

40.ЦИРКОНИЙ

40.1. Цирконий-88

Радиоактивен ($T_{1/2}=83.4$ дн.). Распадается путем захвата орбитального электрона в Y-88, который, в свою очередь, с периодом 106.6 дн. распадается в стабильный Sr-88. В реакторах может образовываться в малых количествах в результате реакций $^{90}\text{Zr}(n,3n)$ и $^{90}\text{Zr}(n,2n)$ $^{89}\text{Zr}(n,2n)$. Полные наборы оцененных нейтронных данных для этого изотопа отсутствуют. Оцененные нейтронные сечения содержатся в библиотеке EAF. Оценка выполнена на основе теоретических расчетов и полуэмпирических систематик. Экспериментальные данные отсутствуют.

Сечение захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл ^{88}Zr согласно оценке EAF-2003 равны , соответственно, 8.44 барн и 5.75 барн.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять файл данных из EAF-2003. Поскольку нейтронные реакции на ^{88}Zr ведут к образованию лишь короткоживущих изомеров, сечения образования ядер-продуктов в основном и изомерном состояниях, представленные в EAF-2003 в подсекциях соответствующих секций файла MF=10, следует просуммировать по подсекциям и суммы записать в соответствующих секциях файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

40.2. Цирконий-89

Радиоактивен ($T_{1/2}=78.4$ ч.). Распадается путем захвата орбитального электрона в стабильный Y-89. В реакторах может образовываться в малых количествах в результате реакции $^{90}\text{Zr}(n,2n)$. Полные наборы оцененных нейтронных данных для этого изотопа отсутствуют. Оцененные нейтронные сечения содержатся в библиотеке EAF. Оценка выполнена на основе теоретических расчетов и полуэмпирических систематик. Экспериментальные данные отсутствуют.

Сечение захвата тепловых нейтронов и резонансный интеграл ^{89}Zr согласно оценке EAF-2003 равны, соответственно, 8.44 барн и 5.75 барн.

Заключение

В РОСФОНД целесообразно принять файл данных из EAF-2003. Поскольку нейтронные реакции на ^{89}Zr ведут к образованию лишь короткоживущих изомеров, сечения образования ядер-продуктов в основном и изомерном состояниях, представленные в EAF-2003 в подсекциях соответствующих секций файла MF=10, следует просуммировать по подсекциям и суммы записать в соответствующих секциях файла MF=3. Файл MF=10 опустить.

Автор заключения

Николаев М.Н.

40.3. Цирконий-90

1. Общие характеристики

1.1. $Z=40$

1.2. $A=90$

1.3. $A_w=89.13237$

1.4. Стабильный, содержание в естественной смеси 51.45 %

1.5. Перечень нейтронных реакций с порогом ниже 20 МэВ:

MT	Реакция	Q, МэВ	Епор, МэВ	Ядро-продукт
51	(n,n')	-1.7607	1.7845	Zr-90
16	(n,2n)	-11.9709	12.1052	Zr-89
22	(n,n α)	-6.6766	6.7515	Sr-86
28	(n,np)	-8.3565	8.4503	Y-89
102	(n, γ)	7.1940		Zr-91
103	(n,p)	-1.4992	1.5160	Y-90
104	(n,d)	-6.1319	6.2007	Y-89
105	(n,t)	-11.3500	11.4761	Y-88
107	(n, α)	1.7515		Sr-87

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

2.1 Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов были измерены в работах [75В, 77М] в диапазоне энергий до 300 кэВ, и на их основе были определены резонансные параметры, представленные в компиляции [81М]. Однако, надежная идентификация угловых моментов имеется примерно лишь для половины резонансов, вследствие чего границы области разрешенных резонансов в различных оценках, сильно различаются. В БРОНД-2 принята верхняя граница разрешенных резонансов 60 кэВ, и большинство резонансов с неизвестными орбитальными моментами были отнесены к s-волне. В JENDL-3.3 верхняя граница резонансов принята более высокой - 171 кэВ, и более корректно учтено разделение p- и d-резонансов. Оценка JENDL-3.3 была включена без изменений в CENDL-3, тогда как в ENDF/B-VII была принята оценка БРОНД-2 с добавлением отрицательного резонанса, обеспечивающего описание уточненного сечения захвата тепловых нейтронов [06М]. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров во всех оценках используется приближение MLBW, и радиус потенциального рассеяния принят равным 7.2 ферми [81М].

Следует отметить, что в новом атласе резонансных параметров нейтронные и радиационные ширины многих резонансов были несколько пересмотрены Мухабхабом [06М] на основе уточнения эффективности нейтронного спектрометра, использовавшегося в измерениях. Радиационные ширины резонансов, принятые в БРОНД-2 и JENDL-3.3, показаны на рис. 1 в сравнении с пересмотренными значениями. В результате уточнений изменились не только ширины многих s- и p-резонансов, но и средние значения радиационных ширин. В новую оценку БРОНД-3 был включен полный набор уточненных параметров нейтронных резонансов [06М]; верхняя граница разрешенных резонансов была принята равной 200 кэВ в соответствии с результатами представленного ниже анализа пропуска резонансов.

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

Оценка	БРОНД-2	JENDL-3.3	ENDF/B-VII	БРОНД-3	Экспер.[06М]
полное	5.41	5.38	5.56	5.54	
упругое	5.40	5.37	5.48	5.46	5.3 \pm 0.3

захвата	0.0116	0.0112	0.0779	0.0771	0.077±0.016
резонансный интеграл захвата					
выше 0.5 эВ:	0.140	0.169	0.186	0.191	0.17±0.02

Следует отметить, что оценки БРОНД-2 и JENDL-3.3 ориентировались на прежние значения сечения захвата тепловых нейтронов 0.011 ± 0.005 барна и резонансного интеграла захвата 0.14 барна [81M], тогда как ENDF/B-VII и БРОНД-3 опираются на уточненные значения [06M].

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки БРОНД-2, JENDL-3.3 и БРОНД-3, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Очевидно, что в БРОНД-2 ряд p-резонансов неоправданно отнесен к s-резонансам. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов в JENDL-3.3 и БРОНД-3 соответствует среднее расстояние между резонансами $D_{\text{obs}} = 7.4$ кэВ и для p-резонансов – 2.8 кэВ. Слабые резонансы сравнительно малое влияние на анализ нейтронных силовых функций, значения которых не сильно отличаются в различных оценках (рис. 2).

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 представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов ENDF/B-VII в диапазоне энергий до 200 кэВ пропущено от 10 до 12 резонансов и в наборе p-резонансов наряду с пропущенными имеются также «лишние» резонансы, которые, по-видимому, следовало бы отнести к d-резонансам. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, соответственно равны $D_0 = 6.0 \pm 0.6$ кэВ и $D_1 = 3.7 \pm 0.4$ кэВ. Для нейтронных силовых функций с учетом пропуска резонансов получены значения $S_0 = (.59 \pm .10) 10^{-4}$ и $S_1 = (3.7 \pm 0.4) 10^{-4}$, которые хорошо согласуются с анализом кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин (рис. 2). В аналогичном анализе, представленном в последнем издании атласа нейтронных резонансов [06M], были получены значения средних расстояний между резонансами $D_0 = 6.89 \pm 0.53$ кэВ и $D_1 = 3.55 \pm 0.20$ кэВ и нейтронных силовых функций $S_0 = (.61 \pm .13) 10^{-4}$ и $S_1 = (4.79 \pm 0.75) 10^{-4}$, которые в пределах погрешности согласуются с результатами настоящего анализа (отличия могут быть связаны с другим выбором энергетического интервала рассмотренных резонансов). Отношение $D_0 / D_1 = 1.62 \pm 0.30$ заметно отличается от общей 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.

На рис. 4 и 5 оценки JENDL-3.3, ENDF/B-VII (\approx БРОНД-2) и БРОНД-3 для полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Различия между резонансными параметрами, использованными в оценках, сравнительно невелики, и главные отличия оценок связаны с выбором верхней границы разрешенных резонансов. **Параметры, принятые в БРОНД-3 на основе последней компиляции резонансных параметров, также как и выбранную верхнюю границу резонансов на сегодняшний день можно рассматривать как оптимальное описание имеющейся совокупности экспериментальных данных во всей резонансной области.**

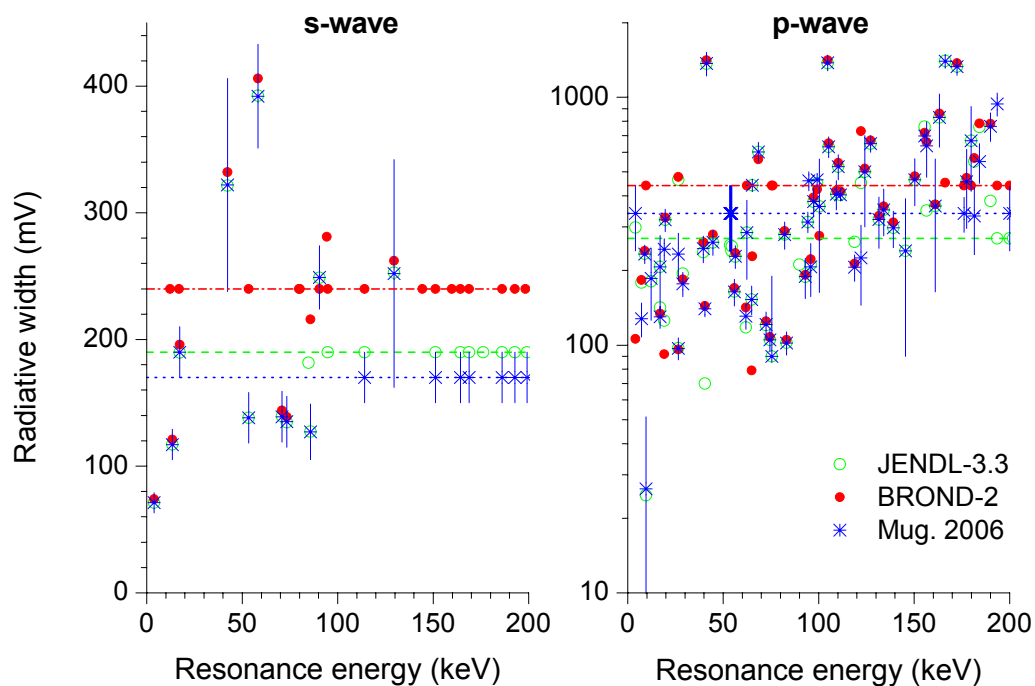


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках, пунктиром показаны принятые средние значения ширины

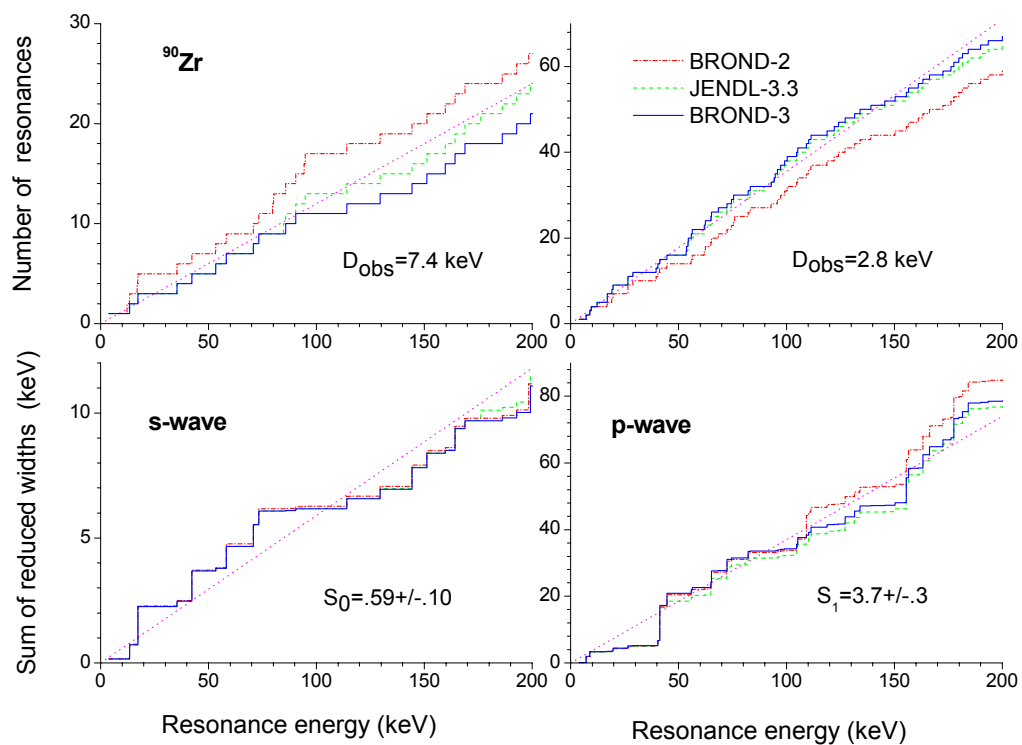


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширины в оценках БРОНД-2, JENDL-3.3 и БРОНД-3

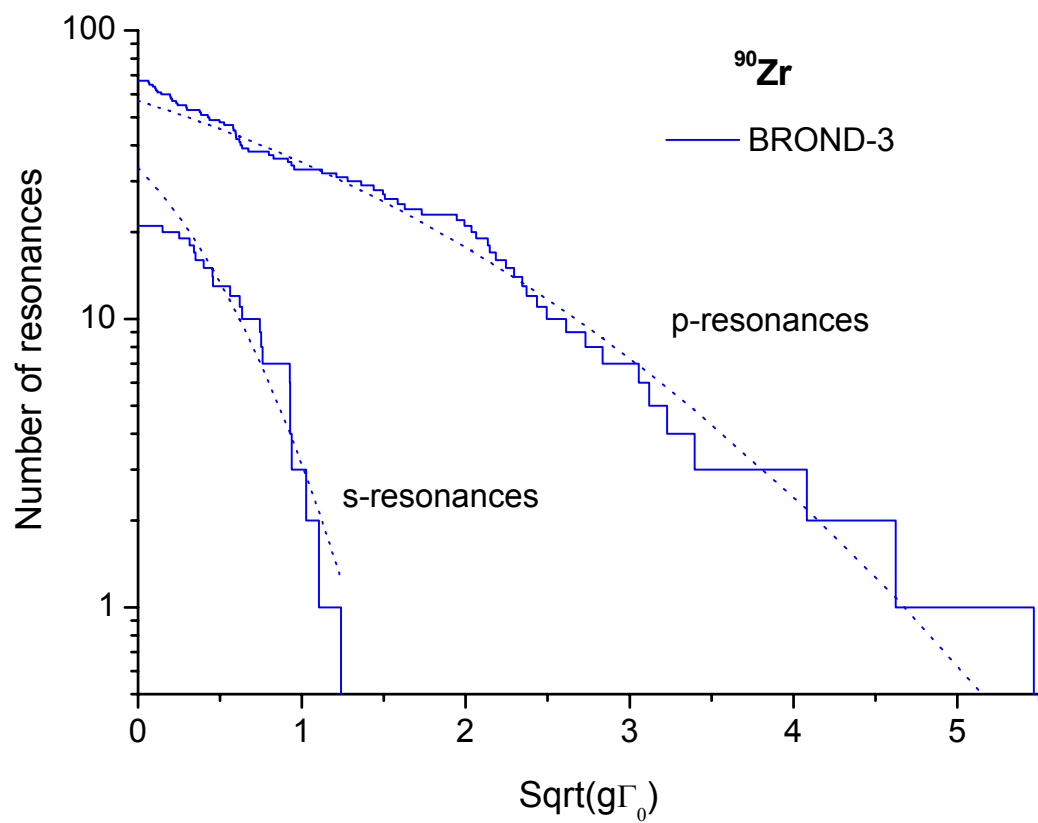


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов в наборе ENDF/B-VII. Пунктиром показано статистически ожидаемое распределение.

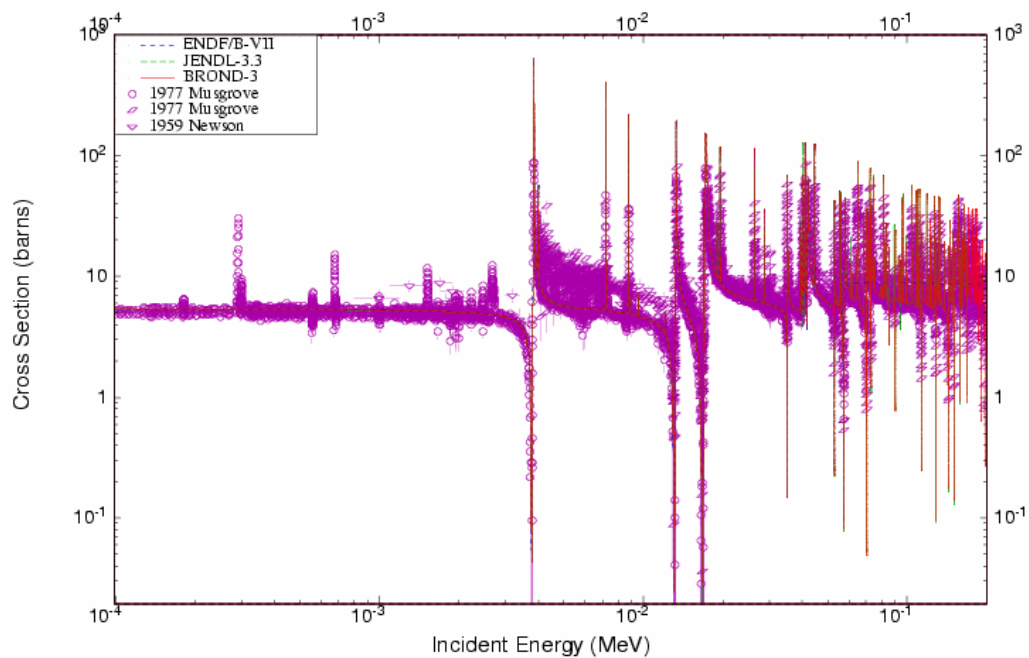


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов

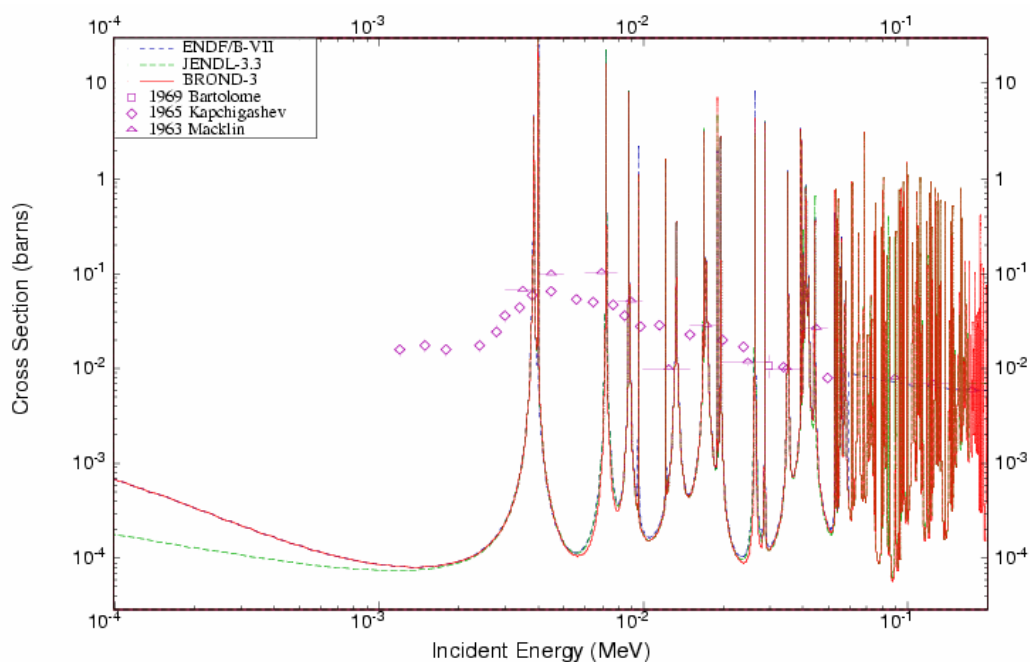


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области.

В данном разделе проведено сравнение оцененных данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII, и JENDL-3.3 вне резонансной области (0.01-20 МэВ). Сравнение с данными библиотеки JEFF-3.1 не проводилось, поскольку для изотопов циркония приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Ниже следует описание оценки БРОНД-3 в сравнении с оценками указанных библиотек.

Ниже дано сравнение указанных библиотек совместно с кратким описанием оценки БРОНД-3. Это связано с тем, что авторы оценки БРОНД-3 по сравнению с оценками других авторов применили дополнительные эмпирические систематики и более корректные теоретические расчеты. Оценка всех сечений изотопов циркония выполнена в едином согласованном подходе. В частности, был оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния, использовались систематические тенденции в поведении функций возбуждения пороговых реакций в зависимости массового числа, применена несферическая оптическая модель.

Нейтронные сечения в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью программы GNASH /96Yo/, модифицированной для учета флуктуации нейтронных ширин на основе подхода, развитого в работе /80Ho/. Для нейтронов была использована модель сильной связи каналов (программа ECIS /70Ra/). В расчетах в качестве исходного был выбран сферический оптический потенциал из работы /80Ar/, но параметры поверхностной мнимой части потенциала были модифицированы, чтобы воспроизвести прямое возбуждение сильных коллективных уровней 2+ и 3- в рассеянии нейтронов. Кроме того, для увеличения сечения реакции в области выше 10 МэВ был добавлен объемный компонент мнимой части потенциала.

Оптические параметры для нейтронов:

Глубина потенциала (МэВ)	Диапазон энергии (МэВ)	Геометрия(фм)
$V_r=49.0-0.28E$	$0 < E < 20$	$R_r=1.24 \quad A=0.62$
$W_d=2.38+0.21E$	$0 < E < 10$	$R_d=1.26 \quad A=0.58$
$W_d=5.39-0.091E$	$10 < E < 20$	

$$W_v=0.0 \quad 0 < E < 10.9$$

$$W_v=-0.0994+0.091E$$

$$0.9 < E < 20$$

$$R_v=1.24 \quad A=0.62$$

$$V_{so}=6.2$$

$$0 < E < 20$$

$$R_{so}=1.12 \quad A=0.47$$

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /01Ko/, /74Lo/ и /94Av/, соответственно.

Гамма-переходы рассчитывались для E1, M2 и E2 -силовых функций. Параметры гигантского резонанса E1 были взяты из работы /88Di/. Полная силовая функция была нормализована к имеющимся экспериментальным данным по средней радиационной ширине и среднему расстоянию между нейтронными резонансами. Параметры дискретных уровней взяты из работы /95Fi/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 6 дано полное сечение Zr-90 вне резонансной области энергий нейтронов. В области до 4 МэВ оценка БРОНД-3 лежит существенно ниже оценки JENDL-3.3, но хорошо согласуется с оценкой ENDF/B-VII. Экспериментальные данные в этой области чрезвычайно разбросаны и не позволяют уверенно обосновать оцененные данные той или иной библиотеки. Однако данные БРОНД-3 и ENDF/B-VII, полученные с помощью разных параметров оптического потенциала, практически совпадают за исключением области до 200 кэВ, поэтому следует отдать им предпочтение. Небольшое различие в указанной области на фоне сильно разбросанных экспериментальных данных представляется не очень существенным.

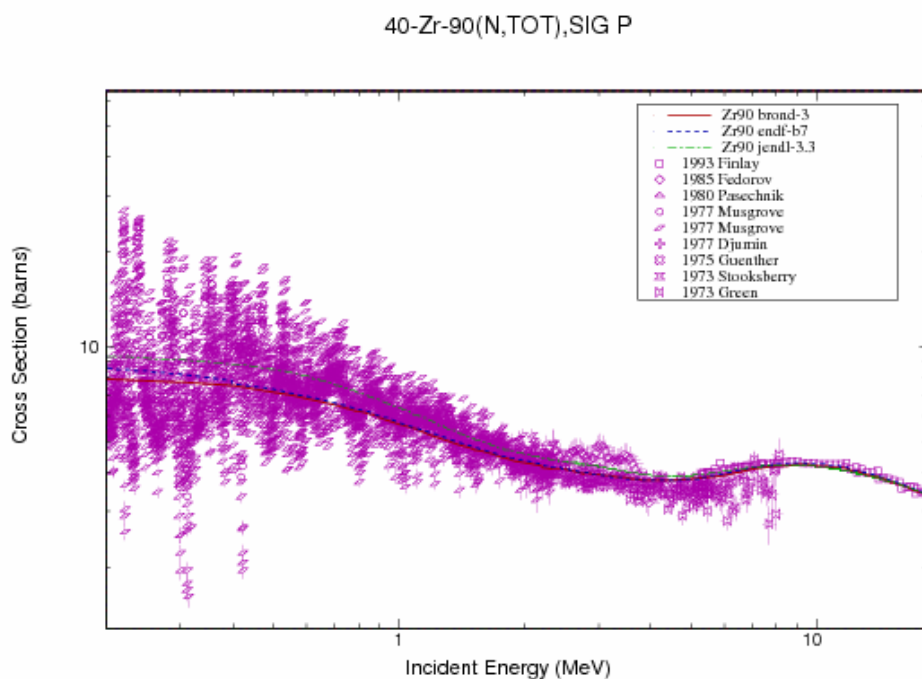


Рис.6. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния обычно определяется как разность полного сечения и суммы всех парциальных сечений. На рис. 7 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния на изотопе Zr-90 с экспериментальными данными. Как видно, сечения упругого рассеяния в области энергий выше 2 МэВ, где есть экспериментальные данные, в библиотеках ENDF/B-VII и JENDL-3.3 практически совпадают. Оценка BROND-3 в области энергий ниже 2 МэВ лежит несколько ниже

данных ENDF/B-VII и JENDL-3.3, но из-за отсутствия экспериментальных данных в этой области трудно обосновать достоверность той или иной оценки.

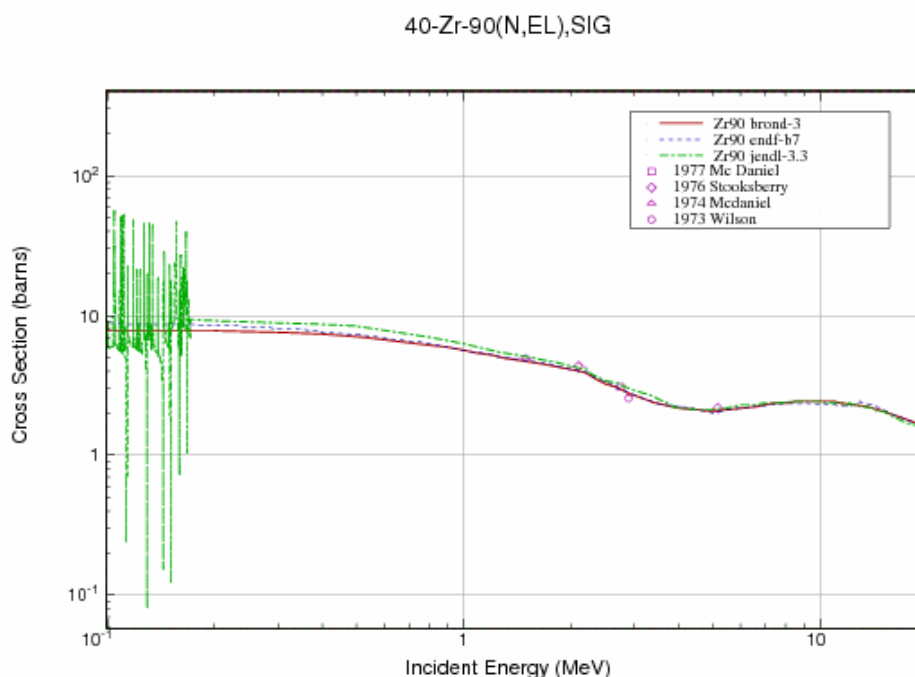


Рис.7. Сечение упругого рассеяния в области 0.1-20 МэВ.

3.3.Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-64).

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

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 4.1300 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней, возбуждаемых при неупругом рассеянии:

N Уровн я	Энергия уровня, МэВ Спин уровня	Переход	Энергия гамма- кванта, МэВ	Вероятность перехода, %
0	0.00000			
51	1.76070 0+	1→0	1.76070	100
52	2.18630 2+	2→0	2.18624	100
53	2.31900 5-	3→0	2.31897	95
		3→2	0.13276	5
54	2.73930 4-	4→3	0.42028	100
55	2.74790 3-	5→2	0.56160	96
		5→0	2.74780	4
56	3.07690 4+	6→2	0.89064	93
		6→5	0.32906	7
57	3.30880 2+	7→0	3.30910	74
		7→2		26
58	3.44820 6+	8→3	1.1220	100
59	3.55700			

60	3.58940	8+	10→8	0.14118	100
61	3.84220	2+	11→0	3.84490	100
62	3.95900	5-			
63	4.06200	4+			
64	4.12600	0+			
91	4.13000				

Экспериментальных данных по интегральному сечению неупругого рассеяния нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния библиотек JENDL-3.3 и БРОНД-3 в области до 15 МэВ близки, оценка ENDF/B-VII лежит заметно выше. При энергии выше 15 МэВ оценка БРОНД-3 лежит ниже оценок ENDF/B-VII и JENDL-3.3, которые в данной области практически совпадают. Данные BROND-3 получены с помощью модифицированной программы GNASH и параметров несферической оптической модели, обеспечивает более корректный подход в расчетах интегрального сечения неупругого рассеяния файла из библиотеки BROND-3. На рис. 8-10 показаны функции возбуждения неупругого рассеяния на первых двух уровнях, где имеются экспериментальные данные. Для обоих уровней оцененные функции библиотек БРОНД-3 и ENDF/B-VII примерно равнозначны, а оценки JENDL-3.3 по форме функций возбуждения выглядят менее привлекательными.

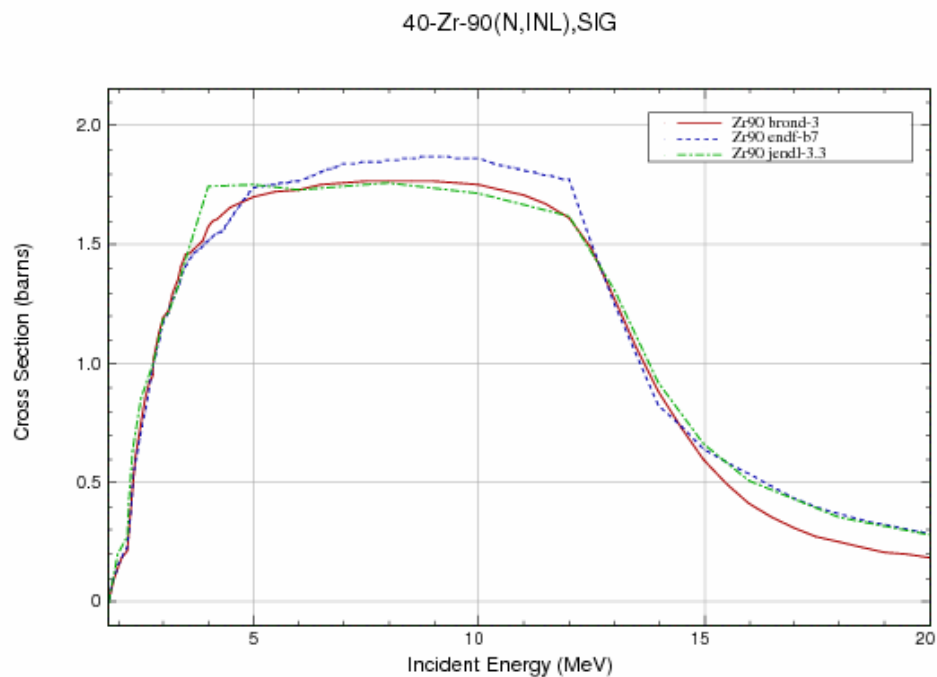


Рис.8. Интегральное сечение неупругого рассеяния Zr-90.

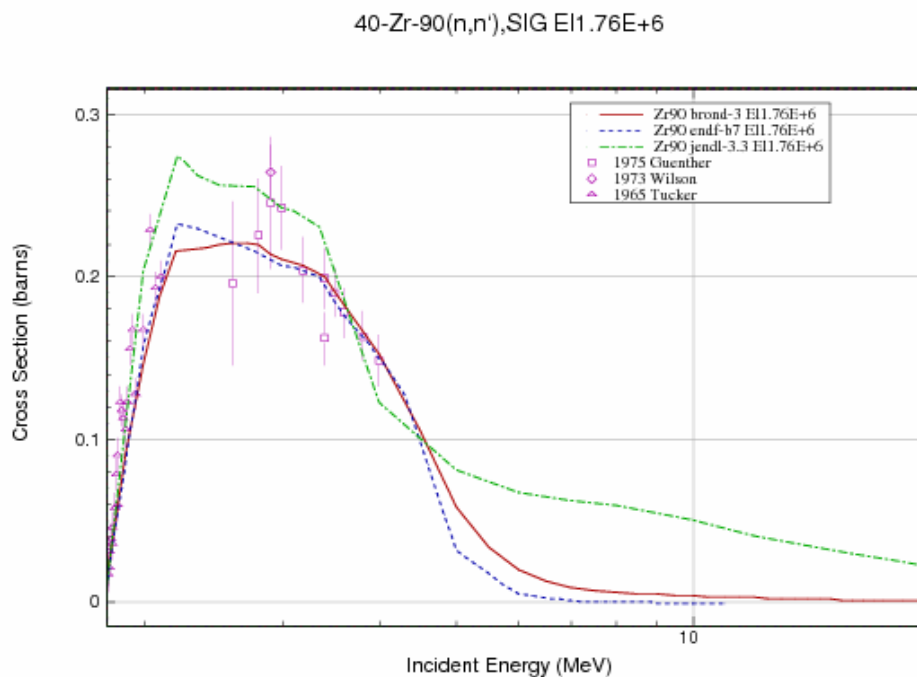


Рис.9. Функция возбуждения первого уровня Zr-90 с энергией 1.7607эВ.

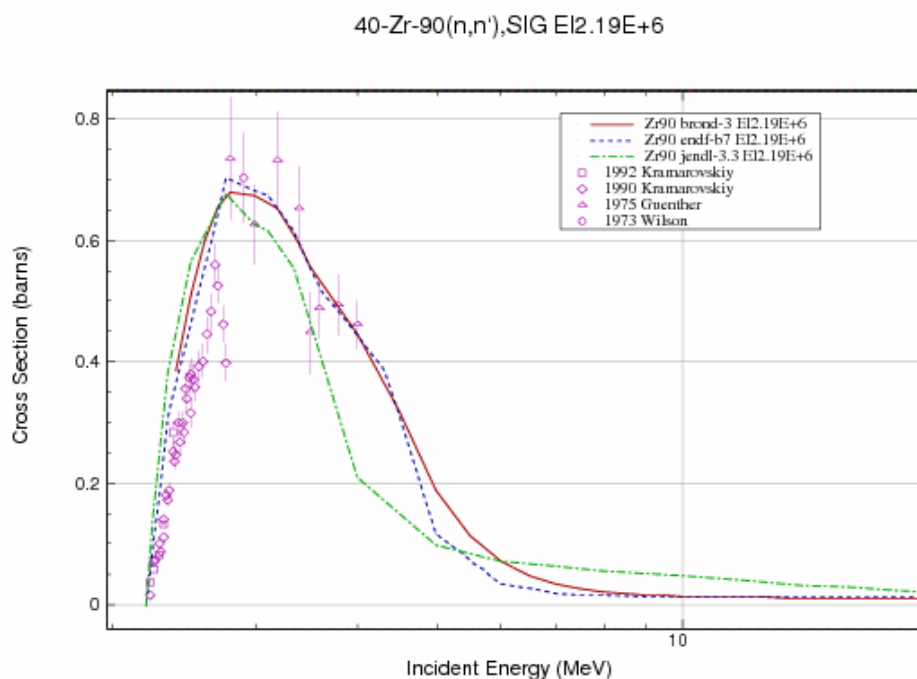


Рис.10. Функция возбуждения второго уровня с энергией 2.1863 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.01-20 МэВ экспериментальные данные по сечению радиационного захвата отсутствуют. Оцененные данные библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII и JENDL-3.3 существенно различаются, но оценка БРОНД-3 по форме зависимости сечения выглядит предпочтительнее.

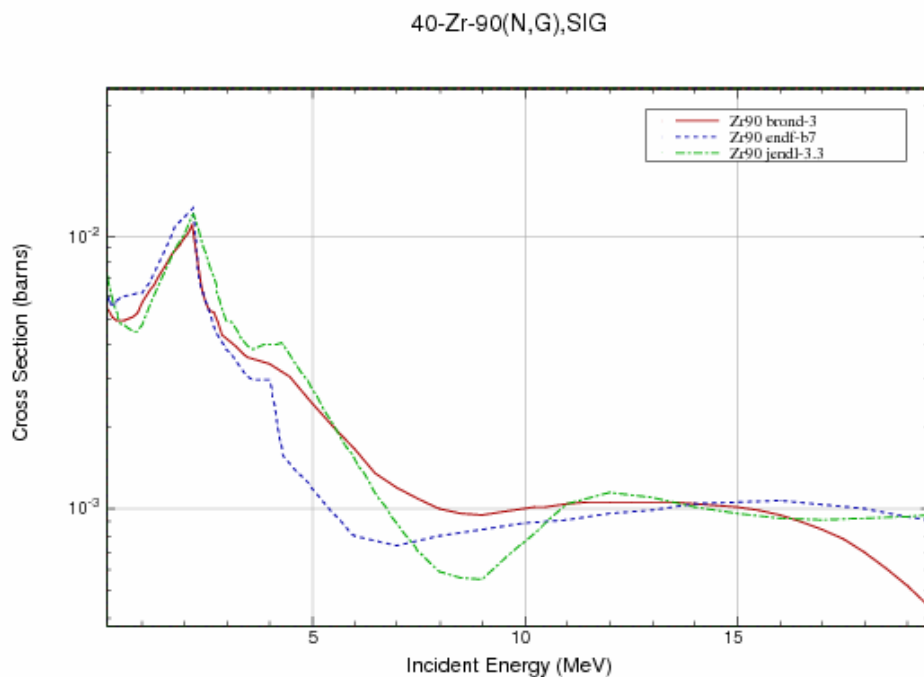


Рис. 11. Сечение радиационного захвата в области 0.01-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

На рис. 12 представлено сечение реакции (n,2n) библиотек ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и BROND-3 в сравнении с экспериментальными данными. Как видно, все три оценки близки, однако оценка БРОНД-3 лучше согласуется с эмпирической систематикой функций возбуждения указанной реакции [97Ma].

Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6 и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

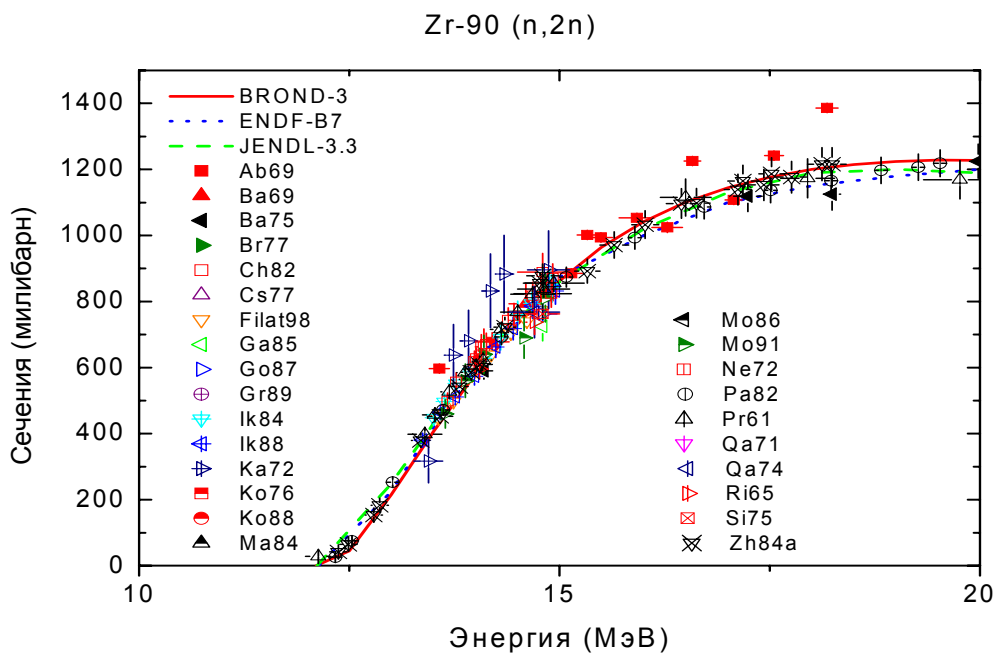


Рис. 12. Сечение реакции (n,2n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n, α) (MT=103, 104, 107):

На рис. 13 показано сечение реакции $^{90}\text{Zr}(n,p)$. Данные трех библиотек заметно различаются, однако предпочтение следует отдать оценке БРОНД-3, поскольку она лучше соответствует систематике сечений реакции (n,p) и, кроме того, анализ показывает, что данные работы Байхурста сильно завышены, их перенормировка на принятый в настоящее время время квантовый выход понижает эти данные до уровня оценки БРОНД-3.

На рис. 14 дано сечение реакции $^{90}\text{Zr}(n,d)$. Данные библиотеки ENDF/B-VII противоречат физическим представлениям. Оценки BROND-3 и JENDL-3.3 реакции (n,d), полученные расчетным путем, существенно не согласуются с единственной экспериментальной точкой работы /Naight81/. Это связано с недостаточным учетом вклада прямого процесса. Однако оценка БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лежит ближе к указанной экспериментальной точке. На рис.15 представлено сечение реакции $^{90}\text{Zr}(n,\alpha)$. Рекомендуются оценка из БРОНД-3, поскольку она лучше согласуется с единственной экспериментальной точкой и систематикой работы /97Ma/.

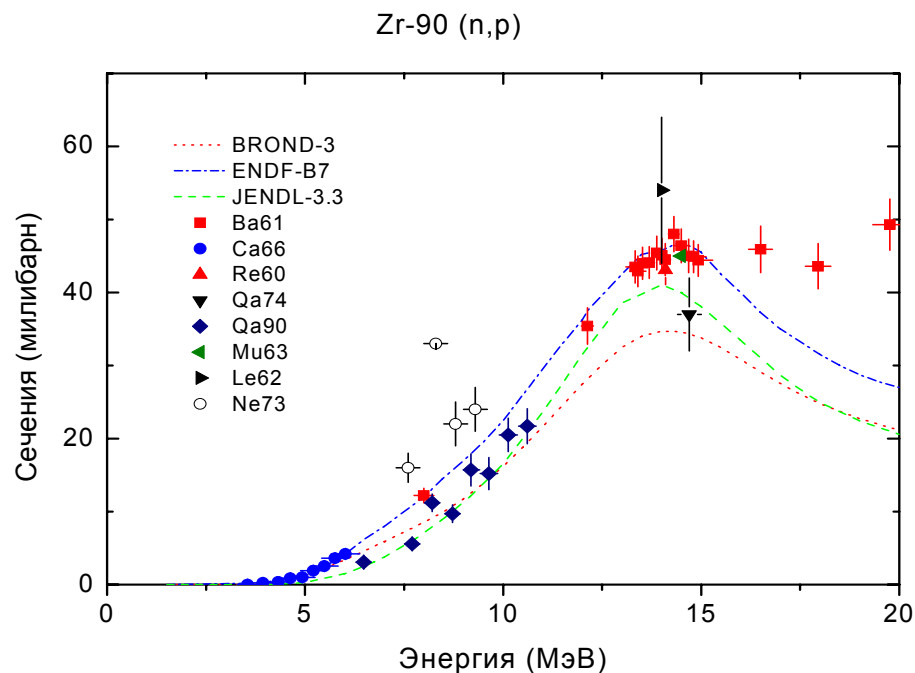


Рис. 13. Сечение реакции (n,p)

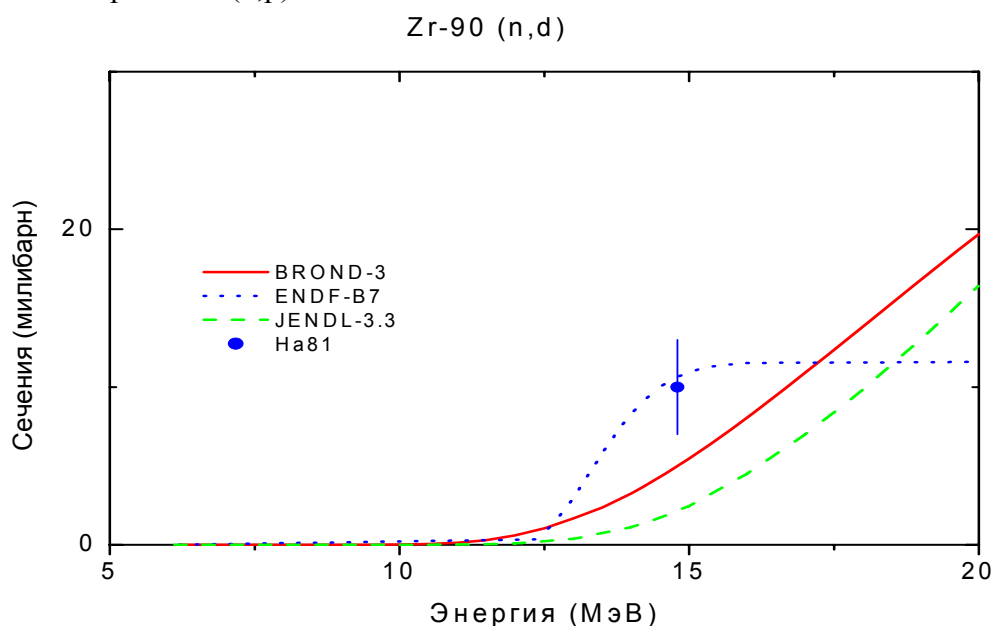


Рис.14. Сечение реакции (n,d).

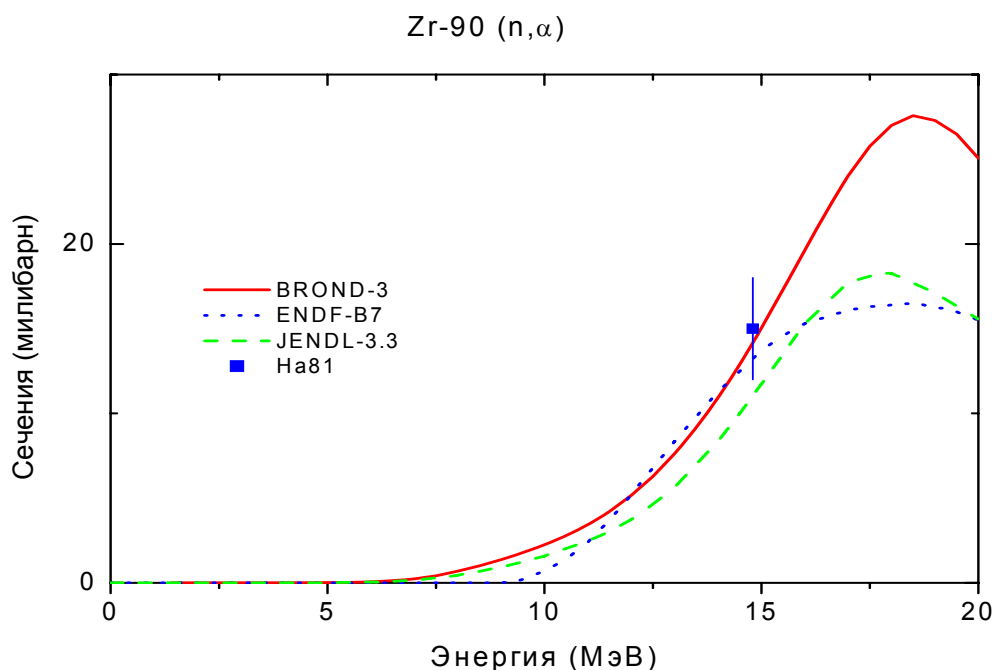


Рис. 15. Сечение реакции (n, α)

3.7. Реакции $(n, n\alpha)$, (n, np) (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. Оценка реакции (n, np) в файле ^{90}Zr в БРОНД-3 основана на расчетах по модифицированной программе GNASH. Разногласия оценок БРОНД-3, ENDF-BVII и JENDL-3.3 (рис.16) обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

Однако зависимость из БРОНД-3 предпочтительнее с физической точки зрения, поскольку она имеет более плавный ход. Сечение из ENDF/B-VII противоречит систематикам сечений реакции как по форме так и абсолютной величине.

На рис.17 дано сечение реакции $\text{Zr}(n, n\alpha)$. Рекомендуется функция возбуждения из библиотеки БРОНД-3, так как она согласуется с сечением реакции (n, α) и с систематикой реакции (n, na) .

Спектры и угловые распределения нейтронов для рассматриваемых реакций представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6, и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

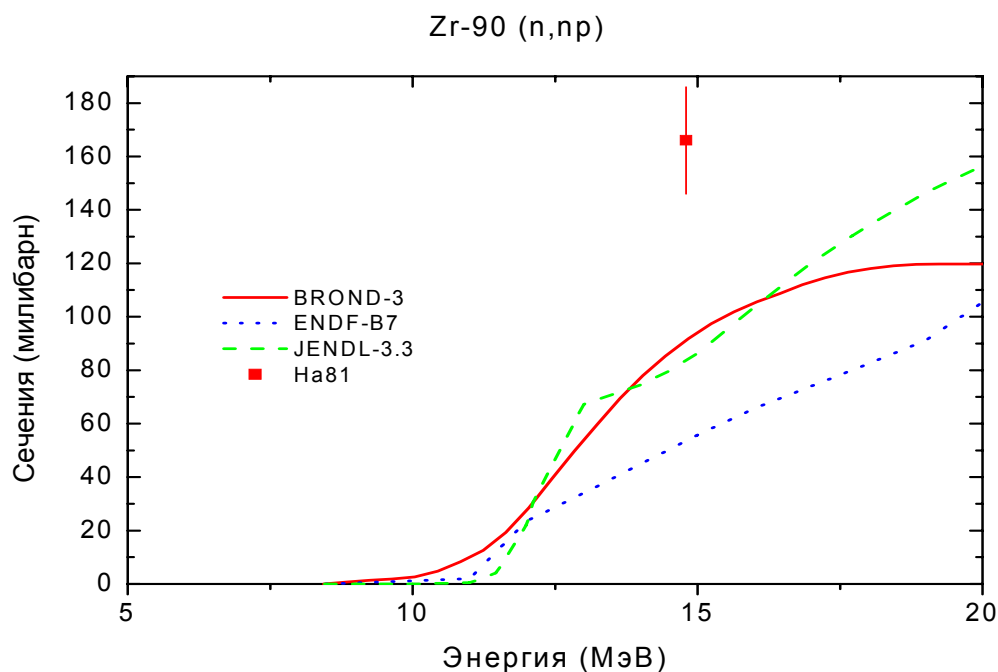


Рис. 16. Сечение реакции (n,np).

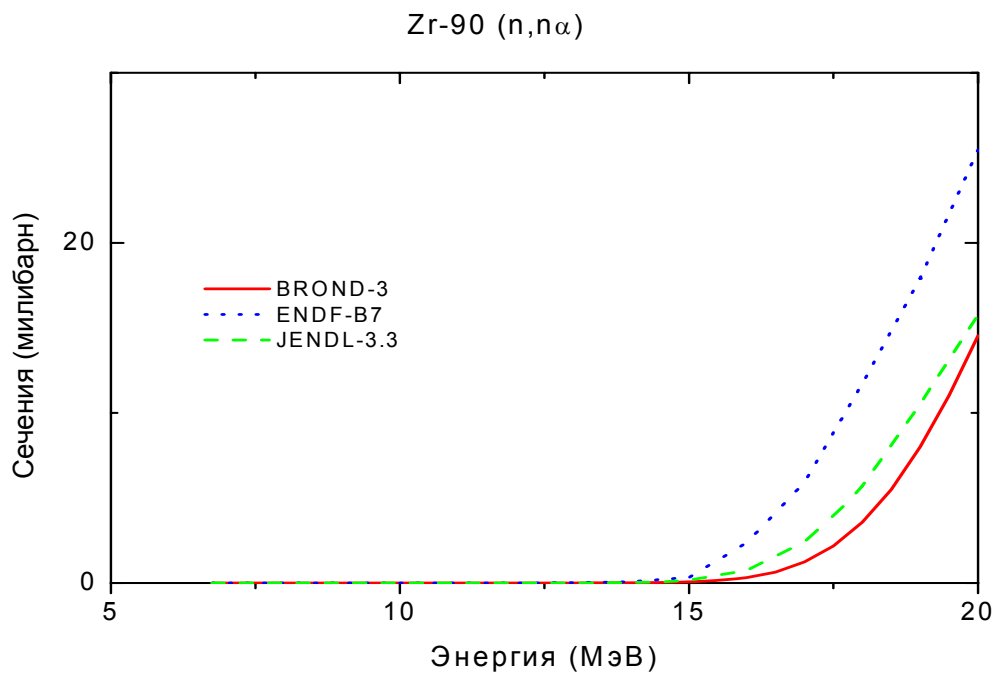


Рис. 17. Сечение реакции (n,nα).

Угловые распределения вторичных нейтронов (MF=4)

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/ 91Ig/. На рис.18 показаны угловые распределения из библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 в сравнении с экспериментальными данными.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов обе оценки учитывают вклад прямых и предравновесных процессов, которые приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов.

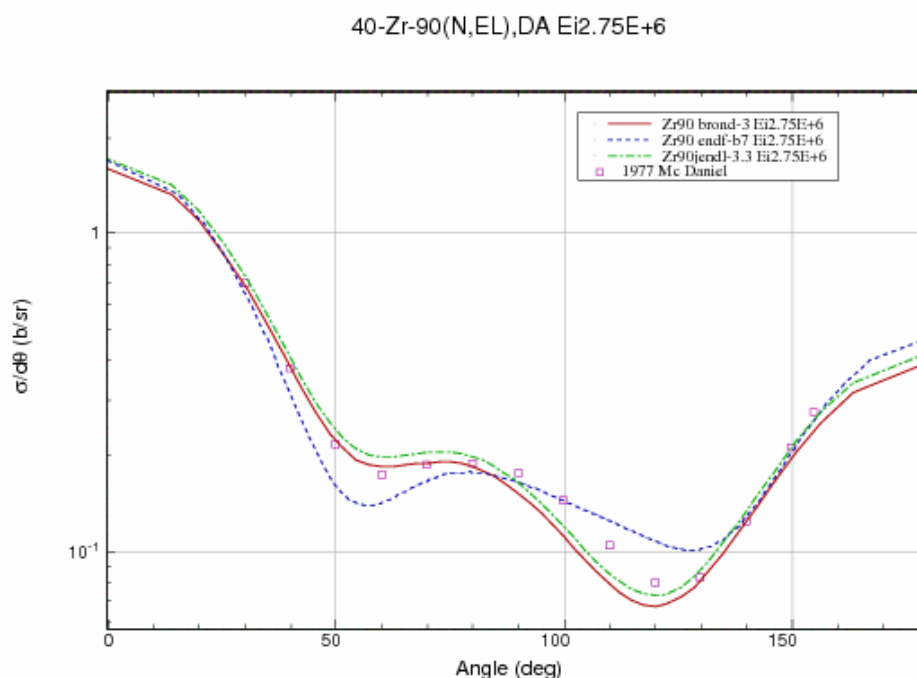


Рис. 18. Угловое распределение упруго рассеянных нейтронов с энергией 2.75 МэВ

MT=51-64 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gasthy /91Ig/ и Dwuck.

Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов (MF=6).

MT=16,22, 28,91 **Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /90Ku/**

Множественность образования гамма-лучей (MF=12).

MT=16,22,28, 51-64,91,102,103,107 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH /96Yo/.

Угловые распределения гамма-лучей (MF=14).

MT=16,22,28,51-64,91,102,103,107 Угловые распределения гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

Непрерывные спектры гамма-лучей (MF=15).

MT=16,22,28,51-64,91,103,107 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, рассчитаны по программе EGNASH /90Ya/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/91Ig/

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка БРОНД-3 является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить в РОСФОНД файл оцененных данных для Zr-90 из БРОНД-3.

Авторы заключения

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

References

- 06M S.Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY, 2006.
01Ko Koning, A.J., Dalaroche, J.P. Contribution to 3rd RCM of RIPL-2, Vienna, 2001.
98Ri RIPL-2. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
97Ma Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
96Yo Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: In "Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors" (Trieste, 1996). Eds. A. Gordini, G. Reffo., World Science, Singapore, 1988, V.1, p.206.
95Fi Firestone, R.B. Table of Isotopes, Eight Edition, V.2, New York, 1995.
94Av Avrigeanu, V., Hodgson, P., Avrigeanu, M. Phys.Rev.C49(1994)2136
91Ig Igarasi, S. and Fukahori, T.: JAERI 1321 (1991).
90Ku Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
90Ya Yamamuro, N.: JAERI-M 90-006 (1990).
88Di Dietrich, S.S., Berman, B.L. Atomic data and Nuclear data Tables 38(1988)199.
86Ki Kikuchi, Y. et al.: JAERI-M 86-030 (1986).
82Al Allen, B.J., et al.: Nucl. Sci. Eng., 82, 230 (1982).
81Lo Lone, M.A. and Bartholomew, G.A.: Proc. 4th Int. Conf. on Neutron-Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, Grenoble, Sept.1981, p.383 (1981).
81Mu Mughabghab, S.F. et al.: "Neutron Cross Sections, Vol. I, Part A", Academic Press (1981).
80Ar Arthur E.D. Nucl.Sci.Eng. 76(1980)137.
77Mu Musgrove, A.R. de L. et al.: Aust. J. Phys., 30, 379 (1977).
76Bo Boldeman, J.W., et al.: AAEC/E367 (1976).
75B J.W.Boldeman et al., Nucl. Phys., **A246** (1975) 1.
75Ho Hofman, H. et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
74Lo Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
70Ra Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8(1970), p.281.

40.4. Цирконий-91

1. Общие характеристики

1.1. $Z=40$ 1.2. $A=91$ 1.3. $A_w=90.012471$

1.4. Содержание в естественной смеси: 11.22

1.5. Перечень нейтронных реакций:

MT	Реакция	Q, МэВ	Епор, МэВ	Ядро-продукт
51	(n,n')	-1.2048	1.2182	Zr-91
16	n,2n	-7.1946	7.2744	Zr-90
17	n,3n	-19.1660	19.3653	Zr-89
22	n,n α	-5.4431	5.5035	Sr-87
28	n,np	-8.6938	8.7903	Y-90
102	n, γ	8.6350		Zr-91
103	n,p	-0.7617	0.7700	Y-91
104	n,d	-6.4692	6.5410	Y-90
105	n,t	-7.0680	7.1457	Y-89
107	n, α	5.6696		Sr-88

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

2.2 Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках БРОНД-2 и JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мухабхабом и др. [81Mu] на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию и радиационному захвату нейтронов [77Mu, 78Br]. Верхняя граница резонансной области принята равной 30 кэВ в БРОНД-2 и 30.16 кэВ в JENDL-3.3, и радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 7.2$ фм [81Mu] в обеих оценках. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами приняты средние значения ширин: 140 мэВ для s-резонансов и 240 мэВ для p-резонансов [81Mu]. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в CENDL-3 и JEFF-3.1.

В новом издании атласа параметров нейтронных резонансов [06M] нейтронные и радиационные ширины многих резонансов были несколько изменены Мухабхабом на основе уточненного анализа прежних экспериментальных данных и более поздних измерений нейтронных сечений для естественной смеси изотопов циркония [85Sa]. Пересмотренные параметры резонансов включены в оценку ENDF/B-VII. Верхняя граница области разрешенных резонансов была уменьшена до 20 кэВ. Радиационные ширины резонансов, использованные в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, показаны на рис. 1. Ширины многих s- и p-резонансов отличаются весьма существенно, и измененные значения получены также для средних ширин: 134 мэВ для s-резонансов и 220 мэВ для p-резонансов.

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

Оценка	БРОНД-2	JENDL-3.3	ENDF/B-VII	Эксперимент [06Mu]
полное	11.75	11.83	10.57	

упругое	10.54	10.59	9.74	10.7±0.6
захвата	1.21	1.25	.832	0.83±0.08
резонансный интеграл захвата				
выше 0.5 эВ:	5.01	6.94	5.89	5.76±0.40

Следует отметить, что оценки БРОНД-2 и JENDL-3.3 ориентировались на прежние значения сечения захвата тепловых нейтронов 1.24 ± 0.25 барна и резонансного интеграла захвата 5.2 ± 0.7 [81M, 03Mu], тогда как в ENDF/B-VII использованы уточненные значения [06M]. Резонансный интеграл захвата нейтронов в JENDL-3.3 оказывается существенно выше экспериментального. До 50% вклада в резонансный интеграл вносит первый s-резонанс с энергией 292.4 эВ, радиационная ширина которого существенно занижена в БРОНД-2 и завышена в JENDL-3.3 по отношению к экспериментальным данным [85Sa].

Следует заметить, что нейтронная ширина p-резонанса с энергией 7.754 кэВ как в старом [81Mu], так и в новом атласе резонансных параметров [06Mu] на порядок превышает значение, приведенное в первоначальной публикации [78Br]. Эта ошибка была исправлена в JENDL-3.3, но сохранилась, к сожалению, в файлах БРОНД-2 и ENDF/B-VII. Она практически не влияет на рассмотренные выше тепловые сечения и резонансный интеграл, но может существенно исказить оценку нейтронной силовой функции p-волны.

Для пересмотренной оценки БРОНД-3 было решено принять за основу резонансные параметры ENDF/B-VII, но исправить в них нейтронную ширину резонанса 7.754 кэВ (уменьшить в 10 раз). С учетом внесенных изменений оценке БРОНД-3 соответствуют те же значения тепловых сечений, что и ENDF/B-VII, но несколько измененное значение резонансного интеграла захвата: 6.041 барна.

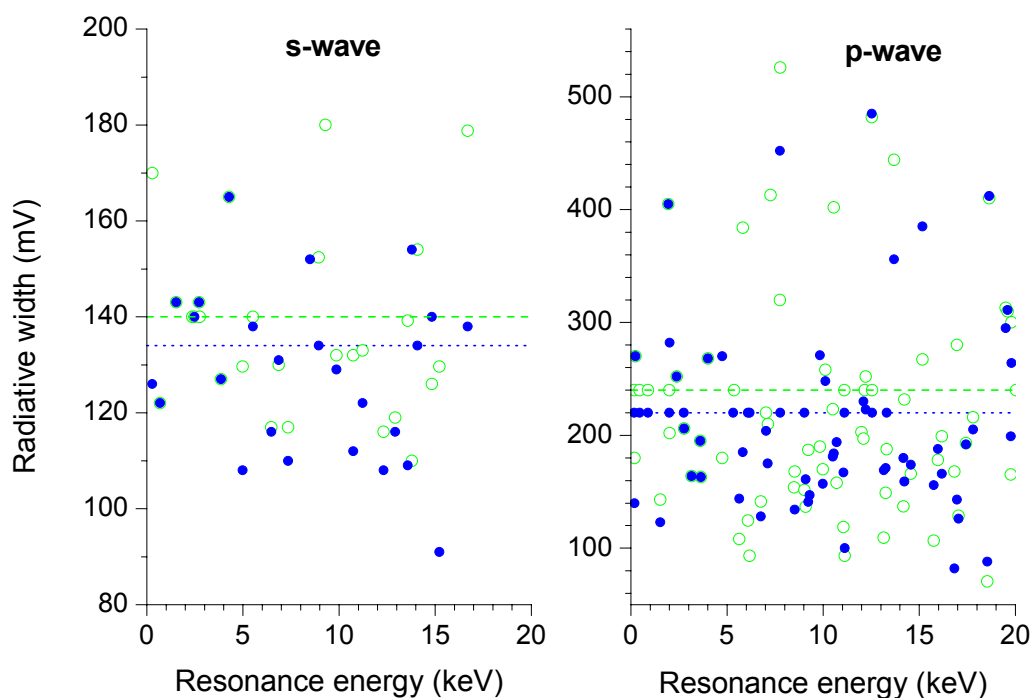


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в оценках JENDL-3.3 (кружки) и ENDF/B-VII (сплошные точки), пунктиром показаны средние значения ширин, которые приняты для резонансов с неизвестными ширинами

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 (=БРОНД-2) и ENDF/B-VII, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0 = (650 \pm 50)$ эВ, а для p-резонансов – $D_1 = (280 \pm 30)$ эВ. Аналогичным образом для нейтронных силовых функций получим $S_0 = (.48 \pm 0.10) 10^{-4}$ и $S_1 = (7.2 \pm 0.8) 10^{-4}$ для JENDL-3.3. По данным ENDF/B-VII силовая функция p-резонансов оказывается заметно большей, но это обусловлено очень большой нейтронной шириной резонанса с энергией 7.754 кэВ, которая завышена на порядок.

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 представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов пропущено от 8 до 10 резонансов и в наборе p-резонансов пропущено около 16 слабых резонансов в обеих оценках. Такие слабые резонансы не искажают приведенный выше анализ нейтронных силовых функций, но они заметно изменяют оценки среднего расстояния между резонансами. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, для обеих наборов резонансных параметров равны $D_0 = (482 \pm 30)$ эВ и $D_1 = (237 \pm 30)$ эВ. Отношение $D_0 / D_1 = 2.03 \pm 0.30$ заметно отличается от общей 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.

На рис. 4 и 5 оценки JENDL-3.3, ENDF/B-VII и БРОНД-3, для области разрешенных резонансов приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Различия между оценками проявляются, главным образом, лишь в окрестностях межрезонансных минимумов и области энергий ниже первого резонанса. При имеющихся погрешностях экспериментальных данных все оценки выглядят равноправными, критерием предпочтения БРОНД-3 перед другими оценками является более согласованное описание тепловых сечений.

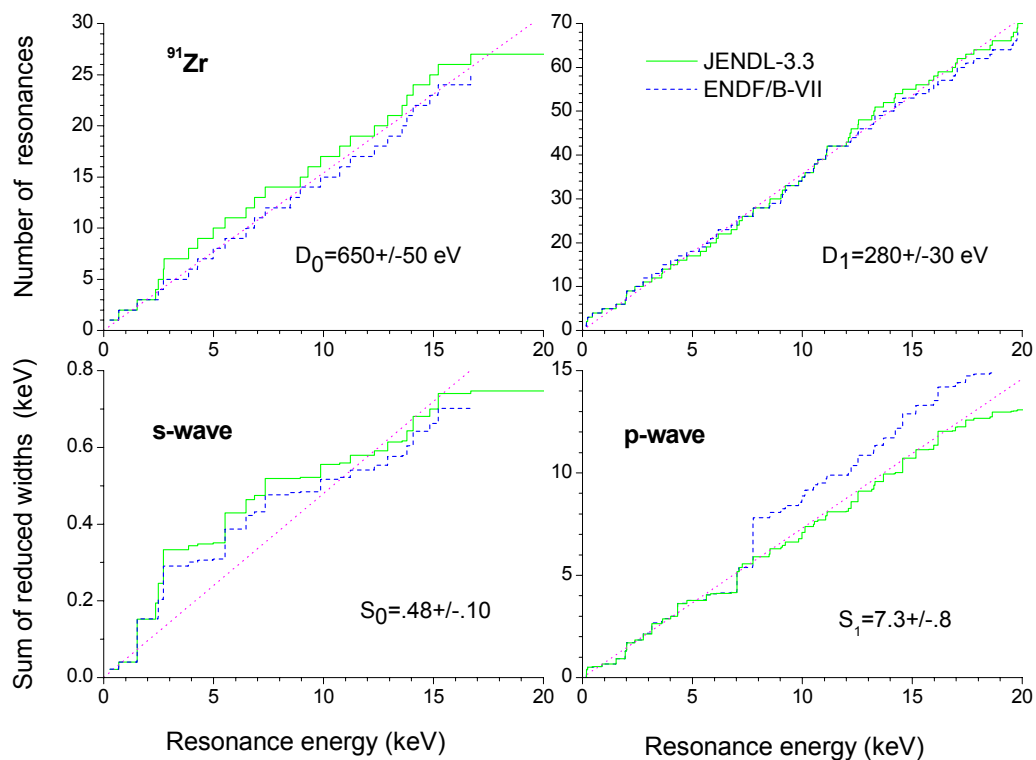


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII

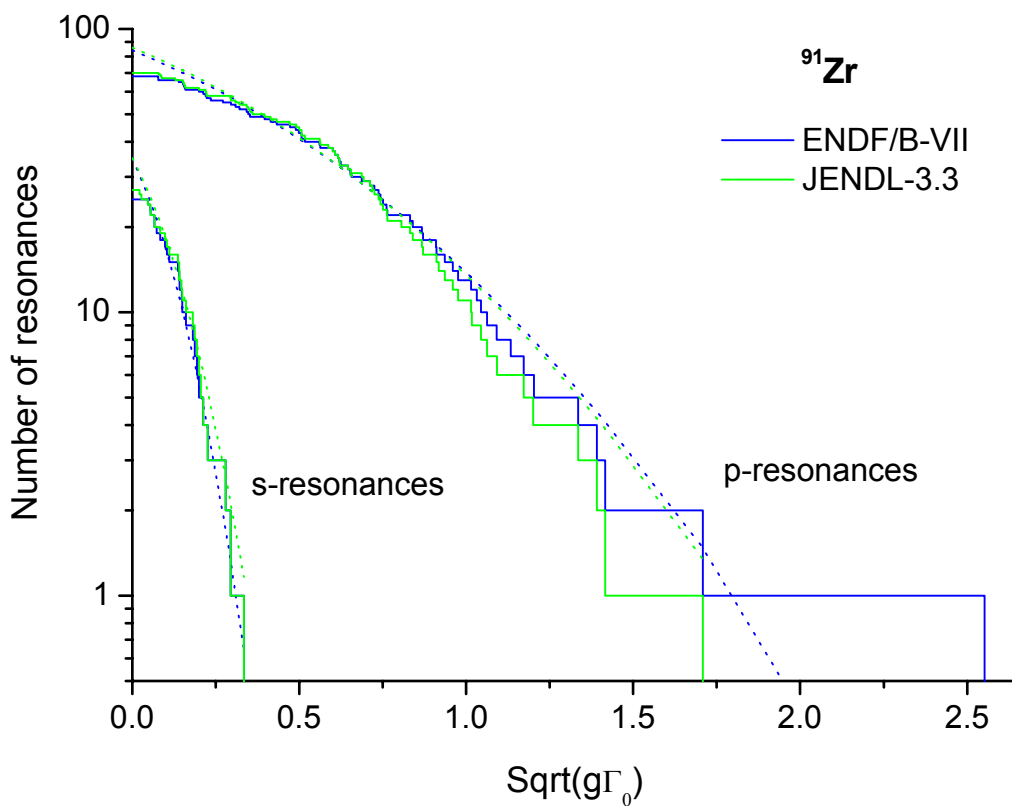


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов. Пунктиром показано теоретически ожидаемые распределения.

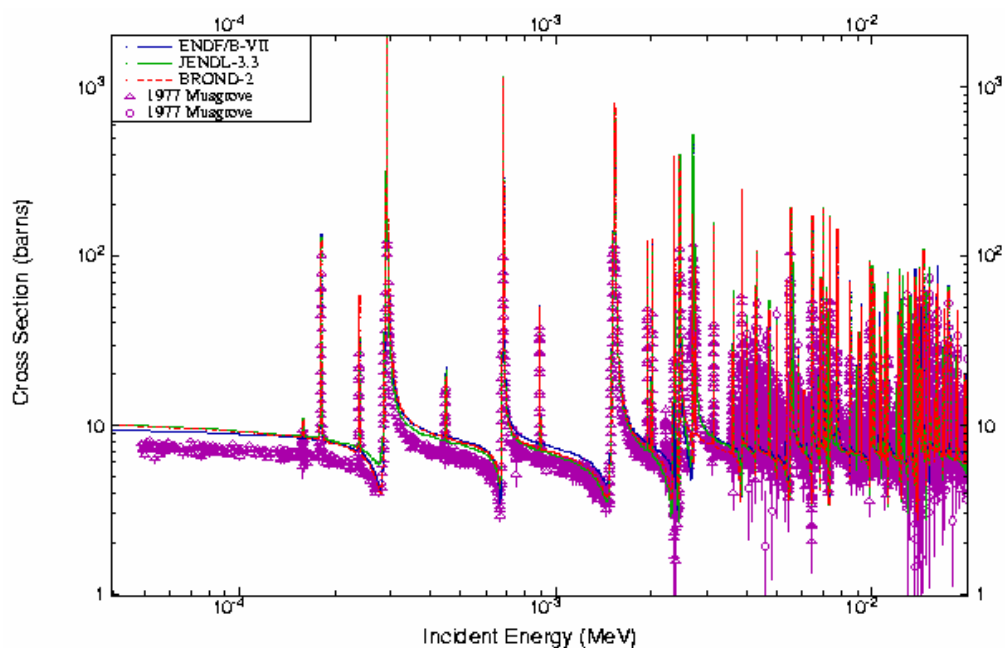


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

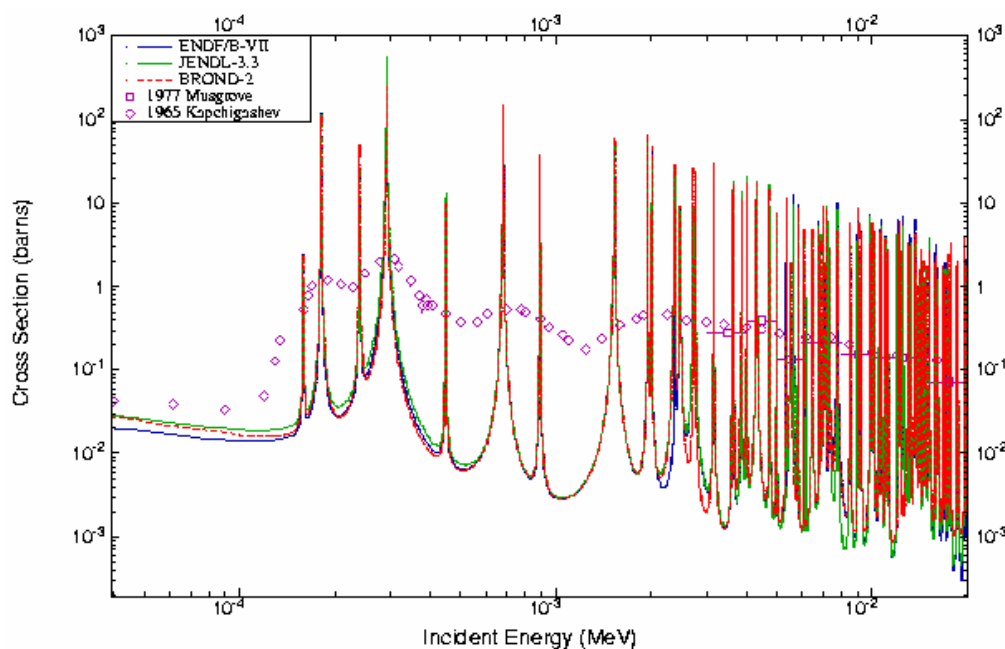


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в БРОНД-2 принята равной 200 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В JENDL-3.3 использован аналогичный подход, но принята более низкая верхняя граница неразрешенных резонансов 100 кэВ. В ENDF/B-VII, также как в CENDL-3 и JEFF-3.1, для неразрешенных резонансов принята оценка JENDL-3.3 без каких-либо изменений. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели по программе [91I]. Средняя радиационная ширина принята не зависящей от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов [65Ka, 77Mu]. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.420\text{E-}4$, $S_1 = 5.700\text{E-}4$, $S_2 = 0.360\text{E-}4$, $G_g = 0.205$ эВ, $D_0 = 660.4$ эВ, $R = 6.621$ ферми. В БРОНД-2 было использовано аналогичное приближение, но средние радиационные ширины были приняты на основе статистического анализа параметров разрешенных резонансов и средние расстояния между резонансами было выбрано из условий оптимального описания наблюдаемых сечений радиационного захвата нейтронов. Для энергии нейтронов 70 кэВ приняты следующие значения параметров:

$S_0 = 0.40\text{E-}4$, $S_1 = 4.31\text{E-}4$, $S_2 = 1.10\text{E-}4$, $D_0 = 597$ эВ, $R = 6.72$ ферми.

Различия в выборе радиационных ширин и значений D_0 в значительной степени компенсируются при подгонке расчетных сечений к одним и тем же экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов [65Ka, 77Mu]. В то же время, различия в нейтронных силовых функциях непосредственно проявляется в полных нейтронных сечениях. Резонансная структура полных сечений сохраняется в экспериментальных данных во всей области неразрешенных резонансов, но полное сечение, усредненное по такой структуре, лучше согласуется с оценкой JENDL-3.3, чем с БРОНД-2. Этот результат является прямым следствием заниженного значения силовой функции S_1 в БРОНД-2.

В новой оценке БРОНД-3 было решено сохранить в области неразрешенных резонансов значения нейтронных силовых функций и радиационных ширин, полученных при анализе параметров разрешенных резонансов и ограничиться выбором параметра D_0 из условий оптимального описания экспериментальных данных по радиационному захвату нейтронов. Верхняя граница области неразрешенных резонансов принята равной 100 кэВ. На рис. 6 и 7 показано сравнение оценок полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов с имеющимися экспериментальными данными. В оценках БРОНД-2 и JENDL-3.3 участок энергий от 20 до 30 кэВ включен в область разрешенных резонансов. Однако, анализ резонансных параметров демонстрирует пропуск более половины резонансов на этом участке, и в этих условиях включение этого участка в область неразрешенных резонансов представляется более оправданным. Оценка БРОНД-3 выше 30 кэВ практически совпадает с JENDL-3.3 для полных нейтронных сечений, и различия в сечениях захвата возникают лишь при энергиях выше 70 кэВ (рис.7).

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, в области неразрешенных резонансов нет существенных расхождений между оценками JENDL-3.3 (=ENDF/B-VII) и БРОНД-3, но последняя оценка является более согласованной в определении средних параметров неразрешенных резонансов, уточнение которых может быть важным для расчетов блокировки нейтронных сечений в рассматриваемой области.

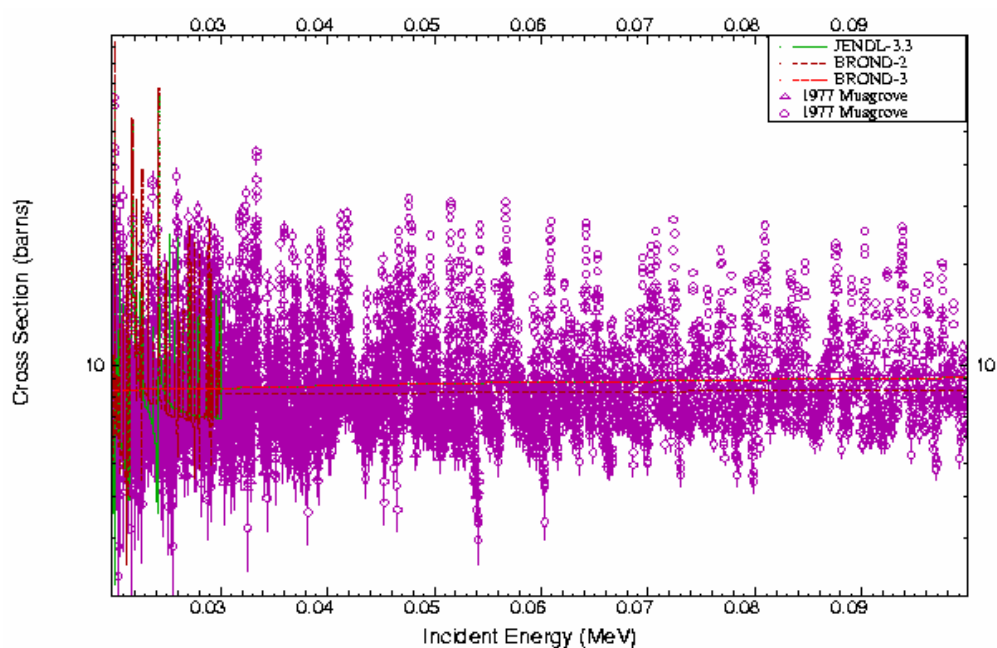


Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений в области неразрешенных резонансов (20-100 кэВ) в сравнении с экспериментальными данными

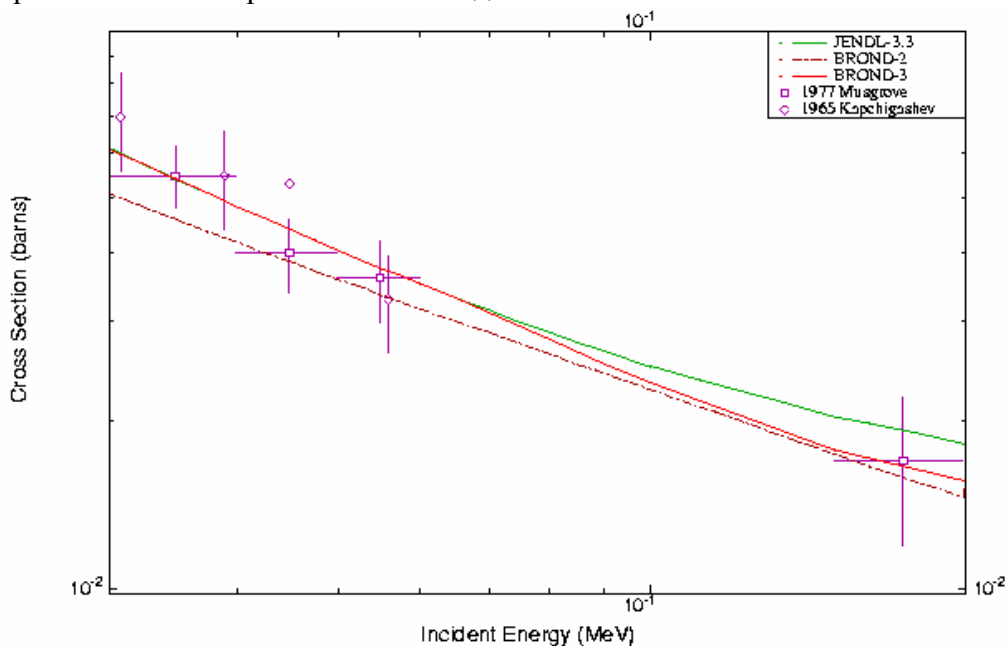


Рис. 7. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области неразрешенных резонансов (30-200 кэВ) в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области.

В данном разделе проведено сравнение оцененных данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII, и JENDL-3.3 вне резонансной области (0.01-20 МэВ). Сравнение с данными библиотеки JEFF-3.1 не проводилось, поскольку для изотопов циркония приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Ниже дано сравнение указанных библиотек совместно с кратким описанием оценки БРОНД-3. Это связано с тем, что авторы оценки БРОНД-3 по сравнению с оценками других авторов применили дополнительные эмпирические систематики и более корректные теоретические расчеты. Оценка всех сечений изотопов циркония выполнена в едином согласованном подходе. В частности, был оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния, использовались систематические

тенденции в поведении функций возбуждения пороговых реакций в зависимости массового числа, применена несферическая оптическая модель.

Нейтронные сечения в диапазоне 0.1 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью модифицированной программы GNASH /96Yo/ с учетом флуктуации нейтронных ширин. Для нейтронов была использована модель сильной связи каналов (программа ECIS /91Ig/). Для оптического потенциала /80Ar/ мнимая часть была модифицирована, чтобы учесть прямое возбуждение низколежащих мультиплетов уровней ($5/2^+ \otimes 2^+$) и ($5/2^+ \otimes 3^-$).

Оптические параметры для нейтронов:

Глубина потенциала (МэВ)	Диапазон энергии (МэВ)	Геометрия(фм)
$V_r=49.0-0.28E$	$0<E<20$	$R_r=1.24 \quad a=0.62$
$W_d=2.38+0.21E$	$0<E<10$	$R_d=1.26 \quad a=0.58$
$W_d=5.39-0.091E$	$10<E<20$	
$W_v=0.0$	$0<E<10.9$	
$W_v=-0.0994+0.091E$	$0.9<E<20$	$R_v=1.24 \quad a=0.62$
$V_{so}=6.2$	$0<E<20$	$R_{s0}=1.12 \quad a=0.47$

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /01Ko/, /74Lo/ и /94Av/, соответственно.

Были рассмотрены гамма переходы E1, M2 и E2. Силовые функции для переходов M1 и E2 были рассчитаны в соответствии с параметризацией программы GNASH. Полная радиационная силовая функция была нормирована к величине, оцененной для радиационной ширины и расстояния между уровнями для S-волны нейтронных резонансов. Параметры гигантского резонанса E1 были взяты из работы /88Di/. Параметры дискретных уровней взяты из работы /95Fi/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 4 дано полное сечение Zr-91 вне резонансной области энергий нейтронов. В области 2-7 МэВ оценка БРОНД-3 лежит ниже оценки JENDL-3.3, а выше они практически совпадают. Экспериментальные данные в области 2-4 МэВ чрезвычайно разбросаны, трудно отдать предпочтение какой-либо одной оценке. Оценка ENDF/B-VII в области 1-4 МэВ близка оценке БРОНД-3, но в области 5-20 МэВ лежит существенно выше оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 и представляется менее предпочтительной.

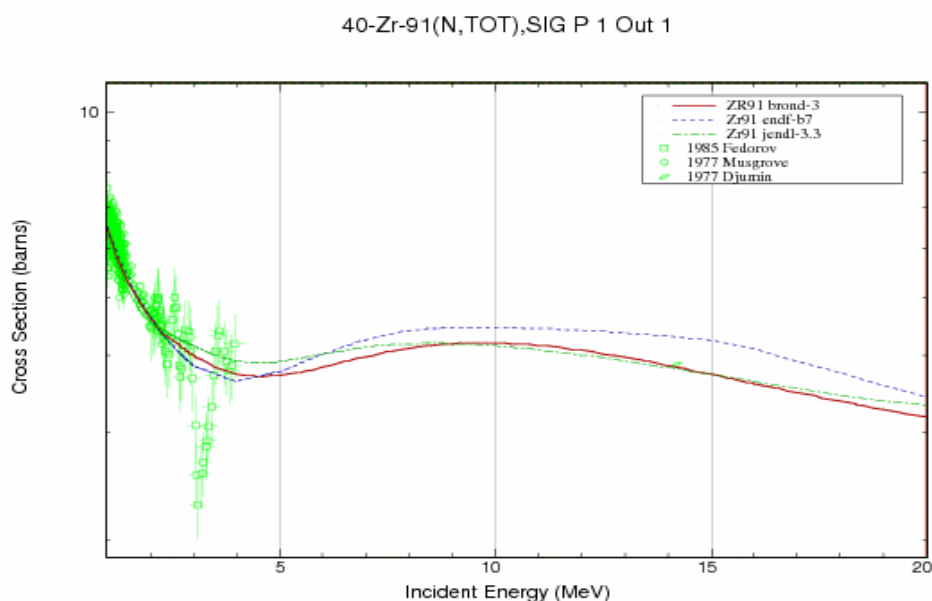


Рис. 4. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. Экспериментальных данных нет. На рис. 5 показано сравнение оценок упругого рассеяния БРОНД-3 и JENDL-3.3 на изотопе Zr-91. Они весьма близки и в отсутствии экспериментальных данных примерно равноценны.

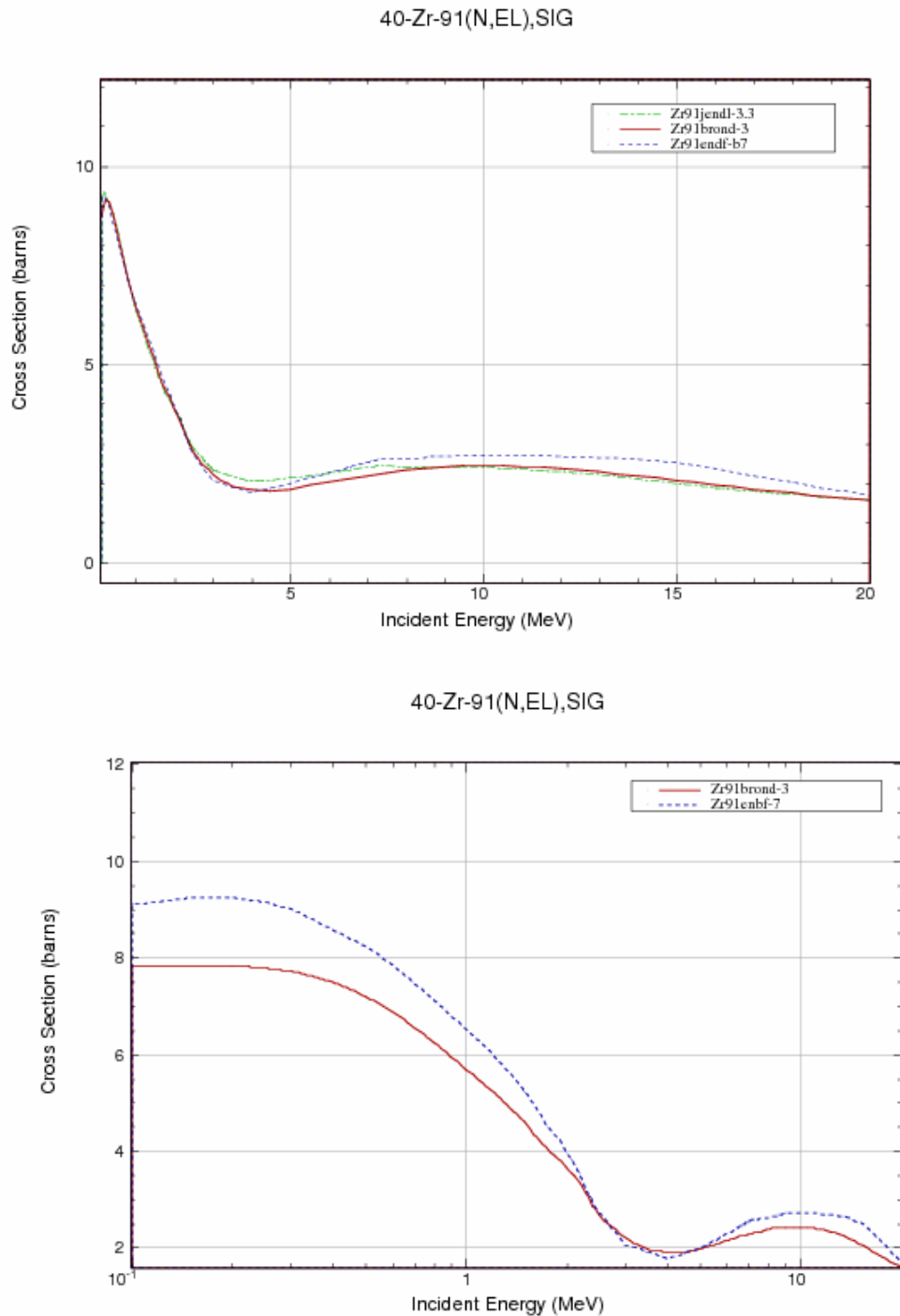


Рис.5. Сечение упругого рассеяния в области 0.01-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-87).

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

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 3.1000 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

N	Энергия уровня, МэВ	Спин	Переход	Энергия гамма- кванта, МэВ	Вероятность перехода, %
0	0.00000	5/2+			
1	1.20480	1/2+	1 → 0	1.20477	100
2	1.46640	5/2+	2 → 0	1.46620	100
3	1.88220	7/2+	3 → 0	1.88218	100
4	2.04230	3/2+	4 → 0	2.04233	100
5	2.13150	9/2+	5 → 0	2.13154	100
6	2.17020	11/2+	6 → 0 6 → 5	2.17004 0.03870	94.5 5.5
7	2.18950	5/2-	7 → 0	2.18907	100
8	2.20050	7/2+	8 → 0	2.20050	100
9	2.25990	13/2-	9 → 6	0.08955	100
10	2.28790	15/2-	10 → 9	0.02800	100
11	2.32050	11/2-	11 → 6 11 → 9	0.15110 0.06033	50 50
12	2.35690	1/2-	12 → 1	1.15210	100
13	2.36660	5/2+	13 → 0	2.36653	100
14	2.39520	9/2-	14 → 6	0.22487	100
15	2.53460	3/2+	15 → 0 15 → 2 15 → 3	2.53466 1.06800 0.065249	44.5 21.3 34.2
16	2.55780	1/2+	16 → 0	2.55780	100
17	2.57760	5/2-	17 → 0	2.57760	100
18	2.63990	3/2-	18 → 0	2.63990	100
19	2.69370	7/2-	19 → 0	2.69370	100
20	2.76460	13/2-	20 → 10 20 → 11	0.47726 0.44385	75.2 24.8
21	2.77500	5/2-	21 → 0 21 → 4	2.77525 0.73245	53.8 46.2
22	2.79150	7/2-	22 → 5	0.65997	100
23	2.81140	5/2-	23 → 0 23 → 4	2.81097 0.7705	84.0 16.0
24	2.82600	3/2+	24 → 0	2.82620	100
25	2.83560	3/2-	25 → 2	1.36923	100
26	2.85710	13/2+	26 → 5 26 → 9 26 → 10 26 → 11	0.72573 0.59693 0.57000 0.53700	48.0 29.3 9.7 13.0

27	2.87100	3/2+	27 → 0	2.87108	100
28	2.89600	5/2+	28 → 6	0.72585	100
29	2.90230	7/2+	29 → 0 29 → 7	2.90230 0.71265	45.7 54.3
30	2.91420	9/2+	30 → 5	0.78270	100
31	2.91840	3/2+	31 → 0	2.92831	100
32	2.99210	3/2-	32 → 8	0.79166	100
33	3.00770	5/2-	33 → 0	3.00768	100
34	3.01700	7/2-	34 → 0	3.01720	100
35	3.03400	1/2-			
36	3.05300	3/2-			
37	3.08270	3/2+	37 → 0	3.08266	100
38	3.1000				

Экспериментальных данных по интегральному сечению неупругого рассеяния нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния в библиотеке JENDL-3.3 рассчитаны на основе сферической оптической моделей ядерных реакций и практически совпадают с данными BROND-3, которые рассчитаны с помощью другой программы для расчета (модифицированной программы GNASH) и параметров несферической оптической модели. На рис. 4 показаны функции возбуждения неупругого рассеяния на первом уровне. Экспериментальных также данных нет. Оцененные функции возбуждения библиотек JENDL-3.3 и БРОНД-3 близки.

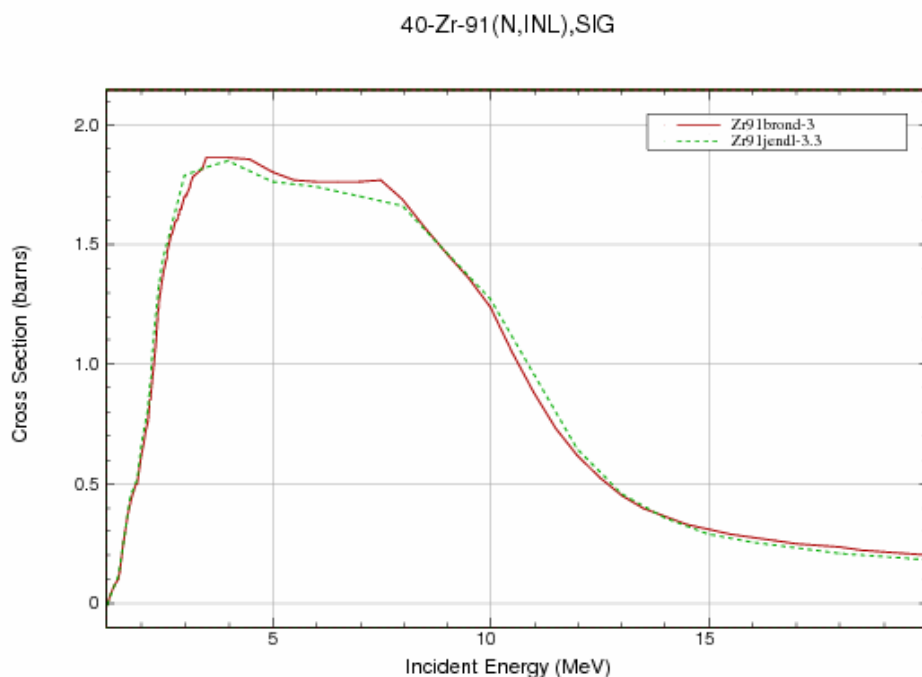


Рис.6. Интегральное сечение неупругого рассеяния Zr-91.

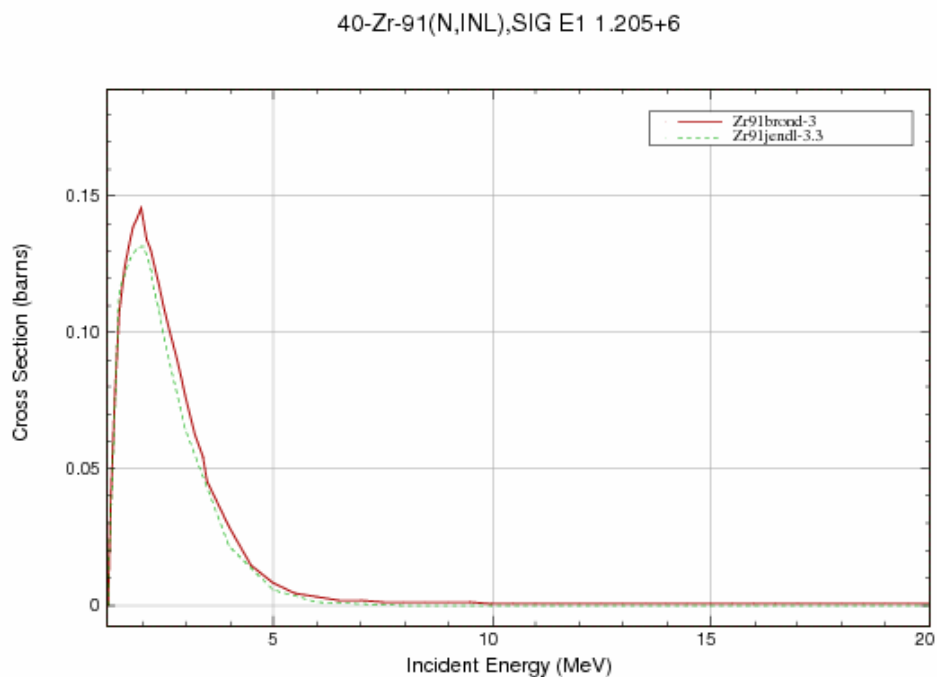


Рис.7. Сечение неупругого рассеяния Zr-91 на первом уровне с энергией 1.205 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.2-2 МэВ сечение радиационного захвата в файле Zr-91 библиотеках БРОНД-3 и JENDL-3.3 различаются, Но из-за отсутствия экспериментальных данных обосновать выбор одной из них трудно.

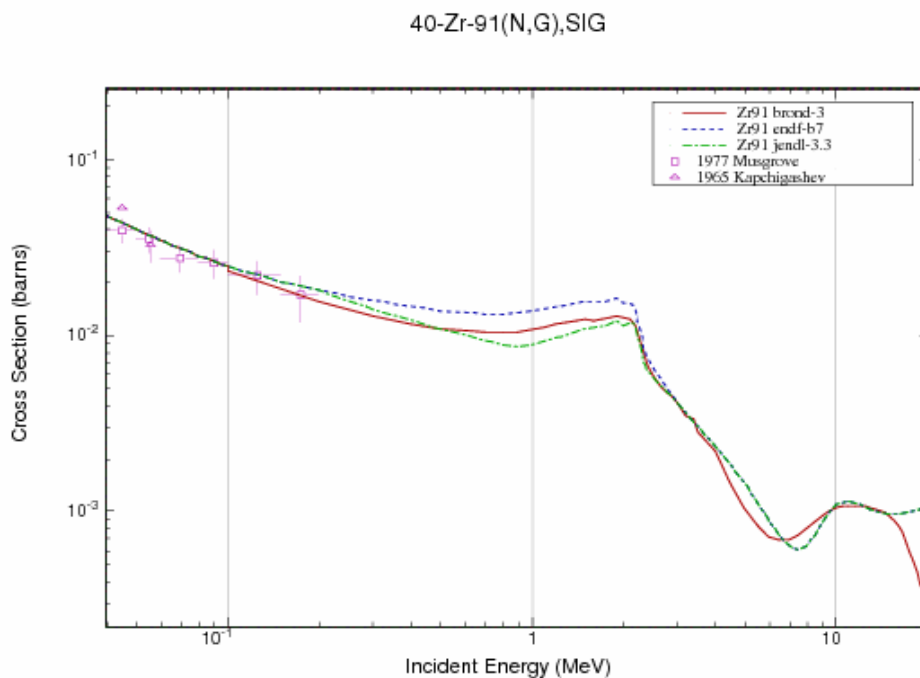


Рис. 9. Сечение радиационного захвата в области 0.1-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

На рис. 10 представлено сечение реакции (n,2n) библиотек JENDL-3.3 и BROND-3. Экспериментальных данных нет. В области до 12 МэВ обе оценки близки, выше оценки заметно различаются, однако оценка БРОНД-3 согласуется с эмпирической систематикой функций возбуждения указанной реакции [97Ma].

Сечение реакции (n,3n) (рис.11) библиотеки БРОНД-3 лучше согласуется с систематикой сечений реакций (n,3n) и (n,2n).

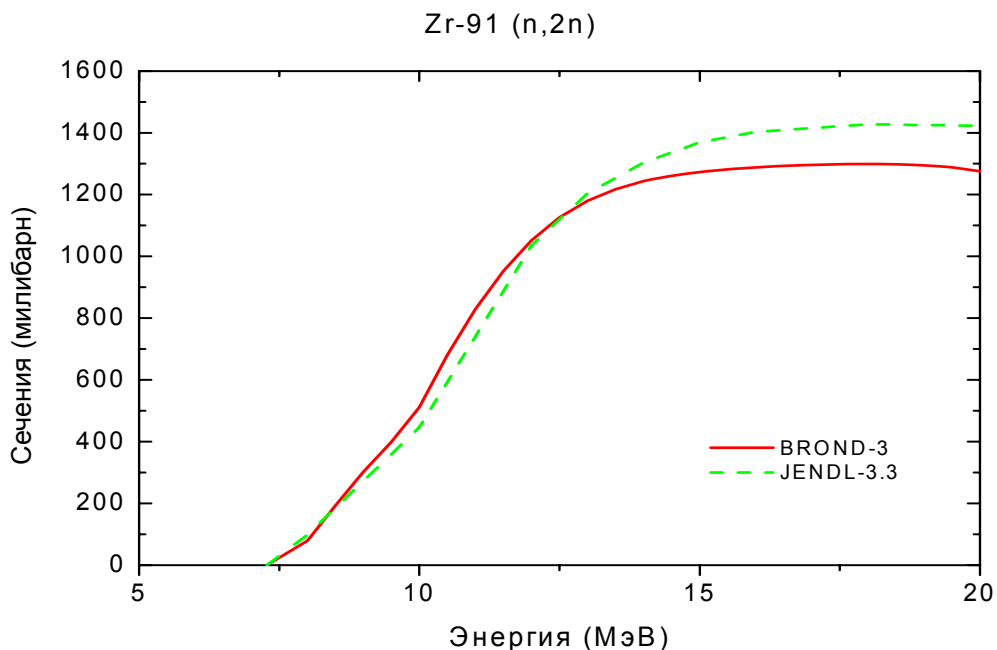


Рис. 10. Сечение реакции (n,2n). JENDL-3.3

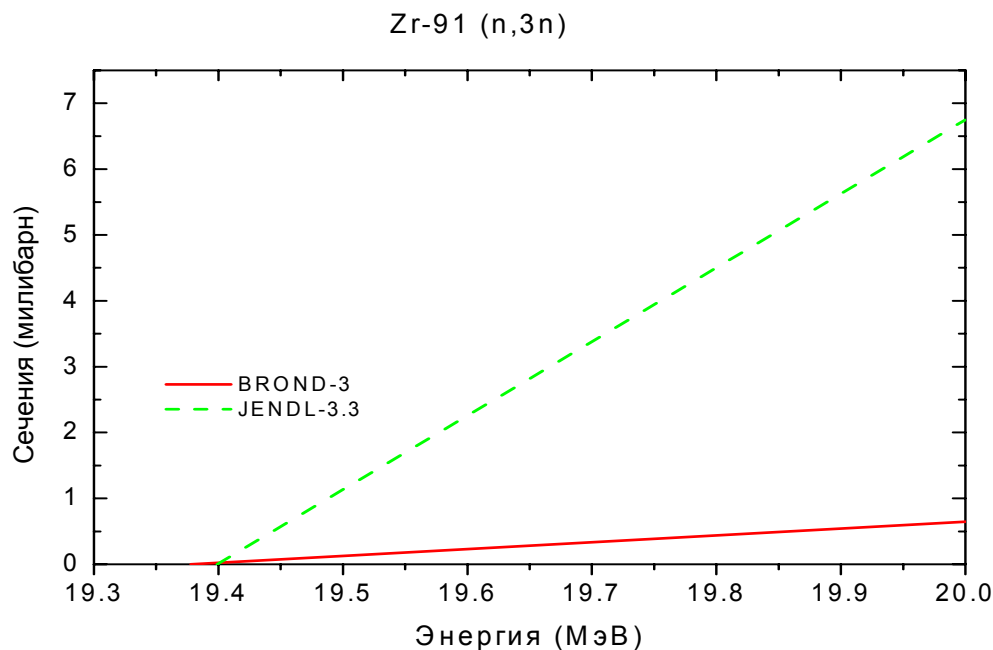


Рис. 11. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104 и 107):

На рис. 12 показано сечение реакции $^{91}\text{Zr}(n,p)$. Оцененные данные библиотеки БРОНД-3 лучше согласуются с систематикой сечений этой реакции и с экспериментальными данными Кайма.

На рис. 13 дано сечение реакции $^{91}\text{Zr}(n,d)$. Данные библиотеки ENDF/B-VII приняты из библиотеки JENDL-3.3. Оценка БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лежит ближе к систематической тенденции поведения этой реакции, основанной на экспериментальных данных Хайта. Эта тенденция требует более высоких сечений реакции (n,d). На рис.14 представлено сечение реакции $^{91}\text{Zr}(n,a)$. Рекомендуется оценка из БРОНД-3, поскольку она также лучше согласуется с эмпирической систематикой.

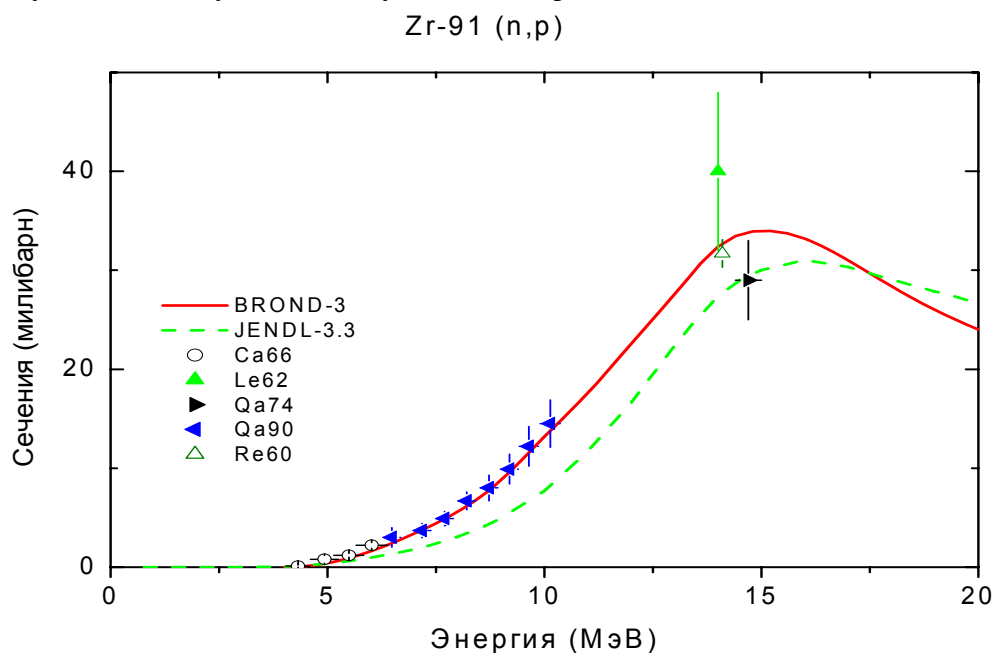


Рис. 11. Сечение реакции (n,p)

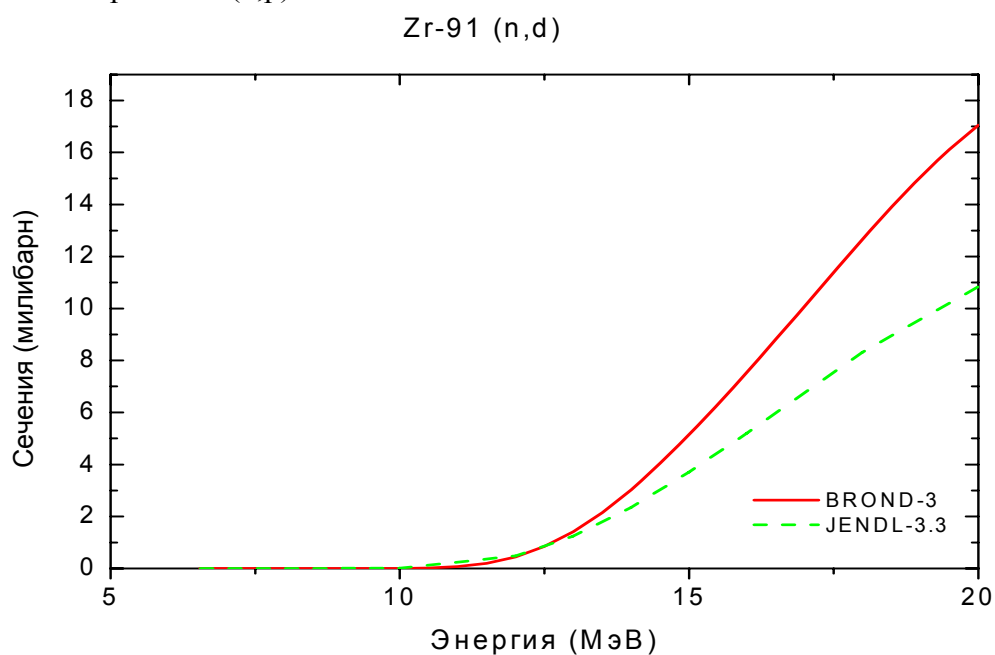


Рис.13. Сечение реакции (n,d).

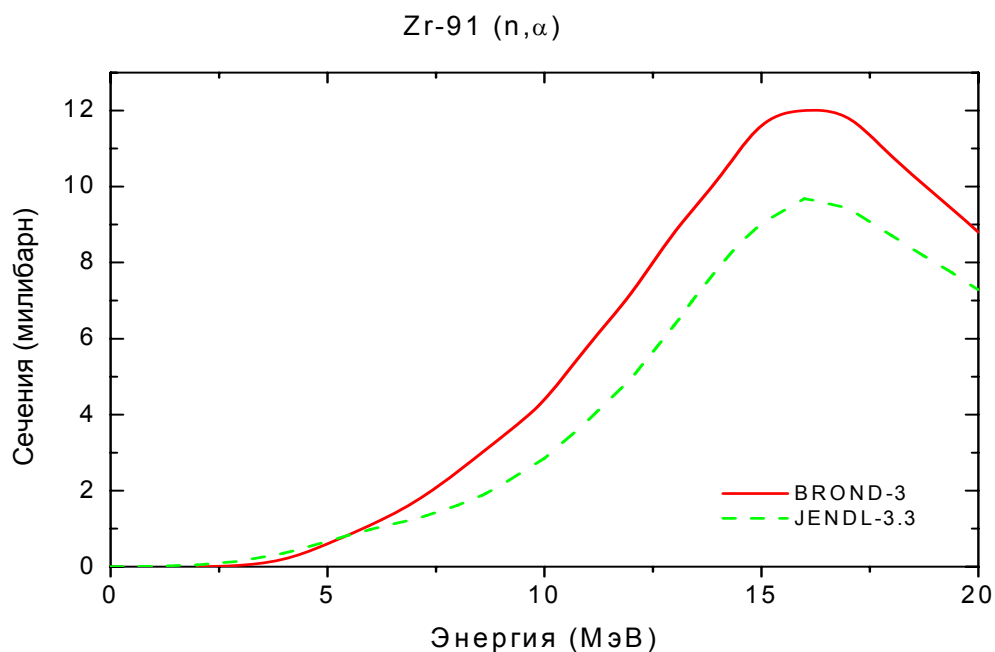


Рис. 14. Сечение реакции (n,α)

3.7. Реакции (n,nα), (n,np) (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. Оценки реакций (n,nα) и (n,np) в файле Zr-91 в БРОНД-3 основаны на расчетах по программе GNASH. Разногласия оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

На рис. 15 дано сечение реакции $^{91}\text{Zr}(n,np)$. Оцененные данные библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 примерно равноценны, однако зависимость из БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она несколько лучше согласуется с систематикой функций возбуждения реакции (n,2n).

На рис.16 дано сечение реакции $^{91}\text{Zr}(n,na)$. Рекомендуется функция возбуждения из библиотеки БРОНД-3, так как она согласуется с сечением реакции (n,α) и с систематикой реакции (n,na).

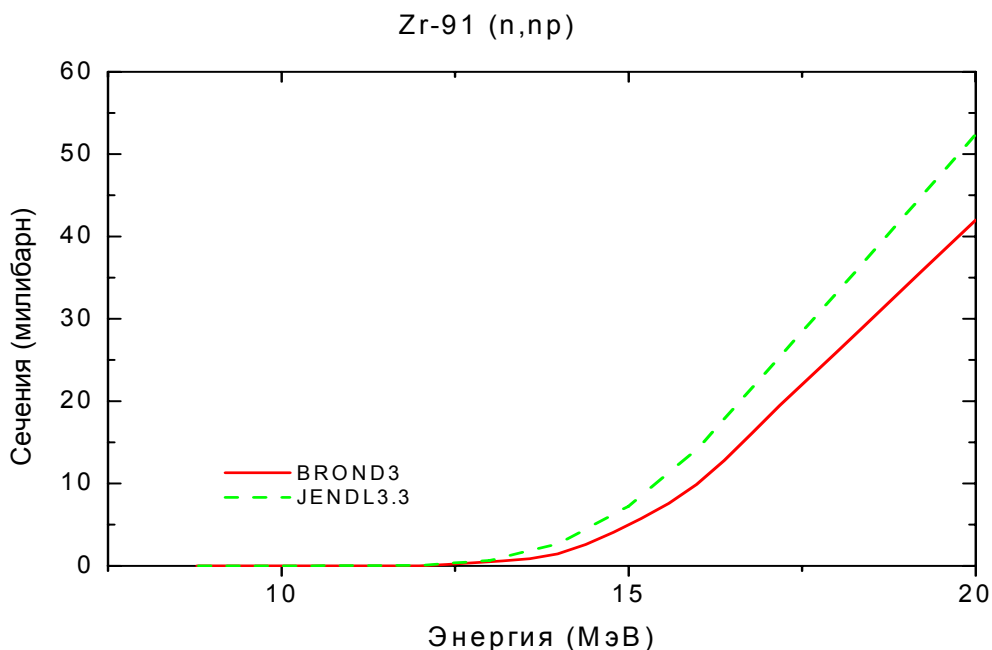


Рис. 15. Сечение реакции (n,np).

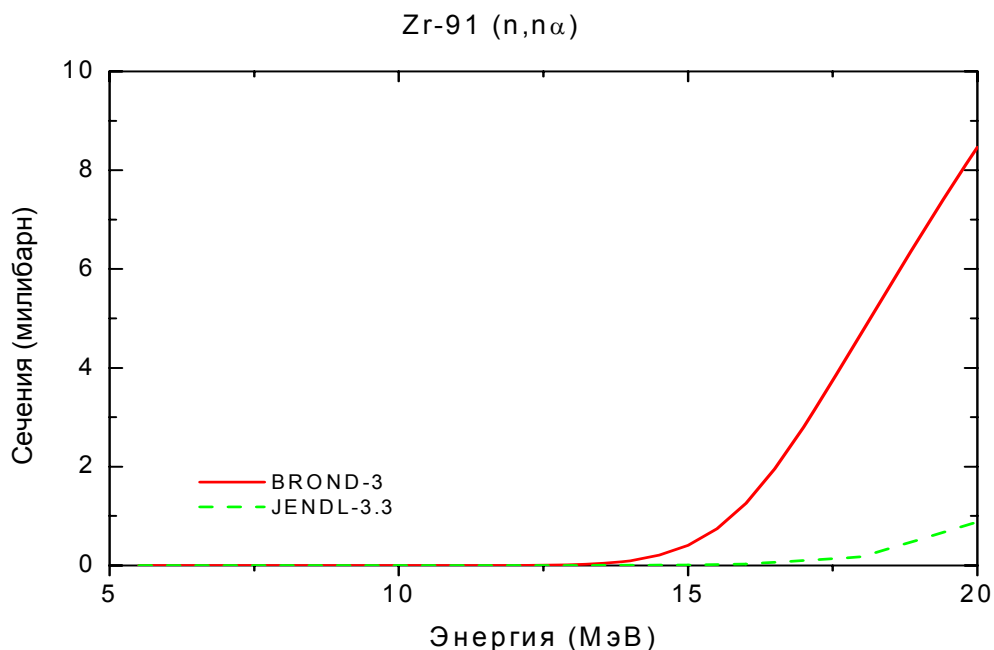


Рис. 16. Сечение реакции (n,nα).

MF=4. Угловые распределения вторичных нейтронов.

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/91Ig/.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов обе оценки учитывают вклад прямых и предравновесных процессов, которые приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов.

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gasthy/91Ig/ и Dwuck/.

MF=6 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

MT=16,17,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /90Ku/.

MF=12 Множественность образования гамма-лучей

MT=16,17,22, 28, 51-87,91,102,103,107. Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH/96Yo/.

MF=14 Угловые распределения гамма-лучей

MT=16,17,22, 28, 51-87,91,103,102 107 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

MF=15 Непрерывные спектры гамма-лучей

MT=16,17,22,28,91,103,107 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, рассчитаны по программе EGNASH/90Ya/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/91Ig/

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка БРОНД-3 является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить в РОСФОНД файл оцененных данных для Zr-91 из БРОНД-3.

Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

References

- 06Mu Mughabghab S.F.: Atlas of Neutron Resonances, Academic Press, NY, 2006 (5-th edition of BNL-325)
- 03M.. S.Mughabghab, Report INDC(NDS)-440, 2003.
- 01Ko Koning,A.J., Dalaroche,J.P. Contribution to 3_th RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
- 98Ri RIPLE-2. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
- 97Ma Manokhin,V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin,V.N., Blokhin,A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
- 96Yo Young,P.G., Arthur,E.D., Chadwick,M.B.: In "Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors" (Triest,1996). Eds. A.Gordini, G.Reffo., World Science, Singapore, 1988,V.1,p.206.
- 95Fi Firestone,R.B. Table of Isotopes, Eight Edition,V.2, New York,1995
- 91Ig Igarasi, S. and Fukahori, T.: JAERI 1321 (1991).
- 90Ku Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
- 90Ya Yamamuro, N.: JAERI-M 90-006 (1990).
- 88Di Dietrich,S.S., Berman,B.L. Atomic data and Nuclear data Tables 38(1988)199.
- 86Ki Kikuchi, Y. et al.: JAERI-M 86-030 (1986).
- 85Sa M.M.Salah et al., EXFOR-12940, 1985
- 80Ar Arthur E.D. Nucl.Sci.Eng. 76(1980)137.
- 78Br Brusegan, A., et al.: "Proc. Int. Conf. on Neutron Physics and Nucl. Data for Reactors, Harwell 1978", 706.
- 74Lo Lohr, J.M. and Haeberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
- 70Ra Raynal,J.: Report IAEA SMR-9/8(1970),p.281.
- 69Ba .Bartolome,Z.M. et al., Nucl. Sci. Eng., v. 37, 137 (1969).**
- 65Ka Капчигашев,С.П., Ю.П.Попов. АЕ, т. 19, 294 (1965).**

40.5. Цирконий-92

1. Общие характеристики

1.1. $Z=40$

1.2. $A=92$

1.3. $A_w=91.11552$

1.4. Содержание в естественной смеси: 17.15

1.5. Перечень нейтронных реакций:

MT	Реакция	Q, МэВ	Епор, МэВ	Ядро-продукт
51	(n,n')	-0.9345	0.9448	Zr-92
16	n,2n	-8.6351	8.7299	Zr-91
17	n,3n	-15.8293	15.9939	Zr-90
22	n,n α	-2.9655	2.9981	Sr-88
28	n,np	-9.3974	9.5005	Y-91
102	n, γ	6.7330		Zr-92
103	n,p	-2.8420	2.8732	Y-92
104	n,d	-7.1728	7.2508	Y-91
105	n,t	-8.8460	8.9422	Y-90
107	n, α	3.4001		Sr-89

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

2.3 Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках БРОНД-2 и JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мухабхабом и др. [81M] на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию и радиационному захвату нейтронов [69Ba, 76Bo]. Верхняя граница резонансной области принята равной 40 кэВ в БРОНД-2 и 71 кэВ в JENDL-3.3, и радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 7.2$ фм [81M] в обеих оценках. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами приняты средние значения ширин: 180 мэВ для s-резонансов и 270 мэВ для p-резонансов [81M]. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в CENDL-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII. Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице:

Оценка	БРОНД-2(=БРОНД-3)	JENDL-3.3	Эксперимент [81Mu, 03Mu]
полное	5.074	7.339	
упругое	4.855	7.110	
захвата	.219	.229	.220±0.060
резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ:	.634	.699	.63±.02

В пределах погрешности оценки БРОНД-2 и JENDL-3.3 согласуются с измеренными сечениями радиационного захвата тепловых нейтронов, но существенно расходятся в оценке полных сечений, для которых нет каких-либо экспериментальных данных. Резонансный интеграл захвата нейтронов в JENDL-3.3 оказывается заметно выше экспериментального.

Для пересмотренной оценки БРОНД-3 было решено сохранить резонансные параметры БРОНД-2, но в соответствии с приведенными ниже результатами статистического анализа параметров резонансов увеличить до 60 кэВ верхнюю границу области разрешенных резонансов. Сечения для тепловых нейтронов и резонансный интеграл захвата при этом практически не изменились.

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 1 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки БРОНД-2 и JENDL-3.3, 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 представлены на рис. 1. Данный анализ показывает, что в диапазоне энергий до 60 кэВ в наборе s-резонансов пропущено от 4-5 резонансов в JENDL-3.3 и в наборе p-резонансов пропущено 5-7 слабых резонансов в JENDL-3.3 и до 10 резонансов в БРОНД-2. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, для обеих наборов резонансных параметров равны $D_0 = (3500 \pm 500)$ эВ и $D_1 = (1140 \pm 60)$ эВ. Отношение $D_0/D_1 = 3.07 \pm 0.45$ согласуется со статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, и это свидетельствует об общей согласованности анализа пропуска резонансов и погрешностей определения средних расстояний между резонансами. Для нейтронных

силовых функций в рамках данного анализа получены значения $S_0=(0.75 \pm 0.10) 10^{-4}$ и $S_1=(7.5 \pm 1.0) 10^{-4}$ для s- и p-резонансов, соответственно.

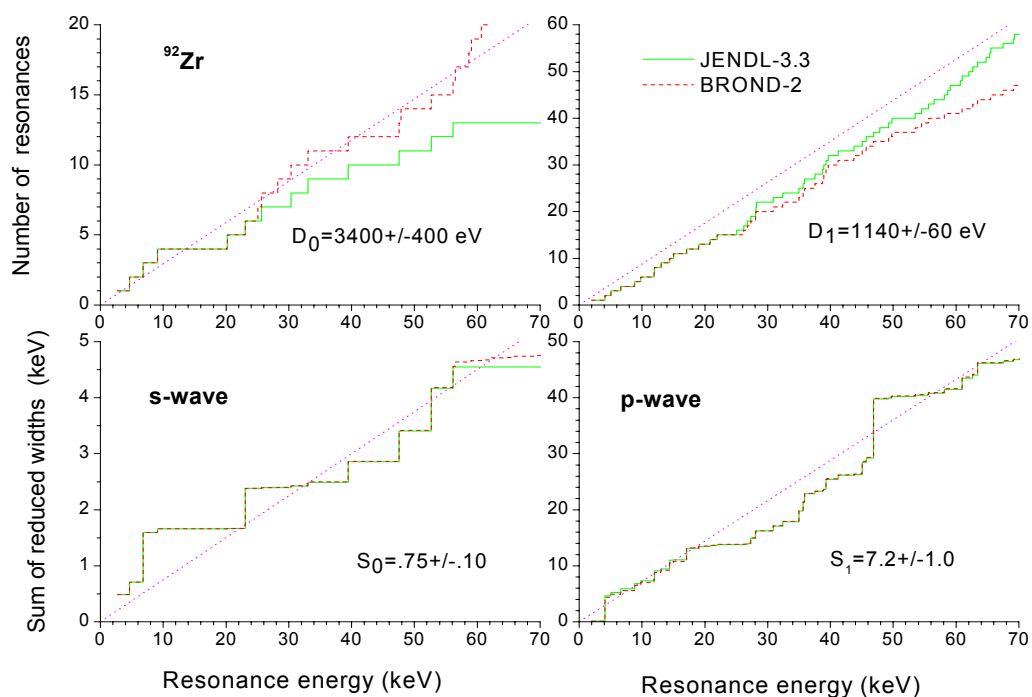


Рис. 1. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках JENDL-3.3 и ENDF/B-VII

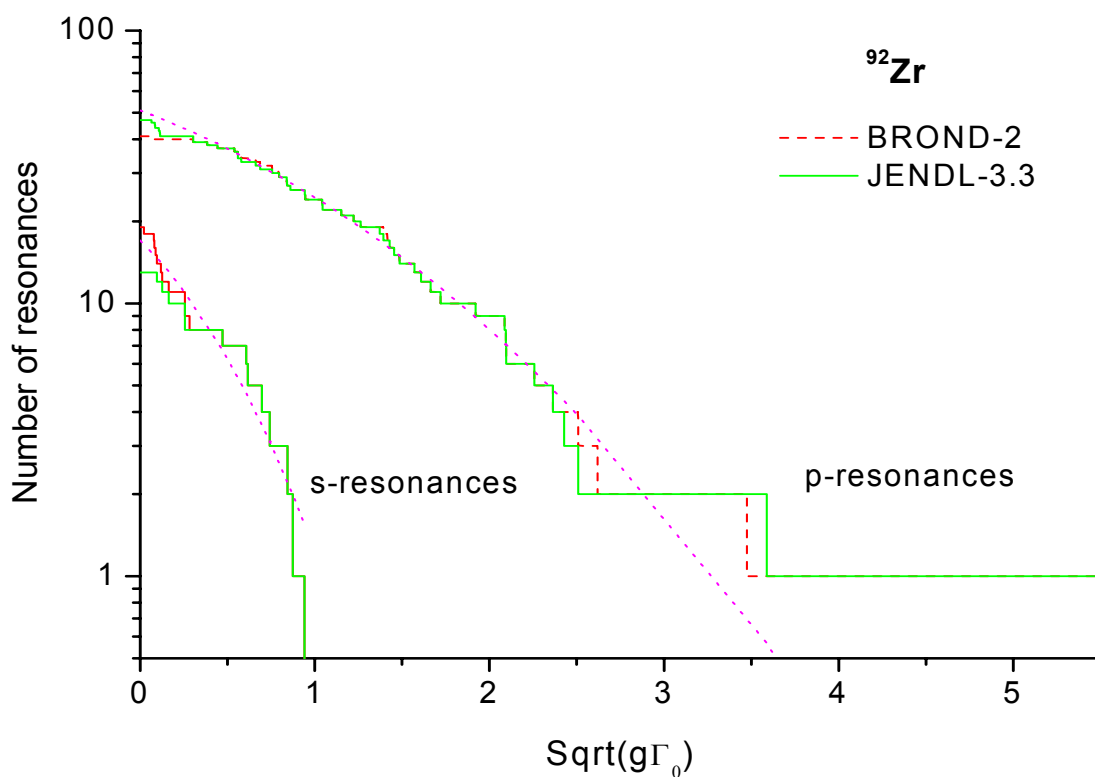


Рис. 2. Анализ пропуска s- и p-резонансов. Пунктиром показано теоретически ожидаемое распределение.

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в БРОНД-2 принята равной 200 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В JENDL-3.3 использован аналогичный подход, но принята более низкая верхняя граница неразрешенных резонансов 100 кэВ. Оценка JENDL-3.3 для неразрешенных резонансов принята без каких-либо изменений в CENDL-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована формула одноуровневого Брейта-Вигнера.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [91I]. Средняя радиационная ширина взята независимой от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов [76Bo]. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S_0 = 0.500\text{E-}4$, $S_1 = 7.00\text{E-}4$, $S_2 = 0.380\text{E-}4$, $G_g = 0.140$ эВ для s- и 0.36 эВ для p-волны, $D_0 = 3233$ эВ, $R = 5.964$ ферми.

В БРОНД-2 было использовано аналогичное приближение, но средние радиационные ширины были приняты на основе статистического анализа параметров разрешенных резонансов и средние расстояния между резонансами было выбрано из условий оптимального описания наблюдаемых сечений радиационного захвата нейтронов. Для энергии нейтронов 70 кэВ приняты следующие значения параметров:

$S_0 = 0.40\text{E-}4$, $S_1 = 5.00\text{E-}4$, $S_2 = 0.88\text{E-}4$, $G_g = 0.196$ эВ для s- и 0.244 эВ для p-волны, $D_0 = 2575$ эВ, $R = 6.68$ ферми.

Различия в выборе радиационных ширин и значений D_0 в значительной степени компенсируются при подгонке расчетных сечений к одним и тем же экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов [76B].

В новой оценке БРОНД-3 было решено сохранить в области неразрешенных резонансов значения нейтронных силовых функций и радиационных ширин, полученных при анализе параметров разрешенных резонансов и ограничиться выбором параметра D_0 из условий оптимального описания экспериментальных данных по радиационному захвату нейтронов. Верхняя граница области неразрешенных резонансов принята равной 200 кэВ. На рис. 3 и 4 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Существенные отличия между оценками проявляются лишь ниже первого резонанса. Эти отличия обусловлены различиями нейтронных сечений для тепловых нейтронов и выбором соответствующих параметров отрицательного резонанса. В области неразрешенных резонансов все оценки практически совпадают.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что основные отличия между оценками JENDL-3.3 (=ENDF/B-VII) и БРОНД-3 (\approx БРОНД-2) относятся к описанию тепловых сечений. БРОНД-3 лучше согласуется с имеющимися экспериментальными данными [03M, 06M], а также является более согласованной в определении средних параметров неразрешенных резонансов, уточнение которых может быть важным для расчетов блокировки нейтронных сечений в рассматриваемой области.

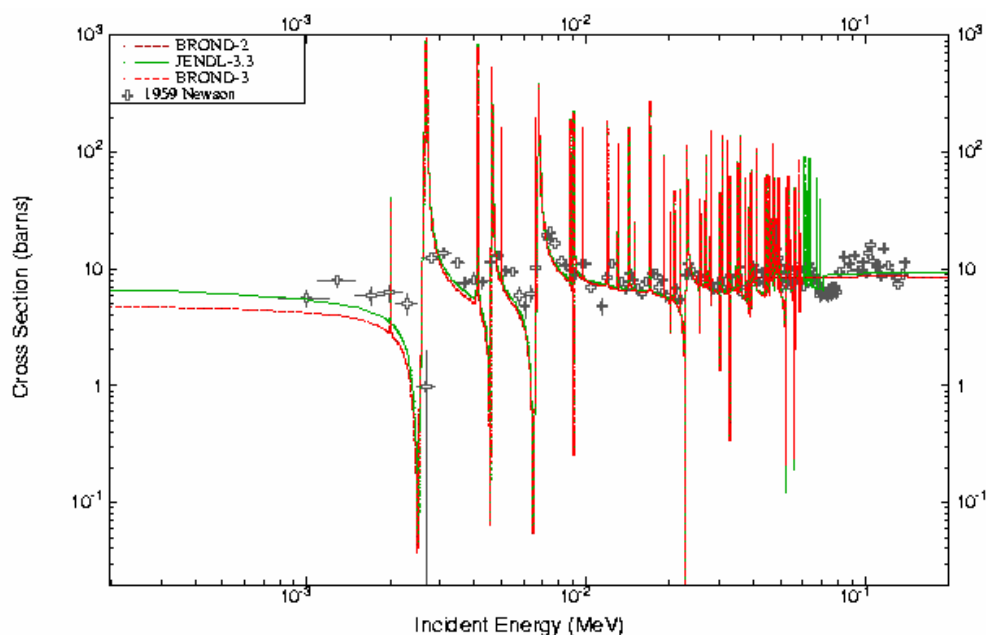


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

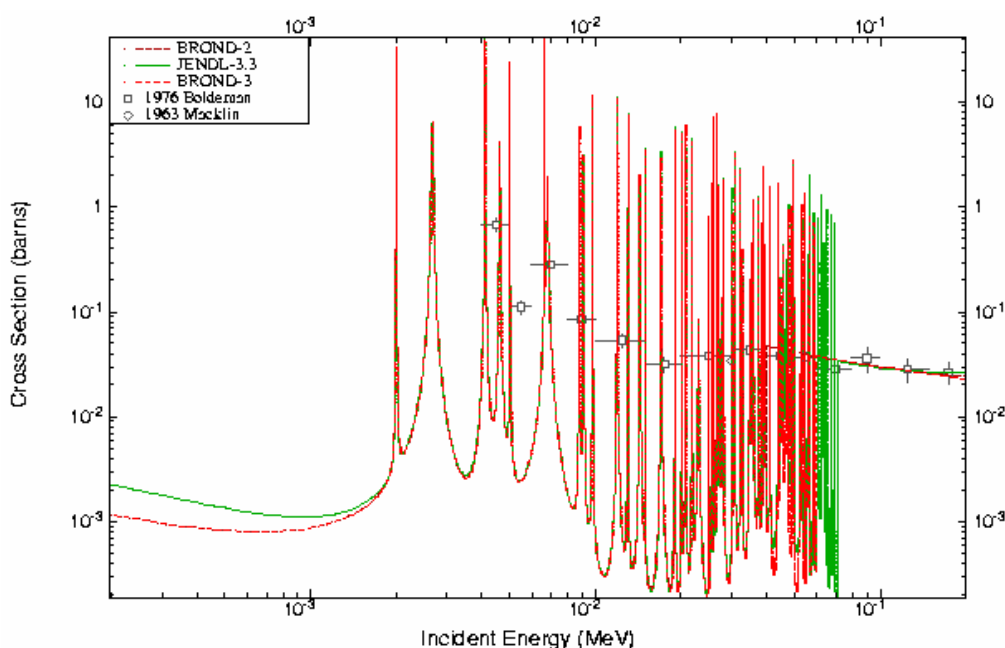


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области.

В данном разделе проведено сравнение оцененных данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII и JENDL-3.3 вне резонансной области (0.02-20 МэВ). Сравнение с данными библиотеки JEFF-3.1 не проводилось, поскольку для изотопов циркония приняты данные библиотеки JENDL-3.3. В последней версии ENDF/B-VII приняты также данные JENDL-3.3. Поэтому ниже следует сравнение только оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3, также дано краткое описание оценки БРОНД-3. Это связано с тем, что авторы оценки БРОНД-3 по сравнению с оценками других авторов применили дополнительные эмпирические систематики и более корректные теоретические расчеты. Оценка всех сечений изотопов

циркония выполнена в едином согласованном подходе. В частности, был оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния, использовались систематические тенденции в поведении функций возбуждения пороговых реакций в зависимости массового числа, применена несферическая оптическая модель.

Нейтронные сечения в БРОНД-3 в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью модифицированной программы GNASH /96Yo/ с учетом флуктуации нейтронных ширин. Для нейтронов была использована модель сильной связи каналов (программа ECIS /91Ig/) с прямым возбуждением низколежащих уровней 2+ и 3-.

Оптические параметры для нейтронов:

Глубина потенциала (МэВ)	Диапазон энергии (МэВ)	Геометрия(фм)
$V_r=49.0-0.28E$	$0<E<20$	$R_r=1.24 \quad a=0.62$
$W_d=2.38+0.21E$	$0<E<10$	$R_d=1.26 \quad a=0.58$
$W_d=5.39-0.091E$	$10<E<20$	
$W_v=0.0$	$0<E<10.9$	
$W_v=-0.0994+0.091E$	$0.9<E<20$	$R_v=1.24 \quad a=0.62$
$V_{so}=6.2$	$0<E<20$	$R_{so}=1.12 \quad a=0.47$

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /01Ko/, /74Lo/ и /94Av/, соответственно.

Гамма-переходы рассчитывались для E1, M2 и E2 -силовых функций. Параметры гигантского резонанса E1 были взяты из работы /88Di/. Полная силовая функция была нормализована к имеющимся экспериментальным данным по радиационной ширине и D0 для нейтронного резонанса. Параметры дискретных уровней взяты из работы /95Fi/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 4 дано полное сечение Zr-92 вне резонансной области энергий нейтронов. В области 3-8 МэВ оценка БРОНД-3 лежит несколько ниже оценки JENDL-3.3 и при сравнении с экспериментальными данными выглядит предпочтительнее. В более высокой области обе оценки практически совпадают.

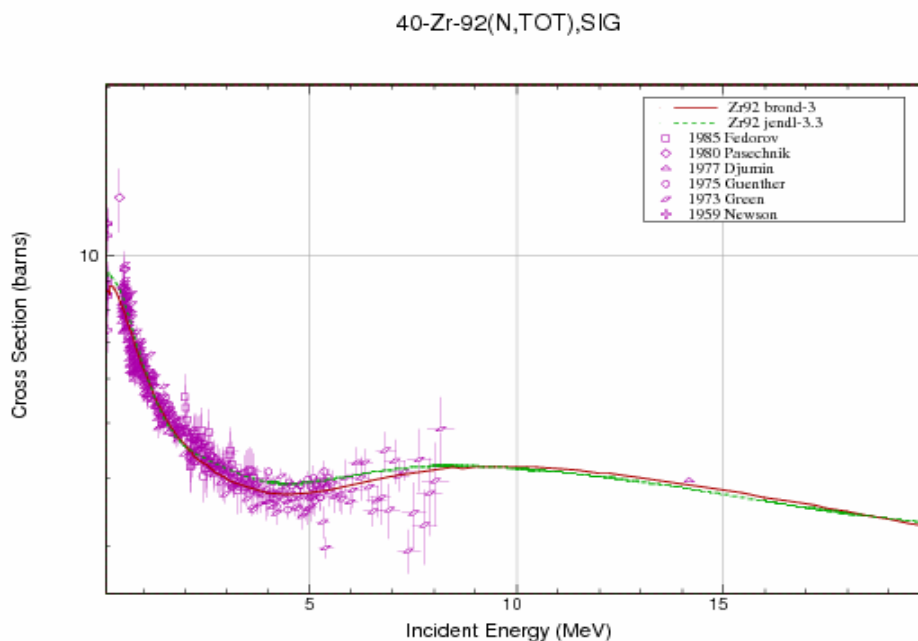


Рис. 4. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.2 -20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 5 показано сравнение оценки упругого рассеяния на изотопе Zr-92 с данными файла библиотеки JENDL-3.3. Как видно, сечение упругого рассеяния в области энергий 3-8 МэВ в библиотеке BROND-3 лежат также несколько ниже данных JENDL-3.3, что связано с более низким сечением в этой области полного сечения (см. рис.4).

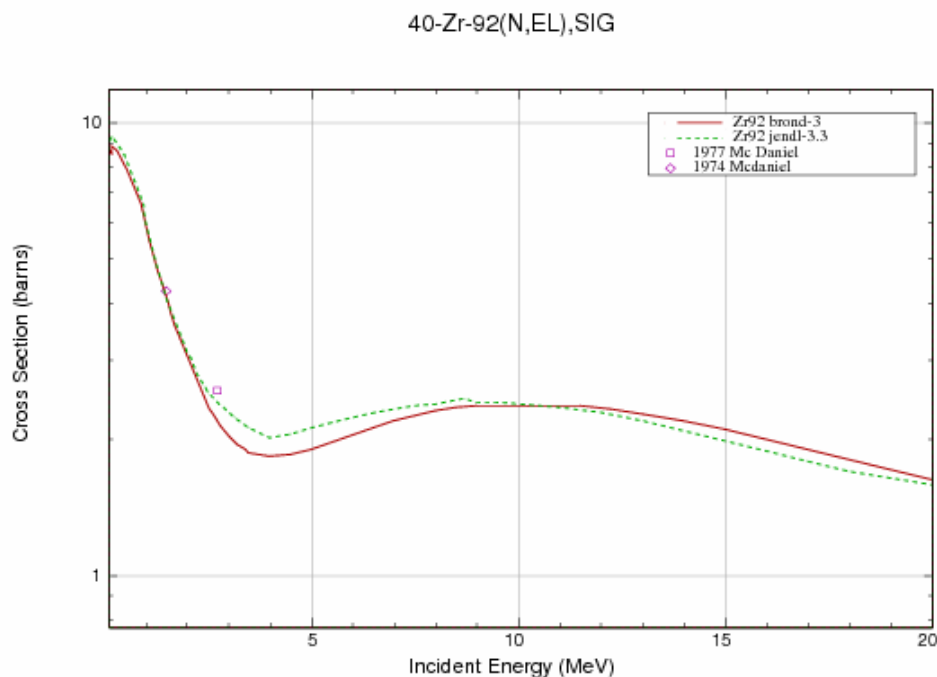


Рис.5. Сечение упругого рассеяния в области 0.01-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-70).

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

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 3.1000 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

N	Энергия уровня, МэВ	Спин	Переход	Энергия гамма- кванта, МэВ	Вероятность перехода, %
0	0.00000				
1	0.93450	2+	1 → 0	0.9345	100
2	1.38280	0+	2 → 0 2 → 1	1.3830 0.4483	0.02 99.8
3	1.49550	4+	3 → 1	0.5610	100
4	1.84730	2+	4 → 0 4 → 1	1.8473 0.9127	33 67
5	2.06670	2+	5 → 1 5 → 3	1.1322 0.5714	98.6 0.06

			$5 \rightarrow 4$	0.2192	0.08
6	2.18200	2+	$6 \rightarrow 0$ $6 \rightarrow 2$ $6 \rightarrow 4$	2.1820 0.7000 0.3347	44 20 36
7	2.33980	3-	$7 \rightarrow 0$ $7 \rightarrow 1$ $7 \rightarrow 3$ $7 \rightarrow 4$ $7 \rightarrow 5$	2.3399 1.4053 0.8442 0.4925 0.2729	0.2 72.9 19.2 7.6 0.1
8	2.39840	4+	$8 \rightarrow 1$ $8 \rightarrow 3$	1.4838 0.9029	25.9 74.1
9	2.47340		$9 \rightarrow 0$	2.4734	100
10	2.48600	5-	$10 \rightarrow 3$	0.9905	100
11	2.66600	2+	$11 \rightarrow 1$ $11 \rightarrow 2$	1.7315 1.3840	95 5
12	2.74360	4-	$12 \rightarrow 3$ $12 \rightarrow 5$ $12 \rightarrow 7$ $12 \rightarrow 8$ $12 \rightarrow 10$	1.2481 0.6775 0.4038 0.3448 0.2576	40.9 3.4 23.3 2.1 30.3
12	2.74360	4-	$12 \rightarrow 3$ $12 \rightarrow 5$ $12 \rightarrow 7$ $12 \rightarrow 8$ $12 \rightarrow 10$	1.2481 0.6775 0.4038 0.3448 0.2576	40.9 3.4 23.3 2.1 30.3
13	2.75200	3-	$13 \rightarrow 0$ $13 \rightarrow 1$ $13 \rightarrow 5$	2.7520 1.8285 0.6853	65 25 10
14	2.81973	2+	$14 \rightarrow 0$ $14 \rightarrow 1$ $14 \rightarrow 2$ $14 \rightarrow 4$ $14 \rightarrow 10$	2.81980 1.8850 1.4362 0.9723 0.3390	3.7 24.5 3.1 61.4 7.3
15	2.86340	4+	$15 \rightarrow 1$ $15 \rightarrow 3$	1.9287 1.3693	21.9 78.1
16	2.90350	0+	$16 \rightarrow 1$ $16 \rightarrow 5$	1.9702 0.8372	46.8 53.2
17	2.90946	2+	$17 \rightarrow 1$ $17 \rightarrow 3$ $17 \rightarrow 5$ $17 \rightarrow 7$	1.97488 1.41406 0.84269 0.56946	47.8 33.5 16.7 2.0
18	2.95780	6+	$18 \rightarrow 3$	1.4623	100
19	3.03970	2+	$19 \rightarrow 1$ $19 \rightarrow 4$ $19 \rightarrow 7$ $19 \rightarrow 12$	2.1052 1.1925 0.7001 0.2958	76.5 3.2 17.4 2.9
20	3.05780	2+	$20 \rightarrow 1$ $20 \rightarrow 5$	2.1224 0.9904 0.7189	21.9 56.2 21.9

			20 → 7		
21	3.1000-				

Экспериментальных данных по интегральному сечению неупругого рассеяния нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния библиотек JENDL-3.3 рассчитаны на основе сферической оптической моделей ядерных реакций. Данные BROND-3 в области до 9 МэВ лежат несколько выше оценки JENDL-3.3, но при более высоких энергиях практически совпадают. Учитывая более корректный подход в расчетах по программе GNASH интегральное сечение неупругого рассеяния из библиотеки BROND-3 предпочтительнее. На рис. 4-5 показаны функции возбуждения неупругого рассеяния на первых двух уровнях, где имеются экспериментальные данные. Для первого уровня оцененные функции примерно равнозначны, а для второго уровня функция BROND-3 лежит ниже экспериментальных данных и оценки JENDL-3.3.

40-Zr-92(N,INL),SIG

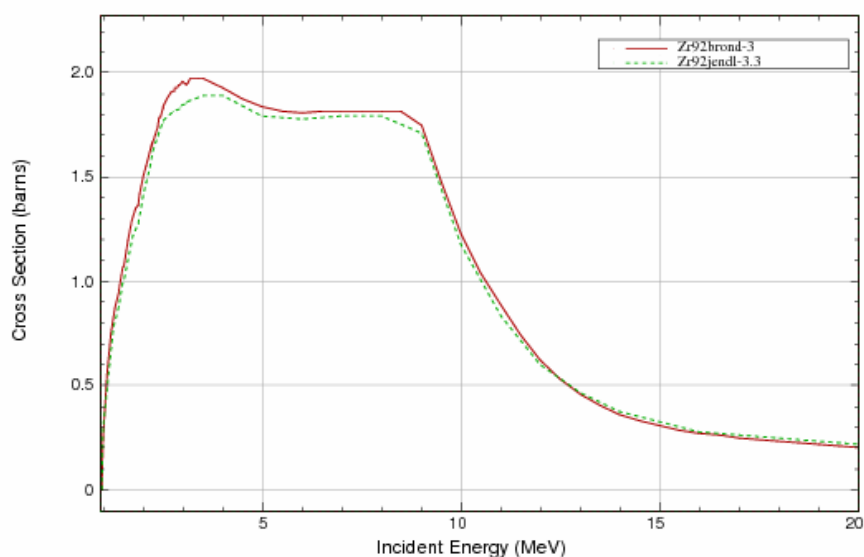


Рис.6. Интегральное сечение неупругого рассеяния Zr-92.

40-Zr-92(n,n'),SIG EI9.34E+5

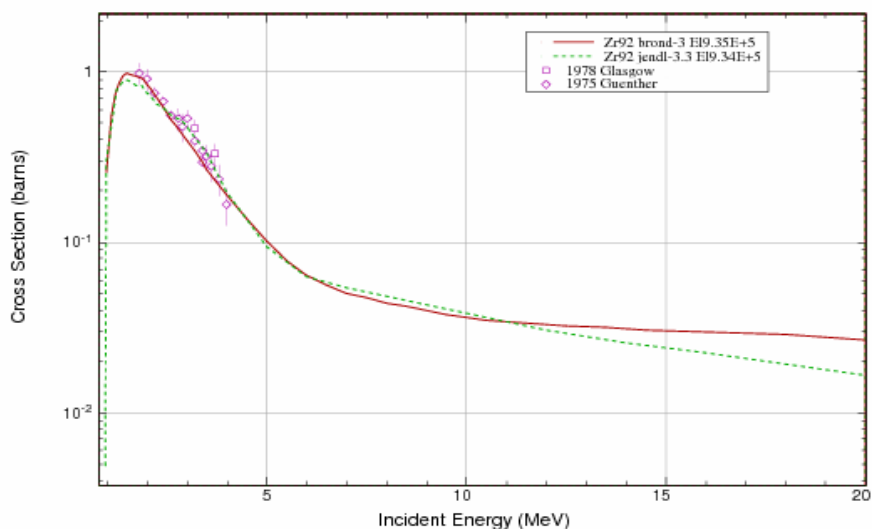


Рис. 7. Функция возбуждения первого уровня Zr-92 с энергией 0.9345 МэВ.

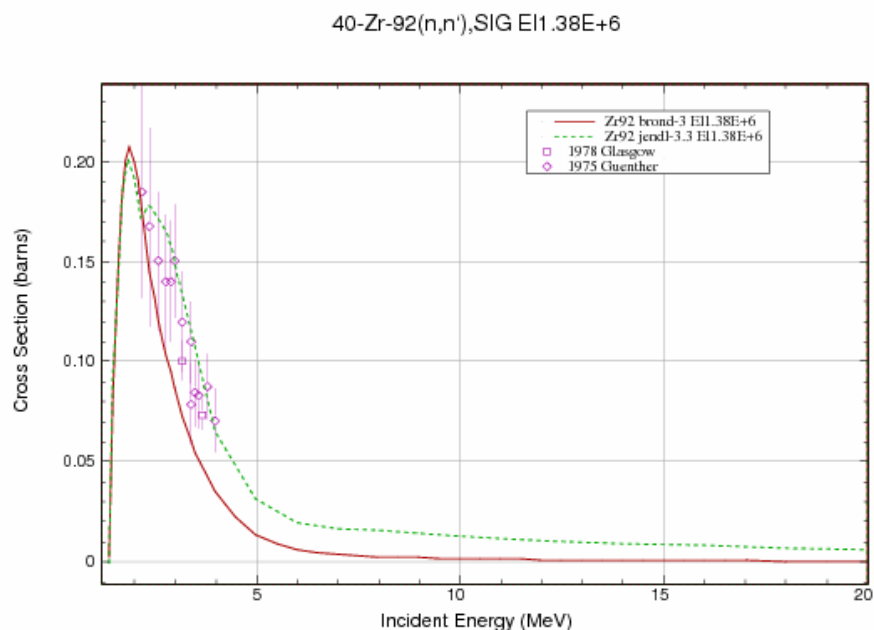


Рис. 8. Функция возбуждения второго уровня ZR-92 с энергией 1.3828 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.1-20 МэВ сечение радиационного захвата в файле Zr-92 библиотеки БРОНД-3 рассчитано с учетом полупрямого механизма в области гигантского резонанса. Как видно, данные БРОНД-3 и JENDL-3.3 заметно различаются, но кривая БРОНД-3 выглядит предпочтительнее.

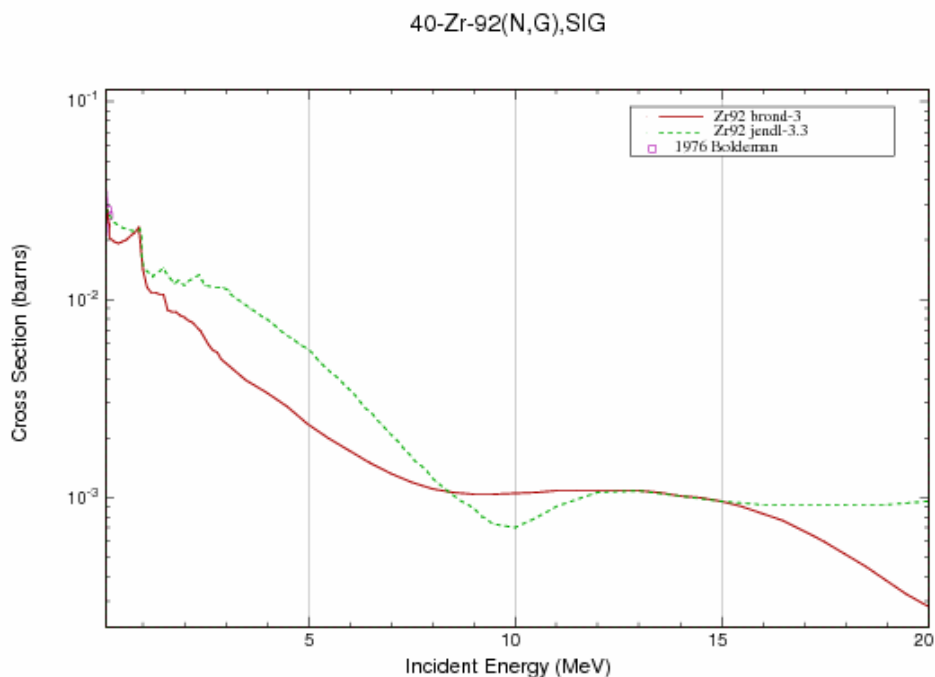


Рис. 9. Сечение радиационного захвата в области 0.1-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

Экспериментальных данных по сечениям реакции (n,2n) нет. На рис. 10 представлены оценки сечений реакции (n,2n) библиотек JENDL-3.3 и БРОНД-3. Как видно, обе оценки

близки и согласуются с эмпирической систематикой функций возбуждения указанной реакции [15]. Могут быть рекомендованы данные обеих библиотек. На рис.10 показана также оценка предыдущей версии ENDF-BVII, принятая до замены на данные JENDL-3.3. На рис. 11 показаны данные реакции (n,3n) JENDL-3.3 и БРОНД-3. Различия не очень велики, однако форма кривой оценки БРОНД-3 предпочтительнее. На рис. показана также оценка предыдущей версии ENDF-BVII, принятая до замены на данные JENDL-3.3. Очевидно, что данные ENDF-BVII ошибочны.

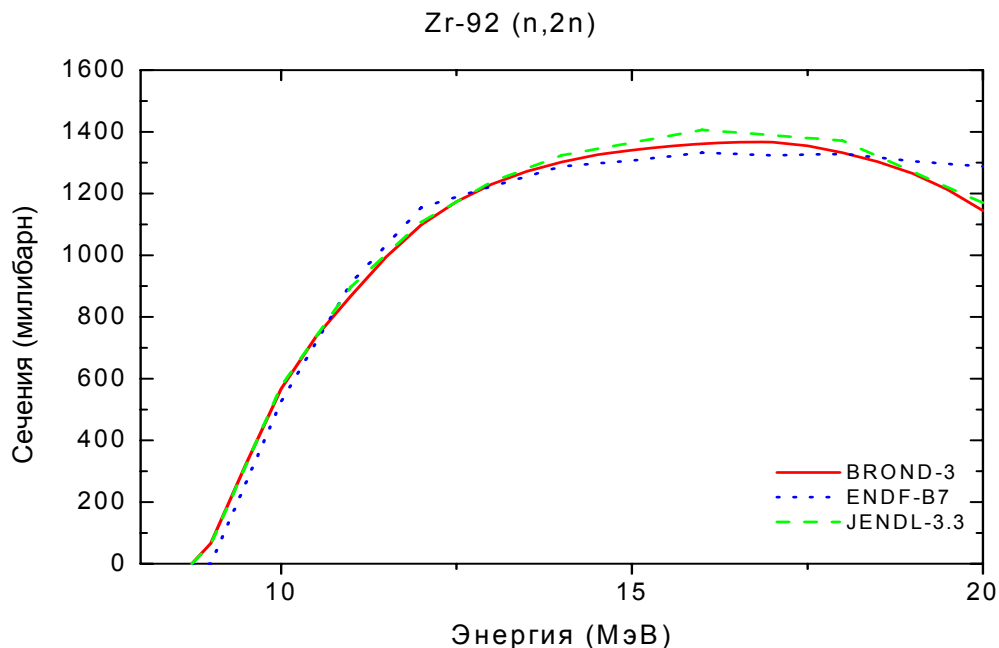


Рис. 10. Сечение реакции (n,2n).

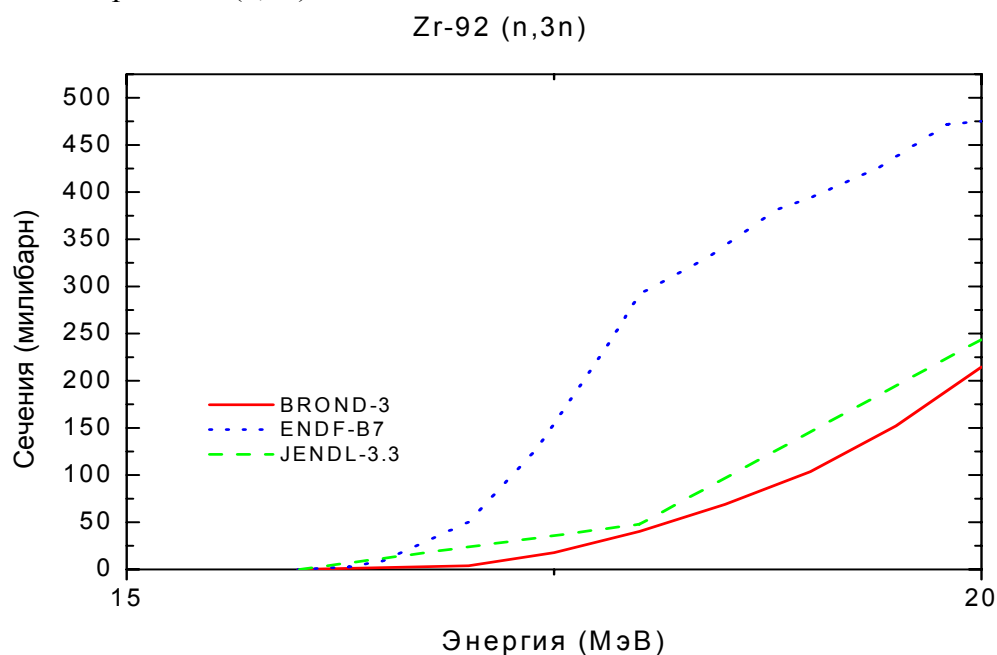


Рис. 11. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104,105 и 107):

На рис. 12 показано сечение реакции $^{92}\text{Zr}(n,p)$. Имеется достаточно много экспериментальных данных. Оценке функции возбуждения из БРОНД-3 следует отдать предпочтение, она лучше согласуется с систематикой сечений реакции (n,p) / ^{97}Ma /.

На рис. 13 дано сечение реакции $^{92}\text{Zr}(n,d)$. Оценки BROND-3 и JENDL-3.3 реакции (n,d), полученные расчетным путем, примерно равноценны. Оценка ENDF-BVII лежит очень низко. На рис.14 представлено сечение реакции $^{92}\text{Zr}(n,a)$. Рекомендуется оценка из БРОНД-3, поскольку она лучше согласуется с экспериментальными данными. Оценка сечения реакции (n,t) принята из JENDL-3.3

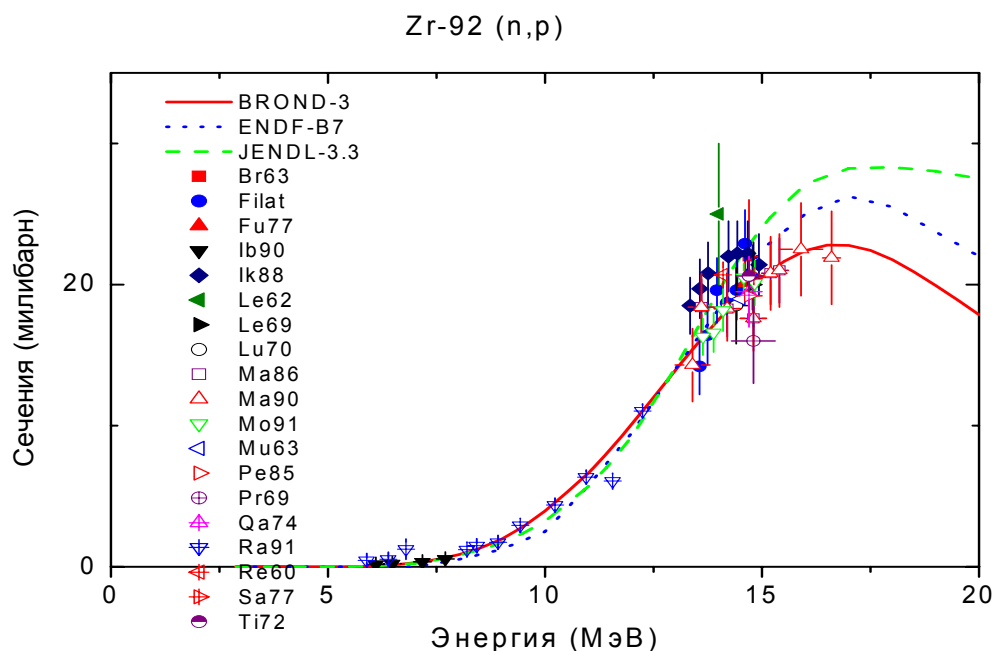


Рис. 12. Сечение реакции (n,p)

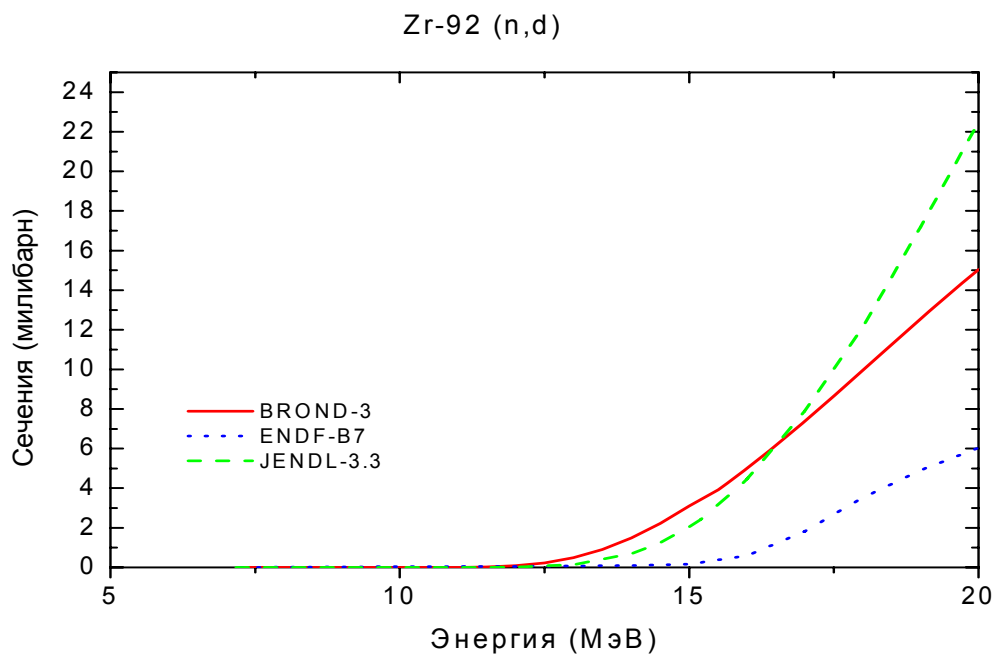


Рис.13. Сечение реакции (n,d).

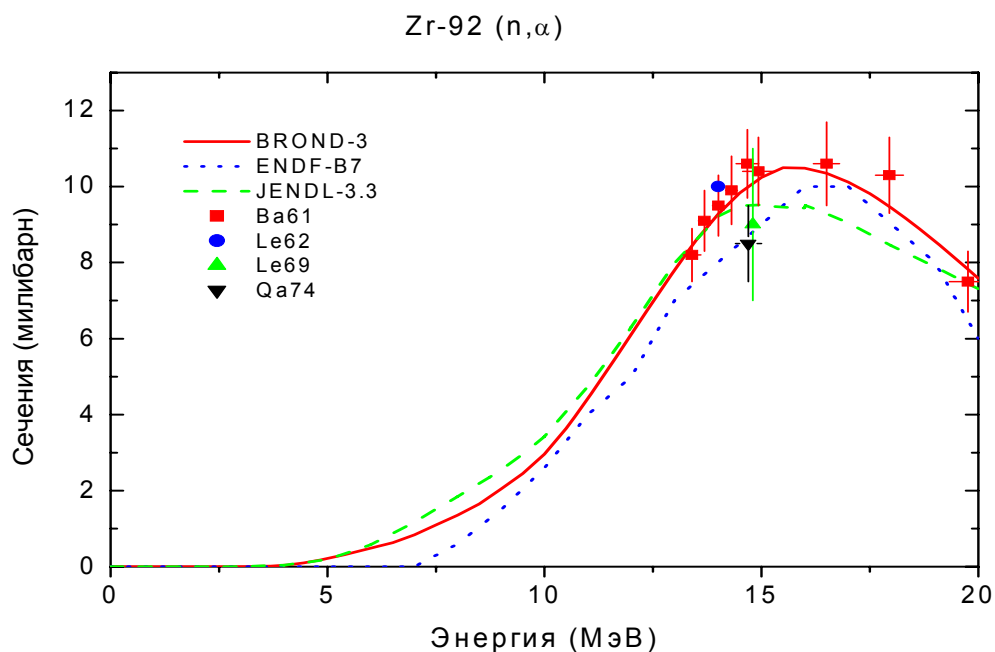


Рис. 14. Сечение реакции (n, α)

3.7. Реакции ($n, n\alpha$), (n, np) (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. Оценки реакций ($n, n\alpha$) и (n, np) в файле Zr-92 в БРОНД-3 основаны на расчетах по программе GNASH.

На рис. 15 дано сечение реакции $^{92}\text{Zr}(n, np)$. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 равноценны. На рисунке показана также оценка предыдущей версии ENDF-BVII, принятая до замены на данные JENDL-3.3. Она представляется ошибочной.

На рис.16 дано сечение реакции $^{92}\text{Zr}(n, n\alpha)$. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 равноценны. На рисунке показана также оценка предыдущей версии ENDF-BVII, принятая до замены на данные JENDL-3.3. Она резко не соответствует систематикам и явно ошибочна.

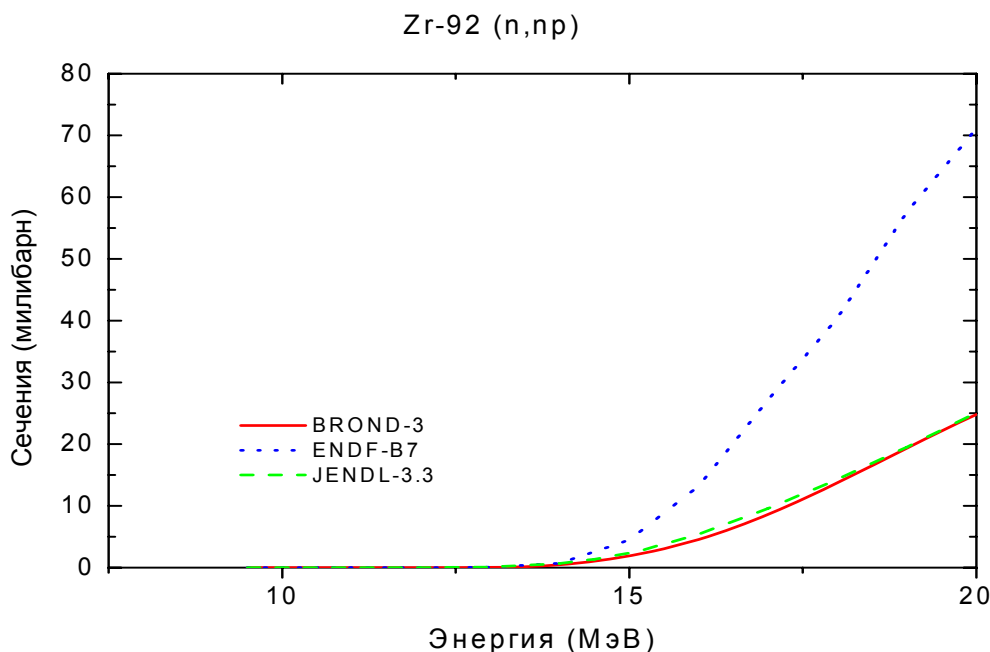


Рис. 15. Сечение реакции (n, np).

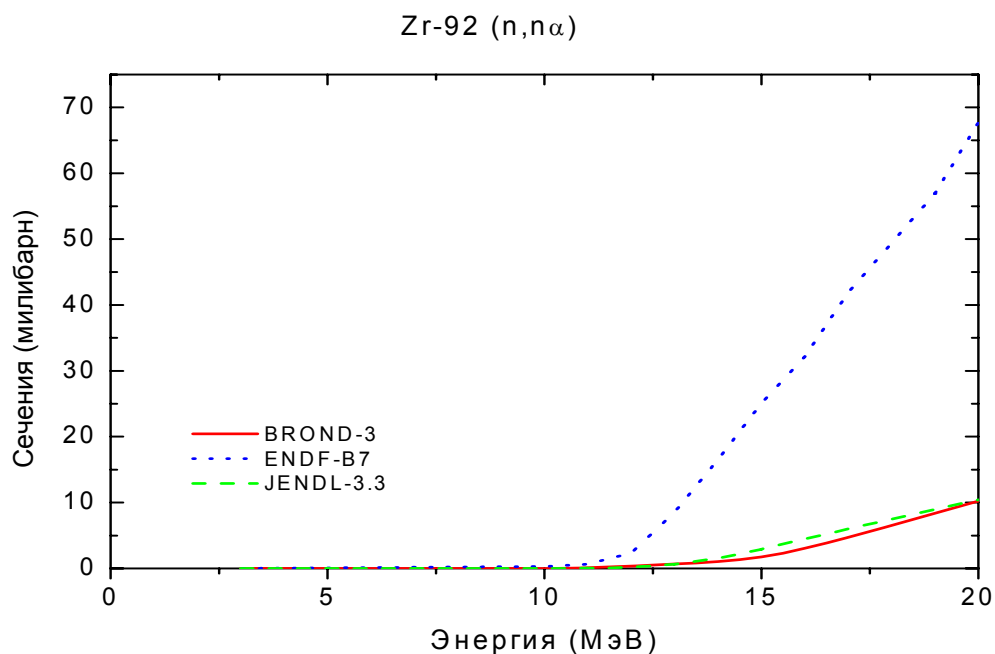


Рис. 16. Сечение реакции (n,n α).

MF=4. Угловые распределения вторичных нейтронов.

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/ 6/. На рис.17-18 показаны угловые распределения из библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 в сравнении с экспериментальными данными.

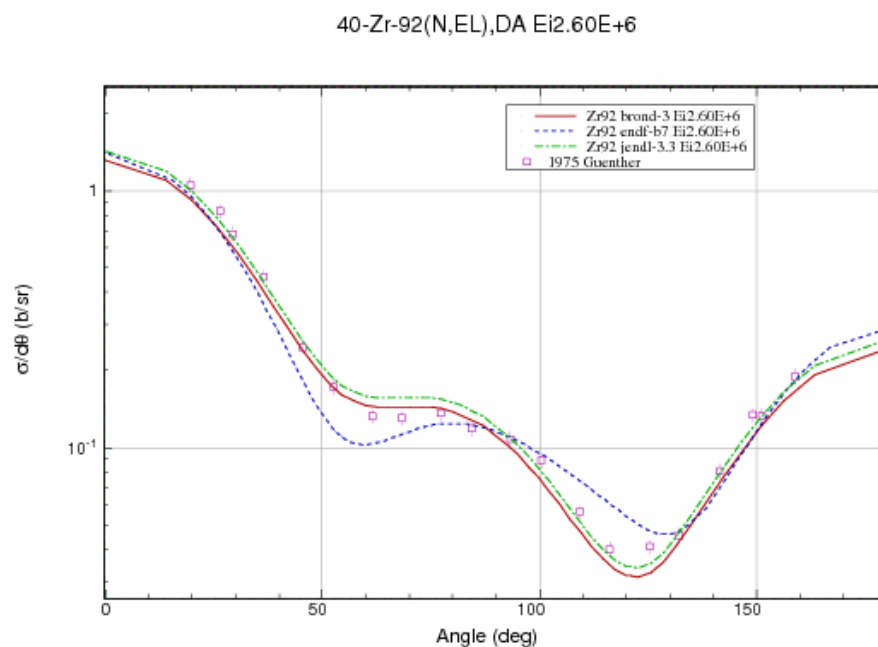


Рис. 17. Угловое распределение упруго рассеянных нейтронов с энергией 2.6 МэВ

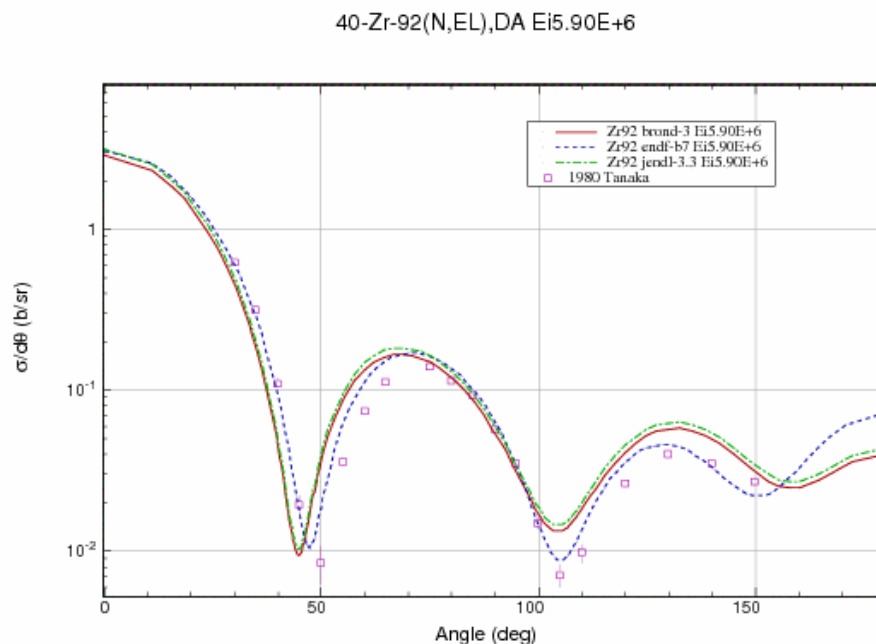


Рис. 18. Угловое распределение упруго рассеянных нейтронов с энергией 5.9 МэВ.

MT=51-70 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gasthy /91Ig/ и Dwuck.

MF=6 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

MT=16,17,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /90Ku/

MF=12 Множественность образования гамма-лучей

MT=16,17,22,28,51-70,102,103,107 рассчитаны по программе GNASH /96Yo/

MF=14 Угловые распределения гамма-лучей

MT=16,17,22,28, 51-70, 91, 102,103, 107 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

MF=15 Непрерывные спектры гамма-лучей

MT=16,17,22,28,91,103,107 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, рассчитаны по программе EGNASH /90Ya/.

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/91Ig/

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка БРОНД-3 является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых

экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить в РОСФОНД файл оцененных данных для Zr-92 из БРОНД-3.

Авторы отбора файла:

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

References

- 06M Mughabghab, S. Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY, 2006.
03M.. Mughabghab, S. Report INDC(NDS)-440, 2003.
01Ko Koning, A.J., Dalaroche, J.P. Contribution to 3_{rd} RCM of
RIPPLE-2, Vienna, 2001.
98Ri RIPPLE-2. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034,
Vienna, 1998.
97Ma Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear
Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
96Yo Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: In "Nuclear Reaction
Data and Nuclear Reactors" (Trieste, 1996). Eds. A. Gordini,
G. Reffo., World Science, Singapore, 1988, V.1, p.206.
95Fi Firestone, R.B. Table of Isotopes, Eight Edition, V.2,
New York, 1995.
94Av Avrigeanu, V., Hodgson, P., Avrigeanu, M. Phys.Rev.C49(1994)2136
91Ig Igarasi, S. and Fukahori, T.: JAERI 1321 (1991).
90Ku Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
90Ya Yamamuro, N.: JAERI-M 90-006 (1990).
88Di Dietrich, S.S., Berman, B.L. Atomic data and Nuclear data
Tables 38(1988)199.
86Ki Kikuchi, Y. et al.: JAERI-M 86-030 (1986).
81Mu Mughabghab, S.F. et al.: "Neutron Cross Sections, Vol. I,
Part A", Academic Press (1981).
80Ar Arthur E.D. Nucl.Sci.Eng. 76(1980)137.
78Br A.Brusegan et al. In: Nucl. Data for Reactors, Harwell, 1978, 706.
76Bo J.W.Boldeman et al., Nucl. Phys. V. A269, 31 (1976).
75Ho Hofman, H. et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
74Lo Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
70Ra Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8(1970), p.281.
69Ba Bartolome, Z.M. et al., Nucl. Sci. Eng., v. 37, 137 (1969).

40.6. Цирконий-93

1. Общие характеристики

1.1. $Z=40$

1.2. $A=93$

1.3. $A_w=92.10835$

1.4. Радиоактивен ($T_{1/2}=1.5 \cdot 10^6$ лет). Испытывает бета-распад в стабильный ^{93}Nb .

В реакторах образуется как продукт деления и в результате радиационного захвата нейтронов в цирконии-92.

1.5. Перечень нейтронных реакций:

MT	Реакция	Q, МэВ	Епор, МэВ	Ядро-продукт
51	(n,n')	-0.2669	0.2698	Zr-93
16	n,2n	-6.7342	6.8073	Zr-92
17	n,3n	-15.3689	15.5287	Zr-91
22	n,n α	-3.3341	3.3703	Sr-89
28	n,np	-9.5762	9.6802	Y-92
102	n, γ	8.2200		Zr-93
103	n,p	-2.0928	2.1155	Y-93
104	n,d	-7.6417	7.7246	Y-92
105	n,t	-7.6500	7.7323	Y-91
107	n, α	4.46910		Sr-90

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

2.4 Область разрешенных резонансов.

Параметры нейтронных резонансов были определены Маклином [85M, 86M] в диапазоне энергий до 30 кэВ. Однако, надежная идентификация угловых моментов имеется лишь для небольшого числа нижайших резонансов, вследствие чего границы области разрешенных резонансов сильно различаются в имеющихся оценках. В БРОНД-2 принята верхняя граница разрешенных резонансов 20 кэВ, и большинство резонансов с неизвестными орбитальными моментами были отнесены к s-волне, тогда как число оставшихся р-резонансов оказалось чрезвычайно низким. В JENDL-3.3 в файл включены практически все известные резонансы, но верхняя граница разрешенных резонансов 1.7 кэВ принята столь низкой, что в описании нейтронных сечений сохраняются лишь три первых s-резонанса. В JEEF-3.1 рассмотрение ограничивается лишь одним первым s-резонансом, тогда как в CENFL-3 для разрешенных и неразрешенных резонансов принята оценка JENDL-3.3. В недавней оценке ENDF/B-VII принята верхняя граница резонансов 6.8 кэВ, и угловые моменты резонансов распределены между s- и р-волнами в общем соответствии с ожидаемым статистическим распределением числа резонансов. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров во всех оценках используется приближение MLBW. Радиусы потенциального рассеяния приняты 6.8 ферми в БРОНД-2, 7.1 ферми в JEEF-3.1 и 7.2 ферми в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII.

Радиационные ширины резонансов, использованные в БРОНД-2, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, показаны на рис. 1. Ширины многих s- и р-резонансов отличаются весьма существенно, и столь же значительными являются различия числа резонансов, отнесенных к s- и р-волнам.

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

Оценка	БРОНД-2	JEFF-3.1	JENDL-3.3	ENDF/B-VII	Экспер.[06M]
полное	5.06	5.87	7.89	6.46	
упругое	4.43	4.09	5.65	5.76	
захвата	0.636	1.78	2.24	0.695	< 4
резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ:	15.3	32.96	18.2	18.4	17±5

Так как измерена только верхняя граница сечения захвата тепловых нейтронов, то разногласия в оценках тепловых сечений оказываются значительными, но для резонансного интеграла захвата оценки согласуются с экспериментом в пределах существующей погрешности (исключая JEFF-3.1).

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки БРОНД-2, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Очевидно, что в БРОНД-2 многие p-резонансы неоправданно отнесены к s-резонансам. Линейной аппроксимации нарастающей суммы s-резонансов в JENDL-3.3 соответствует среднее расстояние между резонансами $D_0=270$ эВ и для p-резонансов – $D_1=222$ эВ. Отношение D_0/D_1 при этом сильно отличается от статистической оценки отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, что свидетельствует о больших погрешностях идентификации угловых моментов резонансов. Более достоверным с этой точки зрения представляется разделение s- и p-резонансов в ENDF/B-VII.

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 представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов ENDF/B-VII в диапазоне энергий до 6.8 кэВ пропущено от 7-9 резонансов и в наборе p-резонансов пропущено около 14 резонансов. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, соответственно равны $D_0=(300 \pm 40)$ эВ и $D_1=(130 \pm 10)$ эВ. Отношение $D_0/D_1=2.31 \pm 0.35$ не отличается сильно от статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов. Для нейтронных силовых функций с учетом пропуска резонансов получены значения $S_0=(.40 \pm .10) 10^{-4}$ и $S_0=(9.8 \pm 1.5) 10^{-4}$, которые согласуются с анализом кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин (рис. 2). В аналогичном анализе, представленном в последнем издании атласа нейтронных резонансов [06M], были получены значения средних расстояний между резонансами $D_0=(302 \pm 75)$ эВ и $D_1=(149 \pm 15)$ эВ и нейтронных силовых функций $S_0=(.43 \pm .18) 10^{-4}$ и $S_0=(11.4 \pm 2.0) 10^{-4}$, которые отличаются от результатов настоящего анализа, главным образом, несколько большими значениями погрешностей.

На рис. 4 и 5 оценки показано сравнение оценок БРОНД-2, JENDL-3.3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII для полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов. приведены в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Так как все оценки основаны на единственном имеющемся наборе резонансных параметров [85M, 86M], то разногласия между ними обусловлены лишь выбором границ резонансной области. Согласно проведенному выше анализу, верхнюю границу разрешенных резонансов, принятую в ENDF/B-VII, следует признать оптимальной при имеющихся неопределенностях идентификации угловых моментов резонансов, и она была включена без изменений в новую оценку БРОНД-3.

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в JEFF-3.1 принята равной 50 кэВ, и в рассмотрение включены независимые от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В БРОНД-2 принята верхняя граница 160 кэВ и зависящие от энергии средние параметры резонансов. В JENDL-3.3 использован аналогичный подход, но принята более низкая верхняя граница - 100 кэВ. В ENDF/B-VII, также как в CENDL-3, для неразрешенных резонансов принята оценка JENDL-3.3 без каких-либо изменений. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений во всех оценках использована одноуровневая формула Брейта-Вигнера.

Нейтронные силовые функции S_0 , S_1 , S_2 и радиусы потенциального рассеяния во всех оценках были выбраны на основе расчетов по оптической модели, средние радиационные ширины приняты в соответствии с результатами анализа разрешенных резонансов и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов [86M]. Для энергии нейтронов 50 кэВ приняты следующие значения параметров:

Оценка	R_s фм	D_0 эВ	S_0 10^{-4}	S_1 10^{-4}	S_2 10^{-4}	$\Gamma_\gamma(s\&d)$ мэВ	$\Gamma_\gamma(p)$ мэВ
JEFF-3.1	7.100	317.0	.750	4.60	.750	179	216
БРОНД-2	6.720	313.1	.440	4.45	1.10	90.3	196
JENDL-3.3	6.734	376.6	.370	5.48	.360	200	200

Различия в выборе радиационных ширин и значений D_0 в значительной степени компенсируются при подгонке расчетных сечений к одним и тем же экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов [85M]. В то же время, различия в нейтронных силовых функциях непосредственно проявляется в полных нейтронных сечениях.

На рис. 4 и 5 показано сравнение оценок полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов. Все оценки в пределах погрешности описывают имеющиеся экспериментальные данные по радиационному захвату нейтронов [85M]. Разногласия между оценками также невелики для полных нейтронных сечений, исключая, возможно, JEFF-3.1, которая кажется несколько завышенной. Однако при отсутствии экспериментальных данных по полным нейтронным сечениям трудно обосновать предпочтение какой-либо из имеющихся оценок.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что оптимальный выбор верхней границы разрешенных резонансов сделан в ENDF/B-VII. Полученные при этом средние параметры резонансов с учетом погрешностей не расходятся существенно с параметрами, принятыми в JENDL-3.3 для области неразрешенных резонансов. Поэтому оценку ENDF/B-VII, включающую JENDL-3.3 для неразрешенных резонансов, можно рассматривать как оптимальное описание имеющейся совокупности экспериментальных данных во всей резонансной области, и она принята без изменений в новую оценку БРОНД-3.

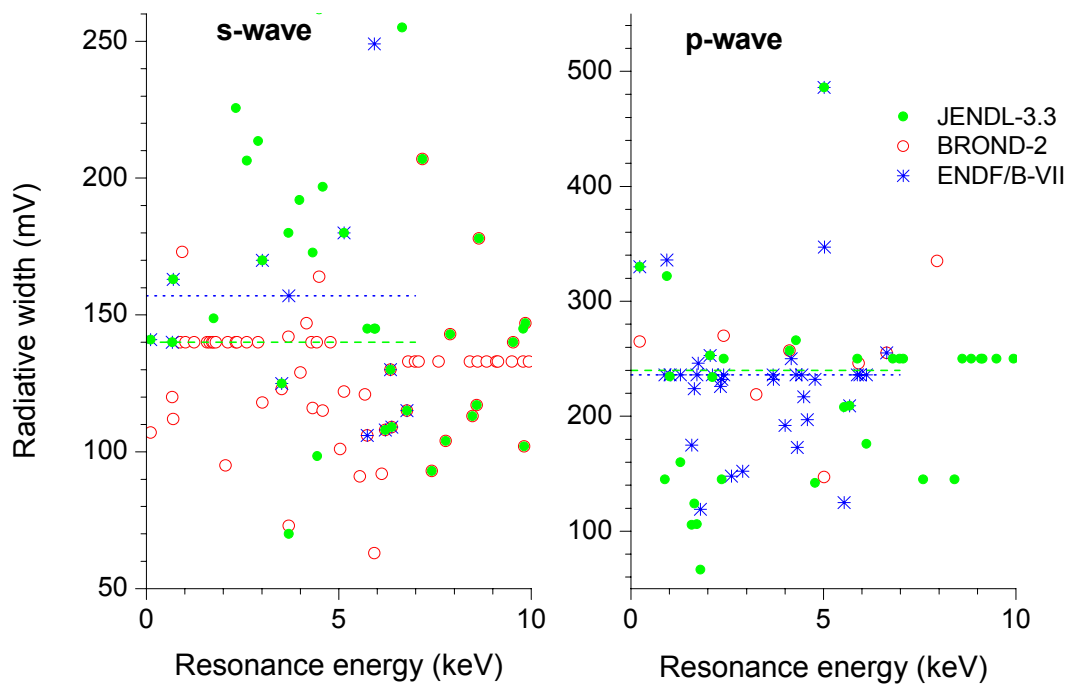


Рис. 1. Нейтронные ширины разрешенных резонансов в различных оценках, пунктиром показаны принятые средние значения ширины

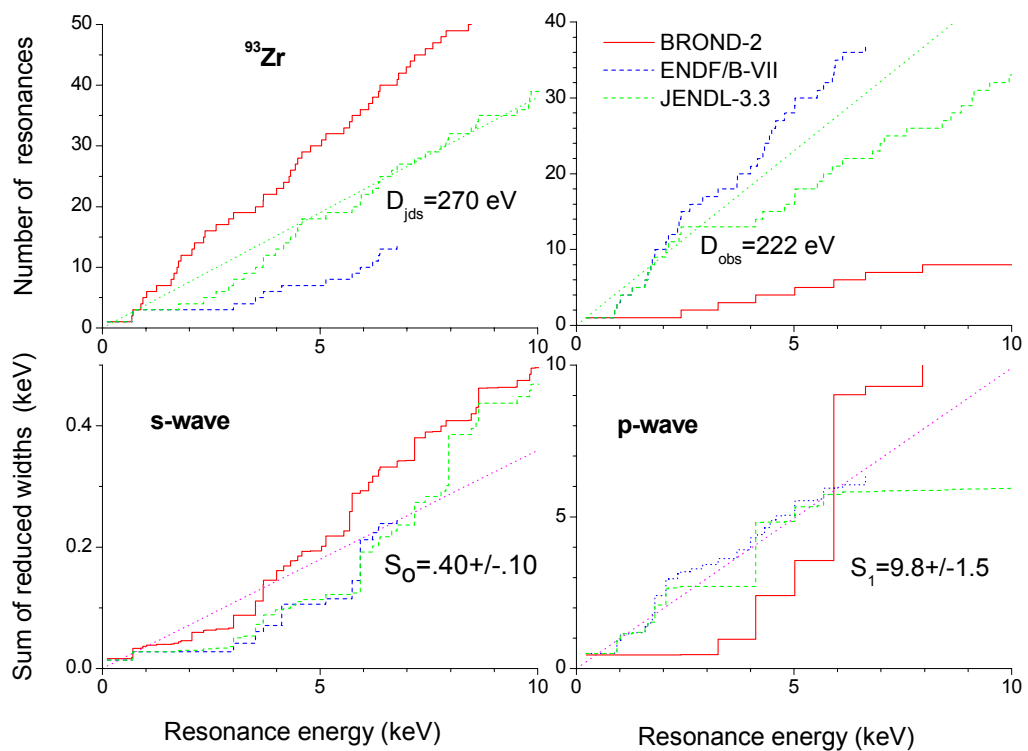


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширины в оценках БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII

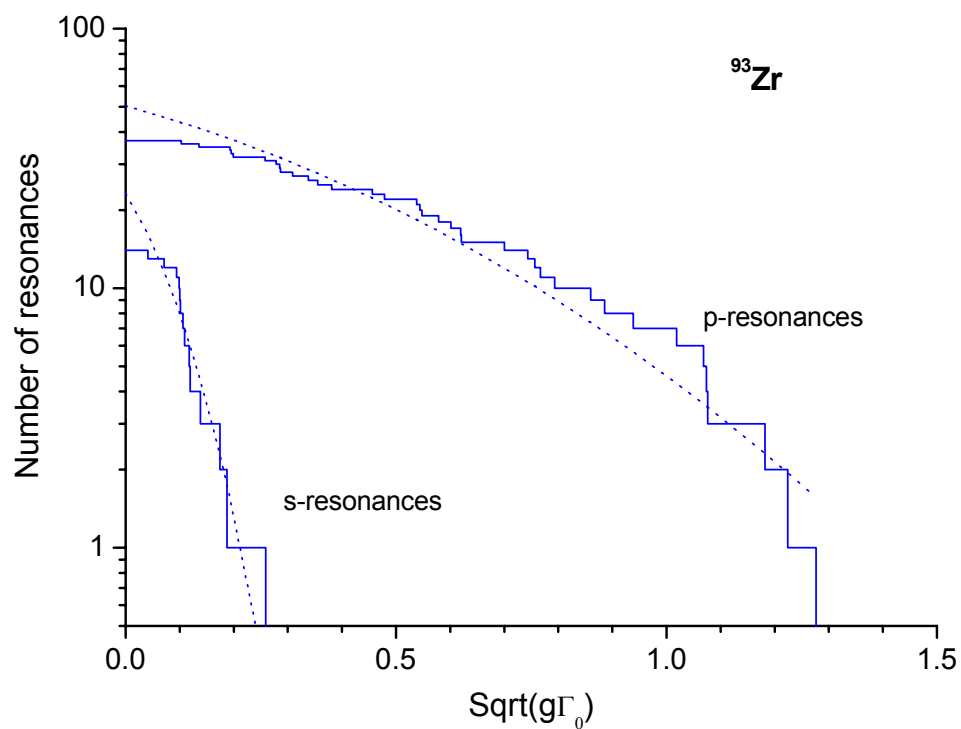


Рис. 3. Анализ пропуска s- и p-резонансов в наборе ENDF/B-VII. Пунктиром показаны теоретически ожидаемые распределения.

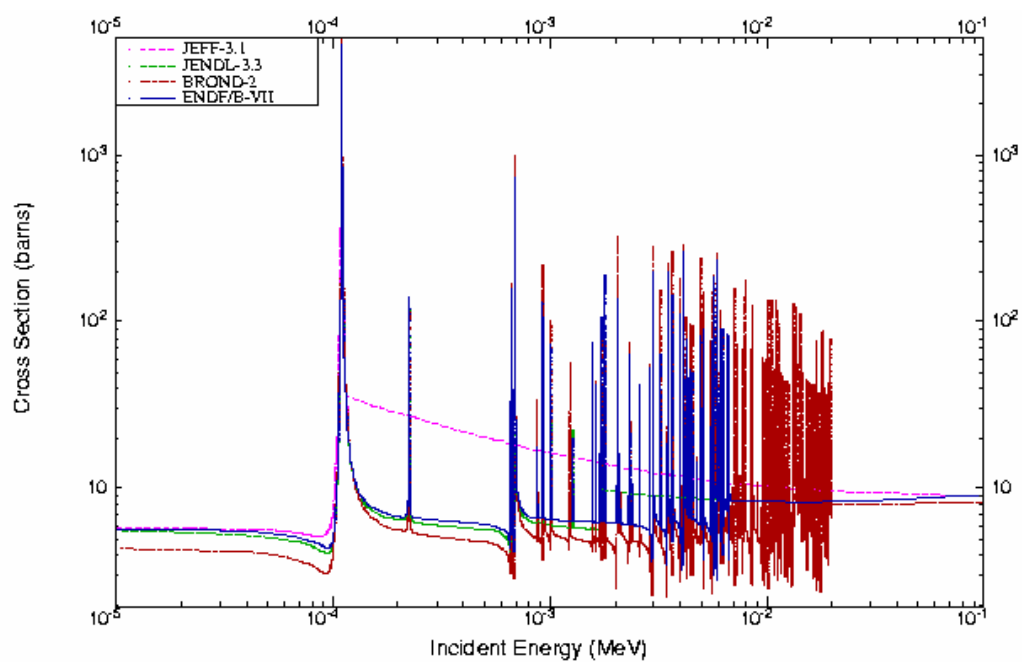


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов

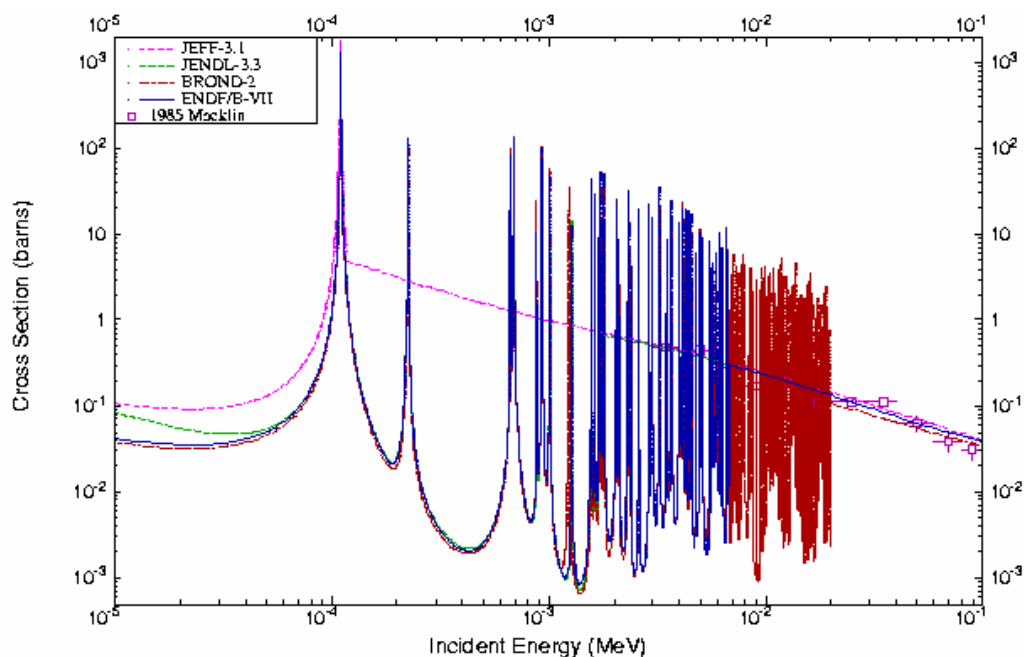


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области.

В данном разделе проведено сравнение оцененных данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII, и JENDL-3.3 вне резонансной области (0.01-20 МэВ). Сравнение с данными библиотеки JEFF-3.1 не проводилось. Для изотопов циркония в эту библиотеку приняты данные библиотеки JEFF-3.0, которые в свою очередь приняты из JEF2.2 (1992). Ниже дано сравнение данных ENDF/B-VII и JENDL-3.3 с оценкой БРОНД-3 совместно с кратким описанием оценки БРОНД-3. Это связано с тем, что авторы оценки БРОНД-3 по сравнению с оценками других авторов применили дополнительные эмпирические систематики и более корректные теоретические расчеты. Оценка всех сечений изотопов циркония выполнена в едином согласованном подходе. В частности, был оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния, использовались систематические тенденции в поведении функций возбуждения пороговых реакций в зависимости массового числа, применена несферическая оптическая модель.

Нейтронные сечения в диапазоне 0.01 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью модифицированной программы GNASH /96Yo/ с учетом флуктуации нейтронных ширин. Для нейтронов была использована модель сильной связи каналов (программа ECIS /91Ig/) с учетом прямого возбуждения коллективных низколежащих уровней, соответствующих мультиплетам $(3/2+\otimes 2+)$ и $(3/2+\otimes 3-)$.

Оптические параметры для нейтронов:

Глубина потенциала (МэВ)	Диапазон энергии (МэВ)	Геометрия(фм)
$V_r=49.0-0.28E$	$0<E<20$	$R_r=1.24 \quad a=0.62$
$W_d=2.38+0.21E$	$0<E<10$	$R_d=1.26 \quad a=0.58$
$W_d=5.39-0.091E$	$10<E<20$	
$W_v=0.0$	$0<E<10.9$	
$W_v=-0.0994+0.091E$	$0.9<E<20$	$R_v=1.24 \quad a=0.62$
$V_{so}=6.2$	$0<E<20$	$R_{so}=1.12 \quad a=0.47$

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /01Ko/, /74Lo/ и /94Av/, соответственно.

Гамма-переходы рассчитывались для E1, M2 и E2 -силовых функций. Параметры гигантского резонанса E1 были взяты из работы /88Di/. Полная силовая функция была нормализована к имеющимся экспериментальным данным по радиационной ширине и D0 для нейтронного резонанса. Параметры дискретных уровней взяты из работы /95Fi/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 6 дано полное сечение Zr-93 вне резонансной области энергий нейтронов.

В области до 5 МэВ оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 практически совпадают. Выше оценка БРОНД-3 лежит ниже, но экспериментальных данных во всей области 1-20 МэВ нет, оцененные данные получены с помощью разных параметров оптического потенциала, поэтому трудно отдать предпочтение какой-либо из упомянутых оценок.

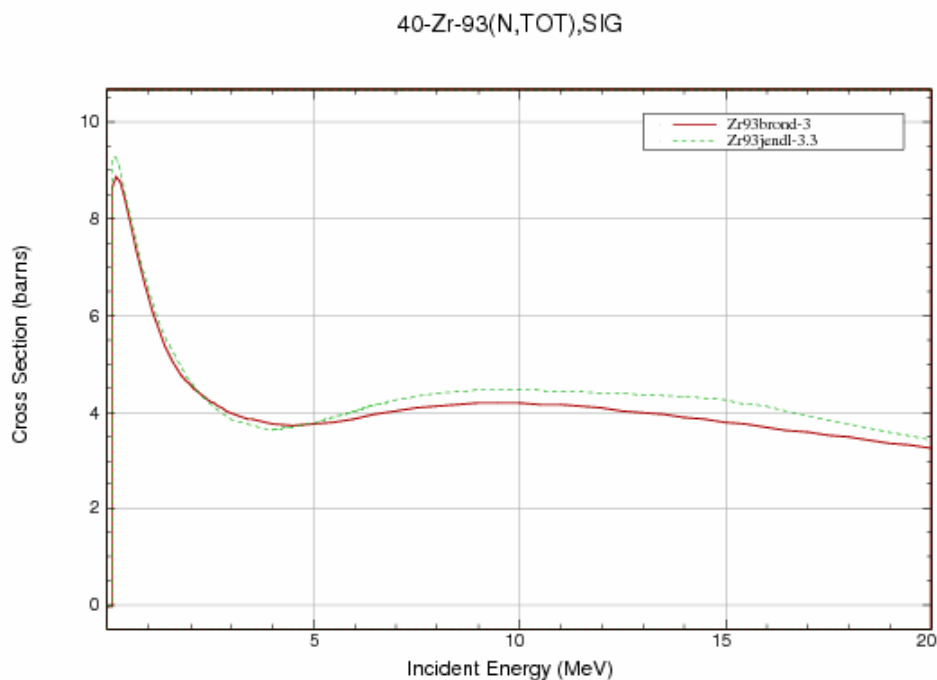


Рис. 6. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 7 показано сравнение оценок упругого рассеяния на изотопе Zr-93 библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3. Как видно, сечение упругого рассеяния в всей области энергий до 20 МэВ существенно различаются. Экспериментальных данных нет.

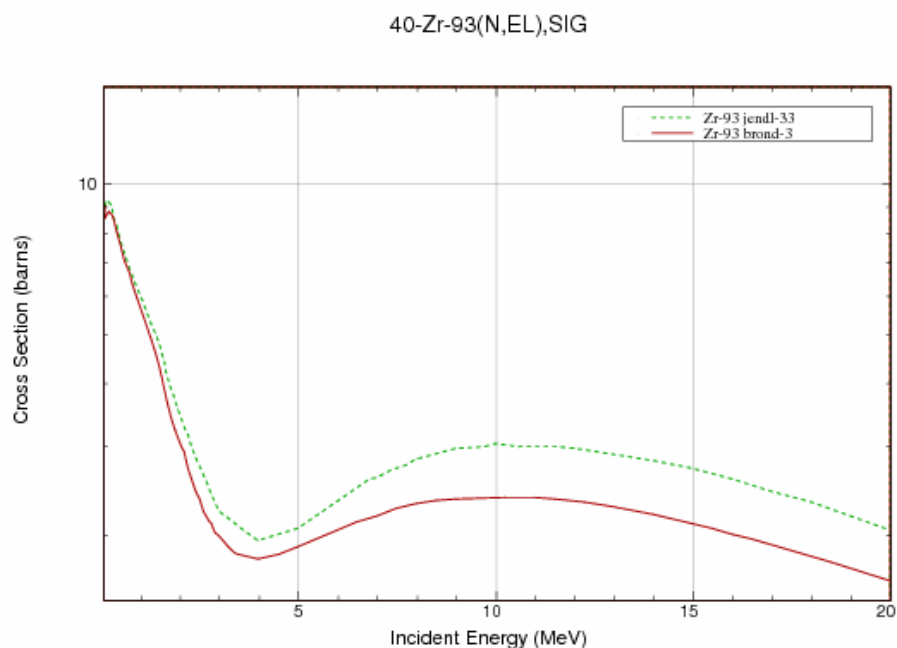


Рис.7. Сечение упругого рассеяния в области 0.01-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-71).

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

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 2.200 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

	Энергия уровня, МэВ	Спин	Переход	Энергия гамма- кванта, МэВ	Вероятность перехода, %
0	0.00000				
1	0.26690	3/2+	1 → 0	0.26690	100
2	0.94710	1/2+	2 → 0 2 → 1	0.94710 0.68020	76.1 23.9
3	1.01800	1/2+	3 → 0 3 → 1	1.01800 0.75110	80 20
4	1.16860	1/2+	4 → 0	1.16860	100
5	1.22200	1/2+	5 → 0 5 → 1	1.22200 0.95510	80 20
6	1.42540	3/2+	6 → 0 6 → 1	1.42540 1.15850	89.05 10.95
7	1.45040	1/2+	7 → 0 7 → 1	1.45051 1.18350	87.2 12.8
8	1.46300	7/2+	8 → 0 8 → 1 8 → 2	1.46300 1.19610 0.51590	20.0 30.0 50.0
9	1.47010	1/2+	9 → 0 9 → 1	1.47010 1.2033	37.9 62.1
10	1.59800	7/2+	10 → 0 10 → 1	1.598000 1.33110	20.0 40.0

			10 → 2		40.0
11	1.64200	1/2+	11 → 0 11 → 1	1.64200 0.65090	40.0 60.0
12	1.73500	5/2+	12 → 0 12 → 1	1.73500 1.46810	50.0 50.0
13	1.90960	1/2+	13 → 1 13 → 2	1.64271 0.96232	81.3 18.7
14	1.91860	1/2+	14 → 1 14 → 2	1.65172 0.97100	77.5 22.5
15	2.02588	9/2-	15 → 1 15 → 9	2.02500 0.55490	30.0 70.0
16	2.04000	7/2+	16 → 2 16 → 7	1.09290 0.58960	30.0 70.0
17	2.04700	9/2+	17 → 0 17 → 2 17 → 6	2.04700 1.09990 0.6216	10.0 20.0 70.0
18	2.07500	9/2+	18 → 0 18 → 2 18 → 8	2.07500 1.12790 0.62200	20.0 20.0 60.0
19	2.07800	7/2+	19 → 0 19 → 1 19 → 9	2.07800 1.81110 0.60790	10.0 50.0 40.0
20	2.09470	1/2+	20 → 1	1.82780	100
21	2.18460	1/2+	21 → 0 21 → 1 21 → 2 21 → 9	2.18460 1.91780 1.23740 0.71440	8.9 88.4 1.7 1.0
22	2.20000				

Экспериментальных данных по интегральному сечению неупругого рассеяния нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII рассчитаны на основе сферической оптической моделей ядерных реакций и практически совпадают. Данные BROND-3 лежат существенно выше, что объясняется использованием другой программы для расчета (модифицированной программы GNASH) и параметров несферической оптической модели. Учитывая более корректный подход в расчетах по программе GNASH интегральное сечение неупругого рассеяния из библиотеки BROND-3 предпочтительнее. Оценка BROND-3 согласована с более приемлемой функцией возбуждения реакции (n,2n)(см. рис. 12) и с величиной вклада прямых процессов при энергии 20 МэВ (200-300 мб). На рисунке приведена также зависимость сечения из CENDL-3, которая существенно лучше согласуется с оценкой БРОНД-3.

На рис. 8-10 показаны функции возбуждения неупругого рассеяния на первых двух уровнях, экспериментальных данных нет.

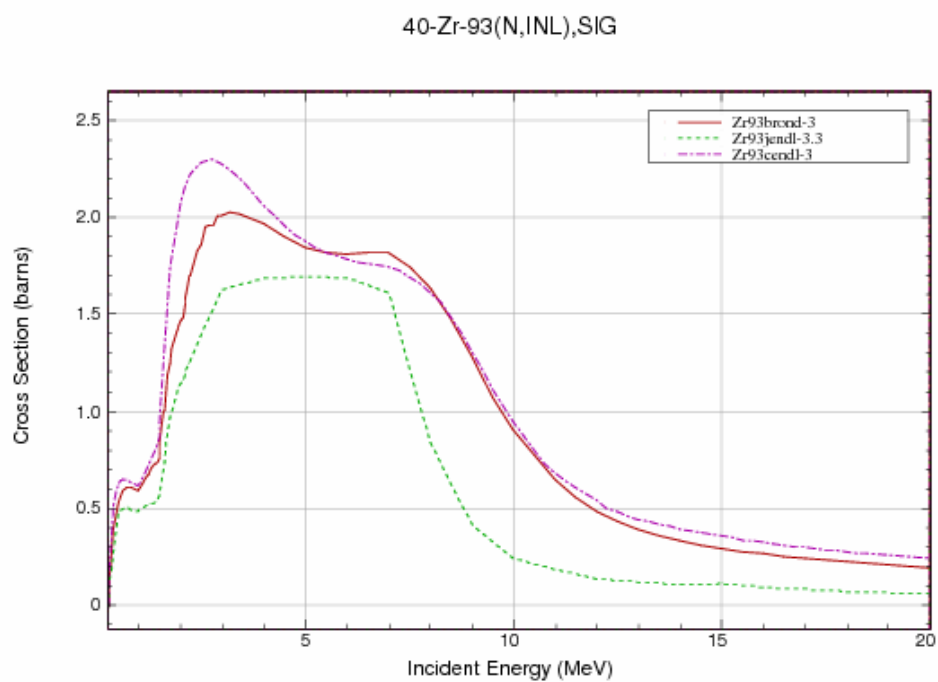


Рис.8. Интегральное сечение неупругого рассеяния Zr-93.

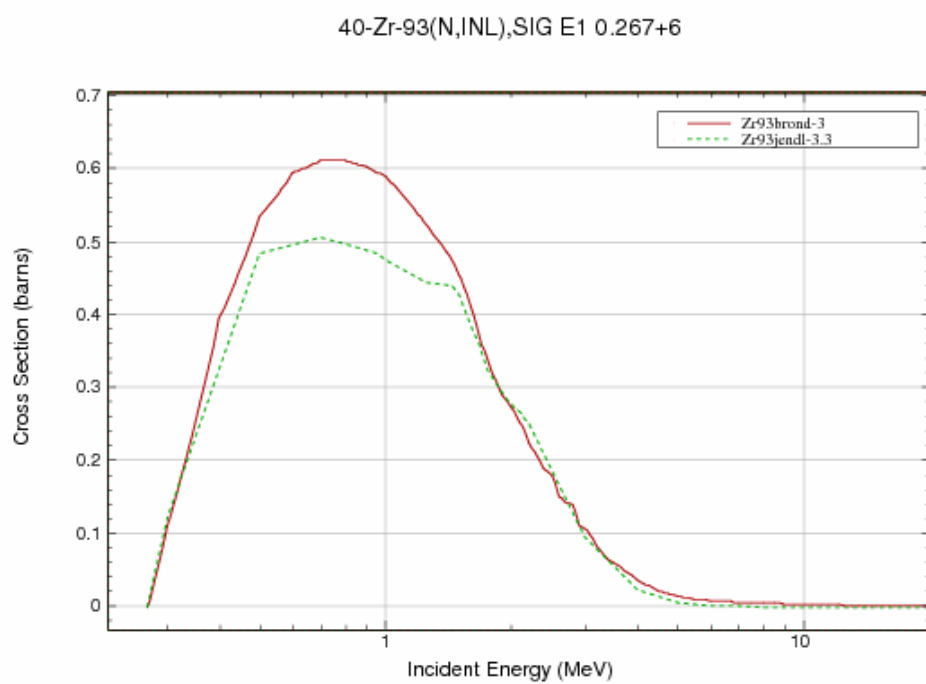


Рис.9. Функция возбуждения первого уровня с энергией 0.2670 МэВ.

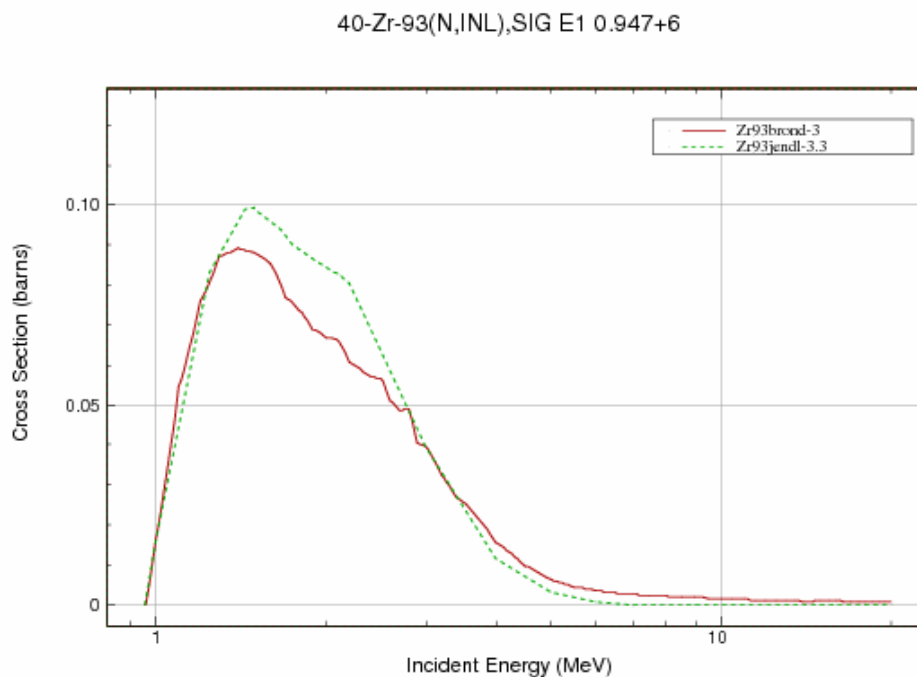


Рис.10. Функция возбуждения второго уровня с энергией 0.9471 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.1-20 МэВ сечение радиационного захвата в файле Zr-93 библиотеки БРОНД-3 рассчитано с учетом полупрямого механизма в области гигантского резонанса. Расчеты согласованы с экспериментальными данными работы /4/. Во всей области выше 0.01 МэВ данные BROND-3 и JENDL-3.3 близки, однако в оценке JENDL-3.3 при энергии 6-9 МэВ в сечении имеется необъяснимый провал, поэтому рекомендуется сечение BROND-3.

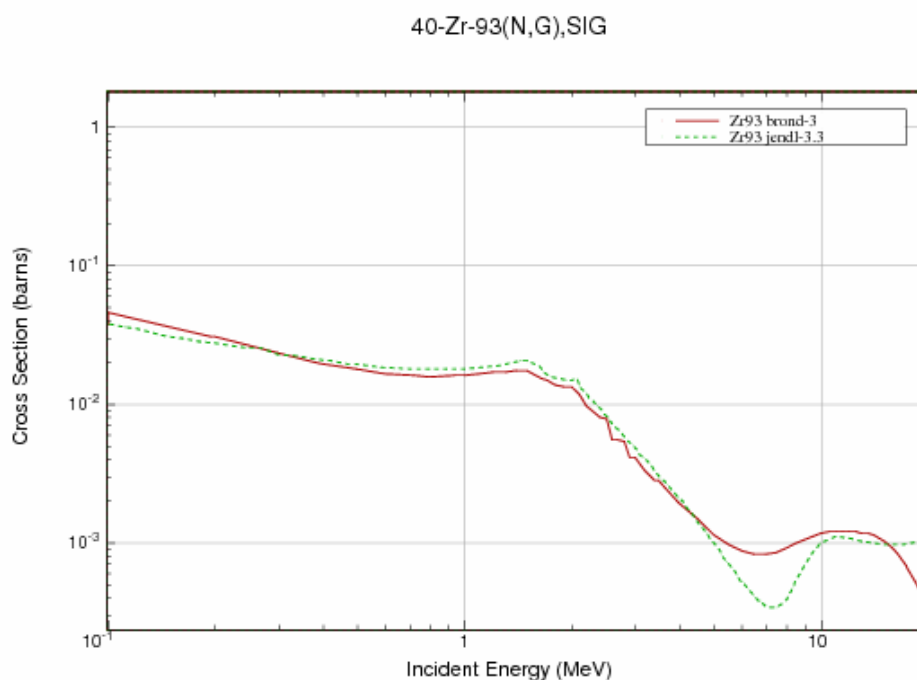


Рис. 11. Сечение радиационного захвата в области 0.1-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

На рис. 12 представлено сечение реакции (n,2n) библиотек JENDL-3.3 и BROND-3. Оценка JENDL-3.3 существенно не согласуется по форме зависимости с эмпирической систематикой функций возбуждения указанной реакции [97Ma]. Рекомендуется оценка БРОНД-3, согласованная с систематикой и с другими рекомендованными сечениями также из БРОНД-3. Сечение реакции (n,3n) (рис. 13) в библиотеке JENDL-3.3 неоправданно завышено. Следует принять сечение из БРОНД-3.

Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6 и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

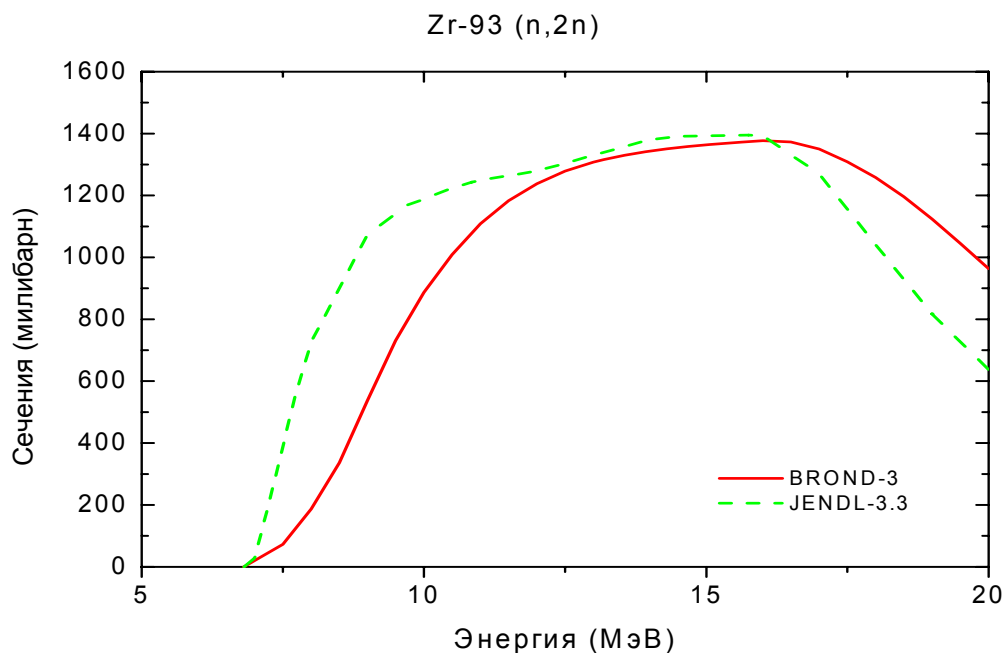


Рис. 12. Сечение реакции (n,2n).

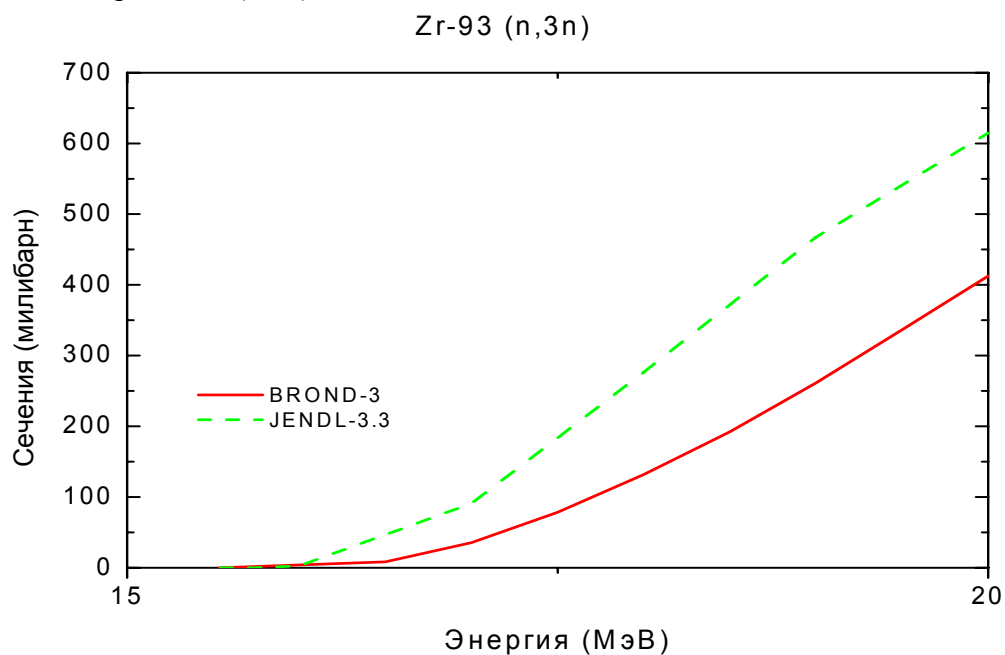


Рис. 13. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104, 105 и 107):

На рис. 14 показано сечение реакции $^{92}\text{Zr}(n,p)$. Экспериментальных данных нет. Оцененные данные библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII примерно равноценны.

На рис. 15 дано сечение реакции $^{93}\text{Zr}(n,d)$. Оценка БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лучше соответствует эмпирической тенденции поведения этой реакции.

Сечение реакции $^{93}\text{Zr}(n,t)$ библиотеках BROND-3 и ENDF/B-VII принято из JENDL-3.3.

На рис.16 представлено сечение реакции $^{93}\text{Zr}(n,\alpha)$. Рекомендуется оценка из БРОНД-3, поскольку она лучше согласуется с эмпирическими систематиками.

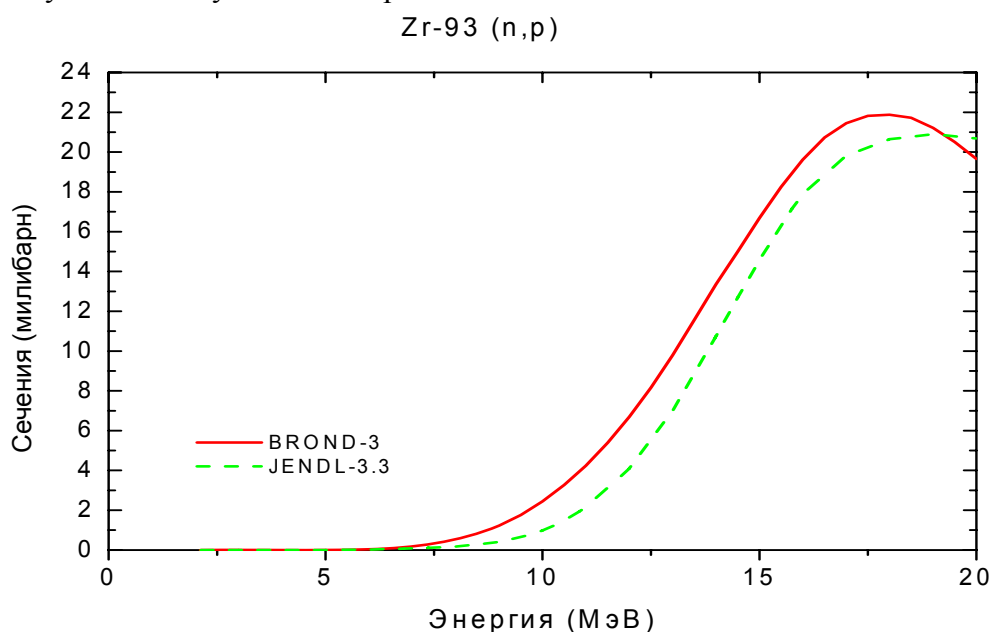


Рис. 14. Сечение реакции (n,p)

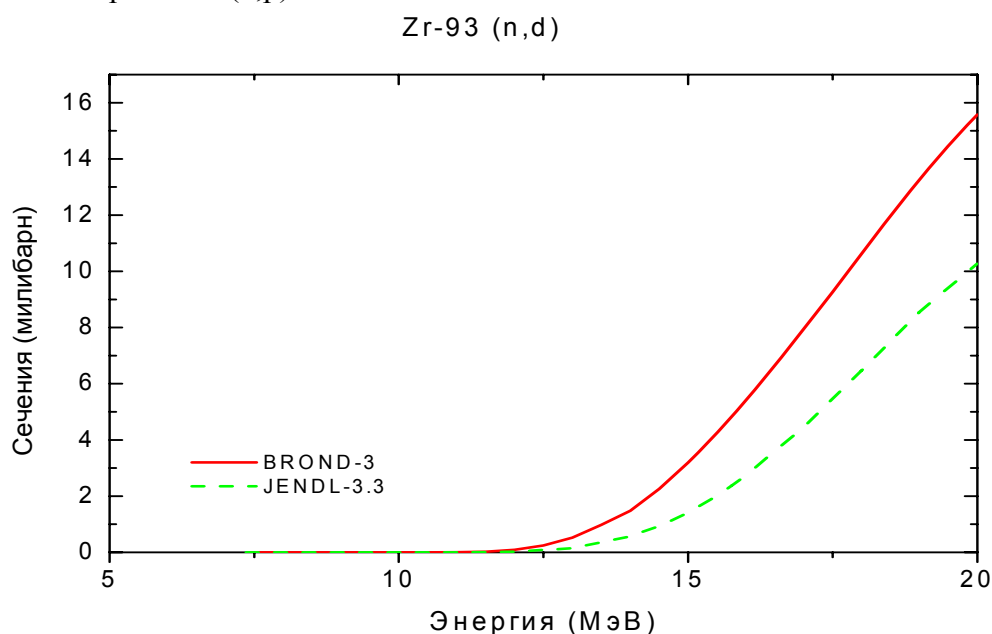


Рис.15. Сечение реакции (n,d).

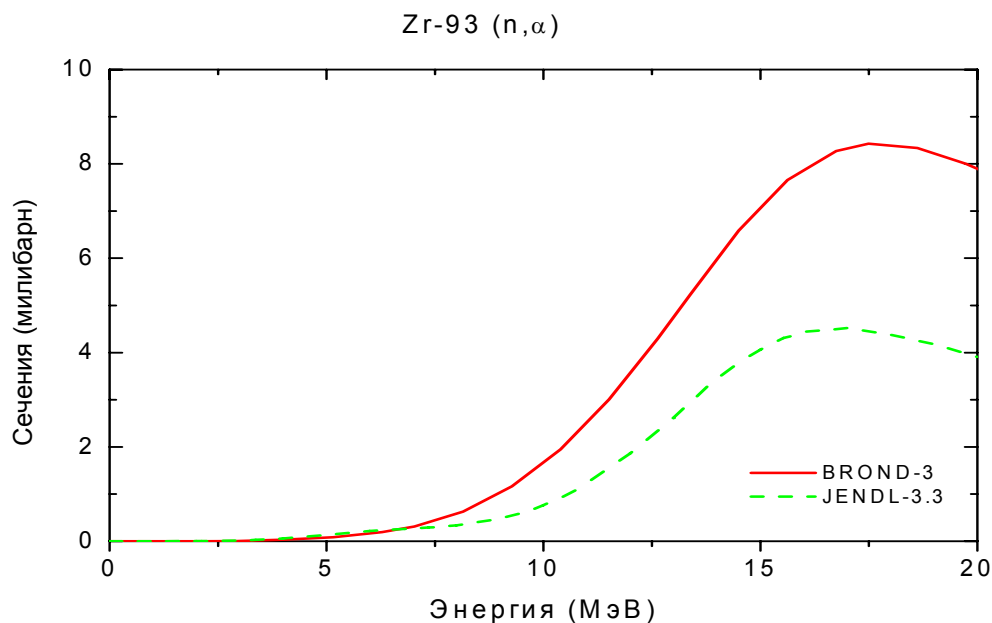


Рис. 16. Сечение реакции (n,α)

3.7. Реакции (n,nα), (n,np) (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. Оценки реакций (n,nα) и (n,np) в файле Zr-93НД-3 основаны на расчетах по программе GNASH. Разногласия оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

На рис. 17 дано сечение реакции $^{93}\text{Zr}(n,p)$. Оцененные данные библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 примерно равноценны. На рис.18 дано сечение реакции $^{93}\text{Zr}(n,n\alpha)$. Рекомендуется функция возбуждения из библиотеки БРОНД-3, так как она согласуется с сечением реакции (n,α) и с систематикой реакции (n,nα).

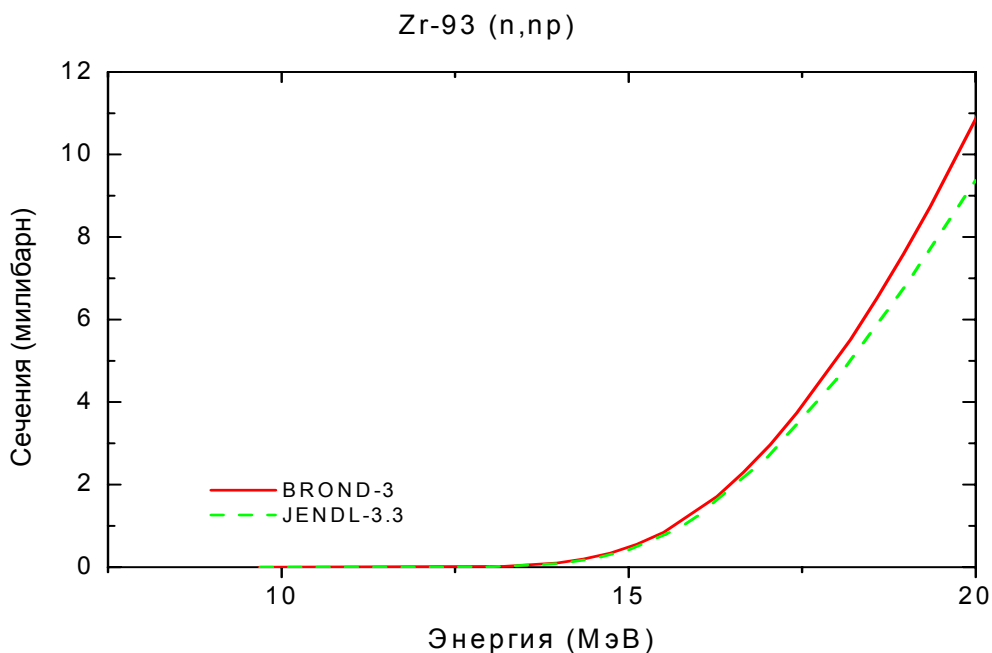


Рис. 17. Сечение реакции (n,np).

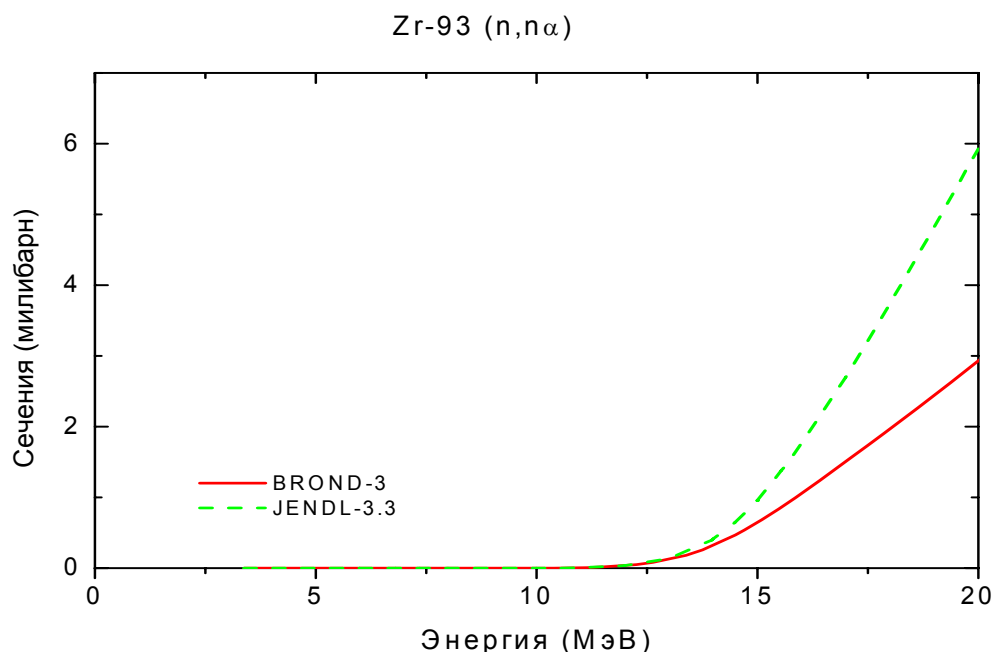


Рис. 18. Сечение реакции (n,nα).

MF=4. Угловые распределения вторичных нейтронов.

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/91Ig/.

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gasthy /91Ig/ и Dwuck.

MF=5 Энергетические распределения вторичных нейтронов

MT=16,17,22, 28,91 Энергетические распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3.

Они основаны на систематике работы /90Ku/

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка БРОНД-3 является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить в РОСФОНД файл оцененных данных для Zr-93 из БРОНД-3.

Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

References

06Mu Mughabghab S.F.: Atlas of Neutron Resonances, Academic Press, NY,

- 2006 (5-th edition of BNL-325).
- 01Ko Koning,A.J., Dalaroche,J.P. Contribution to 3_{th} RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
- 98Ri RIPPLE-2. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
- 97Ma Manokhin,V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin,V.N., Blokhin,A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
- 96Yo Young,P.G., Arthur,E.D., Chadwick,M.B.: In "Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors" (Triest,1996). Eds. A.Gordini, G.Reffo., World Science, Singapore, 1988,V.1,p.206.
- 95Fi Firestone,R.B. Table of Isotopes, Eight Edition,V.2, New York,1995.
- 94Av Avrigeanu,V., Hodgson,P., Avrigeanu,M. Phys.Rev.C49(1994)2136
- 91Ig Igarasi, S. and Fukahori, T.: JAERI 1321 (1991).
- 90Ku Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
- 90Ya Yamamuro, N.: JAERI-M 90-006 (1990).
- 88Di Dietrich,S.S., Berman,B.L. Atomic data and Nuclear data Tables 38(1988)199.
- 86Ki Kikuchi, Y. et al.: JAERI-M 86-030 (1986).
- 86Ma Macklin, R.L. et al.: Nucl. Sci. Eng., 92, 525 (1986).
- 85Ma Macklin, R.L. : Astrophys. Space Sci., 115, 71 (1985).
- 81Mu Mughabghab, S.F. et al.: "Neutron Cross Sections, Vol. I, Part A", Academic Press (1981).
- 80Ar Arthur E.D. Nucl.Sci.Eng. 76(1980)137.
- 75Ho Hofman, H. et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
- 74Lo Lohr, J.M. and Haeberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
- 70Ra Raynal,J.: Report IAEA SMR-9/8(1970),p.281.
- 68Bo Bollinger, L.M. and Thomas, G.E.:Phys. Rev., 171,1293(1968).

40.7. Цирконий-94

1. Общие характеристики

1.1. $Z=40$

1.2. $A=94$

1.3. $A_w=93.09961$

1.4. Содержание в естественной смеси: 17.38

1.5. Перечень нейтронных реакций:

MT	Реакция	Q, МэВ	Епор, МэВ	Ядро-продукт
51	(n,n')	-0.9187	0.9286	Zr-94
16	n,2n	-8.2195	8.3078	Zr-93,
17	n,3n	-14.9542	15.1097	Zr-92
22	n,n α	-3.7504	3.7907	Sr-90
28	n,np	-10.3123	10.4230	Y-93
102	n, γ	6.4630		Zr-94
103	n,p	-4.1380	4.1824	Y-94
104	n,d	-8.0877	8.1746	Y-93
105	n,t	-9.3300	9.4293	Y-92
107	n, α	2.0302		Sr-91

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

2.5 Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках БРОНД-2 и JENDL-3.3 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мухабхабом и др. [81M] на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию и радиационному захвату нейтронов [69B, 76B]. Верхняя граница резонансной области принята равной 30 кэВ в БРОНД-2 и 53.5 кэВ в JENDL-3.3, и радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 7.1$ фм и 7.2 фм, соответственно. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в CENDL-3, JEFF-3.1. В недавней оценке ENDF/B-VII параметры резонансов были взяты теми же, что в JENDL-3.3, но верхняя граница была увеличена до 90 кэВ и параметры отрицательного резонанса были изменены, чтобы получить более высокое значение сечения рассеяния тепловых нейтронов [06M].

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

Оценка	БРОНД-2	JENDL-3.3	ENDF/B-VII	Эксперимент [03Mu]
полное	5.877	6.202	8.662	
упругое	5.827	6.152	8.612	
захвата	.050	.050	.050	.0499 \pm 0.0024
резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ:	.324	0.311	.309	.27 \pm .03

В пределах погрешности все оценки согласуются с измеренными сечениями радиационного захвата тепловых нейтронов, но существенно расходятся в оценке полных сечений и сечений упругого рассеяния, для которых нет каких-либо экспериментальных данных. Причины увеличения этих сечений в ENDF/B-VII не ясны. Резонансный интеграл захвата нейтронов в БРОНД-2 кажется несколько завышенным по сравнению с экспериментальным значением и остальными оценками.

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 1 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки БРОНД-2 и JENDL-3.3 (=ENDF/B-VII), а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Обращает на себя внимание резкое увеличение при энергии 43.68 кэВ суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов в БРОНД-2, которое является следствием ошибки на порядок в ширине резонанса с указанной энергией.

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 представлены на рис. 1. Данный анализ показывает, что в диапазоне энергий до 60 кэВ в наборе s-резонансов в JENDL-3.3, возможно, пропущено 1-2 резонанса и в наборе p-резонансов пропущено 5-7 слабых резонансов. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, равны $D_0=(4240 \pm 800)$ эВ и $D_1=(1190 \pm 80)$ эВ. Отношение $D_0/D_1=3.56 \pm 0.68$ не противоречит статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, но погрешность определения D_0 достаточно велика ввиду малого числа резонансов. Для нейтронных силовых функций в рамках данного анализа получены значения $S_0=(0.60 \pm 0.15) \cdot 10^{-4}$ и $S_1=(9.0 \pm 1.0) \cdot 10^{-4}$ для s- и p-резонансов, соответственно.

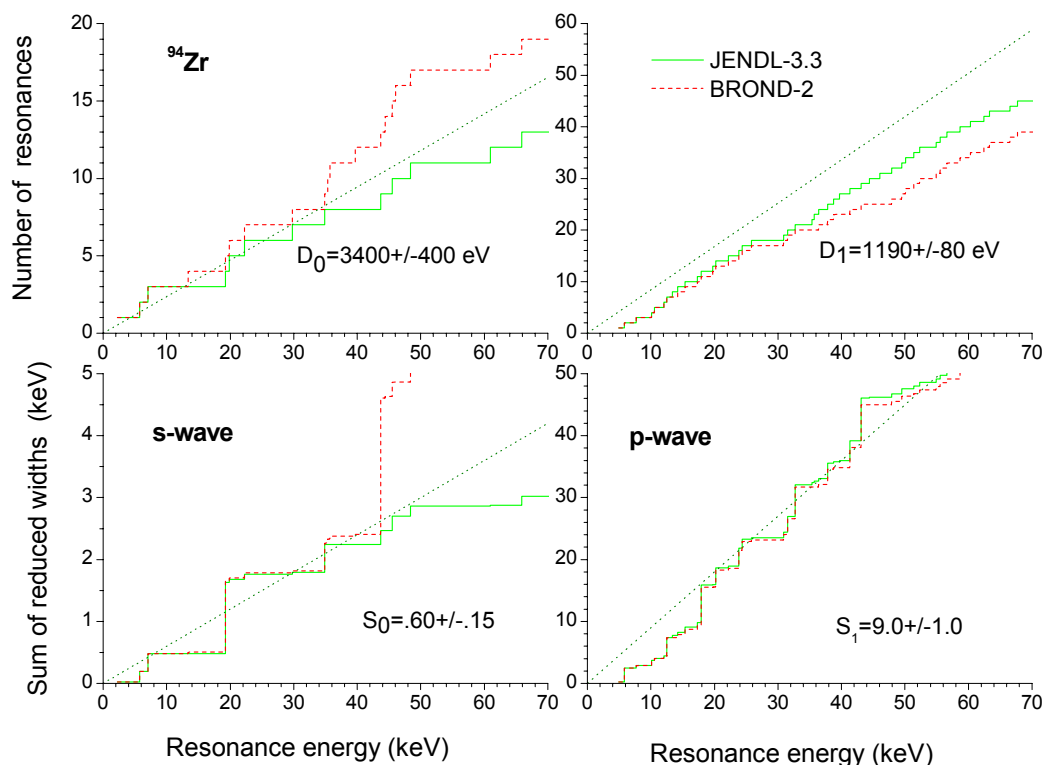


Рис. 1. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках БРОНД-2 и JENDL-3.3

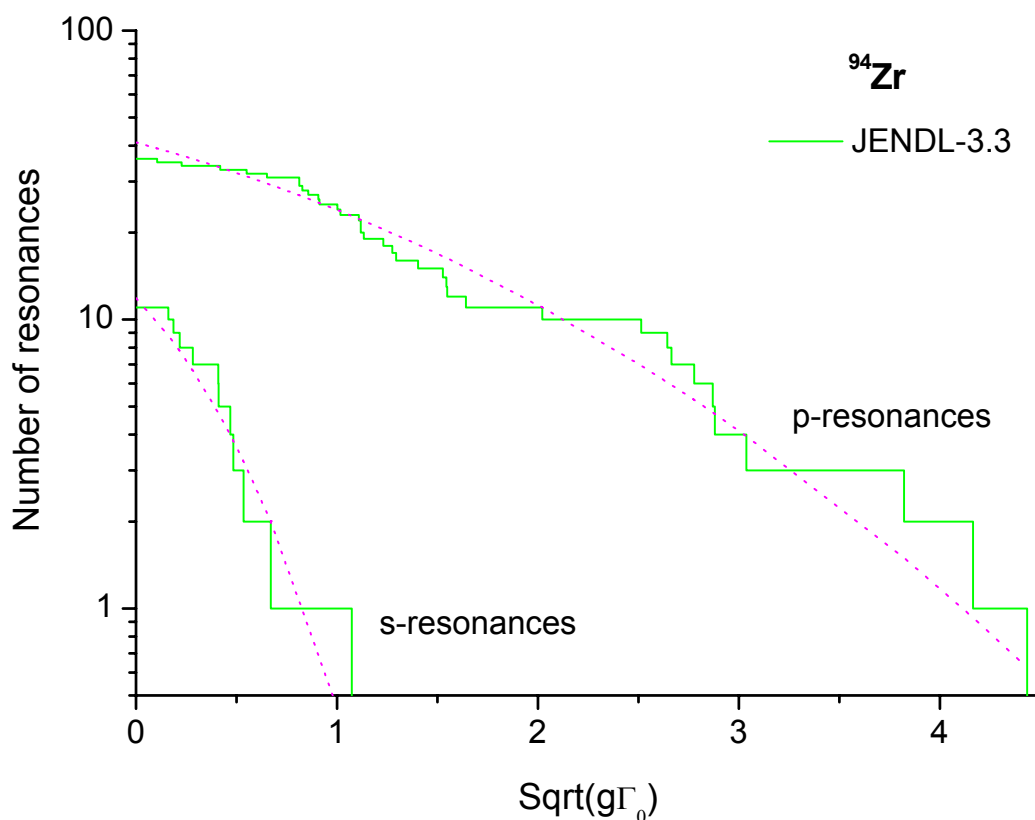


Рис. 2. Анализ пропуска s- и p-резонансов. Теоретически ожидаемые распределения показаны пунктиром.

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в БРОНД-2 принята равной 200 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. В JENDL-3.3 использован аналогичный подход, но принята более низкая верхняя граница неразрешенных резонансов 100 кэВ. Оценка JENDL-3.3 для неразрешенных резонансов принята без каких-либо изменений в CENDL-3, JEFF-3.1 и ENDF/B-VII. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована одноуровневая формула Брейта-Вигнера.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S0, S1 и S2 рассчитаны на основе оптической модели с программой [91]. Средняя радиационная ширина взята не зависящей от орбитального момента и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов [76Bo]. Эффективный радиус рассеяния получен подгонкой к полному сечению, рассчитанному по оптической модели при энергии 100 кэВ. Для энергии нейтронов 70 кэВ получены следующие значения параметров:

$S0 = 0.370E-4$, $S1 = 5.50E-4$, $S2 = 0.360E-4$, $Gg = 0.190$ эВ, $D0 = 3558$ эВ, $R = 6.704$ ферми.

В БРОНД-2 было использовано аналогичное приближение, но средние радиационные ширины были приняты на основе статистического анализа параметров разрешенных резонансов и средние расстояния между резонансами было выбрано из условий оптимального описания наблюдаемых сечений радиационного захвата нейтронов. Для энергии нейтронов 70 кэВ приняты следующие значения параметров:

$S0 = 0.49E-4$, $S1 = 7.15E-4$, $S2 = 0.80E-4$, $Gg = 0.135$ эВ для s- и 0.208 эВ для p-волны, $D0 = 3642$ эВ, $R = 6.61$ ферми.

Различия в выборе радиационных ширин и значений D_0 в значительной степени компенсируются при подгонке расчетных сечений к одним и тем же экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов [65Ka, 76B0].

На рис. 3 и 4 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Существенные отличия между оценками проявляются лишь ниже первого резонанса. Эти отличия обусловлены различиями нейтронных сечений для тепловых нейтронов и выбором соответствующих параметров отрицательного резонанса. В области неразрешенных резонансов все оценки практически совпадают. Учитывая значительный пропуск резонансов выше 60 кэВ, вряд ли можно признать оправданным расширение верхней границы разрешенных до 90 кэВ в ENDF/B-VII.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что основные отличия между оценками БРОНД-2, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII относятся к описанию сечений рассеяния тепловых нейтронов, для которых нет каких-либо экспериментальных данных. Учитывая отмеченные выше недостатки БРОНД-2 и ENDF/B-VII для разрешенных резонансов, в новой оценке БРОНД-3 была принята оценка JENDL-3.3 как для разрешенных, так и для неразрешенных резонансов. Без дополнительных экспериментальных данных в настоящее время не видно возможностей для уточнения этой оценки.

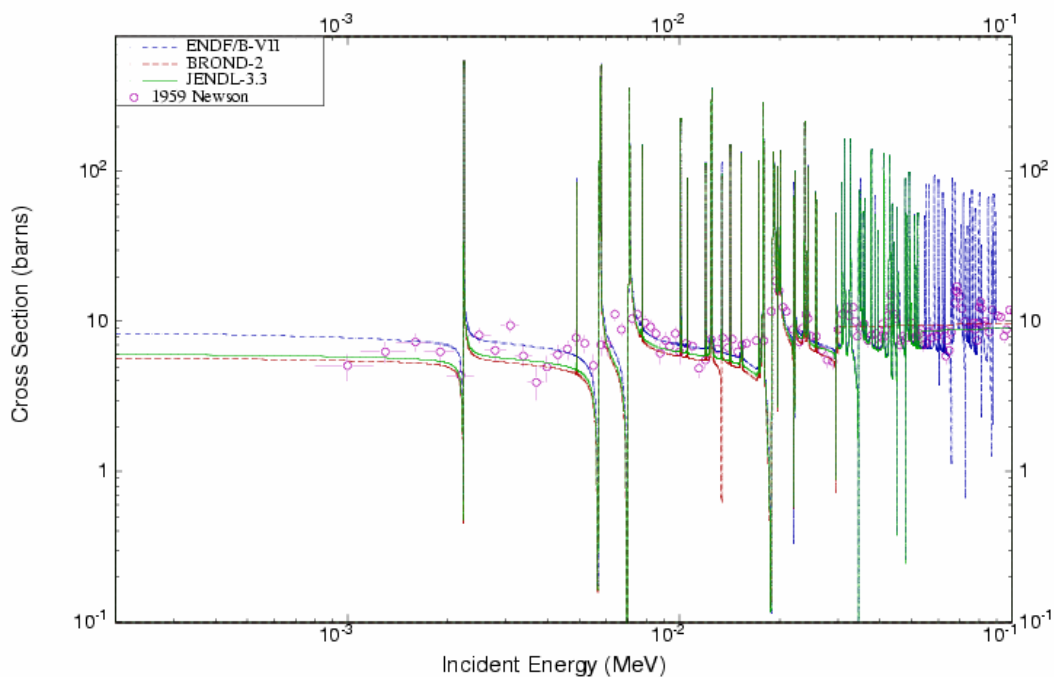


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

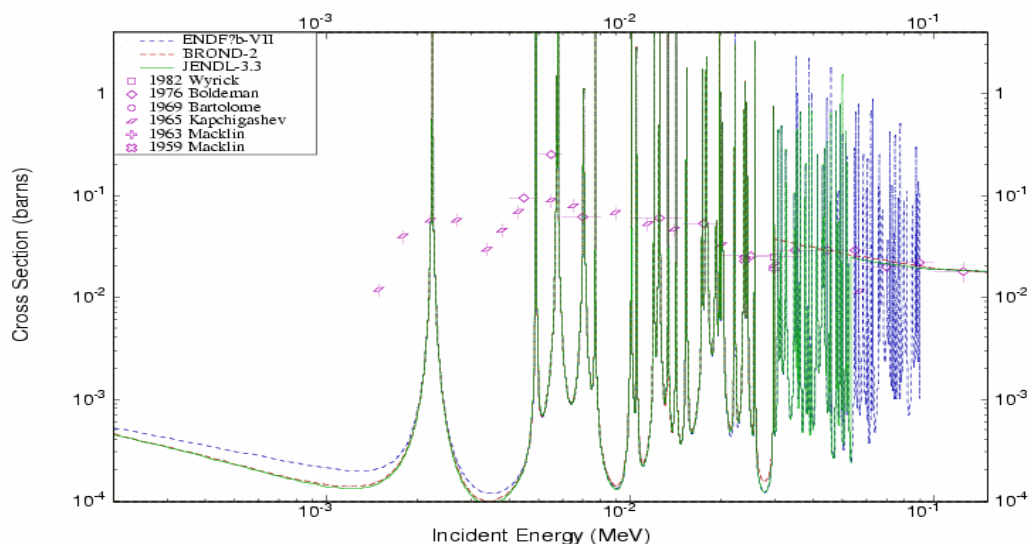


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области.

В данном разделе проведено сравнение оцененных данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII, и JENDL-3.3 вне резонансной области (0.01-20 МэВ). Сравнение с данными библиотеки JEFF-3.1 не проводилось, поскольку для изотопов циркония приняты данные библиотеки JENDL-3.3. Ниже дано сравнение указанных библиотек совместно с кратким описанием оценки БРОНД-3. Это связано с тем, что авторы оценки БРОНД-3 по сравнению с оценками других авторов применили дополнительные эмпирические систематики и более корректные теоретические расчеты. Оценка всех сечений изотопов циркония выполнена в едином согласованном подходе. В частности, был оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния, использовались систематические тенденции в поведении функций возбуждения пороговых реакций в зависимости массового числа, применена несферическая оптическая модель.

Нейтронные сечения в диапазоне 0.1 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью модифицированной программы GNASH /96Yo/ с учетом флуктуации нейтронных ширин. Для нейтронов была использована модель сильной связи каналов (программа ECIS /70Ra/) с прямым возбуждением низколежащих уровней 2+ и 3-.

Оптические параметры для нейтронов:

Глубина потенциала (МэВ)	Диапазон энергии (МэВ)	Геометрия(фм)
$V_r=49.0-0.28E$	$0 < E < 20$	$R_r=1.24 \quad a=0.62$
$W_d=2.38+0.21E$	$0 < E < 10$	$R_d=1.26 \quad a=0.58$
$W_d=5.39-0.091E$	$10 < E < 20$	
$W_v=0.0$	$0 < E < 10.9$	
$W_v=-0.0994+0.091E$	$0.9 < E < 20$	$R_v=1.24 \quad a=0.62$
$V_{so}=6.2$	$0 < E < 20$	$R_{so}=1.12 \quad a=0.47$

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /01Ko/, /74Lo/ и /94Av/, соответственно.

Гамма-переходы рассчитывались для E1, M2 и E2 -силовых функций. Параметры гигантского резонанса E1 были взяты из работы /88Di/. Полная силовая функция была нормализована к имеющимся экспериментальным данным по радиационной ширине и D0 для нейтронного резонанса. Параметры дискретных уровней взяты из работы /95Fi/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 6 дано полное сечение Zr-94 вне резонансной области энергий нейтронов. Оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают. Экспериментальные данные в области до 5 МэВ выглядят странно, а выше имеется только одна точка при 14 МэВ, поэтому трудно отдать предпочтение какой-либо из упомянутых оценок.

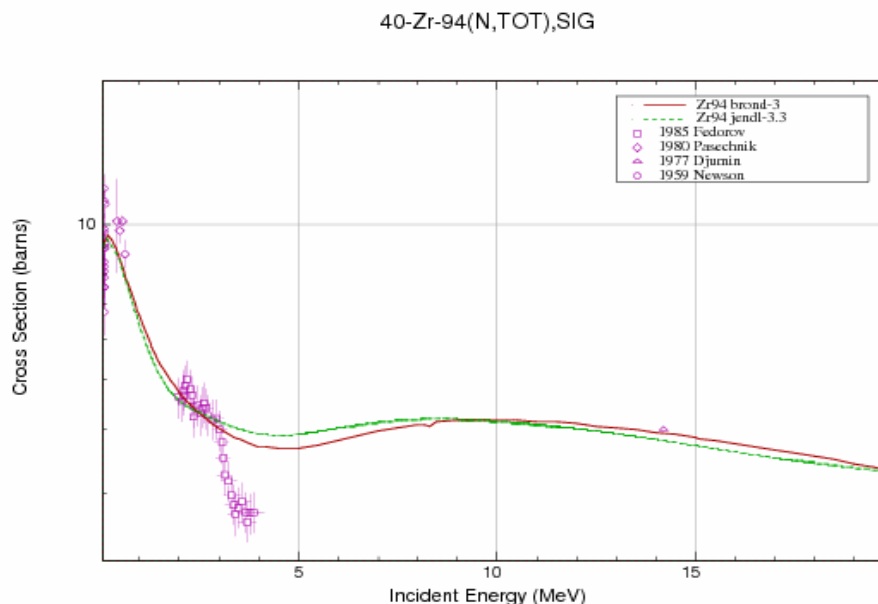


Рис. 6. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.01-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 7 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния на изотопе Zr-94. Сечение упругого рассеяния в области энергий до 1 МэВ в библиотеках ENDF/B-VII и JENDL-3.3 совпадают. В области энергий 2-10 МэВ данные BROND-3 лежат ниже, что связано с более низким сечением в этой области полного сечения (см. рис.4). По единственной экспериментальной точке достоверность любой из указанных оценок оценить трудно.

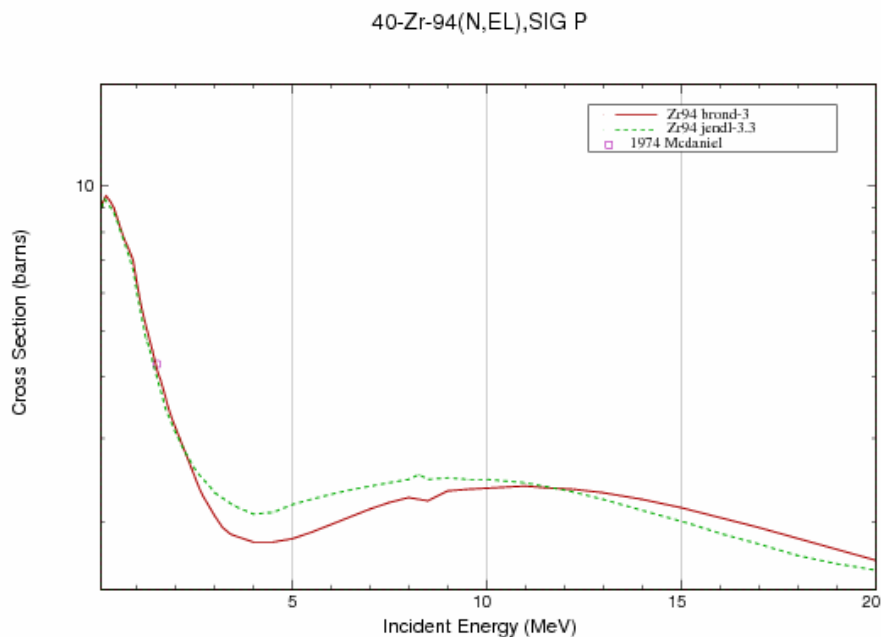


Рис.7. Сечение упругого рассеяния в области 0.1-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-69).

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

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 2.9100 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

N	Энергия уровня, МэВ	Спин	Переход	Энергия гамма- кванта, МэВ	Вероятность перехода, %
0	0.00000				
1	0.91870	2+	1 → 0	0.91874	100
2	1.30020	0+	2 → 0 2 → 1	1.30018 0.38157	0.4 99.6
3	1.46960	4+	3 → 1	0.55088	100
4	1.67140	2+	4 → 0 4 → 1	1.67141 0.75260	58.5 41.5
5	2.05760	3-	5 → 1 5 → 3	1.13888 0.58800	97.3 2.7
6	2.15130	2+	6 → 1	1.23255	100
7	2.33020	4+	7 → 1	1.41146	100
8	2.36610	2+	8 → 1 8 → 2 8 → 4 8 → 5	1.44741 1.06634 0.69466 0.30822	33.3 9.5 51.9 5.3
9	2.40100	2+	9 → 0 9 → 4 9 → 5 9 → 6	2.40100 0.72960 0.34340 0.2497	35.5 12.0 25.0 27.5
10	2.50770	3+	10 → 1 10 → 4	1.58959 0.83607	87.0 13.0
11	2.60450	5-	11 → 3	1.13498	100
12	2.69850	3-	12 → 1	1.77970	100
13	2.71900	2+	13 → 0 13 → 8	2.71900 0.35290	43.0 57.0
14	2.76900	0+	14 → 0 14 → 2	2.76900 1.46880	50 50
15	2.82600	2+	15 → 4	1.15466	100
16	2.84630	1-	16 → 0 16 → 1	2.84633 1.92756	90.1 9.9
17	2.86060	4+	17 → 3	1.39100	100
18	2.88820	4+	18 → 1	1.96942	100
19	2.90800	2+	19 → 0 19 → 1	2.90848 1.98937	21.2 18.2

			19 → 4	1.23660	60.6
20	2.91000				

Экспериментальных данных по интегральному сечению неупругого рассеяния нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII рассчитаны на основе сферической оптической моделей ядерных реакций и совпадают. Данные BROND-3 лежат существенно выше, что объясняется использованием другой программы для расчета (модифицированной программы GNASH) и параметров несферической оптической модели. Учитывая более корректный подход в расчетах по программе GNASH интегральное сечение неупругого рассеяния из библиотеки BROND-3 предпочтительнее. На рис. 9 показана функция возбуждения неупругого рассеяния на первом уровне. Экспериментальных данных также нет.

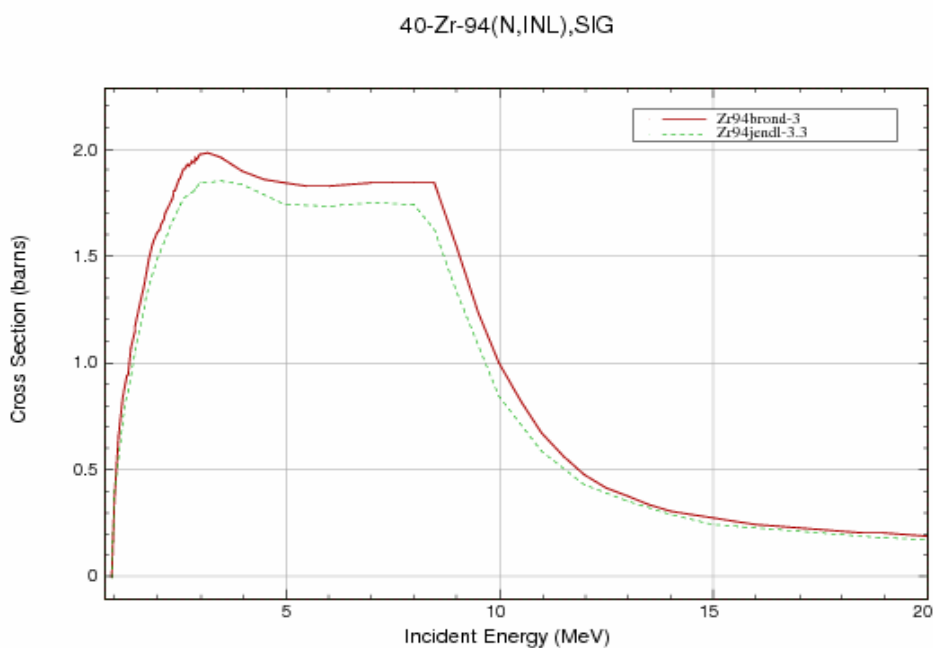


Рис.8. Полное сечение неупругого рассеяния Zr-94.

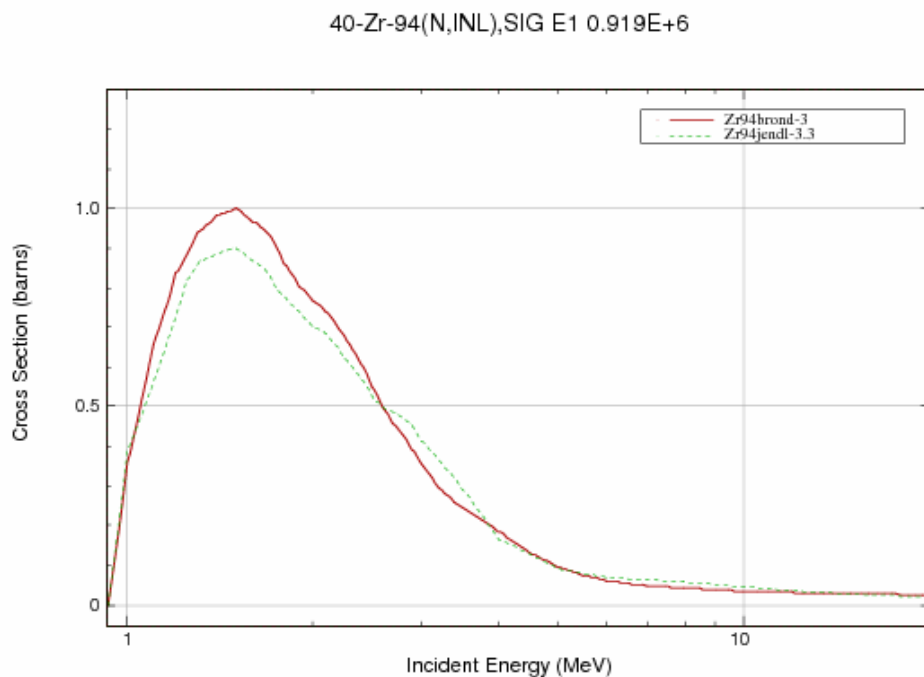


Рис. 9. Функция возбуждения первого уровня Zr-94с энергией 0.9187 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.1-20 МэВ сечение радиационного захвата в файле Zr-94 библиотеки БРОНД-3 рассчитано с учетом полупрямого механизма в области гигантского резонанса. В области выше 1 МэВ экспериментальных данных нет. В области выше 1 МэВ данные BROND-3 и JENDL-3.3 сильно различаются, но кривая БРОНД-3 выглядит предпочтительнее. Данные ENDF/B-VII взяты из JENDL-3.3.

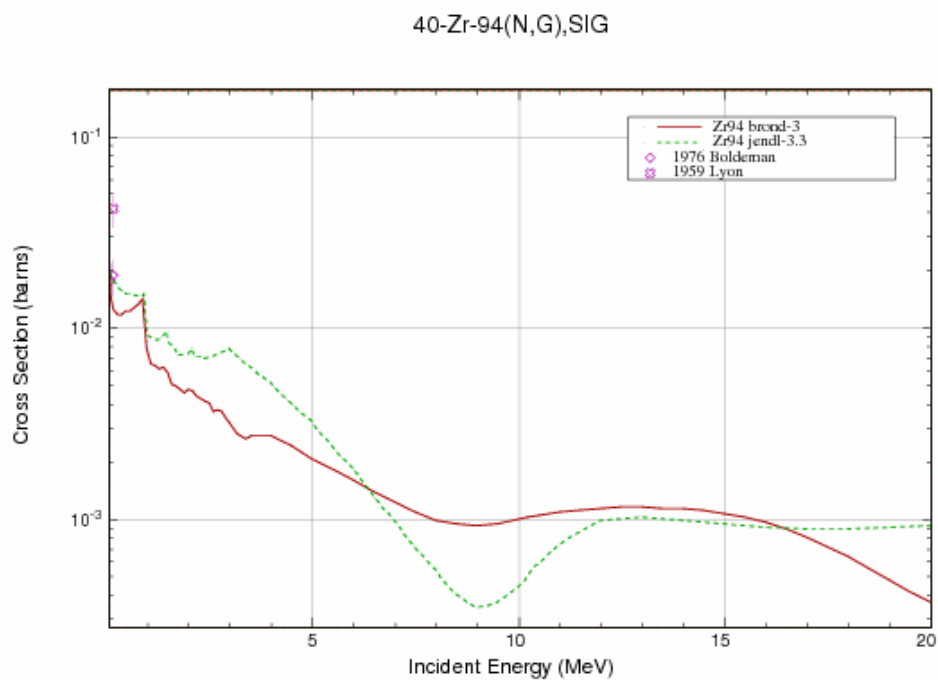


Рис. 10. Сечение радиационного захвата в области 0.1-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

На рис. 11 представлено сечение реакции (n,2n) библиотек JENDL-3.3 и BROND-3. Как видно, обе оценки близки и согласуются с эмпирической систематикой функций возбуждения указанной реакции [97Ma]. Могут быть рекомендованы данные обеих библиотек. На рис.11 даны оцененные сечения реакции (n,3n) из указанных библиотек. Оценки заметно различаются по абсолютной величине. Зависимость из БРОНД-3 лучше согласуется с систематикой сечений реакций (n,2n) и (n,3n).

Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6 и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

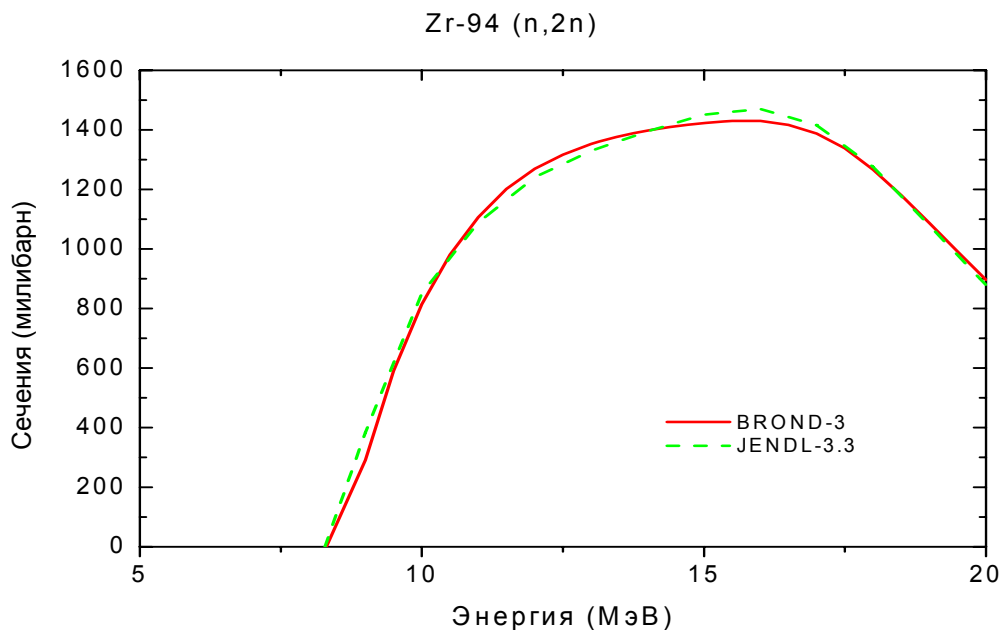


Рис. 11. Сечение реакции (n,2n). JENDL-3.3

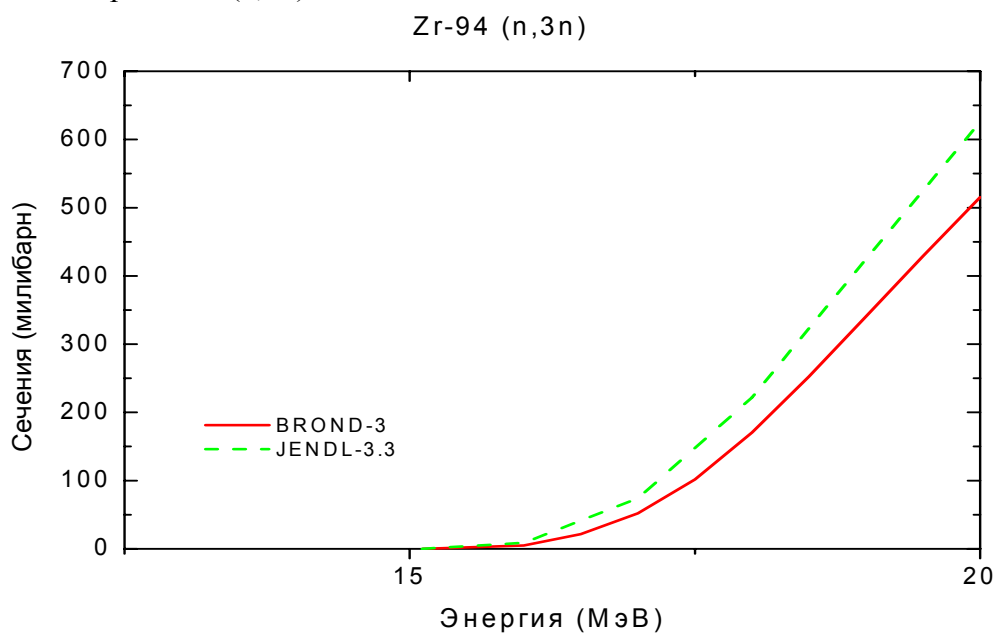


Рис. 11. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104,105 и 107):

На рис. 12 показано сечение реакции $^{94}\text{Zr}(n,p)$. Оцененные данные библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают. Оценке функции возбуждения из БРОНД-3 следует отдать предпочтение, она согласуется с систематикой сечений реакции (n,p) /15,16/ и с экспериментальными данными Икеды.

На рис. 13 дано сечение реакции $^{94}\text{Zr}(n,d)$. Данные библиотеки ENDF/B-VII приняты из библиотеки JENDL-3.3. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 реакции (n,d), получены расчетным путем. Оценка БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лежит выше, что лучше соответствует систематическим тенденциям в зависимости этой реакции.

Сечение реакции (n,t) принято в БРОНД-3 из JENDL-3.3.

На рис.14 представлено сечение реакции $^{94}\text{Zr}(n,\alpha)$. Оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают. Оценки JENDL-3.3 и БРОНД-3 близки и практически равнозначны.

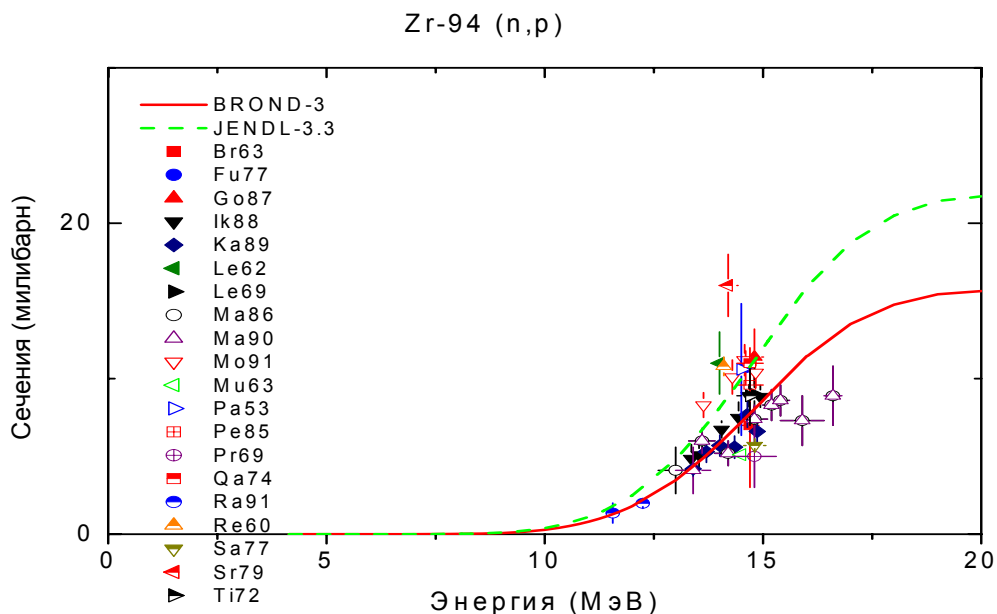


Рис. 12. Сечение реакции (n,p)

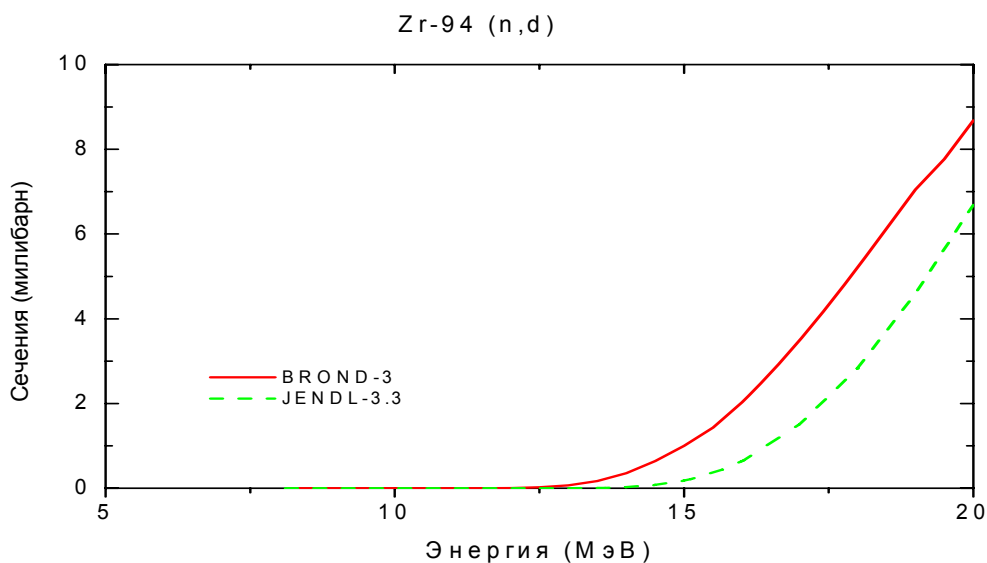


Рис.13. Сечение реакции (n,d).

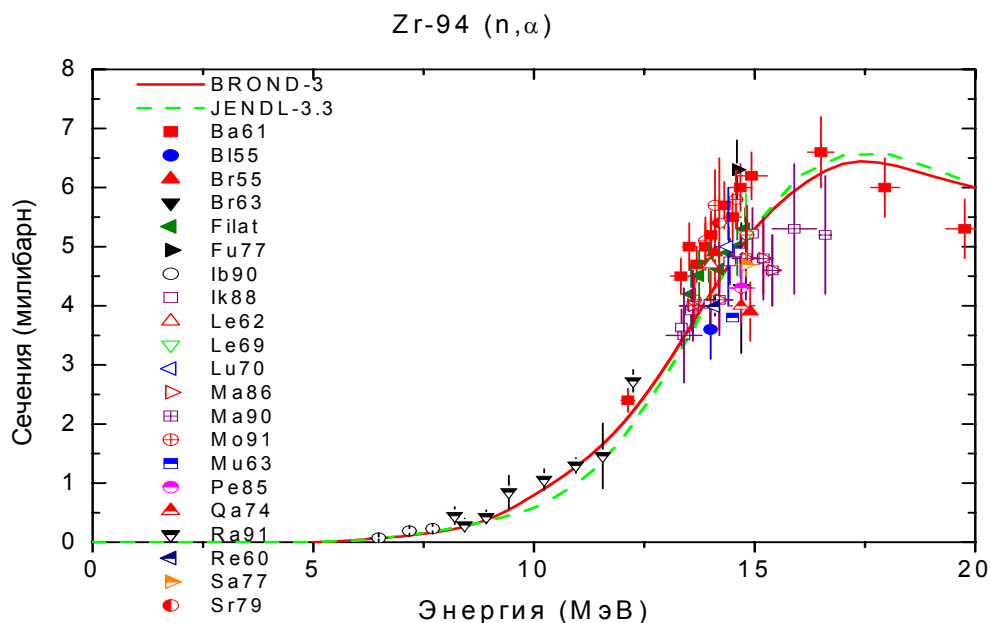


Рис. 14. Сечение реакции (n, α)

3.7. Реакции $(n, n\alpha)$, (n, np) (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет надежных экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. Оценки реакций $(n, n\alpha)$ и (n, np) в файле Zr-94 в БРОНД-3 основаны на расчетах по программе GNASH. Разногласия оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

На рис. 15 дано сечение реакции $^{94}\text{Zr}(n, np)$. Оцененные данные библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 примерно равноценны. На рис. 16 дано сечение реакции $^{94}\text{Zr}(n, na)$. В БРОНД-3 и JENDL-3.3. оценки близки, может быть рекомендована любая из них.

Спектры и угловые распределения нейтронов для рассматриваемых реакций представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6, и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

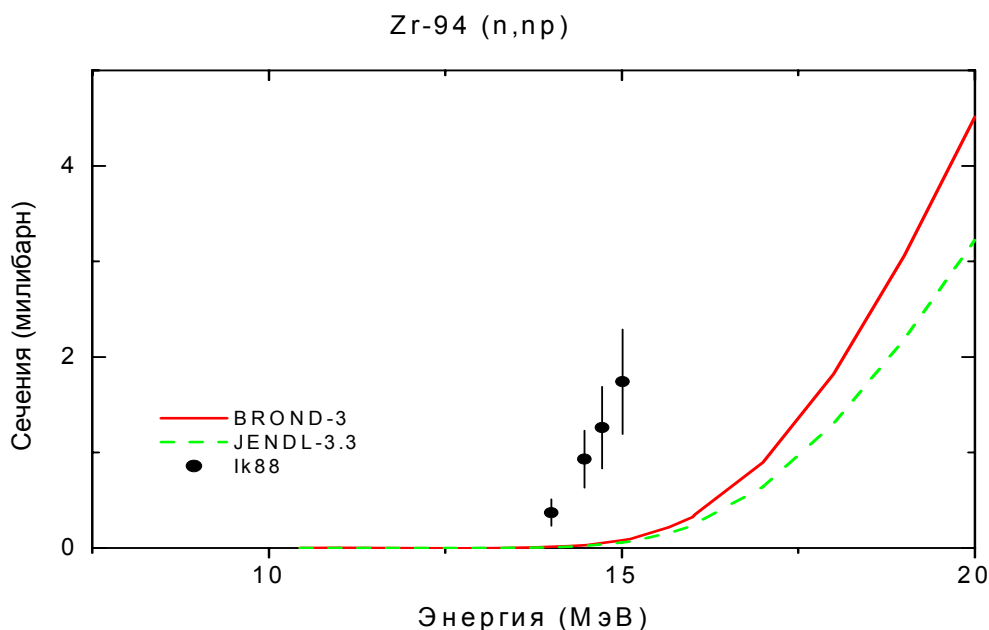


Рис. 15. Сечение реакции (n, np) .

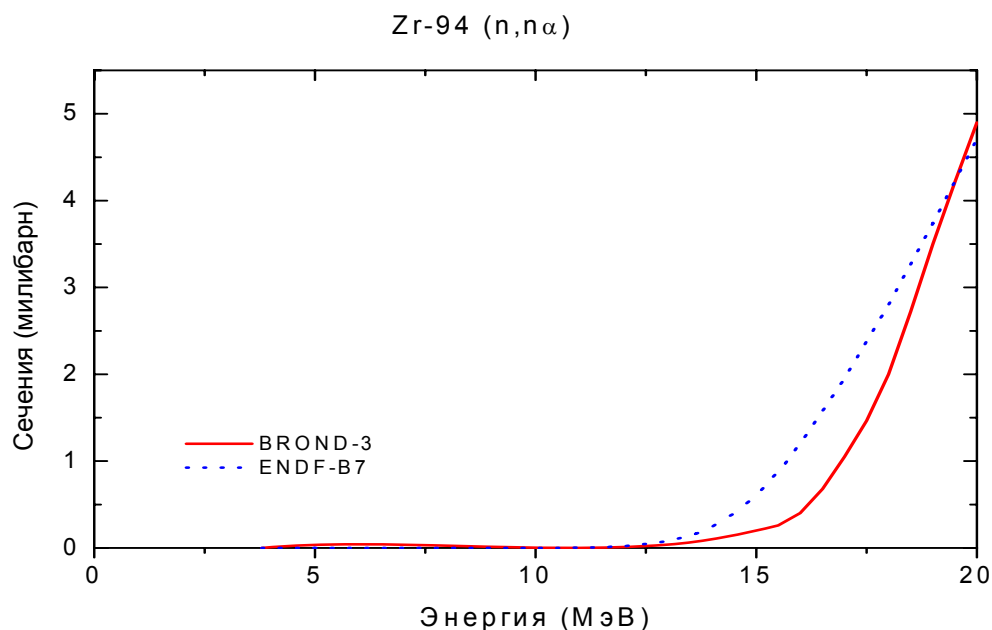


Рис. 16. Сечение реакции (n,n α).

MF=4. Угловые распределения вторичных нейтронов.

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/91Ig/.

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gasthy/91Ig/ и Dwuck.

MF=6 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

MT=16,17,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /90Ku/

MF=12 Множественность образования гамма-лучей

MT=16,17,22, 28, 51-69,91,102,103,107 Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH /96Yo/

MF=14 Угловые распределения гамма-лучей

MT=16,17,22, 28, 51-87,91,103,102,107, 102 Угловые распределения фотонов неупругого взаимодействия и радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

MF=15 Непрерывные спектры гамма-лучей

MT= 16,17,22, 28, 91,103, 107 Непрерывные спектры гамма-лучей неупругого

взаимодействия приняты из JENDL-3.3, рассчитаны по программе EGNASH /90Ya/

MT=102 Непрерывные спектры гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/91Ig/

Закключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка БРОНД-3 является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. Уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить в РОСФОНД файл оцененных данных для Zr-94 из БРОНД-3.

Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

References

- 06M Mughabghab, S. Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY, 2006.
03M.. Mughabghab, S. Report INDC(NDS)-440, 2003.
01Ko Koning, A.J., Dalaroche, J.P. Contribution to 3rd RCM of RIPLE-2, Vienna, 2001.
98Ri RIPLE-2. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
97Ma Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
96Yo Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: In "Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors" (Triest, 1996). Eds. A. Gordini, G. Reffo., World Science, Singapore, 1988, V.1, p.206.
95Fi Firestone, R.B. Table of Isotopes, Eight Edition, V.2, New York, 1995.
94Av Avrigeanu, V., Hodgson, P., Avrigeanu, M. Phys.Rev.C49(1994)2136
91Ig Igarasi, S. and Fukahori, T.: JAERI 1321 (1991).
90Ku Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
90Ya Yamamuro, N.: JAERI-M 90-006 (1990).
88Di Dietrich, S.S., Berman, B.L. Atomic data and Nuclear data Tables 38(1988)199.
86Ki Kikuchi, Y. et al.: JAERI-M 86-030 (1986).
81Mu Mughabghab, S.F. et al.: "Neutron Cross Sections, Vol. I, Part A", Academic Press (1981).
80Ar Arthur E.D. Nucl.Sci.Eng. 76(1980)137.
76Bo Boldeman, J.W. et al., Nucl. Phys. V. A269, 31 (1976).
75Ho Hofman, H. et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
74Lo Lohr, J.M. and Haeberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
70Ra Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8(1970), p.281.
69Ba Bartolome, Z.M. et al., Nucl. Sci. Eng., v. 37, 137 (1969).
65Ka Капчигашев, С.П., Ю.П.Попов. АЕ, т. 19, 294 (1965).

Сечение реакции N,D

	1-й автор	Ссылка	№ EXFOR	Диапазон энергии, эВ		Число Точек
Haight81	R.C.Haight	J, PR/C, 23, 700, 1981	10960	1.48+07		1

Сечение неупругого рассеяния

Filat99	А.А.Филатенков	R, RI-252, 1999	41240	1.30+07	1.50+07	8
Haight81	R.C.Haight	J, PR/C, 23, 700, 1981	10960	1.48+07		1

40.8. Цирконий-95

1. Общие характеристики

1.1. $Z=40$

1.2. $A=95$

1.3. $A_w=94.09273$

1.4. Радиоактивен ($T_{1/2}=64$ дн.). Испытывает бета-распад в ^{95}Nb , который, в свою очередь, распадается ($T_{1/2}=34.97$ дн.) в стабильный ^{95}Mo .

В реакторах образуется как продукт деления и в результате радиационного захвата нейтронов в цирконии-94.

1.5. Перечень нейтронных реакций:

MT	Реакция	Q, МэВ	Епор, МэВ	Ядро-продукт
51	(n,n')	-0.9539	0.9640	Zr-95
16	n,2n	-6.4627	6.5314	Zr-94
17	n,3n	-14.6827	14.8354	Zr-93
22	n,n α	-4.4325	4.4796	Sr-91
28	n,np	-10.6006	10.7133	Y-94
102	n, γ	7.8540		Zr-95
103	n,p	-3.6633	3.7022	Y-95
104	n,d	-8.3760	8.4650	Y-94
105	n,t	-8.3130	8.4014	Y-93
107	n, α	2.9099		Sr-92

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

Для данного изотопа нет каких-либо экспериментальных данных о нейтронных сечениях, поэтому все оценки основаны на систематиках или теоретических расчетах тепловых сечений, плотности нейтронных резонансов или непосредственно самих сечений. В частности, в БРОНД-2 в резонансной области приведен только радиус потенциального рассеяния $R_0 = 5.5035$ фм, тогда как все сечения представлены в секции MF=3. В JENDL-3.3 принят радиус потенциального рассеяния 6.737 фм, и диапазон энергий 125 эВ – 100 кэВ представлен параметрами неразрешенных резонансов. В JEFF-3.1 принят радиус потенциального рассеяния 7.10 фм, и резонансные параметры искусственно смоделированы в области энергий до 3 кэВ, и диапазон энергий от 3 кэВ до 50 кэВ представлен параметрами неразрешенных резонансов. Оценка JENDL-3.3 включена без изменений в CENDL-3 и ENDF/B-VII.

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

Оценка	БРОНД-2	JENDL-3.3	JEFF-3.1
полное	4.296	6.904	5.615
упругое	3.806	5.704	5.390
захвата	.490	1.200	.225
резонансный интеграл захвата выше 0.5 эВ:	4.14	7.79	5.80

Можно видеть существенные различия всех сечений, но без экспериментальных данных нет оснований отдать предпочтение какой-либо из оценок.

В JENDL-3.3 нейтронные силовые функции S_0 , S_1 и S_2 рассчитаны на основе оптической модели, и для энергии нейтронов 70 кэВ приняты следующие значения параметров: $S_0 = 0.370E-4$, $S_1 = 5.420E-4$, $S_2 = 0.360E-4$, $S_g = 8.03E-4$, $G_g = 0.200$ эВ, $R = 6.737$ ферми. На рис. 3 и 4 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для диапазона энергий до 100 кэВ. В области энергий выше 300 эВ оценки БРОНД-2 и JENDL-3.3 дают достаточно близкие значения как полных нейтронных сечений, так и сечений радиационного захвата нейтронов. Учитывая удовлетворительное согласие оценок БРОНД-2 и ENDF/B-VII в области неразрешенных резонансов и отсутствие каких-либо экспериментальных данных о нейтронных сечениях, в новую оценку БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3 для всего диапазона энергий до 100 кэВ. Введение неразрешенных резонансов обусловлено необходимостью анализа блокировки нейтронных сечений в резонансной области. Без дополнительных экспериментальных данных в настоящее время не видно возможностей для уточнения принятой оценки.

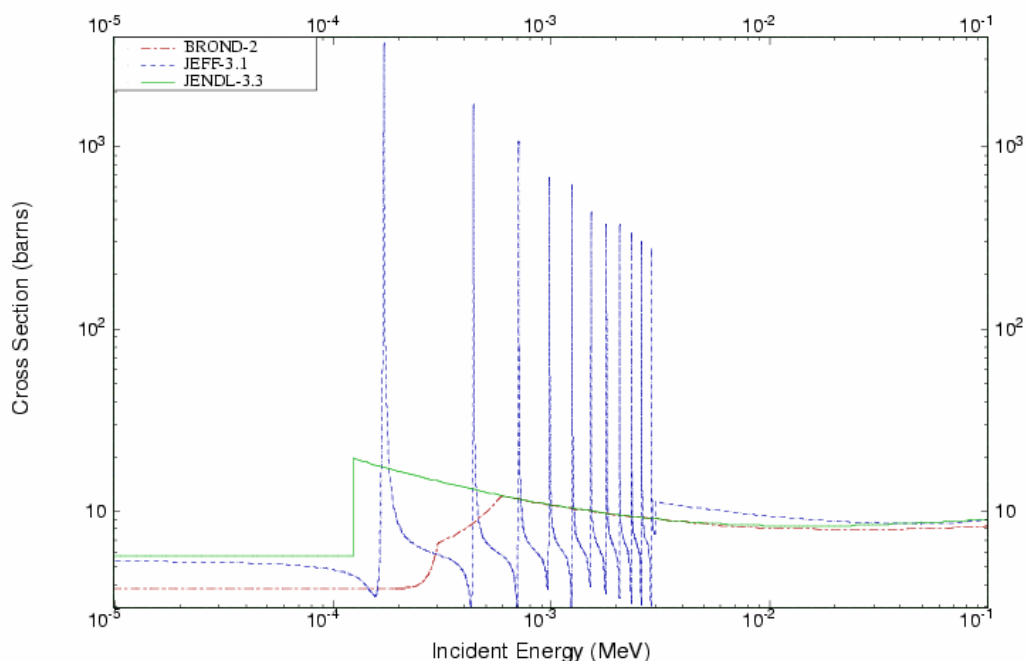


Рис. 1. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов

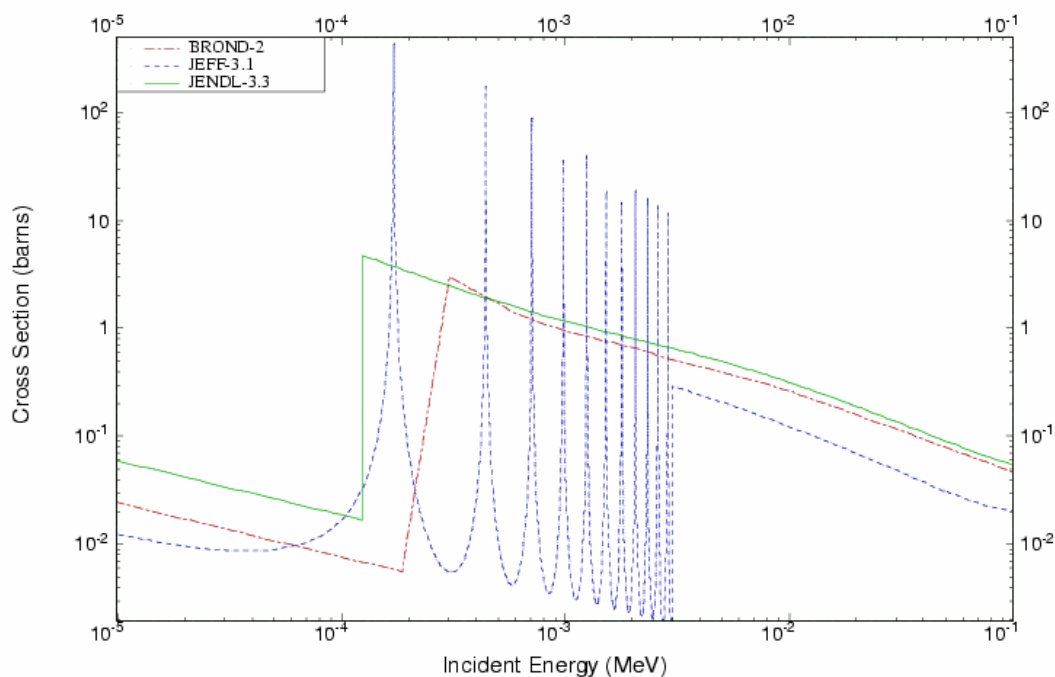


Рис. 2. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов

3. Нейтронные сечения вне резонансной области.

В данном разделе проведено сравнение оцененных данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII, и JENDL-3.3 вне резонансной области (0.01-20 МэВ). Сравнение с данными библиотеки JEFF-3.1 не проводилось. Для изотопов циркония в эту библиотеку приняты данные библиотеки JEFF-3.0, которые в свою очередь приняты из JEF2.2 (1992). В последней версии ENDF/B-VII приняты также данные JENDL-3.3. Поэтому ниже следует сравнение только оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3. Дано также краткое описание оценки БРОНД-3. Это связано с тем, что авторы оценки БРОНД-3 по сравнению с оценками других авторов применили дополнительные эмпирические систематики и более корректные теоретические расчеты. Оценка всех сечений изотопов циркония выполнена в едином согласованном подходе. В частности, был оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния, использовались систематические тенденции в поведении функций возбуждения пороговых реакций в зависимости массового числа, применена несферическая оптическая модель.

Нейтронные сечения в диапазоне 0.1 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью модифицированной программы GNASH /96Yo/ с учетом флуктуации нейтронных ширин. Для нейтронов была использована модель сильной связи каналов (программа ECIS /91lg/). Для оптического потенциала /80Ar/ мнимая часть была модифицирована, чтобы учесть прямое возбуждение низколежащих мультиплетов уровней ($5/2+ \otimes 2+$) и ($5/2+ \otimes 3-$).

Оптические параметры для нейтронов:

Глубина потенциала (МэВ)	Диапазон энергии (МэВ)	Геометрия(фм)
$V_r=49.0-0.28E$	$0 < E < 20$	$R_r=1.24 \quad a=0.62$
$W_d=2.38+0.21E$	$0 < E < 10$	$R_d=1.26 \quad a=0.58$
$W_d=5.39-0.091E$	$10 < E < 20$	
$W_v=0.0$	$0 < E < 10.9$	
$W_v=-0.0994+0.091E$	$0.9 < E < 20$	$R_v=1.24 \quad a=0.62$
$V_{so}=6.2$	$0 < E < 20$	$R_{s0}=1.12 \quad a=0.47$

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /01Ko/, /74Lo/ и /94Av/, соответственно.

Гамма-переходы рассчитывались для E1, M2 и E2 -силовых функций. Параметры гигантского резонанса E1 были взяты из работы /88Di/. Полная силовая функция была нормализована к имеющимся экспериментальным данным по радиационной ширине и D0 для нейтронного резонанса. Параметры дискретных уровней взяты из работы /95Fi/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 3 дано полное сечение ZR-95 вне резонансной области энергий нейтронов. В области до 5 МэВ оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 практически совпадают, в области 5-20 МэВ оценка БРОНД-3 лежит заметно ниже. Из-за отсутствия экспериментальных данных трудно отдать предпочтение какой-либо из упомянутых оценок. Однако более корректный теоретический расчет для оценки БРОНД-3 позволяет отдать этой оценке некоторое предпочтение

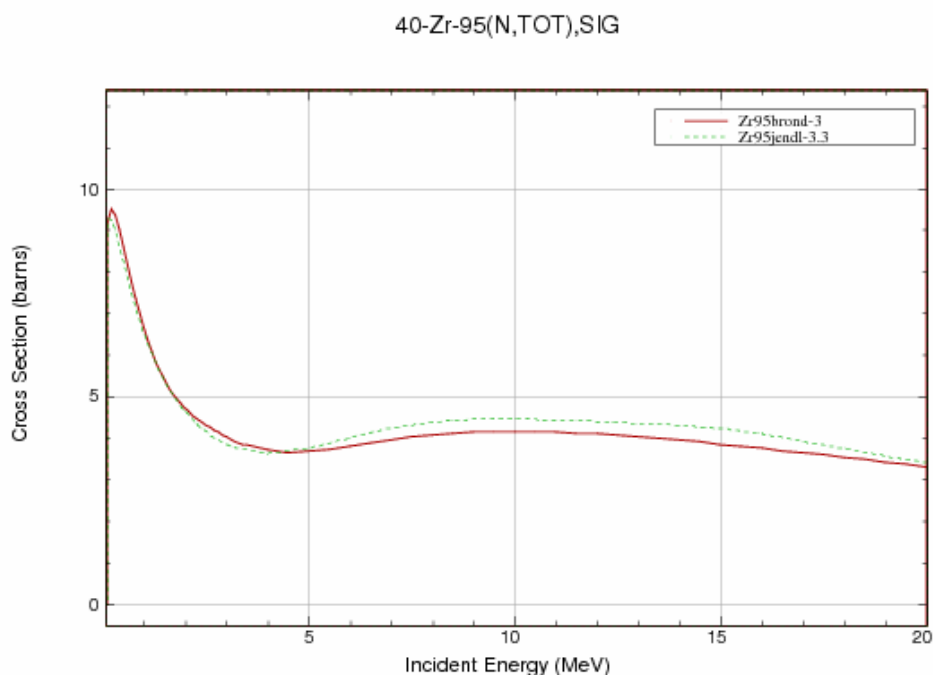


Рис.3. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 4 показано сравнение оценок упругого рассеяния БРОНД-3 и JENDL-3.3. Экспериментальных данных нет. Как видно, сечение упругого рассеяния в области энергий выше 2 МэВ в библиотеке ROND-3 лежит существенно ниже, в что связано с более низким сечением в этой области полного сечения (см. рис.4). Поскольку энергии экспериментальных данных нет, достоверность любой из указанных оценок оценить трудно.

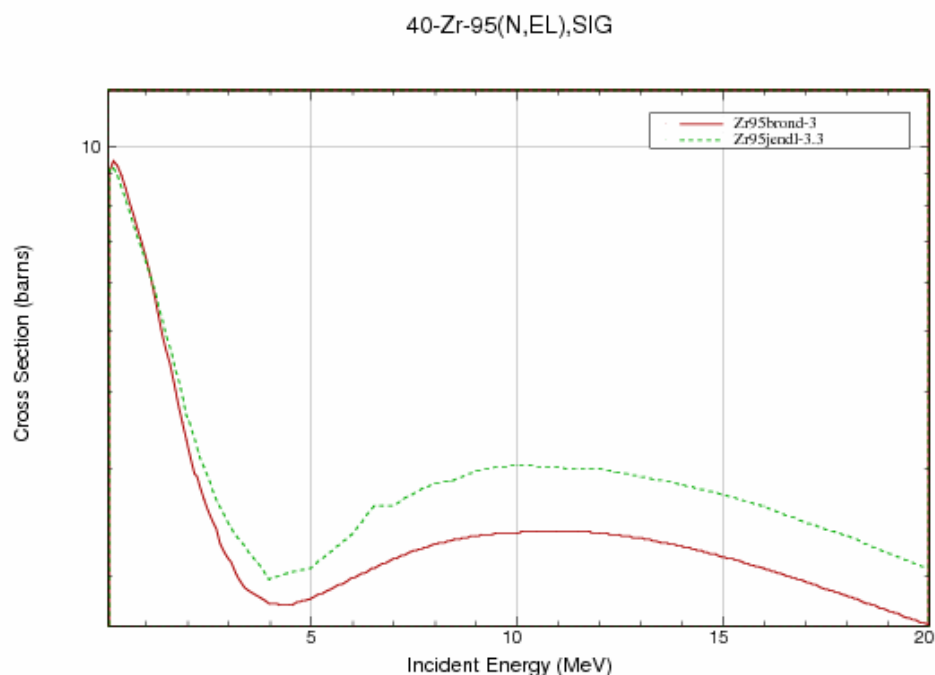


Рис.4. Сечение упругого рассеяния в области 0.1-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-68).

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

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 2.3800 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

N	Энергия уровня, МэВ	Спин	Переход	Энергия гамма- кванта, МэВ	Вероятность перехода, %
0	0.00000				
1	0.95390	1/2+	1 → 0	0.95400	100
2	1.14000	5/2+	2 → 0	1.14000	100
3	1.32380	3/2+	3 → 0	1.32403	100
4	1.61800	9/2+	4 → 1	0.66410	100
5	1.61830	3/2+	5 → 0	1.61854	100
6	1.72170	5/2+	6 → 0 6 → 3	1.72140 0.39626	52.4 47.6
7	1.78800	3/2+	7 → 0	1.78800	100
8	1.89270	5/2+	8 → 0 8 → 3	1.89253 0.56907	76.3 23.7
9	1.90390	3/2+	9 → 0 9 → 3	1.90400 0.58025	59.2 40.8
10	1.94030	1/2+	10 → 0	1.94030	100
11	1.95590	5/2+	11 → 0 11 → 1 11 → 3	1.95583 1.00213 0.63230	46.7 23.8 29.5
12	2.02500	9/2-	12 → 0	2.02500	100

13	2.12000	5/2-	13 → 0	2.12000	100
14	2.25000	7/2+	14 → 1	1.29600	100
15	2.25410	1/2+	15 → 0	2.25410	100
16	2.28500	5/2+	16 → 2	1.14500	100
17	2.31700	3/2+	17 → 1	1.17700	100
18	2.37220	3/2+	18 → 0	2.37258	21.1
			18 → 1	1.41844	11.7
			18 → 3	1.04831	24.1
			18 → 10	0.43200	43.1
19	2.38000				

Экспериментальных данных по сечению неупругого рассеяния нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 существенно различаются, однако данные BROND-3 согласованы с более приемлемой функцией возбуждения реакции (n,2n)(см. рис. 10) и с величиной вклада прямых процессов при энергии 20 МэВ (200-300 мб). На рисунке приведена также зависимость сечения из CENDL-3, которая существенно лучше согласуется с оценкой БРОНД-3.

На рис. 5-7 показаны функции возбуждения неупругого рассеяния на первых двух уровнях, где также нет экспериментальных данных.

40-Zr-95(N,INL),SIG

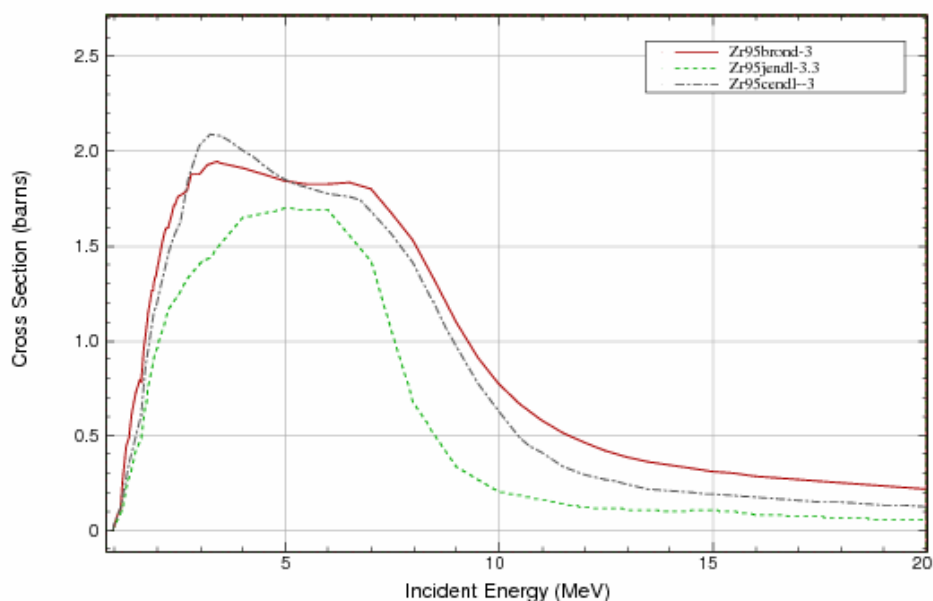


Рис.5. Интегральное сечение неупругого рассеяния Zr-95.

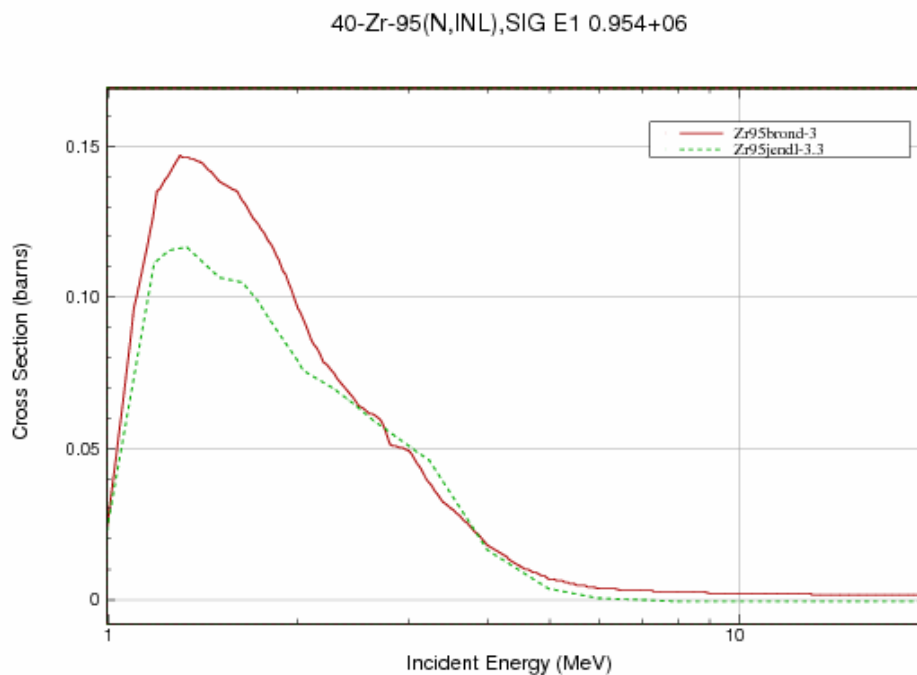


Рис.6. Функция возбуждения первого уровня Zr-95 с энергией 0.954 МэВ.

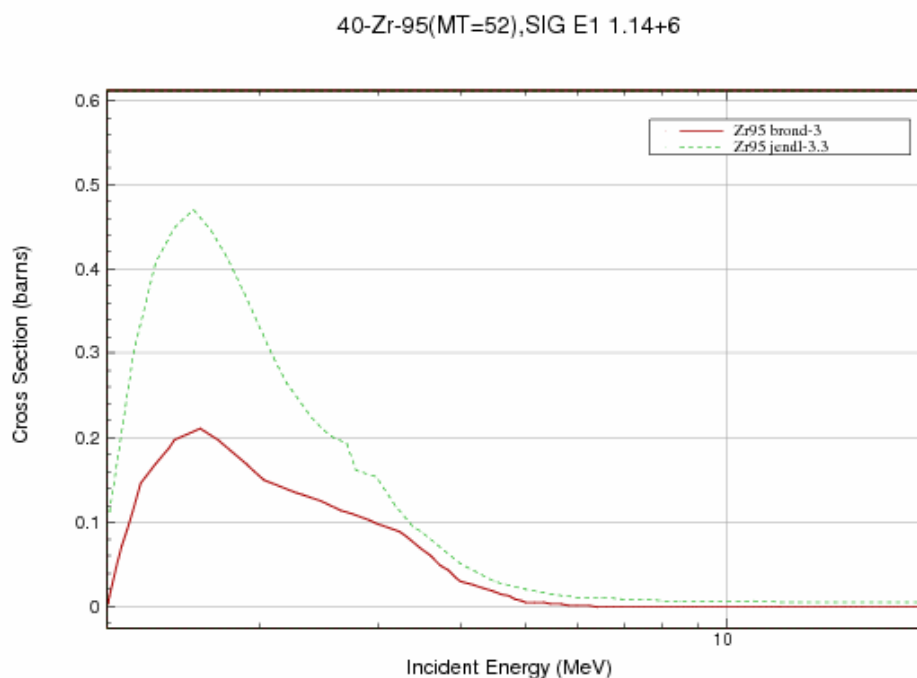


Рис.7. Функция возбуждения второго уровня Zr-95 с энергией 1.140 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.1-20 МэВ сечение радиационного захвата в файле Zr-95 библиотеки БРОНД-3 рассчитано с учетом полупрямого механизма в области гигантского резонанса. В области выше 5-10 МэВ данные BROND-3 и JENDL-3.3 сильно различаются, но кривая с физической точки зрения выглядит явно предпочтительнее.

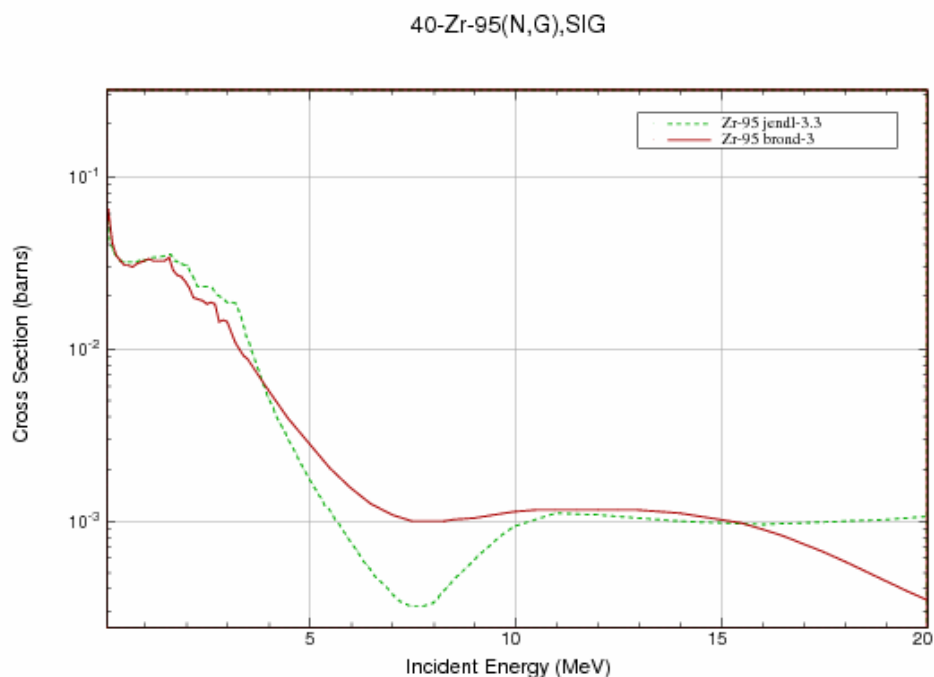


Рис.8. Сечение радиационного захвата в области 0.01-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

На рис. 9и 10 представлены сечения реакции (n,2n) и (n,3n) библиотек JENDL-3.3 и BROND-3. Экспериментальных данных нет. Данные БРОНД-3 хорошо согласуются с эмпирическими систематиками функций возбуждения указанных реакций [97Ma], Форма функций возбуждения реакций (n,2n) и (n,3n) вызывает сомнения.

Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6 и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

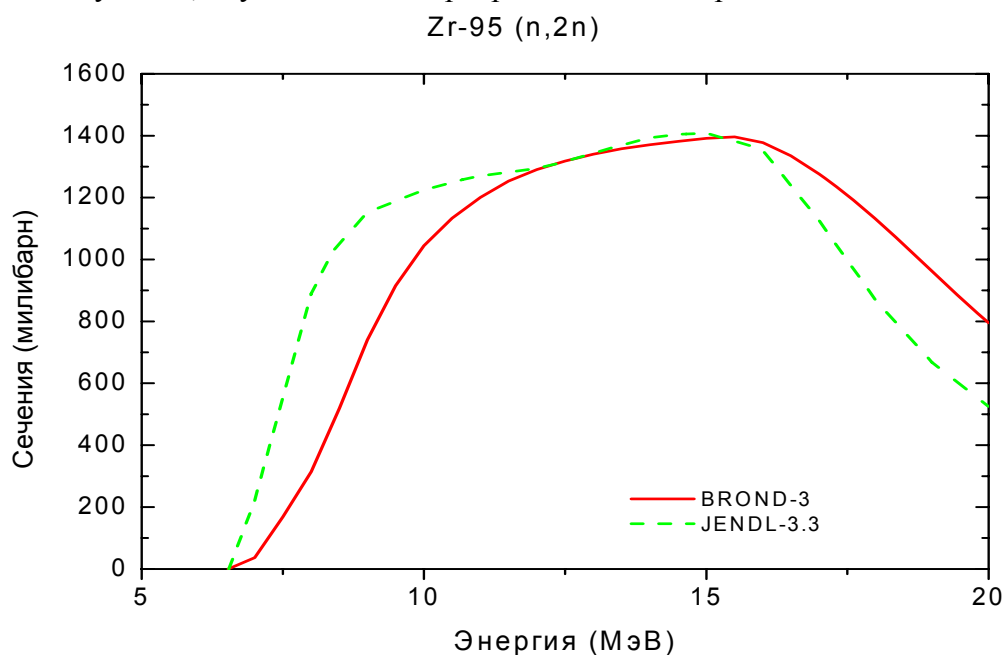


Рис.9. Сечение реакции (n,2n). JENDL-3.3

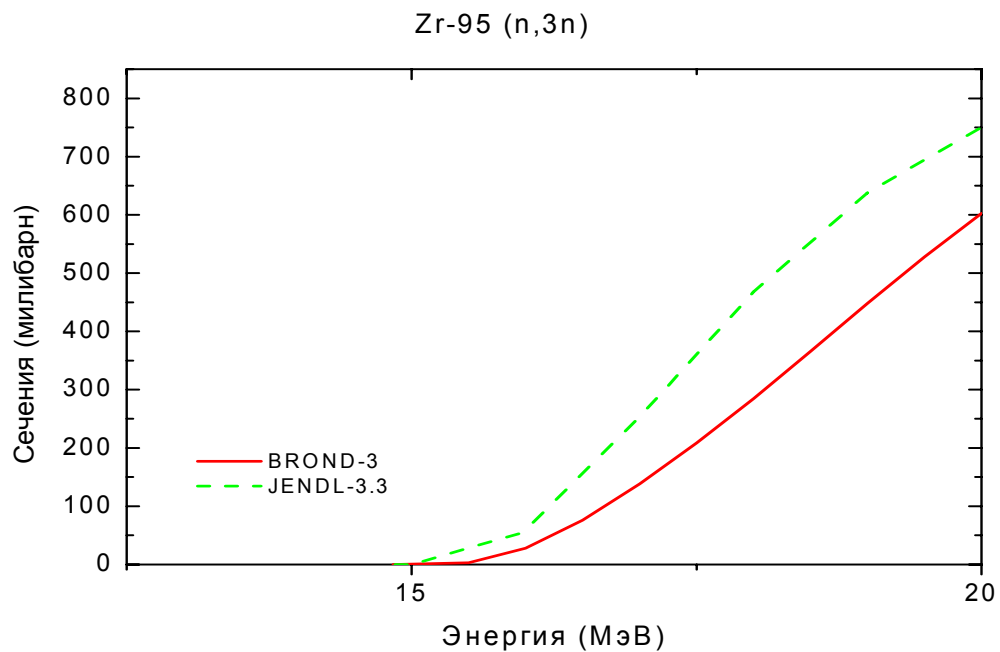


Рис. 10. Сечение реакции (n,3n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104, 105 и 107):

На рис. 11 показано сечение реакции $^{95}\text{Zr}(n,p)$. Экспериментальных данных нет. Оцененные данные библиотеки БРОНД-3 лучше согласуются с эмпирической систематикой /97Ma/. Поэтому оценке функции возбуждения из БРОНД-3 следует отдать предпочтение. На рис. 12 дано сечение реакции $^{95}\text{Zr}(n,d)$. Оценки BROND-3 и JENDL-3.3 реакции (n,d), полученные расчетным путем, существенно не согласуются, однако оценка БРОНД-3 лежит выше и лучше согласуется с эмпирической систематикой, основанной на экспериментальных данных Хайта.

Сечение реакции $^{95}\text{Zr}(n,t)$ в БРОНД-3 принято из JENDL-3.3.

На рис.13 представлено сечение реакции $^{95}\text{Zr}(n,\alpha)$. Рекомендуется оценка из БРОНД-3, поскольку она лучше согласуется с эмпирической систематикой.

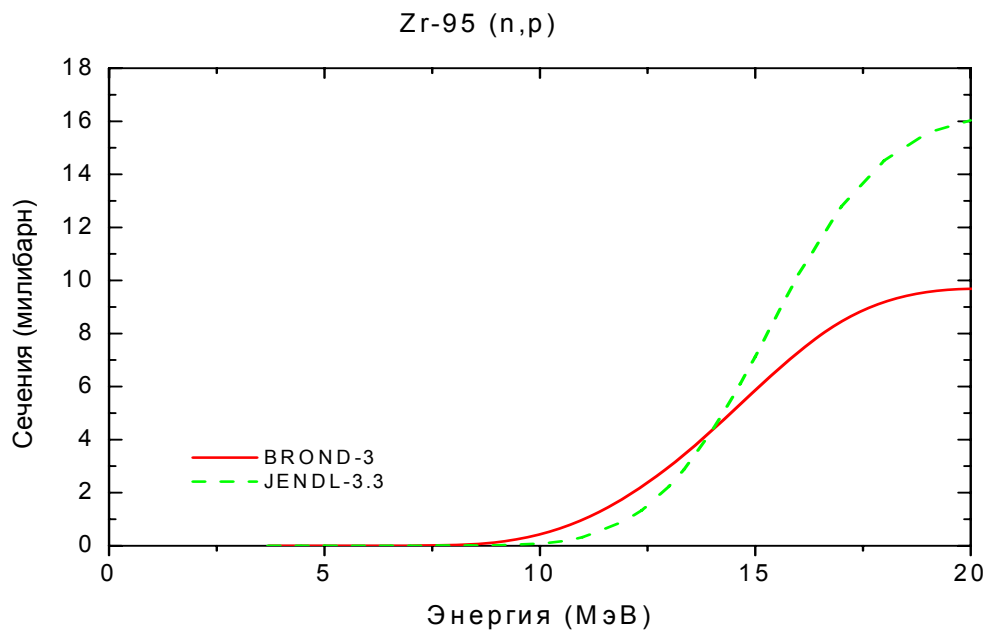


Рис. 11. Сечение реакции (n,p)

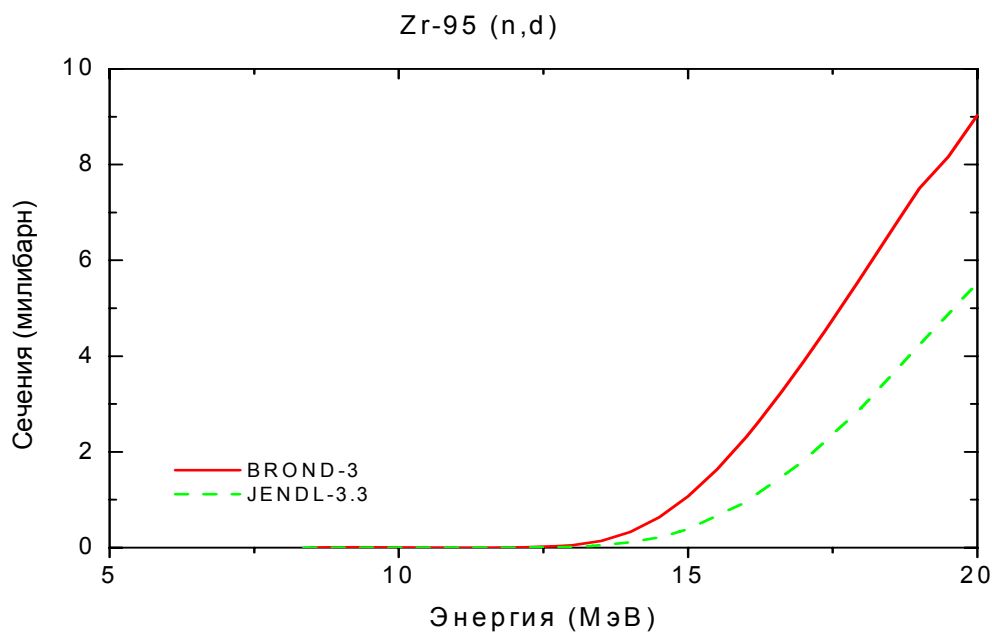


Рис.12. Сечение реакции (n,d).

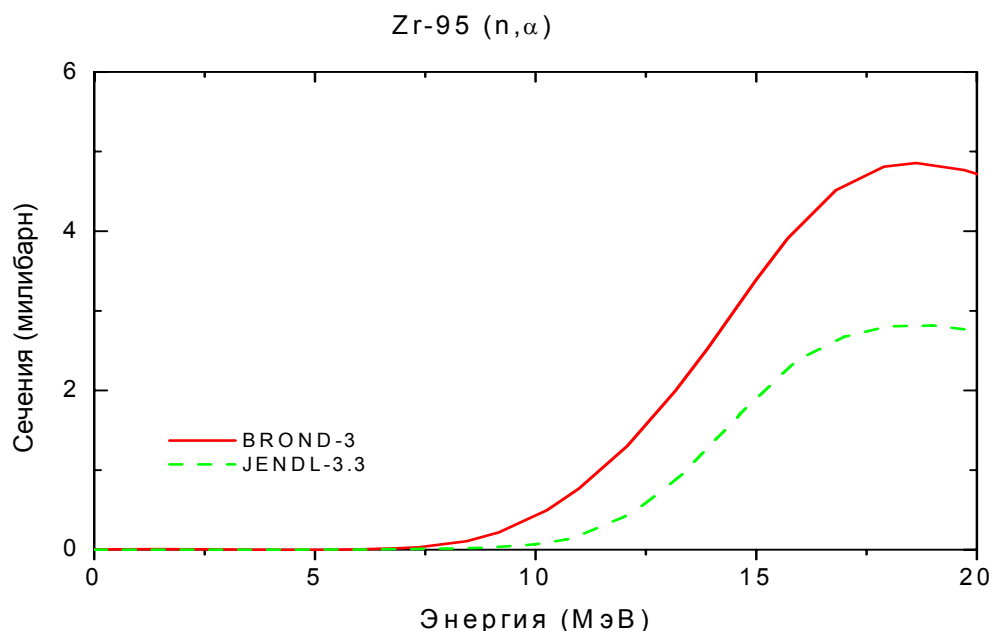


Рис. 13. Сечение реакции (n,α)

3.7. Реакции (n,nα), (n,np) (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет надежных экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. Оценки реакций (n,nα) и (n,np) в файле Zr-95 в БРОНД-3 основаны на расчетах по программе GNASH. Разногласия оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

На рис. 14 дано сечение реакции $^{95}\text{Zr}(n,np)$. Оцененные данные библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 примерно равноценны, однако зависимость из БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она несколько лучше согласуется с систематикой функций возбуждения реакции (n,np) с функциями возбуждения реакции (n,p).

На рис.15 дано сечение реакции $^{95}\text{Zr}(n,\alpha)$. В этом случае функция возбуждения из библиотеки БРОНД-3 предпочтительнее, так как она согласуется с сечением реакции (n,α) и с систематикой реакции (n,α) .

Спектры и угловые распределения нейтронов для рассматриваемых реакций представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6, и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

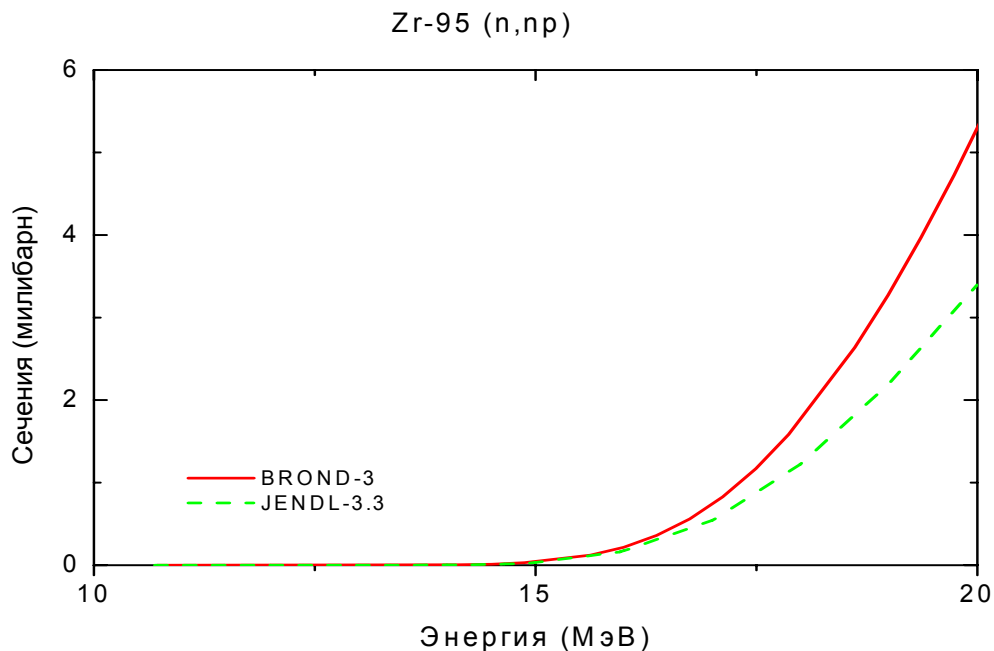


Рис. 14. Сечение реакции (n,np) .

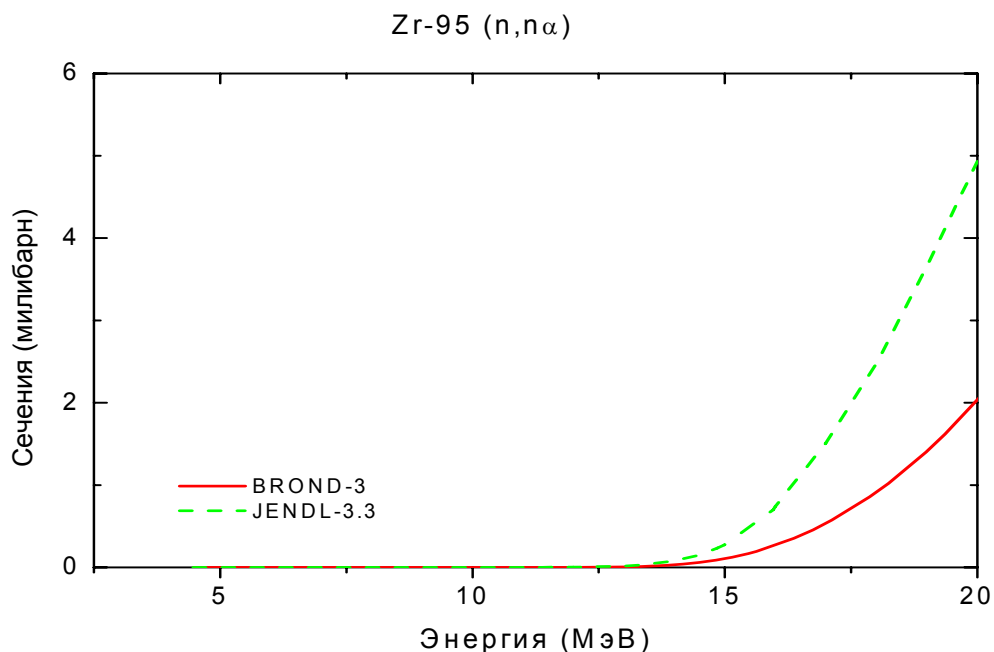


Рис. 15. Сечение реакции $(n,n\alpha)$.

MF=4. Угловые распределения вторичных нейтронов.

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gasthy/91Ig/.

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gasthy /91Ig/ и Dwuck.

MF=5 Энергетические распределения вторичных нейтронов

MT=16,17,22, 28,91 Энергетические распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3.

Они основаны на систематике работы /90Ku/

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка БРОНД-3 является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для резонансной области энергий в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn) реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить в РОСФОНД файл оцененных данных для Zr-95 из БРОНД-3.

Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

References

- 01Ko Koning,A.J., Dalaroche,J.P. Contribution to 3_th RCM of
RIPPLE-2, Vienna, 2001.
- 98Ri RIPPLE-2. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034,
Vienna, 1998.
- 97Ma Manokhin,V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin,V.N., Blokhin,A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear
Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
- 96Yo Young,P.G., Arthur,E.D., Chadwick,M.B.: In "Nuclear Reaction
Data and Nuclear Reactors" (Triest,1996). Eds. A.Gordini,
G.Reffo., World Science, Singapore, 1988,V.1,p.206.
- 95Fi Firestone,R.B. Table of Isotopes, Eight Edition,V.2,
New York,1995.
- 94Av Avrigeanu,V., Hodgson,P., Avrigeanu,M. Phys.Rev.C49(1994)2136
- 91Ig Igarasi, S. and Fukahori, T.: JAERI 1321 (1991).
- 90Ku Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
- 90Ya Yamamuro, N.: JAERI-M 90-006 (1990).
- 88Di Dietrich,S.S., Berman,B.L. Atomic data and Nuclear data
Tables 38(1988)199.
- 86Ki Kikuchi, Y. et al.: JAERI-M 86-030 (1986).
- 81Mu Mughabghab, S.F. et al.: "Neutron Cross Sections, Vol. I,
Part A", Academic Press (1981).
- 80Ar Arthur E.D. Nucl.Sci.Eng. 76(1980)137.
- 75Ho Hofman, H. et all., Ann. Phys. 90(1975)403.
- 74Lo Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
- 70Ra Raynal,J.: Report IAEA SMR-9/8(1970),p.281.

40.9. Цирконий-96

1. Общие характеристики

1.1. $Z=40$

1.2. $A=96$

1.3. $A_w=95.08436$

1.4. Содержание в естественной смеси: 2.80

1.5. Перечень нейтронных реакций:

MT	Реакция	Q, МэВ	Епор, МэВ	Ядро-продукт
51	(n,n')	-1.5816	1.5982	Zr-96
16	n,2n	-7.8538	7.9364	Zr-95
17	n3n	-14.3166	14.4654	Zr-94
22	n,n α	-4.9439	4.9959	Sr-92
28	n,np	-11.5170	11.6381	Y-95
102	n, γ	5.5780		Zr-96
103	n,p	-6.3596	6.4265	Y-96
104	n,d	-9.2924	9.3901	Y-95
105	n,t	-9.9700	10.0739	Y-94
107	n, α	0.3645		Sr-93

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

2.6 Область разрешенных резонансов.

Нейтронные сечения в области разрешенных резонансов в оценках БРОНД-2 основаны на наборе параметров нейтронных резонансов, рекомендованных Мухабхабом и др. [81Mu] на основе анализа экспериментальных данных по пропусканию [77Mu, 80Co]. Верхняя граница резонансной области принята равной 30 кэВ и радиус потенциального рассеяния - $R_0 = 6.85$ фм.

В оценке JENDL-3.3 граница области разрешенных резонансов расширена до 100 кэВ и принят радиус потенциального рассеяния $R_0 = 7.2$ фм [81Mu]. Нейтронные ширины резонансов до энергии 41.5 кэВ взяты такими же как в [81Mu], но выше этой энергии ширины увеличены в 1.79 раза, чтобы согласовать с данными [80C]. При этом радиационные ширины были приняты согласно данным [81Br]. Параметры р-резонанса с энергией 301 эВ взяты в соответствии с данными [86Sa]. Оценка JENDL-3.3 для разрешенных резонансов включена без изменений в CENDL-3 и JEFF-3.1.

В недавней оценке ENDF/B-VII Мухабхаб пересмотрел параметры отрицательного резонанса и резонанса 301 эВ, но сохранил прежние значения параметров остальных резонансов [06Mu]. Верхняя граница области разрешенных резонансов была взята 100 кэВ и принят радиус потенциального рассеяния 6.8 фм. Радиационные ширины резонансов, использованные в различных оценках, показаны на рис. 1. Ширины многих s- и р-резонансов отличаются весьма существенно, также как средних ширин резонансов.

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

Оценка	БРОНД-2	JENDL-3.3	ENDF/B-VII	Эксперимент [06Mu]
полное	5.855	6.154	5.729	
упругое	5.833	6.131	5.706	

захвата	.0229	.0228	.0228	.022±.001
резонансный интеграл захвата				
выше 0.5 эВ:	5.51	5.86	5.32	5.6±0.3

В пределах погрешности все оценки согласуются с измеренными сечениями радиационного захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла захвата, но расходятся в оценке полных сечений и сечений упругого рассеяния, для которых нет каких-либо экспериментальных данных.

2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, а также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин резонансов. Обращает на себя внимание резкое увеличение при энергии 95.93 кэВ суммы приведенных нейтронных ширин s-резонансов, которое в JENDL-3.3 почти в два раза больше, чем в ENDF/B-VII. Это различие является следствием отмеченного выше увеличения в JENDL-3.3 нейтронных ширин резонансов выше 41.5 кэВ, и на основе систематики силовых функций S0 для близлежащих изотопов циркония подобное увеличение силовой функции не кажется оправданным.

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 представлены на рис. 3. Данный анализ показывает, что в диапазоне энергий до 100 кэВ в наборах s- и p-резонансов в каждой из оценок, возможно, пропущено 1-2 резонанса. Средние расстояния между резонансами, исправленные с учетом пропуска, равны $D_0 = (11 \pm 3)$ кэВ и $D_1 = (4.1 \pm .8)$ кэВ. Отношение $D_0 / D_1 = 2.44 \pm 0.65$ не противоречит статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, но погрешность определения D_0 достаточно велика ввиду малого числа резонансов. Для нейтронных силовых функций в рамках данного анализа получены значения $S_0 = (0.40 \pm 0.12) \cdot 10^{-4}$ и $S_1 = (10 \pm 2) \cdot 10^{-4}$ для s- и p-резонансов, соответственно.

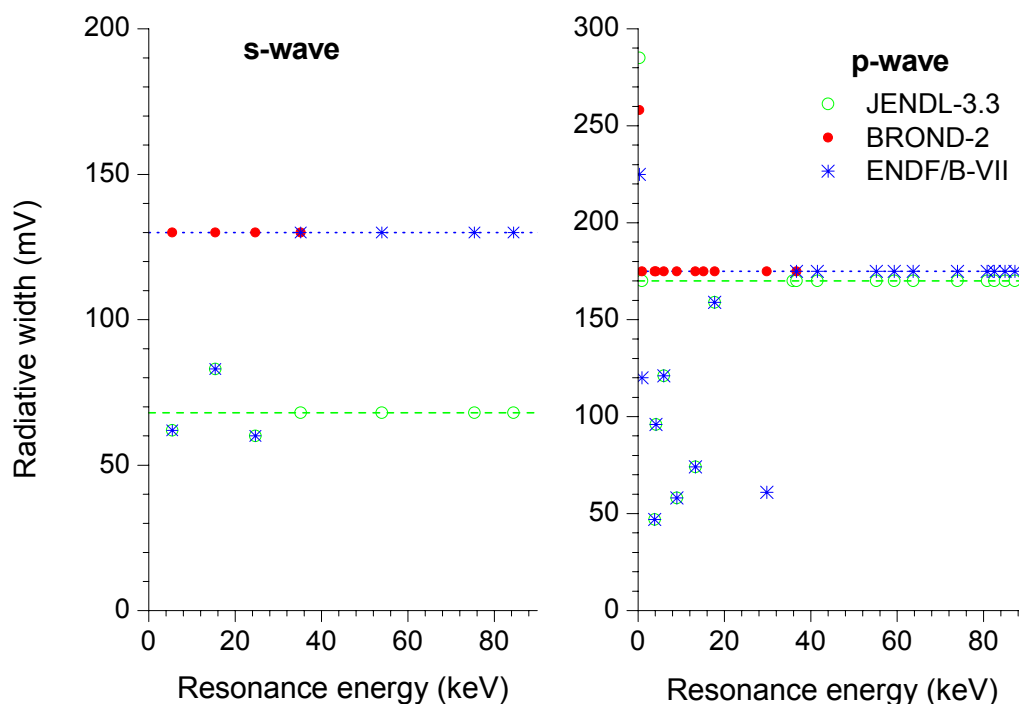


Рис. 1. Радиационные ширины разрешенных резонансов в различных оценках, пунктиром показаны средние значения ширины, принятые для резонансов с неизвестными ширинами

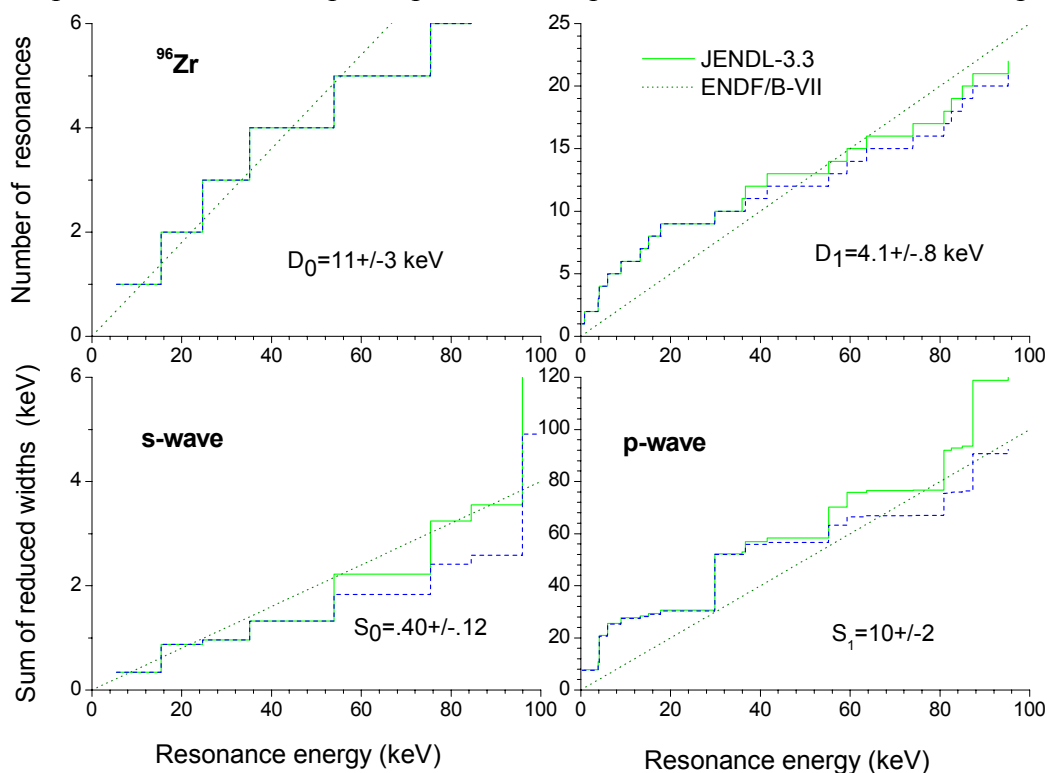


Рис. 2. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивной суммы приведенных нейтронных ширин в оценках БРОНД-2 и JENDL-3.3

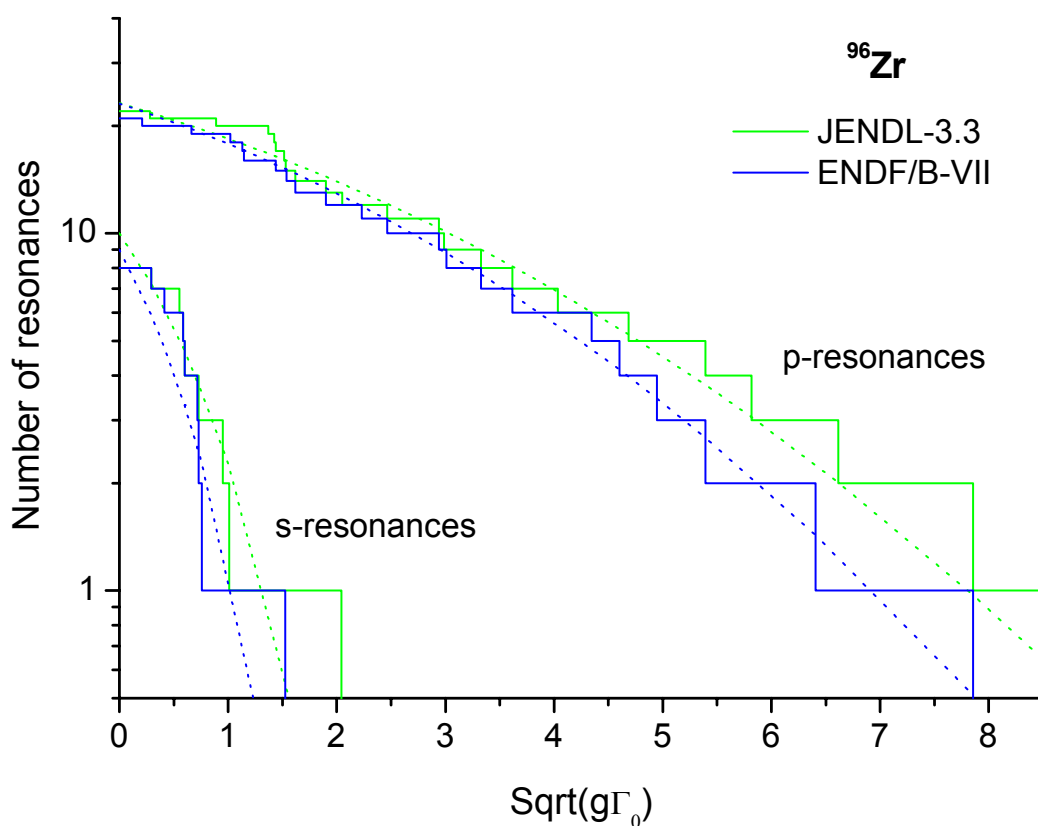


Рис. 2. Анализ пропуска s- и p-резонансов. Теоретически ожидаемые распределения показаны пунктиром.

2.3. Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в БРОНД-2 принята равной 200 кэВ, и в рассмотрение включены зависящие от энергии средние параметры нейтронных резонансов для s-, p- и d-волн. При этом нейтронные силовые функции получены на основе расчетов в рамках оптической модели, и среднее расстояние между уровнями определено таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов [63Ma]. В соответствии с форматом ENDF/B для расчета нейтронных сечений в этой области должна быть использована одноуровневая формула Брейта-Вигнера.

В JENDL-3.3 и ENDF/B-VII нет области неразрешенных резонансов.

На рис. 4 и 5 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Существенные отличия между оценками проявляются лишь в межрезонансных минимумах, а описании среднего сечения радиационного захвата нейтронов при энергиях выше 50-100 МэВ. Последнее различие обусловлено нормировкой оценки БРОНД-2 на экспериментальные данные [63Ma], тогда как JENDL-3.3 и ENDF/B-VII ориентированы на более поздние данные [82Wy], которые соответствуют более низким сечениям захвата нейтронов.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что основные отличия между оценками БРОНД-2, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII относятся к описанию сечений рассеяния тепловых нейтронов, для которых нет каких-либо экспериментальных данных, а также области энергий 30-200 кэВ, для которой в БРОНД-2, по-видимому, завышено сечение захвата нейтронов.

Учитывая отмеченные выше недостатки оценок БРОНД-2 и JENDL-3.3 для разрешенных резонансов, в новой оценке БРОНД-3 была принята оценка ENDF/B-VII во всем диапазоне энергий нейтронов до 100 кэВ. Без дополнительных экспериментальных данных в настоящее время не видно возможностей для уточнения этой оценки.

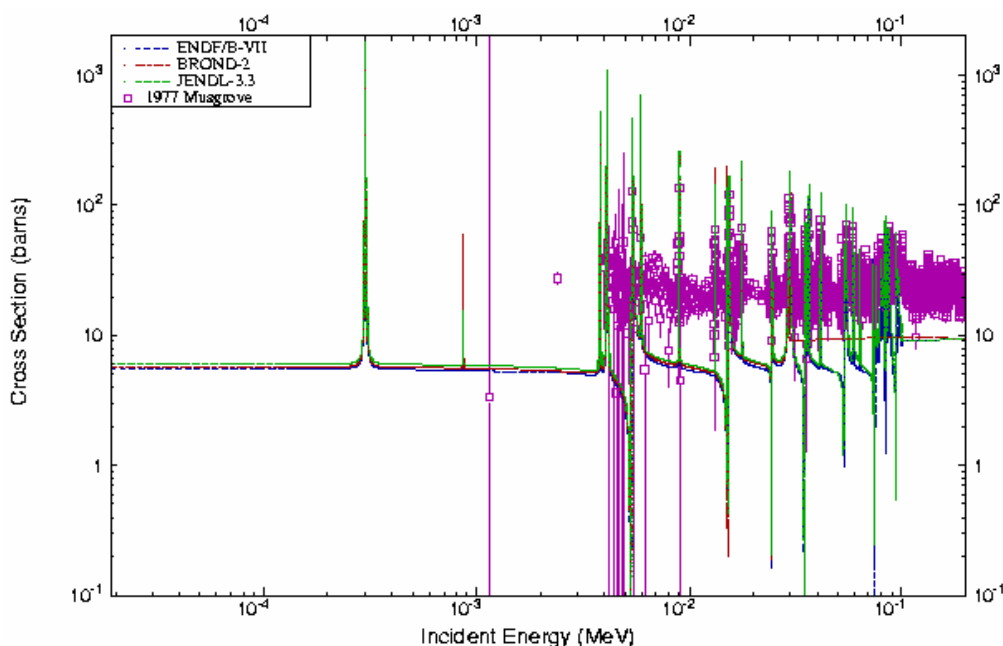


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

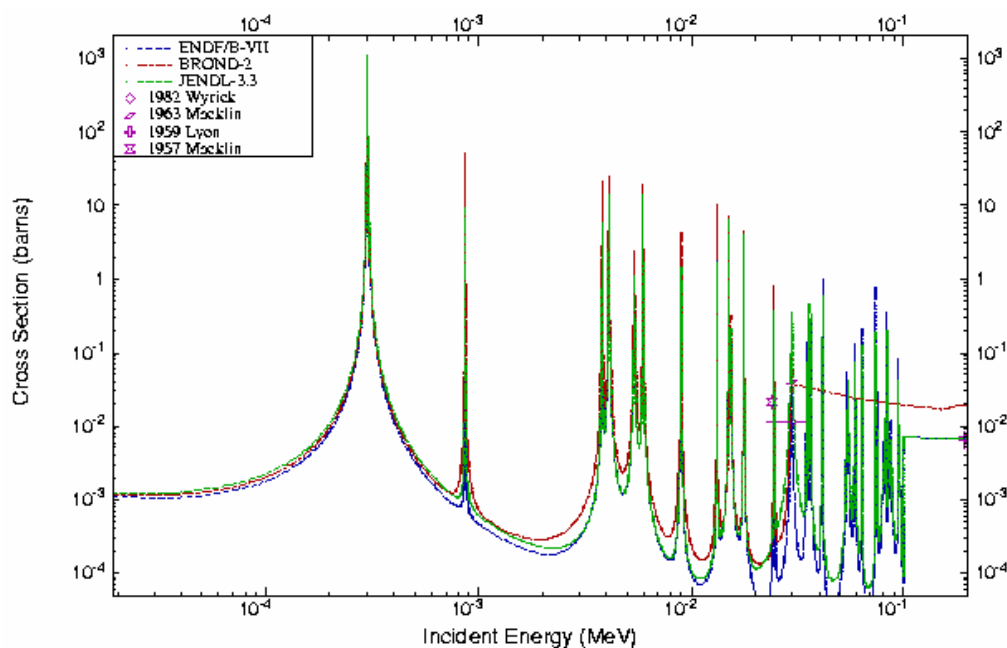


Рис. 5. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных и неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

3. Нейтронные сечения вне резонансной области.

В данном разделе проведено сравнение оцененных данных библиотек БРОНД-3, ENDF/B-VII, и JENDL-3.3 вне резонансной области (0.01-20 МэВ). Сравнение с данными библиотеки JEFF-3.1 не проводилось, поскольку для изотопов циркония приняты данные библиотеки JENDL-3.3.

Ниже дано сравнение указанных библиотек совместно с кратким описанием оценки БРОНД-3. Это связано с тем, что авторы оценки БРОНД-3 по сравнению с оценками других авторов применили дополнительные эмпирические систематики и более корректные теоретические расчеты. Оценка всех сечений изотопов циркония выполнена в едином согласованном подходе. В частности, был оценен вклад прямых процессов в сечение неупругого рассеяния, использовались систематические тенденции в поведении функций возбуждения пороговых реакций в зависимости массового числа, применена несферическая оптическая модель.

Нейтронные сечения в БРОНД-3 в диапазоне 0.1 – 20 МэВ были рассчитаны с помощью модифицированной программы GNASH /96Yo/ с учетом флуктуации нейтронных ширин. Для нейтронов была использована модель сильной связи каналов (программа ECIS /70Ra/) с прямым возбуждением низколежащих уровней 2+ и 3-.

Оптические параметры для нейтронов:

Глубина потенциала (МэВ)	Диапазон энергии (МэВ)	Геометрия(фм)
$V_f=49.0-0.28E$	$0<E<20$	$R_f=1.24 \quad a=0.62$
$W_d=2.38+0.21E$	$0<E<10$	$R_d=1.26 \quad a=0.58$
$W_d=5.39-0.091E$	$10<E<20$	
$W_v=0.0$	$0<E<10.9$	
$W_v=-0.0994+0.091E$	$0.9<E<20$	$R_v=1.24 \quad a=0.62$
$V_{so}=6.2$	$0<E<20$	$R_{so}=1.12 \quad a=0.47$

Оптические параметры для протонов, дейтронов и альфа-частиц приняты из работ /01Ko/, /74Lo/ и /94Av/, соответственно.

Гамма-переходы рассчитывались для E1, M2 и E2 -силовых функций. Параметры гигантского резонанса E1 были взяты из работы /88Di/. Полная силовая функция была

нормализована к имеющимся экспериментальным данным по радиационной ширине и D0 для нейтронного резонанса. Параметры дискретных уровней взяты из работы /95Fi/.

3.1. Полные сечения (MT=1).

На рис. 4 дано полное сечение Zr-96 вне резонансной области энергий нейтронов. В области до 0.5 МэВ имеются экспериментальные данные, но они лежат очень высоко, при более высоких энергиях экспериментальных данных нет, оценки БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII близки, и нет оснований отдать предпочтение какой-либо одной из них.

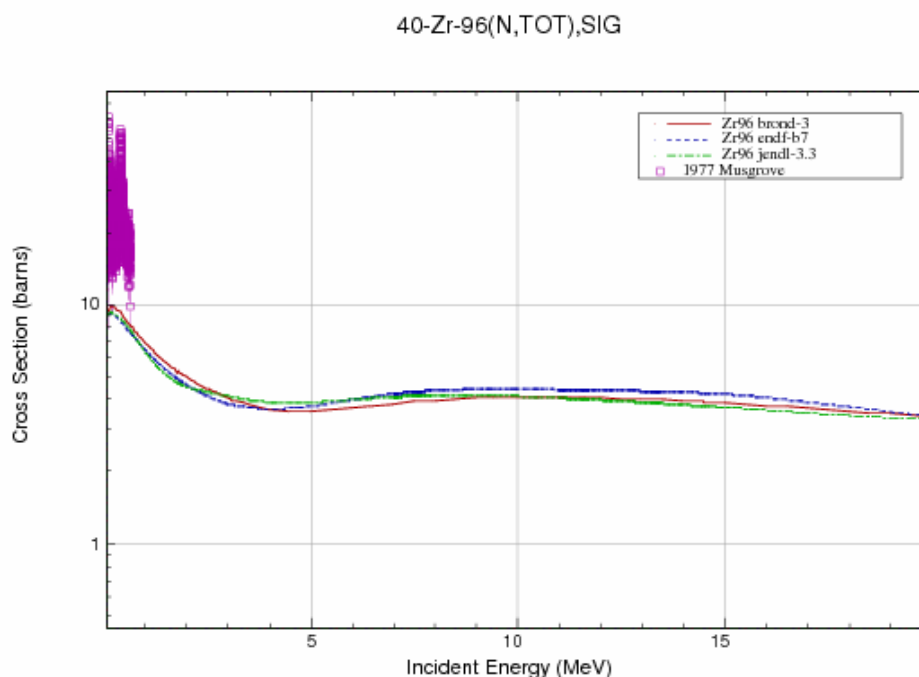


Рис. 4. Полное сечение в области энергий нейтронов 0.1-20 МэВ.

3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 5 показано сравнение различных оценок упругого рассеяния на изотопе Zr-96. Экспериментальных данных нет. Может быть рекомендована оценка BROND-3.

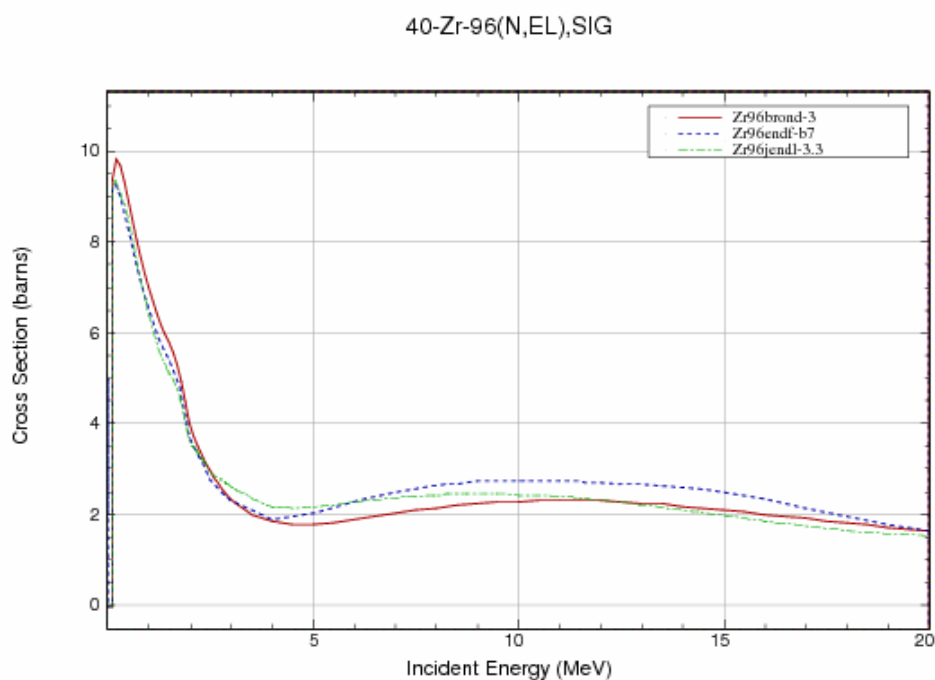


Рис.5. Сечение упругого рассеяния в области 0.01-20 МэВ.

3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4, 51-63).

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

Ниже приведена схема уровней, для которых рассчитаны парциальные сечения неупругого рассеяния. Уровню под номером 1 соответствует секция MT=51 в формате ENDF-6. Начиная с энергии 3.0900 МэВ уровни моделируются непрерывным спектром.

Схема уровней:

N	Энергия уровня, МэВ	Спин	Переход	Энергия гамма- кванта, МэВ	Вероятность перехода, %
0	0.00000				
1	1.58160	0+	1 → 0	1.58160	100
2	1.75050	2+	2 → 0	1.75050	100
3	1.89720	3-	3 → 0 3 → 2	1.89720	15.25 84.75
4	2.22580	2+	4 → 0 4 → 1 4 → 2 4 → 3	2.22590 0.64418 0.47533 0.32875	50.25 14.10 28.60 7.05
5	2.43880	3+	5 → 2	0.68825	100
6	2.66880	2+	6 → 2 6 → 3 6 → 4	0.91861 0.77160 0.44293	70.7 24.8 4.5
7	2.69520	0+	7 → 0	2.69400	1.0

			7 → 1	1.11370	1.0
			7 → 4	0.46933	98.0
8	2.75000	4+	8 → 2	0.99950	100
9	2.78160	3+	9 → 3	0.88400	100
10	2.85740	4+	10 → 2	1.10688	73.5
			10 → 3	0.96150	10.9
			10 → 4	0.63163	15.6
11	2.92460	0+	11 → 2	1.17404	71.4
			11 → 4	0.69972	28.6
12	3.03900	3-	12 → 0	3.03900	100
13	3.08240	4+	13 → 2	1.33180	7.6
			13 → 3	1.18519	74.7
			13 → 4	0.85662	4.7
			13 → 5	0.64392	5.3
			13 → 10	0.22440	7.7
14	3.09000				

Экспериментальных данных по интегральному сечению неупругого рассеяния нет. Оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII рассчитаны на основе сферической оптической моделей ядерных реакций и совпадают. Данные BROND-3 лежат существенно выше, что объясняется использованием другой программы для расчета (модифицированной программы GNASH) и параметров несферической оптической модели. Учитывая более корректный подход в расчетах по программе GNASH интегральное сечение неупругого рассеяния из библиотеки BROND-3 предпочтительнее. На рис. 4 показана функция возбуждения неупругого рассеяния на первом уровне. Экспериментальных данных нет.

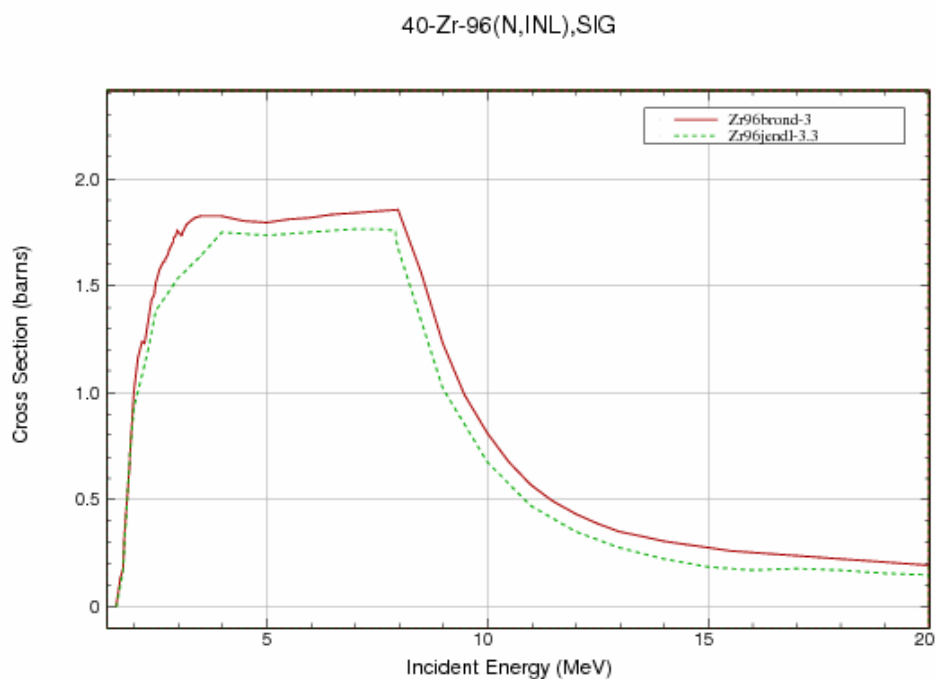


Рис.6. Интегральное сечение неупругого рассеяния Zr-96.

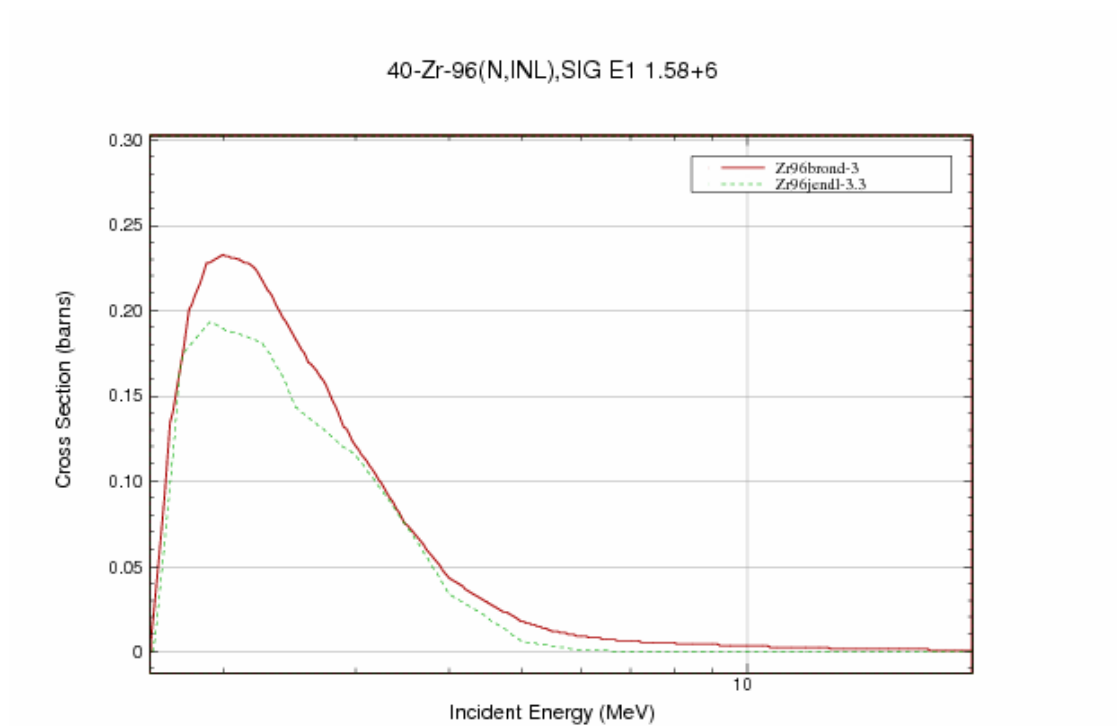


Рис. 7. Функция возбуждения первого уровня Zr-96 с энергией 1.5816 МэВ.

3.4. Сечение радиационного захвата (MT=102).

В области энергий 0.1-20 МэВ сечение радиационного захвата в файле Zr-96 библиотеки БРОНД-3 рассчитано с учетом полупрямого механизма в области гигантского резонанса. Расчеты согласованы с экспериментальными данными работы /4/. В области выше 5-8 МэВ данные BROND-3 и JENDL-3.3 различаются, однако кривая БРОНД-3 выглядит предпочтительнее. Данные ENDF/B-VII и JENDL-3.3 при энергиях выше 3 МэВ совпадают. Рекомендуется сечение BROND-3, поскольку оно получено согласовано с рекомендованными выше сечениями для полного, упругого и неупругого рассеяния.

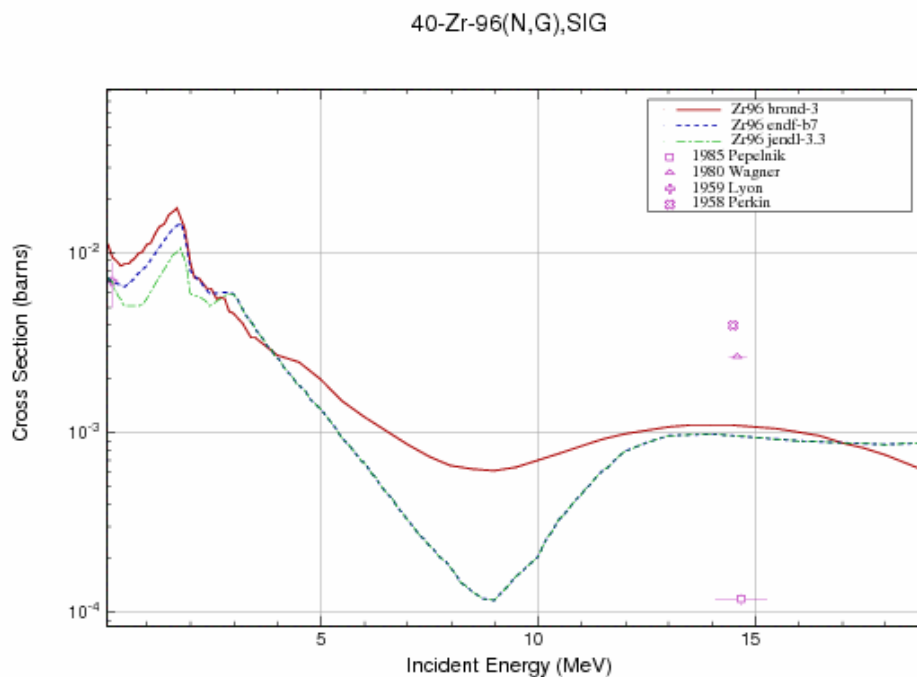


Рис. 8. Сечение радиационного захвата в области 0.1-20 МэВ.

3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

На рис. 9 представлено сечение реакции (n,2n) библиотек JENDL-3.3 и BROND-3 в сравнении с экспериментальными данными. Как видно, обе оценки близки и согласуются с эмпирической систематикой функций возбуждения указанной реакции [97Ma]. Могут быть рекомендованы данные обеих библиотек. Оценки ENDF/B-VII и JENDL-3.3 совпадают. Однако рекомендуется оценка БРОНД-3, поскольку в области максимума она лучше согласуется с систематикой сечений. Функции возбуждения реакции (n,3n) библиотек JENDL-3.3 и БРОНД-3 равноценны. Оценки ENDF/B-VII и JENDL-3.3 совпадают.

Спектры и угловые распределения нейтронов в обеих оценках представлены как дважды дифференциальные сечения в секции MF=6 и в них учтен повышенный выход нейтронов под передними углами, обусловленный предравновесными процессами.

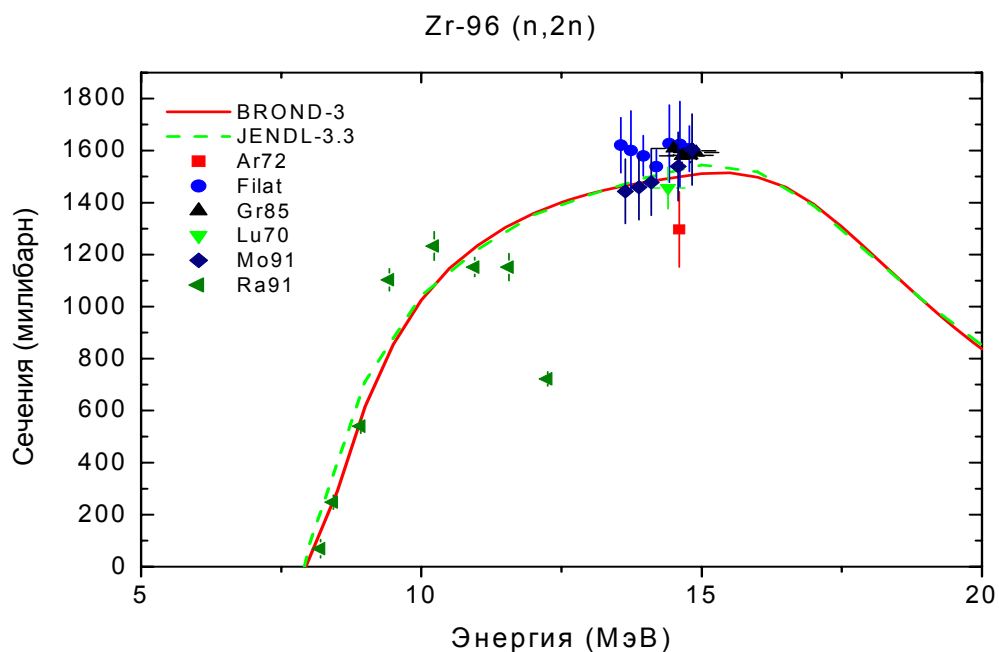


Рис. 9. Сечение реакции (n,2n).

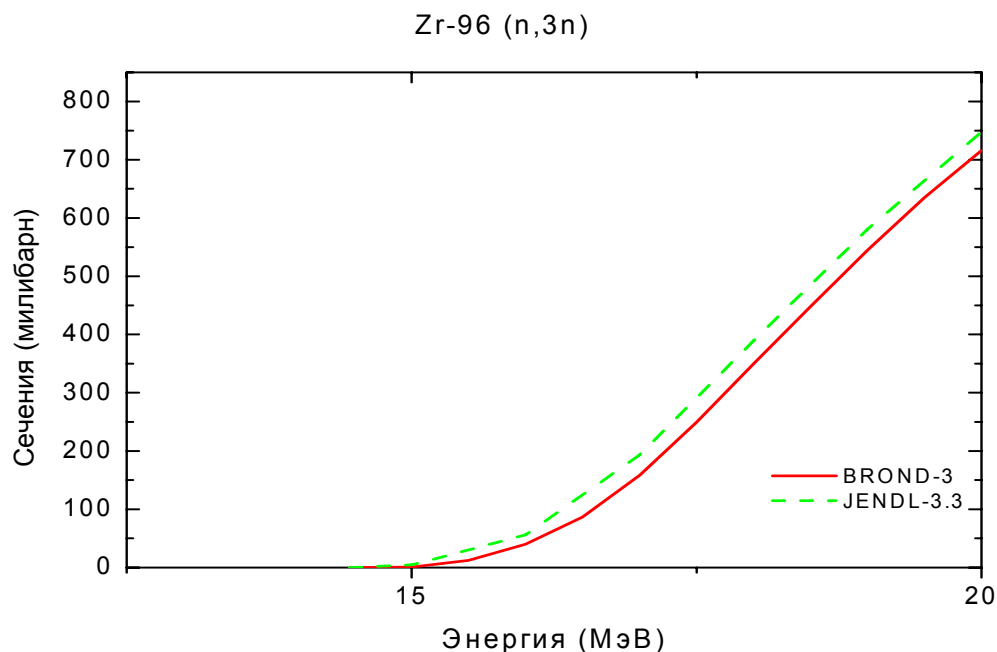


Рис.10. Сечение реакции (n,3 n).

3.6. Реакции (n,p), (n,d), (n,t) и (n, α) (MT=103, 104,105 и 107):

На рис. 11 показано сечение реакции $^{96}\text{Zr}(n,p)$. Имеется только одна экспериментальная точка для реакции (n,xp). Оцененные данные библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VII совпадают. Оценке функции возбуждения из БРОНД-3 следует отдать предпочтение, она согласуется с систематикой сечений реакции (n,p) /97Ma/.

На рис. 12 дано сечение реакции $^{96}\text{Zr}(n,d)$. Данные библиотеки ENDF/B-VII приняты из библиотеки JENDL-3.3. Оценки BROND-3 и JENDL-3.3 реакции (n,d), полученные расчетным путем, существенно не согласуются между собой. Оценка БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лежит выше и лучше соответствует систематическому поведению этой реакции.

Сечение реакции $^{96}\text{Zr}(n,t)$ в библиотеках BROND-3 и ENDF/B-VII принято из JENDL-3.3.

На рис.14 представлено сечение реакции $^{96}\text{Zr}(n,a)$. Рекомендуется оценка из БРОНД-3, поскольку она лучше согласуется с экспериментальными данными и с систематикой сечений.

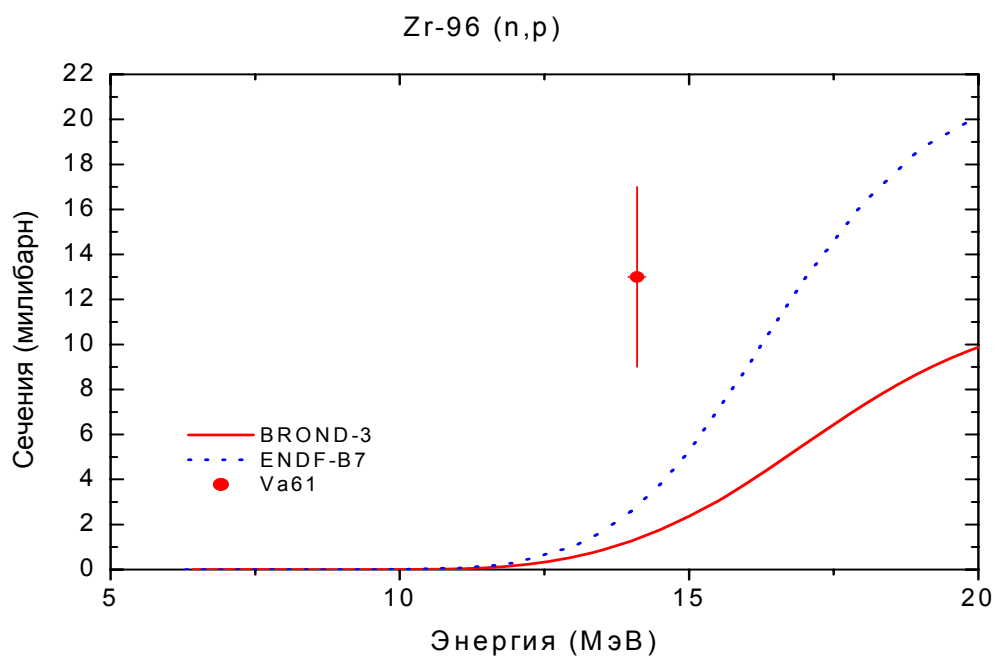


Рис. 11. Сечение реакции (n,p)

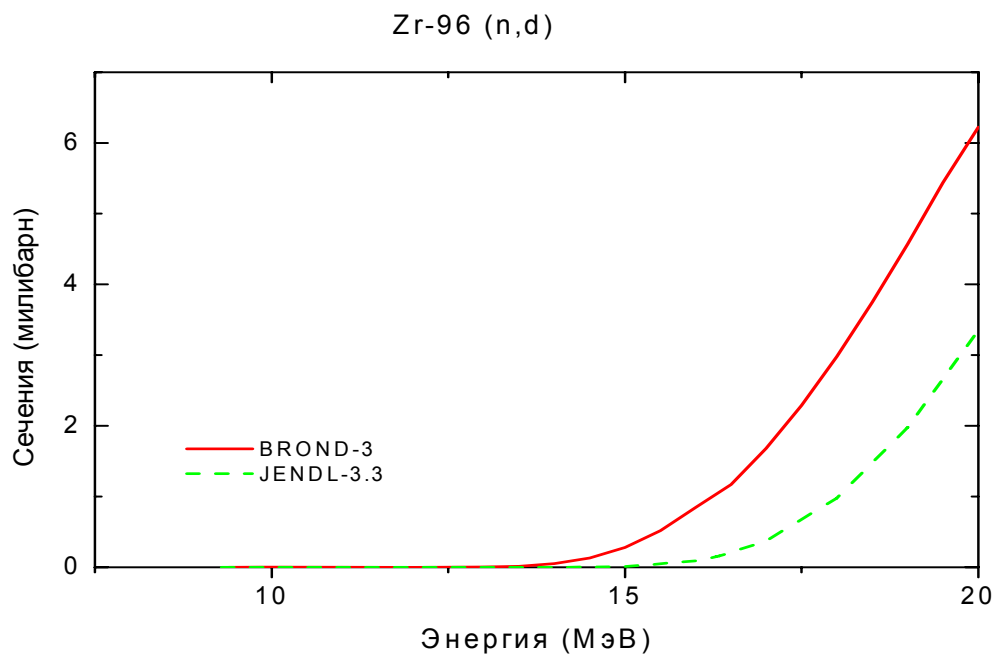


Рис.12. Сечение реакции (n,d).

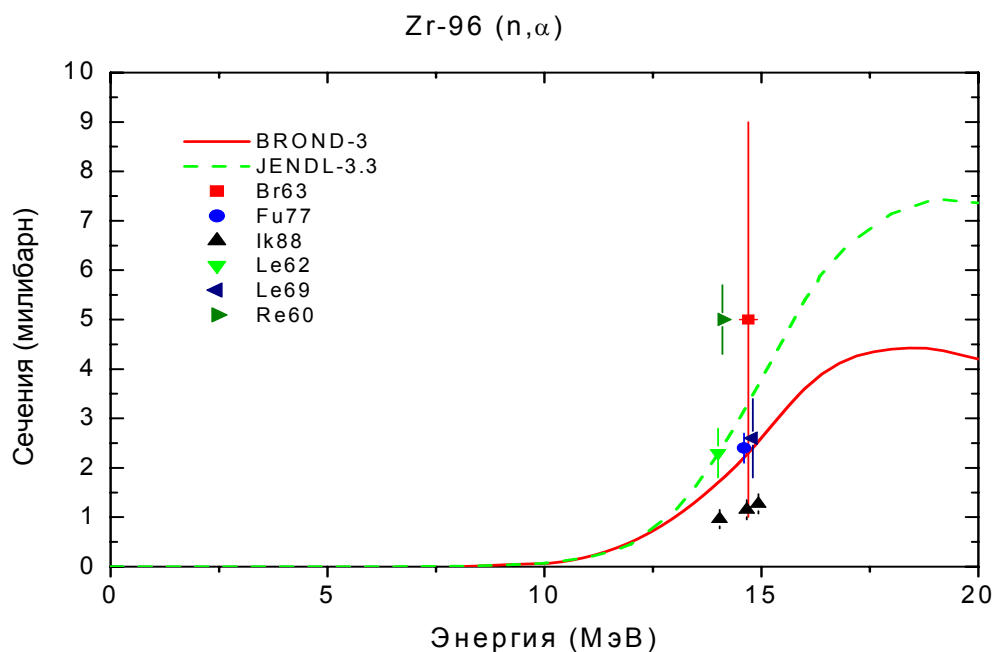


Рис. 14. Сечение реакции (n, α)

3.7. Реакции $(n, n\alpha)$, (n, np) (MT=22, 28):

В большинстве случаев для подобных реакций нет надежных экспериментальных данных, и их оценка, обычно, опирается на оптико-статистические расчеты соответствующих сечений. Оценки реакций $(n, n\alpha)$ и (n, np) в файле Zr-96 в БРОНД-3 основаны на расчетах по программе GNASH. Разногласия оценок БРОНД-3 и JENDL-3.3 обусловлены различием используемых параметров теоретических моделей.

На рис. 15 дано сечение реакции $^{92}\text{Zr-96}(n, np)$. Оцененные данные библиотек БРОНД-3 и JENDL-3.3 примерно равноценны, однако зависимость из БРОНД-3 предпочтительнее, поскольку она лучше согласуется с систематикой функций возбуждения реакции $(n, 2n)$.

На рис. 16 дано сечение реакции $^{92}\text{Zr-96}(n, na)$. Рекомендуется функция возбуждения из библиотеки БРОНД-3, так как она согласуется с сечением реакции (n, α) и с систематикой реакции (n, na) .

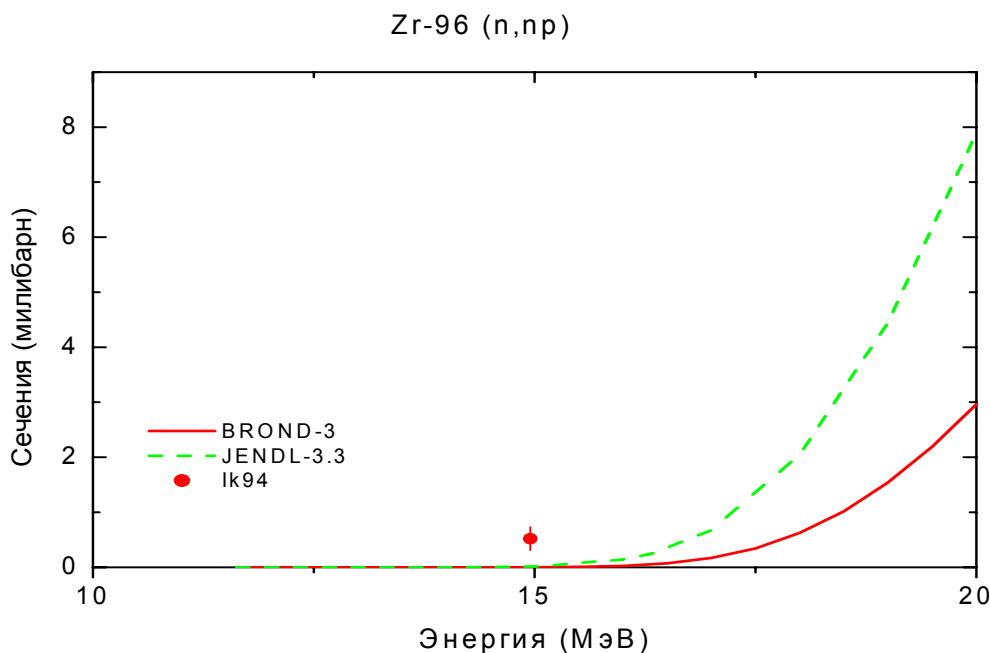


Рис. 15. Сечение реакции (n,np).

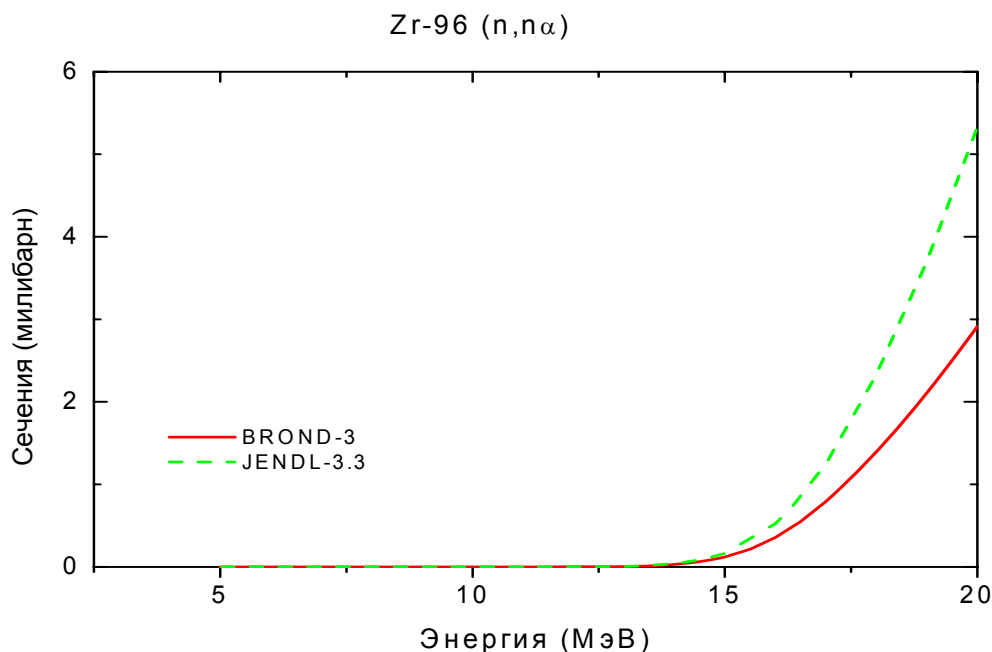


Рис. 16. Сечение реакции (n,n α).

MF=4. Угловые распределения вторичных нейтронов.

MT=2 Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/ 91Ig/.

MT=51-66 Угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программам Gashy /91Ig/ и Dwuck.

MF=6 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

MT=16,17,22, 28,91 Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов в БРОНД-3 приняты из JENDL-3.3. Они основаны на систематике работы /90Ku/.

MF=12 Множественность образования гамма-лучей

MT=16,17,22, 28, 51-63,91,103,102 107 . Множественность образования гамма-лучей в БРОНД-3 рассчитана по программе GNASH / 96Yo/

MF=14 Угловые распределения гамма-лучей

MT=16,17,22, 28, 51-63,91,103, 107 Угловые распределения гамма-лучей неупругого взаимодействия

MT=102 Угловые распределения гамма-лучей радиационного захвата приняты из JENDL-3.3 и предполагаются изотропными.

MF=15 Непрерывные спектры гамма-лучей

MT=16,17,22, 28, ,91,103, 107 Непрерывные спектры фотонов неупругого взаимодействия приняты из JENDL-3.3, рассчитаны по программе EGNASH /90Ya/.

MT=102 Непрерывные спектры фотонов радиационного захвата приняты из JENDL-3.3, где они рассчитаны по программе Gashy/91Ig/

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, оценка БРОНД-3 является оптимальной для всей совокупности нейтронных сечений. Для области разрешенных и неразрешенных резонансов в БРОНД-3 принята оценка JENDL-3.3. Оценка JENDL-3.3 принята также для угловых распределений и спектров вторичных нейтронов, но интегральные сечения неупругого рассеяния и (n,xn)

реакций уточнены на основе согласованных статистических расчетов. По-видимому, существенно уточнены также сечения всех пороговых реакций. Без новых экспериментальных данных нет возможности существенно улучшить оценки нейтронных сечений, включенные в БРОНД-3.

Целесообразно включить в РОСФОНД файл оцененных данных для Zr-96 из БРОНД-3.

Авторы отбора файла

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

References

- 06Mu Mughabghab, S. Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY, 2006.
- 03Mu.. Mughabghab, S. Report INDC(NDS)-440, 2003.
- 01Ko Koning, A.J., Dalaroche, J.P. Contribution to 3_{rd} RCM of RIPL-2, Vienna, 2001.
- 98Ri RIPPLE-2. Reference Input Parameter Library, IAEA-TECDOC-1034, Vienna, 1998.
- 97Ma Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
- 96Yo Young, P.G., Arthur, E.D., Chadwick, M.B.: In "Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors" (Trieste, 1996). Eds. A. Gordini, G. Reffo., World Science, Singapore, 1988, V.1, p.206.
- 95Fi Firestone, R.B. Table of Isotopes, Eight Edition, V.2, New York, 1995.
- 94Av Avrigeanu, V., Hodgson, P., Avrigeanu, M. Phys.Rev.C49(1994)2136
- 91Ig Igarasi, S. and Fukahori, T.: JAERI 1321 (1991).
- 90Ku Kumabe, I. et al.: Nucl. Sci. Eng., 104, 280 (1990).
- 90Ya Yamamuro, N.: JAERI-M 90-006 (1990).
- 88Di Dietrich, S.S., Berman, B.L. Atomic data and Nuclear Data Tables 38(1988)199.
- 86Ki Kikuchi, Y. et al.: JAERI-M 86-030 (1986).
- 86Sa Salah, M.M., et al.: "Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Basic and Applied Science, Santa Fe 1985", Vol. 1, 593 (1986).
- 82Wy Wyrick, J.M., Poenitz, W.P., Report ANL-83-4, p. 196 (1982).
- 81Br Brusegan, A., et al.: "Proc. 4th Int. Symp. on Neutron-Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, Grenoble 1981", 406, the Institute of Physics, London (1982).
- 81Mu Mughabghab, S.F. et al.: "Neutron Cross Sections, Vol. I, Part A", Academic Press (1981).
- 80Ar Arthur E.D. Nucl.Sci.Eng. 76(1980)137.
- 80Co Coceva, C., et al.: "Proc. Int. Conf. on Neutron Cross Sections for Technology, Knoxville 1979", 319 (1980).
- 77Mu Musgrove, A.R. de L., et al.: AAEC/E-415 (1977).
- 75Ho Hofman, H. et al., Ann. Phys. 90(1975)403.
- 74Lo Lohr, J.M. and Haerberli, W.: Nucl. Phys. A232, 381 (1974).
- 70Ra Raynal, J.: Report IAEA SMR-9/8(1970), p.281.
- 63Ma Macklin, R.L., Inada, T., Gibbons, J.H, Bull. APS, v. 8, p. 81(1963).