

32. ГЕРМАНИЙ

Природный германий содержит 5 изотопов: ^{70}Ge , ^{72}Ge , ^{73}Ge , ^{74}Ge и ^{76}Ge (последний слабо радиоактивен). Кроме того имеется еще три долгоживущих радиоизотопа: ^{78}Ge , ^{79}Ge и ^{81}Ge .

Для стабильных изотопов германия используются следующие оценки:

JENDL-3.3 – оценка Ватанабе (T.Watanabe) 1994 г.;

JEFF-3.1 – оценка Кёнинга (A.J.Koning) 2004 г.;

ENDF/B-VIIb2 – оценка Яوامото, Хермана, Мухабхаба и др. (Iwamoto, Herman, Mughabghab et al) также 2004 г.

Для остальных изотопов имеются лишь оценки нейтронных сечений в EAF-2003.

Ниже будут рассматриваться данные из этих источников и, если будет возможно, будет проводиться сравнение с экспериментальными данными по сечению радиационного захвата.

32.1. Германий-68

Радиоактивен ($T_{1/2}=270.82\text{дн.}$). Распадается путем захвата орбитального электрона в галлий-68, а тот тем же путем – в цинк-68. В реакторах может образовываться в малых количествах путем реакции $^{70}\text{Ge}(n,3n)$ или цепочки реакций $^{70}\text{Ge}(n,2n)^{69}\text{Ge}_{(T_{1/2}=39\text{ч.})}(n,2n)$

Тепловое сечение и резонансный интеграл захвата, следующие из оценки EAF-2003, равны, соответственно, 5.5 барна и 2.9 барна.

Единственный экспериментальный результат – измерение теплового сечения захвата Крейном (Krane-99): 1 ± 0.5 барна.

На рис. 1 показана оцененная энергетическая зависимость сечения захвата. В РОСФОНД рекомендуется включить оценку, перенормированную в области энергий ниже 1 кэВ на экспериментальный результат. При этом сечение захвата и резонансный интеграл принимают значения 1.0 барн и 0.95 барна.

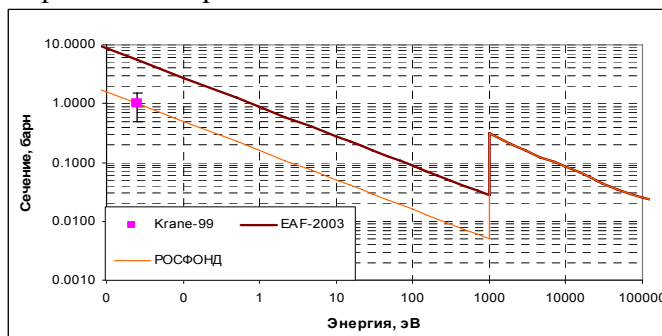


Рис.1. Сечение захвата
Заключение

Принять в РОСФОНД оценку EAF-2003 с измененным сечением захвата.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

32.2. Германий-69

Радиоактивен ($T_{1/2}=39.05$ ч.). Распадается путем захвата орбитального электрона в галлий-69. В реакторах может образовываться путем реакции $^{70}\text{Ge}(n,2n)$.

Тепловое сечение и резонансный интеграл захвата, следующие из оценки EAF-2003, равны, соответственно, 14 барн и 49 барн.

Экспериментальных данных для их проверки нет

На рис. 1 показана оцененная энергетическая зависимость сечения захвата.

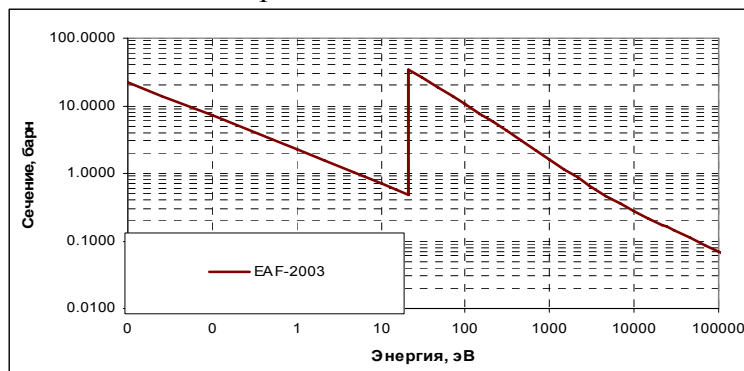


Рис.1. Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку EAF-2003.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

32.3. Германий-70

Содержание в естественной смеси – 20.37%.

Оценка Ватанабе является первой полной оценкой. Она содержит область разрешенных резонансов с параметрами, рекомендованными Мухабхабом в 1981 г. (23 резонанса¹ с максимальной энергией 38.4 кэВ описывают сечения до 15 кэВ). Область неразрешенных резонансов отсутствует. Данных об образовании фотонов нет.

Оценка Кёнинга содержит то же самое описание резонансной области. В пороговых реакциях детально описано возбуждение нескольких состояний ядер-продуктов. Энерго-угловые распределения всех континуальных реакций заданы секциями файла MF=6, содержащих данные об образовании фотонов.

В оценке ENDF/B-VIIb2 область разрешенных резонансов простирается до 14 кэВ и содержит параметры 18 s-резонансов¹ с максимальной энергией 40.3 кэВ и 3 p-резонансов с максимальной энергией 42.3 эВ.

Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата, следующие из оценок ENDF/B-VIIb2, JENDL-3.3 и EAF-2003, равны:

ENDF/B-VII	JENDL-3.3	EAF-2003
$\sigma_t=16.9$ барн	$\sigma_t=15.5$ барн	
$\sigma_{el}=13.9$ барн	$\sigma_{el}=12.6$ барн	
$\sigma_c=3.0$ барн	$\sigma_c=2.9$ барн	$\sigma_c=3.2$ барн
RI=2.5 барн	RI=2.4 барн.	RI=2.3 барн

¹ Включая связанное состояние

Экспериментальные данные по сечению захвата:

Mannhart-68: $\sigma_c = 3.15 \pm 0.16$ барн;

Alexander-63: $\sigma_c = 2.8 \pm 0.07$ барн;

Brooksbank-55: $\sigma_c = 3.9 \pm 1.2$;

Pomerance-52: $\sigma_c = 3.28 \pm 0.25$

не противоречат ни одной оценке.

На рис.1 показаны нарастающие суммы числа резонансов. Различие обусловлено не только выделением в новой оценке р-резонансов, но и отказом от трех слабых уровней.

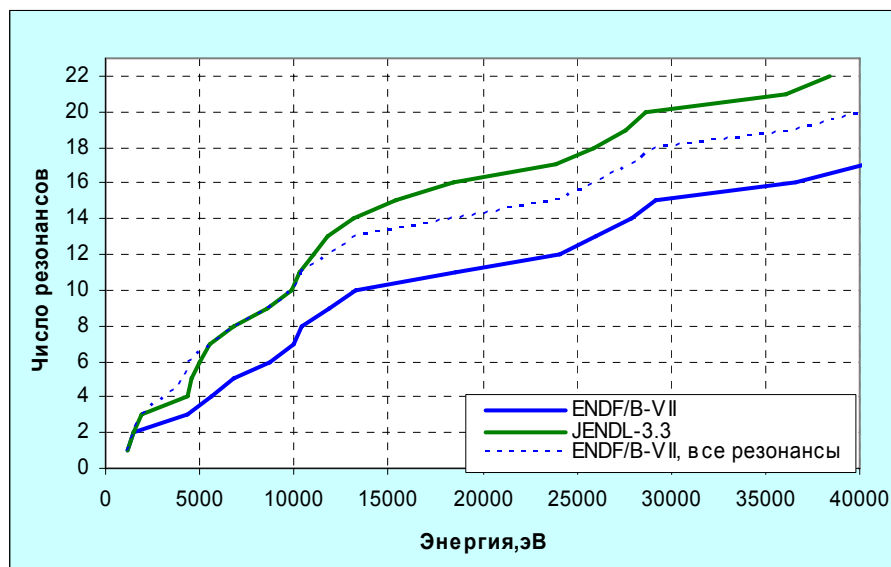


Рис.1. Нарастающая сумма числа резонансов.

Последнее видно из рис.2, где сравниваются суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов (в случае JENDL-3.3 – все резонансы – s).

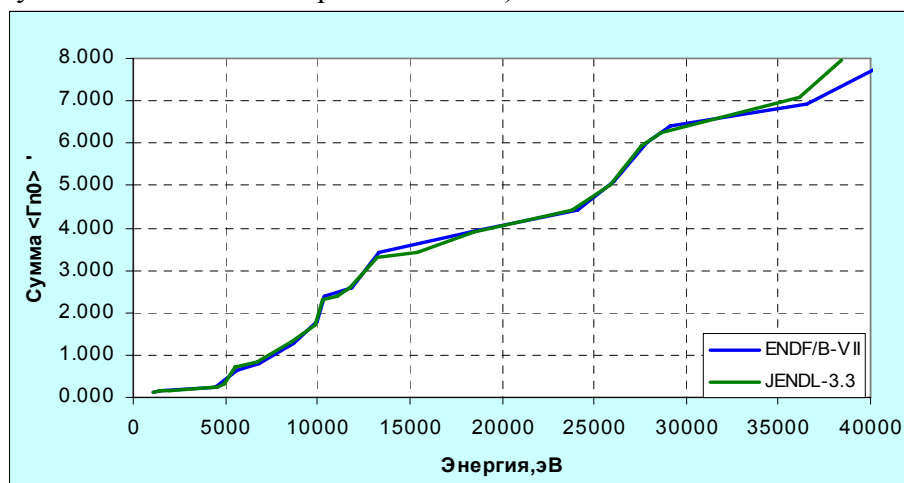


Рис.2. Сумма приведенных нейтронных ширин s-резонансов.

На рис. 3 показана оцененная энергетическая зависимость сечения захвата. Различие выше 3 кэВ обусловлено тем, что в ENDF/B-VII учтен пропуск уровней путем введения плавной подложки в файл MF=3. Экспериментальные данные Уолтера подтверждают необходимость этой подложки.

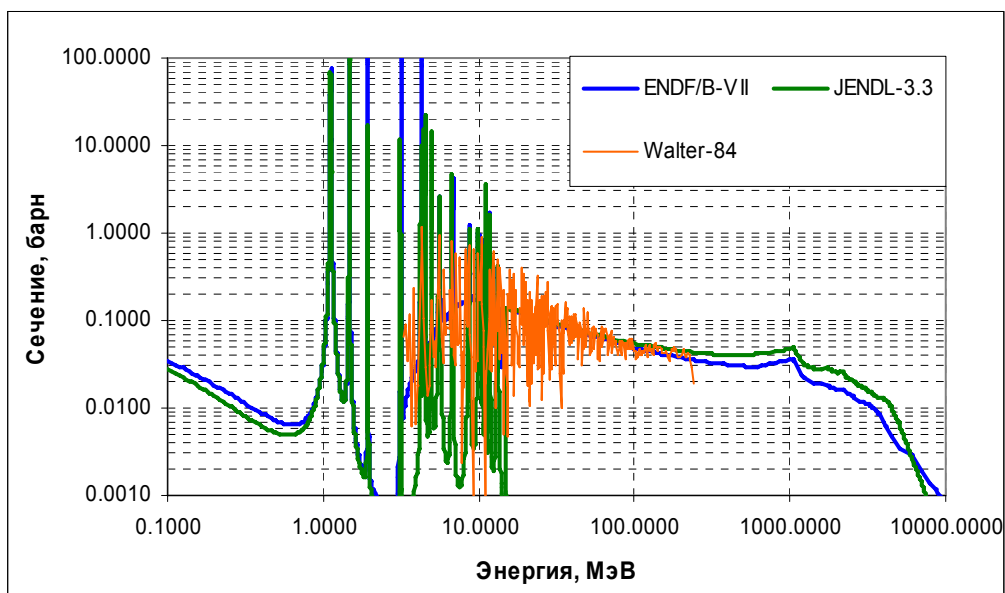


Рис.3а Сечение захвата

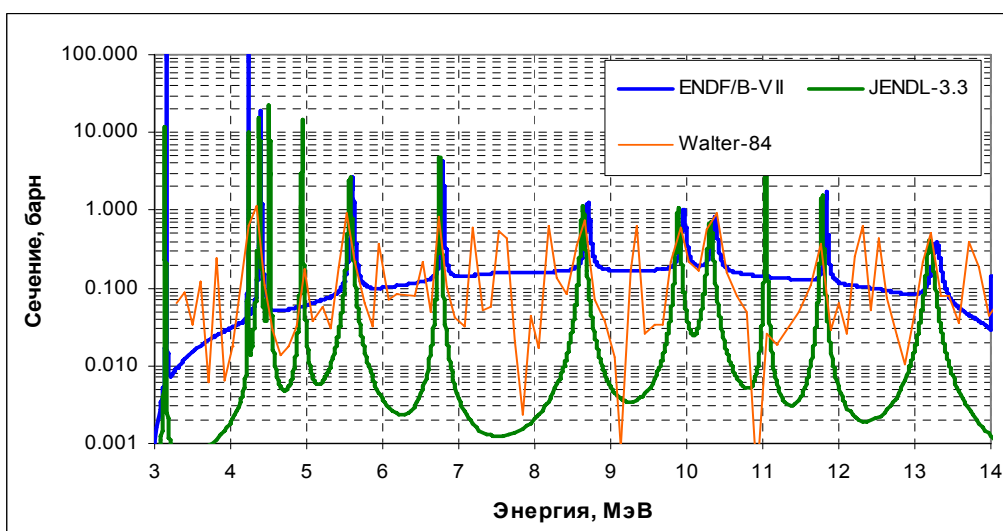


Рис.3б. Сечение захвата

Отметим, что в EXFORе имеются данные по полному сечению, сечениям реакций $(n,2n)$, (n,p) и (n,α) , а также по упругому рассеянию тепловых нейтронов. Сечение упругого рассеяния измерялось лишь Вертебным и др (1970) в тепловой точке. Полученный результат 8.8 ± 0.8 барна существенно ниже оценки.

Данные по пороговым реакциям согласуются с оцененными.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

32.4. Германий-71

Радиоактивен ($T_{1/2}=11.43$ дн.). Распадается путем захвата орбитального электрона в галлий-71. В реакторах может образовываться, главным образом, путем реакции $^{70}\text{Ge}(n,\gamma)$.

Тепловое сечение и резонансный интеграл захвата, следующие из оценки EAF-2003, равны, соответственно, 13 барн и 20 барн.

Экспериментальных данных для их проверки нет

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку EAF-2003. Сечения образования ядра-продукта в различных состояниях, содержащиеся в файле MF=10, сложить по подсекциям и сумму записать в соответствующую секцию файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 удалить.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

32.5. Германий-72

Содержание в естественной смеси – 27.31%.

Во всех современных оценках используется формально одинаковое описание области разрешенных резонансов: она содержит параметры 14 s-резонансов (включая связанное состояние) с максимальной энергией 39.5 кэВ) и трех p-резонансов с максимальной энергией 218 эВ. Однако границы области различны: в ENDF/B-VIIb2 она распространена только до 12 кэВ. Тогда как в двух других оценках – до 40 кэВ. Область неразрешенных резонансов присутствует только в оценке ENDF/B-VIIb2 и распространена до порога неупругого рассеяния – т.е. до 701.096 кэВ. Учтены вклады s-, p- и d-волн.

Данных об образовании фотонов содержатся только в ENDF/B-VIIb2 и в JEFF-3.1. В последнем случае они включены в секции файла MF=6.

Файл данных JEFF-3.1 описывает область энергий до 200 МэВ4 остальные – до 20 МэВ. В JEFF-3.1 содержатся данные о таких экзотических реакциях, как (n,2p), (n,2 α), и (n,p α), первая из которых обладает максимальным сечением, составляющим при 20 МэВ 5 микробарн.

Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата, следующие из оценок ENDF/B-VIIb2, JENDL-3.3 и JEFF-3.1, естественно, весьма близки:

ENDF/B-VIIb2	JENDL-3.3
$\sigma_t=9.814$ барн	$\sigma_t=9.975$ барн
$\sigma_{el}=8.928$ барн	$\sigma_{el}=9.165$ барн
$\sigma_c=0.886$ барн	$\sigma_c=0.810$ барн
RI=0.828 барн	RI=0.746 барн

Экспериментальные данные по сечению захвата:

Koester-87: $\sigma_c=0.8\pm0.02$ барн;

Pomerance-52: $\sigma_c=0.94\pm0.09$

не противоречат оценкам.

На рис.1 показана нарастающая сумма числа резонансов. Очевидно наличие пропуска уровней при энергиях выше 12 кэВ. Судя по рис. 2, на котором изображена

нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин,, пропущенные резонансы имеют малые ширины; однако поскольку нейтронные ширины в среднем много больше радиационных, резонансы с малыми нейтронными ширинами должны давать большой вклад в резонансный интеграл захвата. Это объясняет и обосновывает снижение границы области разрешенных резонансов в ENDF/B-VII и введение в этой оценке области неразрешенных резонансов.

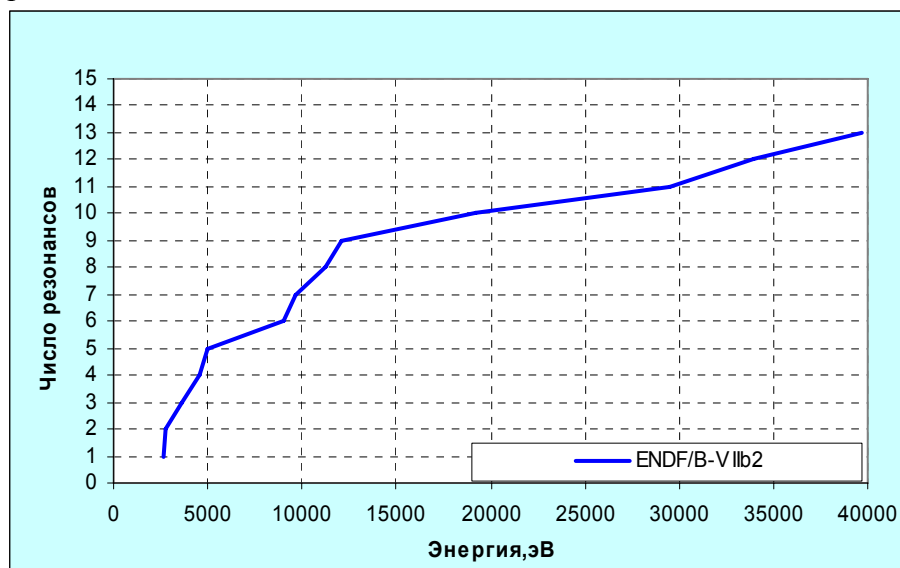


Рис.1. Нарастающая сумма числа s-резонансов.

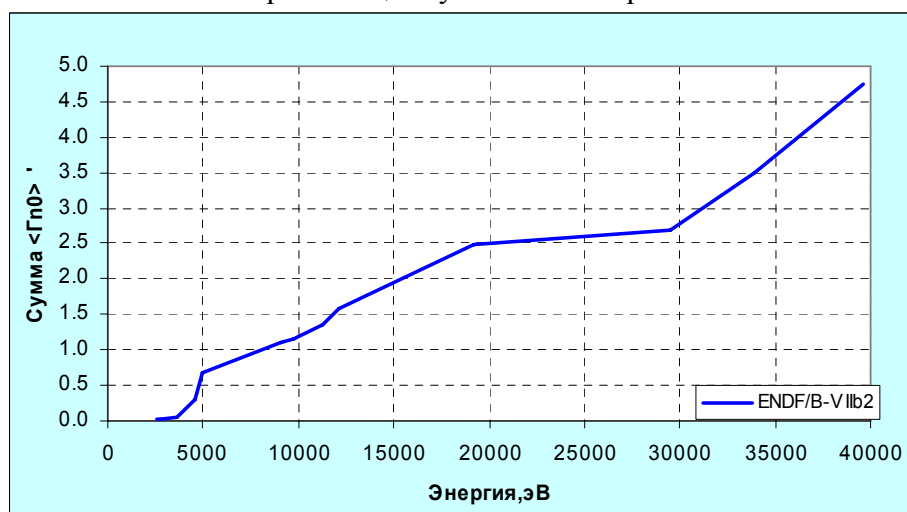


Рис.2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин s-резонансов

На рис. 3 показаны оцененные энергетические зависимости сечения захвата. Экспериментальные данные отсутствуют.

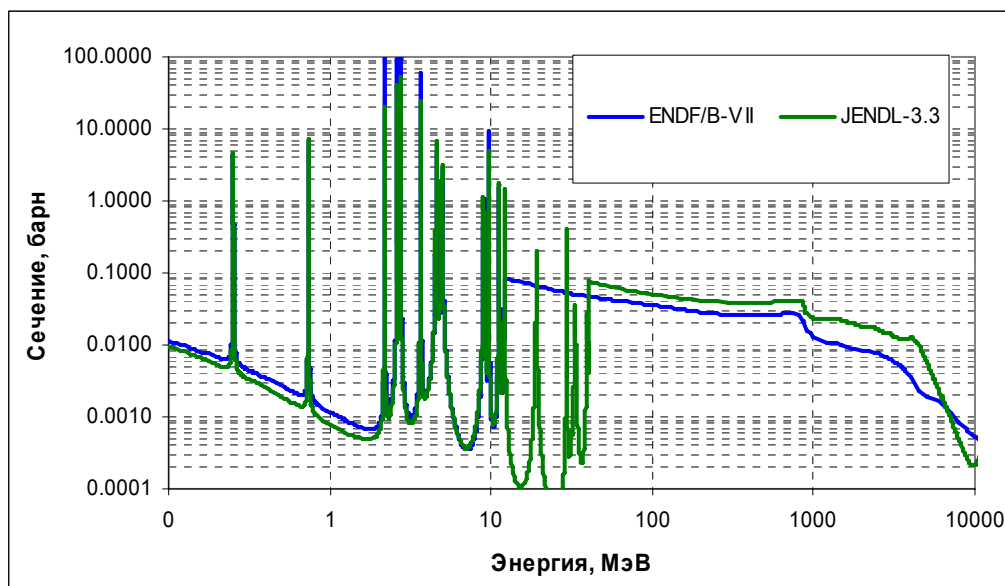


Рис.3 Сечение захвата

Отметим, что в EXFORе имеются данные по полному сечению, сечениям (n,p) и (n, α), а также по упругому рассеянию тепловых нейтронов. Сечение упругого рассеяния измерялось лишь Вертебным и др (1970) в тепловой точке. Полученный результат 7.5 ± 0.8 барна заметно ниже оценки.

Данные по пороговым реакциям не противоречат оцененным.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2.

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

32.6. Германий-73

Содержание в естественной смеси – 7.76%.

Во всех современных оценках используется формально одинаковое описание области разрешенных резонансов: везде содержатся параметры 49 резонансов. В JEFF-3.1 и в JENDL-3.3 все эти резонансы считаются s-резонансами, два из них являются связанными состояниями. В ENDF/B-VII всего 46 s-резонансов (из них одно связанное состояние) и 3 p-резонанса. Границы области несколько различны: в ENDF/B-VIIb2 она распространена до 8630 эВ, тогда как в двух других оценках – до 8530 эВ. Область неразрешенных резонансов присутствует только в оценке ENDF/B-VIIb2 и распространена до порога неупругого рассеяния – т.е. до 13.468 кэВ. Учтены вклады s-, p- и d-волн.

Данных об образовании фотонов содержатся только в ENDF/B-VIIb2 и в JEFF-3.1. В последнем случае они включены в секции файла MF=6.

Файл данных JEFF-3.1 описывает область энергий до 200 МэВ, остальные – до 20 МэВ. В JEFF-3.1 содержатся данные о таких экзотических реакциях, как (n,2p), (n,2 α), и (n,p α), первая из которых обладает максимальным сечением, составляющим при 20 МэВ 1 микробарн.

Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата, следующие из оценок ENDF/B-VIIb2, JENDL-3.3 и JEFF-3.1, естественно, весьма близки:

ENDF/B-VIIb2

JENDL-3.3

$\sigma_t=19.5$ барн

$\sigma_t=19.2$ барн

$\sigma_{el}=4.8$ барн

$\sigma_{el}=4.8$ барн

$\sigma_c=14.7$ барн

$\sigma_c=14.4$ барн

RI=62.8 барн

RI=62.2 барн

Экспериментальные данные по сечению захвата:

Koester-87: $\sigma_c=14.4\pm0.4$ барн;

Pomerance-52: $\sigma_c=13.8\pm1.1$

не противоречат оценкам.

На рис.1 показана нарастающая сумма числа резонансов. Очевидно наличие пропуска уровней при энергиях выше 3 кэВ. Судя по рис. 2, на котором изображена нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин, пропущенные резонансы имеют малые ширины; однако поскольку нейтронные ширины в среднем много больше радиационных, резонансы с малыми нейтронными ширинами должны давать большой вклад в резонансный интеграл захвата. Это заставляет усомниться в обоснованности распространения области разрешенных резонансов до 8.5 - 8.6 кэВ без какой-либо компенсации вклада пропущенных резонансов в сечение захвата.

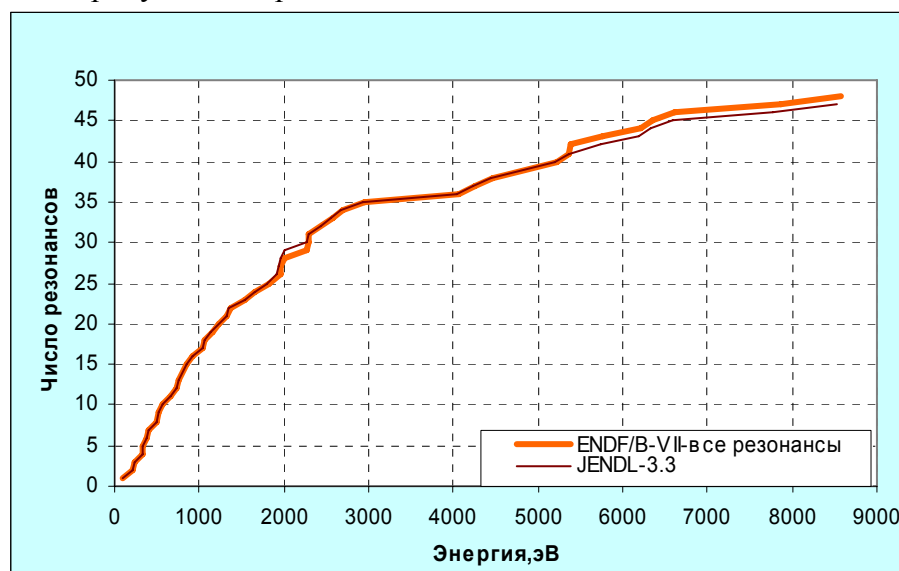


Рис.1. Нарастающая сумма числа s-резонансов.

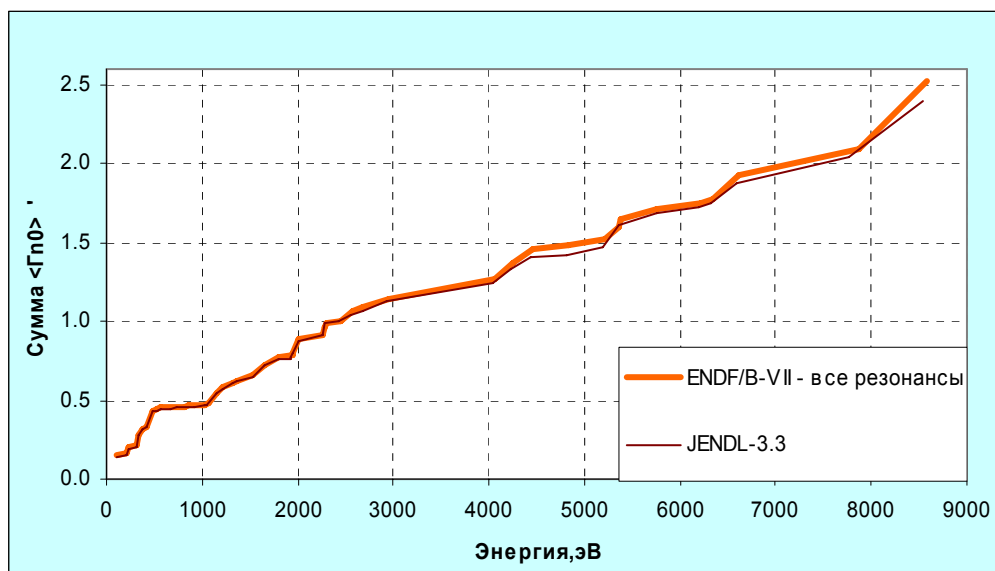


Рис.2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин s-резонансов

На рис. 3 сравниваются оцененные энергетические зависимости сечения захвата ENDF/B-VII и JENDL-3.3. Приведена также оценка, в которой область разрешенных резонансов ограничена 3 кэВ, а выше начинается область неразрешенных резонансов. И там и там использованы параметры ENDF/B-VII. Жирными отрезками показаны результаты усреднения сечений ENDF/B-VII по интервалам 1 - 3 кэВ и 3 - 8.6 кэВ. Видно, что во втором из них сечение явно занижено и этого удастся избежать, описав поведение сечений в этой области средними резонансными параметрами. В интервале 1 – 3 кэВ среднее сечение, рассчитанное по параметрам разрешенных резонансов удовлетворительно «стыкуется» с данными при более высоких энергиях.

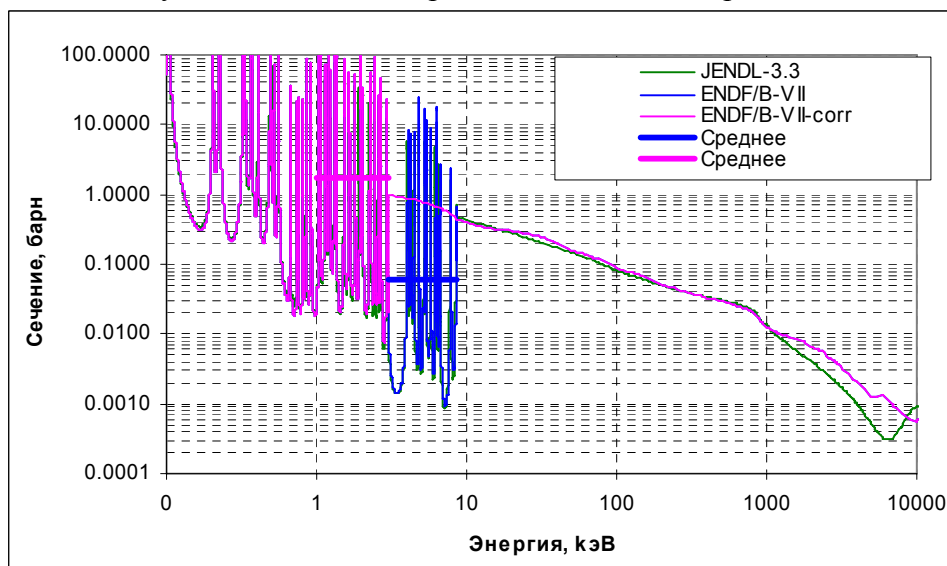


Рис.3 Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2, ограничив область разрешенных резонансов 3 кэВ и снизив до этой энергии нижнюю границу области неразрешенных резонансов.

32.7. Германий-74

Содержание в естественной смеси –36.73% .

Область разрешенных резонансов в JEFF-3.1 и в JENDL-3.3 содержит параметры 10 s-резонансов (в том числе одно связанное состояние), тогда как в ENDF/B-VII описано на один резонанс больше: присутствует очень слабый резонанс при 4.17 кэВ. В предыдущих оценках этот резонанс рассматривается как p-резонанс. Параметры s-резонансов в этих оценках слегка различаются. Главное различие в том, что область разрешенных резонансов в JENDL-3.3 распространена до 62 кэВ, т.е. включает даже последний – сильный – резонанс при 61 кэВ; в ENDF/B-VII эта область ограничена 6.0 кэВ и включает только пять резонансов (в том числе связанное состояние).

В отличие от предыдущих оценок, в ENDF/B-VII введена область неразрешенных резонансов, простирающаяся до порога неупругого рассеяния -60.4 кэВ.

Данных об образовании фотонов содержатся только в ENDF/B-VIIb2 и в JEFF-3.1. В последнем случае они включены в секции файла MF=6.

Файл данных JEFF-3.1 описывает область энергий до 200 МэВ, остальные – до 20 МэВ. В JEFF-3.1 содержатся данные о таких экзотических реакциях, как (n,2p), (n,2 α), и (n,p α), первая из которых обладает максимальным сечением, составляющим при 20 МэВ 1 микробарн.

Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата, следующие из оценок ENDF/B-VIIb2, JENDL-3.3 и JEFF-3.1, таковы:

ENDF/B-VIIb2	JENDL-3.3
$\sigma_t=7.74$ барна	$\sigma_t=7.27$ барна
$\sigma_{el}=7.22$ барна	$\sigma_{el}=6.85$ барна
$\sigma_c=0.52$ барна	$\sigma_c=0.42$ барна
RI=0.61 барна	RI=0.42 барна

Экспериментальные данные по сечению захвата:

Koester-87: $\sigma_c=0.4\pm0.2$ барн;

Brooksbank-55 $\sigma_c=0.53\pm0.1$ барн;

Pomerance-52: $\sigma_c=0.6\pm0.06$

в пределах немалых погрешностей согласуются друг с другом и не противоречат оценкам

На рис.1 показана нарастающая сумма числа резонансов. Очевидно наличие пропуска уровней при энергиях выше 3 кэВ. Судя по рис. 2, на котором изображена нарастающая сумма приведенных нейтроновых ширин, пропущенные резонансы имеют малые ширины; однако поскольку нейтронные ширины в среднем много больше радиационных, резонансы с малыми нейтронными ширинами должны давать большой вклад в резонансный интеграл захвата. Это заставляет усомниться в обоснованности распространения области разрешенных резонансов до 8.5 - 8.6 кэВ без какой-либо компенсации вклада пропущенных резонансов в сечение захвата.

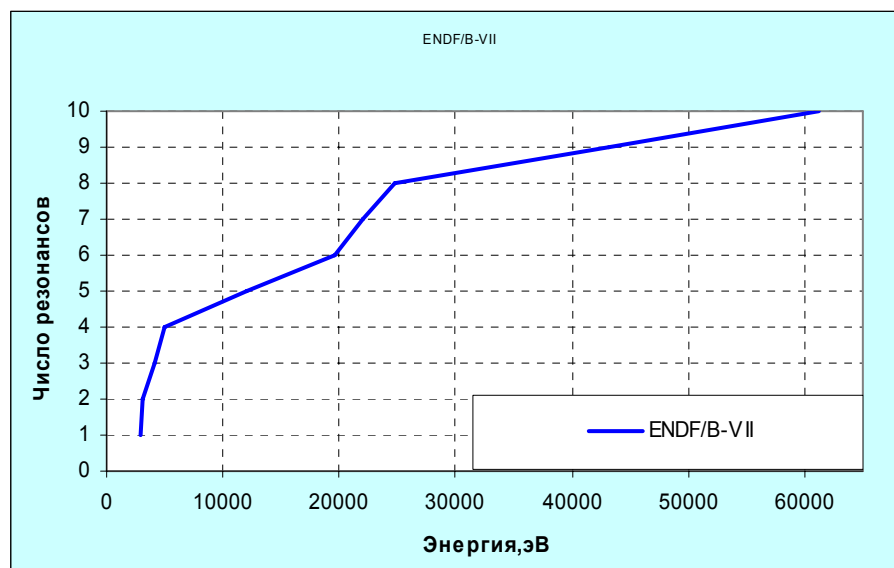


Рис.1. Нарастающая сумма числа s-резонансов.

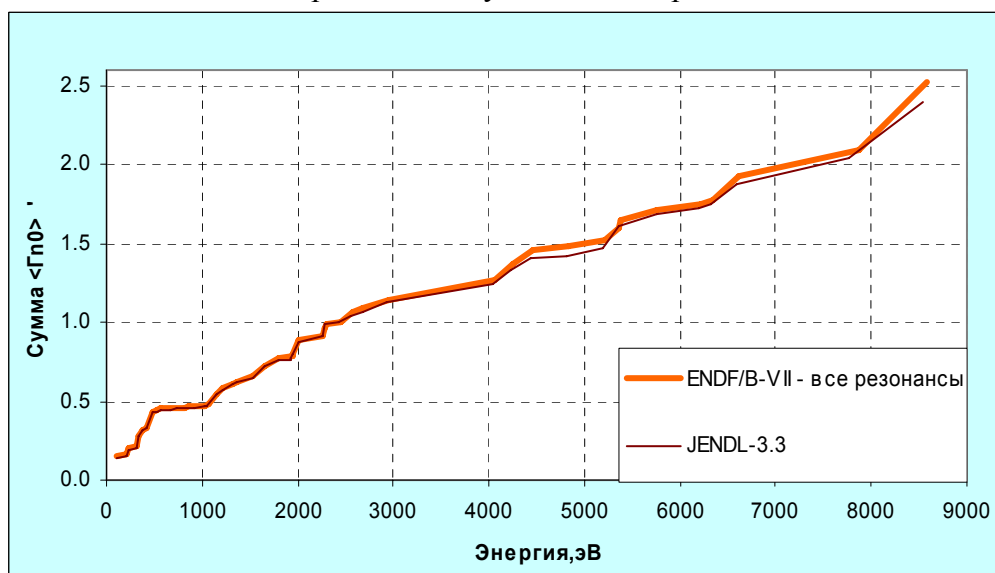


Рис.2. Нарастающая сумма приведенных нейтронных ширин s-резонансов

На рис. 3 сравниваются оцененные энергетические зависимости сечения захвата ENDF/B-VII и JENDL-3.3 друг с другом и с экспериментальными данными. Рисунок показывает, что несмотря на кажущееся из рис.2 отсутствие пропуска сильных уровней, влияние э того пропуска на сечение захвата весьма велико. Снижение границы области разрешенных резонансов, предпринятое в оценке ENDF/B-VII, представляется вполне оправданным, хотя более корректным было бы учесть через средние резонансные параметры вклад только неразрешенных р-резонансов а структуру, обусловленную разрешенными s-резонансами. К сожалению, современный формат ENDF/B не позволяет этого сделать.

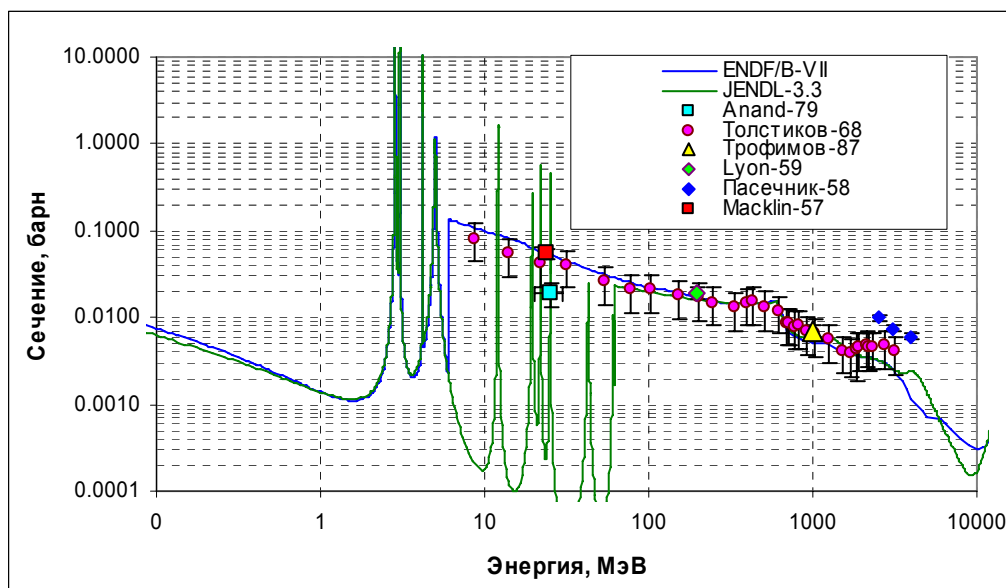


Рис.3 Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2

Автор рекомендации

Николаев М.Н.

32.8. Германий-76

Содержание в естественной смеси –7.44%. Очень слабо радиоактивен ($T_{1/2}=1.53 \cdot 10^{21}$ лет). Испытывает бета-распад в мышьяк-76, а тот- в селен-76.

Область разрешенных резонансов в JEFF-3.1 и в JENDL-3.3 содержит параметры 10 s-резонансов (в том числе одно связанное состояние), тогда как в ENDF/B-VII описано на один резонанс больше: дополнительно присутствует сравнительно узкий резонанс при 6.177 кэВ. Параметры s-резонансов в сравниваемых оценках слегка различаются. Главное различие в том, что область разрешенных резонансов в JENDL-3.3 распространена до 50 кэВ, т.е. включает даже последний – сильный – резонанс при 47.7 кэВ; в ENDF/B-VII эта область ограничена 3.0 кэВ и включает все резонансы, кроме последнего резонансов.

В отличие от предыдущих оценок, в ENDF/B-VII введена область неразрешенных резонансов, простирающаяся до порога неупругого рассеяния – 570.4 кэВ.

Данных об образовании фотонов содержатся только в ENDF/B-VIIb2 и в JEFF-3.1. В последнем случае они включены в секции файла MF=6.

Файл данных JEFF-3.1 описывает область энергий до 200 МэВ; остальные – до 20 МэВ.

Тепловые сечения и резонансные интегралы захвата, следующие из оценок ENDF/B-VIIb2, JENDL-3.3 и JEFF-3.1, таковы:

ENDF/B-VIIb2

$\sigma_t=8.57$ барна

$\sigma_{el}=8.42$ барна

$\sigma_c=0.15$ барна

RI=1.33 барна

JENDL-3.3

$\sigma_t=7.91$ барна

$\sigma_{el}=7.76$ барна

$\sigma_c=0.15$ барна

RI=1.30 барна

Экспериментальные данные по сечению захвата сильно разбросаны. Ниже приводятся как данные по полному сечению захвата, так и по захвату с образованием ^{77}Ge в основном ($T_{1/2}=11.3$ ч.) и в изомерном ($T_{1/2}=53$ сек) состояниях.

Brooksbank-55 $\sigma_c=0.30\pm0.06$ барн;
 Pomerance-52: $\sigma_c=0.35\pm0.07$ барн;
 Seren-47: $\sigma_c=0.085\pm0.017$ барн;
 Heft-78: $\sigma_c=0.055\pm0.001$ барн (G);
 Heft-78: $\sigma_c=0.038\pm0.001$ барн (M);
 Der Mateosian-62: $\sigma_c=0.076\pm0.015$ барн (G);
 Der Mateosian-62: $\sigma_c=0.087\pm0.015$ барн (M);
 Mannhart-68: $\sigma_c=0.086\pm0.009$ барн (M);

При столь большом разбросе результатов принятая оценка представляется приемлемой.

На рис. 1 сравниваются оцененные энергетические зависимости сечения захвата ENDF/B-VII и JENDL-3.3 друг с другом и с экспериментальными данными. Ясно виден дополнительный резонанс. Судя по экспериментальным данным, полученным при 25 кэВ, сечение захвата в верхней части области разрешенных резонансов несколько недооценивается.

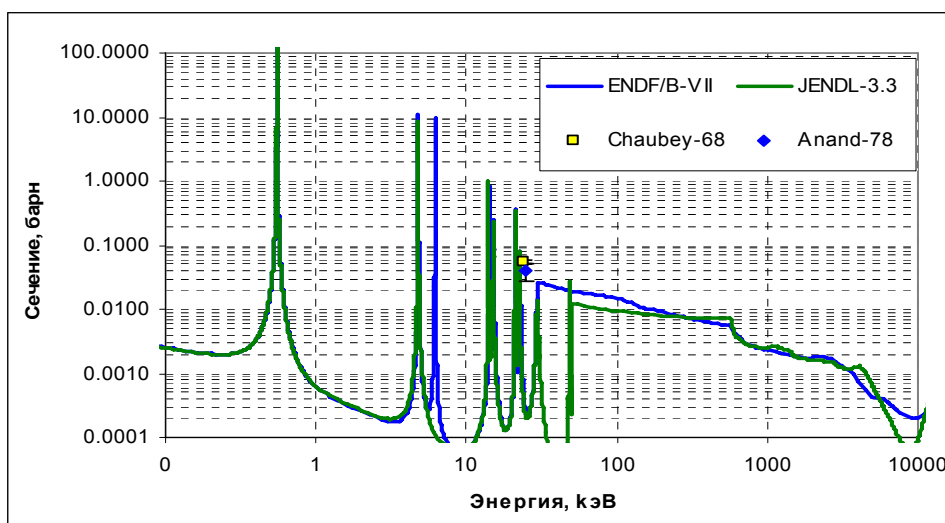


Рис.1 Сечение захвата

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку ENDF/B-VIIb2

Автор рекомендации
 Николаев М.Н.