

51. Сурьма

Рассмотрение состояния дел по нейтронным данным для всех изотопов сурьмы выполнено В.Г.Проняевым. Им же выданы рекомендации о включении файлов оцененных данных в РОСФОНД. Подстрочные примечания о необходимости введения данных о вероятностях образования долгоживущих изомеров сделаны М.Н.Николаевым.

51.1. Сурьма-119

В реакторах может образоваться за счет реакции $^{121}\text{Sb}(n,3n)$ или цепочки из двух реакций $(n,2n)$ через долгоживущий изотоп $^{120}\text{Sb}^m$.

Период полураспада: (38.19 ± 0.22) дней.

Моды распада: e^- 100%.

Спин основного состояния: $5/2^+$.

Файлы

JEFF-3.1/A= EAF-2003 – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки, основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3. Другие файлы представляют библиотеки данных по распаду и не содержат оценок нейтронных сечений.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{119}Sb из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 1. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

Файл ^{119}Sb из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД¹.

¹ Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Вести файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{120}\text{Sb}^m$, $^{119}\text{Sn}^m$, $^{117}\text{Sn}^m$, используя данные из файла MF=10. Файл MF=10 исключить. – М.Н.

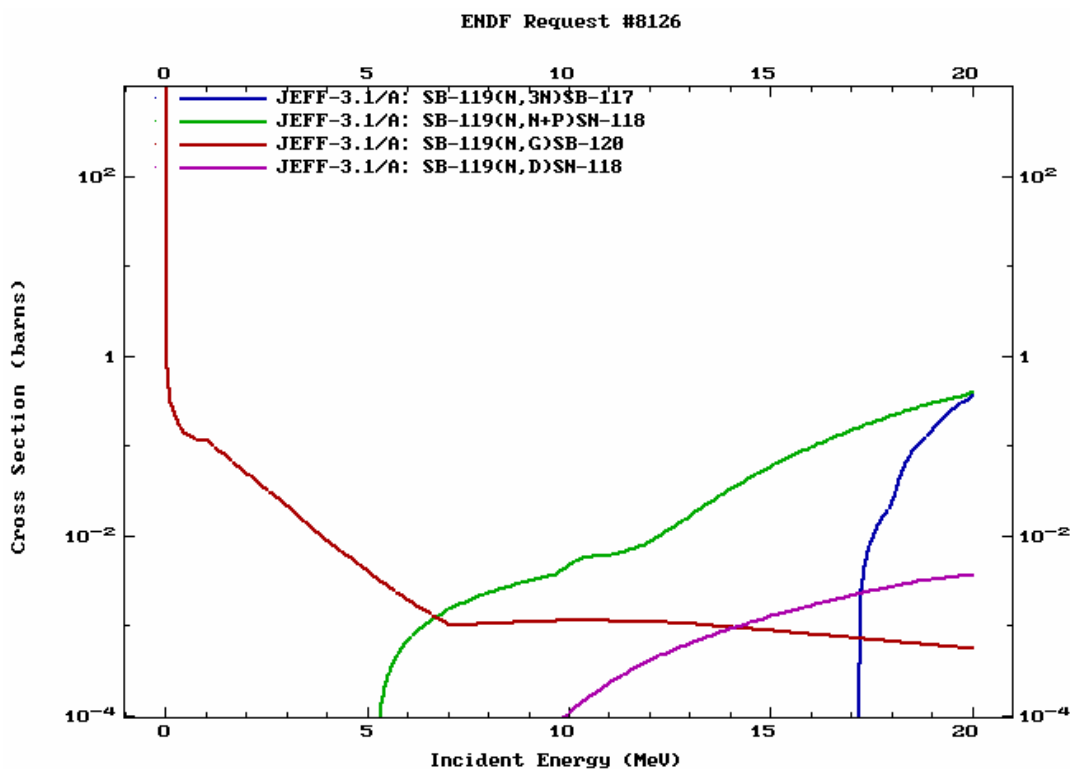


Рис. 1. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

51.2. Сурьма-120m

Долгоживущий изомер. В реакторах может образоваться за счет реакции $^{121}\text{Sb}(n,2n)$,
Период полураспада: 5.76 дн.

Моды распада: e^- 100%.

Спин основного состояния: 8^- .

Файлы

JEFF-3.1/A= EAF-2003 – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки, основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3. Другие файлы представляют библиотеки данных по распаду и не содержат оценок нейтронных сечений.

Данные

Экспериментальные данные отсутствуют. Оцененные сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

Файл $^{120}\text{Sb}^m$ из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД².

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

51.3. Сурьма-121

В ядерном топливе образуется как продукт деления.

Анализ данных подготовлен на основе заключения подгруппы 21 международной группы по оценке сечений (К. Шибата, 2003, <http://www.nndc.bnl.gov/sg21/rev/sb121.doc>).

Содержание в естественной смеси: $0.5721 \pm 0.0005\%$.

Спин основного состояния: $5/2^+$.

Файлы

CENDL-3: оценка 1997 года;

ENDF/B-VI: оценка 2000 года;

JEFF-2.2: оценка 1982 года с данными для сечения производства заряженных частиц взятыми из библиотеки REAC-ECN-4 и другими данными взятыми из библиотеки ENDF/B-V;

JENDL-3.2: оценка 1994 года;

JENDL-3.3: оценка взята из JENDL-3.2;

JEFF-3.0 оценка взята из JENDL-3.2;

ENDF/B-VIIb2: оценка в области разрешённых резонансов выполнена на основе Атласа-2006 (С. Мухабхаб), оценка в области быстрых нейтронов взята из CENDL-3.

Тепловая и резонансная область

CENDL-3: Область разрешённых и неразрешённых резонансов (MF1) взята из библиотеки JENDL-3.2.

ENDF/B-VI: область разрешённых резонансов расположена ниже 2.5261 кэВ и область неразрешённых резонансов – от 2.5261 до 37.4399 кэВ. Параметры оценены Мухабхабом в 1999 году.

JEFF-2.2: разрешённые резонансные параметры взяты из BNL-325 (1981) до энергии в 0.92223 кэВ; область неразрешённых резонансов отсутствует.

JENDL-3.2: область разрешённых резонансов ниже 2 кэВ, а неразрешённая резонансная область от 2 до 100 кэВ.

ENDF/B-VIIb2: оценка Мухабхаба (Атлас-2006) в области разрешённых резонансов (до 5.4 кэВ), оценка JENDL-3.2 в области неразрешённых резонансов (5.4 – 100 кэВ). Статистический анализ распределений резонансов и их ширин показывает небольшой

² Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Вести файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера $^{119}\text{Sn}^m$, используя данные из файла MF=10. Файл MF=10 исключить. – М.Н.

пропуск s- резонансов и более заметный пропуск p- резонансов имеющих малую нейтронную ширину.

Сравнение тепловых сечений и резонансных интегралов захвата показано в таблице 1.

Таблица 1. Тепловые сечения и резонансный интеграл (барн, 300K).

Библиотека	Полное	Упругое	Захват	Резонансный интеграл захвата
JENDL-3.2	9.5999	3.6056	5.9943	213.61
ENDF/B-VI	9.7271	3.8246	5.9025	205.39
JEF-2.2	9.6942	3.7785	5.9157	206.24
CENDL-3	9.5999	3.6056	5.9943	213.61
BNL-325			5.9±0.2	200±20
ENDF/B-VIIb2	9.7964	4.0258	5.7706	206
Atlas-2006			5.77±0.11	202±20

Оценка ENDF/B-VIIb2 является наилучшей в области разрешённых резонансов и рекомендуется для включения в РОСФОНД.

Область быстрых нейтронов

CENDL-3: оценка основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Прямые процессы для неупругого нейтронов оценивались в приближении DWBA. Оценки сечения (n,2n) и захвата основаны на имеющихся экспериментальных данных. Сечение упругого рассеяния получено как разность между полным сечением и суммой сечений всех других реакций.

ENDF/B-VI: оценка основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Сечение захвата оценено на основе имеющихся экспериментальных данных. Для оценки вклада прямых процессов в неупругое рассеяние нейтронов использовался метод сильной связи каналов. Параметры оптической модели определялись из описания угловых распределений упругого рассеяния и полного сечения на природной сурьме. Сечения приведены до энергии 30 МэВ.

JEF-2.2: основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Более детальная информация отсутствует.

JENDL-3.2: основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Прямые процессы для неупругого нейтронов оценивались в приближении DWBA. Вклад прямых-полупрямых процессов в сечение захвата оценивался в рамках феноменологической модели. Сечение упругого рассеяния получено как разность между полным сечением и суммой сечений всех других реакций.

На рисунке 2 показаны результаты оценки полного сечения из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными для естественной сурьмы. Наилучшее согласие наблюдается для библиотеки JENDL-3.3 (JENDL-3.2).

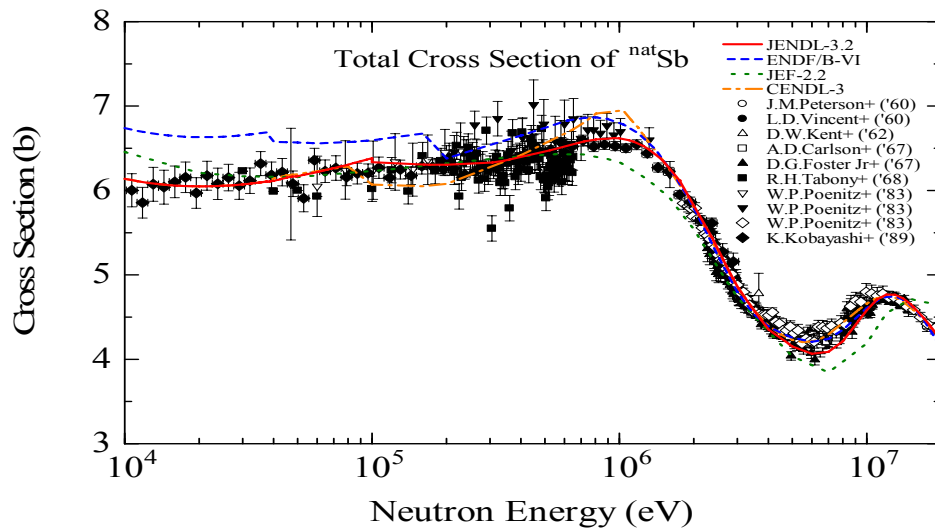


Рис. 2. Полные сечения для ^{121}Sb из разных библиотек в сравнении с экспериментальными данными для естественной сурьмы.

Сравнение сечения упругого рассеяния для ^{121}Sb из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными на естественной сурьме показано на рисунке 3. Оценка ENDF/B-VI как для полного, так и для упругого сечений проходит выше экспериментальных данных при энергии ниже одного МэВ, которые, вероятно, содержат трудноотделимый вклад от неупругого рассеяния нейтронов с возбуждением на первом уровне.

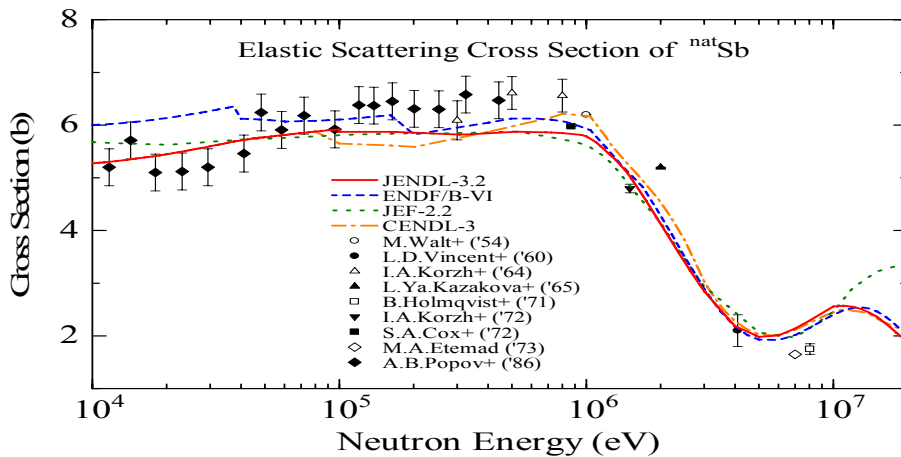


Рис. 3. Сечение упругого рассеяния для ^{123}Sb из разных библиотек в сравнении с экспериментальными данными для естественной сурьмы.

На рисунке 4 показано сравнение сечения захвата для ^{121}Sb из разных библиотек с экспериментальными данными имеющимися для этого изотопа. Как видно, ENDF/B-VIIb2 (CENDL-3) лучше всего описывает сечение.

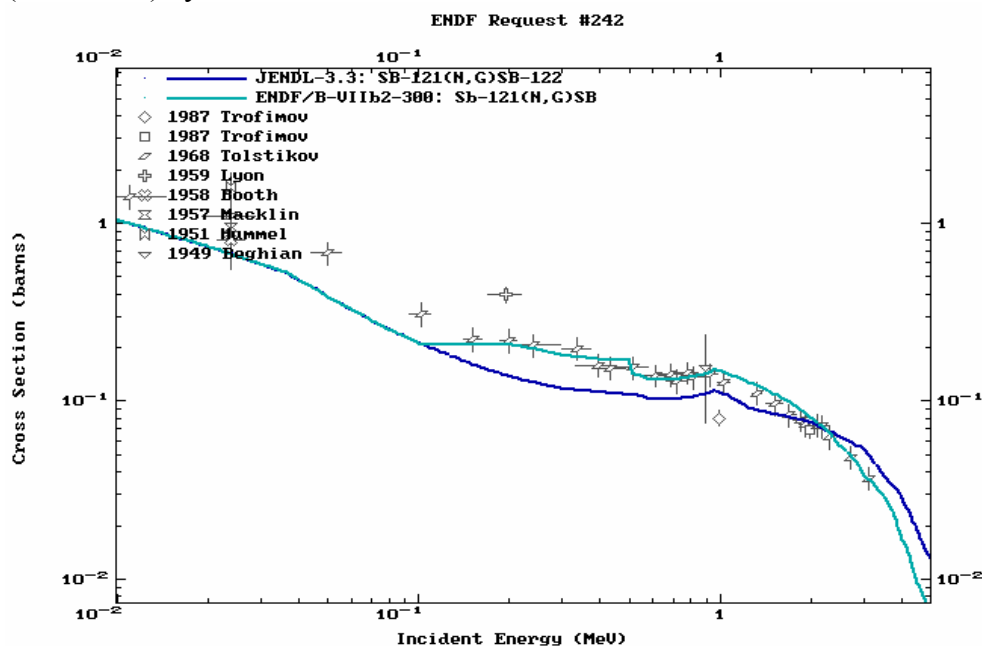


Рис. 4. Сечение захвата для ^{121}Sb из разных библиотек в сравнении с экспериментальными данными.

В оценке библиотеки CENDL-3 энерго-угловые распределения вторичных частиц представлены наиболее детально. Учитывая всё это, а также появление новой оценки Мухабхаба для резонансных параметров принятой в ENDF/B-VIIb2, можно рекомендовать файл из библиотеки ENDF/B-VIIb2 для библиотеки РОСФОНД³. Этот файл содержит средние резонансные параметры для области неразрешённых резонансов из библиотеки JENDL-3.3 (JENDL-3.2) и сечения в быстрой области включая энерго-угловые распределения вторичных частиц из библиотеки CENDL-3.

Автор рекомендации
Проняев В.Г.

³ Вести файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{119}\text{Sn}^m$, $^{120}\text{Sb}^m$, $^{121}\text{Sn}^m$, используя данные из файла MF=10 из библиотеки EAF-2003. – М.Н.

51.4.Сурьма-122

В ядерном топливе образуется, главным образом, в результате захвата нейтронов в олове-121. Непосредственный выход при делении ничтожно мал ($\sim 10^{-9}$).

Период полураспада: (2.7238 ± 0.0002) дней.

Моды распада: α 2.41%; β 97.59%.

Спин основного состояния: 2^- .

Файлы

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3. Другие файлы представляют библиотеки данных по распаду и не содержат оценок нейтронных сечений.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{122}Sb из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 5. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

Файл ^{122}Sb из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁴.

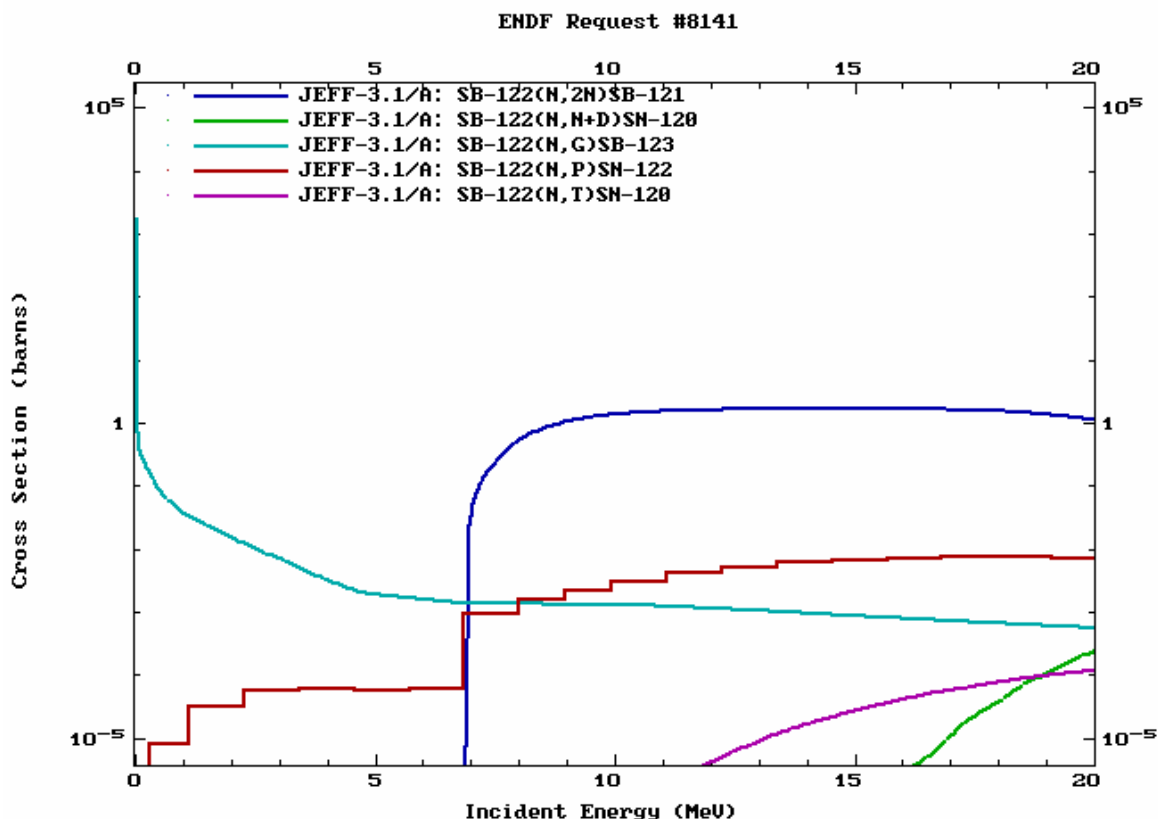


Рис. 5. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A.

⁴ Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Вести файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущих изомеров $^{120}\text{Sb}^m$ и $^{121}\text{Sn}^m$, используя данные из файла MF=10. Файл MF=10 исключить. – М.Н.

51.5. Сурьма-123

В ядерном топливе образуется как продукт деления.

Анализ данных подготовлен на основе заключения подгруппы 21 международной группы по оценке сечений (К. Шибата, 2003, <http://www.nndc.bnl.gov/sg21/rev/sb123.doc>).

Содержание в естественной смеси: $0.4279 \pm 0.0005\%$.

Спин основного состояния: $7/2^+$.

Файлы

CENDL-3: оценка 1999 года;

ENDF/B-VI: оценка 2000 года;

JEFF-2.2: оценка 1982 года с данными для сечения производства заряженных частиц взятыми из библиотеки REAC-ECN-4 и другими данными взятыми из библиотеки ENDF/B-V;

JENDL-3.2: оценка 1994 года;

JENDL-3.3: оценка взята из JENDL-3.2;

JEFF-3.0 оценка взята из JENDL-3.2;

ENDF/B-VIIb2: оценка в области разрешённых резонансов выполнена на основе Атласа-2006 (С. Мухабхаб), оценка в области быстрых нейтронов взята из CENDL-3.

Тепловая и резонансная область

CENDL-3: Область разрешённых и неразрешённых резонансов (MF1) взята из библиотеки JENDL-3.2, при этом была допущена ошибка в знаке для энергии первого связанного состояния (+17 эВ вместо -17 эВ).

ENDF/B-VI: область разрешённых резонансов расположена ниже 2.479 кэВ и область неразрешённых резонансов – от 2.479 до 161 кэВ. Параметры оценены Мухабхабом в 1999 году.

JEFF-2.2: разрешённые резонансные параметры взяты из BNL-325 (1981) до энергии в 1.5096 кэВ, область неразрешённых резонансов отсутствует.

JENDL-3.2: область разрешённых резонансов ниже 2.5 кэВ, а область неразрешённых резонансов от 2.5 до 100 кэВ.

ENDF/B-VIIb2: оценка Мухабхаба (Атлас-2006) в области разрешённых резонансов; оценка JENDL-3.2 в области неразрешённых резонансов. Статистический анализ распределений резонансов и их ширин не показывает существенного отклонения от предсказаний статистических моделей.

Сравнение тепловых сечений и резонансных интегралов захвата показано в таблице 2.

Таблица 2. Тепловые сечения и резонансный интеграл (барн, 300K).

Библиотека	Полное	Упругое	Захват	Резонансный интеграл захвата
JENDL-3.2	8.1031	3.9149	4.1881	122
ENDF/B-VI	8.1217	4.0245	4.0973	127
JEFF-2.2	8.1220	3.7939	4.3280	127

CENDL-3	7.7074	3.5091	4.1983	186
ENDF/B-VIIb2	7.5523	3.6784	3.8739	128
BNL-325			4.2±0.1	125±20
Atlas-2006	7.5523			126±20

Оценка ENDF/B-VIIb2 является наилучшей в области разрешённых резонансов.

Область быстрых нейтронов

CENDL-3: основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Прямые процессы для неупругого нейтронов оценивались в приближении DWBA. Оценки сечения (n,2n) и захвата основаны на имеющихся экспериментальных данных. Сечение упругого рассеяния получено как разность между полным сечением и суммой сечений всех других реакций.

ENDF/B-VI: основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Сечение захвата оценено на основе имеющихся экспериментальных данных. Метод сильной связи каналов использовался для оценки вклада прямых процессов в неупругое рассеяние нейтронов. Параметры оптической модели определялись из описания угловых распределений упругого рассеяния и полного сечения на природной сурьме. Сечения приведены до энергии 30 МэВ.

JEF-2.2: основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Детальная информация отсутствует.

JENDL-3.2: основана на результатах расчётов по оптической и статистической моделям. Прямые процессы для неупругого нейтронов оценивались в приближении DWBA. Вклад прямых-полупрямых процессов в сечение захвата оценивался в рамках феноменологической модели. Сечение упругого рассеяния получено как разность между полным сечением и суммой сечений всех других реакций.

На рисунке 6 показаны результаты оценки полного сечения из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными для естественной сурьмы. Наилучшее согласие наблюдается для библиотеки JENDL-3.3 (JENDL-3.2).

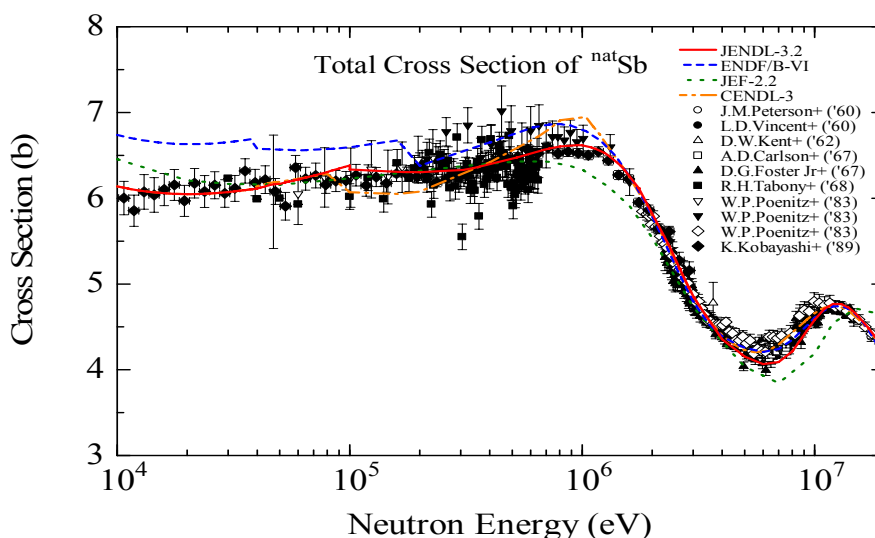


Рис. 6. Полные сечения для ^{123}Sb из разных библиотек в сравнении с экспериментальными данными для естественной сурьмы.

Сравнение сечения упругого рассеяния для ^{123}Sb из разных библиотек с имеющимися экспериментальными данными на естественной сурьме показано на рисунке 7. Оценка ENDF/B-VI как для полного, так и для упругого сечений проходит выше экспериментальных данных при энергии ниже одного МэВ, которые вероятно содержат трудноотделимый вклад от неупругого рассеяния нейтронов с возбуждением на первом низколежащем уровне.

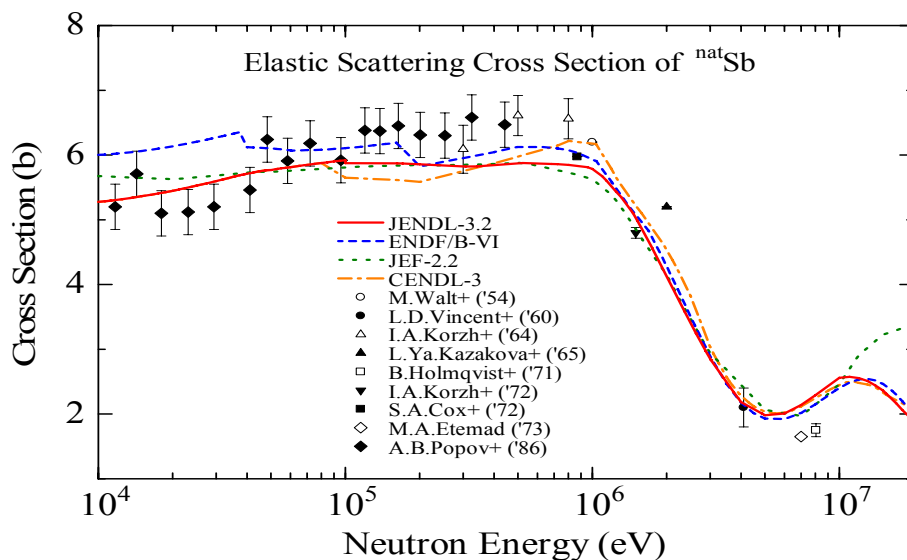


Рис. 7. Сечение упругого рассеяния для ^{123}Sb из разных библиотек в сравнении с экспериментальными данными для естественной сурьмы.

На рисунке 8 показано сравнение оценённых и экспериментальных данных для сечения захвата на ^{123}Sb , а на рисунке 9 показано сравнение сечения захвата для естественной смеси изотопов сурьмы из разных библиотек с экспериментальными данными, имеющимися в большем количестве для естественной смеси. В целом, наблюдается как хорошее согласие между результатами из разных библиотек, так и между результатами измерений на стабильных изотопах и естественной смеси.

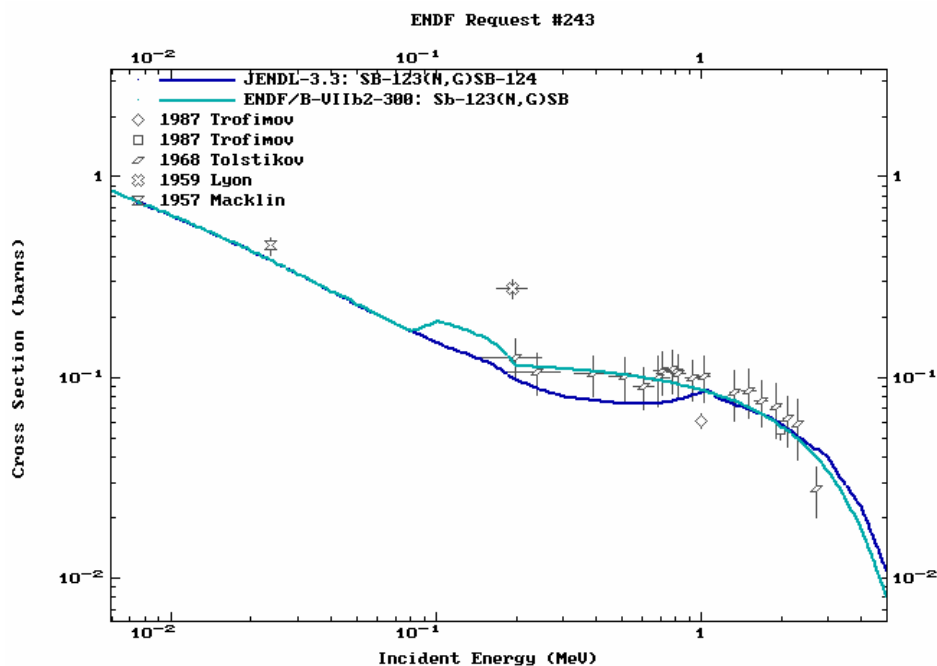


Рис. 8. Сечение захвата для ^{121}Sb из разных библиотек в сравнении с экспериментальными данными.

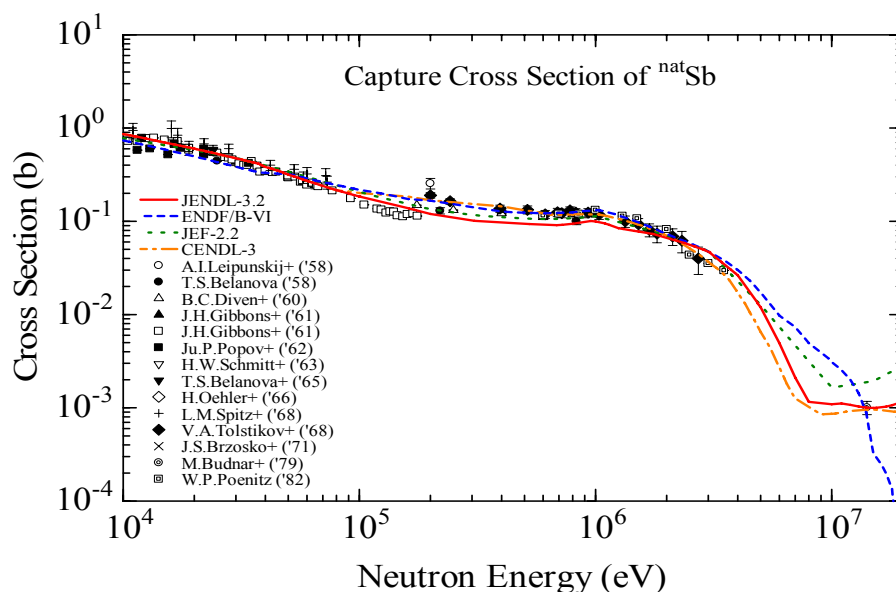


Рис. 9. Сечение захвата для $^{\text{nat}}\text{Sb}$ из разных библиотек в сравнении с экспериментальными данными для естественной сурьмы.

В оценке библиотеки CENDL-3 энерго-угловые распределения вторичных частиц представлены наиболее детально. Учитывая всё это, а также появление новой оценки Мухабхаба для резонансных параметров принятой в ENDF/B-VIIb2, можно рекомендовать файл из библиотеки ENDF/B-VIIb2 для библиотеки РОСФОНД. Этот файл содержит средние резонансные параметры для области неразрешённых резонансов из библиотеки JENDL-3.3 (JENDL-3.2) и сечения в быстрой области, включая энерго-угловые распределения вторичных частиц, из библиотеки CENDL-3⁵.

⁵ Вести файл MF=9 с вероятностями образования долгоживущего изомера $^{123}\text{Sn}^{\text{m}}$, используя данные из файла MF=10 из библиотеки EAF-2003. – М.Н.

51.6. Сурьма-124

В ядерном топливе образуется, главным образом, за счет захвата нейтронов в олове-123. Непосредственный выход при делении мал ($\sim 10^{-6}$).
Период полураспада: (60.20 ± 0.03) дней.

Мода распада: β^- 100%.

Спин основного состояния: 3^- .

Файлы

ENDF/B-VI (JEF-2) - оценка взята из ENDF/B-IV.

ENDF/B-VIIb2 (JENDL-3.3) – оценка взята из JENDL-3.2.

Детальное сравнение оценок приведено в http://www.nndc.bnl.gov/sg21/rev/rev_list.htm.

Данные

Экспериментальные данные отсутствуют.

Подгруппа 21 рабочей группы по оценке сечений рекомендовала (2003) файл из библиотеки JENDL-3.2, поправленная версия которого (ENDF/B-VIIb2) и может быть включена в библиотеку РОСФОНД.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

51.7. Сурьма-125

В ядерном топливе образуется как продукт деления.

Период полураспада: (2.75856 ± 0.00025) дней.

Мода распада: β^- 100%.

Спин основного состояния: $7/2^+$.

Файлы

ENDF/B-VI (JEF-2) - оценка взята из ENDF/B-IV.

ENDF/B-VIIb2 (JENDL-3.3) – оценка взята из JENDL-3.2.

CENDL-3 – новая оценка для быстрых нейтронов (>100 кэВ), оценка для резонансной области взята из JENDL-3.2.

Детальное сравнение оценок приведено в <http://www.nndc.bnl.gov/sg21/rev/sb125.htm>.

Данные

Экспериментальные данные отсутствуют.

Подгруппа 21 рабочей группы по оценке сечений рекомендовала (2003) файл из библиотеки JENDL-3.2, поправленная версия которого (ENDF/B-VIIb2) и может быть включена в библиотеку РОСФОНД.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

51.8. Сурьма-126

В ядерном топливе присутствует как продукт деления.

Период полураспада: (12.48 ± 0.03) дней.

Мода распада: β 100%.

Спин основного состояния: 8^- .

Файлы

ENDF/B-VI (JEF-2) - оценка взята из ENDF/B-IV.

ENDF/B-VIIb2 – новая оценка выполнена в 2006 году в NNDC/BNL в быстрой области с помощью программы EMPIRE и в резонансной области через обоснованные предположения о величине сечений в тепловой точке и генерации псевдо-резонансов в резонансной области. Параметры этих резонансов приняты такими же, как для сурьмы-121. Предположено из ядерно-статистических соображений, что средние резонансные параметры сурьмы-126 должны быть близки к таковым для сурьмы-121. Сечение захвата тепловых нейтронов принято равным 13 барнам и чтобы получить это значение подобраны параметры связанного состояния.

Данные

Экспериментальные данные отсутствуют. На рисунке 10 показаны полное сечение, сечение упругого и неупругого рассеяния и сечение захвата из библиотеки ENDF/B-VIIb2, полученные в результате научно-обоснованной оценки. Этот файл может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁶.

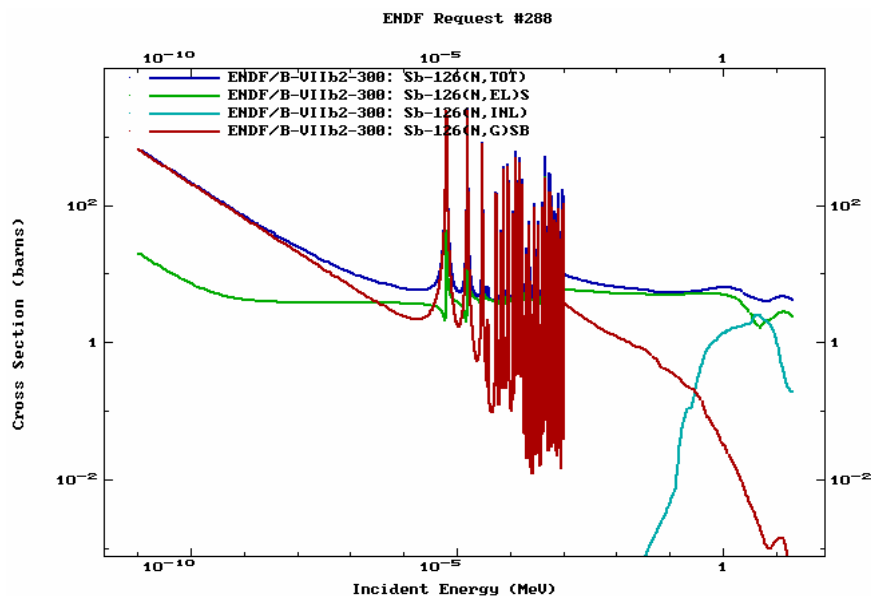


Рис. 10. Основные сечения в файле ¹²⁶Sb из библиотеки ENDF/B-VIIb2.

⁶ Любопытно, что для сурьмы-126, не обладающей ни значительным выходом при делении (при делении ²³⁵U он составляет примерно 0.03%), ни высоким сечением поглощения или какими-либо еще необычными нейтронно-физическими свойствами, составлен файл данных более полный, чем для стабильных изотопов сурьмы, обладающих к тому же и большими выходами при делении (¹²¹Sb -0.13%; ¹²¹Sb -0.15%). В набор оцененных данных включены не только коррелированные энерго-угловые распределения (файл MF=6), но и данные об образовании фотонов в результате нейтронных реакций, которые не приводятся даже для стабильных изотопов. – М.Н.;

51.9. Сурьма-127

В ядерном топливе может присутствовать как продукт деления.

Период полураспада: (3.85 ± 0.05) дней.

Мода распада: β 100%.

Спин основного состояния: $7/2^+$.

Файлы

JEFF-3.1/A – оценка 2003 года файла для активационной библиотеки основанная на данных из активационной библиотеки ADL-3. Другие файлы представляют библиотеки данных по распаду и не содержат оценок нейтронных сечений.

Данные

Все нейтронные сечения для ^{127}Sb из JEFF-3.1/A имеющие значения выше 10^{-4} барн приведены на рисунке 11. Экспериментальные данные отсутствуют. Сечения не имеют каких-либо аномальных нефизических зависимостей.

Файл ^{127}Sb из библиотеки JEFF-3.1/A может быть рекомендован для включения в библиотеку РОСФОНД⁷.

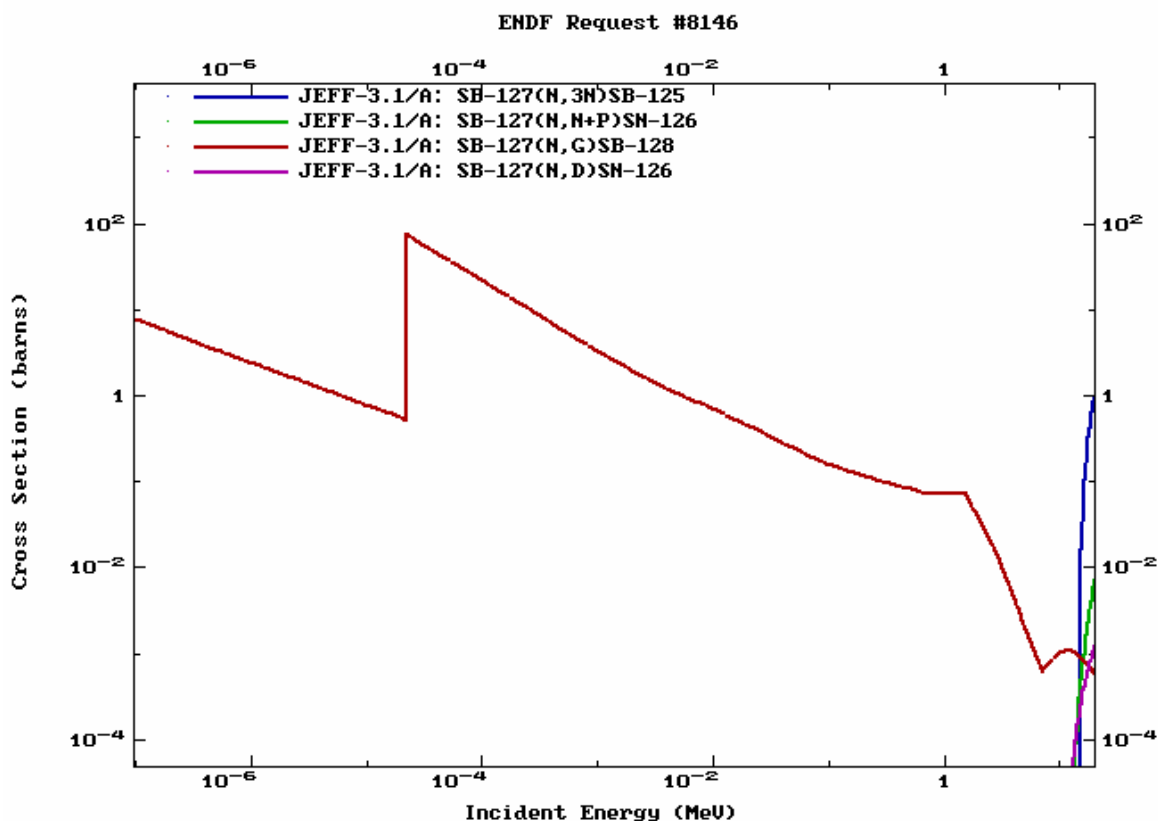


Рис. 11. Нейтронные сечения из библиотеки JEFF-3.1/A.

Автор рекомендации

Проняев В.Г.

⁷ Данные о парциальных сечениях всех реакций, содержащиеся в файле MF=10, просуммировать по подсекциям и включить в файл MF=3. Файл MF=10 исключить. – М.Н.