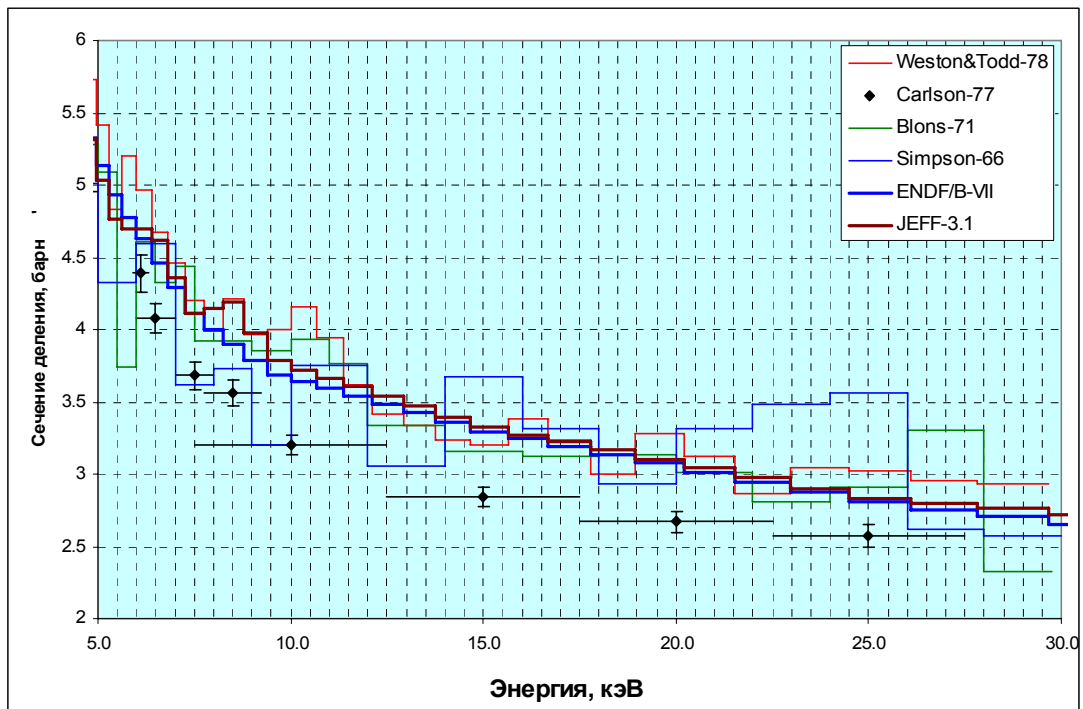


Рис.6б. Сечение деления в области неразрешенных резонансов

Как видно, разброс экспериментальных данных достаточно велик. Лучше других согласуются друг с другом и с оцененными данными результаты измерений Блонса (1971) и Вестона и Тодда (1978). В интервалах, соответствующих мультигрупповому разбиению, были усреднены только данные Вестона и Тодда. На рис. 7 приводятся расхождения этих данных от сечений, рассчитанных по параметрам ENDF/B-VII. Приводятся также и расхождение между оцененными данными. Характер и величины расхождений дают представление о точности оцененного в этой области сечения деления.

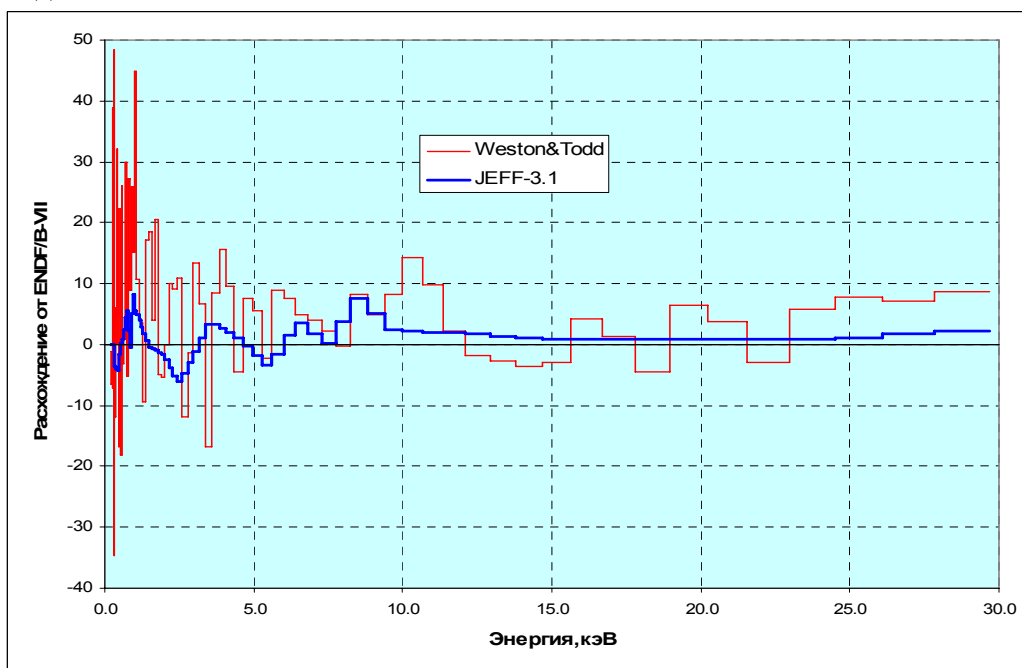


Рис.7. Расхождения в сечениях деления в области неразрешенных резонансов (относительно ENDF/B-VII).

На рис. 8 оцененные сечения захвата сравниваются с результатами единственного в области неразрешенных резонансов эксперимента Вестона и Тодда. На рис. 9 приведены расхождения от оценки ENDF/B-VII, которые дают представление о погрешности оцененных сечений захвата.

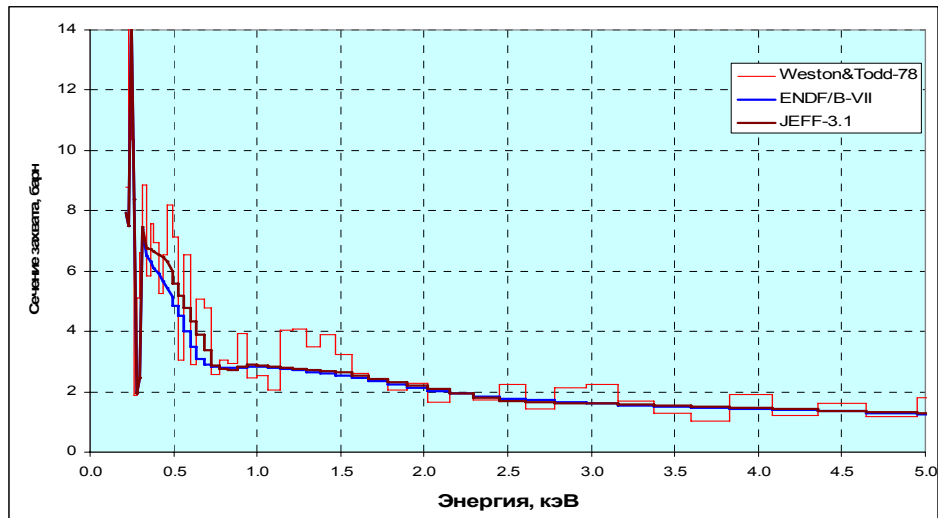


Рис.8а. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов.

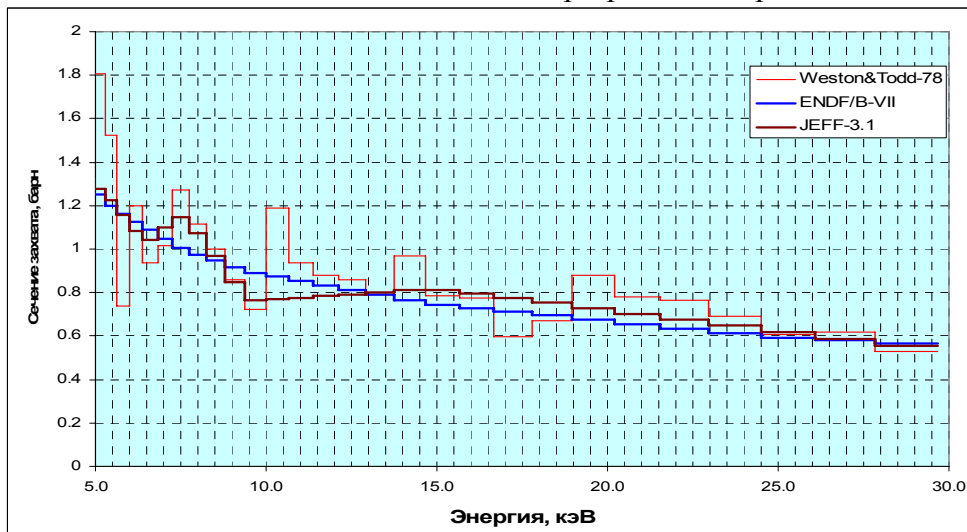


Рис.8б. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов.

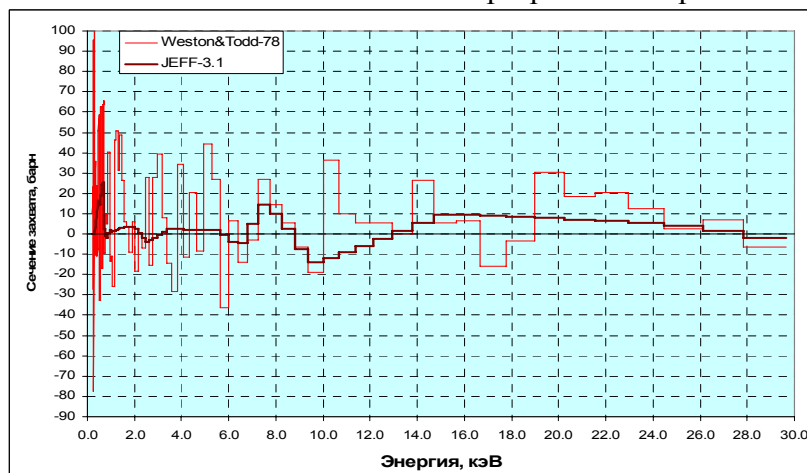


Рис.9. Расхождения в сечениях захвата в области неразрешенных резонансов (относительно ENDF/B-VII).

Проведенное рассмотрение показывает, что введение в JEFF-3.1 нерезонансной подложки в сечения не привело к сколько-нибудь существенному улучшению согласия с экспериментальными данными, положенными в основу оценки. Поэтому из рассмотренных двух оценок **в РОСФОНД рекомендуется принять оценку ENDF/B-VII.**

4. Нейтронные сечения вне резонансной области

4.1 Нейтронные сечения.

4.1.1. Полное сечение

Вне резонансной области экспериментальные данные имеются только по сечению деления. Все остальные сечения рассчитывались на основе оптико-статистических моделей. На рис. 10 сравниваются полные сечения из оценок, принятых в ENDF/B-VII и в JENDL-3.3. Оценки близки друг к другу, хотя в первой из них наблюдаются небольшие нерегулярности, связанные, вероятно, с погрешностями при формировании файла. Заметим, что полное сечение, принятое в БРОНД-2 в точности, со всеми нерегулярностями, совпадает с ENDF/B-VII.

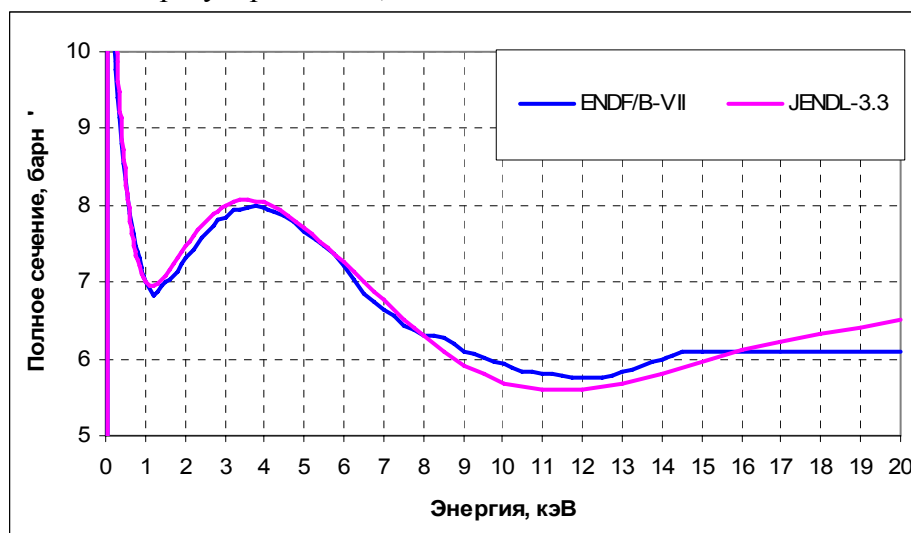


Рис. 10. Полное сечение

4.1.2. Сечение неупругого рассеяния

На рис. 11 сравниваются оцененные данные по сечению неупругого рассеяния. Поведение оцененных сечений существенно различается. Глубокий провал в сечении неупругого рассеяния, имеющий место в оценке ENDF/B-VII, в двух других независимо выполненных оценках не проявляется. Преимущество у новых оценок перед более ранней оценкой, принятой в БРОНД-2 и в ФОНД-2.2, не просматривается.

4.1.3. Сечения реакций (n,xn)

На рис. 12 сравниваются оцененные данные по сечениям реакций (n,2n) и (n,3n). В случае JENDL-3.3 приводится также и реакция (n,4n). Поведение сечения реакции (n,2n) в БРОНД-2.2 представляется ошибочным. В сечении этой реакции, принятом в JENDL-3.3 наблюдается необъяснимый провал при 10 МэВ. Сечение реакции (n,3n) чрезмерно высоко. При большом разбросе оценок сечения рассматриваемых реакций, принятые в ENDF/B-VII, представляются наиболее реалистичными. Целесообразно, видимо, учесть и реакцию (n,4n), уменьшив ее сечение вдвое по сравнению с оценкой JENDL-3.3 (считая, что сечение этой реакции в этой оценке завышено подобно

сечению реакции (n,3n)). Сечение реакции (n,3n) должно быть соответственно сокращено.

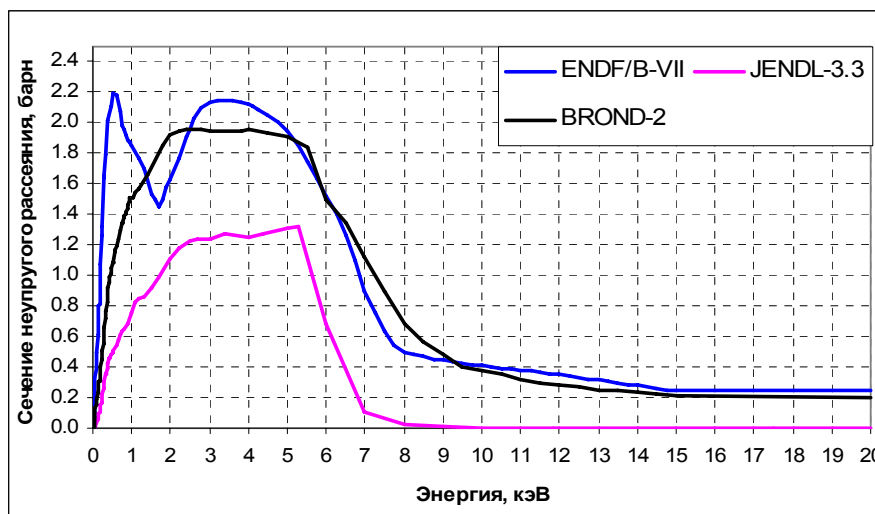


Рис.11. Сечение неупругого рассеяния

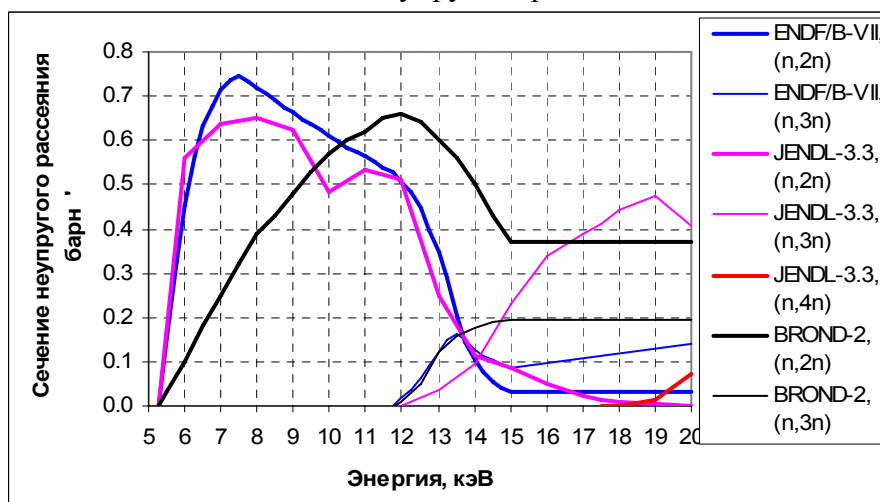


Рис. 12. Сечения реакций (n,xn)

4.1.4. Сечение радиационного захвата.

На рис. 13 сравниваются оценки сечения захвата. Они различаются весьма сильно. Пунктиром приведены оценки сечения захвата для ^{239}Pu . Как видно, наиболее близко по форме к этим оценкам сечение захвата, принятое в БРОНД-2.

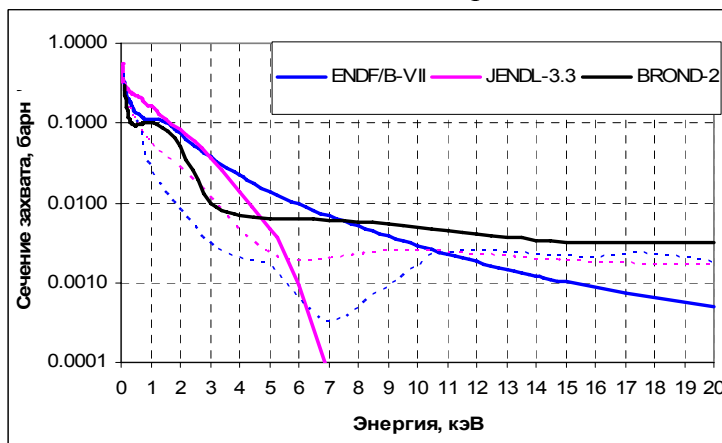


Рис. 13. Сечение захвата. Пунктиром приведены оценки сечения захвата для ^{239}Pu

4.1.5. Сечение деления

На рис. 14 оцененные данные по сечению деления сравниваются с имеющимися экспериментальными данными. Данные White (1967) приводятся в том виде, в каком они даны в базе данных EXFOR, а также перенормированными на современные значения сечения деления урана-235, по отношению к которому проводились измерения. При энергиях ниже 1 МэВ это привело к заметному сближению результатов этого эксперимента с данными жругих авторов. При энергиях выше 2 МэВ, разброс данных велик, а самих данных мало. Сечения, принятые в ENDF/B-VII в этой области представляются заниженными, а в сечениях, принятых в JENDL-3.3, проявляется неоправданная структура.

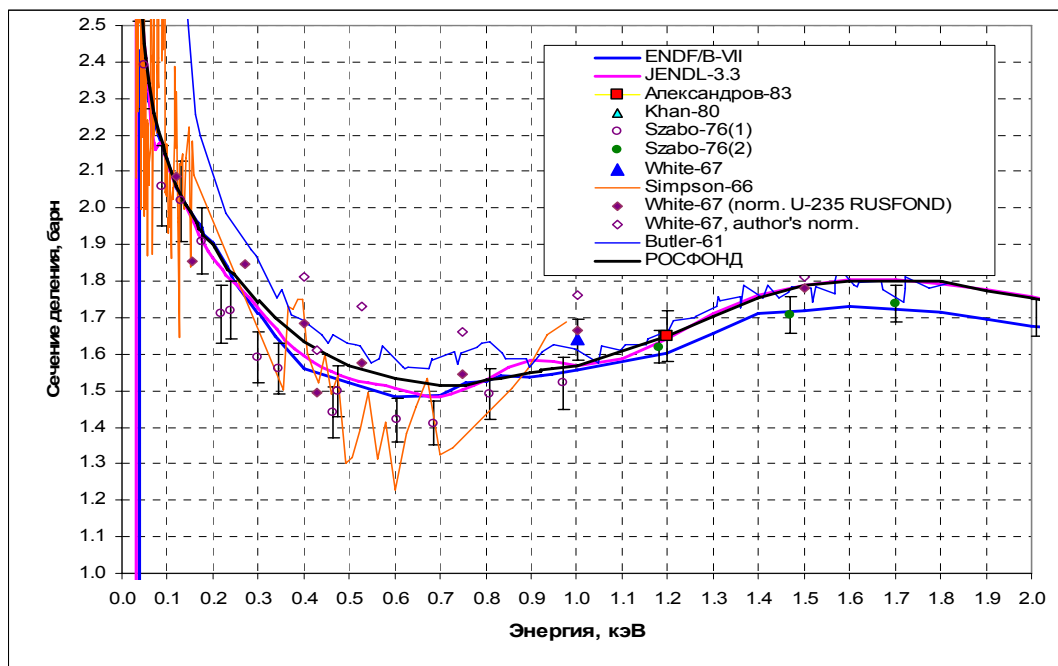


Рис. 14а. Сечение деления

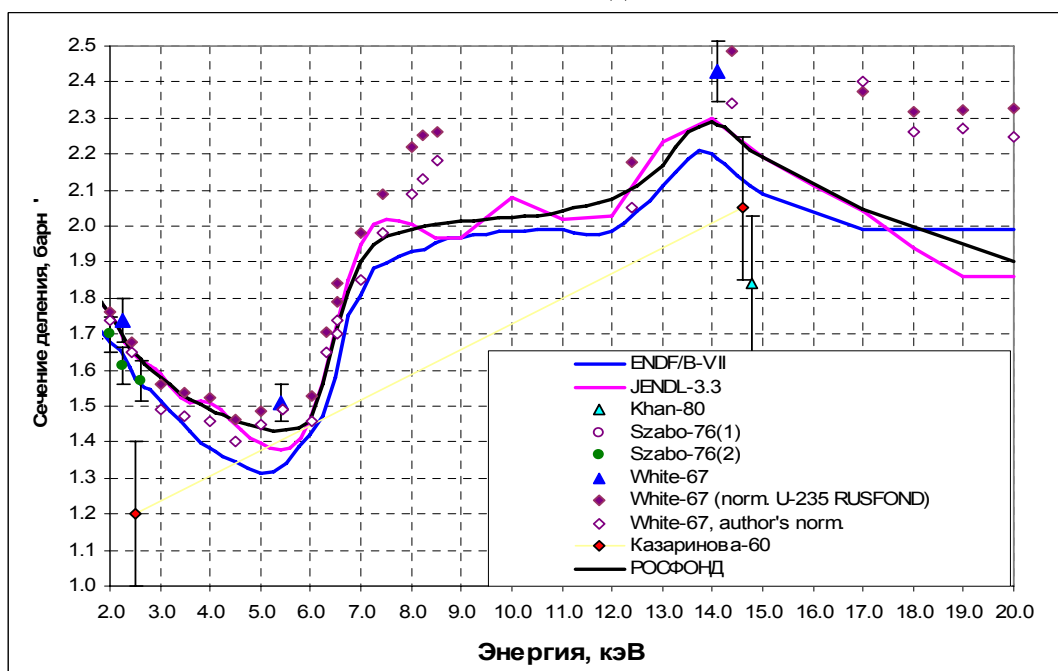


Рис.14б. Сечение деления

При столь больших расхождениях в данных весьма важны результаты интегральных экспериментов. Двумя группами авторов в 1983 г. было измерено среднее сечение деления ^{241}Pu на спектре спонтанного деления ^{252}Cf . В таблице 2 приводятся результаты этих измерений и результаты усреднения оцененных сечений деления по спектру деления калифорния-252.

Таблица 2. Среднее сечение деления на спектре деления ^{252}Cf

| Grundl-83 | Адамов-83 | Среднее | ENDF/B-VII | JENDL-3.3 | БРОНД-2 | РОСФОНД |
|-------------|-------------|-------------|------------|-----------|---------|---------|
| 1.616±0.080 | 1.740±0.054 | 1.704±0.048 | 1.599 | 1.651 | | |

Заметим, что среднеквадратичное отклонение экспериментальных результатов от их среднего, равное 0.048, практически совпадает с погрешностью среднего значения (± 0.045), оцененного исходя из указанных авторами погрешностей результатов измерений. Это повышает надежность оценки погрешности экспериментальных данных.

Данные таблицы 2 показывают, что занижено не только сечение деления, принятое в ENDF/B-VII, но и (в меньшей степени) сечение из JENDL-3.3. Нами проведена плавная кривая, близкая к оценке JENDL-3.3, в которой нет осцилляций, не оправданных экспериментальными данными. Среднее сечение на спектре деления калифорния-252, следующее из этой кривой, совпадает с усредненным экспериментальным результатом в пределах экспериментальной погрешности.

4.1.6. Сечения реакций с вылетом заряженных частиц.

Оцененные данные о сечениях реакций с вылетом заряженных частиц содержатся только в активационных библиотеках. На рис.15. приведены сечения реакций (n,p) и (n,α) из библиотеки EAF-2003. Перелом в сечении реакции (n,p) при 6-7 МэВ, обусловлен, видимо, конкуренцией со стороны реакции $(n,2n)$.

Данные о сечениях этих реакций, разумеется, целиком основаны на теоретических расчетах и не надежностью не отличаются. Тем не менее, эти сечения целесообразно учесть в файле данных РОСФОНД в качестве справочной информации.

4.1.7. Выводы

Проведенное рассмотрение привело к следующим выводам относительно выбора сечений для библиотеки РОСФОНД.

1. Полное сечение вне резонансной области принять в соответствии с оценкой JENDL-3.3.
2. Сечение неупругого рассеяния принять в соответствии с оценкой БРОНД-2.
3. Сечения реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$ принять в соответствии с оценкой ENDF/B-VII. В последнюю внести коррективу для учета конкуренции со стороны реакции $(n,4n)$.
4. Сечение реакции $(n,4n)$ принять вдвое меньшим, чем рекомендуется в JENDL-3.3.
5. Сечение радиационного захвата принять в соответствии с оценкой БРОНД-2.
6. Сечение деления принять в соответствии с настоящей оценкой (черная кривая на рис.14).
7. Сечение упругого рассеяния получить как разность между полным сечением и суммой сечений неупругих взаимодействий.

4.2. Число и спектр нейтронов деления.

В таблице 3 приведены средние значения числа вторичных нейтронов, испускаемых при делении плутония-241, принятые в разных библиотеках, результаты экспериментов, данные которых содержатся в EXFOR, а также оценка этого числа международной группой по стандартам¹. Все измерения выполнялись относительно того или иного стандарта; в таблице приведены данные, в которых для опорных значений ν приняты значения, рекомендованные группой по стандартам.

Таблица 3. Среднее число нейтронов деления тепловыми нейтронами

| Boldemann-85 ^{*)} | Jaffey-70 ^{**)} | Colvin-65 ^{***)} | De-Saussure-59 ^{***)} | Sanders-56 ^{***)} | СТАНДАРТ |
|----------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------|
| 2.9332±0.0072 | 2.888±0.015 | 2.910±0.015 | 3.151±0.049 | 3.00±0.13 | 2.9479±0.0054 |
| ENDF/B-VII | JENDL-3. | BROND-2 | РОСФОНД | | |
| 2.9453 | 2.9313 | 2.9370 | 2.948 | | |

^{*)} Измерено относительно ν Cf-252.

^{**)} Измерено относительно ν U-235, Pu-239 и U-233 и усреднено.

^{***)} Измерено относительно ν U-235

Как видно, все экспериментальные данные согласуются с оценкой, выполненной группой по стандартам в пределах своих погрешностей. Погрешность оценки, выполненной этой группой, разумеется, меньше любого из экспериментальных результатов, поскольку оценка проводилась путем совместного анализа всех данных (кроме данных по ν , учитывались также данные по η и т.д.). Из данных, принятых в библиотеках, ближе всего к оценке группы по стандартам значение ν из ENDF/B-VII. В РОСФОНД, естественно, целесообразно принять значение, рекомендованное группой по стандартам.

Энергетические зависимости $\nu(E)$, принятые в разных библиотеках, сравниваются на рис.15.

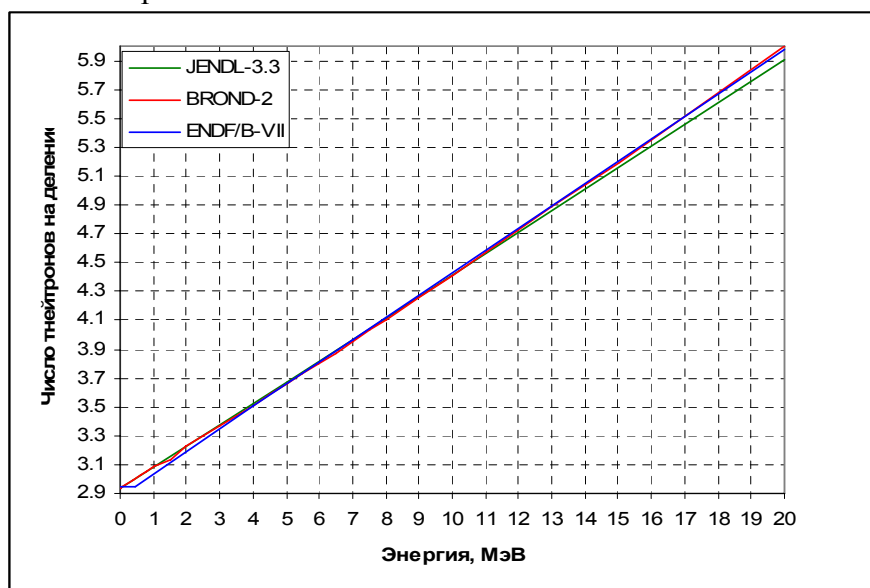


Рис. 15. Энергетические зависимости ν .

Отличия невелики. **В РОСФОНД принимается энергетическая зависимость из JENDL-3.3, являющаяся наиболее простой.** В БРОНД-2 энергетическая зависимость описывается в неоправданно большом числе точек. Экспериментальных оснований для принятия постоянного значения ν при низких энергиях, как это сделано в ENDF/B-VII, не имеется.

Что касается возможной резонансной структуры величины ν , то результаты измерений Гвина и др. (1984 г.), приведенные на рис.16, согласуясь в пределах погрешностей с оценкой группы по стандартам (показана красной линией), отклоняются от нее лишь немногим более, чем на одно стандартное отклонение и эти отклонения не коррелируют с резонансной структурой сечения деления (положение первого резонанса и его полуширина показаны синими линиями). Таким образом учитывать энергетические особенности в поведении ν в тепловой области нет оснований.

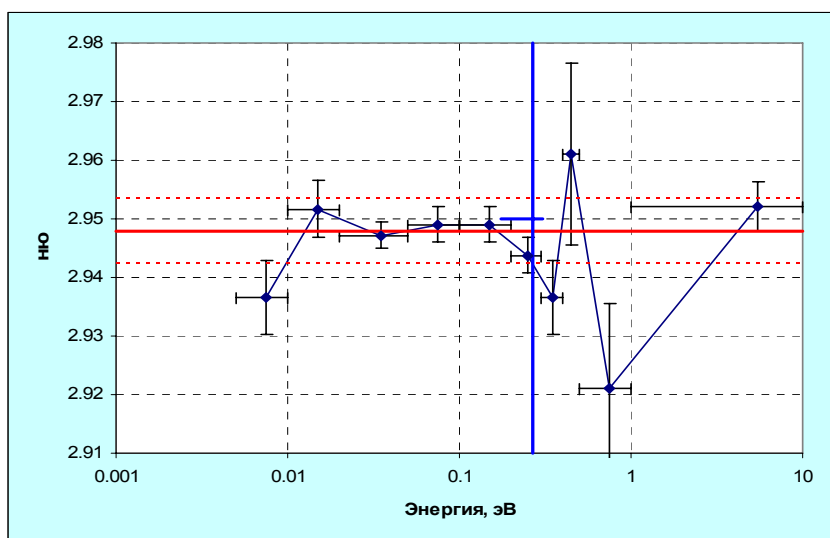


Рис.16. Энергетическое поведение ν при низких энергиях.

Что касается спектра нейтронов деления, то во всех рассматриваемых оценках он описывается простой Максвелловской формой

$$\chi(E \rightarrow E') = \text{Const} * \sqrt{E'} \exp[-E'/\theta(E)].$$

На рис. 17 приводятся оцененные зависимости температуры θ от энергии нейтронов, вызывающих деления. Ясно, что неопределенность в оценке этого параметра весьма велика. **В РОСФОНД рекомендуется принять оценку JENDL-3.3 (принятую, как отмечалось и в JEFF-3.1)**

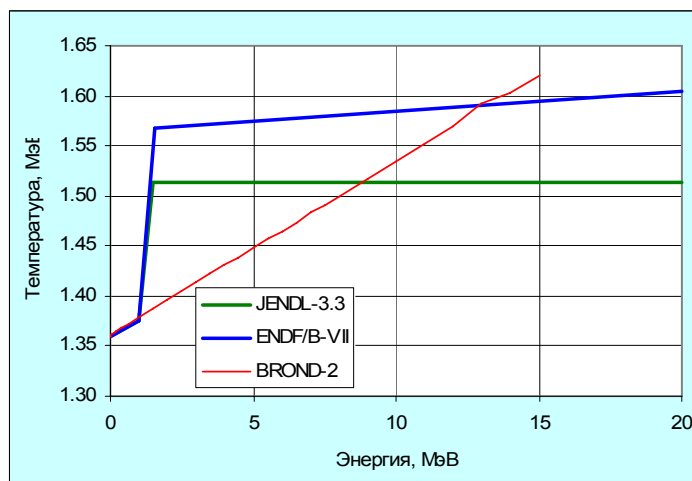


Рис.17. Температура нейтронов спектра деления.

4.3. Запаздывающие нейтроны.

Различия в оценке числа запаздывающих нейтронов, испускаемых при делении ^{241}Pu тепловыми нейтронами, невелики: в JEFF-3.1 и JENDL-3.3 принимается $\nu_d = 0.0160$; в ENDF/B-VII - $\nu_d = 0.0162$. Эти значения считаются неизменными вплоть до 5 МэВ (в JEFF-3.1) или 4МэВ (в ENDF/B-VII), а затем спадают линейно с энергией к 7 МэВ до 0.00911(в JEFF-3.1) или до 0.0084 (в ENDF/B-VII). Эти значения сохраняются вплоть до 20 МэВ.

В JEFF-3.1 запаздывающие нейтроны описываются в 8-групповом представлении, принятом и в РОСФОНДе. Это послужило стимулом для выбора данных именно этой библиотеки и для ν_d . Доли каждой из 8 групп запаздывающих нейтронов в оценке JEFF-3.1 считаются не зависящими от энергии. Так принято и в РОСФОНДе. В ENDF/B-VII и JENDL-3.3, где принято традиционное 6-групповое представление, доли групп также не зависят от энергии. Что касается спектров групп запаздывающих нейтронов, то они не зависят от делящегося ядра и приняты такими же, как для урана-235.

4.4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов.

4.4.1. Анизотропия упругого рассеяния.

Поскольку прямых экспериментальных данных нет во всех библиотеках включены данные, полученные в результате расчетов по оптической модели. **В РОСФОНДе решено включить данные об анизотропии упругого рассеяния из JENDL-3.3, поскольку полное сечение, также рассчитанное по оптической модели, взято из этой библиотеки. Матрица перевода коэффициентов Лежандра из системы центра инерции в систему центра масс удаляется.**

4.4.2. Энерго-угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов.

Как отмечено в разделе 4.1, сечение неупругого рассеяния в РОСФОНДе принято таким, как в БРОНД-2. Естественно принять из этой библиотеки и все составляющие этого сечения- сечения возбуждения дискретных уровней плутония-241 и сечение возбуждения непрерывного спектра уровней, если это решение не наталкивается на какие-либо противоречия или не страдает какими-либо недостатками. С этой целью было проведено сравнение схемы уровней ^{241}Pu , содержащейся в ENSDF, с уровнями, возбуждаемыми при неупругом рассеянии, согласно имеющимся оценкам.

В ENSDF приводятся энергии 53 уровней, с энергиями до 1009 кэВ включительно. В оценке БРОНД-2 учитывается возбуждение 25 из этих уровней, причем последний из этих уровней имеет энергию 1009 кэВ. До 200 кэВ учтено возбуждение всех известных уровней. От 200 до 500 кэВ учтено возбуждение 10 из 15 известных уровней (пропущены уровни с неточно установленными спинами и четностями). Возбуждение континуума начинается с 1010 кэВ.

В ENDF/B-VII учитывается возбуждение 15 уровней, последний из которых имеет энергию 941 кэВ. Возбуждение континуума начинается с 1195 кэВ. Таким образом, не учтено возбуждение большинства известных уровней.

В JEFF-3.1 (как и в JENDL-3.3) учтено возбуждение 11 уровней, последний из которых лежит при 445 кэВ, т.е. не учтено возбуждение большего числа уровней, чем в БРОНД-2. Возбуждение континуума начинается с 490 кэВ.

Из проведенного рассмотрения следует, что **в БРОНД спектр неупруго рассеянных нейтронов описывается более детально и в лучшем соответствии с имеющейся информацией о структуре ^{241}Pu , чем в других оценках. Эти данные и принимаются в РОСФОНД.**

Что касается угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов, то в БРОНД-2 анизотропия рассеяния описывается только для 1-го уровня, а угловые распределения всех остальных приняты изотропными. В ENDF/B-VII все угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов приняты изотропными. В JEFF-3.1 анизотропия описана для всех дискретных уровней. Для второго и третьего уровня, по энергии совпадающих с соответствующими уровнями в БРОНД-2, эта анизотропия включена и в файл РОСФОНДа.

Спектр нейтронов, неупруго рассеянных с возбуждением континуума уровней в также принят в соответствии с оценкой БРОНД-2 (точнее – ФОНД-2.2, где, как отмечалось используется та же оценка, но где область энергий расширена с 15 МэВ до 20 МэВ и исправлен ряд форматных ошибок, в частности, в секции, описывающей спектры нейтронов, неупруго рассеянных с возбуждением континуума уровней ядра-мишени).

4.4.3. Энерго-угловые распределения нейтронов реакций (n,xn).

Угловые распределения нейтронов этих реакций во всех оценках приняты изотропными; естественно, они приняты такими же и в РОСФОНДе. Что касается спектров этих нейтронов, то они приняты такими же, как в тех библиотеках, из которых приняты сечения этих реакций: для **реакций (n,2n) и (n,3n) – из ENDF/B-VII; для реакции (n,4n) – из JEFF-3.1.**

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях.

Данные об образовании фотонов в нейтронных реакциях представлены в двух библиотеках –ENDF/B-VII и БРОНД-2. В последней из них данные представлены отдельно для неупругого рассеяния, реакций (n,2n), (n,3n), для деления и радиационного захвата. В ENDF/B-VII выделено образование фотонов при делении и радиационном захвате, а образование фотонов во всех остальных реакциях рассматривается совокупно. Первый способ описания, является, очевидно, предпочтительным. **В РОСФОНД принимаются данные БРОНД-2.**

6. Ковариации погрешностей нейтронных данных.

В библиотеке JENDL-3.3 содержатся данные о ковариациях погрешностей сечений нейтронных реакций –полном, упругого рассеяния, деления, реакций (n,2n), (n,3n), (n,4n), неупругого рассеяния в целом и неупругого рассеяния с возбуждением отдельных дискретных уровней и континуума уровней; приводятся также ковариации погрешностей числа мгновенных и запаздывающих нейтронов деления и полного числа нейтронов деления; даны ковариации погрешностей резонансных параметров, а также данных об угловых распределениях упруго рассеянных нейтронов.

В библиотеке ENDF/B-VII приводятся данные о ковариациях погрешностей числа вторичных нейтронов деления.

В остальных библиотеках (включая JEFF-3.1, в которой приняты оцененных данные из JENDL-3.3) данных о ковариациях не содержится. Не включаются они и в РОСФОНД, поскольку для проведения серьезной экспертизы качества данных о ковариациях в рамках настоящей работы нет ни времени, ни сил.

7. Заключение

Файл нейтронных данных для ^{241}Pu для библиотеки РОСФОНД на основании проведенного рассмотрения должен быть скомпилирован из данных разных библиотек следующим образом.

1. Описание сечений в областях разрешенных и неразрешенных резонансов – из ENDF/B-VII.
2. Полное сечение – в соответствии с JENDL-3.3.
3. Полное сечение неупругого рассеяния, а также сечения возбуждения дискретных уровней и континуума уровней – из ФОНД-2.2 (=БРОНД-2 с устранением ряда погрешностей).
4. Сечения реакций (n,2n) и (n,3n) – из ENDF/B-VII. Из последней вычесть вклад реакции (n,4n).
5. Сечение реакции (n,4n) взять из JENDL-3.3, сократив его вдвое.
6. Сечение радиационного захвата взять из ФОНД-2.2.
7. Сечение деления принять в соответствии с настоящей оценкой.
8. Сечения реакций (n,p) и (n, α) принять в соответствии с EAF-2003.
9. Сечение упругого рассеяния получить из условия баланса.
10. Энергетическую зависимость полного числа нейтронов деления принять такой же, как в JENDL-3.3, перенормировав ее на значение ν при тепловой энергии, равное, в соответствии с рекомендацией международной группы по стандартам, 2.948.
11. Энергетическую зависимость числа запаздывающих нейтронов деления принять в соответствии с данными JEFF-3.1. Значения постоянных распада 8 групп запаздывающих нейтронов (не зависящих от делящегося ядра) принять из того же источника.
12. Энергетическую зависимость числа мгновенных нейтронов деления получить как разность между полным числом нейтронов деления и числом запаздывающих нейтронов.
13. Составляющие энерговыделения при делении принять такими же, как в ENDF/B-VII.
14. Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов принять такими же, как в ENDF/B-VII.

15. Угловые распределения нейтронов, неупруго рассеянных с возбуждением первого уровня ^{241}Pu , принять такими же, как в БРОНД-2.
16. Угловые распределения нейтронов, неупруго рассеянных с возбуждением второго и третьего уровней ^{241}Pu , принять такими же, как в JENDL-3.3.
17. Угловые распределения вторичных нейтронов, испускаемых во всех остальных реакциях, принять изотропными в системе центра инерции.
18. Энергетические распределения нейтронов реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$ принять такими же, как в ENDF/B-VII.
19. Энергетические распределения нейтронов реакции $(n,4n)$ принять таким же, как в JENDL-3.3.
20. Спектр нейтронов деления принять таким же, как в JENDL-3.3.
21. Спектр нейтронов, испытавших неупругое рассеяние с возбуждением континуума уровней ядра-мишени, принят таким, как в ФОНД-2.
22. Доли групп запаздывающих нейтронов принять такими же, как в JEFF-3.1, а спектры нейтронов этих групп – универсальными (как для ^{235}U в библиотеке РОСФОНД).
23. Данные об образовании фотонов в нейтронных реакциях принять такими же, как в ФОНД-2.2²⁰.
24. Включить файл MF=8 с секциями MT=454 и MT=459 из ENDF/B-VI.

Автор отбора данных – Николаев М.Н.

94.7.Плутоний-242

Радиоактивен. ($T^{1/2}=3.750 \cdot 10^5$ лет). Испытывает альфа-распад в уран-238. Вероятность спонтанного деления : $5.54 \cdot 10^{-4}\%$.

Оценки нейтронных данных плутония-239 в современных библиотеках:

- В ФОНД-2.2 – оценка Коньщина, Суховицкого и Анципова, 1980.
- В ENDF/B-VII – оценка Mann, Benjamin, Madland, Howerton, 1978.
- В JENDL-3.3 – оценка T.Murato, T.Kawano, 2000
- В JEFF-3.1 – оценка A. Ventura, S.Masetti. A.Trkov, 1998.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить недавнюю оценку T.Murato, T.Kawano, 2000 из JENDL-3.3 **со следующими коррективами:**

- 1. Принять оценку запаздывающих нейтронов из JEFF-3.1**
- 2. Спектры 8 групп запаздывающих нейтронов принять такими же, как для урана-235.**
- 3. Включить данные о выходах продуктов деления из JEFF-3.1**
- 4. Включить данные об образовании фотонов из JEFF-3.1/**

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

²⁰ Это значит, что испусканием фотонов в реакции $(n,4n)$ пренебрегается, что вполне оправдано вблизи порога этой реакции. Пренебрегается и испусканием фотонов в реакциях с вылетом заряженных частиц.

94.8.Плутоний-243

Радиоактивен. ($T^{1/2}=4.956$ ч). Испытывает бета-распад в америций-243. Вероятность спонтанного деления : 0.0251%.

Оценки нейтронных данных плутония-239 в современных библиотеках:

В ФОНД-2.2 , ENDF/B-VII и JEFF-3.1 –компиляция Kinsey (Benjamin, Smirenkin, Konjin et al) 1976

В JENDL и EAF– данных нет

Заключение

В РОСФОНД целесообразно сохранить оценки из ФОНД-2.2.

Включить данные о выходе и спектрах запаздывающих нейтронов, приняв их такими же, как для плутония-241.

94.9.Плутоний-244

Радиоактивен. ($T^{1/2}=8.00*10^7$ лет). Испытывает альфа-распад в уран-240 (а затем в нептуний-240 и плутоний-240). Вероятность спонтанного деления : 0.125%.

Оценки нейтронных данных плутония-239 в современных библиотеках:

В ФОНД-2.2 –оценка Коньщина, Суховицкого и Анципова, 1980.

В ENDF/B-VII и JEFF-3.1 – оценка Mann, Shenter, Benjamin, McCrosson, 1978.

В JENDL-3.3 – оценка T.Nakagawa, V.Konjshin, 1995

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить недавнюю оценку T.Nakagawa, V.Konjshin, 1995 из JENDL-3.3. Включить данные о выходе и спектрах запаздывающих нейтронов, приняв их такими же, как для плутония-242. Соответственно откорректировать выходы мгновенных нейтронов.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

94.10.Плутоний-246

Радиоактивен. ($T^{1/2}=10.85$ д). Испытывает бета-распад в изомер америция-246, а затем – в кюрий-246.

В современных библиотеках данные для этого изотопа содержатся только в JENDL-3.3 (оценка T.Nakagawa, 1995)

Заключение

В РОСФОНД целесообразно включить единственную оценку T.Nakagawa 1995 из JENDL-3.3. Включить данные о выходе и спектрах запаздывающих нейтронов, приняв их такими же, как для плутония-242.

Содержание файла РОСФОНД для 94-Pu-246

MF = 1 Общая и специальная информация о нуклиде

 MT = 451 заголовочная секция

 MT = 452 полное среднее число нейтронов деления

 MT = 455 запаздывающие нейтроны деления

 MT = 456 среднее число мгновенных нейтронов деления

MF = 2 Резонансные параметры

 MT = 151 секция резонансных параметров

MF = 3 Нейтронные сечения

 MT = 1 полное сечение

 MT = 2 упругое рассеяние

 MT = 4 суммарное сечение неупругого рассеяния

 MT = 16 реакция (n,2n) 94-Pu-245

 MT = 17 реакция (n,3n) 94-Pu-244

 MT = 18 все процессы деления

 MT = 51 - 52 неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней

 MT = 91 неупругое рассеяние с возбуждением континуума уровней

 MT = 102 радиационный захват: реакция (n,gamma) 94-Pu-247

MF = 4 Угловые распределения вторичных нейтронов

 MT = 2 упругое рассеяние

 MT = 16 реакция (n,2n) 94-Pu-245

 MT = 17 реакция (n,3n) 94-Pu-244

 MT = 18 все процессы деления

 MT = 51 - 52 неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней

MT = 91 неупругое рассеяние с возбуждением континуума уровней

MF = 5 Энергетические распределения вторичных нейтронов

MT = 16 реакция (n,2n) 94-Pu-245

MT = 17 реакция (n,3n) 94-Pu-244

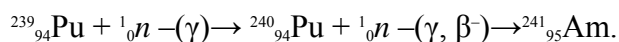
MT = 18 все процессы деления

MT = 91 неупругое рассеяние с возбуждением континуума уровней

95. АМЕРИЦИЙ

95.0. Общие замечания

Классическая схема получения америция выглядит так:



Америций – металл серебристо-белого цвета, тягучий и ковкий. Больше всего он похож на металлы редкоземельного семейства, но вряд ли когда-нибудь удастся использовать на практике металлические свойства америция. Поэтому разговор пойдет лишь о его индивидуальных изотопах.

Самый долгоживущий изотоп америция – ${}^{243}\text{Am}$. Период полураспада у него 7370 лет. Используется он, главным образом, для радиохимических исследований и для накопления более отдаленных трансуранов, вплоть до фермия. Мишени из америция-243 применяли в Дубне при синтезе некоторых изотопов элементов №102, 103 и 105.

Значительно многообразнее применение изотопа ${}^{241}\text{Am}$. Его период полураспада составляет 432.2 года. Этот изотоп, распадаясь, испускает альфа-частицы и мягкие, малоэнергичные гамма-кванты. Их энергия – всего 60 кэВ. (К примеру, энергия жестких гамма-квантов, испускаемых кобальтом-60 ~ миллионы электронвольт.) Защита от мягкого излучения америция-241 сравнительно проста и немассивна: вполне достаточно сантиметрового слоя свинца. В этом одна из причин появления многочисленных приборов с америцием-241.

В частности, предложена конструкция просвечивающего аппарата размером чуть больше спичечного коробка для медицинских целей. Основа такого аппарата – шарик диаметром 3...4 см (источник гамма-излучения) которому, в отличие от рентгеновской установки не нужна громоздкая высоковольтная аппаратура – трансформаторы, выпрямители, усилители и т.д. Так источник мягкого гамма-излучения с америцием-241 используется для изучения болезней щитовидной железы. Стабильный иод, присутствующий в щитовидной железе, под действием гамма-лучей начинает испускать слабое рентгеновское излучение. Его интенсивность пропорциональна концентрации иода в исследуемой точке. Такая установка позволяет получить сведения о распределении иода в щитовидной железе, не вводя радиоактивный изотоп внутрь организма. Суммарная доза облучения пациента оказывается намного ниже, чем при радиоиодном обследовании.

Промышленность нескольких стран мира уже освоила выпуск различных контрольно-измерительных и исследовательских приборов с америцием-241. В частности, такими приборами пользуются для непрерывного измерения толщины стальной (от 0,5 до 3 мм) и алюминиевой (до 50 мм) ленты, а также листового стекла. Аппаратуру с америцием-241 используют также для снятия электростатических зарядов в промышленности пластмасс, синтетических пленок и бумаги.

Полагают, что найдет применение и более короткоживущий (141 года) изотоп – ${}^{242\text{m}}\text{Am}$, которому свойственно очень высокое сечение захвата тепловых нейтронов – около 7000 барн.

В виде индивидуальных изотопов америций очень дорог, во много раз дороже золота. По прейскуранту Комиссии по атомной энергии США грамм америция-241 оценивается в 150 долларов, а ведь это самый доступный из изотопов элемента №95. Но по мере развития атомной техники америций должен стать дешевле. Подсчитано, что к 1980 г. в США будут ежегодно получать примерно 200 кг америция и стоимость основных изотопов элемента №95 снизится до 20...50 долларов за грамм.

Для библиотеки РОСФОНД следовало отобрать три изотопа америция, имеющих период полураспада более суток и два изотопа америция, имеющих период полураспада менее суток, но нейтронные свойства которых, используются для анализа выгорания ядерного топлива.

95.1. Америций-240

Оценка нейтронных данных Am –240 имеется только в одной библиотеке – EAF-2003 (оценка R. A. Forrest, J. Korescky и J-Ch Sublet).

1, Общие характеристики

- 1.1. $Z = 95$ -зарядовое число;
- 1.2. $A = 240$ (атомный вес);
- 1.3. $AWR = 237.993$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 50.8$ часа; доминирует ϵ -распад в Pu-240, но с вероятностью $1.9E-40\%$ испытывает α -распад в Np-236.
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт [*] |
|-----|---------|----------|---------------------------|---------------------------|
| 16 | n,2n | -5.9654 | 5.9905 | Am-239(11.9 ч.) |
| 17 | n,3n | -13.0594 | 13.1143 | Am-238(98 мин.) |
| 18 | деление | | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 6.5802 | 0 | Am-241(432.2 г.) |
| 103 | n,p | 2.1021 | 0 | Pu-240(6564 г.) |
| 107 | n,a | 12.2160 | 0 | Np-237(2.144E+6 г.) |

2 Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов отсутствует.

Сечения в тепловой точке и резонансные интегралы приводятся в таблице 1.

Таблица 1. Резонансные свойства Am-240.

| Оценка | σ_{tot} | σ_f | σ_γ | I_f | I_γ |
|---------|-----------------------|------------|-----------------|--------|------------|
| EAF2003 | - | 2 830. | 20.96 | 1 280. | 201.9 |

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

Полное сечение (MT=1)

В оценке EAF2003 полное сечение отсутствует.

Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

В оценке EAF2003 сечение упругого рассеяния отсутствует.

Сечение деления (MT=18)

На рисунке 1 показано оцененное сечение деления Am-240 в области энергий до 20 МэВ в сравнении с оцененными сечениями деления для четных изотопов америция.

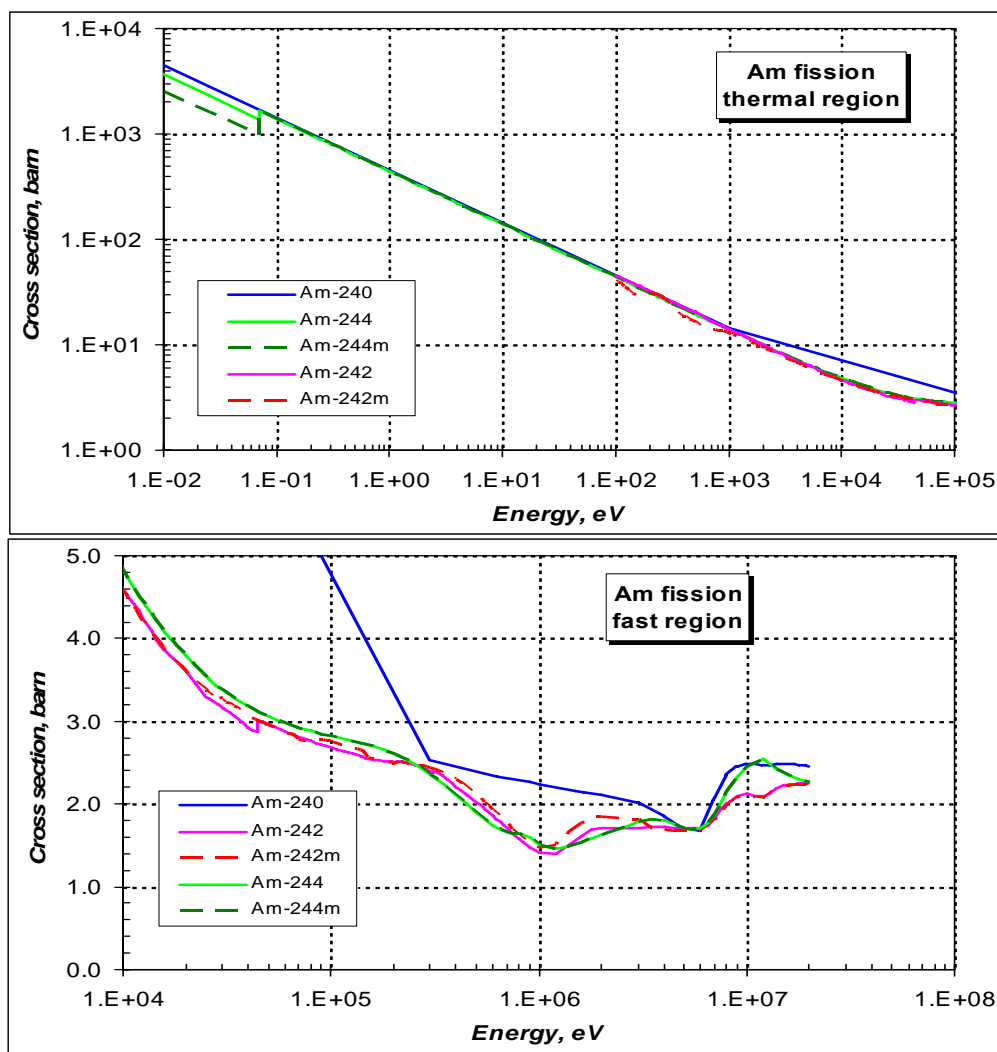


Рисунок 1 - Сечение деления в области энергий нейтронов до 10 МэВ.

Из приведенного на рисунке сравнения видно, что оценка сечения деления для Am-240 выполнена очень грубо. Сечения деления более высоких изотопов америция хорошо согласуются между собой по характеру поведения кривой, различаясь между собой незначительно по величине. Поэтому, как нам кажется, более корректным было бы использование в качестве оценки сечения деления Am-240, например, сечение деления для Am-244.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102)

На рисунке 2 показано сравнение оцененного значения сечения радиационного захвата Am-240 с аналогичными сечениями более высоких изотопов Am.

Из приведенного на рисунке 2 сравнения видно, что в области энергий гладких сечения \sim до 10 кэВ, где сечение радиационного захвата определяется среднестатистическими резонансными параметрами, сечения более высоких изотопов америция, согласуясь между собой, отличаются от оценки EAF2003 для Am-240. Трудно

что либо сказать об оценке сечения в тепловой точке ($E=0.0253$ эВ). Однако, для наиболее промеренных изотопов Am-242 и Am-242m зависимость сечения $\sim 1/v$ справедливо приблизительно до 0.07 эВ. Этот факт учитывается при оценке сечения для Am-244 и Am-244m, о которых также мало что известно, как и для Am-240. Далее ход сечения для изотопов америция 244 определяется по средним резонансным параметрам с подключением оптической модели.

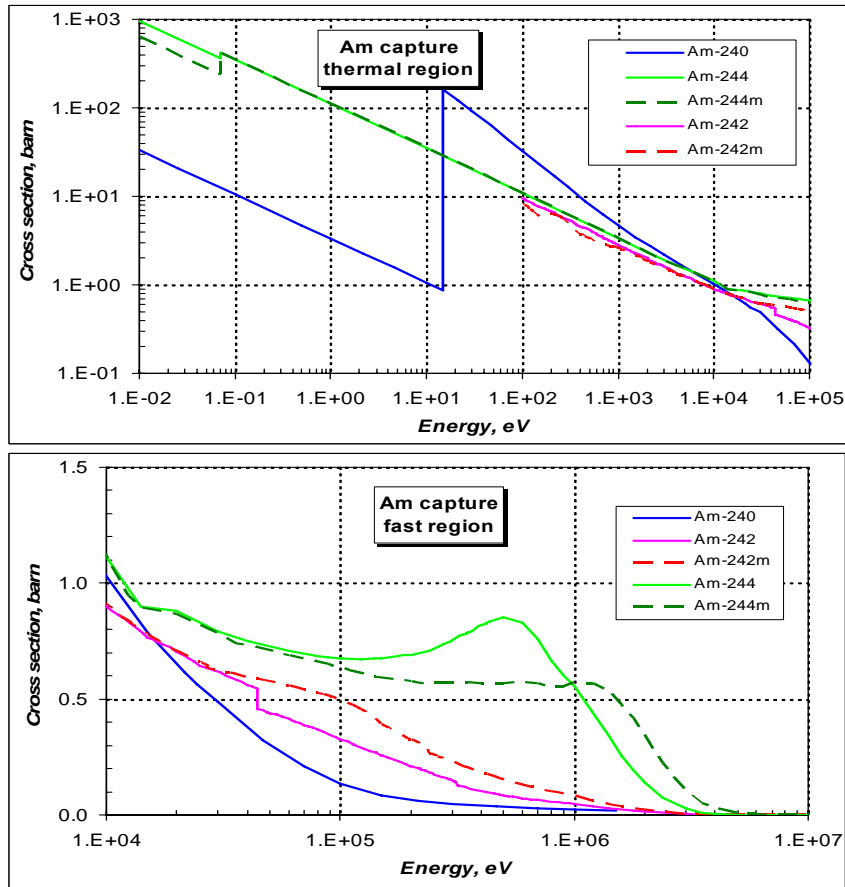


Рисунок 2 - Сечение радиационного захвата в области энергий нейтронов 1-10 МэВ.

Выше 40 кэВ в оценке сечения радиационного захвата проявляются особенности используемой модели расчета нейтронных сечений в области высоких энергий.

Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16, 17)

На рисунке 3 показаны оцененные сечения реакции (n,2n), (n,3n). Согласно имеющейся систематике, они оценены достаточно корректно (см. раздел ...).

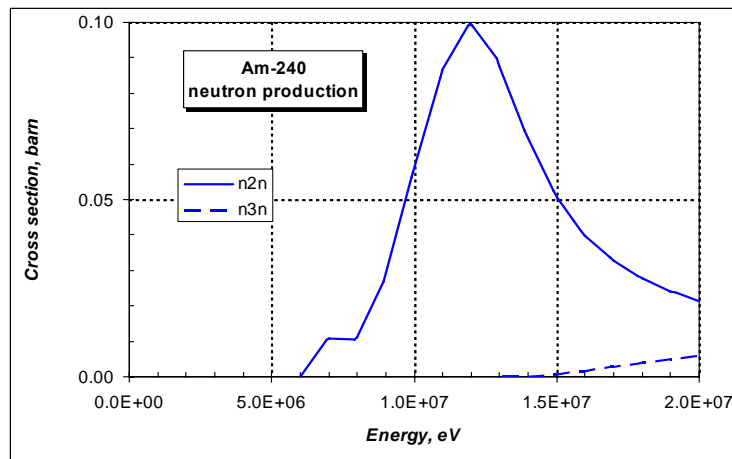


Рисунок 3 - Сечение реакции (n,2n) и(n,3n) .

Заключение.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку EAF2003. Рекомендуется ее модифицировать следующим образом. В качестве сечения деления взять оценку для Am-244 (JENDL-3.3). Сечение радиационного захвата выше 0.07 эВ и до 10 кэВ модифицировать в соответствии с оценкой сечения для Am-244.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

95.2. Америций-241

Оценки сечений Am -241 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3, БРОНД-3 и в библиотеке Маслова и др. (Минск).

В JEFF-3.1 приняты данные библиотеки JENDL-3.3.

Оценка БРОНД-3 выполнена в 1997 году, в 2001 выполнена ревизия файла. Оценка ENDF/B-VII выпущена в 2006 году. Оценка Маслова и др. выполнена в 1996 году. Оценка JENDL-3.3 выпущена в 2002 году, она является модификацией оценки Маслова и др. (Минск).

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 95$ -зарядовое число;
- 1.2. $A = 241$ (атомный вес);
- 1.3. $AWR = 238.986$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 432(7)$ года, доминирует α -распад с вкладом $4E-10\%$ спонтанного деления;
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт [*]) |
|-----|---------|---------|---------------------------|-----------------------------|
| 4 | n,n' | -0.411 | .0413 | Am-241 |
| 16 | n,2n | -6.638 | 6.666 | Am-240 |
| 17 | n,3n | -12.567 | 12.619 | Am-239 |
| 18 | деление | | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 5.537 | 0 | Am-242 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов во всех библиотеках ограничена энергией 150 эВ. Сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в сравнении рекомендованными экспериментальными данными [1] приведены в нижеследующей таблице 2.

Таблица 2. Резонансные свойства Am-241.

| | JENDL-3.3 | МИНСК | БРОНД-3 | ENDF/B-VII | Мухабхаб, барн |
|-----------------|-----------|---------|---------|------------|----------------|
| σ_{tot} | 654.44 | 599.47- | 633.2 | 633.2 | |
| σ_f | 3.14 | 3.14 | 3.14 | 3.13 | 3.20±0.09 |
| σ_γ | 639.47 | 584.80 | 618.7 | 618.7 | 587±12 |
| I_f | 14.8 | 14.51 | 14.66 | 15.79 | 14.4±1.0 |
| I_γ | 1460 | 1351.2 | 1383.9 | 1384.8 | 1425±100 |

На рисунках 4 - 6 представлены экспериментальные и оцененные данные в области энергий разрешенных резонансов.

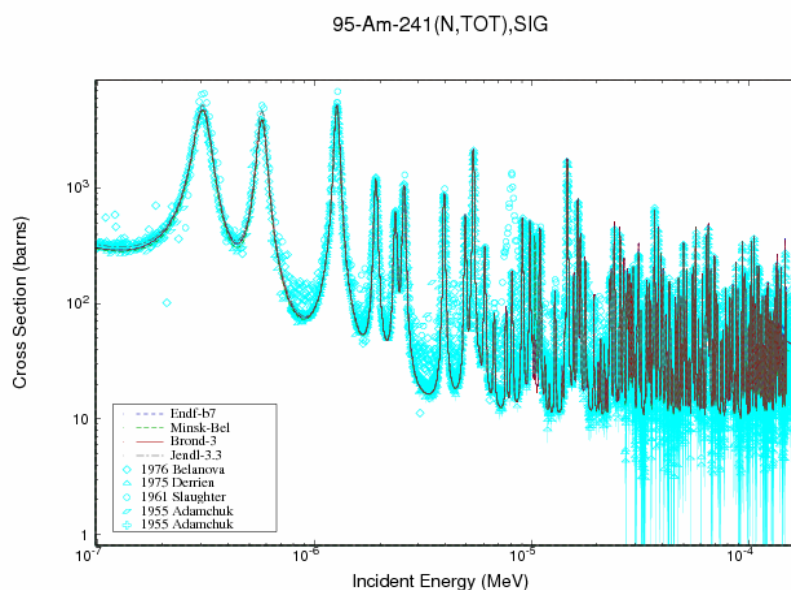


Рисунок 4. Полное сечение Am-241 в области энергий разрешенных резонансов.

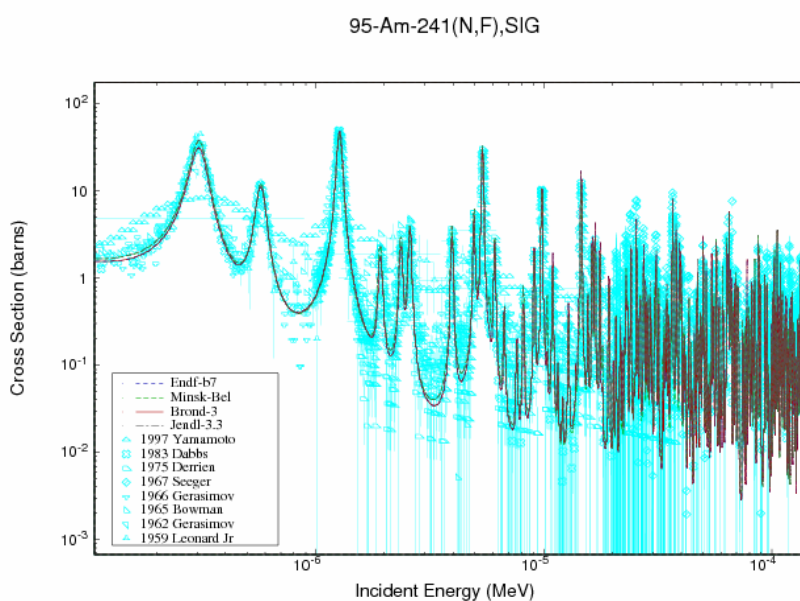


Рисунок 5. Сечение деления Am-241 в области энергий разрешенных резонансов.

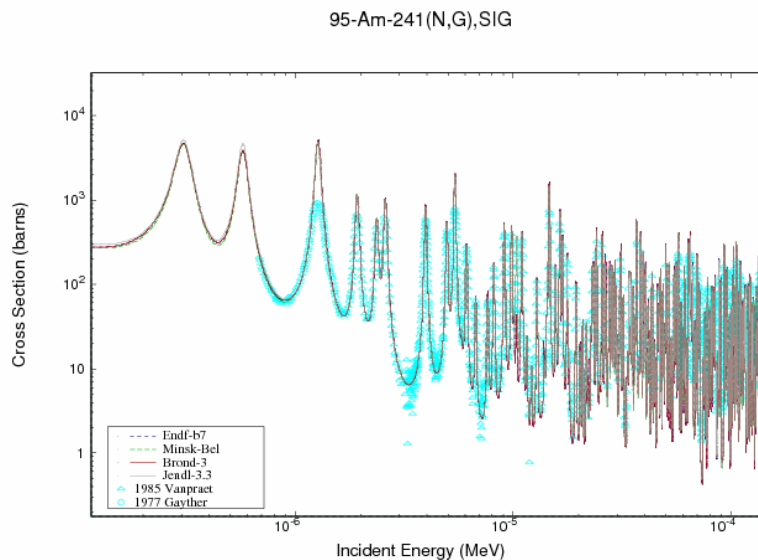


Рисунок 6. Сечение радиационного захвата Am-241 в области энергий разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов

Для области неразрешенных резонансов приняты следующие границы:

| | |
|------------|-------------------|
| БРОНД-3 | 150 эВ – 20 кэВ |
| ENDF/B-VII | 150 эВ – 20 кэВ |
| JENDL-3.3 | 150 эВ – 40 кэВ |
| МИНСК | 150 эВ – 41.3 кэВ |

На рисунке 7 представлены экспериментальные и оцененные данные по полному сечению в области энергий неразрешенных резонансов. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 совпадают. Хотя оценки ENDF/B-VI и Маслова отличаются от оценки БРОНД-3, но нет существенных аргументов, чтобы отдать предпочтение одной из них.

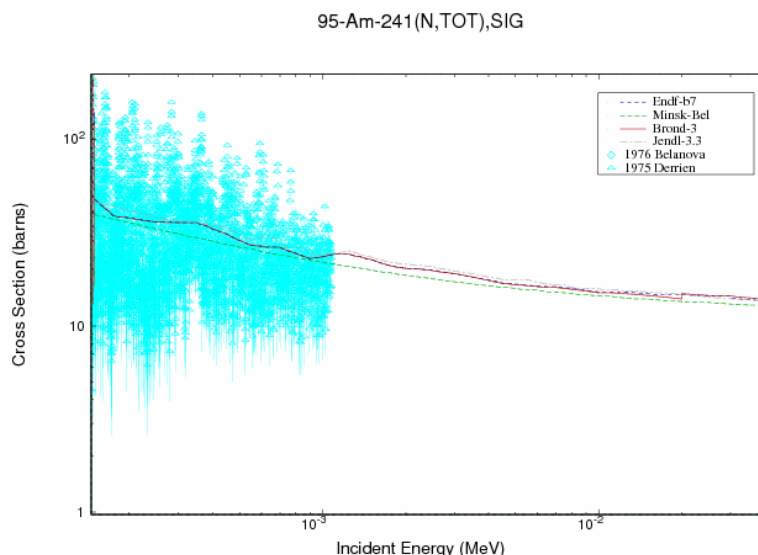


Рисунок 7. Полное сечение Am-241 в области энергий неразрешенных резонансов.

На рисунке 8 показаны сечения деления в области неразрешенных резонансов. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3, ENDF/B-VI и оценка Маслова практически совпадают.

На рисунке 9 представлены экспериментальные и оцененные данные для радиационного захвата. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3, ENDF/B-VI очень близки, но

оценка Маслова лежит несколько ниже и имеет плавный ход, однако в пределах разброса имеющихся экспериментальных данных нет достаточных оснований отдать ей предпочтение.

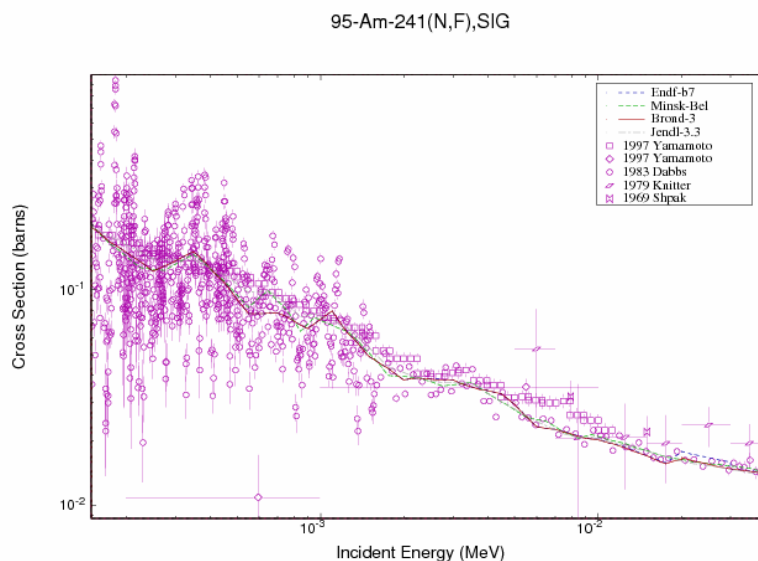


Рисунок 8. Сечение деления Am-241 в области энергий неразрешенных резонансов.

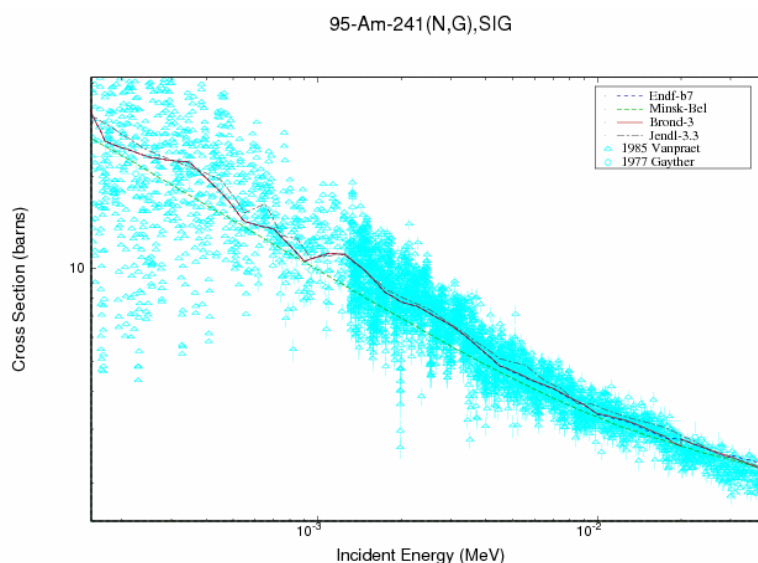


Рисунок 9. Сечение радиационного захвата Am-241 в области энергий неразрешенных резонансов.

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

Полное сечение (MT=1)

В быстрой области энергий нейтронов имеется один ряд экспериментальных данных, по которым проведена оценка ENDF/B-VII (рис. 10). Оценки БРОНД-3, JENDL-3.3 и Маслова, полученные расчетом по теоретическим моделям, различаются с оценкой ENDF/B-VII и между собой, причем в разных диапазонах по-разному. Может быть использована любая из представленных оценок, хотя оценка ENDF/B-VII выглядит предпочтительней.

95-Am-241(N,TOT),SIG

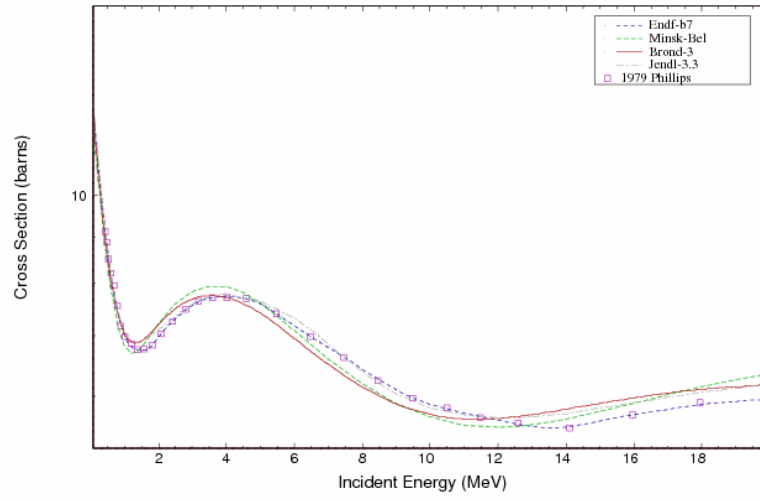


Рисунок 10. Полное сечение Am-241 в области энергий быстрых нейтронов.

Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Сечение упругого рассеяния получено как разница полного сечения и суммы всех неупругих сечений. На рисунке 11 дано сравнение разных оценок. Расхождения между оценками не имеют принципиального характера, и за неимением экспериментальных данных нет возможности отдать предпочтение какой-либо одной из оценок.

Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, обычно, опираются на расчеты по оптической модели, и разногласия в форме дифференциальных сечений рассеяния оказываются подобными расхождениям в полных нейтронных сечениях. Без соответствующих экспериментальных данных предпочтительными являются оценки, в которых достигается лучшее описание полных сечений.

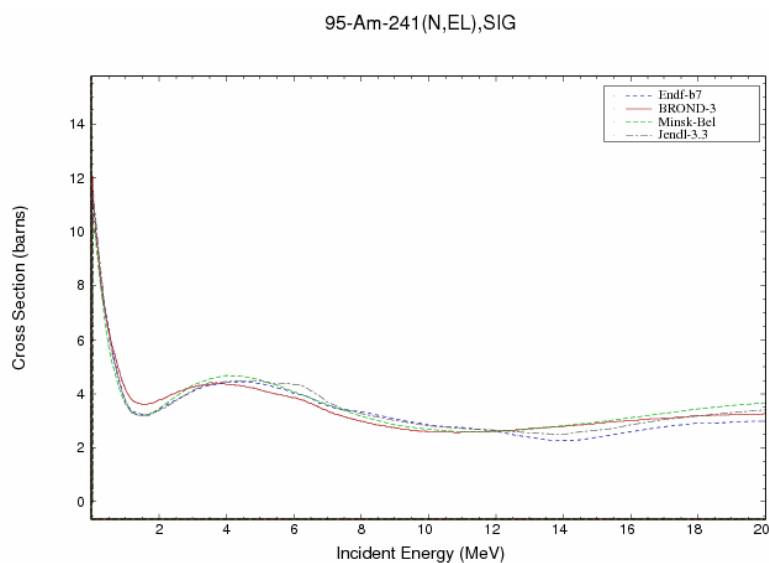


Рисунок 11. Сечение упругого рассеяния Am-241 в области энергий 1-20 МэВ.

Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных нет. На рисунке 12 показаны оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек. Оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII имеют одинаковую форму функции возбуждения и в области энергий выше 6 МэВ оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII практически совпадают, однако при энергиях ниже 6 МэВ имеются различия по абсолютной величине функции возбуждения. Зависимость оценки JENDL-3.3, совпадающая с оценкой Маслова, трудно объяснима при сравнении с функцией возбуждения реакции (n,2n). Оценке БРОНД-3 следует отдать предпочтение, ее форма лучше согласована с формой функции возбуждения реакции (n,2n).

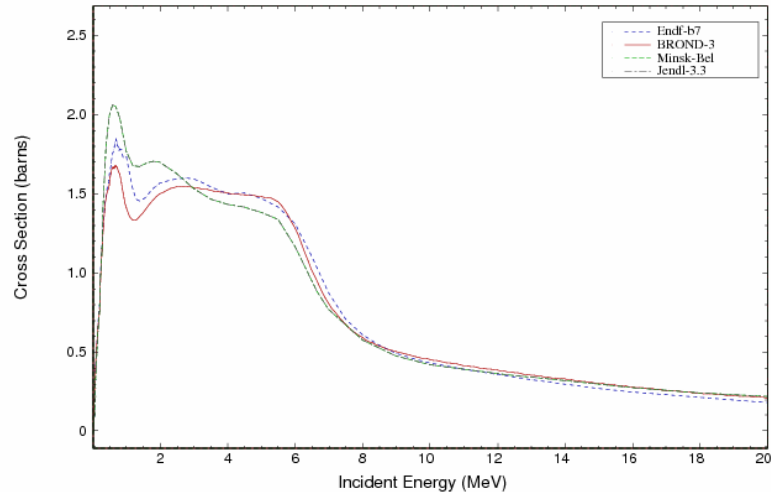


Рисунок 12. Сечение неупругого рассеяния Am-241 в области энергий 1-20 МэВ..

Сечение деления (MT=18)

На рисунке 13 показаны оценки сечений деления. Оценки ENDF/B-VII, БРОНД-3, JENDL-3.3 в области энергий нейтронов до 12 МэВ в пределах экспериментальных погрешностей примерно согласуются между собой. Однако выше 12 МэВ данные оценок ENDF/B-VII и JENDL-3.3 имеют значительный подъем, хотя большой разброс экспериментальных данных не дает уверенности в правильности такого решения. В то же время данные оценки Маслов в этой области сильно занижены и противоречат общей тенденции некоторого подъема сечения деления в области выше максимума в сечении реакции $(n,2n)$ (11-12 МэВ). То же самое можно сказать об оценке Маслова при энергиях 7 - 9 МэВ, предложенный минской группой ход сечения деления не подтверждается другими оценками и экспериментальными данными (и это не только для Am-241).

Оценке БРОНД-3 следует отдать предпочтение, поскольку она лучше соответствует систематическим тенденциям в поведении энергетической зависимости сечений деления, указанные в работе /7/. Кроме того, авторами этой оценки был проведен тщательный анализ и перенормировка экспериментальных сечений на новые стандартные и справочные данные, а полученные скорректированные данные были аппроксимированы методом Паде-аппроксимации /5/. На основе нового метода статистического учета систематических погрешностей экспериментальных данных уточнены рекомендуемые погрешности оцененных данных и определены ковариационные матрицы погрешностей.

На рисунке 14 дана энергетическая зависимость среднего числа нейтронов на деление. В 2001 году Кузьминовым Б.Д. была проведена коррекция оценки на основе экспериментальных данных Хохлова /2/.

Оценка среднего числа запаздывающих нейтронов во всех оценках основана на систематике работы /3/.

Энергетические спектры нейтронов деления были взяты без изменений из оценок ENDF/B-VI.

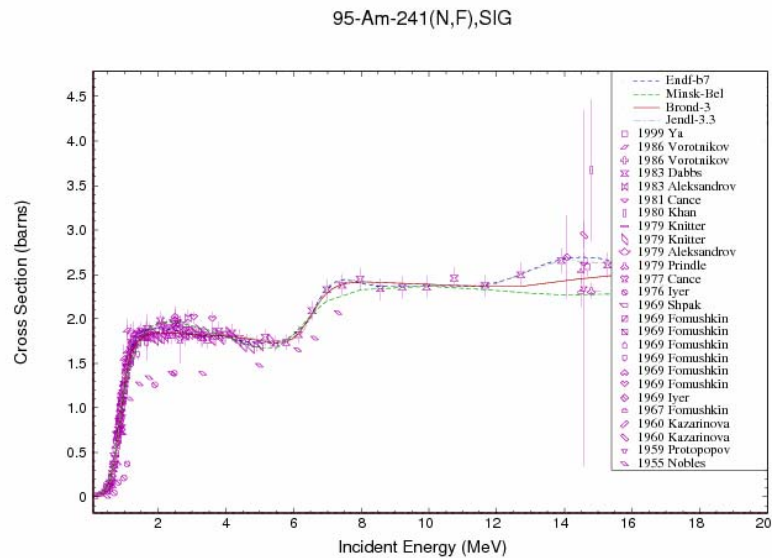


Рисунок 13. Сечение деления Am-241 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

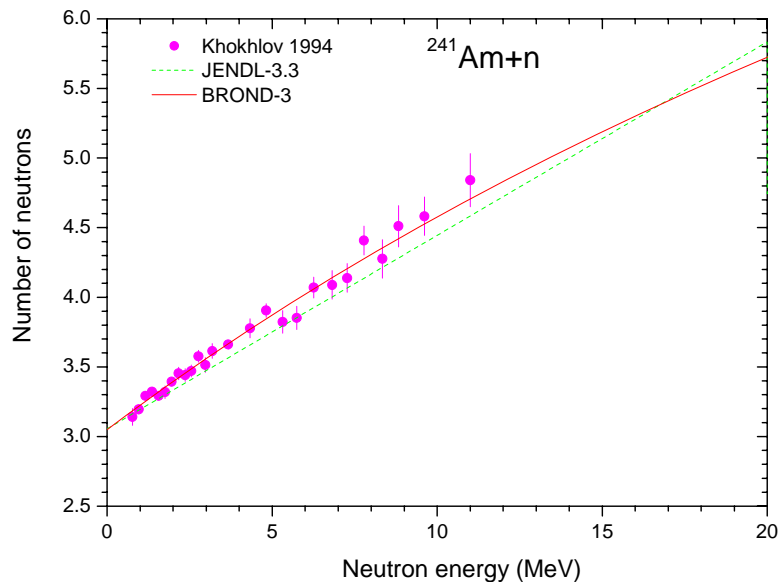


Рисунок 14. Энергетическая зависимость среднего числа нейтронов на деление.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102)

На рисунке 15 приведены оценки сечений радиационного захвата из библиотек ENDF/B-VII, БРОНД-3, JENDL-3.3 и Маслова. В области энергий до 1 МэВ имеется полное согласие всех оценок. Расхождение при более высоких энергиях связаны с использованием различных моделей ядерных реакций и входных параметров к ним.

Экспериментальные данные по сечениям радиационного захвата нейтронов для Am-241 имеются лишь в диапазоне энергий от 1 до 400 кэВ. Детальный анализ и корректировка этих данных выполнены в работе /8/.

В области энергий быстрых нейтронов оценки получены на основе оптико-статистических расчетов с учетом прямого и полупрямого механизма захвата.

В оценке БРОНД-3 для энергий нейтронов выше верхней границы экспериментальных точек в оценке использовалась не только энергетическая зависимость сечений захвата нейтронов, полученная из оптико-статистических расчетов, но и эмпирическая систематика сечений захвата для энергий нейтронов выше 14 МэВ /4/.

Аппроксимирующая кривая для сечений захвата была получена тем же методом, что и для сечений деления.

Анализ совокупности данных по сечениям радиационного захвата нейтронов и накоплению изотопа ^{242m}Am при облучении образцов ^{241}Am в реакторе БН-350 подтверждает предыдущую оценку БРОНД-3 для интегрального сечения радиационного захвата, но указывает на необходимость 10% понижения среднего значения изомерного отношения, определяющего образование изотопа ^{242m}Am . Уточненная оценка изомерного отношения, представленная на рисунке 16, оптимально согласуется с имеющимися прямыми экспериментальными данными, так и с интегральными данными по накоплению ^{242m}Am в быстрых реакторах. Уточнены также погрешности рекомендуемых сечений радиационного захвата нейтронов и соответствующие им ковариационные матрицы.

Уточнены оценки мягкой части спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата и неупругого рассеяния нейтронов.

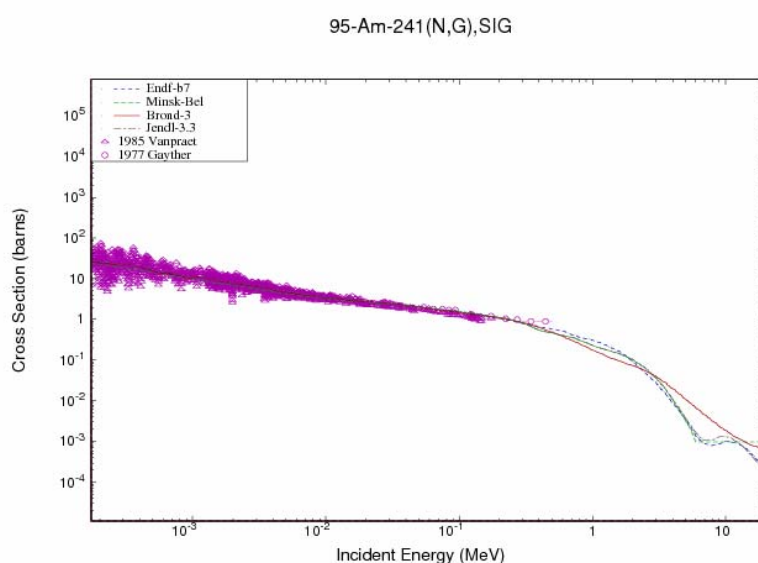


Рисунок 15. Сечение радиационного захвата Am-241 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

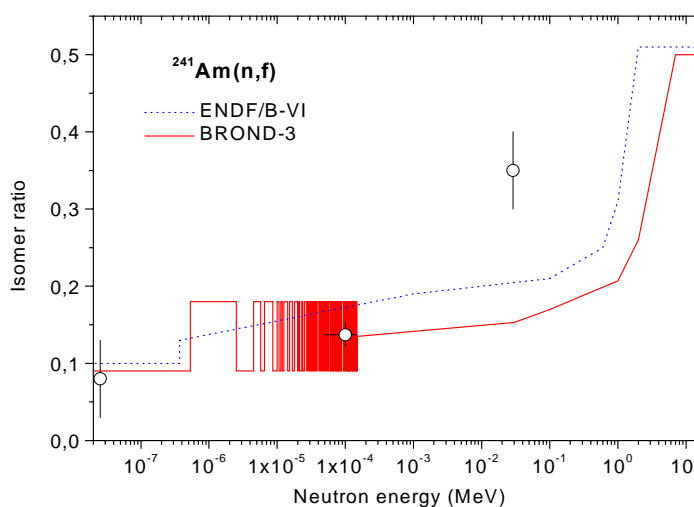


Рисунок 16. Оцененные изомерные отношения для реакции $^{241}\text{Am}(n,\gamma)^{242m}\text{Am}$ в сравнении с имеющимися экспериментальными данными.

Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17)

Оценка сечения реакции $(n,2n)$ в БРОНД-3 была получена расчетом по теоретической модели, но согласована с систематикой функций возбуждения /6/ и с новыми экспериментальными данными работы /9/. В JENDL-3.3 принята оценка Маслова и др. Сравнение оцененных сечений реакции $(n,2n)$ показано на рисунке 17.

Для реакции $(n,3n)$ экспериментальных данных нет. Оценка сечения этой реакции в библиотеке ENDF/B-VII завышена. Следует отдать предпочтение любой из трех других оценок (см. рисунок 18).

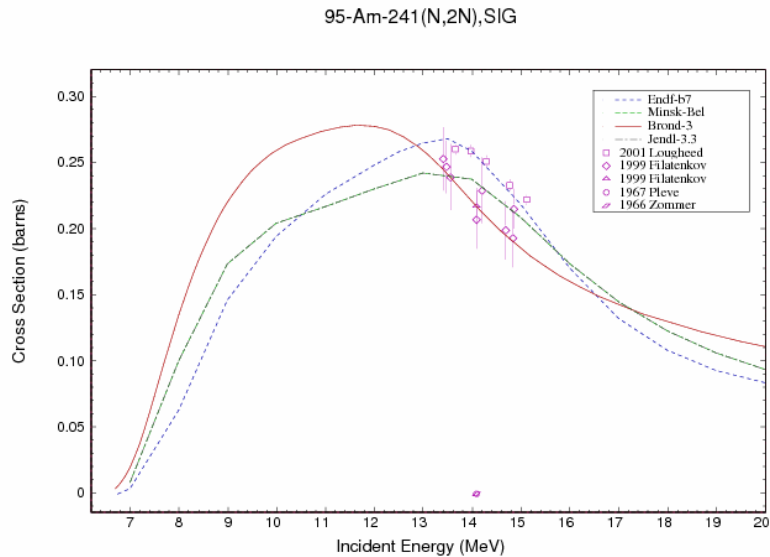


Рисунок 17. Сечение реакции $(n,2n)$.

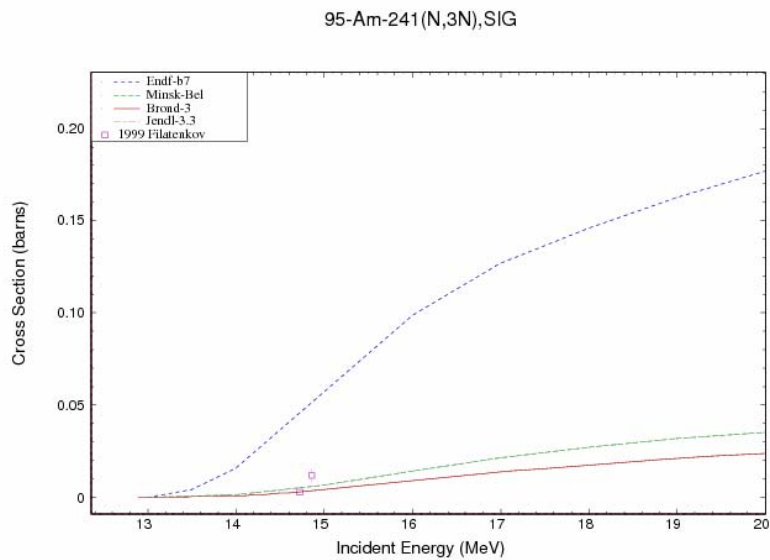


Рисунок 18. Сечение реакции $(n,3n)$.

Заключение.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в области разрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных, и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. Оценки БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений, что свидетельствует о высокой надежности и согласованности данных.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку БРОНД-3¹.

В настоящее время нет каких-либо экспериментальных данных, указывающих на необходимость уточнения этой оценки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mughabghab S.F.: Atlas of Neutron Resonances, Academic Press, NY, 2006 (5-th edition of BNL-325)
Mughabghab.Б.А., Neutron Cross Sections. N.Y.-London, Academic Press, 1984, v.1, part B.
2. Khokhlov Yu.A. et al., Proc. Int. Conf. On Nuclear Data for Sci. and Techn., Gatlinburg, May 9-14, 1994, p.273.
3. Tuttle R.J., Nucl. Sci. Eng., 56(1975)37.
4. Беланова Т.С., Игнатюк А.В., Пашенко А.Б., Пляскин В.И. Радиационный захват нейтронов. М. Энергоатомиздат, 1986.
5. Бадиков С.А. Препринт ФЭИ-1686, Обнинск, 1985.
Badikov S.A., Zolotarev K.I. In: Proc. Spec. Meeting on Evaluation and Processing of Covariance Data (Oak Ridge, 1992). Paris, OECD, 1993, p. 105.
6. Manokhin, V.N. Report INDC(ССР)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
7. Блохин А.И., Манохин В.Н., Насырова С.М., Препринт ФЭИ-2620, 1997.
8. Игнатюк А.В., Толстикова В.А., Золотарев К.И. ВАНТ, Ядерные Константы, 1997, 4,
9. A.Filatnikov et al. VANT, Ser. Nuclear Constants, 1996, is. 2, p.8.

Автор отбора данных

Игнатюк А.В.

95.3. Америций-242

Оценки сечений Am -242 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и в библиотеке Маслова и др. (Минск).

В JEFF-3.1 приняты данные библиотеки JENDL-3.3.

ENDF/B-VII выпущена в 2004 году. Она представляет собой редакцию оценки Маслова выше 44.3 кэВ. В этой области энергий оценка сечений проводилась с использованием программ ECIS96 и GNASH. Сечение деления взято таким же, как и для изотопа Am-242m, которое получено на основе экспериментальных данных.

1. ¹ Файл MF=8 удалить. Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. Включить файл MF=8 с секциями MT=454 и MT=459 из ENDF/B-VI.– М.Николаев.

Оценка Маслова и др. выполнена в 1997 году в рамках проекта МНТЦ (CIS-03-95).
 Оценка JENDL-3.3 датирована 1997 годом как оценка Маслова. Однако, в 2000 году она была модифицирована в области энергий выше 44.3 кэВ.

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 95$ -зарядовое число;
- 1.2. $A = 242$ (атомный вес);
- 1.3. $AWR = 239.980$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 16.02$ часа, с вероятностью 82.7% испытывает β_- -распад в Cm-242, и с вероятностью 17.3% испытывает ϵ -распад в Pu-242.
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ (согласно ENDF/B):

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|---------|---------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | n,n' | -0.0441 | 0.04428 | Am-242, Am-242m |
| 16 | n,2n | -5.5376 | 5.5605 | Am-241 |
| 17 | n,3n | -12.179 | 12.2293 | Am-240 |
| 18 | деление | 200.0 | 0.0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 6.3671 | 0.0 | Am-243 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных и неразрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов во всех библиотеках ограничена энергией 100 эВ.

Область неразрешенных резонансов – 44.3 кэВ.

Сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в сравнении рекомендованными экспериментальными данными Мухабхаба приведены в таблице 3.

Таблица 3. Резонансные свойства Am-242, барн.

| | JENDL-3.3 | МИНСК | ENDF/B-VII | Мухабхаб |
|-----------------|-----------|-------|------------|----------|
| σ_f | 2095. | 2095. | 2095. | 2100±200 |
| σ_γ | 219. | 219. | 219. | - |
| I_f | 987. | 987. | 987. | - |
| I_γ | 187. | 187. | 187. | - |

Как видно из информации приведенной в таблице 3, резонансные свойства всех оценок одинаковы и согласуются с рекомендацией Мухабхаба.

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

Полное сечение (MT=1)

В быстрой области энергий нейтронов экспериментальные данные отсутствуют. Оценки ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и Маслова, получены расчетом по разным теоретическим моделям, различаются между собой, причем в разных диапазонах по-разному (см. рисунок 19). Может быть использована любая из представленных кривых.

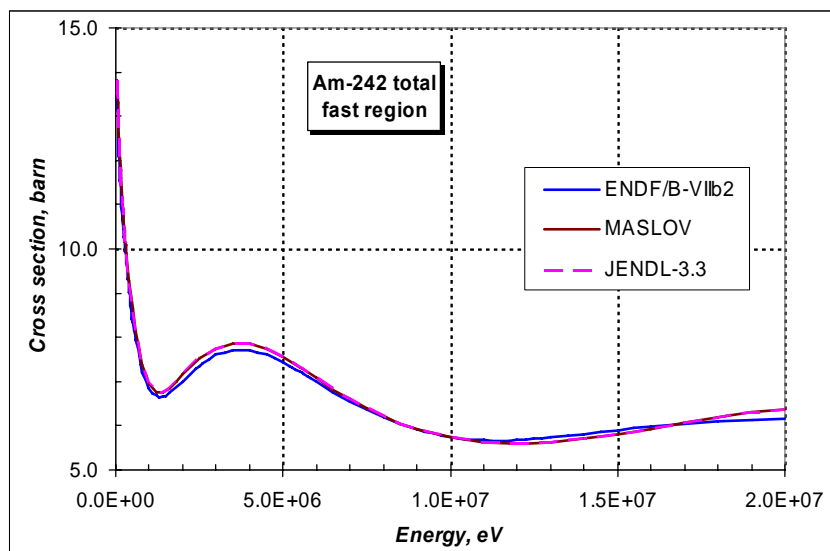


Рисунок 19. Полное сечение Am-242 в области энергий до 20 МэВ.

Сечение деления (MT=18)

На рисунке 20 показаны оценки сечений деления.

Из приведенного на рисунке 20 сравнения видно, что оценки ENDF/B-VII и Маслова согласуются между собой примерно с 30% погрешностью. Однако в оценке Маслова сечение рассчитывалось по статистической модели, где параметры барьеров деления подгонялись под результаты расчета для Am-242m. В оценке ENDF/B-VII, как указано информационной секции, сечение деления взято таким же, как и для изотопа Am-242m, которое получено на основе экспериментальных данных.

На рисунке 20 дана и энергетическая зависимость среднего числа нейтронов на деление. Для всех оценок она одна и та же.

Оценка среднего числа запаздывающих нейтронов во всех оценках так же одна и та же.

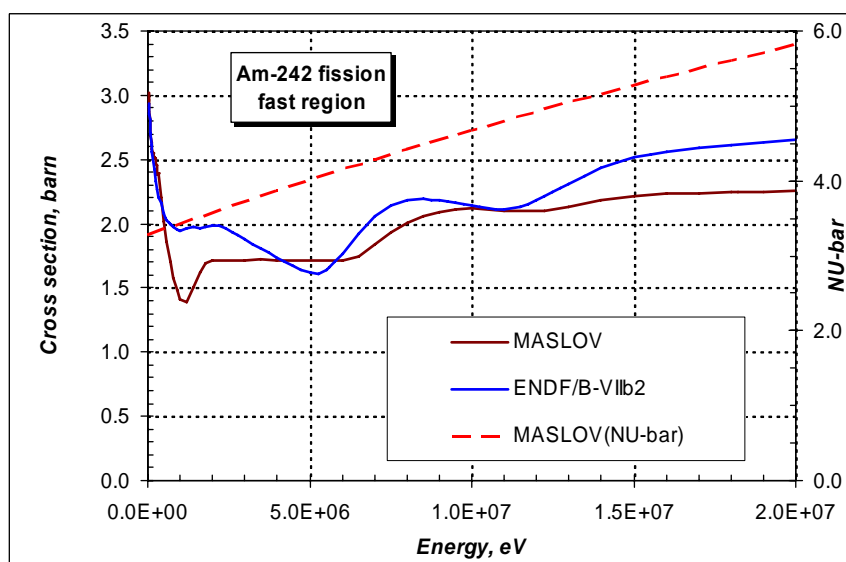


Рисунок 20. Сечение деления Am-242 в области энергий до 20 МэВ.

На рисунке 21 показано сравнение сечения деления для основного изотопа Am-242 и для его изомерного состояния, которые были оценены для библиотеки ENDF/B-VII. Там же показано оцененное Масловым сечение деления для Am-242. Из рисунка 21 видно, что

оценка Маслова лучше согласуется по поведению сечения с оценкой сечения для долгоживущего изомера, т.е. она является предпочтительнее, чем оценка ENDF/B-VII.

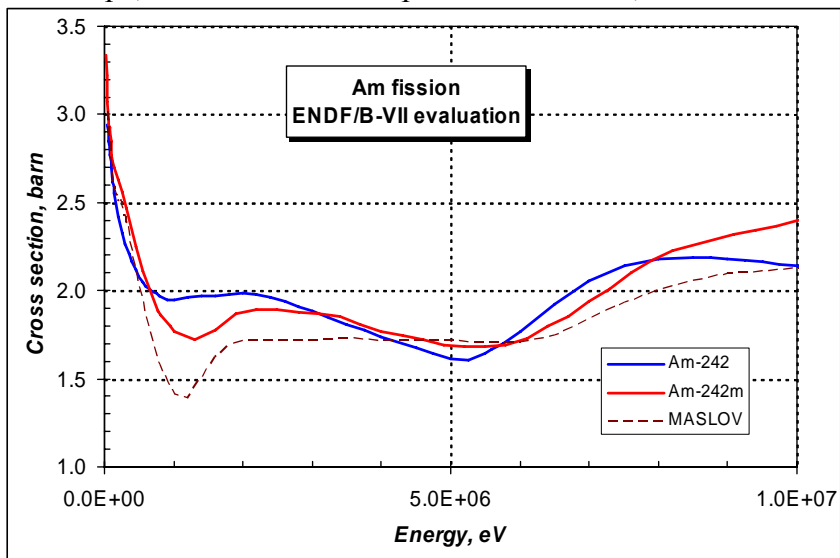


Рисунок 21. Сравнение сечения деления Am-242 и Am-242m.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102)

На рисунке 22 приведены оценки сечений радиационного захвата из библиотек ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и Маслова. В области энергий до 1 МэВ имеется полное согласие всех оценок. Расхождения при более высоких энергиях связаны с использованием различных моделей ядерных реакций и входных параметров к ним.

Экспериментальных данных по сечениям радиационного захвата нейтронов для Am-242 нет.

В области энергий быстрых нейтронов оценки получены на основе оптико-статистических расчетов с учетом прямого и полупрямого механизма захвата.

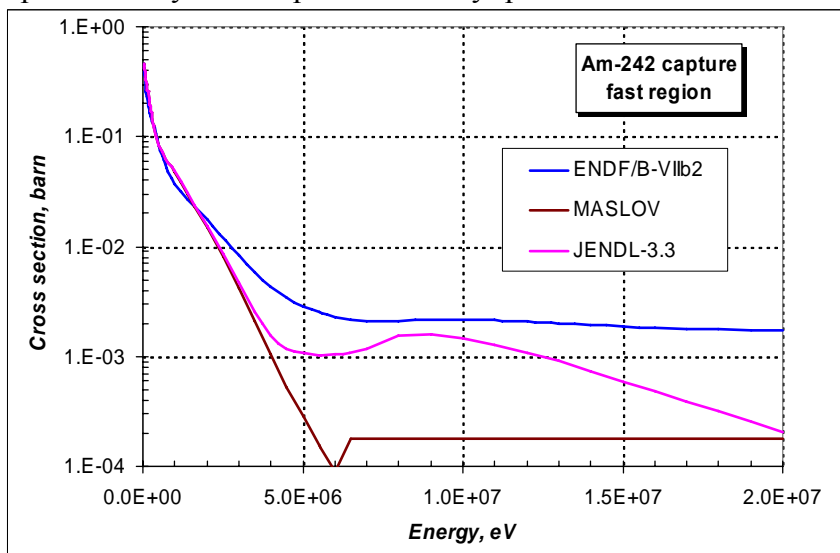


Рисунок 22. Сечение радиационного захвата нейтронов на Am-242 в области энергий до 20 МэВ.

Из приведенного на рисунке 22 сравнения видно, почему в JENDL провели коррекцию сечения захвата в быстрой области. Ход сечения захвата японской оценки предпочтительнее остальных.

Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17)

Сравнение оцененных сечений реакции (n,2n) и (n,3n) показано на рисунке 23. По форме кривой более привлекательной является оценка Маслова.

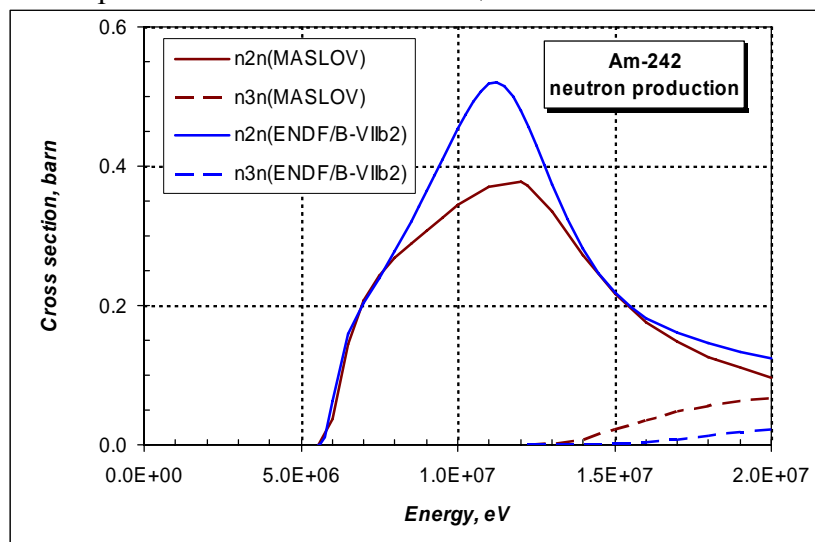


Рисунок 23. Сечение реакции (n,2n) и (n,3n) на Am-242 в области энергий до 20 МэВ.

Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных нет. На рисунке 24 показаны оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек. Они различаются ~ на 20% в максимуме сечения. Оценке Маслова следует отдать предпочтение, ее форма лучше согласована с формой функции возбуждения реакции (n,2n).

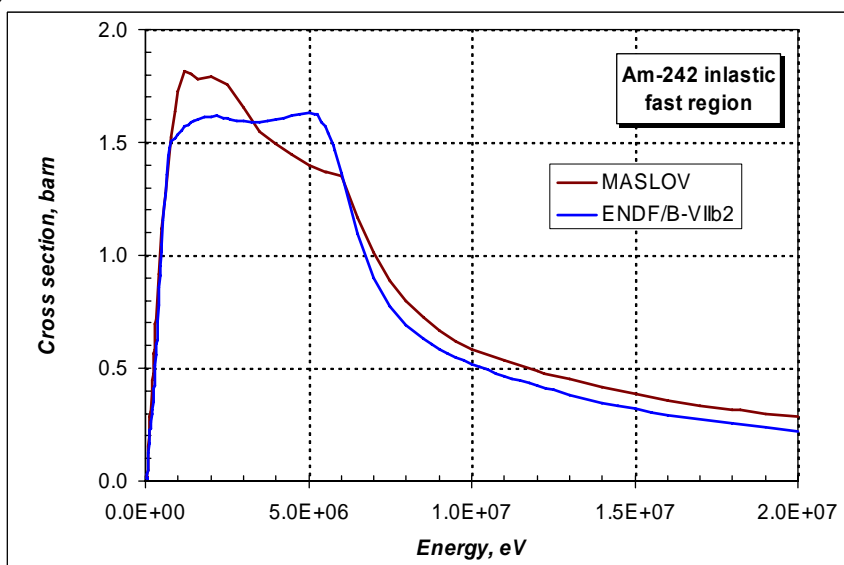


Рисунок 24. Сечение неупругого рассеяния Am-242 в области энергий до 20 МэВ.

Следует отметить, что согласно оценке EAF2003 неупругое рассеяние нейтронов на ядре Am-242 приводит к образованию долгоживущего изомера Am-242m. Следовательно, принятый в РОСФОНД файл оцененных данных необходимо дополнить данными об образовании долгоживущего изомера в разделе MF10, MT4.

Заключение.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в области резонансных энергий все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных.

В области высоких энергий предпочтительнее оказывается откорректированная версия оценки Маслова, принятая в JENDL-3.3.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку JENDL-3.3.²

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

95.4. Америций-242m

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для америция-242m:

Минск-1997 – оценка В.М.Маслова и др., 1997;

JENDL-3.3 (=JEFF-3.1) – оценка T.Nakagawa, 2002, в которой принята оценка Минск-1997 для большинства сечений, но пересмотрена оценка сечений деления;

БРОНД-3 – оценка А.В.Игнатюка и др., 2001, в которой также принята оценка Минск-1997 для большинства сечений, но пересмотрена оценка сечений и числа нейтронов деления;

ENDF/B-VII – оценка P.Telou и др., 2005.

1. Общие характеристики

1.1. $Z = 95$ -зарядовое число;

1.2. $A = 242$ (атомный вес);

1.3. $AW = 239.9800$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);

1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 141 \pm 2$ года, доминируют гамма-переходы с энергией 48.63 кэВ в основное состояние (99.55%) с вкладом 0.45% α -распада и $\sim 4.7 \cdot 10^{-9}$ % спонтанного деления.

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов

В атласе нейтронных резонансов Мугабгаба [84М, 06М] приведены параметры резонансов с энергиями до 19.7 эВ. В оценке Минск-1997 верхняя граница области

² Файл нейтронных данных следует дополнить информацией об образовании долгоживущего изомера Am-242m. Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235.- М. Николаев.

разрешенных резонансов расширена до 43 эВ, и параметры резонансов выше 19.7 эВ определены на основе анализа данных по сечениям деления [84В]. Для всех резонансов приняты значения радиационных ширин 50 мэВ и радиус потенциального рассеяния $R_0 = 9.1677$ фм. Параметры отрицательного резонанса определены из условий описания рекомендованных сечений деления и захвата тепловых нейтронов [06М]. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближение MLBW.

Оценка Минск-1997 для разрешенных резонансов была включена без изменений в JENDL-3.3, ENDF/B-VII и БРОНД-3.

Делительные ширины, принятые в Минск-1997, приведены на рисунке 25 в сравнении с данными компиляции Мугабгаба [06М]. Для резонансов с энергиями ниже 20 эВ разногласия оценок делительных ширин весьма незначительны, а выше этой энергии имеются лишь данные, полученные минской группой и принятые во всех последних оценках.

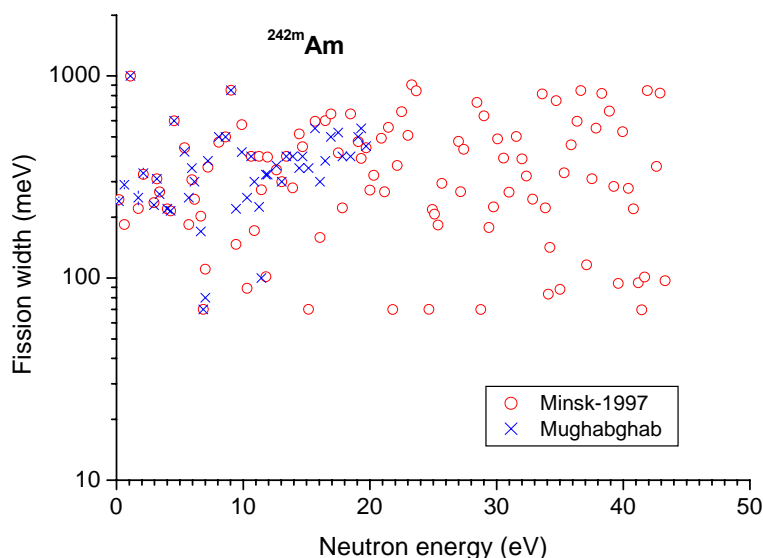


Рисунок 25. Делительные ширины разрешенных резонансов в оценке Минск-1997 в сравнении с данными компиляции ширин в атласе нейтронных резонансов [06М]

Расчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице 4.

Таблица 4. Резонансные свойства Am-242m, барн.

| Оценка | Минск-1997 | ENDF/B-VII | Эксперим. [84М], [06М] | |
|-----------------------------------|------------|------------|------------------------|----------|
| полное | 7624.7 | 7624.7 | -- | |
| упругое | 5.25 | 5.25 | -- | |
| захвата | 1229.2 | 1229.2 | 2000±600 | 1290±300 |
| деления | 6390.2 | 6390.2 | 6950±280 | 6200±200 |
| резонансный интеграл выше 0.5 эВ: | | | | |
| захвата | 237.8 | 239.0 | -- | 211 выч. |
| деления | 1527.0 | 1541.8 | 1800±65 | 1570±80 |

В новом издании атласа нейтронных резонансов [06М] экспериментальные значения сечений и резонансных интегралов деления и захвата нейтронов были уточнены по отношению к предыдущему изданию [84М], и в пределах погрешности оценки согласуются с уточненными данными. Небольшие различия резонансных интегралов в оценках Минск-1997 и ENDF/B-VII обусловлены влиянием вне резонансной области.

На рисунке 26 представлена энергетическая зависимость числа s-резонансов, содержащихся в компиляции [06М] и оценке Минск-1997, а также кумулятивных сумм

приведенных нейтронных ширин. Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов обычно привлекают анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа для набора резонансных параметров Минск-1997 представлены на рисунке 27. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов пропущено более 50% слабых резонансов, и средние расстояния между резонансами, исправленное с учетом пропуска, равно $D_0=0.23\pm 0.05$ эВ и нейтронная силовая функция s-резонансов равна $S_0=(1.32 \pm 0.18) 10^{-4}$. В аналогичном анализе Мухабхаба [06] для резонансов до 20 эВ получены значения $D_0=0.29\pm 0.02$ эВ и $S_0=(1.47\pm 0.25) 10^{-4}$, тогда как в анализе Маслова и др. [2] для набора резонансов до 37 эВ получены $D_0=0.27\pm 0.03$ эВ и $S_0=(1.22\pm 0.25) 10^{-4}$. С учетом погрешностей значения S_0 можно считать совпадающими во всех оценках, тогда как значения D_0 в анализе Мухабхаба [06] кажется несколько завышенным, по-видимому, вследствие недооценки пропуска резонансов.

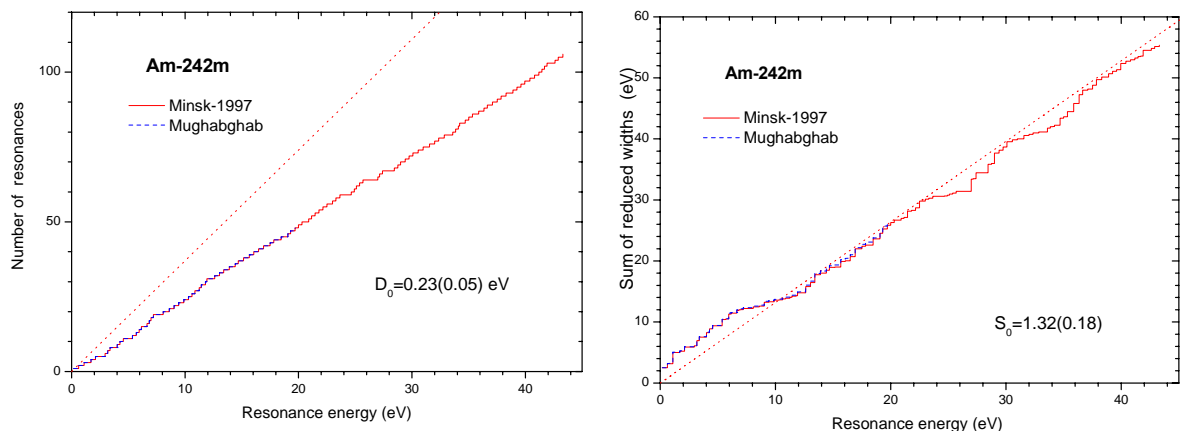


Рисунок 26. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин в различных оценках. Штрих-пунктиром показаны оценки, полученные с учетом пропуска резонансов

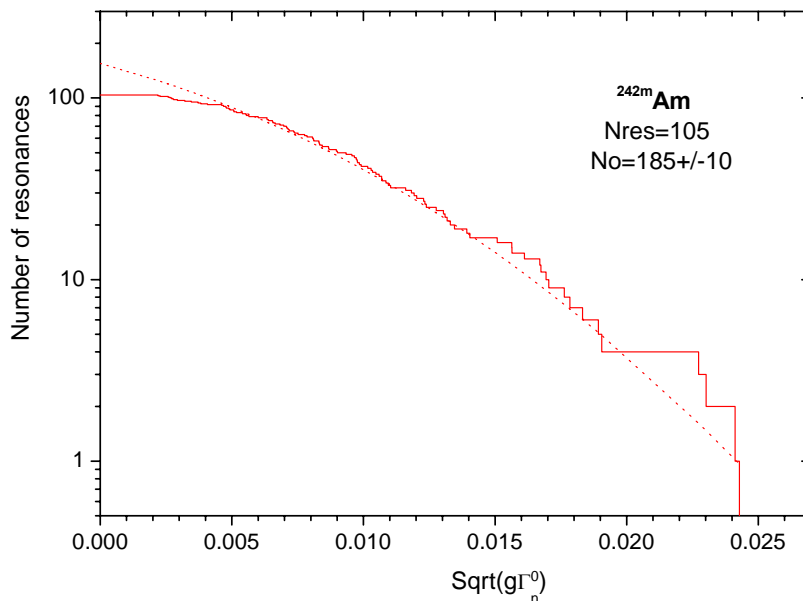


Рисунок 27. Анализ пропуска резонансов на Am-242m.

На рисунке 28 показана оценка сечений деления Минск-1997 для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Описание экспериментальных данных является достаточно хорошим во всем диапазоне энергий до

43 эВ, и это послужило основной причиной включения оценки Минск-1997 в файлы всех современных национальных библиотек ядерных данных.

Для полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов резонансная структура имеет вид, аналогичный сечениям деления, но экспериментальных данных для этих сечений нет.

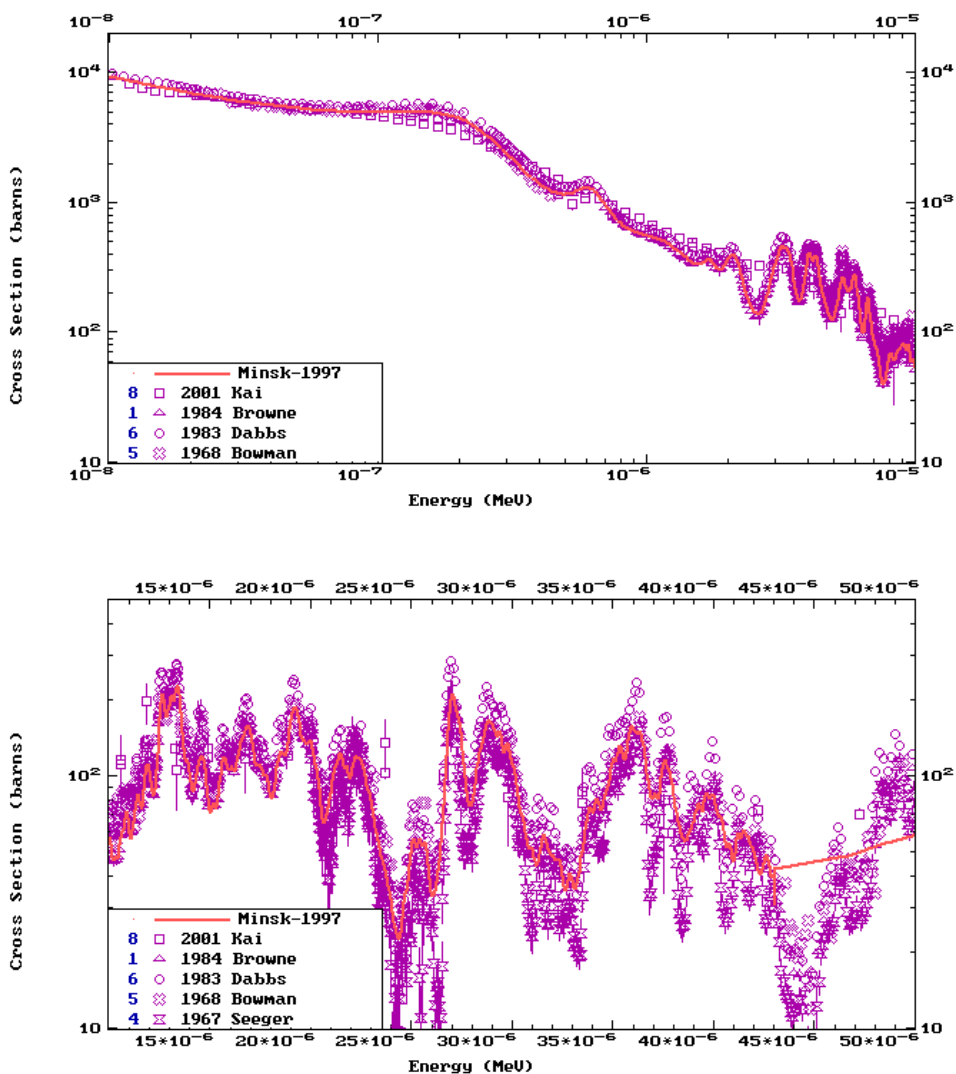


Рисунок 28. Оценки сечений деления Am-242m в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в оценке Минск-1997 принята равной 27.283 кэВ, и эта оценка включена без изменений в файлы всех указанных выше библиотек. В рассмотрение включены орбитальные моменты для s-, p- и d-волн, и в соответствии с правилами формата ENDF/B для вычисления нейтронных сечений принято приближение SLBW.

Радиус потенциального рассеяния и нейтронные силовые функции p- и d-волн были взяты из расчетов по оптической модели, тогда как силовая функция s-волны, среднее расстояние между резонансами и средние радиационные и делительные ширины были приняты в соответствии с результатами анализа разрешенных резонансов. Энергетическая

и спиновая зависимость делительных ширин учитывалась в рамках стандартной статистической модели двугорбого барьера деления [97M]. Для нижней границы использованные параметры имели следующие значения:

$R_0 = 9.1677$ фм, $S_0 = 1.215E-4$, $S_1 = 2.020E-4$, $S_2 = 1.54E-4$, $D_0 = 0.271$ эВ, $\Gamma_g = 0.050$ эВ и $\Gamma_f = 395$ эВ.

На рисунке 29 оценка сечения деления Минск-1997 для области неразрешенных резонансов приведена в сравнении с экспериментальными данными. Описание данных следует признать вполне удовлетворительным, и без дополнительных экспериментальных данных не видно каких либо возможностей улучшения рассматриваемой оценки.

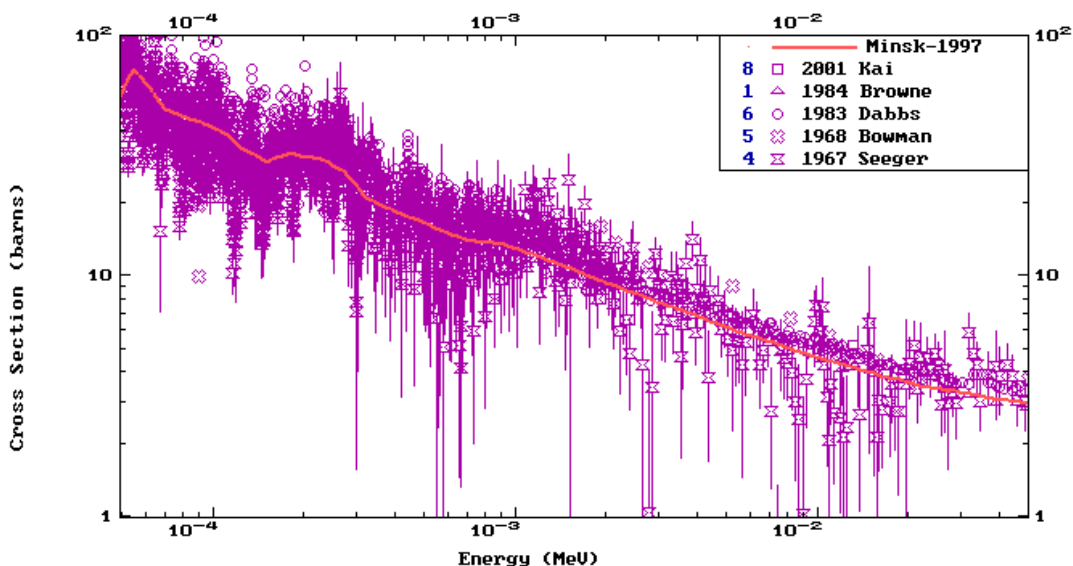


Рисунок 29. Сечение деления Am-242m (Минск-1997) в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными.

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

3.1. Полные сечения (MT=1)

Экспериментальных данных о полных нейтронных сечениях вне резонансной области для ^{242m}Am нет. Поэтому все оценки полных сечений проводятся на основе расчетов в рамках оптической модели. Соответствующие оценки для энергий нейтронов выше 100 кэВ представлены на рисунке 30. Отличие оценок ENDF/B-VII и Минск-1997 обусловлено различием использованных оптических потенциалов, но разногласия оценок весьма незначительны. В JENDL-3.3 и БРОНД-3 была принята оценка полных сечений минской группы во всем диапазоне энергий нейтронов.

3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рисунке 31 показано сравнение оценок интегральных сечений упругого рассеяния нейтронов.

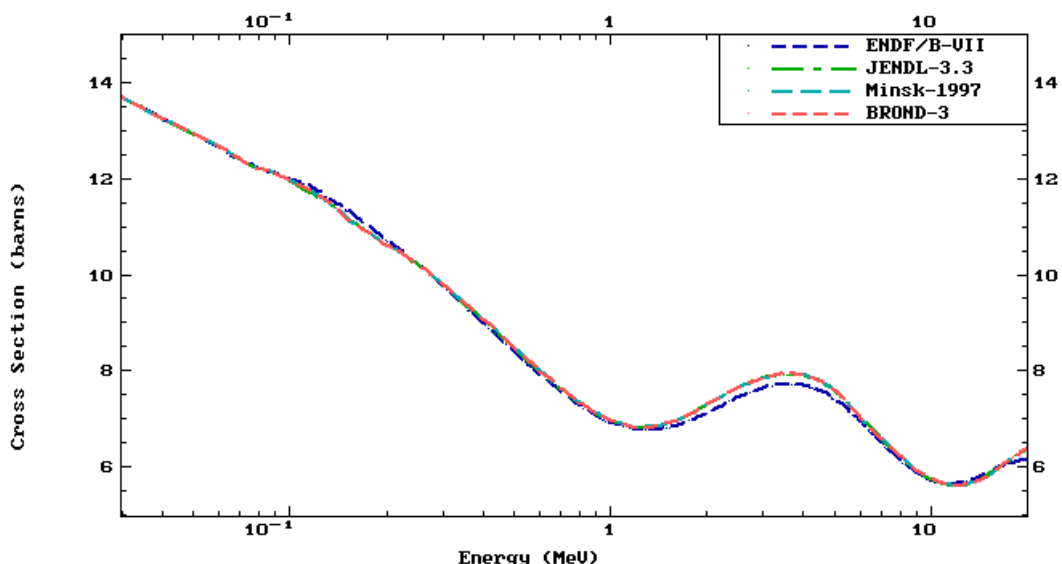


Рисунок 30. Сравнение полных нейтронных сечений Am-242m вне резонансной области

Несмотря на совпадение оценок полных нейтронных сечений, оценки JENDL-3.3, Минск-1997 и БРОНД-3 для сечений упругого рассеяния заметно различаются в области быстрых нейтронов, и эти различия обусловлены соответствующими разногласиями оценок сечений деления. Следует ожидать, что более корректной для сечений упругого рассеяния будут оценка, в которой достигнуто лучшее описание сечений деления рассматриваемого изотопа.

Оптическая модель используется также для расчетов угловых распределений упруго и неупруго рассеянных нейтронов. Различия полученных угловых распределений для упругого рассеяния весьма незначительны в оценках Минск-1997 и ENDF/B-VII. В JENDL-3.3 и БРОНД-3 были приняты оценки угловых распределений минской группы.

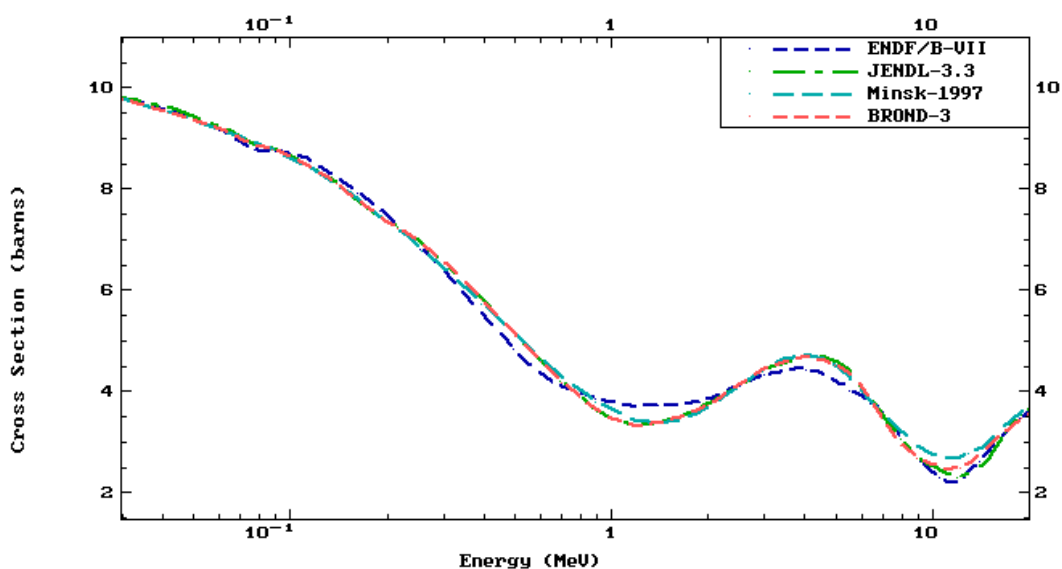


Рисунок 31. Сравнение сечений упругого рассеяния Am-242m вне резонансной области

3.3. Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

Экспериментальных данных по сечению радиационного захвата нейтронов для ^{242m}Am нет, и оценки, обычно, проводятся на основе расчетов по оптико-статистической модели с привязкой радиационных силовых функций к значениям, полученным из анализа нейтронных резонансов. Сравнение оценок Минск-1997 и ENDF/B-VII для сечений радиационного захвата быстрых нейтронов показано на рисунке 32. Различие между оценками сравнительно невелико в области энергий нейтронов до 2 МэВ, и только выше этой энергии разногласия оценок становятся существенными. Следует, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 1 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не оказывает сколь либо заметного влияния на расчеты характеристик ядерных реакторов.

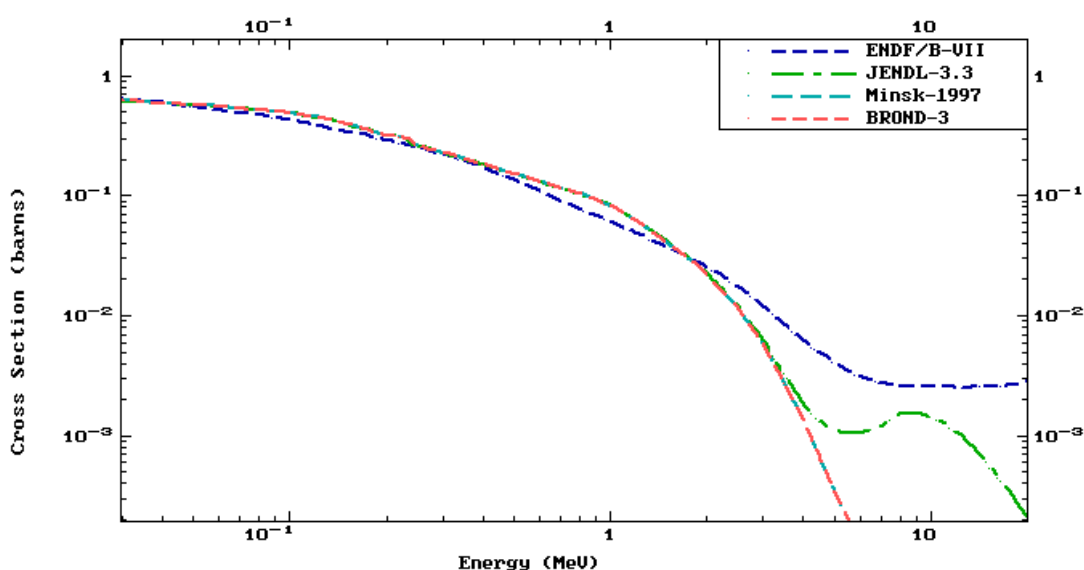


Рисунок 32. Сравнение сечений радиационного захвата Am-242m вне резонансной области

3.4. Реакция деления (MT=18)

Для сечений деления имеется большой объем экспериментальных данных, между которыми, однако, имеются существенные разногласия. Новые экспериментальные данные [97F], полученные в конце девяностых годов, лежат несколько ниже основной массы предыдущих данных, и на эти данные ориентируется большинство недавних оценок сечений деления. Полный статистический анализ всей совокупности экспериментальных данных был проведен в работе [01И], и его результаты приняты в качестве оценки БРОНД-3, приведенной на рисунке 33 совместно с экспериментальными данными и другими оценками. На основе метода статистического учета систематических погрешностей экспериментальных данных были уточнены рекомендуемые погрешности оцененных сечений деления и определена ковариационная матрица погрешностей. Важной особенностью полученной ковариационной матрицы является достаточно большие значения далеких недиагональных элементов, отражающие корреляции рекомендуемых данных в широких энергетических интервалах.

В области энергий нейтронов до 7 МэВ все оценки удовлетворительно согласуются с данными измерений [84В, 97F], которые представляются наиболее надежными. Для

более высоких энергий оценку Минск-1997, несомненно, следует признать заниженной и противоречащей экспериментальным данным. С другой стороны, оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, описывающие экспериментальные данные в области энергий выше 10 МэВ, имеют энергетическую зависимость, противоречащую общим закономерностям «ступенеобразного» роста сечений деления при увеличении энергии нейтронов. Поэтому оценка БРОНД-3, оптимально описывающая всю совокупность экспериментальных данных, представляется для сечений деления наиболее надежной.

Наряду с сечениями деления одной из важнейших характеристик делящихся ядер является множественность нейтронов деления. Оценки числа вторичных нейтронов, испускаемых при делении ^{242m}Am , приведены на рисунке 34 в сравнении с имеющимися экспериментальными данными [70J, 81H]. Погрешности экспериментальных данных для нейтронов с энергиями выше 2 МэВ весьма значительны, и на их основе нельзя сделать выбор между оценками Минск-1997 и БРОНД-3, различия которых весьма незначительны. В JENDL-3.3 и ENDF/B-VII принята оценка Минск-1997.

Для среднего числа запаздывающих нейтронов в Минск-1997 принята оценка Брэди и Ингланда [89B]: $\nu_d = 0.0078$ для энергии нейтронов ниже 4 МэВ и $\nu_d = 0.00427$ выше 7 МэВ. Эта же оценка включена в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII. Аналогичная оценка БРОНД-3 основана на рекомендациях работа [00Z]: $\nu_d = 0.0069$ для энергии нейтронов ниже 4 МэВ и $\nu_d = 0.00414$ выше 7 МэВ. Без дополнительной экспериментальной информации вряд ли можно обосновать выбор между этими оценками.

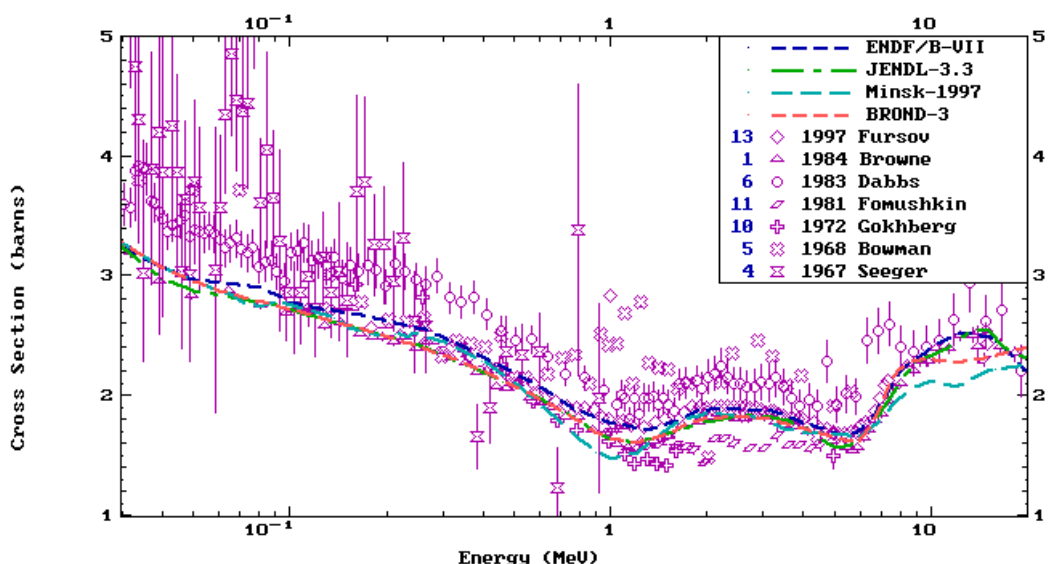


Рисунок 33. Оценки сечений деления Am-242m вне резонансной области в сравнении с экспериментальными данными

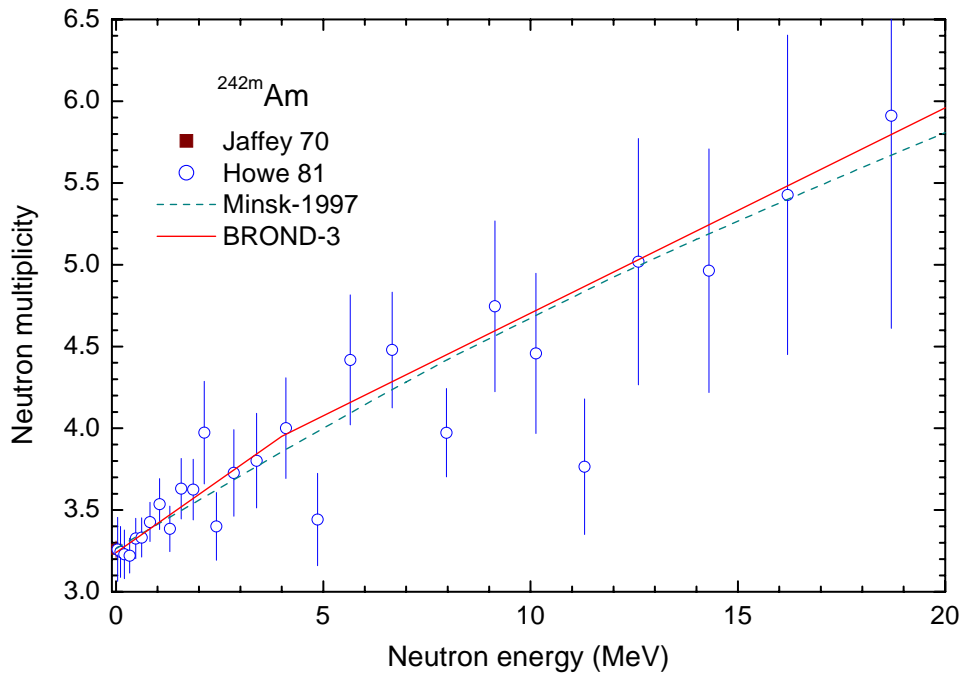


Рисунок 34. Оценки множественности нейтронов деления Am-242m в сравнении с экспериментальными данными

3.5. Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах. В Минск-1997 рассматривался спектр 25 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в ENDF/B-VII – 33 уровней. Так как при увеличении числа уровней соответствующим образом изменяется порог статистического описания уровней, так называемый континуум уровней, то различия в числе рассматриваемых уровней не должно заметно отражаться на оценках полного (интегрального) сечения неупругого рассеяния.

Экспериментальных данных по неупругому рассеянию нейтронов для ^{242m}Am нет. Сравнение оценок сечений неупругого рассеяния показано на рисунке 35. Отличие оценок ENDF/B-VII и Минск-1997 обусловлено различием использованных оптических потенциалов, но разногласия оценок не очень большие. Без дополнительной экспериментальной информации вряд ли можно обосновать предпочтение какой-либо из оценок. Как уже отмечалось выше в JENDL-3.3 и БРОНД-3 была принята оценка Минск-1997.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов все оценки учитывают вклад прямых процессов для уровней ротационной полосы, который приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов. Для рассеяния на более высоких неколективных уровнях учтена небольшая анизотропия угловых распределений нейтронов, обусловленная предравновесными процессами.

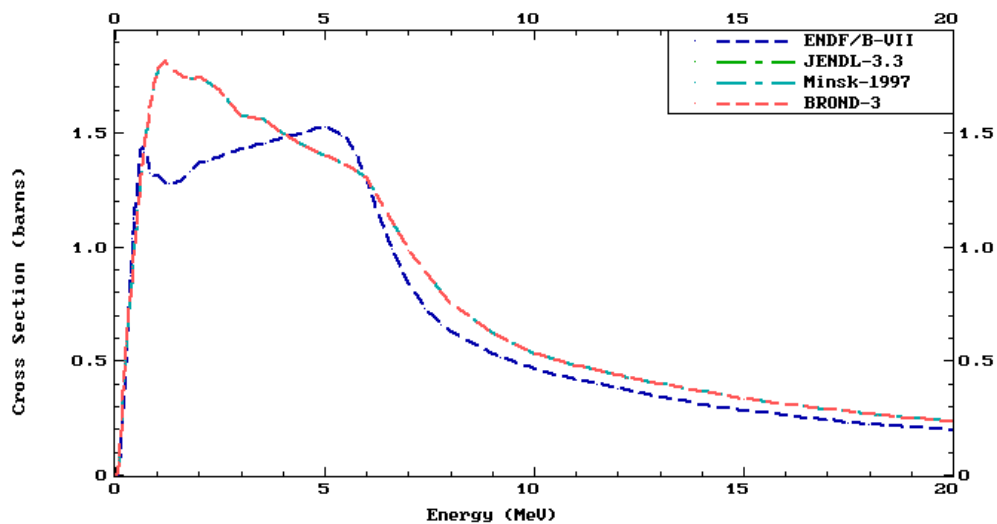


Рисунок 35. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов Am-242m.

3.6. Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT= 17)

Имеющиеся оценки интегральных сечений реакции (n,2n) показаны на рисунке 36. Экспериментальных данных по реакции (n, 2n) на ^{242m}Am нет. Различия оценок не очень значительны, но, тем не менее, оценка Минск-1997 кажется предпочтительной ввиду общего подобия энергетической зависимости сечения с аналогичными зависимостями для близлежащих делящихся ядер, имеющих соответствующие экспериментальные данные. Ход оценки ENDF/B-VII в окрестностях максимума кажется не естественным.

Экспериментальных данных о сечении реакций (n,3n) также нет. Сечение этой реакции существенно только выше 14 МэВ. При энергиях 18 - 20 МэВ сечение не превышает значений 50-70 мбарн.

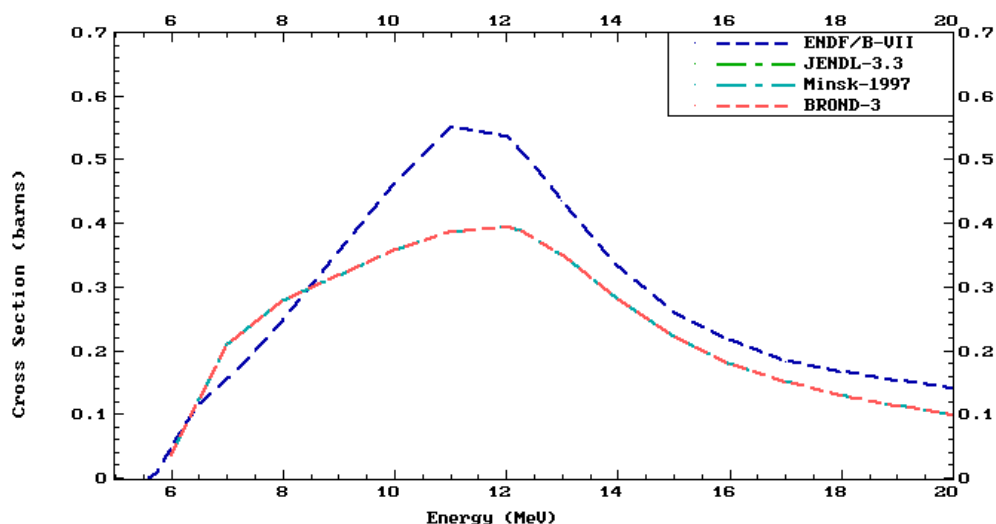


Рисунок 36. Оценки сечений реакций (n,2n) Am-242m.

4. Сечения образования и спектры гамма-лучей (MF=12, 13, 14, 15)

В файлах Минск-1997 и ENDF/B-VII нет оценок выходов гамма-лучей. Оценки интегральных выходов и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата, неупругого рассеяния нейтронов и деления ^{242m}Am содержатся только в БРОНД-3. Они получены на основе оптико-статистических расчетов по программе GNASH с параметрами, тестированными на аналогичных расчетах для изотопов урана и плутония.

Угловые распределения всех типов гамма-излучения приняты изотропными.

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что оценка Минск-1997 обеспечивает оптимальное описание имеющейся совокупности экспериментальных данных для ^{242m}Am в области разрешенных и неразрешенных резонансов, и эта оценка включена во все более поздние оценки: БРОНД-3, JENDL-3.3 (=JEFF-3.1) и ENDF/B-VII. Однако, описание сечений деления для быстрых нейтронов в оценке Минск-1997 нельзя признать удовлетворительным, и такое описание было уточнено в оценках БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII. Оценку БРОНД-3, опирающуюся на совокупность теоретических расчетов и статистических методов описание критически выбранных экспериментальных данных, по-видимому, можно признать оптимальной. БРОНД-3 является также единственной оценкой, включающей выходы гамма-лучей.

Для библиотеки РОСФОНД в настоящее время целесообразно принять оценку БРОНД-3³. Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. Ввести файл MF=10 с сечением перехода в основное состояние на основе EAF2003.

Автор отбора данных

Игнатюк А.В.

ЛИТЕРАТУРА

- 70J A.H.Jaffey, J.L.Lerner, Nucl. Phys., **A145** (1970) 1;
81H R.E.Howe et al., Nucl. Sci. Eng., **77** (1981) 454.
84B J.C.Browne et al., Phys. Rev., **29** (1984) 2188.
89B M.C.Brady, T.R.England, Nucl. Sci. Eng., **103** (1989) 129.
97F B.I.Fursov et al., Nuclear Data for Science and Technology (Trieste, 1997), Eds. G.Reffo, A.Ventura, C.Grandi, IPS, Bologna, 1997, v. 1, p. 488.
00Z Yu.S.Zamyatnin, V.Yu.Konovalov, In: Low Energy Neutron Physics, Ed. H.Schopper, Landolt-Boernstein, Berlin, 2000, v. 16A, ch. 9.
02И А.В.Игнатюк и др. Выработка и аттестация файлов ядерных данных для библиотеки БРОНД-3. Отчет ФЭИ-11197, 2002.

2. ³ Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. Ввести файл MF=10 с сечением перехода в основное состояние на основе EAF2003. Включить файл MF=8 с секциями MT=454 и MT=459 из ENDF/B-VI. – М.Николаев.

95.5. Америций-243

Оценки сечений Am-243 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3, БРОНД-3, JEFF-3.1 и в библиотеке Маслова и др. (Минск).

В JEFF-3.1 приняты данные библиотеки JENDL-3.3.

Оценка БРОНД-3 выполнена в 1996 году, в 2001 выполнена ревизия файла, оценка минской группы выполнена в 1996 году.

Оценка ENDF/B-VII выпущена в 2006 году. По сравнению с версией файла ENDF/B-VI содержит существенное повышение сечения деления в области 150 эВ-1 МэВ, что привело к устранению расхождений данных файла ENDF/B-VI с данными JENDL-3.3 и БРОНД-3.

Оценка JENDL-3.3 выпущена в 2002 году, но ряд основных сечений в ней принят из БРОНД-3. Оценка Маслова и др. выполнена в 1996 году.

1. Общие характеристики

1.1. $Z = 95$ -зарядовое число;

1.2. $A = 243$ (атомный вес);

1.3. $AW = 240.973$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);

1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 7370$ лет, доминирует α -распад с вкладом $3.7E-9\%$ спонтанного деления;

1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|---------|---------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | n,n' | -0.0422 | .0424 | Am-243 |
| 16 | n,2n | -6.638 | 6.666 | Am-242g Am-242m |
| 17 | n,3n | -12.567 | 12.619 | Am-240 |
| 18 | деление | | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 5.363 | 0 | Am-244g Am-244m |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов во всех оценках ограничена энергией 250 эВ. На рисунках 37-39 представлены экспериментальные и оцененные данные в этой области энергий.

Значения сечений для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в сравнении рекомендованными данными [1] приведены в таблице 5.

Таблица 5. Резонансные свойства Am-243, барн.

| | JENDL-3.3 | МИНСК | БРОНД-3 | ENDF/B-VII | Мухабхаб, барн |
|-----------------|-----------|--------|---------|------------|-------------------|
| σ_{tot} | 84.25 | 84.23 | 84.23 | 83.69 | 84.0±1.9 |
| σ_f | 0.0813 | 0.064 | 0.064 | 0.074 | 0.074±0.007 |
| σ_γ | 76.71 | 76.71 | 76.70 | 75.08 | 75.1±1.8 |
| I_f | 7.54 | 7.44 | 7.53 | 8.64 | 8.5±0.5 |
| I_γ | 1790 | 1788.2 | 1783.9 | 1815.8 | 1820±70 |

По сечению деления во всех библиотеках наблюдается значительное расхождение с экспериментальными данными, однако по остальным сечениям и резонансным интегралам есть хорошее согласие.

95-Am-243(N,TOT),SIG

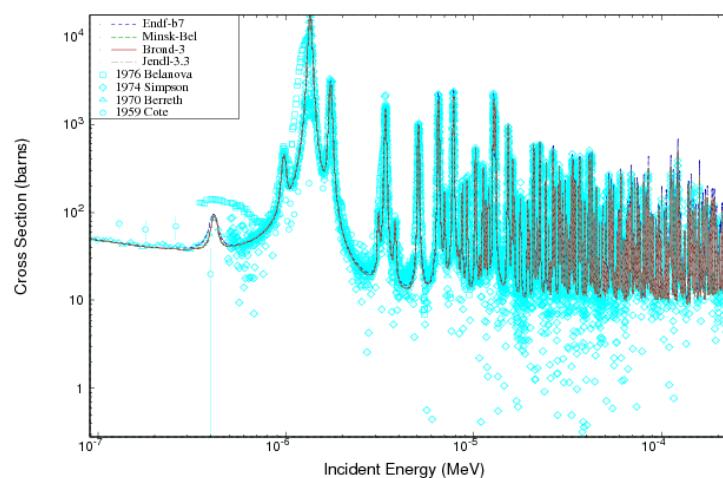


Рисунок 37. Полное сечение Am-243 в области энергий разрешенных резонансов.

95-Am-243(N,F),SIG

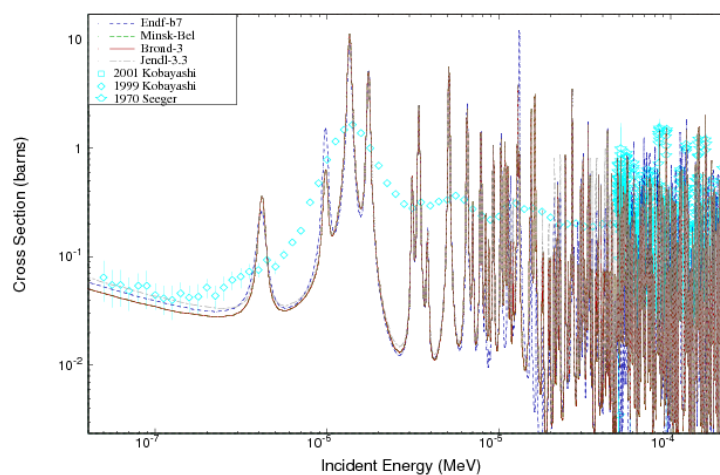


Рисунок 38. Сечение деления Am-243 в области энергий разрешенных резонансов.

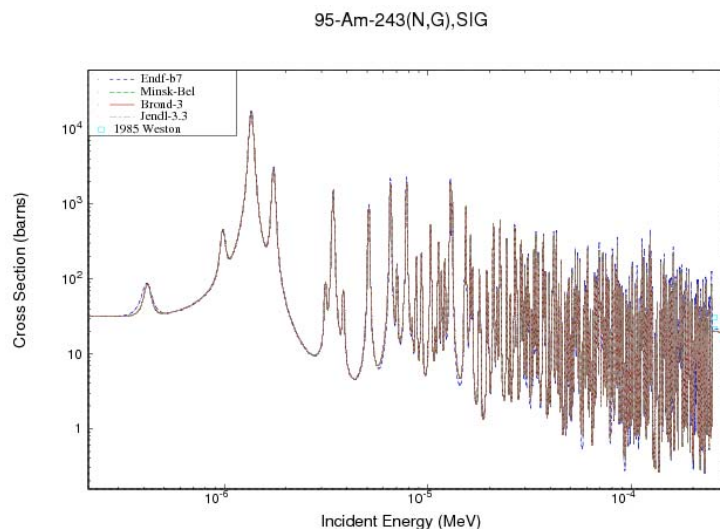


Рисунок 39. Сечение радиационного захвата в области энергий разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов

Для области неразрешенных резонансов в представленных библиотеках приняты следующие границы:

| | |
|------------|-----------------|
| БРОНД-3 | 250 эВ – 20 кэВ |
| ENDF/B-VII | 250 эВ – 30 кэВ |
| JENDL-3.3 | 250 эВ – 40 кэВ |
| МИНСК | 250 эВ – 40 кэВ |

На рисунках 40-43 представлены экспериментальные и оцененные данные в области энергий неразрешенных резонансов. Все оценки описывают сравнительно хорошо имеющиеся данные в области энергий неразрешенных резонансов, и нет очевидных оснований отдать предпочтение какой-либо из них.

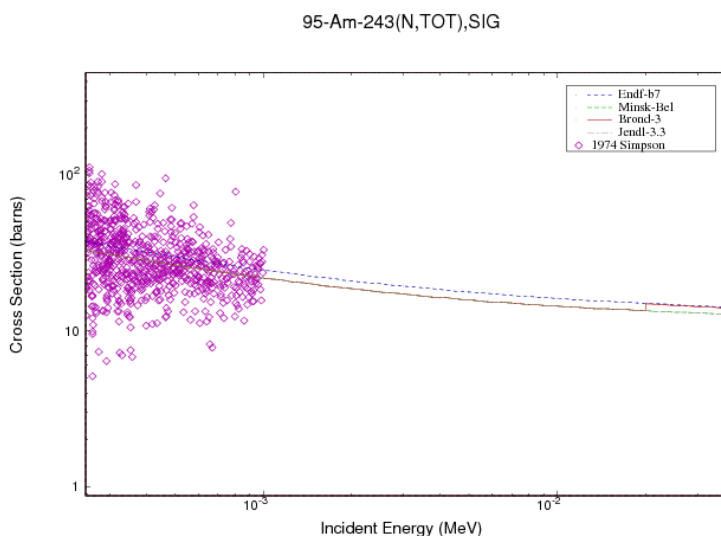


Рисунок 40. Полное сечение Am-243 в области энергий неразрешенных резонансов.

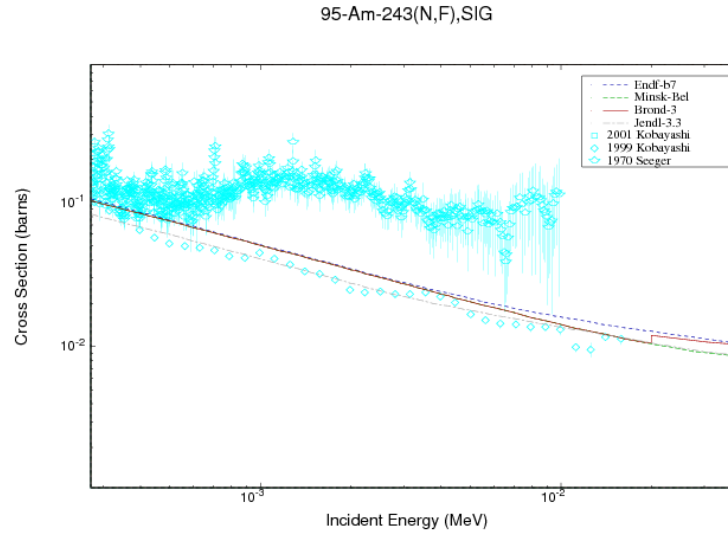


Рисунок 41. Сечение деления Am-243 в области энергий неразрешенных резонансов.

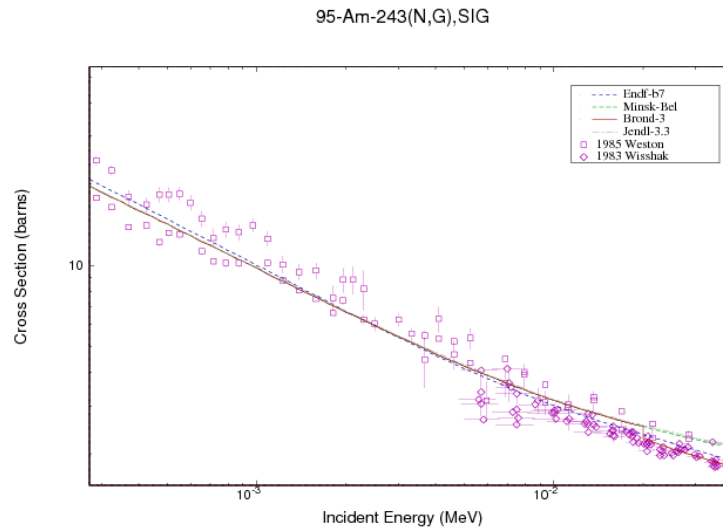


Рисунок 41. Сечение радиационного захвата Am-243 в области энергий неразрешенных резонансов.

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

3.1. Полное сечение (MT=1)

В области энергий нейтронов выше 1 кэВ экспериментальных данных по полному сечению нет. На рисунке 42 показаны оцененные данные по полному сечению библиотек ENDF/B-VII, JENDL-3.3, БРОНД-3 и Маслова (Минск). Как видно из рисунка 42, данные ENDF/B-VII и БРОНД-3 совпадают, однако данные JENDL-3.3, основанные на оценке Маслова заметно отличаются, что связано с использованием других параметров модели. При отсутствии экспериментальных данных трудно отдать предпочтение какой-либо из оценок.

95-Am-243(N,TOT),SIG

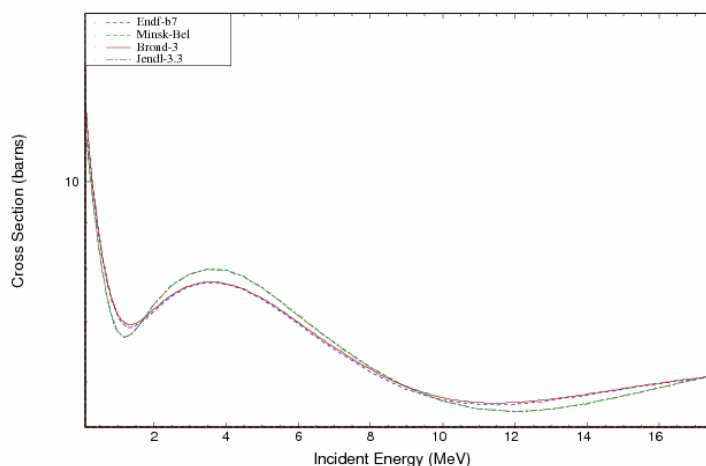


Рисунок 42. Полное сечение Am-243 в области энергий быстрых нейтронов.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

На рисунке 43 представлены оценки упругого рассеяния библиотек ENDF/B-VII, JENDL-3.3, БРОНД-3 и Маслова (Минск). Оценки ENDF/B-VII и БРОНД-3 практически совпадают, тогда как кривая JENDL-3.3, основанная на оценке Маслова, в области 1-7 МэВ заметно отличается, что связано с аналогичным различием в полном сечении (рис. 7).

95-Am-243(N,EL),SIG

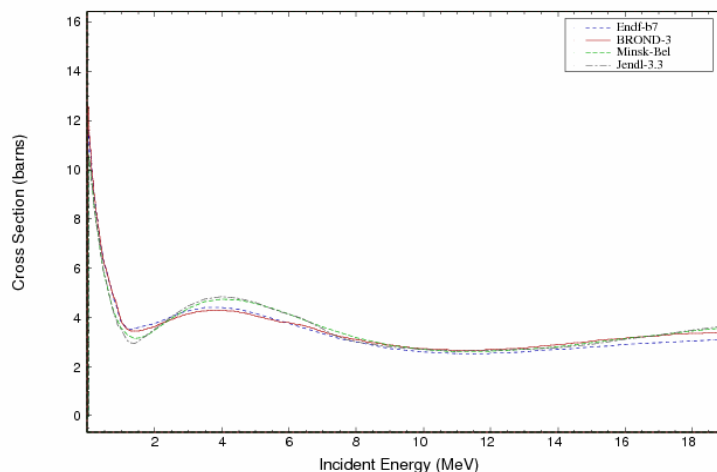


Рисунок 43. Сечение упругого рассеяния Am-243 в области энергий быстрых нейтронов.

Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, обычно, опираются на расчеты по оптической модели, и разногласия в форме дифференциальных сечений рассеяния оказываются подобными расхождениям в полных нейтронных сечениях. Без соответствующих экспериментальных данных предпочтительными являются оценки, в которых достигнуто лучшее описание полных сечений.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных нет, кроме одной точки на первом уровне. На рисунках 44 и 45 показаны оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек. В области энергий выше 6 МэВ оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII совпадают, однако при энергиях ниже имеются заметные различия энергетической зависимости сечений. Зависимость оценки JENDL-3.3, совпадающая с оценкой Маслова, не находит какого-либо физического объяснения. Оценкам БРОНД-3 и ENDF/B-VII следует отдать предпочтение.

95-Am-243(N,INL),SIG

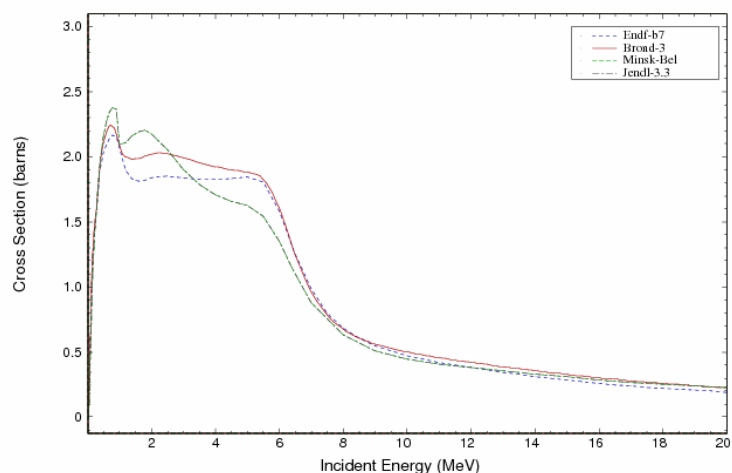


Рисунок 44. Интегральное сечение неупругого рассеяния Am-243.

95-Am-243(n,n'),SIG

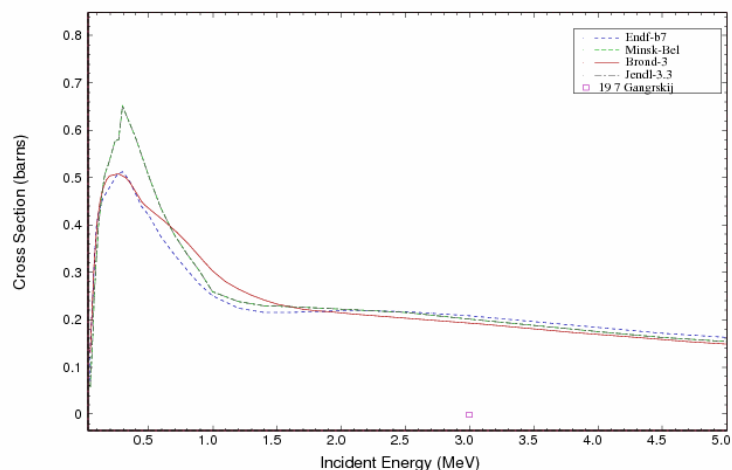


Рисунок 45. Сечение неупругого рассеяния на первом уровне (MT=51).

3.4. Сечение деления (MT=18)

На рисунке 46 показаны оценки сечений деления в сравнении с экспериментальными данными. Оценка Маслова в области энергий 7-10 МэВ неоправданно занижена и противоречит экспериментальным данным. В этой области оценки БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII лучше соответствуют экспериментальным данным. При оценке сечений деления в БРОНД-3 был использован новый метод статистического учета систематических погрешностей экспериментальных данных (Паде-

аппроксимация) [5] и на его основе уточнены рекомендуемые погрешности оцененных данных и определены ковариационные матрицы погрешностей.

Экспериментальных данных при энергиях нейтронов больше 10.5 МэВ явно недостаточно для оценки функции возбуждения реакции $Am-243(n,f)$. Поэтому, в статистическую оценку сечений в качестве дополнительной информации в интервале энергий нейтронов выше 10 МэВ при оценке в библиотеку БРОНД-3 была использована энергетическая зависимость сечений деления, полученная из оптико-статистических расчетов. Имеющиеся различия в данных в области энергий выше 10 МэВ не дают серьезных оснований предпочесть какую-либо из оценок.

На рисунке 47 представлена энергетическая зависимость среднего числа мгновенных нейтронов на деление. В 2001 году Кузьминовым Б.Д. была проведена коррекция оценки на основе экспериментальных данных Хохлова /2/. Оценка среднего числа запаздывающих нейтронов во всех оценках основана на систематике работы /3/.

Энергетические спектры нейтронов деления были взяты без изменений из оценок ENDF/B-VI.

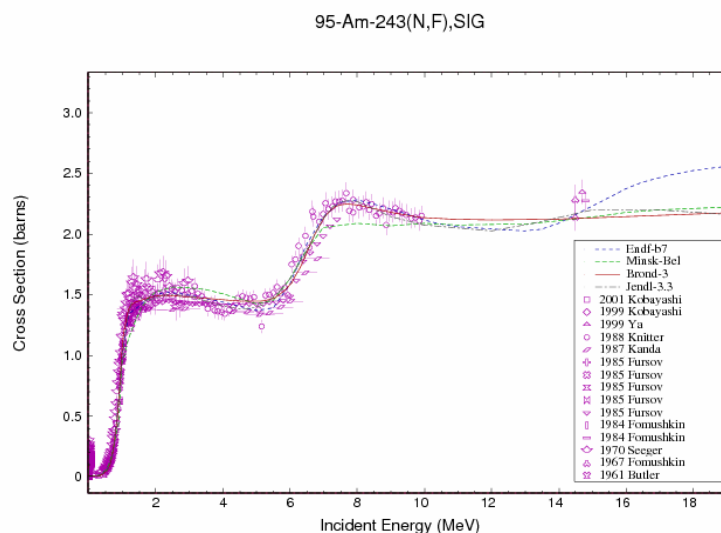


Рисунок 46. Сечение деления Am-243 в области энергий быстрых нейтронов.

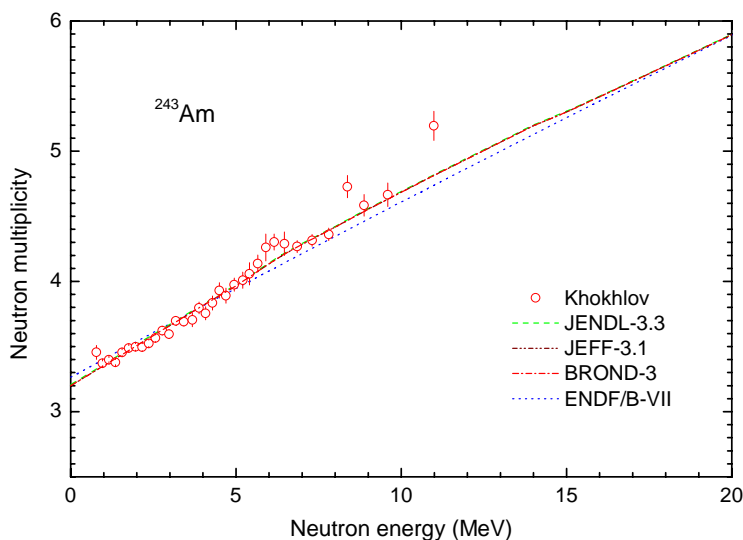


Рисунок 47. Энергетическая зависимость среднего числа нейтронов на деление.

3.5. Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102)

Экспериментальные данные по сечениям радиационного захвата нейтронов для Am-243 имеются лишь в диапазоне энергий до 250 эВ. При оценке в БРОНД-3 эти данные были перенормированы к принятым в настоящее время стандартам, были уточнены их систематические и статистические погрешности, а также оценены коэффициенты корреляции для каждого набора данных.

Для энергий нейтронов выше верхней границы экспериментальных точек в оценке использовалась энергетическая зависимость сечений захвата нейтронов, полученная из оптико-статистических расчетов, и эмпирической систематики сечений захвата для энергий нейтронов выше 14 МэВ [4].

Аппроксимирующая кривая для сечений захвата была получена тем же методом [5], что и для сечений деления. Оцененные таким способом сечения захвата нейтронов приведены на рисунке 48 в сравнении с рассмотренными экспериментальными данными и другими оценками. В области энергий до 250 МэВ данные всех оценок практически совпадают, различия в области энергий выше 700 кэВ связаны с различием теоретических подходов. Более плавные зависимости БРОНД-3 и ENDF/B-VII и выглядят предпочтительней.

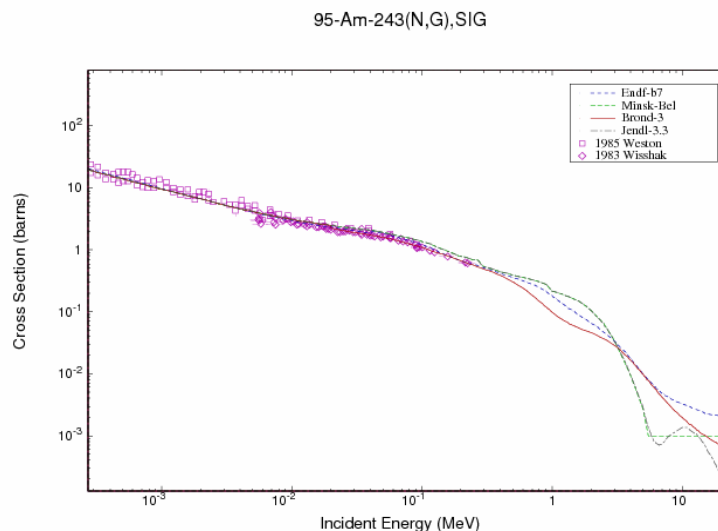


Рисунок 48. Сечение радиационного захвата Am-243 в области энергий быстрых нейтронов.

3.6. Сечения реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17)

На рисунке 49 представлены оцененные сечения реакции (n,2n) из разных библиотек. Следует отдать предпочтение оценке БРОНД-3, поскольку она лучше согласуется с систематикой сечений этой реакции [6].

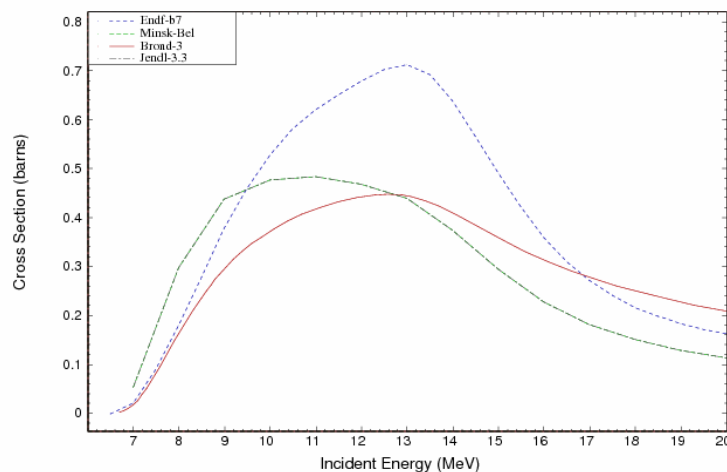


Рисунок 49. Сечение реакции (n,2n) для Am-243.

Заключение.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в области разрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных, и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. Оценки БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений. Это свидетельствует об их достаточно высокой надежности и согласованности.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку БРОНД-3⁴.

В настоящее время нет каких-либо экспериментальных данных, указывающих на необходимость уточнения этой оценки.

Автор отбора данных

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mughabghab S.F. Atlas of Neutron Resonances, Academic Press, NY, 2006 (5-th edition of BNL-325)
Mughabghab S.F, Neutron Cross Sections. N.Y.-London, Academic Press, 1984, v.1, part B.
2. Khokhlov Yu.A. et al., Proc. Int. Conf. On Nuclear Data for Sci. and Techn., Gatlinburg, May 9-14, 1994, p.273.
3. Tuttle R.J., Nucl. Sci. Eng., 56(1975)37.
4. Беланова Т.С., Игнатюк А.В., Пашенко А.Б., Пляскин В.И. Радиационный захват нейтронов. М. Энергоатомиздат, 1986.
5. Бадиков С.А. Препринт ФЭИ-1686, Обнинск, 1985.
Badikov S.A., Zolotarev K.I. In: Proc. Spec. Meeting on Evaluation and Processing of Covariance Data (Oak Ridge, 1992). Paris, OECD, 1993, p. 105.
6. Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).

3. ⁴ Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. Включить файл MF=8 с секциями MT=454 и MT=459 из ENDF/B-VI.- М.Николаев.

95.6. Америций-244

В библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и JEFF-3.1 для Am-244 содержится одна и та же оценка нейтронных данных.

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 95$ -зарядовое число;
- 1.2. $A = 244$ (атомный вес);
- 1.3. $AWR = 241.968$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен ($T_{1/2} = 10.1$ часов), испытывает β_- -распад в Cm-244;
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог-}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|---------|---------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | n,n' | -.0422 | .0424 | Am-244 |
| 16 | n,2n | -6.638 | 6.666 | Am-243 |
| 17 | n,3n | -12.567 | 12.619 | Am-242, Am-242m |
| 18 | деление | | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 5.363 | 0 | Am-245 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов

Область резонансных параметров отсутствует. Приводится только радиус потенциального рассеяния $R=7.98866$ ферми.

Значения сечений в тепловой точке и резонансные интегралы приводятся в таблице 6.

Таблица 6. Резонансные свойства Am-244.

| Оценка | σ_{tot} | σ_f | σ_γ | I_f | I_γ |
|-----------|-----------------------|------------|-----------------|--------|------------|
| JENDL-3.3 | 2 911.6 | 2 300. | 600. | 1 258. | 315.6 |

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

3.1. Полное сечение (MT=1)

На рисунке 50 показано полное сечение взаимодействия Am-244. Экспериментальные данные отсутствуют.

3.2. Сечение деления (MT=18)

На рисунке 50 показано оцененное сечение деления Am-244 в области энергий до 10 МэВ. Экспериментальные данные отсутствуют.

3.3 Сечение деления (MT=102)

На рисунке 50 показано оцененное сечение радиационного захвата Am-244 в области энергий до 10 МэВ. Экспериментальные данные отсутствуют.

Отметим, что в области быстрых нейтронов в поведении сечения захвата наблюдается “горб”, наличие которого не подтверждается систематикой сечения радиационного захвата на четных изотопах америция (см. рис.51).

3.4. Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

На рисунке 52 показано сечение неупругого рассеяния нейтронов Am-244. Экспериментальные данные отсутствуют.

3.5. Сечения реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17)

На рисунке 52 показано сечение неупругого рассеяния нейтронов Am-244. Экспериментальные данные отсутствуют.

Поведение сечения (n,3n) вызывает большое сомнение. Скорее всего, оно ошибочно увеличено на порядок.

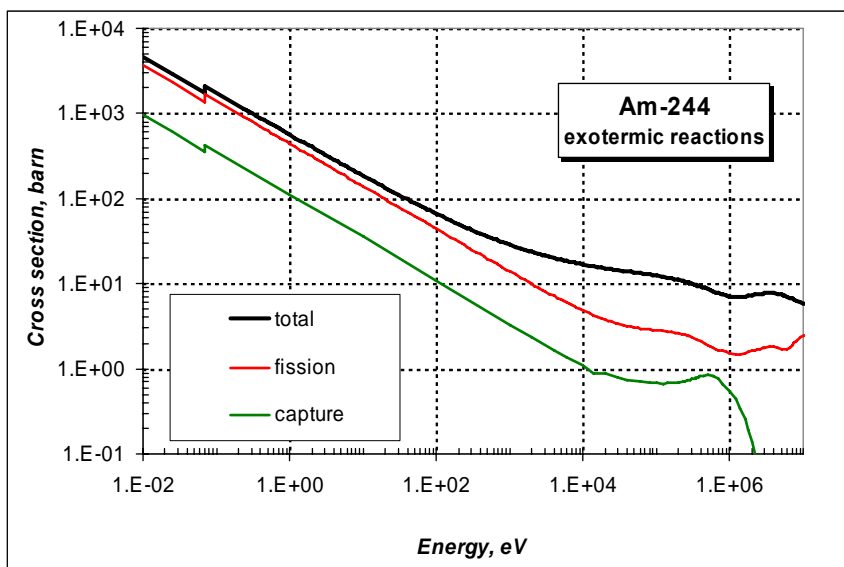


Рисунок 50. Сечения экзотермических реакций на Am-244.

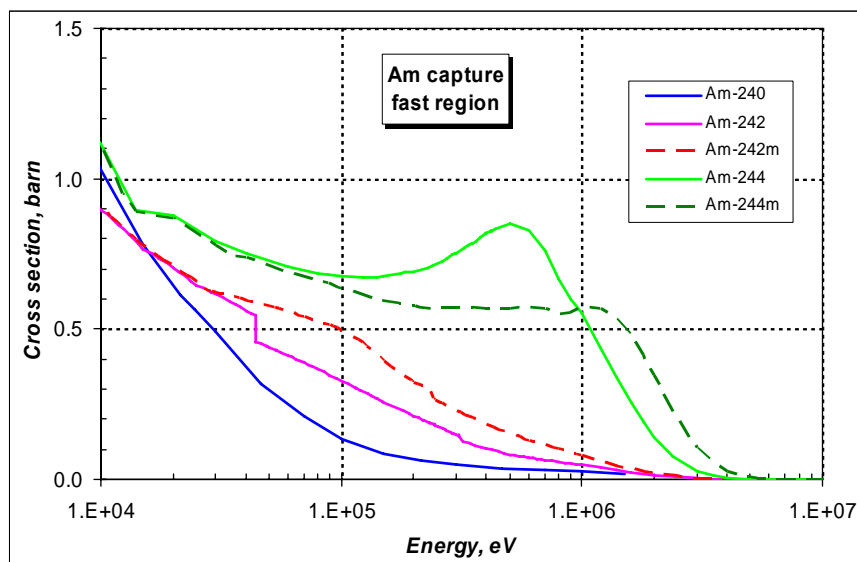


Рисунок 51. Систематика сечения радиационного захвата на четных изотопах америция.

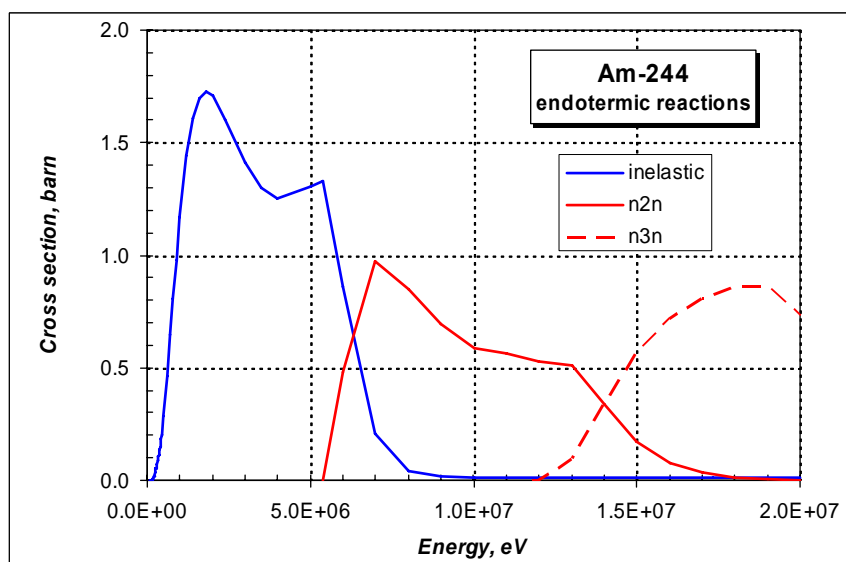


Рисунок 52. Сечения пороговых реакций на Am-244.

Заключение.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку JENDL-3.3⁵.

Рекомендуется в дальнейшем уточнить сечение радиационного захвата в области быстрых нейтронов (выше 100 кэВ) и сечение реакции (n,3n).

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

⁵ Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235.-М.Николаев.

96. КЮРИЙ

96.0. Общие замечания

Для библиотеки файлов нейтронных данных РОСФОНД следовало отобрать нейтронные данные для одиннадцати долгоживущих изотопов юрия.

Ниже анализируются оцененные нейтронных данных изотопов юрия из известных национальных библиотек на предмет их соответствия имеющимся экспериментальным данным и непротиворечивости их современным теоретическим моделям. Используемые экспериментальные данные взяты из международной библиотеки EXFOR на состояние 2006 года.

96.1. Кюрий-240

Оценки сечений Cm-240 имеются в библиотеках JENDL-3.3 и JEFF-31.

Оценка JEFF-3.1 выпущена в 2005 году и включает оценку JENDL-3.3 без заметных изменений.

Оценка JENDL-3.3 выпущена в 2002 году и основана на оценке T.Nakagawa (JAERI) 1995 г.

1. Общие характеристики

1.1. $Z = 96$ -зарядовое число;

1.2. $A = 240$ (атомный вес);

1.3. $AW = 237.993$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);

1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 27$ дней, доминирует α -распад (99.5%) с вкладом $3.9E-6\%$ спонтанного деления и 0.5% ε -захвата.

1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|---------|---------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | n,n' | -0.0380 | .0382 | Cm-243 |
| 16 | n,2n | -7.450 | 7.481 | Cm-242 |
| 17 | n,3n | -13.817 | 13.875 | Cm-241 |
| 18 | деление | | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 6.076 | 0 | Cm-244 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов.

Область разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3 и JEFF-31 ограничена энергией 150 эВ.

Значения сечений для тепловых нейтронов и резонансные интегралы приведены в таблице 1. Экспериментальных данных нет. Приведенные в таблице величины рассчитаны по теоретическим параметрам резонансов.

Таблица 1 – Резонансные свойства Cm-240.

| | JENDL-3.3 | JEFF-3.1 |
|-----------------------|-----------|----------|
| σ_{tot} | 198.4 | 198.4 |
| σ_{el} | 13.1 | 13.1 |
| σ_{f} | 9.8 | 9.8 |
| σ_{γ} | 175.6 | 175.6 |
| I_{f} | 44.6 | 44.6 |
| I_{γ} | 668.0 | 668.0 |

На рисунках 1-3 представлены оцененные данные в области энергий разрешенных резонансов.

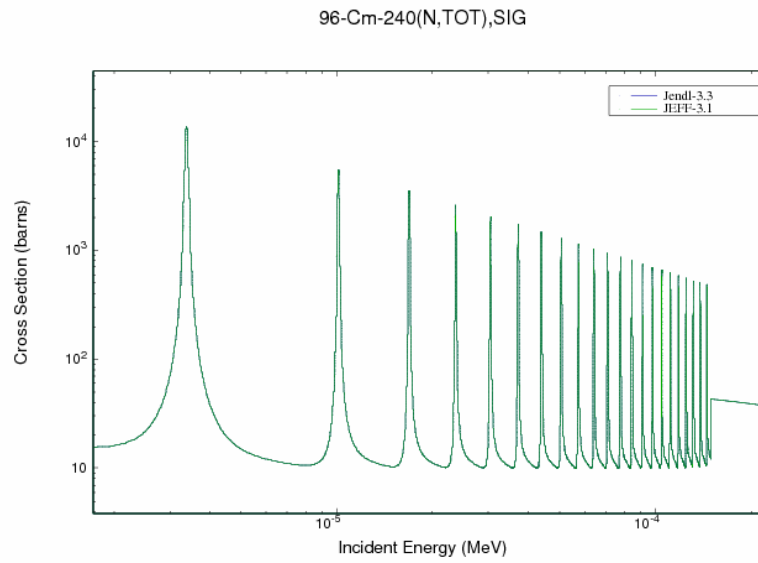


Рисунок 1. Полное сечение Cm-240 в области энергий разрешенных резонансов.

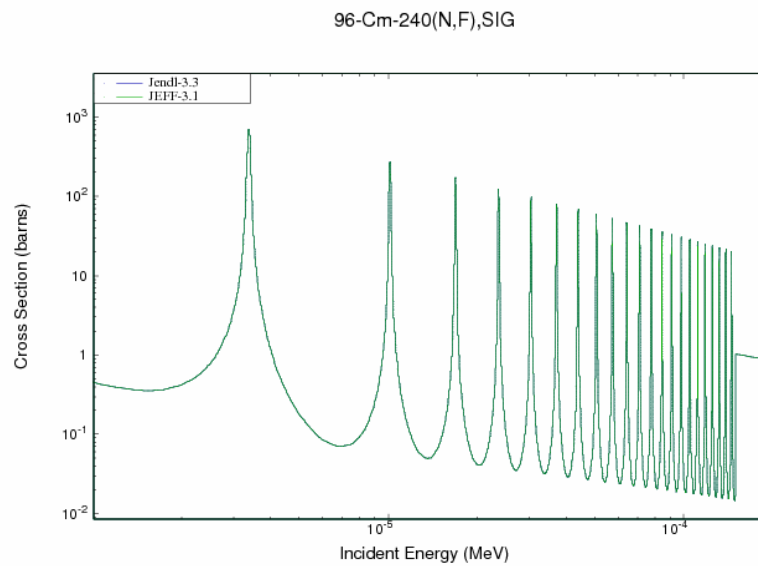


Рисунок 2. Сечение деления Cm-240 в области энергий разрешенных резонансов.

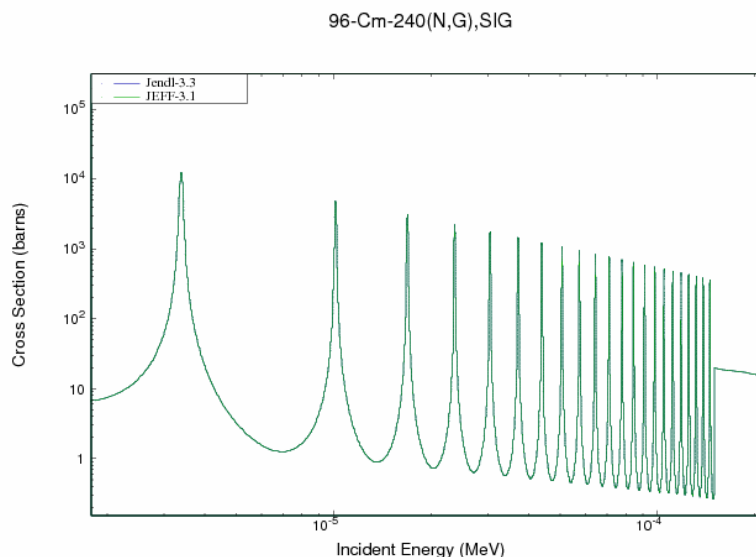


Рисунок 3. Сечение радиационного захвата в области энергий разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов.

Для области неразрешенных резонансов приняты следующие границы:

| | |
|-----------|-----------------|
| JENDL-3.3 | 150 эВ – 30 кэВ |
| JEFF-31 | 150 эВ – 30 кэВ |

Экспериментальных данных, оцененные данные получены расчетом по моделям ядерных реакций.

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

В этой области при отсутствии экспериментальных данных трудно судить о достоверности представленных данных. При дальнейшем анализе используются только физические представления и эмпирические систематики, позволяющие исключить явно ошибочные зависимости.

Полное сечение (MT=1).

В быстрой области энергий нейтронов экспериментальных данных нет. Нет оснований для критических замечаний. Энергетическая зависимость полного сечения в быстрой области энергий показана на рисунке 4.

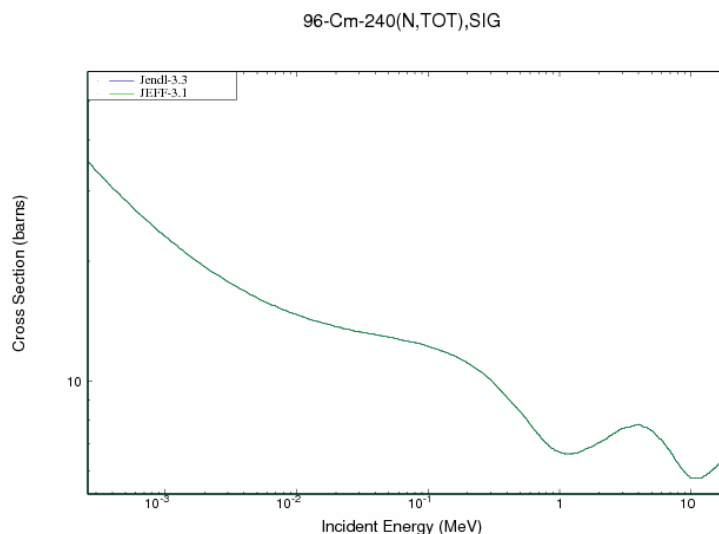


Рисунок 4. Полное сечение в области энергий нейтронов 30 кэВ – 20 МэВ.

Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Сечение упругого рассеяния получено как разница полного сечения и суммы всех неупругих сечений. Нет основания для критических замечаний.

Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных также нет. На рисунке 5 показано оцененное интегральное сечение неупругого рассеяния. Представленная зависимость не соответствует физическим представлениям и нуждается в новой оценке.

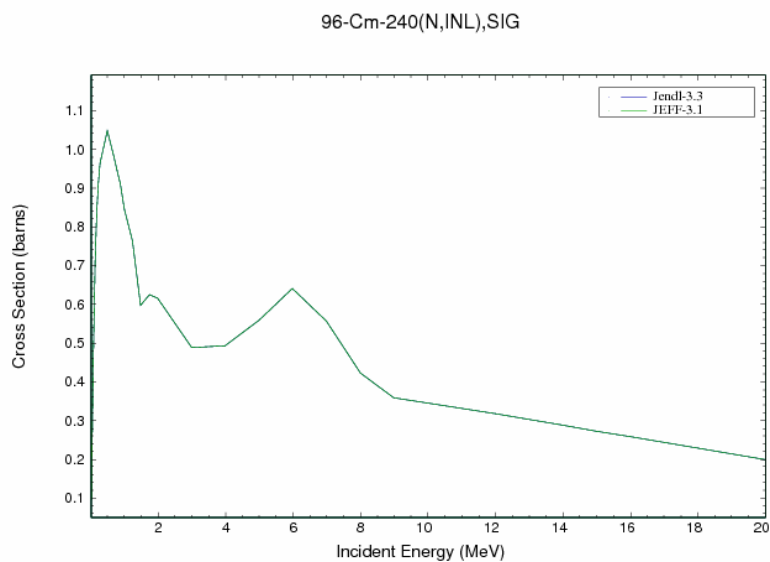


Рисунок 5. Сечение неупругого рассеяния Cm-240 в области энергий 1-20 МэВ..

Сечение деления (MT=18)

На рисунке 6 показана оценка сечений деления. Представленная оценка соответствует примерно систематикам сечений деления /4/ и может быть рекомендована.

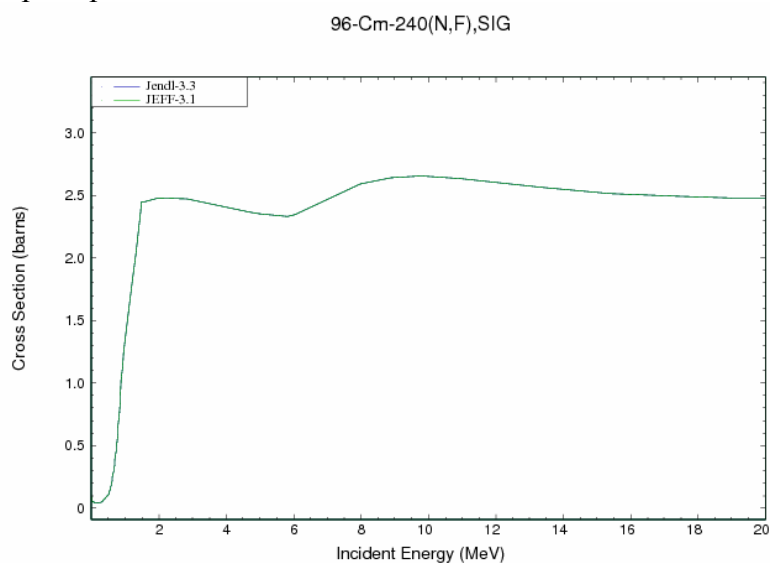


Рисунок 6. Сечение деления Cm-240 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Число мгновенных нейтронов на деление принято на основе систематики /1/. Данные по числу запаздывающих нейтронов основаны на систематике Таттла /2/.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

На рисунке 7 приведены оценки сечений радиационного захвата. Оценка примерно соответствует физическим представлениям.

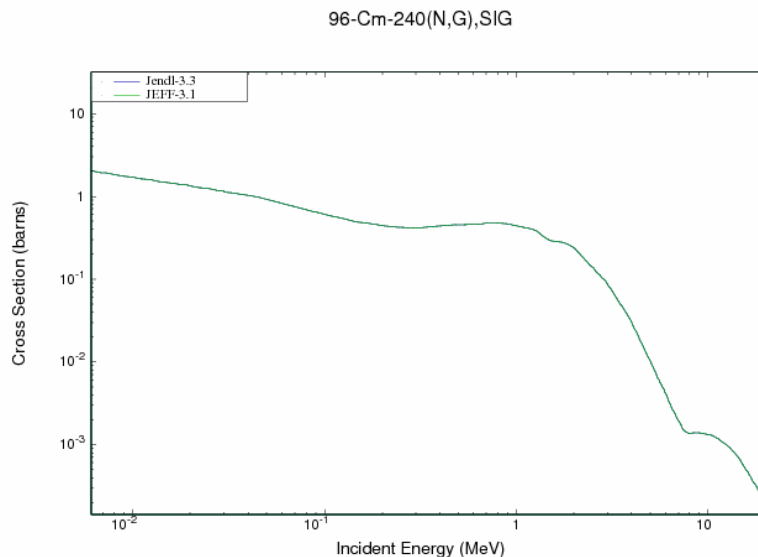


Рисунок 7. Сечение радиационного захвата в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17)

Для реакции (n,2n) экспериментальных данных нет, все оценки получены расчетом по теоретическим моделям. Представленная оценка показана на рисунке 8 и примерно соответствует систематикам /3/.

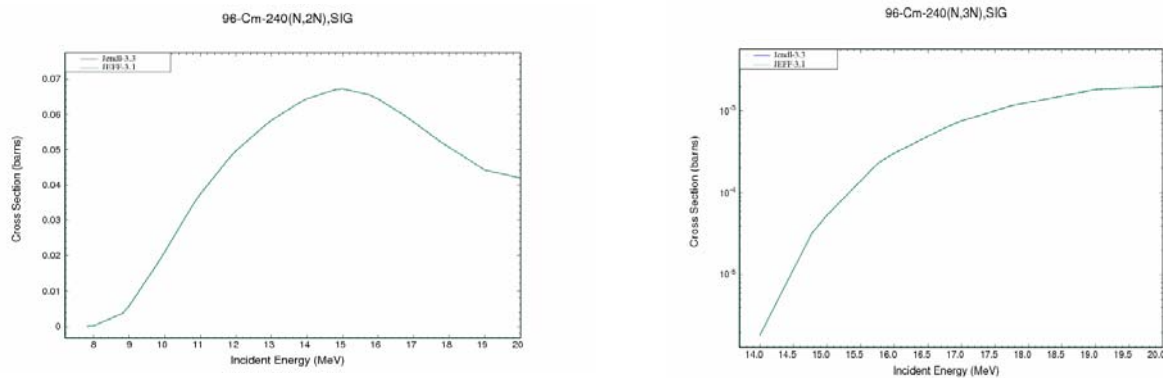


Рисунок 8. Сечение реакции (n,2n) и (n,3n) для Cm-240.

Заключение.

Оценки JENDL-3.3 и JEFF-3.1 идентичны для всех нейтронных реакций и кроме интегрального сечения неупругого рассеяния дают значения сечений, не противоречащие физическим представлениям и эмпирическим систематикам.

Для библиотеки РОСФОНД возможно принять оценку JENDL-3.3¹.

В настоящее время нет каких-либо экспериментальных данных, указывающих на какую-либо возможность уточнения этой оценки.

Автор отбора данных

Манохин В.Н.

96.2. Кюрий-241

Оценки сечений Cm-241 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и JEFF-3.1.

Оценка JEFF-3.1 выпущена в 2005 году после ревизии в том же 2005 году итальянской оценки (NEA) 1982 года. Оценка является результатом последовательной конверсии ENDF/B-V – JEF-2.2 - JEFF-3.0 - JEFF-3.1. Оценка ENDF/B-VII выпущена в 2005 году, в ней принята без изменений оценка ENDF/B-VI, которая конвертирована из ENDF/B-V и которая является модификацией оценки Манна 1982 года. Оценка JENDL-3.3 выпущена в 2002 году после ревизии в 2000 году оценки T.Nakagawa 1995 года.

Нижеследующий анализ показывает, что оценка JEFF-3.1 и ENDF/B-VII по всем реакциям содержат одни и те же данные и полностью совпадают.

1. Общие характеристики

1.1. $Z = 96$ -зарядовое число;

1.2. $A = 241$ (атомный вес);

1.3. $AW = 238.987$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);

1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 32.8$ дня, доминирует ϵ -захват (99.0%), α -распад 1%.

1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|---------|---------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | n,n' | -0.0530 | 0.0422 | Cm-241 |
| 16 | n,2n | -6.076 | 6.102 | Cm-242 |
| 17 | n,3n | -13.533 | 13.590 | Cm-241 |
| 18 | деление | | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 6.967 | 0 | Cm-244 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов имеется только в библиотеке JENDL-3.3 и ограничена энергией 150 эВ.

Резонансные свойства Cm-241 для рассматриваемых оценок приводятся в таблице 2. Экспериментальные данные отсутствуют.

¹ Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. – М.Николаев.

Таблица 2. Резонансные свойства Cm-241.

| | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | JEFF-3.1 |
|-----------------|-----------|------------|----------|
| σ_{tot} | 601.79 | 2862 | 2862 |
| σ_{el} | 7.99 | 12.08 | 12.08 |
| σ_f | 549.82 | 2599 | 2599 |
| σ_γ | 43.99 | 250 | 250 |
| I_f | 1180 | 1178 | 1178 |
| I_γ | 96 | 112.3 | 112.3 |

На рисунках 9-12 представлены оцененные данные в области энергий разрешенных резонансов.

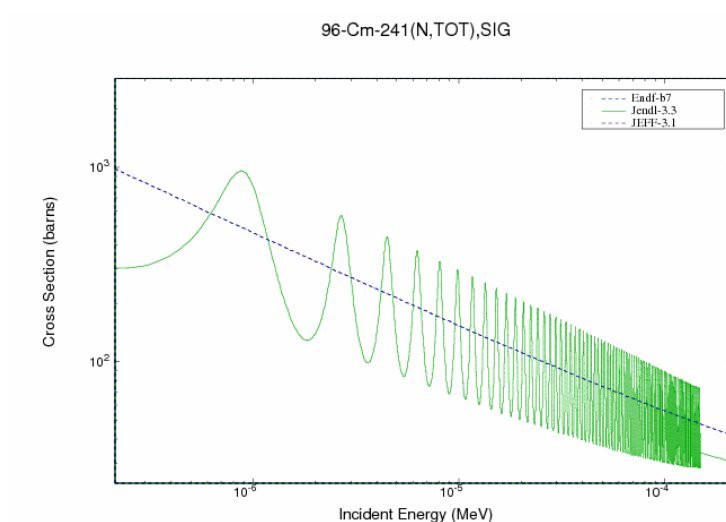


Рисунок 9. Полное сечение Cm-241 в области энергий разрешенных резонансов.

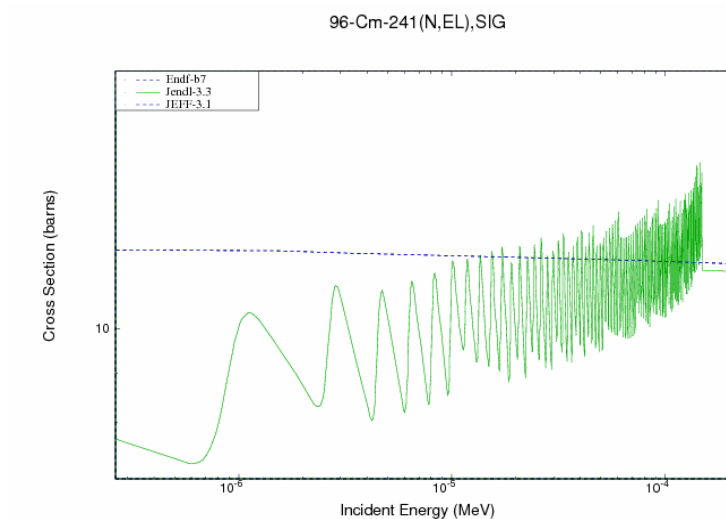


Рисунок 10. Сечение упругого рассеяния на Cm-241 в области энергий разрешенных резонансов.

Оценка сечения реакции упругого рассеяния JENDL-3.3 выглядит весьма странно.

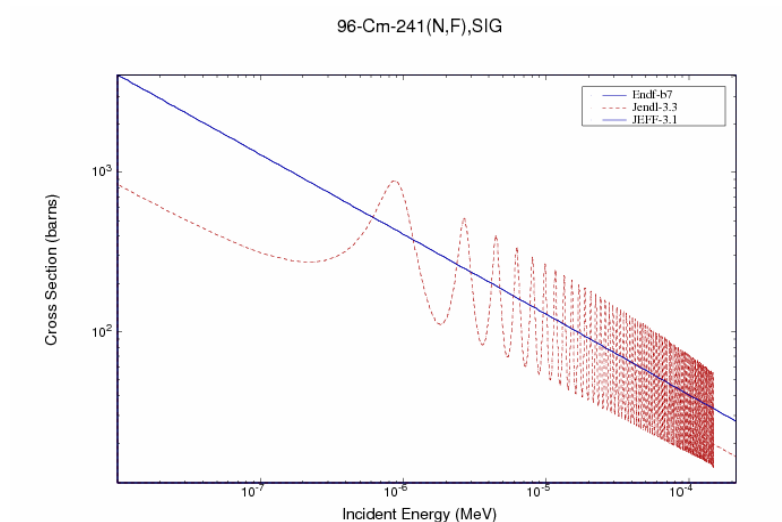


Рисунок 11. Сечение деления Cm-241 в области энергий разрешенных резонансов.

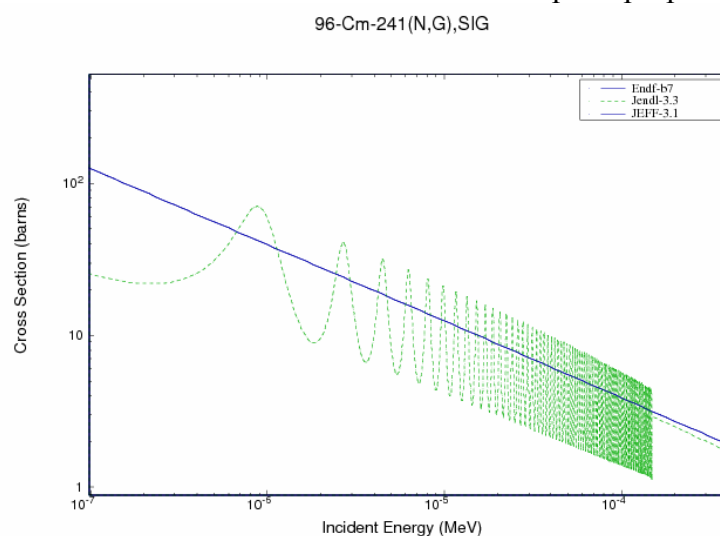


Рисунок 12. Сечение радиационного захвата Cm-241 в области энергий разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов

Для области неразрешенных резонансов приняты следующие границы:

JENDL-3.3

150 эВ – 30 кэВ

Энергетическая зависимость сечений в области неразрешенных резонансов будет показана на дальнейших рисунках.

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

В этой области при отсутствии экспериментальных данных трудно судить о достоверности представленных данных. При дальнейшем анализе используются только физические представления и эмпирические систематики, позволяющие исключить явно ошибочные зависимости.

Полное сечение (MT=1)

Сравнение оцененных сечений показано на рисунке 13.

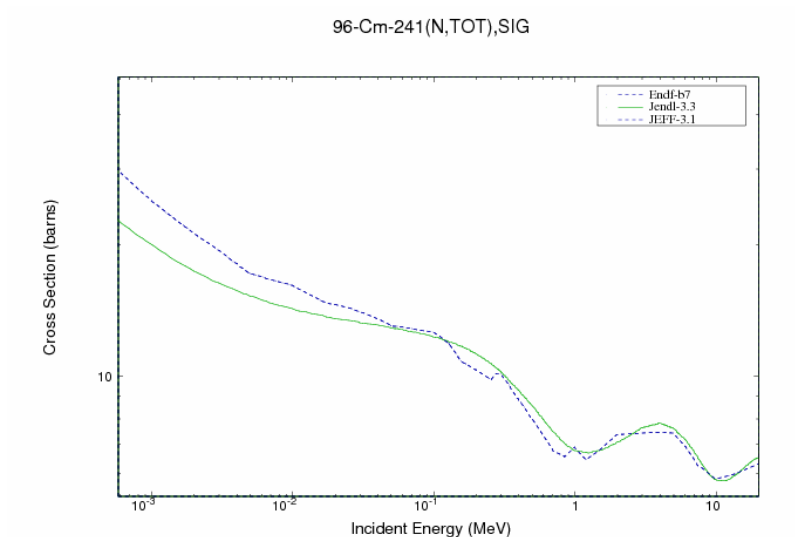


Рисунок 13. Полное сечение Cm-241 в области энергий нейтронов 1 кэВ –20 МэВ.

Оценке JENDL-3.3 по полному сечению следует отдать предпочтение.

Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Сечение упругого рассеяния получено как разница полного сечения и суммы всех неупругих сечений. На рисунке 14 дано сравнение разных оценок. Оценки примерно равноценны.

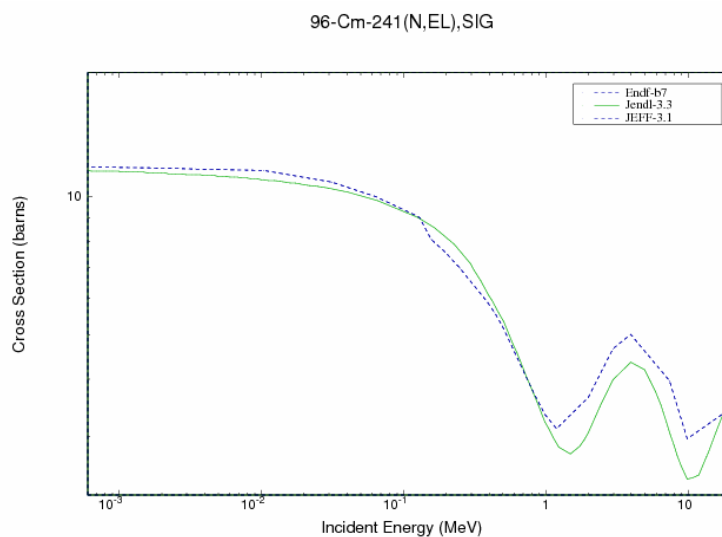


Рисунок 14. Сечение упругого рассеяния на Cm-241 в области энергий 1-20 МэВ.

Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных нет. На рисунке 15 показаны оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек. Следует принять оценку JENDL-3.3, поскольку она больше соответствует систематике и оценена до 20 МэВ.

96-Cm-241(N,INL),SIG

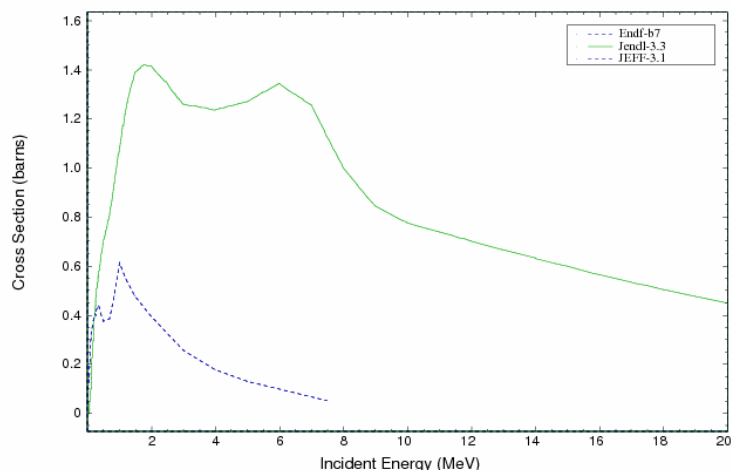


Рисунок 15. Сечение неупругого рассеяния Cm-241 в области энергий до МэВ.

Сечение деления (MT=18)

На рисунке 16 показаны оценки сечений деления. Оценки ENDF/B-VII и JEFF-31 не могут быть рекомендованы как по физическим представлениям, так и с точки зрения эмпирических систематик. Следует принять оценку JENDL-3.3, она более или менее соответствует систематическим тенденциям энергетической зависимости сечений деления.

96-Cm-241(N,F),SIG

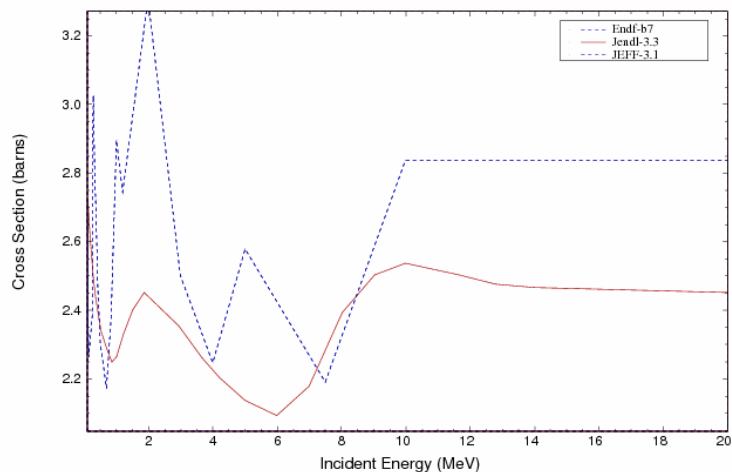


Рисунок 16. Сечение деления Cm-241 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Число мгновенных нейтронов на деление принято на основе систематики /1/. Данные по числу запаздывающих нейтронов основаны на систематике Таттла /2/.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102)

На рисунке 17 приведены оценки сечений радиационного захвата из библиотек ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и JEFF-31.

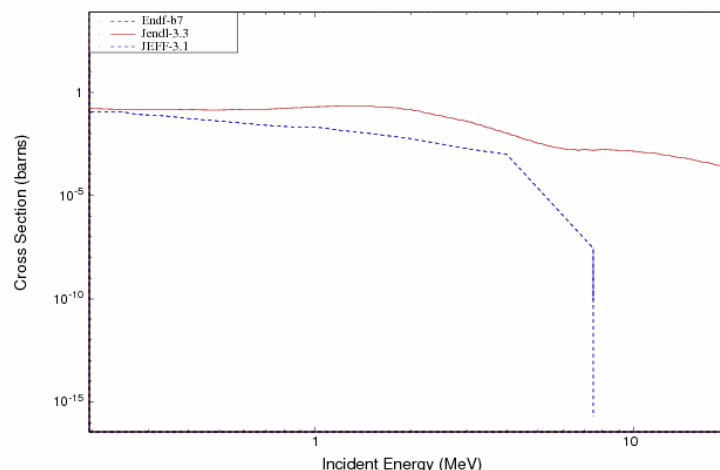


Рисунок 17. Сечение радиационного захвата нейтронов на Cm-241 в области энергий 1-20 МэВ.

Зависимость сечения радиационного захвата от энергии в оценках ENDF/B-VII и JEFF-31 не соответствует физическим представлениям, следует принять оценку JENDL-3.3.

Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17)

Для реакции (n,2n) и (n,3n) экспериментальных данных нет, все оценки получены расчетом по теоретическим моделям. Энергетическая зависимость оцененных сечений показана на рисунке 18.

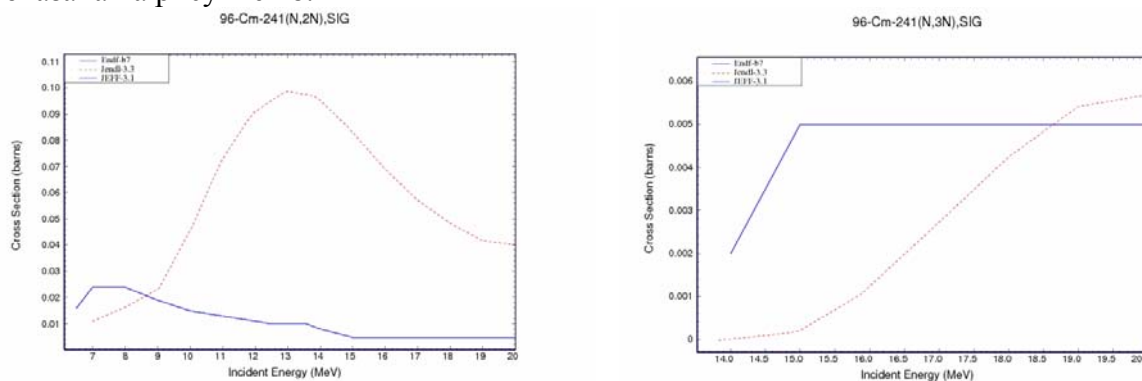


Рисунок 18. Сечение реакции (n,2n) и (n,3n) на Cm-241.

Из сравнения на рисунке 18 следует рекомендовать оценку JENDL-3.3, она соответствует систематикам /3/.

Заключение.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что оценки **JEFF-31** и **ENDF/B-VII** для основных нейтронных реакций не удовлетворяют физическим представлениям и эмпирическим систематикам.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку JENDL-3.3².

В дальнейшем следует обратить внимание на поведение сечений в области резонансных энергий до 150 эВ с тем, чтобы устранить нефизическое поведение сечения упругого рассеяния.

В настоящее время нет каких-либо экспериментальных данных, указывающих на возможность уточнения этой оценки.

Автор отбора данных

Манохин В.Н.

96.3. Кюрий-242

Оценки сечений Cm-242 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3, БРОНД-3, JEFF-3.1.

Оценка JEFF-31 выпущена в 2005 году после ревизии в 2005 году оценки Menarase (1982), являющейся компиляцией данных JEF-2.2, JENDL-3.2 и ENDF-VI. Оценка JENDL-3.3 принята в 2002 году на основе ревизованной оценки Nakagawa 1995 года. Оценка БРОНД-3 выполнена в 1997 году, в 2001 выполнена ревизия файла. Оценка ENDF/B-VII выпущена в 2005 году, в ней принята без заметных изменений оценка ENDF/B-VI, которая является модификацией оценки 1978 года группы Манна.

1. Общие характеристики

1.1. $Z = 96$ -зарядовое число;

1.2. $A = 242$ (атомный вес);

1.3. $AW = 239.970$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);

1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 162.8$ дня, доминирует α -распад с вкладом 6.4 E-6%.

1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт [*] |
|-----|---------|---------|---------------------------|---------------------------|
| 4 | n,n' | -0.0421 | 0.0423 | Cm-242 |
| 16 | n,2n | -6.967 | 6.996 | Cm-241 |
| 17 | n,3n | -13.044 | 13.098 | Cm-240 |
| 18 | деление | | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 5.694 | 0 | Cm-243 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов в библиотеках JENDL-3.3, ENDF/B-VII и JEFF-3.1 ограничена энергией 275 эВ, в БРОНД-3 энергией 155 эВ.

1. ² Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. Включить файл MF=8 с секциями MT=454 и MT=459 из ENDF/B-VI. – М.Николаев.

Значения сечений для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в сравнении рекомендованными данными [Mu81] приведены в таблице 3.

Таблица 3. Резонансные свойства Cm-242.

| | JENDL-3.3 | БРОНД-3 | ENDF/B-VII | JEFF-3.1 | Мухабхаб |
|-----------------|-----------|---------|------------|----------|----------|
| σ_{tot} | 32.57 | 33.43 | 30.69 | 32.57 | - |
| σ_{el} | 11.61 | 11.77 | 10.80 | 11.61 | - |
| σ_f | 5.06 | 5.00 | 3.02 | 5.06 | <5 |
| σ_γ | 15.90 | 16.66 | 16.87 | 15.90 | 16±5 |
| I_f | 19.9 | 12.3 | 6.25 | 19.9 | 12.9±0.7 |
| I_γ | 107 | 112.39 | 111.27 | 107 | 110±20 |

Из приведенного в таблице 3 сравнения видно, что оценка БРОНД лучше других согласуется с рекомендациями Мухабхаба.

На рисунках 19-22 представлены экспериментальные и оцененные данные в области энергий разрешенных резонансов. По сечениям деления, радиационного захвата и упругого рассеяния экспериментальных данных нет. В совпадающих интервалах оценки близки.

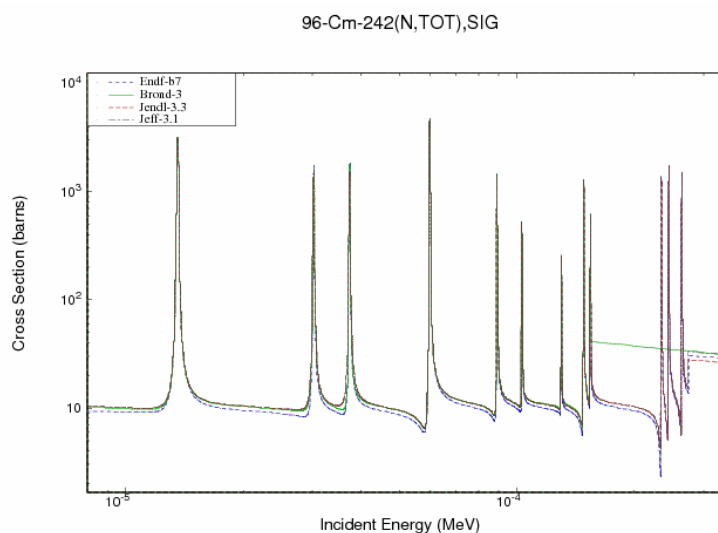


Рисунок 19. Полное сечение Cm-242 в области энергий разрешенных резонансов.

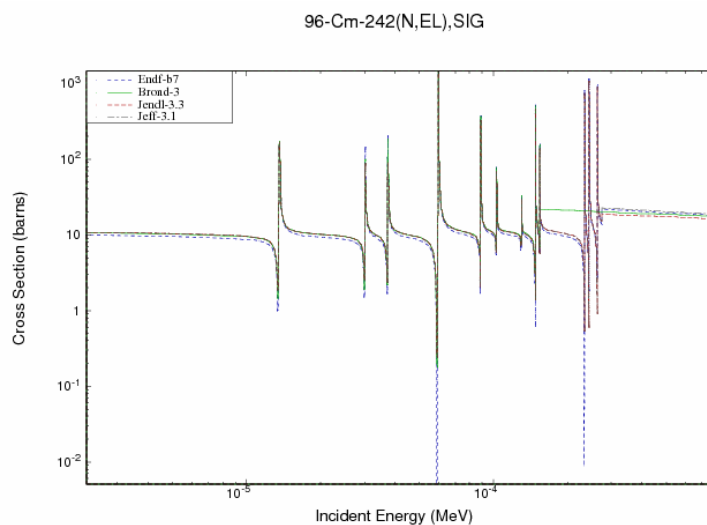


Рисунок 20. Сечение упругого рассеяния нейтронов на Cm-242 в области энергий разрешенных резонансов.

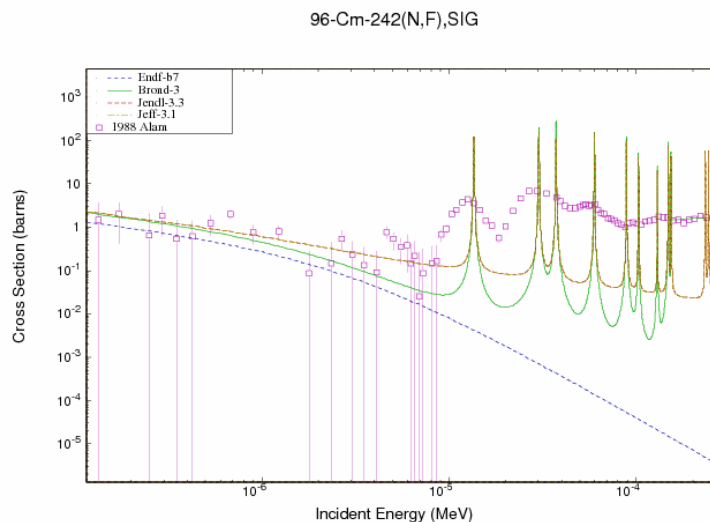


Рисунок 21. Сечение деления Cm-242 в области энергий разрешенных резонансов.

Как видно из рисунка 21, для сечения деления экспериментальные данные имеются, но они не позволяют уверенно показать преимущества какой либо из трех оценок: JENDL-3.3, JEFF-31, БРОНД-3. Оценка ENDF/B-VII в сечении деления не имеет резонансной структуры.

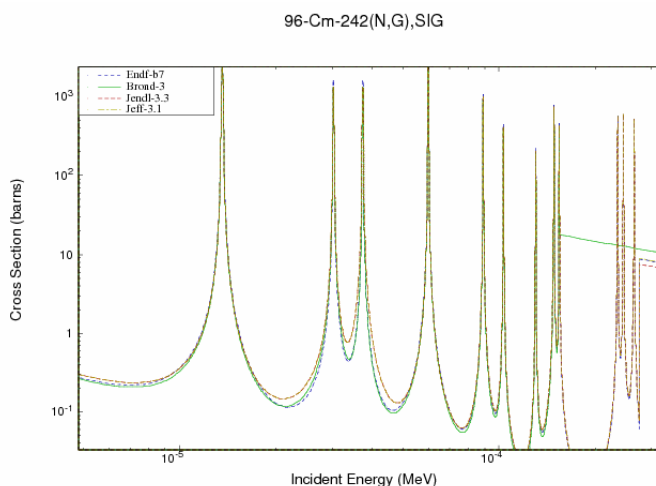


Рисунок 22. Сечение радиационного захвата нейтронов на Cm-242 в области энергий разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов

Для области неразрешенных резонансов приняты следующие границы:

| | |
|------------|-------------------|
| БРОНД-3 | 155 эВ – 20.0 кэВ |
| ENDF/B-VII | 276 эВ – 10.0 кэВ |
| JENDL-3.3 | 225 эВ – 30.0 кэВ |
| JEFF-31 | 275 эВ – 40.0 кэВ |

Энергетическая зависимость сечений в области неразрешенных резонансов будет показана на дальнейших рисунках.

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

Полное сечение (MT=1)

В быстрой области энергий нейтронов по полному сечению экспериментальных данных нет (рисунок 23). Может быть использована любая из представленных оценок, хотя оценка ENDF/B-VII выглядит менее предпочтительной.

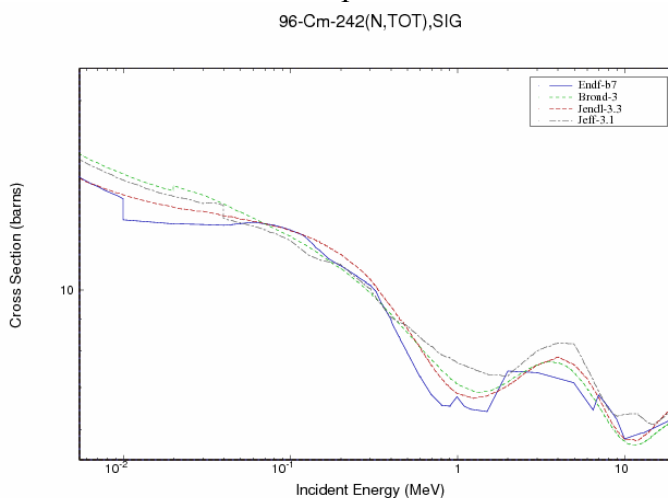


Рисунок 23. Полное сечение Cm-242 в области энергий нейтронов 10 кэВ –20 МэВ.

Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Сечение упругого рассеяния получено как разница полного сечения и суммы всех неупругих сечений. На рисунке 24 дано сравнение разных оценок. Расхождения между оценками не имеют принципиального характера.

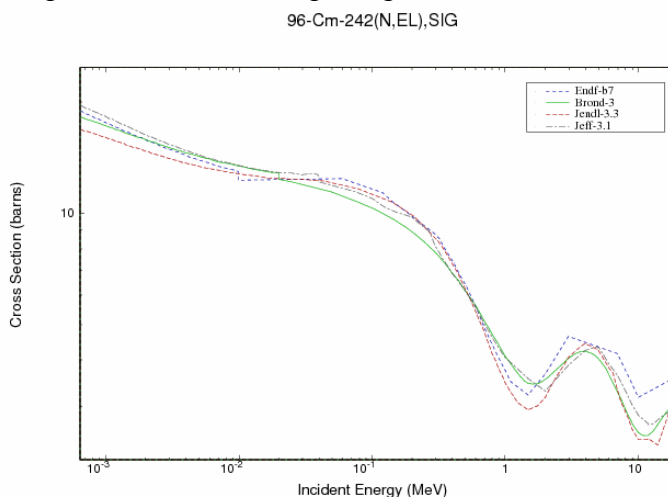


Рисунок 24. Сечение упругого рассеяния Cm-242 в области энергий 1 кэВ-20 МэВ.

Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных нет. На рисунке 25 показаны оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек. Оценка ENDF/B-VII ограничена энергией 5 МэВ и не может быть принята. Остальные оценки сильно различаются. Сравнение с другими изотопами показывает, что оценка JEFF-3.1 лежит слишком высоко, оценка БРОНД-3 низко. Наиболее приемлема оценка JENDL-3.3

96-Cm-242(N,INL),SIG

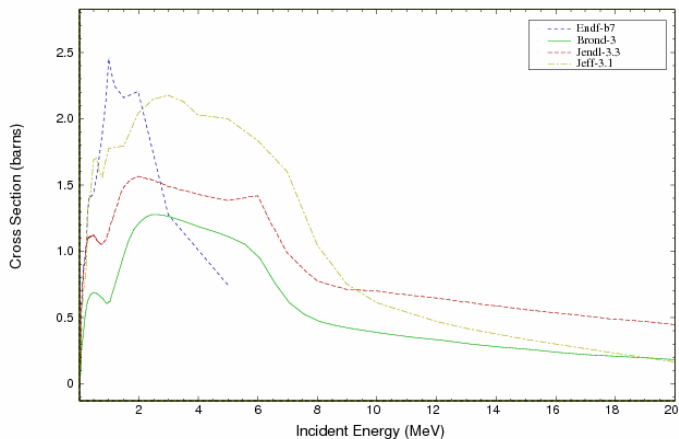


Рисунок 25. Сечение неупругого рассеяния Cm-243 в области энергий 1-20 МэВ..

Сечение деления (MT=18)

На рисунке 26 показаны оценки сечений деления.

Оценки ENDF/B-VII и JEFF-3.1 неприемлемы, поскольку противоречат систематическим тенденциям поведения этой реакции на соседних ядрах. Оценки JENDL-3.3 и БРОНД-3 примерно равноценны.

96-Cm-242(N,F),SIG

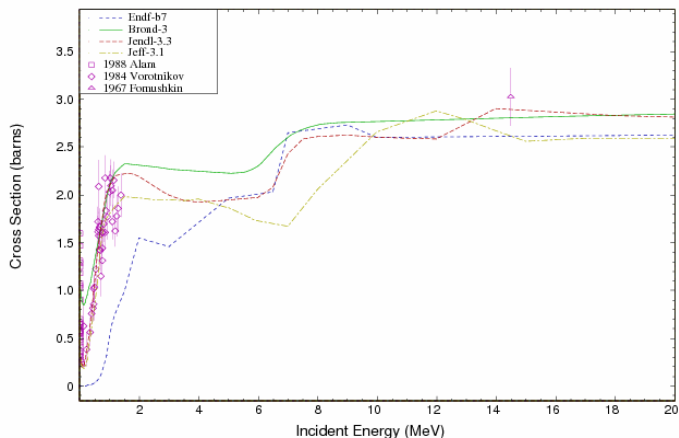


Рисунок 26. Сечение деления Cm-242 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102)

На рисунке 27 приведены оценки сечений радиационного захвата из библиотек ENDF/B-VII, БРОНД-3, JENDL-3.3 и JEFF-3.1. Значительные расхождения связаны с использованием различных моделей ядерных реакций и входных параметров к ним. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 выглядят предпочтительней.

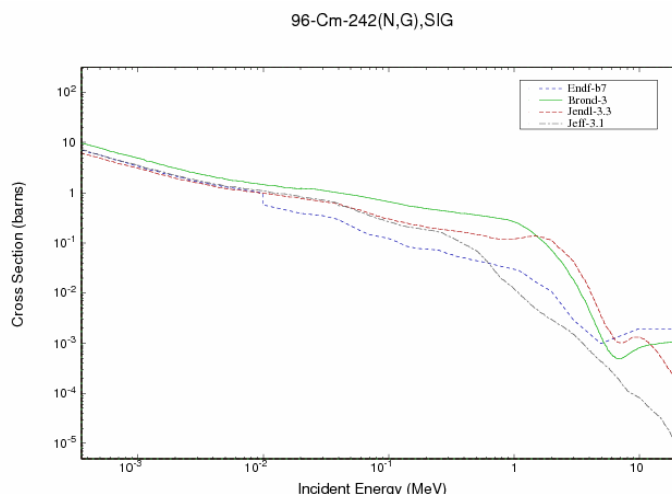


Рисунок 27. Сечение радиационного захвата нейтронов на Cm-242 в области энергий нейтронов.

Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17)

Для реакции (n,2n) экспериментальных данных нет. Все оценки получены расчетным путем по теоретическим моделям. Могут быть рекомендованы оценки JENDL-3.3 и БРОНД-3. Оценки ENDF/B-VII и JEFF-3.1 с точки зрения систематик сечений реакции (n,2n) не могут быть рекомендованы к использованию. Оценка JEFF-31 чрезмерно завышена, положение максимума функции возбуждения ENDF/B-VII не соответствует физическим представлениям.

Эти же соображения справедливы и для оцененных сечений реакции (n,3n).

Энергетические зависимости оцененных сечений реакции (n,2n) и (n,3n) показаны на рисунке 28.

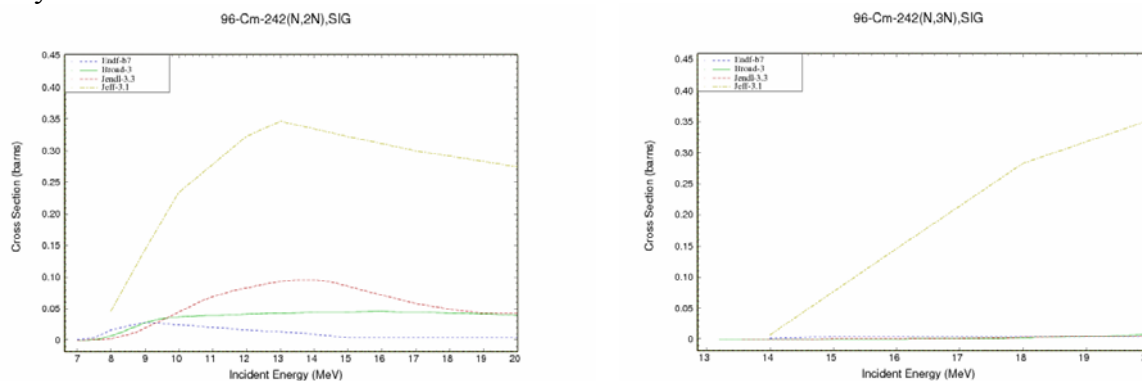


Рисунок 28. Сечение реакции (n,2n) и (n,3n) на Cm-242.

Заключение.

Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку БРОНД-3³.

Отметим, что для оценки БРОНД имеется возможность расширить область разрешенных до 275 эВ и неразрешенных резонансов до 40 кэВ.

³ Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. Включить выходы продуктов деления (файл MF=8) из ENDF/B-VI – М.Николаев.

96.4. Кюрий-243

Оценки сечений Cm –243 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3, БРОНД-3, JEFF-31 и в библиотеке актиноидов Минск-95 (Маслова и др.).

Оценка JEFF-31 выпущена в 2005 году и основана на оценке T.Nakagawa (JAERI) 1989 года без заметных изменений. Оценка БРОНД-3 выполнена в 1997 году, в 2001 выполнена ревизия файла. Оценка ENDF/B-VII выпущена в 2006 году, сохранена оценка ENDF/B-VI, в которой принята оценка Маслова и др. 1995 года. Оценка Маслова и др. выполнена в 1995 году. Оценка JENDL-3.3 выпущена в 2002 году, в ней принята без изменений оценка Маслова и др. (Минск) 1995 года.

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 96$ -зарядовое число;
- 1.2. $A = 243$ (атомный вес);
- 1.3. $AW = 240.973$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 29.1$ года, доминирует α -распад (99.71%) с вкладом $5.3E-9\%$ спонтанного деления и 0.29% ϵ -захвата.
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|---------|---------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | n,n' | -0.420 | .0422 | Cm-243 |
| 16 | n,2n | -5.684 | 5.708 | Cm-242 |
| 17 | n,3n | -12.670 | 12.723 | Cm-241 |
| 18 | деление | | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 6.799 | 0 | Cm-244 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов в библиотеках БРОНД-3, JENDL-3.3, ENDF/B-VII и Маслова (Минск) ограничена энергией 100 эВ, в JEFF-31 энергией 70 эВ.

Значения сечений для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в сравнении рекомендованными данными /1/ приведены в таблице 4.

Таблица 4. Резонансные свойства Cm-243.

| | МИНСК | БРОНД-3 | JEFF-3.1 | Мухабхаб |
|-----------------------|---------|---------|----------|----------|
| σ_{tot} | 752.419 | 752.419 | 757.5 | - |
| σ_{el} | 8.577 | 8.577 | 9.926 | - |
| σ_f | 613.319 | 613.319 | 617.4 | 617±20 |
| σ_γ | 130.523 | 130.523 | 130.2 | 130±10 |
| I_f | 1530.99 | 1530.99 | 1560.0 | 1570±100 |
| I_γ | 211.66 | 211.66 | 199 | 215±20 |

Представленные в таблице значения хорошо согласуются с экспериментальными данными и между собой. Однако, из сравнительных рисунков 29-31 видно, что оцененные

данные в области энергий разрешенных резонансов для полного сечения, сечений деления и радиационного захвата БРОНД-3 и Маслова совпадают, но оценка JEFF-31 несколько отличается для резонансов с энергией выше 10 эВ.

96-Cm-243(N,TOT),SIG

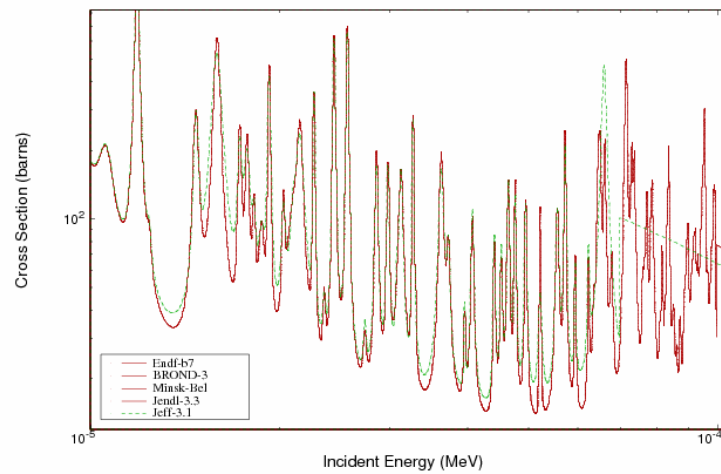


Рисунок 29. Полное сечение Cm-243 в области разрешенных резонансов.

96-Cm-243(N,F),SIG

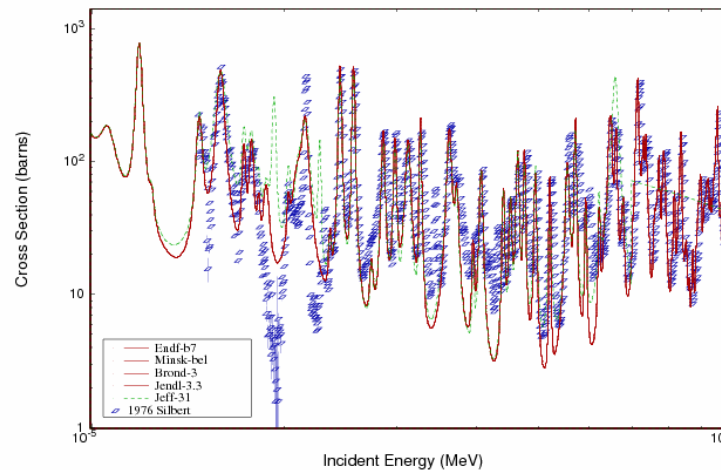


Рисунок 30. Сечение деления Cm-243 в области разрешенных резонансов.

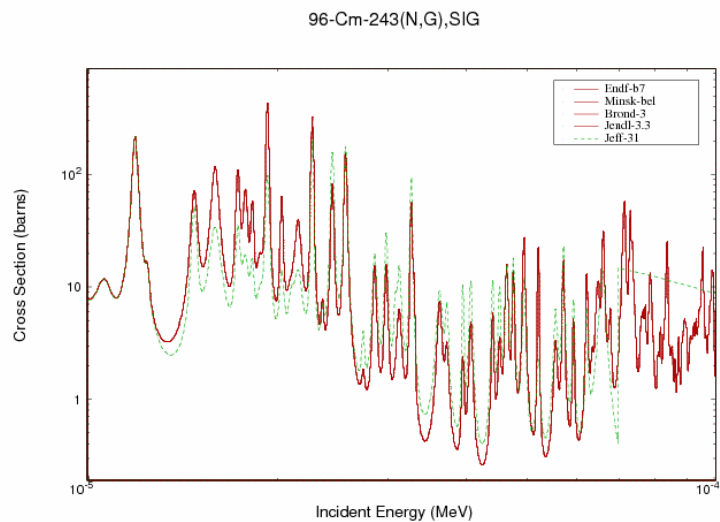


Рисунок 31. Сечение радиационного захвата нейтронов на Cm-243 в области разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов

Для области неразрешенных резонансов приняты следующие границы:

| | |
|------------------------------------|-------------------|
| БРОНД-3 | 100 эВ – 10 кэВ |
| МИНСК-95 (=JENDL-3.3, =ENDF/B-VII) | 100 эВ – 42.2 кэВ |
| JEFF-31 | 70 эВ – 40 кэВ |

На рисунке 32 представлены экспериментальные и оцененные данные по сечению деления в области энергий неразрешенных резонансов. Все оценки (кроме JEFF-31) совпадают.

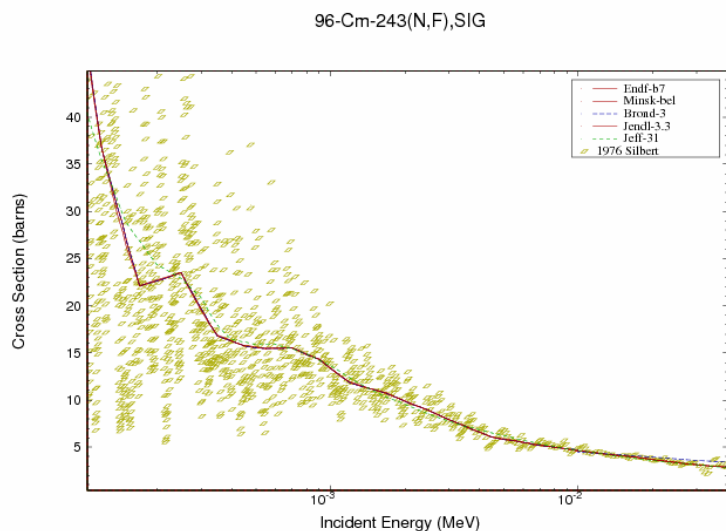


Рисунок 32. Сечение деления Cm-243 в области неразрешенных резонансов.

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

Полное сечение (MT=1)

Экспериментальных данных по полному сечению нет. Сравнение оцененных значений приведено на рисунке 33. Оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII основаны на оценке Маслова

и поэтому совпадают. Оценки БРОНД-3 и JEFF-31 несколько отличаются, но в отсутствии экспериментальных данных это различие трудно обосновать.

96-Cm-243(N,TOT),SIG

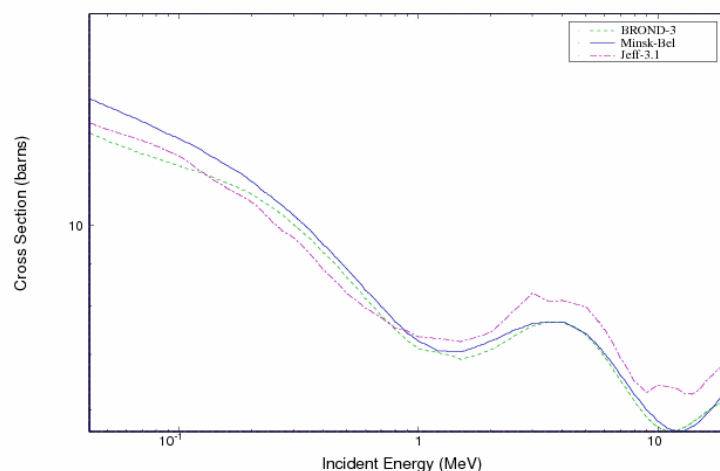


Рисунок 33. Полное сечение Cm-243 в области энергий нейтронов 40 кэВ –20 МэВ.

Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Сечение упругого рассеяния получено как разница полного сечения и суммы всех неупругих сечений. На рисунке 34 дано сравнение разных оценок. Оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, основанные на оценке Маслова, имеют более плавный ход и более приемлемы.

96-Cm-243(N,EL),SIG

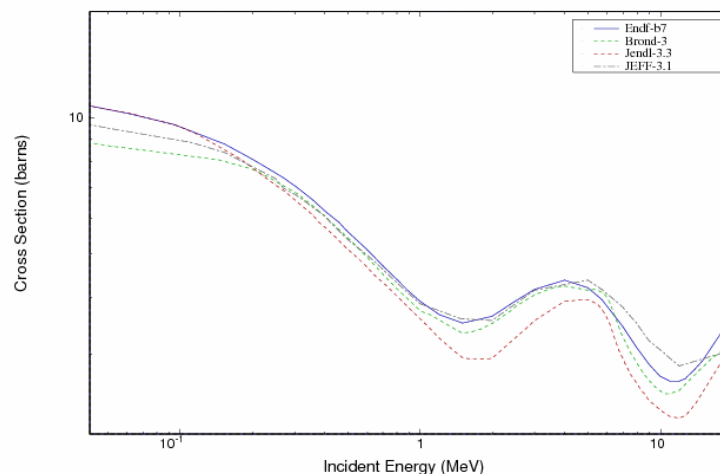


Рисунок 34. Сечение упругого рассеяния в области энергий 1-20 МэВ.

Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных нет. На рисунке 35 показаны оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек. Оценки и Маслова совпадают. Оценка БРОНД-3 лежит существенно ниже оценки Маслова (=ENDF/B-VII, JENDL-3.3), а оценка JEFF-3.1 в области 2-6 МэВ выше указанных оценок. Оценка, принятая в ENDF/B-VII, выглядит предпочтительней.

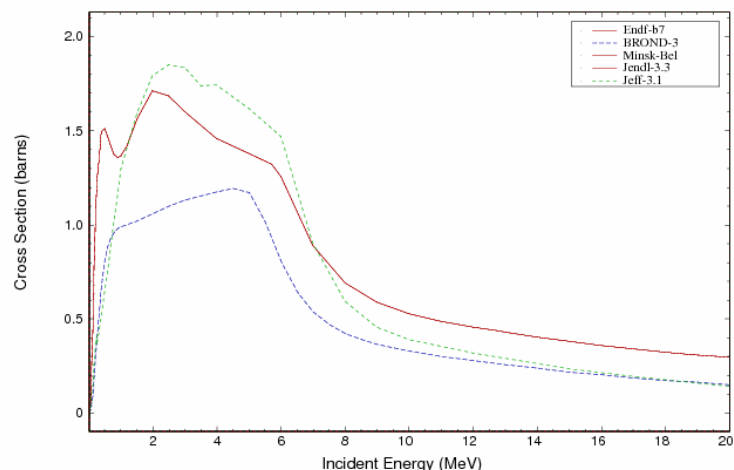


Рисунок 35. Сечение неупругого рассеяния в области энергий 1-20 МэВ..

Сечение деления (MT=18).

На рисунке 36 показаны оценки сечений деления. Данные оценки Маслова (=ENDF/B-VII) сильно занижены и противоречат экспериментальным данным и общей тенденции некоторого подъема сечения деления в области выше максимума в сечении реакции (n,2n) (11-12 МэВ). Оценке БРОНД-3 следует отдать предпочтение, поскольку она лучше соответствует систематическим тенденциям в поведении энергетической зависимости сечений деления на соседних ядрах.

Кроме того, авторами оценки БРОНД-3 при анализе был проведен тщательный анализ и последующая перенормировка экспериментальных сечений на новые стандартные и справочные данные. Полученные скорректированные данные были аппроксимированы методом Паде-аппроксимации /5/.

Число нейтронов на деление принято на основе расчетов по модели Мэдлэнда-Никса /4/. Данные по числу запаздывающих нейтронов основаны систематике Таттла /3/.

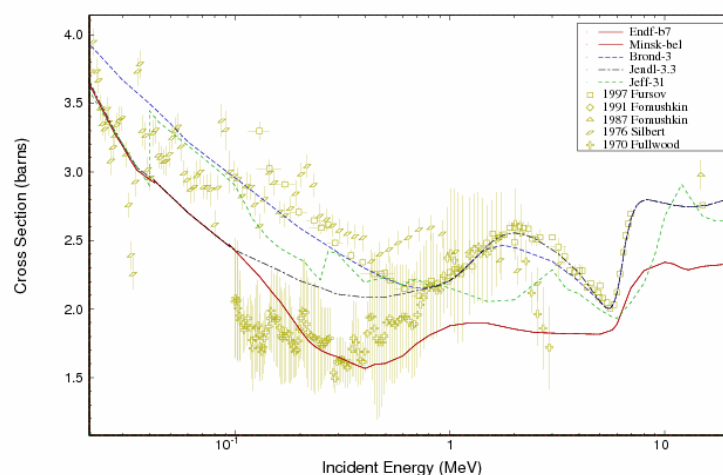


Рисунок 36. Сечение деления Cm-243 в области энергий нейтронов 0.05-20 МэВ.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

На рисунке 37 приведены оценки сечений радиационного захвата из библиотек БРОНД-3, JENDL-3.3, JEFF-3.1 и Маслова (=ENDF/B-VII). Расхождение оценок связано с использованием различных моделей ядерных реакций и входных параметров к ним. В отсутствии экспериментальных данных трудно отдать явное предпочтение одной из них, хотя оценка БРОНД-3 выглядит привлекательней.

96-Cm-243(N,G),SIG

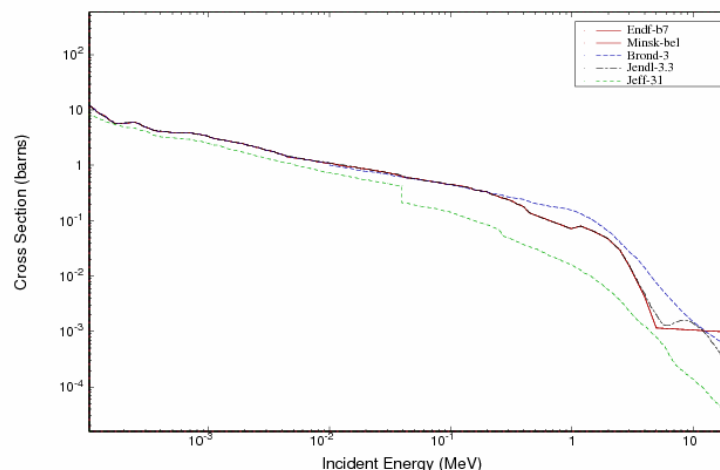
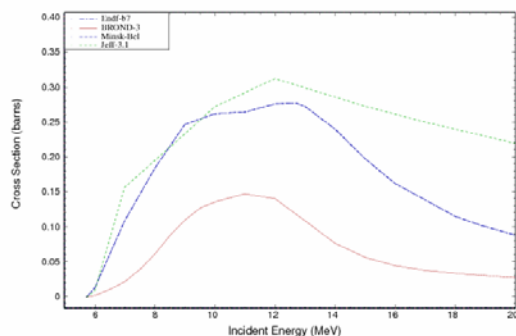


Рисунок 37. Сечение радиационного захвата в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17).

Для реакции (n,2n) экспериментальных данных нет, все оценки получены расчетом по теоретическим моделям. Оценки JENDL-3.3, ENDF/B-VII, Маслова и др. совпадают и почти в 2 раза отличаются по абсолютной величине в максимуме функции возбуждения. Поскольку (см. рис. 36) для сечения деления рекомендована оценка БРОНД-3, то в соответствии с систематикой [7] следует принять и более низкую оценку БРОНД-3 для реакции (n,2n). Оценки сечений реакций (n,2n) и (n,3n) из JEFF-3.1 не согласуются между собой и с сечением деления с точки зрения физических представлений. Для реакции (n,3n) экспериментальных данных также нет. Оценки JENDL-3.3, ENDF/B-VII, Маслова (=JENDL-3.3, ENDF/B-VII), незначительно отличаются от оценки БРОНД-3. Оценка JEFF-3.1 чрезмерно завышена.

96-Cm-243(N,2N),SIG



96-Cm-243(N,3N),SIG

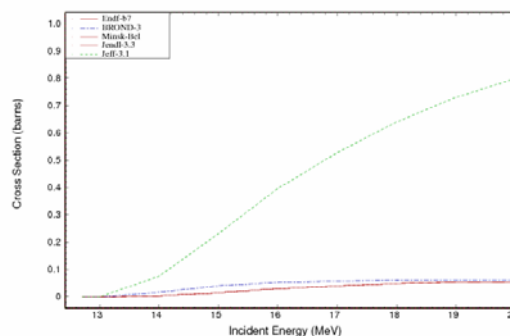


Рисунок 38. Сечение реакции (n,2n) и (n,3n) на Cm-243.

Закключение.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в области разрешенных резонансов все оценки практически опираются на единый набор экспериментальных данных. Оценка JEFF-31 отличается от остальных оценок. Оценка БРОНД-3 для реакции деления в области энергий нейтронов выше резонансной и для реакции (n,2n) имеет существенные преимущества.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку БРОНД-3⁴.

Отметим, что для оценки БРОНД имеется возможность расширить область неразрешенных резонансов до 40 кэВ.

Автор отбора данных

Игнатюк А.В, Манохин В.Н.

96.5. Кюрий-244

Оценки сечений Cm-244 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3, БРОНД-3, JEFF-3.1 и в библиотеке актинидов Минск-95 (Маслов и др.).

Оценка JEFF-3.1 выпущена в 2005 году после некоторой ревизии. Фактически в основе этой оценки лежит оценка 1978 года, включенная сначала в ENDF/B-V и затем конвертированная в ENDF/B-VI.8. Оценка БРОНД-3 выполнена в 1997 году, в 2001 выполнена ревизия файла. Оценка JENDL-3.3 выпущена в 2002 году и включает ревизованную в 2000 году оценку T.Nakagawa 1989 года. Оценка ENDF/B-VII выпущена в 2002 году, в ней принята оценка JENDL-3.3.

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 96$ -зарядовое число;
- 1.2. $A = 244$ (атомный вес);
- 1.3. $AW = 241.966$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 18.10$ лет, доминирует α -распад с вкладом $1.4E-4\%$ спонтанного деления;
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт [*]) |
|-----|---------|---------|---------------------------|-----------------------------|
| 4 | n,n' | -.0429 | .0431 | Cm-244 |
| 16 | n,2n | -6.799 | 6.828 | Cm-243 |
| 17 | n,3n | -12.494 | 12.546 | Cm-242 |
| 18 | деление | | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 5.522 | 0 | Cm-245 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов

⁴ Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. Включить данные о выходах продуктов деления из EBDF/B-VI. – М.Николаев.

Область разрешенных резонансов во всех библиотеках ограничена энергией 150 эВ. Значения сечений для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в сравнении рекомендованными данными [1] приведены в таблице 5.

Таблица 5. Резонансные свойства Cm-244.

| | JENDL-3.3 | JEFF-3.1 | БРОНД-3 | Мухабхаб |
|-------------------|-----------|----------|---------|-----------|
| σ_{tot} | 27.20 | 18.13 | 27.62 | 27.6±1.4 |
| σ_{γ} | 11.06 | 7.16 | 11.34 | 11.8±0.7 |
| σ_f | 1.04 | 0.60 | 1.03 | 1.04±0.20 |
| σ_{γ} | 15.10 | 10.4 | 15.25 | 15.2±1.2 |
| I_f | 13.4 | 18.7 | 14.58 | 12.5±2.5 |
| I_{γ} | 660.0 | 594.0 | 639.43 | 650±30 |

На рисунках 39-41 представлены экспериментальные и оцененные значения полного сечения, сечения деления и радиационного захвата для Cm-244 в области энергий разрешенных резонансов.

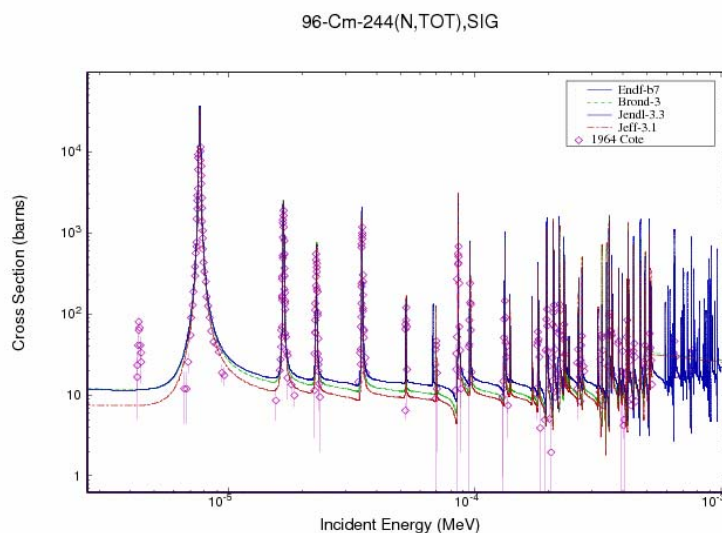


Рисунок 39. Полное сечение Cm-244 в области энергий разрешенных резонансов.

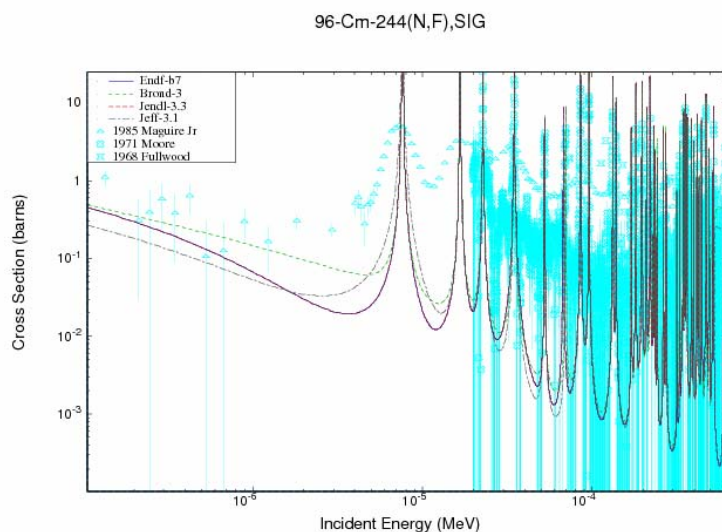


Рисунок 40. Сечение деления Cm-244 в области энергий разрешенных резонансов.

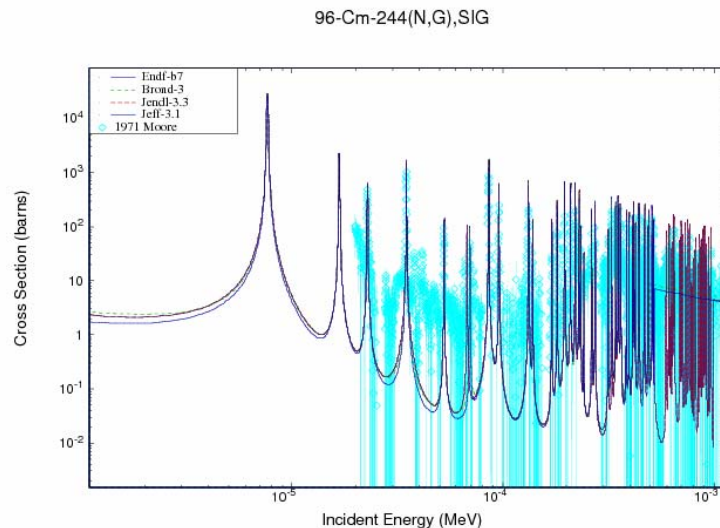


Рисунок 41. Сечение радиационного захвата в области энергий разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов

Для области неразрешенных резонансов приняты следующие границы:

| | |
|-----------|-----------------|
| БРОНД-3 | 500 эВ – 20 кэВ |
| JENDL-3.3 | 1 кэВ – 40 кэВ |
| JEFF-3.1 | 525 эВ – 10 кэВ |

На рисунке 42 представлены экспериментальные и оцененные данные по сечению деления в области энергий неразрешенных резонансов. Оценка JENDL-3.3 (=ENDF/B-VII) лежит на верхней границе массива экспериментальных данных и плохо с ним согласуется. Оценки БРОНД-3 и JEFF-3.1 существенно отличаются от указанных оценок, однако они имеют нерегулярную структуру. Все четыре оценки не вызывают удовлетворения, но оценке JENDL-3.3 следует отдать предпочтение.

96-Cm-244(N,F),SIG

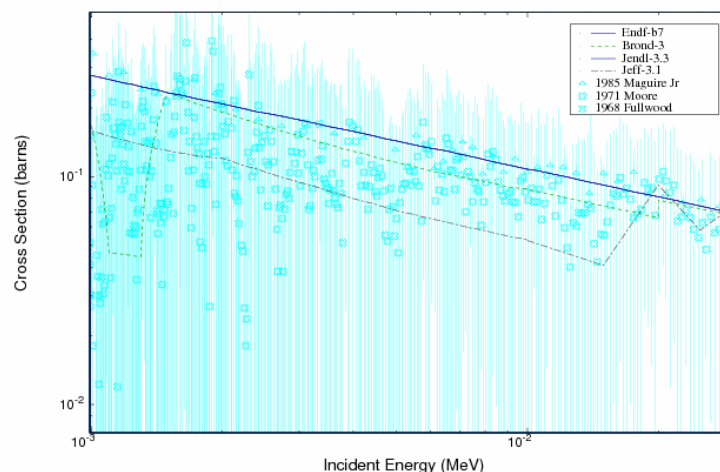


Рисунок 42. Сечение деления Cm-244 в области энергий неразрешенных резонансов.

На рисунке 43 показано сравнение сечений радиационного захвата нейтронов на Cm-244 в области неразрешенных резонансов. В этом случае может быть принята любая оценка, хотя описание экспериментальных данных в области нескольких кэВ не является оптимальным.

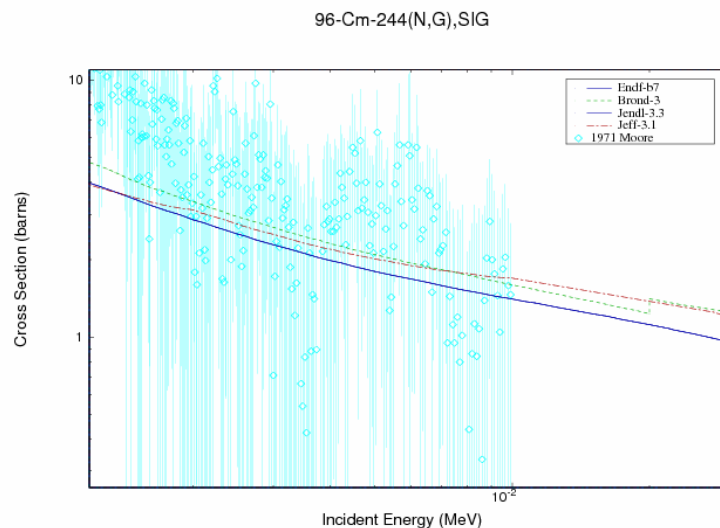


Рисунок 43. Сечение радиационного захвата нейтронов на Cm-244 в области энергий неразрешенных резонансов.

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

Полное сечение (MT=1)

В быстрой области энергий нейтронов экспериментальных данных нет (рисунок 44). Оценка БРОНД-3 близка оценке JENDL-3.3, обе оценки приемлемы.

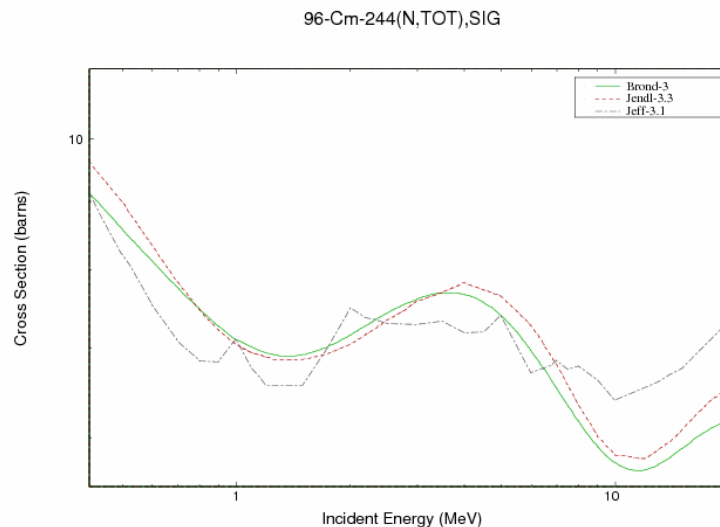


Рисунок 44. Полное сечение Cm-244 в области энергий быстрых нейтронов.

Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Сечение упругого рассеяния получено как разница полного сечения и суммы всех неупругих сечений. На рисунке 45 дано сравнение разных оценок. Экспериментальных данных нет. Расхождения между оценками не имеют принципиального характера.

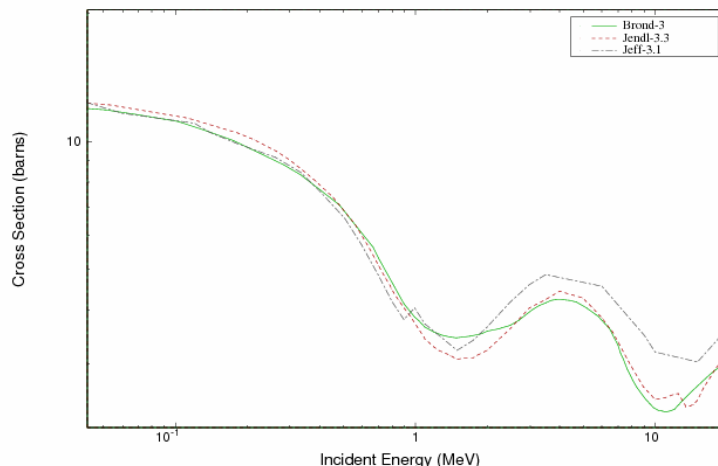


Рисунок 45. Сечение упругого рассеяния в области энергий 1-20 МэВ.

Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных нет. На рисунке 46 показаны оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек.

Из физических соображений функции возбуждения БРОНД-3 следует отдать предпочтение. Оценка JEFF-3.1 по непонятным причинам ограничена энергией 6 МэВ и совершенно неприемлема.

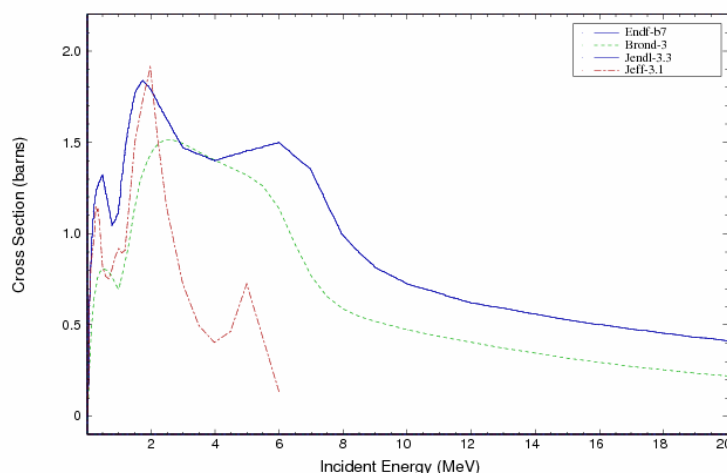


Рисунок 46. Сечение неупругого рассеяния в области энергий 1-20 МэВ.

Сечение деления (MT=18)

На рисунке 47 показаны оценки сечений деления БРОНД-3, JENDL-3.3 (ENDF/B-VII) в области энергий нейтронов до 7 МэВ следует отдать предпочтение оценке БРОНД-3, однако выше 7 МэВ все оценки нельзя признать удовлетворительными. Оценки ENDF/B-VII и JENDL-3.3 в области энергий примерно 6-9 МэВ занижены, а оценка JEFF-3.1 завышена в области энергий 11-20 МэВ. Анализ экспериментальных точек при энергии 15 МэВ, выполненный в процессе оценки БРОНД-3, показал, что эти данные существенно завышены. Оценке БРОНД-3 следует отдать предпочтение, хотя при энергиях 10-13 МэВ с

точки зрения систематических тенденций сечение несколько завышено. При оценке БРОНД-3 был использован метод Паде-аппроксимации /5/.

96-Cm-244(N,F),SIG

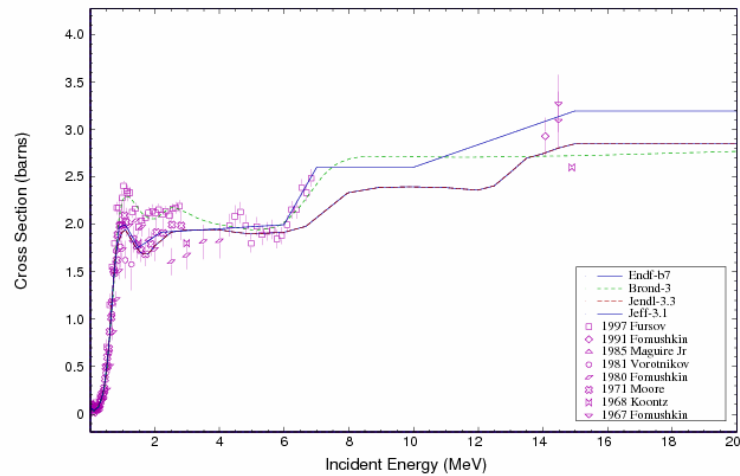


Рисунок 47. Сечение деления в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102)

На рисунке 48 приведены оценки сечений радиационного захвата. Экспериментальных данных нет. Расхождения в оцененных данных связаны с использованием различных моделей ядерных реакций и входных параметров к ним. Оценки БРОНД-3 и JEFF-3.1 выглядят более привлекательными.

96-Cm-244(N,G),SIG

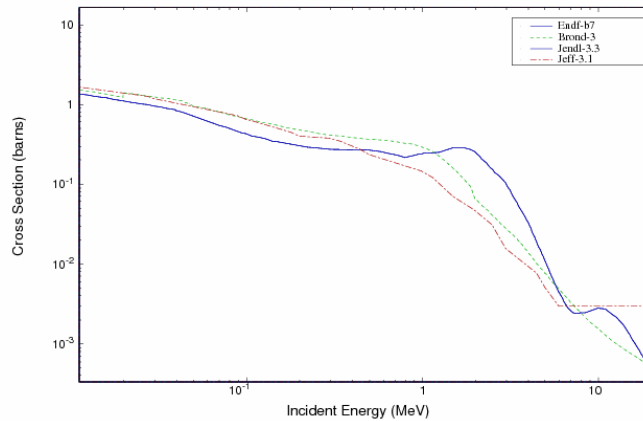


Рисунок 48. Сечение радиационного захвата нейтронов на Cm-244 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17)

Сравнение оцененных значений сечения реакций (n,2n), (n,3n) показано на рисунке 49. Оценка сечения реакции (n,2n) в БРОНД-3 была получена расчетом по теоретической модели, но согласована с систематикой функций возбуждения /6/. Оценка JENDL-3.3 (=ENDF/B-VII) также не противоречат систематикам. Оценка JEFF-3.1 неприемлема как по форме функции возбуждения, так и абсолютной величине.

Для реакции (n,3n) экспериментальных данных нет. Оценки сечений этой реакции из JENDL-3.3 (=ENDF/B-VII) и БРОНД-3 примерно равноценны. Оценка JEFF-3.1 также неприемлема как по форме функции возбуждения, так и абсолютной величине.

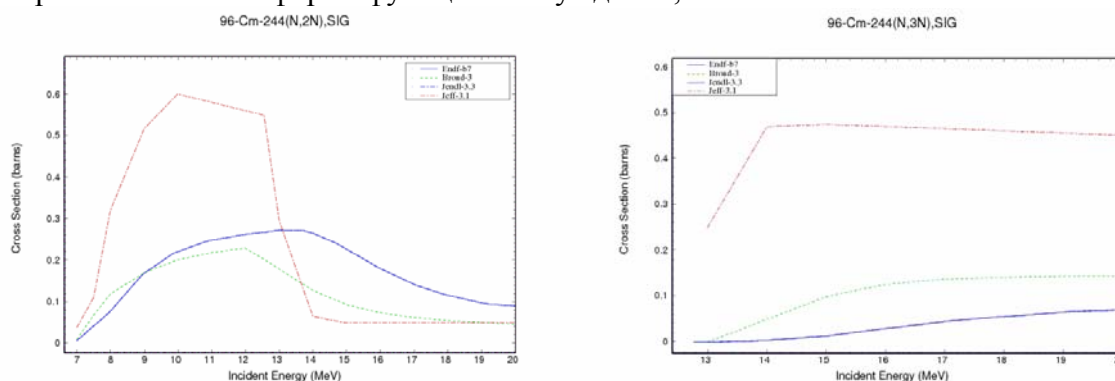


Рисунок 49. Сечение реакции (n,2n) и (n,3n) для Cm-244.

Заключение.

Для основных сечений оценка БРОНД-3 имеет ряд преимуществ по сравнению с другими оценками.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку БРОНД-3⁵.

Автор отбора данных

Игнатюк А.В, Манохин В.Н.

96.6. Кюрий-245

Оценки сечений Cm-245 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3, JEFF-3.1 и в библиотеке Маслова и др. (Минск).

Оценки JENDL-3.3, ENDF/B-VII и JEFF-3.1 выпущены в 2002 году и основаны на оценке Маслова и др. 1995 года, ревизованной в 2000 году. Оценка Маслова и др. выполнена в 1995 году.

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 96$ -зарядовое число;
- 1.2. $A = 245$ (атомный вес);
- 1.3. $AW = 242.960$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 8500$ лет, доминирует α -распад с вкладом $6.1E-7\%$ спонтанного деления;
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|----|---------|---------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | n,n' | -0.0550 | .0413 | Cm-245 |
| 16 | n,2n | -5.520 | 5.543 | Cm-244 |
| 17 | n,3n | -12.320 | 12.371 | Cm-243 |
| 18 | деление | | 0 | продукты |

⁵ Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. Включить данные о выходах продуктов деления из ENDF/B-VI. – М.Николаев.

| | | | | |
|-----|-----|-------|---|---------|
| | | | | деления |
| 102 | n,g | 6.450 | 0 | Cm-246 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов во всех библиотеках ограничена энергией 100 эВ.

Значения сечений для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в сравнении рекомендованными данными [1] приведены в таблице 6.

Таблица 6. Резонансные свойства Cm-245.

| | JENDL-3.3 | МИНСК | ENDF/B-VII | JEFF-31 | Мухабхаб |
|-----------------|-----------|----------|------------|----------|----------|
| σ_{tot} | 2512.50- | 2512.50- | 2512.50- | 2512.50- | 2514±80 |
| σ_{el} | 10.88 | 10.97 | 10.88 | 10.88 | - |
| σ_f | 2142.40 | 2142.38 | 2142.40 | 2142.40 | 2145±58 |
| σ_γ | 359.20 | 359.15 | 359.20 | 359.20 | 369±17 |
| I_f | 804 | 793.93 | 804 | 804 | 840±40 |
| I_γ | 106 | 105.4 | 106 | 106 | 101±8 |

На рисунках 50 - 52 представлены экспериментальные и оцененные данные в области энергий разрешенных резонансов. Различий между оценками нет.

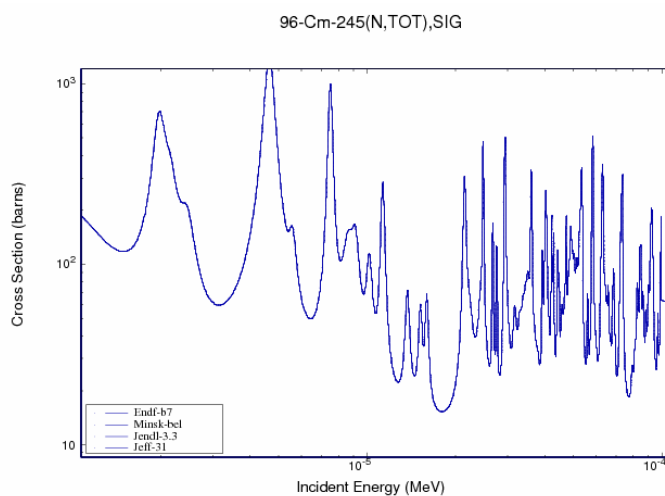


Рисунок 50. Полное сечение Cm-245 в области энергий разрешенных резонансов.

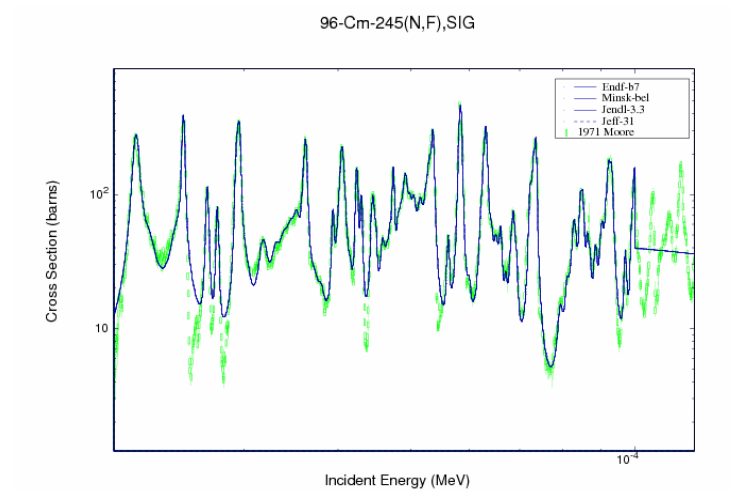


Рисунок 51. Сечение деления Cm-245 в области энергий разрешенных резонансов.

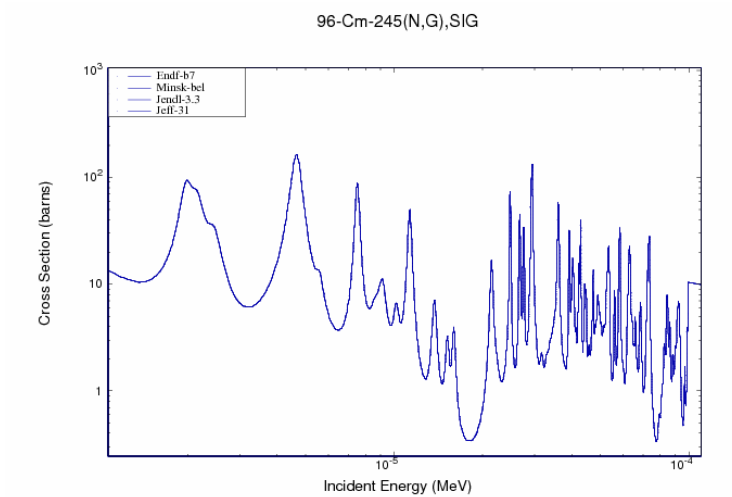


Рисунок 52. Сечение радиационного захвата нейтронов на Cm-245 в области энергий разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов

Для области неразрешенных резонансов в оценке Маслова приняты границы 100 эВ – 55 кэВ, в остальных оценках - 100 эВ – 54кэВ.

На рисунке 53 представлены экспериментальные и оцененные данные по сечению деления в области энергий неразрешенных резонансов. Различий в оценках также нет.

По полному сечению и сечению радиационного захвата экспериментальных данных нет. Все четыре оценки дают одни и те же зависимости.

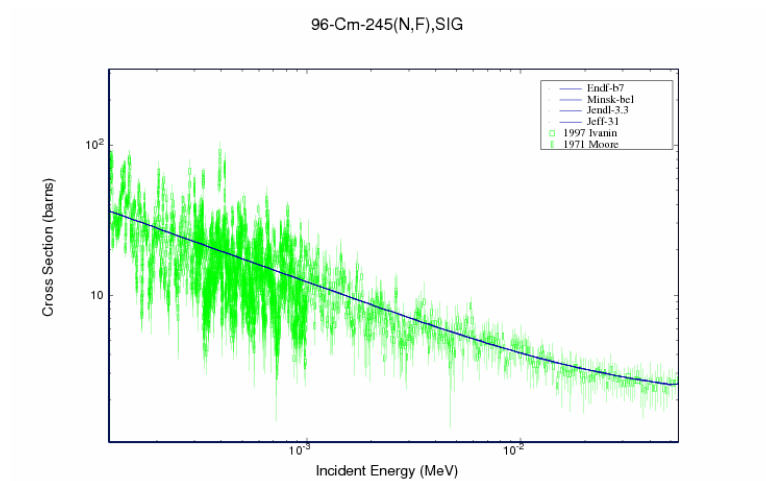


Рисунок 53. Сечение деления Cm-245 в области энергий неразрешенных резонансов.

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

Полное сечение (MT=1)

В быстрой области энергий нейтронов экспериментальных данных по полному сечению нет, между представленными оценками расхождений нет.

Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Сечение упругого рассеяния получено как разница полного сечения и суммы всех неупругих сечений.

Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных нет. На рисунке 54 показано оцененное интегральное сечение неупругого рассеяния. Как видно, все оценки используют одни и те же данные. К функции возбуждения по форме и по абсолютной величине замечаний нет.

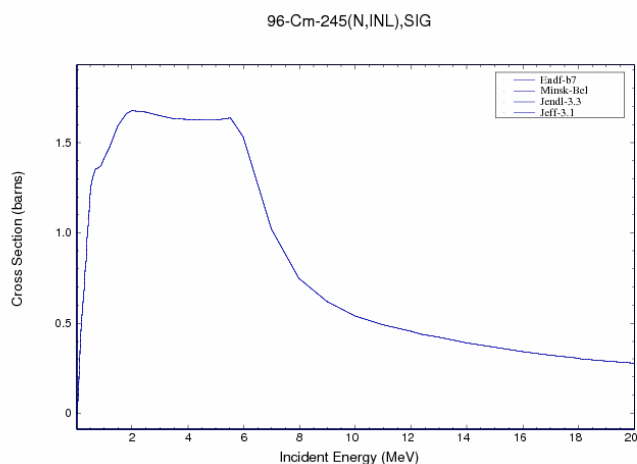


Рисунок 54. Сечение неупругого рассеяния Cm-245 в области энергий 1-20 МэВ.

Сечение деления (MT=18)

На рисунках 55-56 показаны оценки сечений деления. Оценки ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и JEFF-31 основаны на оценке Маслова, но в 2000 была проведена корректировка данных указанных оценок, но файл Маслова такой корректировке не подвергался, поэтому энергетическая зависимость сечения деления оценки Маслова в области энергий быстрых нейтронов заметно отличается. Следует отдать предпочтение оценке ENDF/B-VII (=JENDL-3.3), в области энергий 8-20 МэВ эта оценка лучше согласуется с систематическим поведением сечений деления в этой области.

Число нейтронов на деление принято на основе данных Хохлова /2 / и расчетов по модели Мэдлэнда-Никса /4/. Данные по числу запаздывающих нейтронов основаны систематике Таттла /3/.

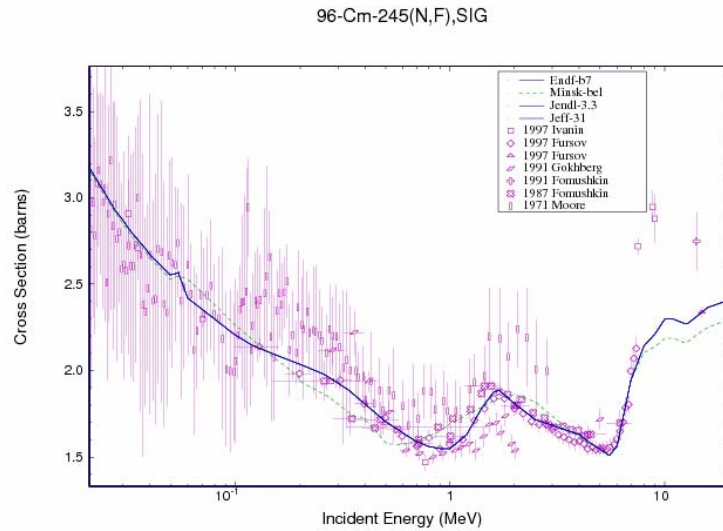


Рисунок 55. Сечение деления Cm-245 в области энергий нейтронов 60 кэВ-20 МэВ.

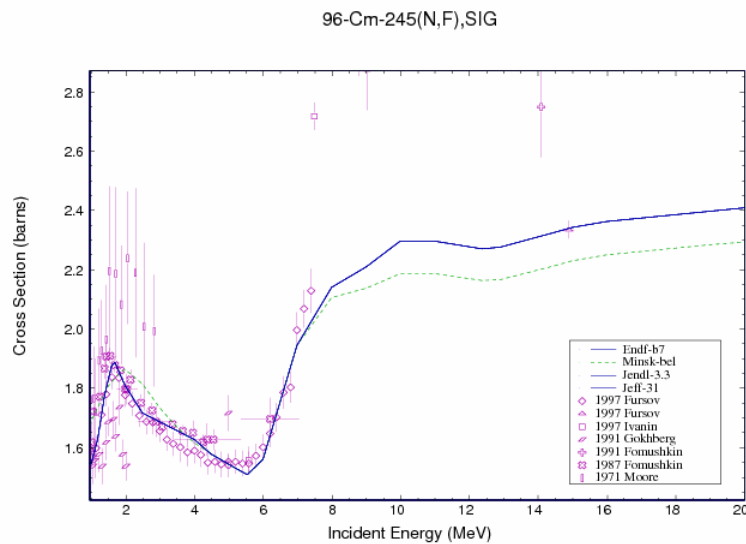


Рисунок 56. Сечение деления Cm-245 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102)

На рисунке 57 приведены оценки сечений радиационного захвата из библиотек ENDF/B-VII, JENDL-3.3, JEFF-31 и Маслова. В области энергий до 4 МэВ имеется полное согласие всех оценок. При больших энергиях оценка JEFF-31 дает нулевое сечение, поэтому предпочтение следует отдать оценке ENDF/B-VII(=JENDL-3.3).

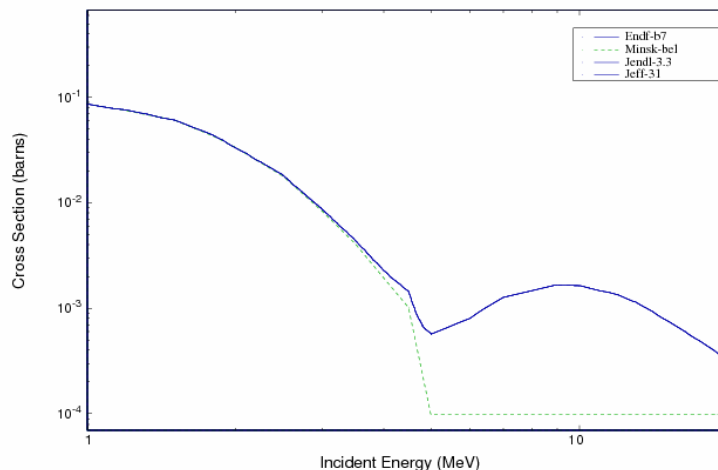


Рисунок 57. Сечение радиационного захвата в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17).

Экспериментальных данных по сечениям реакций (n,2n) и (n,3n). Представленные на рисунке 58 функции возбуждения не противоречат систематикам сечений указанных реакций, хотя сечение реакции (n,2n) несколько (на 100- 150 мбарн) завышено.

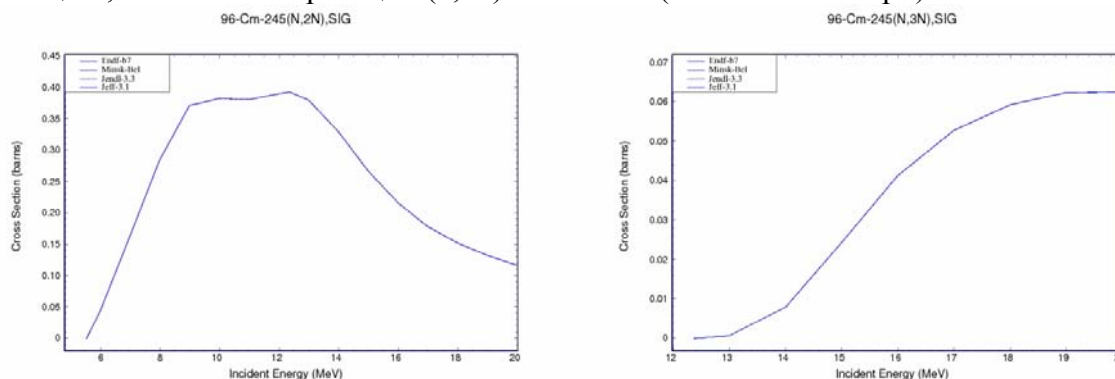


Рисунок 58. Сечение реакции (n,2n) и (n,3n) для Cm-245.

Заключение.

Из проведенного анализа следует, что в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII и JEFF-31 принят один и тот же набор данных, основанный на ревизованной оценке Маслова.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку ENDF/B-VII.⁶

В настоящее время нет каких-либо экспериментальных данных, указывающих на необходимость уточнения этой оценки.

Автор отбора данных
Манохин В.Н.

⁶ Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. Включить данные о выходах продуктов деления из ENDF/B-VI. – М.Николаев.

96.7. Кюрий-246

Оценки нейтронных сечений для Cm-246 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3, JEFF-31 и Маслова и др.

Оценка Маслова выпущена в 1996 году. Оценка ENDF/B-VII выпущена в 2005 году, получена из ENDF/B-VI, которая является оценкой Маслова 1996 года. Оценка JENDL-3.3 выпущена в 2002 году и представляет собой ревизию 2000 года оценки Маслова 1996 года.

Оценка JEFF-31 выпущена в 2005 году, конвертирована из JEFF-3.0 после некоторой ревизии, является оценкой Маслова 1996 года, существенные различия в области неразрешенных резонансов реакции деления.

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 96$ -зарядовое число;
- 1.2. $A = 243$ (атомный вес);
- 1.3. $AW = 243.953$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 4760$ года, доминирует α -распад (99.97%) с вкладом 2.6E-2% спонтанного деления..
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|---------|---------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | n,n' | -0.0429 | .0430 | Cm-246 |
| 16 | n,2n | -6.458 | 6.484 | Cm-245 |
| 17 | n,3n | -11.978 | 12.026 | Cm-244 |
| 18 | деление | | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 5.160 | 0 | Cm-247 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов в библиотеках БРОНД-3, JENDL-3.3, ENDF/B-VII и Маслова (Минск) ограничена энергией 100 эВ, в JEFF-31 энергией 70 эВ.

Значения сечений для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в сравнении рекомендованными данными /1/ приведены в таблице 7.

Таблица 7. Резонансные свойства Cm-246.

| | JENDL-3.3 | МИНСК | ENDF/B-VII | JEFF-3.1 | Мухабхаб |
|-----------------------|-----------|--------|------------|----------|-----------|
| σ_{tot} | 10.664 | 10.664 | 10.664 | 10.664 | - |
| σ_{el} | 9.208 | 9.208 | 9.208 | 9.208 | 11.1±0.2 |
| σ_{f} | 0.144 | 0.144 | 0.144 | 0.144 | 0.14±0.05 |
| σ_{γ} | 1.31 | 1.31 | 1.31 | 1.31 | 1.22±0.16 |
| I_{f} | 10.4 | 10.3 | 10.3 | 10.3 | 10.2±0.4 |
| I_{γ} | 115 | 114.6 | 114.6 | 114.6 | 121.±7. |

Согласно результатам таблицы 7, наблюдается хорошее согласие всех величин с экспериментом и между собой.

На рисунке 59-61 представлены экспериментальные и оцененные данные в области энергий разрешенных резонансов.

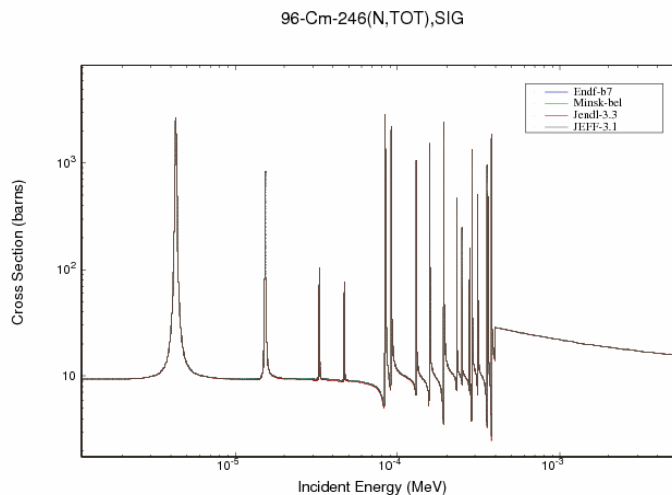


Рисунок 59. Полное сечение Cm-246 в области энергий разрешенных резонансов.

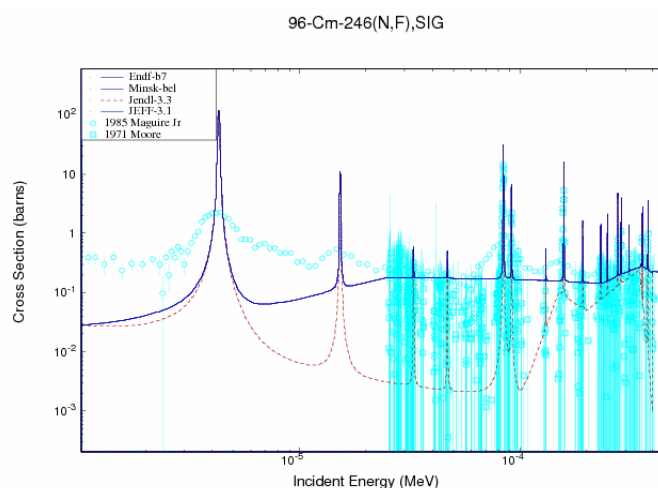


Рисунок 60. Сечение деления в области энергий разрешенных резонансов.

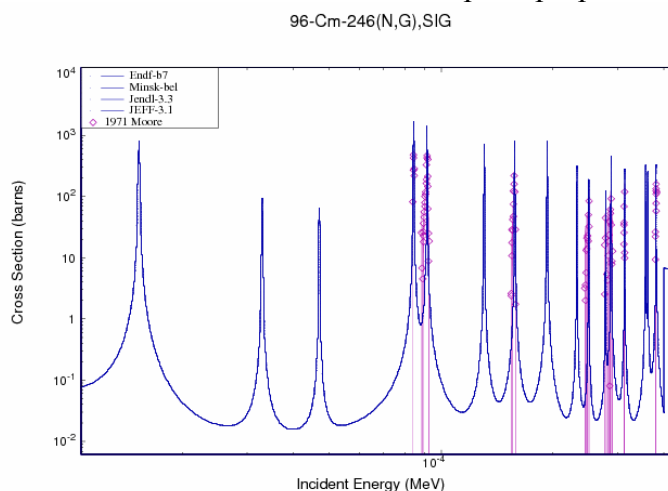


Рисунок 61. Сечение радиационного захвата нейтронов на Cm-246 в области энергий разрешенных резонансов.

Оценки полного сечения и сечений радиационного захвата, ENDF/B-VII, JENDL-3.3, JEFF-3.1 и Маслова совпадают, оценка JENDL-3.3 для сечения деления существенно

отличается. Это, по-видимому, связано с тем, что изменена подложка в сечении деления в соответствии с экспериментальными данными группы Maguire Jr. H.T. et al. (1985).

Область неразрешенных резонансов

Для области неразрешенных резонансов во всех оценках приняты следующие границы: 400 эВ – 43 кэВ. В этой области энергий различий между оценками нет.

На рисунке 62 представлены экспериментальные и оцененные данные по сечению деления в области энергий неразрешенных резонансов. Все оценки совпадают.

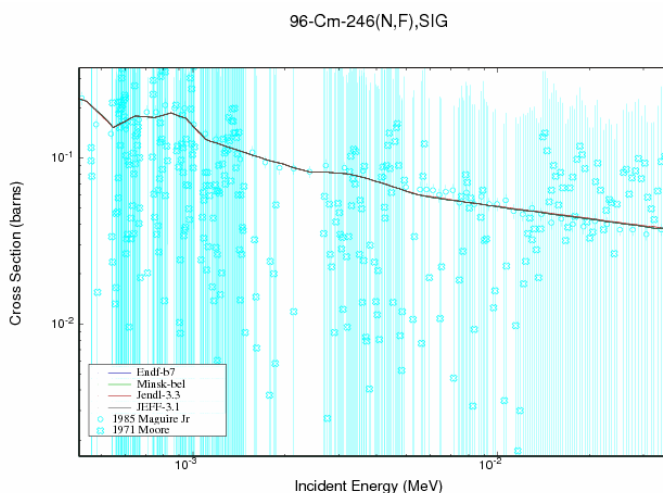


Рисунок 62. Сечение деления Cm-246 в области энергий неразрешенных резонансов.

Для полного сечения и сечения радиационного захвата в области энергий неразрешенных резонансов экспериментальных данных нет. Все оценки имеют одну и ту же зависимость.

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

Полное сечение (MT=1).

Экспериментальных данных нет, все оценки основаны на оценке Маслова и поэтому совпадают (см. рис. 63).

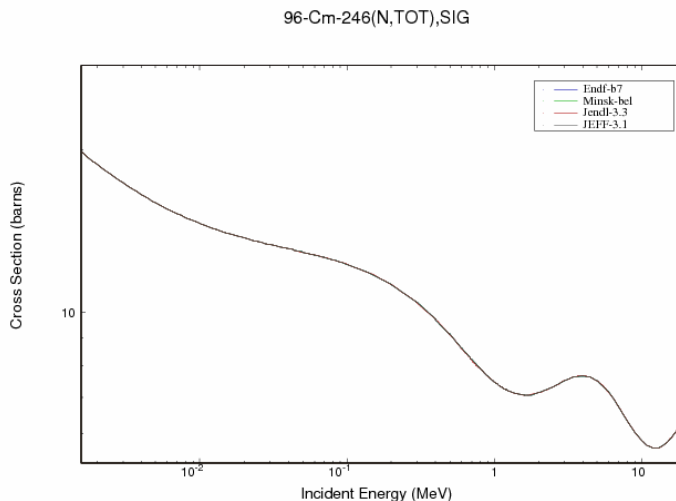


Рисунок 63. Полное сечение Cm-246 в области энергий нейтронов 40 кэВ – 20 МэВ.

Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Сечение упругого рассеяния получено как разница полного сечения и суммы всех неупругих сечений. На рисунке 64 дано сравнение разных оценок. В области энергий выше 8 МэВ оценка JENDL-3.3 лежит ниже, но это отличие от других оценок практически не является значимым.

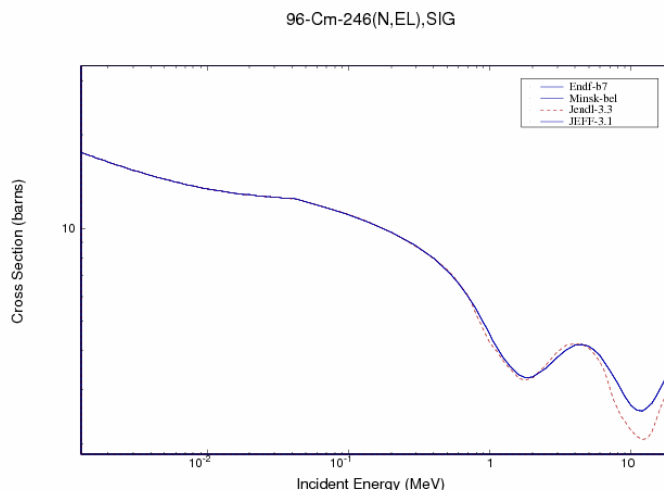


Рисунок 64. Сечение упругого рассеяния Cm-246 в области энергий 40кэВ-20 МэВ.

Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

На рисунке 65 показаны оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек. Во всех рассмотренных файлах одна и та же оценка. Существенных замечаний к оценке нет.

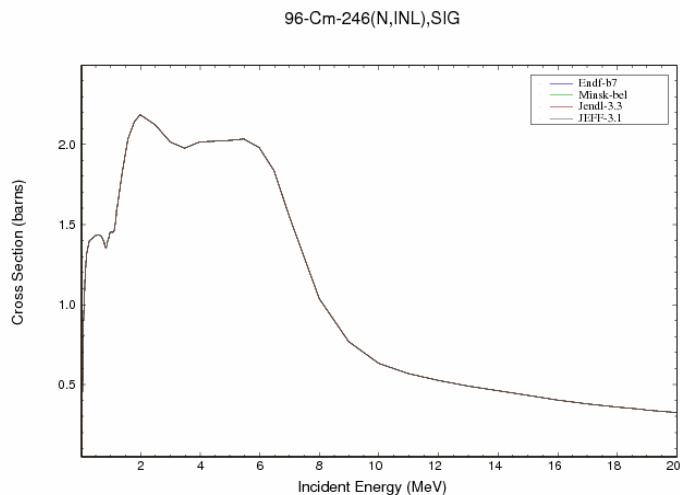


Рисунок 65. Сечение неупругого рассеяния Cm-246 в области энергий 1-20 МэВ.

Сечение деления (MT=18)

На рисунке 66 показаны оценки сечений деления. Оценки ENDF/B-VII, JEFF-3.1 и Маслова идентичны и в области энергий нейтронов выше 8 МэВ. С точки зрения систематического поведения сечений деления в этой области, они лежат слишком низко. С другой стороны, оценка JENDL-3.3 в этой области завышена и не согласуется также с явно завышенным сечением реакции (n,2n). Учитывая, что оценка JENDL-3.3 лучше

описывает экспериментальные данные при энергиях 4-7 МэВ, следует принять оценку JENDL-3.3, хотя она и нуждается в существенной коррекции в этой области энергий.

Число нейтронов на деление принято на основе данных расчетов по модели Мэдлэнда-Никса /2/. Данные по числу запаздывающих нейтронов основаны систематике Таттла /3/.

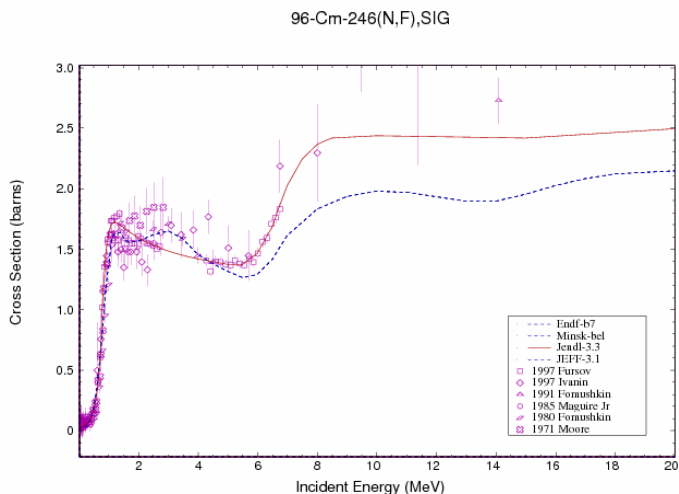


Рисунок 66. Сечение деления Cm-246 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

На рисунке 67 приведены оценки сечений радиационного захвата из библиотек ENDF/B-VII, JEFF-3.1, JENDL-3.3 и Маслова. В области энергий 7 МэВ имеется полное согласие всех оценок. Расхождение при более высоких энергиях связаны с использованием различных моделей ядерных реакций и входных параметров к ним и с количественной точки зрения принципиального значения не имеют.

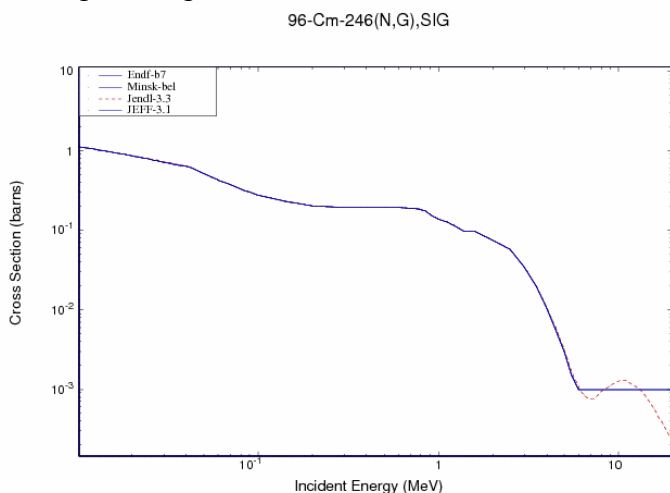


Рисунок 67. Сечение радиационного захвата Cm-246 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17).

Для реакции (n,2n) экспериментальных данных нет, все оценки получены расчетом по теоретическим моделям. Оценки JENDL-3.3, ENDF/B-VII, JEFF-31 и Маслова и др. совпадают. Анализ показывает, что они почти в 1,5 раза завышены с точки зрения

систематики /4/ сечений реакции $(n,2n)$ в максимуме функции возбуждения. Для реакции $(n,3n)$ экспериментальных данных также нет. Указанную на рисунке 68 оценку можно считать удовлетворительной.

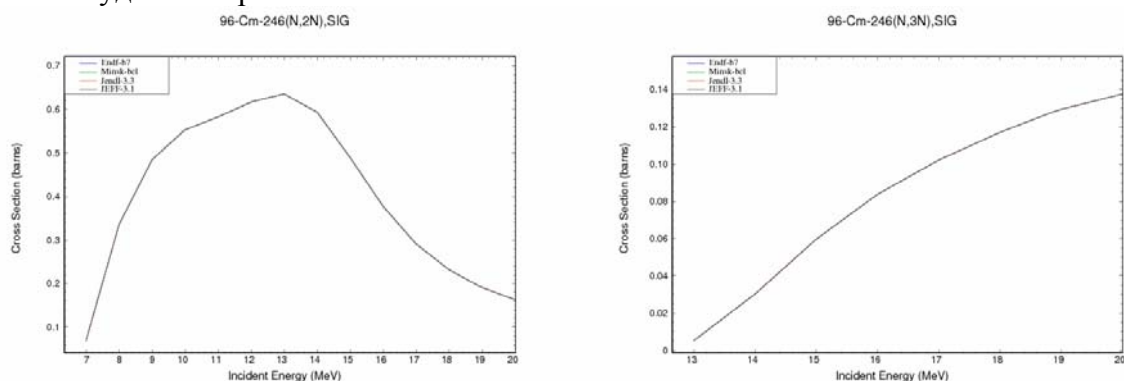


Рисунок 68. Сечение реакции $(n,2n)$ и $(n,3n)$ для Cm-246.

Заключение.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в области разрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных, и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. Файлы ENDF/B-VII, JEFF-31 и Маслова и др. содержат одни те же оценки. Оценка JENDL-3.3 в основном сформирована из тех же данных, кроме сечений деления.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку JENDL-3.3⁷ с учетом замечания по сечению деления в быстрой области.

Автор отбора данных

Манохин В.Н.

⁷ Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. Включить данные о выходах продуктов деления из ENDF/B-VI. – М.Николаев.

96.8. Кюрий-247

Оценки сечений Cm-247 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3, JEFF-31.

Оценка JEFF-3.1 выпущена в 2005 году и основана на оценке T.Nakagawa (JAERI) 1989. Оценка ENDF/B-VII выпущена в 2005 году и является совместной оценкой ORNL-JAERI. Оценка JENDL-3.3 выпущена в 2002 году и представляет собой ревизию 2002 года файла JAERI 1989 года.

1, Общие характеристики

1.1. $Z = 96$ -зарядовое число;

1.2. $A = 247$ (атомный вес);

1.3. $AW = 244.948$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);

1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 1.56E+7$ года, доминирует α -распад (100%).

1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|---------|---------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | n,n' | -0.0615 | 0.0618 | Cm-247 |
| 16 | n,2n | -5.156 | 5.177 | Cm-246 |
| 17 | n,3n | -11.600 | 11.647 | Cm-245 |
| 18 | деление | | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 6.211 | 0 | Cm-248 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов в библиотеках БРОНД-3, JENDL-3.3, ENDF/B-VII и Маслова (Минск) ограничена энергией 100 эВ, в JEFF-31 энергией 70 эВ.

Значения сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в сравнении рекомендованными данными /1/ приведены в таблице 8.

Таблица 8. Резонансные свойства Cm-247.

| | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | JEFF-3.1 | Мухабхаб |
|-----------------------|-----------|------------|----------|----------|
| σ_{tot} | 176.1 | 176.1 | 147.8 | -- |
| σ_{el} | 7.95 | 7.95 | 8.78 | -- |
| σ_f | 111.3 | 111.3 | 81.79 | 81.9±4.4 |
| σ_γ | 56.9 | 56.9 | 57.2 | 57±10 |
| I_f | 1130.0 | 1130.0 | 612.0 | 760±50 |
| I_γ | 574.0 | 574.0 | 535.0 | 530±30 |

Величины, полученные в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают между собой, но существенно расходятся с экспериментальными данными. Величины JEFF-31 ближе к рекомендованным данным. Следует отметить, что оценка JENDL (ENDF/B) ориентирована на результаты по делению, полученные группой Данона (1994 г.)

На рисунках 69-72 представлены экспериментальные и оцененные данные в области энергий разрешенных резонансов. Оценки полного сечения и сечений деления и

радиационного захвата ENDF/B-VII, JENDL-3.3 совпадают, оценка JEFF-3.1 существенно отличается большим пропуском уровней.

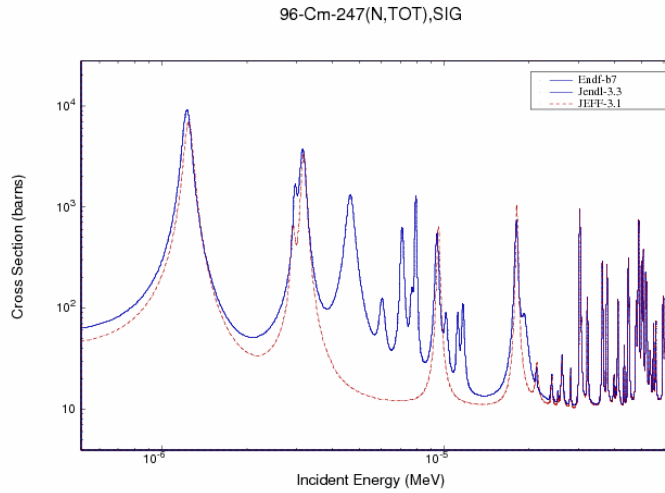


Рисунок 69. Полное сечение Cm-247 в области энергий разрешенных резонансов.

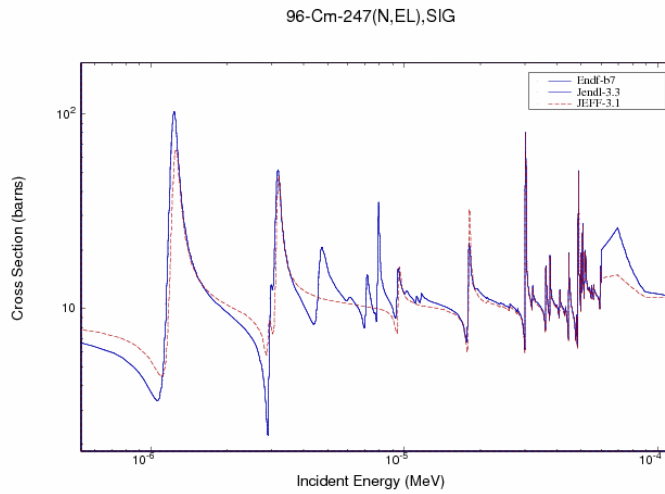


Рисунок 70. Сечение упругого рассеяния Cm-247 в области энергий разрешенных резонансов.

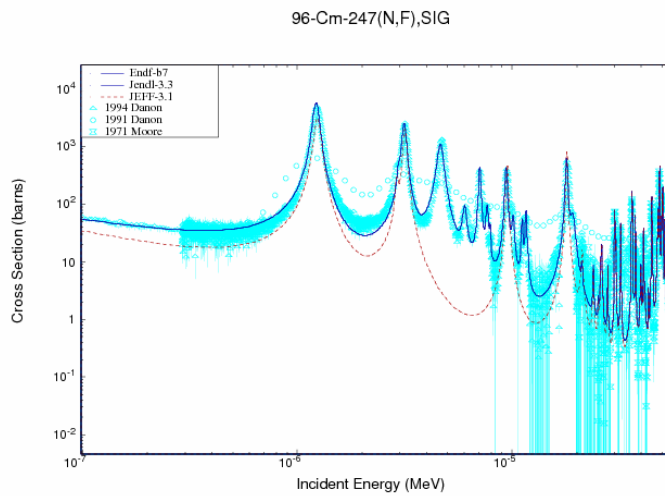


Рисунок 71. Сечение деления Cm-247 в области энергий разрешенных резонансов.

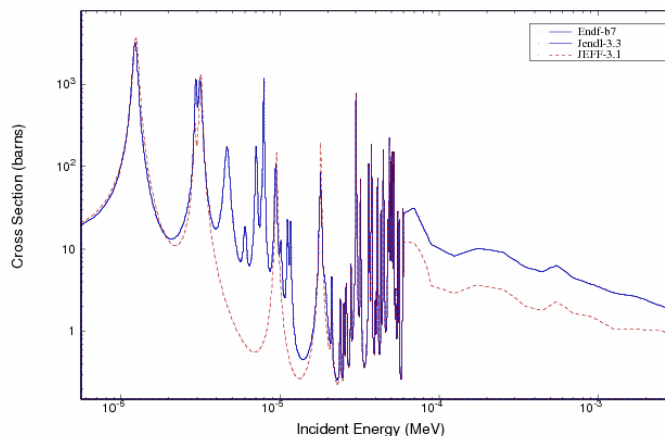


Рисунок 72. Сечение радиационного захвата Cm-247 в области энергий разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов.

Для области неразрешенных резонансов во всех оценках приняты следующие границы: 60 эВ –30. кэВ

На рисунке 73 представлены экспериментальные и оцененные данные по сечению деления в области энергий неразрешенных резонансов. Все оценки (кроме JEFF-31) совпадают.

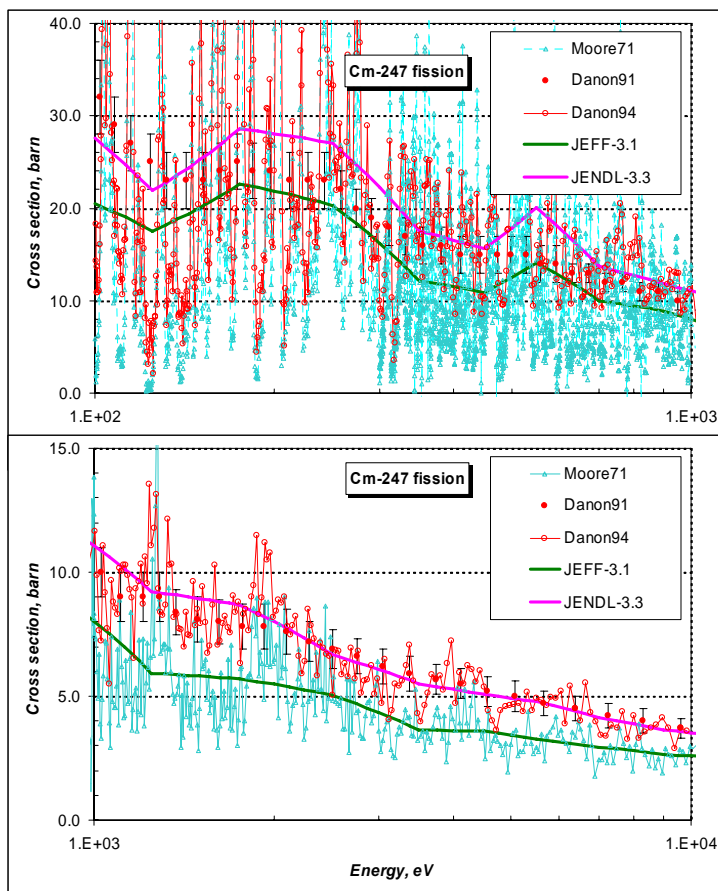


Рисунок 73. Сечение деления Cm-247 в области энергий неразрешенных резонансов.

Из приведенного на рисунке 73 сравнения видно, что оценка JEFF ориентирована на экспериментальные данные Moore(1971 г.) в то время, как оценка JENDL опирается на согласующиеся данные Danon'a (1991 г. и 1994 г.)

Для полного сечения и сечения радиационного захвата в области энергий неразрешенных резонансов экспериментальных данных нет. Все оценки имеют одну и ту же зависимость.

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

Полное сечение (MT=1)

В быстрой области энергий нейтронов по полному сечению экспериментальных данных нет (рис. 74). Оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, полученные расчетом по теоретическим моделям, согласуются между собой. Оценка JEFF-3.1 в области энергий неразрешенных резонансов лежит ниже за счет более низкого сечения деления.

96-Cm-247(N,TOT),SIG

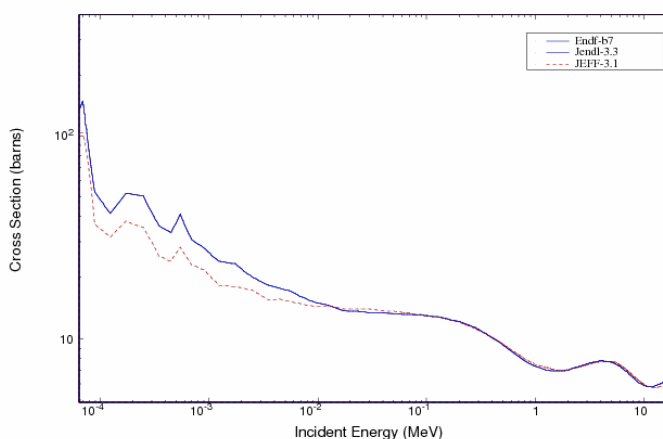


Рисунок 74. Полное сечение в области энергий нейтронов 40 кэВ –20 МэВ.

Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Сечение упругого рассеяния получено как разница полного сечения и суммы всех неупругих сечений. На рисунке 75 дано сравнение разных оценок. Расхождения между оценками не имеют принципиального характера, и за неимением экспериментальных данных нет возможности отдать предпочтение какой-либо одной из оценок.

96-Cm-247(N,EL),SIG

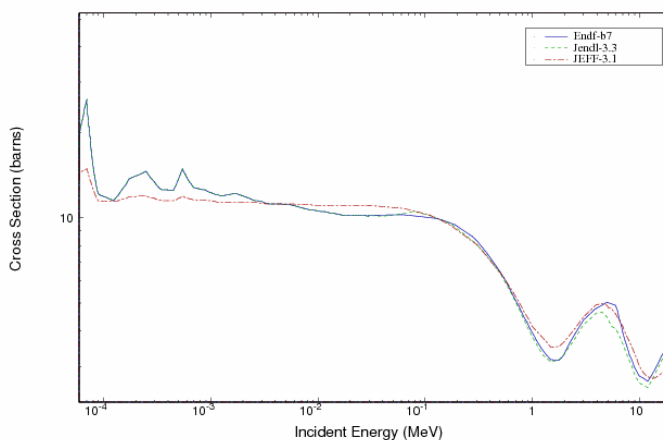


Рисунок 75. Сечение упругого рассеяния Cm-247 в области энергий 100 эВ-20 МэВ.

Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных нет. На рисунке 76 показаны оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек. Оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают, оценка JEFF-31 существенно ниже и явно занижена в области выше 8 МэВ. Следует принять оценку ENDF/B-VII (= JENDL-3.3).

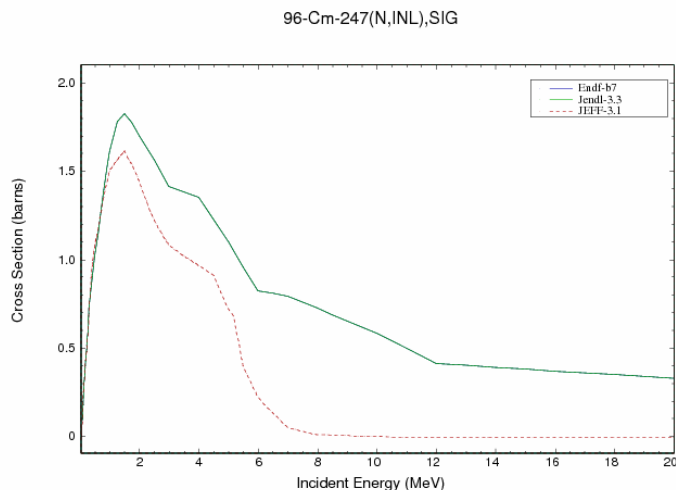


Рисунок 76. Сечение неупругого рассеяния Cm-247 в области энергий 1-20 МэВ.

Сечение деления (MT=18).

На рисунке 77 показаны оценки сечений деления. Оценки JENDL-3.3 и JEFF-31 практически идентичны, полностью игнорируют экспериментальные данные в области энергий 2-8 МэВ и лежат слишком высоко выше 8 МэВ с точки зрения систематик /5/. Оценка ENDF/B-VII лучше согласуется с экспериментальными данными и с систематическими тенденциями в поведении сечений деления.

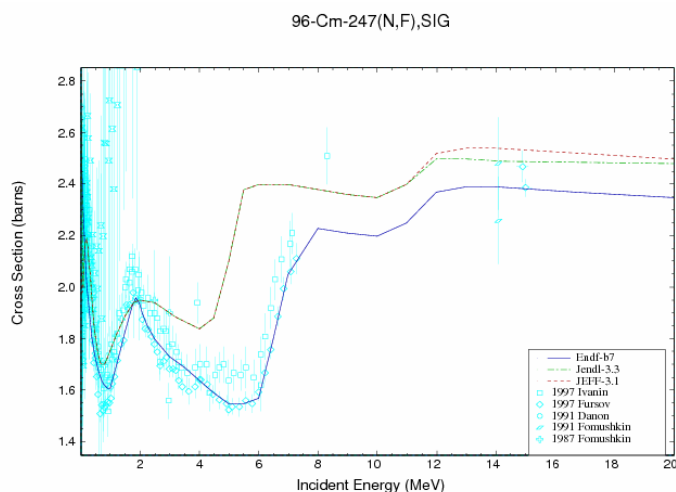


Рисунок 77. Сечение деления Cm-247 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Число мгновенных нейтронов на деление принято на основе систематики /2/. Данные по числу запаздывающих нейтронов основаны на систематике Таттла /3/.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

На рисунке 78 приведено сравнение оцененных сечений радиационного захвата из библиотек ENDF/B-VII, JEFF-31, JENDL-3. Экспериментальные данные отсутствуют. Исходя из систематики сечений, оценка ENDF/B-VII (=JENDL-3.3) является предпочтительней.

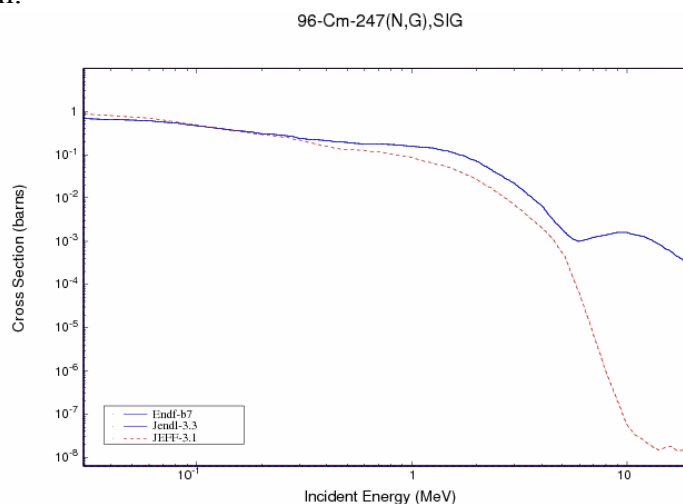


Рисунок 78. Сечение радиационного захвата в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17).

Для реакции (n,2n) экспериментальных данных нет. Все оценки получены расчетом по теоретическим моделям. Сравнение оцененных кривых показано на рисунке 79. Оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают и хорошо согласуются с систематикой /4/. Оценка JEFF-31 для реакции (n,2n) чрезмерно высока, противоречит систематике, и, кроме того, сумма сечения деления и сечения реакции (n,2n) также противоречит систематике /5/.

Для реакции (n,3n) экспериментальных данных также нет. Оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают. Оценка JEFF-31 чрезмерно завышена.

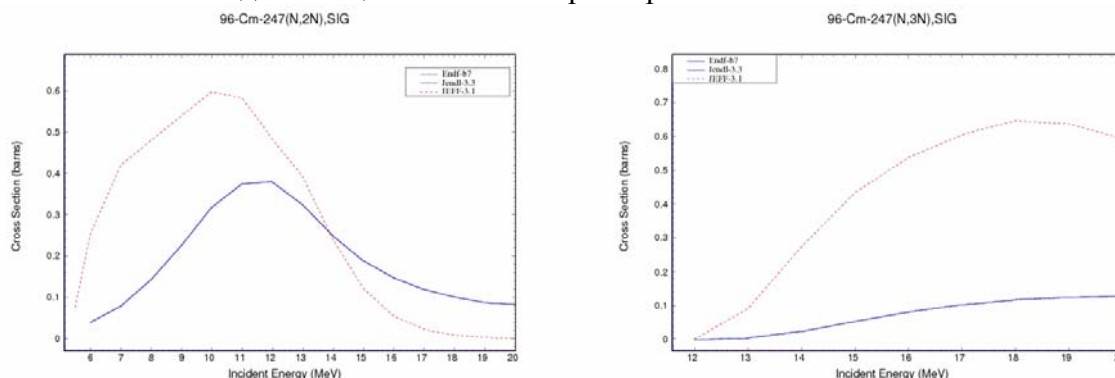


Рисунок 79. Сечение реакции (n,2n) и (n,3n) для Cm-247.

Заключение.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в области разрешенных резонансов оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII опираются на единый набор экспериментальных данных. В настоящее время нет каких-либо экспериментальных данных, указывающих на необходимость уточнения этих оценок. Оценка JEFF-31 по указанным выше причинам не может быть рекомендована в РОСФОНД.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку ENDF/B-VII⁸.

Автор отбора данных
Манохин В.Н.

96.9. Кюрий-248

Оценки сечений Cm -248 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3, JEFF-31.

Оценка JEFF-31 выпущена в 2005 году, в основе оценки лежат данные JEF-2 и JENDL-3.2 (1989 г.). Оценка ENDF/B-VII выпущена в 2005 году, в ней принята оценка ENDF/B-VI. Оценка JENDL-3.3 выпущена в 2002 году на основе ревизованной в 2000 году оценки JAERI 1995 года.

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 96$ -зарядовое число;
- 1.2. $A = 248$ (атомный вес);
- 1.3. $AW = 245.941$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 3.48E+5$ года, доминирует α -распад (99.61%) с вкладом 8.39% спонтанного деления.
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог.}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|-----|---------|---------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | n,n' | -.04283 | .0430 | Cm-248 |
| 16 | n,2n | -6.185 | 6.210 | Cm-247 |
| 17 | n,3n | -11.364 | 11.410 | Cm-246 |
| 18 | деление | | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 4.710 | 0 | Cm-249 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов в библиотеках JENDL-3.3, ENDF/B-VII и Маслова (Минск) ограничена энергией 100 эВ, в JEFF-31 энергией 70 эВ.

Значения сечений для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в сравнении рекомендованными данными /1/ приведены в таблице 9.

Таблица 9. Резонансные свойства Cm-248.

| | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | JEFF-3.1 | Мухабхаб |
|-----------------------|-----------|------------|----------|-----------|
| σ_{tot} | 9.456 | 8.668 | 9.456 | - |
| σ_{el} | 6.51 | 6.14 | 6.51 | 7.65±0.40 |
| σ_{f} | 0.372 | 0.087 | 0.370 | 0.37±0.05 |
| σ_{γ} | 2.570 | 2.44 | 2.57 | 2.63±0.26 |
| I_{f} | 10.0 | 15.4 | 17.5 | 13.6±0.8 |
| I_{γ} | 267.0 | 248.1 | 260.0 | 270±15 |

⁸ Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. – М.Николаев.

Из таблицы 9 следует, что сечение деления в тепловой точке в оценке ENDF/B занижено более чем в 4 раза. Резонансный интеграл деления в оценке JENDL ниже рекомендуемого в полтора раза. Это различие возникает за счет резонансных параметров для первого резонансного уровня (см. рис. 82). Если увеличить GF для первого уровня на порядок, то получим RIF ~ 13.6 барн (что совпадает с рекомендуемым значением!)

На рисунках 80-83 представлены экспериментальные и оцененные данные в области энергий разрешенных резонансов. В оценке ENDF/B-VII область разрешенных резонансов ограничена энергией 2.4 кэВ, в оценках JEFF-31 и JENDL-3.3 энергией 1.5 кэВ.

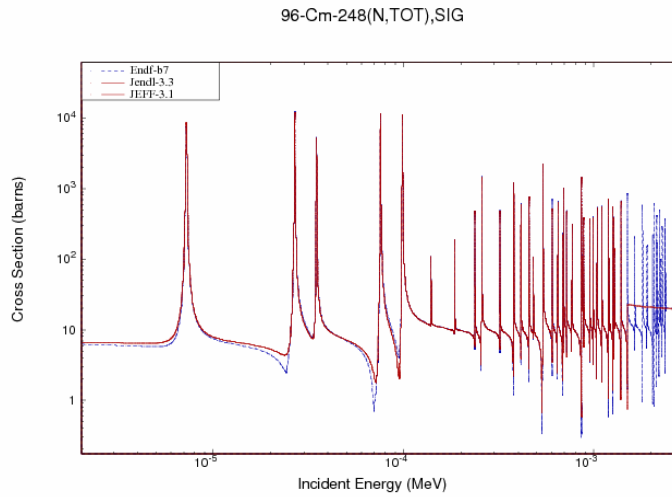


Рисунок 80. Полное сечение Cm-248 в области энергий разрешенных резонансов.

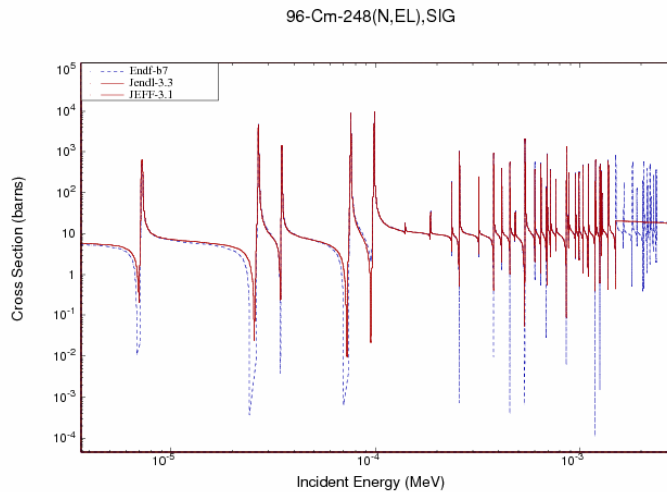


Рисунок 81. Сечение упругого рассеяния Cm-248 в области энергий разрешенных резонансов.

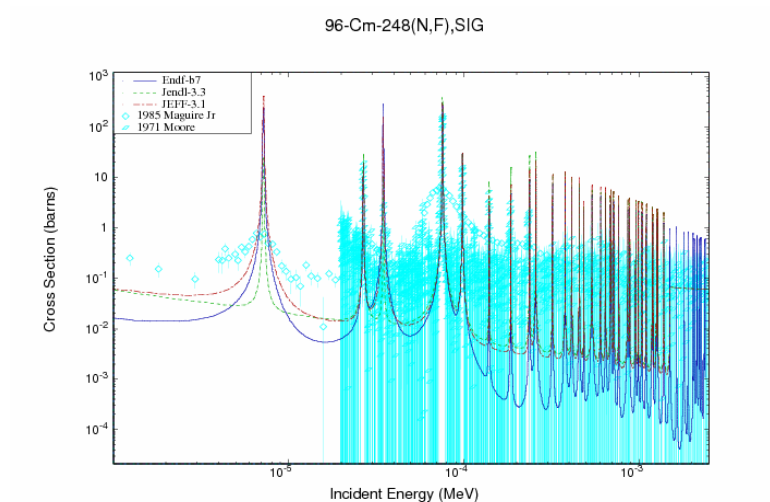


Рисунок 82. Сечение деления Cm-248 в области энергий разрешенных резонансов.

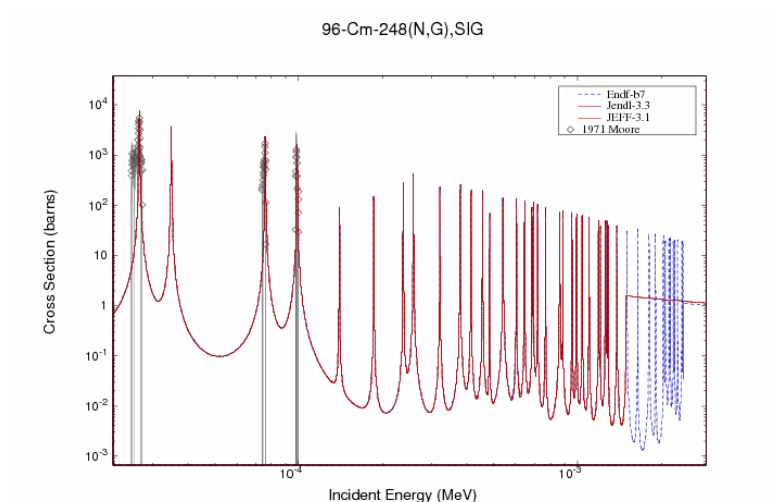


Рисунок 83. Сечение радиационного захвата Cm-248 в области энергий разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов.

Для области неразрешенных резонансов приняты следующие границы:

| | |
|------------|--------------------|
| ENDF/B-VII | 2.4 кэВ – 10.0 кэВ |
| JENDL-3.3 | 1.5 кэВ – 30.0 кэВ |
| JEFF-3.1 | 1.5 кэВ – 30.0 кэВ |

На рисунке 84 представлены экспериментальные и оцененные данные по сечению деления в области энергий неразрешенных резонансов. Оценка ENDF/B-VII существенно не согласуется с оценками JENDL-3.3 и JEFF-3.1. Эти оценки выглядят более предпочтительно. По полному сечению и сечению радиационного захвата в области энергий неразрешенных резонансов экспериментальных данных, полученные на основе теории ядерных реакций оценки для всех трех файлов совпадают.

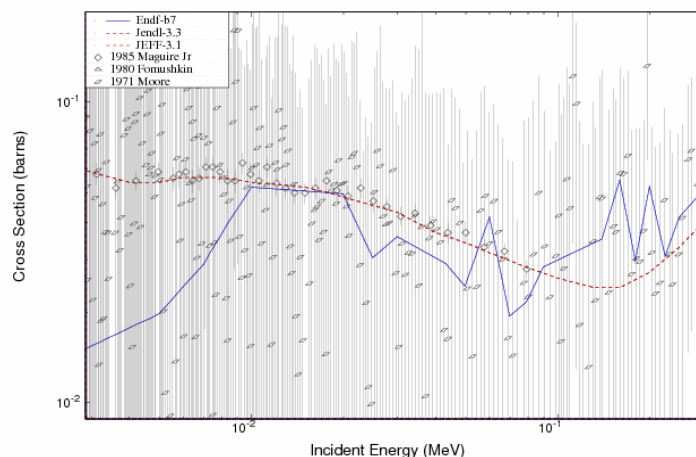


Рисунок 84. Сечение деления Cm-248 в области энергий неразрешенных резонансов.

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

Полное сечение (MT=1)

В быстрой области энергий нейтронов по полному сечению нет экспериментальных данных (см. рис. 85). Оценки различаются, но может быть использована любая из представленных оценок, хотя оценка JENDL-3.3 выглядит предпочтительней.

96-Cm-248(N,TOT),SIG

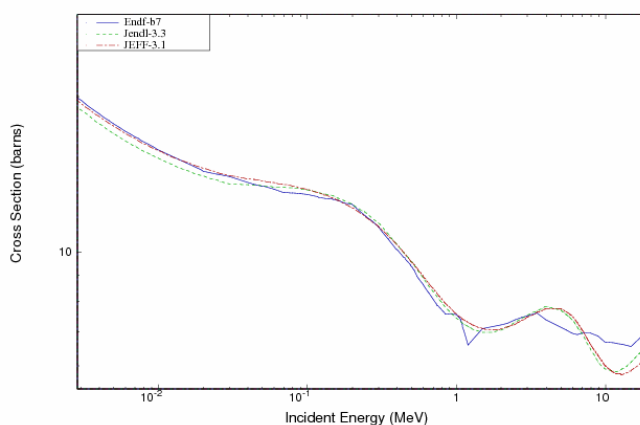


Рисунок 85. Полное сечение Cm-248 в области энергий нейтронов 30 кэВ –20 МэВ.

Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Сечение упругого рассеяния получено как разница полного сечения и суммы всех неупругих сечений. На рисунке 86 дано сравнение разных оценок. Расхождения между оценками не имеют принципиального характера, и за неимением экспериментальных данных нет возможности отдать предпочтение какой-либо одной из оценок.

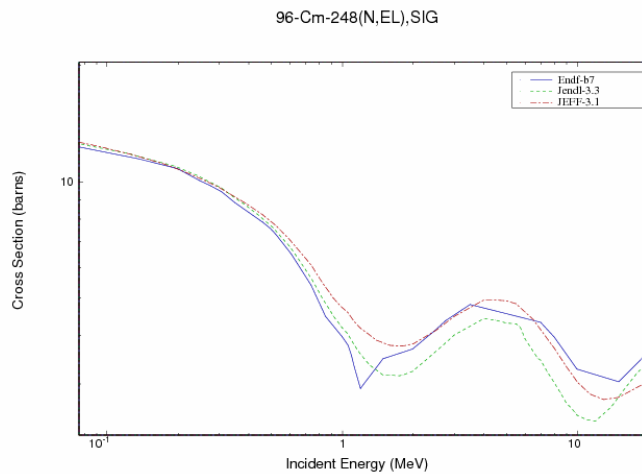


Рисунок 86. Сечение упругого рассеяния Cm-248 в области энергий 1-20 МэВ.

Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

На рисунке 87 показаны оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек.

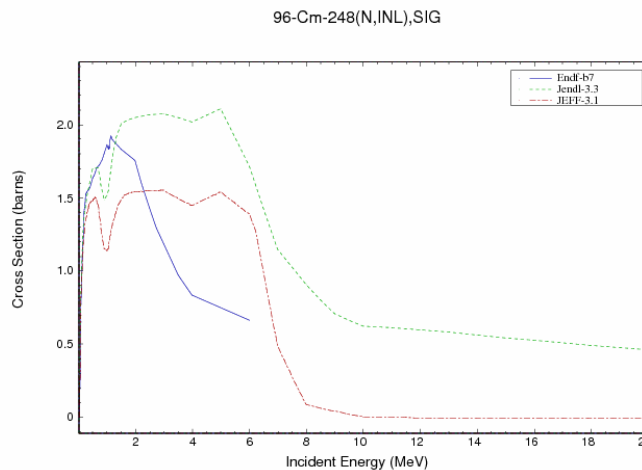


Рисунок 87. Сечение неупругого рассеяния Cm-248 в области энергий 1-20 МэВ..

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных нет. Оценка ENDF/B-VII ограничена энергией 6 МэВ, скорее всего это ошибка в файле. Оценки JEFF-3.1 и JENDL-3.3 сильно различаются, но оценка JEFF-3.1 имеет нулевое сечение при энергиях выше 6 МэВ, что противоречит физическим представлениям. В данном случае приемлема оценка JENDL-3.3, хотя она несколько завышена.

Сечение деления (MT=18).

На рисунке 88 показаны оценки сечений деления в области энергий быстрых нейтронов. Экспериментальных данных нет. С точки зрения систематик /5/ лучше всего физическим представлениям соответствует оценка JENDL-3.3

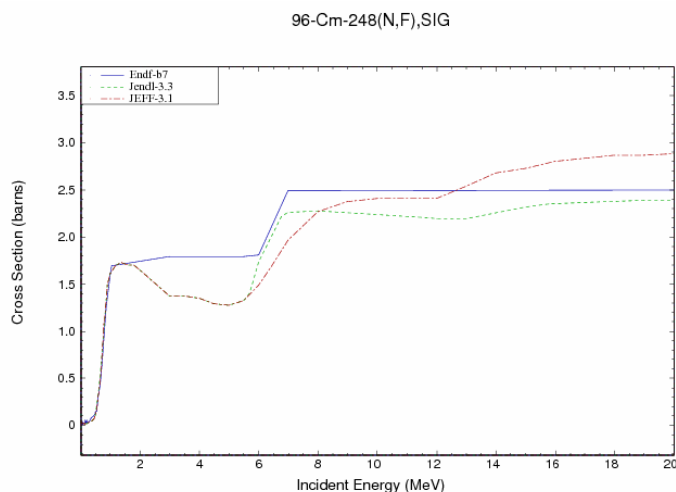


Рисунок 88. Сечение деления Cm-248 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

В оценках JENDL-3.3 и JEFF-3.1 число мгновенных нейтронов на деление принято на основе систематики /2/. Данные по числу запаздывающих нейтронов основаны на систематике Таттла /3/.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102)

На рисунке 89 приведены оценки сечений радиационного захвата ENDF/B-VII, JEFF-3.1 и JENDL-3.3.

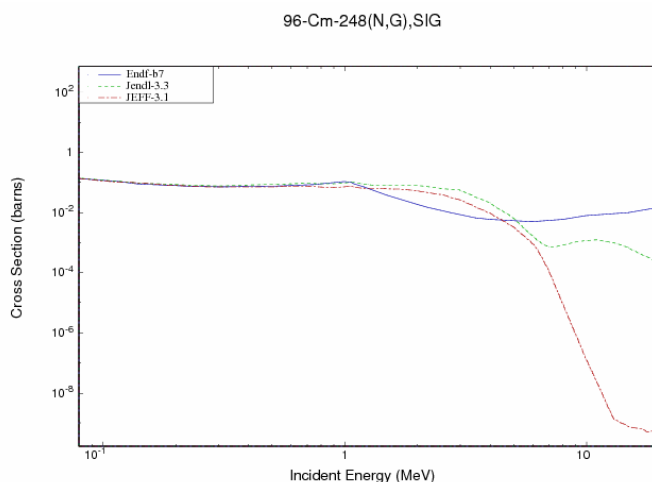


Рисунок 89. Сечение радиационного захвата в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

В области энергий до 1 МэВ имеется полное согласие всех оценок. Расхождения при более высоких энергиях связаны с использованием различных моделей ядерных реакций и входных параметров к ним. Оценка ENDF/B-VII выглядит крайне странно и не может быть рекомендована. Следует принять оценку JENDL-3.3.

Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17).

Для реакции (n,2n) экспериментальных данных нет. Все оценки получены расчетом по теоретическим моделям (см. рис. 90). Оценка JENDL-3.3 соответствует систематике /4/. Оценка ENDF/B-VII противоречит существенно систематике, оценка JEFF-3.1 не соответствует физическим представлениям.

Для реакции (n,3n) экспериментальных данных также нет. Оценка ENDF/B-VII чрезмерно высока. Следует отдать предпочтение оценке JENDL-3.3.

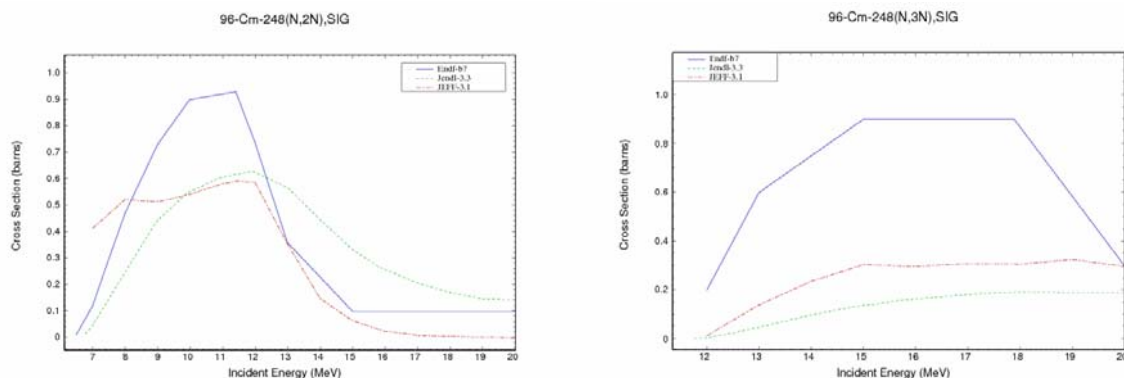


Рисунок 90. Сечение реакции (n,2n) и (n,3n) для Cm-248.

Заключение.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что из оценок JENDL-3.3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII оценка JENDL-3.3 является лучшей.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку JENDL-3.3⁹.

Следует изменить параметры первого резонансного уровня с тем, что бы устранить расхождение с рекомендованными данными Мухабхаба по резонансному интегралу деления.

Автор отбора данных

Манохин В.Н.

96.10. Кюрий-249

Оценки сечений Cm-249 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3, JEFF-31.

Оценка ENDF/B-VII выпущена в 2002 году на основе ревизованной в 2000 году оценки JAERI 1995 года. Оценки JENDL-3.3 и JEFF-31 выпущены в 2002 году и идентичны оценке ENDF/B-VII, кроме области разрешенных резонансов, где в оценке ENDF/B-VII в 2006 году проведена коррекция резонансных параметров, что привело к существенному различию в резонансном интеграле деления.

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 96$ -зарядовое число;
- 1.2. $A = 249$ (атомный вес);
- 1.3. $AW = 246.936$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 64.15$ мин, доминирует β -распад (100%).
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог-}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|----|---------|---------|---------------------------|----------------------------|
| 4 | n,n' | -.0430 | .0432 | Cm-249 |
| 16 | n,2n | -5.829 | 5.853 | Cm-248 |
| 17 | n,3n | -10.548 | 10.591 | Cm-247 |

⁹ Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. Включить данные о выходах продуктов деления из ENDF/B-VI. – М.Николаев.

| | | | | |
|-----|---------|-------|---|------------------|
| 18 | деление | | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 4.406 | 0 | Cm-250 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов в оценках JEFF-31, JENDL-3.3, ENDF/B-VII ограничена энергией 150 эВ.

Значения сечений для тепловых нейтронов и резонансные интегралы приведены в таблице 10. Имеется только одна экспериментальная точка по сечению захвата σ_{γ} .

Таблица 10. Резонансные свойства Cm-249.

| | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | JEFF-3.1 | Мухабхаб |
|-----------------------|-----------|------------|----------|----------|
| σ_{tot} | 20.75 | 21.28 | 20.75 | - |
| σ_{el} | 8.76 | 9.28 | 8.76 | - |
| σ_f | 10.23 | 10.25 | 10.23 | |
| σ_{γ} | 1.76 | 1.75 | 1.76 | 1.6±0.8 |
| I_f | 166.0 | 134.0 | 166.0 | - |
| I_{γ} | 62.2 | 59.1 | 62.2 | - |

Данные ENDF/B-VII, приведенные в таблице, отличаются от данных JENDL-3.3 (=JEFF-3.1), поскольку в 2006 году Wright провел коррекцию резонансных параметров.

На рисунках 91-93 представлены оцененные данные в области энергий разрешенных резонансов. Экспериментальных данных нет. Оценки полного сечения, сечений деления и радиационного захвата ENDF/B-VII отличаются от оценок JENDL-3.3 и JEFF-31 вследствие указанной выше коррекции резонансных параметров в ENDF/B-VII.

96-Cm-249(N,TOT),SIG

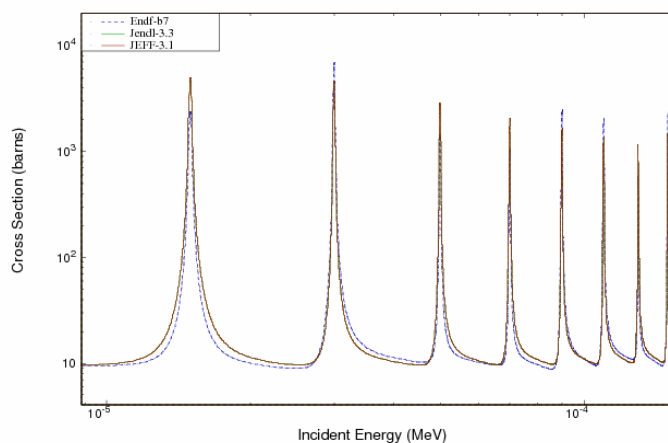


Рисунок 91. Полное сечение Cm-249 в области энергий разрешенных резонансов.

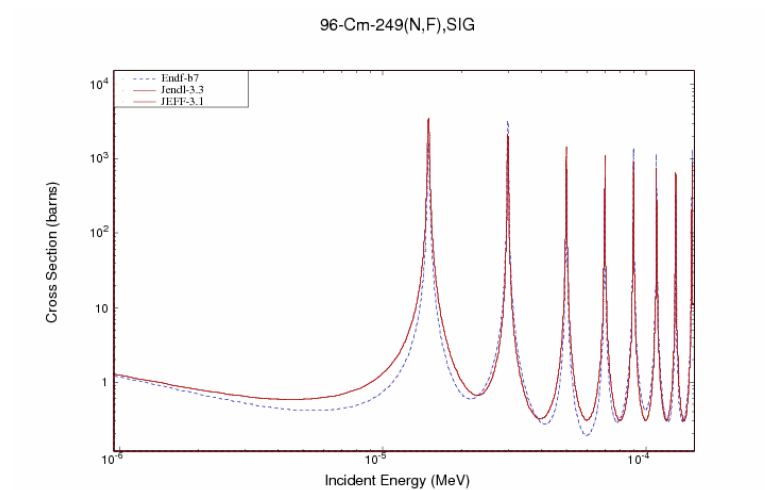


Рисунок 92. Сечение деления Cm-249 в области энергий разрешенных резонансов.

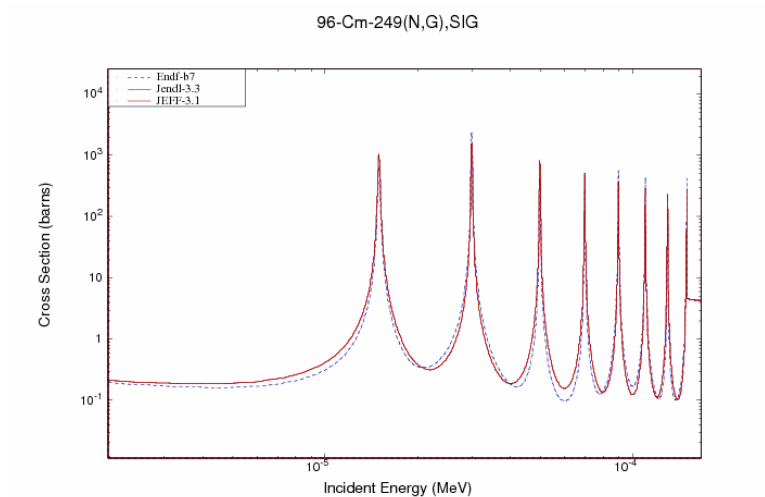


Рисунок 93. Сечение радиационного захвата Cm-249 в области энергий разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов

Для области неразрешенных резонансов приняты следующие границы: 150 эВ – 25 кэВ.

Экспериментальных данных в этой области по всем сечениям нет. Все оценки в области выше области разрешенных резонансов идентичны.

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

Полное сечение (MT=1).

В быстрой области энергий нейтронов по полному сечению экспериментальных данных нет (см. рис. 94).

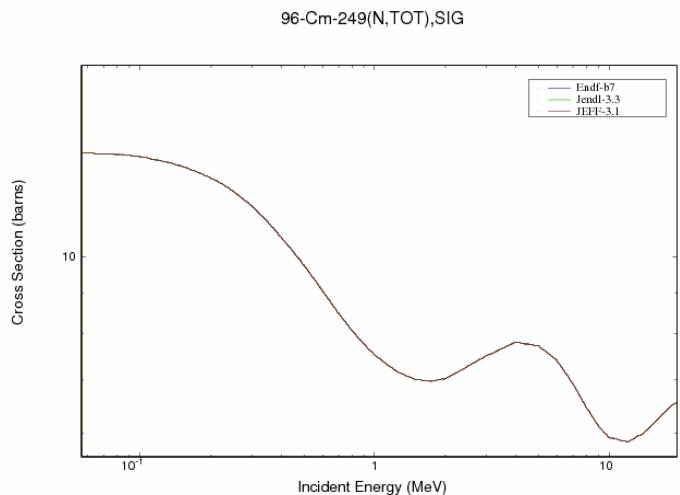


Рисунок 94. Полное сечение Cm-249 в области энергий нейтронов 40 кэВ –20 МэВ.

Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных нет. На рисунке 95 показаны оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек. Существенных замечаний оценке в области энергий до 8 МэВ нет. При энергии 8-20 МэВ оценка явно завышена.

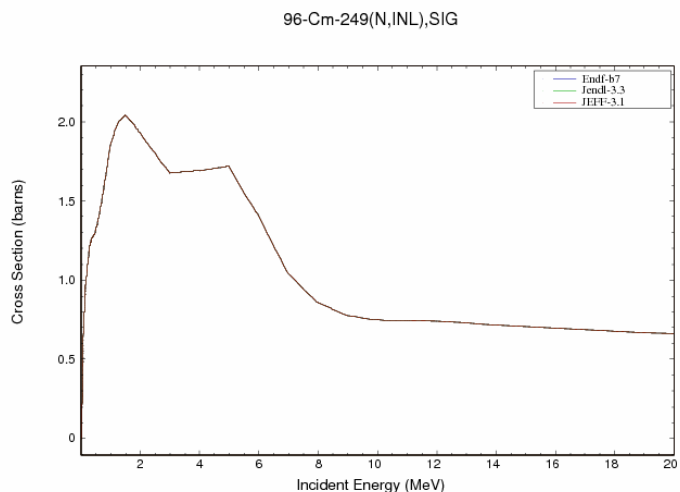


Рисунок 95. Сечение неупругого рассеяния Cm-249 в области энергий 1-20 МэВ..

Сечение деления (MT=18)

На рисунке 96 показаны оценки сечений деления. Из-за отсутствия экспериментальных данных трудно делать обоснованные комментарии, однако представленная зависимость не противоречит систематическим тенденциям в реакции деления в быстрой области энергий нейтронов.

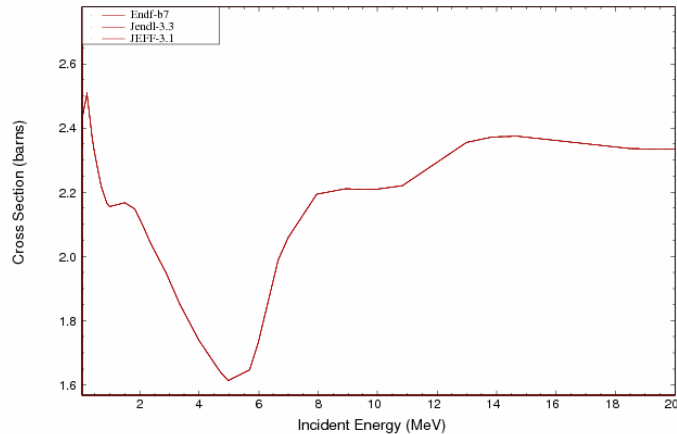


Рисунок 96. Сечение деления Cm-249 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Число мгновенных нейтронов на деление принято на основе систематики /2/. Данные по числу запаздывающих нейтронов основаны на систематике Таттла /3/.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

На рисунке 97 приведены оценки сечений радиационного захвата. Некоторый подъем сечения вблизи 1-2 МэВ вызывает сомнения, но в целом оценка приемлема.

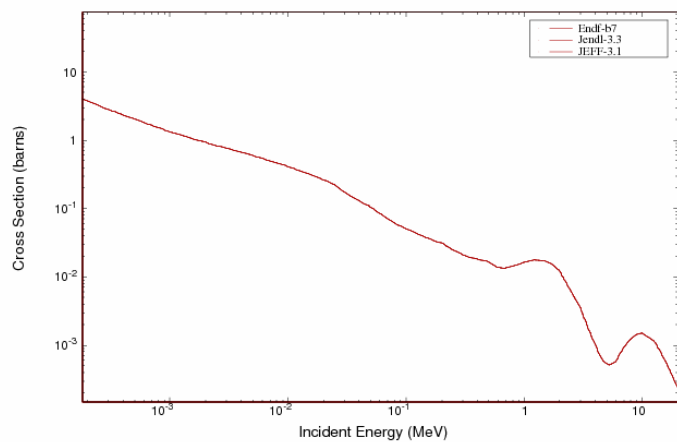


Рисунок 97. Сечение радиационного захвата Cm-249 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17)

Для реакции (n,2n) экспериментальных данных нет (см. рис.98) , все оценки получены расчетом по теоретическим моделям, оценки соответствуют систематикам /4/ и могут быть рекомендованы. Для реакции (n,3n) экспериментальных данных также нет. К представленной на рисунке 98 оценке замечаний нет.

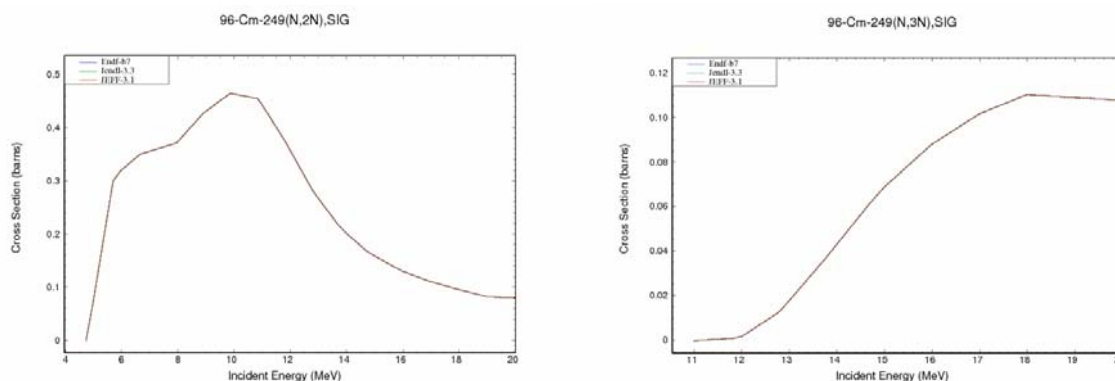


Рисунок 98. Сечение реакции (n,2n) и (n,3n) для Cm-249.

Заключение.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в области разрешенных резонансов следует принять оценку ENDF/B-VII. Оценки основных сечений в области энергий нейтронов быстрых в файле ENDF/B-VII также приемлемы в качестве основы для дальнейшего экспериментального и теоретического обоснования.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку ENDF/B-VII¹⁰.

В настоящее время нет каких-либо экспериментальных данных, указывающих на возможность уточнения этой оценки.

Автор отбора данных

Манохин В.Н.

96.11. Кюрий-250

Оценки сечений Cm –250 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3, JEFF-31.

Оценка ENDF/B-VII выпущена в 2002 году на основе ревизованной в 2000 году оценки JAERI 1995 года. Оценка JENDL-3.3 выпущена в 2002 году на основе ревизованной в 2000 году оценки T.Nakagawa (JAERI) 1995 года. Оценка JEFF-31 выпущена в 2005 году и включает оценку JENDL-3.3.

Все три оценки содержат одни и те же данные: JENDL-3.3.

1. Общие характеристики

- 1.1. $Z = 96$ -зарядовое число;
- 1.2. $A = 250$ (атомный вес);
- 1.3. $AW = 247.930$ (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 8.3E+3$ года, α -распад (18%) и 74% спонтанное деление (74%).
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

| MT | Реакция | Q, МэВ | $E_{\text{порог-}}$, МэВ | Ядро-продукт ^{*)} |
|----|---------|--------|---------------------------|----------------------------|
|----|---------|--------|---------------------------|----------------------------|

¹⁰ Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. – М.Николаев.

| | | | | |
|-----|---------|---------|--------|------------------|
| 4 | n,n' | -0.0430 | .0432 | См-250 |
| 16 | n,2n | -5.829 | 5.853 | См-249 |
| 17 | n,3n | -10.548 | 10.591 | См-248 |
| 18 | деление | | 0 | продукты деления |
| 102 | n,g | 4.406 | 0 | См-251 |

2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

Область разрешенных резонансов

бласть разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3, ENDF/B-VII и JEFF-3.1 ограничена энергией 150 эВ.

Значения сечений для тепловых нейтронов и резонансные интегралы приведены в таблице 11. Экспериментальных данных нет.

Таблица 11. Резонансные свойства Cm-250.

| | JENDL-3.3 | ENDF/B-VII | JEFF-3.1 |
|-----------------|-----------|------------|----------|
| σ_{tot} | 124.9 | 124.9 | 124.9 |
| σ_{el} | 39.5 | 39.5 | 39.5 |
| σ_f | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| σ_γ | 85.3 | 85.3 | 85.3 |
| I_f | 6.91 | 6.91 | 6.91 |
| I_γ | 304 | 304 | 304 |

На рисунках 99-102 представлены экспериментальные и оцененные данные в области энергий разрешенных резонансов.

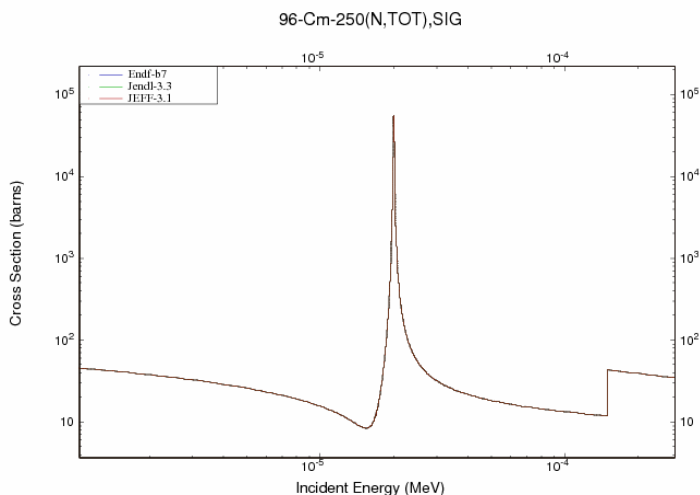


Рисунок 99. Полное сечение Cm-250 в области энергий разрешенных резонансов.

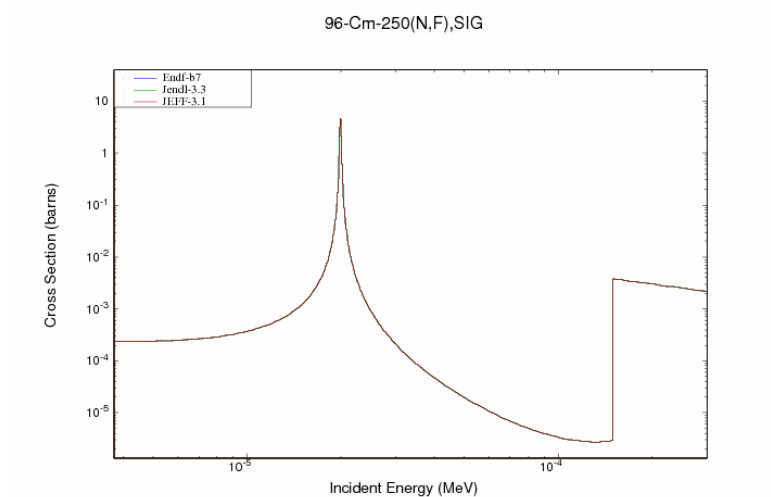


Рисунок 100. Сечение деления Cm-250 в области энергий разрешенных резонансов.

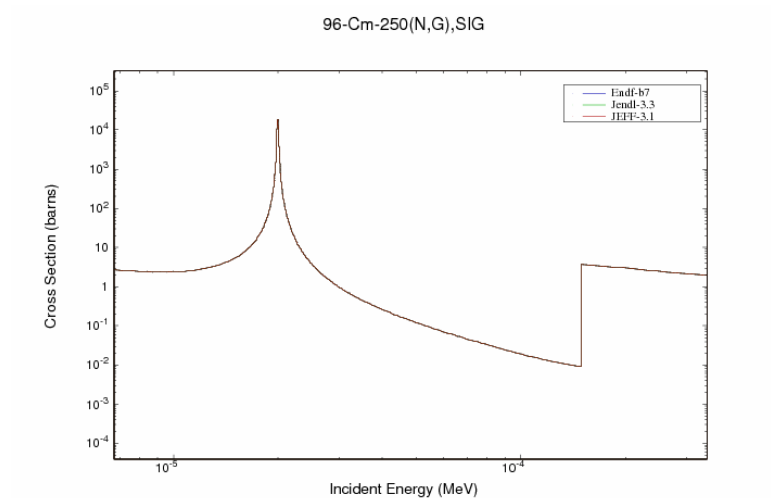


Рисунок 101. Сечение радиационного захвата в области энергий разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов

Для области неразрешенных резонансов приняты следующие границы:
 JENDL-3.3 150 эВ – 30.0 кэВ

3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

В этой области при отсутствии экспериментальных данных трудно судить о достоверности представленных данных. При дальнейшем анализе используются только физические представления и эмпирические систематики, позволяющие исключить явно ошибочные зависимости.

Полное сечение (MT=1)

В быстрой области энергий нейтронов экспериментальных данных (рис. 102) нет. Замечаний к оценке нет.

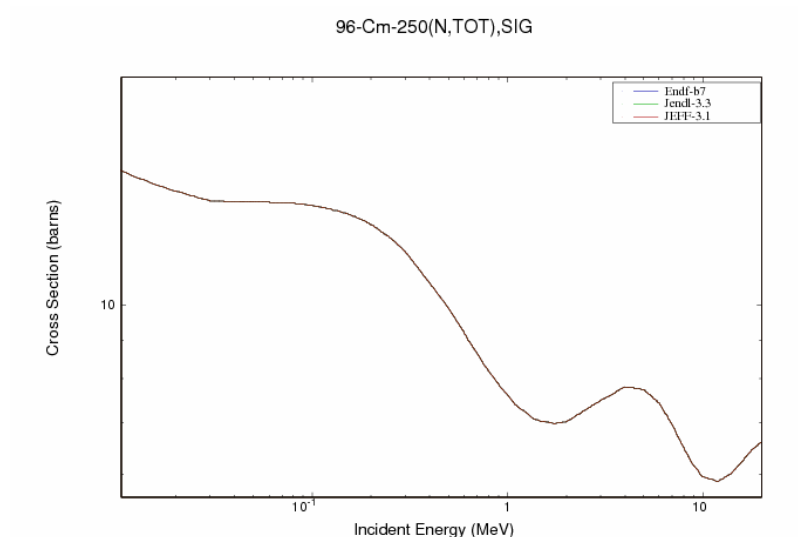


Рисунок 102. Полное сечение Cm-250 в области энергий нейтронов 40 кэВ –20 МэВ.

Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных нет. На рисунке 103 показано оцененное интегральное сечение неупругого рассеяния.

С точки зрения физических представлений и систематических тенденций эта зависимость нуждается в корректировке, но, тем не менее, ее можно принять за основу.

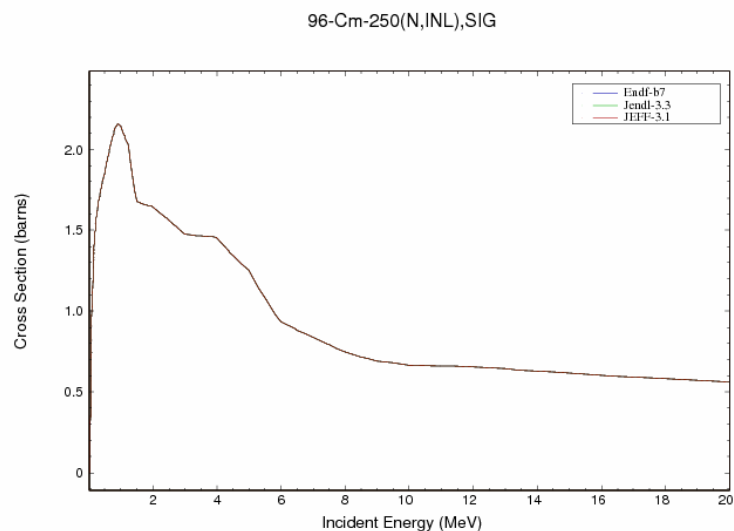


Рисунок 103. Сечение неупругого рассеяния Cm-250 в области энергий 1-20 МэВ.

Сечение деления (MT=18).

Представленная на рисунке 104 оценка сечения деления примерно соответствует систематическим тенденциям и может быть рекомендована.

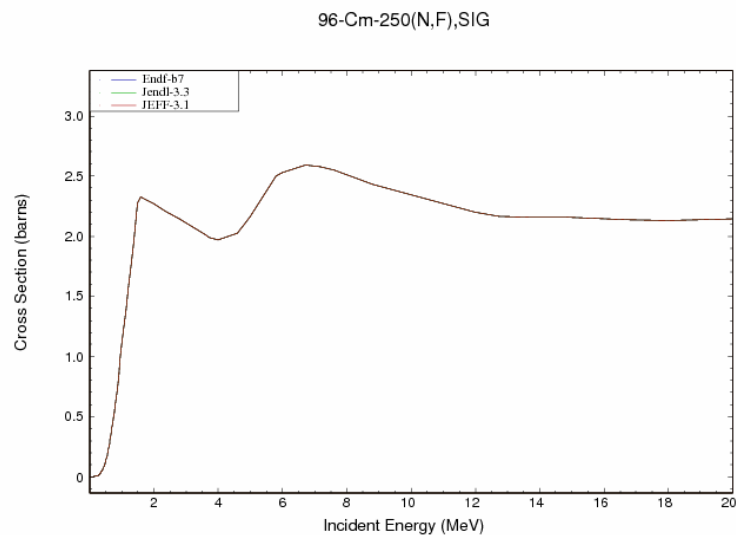


Рисунок 104. Сечение деления Cm-250 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Число мгновенных нейтронов на деление принято на основе систематики /1/. Данные по числу запаздывающих нейтронов основаны на систематике Таттла /2/.

Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

Сечение радиационного захвата представлено на рисунке 105. Оцененное сечение радиационного захвата примерно соответствует систематическим тенденциям. Она может быть принята за основу.

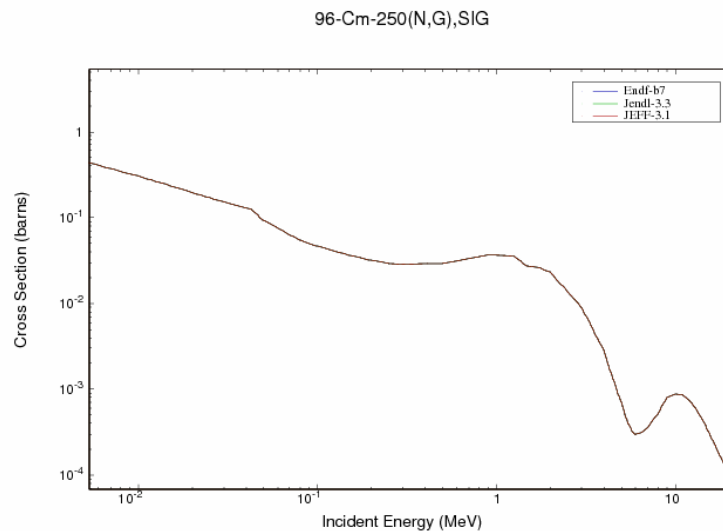


Рисунок 105. Сечение радиационного захвата Cm-250 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17)

Для реакции (n,2n) экспериментальных данных нет, все оценки получены расчетом по теоретическим моделям. Оценка не противоречит эмпирической систематике /3/.

Для реакции (n,3n) экспериментальных данных также нет. Оценка соответствует систематике.

Энергетическая зависимость сечений показана на рисунке 106.

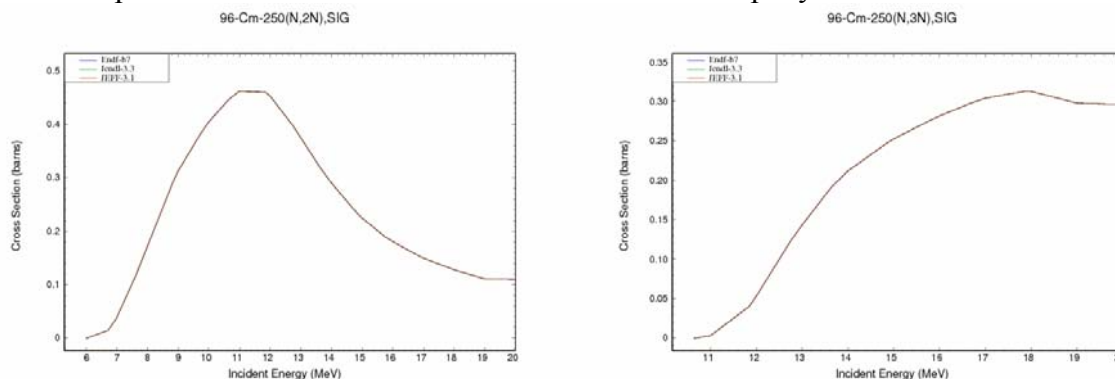


Рисунок 106. Сечение реакции (n,2n) и(n,3n) для Cm-250.

Заключение.

Анализ показывает, что основные сечения представленных оценок приемлемы в качестве основы для дальнейшего экспериментального и теоретического обоснования.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку JENDL-3.3¹¹ (=ENDF/B-VII).

В настоящее время нет каких-либо экспериментальных данных, указывающих на возможность уточнения этой оценки.

Автор отбора данных

Манохин В.Н.

ЛИТЕРАТУРА-240

1. Howerton R.J.: Nucl. Sci. Eng., 62, 438 (1977).
2. Tuttle R.J., Nucl. Sci. Eng., 56(1975)37.
Tuttle R.J.: INDC(NDS)-107/G+special, P.29 (1979).
3. Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
4. Блохин А.И., Манохин В.Н., Насырова С.М., Препринт ФЭИ-2620, 1997.

ЛИТЕРАТУРА-242

1. Mughabghab S., Neutron Cross Sections. N.Y.-London, Academic Press, 1984, v.1, part B.
2. Беланова Т.С., Игнатюк А.В., Пашенко А.Б., Пляскин В.И. Радиационный захват нейтронов. М. Энергоатомиздат, 1986.
3. Бадиков С.А. Препринт ФЭИ-1686, Обнинск, 1985.
Badikov S.A., Zolotarev K.I. In: Proc. Spec. Meeting on Evaluation and Processing of Covariance Data (Oak Ridge, 1992). Paris, OECD, 1993, p. 105.
4. Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
5. Блохин А.И., Манохин В.Н., Насырова С.М., Препринт ФЭИ-2620, 1997.

¹¹ Данные о запаздывающих нейтронах приняты в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры приняты такими же, как для урана-235. – М.Николаев.

6. Игнатюк А.В., Толстикова В.А., Золотарев К.И. ВАНТ, Ядерные Константы, 1997, 4,
7. Блохин А.И. и др. ВАНТ, Ядерные константы, 1999, вып. 2, с.62.
8. Игнатюк А.И., Отчет ФЭИ-11197, 2002.

ЛИТЕРАТУРА-243

1. Mughabghab S., Neutron Cross Sections. N.Y.-London, Academic Press, 1984, v.1, part B.
2. Khokhlov Yu.A. et al., Proc. Int. Conf. On Nuclear Data for Sci. and Techn., Gatlinburg, May 9-14, 1994, p.273.
3. Tuttle R.J., Nucl. Sci. Eng., 56(1975)37.
4. Madland D.G., Nix J.R., Nucl. Sci. Eng., 81, 213, (1982). 9640 1451
5. Блохин А.И. и др. ВАНТ, Ядерные константы, 1999, вып. 2, с.62.
6. Игнатюк А.И., Отчет ФЭИ-11197, 2002.
7. Manokhin, V.N. Report INDC(ССР)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).

ЛИТЕРАТУРА-244

1. Mughabghab S., Neutron Cross Sections. N.Y.-London, Academic Press, 1984, v.1, part B.
2. Khokhlov Yu.A. et al., Proc. Int. Conf. On Nuclear Data for Sci. and Techn., Gatlinburg, May 9-14, 1994, p.273.
3. Tuttle R.J., Nucl. Sci. Eng., 56(1975)37.
4. Беланова Т.С., Игнатюк А.В., Пашенко А.Б., Пляскин В.И. Радиационный захват нейтронов. М. Энергоатомиздат, 1986.
5. Бадиков С.А. Препринт ФЭИ-1686, Обнинск, 1985.
Badikov S.A., Zolotarev K.I. In: Proc. Spec. Meeting on Evaluation and Processing of Covariance Data (Oak Ridge, 1992). Paris, OECD, 1993, p. 105.
6. Manokhin, V.N. Report INDC(ССР)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
7. Блохин А.И., Манохин В.Н., Насырова С.М., Препринт ФЭИ-2620, 1997.
8. Игнатюк А.В., Толстикова В.А., Золотарев К.И. ВАНТ, Ядерные Константы, 1997, 4,
9. Блохин А.И. и др. ВАНТ, Ядерные константы, 1999, вып. 2, с.62.
10. Игнатюк А.И., Отчет ФЭИ-11197, 2002.

ЛИТЕРАТУРА-245

1. Mughabghab S., Neutron Cross Sections. N.Y.-London, Academic Press, 1984, v.1, part B.
2. Khokhlov Yu.A. et al., Proc. Int. Conf. On Nuclear Data for Sci. and Techn., Gatlinburg, May 9-14, 1994, p.273.
3. Tuttle R.J., Nucl. Sci. Eng., 56(1975)37.
4. Madland D.G., Nix J.R., Nucl. Sci. Eng., 81, 213, (1982). 9640 1451
5. Manokhin, V.N. Report INDC(ССР)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
6. Блохин А.И., Манохин В.Н., Насырова С.М., Препринт ФЭИ-2620, 1997.

ЛИТЕРАТУРА-246

1. Mughabghab S., Neutron Cross Sections. N.Y.-London, Academic Press, 1984, v.1, part B.

2. Madland D.G., Nix J.R., Nucl. Sci. Eng., 81, 213, (1982).
3. Tuttle R.J., Nucl. Sci. Eng., 56(1975)37.
Tuttle R.J. Proc. Consultants Meeting on Delayed Neutron Properties, 1979, Vienna, INDC(NDS)-107/G, p.29.
4. Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
5. Блохин А.И., Манохин В.Н., Насырова С.М., Препринт ФЭИ-2620, 1997.
6. Maguire Jr. H.T. et al.: Nucl. Sci. Eng., 89, 293 (1985). 9643 1451 74

ЛИТЕРАТУРА-247

1. Mughabghab S., Neutron Cross Sections. N.Y.-London, Academic Press, 1984, v.1, part B.
2. Howerton R.J.: Nucl. Sci. Eng., 62, 438 (1977).
3. Tuttle R.J., Nucl. Sci. Eng., 56(1975)37.
Tuttle R.J.: INDC(NDS)-107/G+special, P.29 (1979).
4. Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
5. Блохин А.И., Манохин В.Н., Насырова С.М., Препринт ФЭИ-2620, 1997.

ЛИТЕРАТУРА-248

1. Mughabghab S., Neutron Cross Sections. N.Y.-London, Academic Press, 1984, v.1, part B.
2. Howerton R.J.: Nucl. Sci. Eng., 62, 438 (1977).
3. Tuttle R.J., Nucl. Sci. Eng., 56(1975)37.
Tuttle R.J.: INDC(NDS)-107/G+special, P.29 (1979).
4. Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
5. Блохин А.И., Манохин В.Н., Насырова С.М., Препринт ФЭИ-2620, 1997.

ЛИТЕРАТУРА-249

1. Mughabghab S.F.: Atlas of Neutron Resonances, Academic Press, NY, 2006 (5-th edition of BNL-325)
Mughabghab, B.I.A., Neutron Cross Sections. N.Y.-London, Academic Press, 1984, v.1, part B.
2. Khokhlov Yu.A. et al., Proc. Int. Conf. On Nuclear Data for Sci. and Techn., Gatlinburg, May 9-14, 1994, p.273.
3. Tuttle R.J., Nucl. Sci. Eng., 56(1975)37.
4. Беланова Т.С., Игнатюк А.В., Пашенко А.Б., Пляскин В.И. Радиационный захват нейтронов. М. Энергоатомиздат, 1986.
5. Бадиков С.А. Препринт ФЭИ-1686, Обнинск, 1985.
Badikov S.A., Zolotarev K.I. In: Proc. Spec. Meeting on Evaluation and Processing of Covariance Data (Oak Ridge, 1992). Paris, OECD, 1993, p. 105.
6. Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
7. Блохин А.И., Манохин В.Н., Насырова С.М., Препринт ФЭИ-2620, 1997.
8. Игнатюк А.В., Толстикова В.А., Золотарев К.И. ВАНТ, Ядерные Константы, 1997, 4,
9. A.Filatenkov et al. VANT, Ser. Nuclear Constants, 1996, is. 2, p.8.

ЛИТЕРАТУРА-250

1. Howerton R.J.: Nucl. Sci. Eng., 62, 438 (1977).
2. Tuttle R.J., Nucl. Sci. Eng., 56(1975)37.
Tuttle R.J.: INDC(NDS)-107/G+special, P.29 (1979).
- 3.. Манокхин, V.N. Report INDC(ССР)-397, Vienna, 1997.
Манокхин, V.N., Блохин, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
4. Блохин А.И., Манохин В.Н., Насырова С.М., Препринт ФЭИ-2620, 1997.

97.БЕРКЛИЙ

Берклий обладает пятью долгоживущими изотопами ^{245}Bk ($T_{1/2}=4.90$ дн.), ^{246}Bk ($T_{1/2}=1.80$ дн.), ^{247}Bk ($T_{1/2}=1380$ г.), ^{248}Bk ($T_{1/2}> 9$ г.), ^{249}Bk ($T_{1/2}= 320$ дн.). ^{248}Bk обладает также сравнительно долгоживущим изомером $^{247}\text{Bk}^m$ ($T_{1/2}=23.7$ ч.), однако период его полураспада менее суток и данные для него в РОСФОНД могут и не вноситься.

В реакторе первичным материалом для образования всех этих изотопов является наработка ^{249}Cm ($T_{1/2}=64.15$ мин.), испытывающего бета-распад в ^{249}Bk . Все остальные долгоживущие изотопы могут быть образованы лишь путем последовательных реакций (n,2n) и (n,3n). ^{249}Bk , распадающийся в ^{249}Cf , является важнейшим промежуточным продуктом при наработке ^{252}Cf и поэтому ясно, что знание нейтронных данных для него с практической точки зрения представляет наибольший интерес. ^{250}Bk , образующийся при захвате нейтронов в ^{249}Bk , также испытывает бета распад в калифорний (разумеется, в ^{250}Cf) с периодом всего 3.212 ч. Поэтому захват нейтронов в ^{249}Bk с последующим распадом ^{250}Bk , позволяет получить ^{250}Cf более эффективным путем, чем через ^{249}Cf с последующим захватом нейтрона (^{249}Cf обладает большим сечением деления - порядка 1700 барн для тепловых нейтронов, существенно большим, чем сечение захвата – 500 барн и поэтому значительная доля образовавшегося ^{249}Cf теряется при делении так и не образовав ^{250}Cf). В связи с изложенным определенным интерес представляет и знание сечений короткоживущего ^{250}Bk – по крайней мере для того, чтобы убедиться в том, что за свое короткое время жизни он, действительно, не успеет разделиться.

97.1. Берклий-245

Радиоактивен ($T_{1/2}=4.90$ дн.). Распадается, главным образом путем захвата орбитального электрона в ^{245}Cm ; вероятность альфа-распада 0.12%. Источником может служить реакция $^{247}\text{Bk}(T_{1/2}=1380\text{ г.})(n,3n)$.

Полных оценок нейтронных данных не имеется. Оценка нейтронных сечений содержится в EAF-2003. Экспериментальных данных для ее проверки нет.

Из этой оценки получены следующие значения тепловых сечений и резонансных интегралов:

| Источник | $\sigma_c(0.0253\text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253\text{ эВ})$ | RI_f |
|----------|------------------------------|--------|------------------------------|--------|
| EAF-2003 | 37.60 | 144.25 | 18.00 | 7.99 |

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку сечений из EAF-2003. Парциальные сечения образования конечных ядер в разных состояниях, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы записать в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и 10 удалить, поскольку долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на рассматриваемом изотопе не образуется.

Файлу присвоить МАТ=9745.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

97.2. Берклий-246

Радиоактивен ($T_{1/2}=1.80$ дн.). Распадается путем захвата орбитального электрона в ^{246}Cm . Источником может служить реакция $^{247}\text{Bk}_{(T_{1/2}=1380 \text{ г.})}(n,2n)$.

Полных оценок нейтронных данных не имеется. Оценка нейтронных сечений содержится в EAF-2003. Экспериментальных данных для ее проверки нет.

Из этой оценки получены следующие значения тепловых сечений и резонансных интегралов:

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f |
|----------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| EAF-2003 | 37.60 | 106.22 | 3085 | 1385 |

Как видим, тепловое сечение захвата принято в точности таким же, как для берклия-245. Основания для выбора теплового сечения деления неизвестны – видимо оно оценено на основе какой-то систематики. То же относится к резонансным интегралам.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку сечений из EAF-2003. Файлу присвоить МАТ=9746.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

97.3. Берклий-247

Радиоактивен ($T_{1/2}=1380$ лет). Испытывает альфа-распад в америций-243. Источником может служить реакция $^{249}\text{Bk}_{(T_{1/2}=320 \text{ д.})}(n,3n)$ ^{247}Bk или цепочка реакций $^{249}\text{Bk}_{(T_{1/2}=320 \text{ д.})}(n,2n)$ $^{248}\text{Bk}_{(T_{1/2}>9 \text{ г.})}(n,2n)$ ^{247}Bk .

В JENDL-3.3 содержится полная оценка нейтронных данных для этого изотопа, выполненная Накагавой и Лью (T.Nakagawa, T.Liu) в 1995 г. Оценка основана на расчетах по оптической и статистической моделям (программа GNASH). Введены фиктивные резонансы с параметрами обеспечивающими заданные тепловые сечения.

. Оценка нейтронных сечений содержится также в EAF-2003. Экспериментальных данных для проверки оцененных данных в EXFORe нет.

Из упомянутых оценок получены следующие значения тепловых сечений и резонансных интегралов:

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f |
|-----------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| JENDL-3.3 | 183.8 | 895 | 91.9 | 448 |
| EAF-2003 | 37.60 | 144.25 | 18.00 | 7.99 |

Различия, как видим, весьма велики, что и не удивительно при полном отсутствии экспериментальных данных.

На рис.1 и 2 сравниваются оцененные сечения деления и радиационного захвата. Как видим, оценки сечения деления в области быстрых нейтронов совпадают (т.е. принята одна и та же оценка - японская). В резонансной области различия кардинальны из за разных подходов к описанию структуры сечений (оценка EAF-2003 на это не претендует). Сечения захвата в области быстрых нейтронов различаются существенно, но в более важной резонансной области в среднем различаются сравнительно слабо.

Наиболее существенно различие в тепловых сечениях и резонансных интегралах.

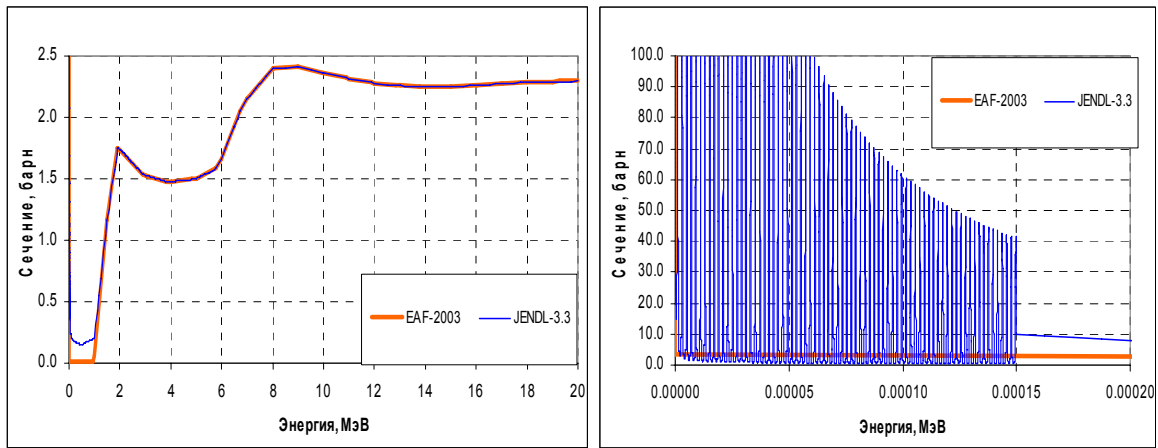


Рис. 1. Сечение деления

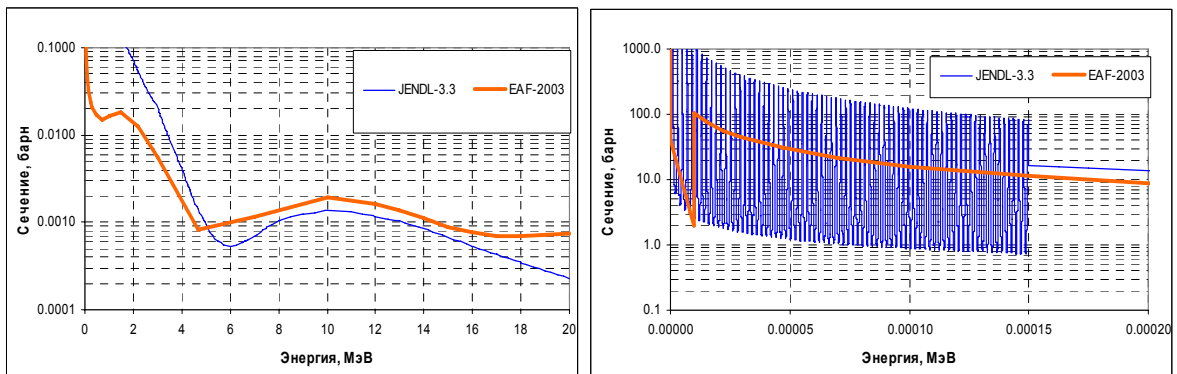


Рис.2. Сечение захвата.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку сечений из JENDL-3.3 поскольку при работе над ней особенности изотопов берклия и соседних актинидов (оценивавшимися в то же время теми же авторами) учтены, видимо, более полно, чем это могло быть сделано при оценке файлов для EAF-2003. К тому же оценка JENDL-3.3 существенно полнее: она содержит и данные о сечениях рассеяния и энерго-угловые распределения вторичных нейтронов. Данные о выходах 8 групп запаздывающих нейтронов принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1, а их спектры – такими же, как и для урана-235.

Файлу присвоить МАТ=9747.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

97.4. Берклий-248

Радиоактивен ($T_{1/2} > 9$ лет). Способ распада плохо известен; вероятнее всего преобладает альфа-распад в америций-244.

Полных оценок нейтронных данных не имеется. Оценка нейтронных сечений содержится в EAF-2003. Экспериментальных данных для ее проверки нет.

Из этой оценки получены следующие значения тепловых сечений и резонансных интегралов:

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f |
|----------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| EAF-2003 | 37.60 | 106.22 | 715 | 321 |

Как видим, тепловое сечение захвата принято в точности таким же, как для берклия-245 и берклия-246. Резонансный интеграл захвата совпадает с таковым для берклия-246. Сечение деления отлично от данных для других изотопов. Основания для выбора этого сечения деления неизвестны.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку сечений из EAF-2003. Файлу присвоить МАТ=9748.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

97.5. Берклий-249

Радиоактивен ($T_{1/2} = 320$ дн.). Испытывает бета-распад в калифорний-249. Вероятность альфа-распада $1.3 \cdot 10^{-3}$; вероятность спонтанного деления - $4.7 \cdot 10^{-8}$.

В JENDL-3.3 и в JEFF-3.1 содержится оценка Кикучи и Накагавы (T.Nakagawa) 1985 г.

В ENDF/B-VIIb2 содержится оценка Чжоу Делиня (Zhou Delin) 1986 г., перешедшая еще из ENDF/B-V и выполненная с учетом результатов оценки Кикучи и Накагавы.

Имеется также оценка нейтронных сечений берклия-249 в EAF-2003.

В нижеследующей таблице сравниваются следующие из этих оценок тепловые сечения и резонансные интегралы.

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f | ν_p |
|--------------|--|----------|-------------------------------|--------|-------------|
| ENDF/B-VII | 745.3 | 1127.3 | 3.99 | 6.49 | 3.3375 |
| JENDL-3.3 | 710.9 | 1123.7 | 3.97 | 650 | 3.41 |
| EAF-2003 | 711.4 | 1123 | 3.97 | 6.50 | |
| Мухабхаб-84 | 746±40 | 1100±100 | | | |
| Косяков-72 | | | | | 3.395±0.026 |
| Гаврилов-75 | 1800±100 | | | | |
| Исе-66 | 660 | | | | |
| Magnusson-54 | 350 | | | | |
| Harvey-54 | $\sigma_a(0.0253 \text{ эВ})=1100\pm300$ | | | | |
| Folger-68 | $\sigma_a(0.0253 \text{ эВ})=1400$; $RI_a=1240$ | | | | |
| Ануфриев-83 | $\sigma_i(0.0253 \text{ эВ})=500\pm70$ | | | | |

Приведены также оценки Мухабхаба и результаты экспериментов, содержащихся в EXFORe. Разброс данных весьма велик и не позволяет отдать предпочтение какой-либо из оценок.

На рис.1 и 2 оцененные сечения деления и захвата сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.

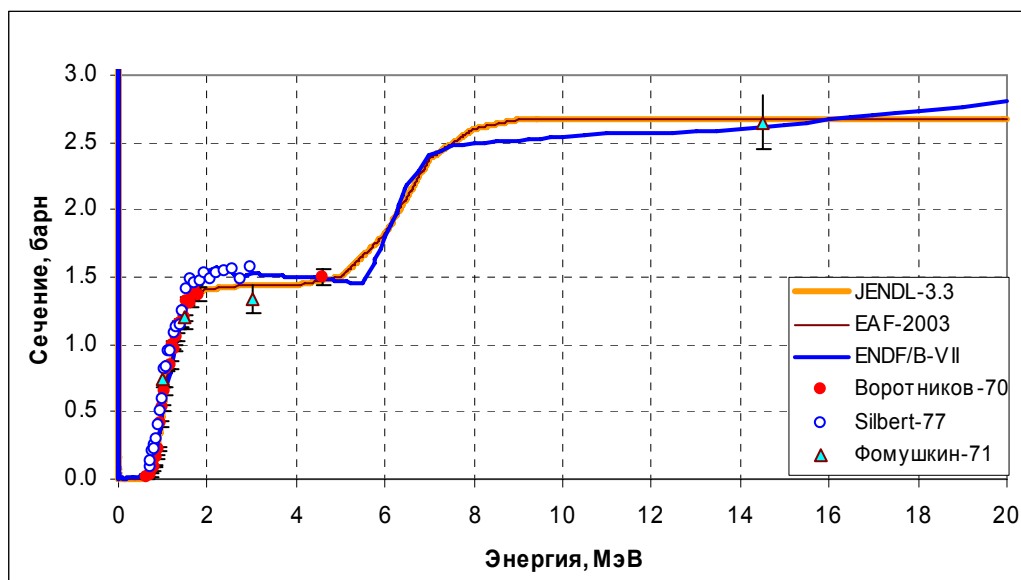


Рис.1а. Сечение деления

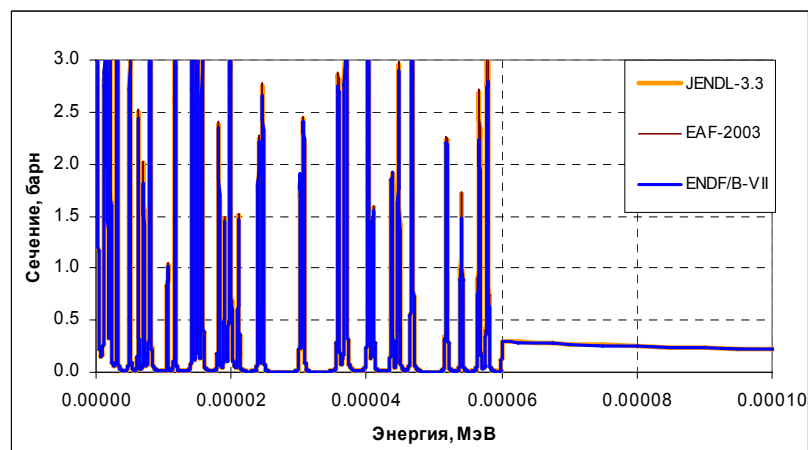


Рис.1б. сечение деления в резонансной области.

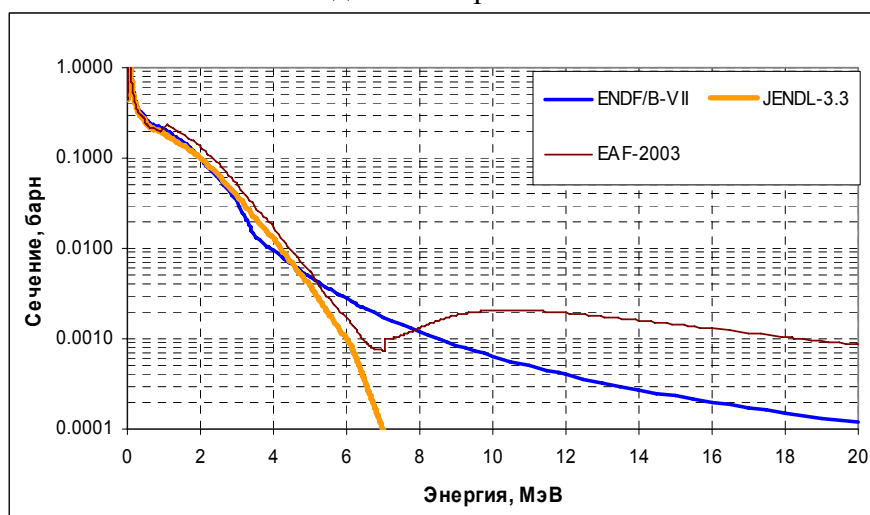


Рис.2. Сечение захвата

Как видно, оценки сечения близки друг к другу (а оценки EAF-2003 и JENDL-3.3 в точности совпадают). Сечение захвата в области быстрых нейтронов в оценке ENDF/B-VII наиболее реалистично.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять оценку ENDF/B-VIIb2. Данные о выходах 8 групп запаздывающих нейтронов принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1, а их спектры – такими же, как и для урана-235. Файлу присвоить МАТ=9749.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

97.6. Берклий-250

Радиоактивен ($T_{1/2}=3.212$ ч). Испытывает бета-распад в калифорний-250.

Во всех полных библиотеках содержится одна и та же оценка Накагавы (t. Nakagawa), выполненная в 1987 г.

Оценка нейтронных сечений содержится также в EAF-2003.

Из названных оценок получены следующие значения тепловых сечений и резонансных интегралов:

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f |
|------------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| JENDL-3.3 | 353.1 | 198.9 | 958.5 | 505.5 |
| EAF-2003 | 353.3 | 198.9 | 959 | 505.5 |
| Diamond-68 | | | 960±150 | |

Оценки практически совпадают и прекрасно согласуются с единственным имеющимся экспериментом Дайамонда.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку Накагавы из JENDL-3.3. Данные о выходах 8 групп запаздывающих нейтронов принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1, а их спектры – такими же, как и для урана-235. Файлу присвоить МАТ=9750.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

98. КАЛИФОРНИЙ

Основной интерес к нейтронным сечениям изотопов калифорния был связан с наработкой ^{252}Cf , как компактного источника нейтронов, используемого в самых различных областях. При этом исходным продуктом является ^{249}Cf , образующийся при бета-распаде ^{252}Bk , который, в свою очередь, является продуктом распада ^{249}Cm . В связи с изложенным понятно, что на измерение нейтронных данных для ^{249}Cf и более тяжелых изотопов вплоть до ^{252}Cf обращалось гораздо большее внимание, чем на данные для более тяжелых сравнительно долгоживущих изотопов ^{253}Cf и ^{254}Cf , а экспериментальных данных для легких нейтронно-дефицитных ^{246}Cf и ^{248}Cf вовсе нет.

Отметим, что кроме дифференциальных данных, на которые даются ссылки в нижеследующих параграфах, при оценке нейтронных данных использовались и неопубликованная информация о изотопном составе облучаемых образцов калифорния¹.

98.1. Калифорний-246

Альфа-активен ($T_{1/2}=35.7$ ч.). Вероятность спонтанного деления $2.5 \cdot 10^{-4}\%$.
Возможный источник: реакция $^{248}\text{Cf}_{(T_{1/2}=333.5 \text{ дн.})}(n,3n)$.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. Теоретически оцененные нейтронные сечения приведены в EAF-2003 (последняя версия оценки). Экспериментальных данных для их проверки нет. В EXFOR содержатся лишь скудные данные о числе мгновенных нейтронов, испускаемых при спонтанном делении: $\nu_p=3.14 \pm 0.09$ (Даковский-73) и данные о средней кинетической энергии осколков деления (Friedman-63).

Оцененные тепловое сечение и резонансный интеграл захвата совпадающие с таковыми для калифорния-248:

$$\sigma_c=37.6 \text{ барн}; RI=106.2 \text{ барн.}$$

Заключение

Принять в РОСФОНД оцененные данные из EAF-2003. Файл MF=8 удалить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

¹ В частности, работа R.W.Benjamin, F.J.McCrosson, V.D.Vandervelde and T.C.Gjrrrell, USERDA Report DP-1394(1975).

98.2. Калифорний-248

Альфа-активен ($T_{1/2}=333.5$ дн.). Возможные источники: бета-распад ^{248}Bk и реакция $^{249}\text{Cf}_{(T_{1/2}=350.6 \text{ лет.})}(n,2n)$.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. Теоретически оцененные нейтронные сечения приведены в EAF-2003 (последняя версия оценки). Экспериментальных данных для их проверки нет. В EXFOR содержатся лишь данные о средней кинетической энергии осколков деления (Friedman-63).

Оцененные тепловое сечение и резонансный интеграл захвата, совпадающие с таковыми для калифорния-246:

$$\sigma_c=37.6 \text{ барн}; RI=106.2 \text{ барн.}$$

Заключение

Принять в РОСФОНД оцененные данных из EAF-2003. Парциальные сечения, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и сумму записать в соответствующую (MT=103) секцию файла MF=3. Включить файл MF=9 с секцией MT=103 с вероятностями образования $^{248}\text{Bk}^m$ и $^{248}\text{Bk}^g$. Файлы MF=8 и 10 удалить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

98.3. Калифорний-249

Альфа-активен ($T_{1/2}=350.6$ лет). Возможные источники: бета-распад ^{249}Bk и реакция $^{250}\text{Cf}_{(T_{1/2}=13.08 \text{ лет.})}(n,2n)$.

В современных библиотеках используются две оценки:

1. Чжоу Делиня и Су Чжонгди (Zhou Dtlin, Su Zhongdi, 1989) – в ENDF/B-VIIb2;
2. Накагава и Лью (T.Nakagawa, T.Liu, 1995) – в JENDL-3.3, в JEFF-3.1² и в ФОНД-

2.2.

В таблице 1 приведены оцененные тепловые сечения и резонансные интегралы захвата и деления, а также число мгновенных нейтронов деления в сравнении с экспериментальными данными.

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f | ν_p |
|-------------|-------------------------------|---------|-------------------------------|----------|-----------|
| ENDF/B-VII | 496 | 572 | 1633 | 2381 | 3.884 |
| JENDL-3.3 | 504 | 694 | 1667 | 2209 | 4.060 |
| EAF-2003 | 482 | 812 | 1666 | 2098 | |
| Мухабхаб-84 | 497±21 | 765±35 | 1642±33 | 2380±85 | 4.06±0.04 |
| Halperin-71 | 478±25 | 765±35 | | | |
| Гаврилов-75 | 540±33 | 720±120 | | | |
| Metta-64 | | | 1735±70 | | |
| Halperin-70 | | | 1690±160 | 2940±280 | |
| Фурсов-71 | | | 1619±43 | | |
| Benjamin-72 | | | 1660±50 | 2114±70 | |
| Фомушкин-73 | | | 1630±100 | | |
| Гаврилов-75 | | | 1610±110 | 1800±200 | |
| Володин-72 | | | | | 4.06±0.04 |

² В JEFF-3.1 введено 8-групповое описание запаздывающих нейтронов и даны их спектры.

Из приведенных данных видно, что более поздняя оценка, принятая в JENDL-3.3, лучше соответствует совокупности экспериментальных данных.

Область разрешенных резонансов в обеих оценках простирается до 70 эВ, максимальная резонансная энергия и там и там – 89.8 эВ. Однако в ENDF/B-VII в этой области приводятся параметры 63 резонансов, а в JENDL-3.3 – только 56 (не считая связанных состояний). На рис. 1 сравниваются нарастающие суммы числа резонансов, а на рис. 2 – суммы приведенных нейтронных ширин. Из рис.2 видно, что резонансы, отсутствующие в последней оценке отнюдь не слабые: их вклад в сумму приведенных ширин столь же существенен, сколько и в сумму резонансов. В описаниях обеих оценок говорится, что в их основе лежит эксперимент Бенжамина³, а в ENDF/B-VII – есть ссылка и на эксперимент Ануфриева⁴. Между тем из 8 резонансов, присутствующих только в оценке ENDF/B-VII, в работе Ануфриева был замечен только один – предпоследний из зарегистрированных в этой работе. Возможно, новая оценка Мухабхаба, выполненная в 2006 г., но пока исполнителям данной работы не известная в полной мере, прольет свет на причины этих расхождений. Пока же преимущество следует отдать оценке Накагавы и Лью.

Область неразрешенных резонансов в обеих оценках простирается до 30 кэВ, учитываются вклады s-, p- и d- резонансов, но параметризация различается. На рис. 3а оцененные сечения в области неразрешенных резонансов сравниваются с результатами измерений с высоким разрешением. Как видно, различия между оценками в этой области несущественны.

На рис. 3б и 3в сечение деления сравнивается с экспериментальными данными при более высоких энергиях. Здесь преимущество оценки Накагавы и Лью очевидно.

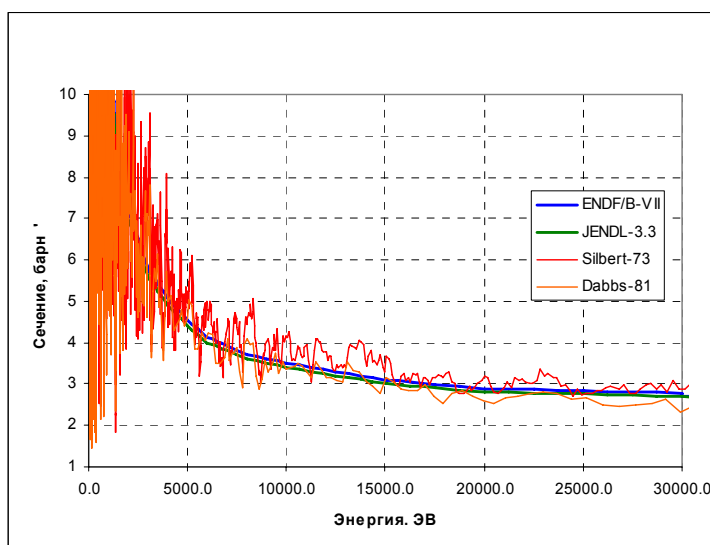


Рис.3а. Сечение деления.

³ Benjamin R.W. et al.: Nucl. Sci. Eng., 85, 261 (1983).

⁴ В. Ануфриев и др., Атомная Энергия, 55,285(1983)

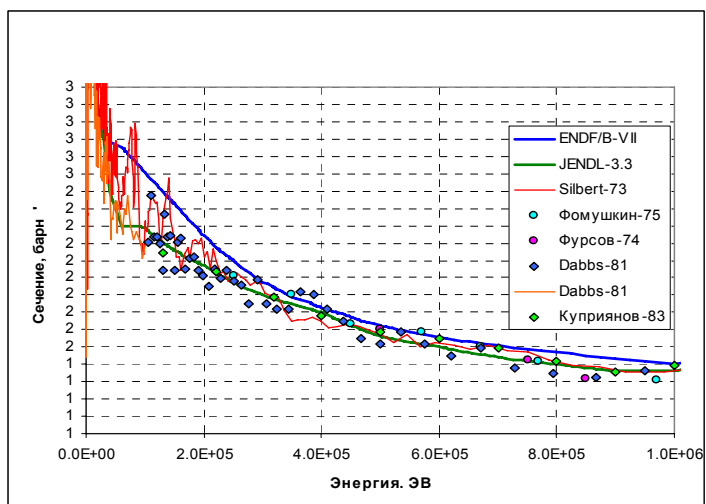


Рис.3б. Сечение деления

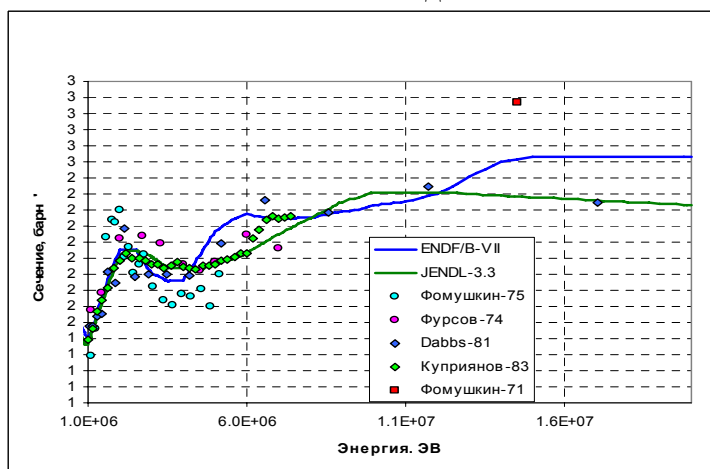


Рис.3в. Сечение деления.

Заключение

В РОСФОНД следует включить оценку Накагава и Лью из JENDL-3.3. Данные о запаздывающих нейтронах (MF=1, MT=455) в 8-групповом представлении принять в соответствии с JEFF-3.1. Ввести секцию MT=455 в файл MF=5 приняв спектры запаздывающих нейтронов такими, как для урана-235, а выходы групп – такими, как в JEFF-3.1. Включить данные о выходах продуктов деления из ENDF/B-VI.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

98.4. Калифорний-250

Альфа-активен ($T_{1/2}=13.08$ лет). Возможные источники: бета-распад ^{250}Bk и реакции $^{249}\text{Cf}_{(T_{1/2}=350.6 \text{ лет.})}(n,\gamma)$, $^{251}\text{Cf}_{(T_{1/2}=898 \text{ лет.})}(n,2n)$.

В современных библиотеках используются две оценки:

1. Бенжамина, Мак-Кроссена и Хавертона (Benjamin, McCrosson, Howerton, 1975), выполненная для ENDF/B-V и перешедшая в ENDF/B-VII.
2. Накагавы (T.Nakagawa, 1986), используемая в JENDL-3.3, JEFF-3.1 и ФОНД-2.2

В таблице 1 приведены оцененные тепловые сечения и резонансные интегралы захвата и деления, а также число мгновенных нейтронов деления в сравнении с экспериментальными данными.

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f | ν_p |
|--------------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|---------|
| ENDF/B-VII | 1611 | 11224 | 0 | 0.66 | 0 |
| JENDL-3.3 | 1779 | 8418 | 4.09 | 19.36 | 3.63 |
| EAF-2003 | 1613 | 11223 | 112 | 530 | |
| Мухахаб-84 | 2034±200 | 11600 | | | |
| Magnusson-54 | 1500 | | | | |
| Halperin-71 | 2034±200 | | | | |
| Гаврилов-78 | 1800 | | | | |
| Metta-64 | | | 350 | | |
| Folger-68 | | | 1500 | | |
| Smoth-68 | | | 1090 | | |
| Danon-91 | | | 112±99 | | |

В обеих оценках введены области фиктивных разрешенных резонансов, а затем – неразрешенных резонансов. И те и другие данные равно ненадежны. На рис. 1а и 1б оцененные сечения деления сравниваются с имеющимися экспериментами в области разрешенных резонансов. В оценке ENDF/B-VII делительные ширины равны нулю, так что равно нулю и сечение.

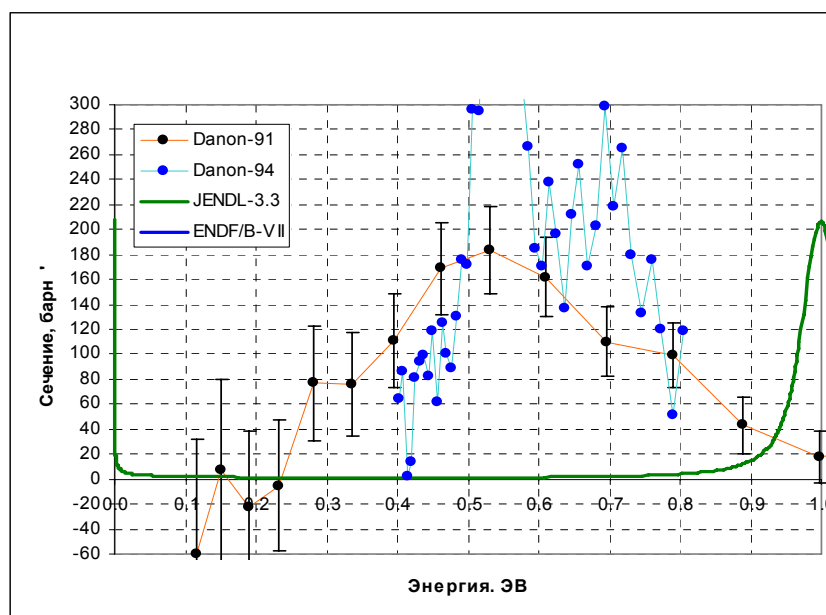


Рис. 1а. Сечение деления

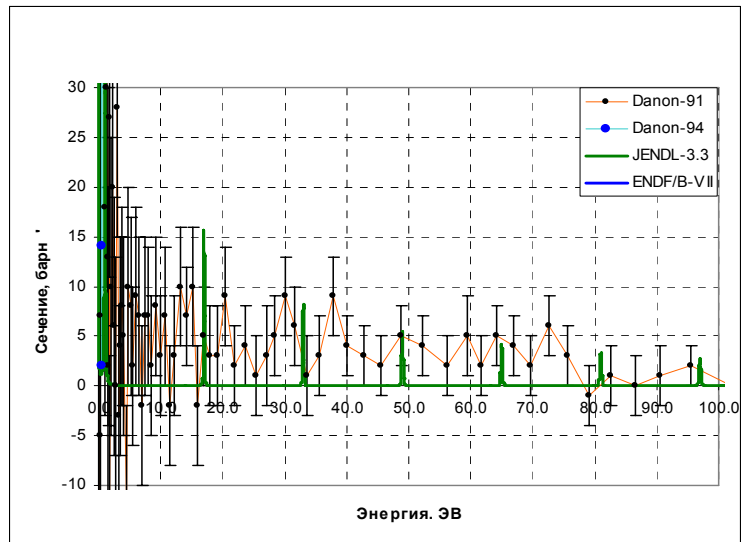


Рис.1б. Сечение деления.

Как видно, ни одна из оценок не описывает экспериментальные данные Данона, указывающие на наличие резонанса при энергии около 0.6 эВ. В области десятков эВ фиктивные резонансы введенные Накагавой, также не описывают среднее сечение, следующее из эксперимента Данона.

На рис.1в приведены данные о сечении деления при высоких энергиях. Экспериментальные данные в этой области отсутствуют.

Экспериментальных данных о сечении захвата в резонансной области и выше в EXFORe нет.

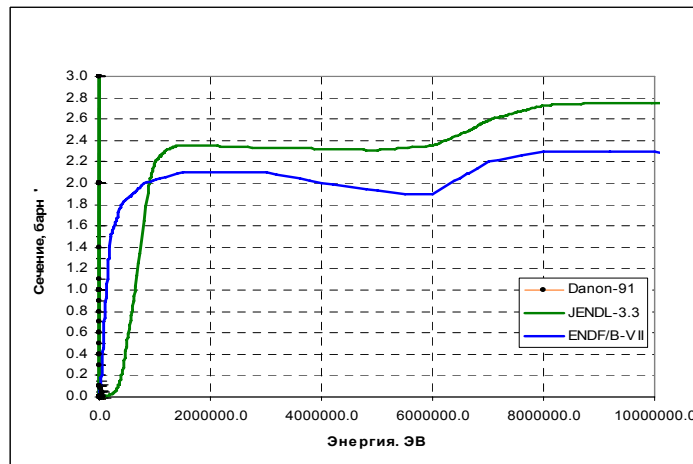


Рис.1в. Сечение деления.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку Накагавы из JENDL-3.3. Данные о запаздывающих нейтронах (MF=1, MT=455) в 8-групповом представлении принять в соответствии с JEFF-3.1. Ввести секцию MT=455 в файл MF=5 приняв спектры запаздывающих нейтронов такими, как для урана-235, а выходы групп – такими, как в JEFF-3.1.

В дальнейшем следует провести новую оценку, учитывающую данные Данона в купе с теоретическими расчетами сечений.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

98.5. Калифорний-251

Альфа-активен ($T_{1/2}=898$ лет). Возможные источники: бета-распад ^{251}Bk и реакции $^{250}\text{Cf}_{(T_{1/2}=13.08 \text{ лет.})}(n,\gamma)$, $^{252}\text{Cf}_{(T_{1/2}=2.645 \text{ лет.})}(n,2n)$.

В современных библиотеках используются две оценки:

1. Бенжамина, Мак-Кроссена и Хавертона (Benjamin, McCrosson, Howerton, 1975), выполненная для ENDF/B-V и перешедшая в ENDF/B-VII.

2. Накагавы (T.Nakagawa, 1986), используемая в JENDL-3.3 и ФОНД-2.2

В JEFF-3.1 используется та же оценка, что и в ENDF/B-VII с заменой 6-группового представления запаздывающих нейтронов на 8-групповое.

В таблице 1 приведены оцененные тепловые сечения и резонансные интегралы захвата и деления, а также число мгновенных нейтронов деления в сравнении с экспериментальными данными.

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f | ν_p |
|--------------|---|---------|-------------------------------|-------------------------|---------|
| ENDF/B-VII | 2862 | 1631 | 5233 | 4947 | 4.13 |
| JENDL-3.3 | 2876 | 1604 | 4933 | 2762 | 4.10 |
| EAF-2003 | 2864 | 1613 | 5328 | 4887 | |
| Мухабхаб-84 | 2850±150 | 1600±30 | 4895±250 | 5900±100 | |
| Magnusson-54 | 3000 | | | | |
| Halperin-71 | 2850±150 | | | 6900-2850 =4050±1400 | |
| Гаврилов-78 | 1800 | | | | |
| Metta-64 | | | 3000±260 | | |
| Ragaini-74 | | | 4800±250 | | |
| Smith-68 | 4970-3550=1420 | | 3550 | | |
| Folger-68 | $\sigma_{\text{abs}}(0.0253 \text{ эВ})=6600$ | | | | |

Как видим, разброс экспериментальных данных велик и разброс оценок ему соответствует.

Для быстрых нейтронов никаких данных в EXFORe нет.

В обеих оценках введены области фиктивных разрешенных резонансов, за которой следует область неразрешенных резонансов, обладающая не большей надежностью.

Заключение

Целесообразно принять в РОСФОНД оценку Накагавы (JENDL-3.3) как более позднюю. Данные о запаздывающих нейтронах ($MF=1$, $MT=455$) в 8-групповом представлении принять в соответствии с JEFF-3.1. Ввести секцию $MT=455$ в файл $MF=5$ приняв спектры запаздывающих нейтронов такими, как для урана-235, а выходы групп – такими, как в JEFF-3.1. Включить данные о выходах продуктов деления из ENDF/B-VI.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

98.6. Калифорний-252

Радиоактивен ($T_{1/2}=2.645$ лет). Испытывает альфа распад в ^{248}Cm (96.91%), а в остальных случаях – спонтанное деление. Источник: реакция $^{251}\text{Cf}_{(T_{1/2}=898 \text{ лет.})}(n,\gamma)$.

В современных библиотеках используются две оценки:

1. Бенжамина, Мак-Кроссена и Хавертона (Benjamin, McCrosson, Howerton, 1975), выполненная для ENDF/B-V и перешедшая в ENDF/B-VII и JEFF-3.1.

2. Накагавы (T.Nakagawa, 1987), используемая в JENDL-3.3 и ФОНД-2.2

В таблице 1 приведены оцененные тепловые сечения и резонансные интегралы захвата и деления, а также число мгновенных нейтронов деления в сравнении с экспериментальными данными.

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f | ν_p |
|--------------|--|----------------|-------------------------------|--------------|-------------------------|
| ENDF/B-VII | 20.5 | 47.1 | 32.2 | 111 | $\nu_{\text{tot}}=4.06$ |
| JENDL-3.3 | 20.7 | 47.0 | 33.0 | 99.7 | 3.884 |
| EAF-2003 | 20.5 | 47.0 | 33.1 | 99.7 | |
| Мухабхаб-84 | 20.4 ± 1.5 | 43.5 ± 3.0 | 32 ± 4 | 110 ± 30 | |
| Magnusson-54 | 25 | | | | |
| Harvey-54 | 30 | | | | |
| Halperin-71 | 20.4 ± 2.0 | 43.5 ± 3.0 | 32 ± 4 | 110 ± 30 | |
| Folger-68 | $\sigma_{\text{abs}}(0.0253 \text{ эВ})=8.6; RI_{\text{abs}}=42$ | | | | |

Различия между оценками приведенных величин менее экспериментальных погрешностей.

Область разрешенных резонансов в ENDF/B-VII простирается до 366.5 эВ и содержит параметры 20 фиктивных резонансов не считая связанного состояния. В JENDL-3.3 приводятся все 37 резонансов, параметры которых приводятся в компиляции Мухабхаба-84, включая связанное состояние. Нейтронные ширины в этой компиляции, как правило, не приводятся, но известны резонансные интегралы деления.

Исключением из этого правила является резонанс при 66.37 эВ, для которого $g\Gamma_n$ определено, и еще три резонанса, для которых приведены верхние оценки $g\Gamma_n$. В JENDL-3.3 для этих резонансов приняты именно эти верхние оценки.

На рис.1 сравниваются нарастающие суммы резонансов в обсуждаемых оценках. Строгая линейность этой суммы для ENDF/B-VII является свидетельством искусственности принятых резонансов.

На рис. 2 приведена нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин для оценки JENDL-3.3. Отчетливо видны ступеньки при энергиях 557.2 эВ, 726.1 эВ и 855.1 эВ, где приняты верхние оценки $g\Gamma_n$.

Область неразрешенных резонансов в JENDL-3.3 простирается до 30 кэВ и описывается параметрами s- и p-волны; в ENDF/B-VII эта область учитывает только s-волну и простирается до 10 кэВ.

На рис. 1а приведено сечение деления в области разрешенных резонансов, а на рис. 1б – выше этой области в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. В сечении деления наблюдаются значительные расхождения, особенно в резонансной области. Заметим, что Мухабхаб не указывает ссылку на работу, на основе которой он оценил резонансные параметры. Ссылки на измерения Мура у него также не содержится.

Ненадежность оценки сечений калифорния-252 очевидна, однако при скудости экспериментальных данных добиться этой надежности, видимо, невозможно.

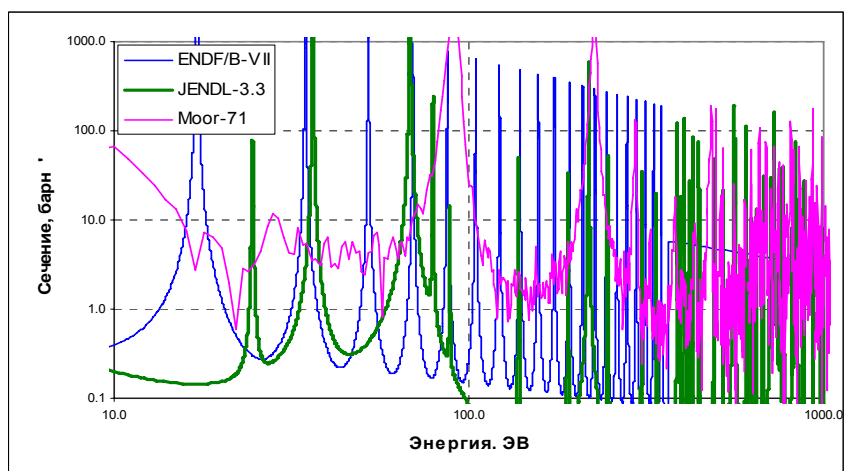


рис.1а. Сечение деления

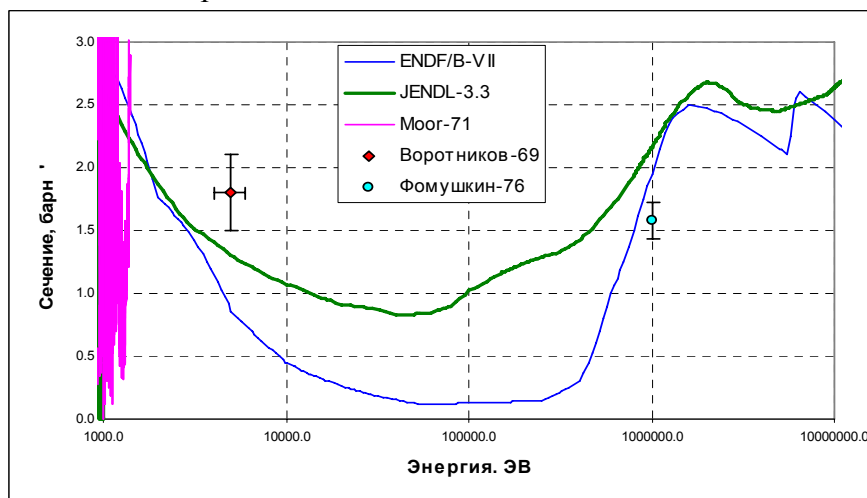


Рис.1б. Сечение деления

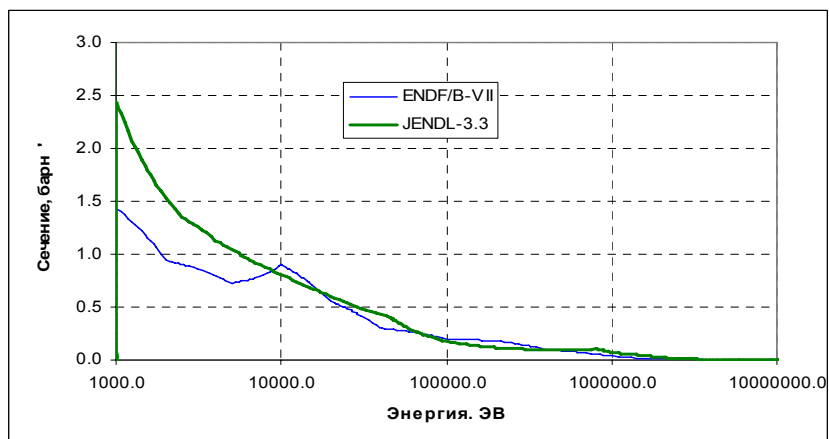


Рис.2. Сечение захвата

Заклучение

Принять в РОСФОНД оценку Накагавы из JENDL-3.3 как более позднюю. Данные о запаздывающих нейтронах (MF=1, MT=455) в 8-групповом представлении принять в соответствии с JEFF-3.1. Ввести секцию MT=455 в файл MF=5 приняв спектры запаздывающих нейтронов такими, как для урана-235, а выходы групп – такими, как в JEFF-3.1.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

98.7. Калифорний-253

Радиоактивен ($T_{1/2}=17.81$ дн.). Испытывает бета-распад в ^{253}Es (99.69%); в остальных случаях – альфа-распад в ^{249}Cm . Источник: реакция $^{252}\text{Cf}(T_{1/2}=2.645 \text{ лет.})(n,\gamma)$.

Более-менее полный набор нейтронных данных содержится лишь в ENDF/B-VIIb2 – оценка Бенжамина и Мак-Кроссона 1975 г.

В таблице 1 приведены оцененные тепловые сечения и резонансные интегралы захвата и деления, а также число мгновенных нейтронов деления в сравнении с экспериментальными данными.

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f | ν_t |
|-------------|--|--------|-------------------------------|----------------|---------|
| ENDF/B-VII | 341 | 381 | 1136 | 1251 | 4.15 |
| EAF-2003 | 18.0 | 20.5 | 1137 | 1254 | |
| Мухабхаб-84 | 17.6 ± 1.8 | 13.3 | 1300 ± 240 | 2000 ± 400 | |
| Bemis-70 | 17.6 ± 1.8 | | 2550 ± 400 | | |
| Wild-73 | | | 1300 ± 240 | | |
| Smith-68 | $\sigma_{\text{abs}}(0.0253 \text{ эВ})=165$ | | | | |

Бенжамин и Мак-Кроссон полагают, что величина α , следующая из эксперимента Бемиса, слишком мала и положили ее равной 0.3.

В оценке Бенжамина и Мак-Кроссона введена область фиктивных разрешенных резонансов (120 резонансов до 1 кэВ) и область неразрешенных резонансов, простирающаяся до 10 кэВ. Сечения в ней заданы параметрами только s-волны. Следует отметить, что эта оценка лишь формально распространена до 20 МэВ. Сечения деления и захвата в ней определены только до 10 кэВ, а далее полагаются равными нулю. Сечение упругого рассеяния выше 10 кэВ равно полному и не зависит от энергии. Никакие пороговые реакции, естественно, при этом не описываются.

На рис. 1 и 2 оценки сечений деления и захвата из ENDF/B-VII и EAF-2003 сравниваются друг с другом. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Как видно, сечения деления отличаются лишь тем, что в EAF-2003 выше 1 МэВ оно скачком возрастает от нуля до 2 барн и далее остается постоянным. Поведение сечения захвата не согласуется с поведением сечения деления, ведет себя не физично и не может быть принято. Наличие в файле EAF-2003 сечений пороговых реакций, полученных расчетным путем не является причиной для принятия этого файла в РОСФОНД: в файле из ENDF/B-VII, где этих данных нет, тот факт, что сечения важнейших реакций выше 10 кэВ не оценены, не скрыт от пользователя.

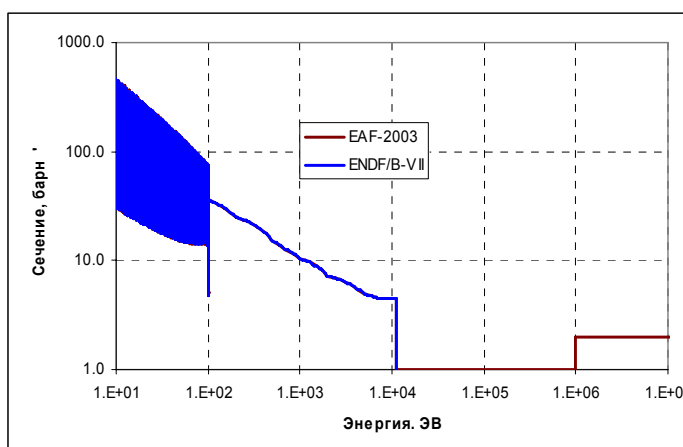


Рис.1. Сечение деления.

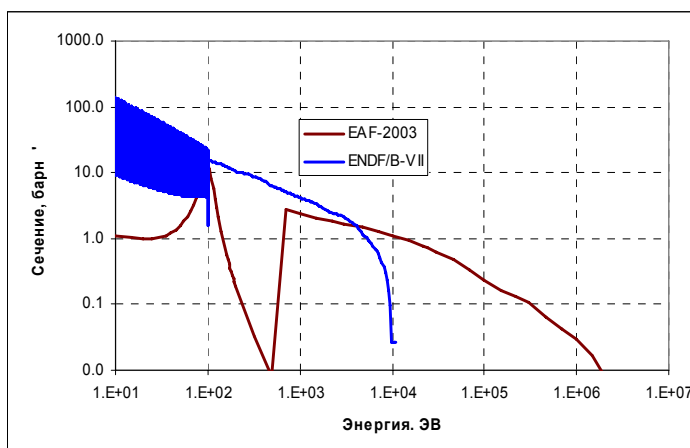


Рис.2. Сечение захвата.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл данных из ENDF/B-VII. Данные о запаздывающих нейтронах (MF=1, MT=455) в 8-групповом представлении принять в соответствии с JEFF-3.1. Ввести секцию MT=455 в файл MF=5 приняв спектры запаздывающих нейтронов такими, как для урана-235, а выходы групп – такими, как в JEFF-3.1.

При случае или при необходимости эту оценку целесообразно выполнить заново, опираясь на современные теоретические модели.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

98.8. Калифорний-254

Радиоактивен ($T_{1/2}=60.5$ дн.). Испытывает спонтанное деление (99.69%); в остальных случаях – альфа-распад в ^{250}Cm . Источник: реакция $^{253}\text{Cf}_{(T_{1/2}=2.645 \text{ лет.})}(n,\gamma)$.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. Теоретически оцененные нейтронные сечения приведены в EAF-2003 (последняя версия оценки).

В таблице 1 приведены оцененные тепловые сечения и резонансные интегралы захвата и деления в сравнении с экспериментальными данными.

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f | ν_t |
|-------------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|---------|
| EAF-2003 | 4.5 | 2.07 | 2 | 13.8 | |
| Мухабхаб-84 | 4.5 ± 1.5 | | | | |
| Harvey-54 | 2 | | | | |
| Lougheed-81 | 4.5 ± 1.0 | | | | |

Заключение

Принять в РОСФОНД оцененные данных из EAF-2003. Данные о запаздывающих нейтронах (MF=1, MT=455) в 8-групповом представлении принять в соответствии с JEFF-3.1. Ввести секцию MT=455 в файл MF=5 приняв спектры запаздывающих нейтронов такими, как для урана-235, а выходы групп – такими, как в JEFF-3.1.

Файл MF=8 удалить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

99.ЭЙНШТЕЙНИЙ

99.1. Эйнштейний-251

Радиоактивен ($T_{1/2}=33$ ч.). испытывая захват орбитального электрона превращается в ^{251}Cf (99.5%). В остальных случаях испытывает альфа-распад в ^{247}Bk .

Источником этого изотопа может служить реакция $^{252}\text{Es}_{(T_{1/2}=471.7 \text{ дн.})}(n,2n)$.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится последняя теоретическая оценка сечений нейтронных реакций. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Оцененные сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы таковы:

$\sigma_c=37.6$ барн;

$\sigma_f= 39.0$ барн;

$RI_c= 106$ барн;

$RI_f= 20$ барн.

Энергетические зависимости сечений основных реакций показаны на рис. 1. Заметим, что существенное отличие поведения сечения деления от поведения сечения захвата в области сотен электронвольт представляется неоправданным.

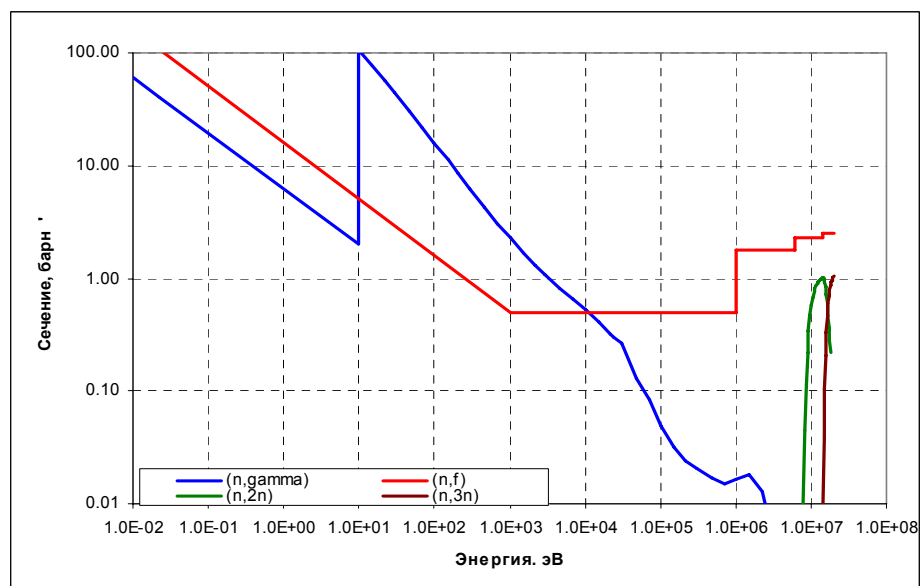


Рис.1. Нейтронные сечения эйнштейния-251

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в секцию MT=103 файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

99.2. Эйнштейний-252

Радиоактивен ($T_{1/2}=471.7$ дн). Испытывая захват орбитального электрона превращается в ^{252}Cf (22%). В остальных случаях испытывает альфа-распад в $^{248}\text{Bk}^g$.

Источником этого изотопа может служить реакция $^{253}\text{Es}_{(T_{1/2}=20.47 \text{ дн.})}(n,2n)$ (^{253}Es является продуктом бета-распада ^{253}Cf).

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится последняя теоретическая оценка сечений нейтронных реакций. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Оцененные сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы таковы:

$\sigma_c=37.6$ барн;

$\sigma_f= 4800$ барн;

$RI_c= 106$ барн;

$RI_f= 2114$ барн.

Энергетические зависимости сечений основных реакций показаны на рис. 1. Заметим, что существенное отличие поведения сечения деления от поведения сечения захвата в области сотен электронвольт представляется неоправданным.

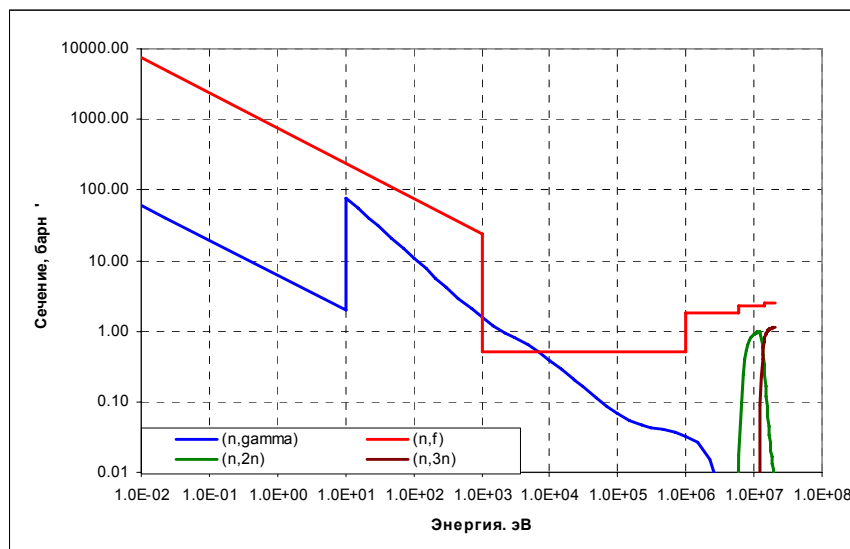


Рис.1. Нейтронные сечения эйнштейния-252

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных данных из EAF-2003. Сечения возбуждения изомерных состояний, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в секцию MT=103 файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

99.3. Эйнштейний-253

Радиоактивен ($T_{1/2}=20.47$ дн). Испытывает альфа-распад в ^{249}Bk . В редких случаях ($8.7 \cdot 10^{-6}\%$) спонтанно делится. Является продуктом бета-распада ^{253}Cf .

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится последняя теоретическая оценка сечений нейтронных реакций. Сечение радиационного захвата в этой оценке имеет сложную резонансную структуру, полученную на основе резонансных параметров, заимствованных из файла данных JEF-2.2.

В JEF-2.2 содержится оценка Бенжамина и Мак-Кроссона (R.Benjamin, F. McCrosson, 1975). Резонансные параметры (27 резонансов с максимальной энергией 97.46 эВ) сгенерированы специальной программой на основе экспериментальных данных о тепловом сечении захвата и резонансном интеграле. В области разрешенных резонансов введена подложка, учитывающая, как говорится в комментариях к файлу, влияние связанного состояния. Введена также область неразрешенных резонансов, простирающаяся до 10 кэВ. В этой области также введена линейно нарастающие с энергией подложки в сечение рассеяния и в сечение захвата

Оцененные сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в оценке JEF-2.2 таковы:

$$\sigma_c = 201 \text{ барн};$$

$$RI_c = 6337 \text{ барн}.$$

Сечение деления в файле вообще не приводится.

Приведем результаты измерений этих величин, содержащиеся в EXFOR:

Адаев-61: $RI_c^g = 70$ барн; $RI_c^m = 3430$ барн.

Folger-68¹: $\sigma_c^{g+m} = 130$ барн; $RI_c^{g+m} = 3600$ барн.

Harbor-73: $\sigma_c^g < 3$ барн; $\sigma_c^m = 155 \pm 20$ барн;

$$RI_c^g = 4299 \pm 218 \text{ барн}; RI_c^m = 3009 \pm 168 \text{ барн}.$$

Налицо противоречие в результатах измерений резонансного интеграла захвата с образованием ядра-продукта в основном состоянии.

Мухабхаб разрешил имеющиеся противоречия следующим образом:

$$\sigma_c^g = 5.8 \pm 0.7 \text{ барн}; \sigma_c^m = 178 \pm 15 \text{ барн};$$

$$RI_c^g = 114 \pm 7 \text{ барн}; RI_c^m = 3750 \pm 200 \text{ барн}.$$

Никаких оценок сечения деления Мухабхабом не сделано.

В оценке EAF-2003 приводятся и сечение деления и сечения всех других реакций, возможных при энергии ниже 20 МэВ. Тепловое сечение и резонансный интеграл захвата, естественно, совпадают с приведенными выше. Тепловое сечение и резонансный интеграл деления в этой оценке приняты такими же как для эйнштейния-252:

$$\sigma_c = 4800 \text{ барн};$$

$$RI_c = 2114 \text{ барн}.$$

Столь высокие значения этих величин представляются сомнительными, как потому, что естественней было бы принять значения сечения деления ^{253}Es таким, как у ^{251}Es , так и потому, что столь высокий резонансный интеграл должен был бы привести к существенно большему значению резонансного интеграла поглощения, измеренному по выгоранию в работе Folger-68 (см. выше).

¹ Указывается, что сечение захвата тепловых нейтронов измерялось по активации, но период продукта не указан. Резонансный интеграл, как отмечено, измерялся по выгоранию.

Заключение

Для библиотеки РОСФОНД следует скомпилировать новый файл оцененных данных, приняв резонансные параметры из JEF-2.2 (=ФОНД-2.2), но добавив делительную ширину, приняв ее такой же, как для ^{249}Bk (0.0002 эВ). Такую же среднюю делительную ширину добавить и в средние резонансные параметры.

Область неразрешенных резонансов ограничить 3.5 кэВ для более удобного сопряжения с сечениями при более высоких энергиях²

Вне резонансной области (выше 10 кэВ) полное сечение, сечение упругого рассеяния, сечения радиационного захвата, деления, реакций (n,2n), (n,3n), (n,p) и (n, α) принять такими, как они оценены Такаги для ^{255}Es (см. ниже п. 99.5). Такими же принять и энерго-угловые распределения вторичных нейтронов. В интервале от 3.5 до 10 кэВ обеспечить сопряжение сечений с данными, рассчитанными по средним резонансным параметрам с учетом подложки.

Ввести файл MF=9 с вероятностями образования ^{254}Es в основном и изомерных состояниях приняв вероятность образования изомера при энергиях ниже 1 эВ (т.е. в зоне 1-го резонанса) равной 0.77 (исходя из оцененного полного сечения захвата тепловых нейтронов и сечения образования изомера, измеренного Харбором), а выше этой энергии – равной 0.41, что соответствует значению этой вероятности в резонансной области судя по данным Харбора.

Тепловые сечения и резонансные интегралы, следующие из рекомендуемой оценки приводятся ниже:

$$\begin{aligned}\sigma_c &= 201 \text{ барн}; \quad \sigma_f = 1.86 \text{ барн}; \\ RI_c &= 6255 \text{ барн}; \quad RI_f = 64.14 \text{ барн}; \\ \nu &= 3.866\end{aligned}$$

Энергетическое поведение сечений, описываемое рекомендуемым составным файлом оцененных данных, показано на рис. 1

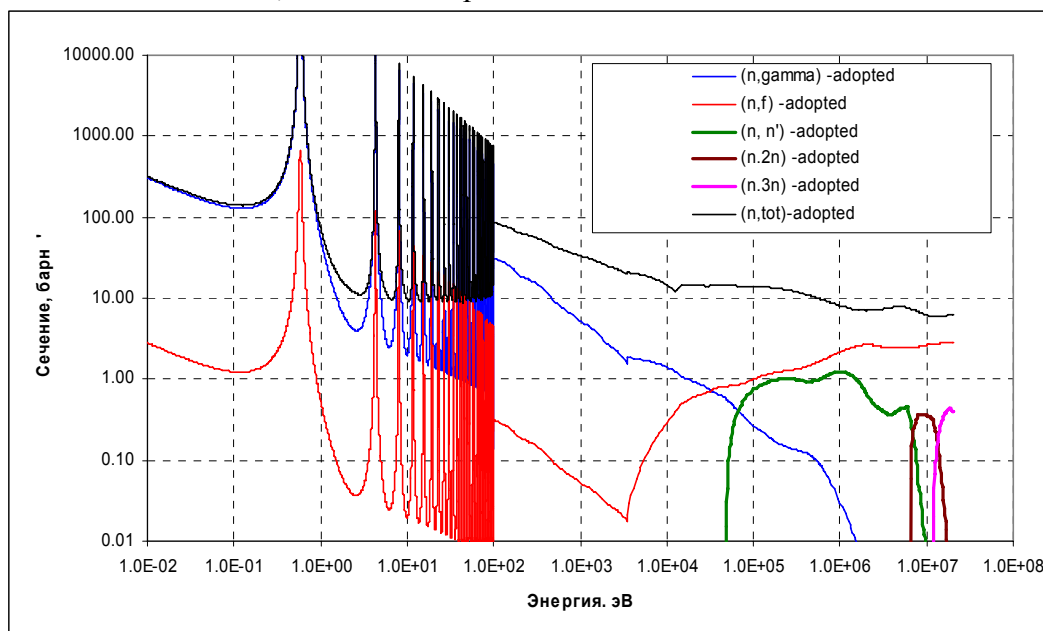


Рис. 1. Оцененные нейтронные сечения эйнштейния-253.

Данные о запаздывающих нейтронах (MF=1, MT=455) в 8-групповом представлении принять в соответствии с JEFF-3.1. Ввести секцию MT=455 в файл MF=5

² Из за большой отрицательной подложки при 10 кэВ сечения, рассчитанные по данным JEF-2.2, имеют очень глубокий минимум и не сопрягаются с данными при более высоких энергиях.

приняв спектры запаздывающих нейтронов такими, как для урана-235, а выходы групп – такими, как в JEFF-3.1.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

99.4. Эйнштейний-254

Альфа-активен ($T_{1/2}=275.7$ дн). Распадается в бета-активный ^{250}Bk , который с периодом 3.217 ч. распадается в долгоживущий ^{250}Cf ($T_{1/2}=13.08$ лет).

Во всех современных библиотеках оцененных данных используется одна и та же оценка, выполненная в 1987 г. Такаги (N.Takagi) в токийском технологическом институте для JENDL-3.2, слегка модернизированная в 1990 г. Накагавой (T.Nakahava).

В нижеследующей таблице приводятся значения сечений захвата и деления под действием тепловых нейтронов и резонансные интегралы, следующие из этой оценки, измеренные разными авторами и принятые в РОСФОНД по излагаемым ниже причинам.

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f |
|--------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-----------------|
| Takagi | 28.3 | 22.5 | 1966 | 1809 |
| Гальперин-85 | 28.3±2.5 | | 2030±250 | 1200±250 |
| Masmurdo-72 | | | 2830±130 | 2200±90 |
| Diamond-68 | | | 3060±180 | |
| Мухабхаб-84 | 28.3±2.5 | 18.2±1.5 | 1966±160 | 1200±250 |
| РОСФОНД | 28.3 | 14.0 | 2100 | 1624 |

На рис. 1. приведены оцененные энергетические зависимости сечений деления и захвата в сравнении с экспериментальными данными. Как видно, согласующиеся между собой и с данными других авторов результаты Данона заставляют пересмотреть оценку. Оцененные данные, принятые в РОСФОНД, изображены толстыми линиями.

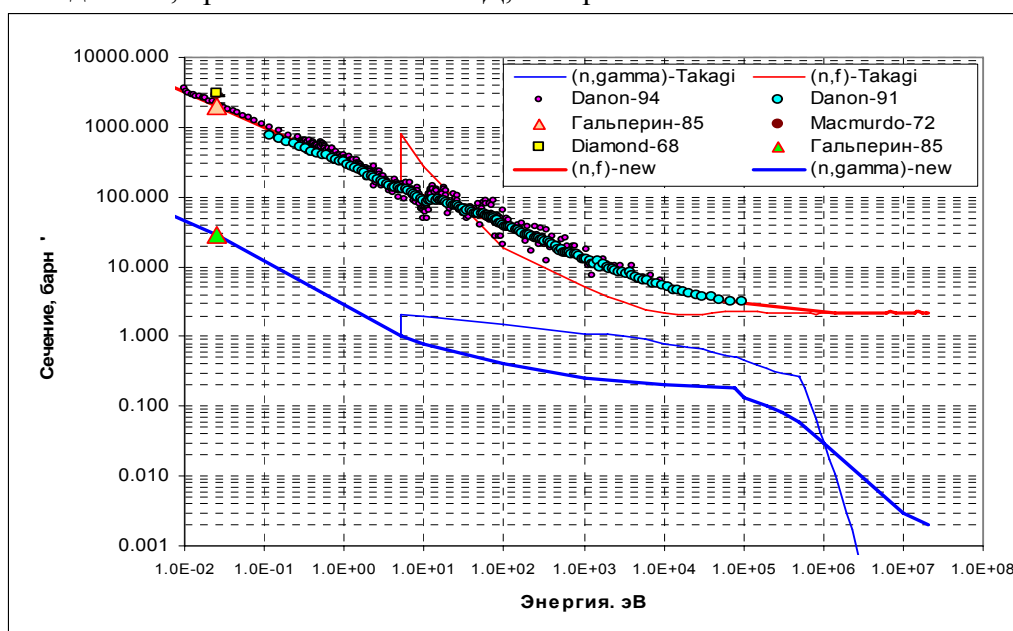


Рис.1. Сечения захвата и деления

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку Такаги, заменив в ней сечения деления и захвата показанными на рис. 1 жирными линиями. Соответственно откорректировать полное сечение. Ввести файл MF=10 с секцией MT=4 с сечением образования изомерного состояния на основе данных EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

99.5. Эйнштейний-254-m

Долгоживущий изомер ($T_{1/2}=39.3$ ч.) испытывает бета-распад в ^{254}Fm (98%), изомерный переход в основное состояние (около 3%), альфа-распад в ^{247}Bk или захват орбитального электрона с образованием спонтанно делящегося ^{254}Es ($T_{1/2}=60.5$ дн.). Источником этого изотопа может служить реакция $^{255}\text{Es}(T_{1/2}=39.8 \text{ дн.})(n,2n)$.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится последняя теоретическая оценка сечений нейтронных реакций. Экспериментальных данных для их проверки нет.

Оцененные сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы таковы:

$\sigma_c=1830$ барн;

$\sigma_f=1584$ барн;

$RI_c=1056$ барн;

$RI_f=1540$ барн.

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных данных из EAF-2003. Файл MF=8 опустить. Секцию MT=4 перенести из файла MF=3 в файл MF=10.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

99.6. Эйнштейний-255

Альфа-активен ($T_{1/2}=39.8$ дн). Распадается в бета-активный ^{251}Bk , который с периодом 3.217 ч. распадается в долгоживущий ^{251}Cf ($T_{1/2}=898$ лет).

Во всех современных библиотеках оцененных данных используется одна и та же оценка, выполненная в 1987 г. Такаги (N.Takagi) в токийском технологическом институте для JENDL-3.2, слегка модернизированная в 1990 г. Накагавой (T.Nakahava).

В нижеследующей таблице приводятся значения сечений захвата и деления под действием тепловых нейтронов и резонансные интегралы, следующие из этой оценки.

Единственной измеренной величиной является сечение захвата тепловых нейтронов, измерявшееся Логхидом.

| Источник | $\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_c | $\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})$ | RI_f |
|-------------|-------------------------------|------------|-------------------------------|-------------|
| Takagi | 55 | 291 | 13.4 | 85.6 |
| Lougheed | 55±10 | | | |
| Мухабхаб-84 | 55±10 | | | |

На рис. 1. приведены оцененные энергетические зависимости сечений деления и захвата в сравнении с экспериментальными данными. Как видно, согласующиеся между собой и с данными других авторов результаты Данона заставляют пересмотреть оценку. Оцененные данные, принятые в РОСФОНД, изображены толстыми линиями.

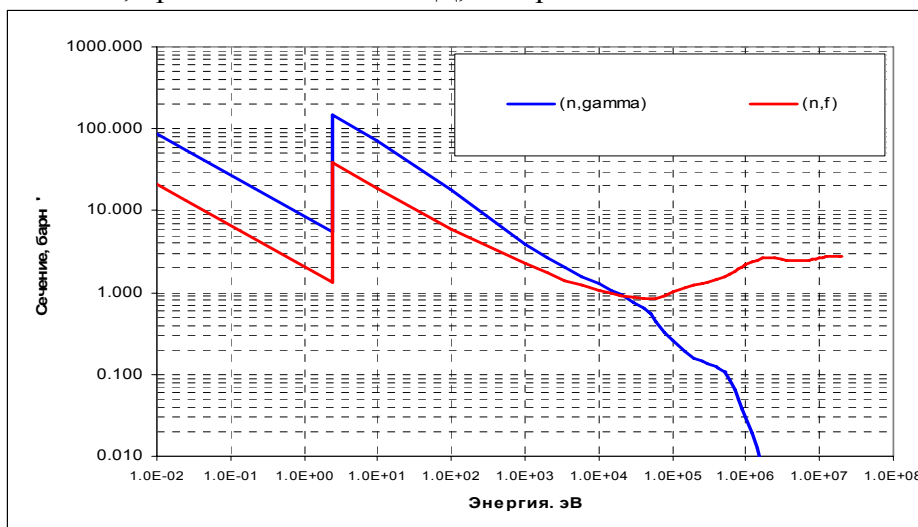


Рис.1. Сечения захвата и деления

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных нейтронных данных Такага из JENDL-3. Ввести файл MF=9 с секцией MT=102 с вероятностями образования эйнштейния-254 в основном и в изомерном состояниях.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

100.ФЕРМИЙ

100.1. Фермий-252

Альфа-активный радионуклид ($T_{1/2}=25.39$ ч.), порождающий цепочку альфа-распадов $^{252}\text{Fm} \rightarrow ^{248}\text{Cf} \rightarrow ^{244}\text{Cm} \rightarrow ^{240}\text{Pu} \rightarrow ^{236}\text{U} \rightarrow ^{232}\text{Th}$ и т.д. Источниками этого изотопа могут быть реакции $^{253}\text{Fm}_{(T_{1/2}=3.0 \text{ дн.})} (n,2n)$; $^{254}\text{Fm}_{(T_{1/2}=3.24 \text{ ч.})} (n,3n)$; $^{255}\text{Fm}_{(T_{1/2}=20.1 \text{ ч.})} (n,4n)$.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится последняя теоретическая оценка сечений нейтронных реакций.

Экспериментальных данных для их проверки, естественно, нет.

Оцененные сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы таковы:

$\sigma_c=39.0$ барн;

$\sigma_f=37.6$ барн;

$RI_c=106$ барн;

$RI_f=20$ барн.

Энергетические зависимости сечений основных реакций показаны на рис. 1.

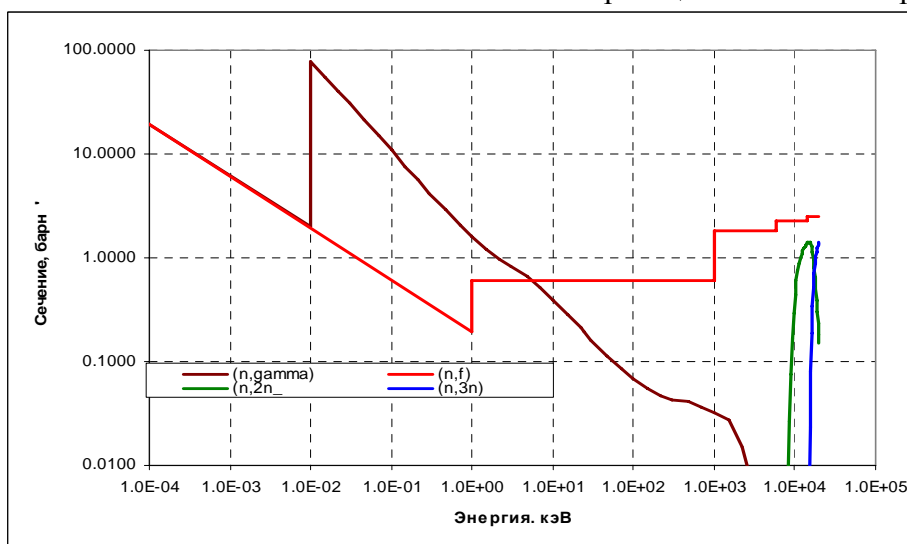


Рис.1. Нейтронные сечения фермия-252

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных данных из EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

100.2. Фермий-253

Альфа-активный радионуклид ($T_{1/2}=3.0$ дн.), порождающий цепочку альфа-распадов $^{252}\text{Fm} \rightarrow ^{249}\text{Cf} \rightarrow ^{245}\text{Cm} \rightarrow ^{241}\text{Pu}$ и т.д. Источниками этого изотопа могут быть реакции $^{254}\text{Fm}(T_{1/2}=3.24 \text{ ч.}) (n,2n)$, $^{255}\text{Fm}(T_{1/2}=20.1 \text{ ч.}) (n,3n)$.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится последняя теоретическая оценка сечений нейтронных реакций.

Экспериментальных данных для их проверки, естественно, нет.

Оцененные сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы таковы:

$\sigma_c=40$ барн;

$\sigma_f=40\,000$ барн;

$RI_c=297$ барн;

$RI_f=17\,600$ барн.

Энергетические зависимости сечений основных реакций показаны на рис. 1.

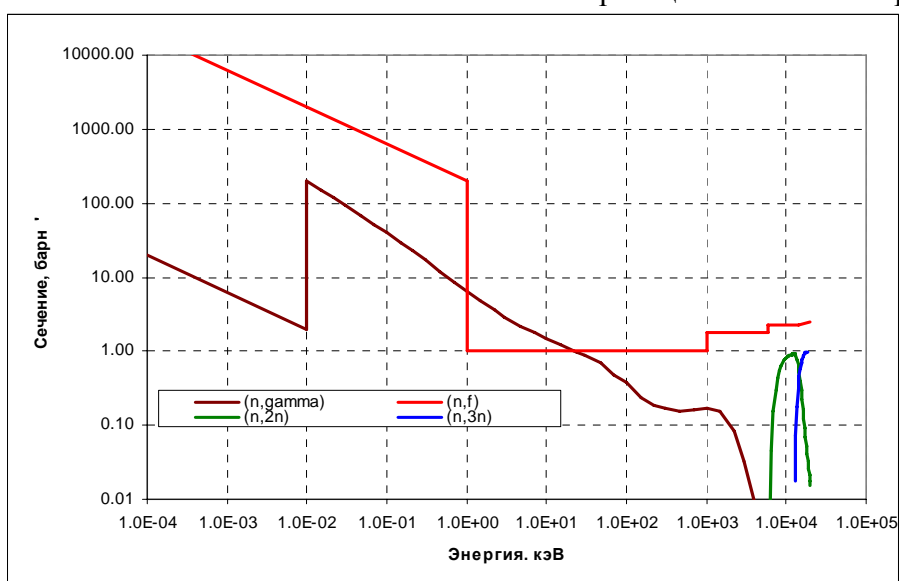


Рис.1. Нейтронные сечения фермия-253

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных данных из EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

100.3. Фермий-255

Альфа-активный радионуклид ($T_{1/2}=20.1$ дн.), порождающий цепочку альфа-распадов $^{252}\text{Fm} \rightarrow ^{251}\text{Cf} \rightarrow ^{247}\text{Cm} \rightarrow ^{243}\text{Pu}$, испытывающий бета-распад в ^{242}Cm . Источниками этого изотопа является бета-распад ^{255}Es ($T_{1/2}=39.8$ дн.).

Имеется единственный полный набор нейтронных данных Экспериментальных данных, оцененный Такаги (N. Takagi, 1982) для JENDL-3.2 и вошедший и в JENDL-3.3 и в ENDF/B-VIIb2

Оцененные сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы таковы:

$\sigma_c=26$ барн;

$\sigma_f=3360$ барн;

$RI_c=101$ барн;

$RI_f=1170$ барн.

$\nu_p=4.39$ – из систематики Хавертон.

$\nu_d=0.025$ – из систематики Ингланда.

Для сравнения приведем имеющиеся в EXFORe экспериментальные данные:

Ragaini-74: $\sigma_f=3400 \pm 170$ барн;

Flynn-75: $\sigma_f=3200 \pm 320$ барн; $\nu=4.0 \pm 0.5$.

Данных по сечению захвата не имеется.

Энергетические зависимости сечений основных реакций показаны на рис. 1.

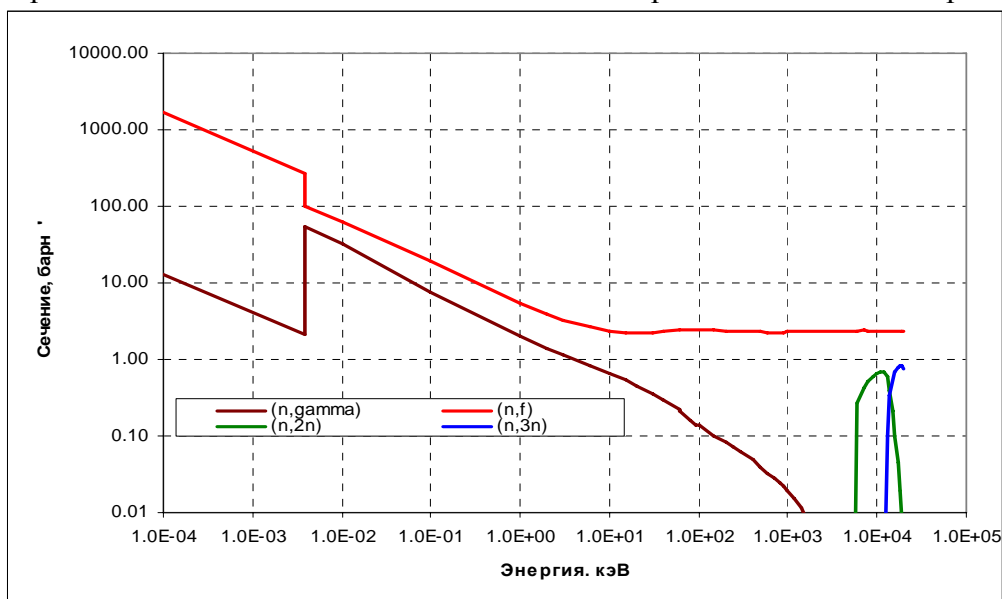


Рис.1. Нейтронные сечения фермия-255

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных данных из JENDL-3.3. Данные о запаздывающих нейтронах (MF=1, MT=455) в 8-групповом представлении принять в соответствии с JEFF-3.1. Ввести секцию MT=455 в файл MF=5 приняв спектры запаздывающих нейтронов такими, как для урана-235, а выходы групп – такими, как в JEFF-3.1.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

100.4. Фермий-257

Альфа-активный радионуклид ($T_{1/2}=100.5$ дн.). Источниками этого изотопа может быть только реакция $^{256}\text{Fm}(T_{1/2}=2.36 \text{ ч.}) (n,\gamma)$.

Полных наборов нейтронных данных не имеется. В библиотеке EAF-2003 содержится последняя теоретическая оценка сечений нейтронных реакций.

Экспериментальных данных для их проверки, естественно, нет.

Оцененные сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы таковы:

$\sigma_c=40$ барн;

$\sigma_f=3013$ барн;

$RI_c=298$ барн;

$RI_f=1694$ барн.

Энергетические зависимости сечений основных реакций показаны на рис. 1.

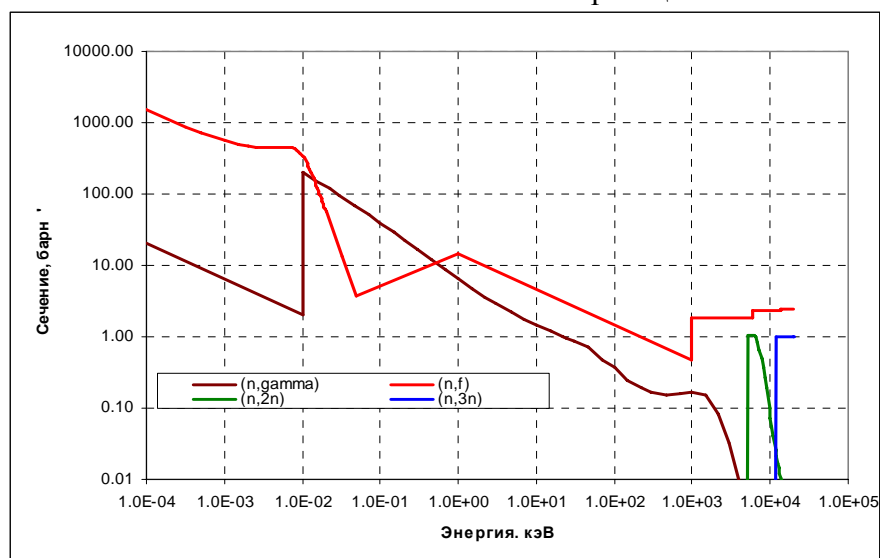


Рис.1. Нейтронные сечения фермия-257

Заключение

Принять в РОСФОНД файл оцененных данных из EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.