

## 82. СВИНЕЦ

В РОСФОНД включены данные для всех 4-х стабильных и 4-х долгоживущих радиоактивных изотопов свинца.

### 82.1. Свинец-202

Радиоактивен. ( $T_{1/2}=5.25 \cdot 10^4$  лет).

Путем захвата орбитального электрона распадается в таллий-202, который, в свою очередь, тем же путем быстро ( $T_{1/2}=12.23$  д) распадается в ртуть-202.

Источник – реакция  $^{204}\text{Pb}(n,3n)$ .

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений, основанная на теоретических расчетах и систематиках экспериментальных данных для других ядер.

Оцененные сечения захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл равны 7.9 барн и 4.2 барн.

Экспериментальных данных для проверки оцененных данных в EXFORe нет

#### Заключение

В РОСФОНД принимается оценка нейтронных сечений из EAF-2003. Парциальные сечения реакций, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

#### Автор заключения

Николаев М.Н.

### 82.2. Свинец-203

Радиоактивен. ( $T_{1/2}=2.161$  д). Путем захвата орбитального электрона распадается в таллий-202.

Возможный путь образования – реакция  $^{204}\text{Pb}(n,2n)$ .

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений, основанная на теоретических расчетах и систематиках экспериментальных данных для других ядер.

Оцененные сечения захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл равны 9.9 барна. и 11.5 барна.

Экспериментальных данных для проверки оцененных данных в EXFORe нет.

#### Заключение

В РОСФОНД принимается оценка нейтронных сечений из EAF-2003. Парциальные сечения реакций, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

#### Автор рекомендации

Николаев М.Н.

## 82.3. Свинец-204

Стабилен, содержание в естественной смеси  $(1.4 \pm 0.1)\%$

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для свинца-204:

ФОНД-2.2 = JENDL-3.3 – оценка М. Mizumoto, 1987, пересмотрена и существенно модифицирована в 1994 и дополнительно модифицирована в 2001;

БРОНД-2 – оценка Блохина и др., 1990;

JEFF-3.1 – оценка А. Koning, 2005;

ENDF/B-VII - данный изотоп не рассматривался ни в одной из версий ENDF/B.

### 1. Общие характеристики

1.1.  $Z = 82$  -зарядовое число;

1.2.  $A = 204$  (атомный вес);

1.3.  $AWR = 202.221$  (отношение массы ядра к массе нейтрона);

### 2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

#### 2.1 Область разрешенных резонансов.

В JENDL-3.3 приняты верхняя граница области разрешенных резонансов 50 кэВ и радиус потенциального рассеяния  $R_0 = 8.5$  фм. Параметры резонансов взяты на основе анализа данных [84Н]. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в JEFF-3.1.

Параметры нейтронных резонансов в БРОНД-2 взяты из компиляции Мухабхаба [84М]. Верхняя граница резонансной области принята равной 100 кэВ и радиус потенциального рассеяния -  $R_0 = 9.32$  фм. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров в обеих оценках рекомендовано приближение MLBW.

Радиационные ширины резонансов, использованные в оценках, показаны на рис. 1. Ширины большинства s-резонансов имеют близкие значения, но ширины p-резонансов отличаются весьма существенно. К сожалению, в БРОНД-2 для s-резонанса с энергией 32.00 кэВ содержится ошибка в радиационной ширине, вместо среднего значения ширины 650 мэВ стоит в 10 раз большее значение. Эта ошибка практически не влияет на расчеты полных нейтронных сечений, но отражается на расчетах сечений радиационного захвата нейтронов для близлежащих энергий.

Недавно Мухабхабом были пересмотрены параметры нейтронных резонансов [06М] на основе уточненных данных об эффективности нейтронных детекторов, использованных в измерениях нейтронных сечений [84Н], а также результатов более поздних измерений [03С]. Уточненные ширины приведены на рис. 1, и для большинства p-резонансов они существенно отличаются от использованных в обеих предыдущих оценках. В частности, уточненная средняя радиационная ширина p-резонансов  $135 \pm 25$  МэВ [06М] оказывается более чем в два раза ниже значения 330 МэВ [84М], принятого в JENDL-3.3 для практически всех p-резонансов.

Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице вместе с соответствующими экспериментальными данными:

Оценка	БРОНД-2	JENDL-3.3=JEFF-3.1	Эксп.: [84М]	[06М]
полное	11.652	11.857		
упругое	10.983	11.197		
захвата	0.669	0.661	$0.661 \pm 0.070$	$0.703 \pm 0.035$
резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ:	1.921	1.848	$2.0 \pm 0.2$	$2.23 \pm 0.20$

В пределах погрешности оценки согласуются с предыдущими экспериментальными данными о сечении радиационного захвата нейтронов и резонансном интеграле захвата [84М], но недавние уточнения экспериментальных данных требуют соответствующего уточнения резонансных параметров, включенных в оценки.

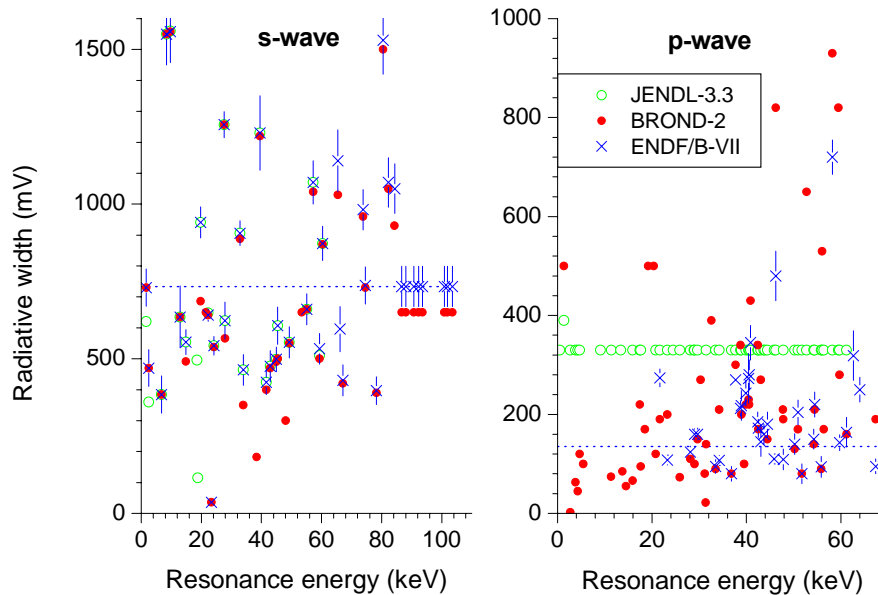


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках, пунктиром показаны средние значения ширины, принятые для резонансов с неизвестными ширинами

В оценках JENDL-3.3 и БРОНД-2 нет области неразрешенных резонансов. Однако, статистический анализ параметров резонансов, включенных в оценки, представляет интерес как для определения числа пропущенных резонансов и соответствующих погрешностей оцененных резонансных сечений, так и для анализа согласованности параметров плотности уровней и нейтронных силовых функций, используемых в оптической и статистической моделях для расчетов нейтронных сечений вне резонансной области.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и БРОНД-2, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширины резонансов. Можно видеть, что выше энергии 60 кэВ число p-резонансов в БРОНД-2 практически не растет, что указывает на необходимость уменьшения верхней границы области разрешенных резонансов до этой энергии.

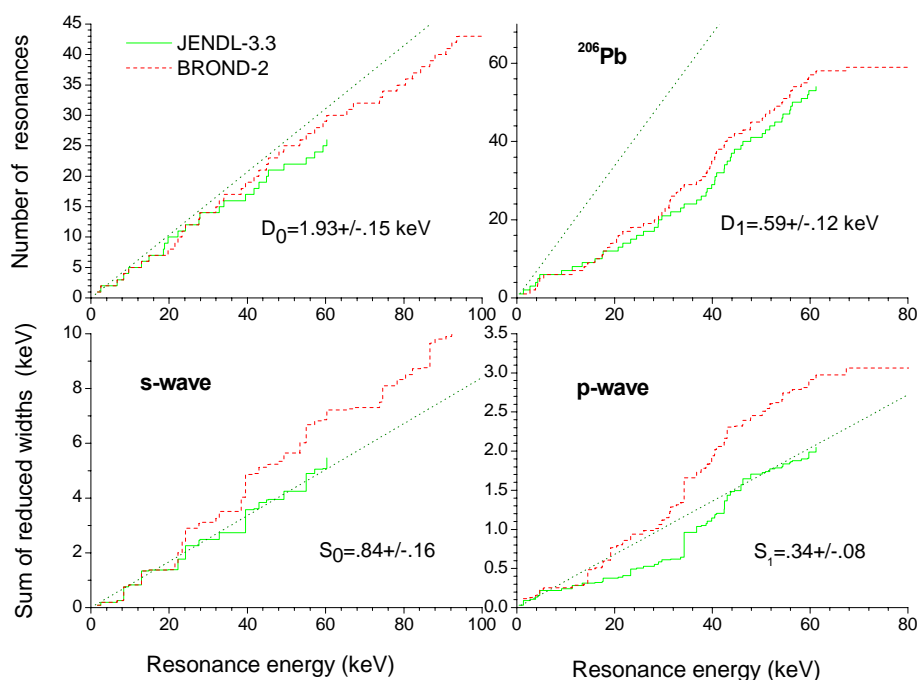


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках БРОНД-2 и JENDL-3.3

Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа для набора резонансных параметров JENDL-3.3 представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в диапазоне энергий до 50 кэВ в наборе s-резонансов пропущено от 3 до 6 резонансов, тогда как для p-резонансов пропущено примерно 40 резонансов. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, равны  $D_0 = (1.93 \pm 0.15)$  кэВ и  $D_1 = (0.59 \pm 0.12)$  кэВ. Для нейтронных силовых функций в рамках данного анализа получены значения  $S_0 = (0.84 \pm 0.16) \cdot 10^{-4}$  и  $S_1 = (0.34 \pm 0.08) \cdot 10^{-4}$  для s- и p-резонансов, соответственно. В аналогичном анализе Мухабхаба, проведенном для уточненных параметров нейтронных резонансов [06M], получены значения  $D_0 = (2.17 \pm 0.10)$  кэВ,  $D_1 = (0.69 \pm 0.06)$  кэВ и  $S_0 = (1.27 \pm 0.16) \cdot 10^{-4}$ ,  $S_1 = (0.35 \pm 0.06) \cdot 10^{-4}$ , которые с учетом погрешностей не сильно отличаются от результатов анализа параметров резонансов, содержащихся в JENDL-3.3. Отношение  $D_0/D_1 = 3.1 \pm 0.4$  не противоречит статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, но погрешности определения  $D_1$  достаточно велики ввиду значительного пропуска резонансов. Уточнения нейтронных силовых функций s-резонансов в новом наборе резонансных параметров [06M] может оказаться весьма важным для выбора параметров оптической модели, привлекаемой для расчетов нейтронных сечений в области энергий до 1-2 МэВ.

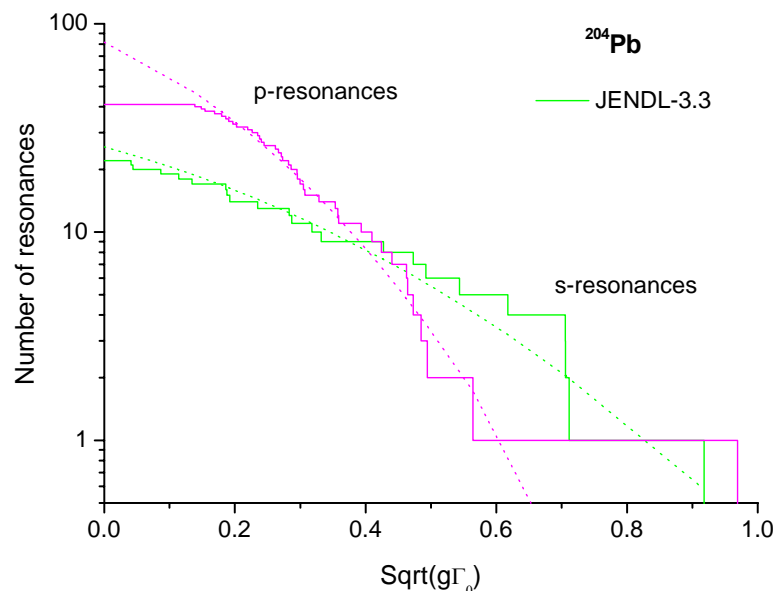


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов

На рис. 4 и 5 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для полных нейтронных сечений некоторые разногласия в нейтронных ширинах резонансов не выходят за пределы погрешностей экспериментальных данных, но для более высоких энергий в БРОНД-2 содержатся достаточно сильные резонансы, не подтвержденные в экспериментах по пропусканию и рассеянию нейтронов. Для сечений захвата нейтронов имеются только экспериментальные данные, усредненные по большому числу резонансов. Разногласия оценок в этом случае более существенные. В частности, в БРОНД-2 пропущен нижайший p-резонанс с энергией 480 эВ, примерно в 10 раз завышено сечение резонанса с энергией 32.00 кэВ и, несомненно, слишком мало учтено p-резонансов выше энергии 60 кэВ, что приводит к неоправданно низким сечениям радиационного захвата нейтронов в области энергий от 50 до 100 кэВ.

Учитывая отмеченные выше недостатки БРОНД-2, **на сегодняшний день JENDL-3.3 следует признать более надежной оценкой нейтронных сечений в диапазоне энергий нейтронов до 100 кэВ.** Однако, параметры большинства p-резонансов в JENDL-3.3 также существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов [06M], поэтому целесообразно дальнейшее уточнение оценки нейтронных сечений в области разрешенных резонансов.

84H D.J. Horen et al., Phys. Rev., C29, 2126 (1984).

84M S.Mughabghab, Neutron Cross Sections, Academic Press, NY, 1984, part A.

03C R.F. Carlton, J.A. Harvey, N.W. Hill, Phys. Rev., C67 (2003) 024601.

06M S.Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY, 2006.

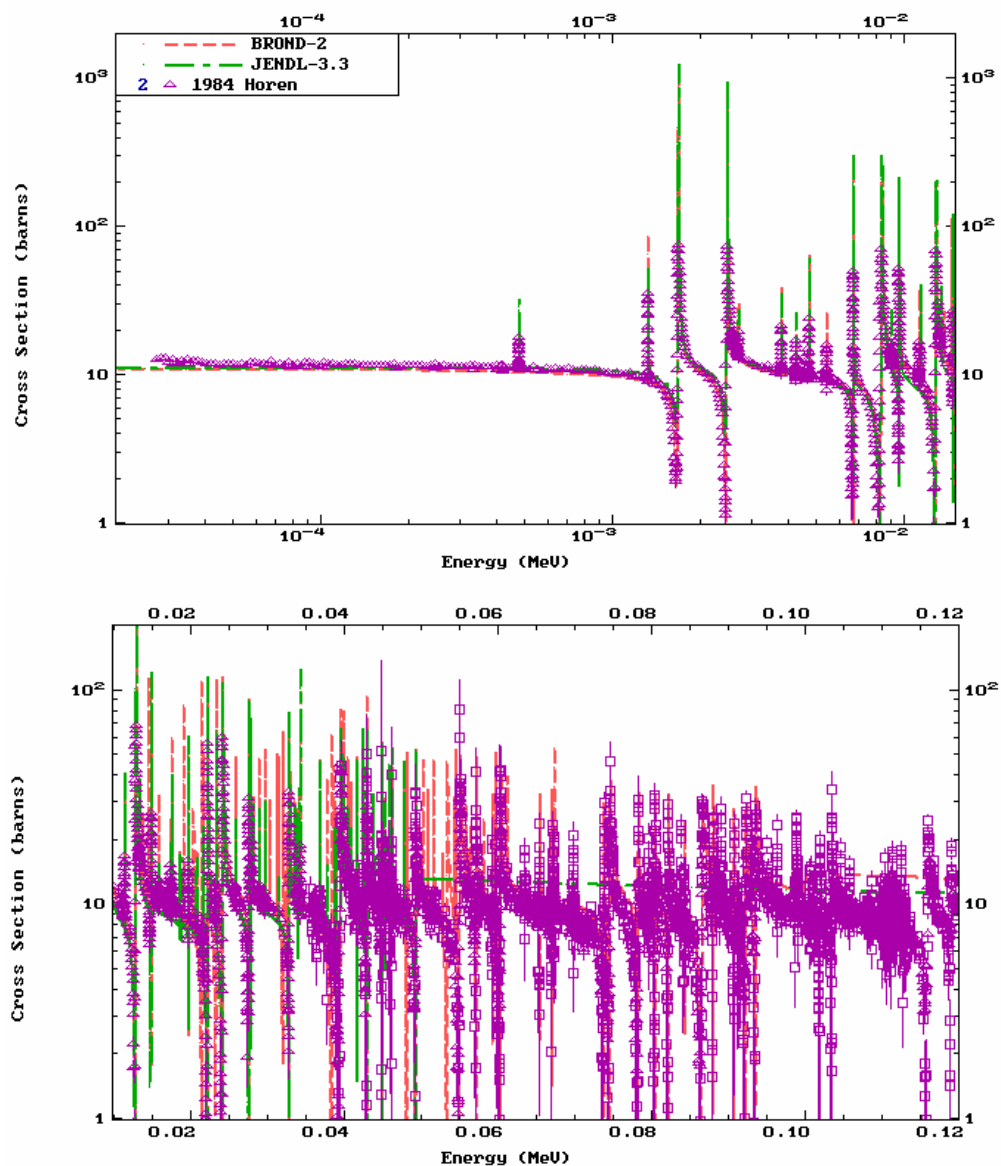
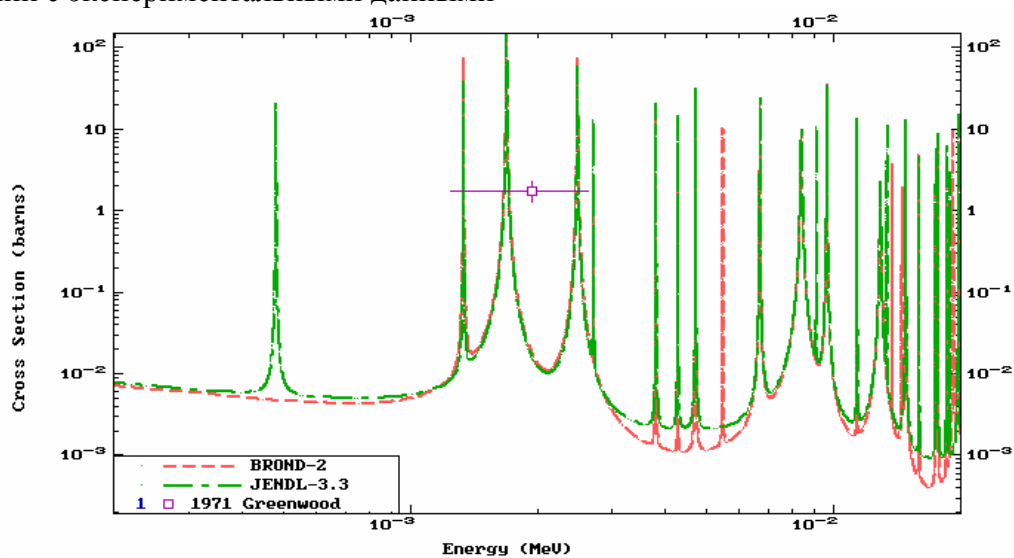


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными



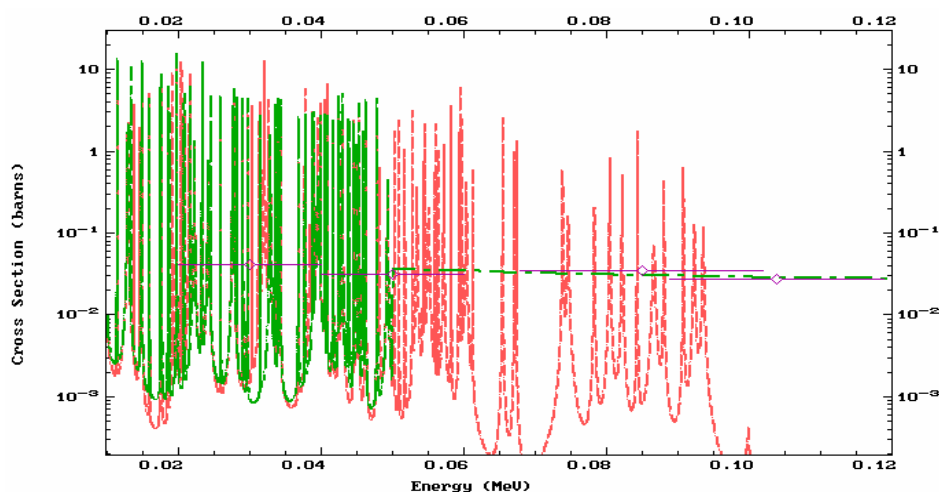


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

### 3. Нейтронные сечения вне резонансной области

#### 3.1. Полные сечения (MT=1)

На рис. 6 показаны имеющиеся оценки полных нейтронных сечений в области энергий выше 100 кэВ в сравнении с экспериментальными данными. В дополнение к рассмотренным выше оценкам JENDL-3.3 и БРОНД-2 вне резонансной области для всех сечений имеется также недавняя оценка JEFF-3.1. Все оценки получены на основе расчетов по оптической модели, но параметры оптического потенциала в таких расчетах отличались весьма существенно. Тем не менее, все оценки полных сечений оказываются очень близкими. Они хорошо описывают экспериментальные данные выше энергии нейтронов 2.5 МэВ, но совершенно не учитывают достаточно сильную структуру полных сечений, проявляющуюся в экспериментальных данных [03С]. Отличия данных [84Н] в области энергий выше 1 МэВ от результатов более поздних измерений [03С] обусловлено погрешностями ранних измерений [84Н], и им не следует придавать какого-либо значения.

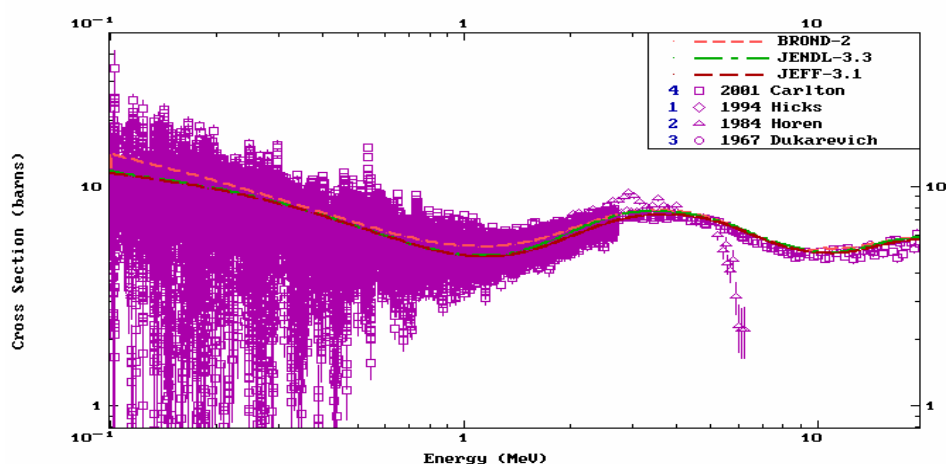


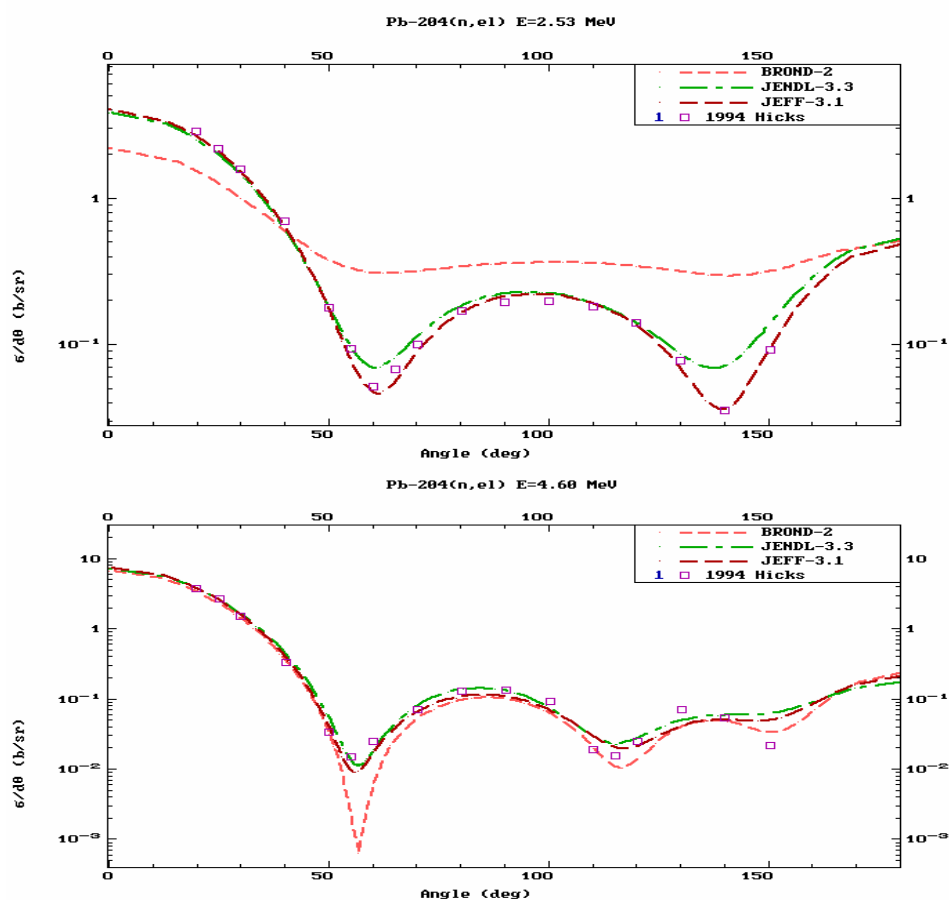
Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений  $^{204}\text{Pb}$  в диапазоне энергий от 0.1 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

### 3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. Прямых экспериментальных данных по интегральным сечениям упругого рассеяния нейтронов для изотопа  $^{204}\text{Pb}$  нет. В этих условиях можно ожидать, что более корректной для сечений упругого рассеяния будут оценка, в которой достигнуто лучшее описание данных по угловым распределениям упруго рассеянных нейтронов.

На рис. 7 для трех энергий нейтронов показано сравнение оценок угловых распределений с соответствующими экспериментальными данными. Аналогичные результаты имеются также для ряда промежуточных и более высоких энергий. Анализ угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, как правило, осуществляется на основе расчетов по оптической модели, и оценки JENDL-3.3 и JEFF-3.1 хорошо описывают экспериментальные данные для всех трех энергий, тогда как БРОНД-2 также хорошо согласуется с данными при энергиях нейтронов выше  $\sim 4$  МэВ, но дает слишком слабую дифракционную структуру угловых распределений при более низких энергиях, в частности, при энергии 2.53 МэВ (рис. 7).

Следует отметить, что при энергиях ниже 2.5 МэВ в экспериментальных данных важную роль играет промежуточная структура нейтронных сечений, подобная представленной на рис. 6 для полных сечений. В этих условиях сравнение оценок с экспериментальными данными будет оправданно только при усреднении соответствующих данных по широкому энергетическому интервалу, соответствующему условиям справедливости оптической модели. С учетом данного замечания оценки JENDL-3.3 и JEFF-3.1 для сечений и угловых распределений упруго рассеянных нейтронов следует признать одинаково надежными для всего диапазона энергий от 100 кэВ до 20 МэВ.





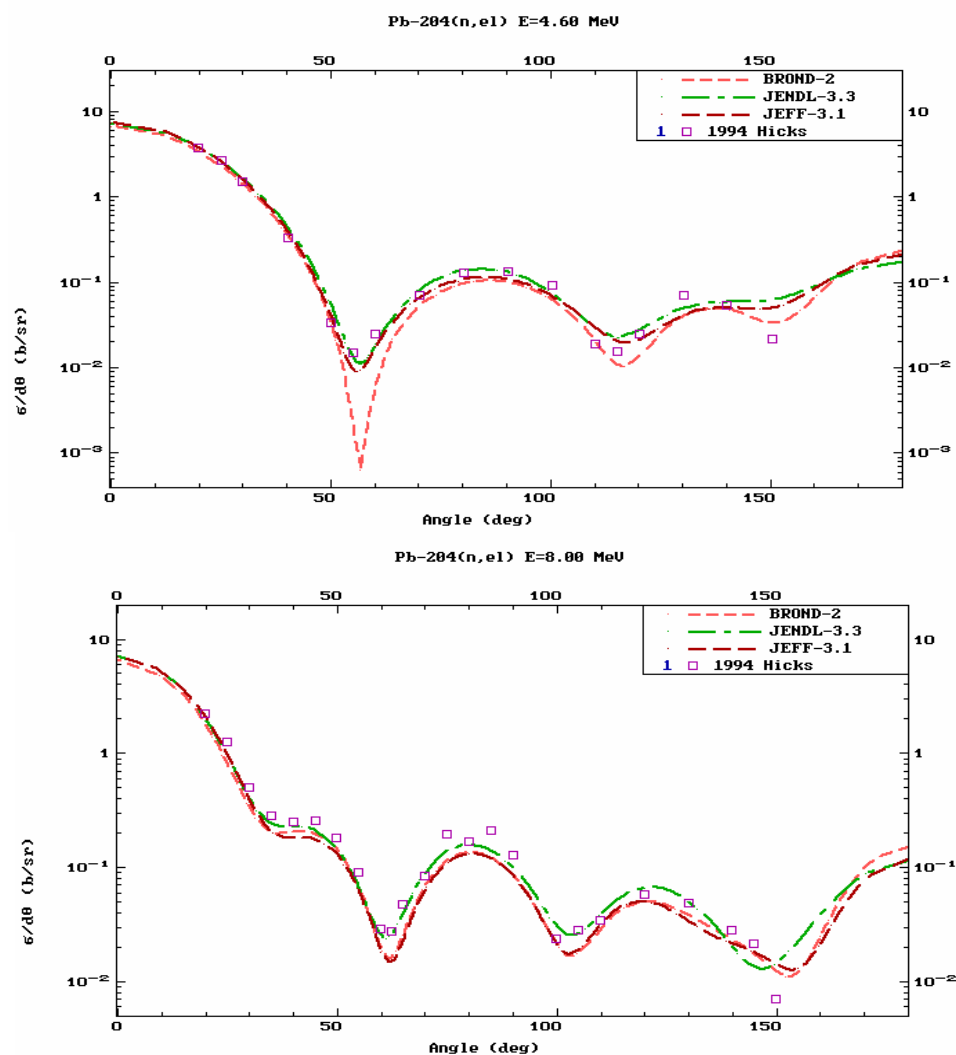


Рис. 7. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов при энергиях 2.53, 4.60 и 8.00 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

### 3.3. Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

В JENDL-3.3 рассматривается спектр 11 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в БРОНД-2 и JEFF-3.1 число учитываемых уровней увеличено до 24 и 21, соответственно. Так как при увеличении числа уровней соответствующим образом изменяется порог статистического описания уровней, так называемый континуум уровней, то различия в числе рассматриваемых уровней не должно заметно отражаться на оценках полного (интегрального) сечения неупругого рассеяния

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 8. Каких-либо экспериментальных данных для этого сечения нет. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели, а также различием моделей расчета вкладов прямых и предравновесных процессов, существенных для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Из сопоставления с расчетами для других изотопов свинца можно сделать вывод, что в области максимума сечений (~ 4 МэВ) БРОНД-2 предсказывает неоправданно высокие значения сечений. Оценки JENDL-3.3 и JEFF-3.1 для всех изотопов свинца дают

очень близкие значения сечений неупругого рассеяния выше энергии нейтронов 1.5-2 МэВ, и такое «универсальное» поведение сечения неупругого рассеяния для близлежащих изотопов является важным аргументом для выбора предпочтительной оценки. С позиций такого критерия оценки JENDL-3.3 и JEFF-3.1 для неупругого рассеяния выглядят более достоверными, чем БРОНД-2.

Асимметрия угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов, обусловленная прямыми и предравновесными процессами, учтена в оценках JENDL-3.3 и JEFF-3.1 для всех рассматриваемых уровней, а также для нейтронного рассеяния в континууме, тогда как в БРОНД-2 аналогичная асимметрия рассмотрена только для рассеяния на первых шести уровнях, а для более высоких уровней и континуума приняты изотропные угловые распределения. Надежных экспериментальных данных по угловым распределениям неупруго рассеянных нейтронов для  $^{204}\text{Pb}$  нет, и справедливость оценок соответствующих угловых распределений подтверждается, главным образом, их подобием с аналогичными оценками для других изотопов свинца, где такие данные имеются.

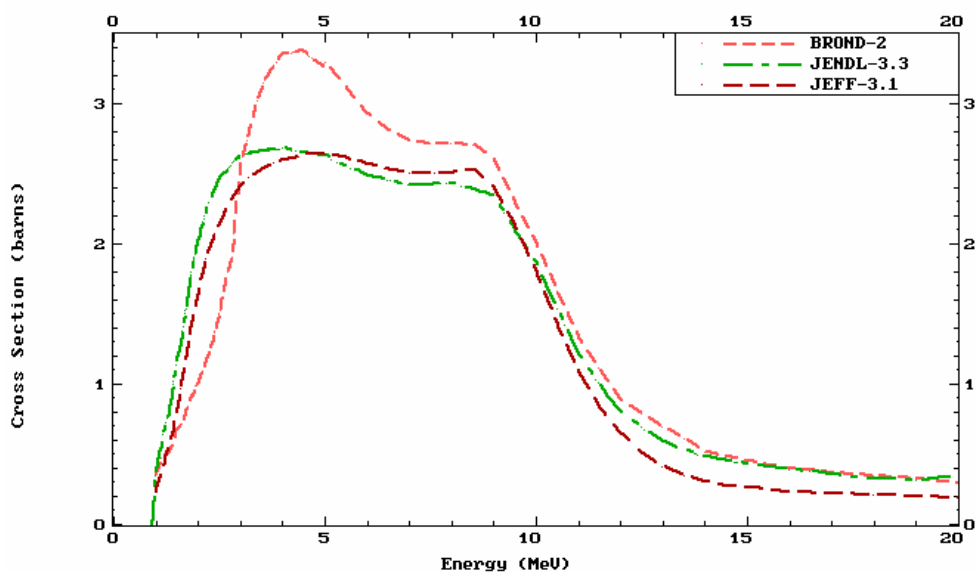


Рис. 8. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для  $^{204}\text{Pb}$

### 3.4 Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

На рис. 9 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 моделирования плотности уровней в расчетах энергетической зависимости нейтронных и радиационных ширин. Оценка БРОНД-2, несомненно, дает слишком низкое сечение захвата нейтронов. JENDL-3.3 и JEFF-3.1 корректно описывают имеющиеся экспериментальные данные в области энергий нейтронов до 200 кэВ, но выше 10 МэВ JENDL-3.3 предсказывает слишком быстрое падение сечений захвата, противоречащее систематике сечений при энергии нейтронов 14 МэВ. Согласно систематике, основанной на модели прямого-коллективного захвата нейтронов, для всех тяжелых ядер сечение захвата 14-МэВных нейтронов близко к 1 мб [86Б]. Оценка JEFF-3.1 лучше других описывает ожидаемую энергетическую зависимость сечений захвата во всем диапазоне энергий нейтронов от 0.1 до 20, и ее следует признать предпочтительной.

Необходимо, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 2-3 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не являются сколь-либо существенными для анализа характеристик ядерных реакторов.

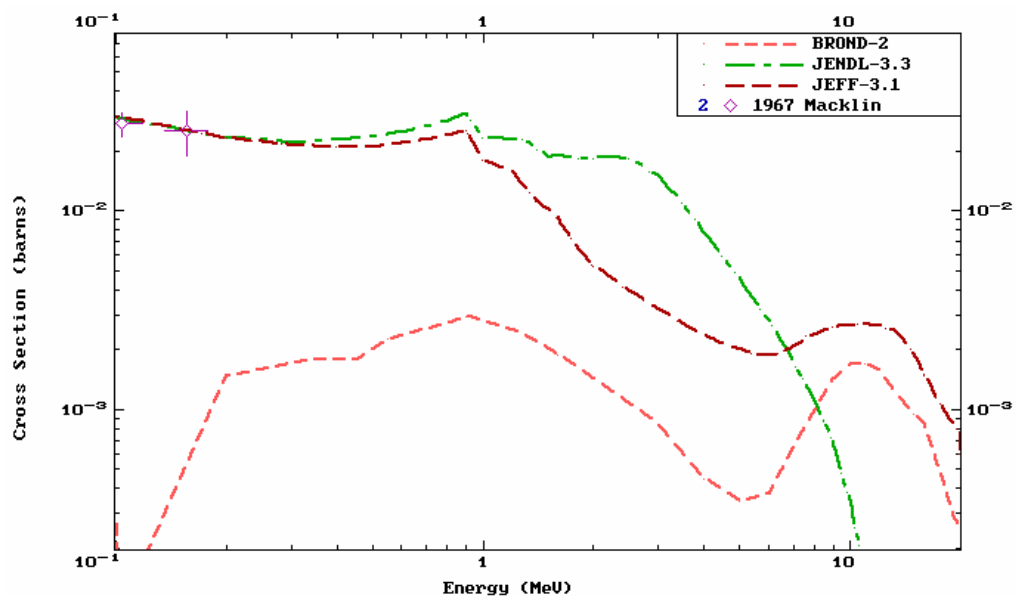


Рис. 9. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов  $^{204}\text{Pb}$  в сравнении с экспериментальными данными

### 3.5. Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT= 17)

Экспериментальные данные о сечении реакций (n,2n) показаны на рис. 10 совместно с различными оценками. Все оценки хорошо согласуются между собой и с экспериментальными данными при энергиях нейтронов 13.5- 14.5 МэВ, но при более низких энергиях несколько предпочтительной выглядит JENDL-3.3. Однако, оптимальной для всего диапазона энергий нейтронов следует все же признать оценку JEFF-3.1 на основе подобию сечений реакции (n,2n) для всех изотопов свинца и висмута.

Экспериментальных данных о сечении реакций (n,3n) нет. Сечение этой реакции (n,3n) существенно только выше 16 МэВ, и оно примерно соответствует разности сечения реакции (n,2n) в максимуме и в любой из вышележащих энергетических точек. При энергии 20 МэВ сечение достигает значений 0.5 – 0.65 барна. Для согласованности, для сечения реакции (n,3n) следует принимать ту же оценку, что выбрана предпочтительной для (n,2n).

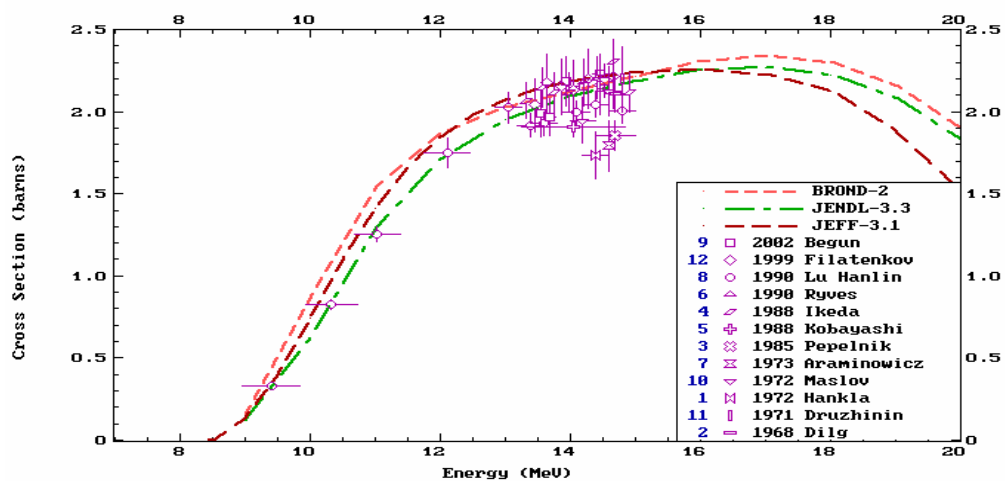


Рис.10. Оценки сечений реакции  $^{204}\text{Pb}(n,2n)$

### 3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц

Реакции с вылетом заряженных частиц включены во все рассматриваемые оценки. Эти реакции существенны только в области энергий нейтронов выше 15 МэВ, и максимальное сечение таких реакций не превышает 30 мбарн. На рис. 11 показаны оценки сечений реакций (n,p) и (n,α), соответствующие наиболее высоким выходам заряженных частиц. Разногласия между оценками этих реакций сравнительно велики, и вряд ли оправдано предпочтение какой-либо из оценок без дополнительной информации.

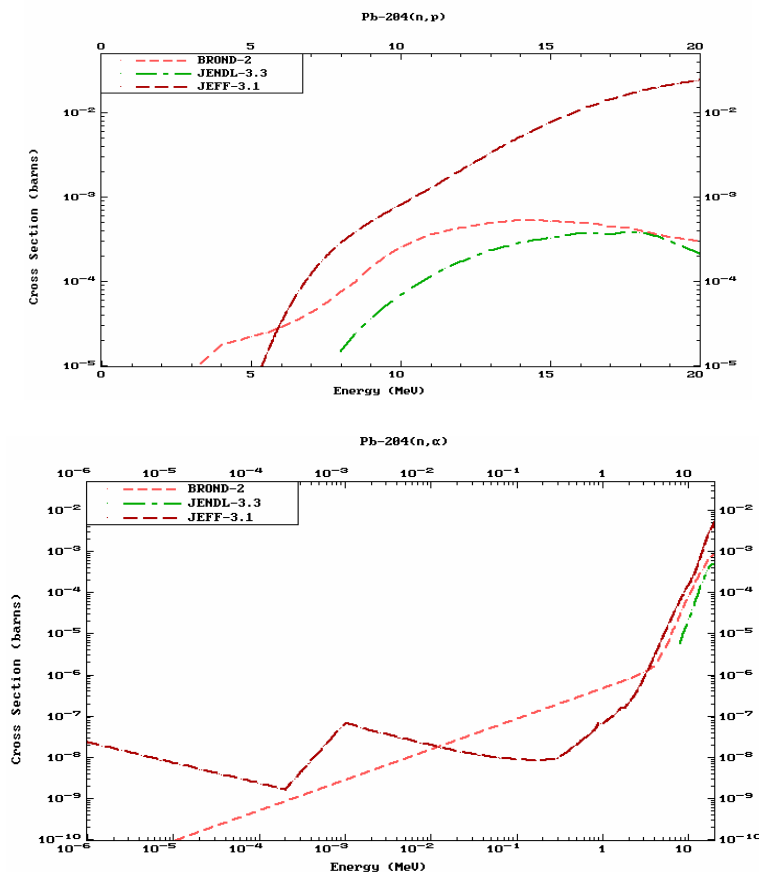


Рис.11. Оценки сечений реакции  $^{204}\text{Pb}(n,p)$  и  $^{204}\text{Pb}(n,\alpha)$

84Н D.J. Horen et al., Phys. Rev., C29, 2126 (1984).

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

03С R.F.Carlton, J.A.Harvey, N.W.Hill, Phys. Rev., C67 (2003) 024601.

### 4. Образование гамма-лучей

Оценки сечений образования и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата и неупругого взаимодействия нейтронов, содержатся во всех оценках. В БРОНД-2, однако, рассмотрение ограничивается дискретными гамма-переходами между низколежащими уровнями ядра-мишени. В оценках JENDL-3.3 и JEFF-3.1 представлена достаточно полная информация как о спектрах дискретных гамма-лучей, так и непрерывных спектрах гамма-излучения для всех каналов неупругого взаимодействия нейтронов с рассматриваемым изотопом свинца. Угловые распределения всех типов гамма-излучения в приняты изотропными.

Ввиду учета большего числа дискретных уровней ядра-мишени JEFF-3.1 дает более детальную информацию о спектрах гамма-переходов, но результирующие интегральные выходы гамма-лучей оказываются достаточно близкими в обеих оценках.

## 5. Заключение

На основе проведенного рассмотрения оценок и имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что оценки JENDL-3.3 и JEFF-3.1 для большинства реакций оказываются весьма близкими, и некоторое предпочтение JEFF-3.1 может быть обусловлено несколько большим числом учитываемых дискретных уровней ядра-мишени и, по-видимому, более корректной оценкой сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 3-5 МэВ. Таким образом, для библиотеки РОСФОНД целесообразно в настоящее время принять оценку JEFF-3.1<sup>1</sup>.

Следует однако, отметить, что параметры большинства резонансов в этой оценке, также как в других оценках, существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов, поэтому в ближайшем будущем необходимо дополнительное уточнение оценки нейтронных сечений в области разрешенных резонансов, включая уточнение сечений для тепловых нейтронов.

**Автор заключения**

А.В.Игнатюк

## 82.4. Свинец-205

Радиоактивен. ( $T_{1/2}=1.25 \cdot 10^7$  лет). Путем захвата орбитального электрона распадается в таллий-205.

Источник – реакции  $^{204}\text{Pb}(n,\gamma)$  и  $^{206}\text{Pb}(n,2n)$ .

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений, основанная на теоретических расчетах и систематиках экспериментальных данных для других ядер.

Оцененные сечения захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл равны 5 барн и 4 барна.

Экспериментальных данных для проверки оцененных данных в EXFORе нет

## Заключение

В РОСФОНД принимается оценка нейтронных сечений из EAF-2003. Парциальные сечения реакций, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

**Автор заключения**

Николаев М.Н.

---

<sup>1</sup> Файлы MF=8 и MF=10 из оценки, включаемой в РОСФОНД, удаляются, поскольку в нейтронных реакциях на свинце-204 не образуется долгоживущих изомеров. – М.Н.Николаев.

## 82.5. Свинец-206

Стабилен, содержание в естественной смеси ( $24.1 \pm 0.1$ )%

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для свинца-206:

ФОНД-2.2 = JENDL-3.3 – оценка M.Mizumoto, 1987, пересмотрена и существенно модифицирована в 1994 и дополнительно модифицирована в 2001;

БРОНД-3 – оценка Игнатюка и др., 2001;

ENDF/B-VI – оценка M.Chadwick et al., 1996; дополнительные уточнения в 1999;

JEFF-3.1 – оценка A.Koning, 2005; принята также в ENDF/B-VII.

### 1. Общие характеристики

1.1.  $Z = 82$  -зарядовое число;

1.2.  $A = 206$  (атомный вес);

1.3.  $AWR = 204.205$  (отношение массы ядра к массе нейтрона).

### 2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

#### 2.2 Область разрешенных резонансов.

В оценке JENDL-3.3 граница области разрешенных резонансов выбрана равной 500 кэВ и принят радиус потенциального рассеяния  $R_0 = 8.042$  фм. Нейтронные ширины резонансов взяты на основе анализа данных [79H, 79M], радиационные ширины – из компиляции Мугабгаба [84M].

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках ENDF/B-VI основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мугабгабом [84M] на основе анализа экспериментальных данных [79H, 81H]. Верхняя граница резонансной области принята равной 900 кэВ и радиус потенциального рассеяния -  $R_0 = 9.5$  фм. Оценка ENDF/B-VI для разрешенных резонансов включена без изменений в БРОНД-3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII).

Радиационные ширины резонансов, использованные в оценках, показаны на рис. 1. Ширины многих s- и p-резонансов, которые не были измерены экспериментально и которым были приписаны средние значения ширин, отличаются весьма существенно в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI.

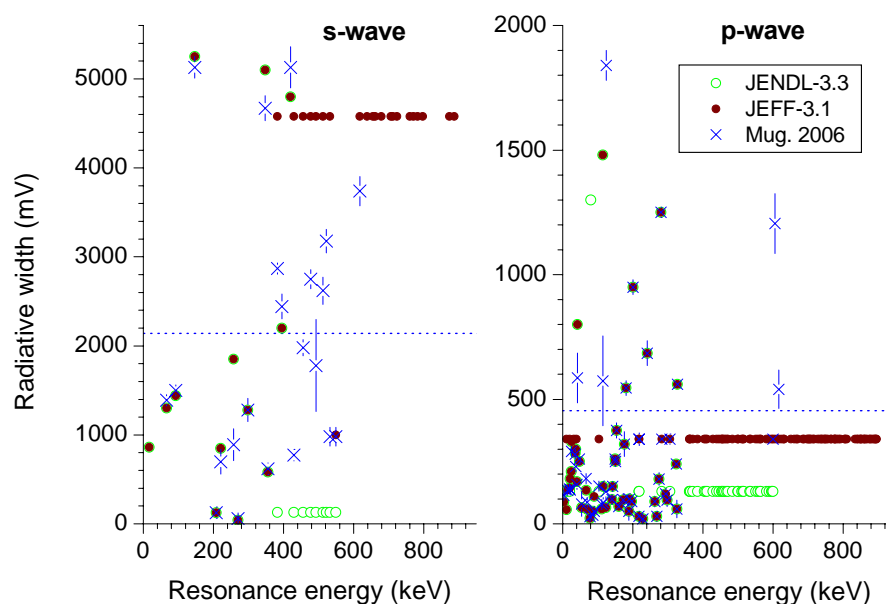


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках, пунктиром показаны уточненные значения средних ширин [06M]

Недавно Мугабгабом были пересмотрены параметры нейтронных резонансов [06M] на основе уточненных данных об эффективности нейтронных детекторов, использованных в измерениях нейтронных сечений [81H], а также результатов новых измерений сечений пропускания и захвата нейтронов [05B]. Уточненные ширины приведены на рис. 1, и для большинства резонансов они существенно отличаются от использованных в обеих предыдущих оценках. В частности, для d-резонанса с энергией 493.96 кэВ уточненная ширина равна  $0.351 \pm 0.077$  эВ вместо 12.5 эВ в предыдущих оценках, аналогично для s-резонанса с энергией 521.86 кэВ –  $3.177 \pm 0.132$  вместо предыдущего значения 42.0 эВ. Столь же велики расхождения средних ширин: уточненная средняя радиационная ширина s-резонансов  $2.14 \pm 0.11$  эВ [06M] оказывается более чем в два раза ниже значения 4.578 эВ, принятого в ENDF/B-VI для многих s-резонансов, и в 15 раз выше значения 0.13 эВ, принятого в JENDL-3.3 (рис. 1). Примерно такими же являются отличия средних радиационных ширин для p-и d-резонансов.

Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров во всех последних оценках рекомендовано приближении Рэйха-Мура. Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

Оценка	JENDL-3.3	ENDF/B-VI=JEFF-3.1	Эксп. [84M]	[06M]
полное	10.066	11.266		
упругое	10.035	11.236		$10.85 \pm 0.11$
захвата	0.0306	0.0298	$0.0306 \pm 0.0008$	$0.0266 \pm 0.0013$
резонансный интеграл захвата				
выше 0.5 эВ:	0.1108	0.1106	$0.097 \pm 0.014$	$0.123 \pm 0.014$

В пределах погрешности оценки согласуются с предыдущими экспериментальными данными о сечении радиационного захвата нейтронов и резонансном интеграле захвата [84M], но недавние уточнения экспериментальных данных требуют соответствующего уточнения резонансных параметров, включенных в оценки.

В оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI нет области неразрешенных резонансов. Однако, статистический анализ параметров резонансов, включенных в оценки, представляет интерес как для определения числа пропущенных резонансов и соответствующих погрешностей оцененных резонансных сечений, так и для анализа согласованности

параметров плотности уровней и нейтронных силовых функций, используемых в оптической и статистической моделях для расчетов нейтронных сечений вне резонансной области.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа для набора резонансных параметров ENDF/B-VI представлены на рис. 3.

Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов присутствует от 2 до 5 слабых резонансов, которые следовало бы отнести к p-резонансам. С другой стороны, в наборе p-резонансов пропущено, по-видимому, от 40 до 50 резонансов. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, равны  $D_0 = (32 \pm 5)$  кэВ и  $D_1 = (4.8 \pm 0.3)$  кэВ. Для нейтронных силовых функций в рамках данного анализа получены значения  $S_0 = (1.10 \pm 0.25) \cdot 10^{-4}$  и  $S_1 = (0.32 \pm 0.08) \cdot 10^{-4}$  для s- и p-резонансов, соответственно. В аналогичном анализе Мугабгаба, проведенном для уточненных параметров нейтронных резонансов [06M], получены значения  $D_0 = (37.1 \pm 5.5)$  кэВ,  $D_1 = (4.78 \pm 0.21)$  кэВ и  $S_0 = (1.06 \pm 0.26) \cdot 10^{-4}$ ,  $S_1 = (0.26 \pm 0.03) \cdot 10^{-4}$ , которые с учетом погрешностей не сильно отличаются от результатов анализа параметров резонансов, содержащихся в ENDF/B-VI. Отношение  $D_0/D_1 = 6.6 \pm 1.1$  отличается примерно в два раза от статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, и это может указывать на достаточно сильную зависимость плотности нейтронных резонансов от четности, но также может оказаться следствием более значительного пропуска резонансов, чем полученного в рамках представленного выше анализа. Уточнения нейтронных силовых функций резонансов в новом наборе резонансных параметров [06M] может оказаться весьма важным для выбора параметров оптической модели, привлекаемой для расчетов нейтронных сечений в области энергий до 5 МэВ.

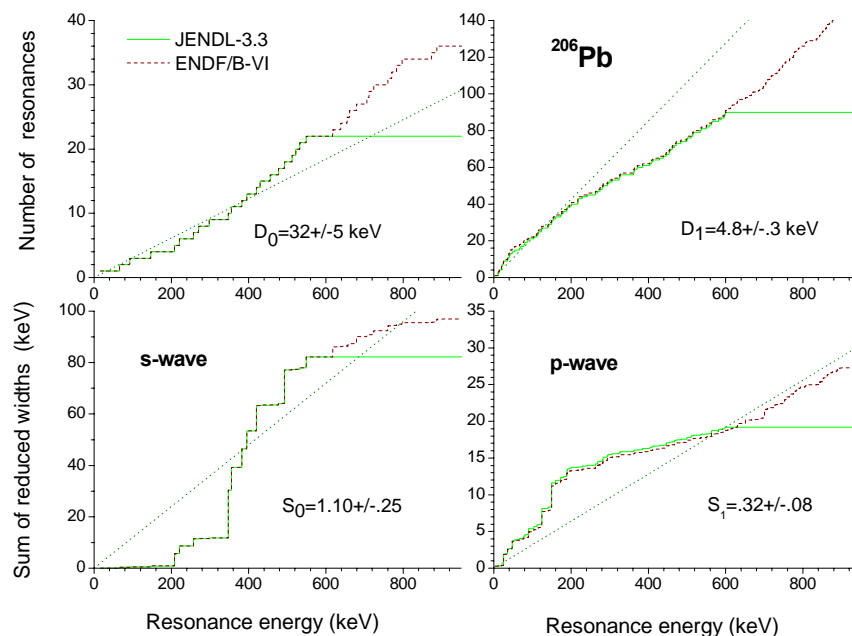


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VI)



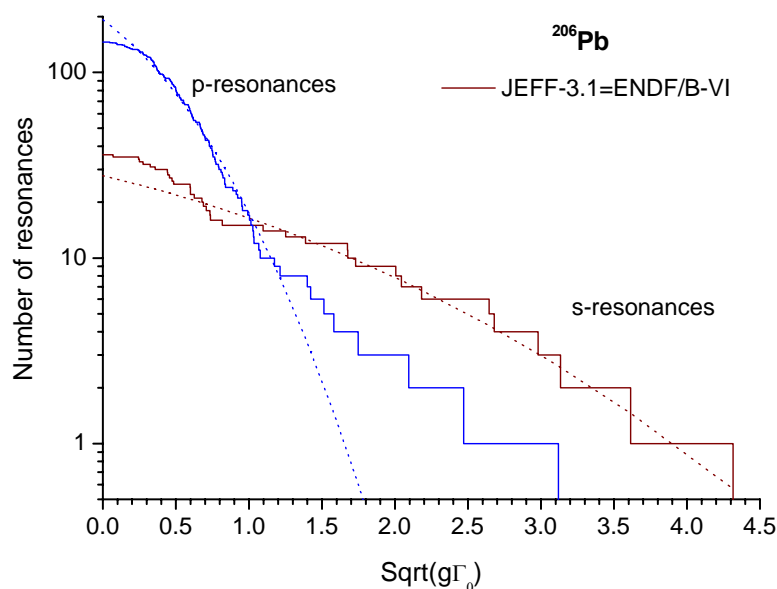


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов

На рис. 4 и 5 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для полных нейтронных сечений некоторые разногласия в нейтронных ширинах резонансов не выходят за пределы погрешностей экспериментальных данных. Для сечений захвата нейтронов имеются только экспериментальные данные, усредненные по большому числу резонансов. Разногласия оценок в этом случае проявляются, главным образом, в межрезонансных минимумах, и они обусловлены большими различиями средних радиационных ширин, принятых в оценках.

Учитывая более высокую верхнюю границу резонансной области **оценку ENDF/B-VI, включенную также в новые файлы JEFF-3.1(=ENDF/B-VII) на сегодняшний день следует признать предпочтительной для всего диапазона энергий нейтронов до 900 кэВ.** Однако, параметры большинства резонансов в этой оценке существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов [06M], поэтому в ближайшем будущем необходимо дополнительное уточнение оценки резонансных параметров.

79H D.J. Horen, J.A.Harvey, N.W.Hill, Phys. Rev., C20, 478 (1979).

79M M.Mizumoto et al., Phys. Rev., C19, 335 (1979).

81H D.J. Horen, J.A.Harvey, N.W.Hill, Phys.Rev., C24, 1961 (1981).

84M S.Mughabghab, Neutron Cross Sections, Academic Press, NY,1984, part B.

05B P.Borella, DS Thesis, Gent Univ., 2005.

06M S.Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY,2006.

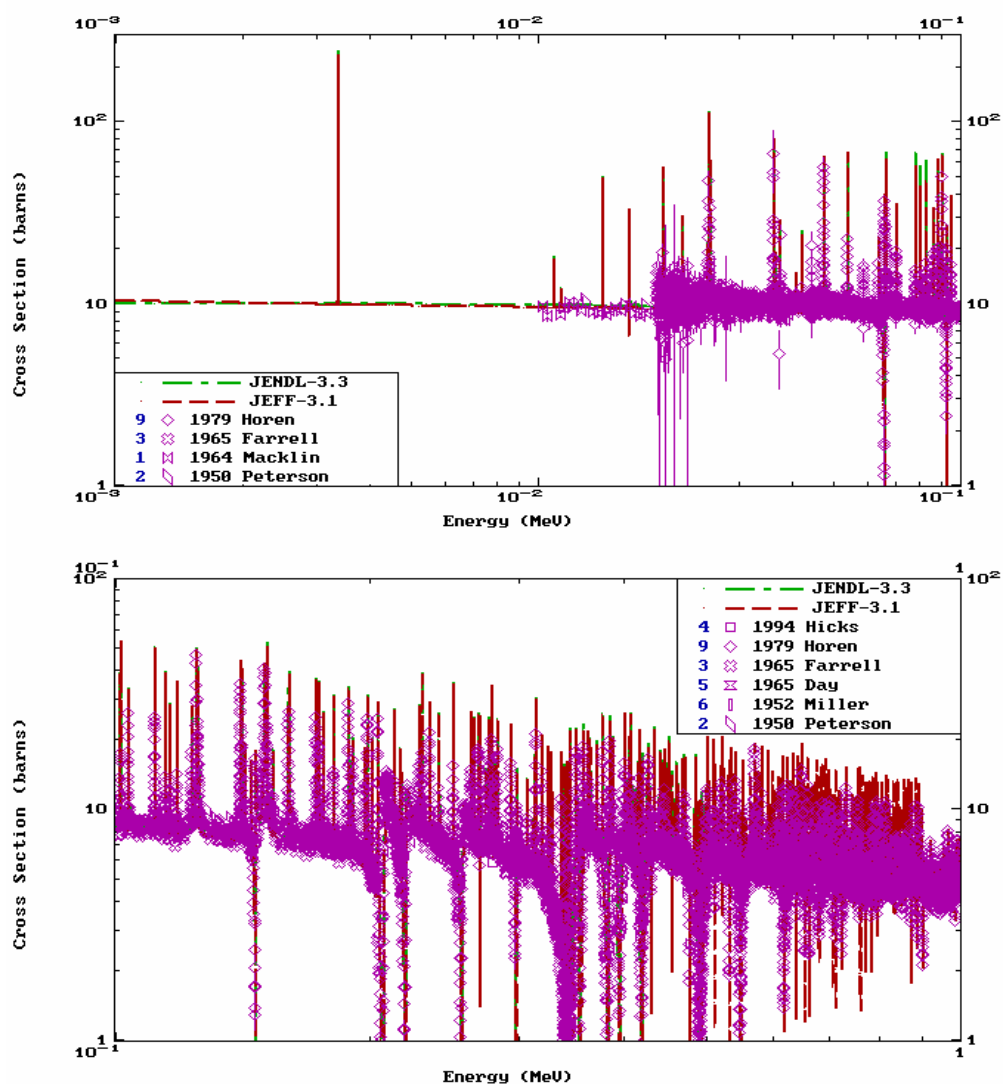


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

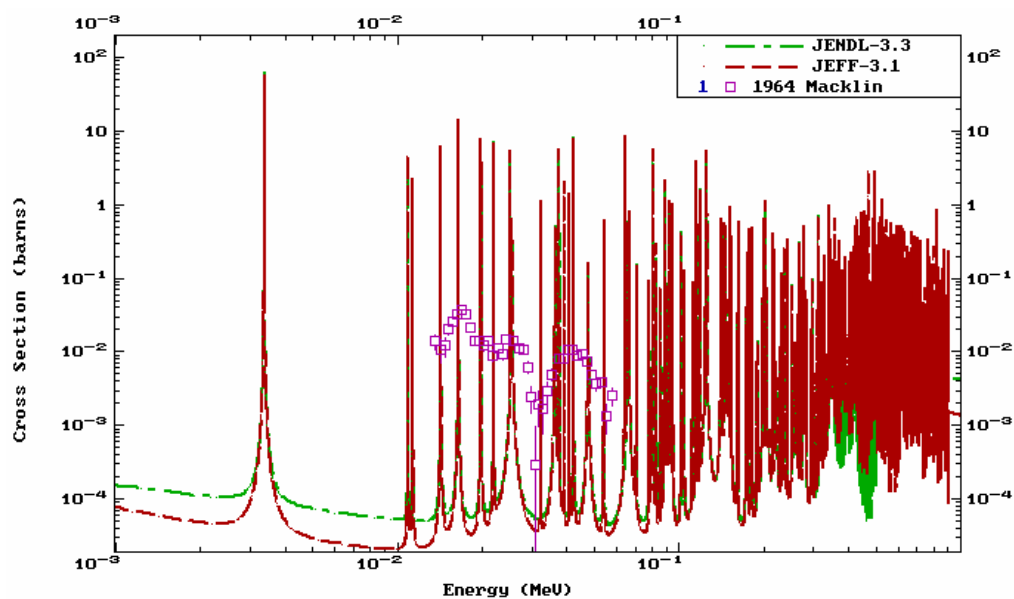


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

## 4. Нейтронные сечения вне резонансной области

### 3.1. Полные сечения (MT=1)

На рис. 6 показаны имеющиеся оценки полных нейтронных сечений в области энергий выше 900 кэВ в сравнении с экспериментальными данными. В дополнение к рассмотренным выше оценкам JENDL-3.3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII) вне резонансной области для всех сечений имеется также недавняя оценка БРОНД-3. Гросс-структура резонансо-подобных флуктуаций полных сечений, проявляющаяся в данных [79H], в несколько усредненной форме принята в качестве оценки полных сечений ENDF/B-VI в области энергий до 5 МэВ, и эта оценка сохранена без изменений также в БРОНД-3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII). В JENDL-3.3 для этого диапазона энергий принята бесструктурная оценка сечений, полученная на основе расчетов по оптической модели. Отличие данных [79H] в области энергий выше 2 МэВ от результатов остальных измерений, включая более поздние [94H], связано с проблемами нормировки данных по пропусканию нейтронов [79H], которые требуют уточнения эффективности детекторов в области быстрых нейтронов.

В БРОНД-3 и JEFF-3.1 результаты расчетов по оптической модели приняты в качестве оценки полных сечений только для энергий нейтронов выше 5 МэВ. Все оценки, основанные на расчетах по оптической модели, хорошо согласуются между собой, несмотря на имеющиеся разногласия параметров оптического потенциала. Эти разногласия оказываются существенными в области более низких энергий, когда оптическая модель используется для расчетов сечений неупругого взаимодействия нейтронов.

### 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. Экспериментальные данные об интегральном сечении упругого рассеяния нейтронов показаны на рис. 7 в сравнении с имеющимися оценками. Структура сечений упругого рассеяния ниже 5 МэВ определяется аналогичной структурой полных нейтронных сечений (рис. 6). Экспериментальные точки при энергиях 7 и 8 МэВ [71H, 73E], заметно отклоняющиеся от оценок, имеют, видимо,

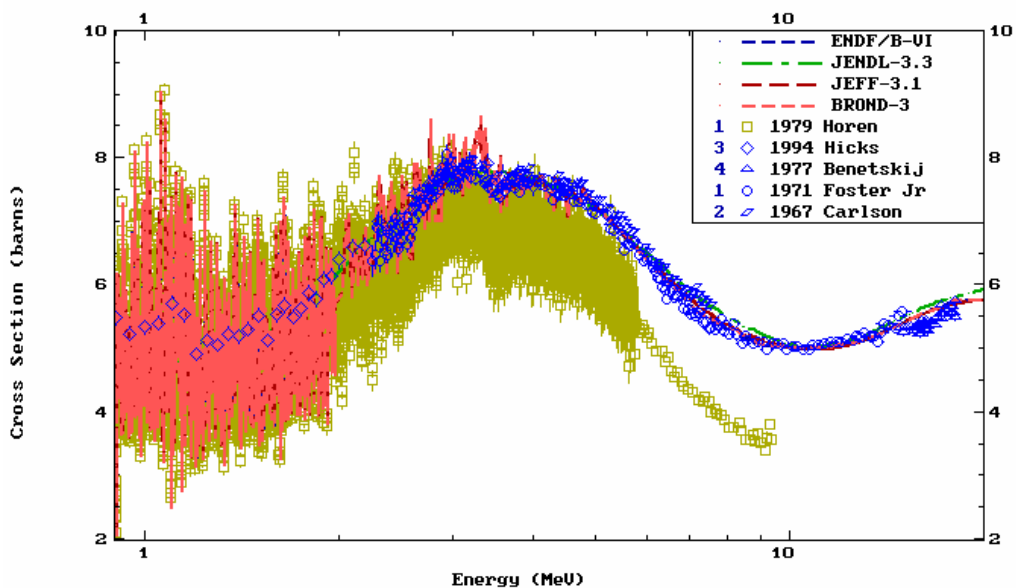


Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений  $^{206}\text{Pb}$  в диапазоне энергий от 0.9 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

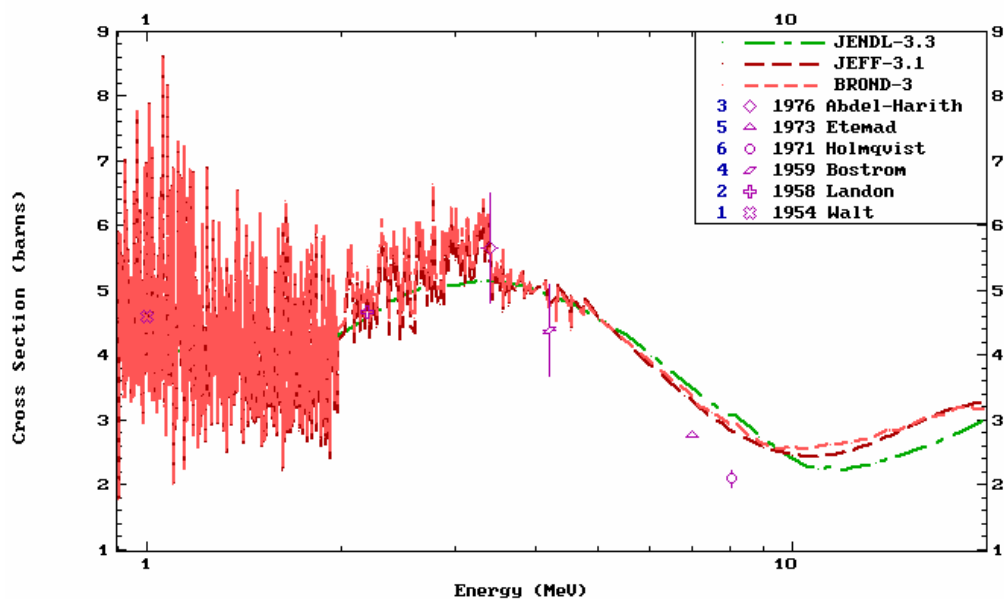


Рис. 7. Оценки сечений упругого рассеяния нейтронов на  $^{206}\text{Pb}$  в диапазоне энергий от 0.9 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

значительно большие погрешности, чем указанные авторами. Это непосредственно следует из приведенного ниже рассмотрения экспериментальных данных по дифференциальным сечениям рассеяния нейтронов.

На рис. 8 для трех энергий нейтронов показано сравнение оценок угловых распределений с соответствующими экспериментальными данными. Аналогичные результаты имеются также для ряда промежуточных и более высоких энергий. Анализ угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, как правило, осуществляется на основе расчетов по оптической модели, и все оценки хорошо описывают имеющиеся экспериментальные данные. Для энергии нейтронов 7 МэВ данные работы [73Е] под передними углами оказываются заметно ниже данных других авторов, и именно эти данные вносят определяющий вклад в интегральное сечение рассеяния, полученное в [73Е]. Более детальные данные других авторов хорошо согласуются с оценками (рис.8), и это согласие снимает вопросы о расхождении оценок с измеренными интегральными сечениями

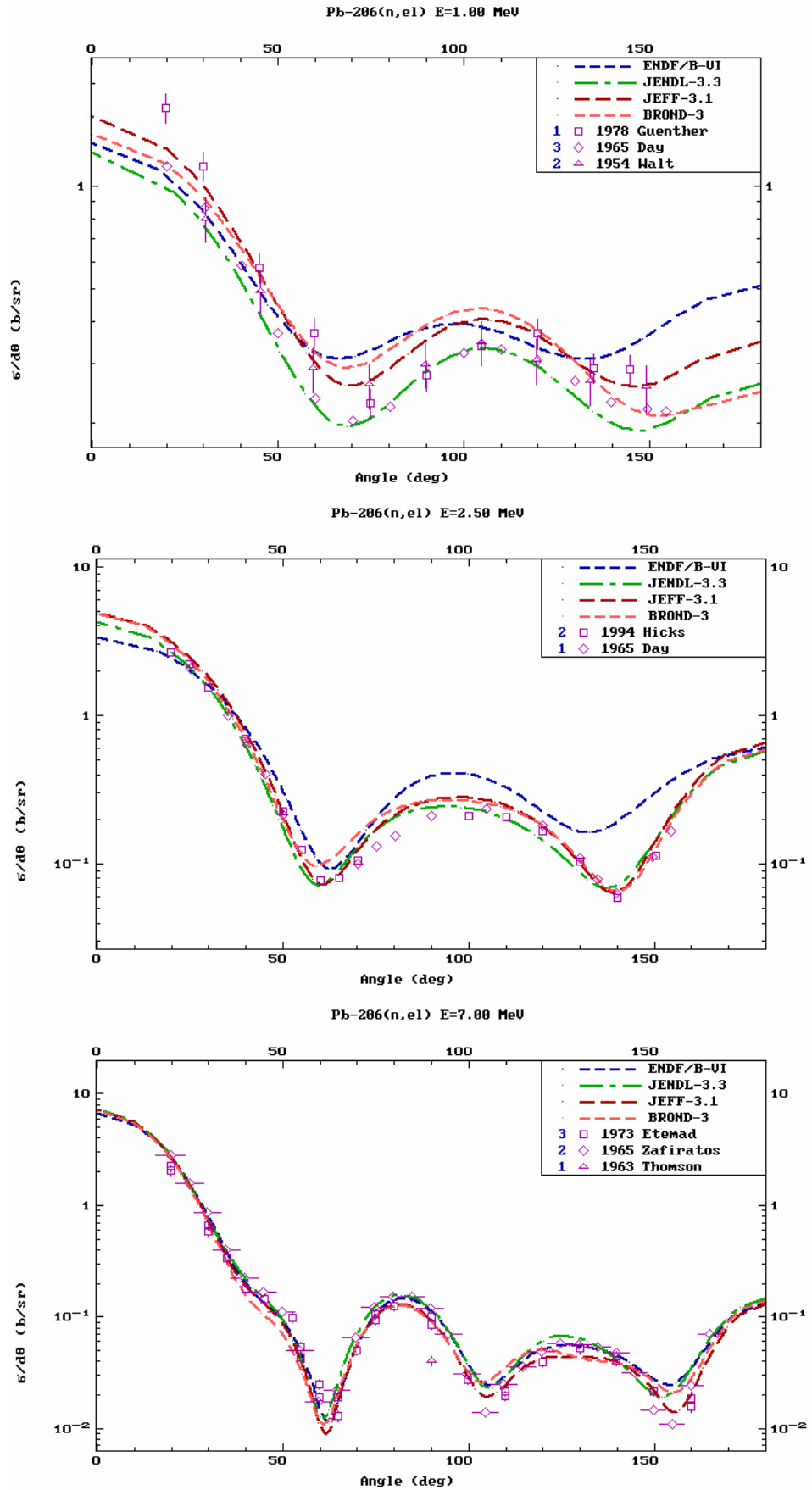


Рис. 8. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов при энергиях 1.00, 2.50 и 7.00 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

рассеяния. Аналогичное заключение возникает при анализе угловых распределений для энергии нейтронов 8 МэВ.

Следует отметить, что при энергиях ниже 2.5 МэВ в экспериментальных данных важную роль играет рассмотренная выше промежуточная структура нейтронных сечений. В этих условиях сравнение оценок с экспериментальными данными будет оправданно только при усреднении данных по широкому энергетическому интервалу, соответствующему условиям справедливости оптической модели.

### 3.3 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

В JENDL-3.3 рассматривался спектр 15 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в БРОНД-3 и JEFF-3.1 число учитываемых уровней увеличено до 24 и 25, соответственно, и в ENDF/B-VII учитывалось 39 уровней. Так как при увеличении числа уровней соответствующим образом изменяется порог статистического описания уровней, так называемый континуум уровней, то различия в числе рассматриваемых уровней не должно заметно отражаться на оценках полного (интегрального) сечения неупругого рассеяния

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 9. Каких-либо экспериментальных данных для этого сечения нет. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели, а также различием моделей расчета вкладов прямых и предравновесных процессов, существенных для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Все оценки дают весьма близкие значения сечений неупругого рассеяния, и лишь несколько завышенной в области энергий нейтронов до 4.5 МэВ можно считать JENDL-3.3.

Аргументы для такого заключения дает анализ функций возбуждения первого  $2^+$ -уровня, оценки которых приведены на рис. 10. Оценка JENDL-3.3 в области максимума значительно превышает другие оценки, и это обусловлено, по-видимому, слишком малой глубиной мнимой части оптического потенциала, использованного в соответствующих расчетах. Аналогичный дефект проявляется в JENDL-3.3 также для околопороговых участков функций возбуждения более высоких уровней.

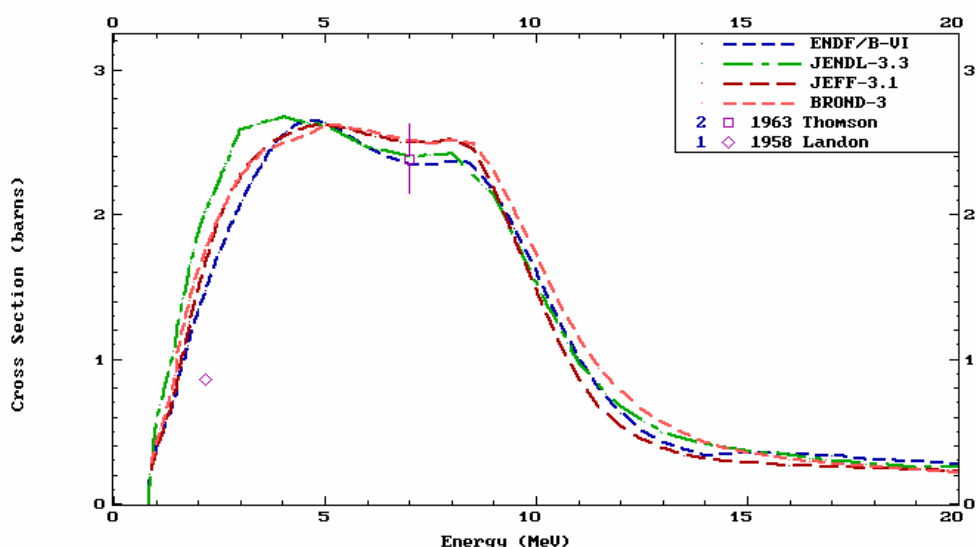


Рис. 9. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для  $^{206}\text{Pb}$

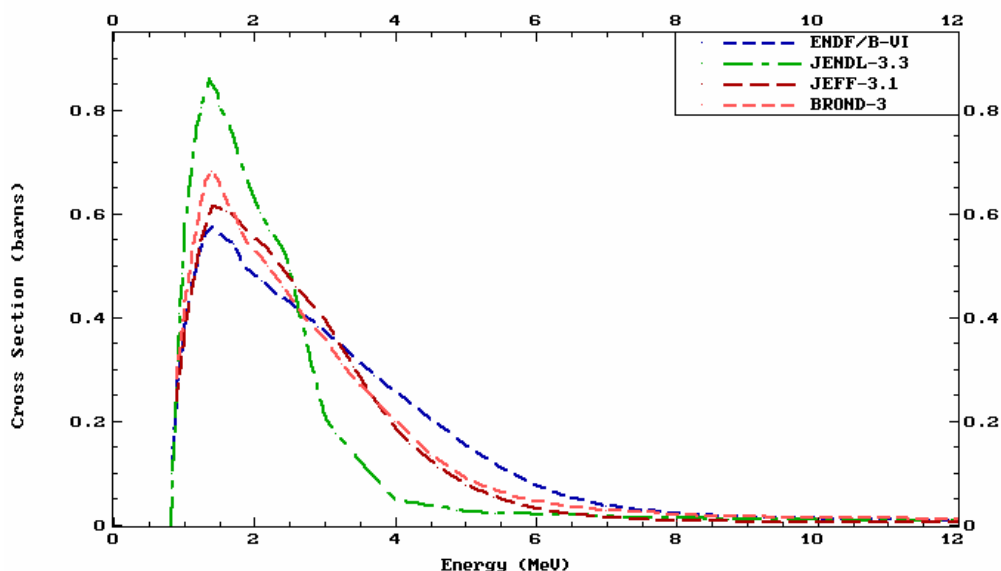


Рис. 10. Оценки сечения неупругого рассеяния нейтронов на первом  $2^+$ -уровне  $^{206}\text{Pb}$

Асимметрия угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов, обусловленная прямыми и предравновесными процессами, учтена во всех оценках для рассеяния на коллективных уровнях, а также для нейтронного рассеяния в континууме. Надежных экспериментальных данных по угловым распределениям неупруго рассеянных нейтронов для  $^{206}\text{Pb}$  нет, и справедливость оценок соответствующих угловых распределений подтверждается, главным образом, их подобием с аналогичными оценками для  $^{208}\text{Pb}$  и естественной смеси изотопов свинца, где такие данные имеются.

### 3.4 Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

На рис. 11 показаны оценки сечений радиационного захвата нейтронов с энергией выше 900 кэВ. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия обусловлены различиями моделирования плотности уровней в расчетах энергетической зависимости нейтронных и радиационных ширин. Экспериментальных данных вне резонансной области нет. Тем не менее, оценка JEFF-3.1 в области энергий до 7 МэВ следует признать заниженной. Если опираться на подобие энергетической зависимости сечений захвата для четно-четных изотопов свинца и значение  $1.0 \pm 0.3$  мб [58L] для сечения захвата на  $^{208}\text{Pb}$  при энергии нейтронов 2.5 МэВ, то для  $^{206}\text{Pb}$  при той же следует ожидать сечения 2-6 мб. Эта грубая оценка согласуется с результатами расчетов, положенных в основу оценок ENDF/B-VI, JENDL-3.3 и БРОНД-3.

Для энергии нейтронов все оценки дают сечение захвата близкое к 1 мб, что хорошо согласуется с систематикой, основанной на модели прямого-коллективного захвата нейтронов [86Б]. Такая модель предсказывает энергетическую зависимость сечений захвата нейтронов с энергиями выше 10 МэВ, подобную оценкам ENDF/B-VI, JEFF-3.1 и БРОНД-3, но существенно противоречащую оценке JENDL-3.3.

Необходимо, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 2-3 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не являются сколь-либо существенными для анализа характеристик ядерных реакторов.

### 3.5. Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT= 17)

Экспериментальные данные о сечении реакций (n,2n) показаны на рис. 12 совместно с различными оценками. Оценку JENDL-3.3, несомненно, следует признать сильно завышенной. ENDF/B-VI и БРОНД-3 значительно лучше согласуются с экспериментальными данными, и это обусловлено, в первую очередь, более корректным учетом в соответствующих расчетах оболочечных эффектов в плотности уровней ядер, влияние которых в изотопах свинца является достаточно сильным [98I].

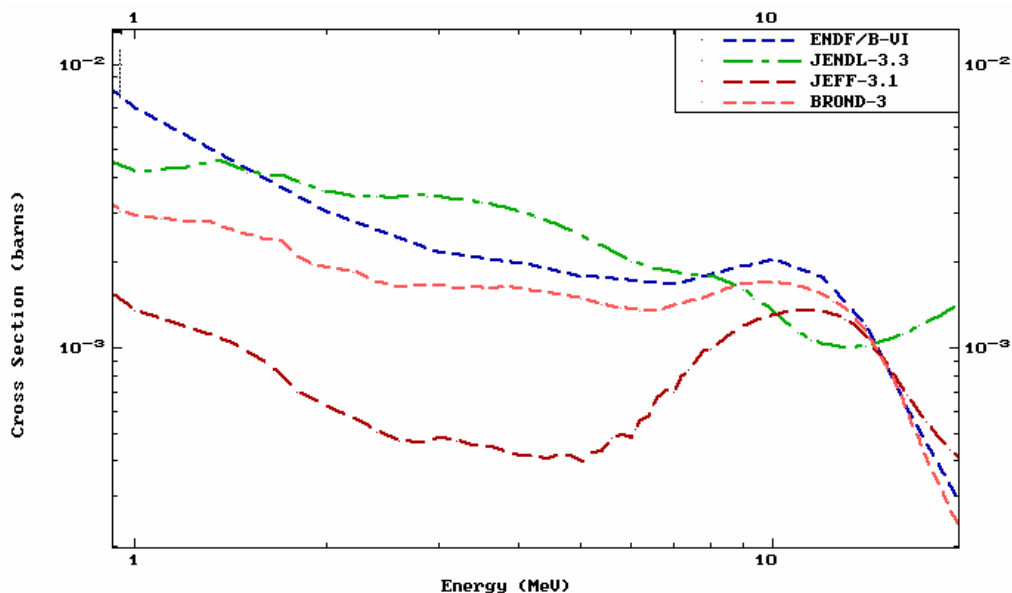


Рис. 11. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов  $^{206}\text{Pb}$

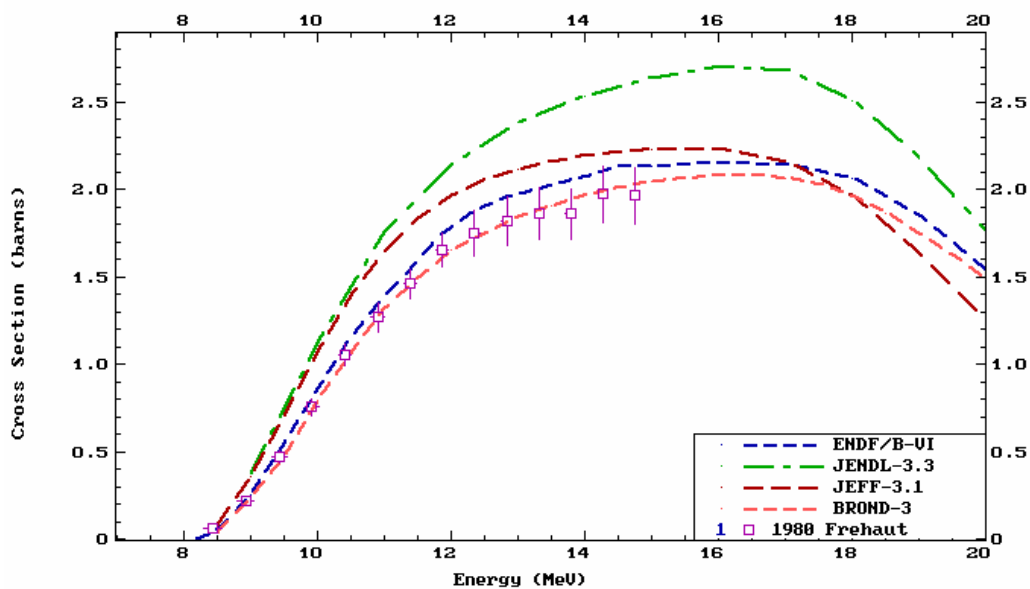


Рис.12. Оценки сечений реакции (n,2n) в сравнении с экспериментальными данными

Экспериментальных данных о сечении реакций (n,3n) нет. Сечение этой реакции существенно только выше 15 МэВ, и оно примерно соответствует разности сечения реакции (n,2n) в максимуме и в любой из вышележащих энергетических точек. При



энергии 20 МэВ сечение достигает значений 0.65 – 0.85 барна. Для согласованности, для сечения реакции (n,3n) следует принимать ту же оценку, что выбрана предпочтительной для (n,2n).

### 3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц

Реакции с вылетом заряженных частиц включены во все рассматриваемые оценки. Эти реакции существенны только в области энергий нейтронов выше 15 МэВ, и максимальное сечение таких реакций не превышает 30 мбарн. На рис. 13 показаны оценки сечений реакций (n,p) и (n,α), соответствующие наиболее высоким выходам заряженных частиц. Разногласия между оценками этих реакций сравнительно велики, и вряд ли оправдано предпочтение какой-либо из оценок без дополнительной информации.

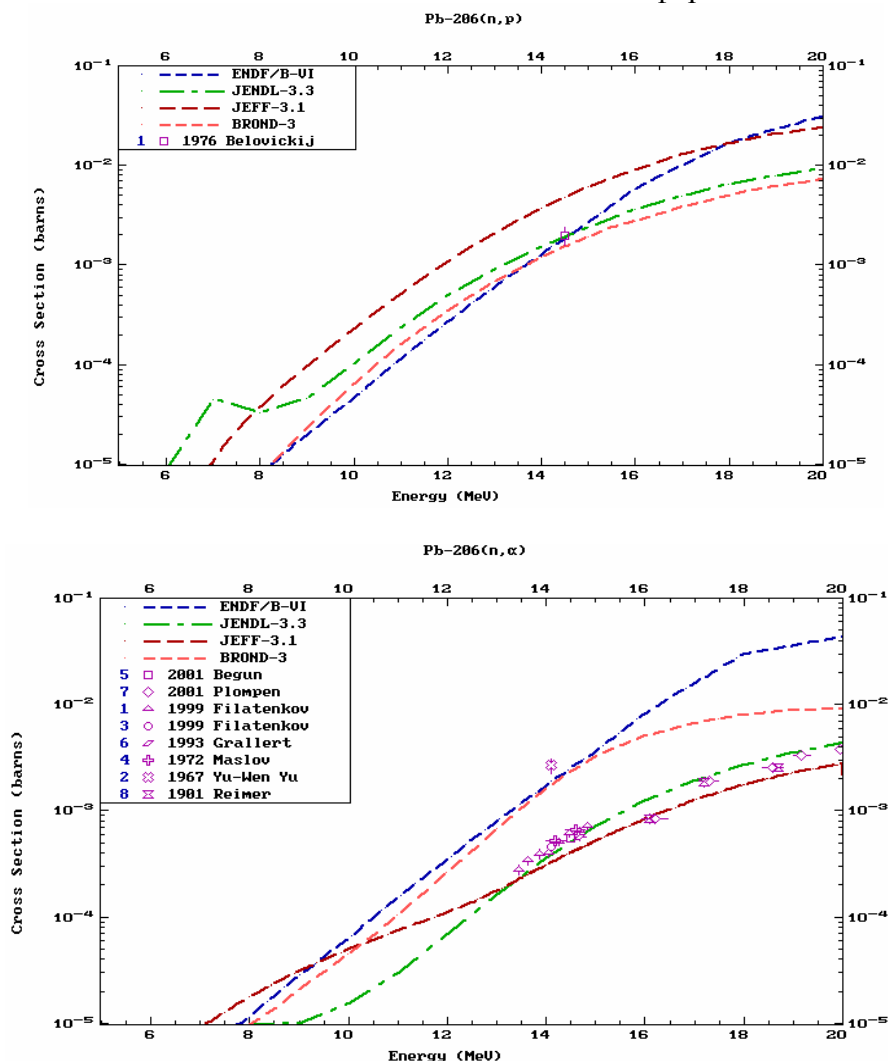


Рис.13. Оценки сечений реакции  $^{206}\text{Pb}(n,p)$  и  $^{206}\text{Pb}(n,\alpha)$

71H B.Holmqvist, T.Wiedling, Report AE-430 (1971).

73E M.A.Etemad, Report AE-482 (1973).

79H D.J. Horen, J.A.Harvey, N.W.Hill, Phys. Rev., C20, 478 (1979).

81H D.J. Horen, J.A.Harvey, N.W.Hill, Phys.Rev., C24, 1961 (1981).

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

98I A.V.Ignatyuk, In: Handbook for calculations of nuclear reaction data – Reference input parameter library. TECDOC-1034, IAEA, Vienna, 1998, ch. 5.

#### 4. Образование гамма-лучей

Оценки сечений образования и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата и неупругого взаимодействия нейтронов, содержатся во всех оценках. В БРОНД-3 дискретные гамма-переходы между низколежащими уровнями ядрамишени рассмотрены лишь ниже порога контитуума, и для более высоких энергий представлены интегральные выходы гамма-лучей. В остальных оценках содержится более детальная информация как о спектрах дискретных гамма-лучей, так и непрерывных спектрах гамма-излучения для всех каналов неупругого взаимодействия нейтронов с рассматриваемым изотопом.

Угловые распределения всех типов гамма-излучения в приняты изотропными во всех оценках.

#### 5. Заключение

На основе проведенного рассмотрения оценок и имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что оценку JENDL-3.3, по-видимому, нельзя признать удовлетворительной ни для полных нейтронных сечений ниже энергии 5 МэВ, ни для сечений неупругого рассеяния нейтронов и (n,xn) реакций. С другой стороны оценки ENDF/B-VI, БРОНД-3 и JEFF-3.1 (=ENDF/B-VII) для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений. Это свидетельствует об их достаточно высокой надежности и согласованности. Оценка JEFF-3.1 содержит много компонент ENDF/B-VI и ее преимущества перед другими оценками связано лишь с более детальным представлением спектров гамма-лучей и заряженных частиц. Для библиотеки РОСФОНД в настоящее время целесообразно принять оценку JEFF-3.1.

Следует однако отметить, что параметры большинства резонансов в этой оценке, также как в других оценках, существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов, поэтому в ближайшем будущем необходимо дополнительное уточнение оценки нейтронных сечений в области разрешенных резонансов, включая уточнение сечений для тепловых нейтронов. Такие уточнения вносятся в БРОНД-3, но эта работа сможет быть завершена лишь в 2007 г.

Автор заключения

А.В.Игнатьук

### 82.6. Свинец-207

Стабилен, содержание в естественной смеси  $(22.1 \pm 0.1)\%$

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для свинца-207:

ФОНД-2.2 = JENDL-3.3 – оценка M.Mizumoto, 1987, пересмотрена и существенно модифицирована в 1994 и дополнительно модифицирована в 2001;

БРОНД-3 – оценка А.В.Игнатьюка и др., 2001;

ENDF/B-VI – оценка M.Chadwick et al., 1996; дополнительные уточнения в 1999;

JEFF-3.1 – оценка A.Koning, 2005; принята также в ENDF/B-VII.

#### 1. Общие характеристики

1.1.  $Z = 82$  -зарядовое число;

1.2.  $A = 207$  (атомный вес);

1.3.  $AWR = 205.198$  (отношение массы ядра к массе нейтрона).

## 2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

### 2.3 Область разрешенных резонансов.

В оценке JENDL-3.3 граница области разрешенных резонансов выбрана равной 475 кэВ, и принят радиус потенциального рассеяния  $R_0 = 9.53$  фм. Нейтронные ширины резонансов взяты на основе анализа данных [78H] и компиляции Мугабгаба [84M].

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках ENDF/B-VI основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мугабгабом [84M] на основе анализа тех же экспериментальных данных [78H]. Верхняя граница резонансной области также принята равной 475 кэВ, и радиус потенциального рассеяния -  $R_0 = 9.5$  фм. Оценка ENDF/B-VI для разрешенных резонансов включена без изменений в БРОНД-3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII).

Радиационные ширины резонансов, использованные в оценках, показаны на рис. 1. Ширины многих s- и p-резонансов, которые не были измерены экспериментально и которым были приписаны средние значения ширин, отличаются очень сильно в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI. В частности, в ENDF/B-VI для s-резонансов с неизвестными ширинами были приняты значения 15 эВ, тогда как в JENDL-3.3 для тех же резонансов – 0.11 эВ. Для p-резонансов аналогичных расхождения оказываются несколько меньшими, но они также превышают 4.5 раза (рис. 1).

Недавно Мугабгабом были пересмотрены параметры нейтронных резонансов [06M] на основе новых измерений сечений пропускания и захвата нейтронов [87K, 97M]. Уточненные ширины приведены на рис. 1, и для большинства резонансов они существенно отличаются от использованных в обеих предыдущих оценках. В частности, средняя радиационная ширина ширин: уточненная средняя радиационная ширина p-резонансов  $0.38 \pm 0.03$  эВ [06M] оказывается примерно на 30% ниже значений, принятых в ENDF/B-VI для многих s-резонансов, и более чем в 3 раз выше значения 0.11 эВ, принятого в JENDL-3.3.

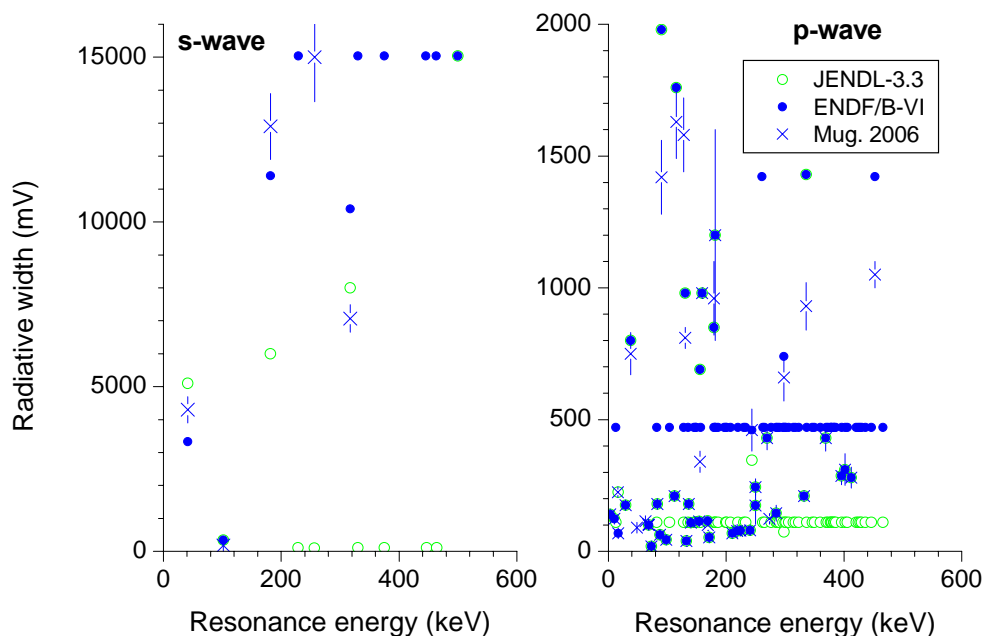


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках

Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров во всех последних оценках рекомендовано приближении Рэяха-Мура. Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

Оценка	JENDL-3.3	ENDF/B-VI=JEFF-3.1	Эксп. [84M]	[06M]
полное	11.966	11.459		
упругое	11.254	10.747		
захвата	0.712	0.711	0.712±0.010	0.622±0.014
резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ:	0.391	0.392	0.39±0.01 cal.	0.32±0.02 cal.

В пределах погрешности оценки согласуются с предыдущими экспериментальными данными о сечении радиационного захвата нейтронов и резонансном интеграле захвата [84M], но недавние уточнения экспериментальных данных требуют соответствующего уточнения резонансных параметров, включенных в оценки.

В оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI нет области неразрешенных резонансов. Однако, статистический анализ параметров резонансов, включенных в оценки, представляет интерес как для определения числа пропущенных резонансов и соответствующих погрешностей оцененных резонансных сечений, так и для анализа согласованности параметров плотности уровней и нейтронных силовых функций, используемых в оптической и статистической моделях для расчетов нейтронных сечений вне резонансной области.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа для набора резонансных параметров ENDF/B-VI представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов пропущено не более одного резонанса, но число резонансов сравнительно мало, и статистическая погрешность определения среднего расстояния между резонансами достигает 25%. С другой стороны, в наборе p-резонансов пропущено, по-видимому, около 20 резонансов. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, равны  $D_0=(48 \pm 9)$  кэВ и  $D_1=(4.0 \pm 0.3)$  кэВ. Для нейтронных силовых функций в рамках данного анализа получены значения  $S_0=(1.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$  и  $S_1=(0.55 \pm 0.15) \cdot 10^{-4}$  для s- и p-резонансов, соответственно. В аналогичном анализе Мугабгаба, проведенном для уточненных параметров нейтронных резонансов [06M], получены значения  $D_0=(30 \pm 4)$  кэВ,  $D_1=(4.03 \pm 0.29)$  кэВ и  $S_0=(0.76 \pm 0.31) \cdot 10^{-4}$ ,  $S_1=(0.45 \pm 0.07) \cdot 10^{-4}$ , которые с учетом погрешностей не сильно отличаются от результатов анализа параметров резонансов, содержащихся в ENDF/B-VI. Отношение  $D_0/D_1 > 7.5$  отличается примерно в два раза от статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, и это может указывать на достаточно сильную зависимость плотности нейтронных резонансов от четности, но также может оказаться следствием более значительного пропуска резонансов, чем полученного в рамках представленного выше анализа.

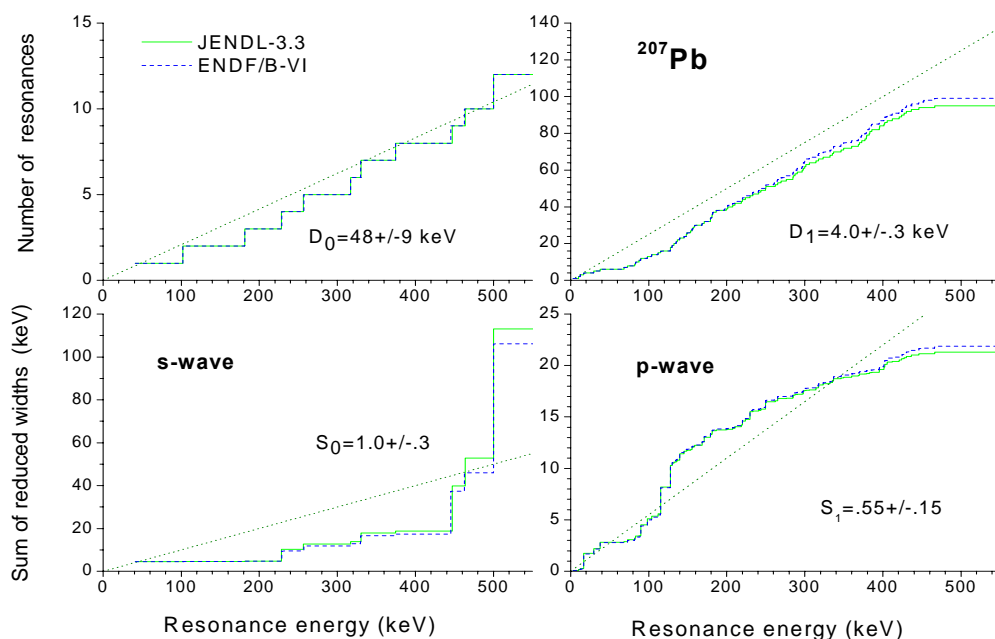


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI (=JEFF-3.1)

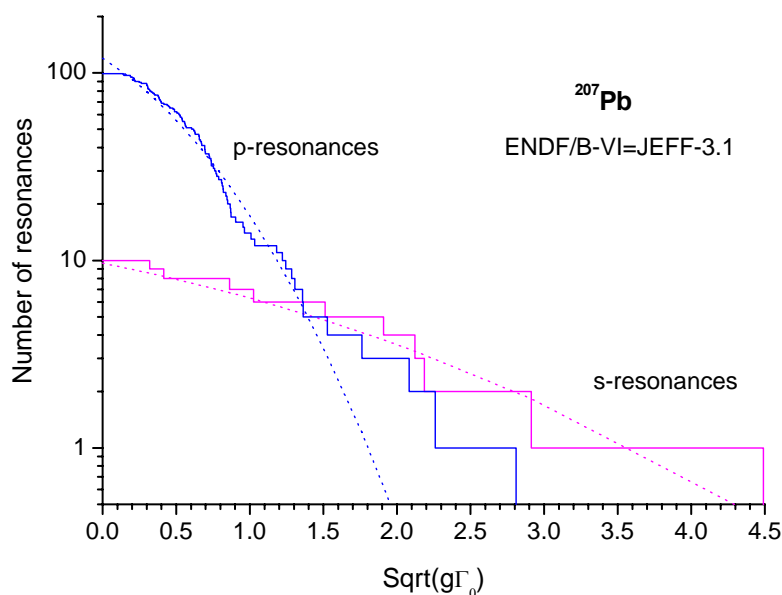


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов

На рис. 4 и 5 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для полных нейтронных сечений некоторые разногласия в нейтронных ширинах резонансов не выходят за пределы погрешностей экспериментальных данных. Для сечений захвата нейтронов имеются только экспериментальные данные, усредненные по большому числу резонансов. Разногласия оценок в этом случае проявляются, главным образом, в межрезонансных минимумах, и они обусловлены большими различиями средних радиационных ширин, принятых в оценках.

Учитывая неоправданно низкие значения радиационных ширин многих резонансов в JENDL-3.3, при формировании БРОНД-3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII) предпочтение было отдано оценке ENDF/B-VII. Однако, параметры многих резонансов в этой оценке существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов [06M], поэтому

в ближайшем будущем необходимо дополнительное уточнение оценки резонансных параметров.

78H D.J. Horen, J.A.Harvey, N.W.Hill, Phys. Rev. C18, 722 (1978)

84M S.Mughabghab, Neutron Cross Sections, Academic Press, NY,1984, part B.

87K R.Koehler et al., Phys. Rev. C35, 1646 (1987).

97M P.Mutti et al., Nuclear Data for Science and Technology (Trieste, 1997), Eds. G.Reffo, A.Ventura, C.Grandi, IPS, Bologna, 1997, part 2, p. 1584.

06M S.Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY,2006.

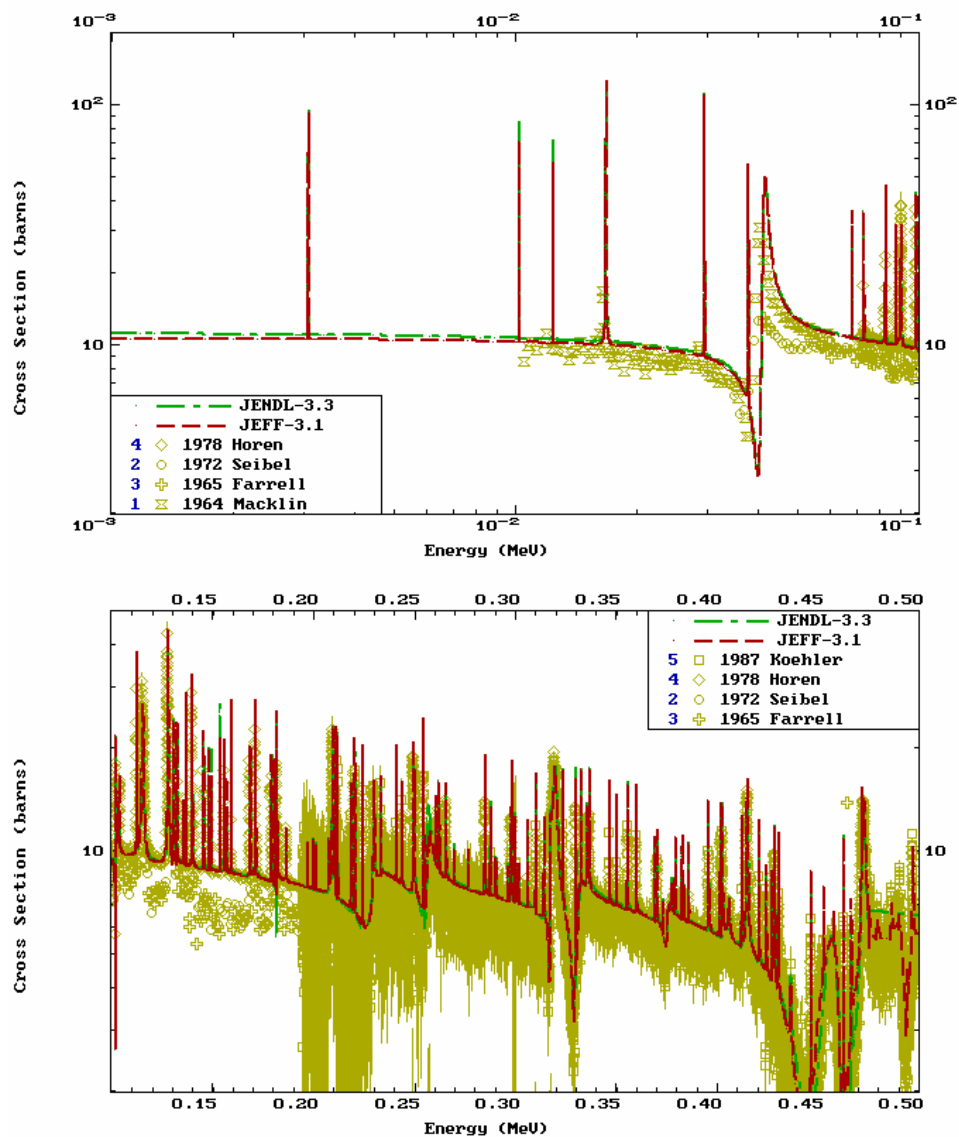


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

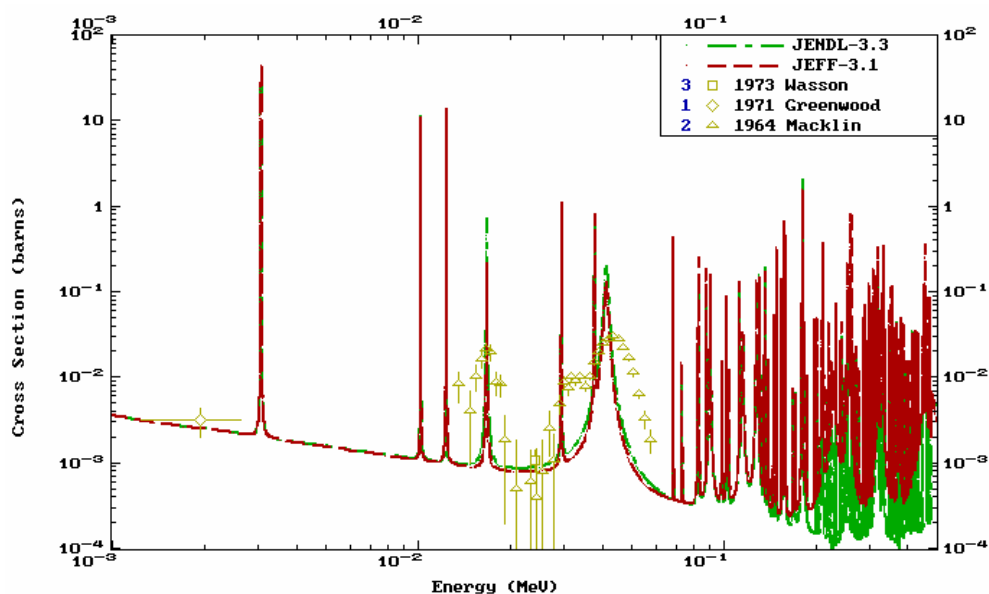


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

## 5. Нейтронные сечения вне резонансной области

### 3.1. Полные сечения (MT=1)

На рис. 6 показаны имеющиеся оценки полных нейтронных сечений в области энергий выше 475 кэВ в сравнении с экспериментальными данными. В дополнение к рассмотренным выше оценкам JENDL-3.3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII) вне резонансной области для всех сечений имеется также недавняя оценка БРОНД-3. Гросс-структура резонансо-подобных флуктуаций полных сечений, проявляющаяся в данных [78H, 87K], в несколько усредненной форме принята в качестве оценки полных сечений ENDF/B-VI в области энергий до 5 МэВ, и эта оценка сохранена без изменений также в БРОНД-3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII). В JENDL-3.3 для этого диапазона энергий принята бесструктурная оценка сечений, полученная на основе расчетов по оптической модели.

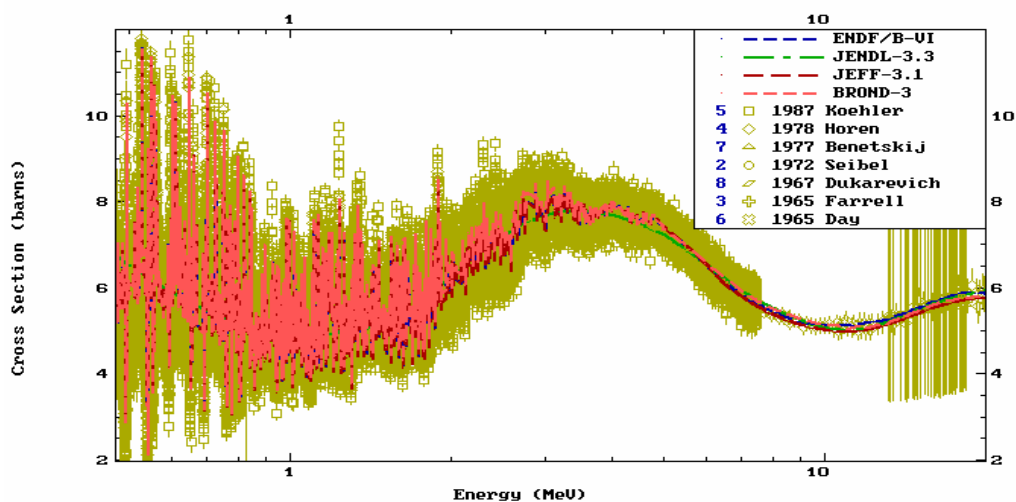


Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений  $^{206}\text{Pb}$  в диапазоне энергий от 0.9 до 20 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

В БРОНД-3 и JEFF-3.1 результаты расчетов по оптической модели приняты в качестве оценки полных сечений только для энергий нейтронов выше 5 МэВ. Все оценки

основанные на расчетах по оптической модели, хорошо согласуются между собой, несмотря на имеющиеся разногласия параметров оптического потенциала. Эти разногласия оказываются существенными в области более низких энергий, когда оптическая модель используется для расчетов сечений неупругого взаимодействия нейтронов.

### **3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов (MT=2).**

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. Прямых экспериментальных данных по интегральным сечениям упругого рассеяния нейтронов для изотопа  $^{207}\text{Pb}$  нет. В этих условиях можно ожидать, что более корректной для сечений упругого рассеяния будут оценка, в которой достигнуто лучшее описание данных по угловым распределениям упруго рассеянных нейтронов.

На рис. 7 для трех энергий нейтронов показано сравнение оценок угловых распределений с соответствующими экспериментальными данными. Аналогичные результаты имеются также для ряда промежуточных. Анализ угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, как правило, осуществляется на основе расчетов по оптической модели, и все оценки хорошо описывают имеющиеся экспериментальные данные.

Следует отметить, что при энергиях ниже 2.5 МэВ в экспериментальных данных важную роль играет рассмотренная выше промежуточная структура нейтронных сечений. В этих условиях сравнение оценок с экспериментальными данными будет оправданно только при усреднении данных по широкому энергетическому интервалу, соответствующему условиям справедливости оптической модели.



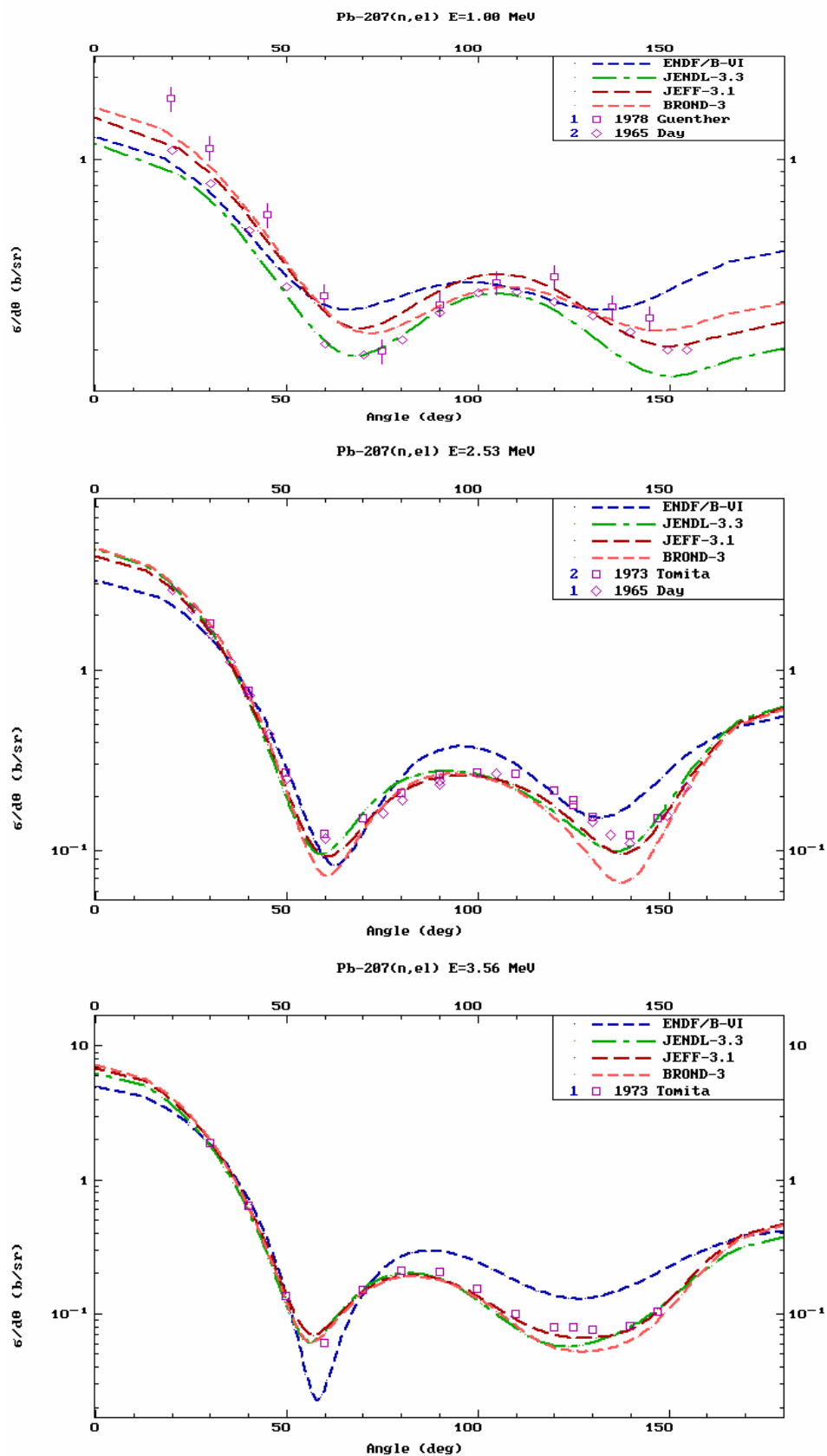


Рис. 7. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов при энергиях 1.00, 2.53 и 3.53 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

### 3.3 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

В JENDL-3.3 рассматривался спектр 8 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в ENDF/B-VI учитывалось 39 уровней, в БРОНД-3 – 40 уровней и в JEFF-3.1 – 20 уровней. Так как при увеличении числа уровней соответствующим образом изменяется порог статистического описания уровней, так называемый континуум уровней, то различия в числе рассматриваемых уровней не должно заметно отражаться на оценках полного (интегрального) сечения неупругого рассеяния.

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 8. Каких-либо экспериментальных данных для этого сечения нет. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели, а также различием моделей расчета вкладов прямых и предравновесных процессов, существенных для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Все оценки дают весьма близкие значения сечений неупругого рассеяния, и лишь несколько завышенной в области энергий нейтронов до 5 МэВ можно считать JENDL-3.3. Аргументы для такого заключения дает анализ функций возбуждения первого уровня, оценки которых приведены на рис. 9. Оценка JENDL-3.3 в области максимума существенно превышает другие оценки, и это обусловлено, по-видимому, слишком малой глубиной мнимой части оптического потенциала, использованного в соответствующих расчетах. Аналогичный дефект проявляется в JENDL-3.3 также для околопороговых участков функций возбуждения более высоких уровней.

Асимметрия угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов, обусловленная прямыми и предравновесными процессами, учтена во всех оценках для рассеяния на мультиплетах низколежащих коллективных уровнях, а также для нейтронного рассеяния в

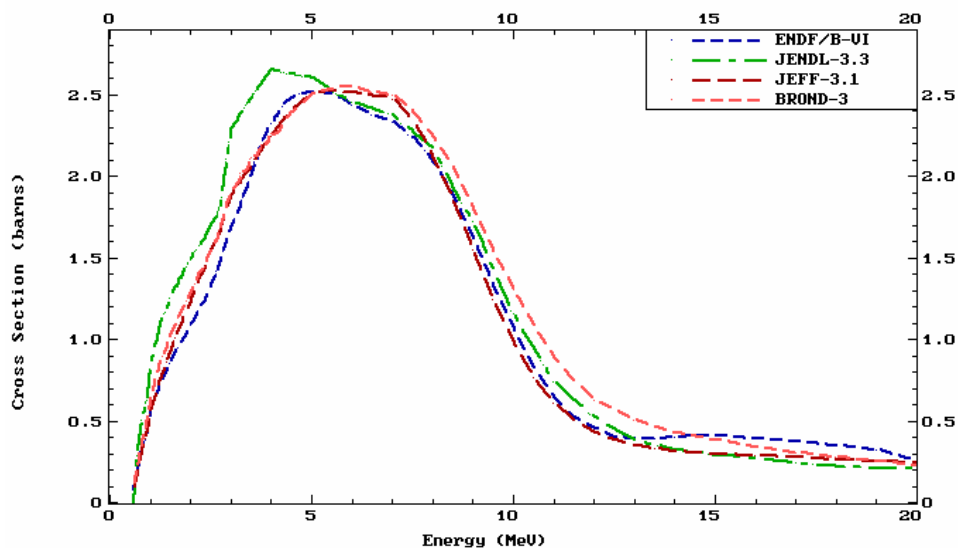


Рис. 8. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для  $^{207}\text{Pb}$

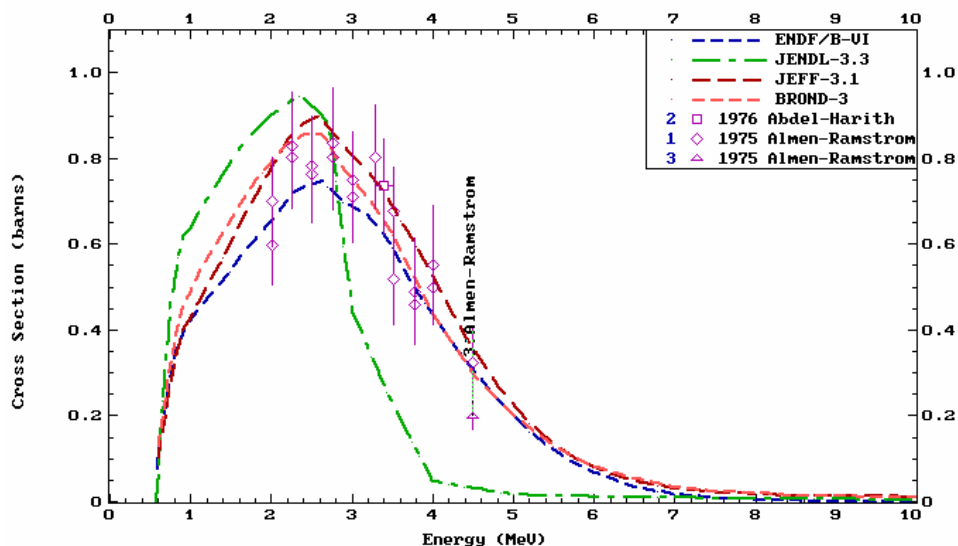


Рис. 9. Оценки сечения неупругого рассеяния нейтронов на первом уровне  $^{207}\text{Pb}$

континууме. Надежных экспериментальных данных по угловым распределениям неупруго рассеянных нейтронов для  $^{207}\text{Pb}$  нет, и справедливость оценок соответствующих угловых распределений подтверждается, главным образом, их подобием с аналогичными оценками для  $^{208}\text{Pb}$  и естественной смеси изотопов свинца, где такие данные имеются.

### 3.4 Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

На рис. 10 показаны оценки сечений радиационного захвата нейтронов выше 475 кэВ. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия обусловлены различиями моделирования плотности уровней в расчетах энергетической зависимости нейтронных и радиационных ширин. Экспериментальных данных вне резонансной области нет. Тем не менее, оценка JEFF-3.1 в области энергий до 7 МэВ следует признать заниженной. Если опираться на подобие энергетической зависимости сечений захвата для четно-четных изотопов свинца и значение  $1.0 \pm 0.3$  мб [58L] для сечения захвата на  $^{208}\text{Pb}$  при энергии нейтронов 2.5 МэВ, то для  $^{207}\text{Pb}$  при той же следует ожидать сечения 4-7 мб. Эта грубая оценка согласуется с результатами расчетов, положенных в основу оценок ENDF/B-VI, JENDL-3.3 и БРОНД-3.

Для энергии нейтронов все оценки дают сечение захвата близкое к 1 мб, что хорошо согласуется с систематикой, основанной на модели прямого-коллективного захвата нейтронов [86Б]. Такая модель предсказывает энергетическую зависимость сечений захвата нейтронов с энергиями выше 10 МэВ, подобную оценкам ENDF/B-VI, JEFF-3.1 и БРОНД-3, но существенно противоречащую оценке JENDL-3.3.

Необходимо, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 2-3 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не являются сколь-либо существенными для анализа характеристик ядерных реакторов.

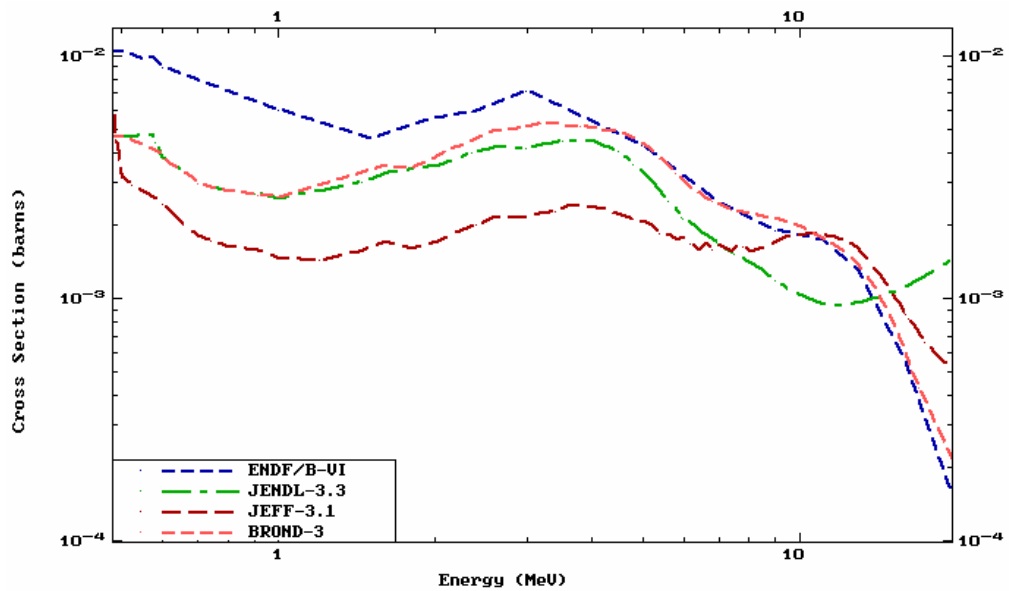


Рис. 10. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов для  $^{207}\text{Pb}$

### 3.5. Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT= 17)

Экспериментальные данные о сечении реакций (n,2n) показаны на рис. 11 совместно с различными оценками. Оценку JENDL-3.3, несомненно, следует признать сильно завышенной. ENDF/B-VI и БРОНД-3 значительно лучше согласуются с экспериментальными данными, и это обусловлено, в первую очередь, более корректным учетом в соответ-

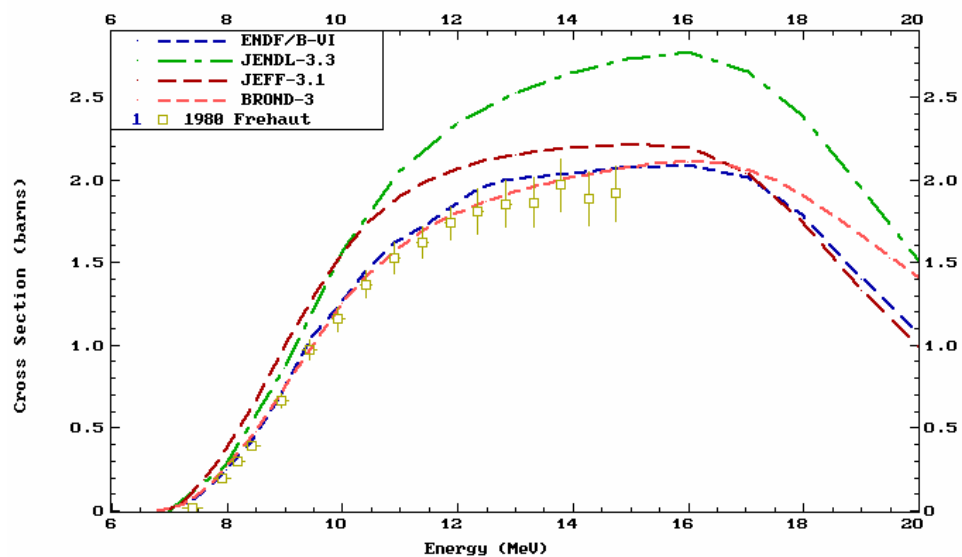


Рис.11. Оценки сечений реакции (n,2n) в сравнении с экспериментальными данными

ствующих расчетах оболочечных эффектов в плотности уровней ядер, влияние которых в изотопах свинца является достаточно сильным [98I].

Экспериментальных данных о сечении реакций (n,3n) нет. Сечение этой реакции существенно только выше 15 МэВ, и оно примерно соответствует разности сечения реакции (n,2n) в максимуме и в любой из вышележащих энергетических точек. При энергии 20 МэВ сечение достигает значений 0.75 – 1.15 барна. Для согласованности, для сечения реакции (n,3n) следует принимать ту же оценку, что выбрана предпочтительной для (n,2n).

### 3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц

Реакции с вылетом заряженных частиц включены во все рассматриваемые оценки. Эти реакции существенны только в области энергий нейтронов выше 15 МэВ, и максимальное сечение таких реакций не превышает 30 мбарн. На рис. 12 показаны оценки сечений реакций (n,p) и (n,α), соответствующие наиболее высоким выходам заряженных частиц. Разногласия между оценками этих реакций сравнительно велики, и вряд ли оправдано предпочтение какой-либо из оценок без дополнительной информации

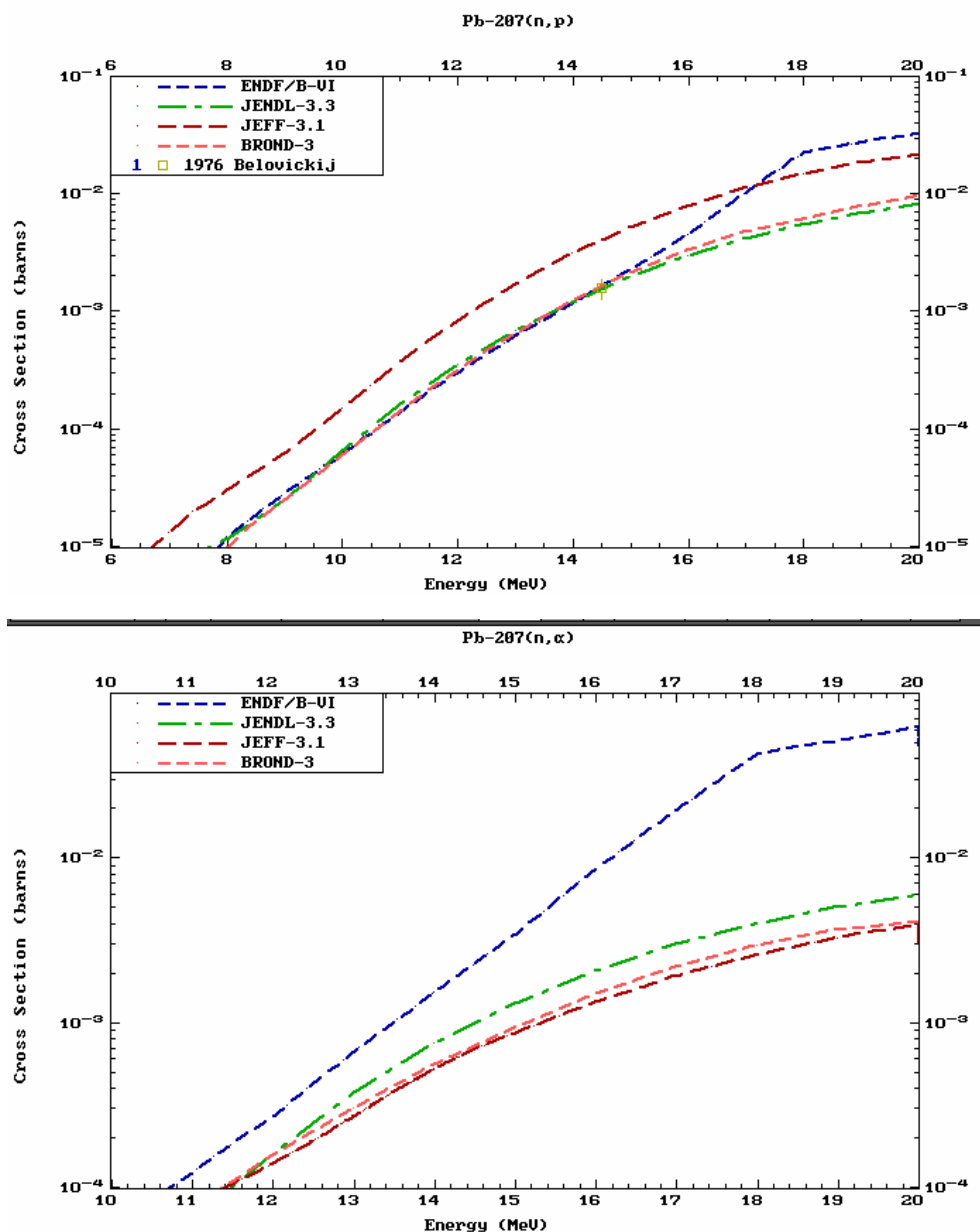


Рис.13. Оценки сечений реакции  $^{207}\text{Pb}(n,p)$  и  $^{207}\text{Pb}(n,\alpha)$

78H D.J. Horen, J.A.Harvey, N.W.Hill, Phys. Rev. C18, 722 (1978)

87K R.Koehler et al., Phys. Rev. C35, 1646 (1987).

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

98I A.V.Ignatyuk, In: Handbook for calculations of nuclear reaction data – Reference input parameter library. TECDOC-1034, IAEA, Vienna, 1998, ch. 5.

#### 4. Образование гамма-лучей

Оценки сечений образования и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата и неупругого взаимодействия нейтронов, содержатся во всех оценках. В БРОНД-3 дискретные гамма-переходы между низколежащими уровнями ядрамишени рассмотрены лишь ниже порога контитуума, и для более высоких энергий представлены интегральные выходы гамма-лучей. В остальных оценках содержится более детальная информация как о спектрах дискретных гамма-лучей, так и непрерывных спектрах гамма-излучения для всех каналов неупругого взаимодействия нейтронов с рассматриваемым изотопом.

Угловые распределения всех типов гамма-излучения приняты изотропными во всех оценках.

#### 5. Заключение

На основе проведенного рассмотрения оценок и имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что оценку JENDL-3.3, по-видимому, нельзя признать удовлетворительной ни для полных нейтронных сечений ниже энергии 5 МэВ, ни для сечений неупругого рассеяния нейтронов и (n,xn) реакций. С другой стороны оценки ENDF/B-VI, БРОНД-3 и JEFF-3.1 (=ENDF/B-VII) для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений. Это свидетельствует об их достаточно высокой надежности и согласованности. Оценка JEFF-3.1 содержит много компонент ENDF/B-VI, и ее преимущества перед другими оценками связано лишь с более детальным представлением спектров гамма-лучей и заряженных частиц. Для библиотеки РОСФОНД в настоящее время целесообразно принять оценку JEFF-3.1.

Следует однако отметить, что параметры большинства резонансов в этой оценке, также как в других оценках, существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов, поэтому в ближайшем будущем необходимо дополнительное уточнение оценки нейтронных сечений в области разрешенных резонансов, включая уточнение сечений для тепловых нейтронов. Такие уточнения вносятся в БРОНД-3, но эта работа будет завершена лишь в 2007 г.

Автор заключения

А.В.Игнатюк

## 82.7. Свинец-208

Стабилен, содержание в естественной смеси ( $52.4 \pm 0.1$ )%

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для свинца-208:

ФОНД-2.2 = JENDL-3.3 – оценка M.Mizumoto, 1987, пересмотрена и существенно модифицирована в 1994 и дополнительно модифицирована в 2001;

БРОНД-3 – оценка А.В.Игнатюка и др., 2001;

ENDF/B-VII – оценка M.Chadwick et al., 1996; дополнительные уточнения в 1999 и 2002, и еще раз уточнены сечения неупругих взаимодействий в 2006;

JEFF-3.1 – оценка A.Koning, 2005.

### 1. Общие характеристики

1.1.  $Z = 82$  -зарядовое число;

1.2.  $A = 208$  (атомный вес);

1.3.  $AWR = 206.190$  (отношение массы ядра к массе нейтрона).

### 2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

#### 2.4 Область разрешенных резонансов.

В оценке JENDL-3.3 граница области разрешенных резонансов выбрана равной 1.0 МэВ, и принят радиус потенциального рассеяния  $R_0 = 9.69$  фм. Нейтронные ширины резонансов взяты на основе анализа данных [86H] и компиляции Мугабгаба [84M].

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках ENDF/B-VI основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мугабгабом [84M] на основе анализа тех же экспериментальных данных [86H]. Верхняя граница резонансной области и радиус потенциального рассеяния приняты теми же, что в JENDL-3.. Оценка ENDF/B-VI для разрешенных резонансов включена без изменений в ENDF/B-VII и принята также в БРОНД-3 и JEFF-3.1.

Радиационные ширины резонансов, использованные в оценках, показаны на рис. 1. Ширины многих s- и p-резонансов, которые не были измерены экспериментально и которым были приписаны средние значения ширин, отличаются в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI весьма существенно. В частности, в ENDF/B-VI для s-резонансов с неизвестными ширинами были приняты значения 370 мэВ, тогда как в JENDL-3.3 для тех же резонансов – 180 мэВ. Для p-резонансов аналогичные значения ширин приняты равными 286 мэВ и 180 МэВ, соответственно (рис. 1).

Недавно Мугабгабом были пересмотрены параметры нейтронных резонансов [06M] на основе новых измерений сечений пропускания и захвата нейтронов [91C, 97M]. Уточненные ширины приведены на рис. 1, и для многих резонансов они заметно отличаются от использованных в обеих предыдущих оценках. В частности, средняя радиационная ширина ширин: уточненная средняя радиационная ширина p-резонансов  $0.38 \pm 0.03$  эВ [06M] оказывается примерно на 30% ниже значений, принятых в ENDF/B-VI для многих s-резонансов, и более чем в 3 раз выше значения 0.11 эВ, принятого в JENDL-3.3.

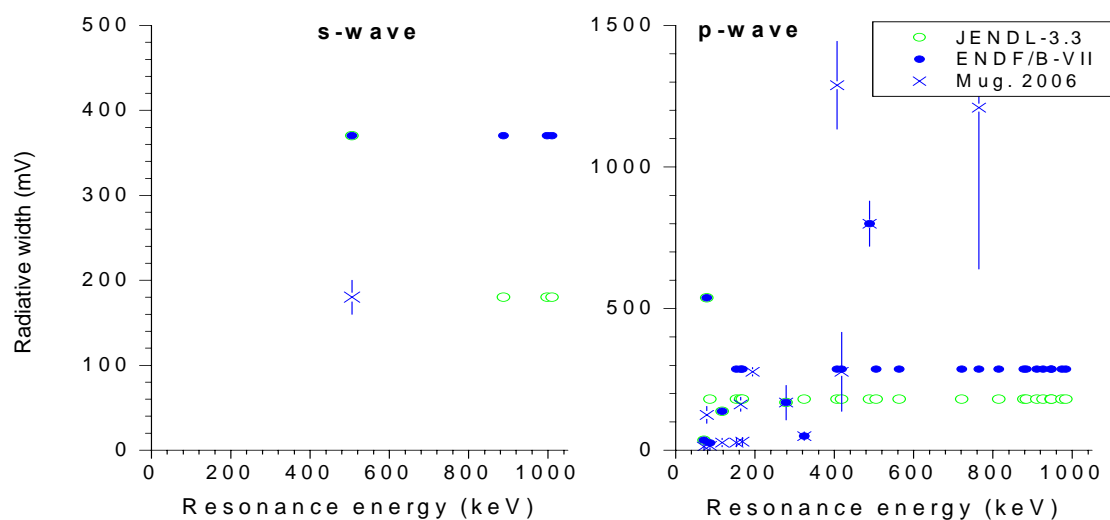


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках

Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров во всех оценках рекомендовано приближении Рэ́йха-Му́ра. Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

Оценка	JENDL-3.3	ENDF/B-VI=ENDF/B-VII	Эксп. [84M]	[06M]
полное	11.472	11.372		$11.50 \pm 0.15$
упругое	11.471	10.371		$11.50 \pm 0.15$
захвата	$5.007 \cdot 10^{-4}$	$4.920 \cdot 10^{-4}$	$(0.49 \pm 0.03) \cdot 10^{-3}$	$(0.23 \pm 0.02) \cdot 10^{-3}$
резонансный интеграл захвата				
выше 0.5 эВ:	$6.755 \cdot 10^{-3}$	$5.026 \cdot 10^{-3}$	$(2.0 \pm 0.2) \cdot 10^{-3} \text{ cal.}$	$(1.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-3} \text{ cal.}$

В пределах погрешности оценки согласуются с предыдущими экспериментальными данными о сечении радиационного захвата нейтронов и резонансном интеграле захвата [84M], но недавние уточнения экспериментальных данных требуют соответствующего уточнения резонансных параметров, включенных в оценки.

В оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI нет области неразрешенных резонансов. Однако, статистический анализ параметров резонансов, включенных в оценки, представляет интерес как для определения числа пропущенных резонансов и соответствующих погрешностей оцененных резонансных сечений, так и для анализа согласованности параметров плотности уровней и нейтронных силовых функций, используемых в оптической и статистической моделях для расчетов нейтронных сечений вне резонансной области.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VI, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов целесообразно привлечь анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа для набора резонансных параметров ENDF/B-VI представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов пропущено не более одного резонанса, но число резонансов сравнительно мало, и статистическая погрешность определения среднего расстояния между резонансами достигает 25%. С другой стороны, в наборе p-резонансов пропущено, по-видимому, около 20 резонансов. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, равны  $D_0 = (48 \pm 9) \text{ кэВ}$  и  $D_1 = (4.0 \pm 0.3) \text{ кэВ}$ . Для нейтронных силовых функций в рамках данного анализа получены значения  $S_0 = (1.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$  и  $S_1 = (0.55 \pm 0.15) \cdot 10^{-4}$  для s- и p-резонансов, соответственно. В аналогичном анализе Мугабгаба, проведенном для уточненных параметров нейтронных резонансов



[06M], получены значения  $D_0=(30 \pm 4)$  кэВ,  $D_1=(4.03 \pm 0.29)$  кэВ и  $S_0=(0.76 \pm 0.31) 10^{-4}$ ,  $S_1=(0.45 \pm 0.07) 10^{-4}$ , которые с учетом погрешностей не сильно отличаются от результатов анализа параметров резонансов, содержащихся в ENDF/B-VI. Отношение  $D_0/D_1 > 7.5$  отличается примерно в два раза от статистической оценки отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, и это может указывать на достаточно сильную зависимость плотности нейтронных резонансов от четности, но также может оказаться следствием более значительного пропуска резонансов, чем полученного в рамках представленного выше анализа.

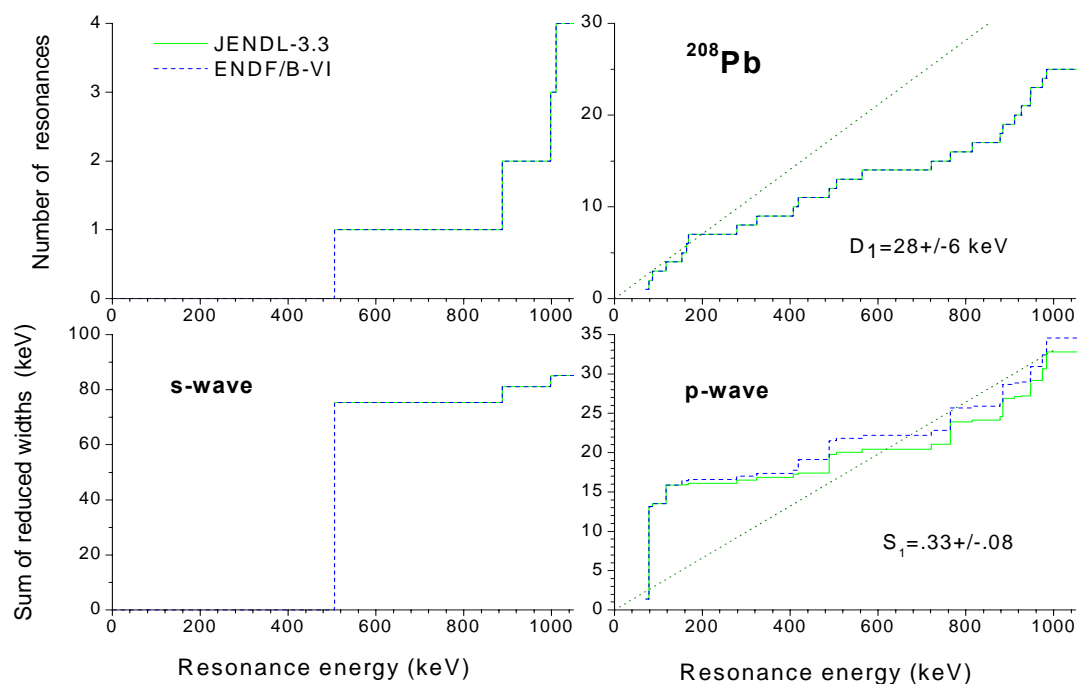


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VI (=JEFF-3.1)

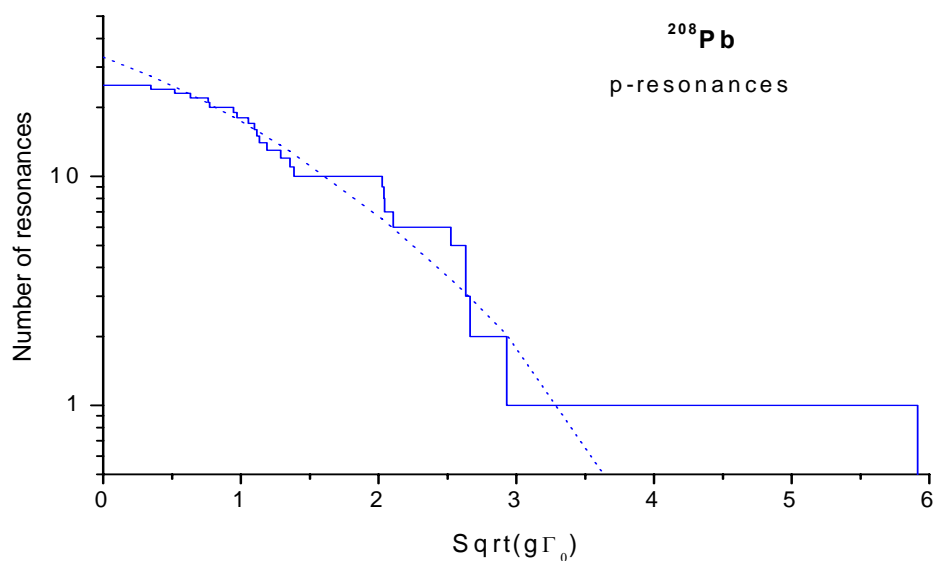


Рис. 3. Анализ пропуска p-резонансов

На рис. 4 показаны оценки полных нейтронных сечений для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для полных нейтронных

сечений некоторые разногласия в нейтронных ширинах резонансов не выходят за пределы погрешностей экспериментальных данных. Данные последних измерений [99H] получены с достаточно плохим энергетическим разрешением, и для энергий ниже 1 МэВ их не следует принимать во внимание.

На рис. 5 показаны оценки сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для сечений захвата имеются только экспериментальные данные, усредненные по большому числу резонансов. Разногласия оценок в этом случае проявляются, главным образом, в межрезонансных минимумах, и они обусловлены большими различиями средних радиационных ширин, принятых в оценках.

Учитывая неоправданно низкие значения радиационных ширин многих резонансов в JENDL-3.3, при формировании БРОНД-3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII) предпочтение было отдано оценке ENDF/B-VI. Однако, параметры многих резонансов в этой оценке существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов [06M], поэтому в ближайшем будущем необходимо дополнительное уточнение оценки резонансных параметров.

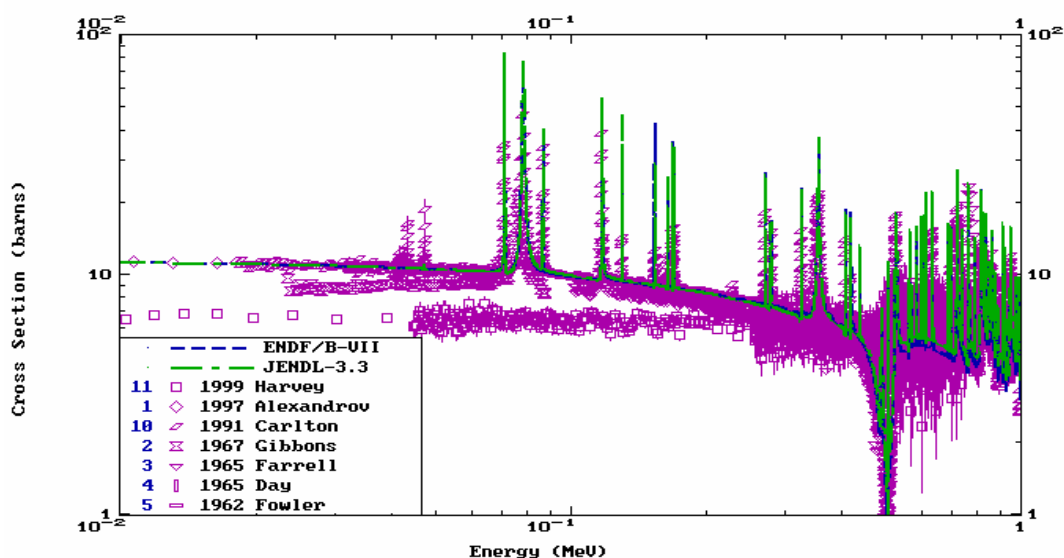


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

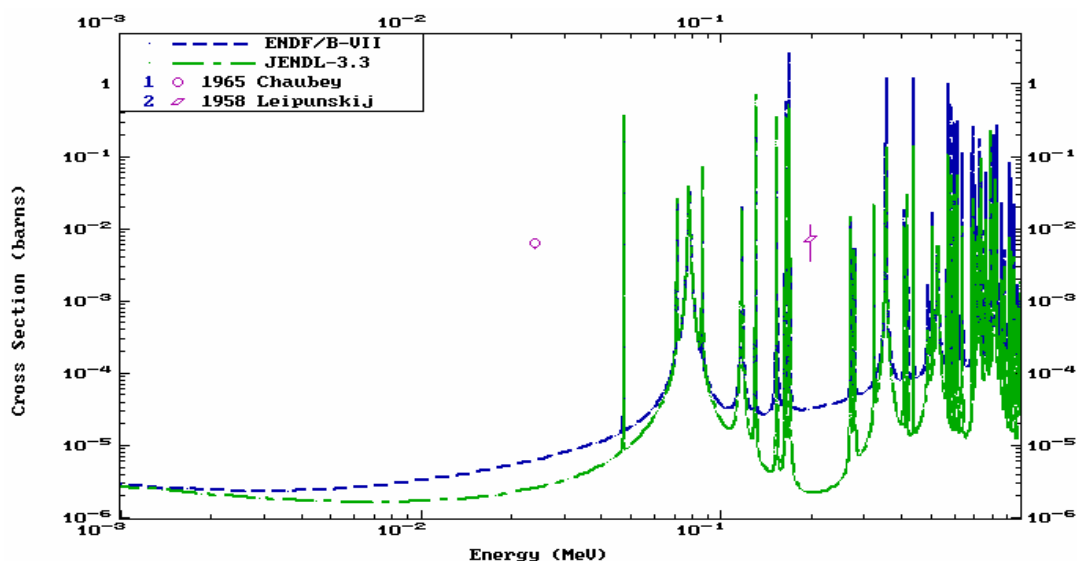


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

- 84M S.Mughabghab, Neutron Cross Sections, Academic Press, NY,1984, part B.  
 86H D.J. Horen et al., Phys. Rev. C34, 420 (1986).  
 91C R.F.Carlton et al., BAP, 36, 1349 (1991).  
 97A Yu.A.Alexandrov et al., Report JINR-E3-213, 1997.  
 97M P.Mutti et all.,DS Thesis, Gent Univ., 1997.  
 99H J.A.Harvey, Exfor 13732 (1999)  
 06M S.Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY,2006.

### 3.Нейтронные сечения вне резонансной области

#### 3.1. Полные сечения (MT=1)

На рис. 6 показаны имеющиеся оценки полных нейтронных сечений в области энергий выше 1 МэВ в сравнении с экспериментальными данными. В дополнение к рассмотренным выше оценкам JENDL-3.3 и JEFF-3.1 (=ENDF/B-VII) вне резонансной области для всех сечений имеется также оценка БРОНД-3. Гросс-структура резонансоподобных флуктуаций полных сечений, проявляющаяся в данных [87H, 91C, 99H], в несколько усредненной форме принята в качестве оценки полных сечений ENDF/B-VI в

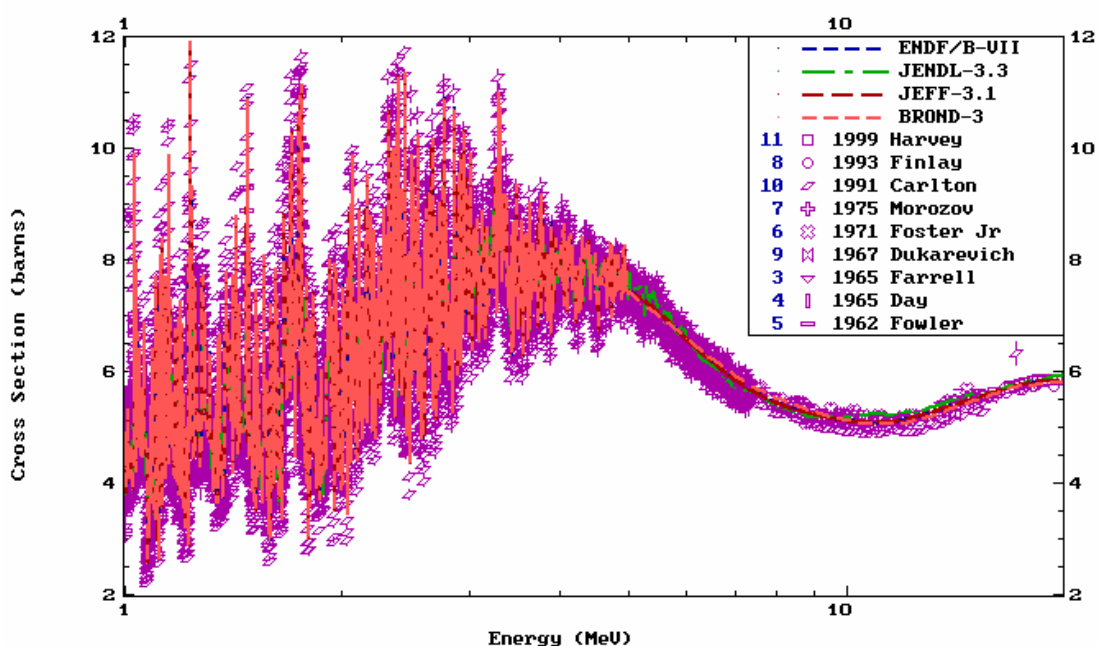


Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений  $^{208}\text{Pb}$  в диапазоне энергий выше 1 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

области энергий до 5 МэВ, и эта оценка сохранена с незначительными изменениями в JENDL-3.3, БРОНД-3 и JEFF-3.1(=ENDF/B-VII).

Во всех библиотеках выше 5 МэВ приняты в качестве оценки полных сечений результаты расчетов по оптической модели. Такие расчеты хорошо согласуются между собой, несмотря на имеющиеся разногласия параметров оптического потенциала. Эти разногласия потенциалов оказываются существенными в области более низких энергий,

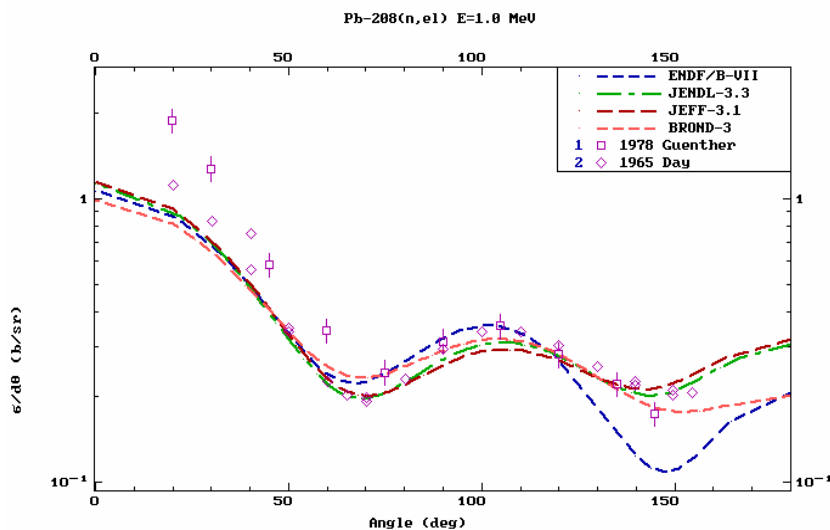
когда оптическая модель используется для расчетов сечений неупругого взаимодействия нейтронов.

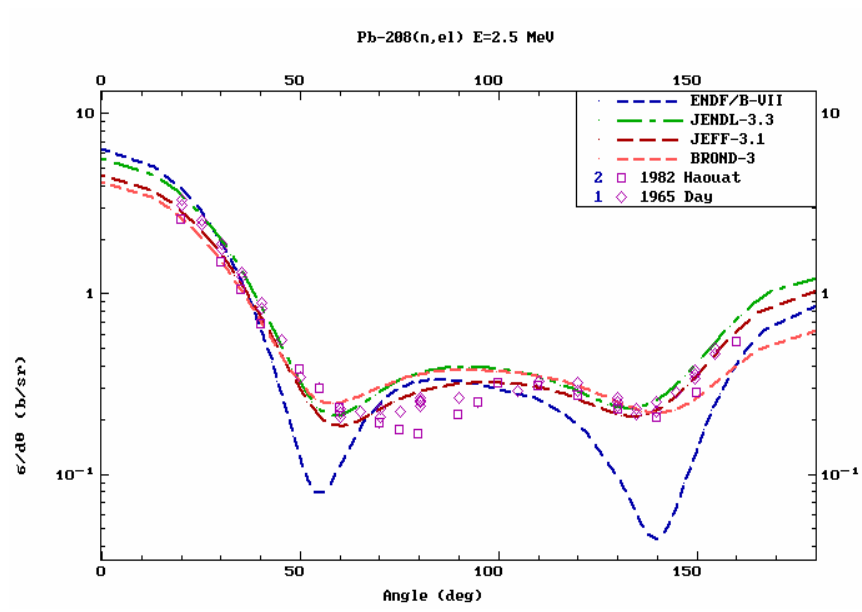
### 3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. Прямых экспериментальных данных по интегральным сечениям упругого рассеяния нейтронов для изотопа  $^{208}\text{Pb}$  нет. В этих условиях следует ожидать, что более корректной для сечений упругого рассеяния будет оценка, в которой достигнуто лучшее описание данных по угловым распределениям упруго рассеянных нейтронов.

На рис. 7 для трех энергий нейтронов показано сравнение оценок угловых распределений с соответствующими экспериментальными данными. Аналогичные результаты имеются также для ряда промежуточных и более высоких энергий. Анализ угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, как правило, осуществляется на основе расчетов по оптической модели, и все оценки хорошо описывают имеющиеся экспериментальные данные.

Следует отметить, что при энергиях ниже 2.5 МэВ в экспериментальных данных важную роль играет рассмотренная выше промежуточная структура нейтронных сечений. В этих условиях сравнение оценок с экспериментальными данными будет оправданно только при усреднении данных по широкому энергетическому интервалу, соответствующему условиям справедливости оптической модели.





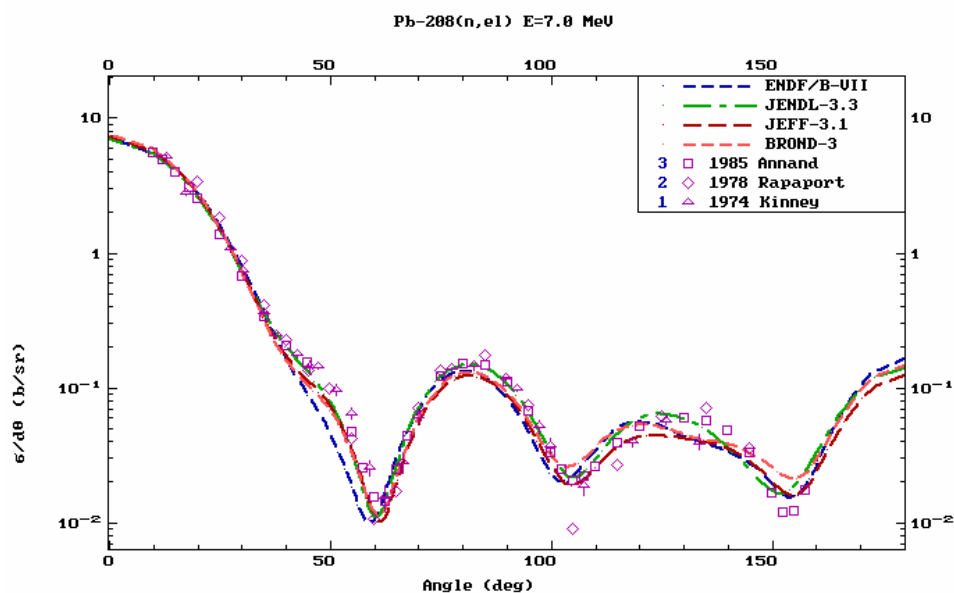


Рис. 7. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов при энергиях 1.0, 2.5 и 7.0 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

### 3.3 Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах.

В JENDL-3.3 рассматривался спектр 8 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в ENDF/B-VI учитывалось 39 уровней, в БРОНД-3 – 40 уровней и в JEFF-3.1 – 20 уровней. Так как при увеличении числа уровней соответствующим образом изменяется порог статистического описания уровней, так называемый континуум уровней, то различия в числе рассматриваемых уровней не должно заметно отражаться на оценках полного (интегрального) сечения неупругого рассеяния.

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 8 вместе с имеющимися экспериментальными данными. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели, а также различием моделей расчета вкладов прямых и предравновесных процессов, существенных для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Все оценки дают весьма близкие значения сечений неупругого рассеяния, и лишь несколько странной кажется энергетическая зависимость оценки JENDL-3.3 в области энергий нейтронов от 5 до 8 МэВ.

Недостатки оценки JENDL-3.3 проявляются более явно при рассмотрении функций возбуждения дискретных уровней ядра-мишени. Для первого уровня оценки соответствующих сечений приведены на рис. 9 в сравнении с экспериментальными данными. Оценка JENDL-3.3 в области максимума существенно превышает другие оценки, и это обусловлено, по-видимому, слишком малой глубиной мнимой части оптического потенциала, использованного в соответствующих расчетах. В то же время, после максимума функция возбуждения JENDL-3.3 убывает значительно более резко, чем все другие оценки. Аналогичный дефект проявляется в JENDL-3.3 также для функций возбуждения более высоких уровней.

Асимметрия угловых распределений неупруго рассеянных нейтронов, обусловленная прямыми и предравновесными процессами, учтена в большинстве оценок для рассеяния

на низколежащих коллективных уровнях, а также для нейтронного рассеяния в континууме.

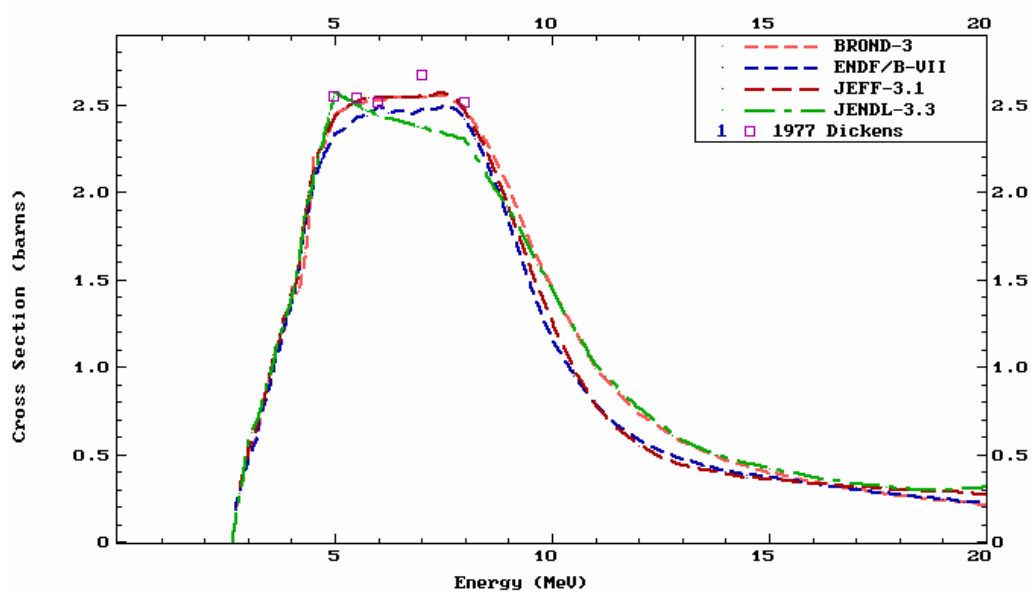


Рис. 8. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов для  $^{208}\text{Pb}$  в сравнении с экспериментальными данными

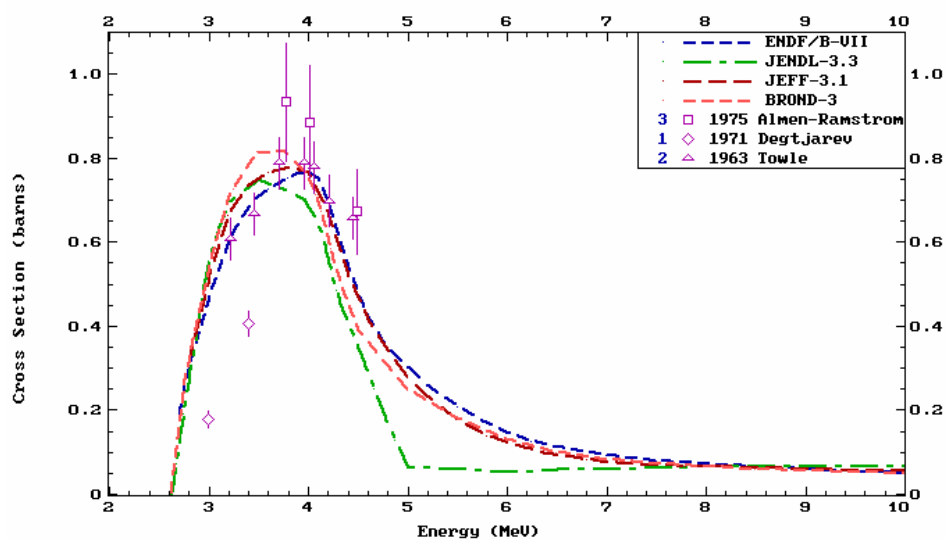


Рис. 9. Оценки сечения неупругого рассеяния нейтронов на первом уровне  $^{208}\text{Pb}$  в сравнении с экспериментальными данными

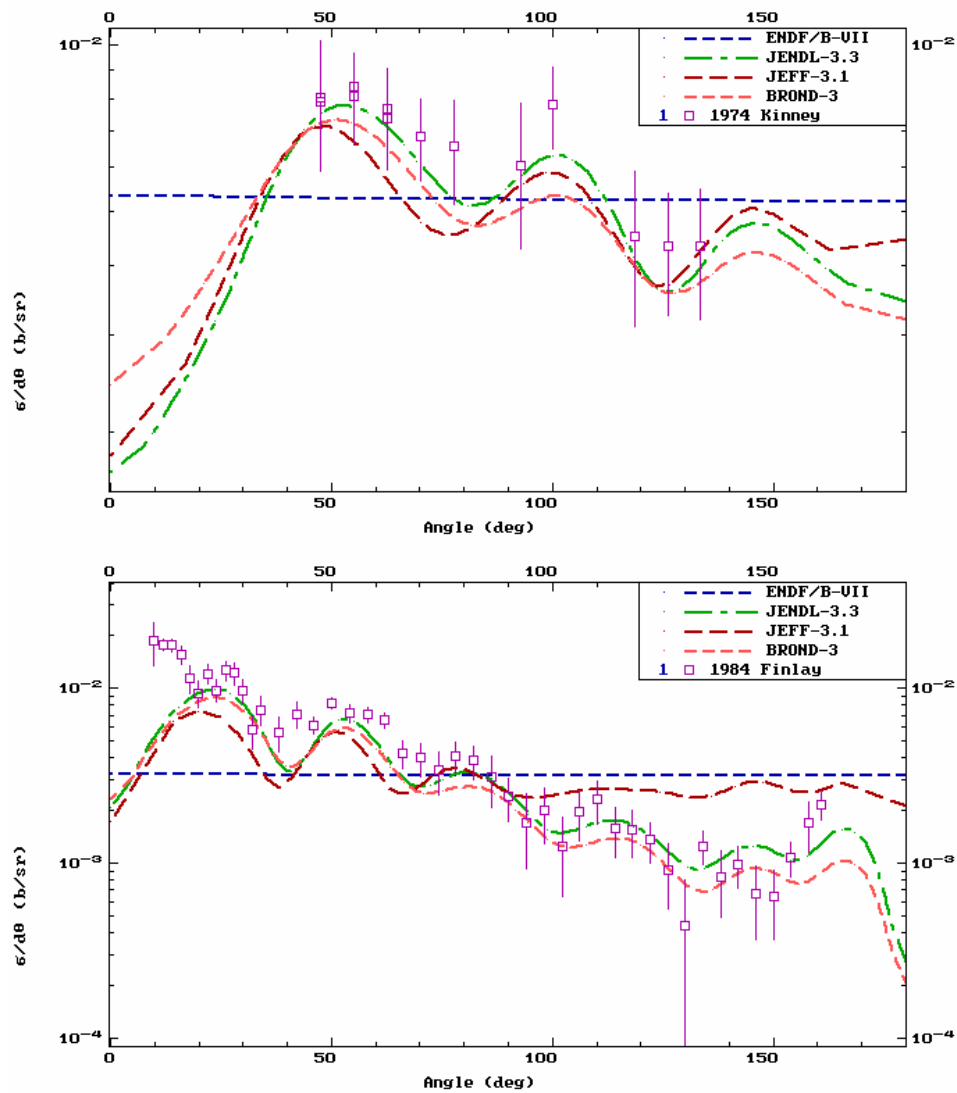


Рис. 10. Оценки угловых распределений рассеянных нейтронов первом  $3^-$  уровне  $^{208}\text{Pb}$  при начальных энергиях нейтронов 8.5 (вверху) и 20.0 МэВ (внизу) в сравнении с экспериментальными данными

Экспериментальных данных об угловых распределениях неупруго рассеянных нейтронов сравнительно мало. На рис. 10 показаны имеющиеся данные для энергий нейтронов 8.5 и 20.0 МэВ в сравнении с оценками. В ENDF/B-VII, также как в более ранней версии ENDF/B-VI, неупругое рассеяние на дискретных уровнях принято изотропным. Остальные оценки достаточно корректно воспроизводят наблюдаемые угловые распределения. Следует заметить, что превышение экспериментальных точек над оценками при малых углах, проявляющееся для энергии нейтронов 20 МэВ, по-видимому, связано с погрешностями выделения вклада упругого рассеяния нейтронов. Многочисленные данные по неупругому рассеянию протонов на нижайших коллективных уровнях свинца убедительно демонстрируют справедливость теоретических расчетов в описании формы угловых распределений для малых углов.

### 3.4 Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

На рис. 11 показаны оценки сечений радиационного захвата нейтронов вне резонансной области. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и они достаточно хорошо описывают не многочисленные экспериментальные данные. Данные при энергиях выше 7 МэВ подтверждают энергетическую зависимость, предсказанную моделью прямого-коллективного захвата нейтронов, и аналогичные



значения сечений захвата следует ожидать для всех тяжелых ядер при энергиях нейтронов выше 12-14 МэВ [86Б].

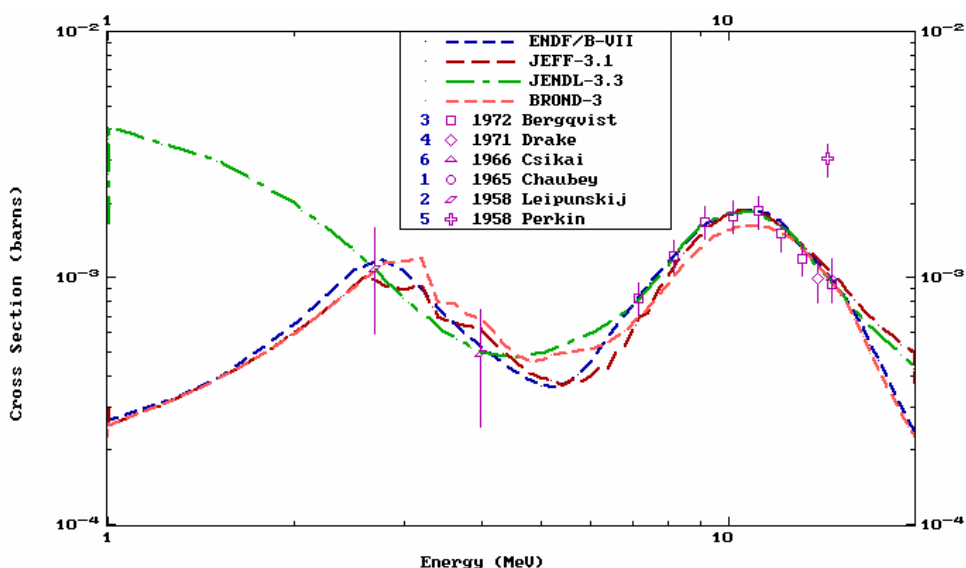


Рис.11. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов выше 1 МэВ в сравнении с экспериментальными данными

### 3.5 Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT= 17)

Экспериментальные данные о сечении реакции (n,2n) показаны на рис. 12 совместно с различными оценками. Оценку JENDL-3.3, несомненно, следует признать сильно завышенной. БРОНД-3 значительно лучше согласуется с экспериментальными данными [80F], и это обусловлено, в первую очередь, более корректным учетом в соответствующих расчетах оболочечных эффектов в плотности уровней ядер, влияние которых в изотопах свинца является достаточно сильным [98I]. Расхождение между данными двух измерений [80F] и [93S] дополнительной экспериментальной проверки, но в целом данные работы [80F] кажутся предпочтительными, так как аналогичные значения сечений реакции (n,2n) получены для всех изотопов свинца, и в случае  $^{204}\text{Pb}$  значение сечения в максимуме 2.0-2.2 б подтверждено в нескольких независимых измерениях. Подобное «универсальное» значение сечения в максимуме подтверждается также результатами систематических теоретических расчетов.

Экспериментальных данных о сечении реакций (n,3n) нет. Сечение этой реакции существенно только выше 15 МэВ, и оно примерно соответствует разности сечения реакции (n,2n) в максимуме и в любой из вышележащих энергетических точек. При энергии 20 МэВ сечение достигает значений 0.90 – 1.15 барна. Для согласованности, для сечения реакции (n,3n) следует принимать ту же оценку, что выбрана предпочтительной для (n,2n).

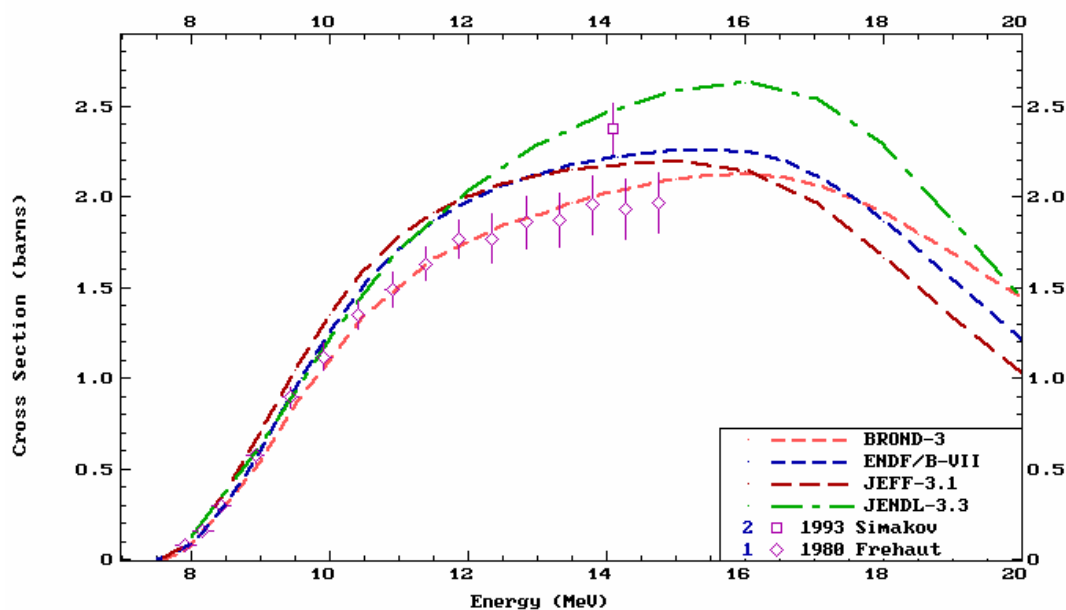


Рис.12. Оценки сечений реакции  $^{208}\text{Pb}(n,2n)$  в сравнении с экспериментальными данными

### 3.7. Реакции с вылетом заряженных частиц

Реакции с вылетом заряженных частиц включены во все рассматриваемые оценки. Эти реакции существенны только в области энергий нейтронов выше 15 МэВ, и максимальное сечение таких реакций не превышает 30 мбарн. На рис. 12 показаны оценки сечений реакций (n,p) и (n, $\alpha$ ), соответствующие наиболее высоким выходам заряженных частиц, вместе с имеющимися экспериментальными данными. Для реакции (n,p) результаты недавних измерений хорошо согласуются с оценками JENDL-3.3 и JEFF-3.1 и несколько хуже с БРОНД-3 и ENDF/B-VII. Для реакции (n, $\alpha$ ) экспериментальные данные весьма противоречивы, и вряд ли можно предпочесть какую-либо из оценок без дополнительной информации.

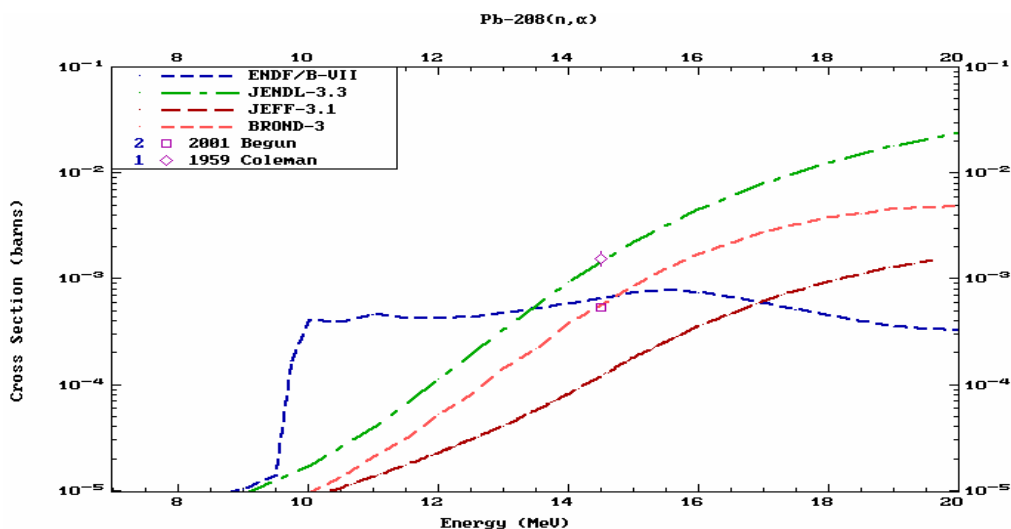


Рис.13. Оценки сечения реакции  $^{207}\text{Pb}(n,p)$

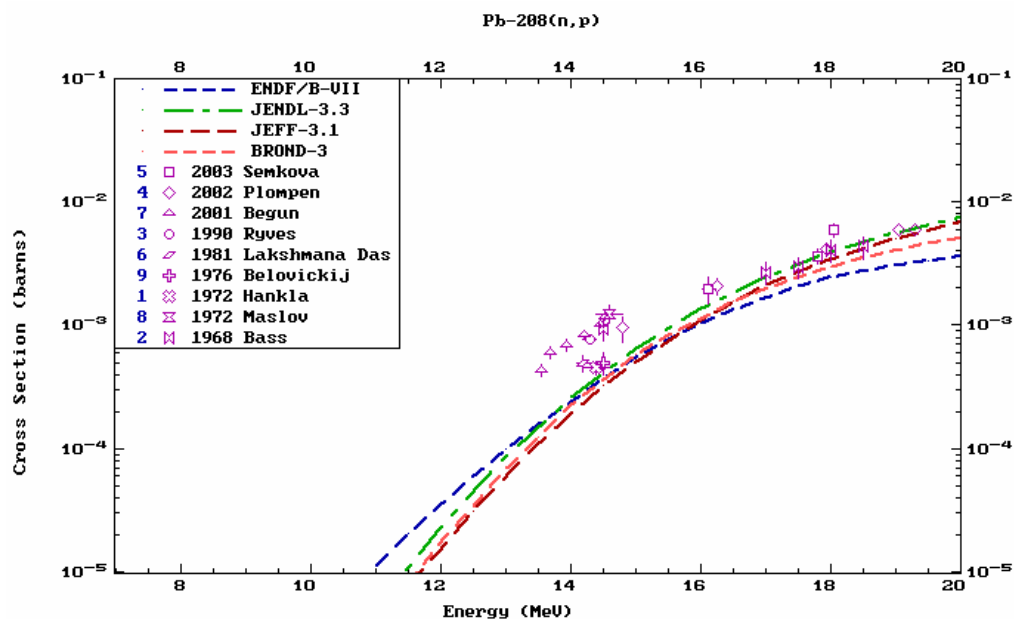


Рис.14. Оценки сечения реакции  $^{207}\text{Pb}(n, \alpha)$

#### 4. Образование гамма-лучей

Оценки сечений образования и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата и неупругого взаимодействия нейтронов, содержатся во всех оценках. В БРОНД-3 дискретные гамма-переходы между низколежащими уровнями ядермишени рассмотрены лишь ниже порога континуума, и для более высоких энергий представлены интегральные выходы гамма-лучей. В остальных оценках содержится более детальная информация как о спектрах дискретных гамма-лучей, так и непрерывных спектрах гамма-излучения для всех каналов неупругого взаимодействия нейтронов с рассматриваемым изотопом.

Угловые распределения всех типов гамма-излучения приняты изотропными во всех оценках.

#### 5. Заключение

На основе проведенного рассмотрения оценок и имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что оценку JENDL-3.3, по-видимому, нельзя признать удовлетворительной ни для сечений неупругого рассеяния нейтронов, ни для  $(n, xn)$  реакций. С другой стороны оценки БРОНД-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений. Это свидетельствует об их достаточно высокой надежности и согласованности. Оценка JEFF-3.1 содержит много компонент ENDF/B-VI, и ее преимущества перед другими оценками связано лишь с более детальным представлением спектров гамма-лучей и заряженных частиц. Для библиотеки РОСФОНД в настоящее время целесообразно принять оценку JEFF-3.1.

Следует однако отметить, что параметры большинства резонансов в этой оценке, также как в других оценках, существенно расходятся с данными нового атласа нейтронных резонансов, поэтому в ближайшем будущем необходимо дополнительное уточнение оценки нейтронных сечений в области разрешенных резонансов, включая уточнение сечений для тепловых нейтронов. Такие уточнения вносятся в БРОНД-3, но эта работа будет завершена лишь в 2007 г.

#### Автор заключения

А.В.Игнатюк

## 82.8. Свинец-210

Радиоактивен. ( $T_{1/2}=22.3$  г). Испытывает бета-распад в висмут-210 (вероятность альфа-распада в ртуть-206 –  $1.9 \cdot 10^{-8}\%$ ). Висмут испытывает бета-распад в полоний-210 ( $T_{1/2}=5.013$  д), а тот – альфа-распад в свинец-296 ( $T_{1/2}=138.38$  д).

В реакторах может образовываться только в ничтожных количествах за цепочки реакций  $^{208}\text{Pb}(n,\gamma)^{209}\text{Pb}(T_{1/2}=3.253 \text{ ч.}) (n,\gamma)^{210}\text{Pb}$  и как один из продуктов распада  $^{233}\text{U}$ .

Полных наборов оцененных нейтронных данных не имеется. В EAF-2003 содержится последняя оценка нейтронных сечений, основанная на теоретических расчетах и систематиках экспериментальных данных для других ядер.

Оцененные сечения захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл равны 0.5 барна и 0.2 барна.

Экспериментальных данных для проверки оцененных данных в EXFORe нет

### Заключение

В РОСФОНД принимается оценка нейтронных сечений из EAF-2003. Парциальные сечения реакций, содержащиеся в EAF-2003 в файле MF=10, сложить по подсекциям и суммы занести в соответствующие секции файла MF=3. Файлы MF=8 и MF=10 опустить.

### Автор заключения

Николаев М.Н.