

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 р-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 р-резонансов и 46.0 мВ 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	Эксп. [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.

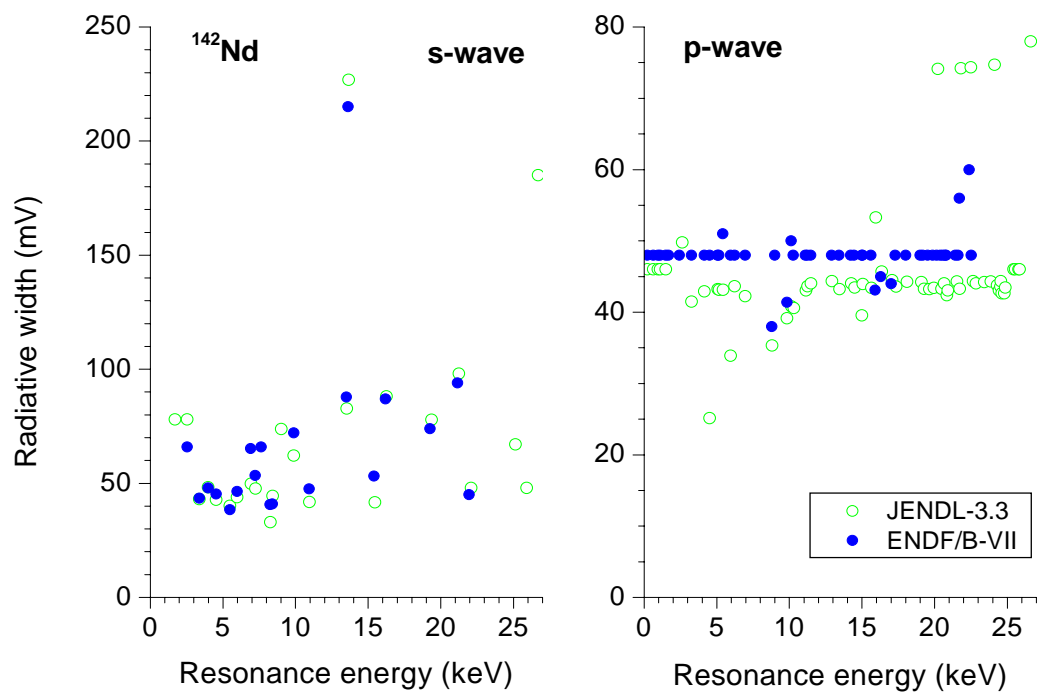


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках

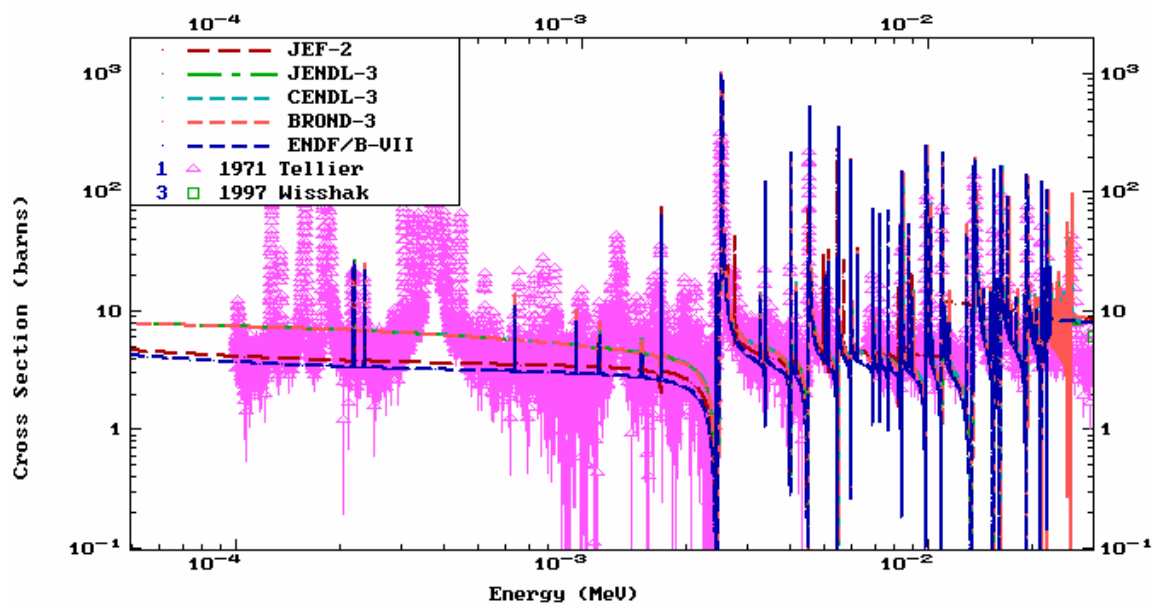


Рис. 2. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

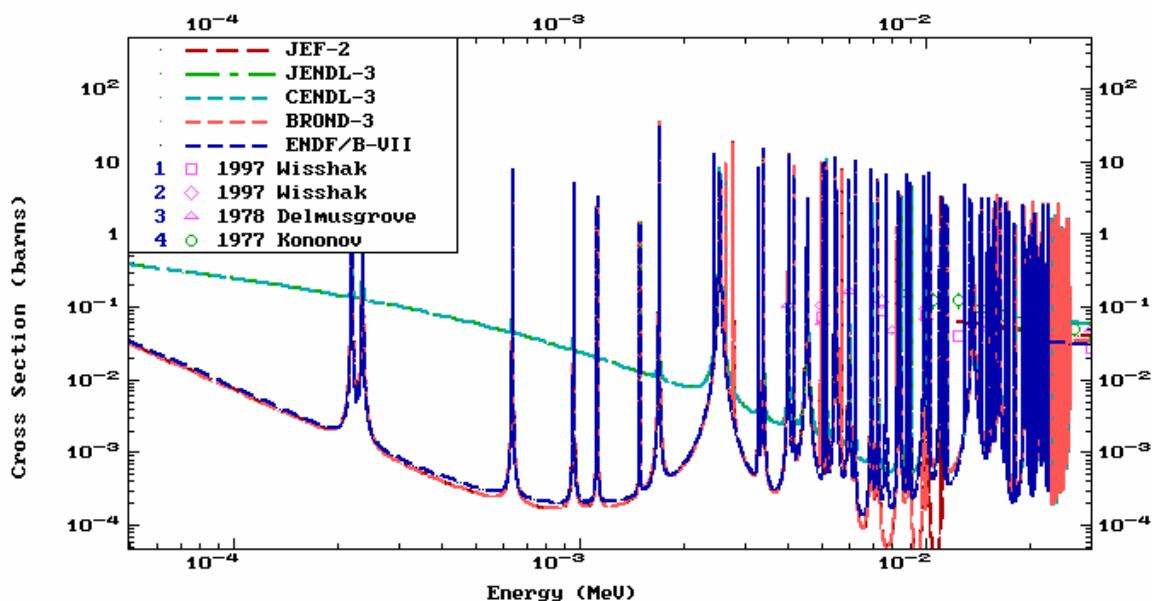


Рис. 3. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

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:

$S_0 = 1.500\text{E-}4$, $S_1 = 0.400\text{E-}4$, $S_2 = 1.700\text{E-}4$, $Gg(s) = 0.064$ 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 :

$S_0 = 1.70\text{E-}4$, $S_1 = 0.58\text{E-}4$, $S_2 = 1.45\text{E-}4$, $Gg(s) = 0.0485$ 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.

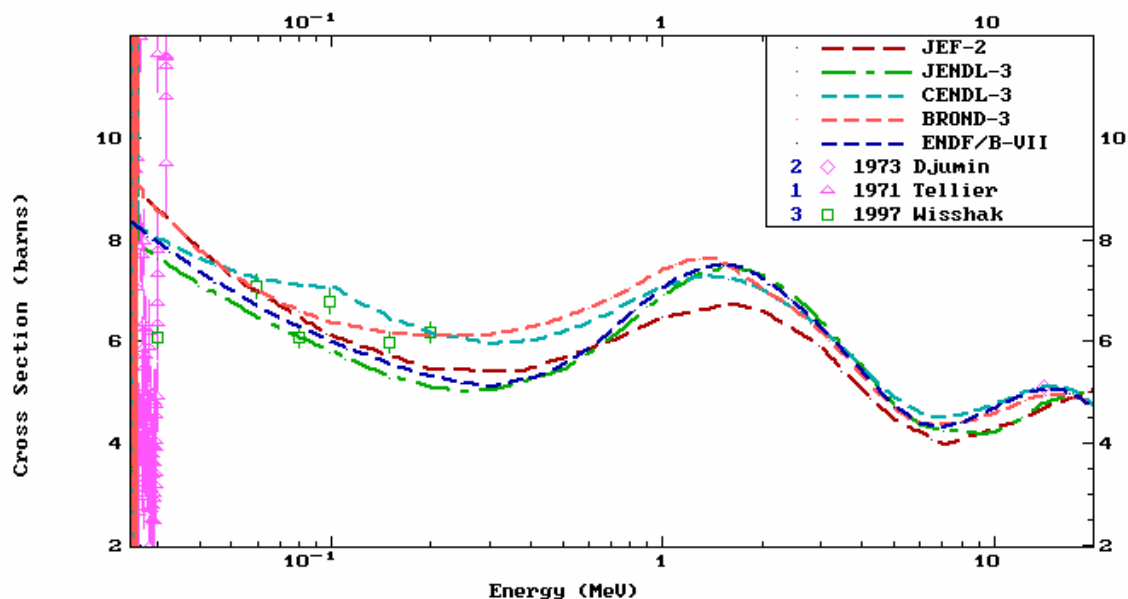


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения вне области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

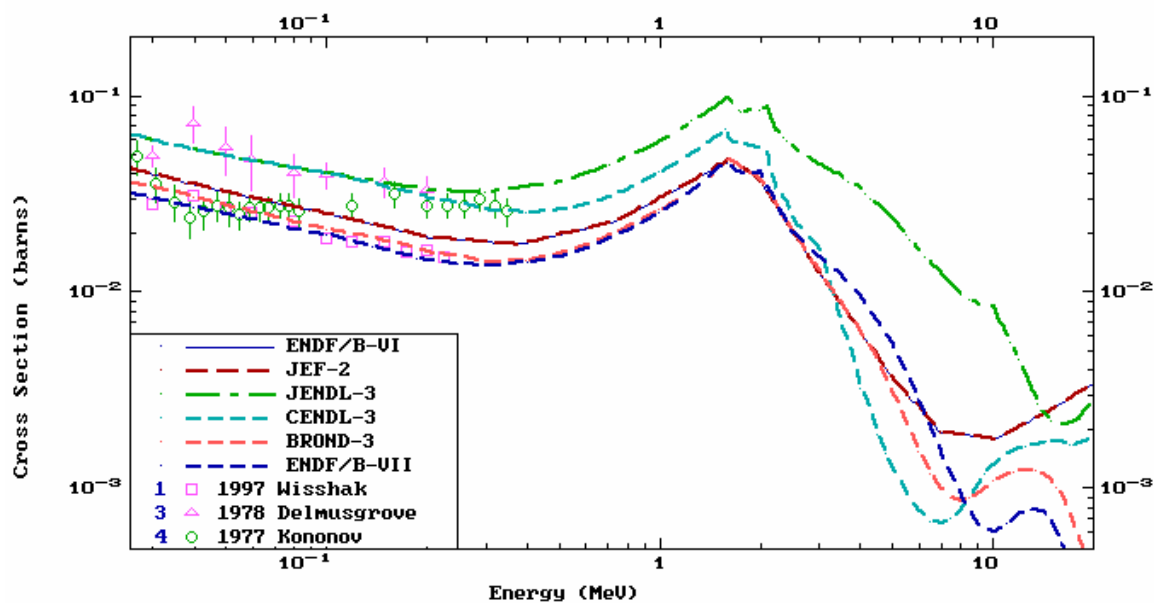


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов вне области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

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 (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 ^{142}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 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.

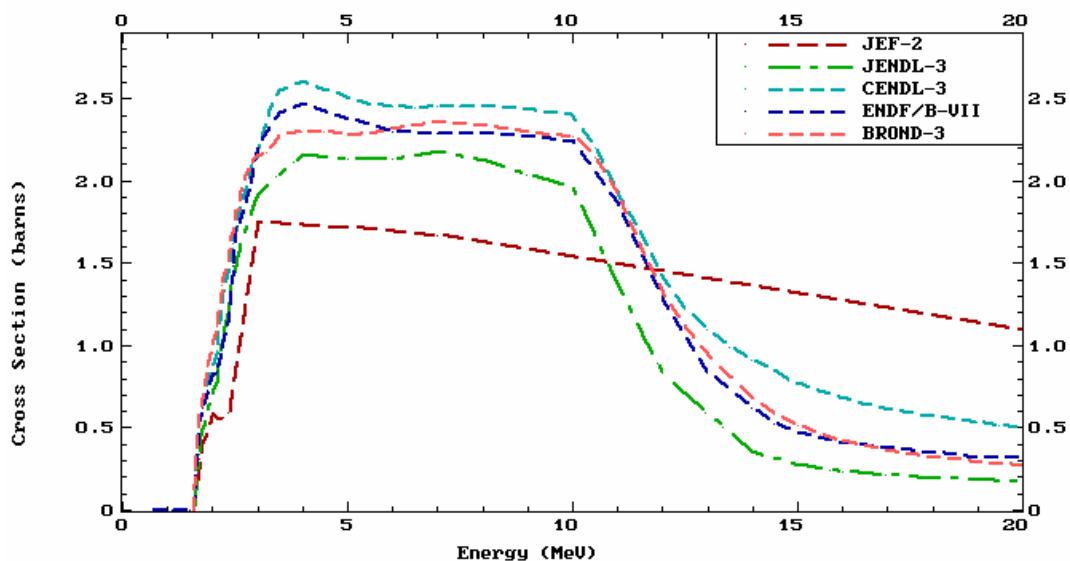


Рис. 6. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для ^{142}Nd

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).

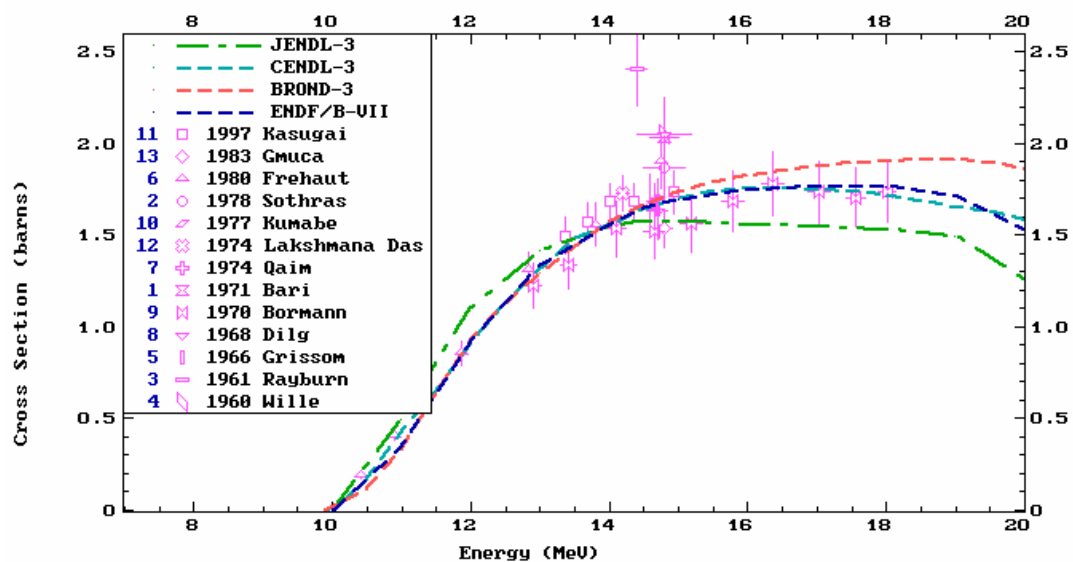


Рис.7. Оценки сечений реакции (n,2n) в сравнении с экспериментальными данными

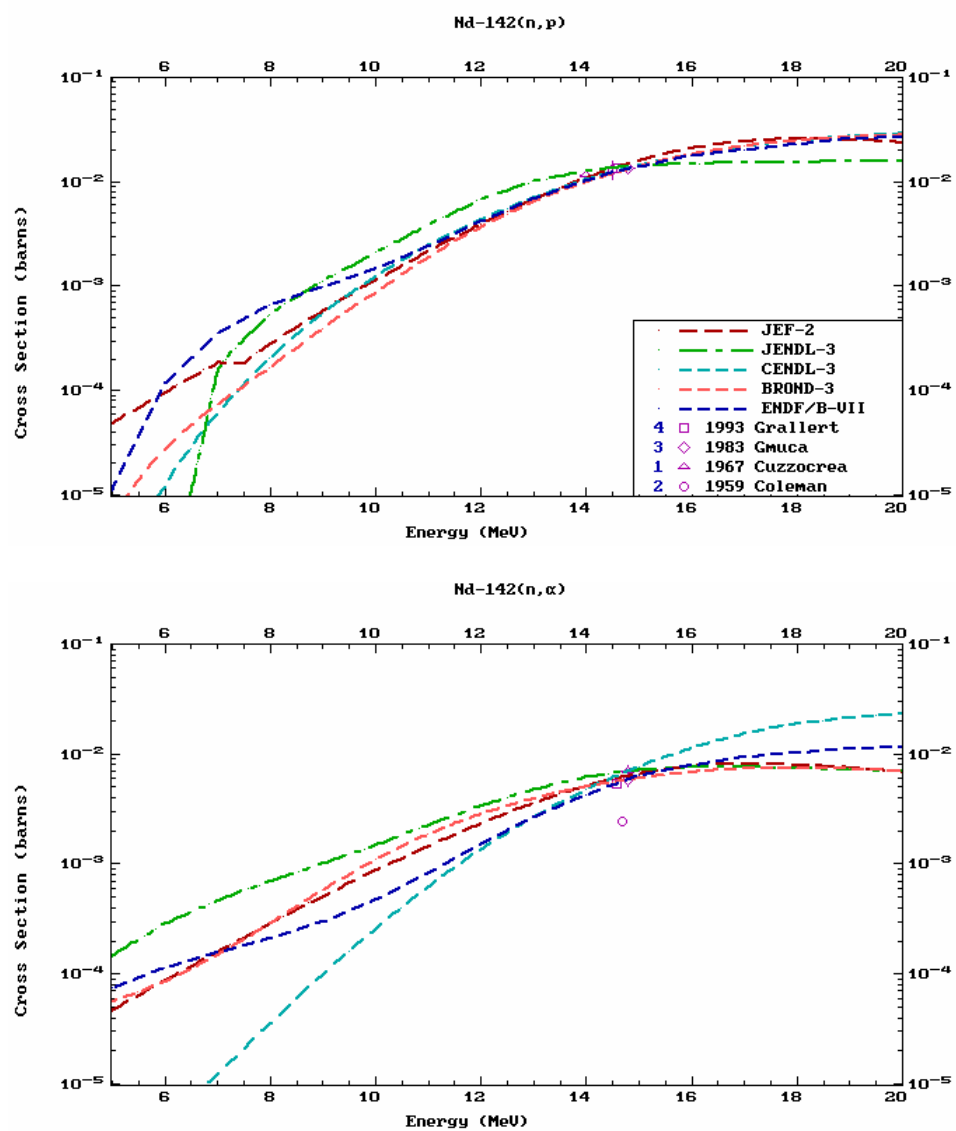


Рис. 8. Оценки сечений реакции $^{142}\text{Nd}(n,p)$ и $^{142}\text{Nd}(n,\alpha)$

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:

$S0 = 2.624E-4$, $S1 = 1.042E-4$, $S2 = 1.783E-4$, $Gg = 0.079$ эВ, $D0 = 36.9$ 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]:

$S0 = 3.62E-4$, $S1 = 0.80E-4$, $S2 = 1.50E-4$, $Gg = 0.0799$ эВ, $D0 = 32.8$ эВ, $R = 5.60$ ферми.

В БРОНД-3 были приняты эти же значения нейтронных силовых функций и радиационных ширин, но проведено независимое фитирование D0, 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: $S0 = 3.50E-4$, $D0 = 29.8$ эВ и $R = 5.54$ 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. 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.

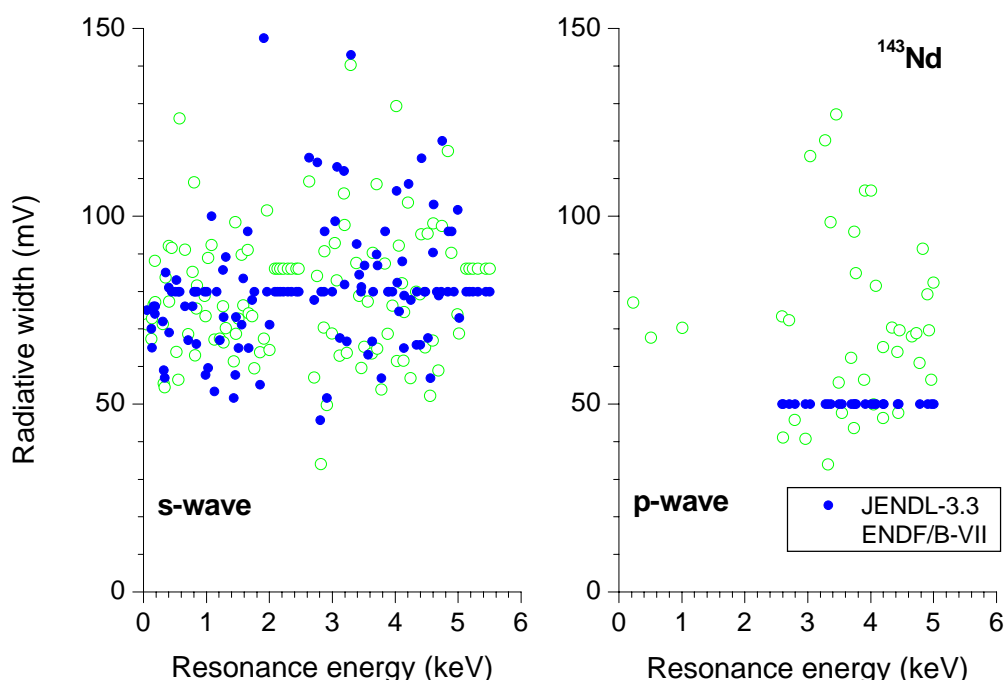


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках

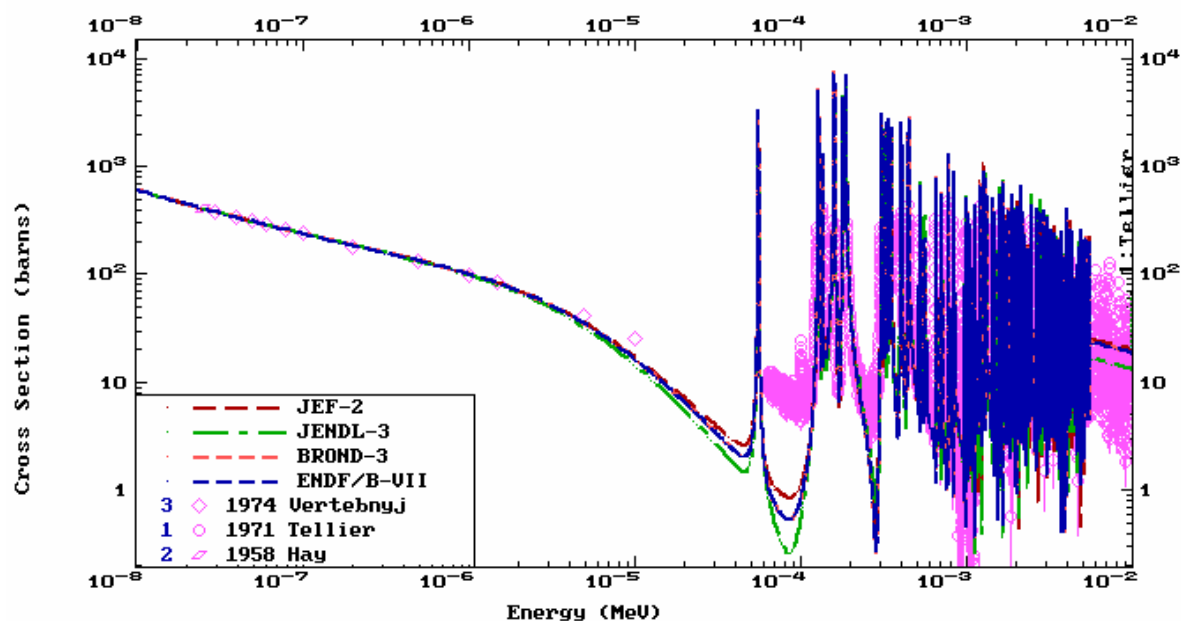


Рис. 2. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

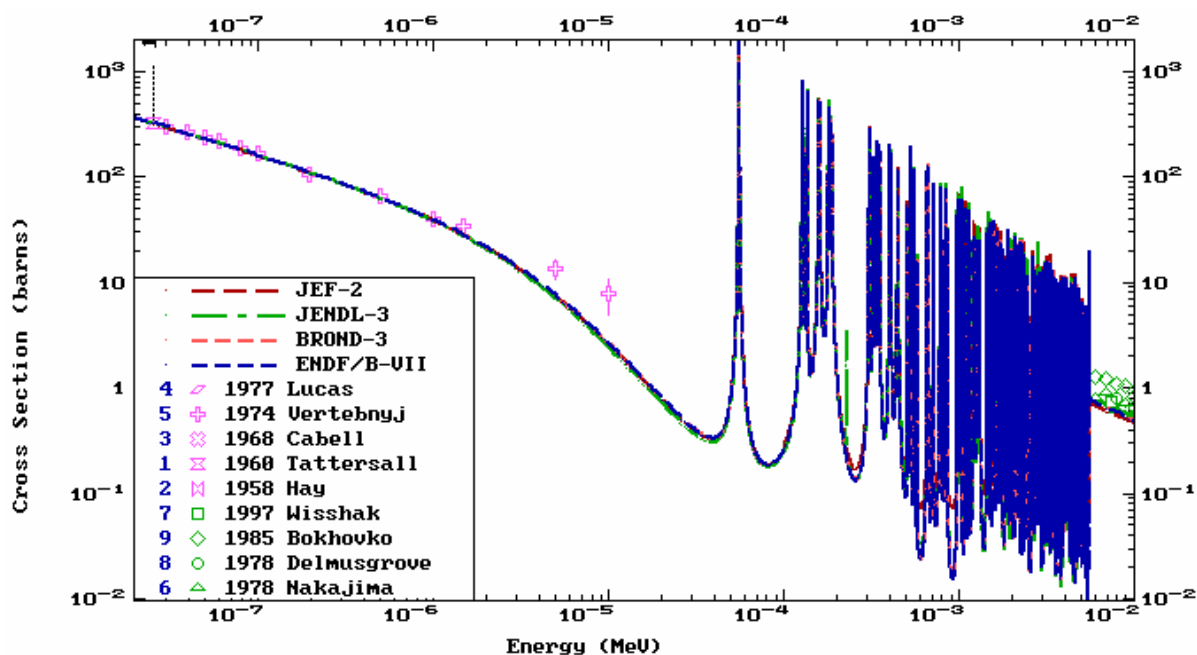


Рис. 3. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

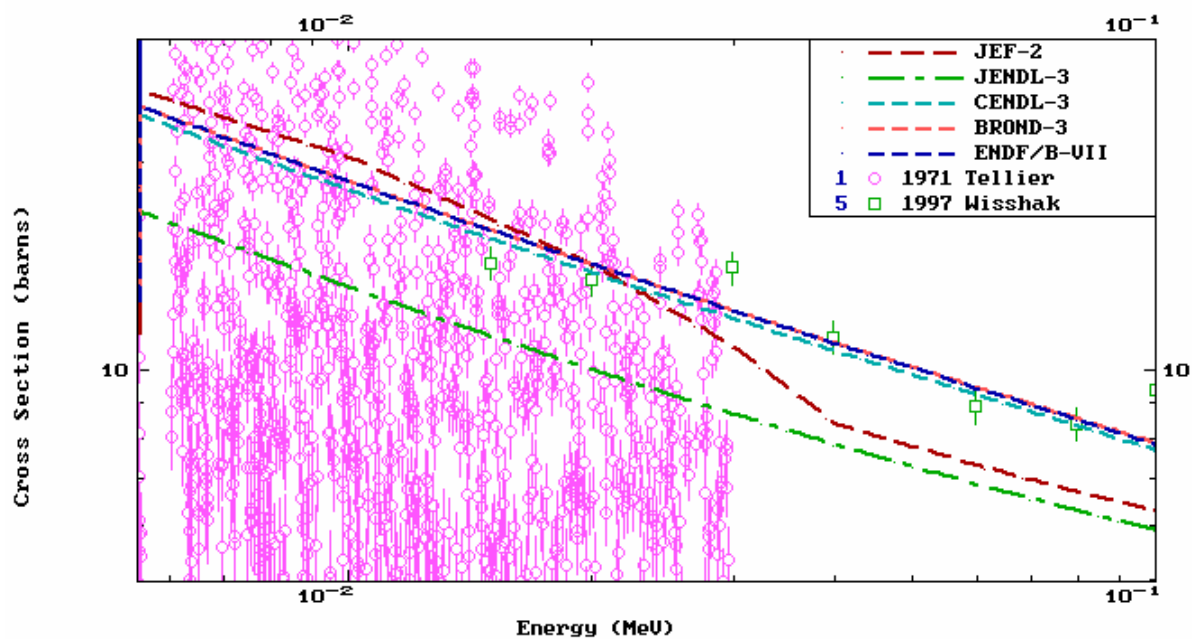


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

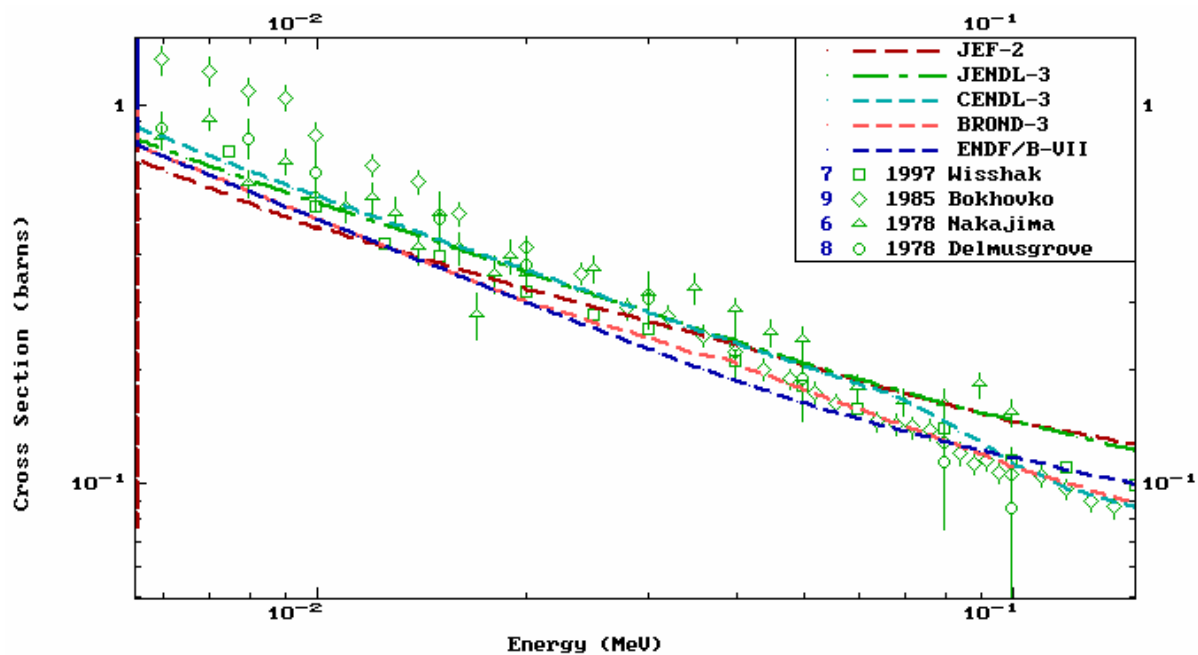


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

4. Нейтронные сечения вне резонансной области

3.1. Полные сечения (MT=1)

На рис. 6 показаны имеющихся оценки полных нейтронных сечений в области энергий выше 50 кэВ в сравнении с экспериментальными данными. Все оценки основанны 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.

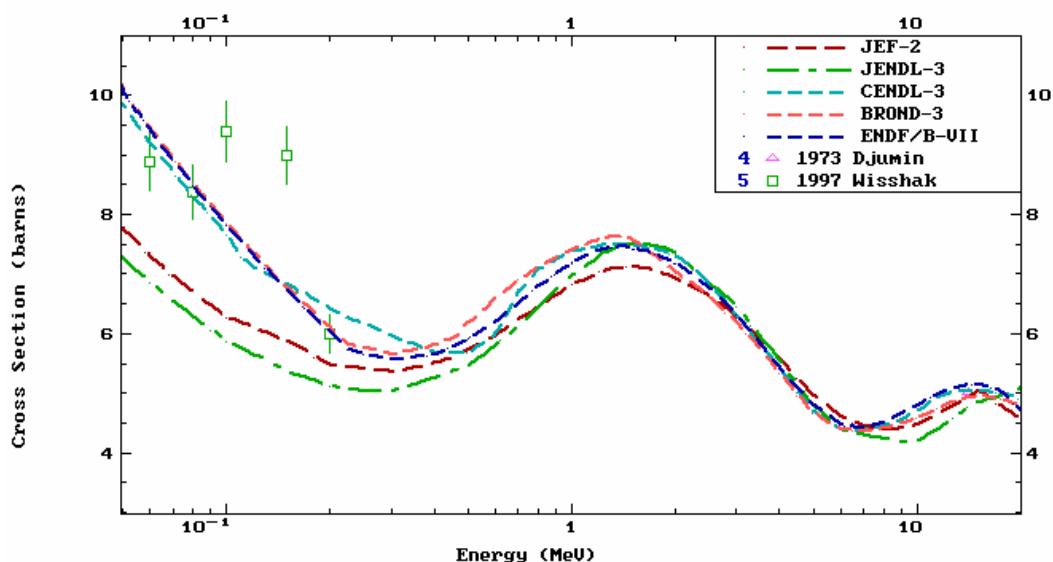


Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений ^{143}Nd в диапазоне энергий от 0.005 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

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 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 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.

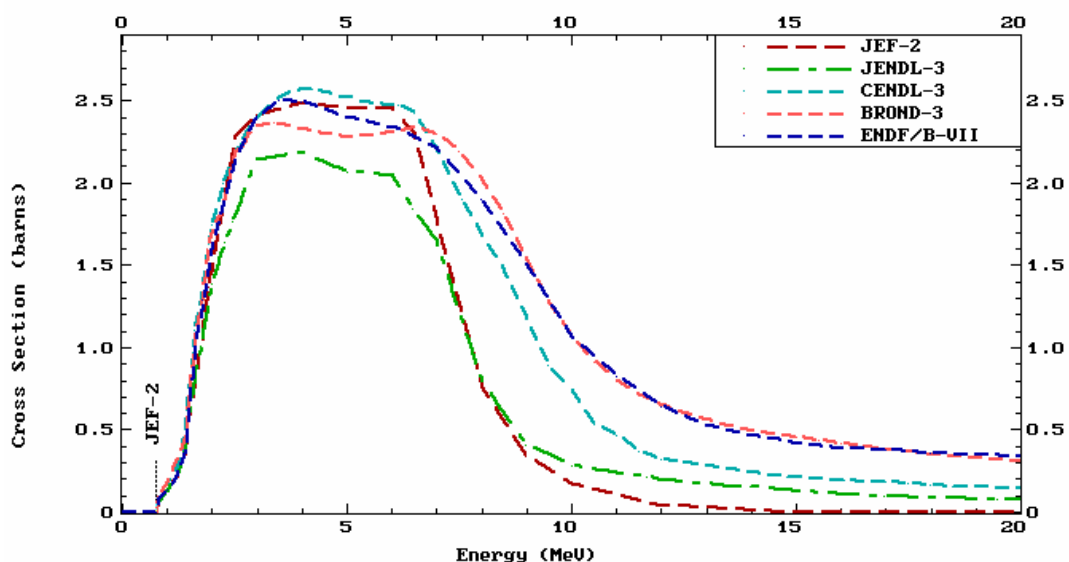


Рис. 7. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для ^{143}Nd

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.

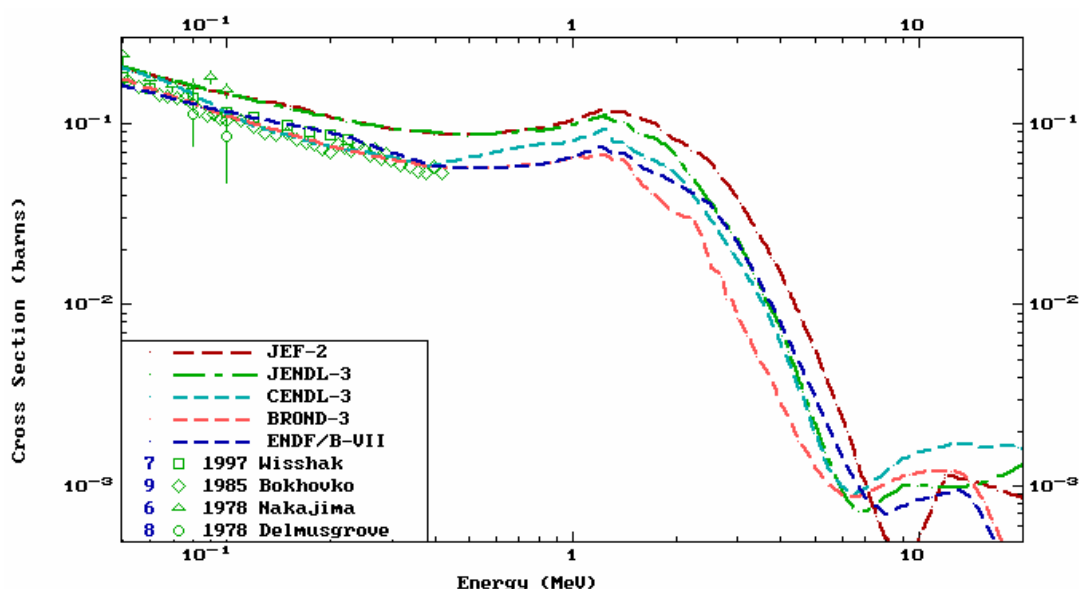


Рис. 8. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов для ^{143}Nd вне резонансной области в сравнении с экспериментальными данными

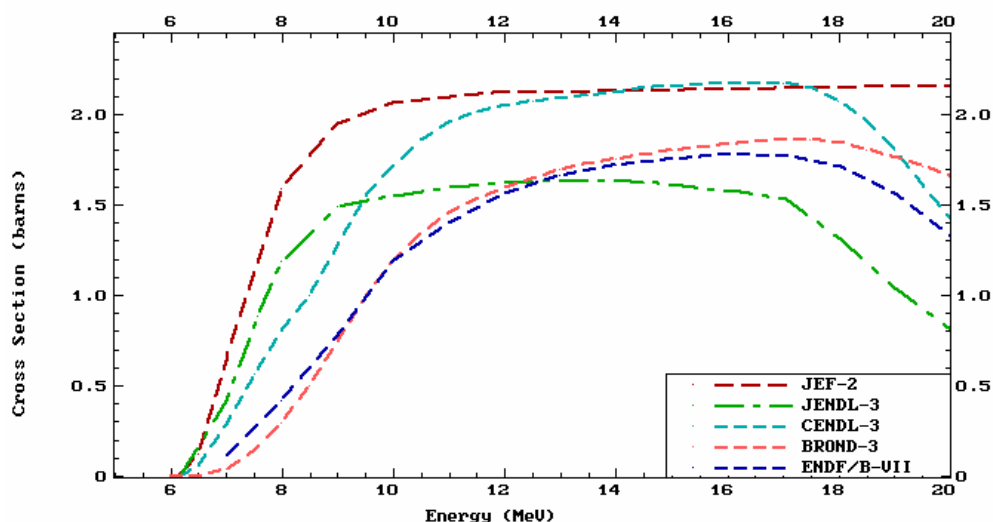


Рис.9. Оценки сечений реакции $(n,2n)$

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.

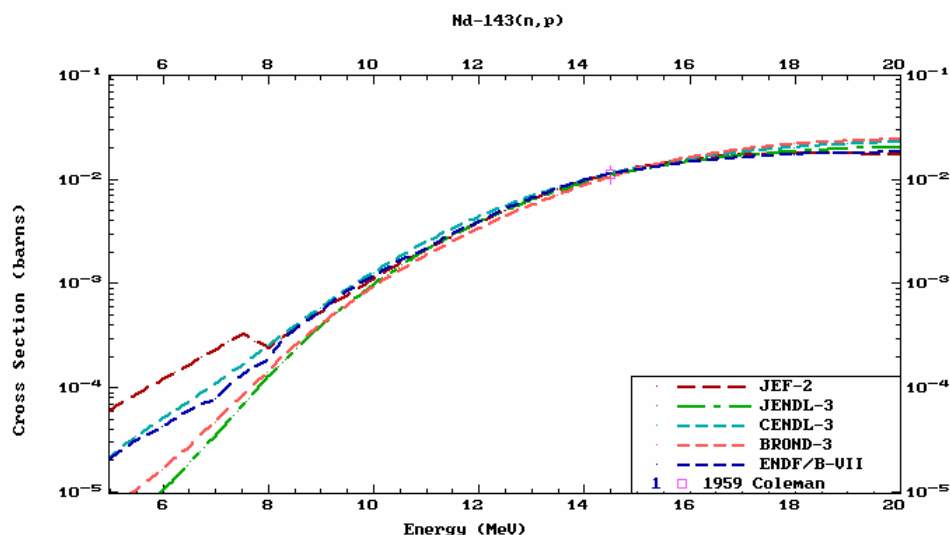
Экспериментальных данных о сечении реакций (n,3n) нет. Сечение этой реакции существенно только выше 17 МэВ, и оно примерно соответствует разности сечения реакции (n,2n) в максимуме и в любой из вышележащих энергетических точек. При энергии 20 МэВ сечение достигает значений 0.35 – 0.55 барна. Для согласованности, 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 K.Wisshak et al., Phys. Rev., C57 (1998) 391.

86Б Т.С.Беланова и др., Радиационный захват нейтронов – Справочник, Энергоатомиздат, Москва, 1986.



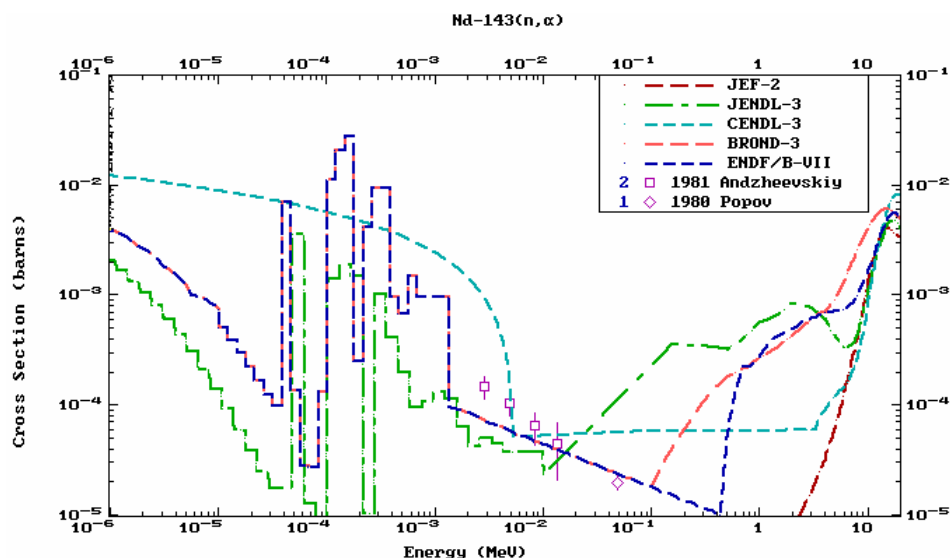


Рис.10. Оценки сечений реакции $^{143}\text{Nd}(n,p)$ и $^{143}\text{Nd}(n,\alpha)$

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.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.Игнатюка и др., 2003;
 ENDF/B-VII – полностью новая оценка S.Muhgabhah 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.

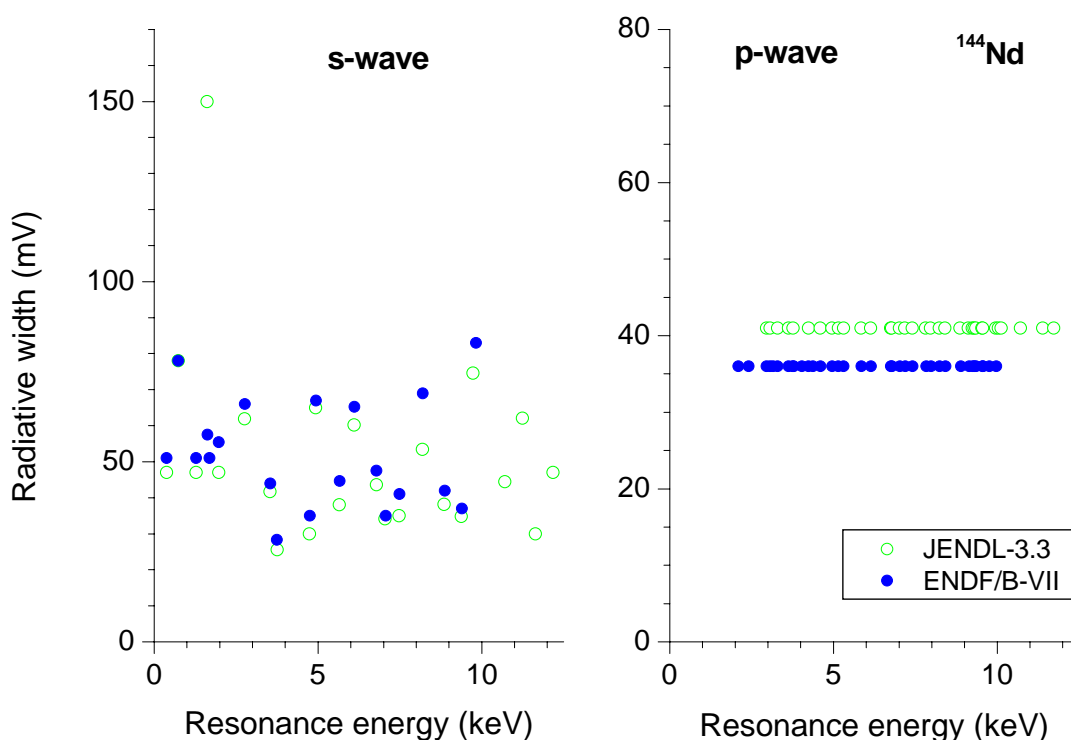


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках

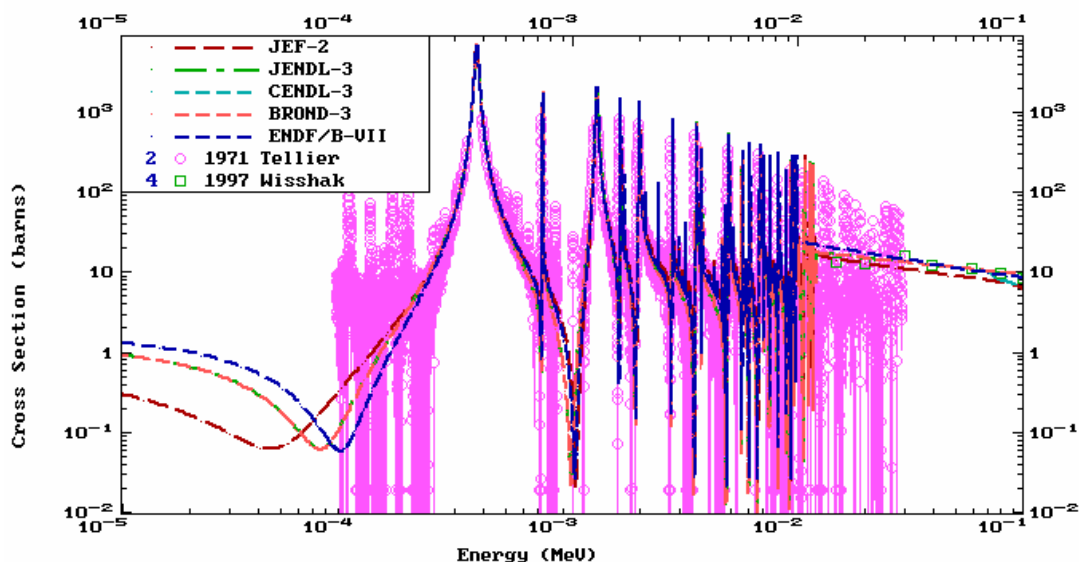


Рис. 2. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

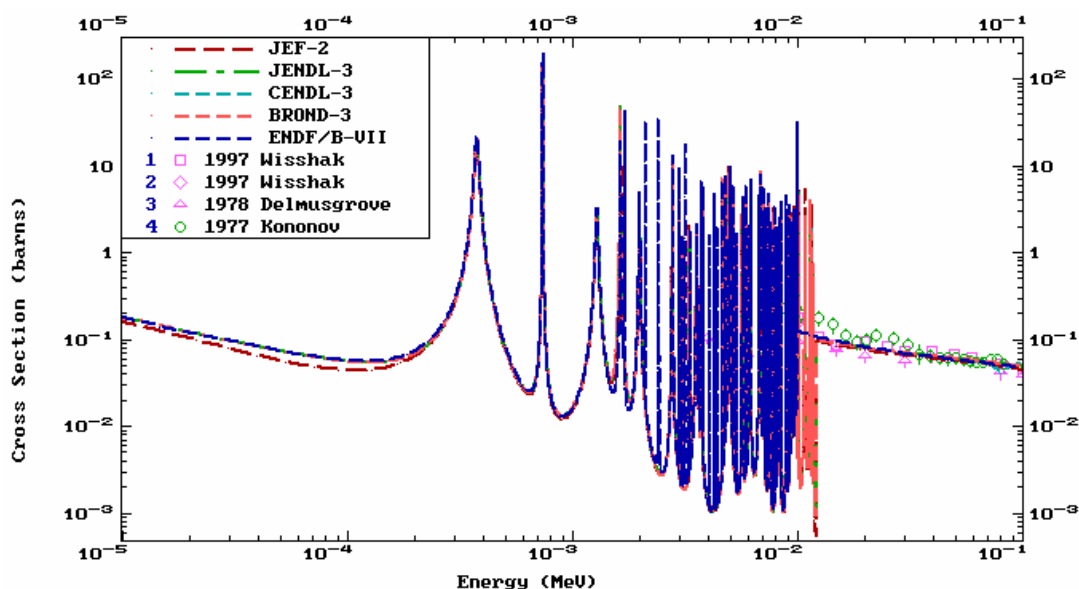


Рис. 3. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

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:

$S_0 = 2.928E-4$, $S_1 = 0.688E-4$, $S_2 = 3.543E-4$, $G_G = 0.041$ 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]. Использованы следующие значения параметров при энергии нейтронов 70 кэВ :

$S_0 = 5.36E-4$, $S_1 = 0.92E-4$, $S_2 = 3.00E-4$, $G_g(s) = 0.057$ эВ, $G_g(p) = 0.036$ эВ и $G_g(d) = 0.048$ 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.Н.Кононов и др., ВАЯТ, сер. Ядерные константы, т. 22 (1977) с. 29.

77M A.R.Musgrave 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.

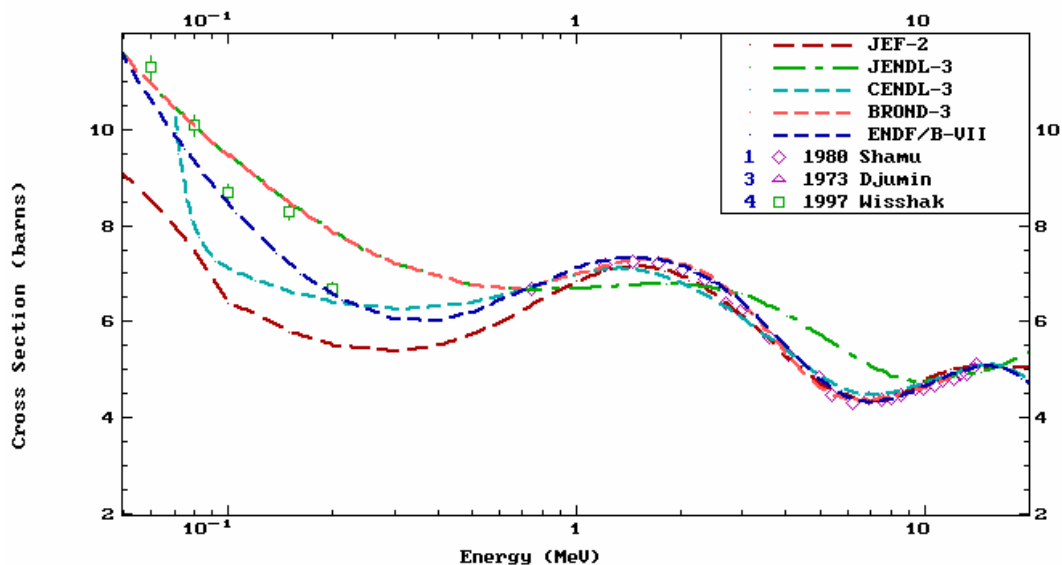


Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений вне резонансной области резонансов в сравнении с экспериментальными данными

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

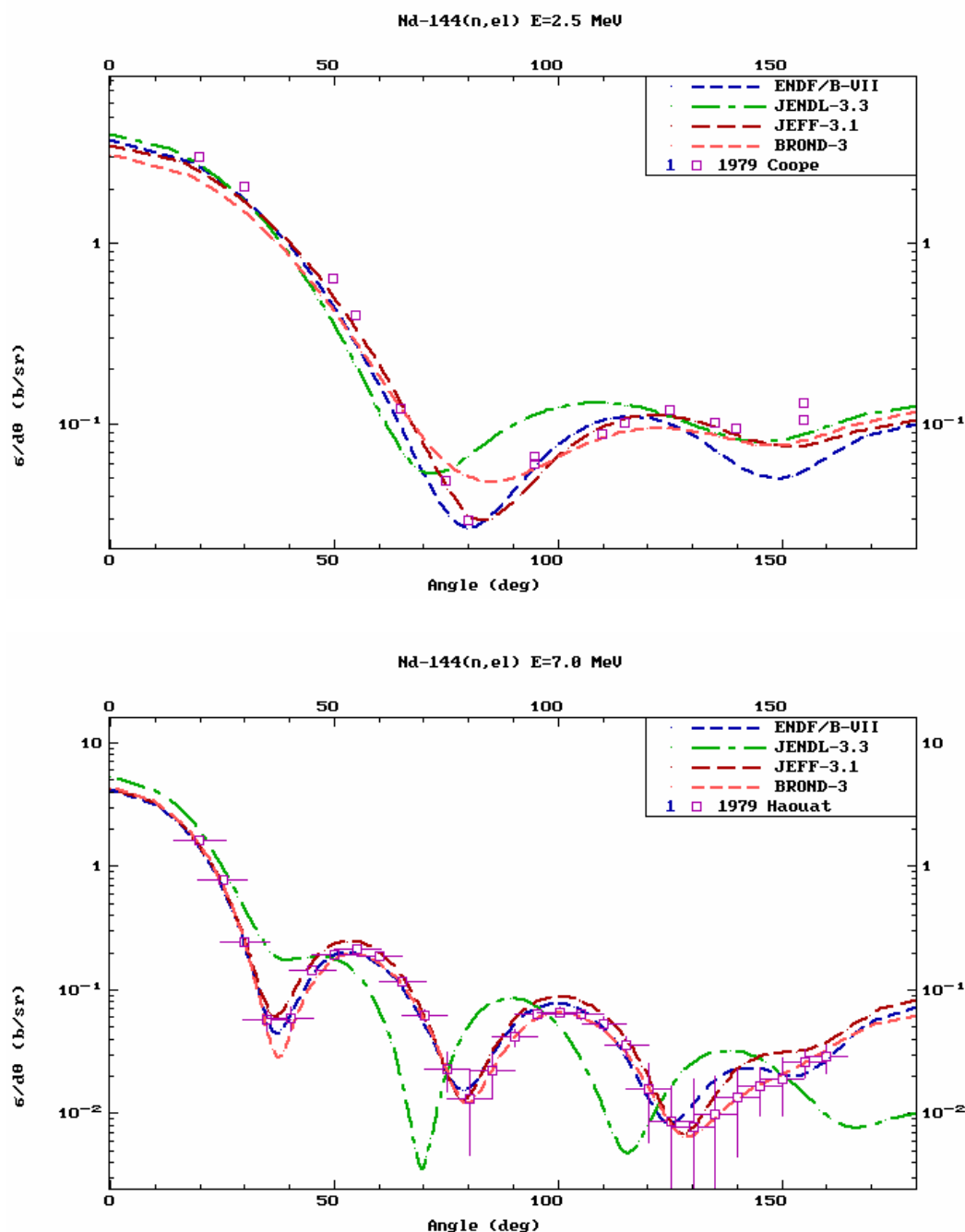


Рис. 7. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов при энергиях 2.5 и 7.0 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

предравновесных процессов, насомненно, 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.

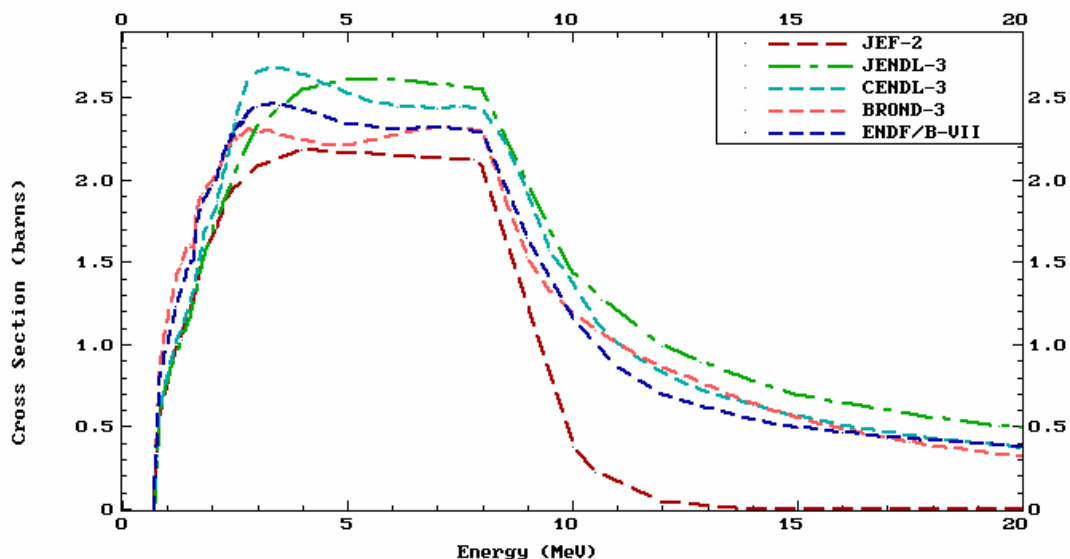


Рис. 8. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для ^{142}Nd

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).

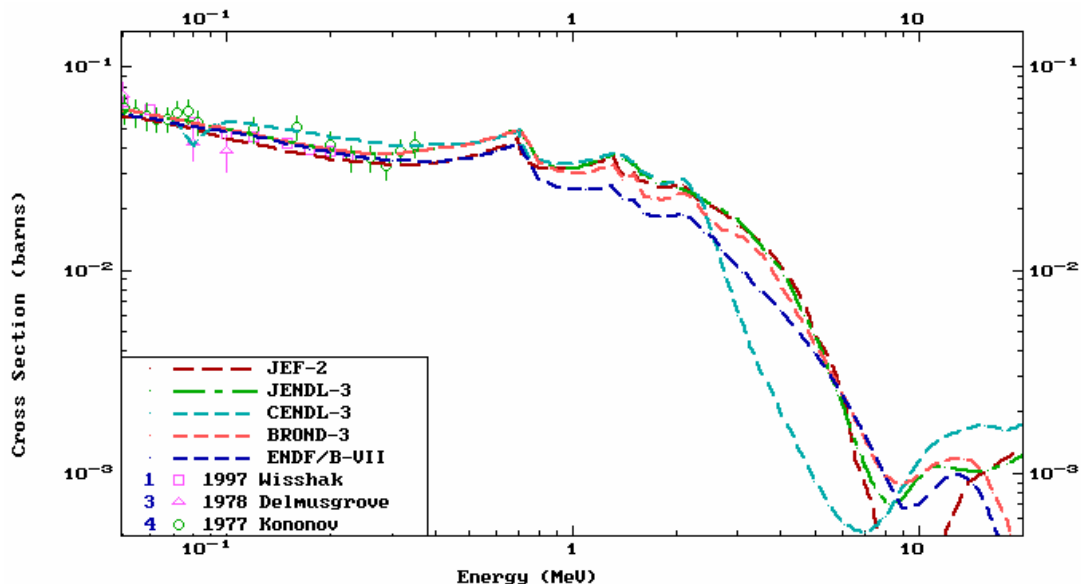


Рис. 9. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов вне резонансной области резонансов в сравнении с экспериментальными данными

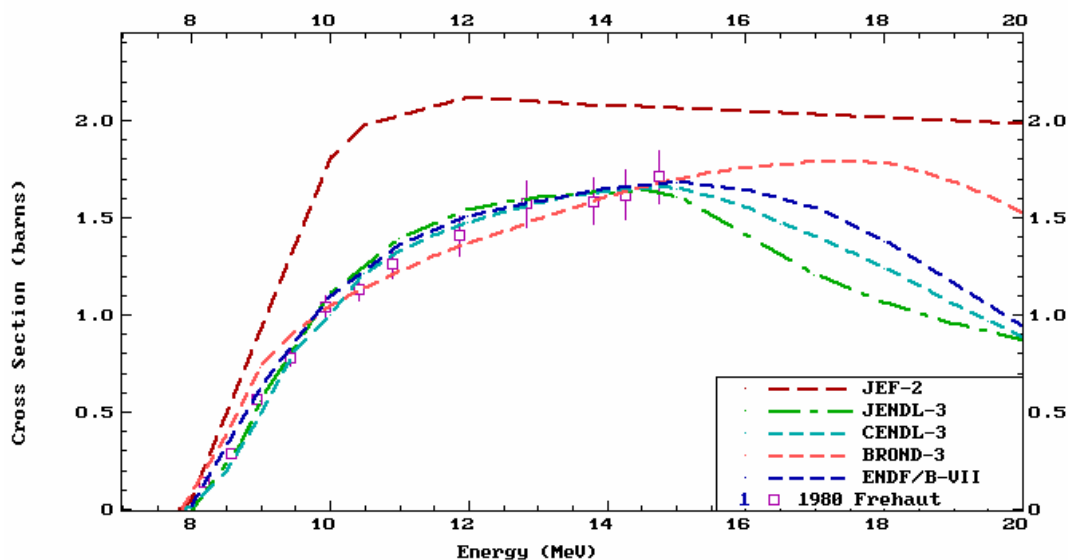


Рис.10. Оценки сечений реакции (n,2n) в сравнении с экспериментальными данными

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

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.

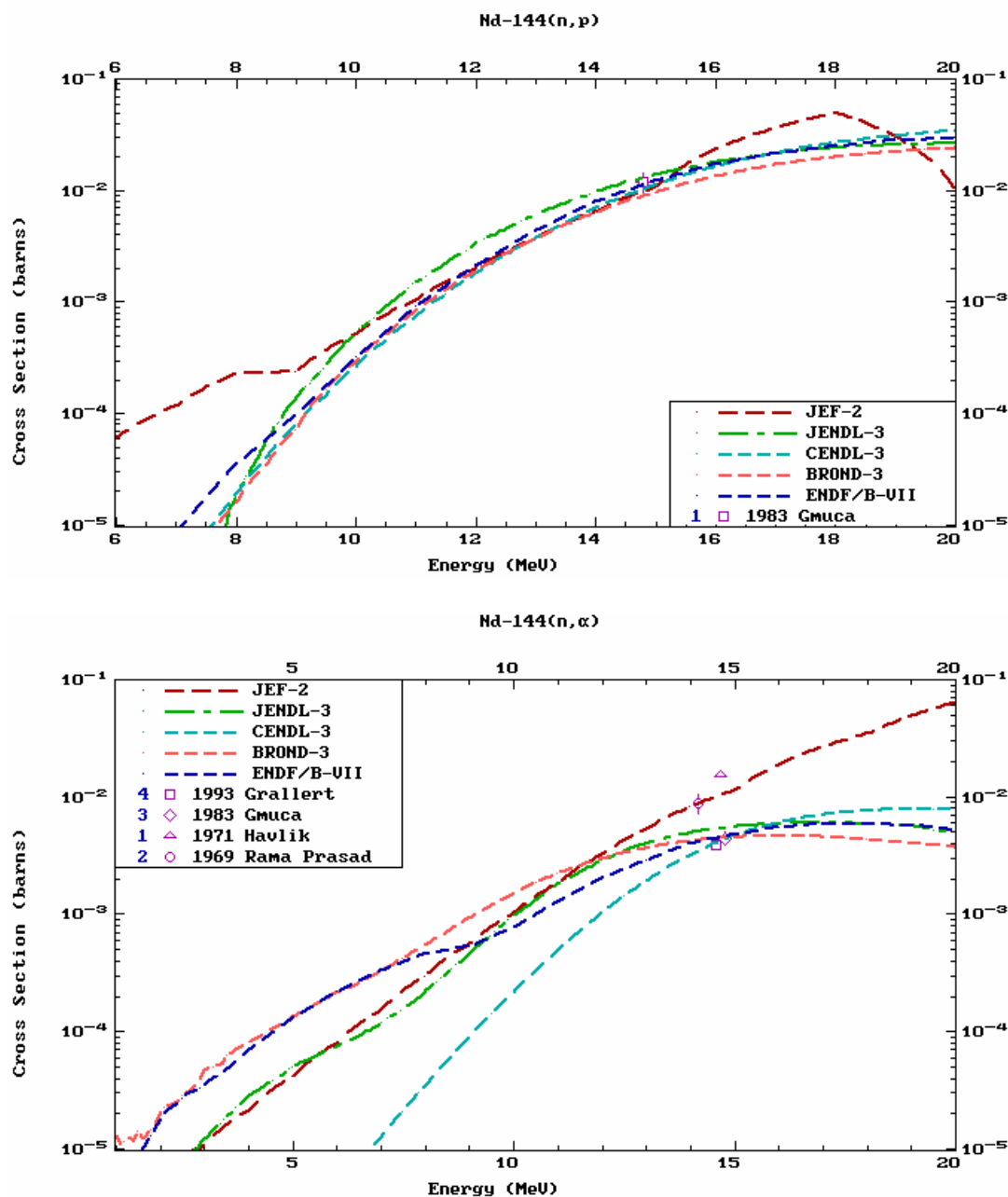


Рис. 8. Оценки сечений реакции $^{144}\text{Nd}(n,p)$ и $^{144}\text{Nd}(n,\alpha)$

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.

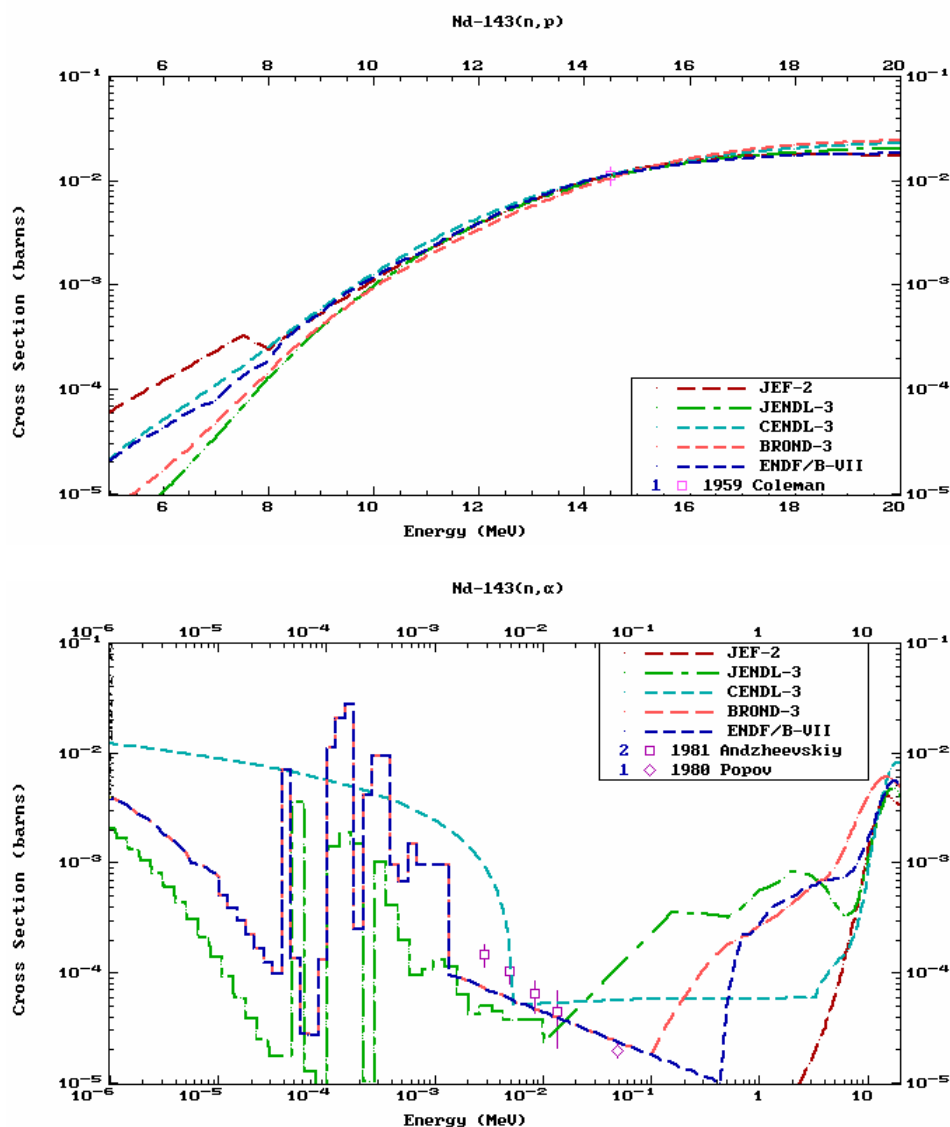


Рис.10. Оцененки сечений реакции $^{143}\text{Nd}(n,p)$ и $^{143}\text{Nd}(n,\alpha)$

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.Muhabgahab 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.

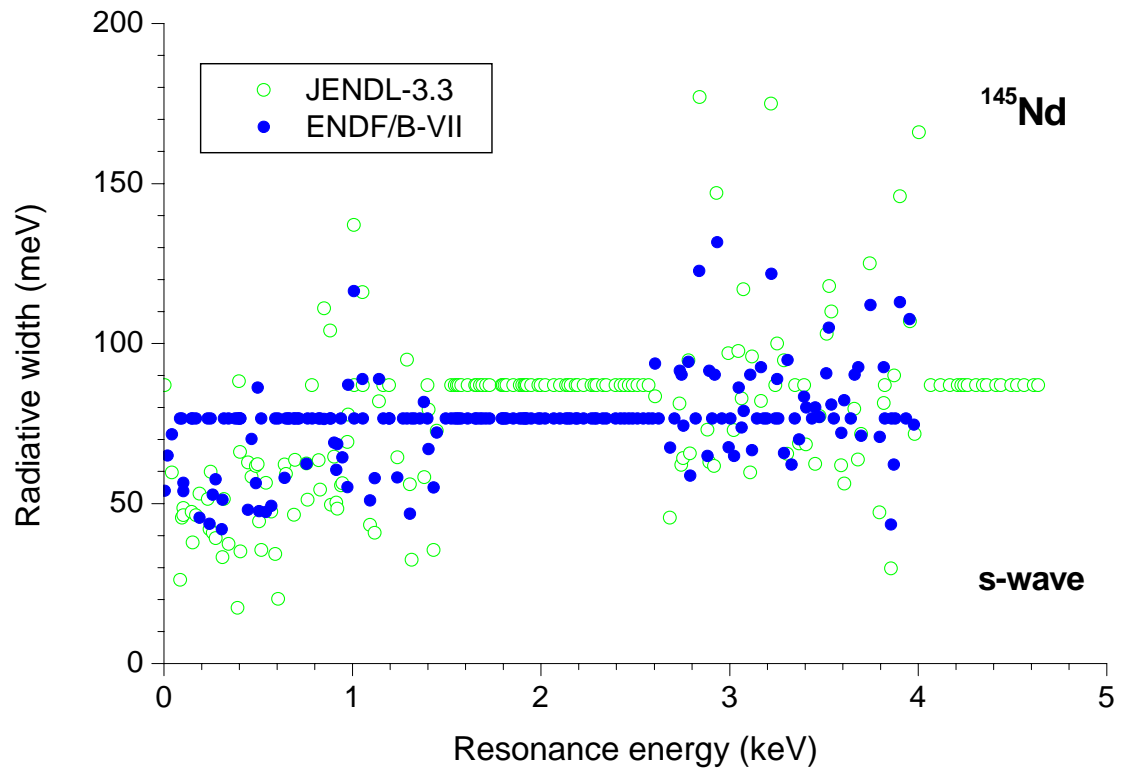


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках

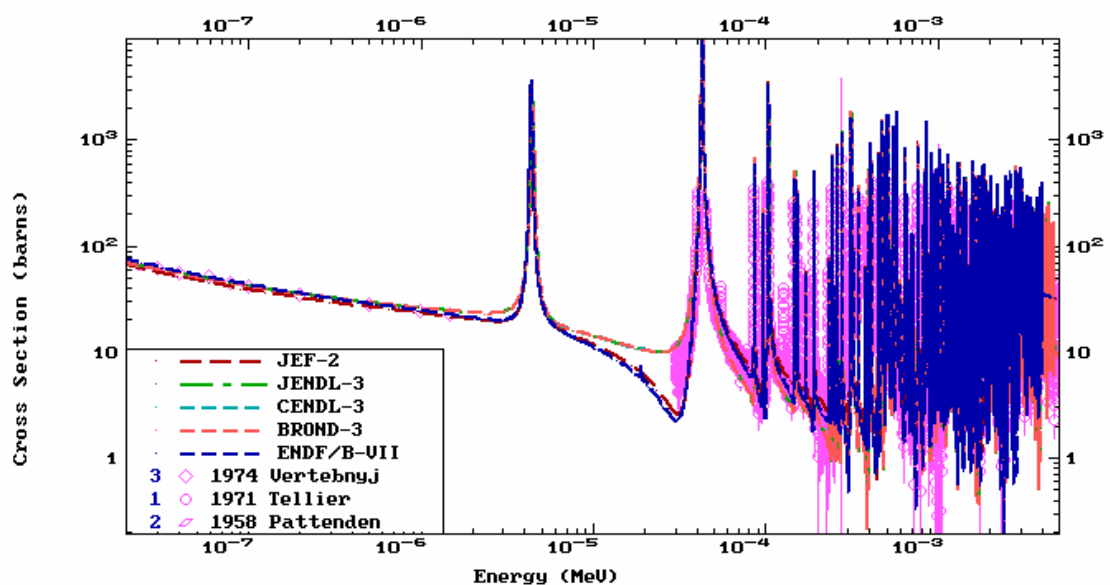


Рис. 2. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

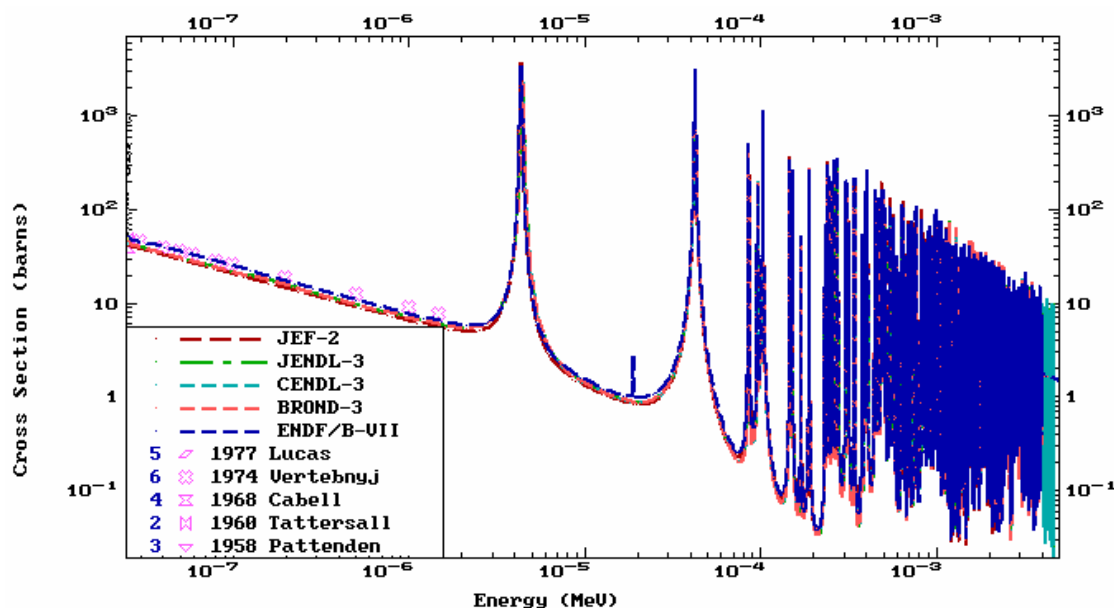


Рис. 3. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

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:

$S_0 = 2.927\text{E-}4$, $S_1 = 0.685\text{E-}4$, $S_2 = 3.510\text{E-}4$, $G_g = 0.0975$ 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:

$S_0 = 4.40\text{E-}4$, $S_1 = 0.70\text{E-}4$, $S_2 = 2.20\text{E-}4$, $G_g = 0.0843$ 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 :

$S_0 = 4.75\text{E-}4$, $S_1 = 1.20\text{E-}4$, $S_2 = 0.80\text{E-}4$, $G_g(s \text{ и } d) = 0.0765$ 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 [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 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.

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.

77K B.Н.Кононов и др., ВАИТ, сер. Ядерные константы, т. 22 (1977) с. 29.

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)

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.

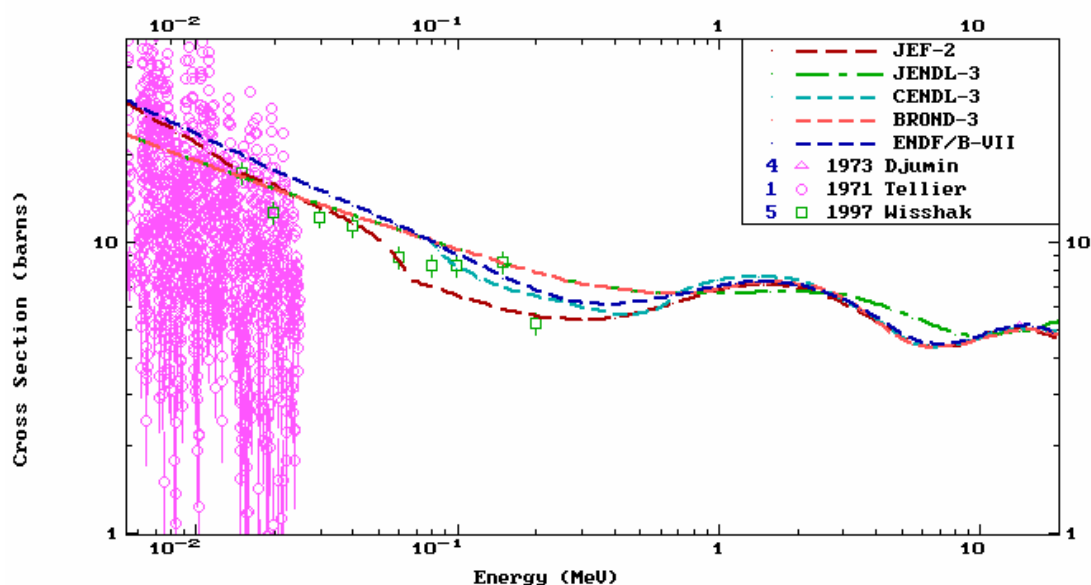


Рис. 4. Оценки полных нейтронных сечений вне резонансной области резонансов в сравнении с экспериментальными данными

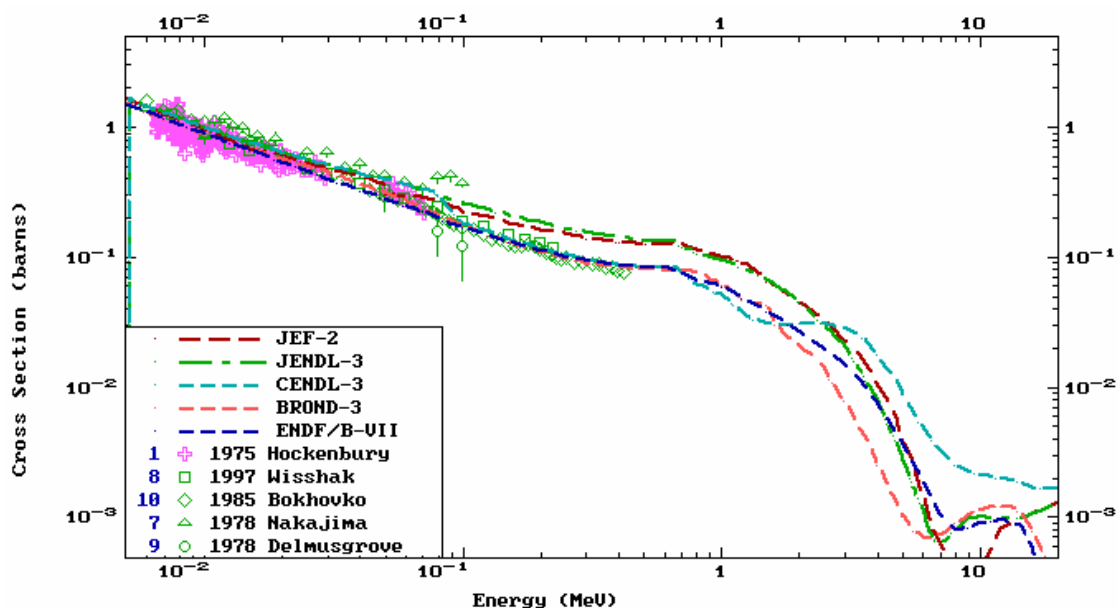


Рис. 5. Оценки полных нейтронных сечений вне резонансной области резонансов в сравнении с экспериментальными данными

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-

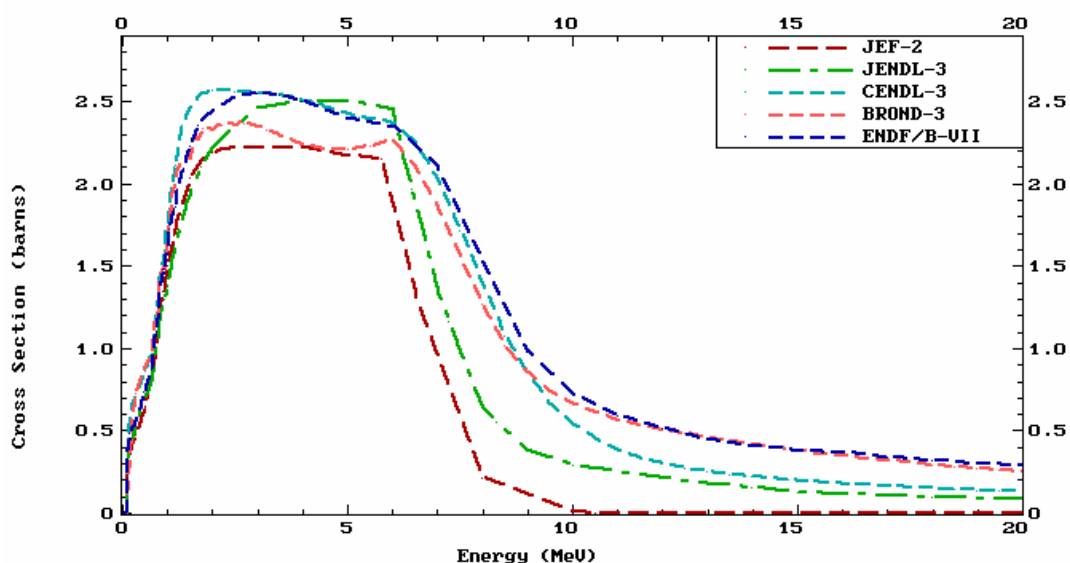


Рис. 6. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для ^{145}Nd

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.

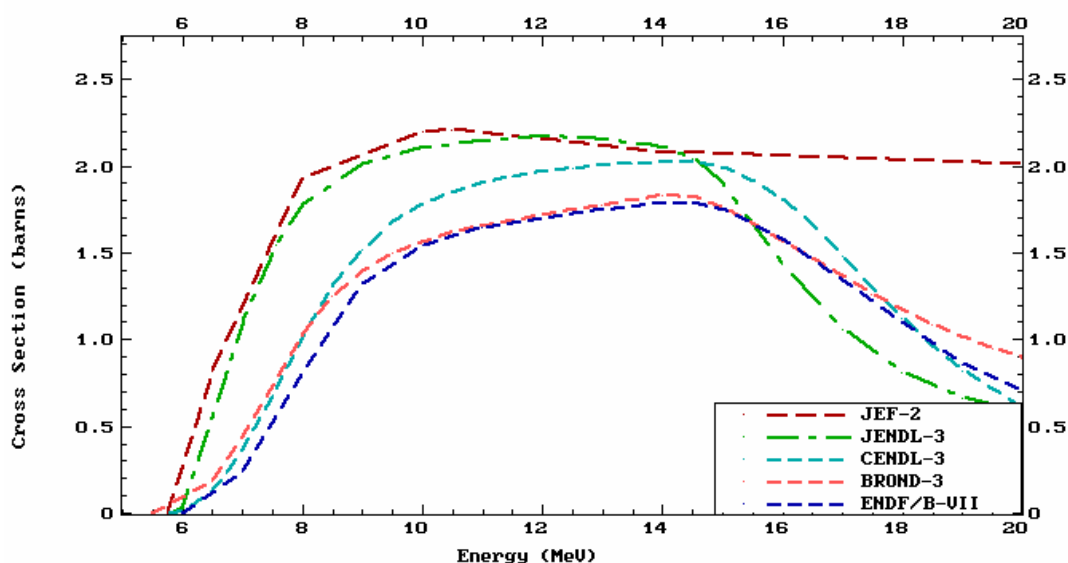


Рис. 7. Оценки сечений реакции $(n,2n)$ в сравнении с экспериментальными данными

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 неупругого 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 неодама, имеющих соответствующие экспериментальные данные.

Экспериментальных данных о сечении реакций $(n,3n)$ 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 K. Wisshak et al., Phys. Rev., C57 (1998) 391.

86Б Т.С.Беланова и др., Радиационный захват нейтронов – Справочник, Энергоатомиздат, Москва, 1986.

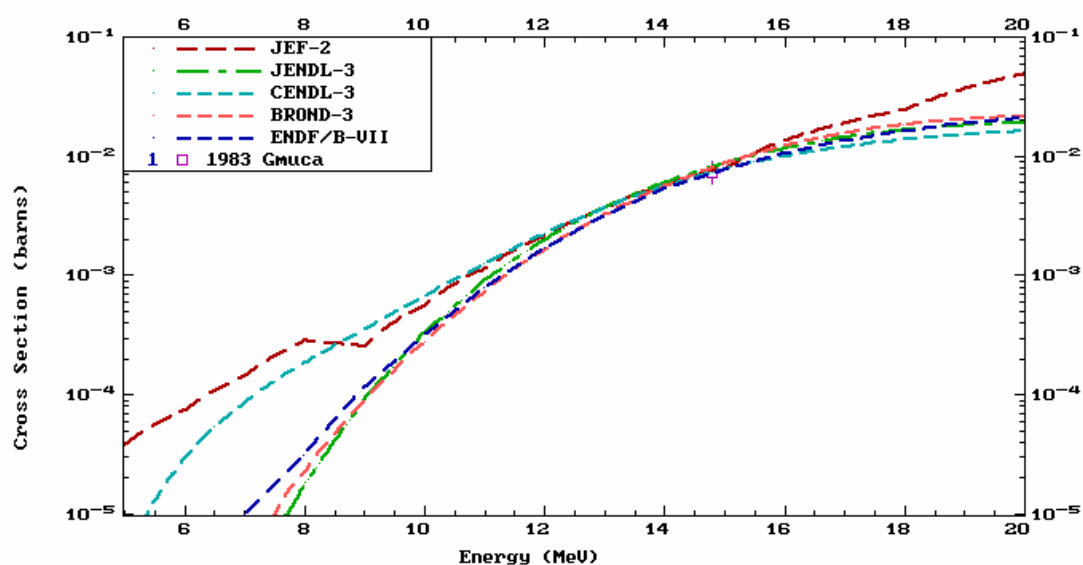


Рис. 8. Оценки сечений реакции $^{145}\text{Nd}(n,p)$

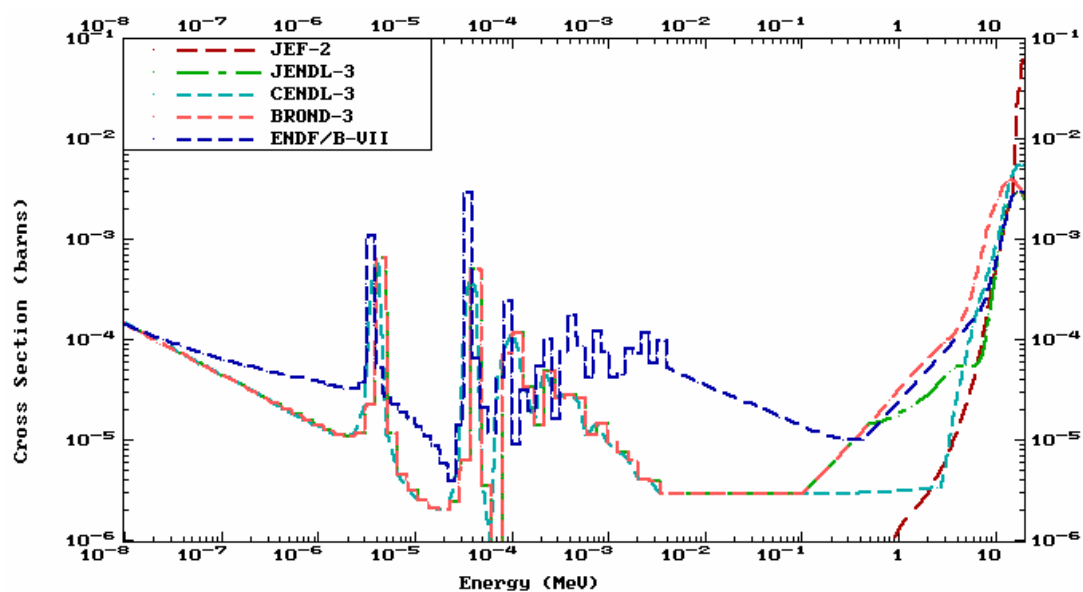


Рис. 9. Оценки сечений реакции $^{145}\text{Nd}(n,\alpha)$

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 $(17.2 \pm 0.3)\%$.

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.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	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 $(5.7 \pm 0.1)\%$.

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, E.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 6кэВ 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