

11.НАТРИЙ

Природный натрий содержит только один изотоп – натрий-23.

В реакторах с натриевым охлаждением за счет реакции (n,2n) нарабатывается долгоживущий (2.6 года) натрий-22. Содержание этого радионуклида в натрии определяется не только его накоплением, но и выгоранием. Данные для этого радионуклида также помещены в РОСФОНД.

11.1. Натрий-22

Имеется только одна полная оценка нейтронных данных, пригодная для решения задач расчета переноса нейтронов, выполненная в 1985 г. и включенная в последнюю версию европейской библиотеки оцененных ядерных данных JEFF-3.1. Кроме того, существуют две оценки отдельных сечений из активационных библиотек ADL-3 и EAF-99. В дальнейшем будет проведено сравнение лишь тех парциальных сечений, которые имеет смысл сравнивать. Так, например, необходимости в сравнении оценок сечения полного взаимодействия, сечения упругого рассеяния и сечений на отдельных уровнях неупругого рассеяния нет, поскольку существует лишь одна оценка этих сечений.

1. Общие характеристики

1.1. $Z=11$

1.2. $A=21.994\ 436\ 425$

1.3. $A_{wr}=21.805\ 493\ 660$

1.4. Содержание в естественной смеси: - отсутствует

1.5. Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}$, МэВ	Ядро-продукт *)
4	(n,n')	-0.58300	0.60974	
16	(n,2n)	-10.5840	11.0696	Na-21 (22.5s)
22	(n,na)	-10.5180	11.0000	F-18 (1.83h)
28	(n,np)	-6.69310	7.0000	Ne-21
32	(n,nd)	-11.2760	11.7930	Ne-20
102	(n, γ)	12.4200	0.0	Na-23
103	(n,p)	3.62500	0.0	Ne-22
104	(n,d)	-3.82460	4.0000	Ne-21
105	(n,t)	-5.01790	5.24800	Ne-20
107	(n,a)	1.95000	0.0	F-19
108	(n,2a)	-2.06400	2.1590	N-15
111	(n,2p)	-11.6410	12.1750	F-21(4.158s)

1.6. Схема уровней:

MT	LEVEL ENERGY (MEV)	SPIN-PARITY
	0.0	3+
51	0.58303	1+
52	0.65700	0+
53	0.89089	4+
54	1.52806	5+
55	1.9369	1+
56	1.9518	2+
57	1.9838	3+
58	2.2115	1-
59	2.5715	2-
60	2.9689	3+
61	3.0596	2+
91 (cont)	3.3647	

1.7. Радиоактивность: тип распада: β^+ .

1.8. $T_{1/2}$ – 2.6019 лет.

1.9. Средняя энергия позитронов – 195.7 кэВ,

1.10. Средняя энергия распада γ – квантов – 2198.9 кэВ, из которых 1274.5 кэВ приходится на энергию γ – квантов перехода с 1-го уровня ^{22}Ne , остальное – энергия фотонов, возникающих при аннигиляции позитронов.

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 3^+$;

2.2. Радиус рассеяния: $R = 0.570 \cdot 10^{-12}$ см.

2.3. Область резонансных энергий.

Имеется только одна оценка резонансных параметров, используемая в библиотеке JEFF-3.1 (JEFF-3.0 <- JEF-2.2 <- RCN-2 (1985)).

Резонансная область распространяется до 15 кэВ. В ней содержится только один резонанс, параметры которого определены по данным Гледенова (1982), не содержащихся в базе данных EXFOR.

Область неразрешенных резонансов простирается от 15 кэВ до 100 кэВ. Силовые функции приняты из расчетов по оптической модели для натрия-23. Среднее расстояние между уровнями принято равным 30.8 кэВ. Захватные ширины для s-резонансов равны 1 эВ; для p-резонансов – 5.4 эВ. В файле MF=3 содержатся «плавные подложки» к сечению упругого рассеяния и радиационного захвата, имеющие отрицательные знаки и составляющие при энергии 0.0253 эВ -10.86 и -39.9 б соответственно. Сечения реакций (n,p) и (n, α) целиком определяются «плавными подложками», которые в этих случаях, разумеется положительны. Подложка к полному сечению, основной вклад в который дает реакция (n,p), также положительна.

3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)

Энергетические зависимости сечений реакций взаимодействия нейтронов с натрием-22 показаны на рис. 1 и 2.

Поскольку имеется только одна полная оценка нейтронных данных, для задач расчета переноса нейтронов и две оценки отдельных сечений из активационных библиотек ADL-3 и EAF-99, то в дальнейшем будет проведено сравнение лишь тех

парциальных сечений, которые имеет смысл сравнивать. Так, например, необходимости в сравнении сечения полного взаимодействия, сечения упругого рассеяния и сечений на отдельных уровнях неупругого рассеяния нет, поскольку они присутствуют в единственном исполнении.

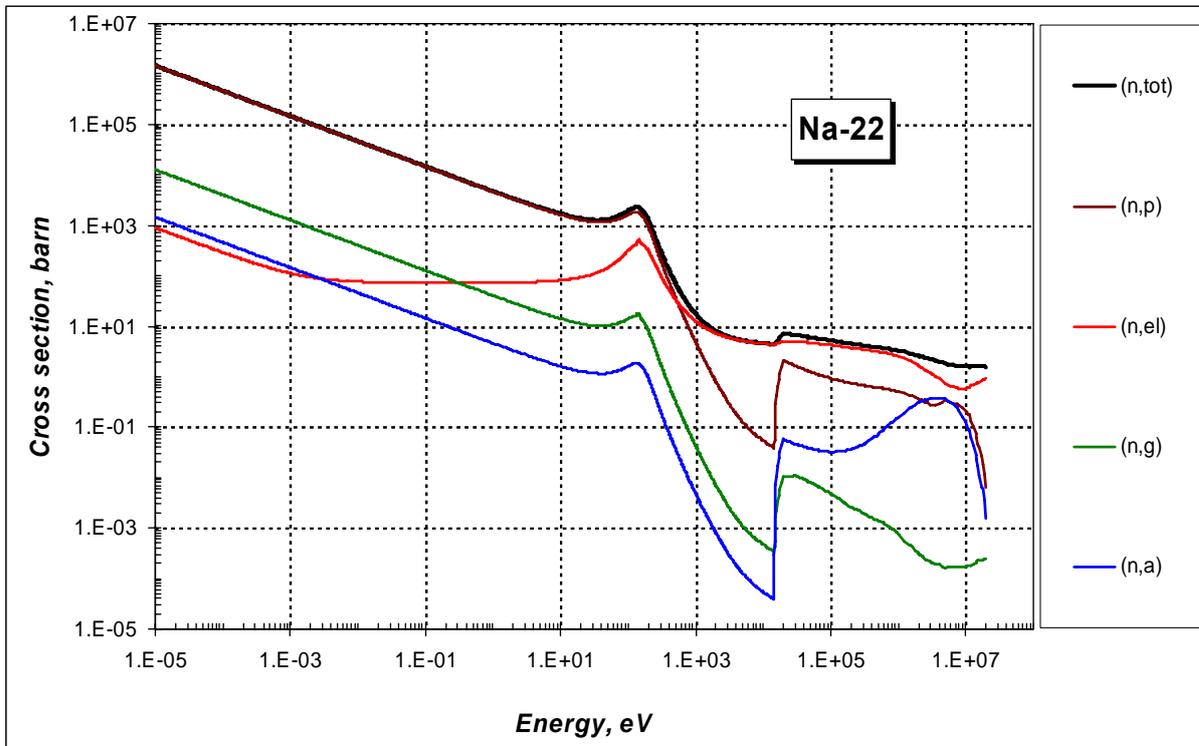


Рисунок 1 - Сечения экзотермических реакций (согласно JEFF-3.1).

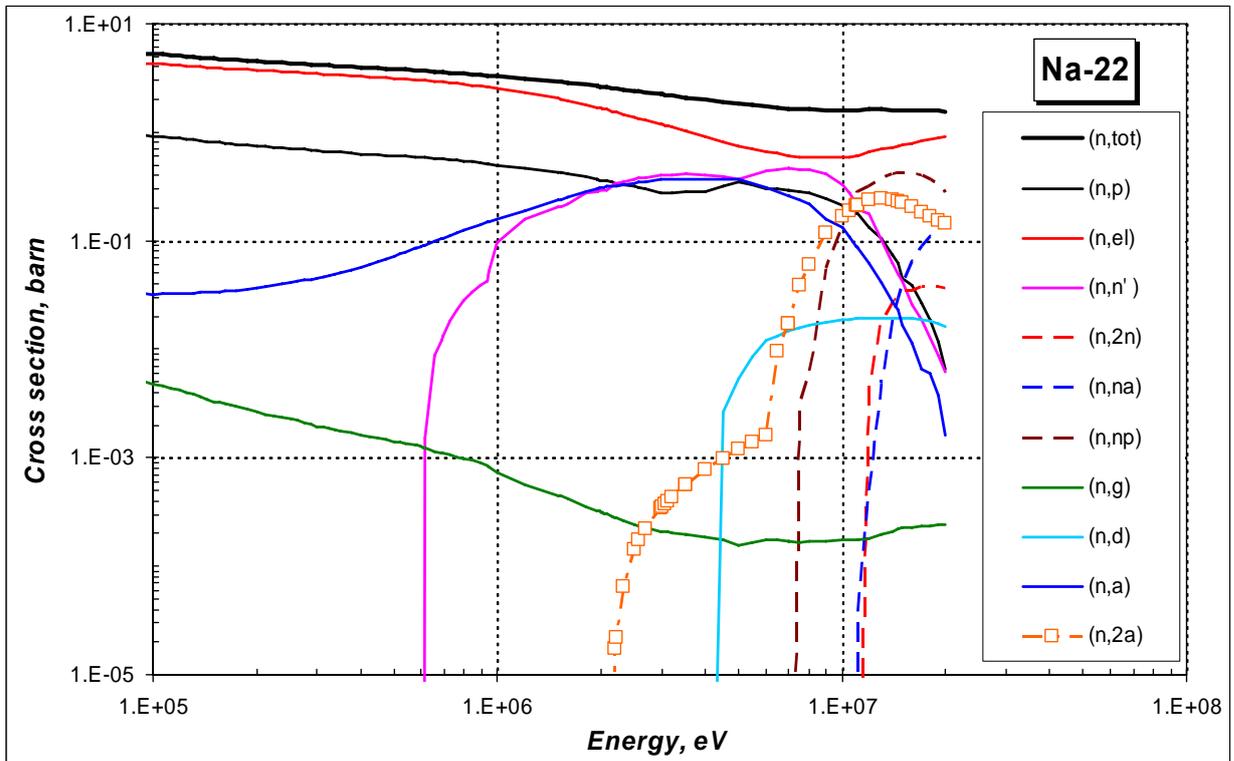


Рисунок 2 - Сечения пороговых реакций (согласно JEFF-3.1).

3.1. Сечения экзотермических реакций

В области тепловых сечений основным процессом является поглощение нейтрона с испусканием протона - **реакция (n,p)** - сечение которой практически совпадает с полным сечением взаимодействия.

На рисунке 3 приводится сравнение оцененных значений сечения реакции (n,p) с немногочисленными экспериментальными данными.

Из приведенного сравнения видно, что все оцененные кривые согласуются между собой лучше, чем совокупность экспериментальных данных. Из совокупности экспериментальных данных только результаты Квитека81 приводятся как сечение реакции (n,p) в тепловой точке. Остальные данные - сечение активации. Но поскольку в тепловой точке преобладающим является процесс (n,p), а погрешности измерения меньше чем величины сечений других экзотермических реакций, результаты измерения сечения активации соотнесены с сечением реакции (n,p).

Все оцененные кривые ориентируются на оценку сечения активации Мухабхаба-81, которая составляет $\sim (29 \pm 1) \cdot 10^3$ барн.

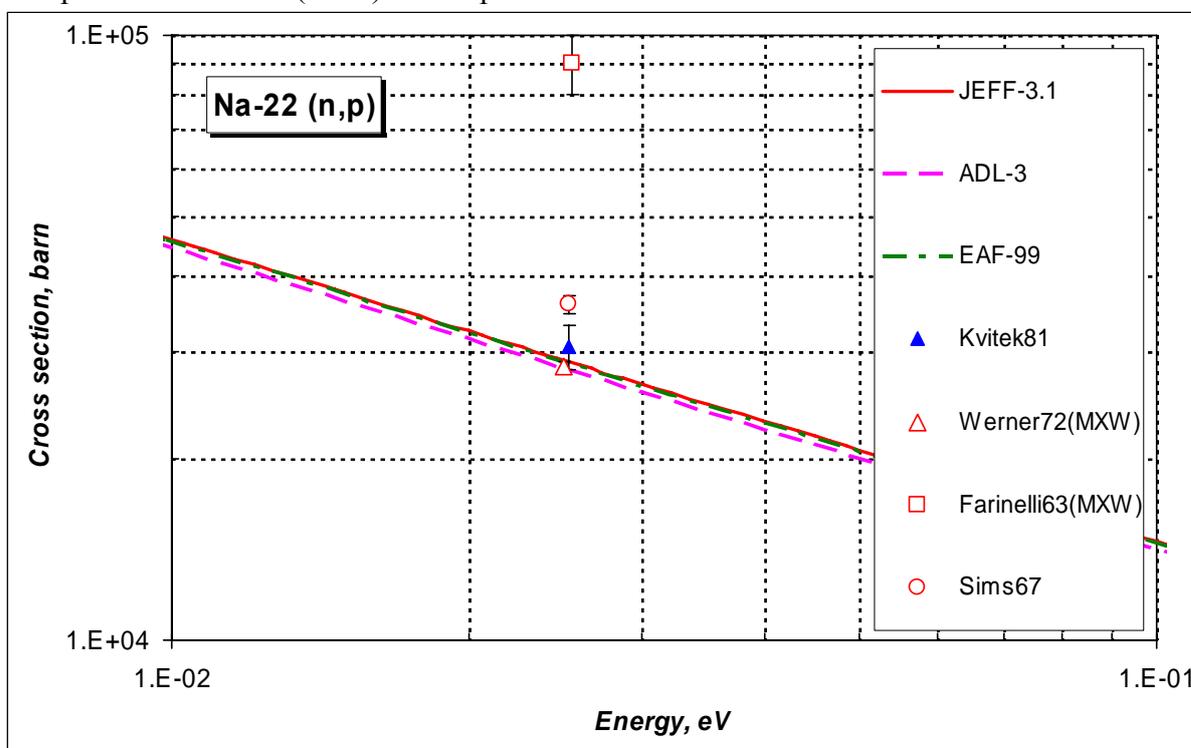


Рисунок 3 – Сечение реакции (n,p) Na-22 в тепловой области энергий.

На рисунке 4 показано сравнение оцененных кривых в диапазоне энергий до 20 МэВ с экспериментальными данными Квитека81.

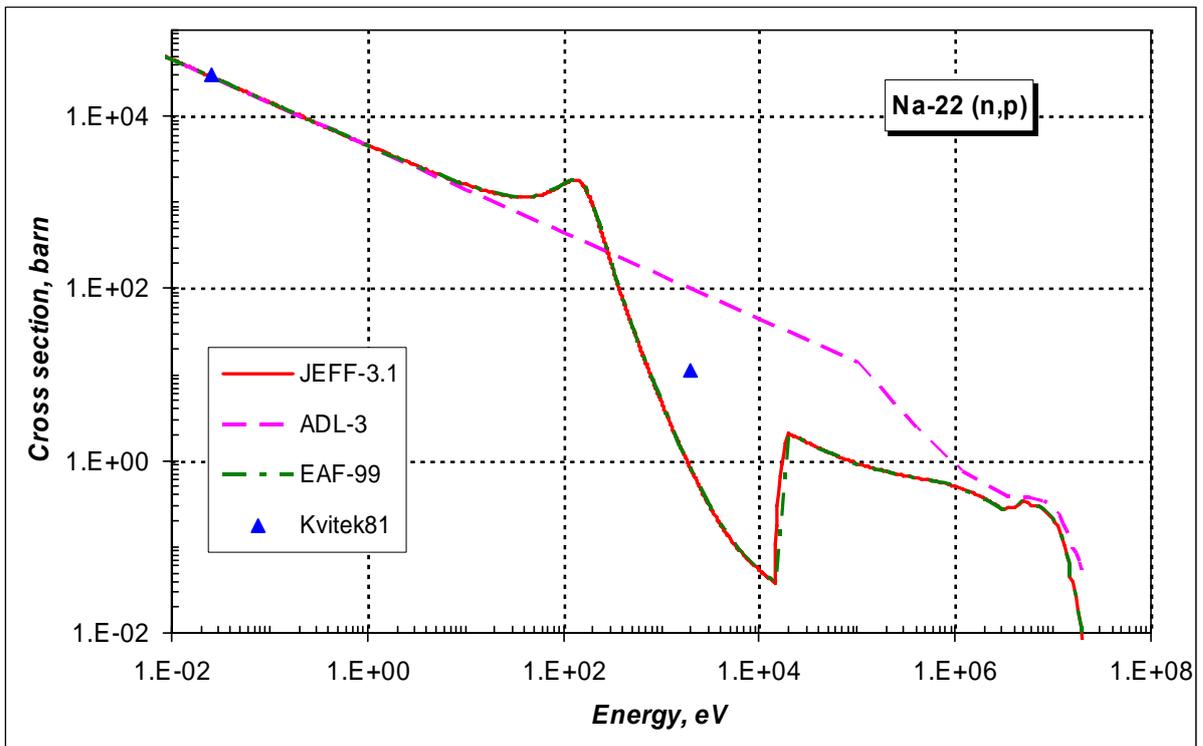


Рисунок 4 – Сечение реакции (n,p) Na-22 в области энергий до 20 МэВ.

Оцененные сечения радиационного захвата на натрия-22, принятые в различных библиотеках, хорошо согласуются между собой, вероятно, благодаря полному отсутствию экспериментальных данных (см. рисунок 5).

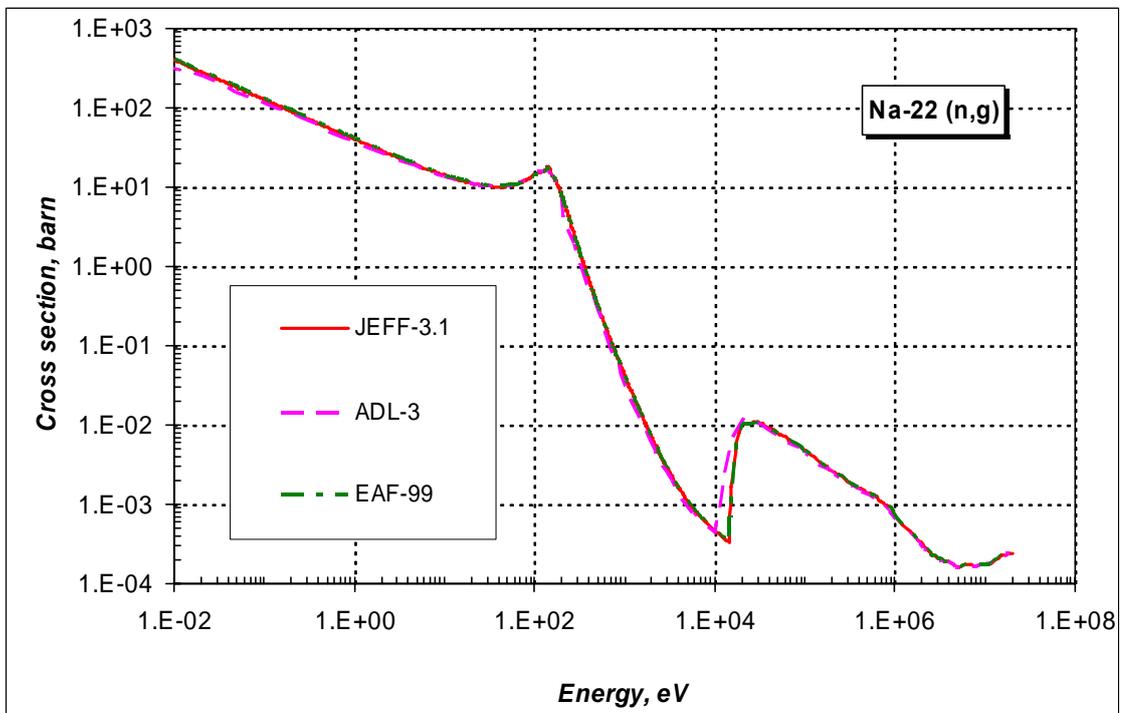


Рисунок 5 – Сравнение различных оценок сечения радиационного захвата Na-22.

Сечение реакции (n,a) на натрия-22 – еще одна экзотермическая реакция. Сравнение различных оценок приведено на рисунке 6.

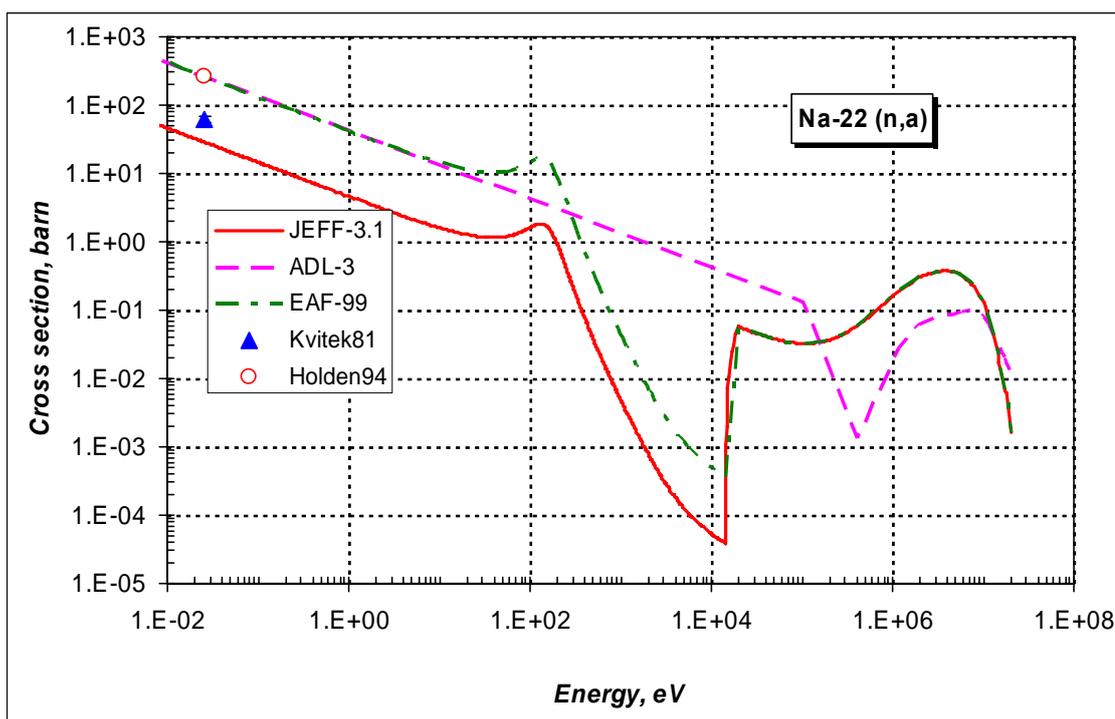


Рисунок 6 – Сравнение различных оценок сечения реакции (n,a) на Na-22.

Видно, что экспериментальная точка Квитка81 лежит ближе к оценке JEFF-3.1. В библиотеке EXFOR для данных Квитка приводится измеренное отношение между реакциями (n,a)/(n,p) = 2.0E-3. Откуда и получено экспериментальное значение сечения реакции (n,a) в тепловой точке. Н.Е. Холден приводит другое значение величины сечения реакции (n,a) в тепловой точке, на которое были отнормированы сечения в библиотеках ADL-3 и в EAF-99.

Тепловые сечения и резонансный интеграл:

В таблице приводится сравнение характеристик сечений в тепловой и в резонансной области энергий рассчитанных по программе INTER из пакета программ ENDF Utility Codes (release 6.13).

Таблица 1 – Сравнение тепловых значений сечений и резонансных интегралов I_x основных экзотермических реакций.

	σ_p , барн	I_p , барн	σ_γ , барн	I_γ , барн	σ_a , барн	I_a , барн
JEFF-3.1	2.88E+4	1.47E+4	252.	128.	28.1	14.7
ADL-3	2.80E+4	1.68E+4	231.	260.	260.	156.
EAF-99	2.87E+4	1.47E+4	260.	132.	260.	133.

Из приведенного в таблице сравнения оцененных сечений видно, что количественно и качественно отличается только сечение реакции (n,a), которое в тепловой области на два порядка меньше сечения реакции (n,p).

3.2. Сечения пороговых реакций

Экспериментальных данных по пороговым реакциям в библиотеке EXFOR нет, поэтому ниже на рисунках 7-10 будут графически показаны сравнения имеющихся оцененных сечений, полученных расчетным путем по разным программам.

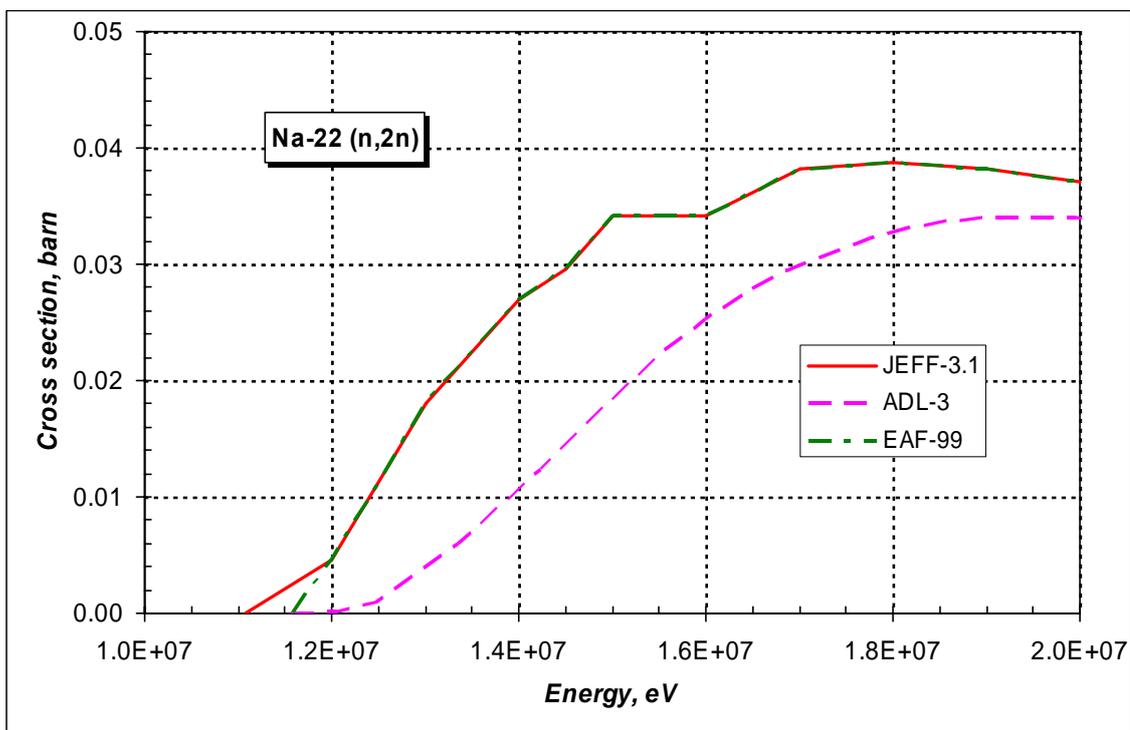


Рисунок 7 – Сравнение различных оценок сечения реакции $(n,2n)$ на $Na-22$.

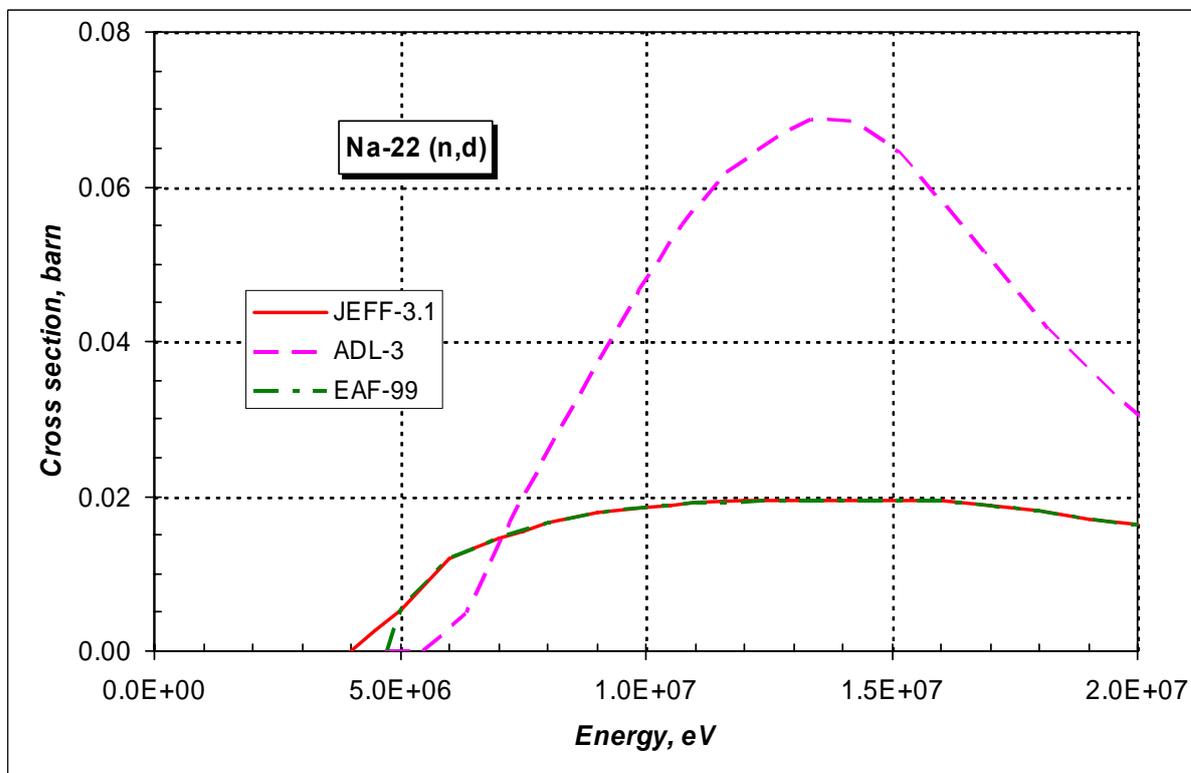


Рисунок 8 – Сравнение различных оценок сечения реакции (n,d) на $Na-22$.

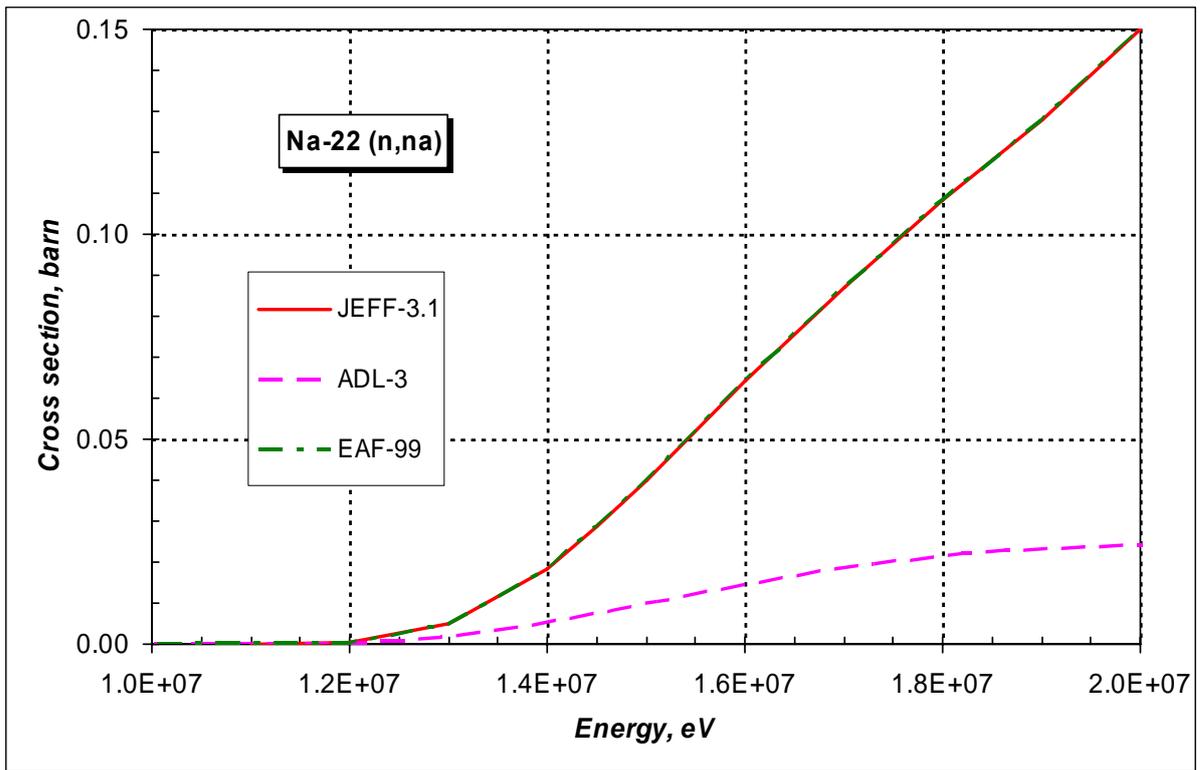


Рисунок 9 – Сравнение различных оценок сечения реакции (n,na) на Na-22.

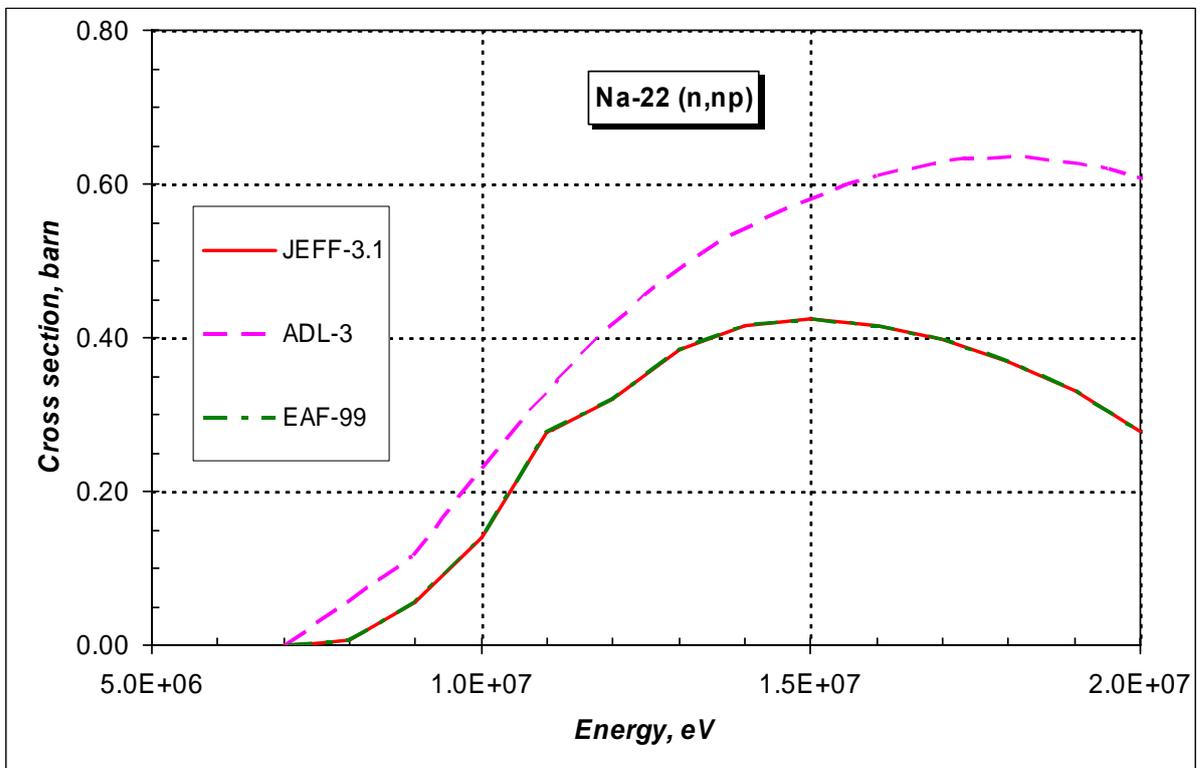


Рисунок 10 – Сравнение различных оценок сечения реакции (n,np) на Na-22.

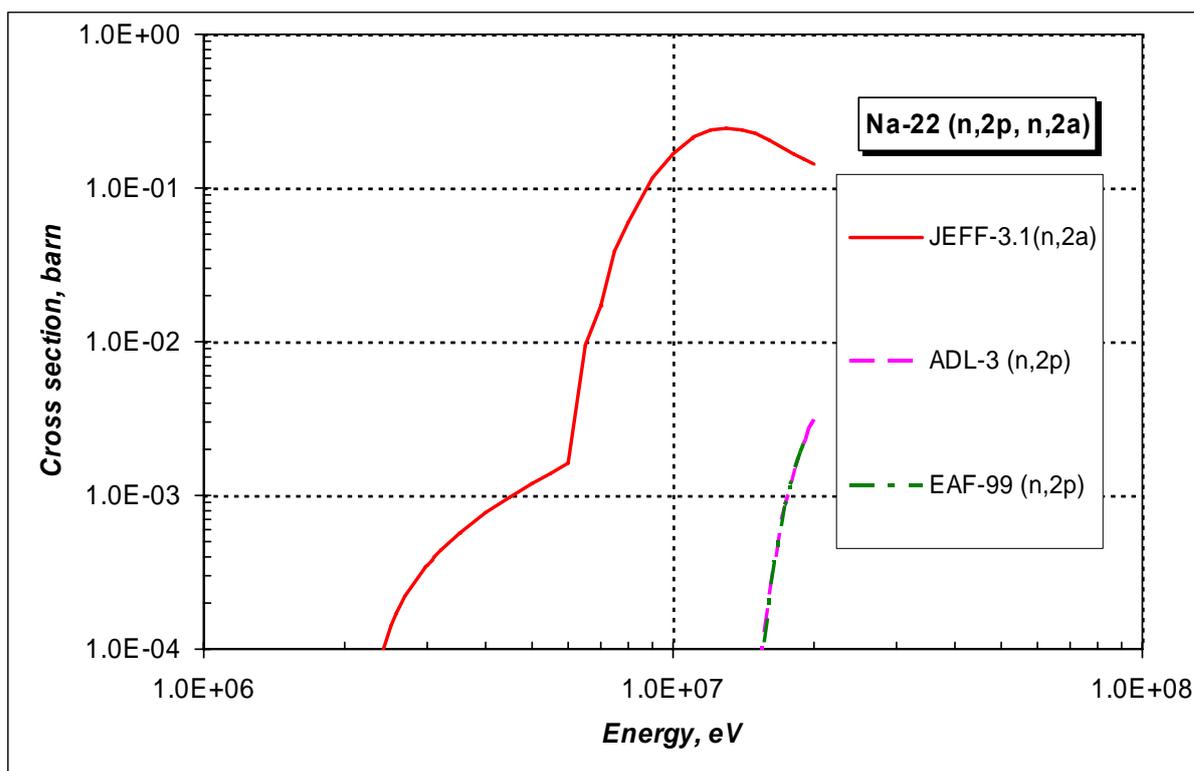


Рисунок 11 – Сравнение различных оценок сечения реакции (n,2a и n,2p) на Na-22.

Из рисунков 7-10 видно, что в EAF-99 и JEFF-3.1 используются одни и те же оцененные сечения пороговых реакции. В ADL-3 пошли своим путем. Их оценка заметно отличается от европейских расчетов.

На рисунке 11 приведена энергетическая зависимость сечений (n,2a) и (n,2p). Причем сечение реакции (n,2a) присутствует только в библиотеке JEFF-3.1. А оно на три порядка (!) больше, чем сечение в максимуме реакции (n,2p). Что это – ошибка в JEFF-3.1 или простой недосмотр в EAF-99 (=ADL-3)?

4. Энерго-угловые распределения

Для описания углового рассеяния нейтронов при упругом рассеянии нейтронов используется разложение по полиномам Лежандра.

Остальные процессы с испусканием нейтронов предполагаются изотропными в системе центра масс.

Спектры испускаемых нейтронов описываются с помощью спектра испарения.

5. Заключение

В библиотеку РОСФОНД рекомендуется включить оцененные нейтронные данные из библиотеки JEFF-3.1. В дальнейшем этот файл при нужде может быть расширен за счет добавления данных о сечениях реакций (n,2p), (n,t) и (n,nd), например, из EAF-99.

5.2. Тепловые и интегральные сечения

Реакция	$\sigma(0.0253 \text{ эВ})$	RI	$\langle \sigma \rangle$ на спектре Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$
Упругое рассеяние	7.420 барн	961.3 барн	2.045 барн
Рад. захват	252.1 барн	128.4 барн	0.773 мбарн
Реакция (n,p)	28826. барн	14666. барн	445.9 мбарн
Реакция (n,d)	-	-	0.833 мбарн
Реакция (n, α)	28.82 барн	14.73 барн	229.9 мбарн
Реакция (n, 2α)	-	-	16.04 мбарн
Реакция (n, $2n$)	-	-	0.010 мбарн

5.3. Автор обоснования оцененных данных

Кощев В.Н.

11.2. Натрий-23

1. Общие характеристики

$Z=11$

$A=22.989\ 769\ 280\ 9 \pm 0.000\ 000\ 002\ 9$

$A_{wr}=22.792\ 276\ 129\ 6 \pm 0.000\ 000\ 003\ 0$

Содержание в естественной смеси: 100. вес%;

Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}$, МэВ	Ядро-продукт ^{*)}
4	(n,n')	-0.4399±0.0001	0.4592	
16	(n, $2n$)	-12.4178±0.0001	12.9626	Na-22 (2.6 y)
22	(n,na)	-8.7931±0.0001	9.1789	F-19
28	(n,np)	-10.4678±0.0001	10.9271	Ne-22
102	(n, γ)	6.9596±0.0001	0.0	Na-24(14.951h)
103	(n,p)	-3.5965±0.0001	3.7543	Ne-23(37.24 s)
104	(n,d)	-6.5655±0.0001		Ne-22
105	(n,t)	-10.6710±0.0001		Ne-21
107	(n,a)	-3.8665±0.0001	4.0362	F-20(11.07 s)

Схема уровней: (согласно оценке JENDL)

MT	LEVEL ENERGY (MEV)	SPIN-PARITY
	0.0	3/2+
51	0.439899	5/2+
52	2.0764	7/2+
53	2.3909	1/2+
54	2.6398	1/2-

55	2.7037	9/2+
56	2.9824	3/2+
57	3.6783	3/2-
58	3.8480	5/2-
59	3.9147	5/2+
60	4.4320	1/2+
61	4.7756	7/2+
62	5.3800	3/2+
63	5.5360	11/2+
64	5.7410	3/2+
65	5.7660	5/2+
66	5.9310	1/2-
67	5.9670	3/2-
68	6.0430	1/2-
69	6.1170	11/2+
70	6.1910	11/2+
71	6.2360	13/2+
72	6.3080	1/2+
73	6.3506	9/2-
74	6.5770	5/2+
75	6.6170	9/2+
76	6.7340	3/2+
77	6.8680	5/2+
91 (cont)	6.89999	

Радиоактивность: не радиоактивен

2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность $J^\pi = 3/2^+$;

2.2. Радиус рассеяния: $R = 0.520 \cdot 10^{-12}$ см.

2.3. Область разрешенных резонансов.

К настоящему времени опубликованы три полных оценки резонансных параметров натрия:

- Мухабхаба, приведенная в известном справочнике BNL-325¹;
- Ларсона, включенная в библиотеку ENDF/B-V.2 и во все версии библиотеки ENDF/B-VI;
- Шибата, включенная во все версии библиотеки JENDL-3.

Кроме того, существует оценка положений резонансов и их нейтронных ширин, выполненная Моксоном, с учетом, как предыдущих измерений пропускания, так и его собственных, выполненных с высоким разрешением.

В российской библиотеке ФОНД-2.2. используется оценка Ларсона, рекомендованная к использованию от 600эВ до 500кэВ (ниже 600 эВ сечения задаются поточечно. Во всей резонансной области к сечению, рассчитанному по резонансным параметрам добавляется небольшая, знакопеременная подложка сечения рассеяния). Экспериментальная информация, положенная в основу этой оценки, та же, что и у Мухабхаба, однако методика обработки данных в этой оценке представляется несколько более обоснованной (анализ проводился на основе многоуровневой резонансной формулы). Резонансные энергии и нейтронные ширины определены, главным образом, на основе работ Зельцера и Фирка и Ларсона, Харви и Хилла², радиационные ширины – на основе данных Масгроува, Алена и Маклина³. Оценка параметров первого резонанса проводилась с учетом результатов и ряда других работ.

¹ S.F.Mughabghab et al, Neutron Cross Sections, v.1, part A. Academic Prass 1981.

² Larson, Harvey, Hill ORNL-TM-5614, 1976

³ Musgrove, Allen, Macklin, preprint ORNL, 1977

Во всех версиях европейских библиотек (JEF, JEFF) используется оценка Шибата, рекомендованная к использованию от 10-5 эВ до 350 эВ (ниже 250 кэВ к сечению, рассчитанному по резонансным параметрам, добавляется небольшая плавная подложка сечения рассеяния). В этой оценке за основу принимались параметры, рекомендованные Мухабхабом, откорректированные для лучшего описания хода полного сечения. Измеренного, видимо, в работе² (ссылок на другие измерения в описании оценки не содержится). Таким образом, новая экспериментальная информация к оценке параметров Шибата не привлекалась.

Изложенные выше соображения не дают оснований для перехода от уже принятой в российской библиотеке оценки Ларсона к оценке Шибата в резонансной области энергий.

В таблице 1 приведено сравнение резонансных параметров для всех упомянутых двух оценок.

Из приведенного сравнения видно, что оценки, принятые в библиотеках оцененных нейтронных данных, содержат меньшее число резонансов, чем рекомендуется Мухабхабом. Не учитывается, разумеется, вклад слабых резонансов. Однако выбор этих слабых резонансов Ларсоном и Шибата различен. Обращает на себя внимание, что Моксон, наблюдает все резонансы, на которые указывает Мухабхаб в области до 300 кэВ (есть даже один дополнительный резонанс при 243 кэВ). Очевидна, таким образом, целесообразность переоценки резонансных параметров натрия. Решающим стимулом к такой переоценке послужило бы измерение сечения захвата в широком диапазоне энергий с использованием современных экспериментальных методик.

На рисунках 1-2 показано, как обе оценки **полного сечения** согласуются с экспериментальными данными в районе первого S-резонанса. Смещение резонанса в сторону низких энергий, имеющее место в оценке Ларсона, подтверждается данными Зельтцера и Рана, тогда как оценка Шибата опирается, видимо, на ранние результаты Линна. На крыльях резонанса оценка Ларсона также выглядит более правдоподобно (см. рис.2).

Сравнение различных оценок резонансных параметров натрия

Мухабхаб (BNL-325)						Ларсон (ENDF/B-VI)						(JENDL-3.)						Монон90				
Е, кэВ	J	l	Гn	Гγ	gГnГγ/Г	Е, кэВ	J	l	Гn	Гγ	gГnГγ/Г	Е, кэВ	J	l	Гn	Гγ	gГnГγ/Г	Е, кэВ	J	l	Гn	
																			-381.4	1	0	2.50
-100.0	2	0										-100	2	0	1600	0.3			-100.0	2	0	14192.00
2.850	1	0	676.7	0.35	0.07	2.81	1	0	376.34	0.353	0.08	2.85	1	0	411	0.333	0.07	2.787	1	0	361.40	
7.617			0.0			7.617	2	1	0.0058	0.600	0.002	7.617	1	1	0.00296	1	0.001					
35.380	3	1	1.0	0.788	0.22	35.39	1	1	1.6	1.900	0.19	35.38	1	1	0.549	0.788	0.07	35.295	2	1	1.37	
53.040	2	1	2016.0	1	0.36	53.22	2	1	1112	0.785	0.28	53.04	2	1	1152	1	0.36	52.973	2	1	1045.00	
113.800				0.216								113.8	2	2	0.144	0.216	0.03	113.427	3	2	0.43	
117.500						117.43	1	1	26.8	4.230	0.78							117.348	1	1	24.71	
131.900	0	1		1.6								131.9	2	1	1.07	1.6	0.23	131.849	3	2	0.64	
143.100				0.89		143.13	0	1	16.5	7.100	0.35	143.1	2	1	5.48	0.89	0.27	143.068	0	2	18.74	
190.100						190.06	0	2	18.2	9.300	0.44							190.034	3	2	2.59	
200.200	1	1	9566.7	4	0.86	201.15	1	1	4925	2.940	0.63	200.2	1	1	5470	4	0.86	200.997	1	1	4233.00	
212.600	0	1	4000.0	4.9	2.45	214.3	0	1	1428	4.640	0.33	212.6	0	1	1600	4.9	0.35	213.596	0	1	18635.00	
236.700						236.71	2	2	65.2	1.590	0.55							236.772	3	1	43.41	
237.500	2	1	9632.0	1.4	0.50	239.05	2	1	5349	1.200	0.43	237.5	2	1	5500	1.4	0.50	239.153	2	1	5576.00	
243.000	0	1	3150.0	4.81	0.34	242.97	1	0	328	1.500	0.32	243	0	0	1790	4.610	0.33	242.806	0	1	426.40	
																		242.994	1	0	361.40	
298.650	2	0	3500.0	1.14	0.41	298.32	2	0	2038	1.020	0.36	298.65	2	0	2000	1.14	0.41	298.650	2	0	2141.00	
299.200	1	1	525.0	2.6	0.55	299.41	1	1	130	2.560	0.54	299.2	1	1	300	2.6	0.55	299.543	3	1	60.43	
305.100						305.2	0	2	68.3	9.700	0.61							305.408	2	1	18.33	
380.900																						
384.300	1	1	4526.7	12	2.56							384.3	1	1	500	12	2.51					
393.800	1	1	44566.7			392.32	1	1	22760	9.870	2.11	393.8	1	1	25500	1.2	0.26	394.939	1	1	27435.00	
431.300	0	1	1900.0	11	5.47	430.9			4000	5.290	0.38	431.3	0	1	7600	11	0.78	431.529	0	1	6866.00	
445.500	2	2	15750.0	4.2	1.50	448.82			7026	3.520	0.25							449.723	2	1	6710.00	
468.500																						
495.000																			495.839	0	2	535.20
508.000																			510.219	4	2	54.90
537.000	1	0	61833.3	10.6	2.27	538.57	1	0	62770	10.14	2.17	537.5	1	1	35300	10.6	2.27	539.655	1	0	32164.00	
564.000																			566.108	4	2	107.60
576.000																						
584.000																						
598.000	1	1	42437.5	0.8	0.18	598	1	1	25800									597.668	1	1	18636.00	
599.000	1	1		7														602.228	4	2	103.50	
																		629.906	0	1	263.00	
697.000	4	2		135		697	4	2	60000									686.730	3	2	379.80	
						727	3	2	45000									715.431	2	1	131420.00	
																		710.788	3	1	61594.00	
726.000	3	1	79000.0																			
																			753.374	3	2	1000.00
						780	4	2	44000									771.392	1	1	5830.00	
780.500	4	2	76300.0															784.266	3	1	32450.00	
911.200	3	2	70200.0																			
985.100	2	2	28560.0																			

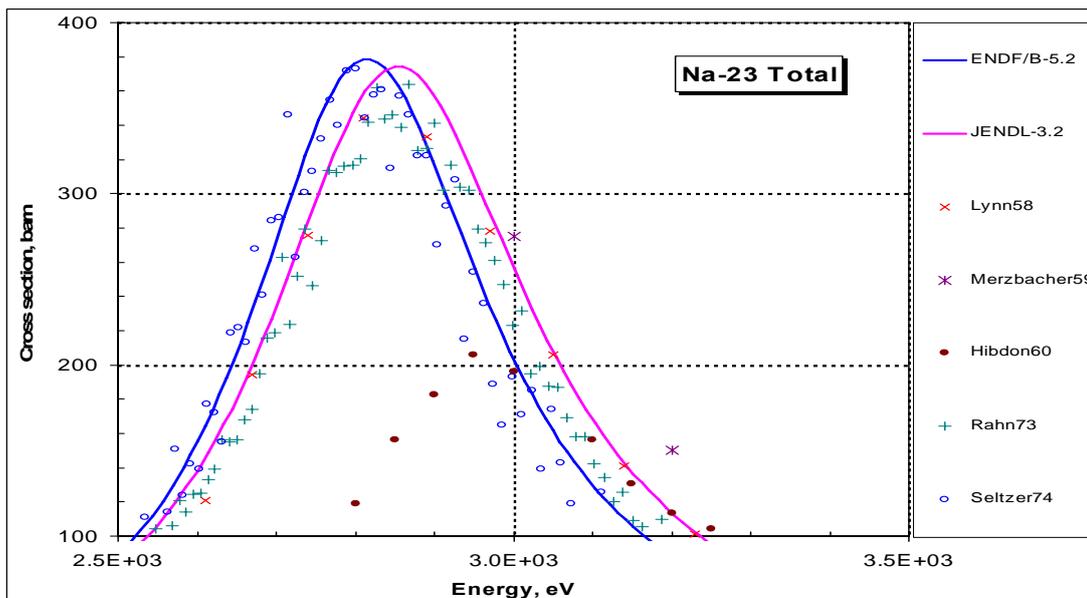


Рисунок 1 – Полное сечение Na-23 в районе максимума первого S-резонанса.

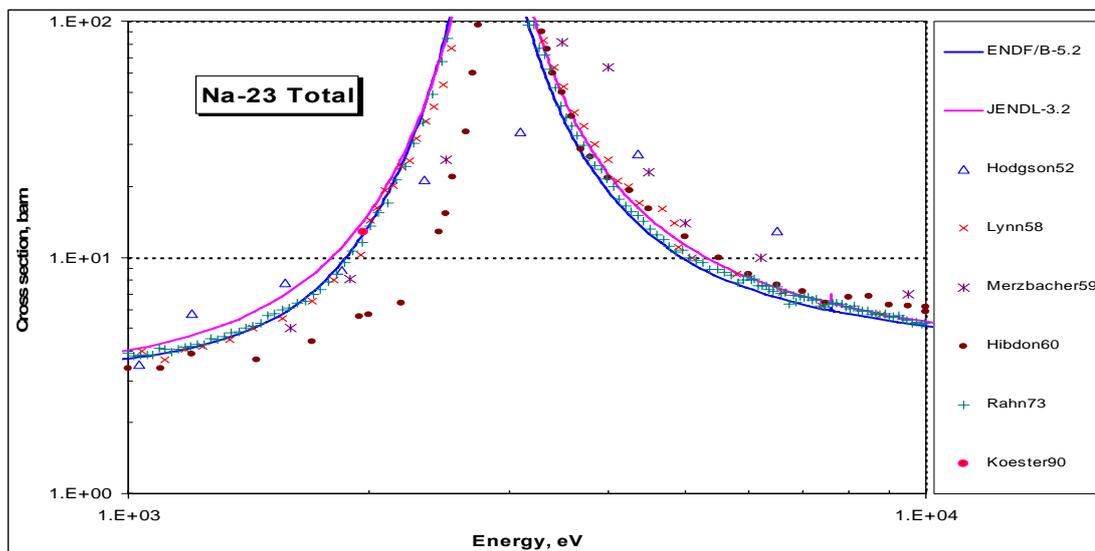


Рисунок 2 – Полное сечение Na-23 в районе первого S-резонанса.

На рисунке 3 показано сравнение оцененных кривых с экспериментальными данными в области энергий от 0.1 до 0.5 МэВ, из которого видна общая картина соответствия экспериментальных данных и оцененных кривых на этом энергетическом участке.

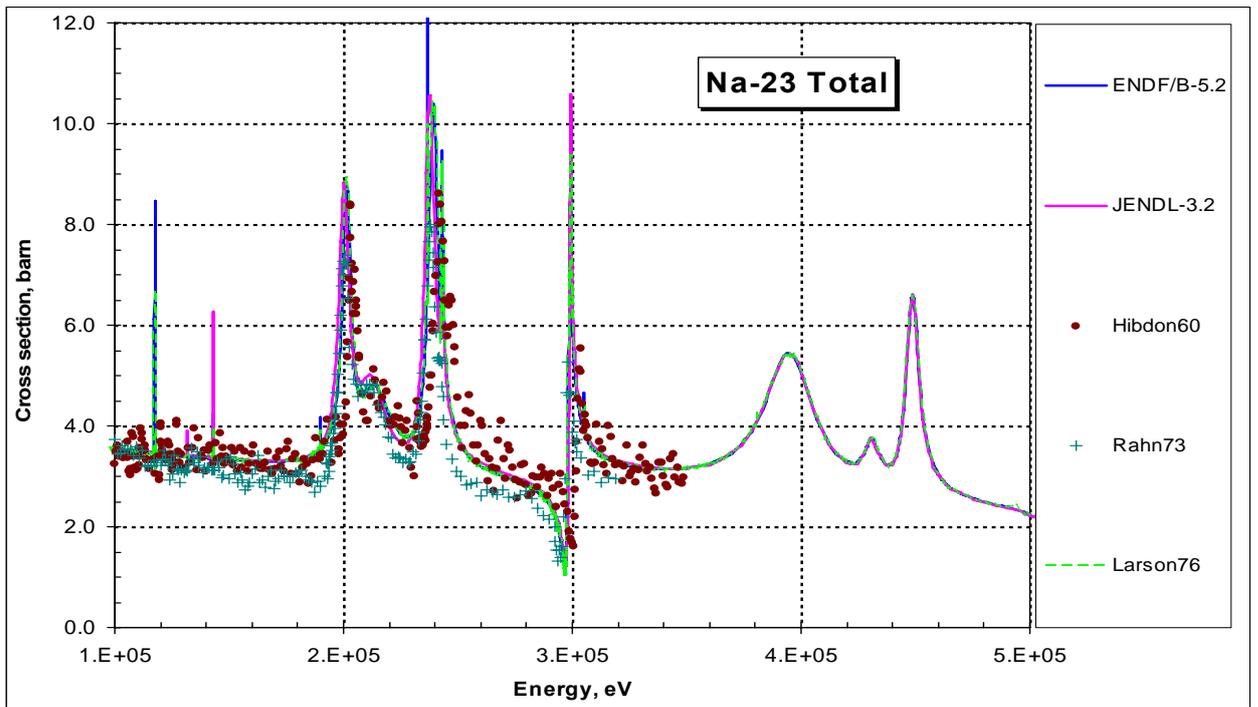


Рисунок 3 – Полное сечение Na-23 в области энергий 0.1-1.0 МэВ.

На рисунках 4 - 6 показано более детальное сравнение оцененных кривых в диапазоне энергий от 0.1 до 0.5 МэВ с наиболее подробными экспериментальными данными Ларсона76, которые взяты за основу в оценке ENDF/B.

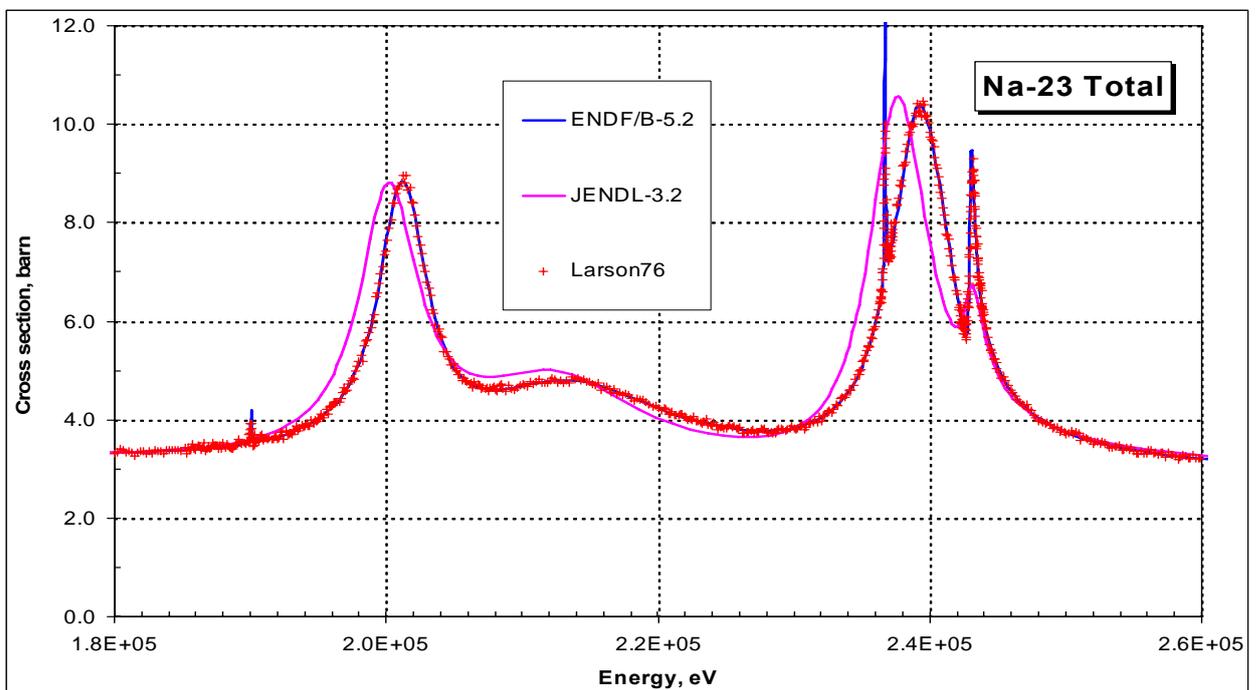


Рисунок 4 – Полное сечение Na-23 в области энергий 0.18-0.26 МэВ.

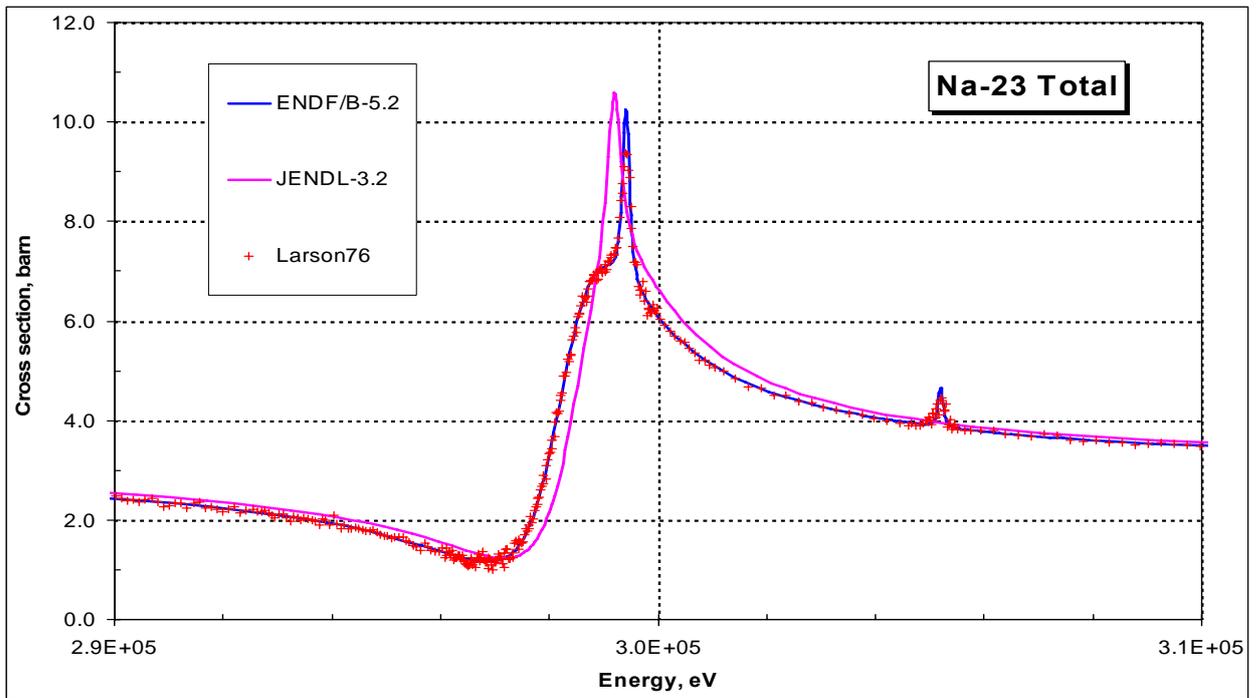


Рисунок 5 – Полное сечение Na-23 в области энергий 0.29-0.31 МэВ.

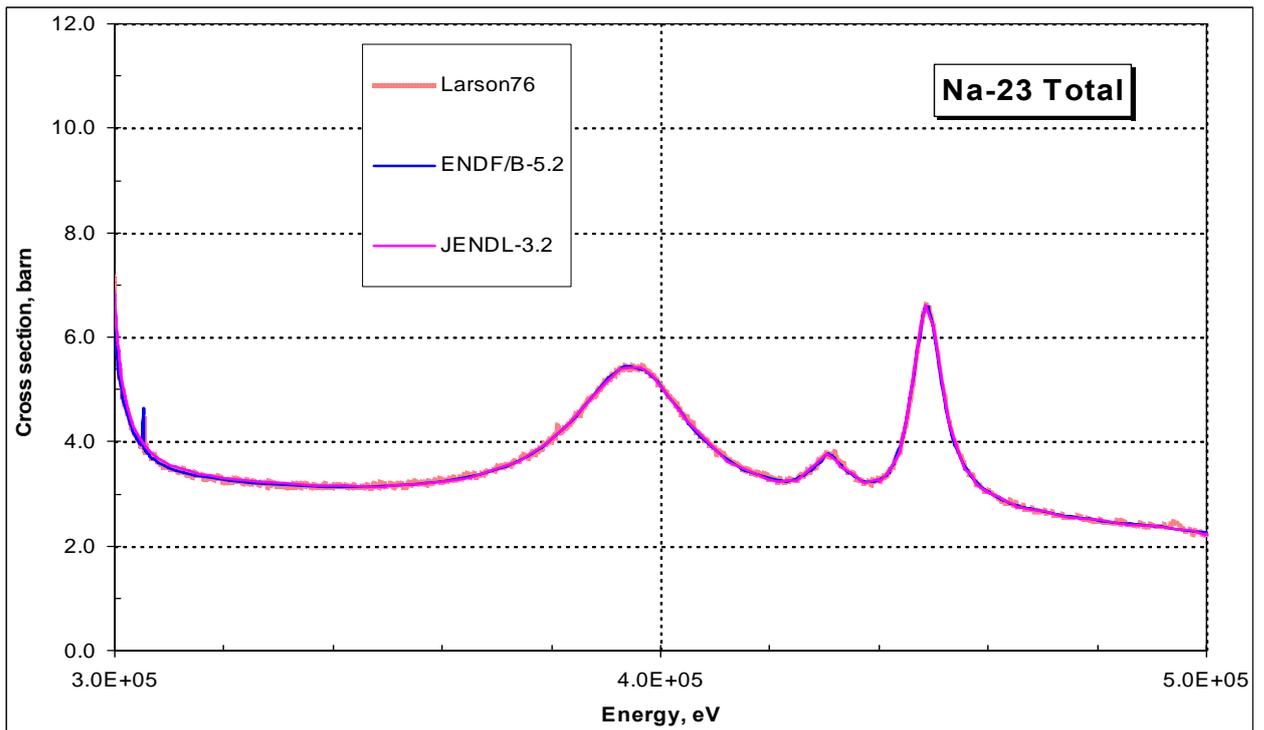


Рисунок 6 – Полное сечение Na-23 в области энергий 0.3-0.5 МэВ.

Из приведенного на рисунках 4 - 6 сравнения видно, что имеющиеся в библиотеке EXFOR экспериментальные данные Ларсона наилучшим образом согласуются с оценкой из библиотеки ENDF/B. К сожалению, не доступными являются экспериментальные данные Моксона, выполненные с высоким разрешением в 1990 году. Они могли бы либо “закрепить” энергетическую зависимость полного сечения, либо указать на разногласие с данными Ларсона.

Сечение радиационного захвата на натрия в резонансной области измерено с низким разрешением. Оно не может быть использовано для выводов о преимуществе той или иной оценки параметров отдельных резонансов. На рисунках 7 - 8 сечения радиационного захвата, рассчитанные по резонансным параметрам, сравниваются с имеющимися экспериментальными данными из библиотеки EXFOR.

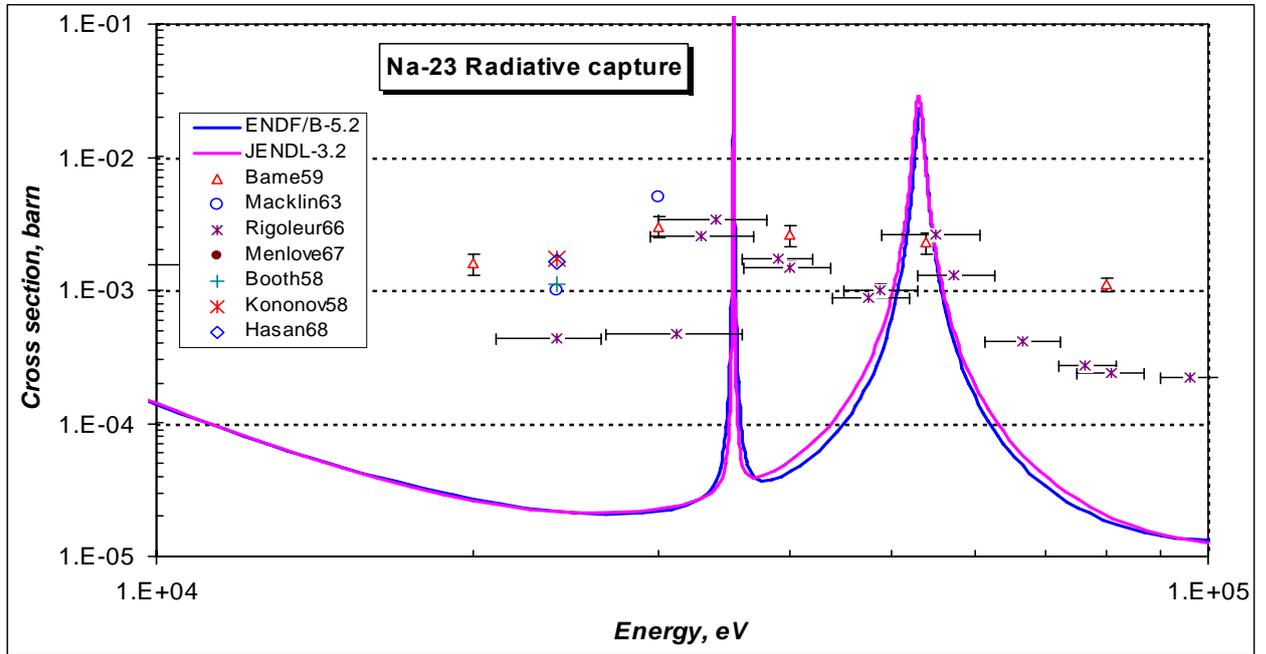


Рисунок 7 – Сечение радиационного захвата Na-23 в области энергий 0.01-0.1 МэВ.

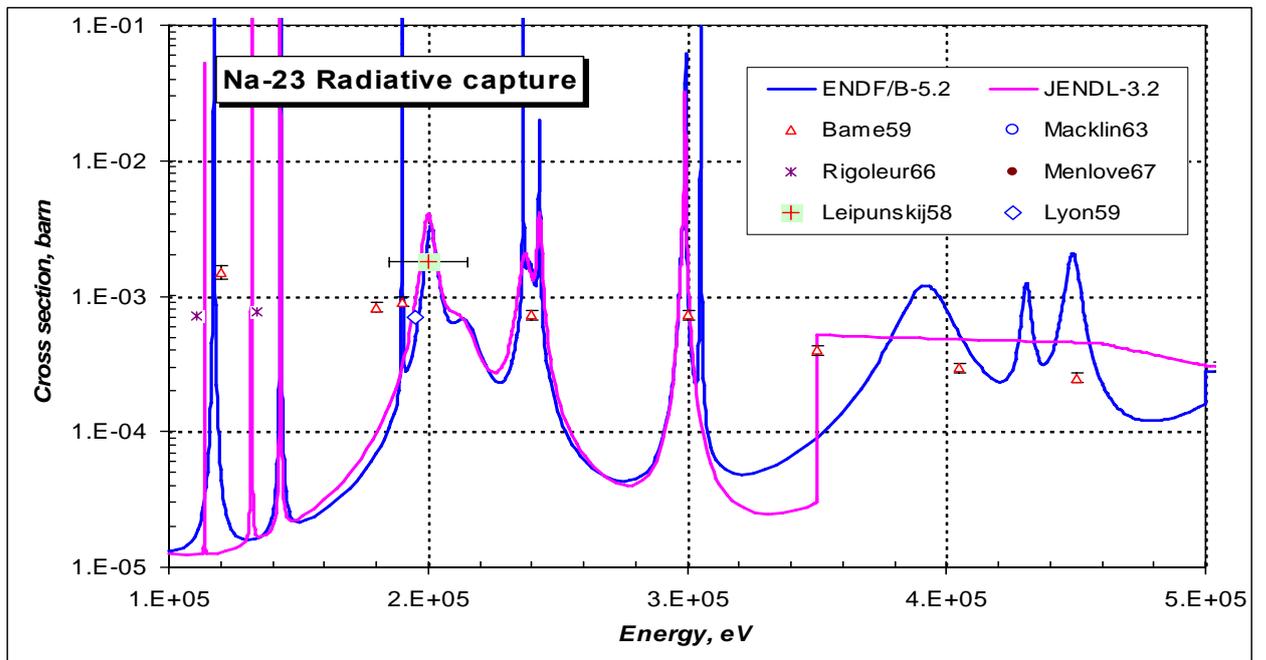


Рисунок 8 – Сечение радиационного захвата Na-23 в области энергий 0.1-0.5 МэВ.

2.4. Область неразрешенных резонансов отсутствует.

2.5. Тепловые сечения и резонансный интеграл:

Итак, экспериментальные данные по **полному сечению** в области разрешенных резонансов лучшим образом описывает оценка Ларсона для библиотеки ENDF/B.

Что, касается **сечения радиационного захвата**, то имеющихся экспериментальных данных недостаточно для определения наилучшего согласия с ними рассматриваемых оценок.

Для этого обратимся к сравнению простейших интегральных характеристик: к сечениям в тепловой точке ($E=0.0253$ эВ), к фактору Весткотта и к резонансному интегралу I_γ , значения которых приведены в таблице 2 вместе с последними рекомендациями Мухабхаба (2003).

Таблица 2 – Сравнение тепловых значений сечений и резонансного интеграла I_γ

	$\sigma_s(0.0253$ эВ), барн	$\sigma_\gamma(0.0253$ эВ), барн	G-фактор	I_γ , барн
Мухабхаб- 2003	$3.025\pm 0.02^*)$	0.530 ± 0.005	1.0003	0.311 ± 0.010
ENDF/B-VI	3.319	0.528	1.0001	0.314
JENDL-3	3.024	0.531	1.0001	0.310

*) Сечение рассеяния в работе Мухабхаба 2003 г. не приводится. Здесь дана его же оценка 1981 г.

Различие в данных по сечению рассеяния обусловлено тем, что в библиотеке ENDF/B-VI приводятся для температуры 300К, тогда как в JENDL-3 сечение рассеяния рассчитывается по резонансным параметрам для покоящихся ядер. Эффектом теплового движения и объясняется различие тепловых сечений рассеяния.

Заметим, что в базе данных EXFOR содержится лишь две работы, в которых измерялось полное сечение натрия при низких энергиях. Первой из них является работа Жоки, Миллера и Эванса⁴, измерившие полное сечение натрия в интервале энергии от 0.02эВ до 10 эВ. При 0.025 эВ они получили сечение, равное 3.85 ± 0.05 барна; при 1.26 эВ и при 5.2 эВ – одинаковое сечение, равное 3.30 ± 0.05 барн. В работе Кёстерса, Кнопфа и Вачковского⁵ при последних двух энергиях было получено 3.14 ± 0.07 барна и 3.23 ± 0.04 барна (при опорных полных сечениях природного хлора, равных 20.6 барн и 18.0 барн в соответствии с ENDF/B-VI). Таким образом, величина сечения, принятая в оценке Ларсона не противоречит экспериментальным данным, как могло бы показаться при сравнении с рекомендацией Мухабхаба.

Из приведенных в таблице 2 данных видно, что обе оценки соответствуют современному знанию сечения радиационного захвата нейтронов в тепловой области и резонансной областях.

Все изложенное привело к выводу о целесообразности включения в библиотеку РОСФОНД оценки Ларсона.

Как отмечалось, в библиотеке EXFOR имеется еще одна (более свежая) оценка резонансных параметров, которая выполнена М. Моксоном (EXFOR-22184) на основе совокупной обработки экспериментальных данных Ларсона(1976) и Моксона(1990). Однако поскольку в этой оценке не приводятся радиационные ширины, ее использование без доработки и дополнительного анализа невозможно. Учет новых данных в оценке – дело будущего.

⁴ E.G.Joki,L.G.Miller, J.E.Evans. Phys. Rev. ,99, 610 (1955)

⁵ L.Koesters, K.Knopf, W.Waschnowski ZP/A, 292, (5) ,81 ,(1979)

3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)

3.1. Полное сечение (MT=1).

Оцененные данные в области энергии выше 0.5 МэВ, т.е. выше той области, где энергетический ход сечений описывается аналитически через резонансные параметры, сравниваются на рисунках 9 - 13 с основными экспериментальными результатами, полученными в работах Ларсона, Клемера и Сьержекса.

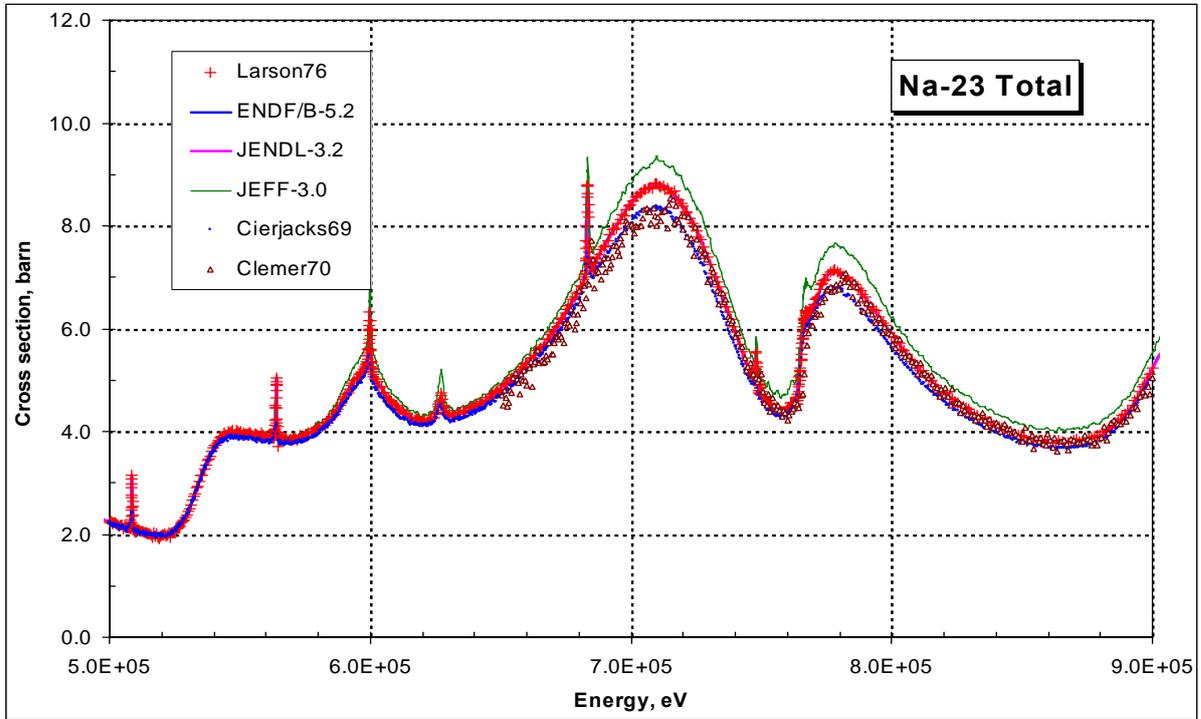


Рисунок 9 – Полное сечение Na-23 в области энергий 0.5 – 0.9 МэВ.

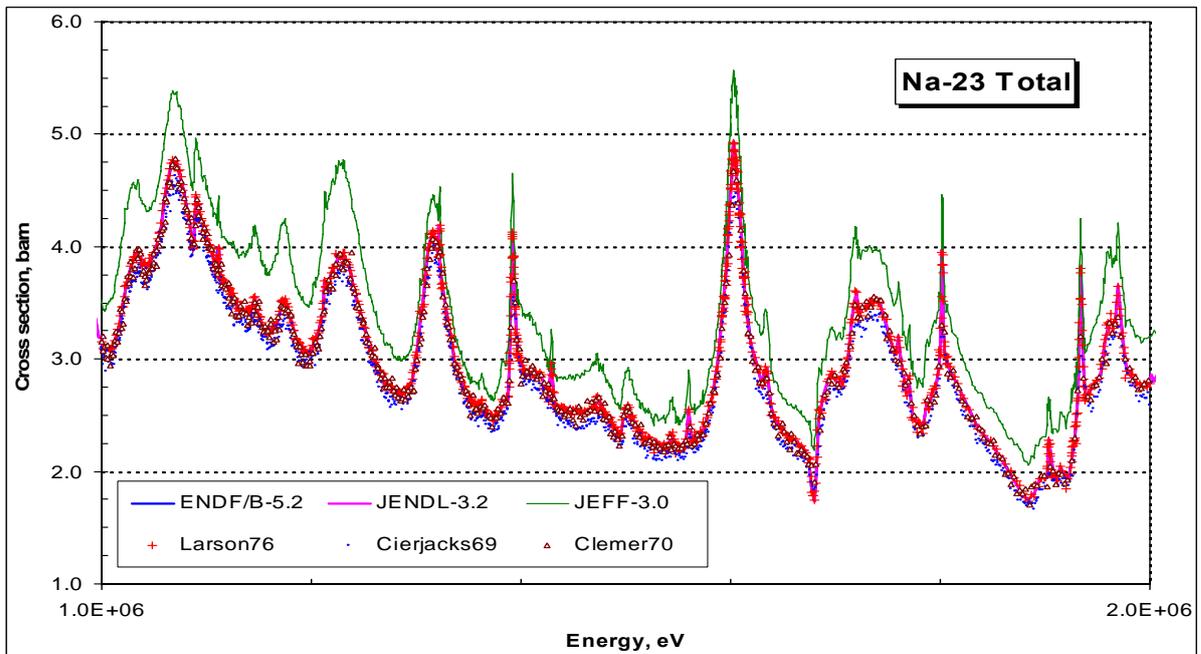


Рисунок 10 – Полное сечение Na-23 в области энергий 1.0 – 2.0 МэВ.

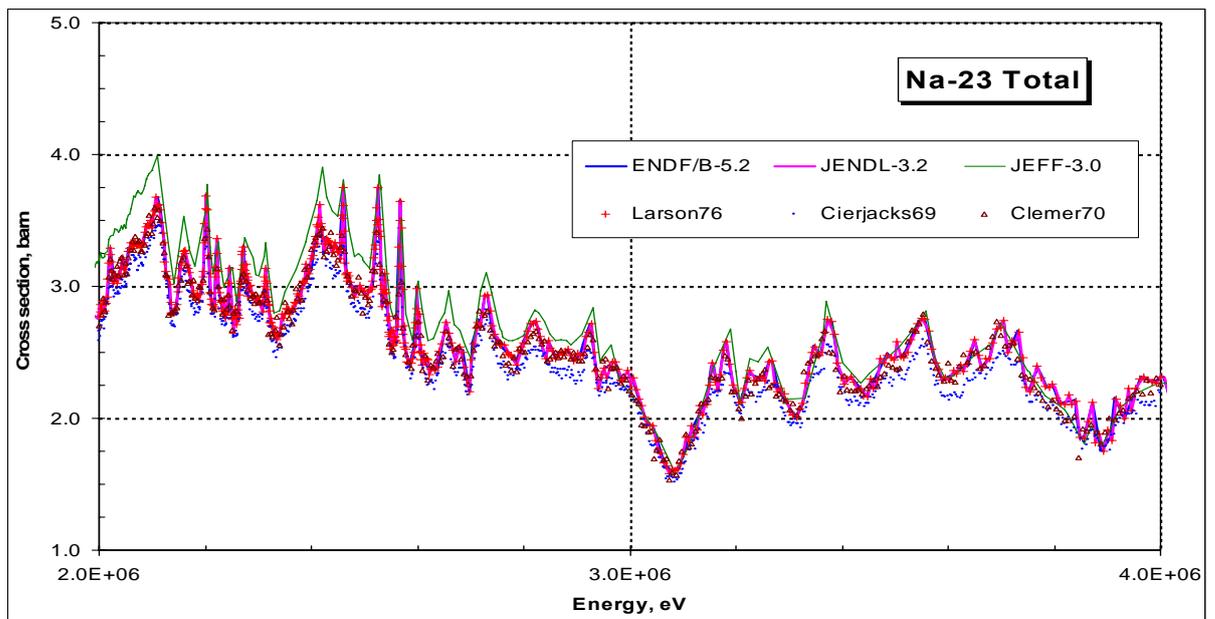


Рисунок 11 – Полное сечение Na-23 в области энергий 2.0 – 4.0. МэВ.

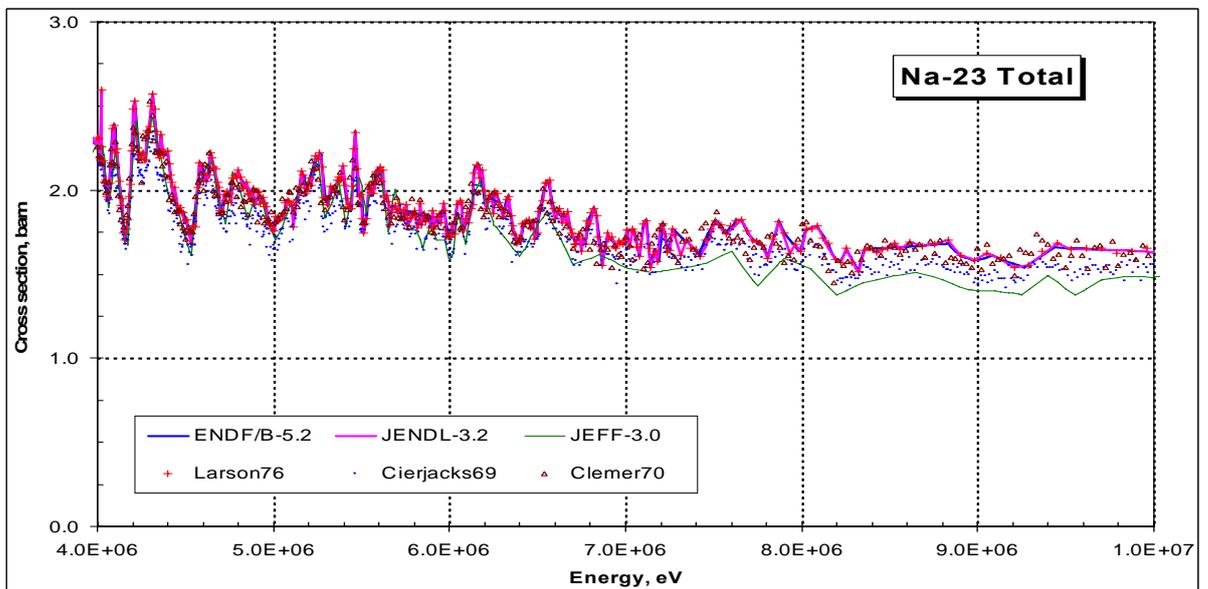


Рисунок 12 – Полное сечение Na-23 в области энергий 4.0 – 10.0. МэВ.

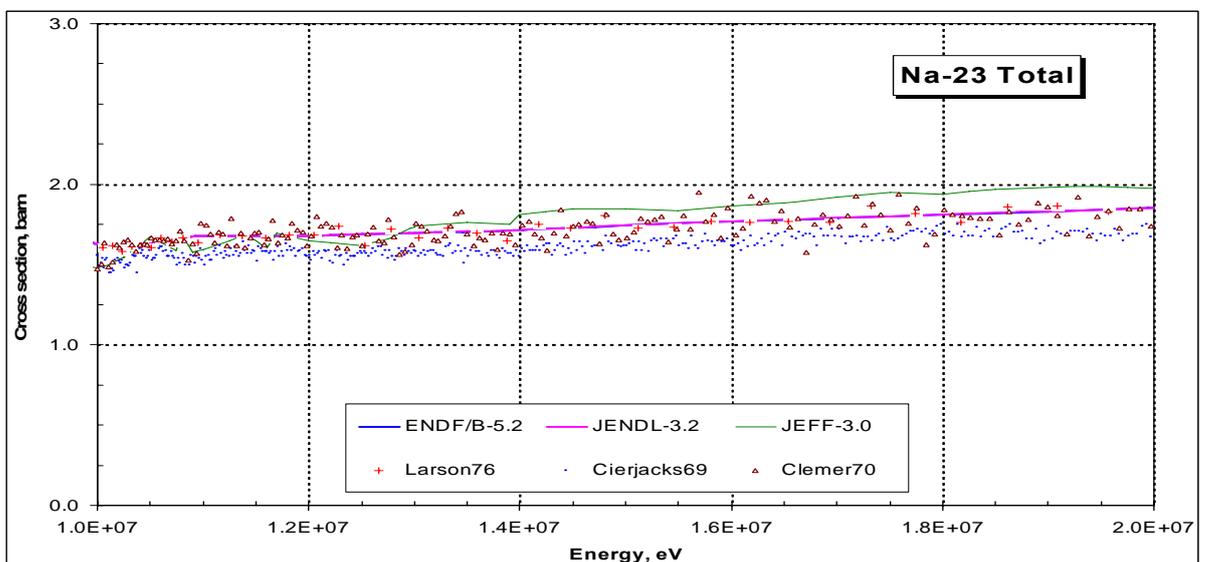


Рисунок 13 – Полное сечение Na-23 в области энергий 10.0 – 20.0. МэВ.

Как видно из рисунков, результаты Ларсона прекрасно согласуются с более ранними данными Клемера везде, кроме области ниже, примерно 800 кэВ, где сечения, измеренные Ларсоном, оказались несколько выше прежних результатов (см. рис.9), но систематически выше результатов данных Сьержекса. Принятая в ENDF/B-V оценка, выполненная Ларсоном, основывается на результатах именно этого автора; ссылка на работу Сьержекса отсутствует, как в оригинальном описании оценки 1977 г. в заголовочной секции файла ENDF/B-V, так и в ревизованной в 1991г. (и сохраненной прежней) версии, принятой в ENDF/B-VI.

Во всей рассматриваемой энергетической области оцененная кривая полного сечения из JENDL-3 хорошо согласуется с оценкой Ларсона.

Что касается оценки принятой в JEFF-3, то вне зависимости от того, как следует относиться к результатам Сьержекса, ясно, что результаты дифференциальных экспериментов не дают никаких оснований проводить оцененную кривую так высоко. Заметим, что последняя переоценка в JEFF-3 выполнялась, имея задачу описать эксперименты по натриевому пустотному эффекту реактивности (НПР) в быстрых натриевых реакторах, требовавших повышения транспортного сечения натрия. Однако, повышение полного сечения в противоречии с экспериментальными данными не является единственным путем согласования расчета НПР с экспериментом.

3.2. Сечения упругого рассеяния (MT=2)

Для сечения упругого рассеяния экспериментальных данных намного меньше, чем для сечения полного взаимодействия. В основном, это данные Кини (1976) в области энергий от 0.5 до 2.0 МэВ.

На рисунках 14-21 показано сравнение оцененных кривых с имеющимися экспериментальными данными.

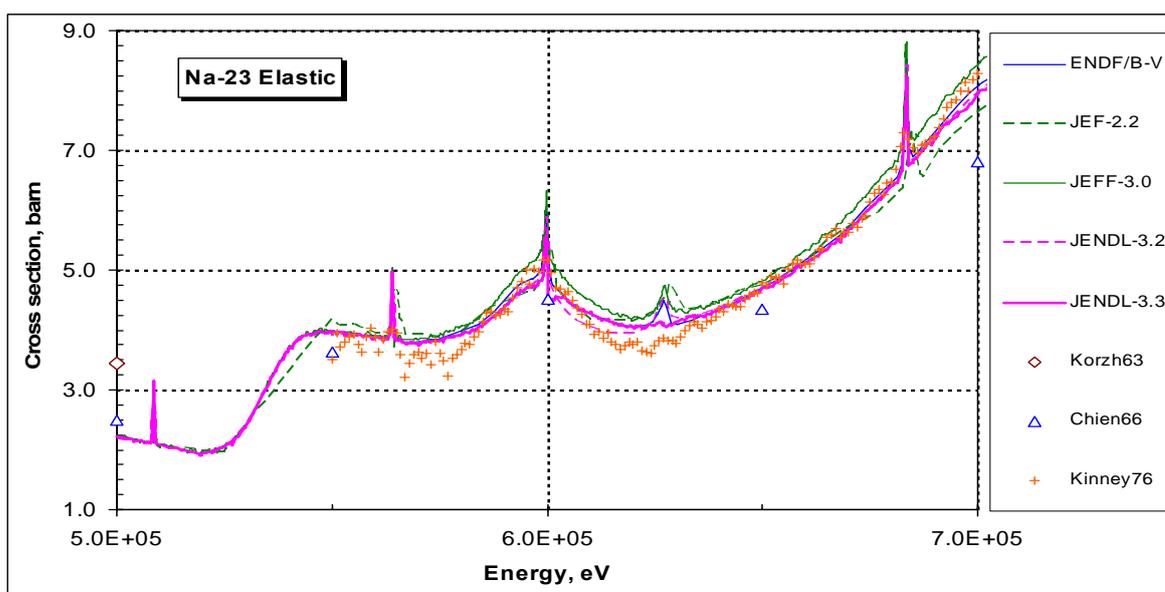


Рисунок 14 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 0.5 – 0.7 МэВ.

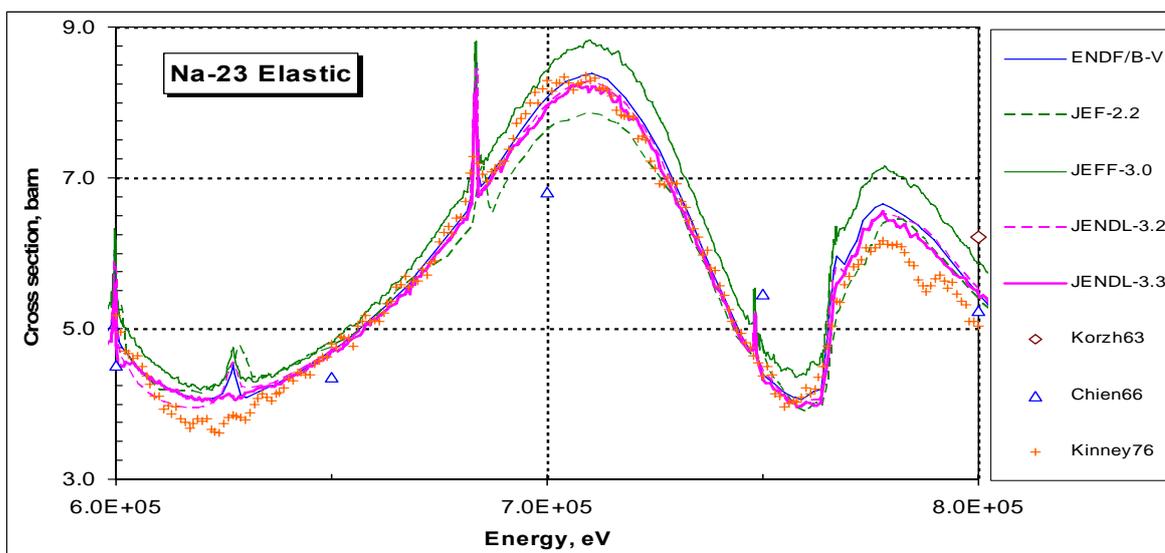


Рисунок 15 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 0.6 – 0.8 МэВ.

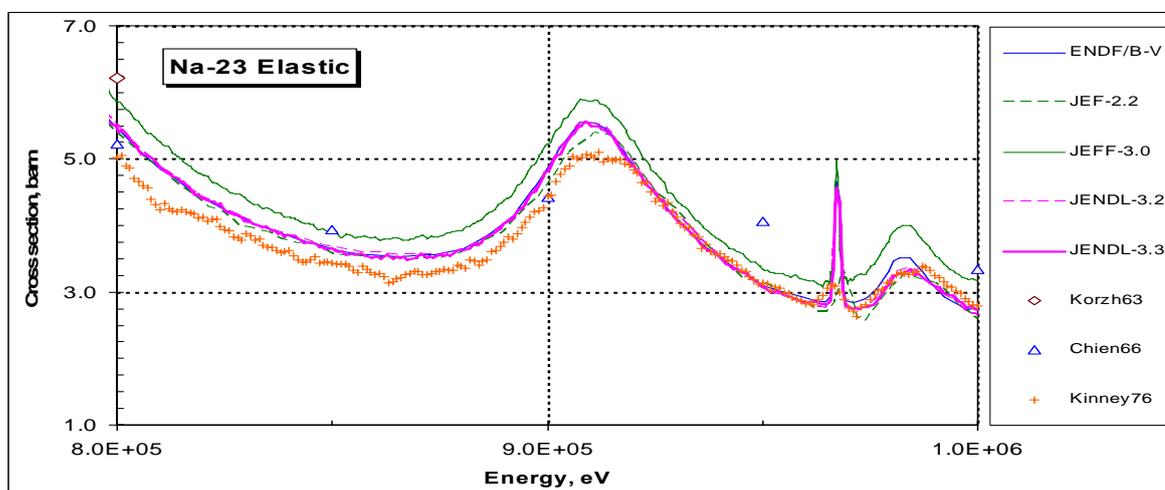


Рисунок 16 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 0.8 – 1.0 МэВ.

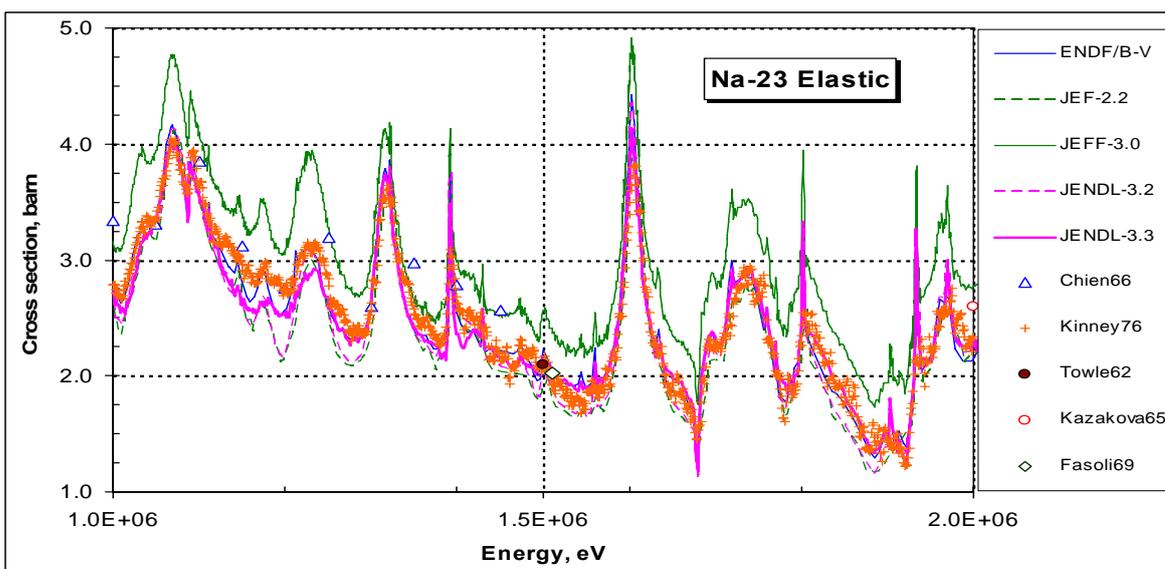


Рисунок 17 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 1.0 – 2.0 МэВ.

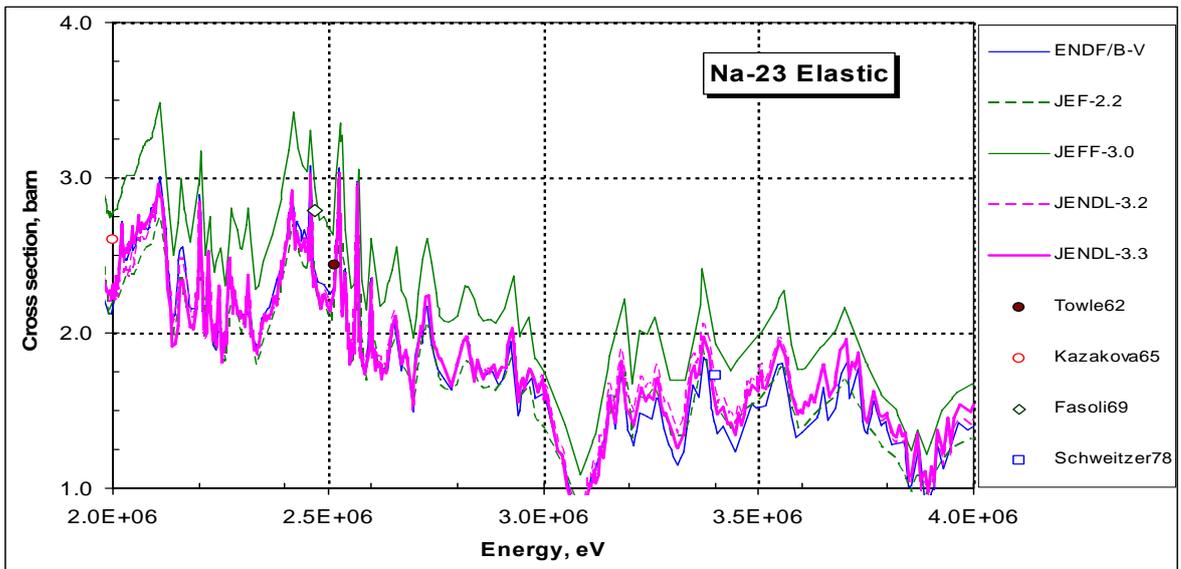


Рисунок 18 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 2.0 – 4.0 МэВ.

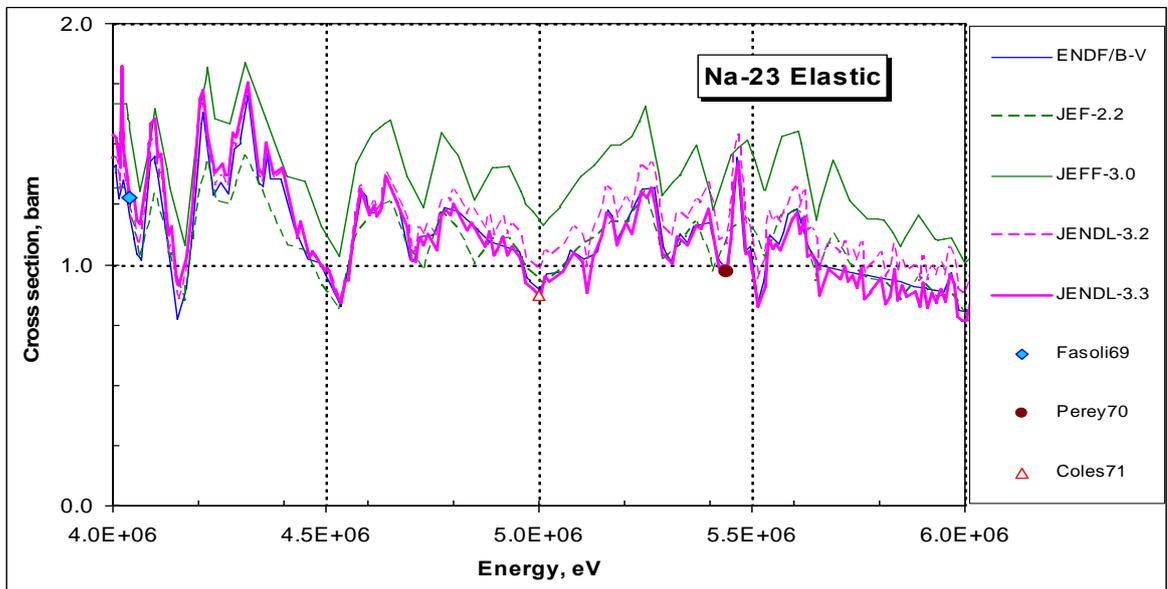


Рисунок 19 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 4.0 – 6.0 МэВ.

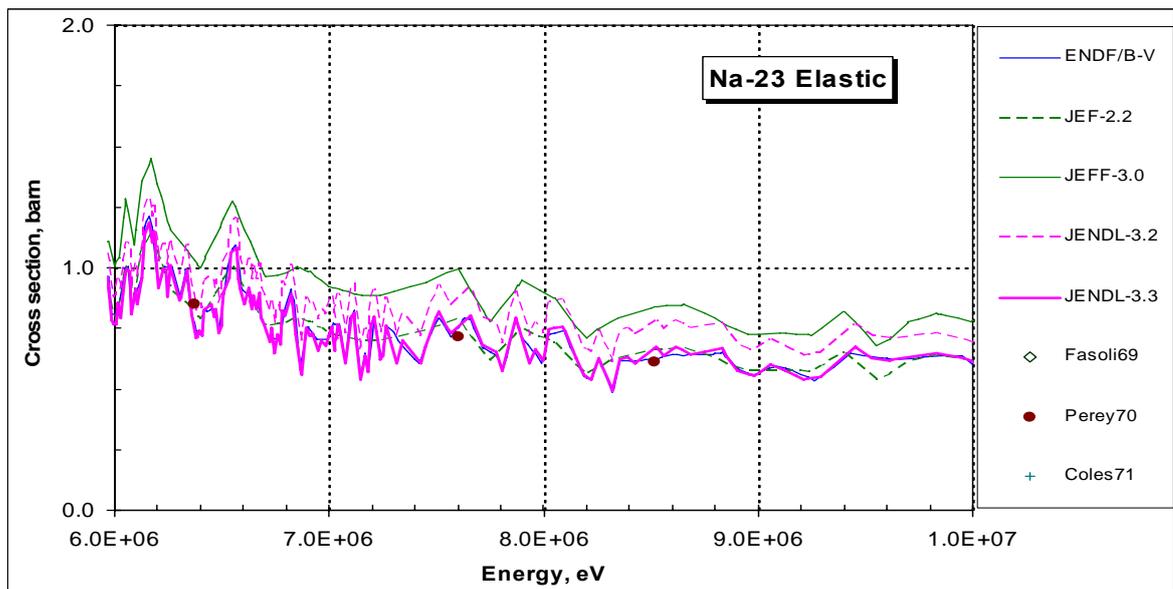


Рисунок 20 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 6.0 – 10.0 МэВ.

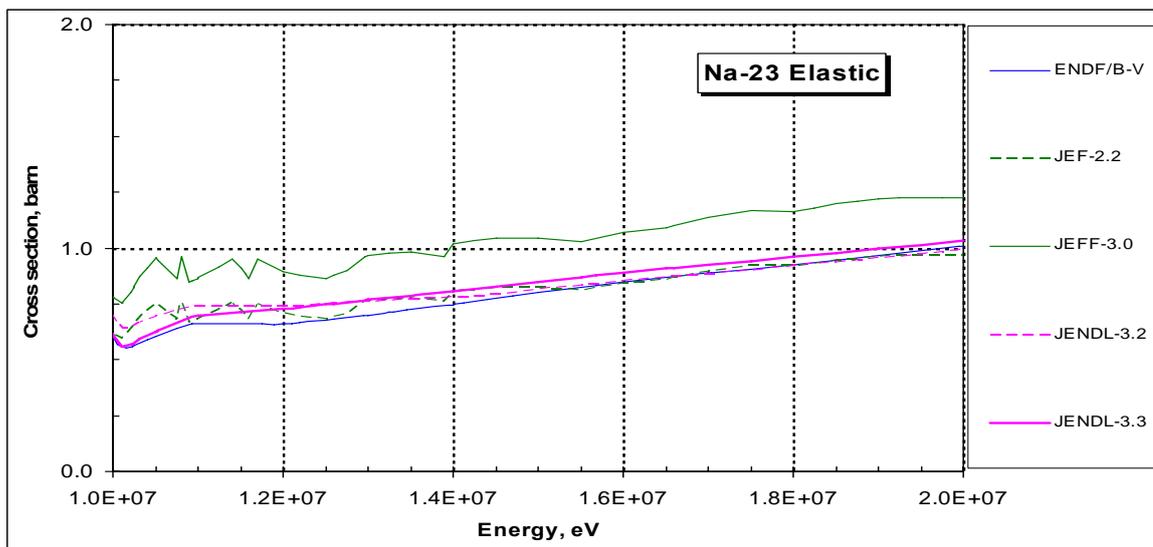


Рисунок 21 – Сечение упругого рассеяния в области энергий 10.0 – 20.0 МэВ.

Как видно, экспериментальные данные по сечению упругого рассеяния также не дают никаких оснований для повышения сечения рассеяния до уровня, принятого в JEFF-3.

Все остальные оценки, и, особенно, последние версии – JENDL-3.3 и ENDF/B-VI (совпадающая с ENDF/B-V) различаются между собой несущественно.

3.3. Сечение радиационного захвата

На рисунках 22 - 23 приведено сравнение экспериментальных и оцененных кривых в области энергий выше 0.5 МэВ.

Экспериментальные данные для этого процесса еще более скудные, чем для упругого рассеяния.

Следует отметить, что в библиотеках JEFF осталась без изменения оценка сечения радиационного захвата из JENDL-3. Поэтому на рисунках сравниваются только две оцененные кривые.

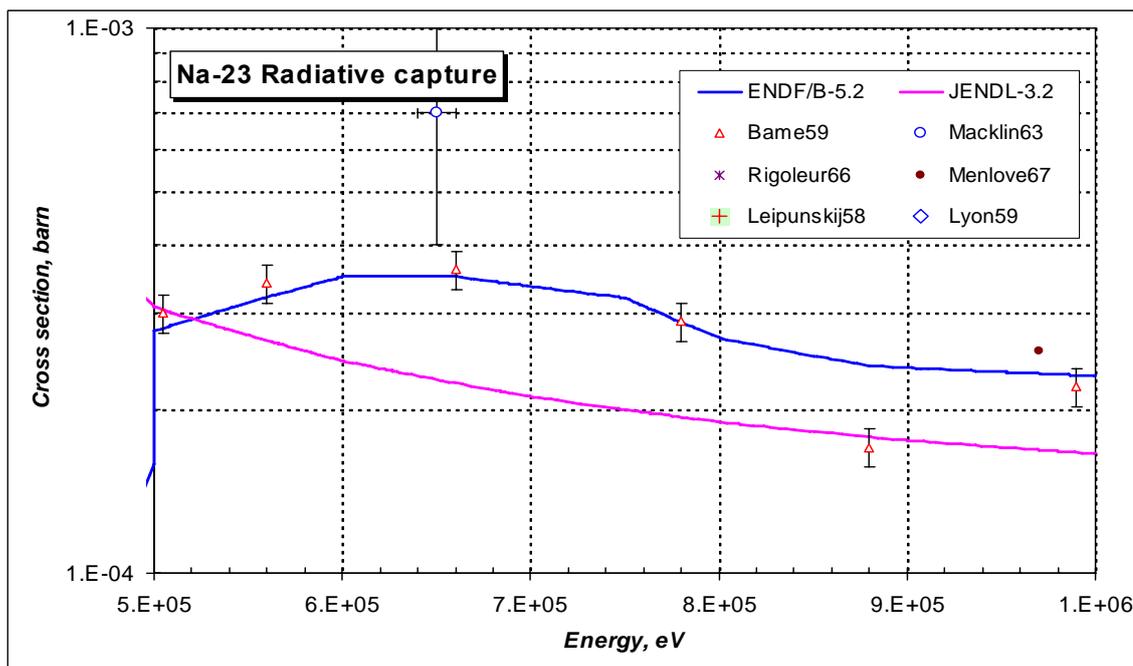


Рисунок 22 – Сечение радиационного захвата Na-23 в области энергий 0.5 – 1.0. МэВ.

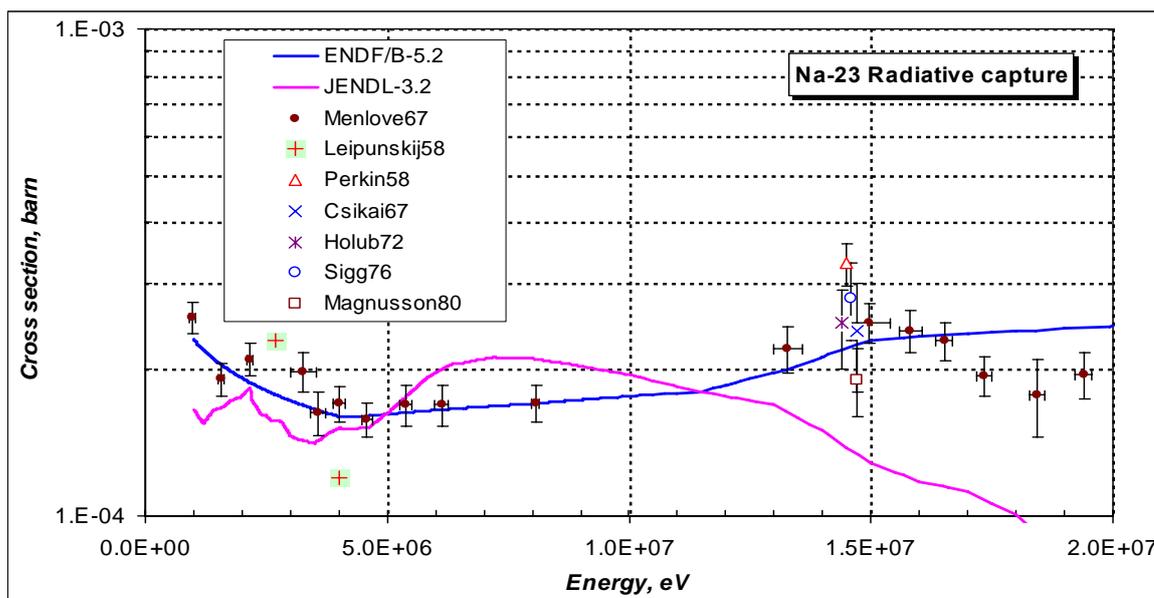


Рисунок 23 – Сечение радиационного захвата Na-23 в области энергий 0.5 – 1.0. МэВ.

Из представленных на рисунках данных видно, что, несмотря на то обстоятельство, что экспериментальные данные по сечению захвата нейтронов малочисленны, а оценки достаточно близки друг к другу, тем не менее, они по-разному согласуются с экспериментальными данными.

Оценка ENDF/B является более привлекательной, по сравнению с оценкой JENDL-3.

3.4. Сечение неупругого рассеяния

Процесс неупругого рассеяния нейтронов на натрия ($E_{\text{порог}} \sim 0.4592$ МэВ) начинается ниже границы разрешенных резонансов. В параметрах разрешенных резонансов в оценке Ларсона конкуренция со стороны неупругого рассеяния не учитывается. Неупругое рассеяние в области разрешенных резонансов описывается плавной подложкой, величина которой на границе этой области составляет всего 15 миллибарн, т.е. менее 1% от полного сечения. Измеренное сечение неупругого рассеяния имеет более ярко выраженную резонансную структуру, чем полное сечение, поскольку значительный вклад в этот процесс (или, точнее, процессы) вносит нейтронное взаимодействие с передачей составному ядру высоких орбитальных моментов. Возбуждаемые при этом резонансы слишком слабы, чтобы быть замеченными при измерениях полного сечения на фоне сечения потенциального рассеяния.

Экспериментальных работ по измерению сечения неупругого рассеяния мало – всего 3 работы. Среди них выделяется эксперимент Перри (1971), выполненный с весьма высоким разрешением. В остальных работах сечение неупругого рассеяния было измерено в одной – двух точках. В 1997 году сечение неупругого рассеяния с высокой точностью измерялось в Гиле (Бельгия) группой С.Копецкий, Р.Шелли, Х.Мертен и Х.Вейгман. Однако результатов измерения именно сечения неупругого рассеяния в библиотеке EXFOR не имелось. Поэтому сравнение проводилось с отмеченными выше немногочисленными экспериментальными данными.

На рисунках 24 – 28 показано сравнение оцененных и имеющихся экспериментальных данных.

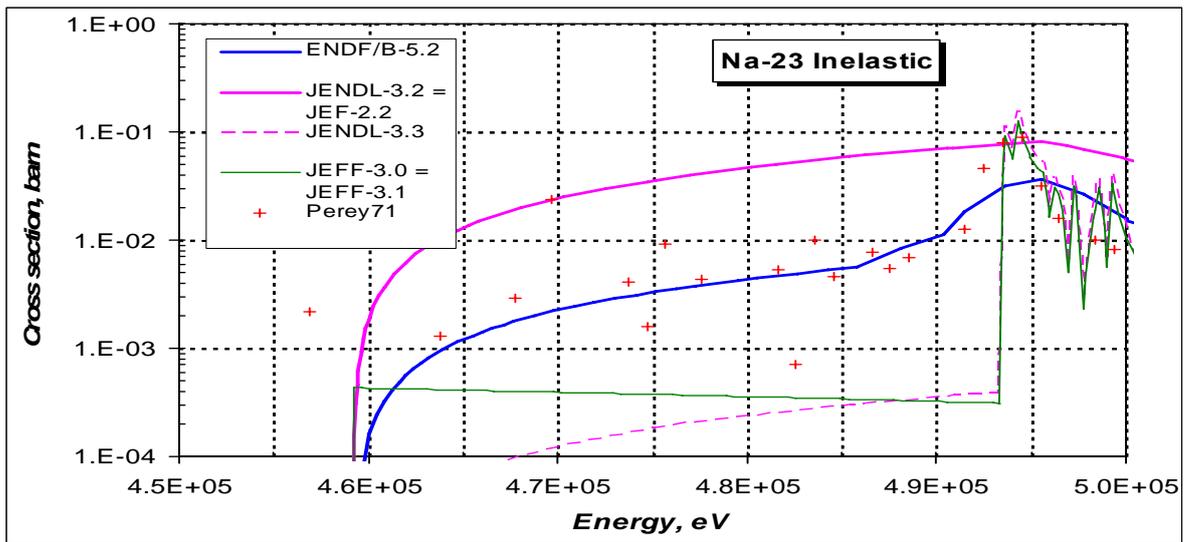


Рисунок 24 – Сечение неупругого рассеяния Na-23 в области порога.

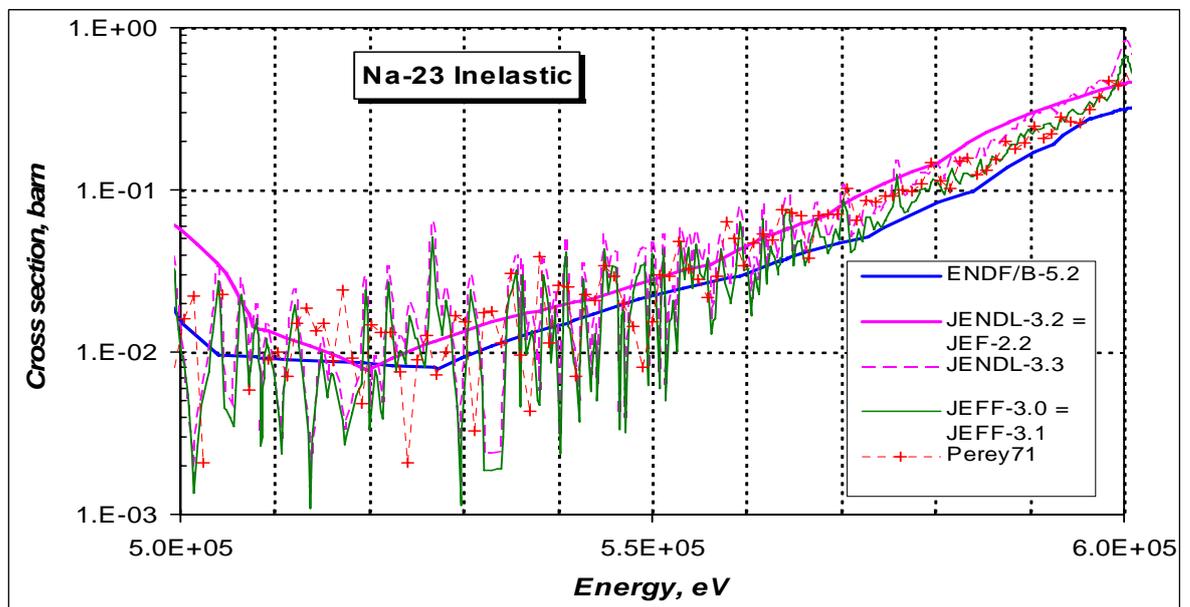


Рисунок 25 – Сечение неупругого рассеяния Na-23 в области 0.5 – 0.6 МэВ.

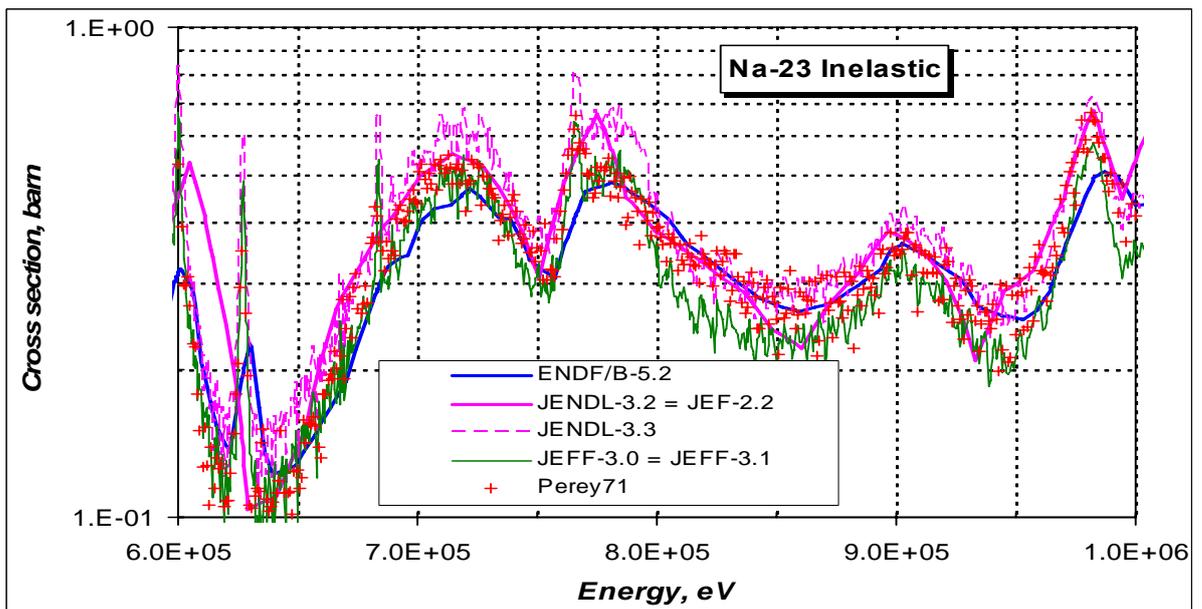


Рисунок 26 – Сечение неупругого рассеяния Na-23 в области 0.6 – 1.0 МэВ.

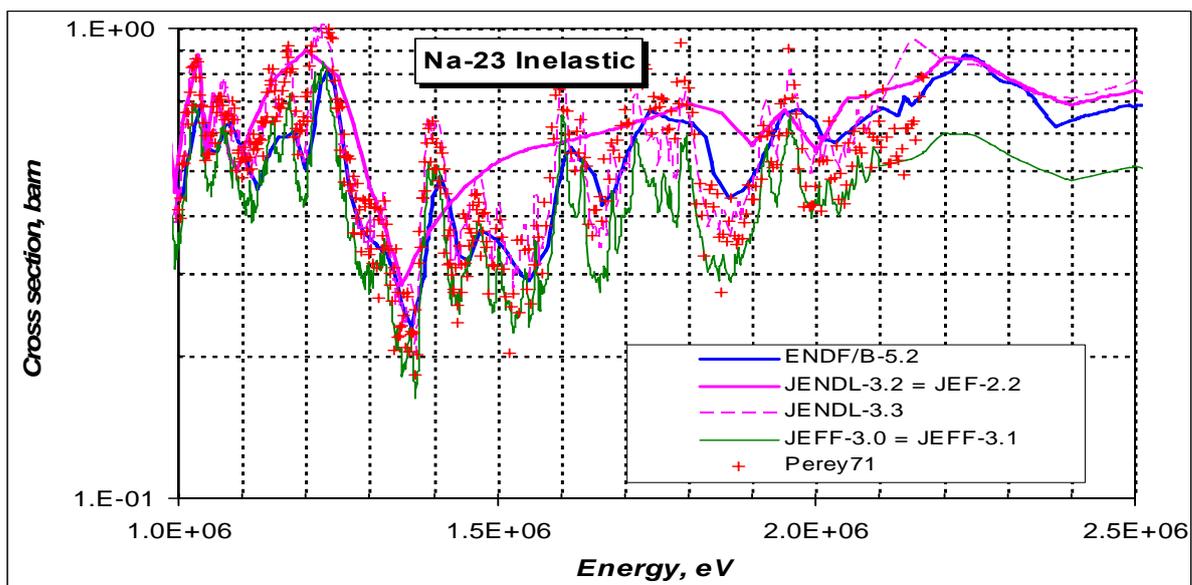


Рисунок 27 – Сечение неупругого рассеяния Na-23 в области 1.0 – 2.5 МэВ.

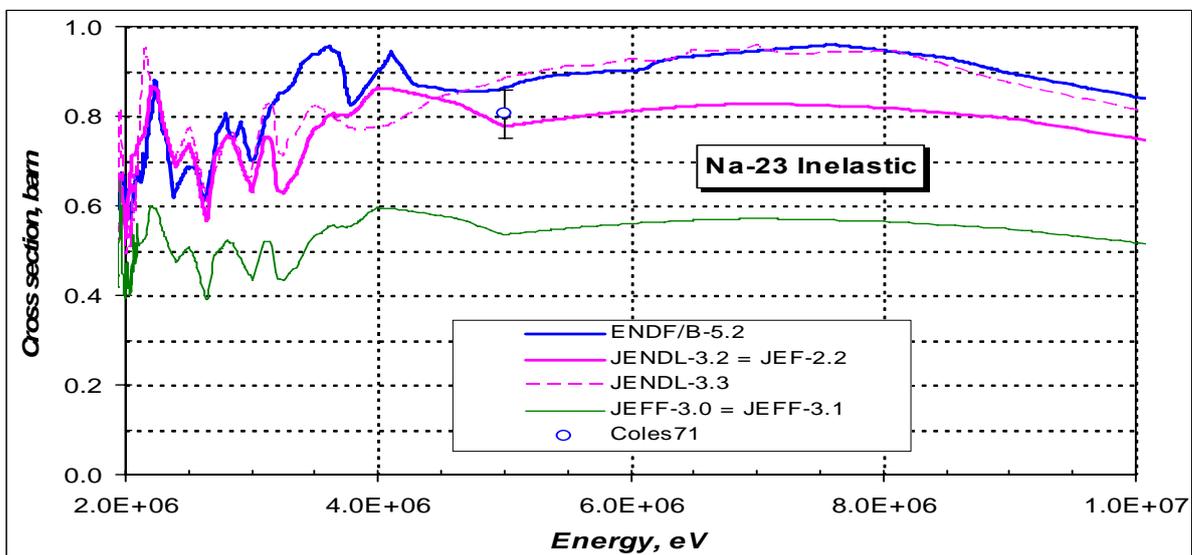


Рисунок 28 – Сечение неупругого рассеяния Na-23 в области 2.5 – 10.0 МэВ.

Выводы:

При сравнении оцененных кривых с экспериментальными данными, прежде всего, обращает на себя внимание детальная резонансная структура, принятая в оценке JEFF, которая далеко не всегда совпадает со структурой сечения неупругого рассеяния, измеренной Перри и являющейся в настоящее время единственным источником данных о тонкой структуре сечений в этой энергетической области. В полном сечении эта структура практически не проявляется, так что ни к какой резонансной самоэкранировке сечений неупругого рассеяния она не ведет. Выше, примерно, 800 кэВ оценка JEFF-3 проведена в среднем ниже экспериментальных данных, лишь местами соприкасаясь с ними.

Оценка, принятая в JENDL-3.3 также пытается следовать измеренной структуре сечения неупругого рассеяния, но в среднем она отклоняется от экспериментальных данных в сторону, противоположную оценке JEFF.

Оценка JENDL-3.2, напротив, не отражает даже очевидных нерегулярностей в ходе сечения неупругого рассеяния в области около 1.5 МэВ.

Оценка Ларсона, не учитывая тонкой структуры, обнаруженной Перри, хорошо согласуется с его данными в среднем.

3.5. Сечение реакции (n,2n)

Сечение реакции (n,2n) имеет очень высокий порог ~ 13 МэВ, и к 20 МэВ ее сечение дорастает до ~ 0.1 барна. На рисунке 29 представлено сравнение оцененных кривых и экспериментальных данных.

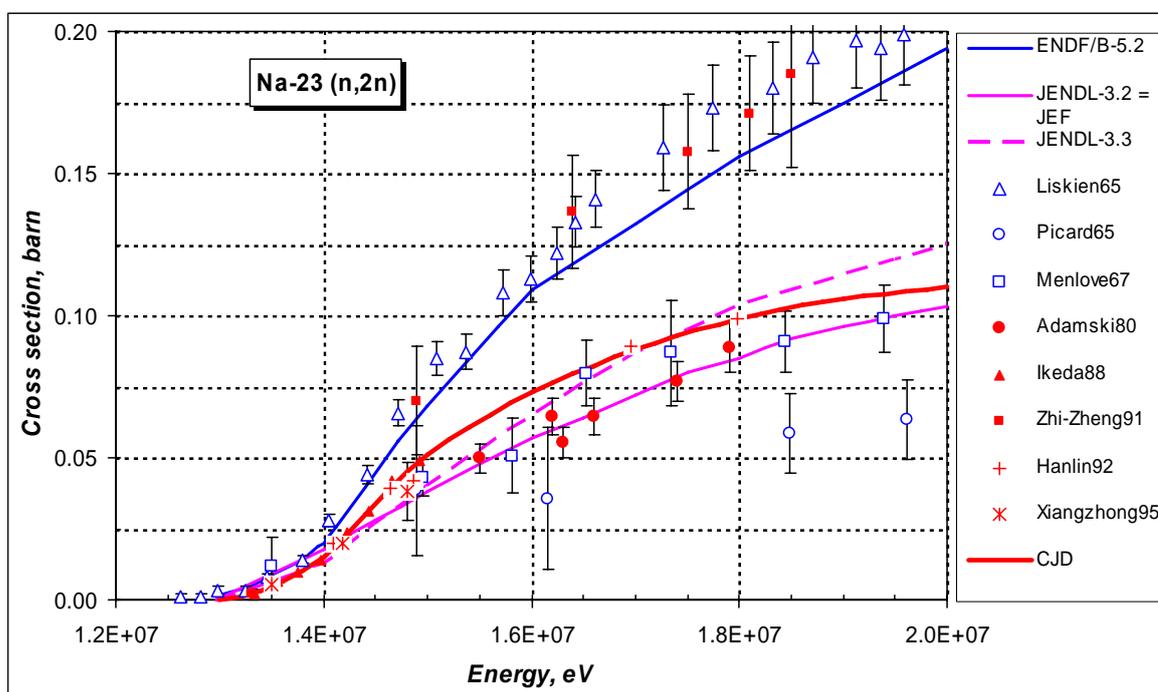


Рисунок 29 – Сечение реакции (n,2n) в области энергий 12.0 –20.0 МэВ.

Из представленного на рисунке сравнения видно, что проблема хода сечения реакции (n,2n), возникшая в середине 60-х годов (эксперимент Лискина с одной стороны и эксперименты Пикарда и Менлова с другой стороны), не получила разрешения с появлением новых экспериментальных данных, появившихся в 80-х и 90-х годах. Согласно систематике, разработанной в Центре по ядерным данным (г. Обнинск) В.Н.Манохиним, сечение реакции (n,2n) имеет не такой резкий подъем, как в оценке Ларсона, и хорошо согласуется с оценкой из JENDL-3.

По всей видимости, оценка сечения, выполненная в ЦЯД, является предпочтительной.

3.6. Сечения реакций (n, n'p) и (n, n'α)

На рисунке 30 показано сравнение оцененных кривых сечения реакции (n,n'p) с результатами измерений в двух экспериментах. Отметим, что сечение реакции (n,n'p) в оценке ENDF/B отсутствует.

Заметим, что в то время как реакции (n,n'p) и (n,pn') являются идентичными с практической точки зрения и их пороги совпадают (и равны 9.18 МэВ), реакция (n,d) имеет более низкий порог (6.858 МэВ) и не сопровождается испусканием нейтронов. Сечения реакций с вылетом других заряженных частиц – (n,p), (n,α) – как будет показано ниже, при 14 -15 МэВ равны, примерно, 100 миллибарнам.

Если предположить, что вклад реакции (n,d) в сечение, измеренное Лейчем, имеет тот же порядок величины, придется констатировать расхождение между его результатом и результатом, полученным Козиром и др. Для оценки вероятного значения сечения реакции (n,d), рассмотрим алюминий, для которого эта реакция измерялась непосредственно и при 14 -16 МэВ равна 3 -4 миллибарн, тогда как сечения реакций (n,p) и (n,α) при этих энергиях, как и в случае натрия, равны, примерно 100 миллибарнам. Порог

реакции (n,d) на алюминии даже несколько ниже, чем на натрии. Можно поэтому полагать, что и в случае натрия сечение реакции (n,d) при 14-16 МэВ составит несколько миллибарн, т.е. ее вклад в измеренное Лейчем сечение существенно меньше экспериментальной погрешности.

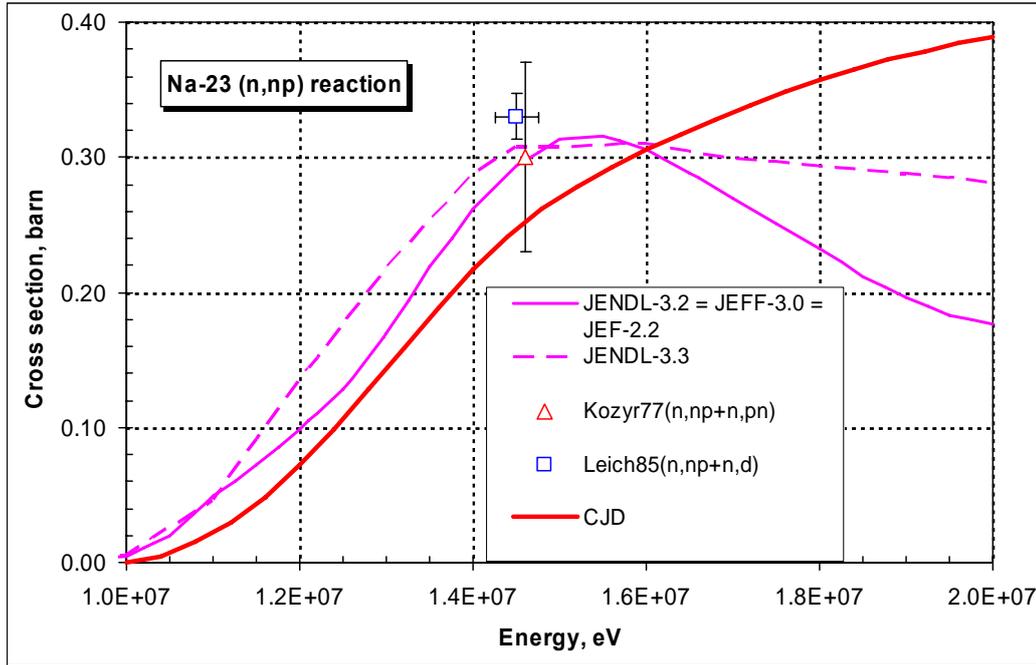


Рисунок 30 – Сечение реакции (n,n'p) в области энергий 10.0 –20.0 МэВ.

Исходя из выше изложенного, констатируем, что оцененные экспериментальные данные по сечению реакции (n,n'p) имеют достаточно надежное экспериментальное подтверждение. Оценка сечения, выполненная в ЦЯД, по величине сечения согласуется с другими оценками, а по форме отличается - особенно выше энергии 16 МэВ.

На рисунке 31 показано сравнение оцененных кривых сечения реакции (n,na) с экспериментальными данными.

Отметим, что в оценке ENDF/B сечение такой реакции нет.

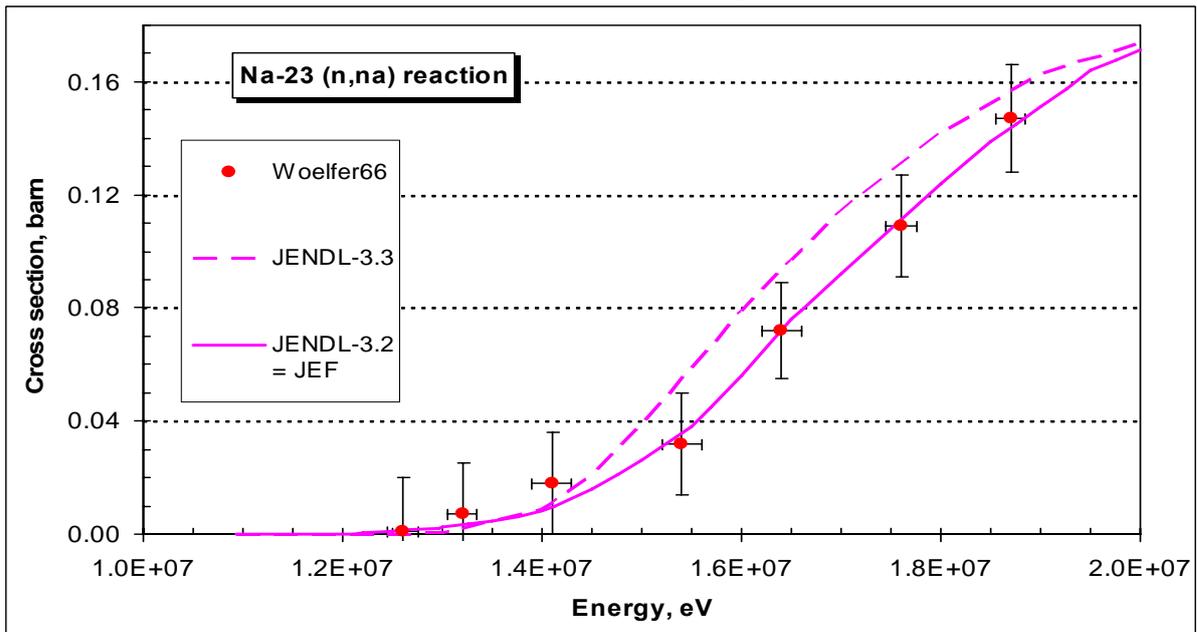


Рисунок 31 – Сечение реакции (n,n'a) в области энергий 10.0 –20.0 МэВ.

Из приведенного рисунка видно, что оценка JENDL-3.2 проведена просто по экспериментальным точкам, тогда как более поздняя оценка JENDL-3.3 основана на модельных расчетах. Различие между оценками невелико, и сама реакция с практической точки зрения не очень существенна.

3.7. Сечения реакций (n,p) и (n, α)

Сравнение оцененных кривых энергетической зависимости сечения реакции (n,p) с экспериментальными данными приводится на рисунках 32 – 36. В экспериментах Вейгемана, выполненных с высоким разрешением, проявилась резонансная структура. В целом же результаты этой работы согласуются в пределах погрешностей с данными более ранних работ Вильямсона, Басса и Бартле вплоть до 9 МэВ.

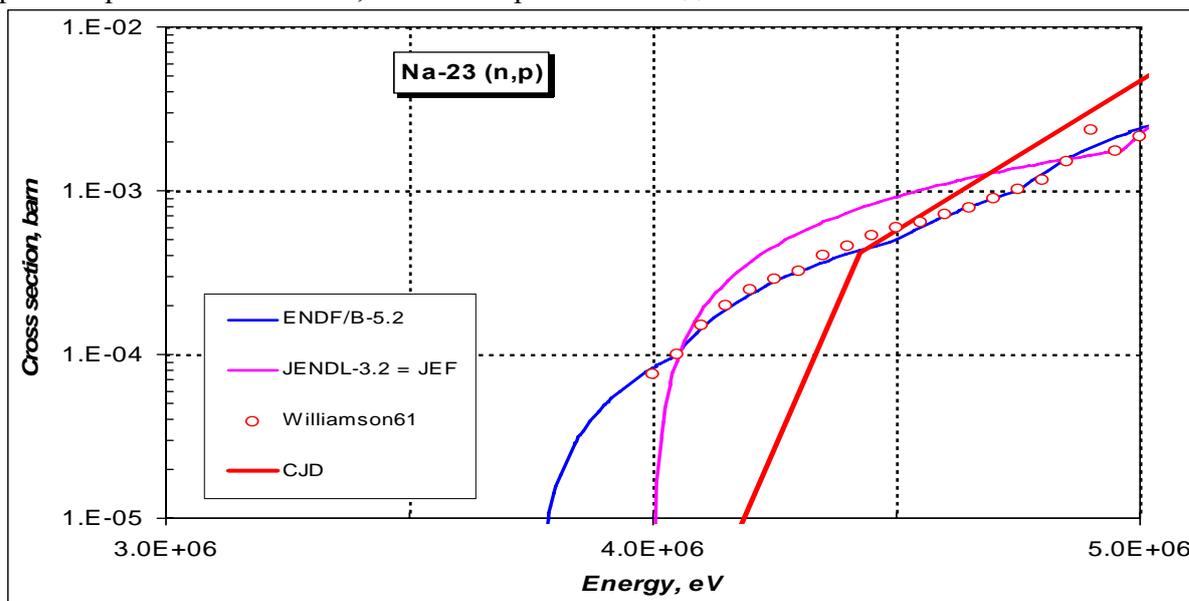


Рисунок 32 – Сечение реакции (n,p) в области энергий 3.5 – 5.0 МэВ.

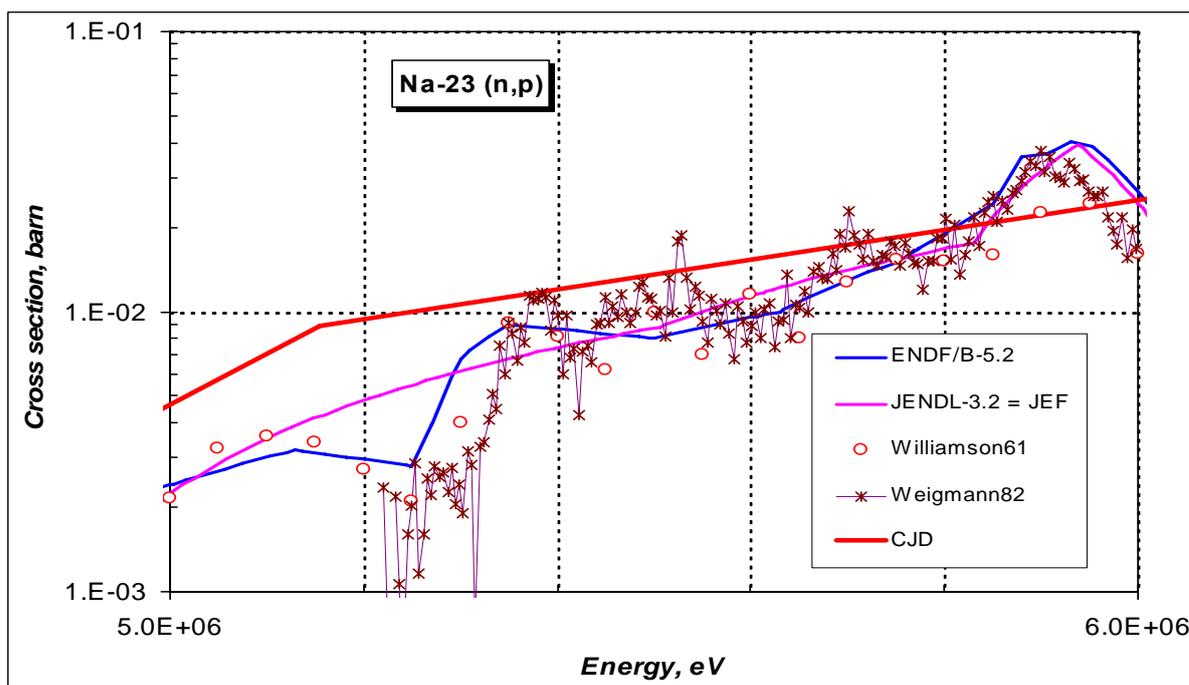


Рисунок 33 – Сечение реакции (n,p) в области энергий 5.0 – 6.0 МэВ.

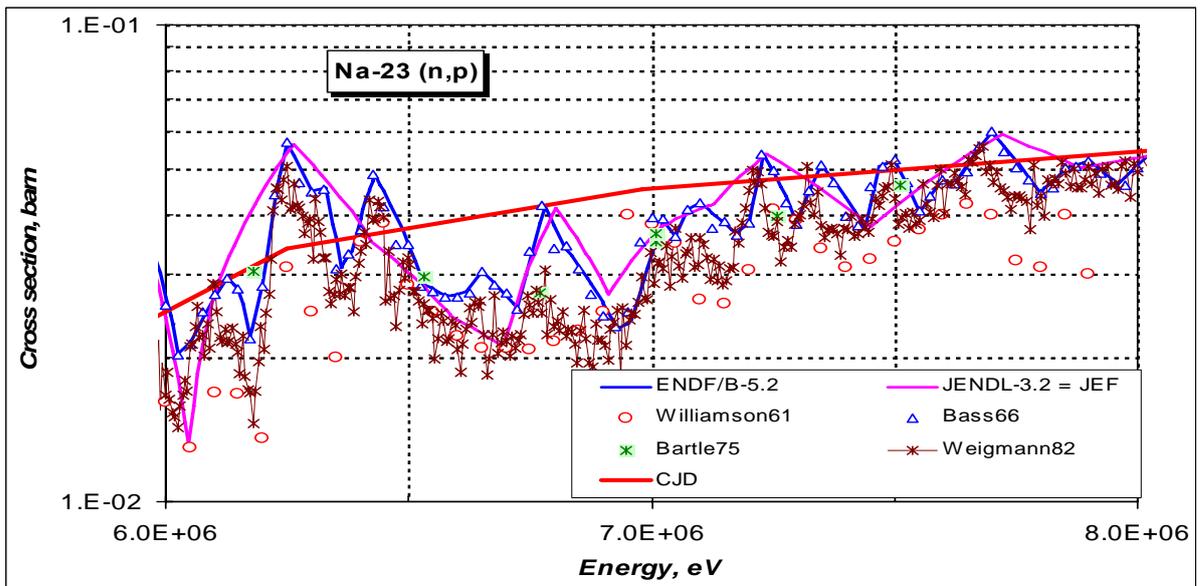


Рисунок 34 – Сечение реакции (n,p) в области энергий 6.0 – 8.0 МэВ.

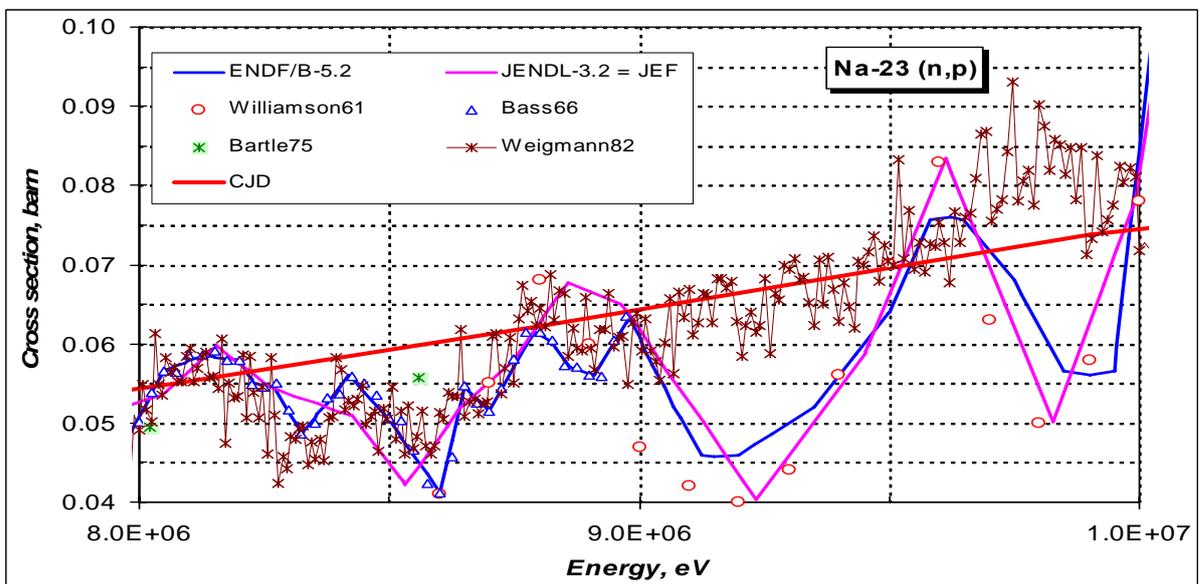


Рисунок 35 – Сечение реакции (n,p) в области энергий 8.0 – 10.0 МэВ.

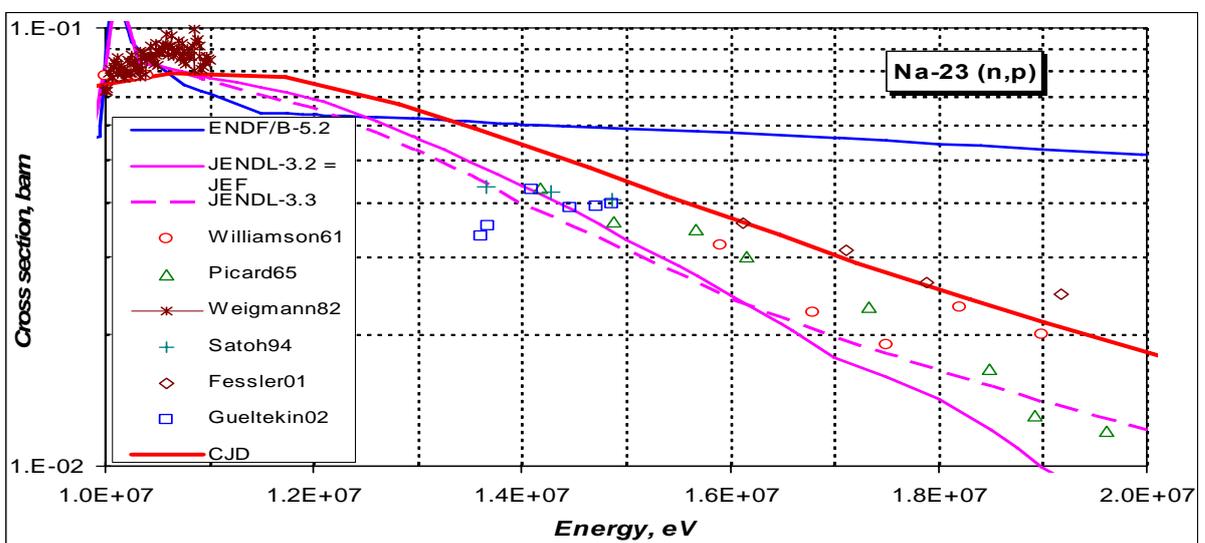


Рисунок 36 – Сечение реакции (n,p) в области энергий 10.0 – 20.0 МэВ.

Выше этой энергии результаты Вильямса испытывают сильную осцилляцию, не подтверждаемую более поздними данными Вайгемана 1982 г.. Отметим, что последние не учитывались при оценке сечений ни в ENDF/B ни в JENDL-3. Из приведенных рисунков видно, что оценка ENDF/B лучше описывают совокупность экспериментальных данных, за исключением области энергий выше 13 МэВ, где оценка из JENDL-3.3 имеет очевидное преимущество. Оценка сечения, выполненная в ЦЯД, не отражает структуру сечения, наблюдаемую в экспериментах, но хорошо согласуется с совокупностью экспериментов выше 11 МэВ.

Очевидно, что сечение реакции (n,p) нуждается в переоценке на основе данных Вайгемана.

Выводы:

Оценка из ENDF/B предпочтительна по сравнению с другими. Она требует небольшой корректировки в области порога реакции, а также, в области энергий выше 10-МэВ. Имеется возможность откорректировать сечение в этой области энергий согласно оценке ЦЯД.

3.6. Сечение реакции (n,a)

Сравнение оцененных кривых с экспериментальными данными показано на рисунках 37-39.

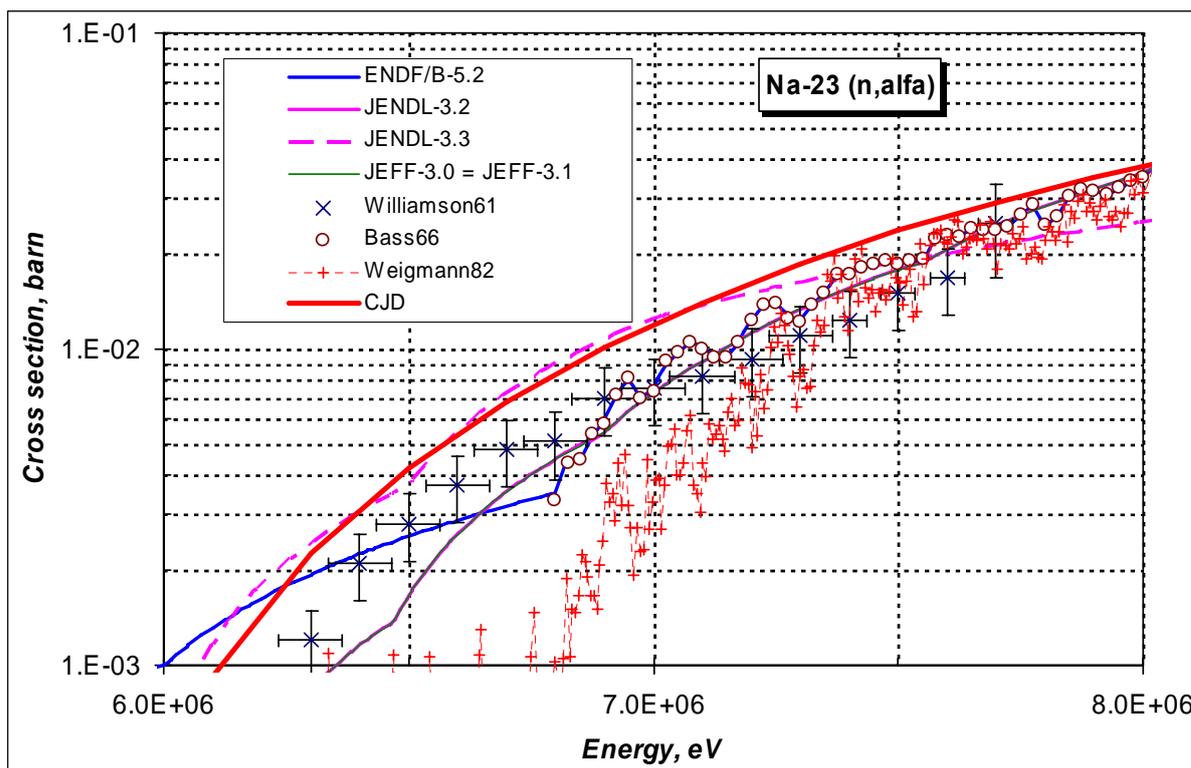


Рисунок 37 – Сечение реакции (n,a) в области энергий 6.0 –8.0 МэВ.

Новые экспериментальные данные Вайгемана вблизи порога указывают на плавное нарастание сечения реакции (как это имеет место в случае фтора или алюминия, например). Все оценки в этой области (ниже 7.5 МэВ) опираются на данные Вильямсона и Басса и, по нашему мнению, требуют корректировки.

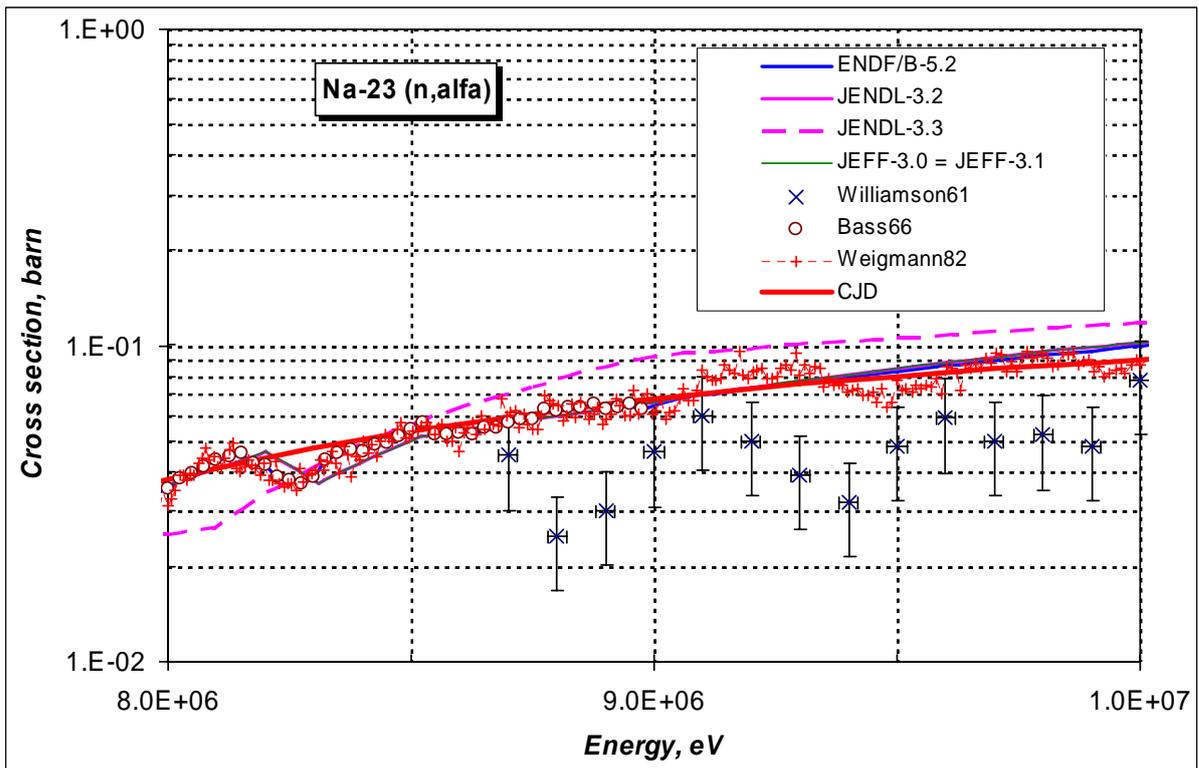


Рисунок 38 – Сечение реакции (n,а) в области энергий 8.0 –10.0 МэВ.

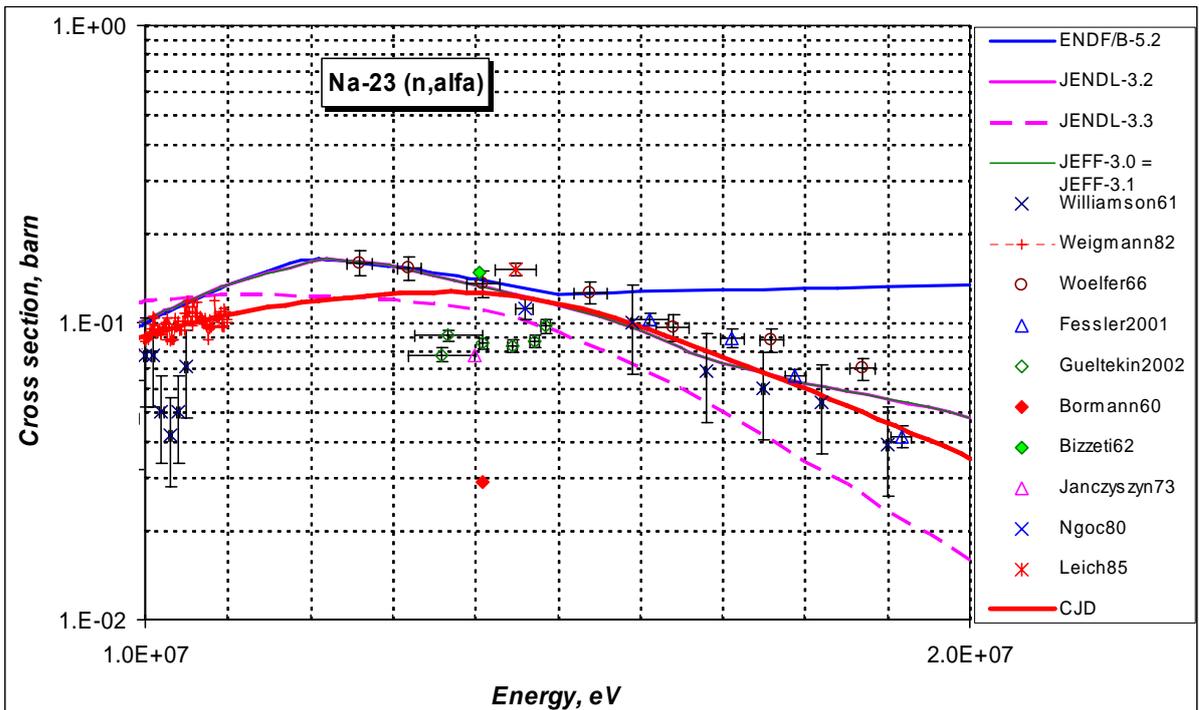


Рисунок 39 – Сечение реакции (n,а) в области энергий 10.0 –20.0 МэВ.

От 7.5 до 14 МэВ оценка ENDF/B-V получила подтверждение в более поздних результатах Вайгемана и представляется наиболее надежной. При этой энергии оценка ENDF/B-V «сшивается» с оценкой JEFF, которая наилучшим образом согласуется с совокупностью данных при более высоких энергиях, включая недавние измерения Фесслера. В то же время, нельзя не отметить и расхождение экспериментальных данных в области 15 Мэв, где результаты Гвелтекина (2002) и Джакцисцина(1973) лежат существенно ниже данных Вольфера и Бизетти, полученных в 60-х годах и более позднего

результата Лейча (85). Нельзя не обратить внимания и на то, что данные Вольфера подтверждаются и результатами Фесслера. Оценка, выполненная в ЦЯД, носит более плавный характер и хорошо согласуется с экспериментальными данными выше 10 МэВ.

3.7. Сечения реакций (n,d) и (n,t)

Сечения реакций (n,d) и (n,t) в рассматриваемых оценках отсутствуют, вероятно, по причине их малой величины. Однако, в силу необходимости знания этих сечений в задачах активации, следовало бы включить в новую оценку соответствующие секции. За основу их можно взять оценку сечений, выполненных в ЦЯД (см. рис.40 – 41).

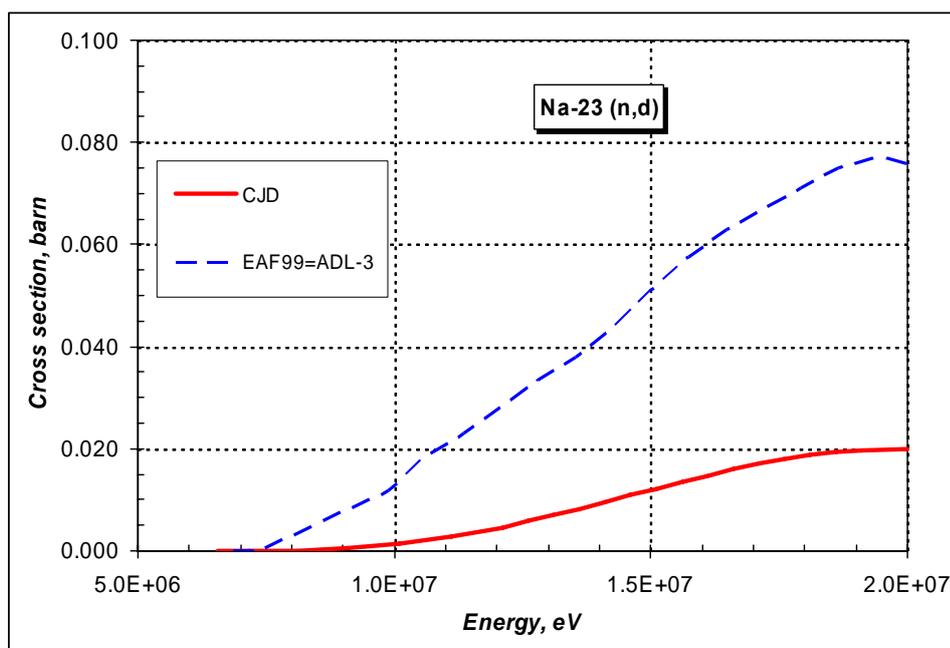


Рисунок 40 - Сечение реакции (n,d) в области энергий 5.0 –20.0 МэВ

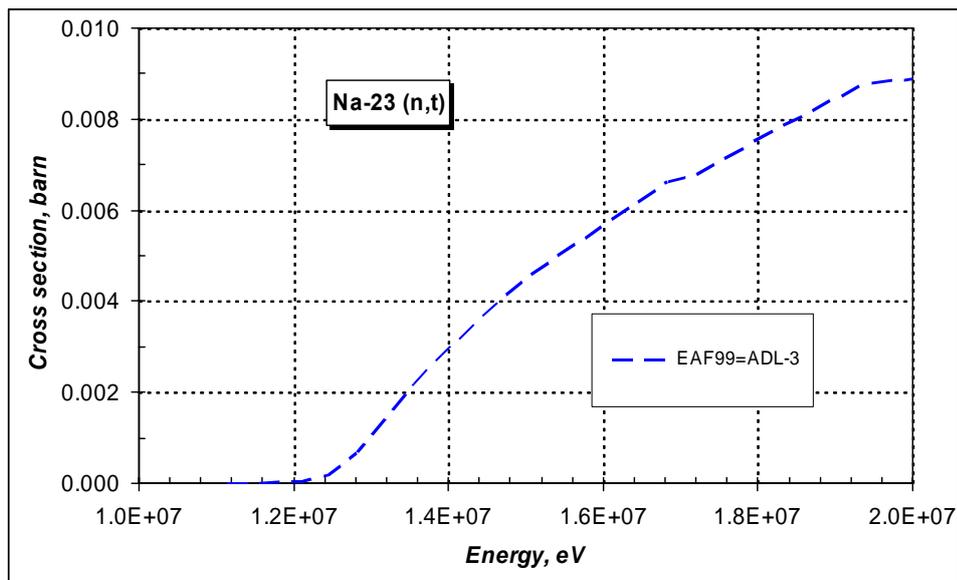


Рисунок 41 - Сечение реакции (n,t) в области энергий 10.0 –20.0 МэВ

4. Энерго-угловые распределения

4.1. Анизотропия упругого рассеяния.

В оценке ENDF/B-5 угловые распределения представлены полиномами Лежандра на основе данных работы Кени и Перри(1976). Привлекались расчеты, выполненные по оптической модели. В оценках JENDL-3 и JEFF-3 использовались расчеты по программе CASTHY.

Одним из основных параметров углового распределения упругого рассеяния нейтронов является средний косинус угла рассеяния.

На рисунке 42 приводится сравнение различных оценок среднего косинуса угла рассеяния при упругом рассеянии нейтронов.

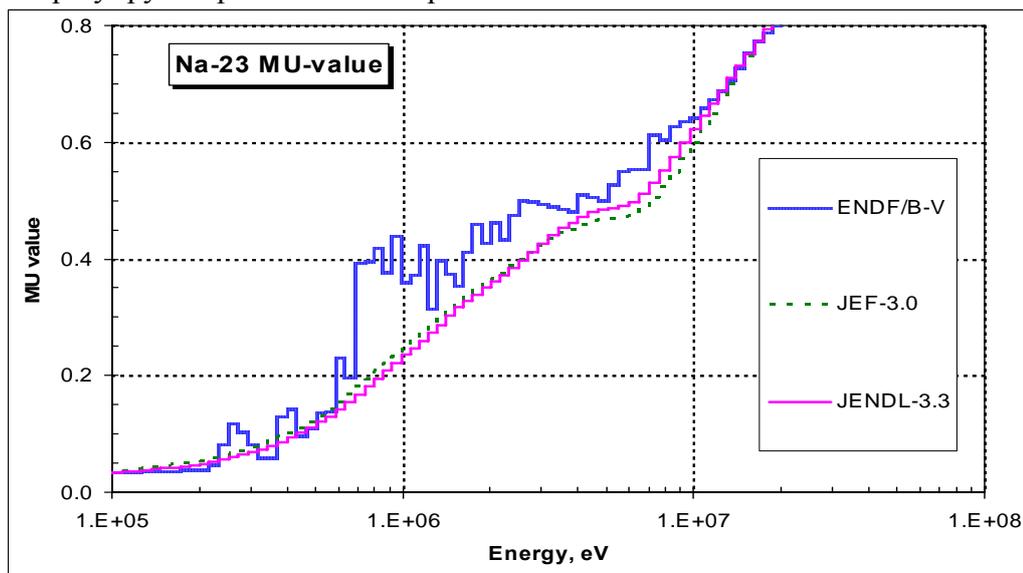


Рисунок 42 – Энергетическая зависимость $\mu(E)$.

Из приведенного на рисунке сравнения видно, что эта величина в оценке ENDF/B имеет принципиально различный характер энергетической зависимости $\mu(E)$. В районе 1 МэВ значения различных оцененных значений отличаются в ~ 2 раза. Оцененная кривая из ENDF/B, в целом, лежит выше кривых из JEFF-3 и JENDL-3. Экспериментальные данные Кени и Перри, находящиеся в библиотеке EXFOR, подтверждают ход кривой из ENDF/B (см. рис. 43).

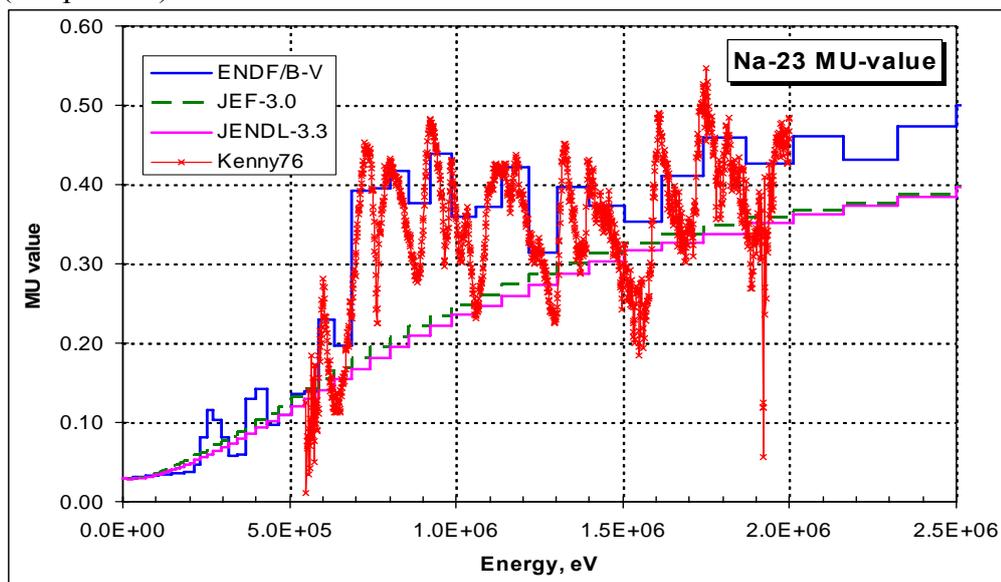


Рисунок 43 – Сравнение оцененных и экспериментальных значений $\mu(E)$.

Однако, наряду с экспериментом Кени и Перри, в библиотеке EXFOR имеются экспериментальные данные по угловым распределениям упруго рассеянных нейтронов, выполненные в Гиле группой С.Копески и др. Данные приводятся как угловые распределения рассеянных нейтронов под разными углами 24, 40, 60, 90, 120, 137 и 150 градусов. Величина среднего косинуса угла рассеяния после обработки этих данных Николаевым М.Н. приведена на рисунке 44.

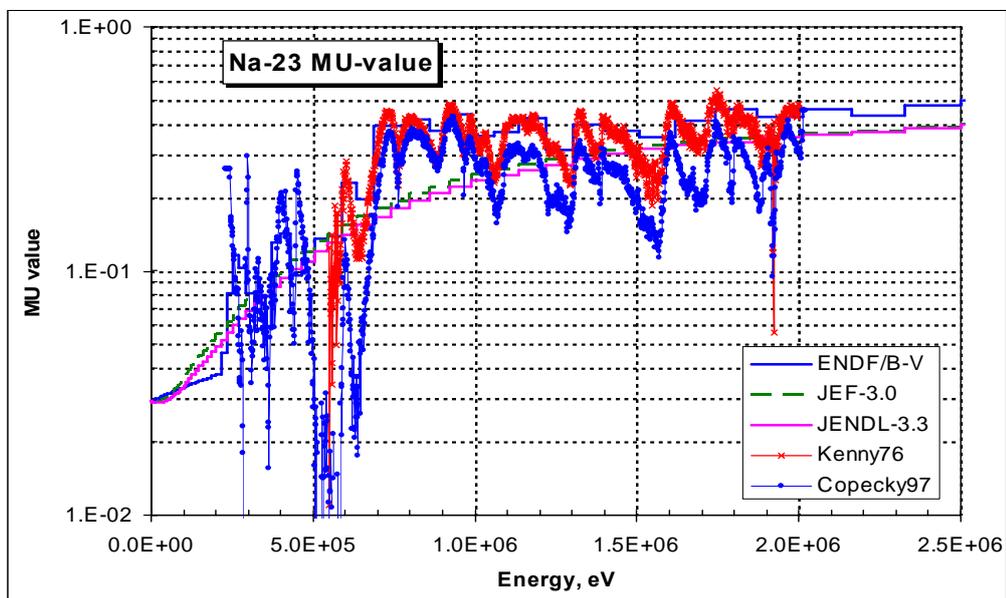


Рисунок 44 – Сравнение оцененных и экспериментальных значений $\mu(E)$.

Из приведенного на рис.44 сравнения видно, что характер энергетической зависимости величины $\mu(E)$ в обоих экспериментах совпадают. Значения из эксперимента С.Копески и др. находятся систематически ниже данных Кени и Перри. Если обработка эксперимента, выполненного в Гиле, подтвердится, то это значит, что средний косинус угла упруго рассеянных нейтронов можно значительно понизить относительно оценки из ENDF/B до уровня, например, оценки из JENDL-3.3.

Выводы:

Угловые распределения упруго рассеянных нейтронов нуждаются в переоценке. Для этого имеются достаточно подробные экспериментальные работы, выполненные недавно в Гиле группой С.Копески и др.

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

При анализе фотонных данных рассматривались данные из библиотек ENDF/B6r8, JEF2.2, JENDL3.2, JENDL3.3.

Данные в библиотеке ENDF/B6.r8 представлены неполно: присутствуют только фотоны при неупругом рассеянии и радиационном захвате нейтронов. В неупругом рассеянии выделен первый уровень, остальные уровни объединены в реакцию nonelastic (MT=3) вместе с другими реакциями неупругого взаимодействия.

Из остальных библиотек наиболее полно фотонные данные представлены в библиотеке JENDL-3.3. В файле MF=12 (множественности образования фотонов и вероятности переходов) представлены данные для реакций MT= 4, 16, 22, 28, 51-78,102,103,107. Для этих же реакций присутствуют файлы MF=14(угловые распределения) и MF=15(энергетические спектры).

Поскольку нейтронные данные в основном были взяты из библиотеки ENDF/B6.r8, то была выполнена небольшая редакционная работа в представлении фотонных данных из библиотеки JENDL-3. Для неупругого рассеяния область непрерывного спектра опустилась до 6.1 МэВ (7.2 МэВ в ENDF/B6.r8) и были приведены в соответствие пороговые энергии. В связи с этим число дискретных уровней стало 63, т.е. уменьшилось по сравнению с JENDL-3.3. Множественности образования фотонов и спектры в JENDL-3.3 рассчитывались по программе TNG. Для уровней 60, 61, 63 приводится большое количество переходов (до 30-ти) с маленькой вероятностью образования фотонов. Для этих уровней решено было оставить схемы, представленные в JENDL3.2 из Nuclear Physics, Vol.A30,1978.

Ниже в таблице дана схема гамма-переходов для неупругого рассеяния, представленная в окончательном варианте секций фотонных данных в библиотеке РОСФОНД.

В секциях MF=14 и MF=15 были выполнены аналогичные замены границы непрерывного спектра и порогов.

N	Энергия уровня, MeV	Переход	Энергия гамма-кванта, MeV	Вероятность перехода, %.
0.	0.0000			
51.	0.4400	1: 1→0	0.4400	100
52.	2.0780	3: 2→0 2→1 1→0	2.0780 1.6380 0.4400	9 91 91
53.	2.3930	3: 3→0 3→1 1→0	2.3930 1.9530 0.4400	66 34 34
54.	2.6400	6: 4→0 4→1 4→2 2→0 2→1 1→0	2.6400 2.2000 0.5620 2.0780 1.6380 0.4400	98 1 1 0.09 0.91 1.91
55.	2.7050	6: 5→1 5→2 5→0 2→0 2→1 1→0	2.2650 0.6270 2.7050 2.0780 1.6380 0.4400	64 35 1 3.15 31.85 95.85
56.	2.9830	3: 6→0 6→1	2.9830 2.5430	59 41

		1→0	0.4400	41
57.	3.6800	12: 7→1	3.2400	78.0
		7→2	1.6020	2.0
		7→3	1.2870	1.0
		7→4	1.0400	19.0
		3→0	2.3930	0.66
		3→1	1.9530	0.34
		4→0	2.6400	18.62
		4→1	2.2000	0.19
		4→2	0.5620	0.19
		2→0	2.0780	0.1971
		2→1	1.6380	1.9929
		1→0	0.4400	80.05229
58.	3.8800	13: 8→0	3.8800	24
		8→1	3.4400	9
		8→2	1.8020	61
		8→4	1.2400	4
		8→6	0.8970	2
		2→0	2.0780	5.4936
		2→1	1.6380	55.5464
		4→0	2.6400	3.92
		4→1	2.2000	0.04
		4→2	0.5620	0.04
		6→0	2.9830	1.18
		6→1	2.5430	0.82
		1→0	0.4400	65.4064
59.	4.4300	5: 9→0	4.4300	94
		9→3	2.0370	6
		3→0	2.3930	3.96
		3→1	1.9530	2.04
		1→0	0.4400	2.04
60.	4.7700	8: 10→1	4.3300	60
		10→2	2.6920	27
		10→5	2.0650	13
		5→1	2.2650	8.32
		5→2	0.6270	4.68
		2→0	2.0780	2.8512
		2→1	1.6380	28.8288
		1→0	0.4400	97.1488
61.	5.3800	6: 11→0	5.3800	13
		11→1	4.9400	60
		11→2	3.3020	27
		2→0	2.0780	2.43
		2→1	1.6380	24.57
		1→0	0.4400	84.57
62.	5.5300	7: 12→2	3.4520	21
		12→5	2.8250	79
		5→0	2.7050	0.79
		5→1	2.2650	50.56
		5→2	0.6270	27.65
		2→0	2.0780	4.43785
		2→1	1.6380	44.2715

		1→0	0.4400	94.8315
64.	5.7600	3: 13→0	5.7600	67
		13→1	5.3200	33
		1→0	0.4400	33
91	5.8436			

7. Погрешности нейтронных сечений.

На нижеследующих рисунках показаны энергетические зависимости погрешностей нейтронных сечений, принятые в библиотеках ENDF/B-V, JENDL-3.3, в многогрупповой библиотеке БНАБ-93.1⁶ и в недавней оценке Пальмиотти и Сальватореса⁷. Из сравнения оцененных и экспериментальных данных, проведенного в разделе 2, не усматривается причин для резкого повышения погрешности полного сечения в интервале от 40 до 100 кэВ, как это принято в оценке БНАБ-93.1. В области энергий порядка МэВ разброс экспериментальных данных, как видно из графиков, приведенных в разделе 3, не превышает 0.2 барна, составляя в среднем порядка 0.1 барна, т.е. примерно 5%. Оценка, принятая в БНАБ-93 и в этой области представляется завышенной. В то же время погрешности порядка 2 -2.5%, принятые в JENDL-3, представляются чрезмерно оптимистичными. Оценки ENDF/B-V и Пальмиотти различаются не существенно и обе представляются вполне реалистичными.

7.1. Погрешность полного сечения.

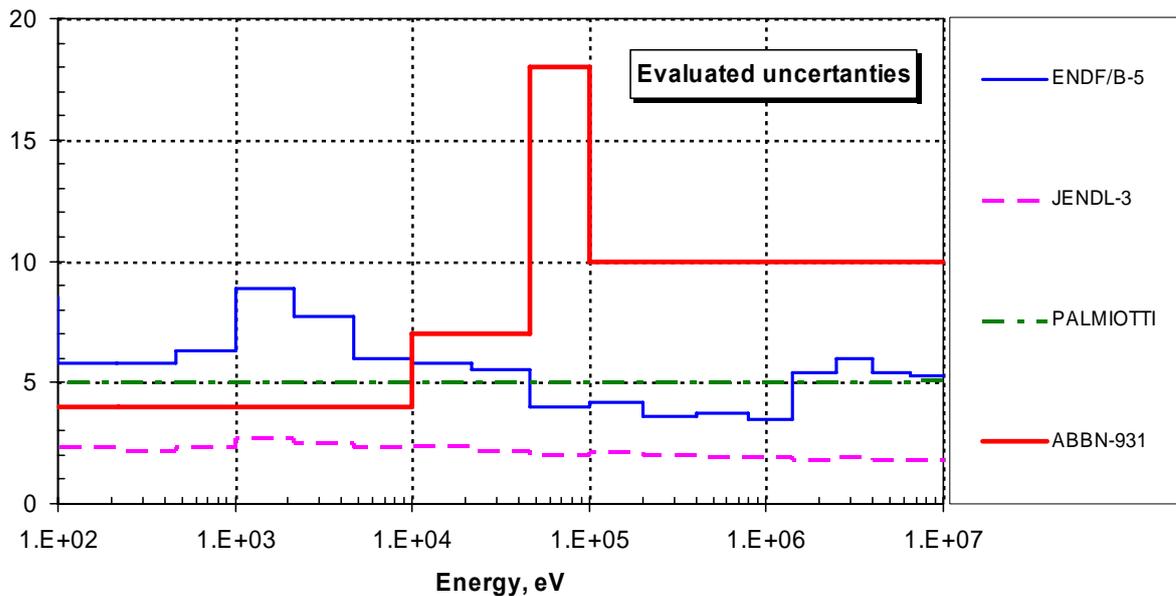


Рисунок 45 – Оценки погрешностей полного сечения.

7.2. Погрешность сечения упругого рассеяния.

Погрешности сечения упругого рассеяния во всех оценках практически совпадают с оценками погрешностей полного сечения. Исключением является оценка ENDF/B-V, в которой (вполне обоснованно) учитывается повышение погрешности сечения рассеяния при высоких энергиях, где конкуренция со стороны неупругих взаимодействий становится существенной. Это повышение должно вести к наличию сильных корреляций между погрешностями сечений упругого рассеяния и сечением неупругих взаимодействий.

⁶ Ссылка на БНАБ

⁷ Ссылка на Пальмиотти (с Сальваторесом?)

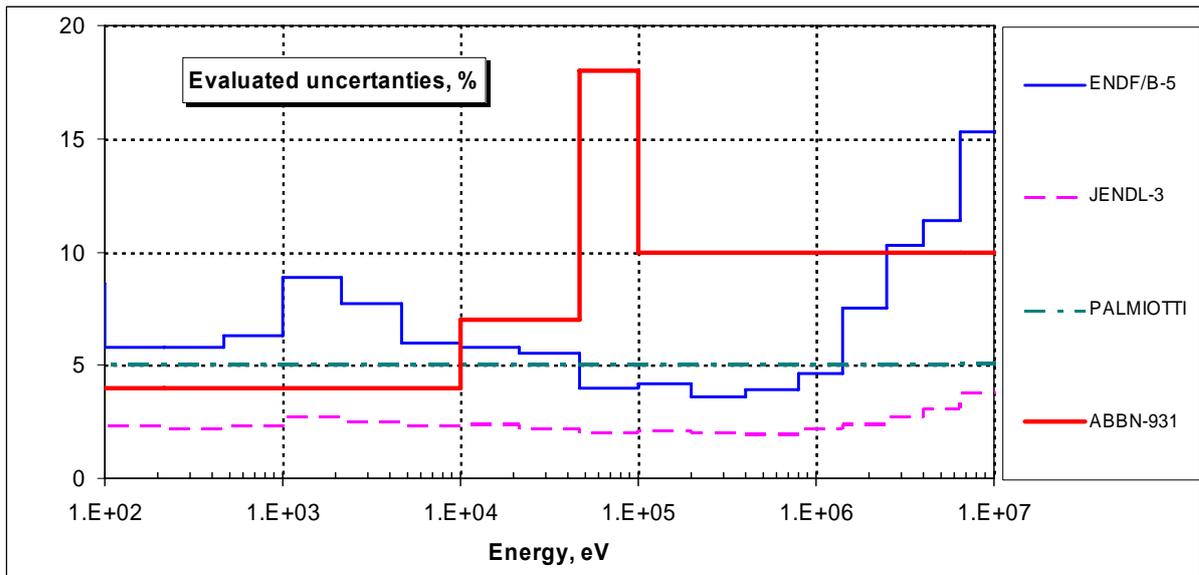


Рисунок 46 – Оценки погрешностей сечения упругого рассеяния.

7.3. Погрешность сечения радиационного захвата.

Погрешности сечения захвата, оцененные в Японии, в резонансной области энергий наиболее осторожны. Основанием для этого служит, очевидно, большой разброс экспериментальных данных в этом энергетическом диапазоне (см. рис.7). При более высоких энергиях расхождения в оценках не принципиальны.

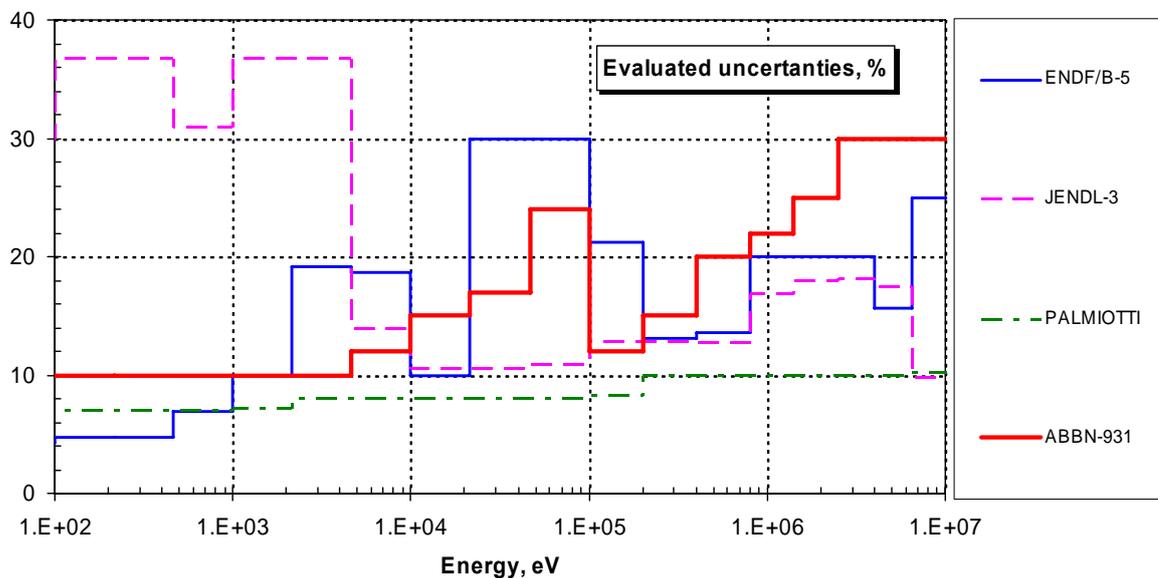


Рисунок 47 – Оценки погрешностей сечения захвата.

7.4. Погрешность сечения неупругого рассеяния.

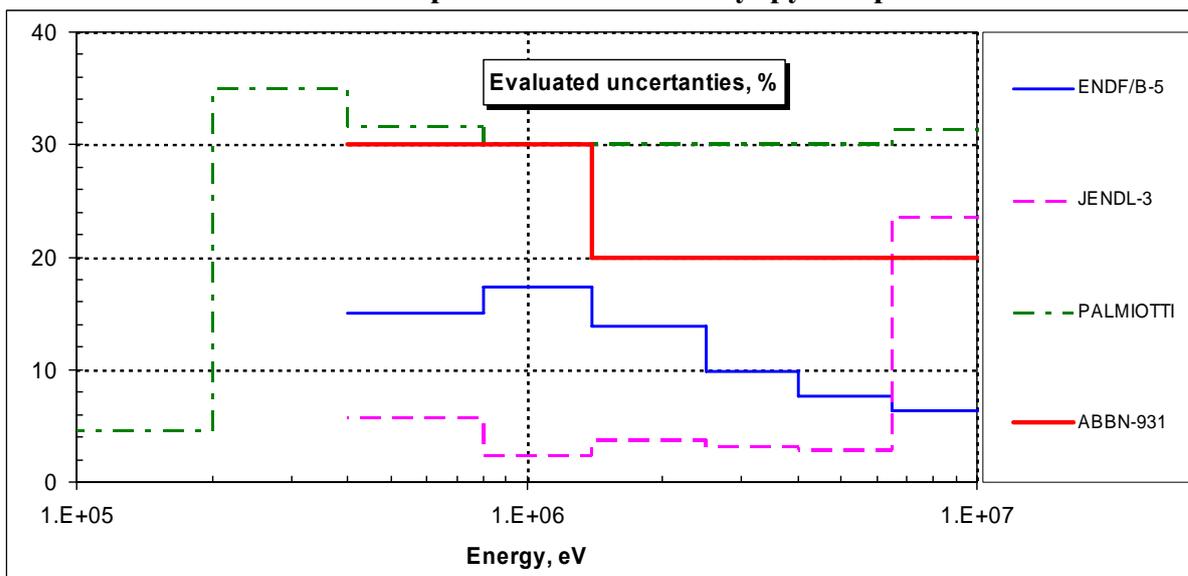


Рисунок 48 - Оценки погрешностей сечения неупругого рассеяния.

Рекомендаций по поводу выбора оценок погрешностей здесь не делается, т.к. для выдачи таких рекомендаций требуется точно знать, для какой цели будут использоваться рекомендованные погрешности, будут ли и каким образом учитываться корреляции между погрешностями и т. п. Приводимые выше данные могут быть полезны для специалистов, которые в будущем сделают такие рекомендации.

9. Заключение

9.1. Выводы

В библиотеку РОСФОНД рекомендуется принять оцененные данные, для Na-23 компилированные следующим образом:

В области резонансных энергий

- принять оценку Ларсона и др. (ENDF/B-VI).

В области гладких сечений

- для сечения полного взаимодействия принять оценку Ларсона и др. (ENDF/B-VI);
- сечение упругого рассеяния получить из баланса;
- для сечения на уровнях неупругого рассеяния и континууме уровней принять оценку Ларсон и др. (ENDF/B-VI);
- для сечений реакций (n2n,), (n,na), (n,np), (n,p) принять новую оценку Манохина (ЦЯД);
- для сечения реакции (n,t) принять оценку из ADL-3;
- для сечений реакций (n,p) и (n,a) принять до 9.0 МэВ оценку Ларсона и др. (ENDF/B-VI), выше 9.0 МэВ оценку Манохина (ЦЯД)

Данные по угловым распределениям принять из ENDF/B-VI.

Данные по энергетическим спектрам нейтронов в (реакции n,2n) и на континууме уровней неупругого рассеяния принять из ENDF/B-VI.

Энерго-угловые данные для следующих реакций (n,na), (n,np), (n,p), (n,d) принять из JENDL-3.3.

Данные об образовании радионуклидов принять из ENDF/B-VI.

Для данных об образовании фотонов, угловых распределениях фотонов и их энергетических спектров использовать оценку Забродской, Николаева (ABBN).

Ковариационные данные из файлов MF=32, 33 оставить из ENDF/B-VI для информативности, но не рекомендовать для использования.

9.2. Тепловые и интегральные сечения

Реакция	$\sigma(0.0253 \text{ эВ})$	RI	$\langle\sigma\rangle$ на спектре Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$
Упругое рассеяние	3.394 барн	117.8 барн	2.709 барн
Рад. захват	0.528 барн	0.314 барн	0.280 мбарн
Реакция (n,p)	-	-	1.69 мбарн
Реакция (n,d)	-	-	0.011 мбарн
Реакция (n,t)	-	-	0.86 мкбарн
Реакция (n, α)	-	-	0.776 мбарн
Реакция (n,2n)	-	-	6.7 мкбарн

9.3. Автор обоснования отбора оцененных данных

Кощев В.Н.