

## 53.Йод

### Замечание к оценке качества данных для осколков деления

Учитывая, что тяжелые изотопы йода являются важными продуктами деления, сделаем общие замечания по приоритетам к качеству данных. Наиболее важной областью энергий является область спектра нейтронов с максимальными нейтронными потоками в реакторах на тепловых и быстрых нейтронах, то есть около 0.0253 эВ и ниже 5 МэВ. Наиболее важными сечениями, выстроенными в порядке убывания важности являются интегральные сечения: захвата, полное сечение, сечение упругого рассеяния, неупругое рассеяния с возбуждением первых уровней и других пороговых сечений; дифференциальные данные: спектры вторичных нейтронов неупругого рассеяния и угловые распределения упруго рассеянных нейтронов.

### 53.1. Йод-124

#### Общие характеристики

Период полураспада:  $(4.176 \pm 0.003)$  дней.

Моды распада:  $e^-$  100%.

Спин основного состояния:  $2^-$ .

#### Файлы оцененных данных

JEF-2.2 – оценка 1988 года файла для библиотеки данных по радиоактивному распаду полученная преобразованием данных из библиотеки ENSDF. Нейтронные сечения отсутствуют.

JEFF-3.1 – оценка 1997 года файла для библиотеки данных по радиоактивному распаду полученная преобразованием данных из библиотеки ENSDF. Нейтронные сечения отсутствуют.

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3.

#### Заключение

Все нейтронные сечения для  $^{124}\text{I}$  из JEFF-3.1/A, имеющие значения выше  $10^{-5}$  барн, приведены на рисунке 1. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей. Файл  $^{124}\text{I}$  из библиотеки JEFF-3.1 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> В файле РОСФОНДа парциальные сечения реакций, приведенные в JEFF-3.1/A (EAF-2003) в файле MF=10, просуммированы и суммы приведены в секциях MT=22, 28, 33, 104 и 106 файла MF=3. Данные о вероятностях образования теллура-123 в основном и долгоживущем изомерном состояниях включены в файл MF=9(секции MT=28 и MT-104). Файл MF=10 удален. – М.Н.Николаев.

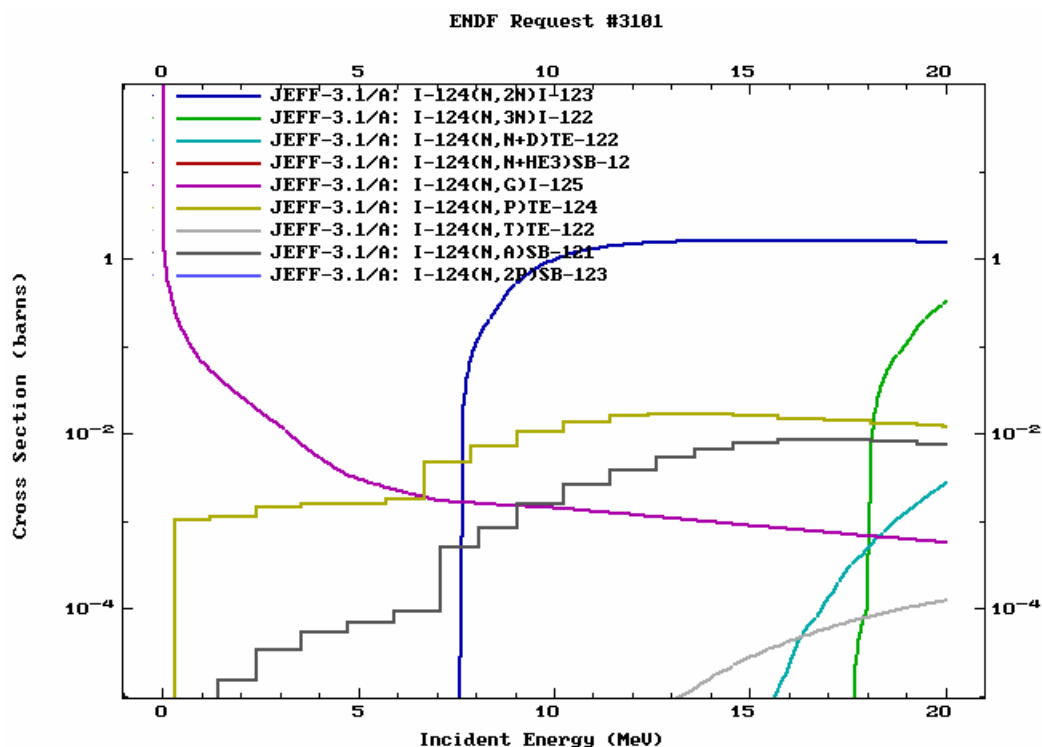


Рис. 1. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A.

#### Автор рекомендации

Проняев В.Г.

### 53.2. Йод-125

#### Общие характеристики

Период полураспада:  $(59.400 \pm 0.010)$  дней.

Моды распада:  $e^-$  100%.

Спин основного состояния:  $5/2^+$ .

#### Файлы

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3.

#### Рекомендация

Все нейтронные сечения для  $^{125}\text{I}$  из JEFF-3.1/A имеющие значения выше  $10^{-5}$  барн приведены на рисунке 1. Тепловое сечение захвата (894 барн) хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными:  $894 \pm 90$  барн ( $X4=20629$ , Бресести, 1964) и 890 барн ( $X4=12046$ , Харпер, 1961), а резонансный интеграл захвата рассчитанный по программе PSYCHE7.1 равный 14838 барн не противоречит имеющемуся экспериментальному  $13730 \pm 2000$  барн ( $X4=20629$ , Бресести, 1964). Сечения на рисунке 2

не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей. Файл  $^{125}\text{I}$  из библиотеки JEFF-3.1 может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД<sup>2</sup>.

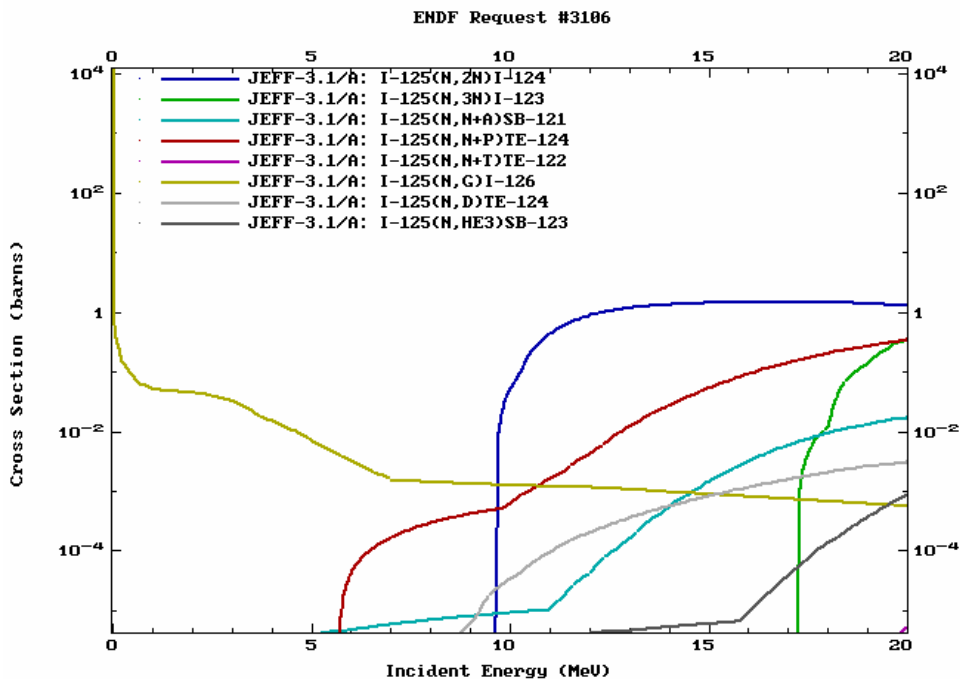


Рис. 2. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A (EAF-2003).

#### Автор рекомендации

Проняев В.Г.

### 53.3. Йод-126

#### Общие характеристики

Период полураспада:  $(12.93 \pm 0.05)$  дней.

Моды распада:  $e^-$  52.7%,  $\beta^-$  47.3%.

Спин основного состояния:  $2^-$ .

#### Файлы

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3.

#### Рекомендация

Все нейтронные сечения для  $^{126}\text{I}$  из JEFF-3.1/A имеющие значения выше  $10^{-5}$  барн приведены на рисунке 1. Тепловое сечение захвата (6192 барн) хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными:  $9000 \pm 5000$  барн ( $X_4=10546$ , Элгарт, 1975) и 5960 барн ( $X_4=10728$ , Элгарт, 1971), а резонансный интеграл захвата рассчитанный по

<sup>2</sup> В файле РОСФОНДа парциальные сечения реакций, приведенные в JEFF-3.1/A (EAF-2003) в файле MF=10, просуммированы и суммы приведены в секциях MT=22, 28, 33, 104 и 106 файла MF=3. Данные о вероятностях образования теллура-123 и теллура-125 в основном и долгоживущем изомерном состояниях (секции MT=32, 105 и MT=103) включены в файл MF=9. Файл MF=10 удален. – М.Н.Николаев.

программе PSYCHE7.1 равный 41023 барн не противоречит имеющемуся экспериментальному 40600 барн ( $X_4=10728$ , Элгарт, 1971). Сечения на рисунке 3 не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей. Файл  $^{126}\text{I}$  из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД<sup>3</sup>.

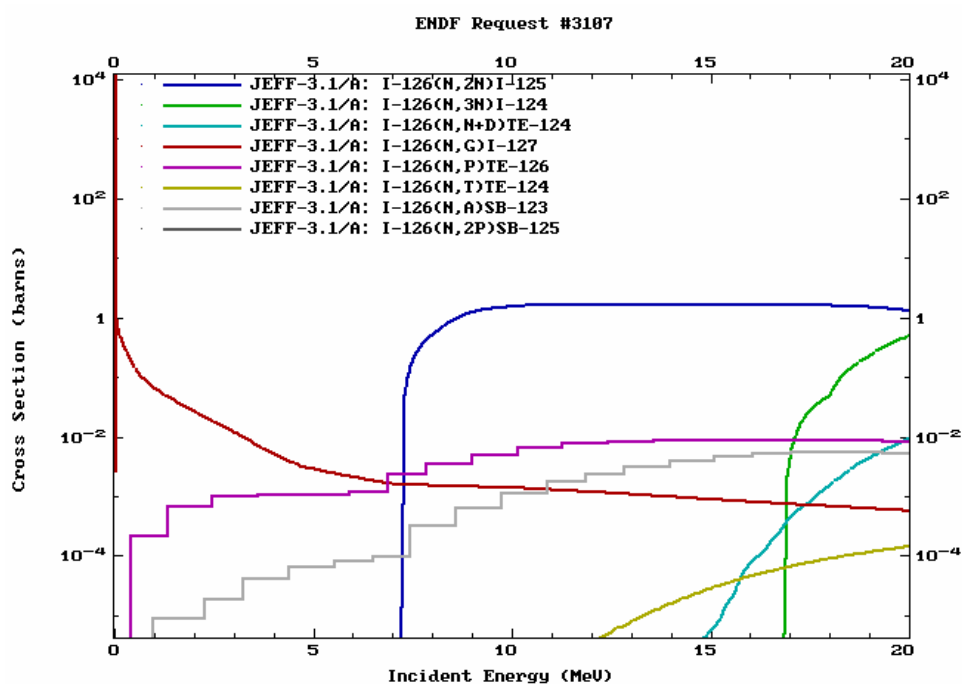


Рис. 3. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

<sup>3</sup> В файле РОСФОНДа парциальные сечения реакций, приведенные в JEFF-3.1/A (EAF-2003) в файле MF=10, просуммированы и суммы приведены в сечениях MT=22, 28, 33, 104, и 106 файла MF=3. Данные о вероятностях образования теллура-125 в основном и долгоживущем изомерном состояниях включены в файл MF=9(сечения MT=28 и MT-104). Файл MF=10 удален. – М.Н.Николаев.

## 53.4. Йод-127

### Общие характеристики

Содержание в естественной смеси: 100%.

Спин основного состояния:  $5/2^+$ .

### Файлы

ENDF/B-VI – оценка 1991 года основанная в резонансной области (до 1 кэВ) на параметрах оцененных Мугхабгхабом (1981) в формализме многоуровневого Брейт-Вигнера (MLBW). В интервале энергий 1 кэВ – 30 МэВ оценка основана на модельных расчётах.

JEFF-2 – оценка 1983 года, базируется в резонансной области энергий (ниже 2.02 кэВ) на параметрах оцененных Мугхабгхабом (1981) с их некоторой ревизией, включая параметры отрицательного резонанса. Сечения в области неразрешённых резонансов 2.02 – 60 кэВ заданы через средние резонансные параметры. Результаты модельных расчётов приведены в качестве оценки в интервале энергий 60 кэВ – 20 МэВ.

JENDL-3.2 – оценка 1990 года, основана на модификации оценки JENDL-2. MLBW анализ экспериментальных данных выполнен в области разрешённых резонансов до энергии в 2 кэВ. Область неразрешённых резонансов с учётом конкуренции со стороны неупругого рассеяния задана от 2 до 100 кэВ. Результаты модельных расчётов в области энергий от 100 кэВ до 20 МэВ.

CENDL-3 – оценка 1999 года с параметрами разрешённых и неразрешённых резонансов взятыми из JENDL-3.2. Результаты модельных расчётов в интервале энергий от 100 кэВ до 20 МэВ.

ENDF/B-VII – оценка 2005 года основанная на новой оценке резонансных параметров (Мугхабгхаб 2006) в области разрешённых резонансов до энергии 4.05 кэВ и оценке ENDF/B-VI для более высокой энергии.

### Тепловая и резонансная области энергий

Оценка ENDF/B-VII в тепловой и резонансной области энергий является наилучшей. Она покрывает широкую область энергий до 4.05 кэВ. Значение интеграла резонансного захвата на несколько процентов больше, чем в других библиотеках. Анализ статистических распределений уровней и ширин показывает небольшой пропуск очень узких резонансов в s- волне, лишний уровень с аномально большой шириной и недостаток большого числа уровней с малыми нейтронными ширинами в p-волне. Однако эти недостатки не влияют существенным образом на значения средних сечений в резонансной области. Тепловые сечения в разных библиотеках отличаются незначительно.

### Область быстрых нейтронов

Одногрупповое сечение захвата усреднённое по спектру нейтронов быстрого реактора в оценке ENDF/B-VII (ENDF/B-VI) на 20% выше чем в других оценках. Это отличие обусловлено более высоким сечением захвата в библиотеке ENDF/B-VII чем в других библиотеках в области энергий нейтронов от нескольких кэВ до сотен кэВ. Сравнение сечений захвата в области энергий выше 20 кэВ показано на рисунке 4. Более детальное сравнение для ENDF/B-VII с имеющимися данными приведено на рисунке 5. Существующий разброс экспериментальных данных (30% и выше) не позволяет сделать вывод о том какая оценка является более предпочтительной.

Полное сечение в библиотеке ENDF/B-VII хорошо согласуется с экспериментальными данными в быстрой области энергий (рисунок 6), разброс в оценках в 10 – 20% обусловлен используемыми в расчётах оптическими потенциалами.

Вклад прямых процессов в неупругое рассеяние (рисунок 7) учитывался только в библиотеках ENDF/B-VII и CENDL-3. Независимые оценки ENDF/B-VII и CENDL-3 близки друг к другу, хотя оценка вклада прямых процессов в CENDL-3 несколько занижена. В то же время, сравнение для сечения (n,2n) (рисунки 8 и 9) показывает, что оценка CENDL-3 лучше согласуется с последними экспериментальными данными, чем ENDF/B-VII. Энерго-угловые распределения вторичных частиц наилучшим образом представлены в файле MF=6 библиотеки ENDF/B-VII.

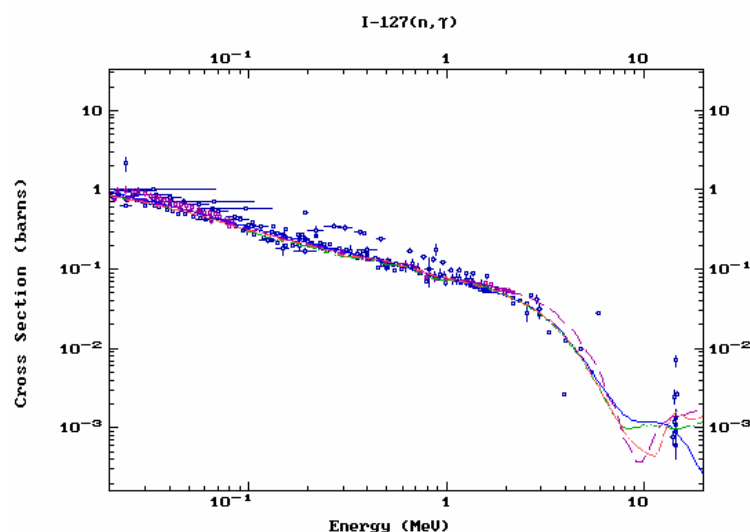


Рис. 4. Сравнение сечений захвата из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными (показаны одинаковым значком для всех работ без ссылок). Сплошная (голубая) линия - ENDF/B-VII, штрих-пунктирная (зелёная) линия - JENDL-3.2, пунктирная (фиолетовая) - JEF-2, короткие пунктиры (красная) - CENDL-3.

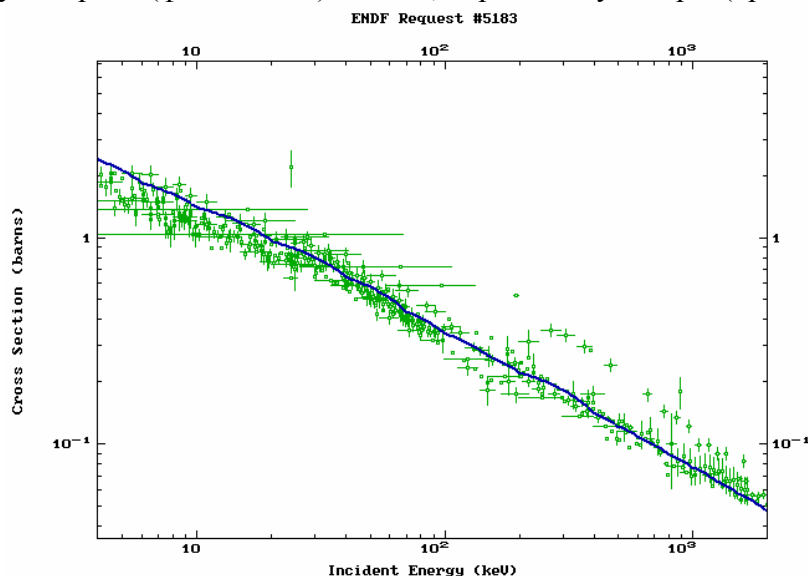


Рис. 5. Сравнение сечений захвата из библиотеки ENDF/B-VII (сплошная голубая линия) с имеющимися экспериментальными данными (показаны одинаковым значком для всех работ без ссылок).

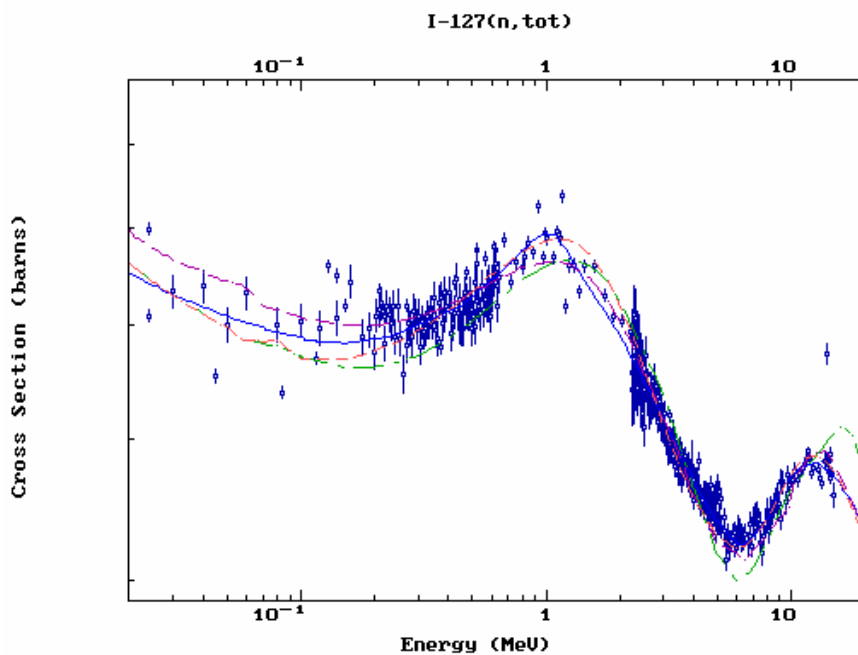


Рис. 6. Сравнение полного сечения из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными (показаны одинаковым значком для всех работ без ссылок). Сплошная (голубая) линия - ENDF/B-VII, штрих-пунктирная (зелёная) линия - JENDL-3.2, пунктирная (фиолетовая) - JEF-2, короткие пунктиры (красная) - CENDL-3.

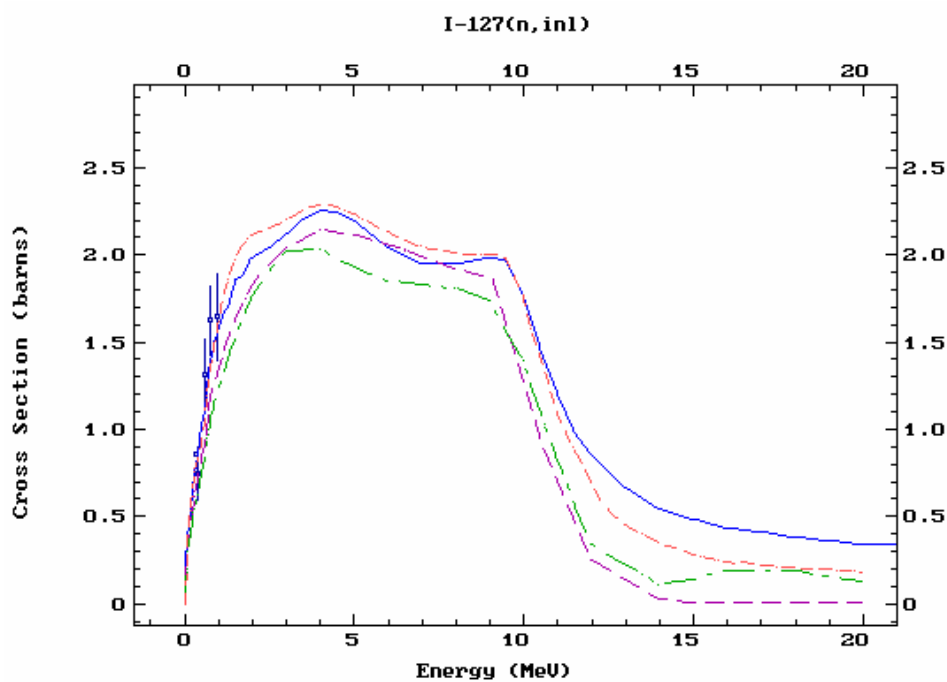


Рис. 7. Сравнение сечения неупругого рассеяния из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными (показаны одинаковым значком для всех работ без ссылок). Сплошная (голубая) линия - ENDF/B-VII, штрих-пунктирная (зелёная) линия - JENDL-3.2, пунктирная (фиолетовая) - JEF-2, короткие пунктиры (красная) - CENDL-3.

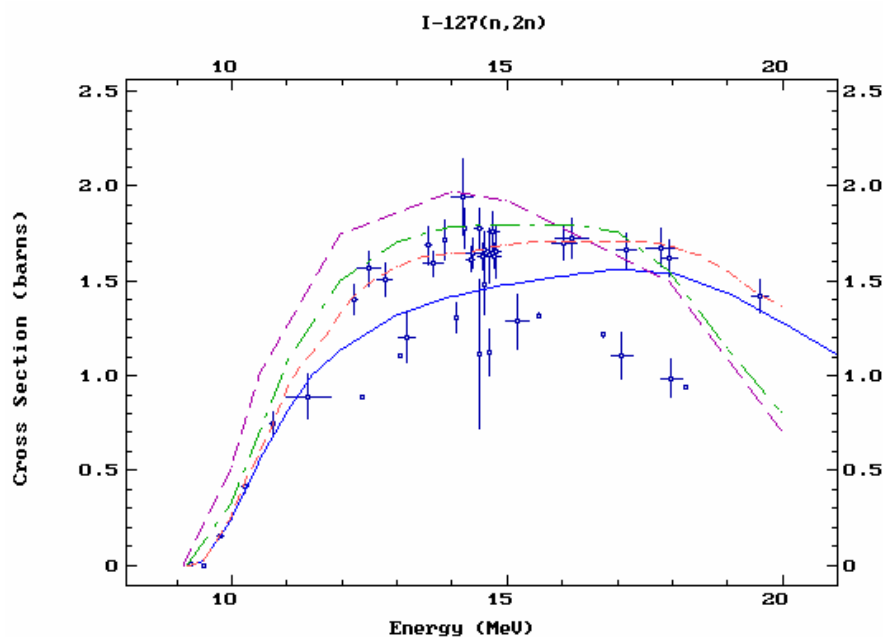


Рис. 8. Сравнение сечения реакции  $(n,2n)$  из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными (показаны одинаковым значком для всех работ без ссылок). Сплошная (голубая) линия - ENDF/B-VII, штрих-пунктирная (зелёная) линия - JENDL-3.2, пунктирная (фиолетовая) - JEF-2, короткие пунктиры (красная) - CENDL-3.

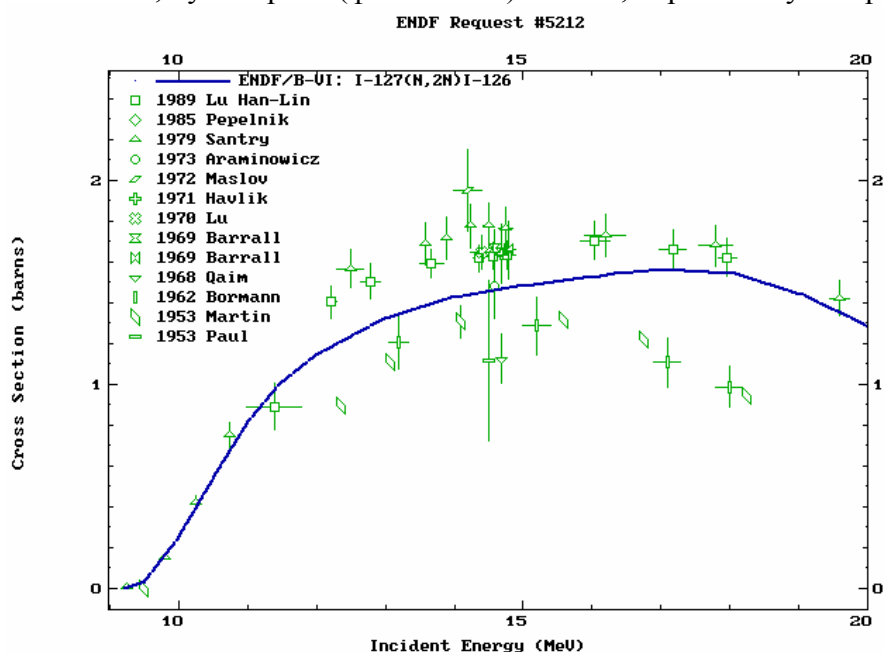


Рис. 9. Сравнение сечения реакции  $(n,2n)$  из разных библиотеки ENDF/B-VI (ENDF/B-VII) с имеющимися экспериментальными данными.

### Рекомендация

Оценка из библиотеки ENDF/B-VII рекомендуется для включения в библиотеку РОСФОНД<sup>4</sup>.

### Автор рекомендации

Проняев В.Г.

<sup>4</sup> В РОСФОНДе из файла MF=9 исключена секция MT=107 поскольку изомеры сурьмы-124, вероятности которых описываются в этой секции, имеют короткие времена жизни. Исключен также файл MF=8, поскольку РОСФОНД не предусматривает рекомендацию распадных данных.



## 53.5. Йод-129

### Общие характеристики

Период полураспада:  $(1.57 \pm 0.04) \cdot 10^7$  лет.

Моды распада:  $\beta$  100%.

Спин основного состояния:  $7/2^+$ .

### Файлы

ENDF/B-VI – оценка 1980 года, основанная в резонансной области (до 166.72 эВ) на параметрах оцененных Мугхабгхабом (1981) в формализме одноуровневого Брейт-Вигнера (SLBW). В интервале энергий 166.72 эВ – 20 МэВ оценка основана на модельных расчётах.

JEF-2 – оценка 1991 года с областью разрешённых резонансов до 3.4 кэВ. Полный спин для s- резонансов с неизвестным спином приписывался случайным образом с сохранением правила  $(2J+1)$ . Область неразрешённых резонансов задана от 3.4 до 25 кэВ, а для более высоких энергий в оценке использовались результаты модельных расчётов по статистической и предравновесной модели.

JENDL-3.2 – оценка 1984 года, модифицированная в 1990 году. Область разрешённых резонансов со 127 MLBW s- резонансами расположена до 3.4 кэВ. Резонансам с неизвестным полным спином был приписан спин методом случайных чисел с учётом  $(2J+1)$  зависимости и с сохранением приведённых ширин и захватных площадей. Параметры в области неразрешённых резонансов (3.4 кэВ – 100 кэВ) подбирались из наилучшего описания экспериментальных данных по полному сечению и сечению захвата. Результаты модельных расчётов использовались в оценке для энергий нейтронов выше 100 кэВ. В библиотеке JENDL-3.3 взята оценка JENDL-3.2 без каких-либо изменений.

BROND-2 – оценка 1985 года с 66 MLBW s- резонансами в резонансной области (и приписанным фиктивным полным спином равным спину ядра-мишени) лежащей до 2 кэВ и взятыми из оценки Мугхабгхаба (1981) и экспериментальных данных Маклина (1983). Область неразрешённых резонансов задана от 2 до 500 кэВ с параметрами подобранными из описания экспериментальных данных. Результаты расчётов по оптической и статистической моделям для энергий от 500 кэВ до 20 МэВ.

CENDL-3 – оценка 2001 года с параметрами разрешённых и неразрешённых резонансов взятыми из JENDL-3.2. Результаты расчётов по оптической, статистической и предравновесной модели с учётом вклада прямых процессов в интервале энергий от 100 кэВ до 20 МэВ.

ENDF/B-VII – оценка Мугхабгхаба 2006 года параметров разрешённых резонансов в области энергий до 3.4 кэВ (s- и p- резонансы) объединённая с оценкой JENDL-3.2 для области неразрешённых резонансов и быстрой области энергий.

### Тепловая и резонансная области энергий

Сечение упругого рассеяния в тепловой точке (10.23 барн) также как и полное сечение (40.63 барн) вероятно слишком высоки. Экспериментальные данные Р. Блока для полного сечения  $35.8 \pm 4.0$  барн дают оценку для сечения упругого рассеяния в тепловой точке в 4.8

барна. Как кажется, вклад гладкого фонового сечения от неупругого рассеяния в области неразрешённых резонансов не согласовано с ширинами неупругого рассеяния приведёнными в области разрешённых резонансов. Каких-либо данных для переоценки параметров в области разрешённых резонансов не существует.

Тепловые сечения (барны при энергии в 0.0253 эВ) из разных библиотек приведены ниже в таблице:

Сечение	ENDF/B-VI	ENDF/B-VII	JEF-2	JENDL-3.2 (и 3.3)	BROND-2	CENDL-3
Полное	31.562	40.63	42.473	33.502	33.924	33.502
Упругое	4.560	10.23	8.571	6.496	7.012	6.496
Захвата	27.002	30.40	33.902	27.006	26.912	27.006

Измерения Блока (1960, X4=12024) полного сечения выполнены в 14 точках по энергии между 0.0253 эВ и 0.0453 эВ. Так как полное сечение в этой области с большой вероятностью может быть представлено как  $\sigma(\text{tot}) = \sigma(\text{elastic}) + \sigma(\text{capture}) = S1 + S2/\sqrt{E_n}$  (где S1 и S2 являются константами), то простая оценка для энергии 0.0253 эВ даёт значение для полного сечения 35.4 барн с ошибкой около 3%. Все оценки (исключая JEF-2 и ENDF/B-VII) дают для теплового сечения захвата величину близкую к 27 барн, рекомендованную Мугхабгхабом (1981) и лишь на 5% ниже значения, которое может быть получено из измерений Блока. Однако, оценка ENDF/B-VII основывается на новой оценке Мугхабгхаба (2006) выполненной как для тепловой области, так и для области разрешённых резонансов и близка к значению  $30.3 \pm 1.2$  барн полученном в последних измерениях Накамуры (X4=22819, 1996). Хотя число резонансов в оценках ENDF/B-VII и JENDL-3.2 близко, в JENDL-3.2 они представлены только s- резонансами, а в ENDF/B-VII заданы через 84 s- и 41 p- резонанса. Их анализ показывает большие пропуски резонансов и распределения ширин и расстояний между уровнями далёкими от статистических, а также к понижению сечения захвата в области разрешённых резонансов в ENDF/B-VII по сравнению с JENDL-3.2.

Хотя одnogрупповые сечения захвата усреднённые по спектру быстрого реактора отличаются лишь на 5% в разных библиотеках, это является результатом усреднения по широкой области энергий. Оценка JENDL-3.2 выше оценки ENDF/B-VI на 20 – 30% для энергий выше 6 кэВ и проходит по результатам измерений Маклина (X4=12806, 1983) выполненных с плохим разрешением. Новые экспериментальные данные Ногуре (X4=22868, 2004) хорошо согласуются с данными Маклина и показывают, что оценка сечения захвата в JENDL-3.2 возможно лишь немного завышена (рисунки 10 и 11). Учитывая, что оценка ENDF/B-VII получена объединением новой оценки в области разрешённых резонансов выполненной Мугхабгхабом (2006) и оценки JENDL-3.2 для области неразрешённых резонансов, хорошо описывающей экспериментальные сечения в этой области, она может быть рекомендована для включения в библиотеку РОСФОНД.

## Область быстрых нейтронов

Для области быстрых нейтронов экспериментальные данные существуют только для реакции (n,2n). ENDF/B-VI и BROND-2 не содержат оценку (n,2n). Как видно (рисунок 12) все остальные оценки за исключением JEF-2 достаточно хорошо описывают экспериментальные данные. Полное и упругое сечение в разных библиотеках отличается на 10%. Сечения неупругого рассеяния с возбуждением дискретных уровней наилучшим образом, с учётом вкладов всех механизмов реакций, оценены в CENDL-3, но имеющийся

разрыв между последним дискретным уровнем (1.1116 МэВ) и порогом континуума уровней (2.4 МэВ) является существенным недостатком оценки неупругого рассеяния. Сечения всех остальных пороговых реакций являются незначительными. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов наилучшим образом представлены в библиотеке JENDL-3.2.

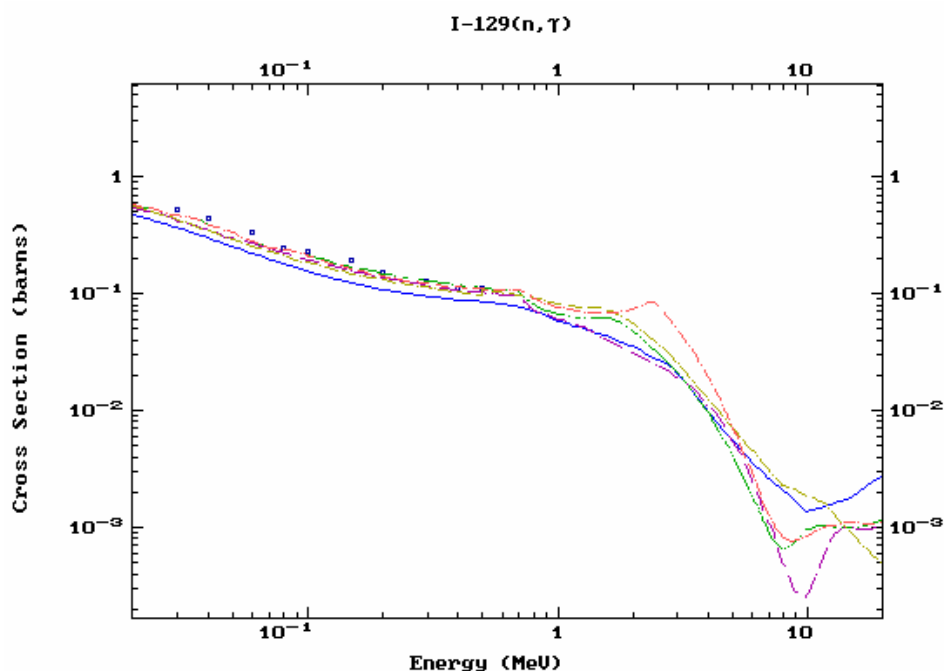


Рис. 10. Сравнение сечений захвата из разных библиотек с экспериментальными данными Маклина (X4=12806, 1983). Сплошная (голубая) линия - ENDF/B-VI, штрих-пунктирная (зелёная) линия - JENDL-3.2, пунктирная (фиолетовая) - JEF-2, короткие пунктиры (красная) - CENDL-3.

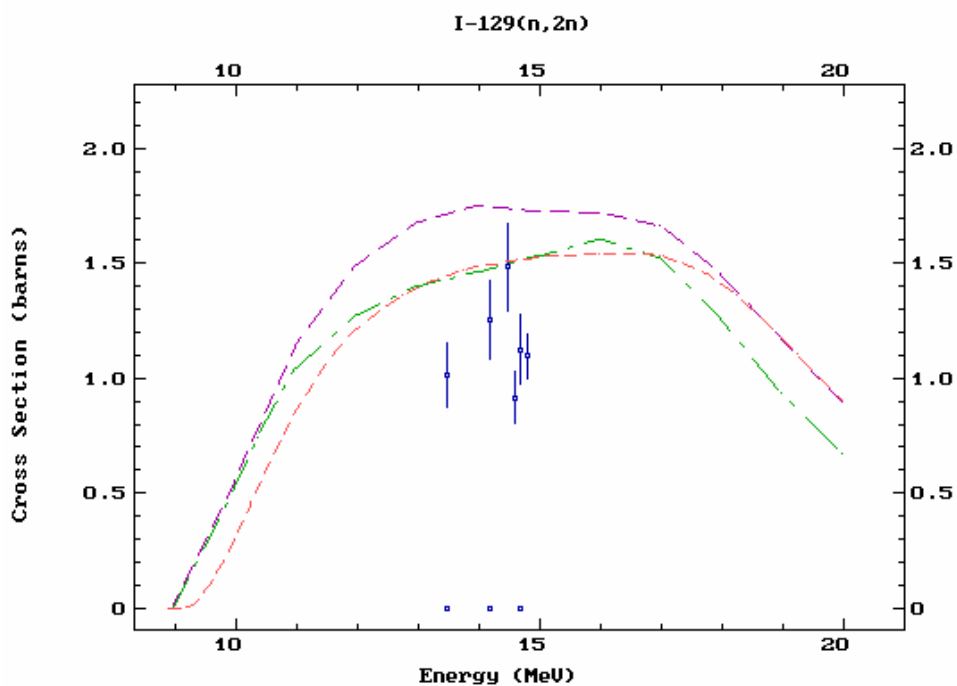


Рис. 11 Сравнение сечения реакции (n,2n) из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными (показаны одинаковым значком для всех работ без ссылок). Штрих-пунктирная (зелёная) линия - JENDL-3.2 (и ENDF/B-VII), пунктирная (фиолетовая) - JEF-2, короткие пунктиры (красная) - CENDL-3.

## Рекомендация

Оценка из библиотеки ENDF/B-VII рекомендуется для включения в библиотеку РОСФОНД<sup>5</sup>.

## Автор рекомендации

Проняев В.Г.

## 53.6. Йод-131

### Общие характеристики

Период полураспада: 8.0207 дн.

Моды распада:  $\beta^-$  100%.

Спин основного состояния: 7/2+

### Файлы оцененных нейтронных данных

Имеются две независимых оценки – первая 1982 г. выполненная рабочей группой для библиотеки JEF-2, вошла без изменений в JEFF-3.1 и послужила основой для нейтронных сечений основных реакций в библиотеке EAF-2003.

Вторая оценка выполненная другой рабочей группой в 1990 г. для библиотеки JENDL-3, в 2005 г. вошла без существенных изменений в библиотеку ENDF/B-VIIb2. В последней оценке сечения, в частности сечение захвата, описываются средними параметрами неразрешенных резонансов в интервале от 30 эВ до 100 кэВ; ниже 30 эВ сечение захвата подчиняется закону  $1/v$  при тепловом сечении 80 барн. Резонансный интеграл захвата равен 77.8 барн; тепловое сечение рассеяния – 3.6 барн. В оценке, принятой в JEFF-3.1, тепловое сечение захвата равно всего лишь 0.7 барна, а резонансный интеграл захвата – 8 барн. Различие в оцененных энергетических поведениях сечения захвата показано на рис.12.

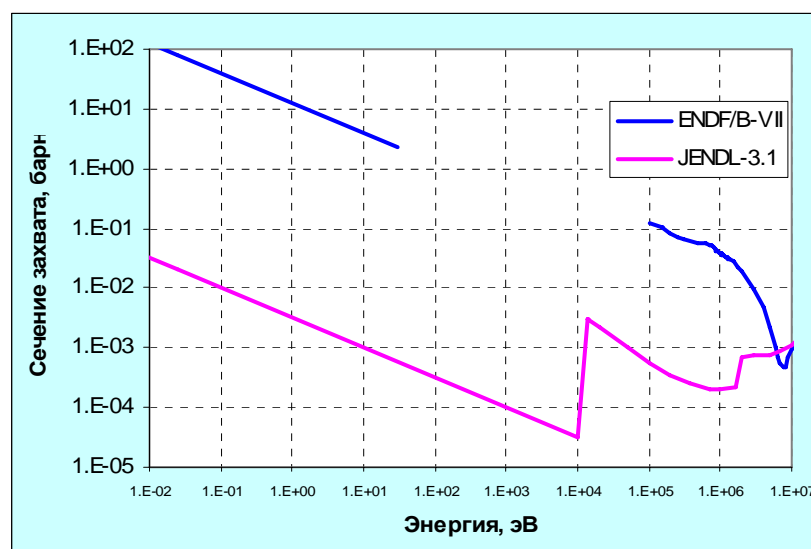


Рис.12. Сечение захвата йода-131  
(в области неразрешенных резонансов кривая прерывается)

<sup>5</sup> В РОСФОНДе из файла MF=9 исключена секция MT=107 поскольку изомеры сурьмы-124, вероятности которых описываются в этой секции, имеют короткие времена жизни. Исключен также файл MF=8, поскольку РОСФОНД не предусматривает рекомендацию распадных данных.

## Заключение

Оснований утверждать, что вторая оценка намного надежнее первой, разумеется, нет. Тем не менее, представляется целесообразным включить в РОСФОНД более позднюю оценку из ENDF/B-VIIb2, дополнив ее данными об образовании долгоживущих изомеров, оцененными на основе EAF-2003.

## Автор рекомендации

М.Н.Николаев

## 53.7. Йод-135

### Общие характеристики

Период полураспада: 6.57 ч.

Моды распада:  $\beta^-$  100%.

Спин основного состояния: 7/2+

Распадается в ксенон-135 с аномально высоким сечением захвата тепловых нейтронов.

### Файлы оцененных нейтронных данных

Имеются две независимых оценки – первая 1982 г. выполненная рабочей группой для библиотеки JEF-2, вошла без изменений в JEFF-3.1 и послужила основой для нейтронных сечений основных реакций в библиотеке EAF-2003.

Вторая оценка выполненная другой рабочей группой в 1990 г. для библиотеки JENDL-3, в 2005 г. вошла без существенных изменений в библиотеку ENDF/B-VIIb2. В последней оценке сечения, в частности сечение захвата, описываются средними параметрами неразрешенных резонансов в интервале от 30 эВ до 100 кэВ; ниже 30 эВ сечение захвата подчиняется закону  $1/v$  при тепловом сечении 80 барн. Резонансный интеграл захвата равен 34.6 барн; тепловое сечение рассеяния – 10.13 барн. В оценке, принятой в JEFF-3.1, тепловое сечение захвата равно всего лишь 0.02 барна, а резонансный интеграл захвата – 0.15 барн. Различие в оцененных сечениях захвата показано на рис.13. Заметим, что сечение захвата, принятое в JEFF-3.1 по крайней мере на порядок ниже, чем у близких к йоду-135 нейтронно-избыточных нечетно-четных ядер (например у цезия-135  $\sigma_c=8.9$  барн, у цезия-137  $\sigma_c=0.25$  барна).

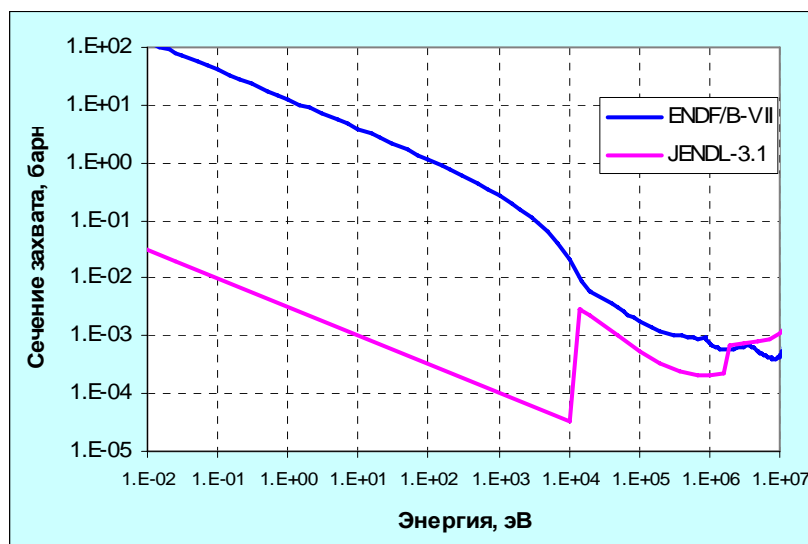


Рис.13. Сечение захвата йода-135

## Заключение

Целесообразно включить в РОСФОНД более позднюю оценку из ENDF/B-VIIb2.

## Автор рекомендации

М.Н.Николаев