

## 62.САМАРИЙ

Известно 11 стабильных и долгоживущих изотопов самария, из которых 7 сохранились в природе. Два радиоактивных изотопа ( $^{151}\text{Sm}$  и  $^{153}\text{Sm}$ ) образуются в результате деления тяжелых ядер. В качестве продуктов деления образуются также стабильные изотопы  $^{147}\text{Sm}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{152}\text{Sm}$  и  $^{154}\text{Sm}$ . Легкие радиоактивные изотопы ( $^{145}\text{Sm}$  и  $^{146}\text{Sm}$ ) 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 ( $^{149}\text{Sm}$  и  $^{151}\text{Sm}$ ).

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  $^{145}\text{Sm}$  и  $^{146}\text{Sm}$ ) - оценки 90-х годов, близкие к содержащимся в ФОНД-2.2).

JEFF-3.1 - 9 изотопов (кроме  $^{145}\text{Sm}$  и  $^{146}\text{Sm}$ )- оценки, как правило, 80-х годов.

ENDF/B-VII b1.2 - 9 изотопов (кроме  $^{145}\text{Sm}$  и  $^{146}\text{Sm}$ )- 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.Мann, 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 Мухабхаба<sup>1</sup> (1.64 барна). Резонансные интегралы близки друг к другу (1.91 барна и 1.86 барна), но ниже рекомендуемого Мухабхабом<sup>1</sup> 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  $^{145}\text{Pm}$ , который с периодом  $T_{1/2}=17.7$ г. распадается в стабильный  $^{145}\text{Nd}$ .

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  $^{142}\text{Nd}$ .

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.

---

<sup>1</sup> 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  $^{143}\text{Nd}$ .

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  $^{144}\text{Nd}$ .

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	$n, n'$	-0.00482	.0048522	Sm-149
16	$(n, 2n)$	-5.596	5.6334	Sm-148
17	$(n, 3n)$	-13.581	13.6718	Sm-147
22	$(n, n\alpha)$	1.145	-	Nd-145
28	$(n, np)$	-8.268	8.3233	Pm-148
102	$n, \gamma$	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	$(n, \alpha)$	-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.

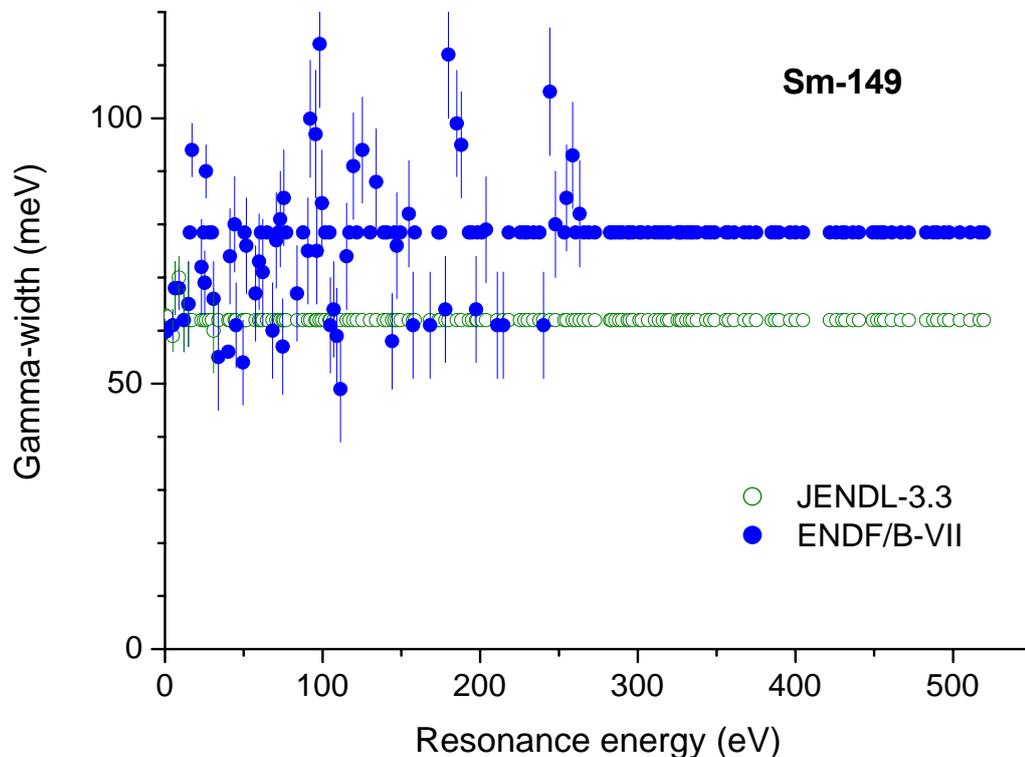


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3 (кружки) и ENDF/B-VII (сплошные точки)

## 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.

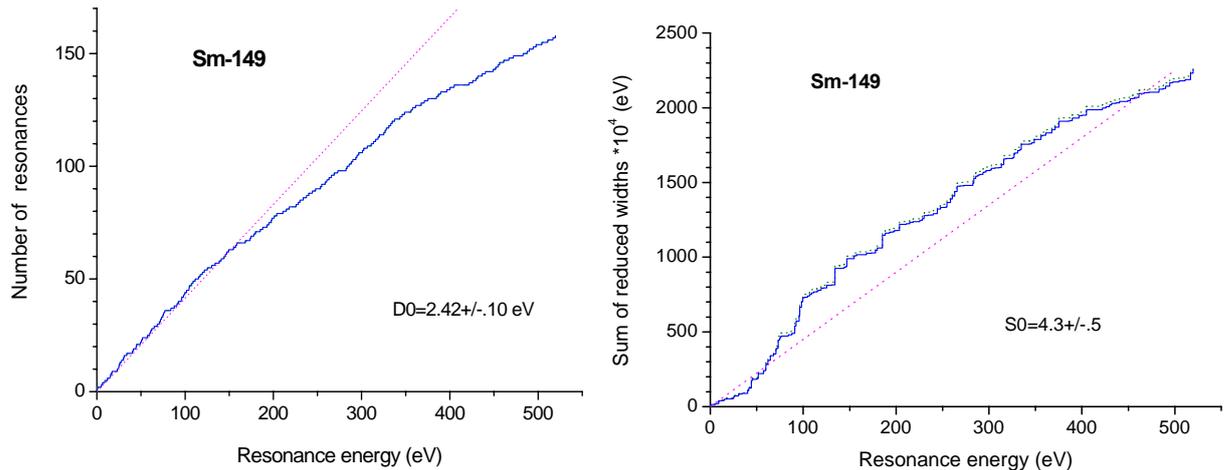


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин

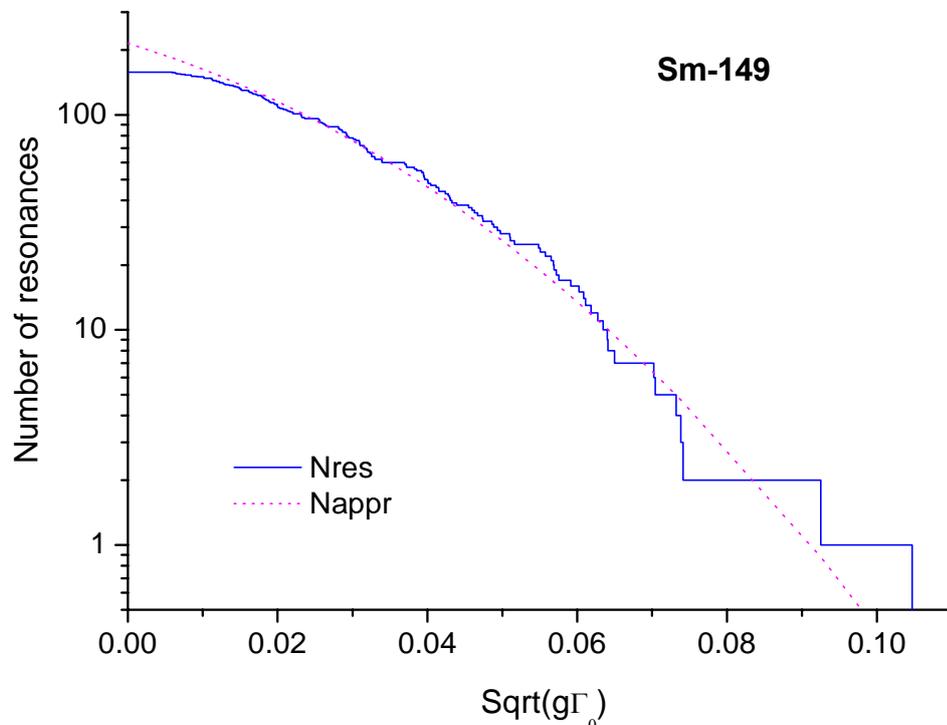


Рис. 3. Анализ пропуска резонансов

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 <sup>-4</sup> )	S1(10 <sup>-4</sup> )	S2(10 <sup>-4</sup> )	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 р-волны)	8.3

Следует отметить, что в оценке ENDF/B-VII радиационная ширина для р-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. Обращают на себя внимание также значительные расхождения нейтронных силовых функций р-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 <sup>149</sup>Sm 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 <sup>150</sup>Sm [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).

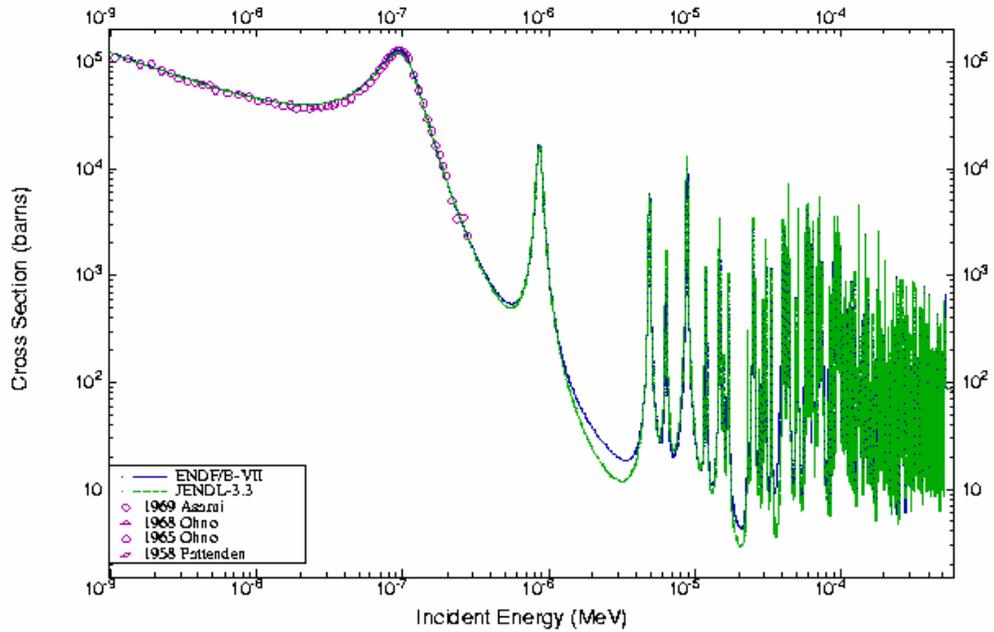


Рис. 4. Оценки полного нейтрона сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

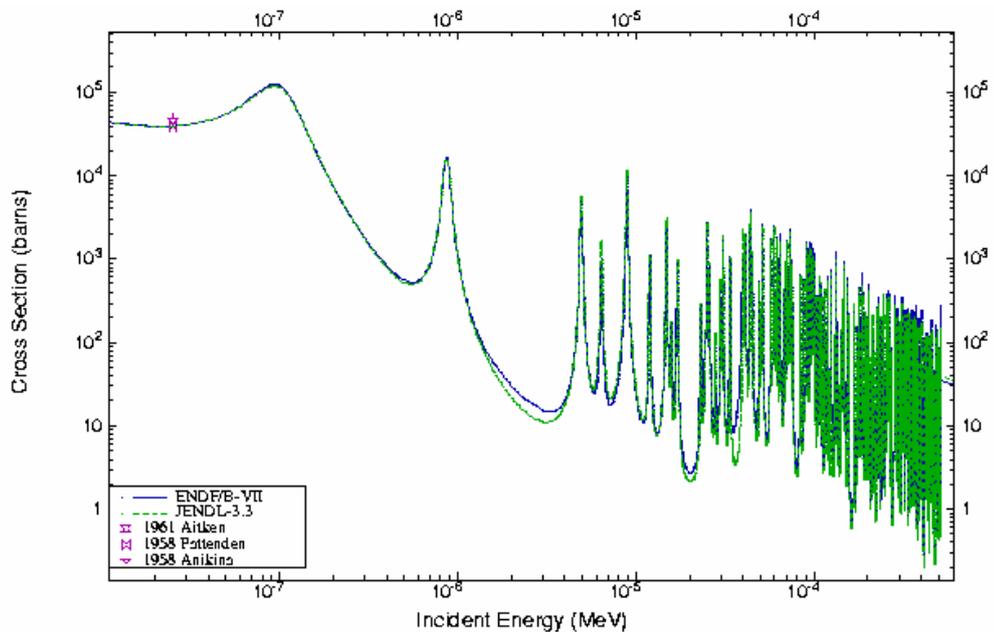


Рис. 5. Оценка сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов

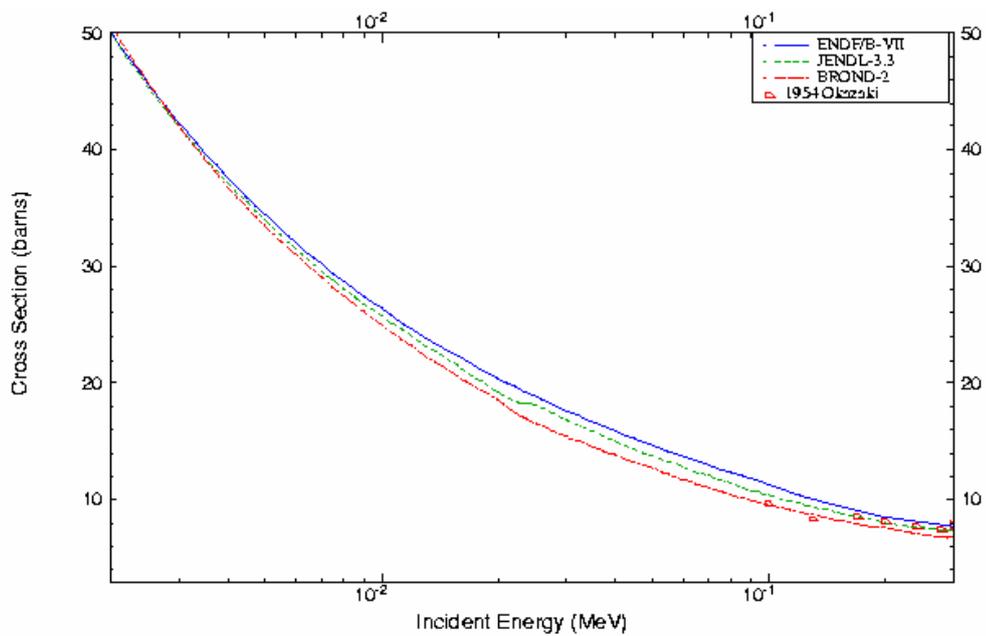


Рис. 6. Оценки полного нейтронного сечения в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными для естественной смеси изотопов самария [54O, 57E, 70S] и для изотопа  $^{150}\text{Sm}$  [93W]

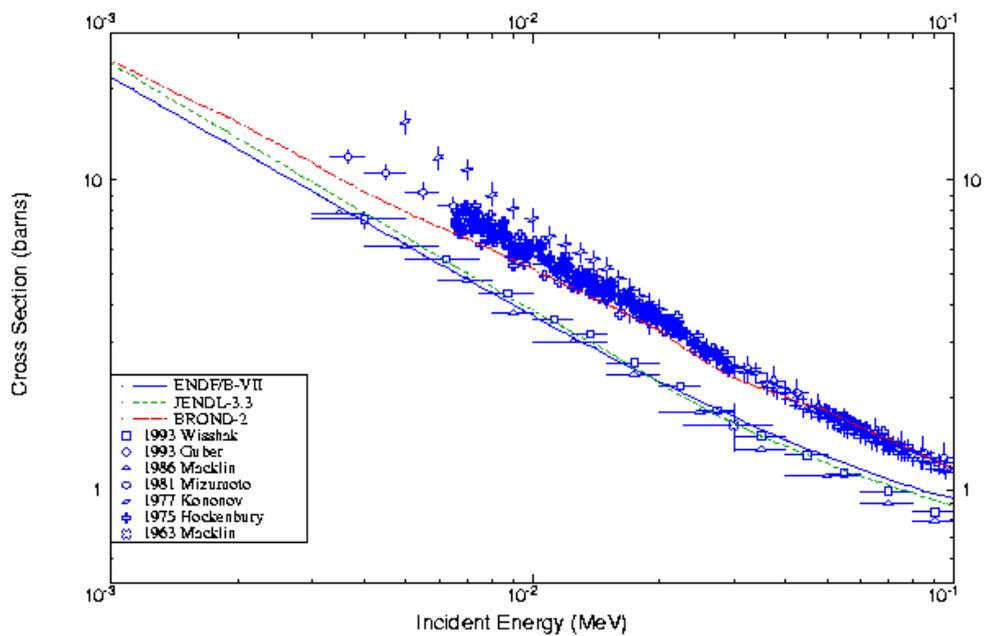


Рис. 7. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

### 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  $^{150}\text{Sm}$  [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  $^{149}\text{Sm}$  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.

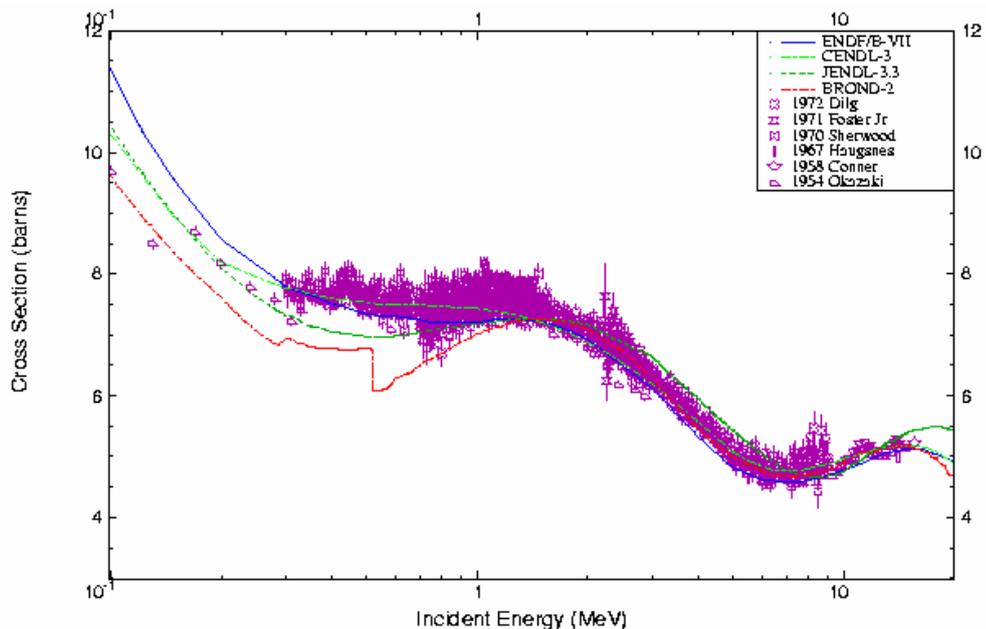


Рис. 8. Оценки полных нейтронных сечений  $^{149}\text{Sm}$  в диапазоне энергий от 0.2 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными для естественной смеси изотопов самария [54O, 70S, 71F, 74K] и для изотопа  $^{150}\text{Sm}$  [80S]

### 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  $^{149}\text{Sm}$ , 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.

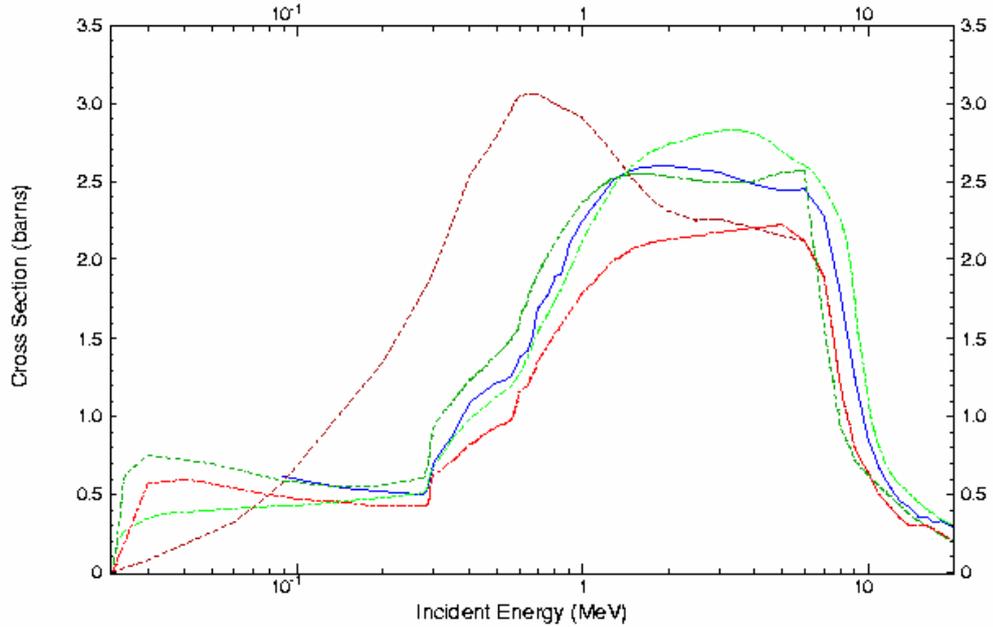


Рис. 9. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для  $^{149}\text{Sm}$  в сравнении с экспериментальными данными

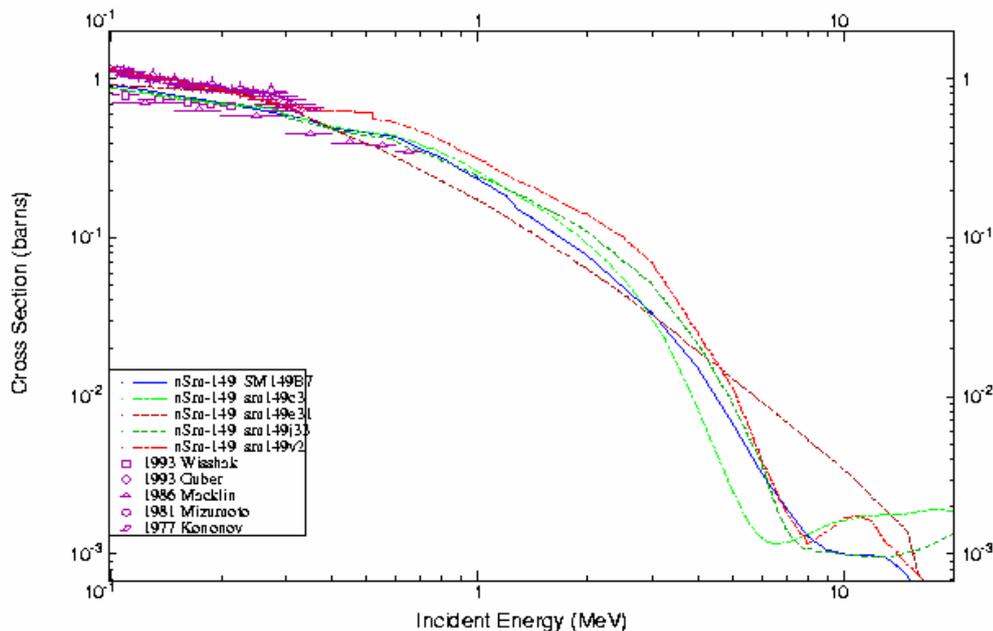


Рис. 10. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов  $^{149}\text{Sm}$  в сравнении с экспериментальными данными [04N]

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.

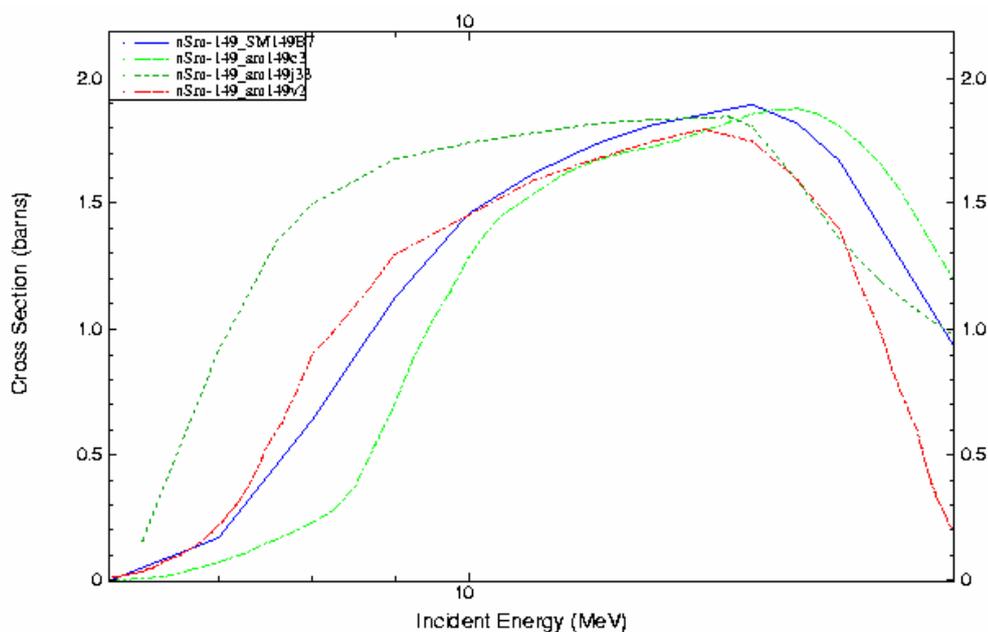


Рис.11. Оценки сечений реакции  $^{149}\text{Sm} (n,2n)$

### 3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц: (n,np), (n,n $\alpha$ ), (n,p), (n,d), (n,t), (n, $\alpha$ )

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.**<sup>2</sup>

**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. Menarace, 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.

---

<sup>2</sup> 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'	-.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 $\alpha$ )	1.145	-	Nd-147
28	(n,np)	-8.268	8.3233	Pm-150
102	n, $\gamma$	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, $\alpha$ )	-7.0575	7.1038	Nd-148

Радиоактивен, испытывает  $\beta$ -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.

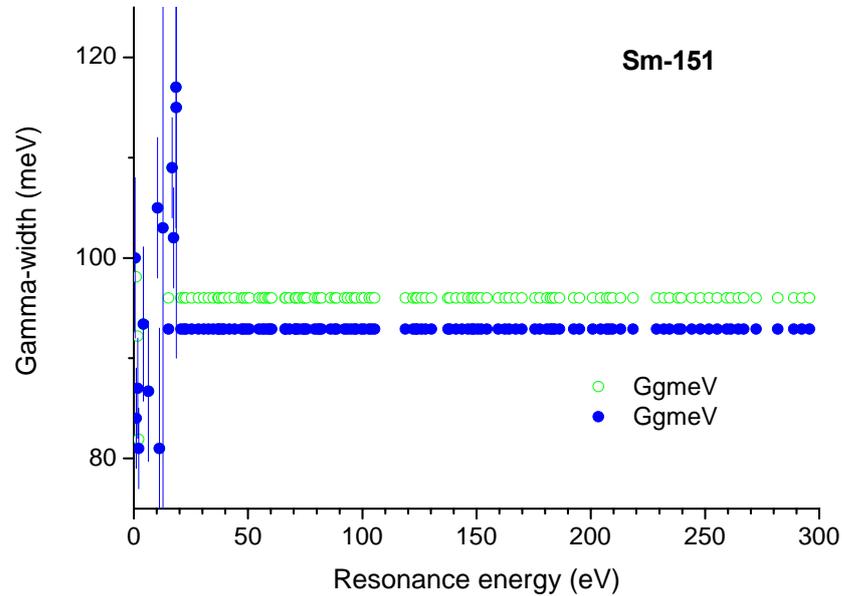


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3 (кружки) и ENDF/B-VII (сплошные точки)

## 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.

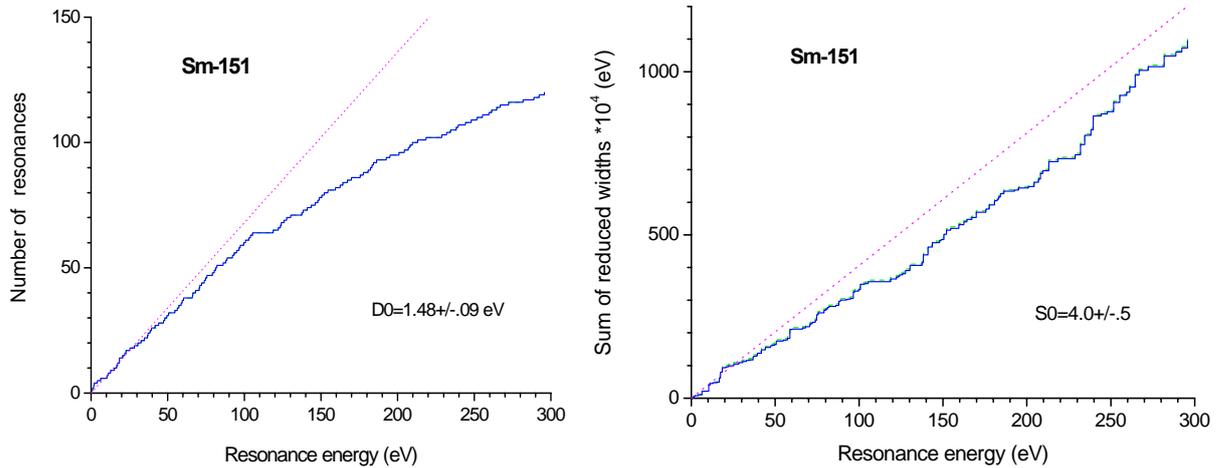


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин

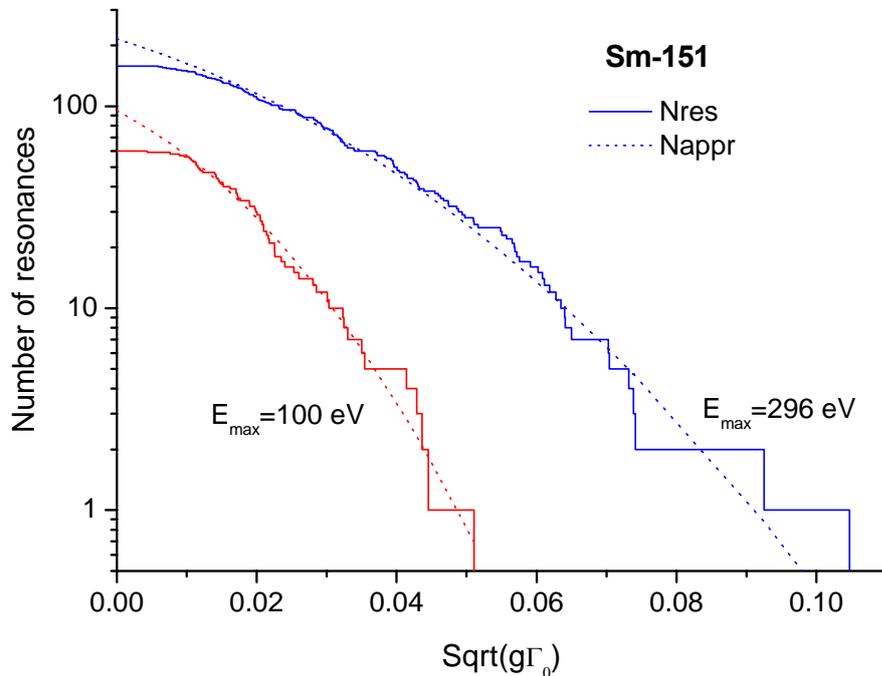


Рис. 3. Анализ пропуска резонансов для различных границ области разрешенных резонансов

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 <sup>-4</sup> )	S1(10 <sup>-4</sup> )	S2(10 <sup>-4</sup> )	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 <sup>151</sup>Sm 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 <sup>150</sup>Sm [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/](http://www.nds.iaea.org/RIPL-2/)

04N n\_TOF Collaboration, Phys. Rev. Lett., v. 93 (2004) 161103.

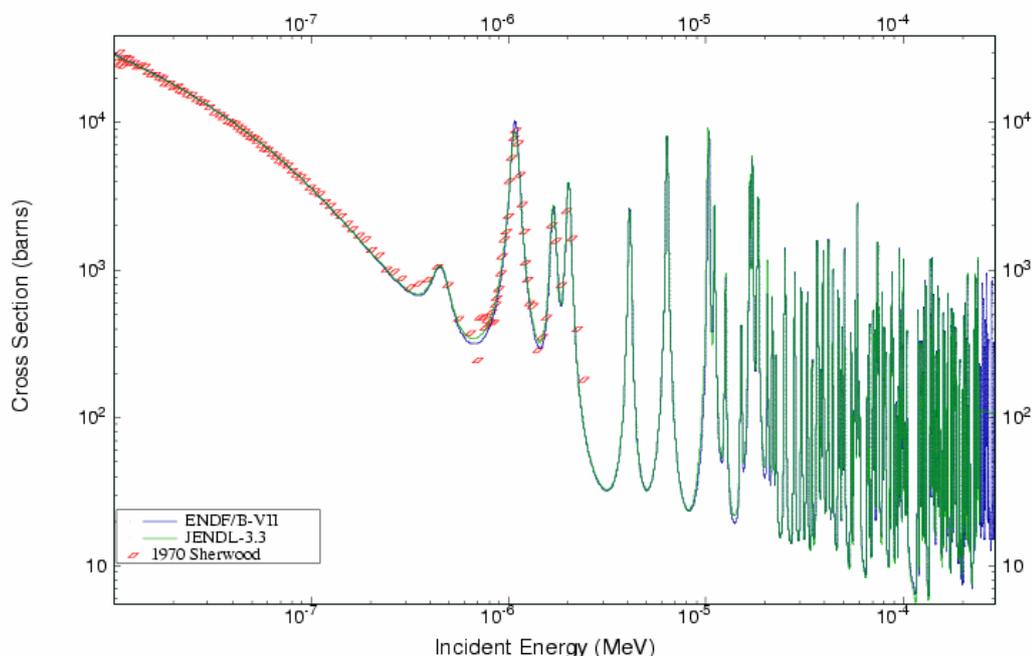


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

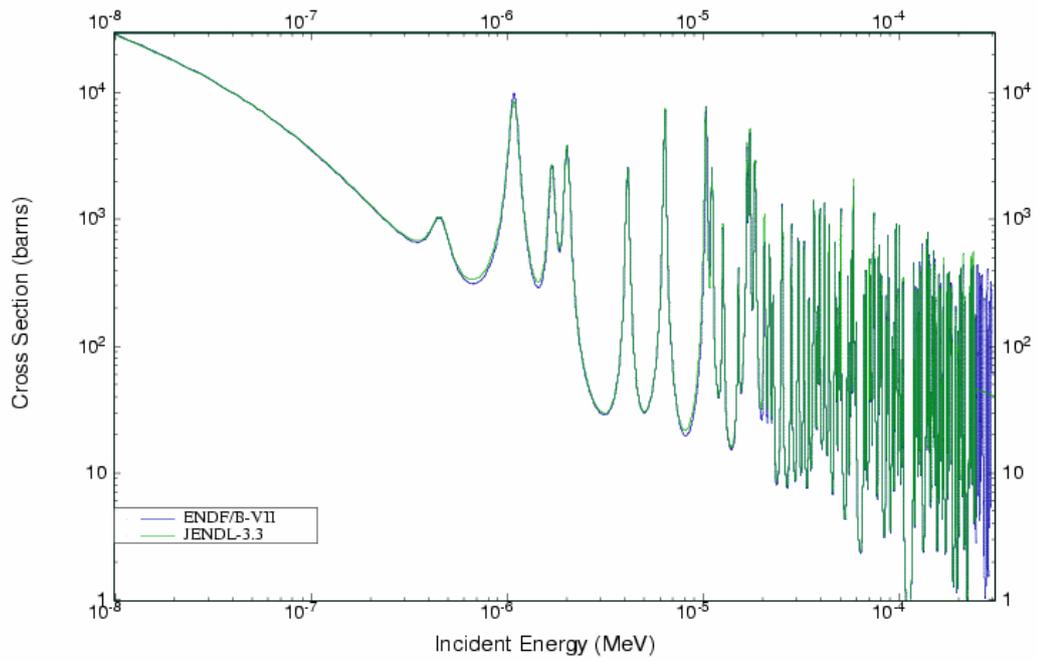


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов

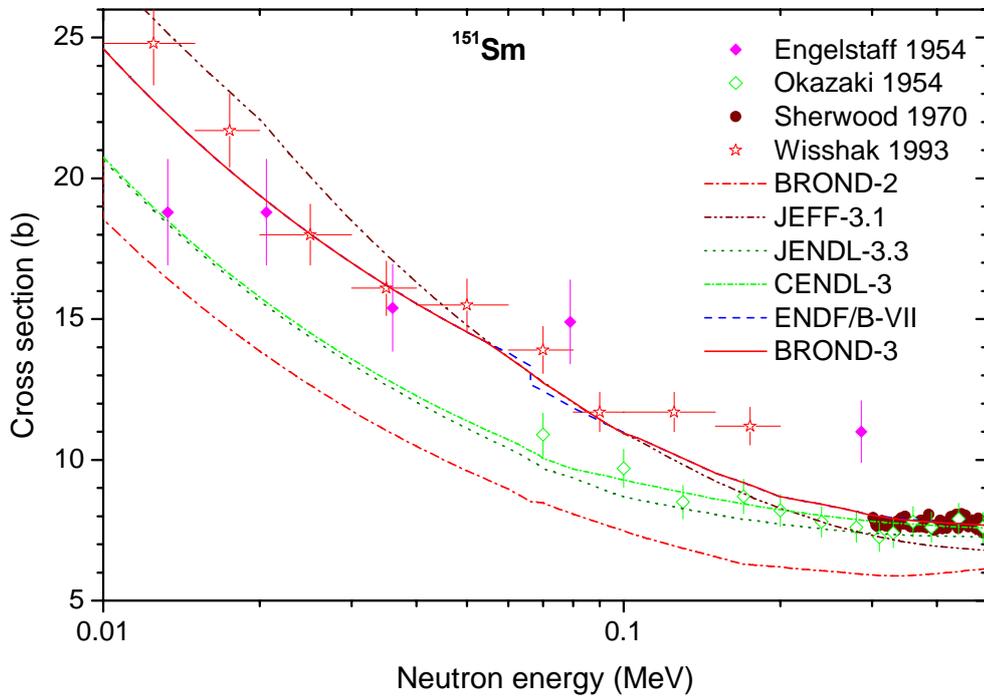


Рис. 6. Оценки полного нейтронного сечения в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными для естественной смеси изотопов самария [54O, 57E, 70S] и для изотопа  $^{150}\text{Sm}$  [93W]

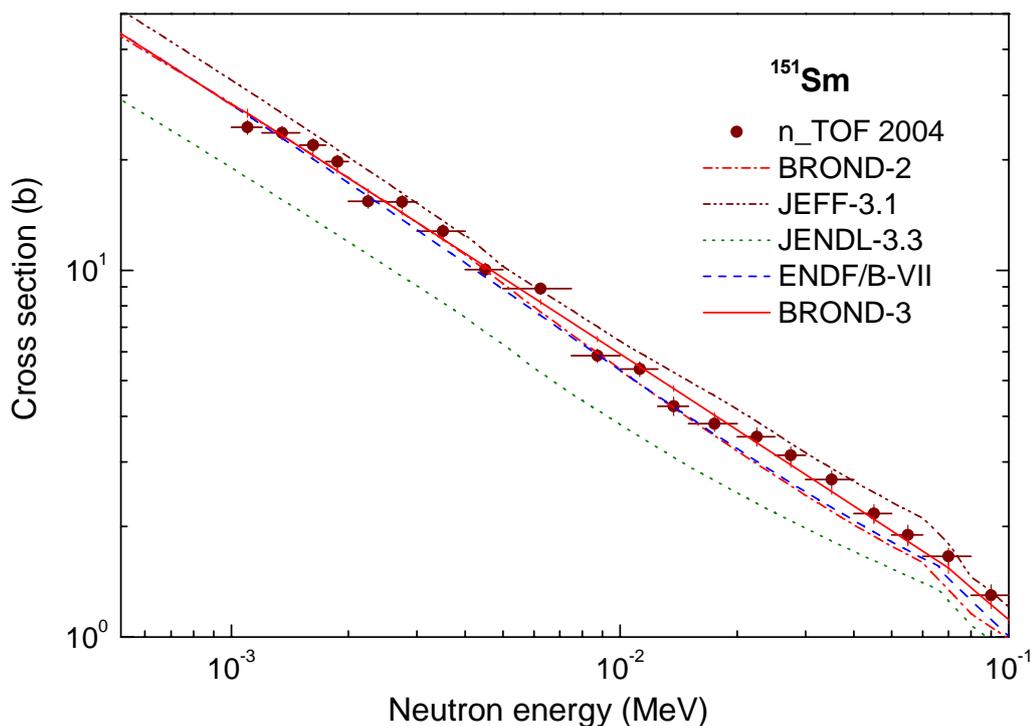


Рис. 7. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

## 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  $^{150}\text{Sm}$  [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  $^{151}\text{Sm}$  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.

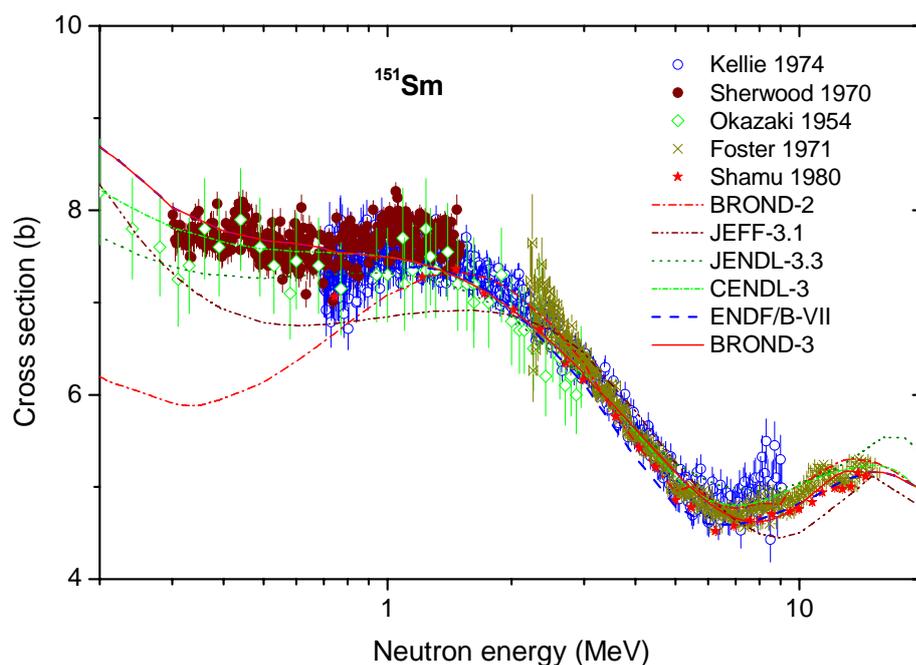


Рис. 8. Оценки полных нейтронных сечений  $^{151}\text{Sm}$  в диапазоне энергий от 0.2 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными для естественной смеси изотопов самария [54O, 70S, 71F, 74K] и для изотопа  $^{150}\text{Sm}$  [80S]

### 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  $^{151}\text{Sm}$ , 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).

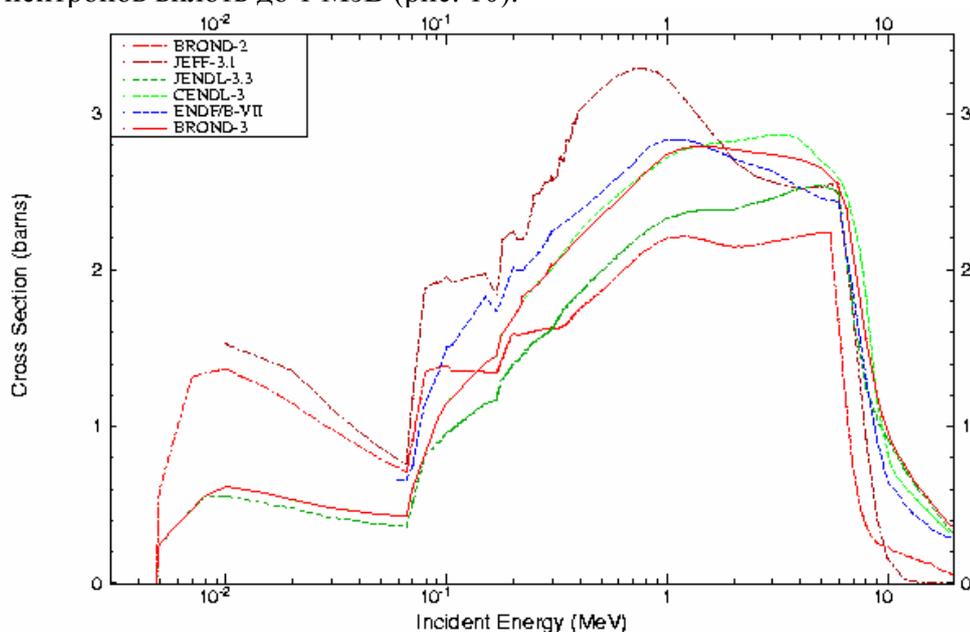


Рис. 9. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для  $^{151}\text{Sm}$  в сравнении с экспериментальными данными

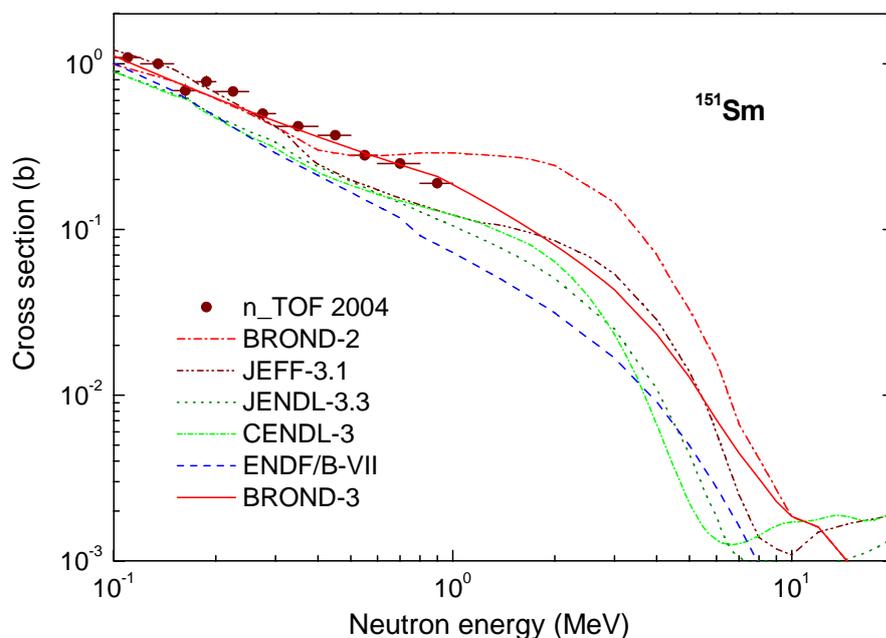


Рис. 10. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов  $^{151}\text{Sm}$  в сравнении с экспериментальными данными [04N]

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.

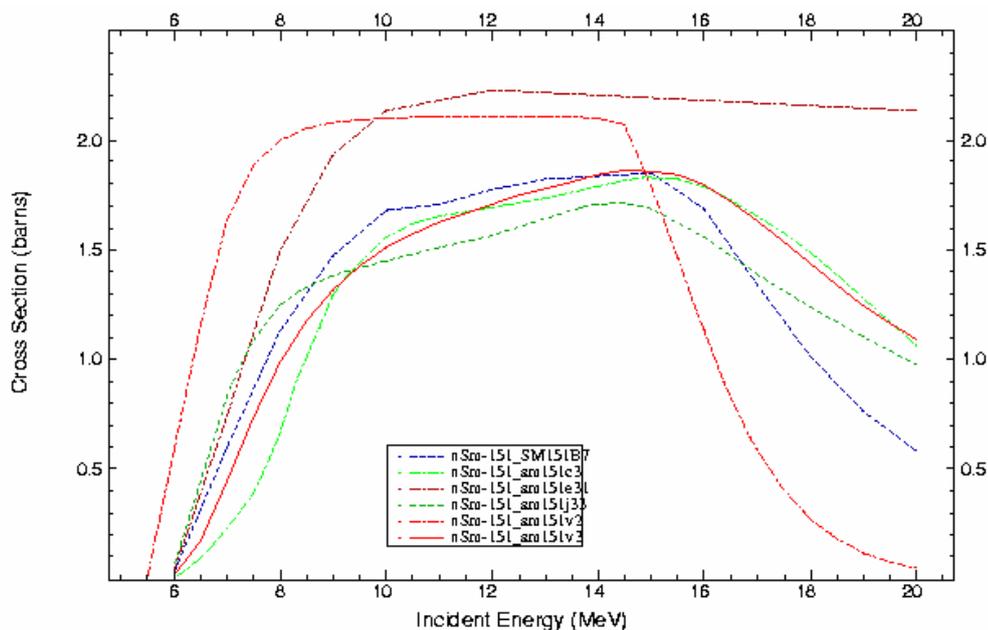


Рис.11. Оценки сечений реакции  $^{151}\text{Sm}(n,2n)$

### 3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц: $(n,np)$ , $(n,n\alpha)$ , $(n,p)$ , $(n,d)$ , $(n,t)$ , $(n,\alpha)$

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-VII<sup>3</sup>.

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 <sup>153</sup>Eu.

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.

---

<sup>3</sup> 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.Игнатюка, 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.