

ОЦЕНКА СЕЧЕНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЯДЕР ^{10}Be ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДЕЙТРОНОВ С ^9Be

Л. Н. Генералов, С. М. Селянкина, С. М. Таова, В. А. Жеребцов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Потребность в более точных ядерных данных по реакциям на бериллии будет возрастать по мере развития установок управляемого термоядерного синтеза, где бериллий уже используется или планируется использовать в качестве важнейшего конструкционного материала (покрытие первой стенки токамака, в бланкете воспроизводства трития). В работе представлена оценка сечений реакции $^9\text{Be}(d, x)^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$ от нулевой энергии налетающих дейтронов до 22 МэВ. Она выполнена на основании всех имеющихся экспериментальных данных с применением математических средств электронной библиотеки SaVa [1], разработанной в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Введение

Одна из потребностей в ядерных данных по реакциям на бериллии вытекает из задач прогнозирования радиоактивности термоядерных установок. Проведенные расчеты по образованию радиоактивных ядер ^{10}Be в бланкете NET-TYPE STR [2] показали, что накопление этих ядер возникает в основном из реакций $^{10}\text{B}(n, p)^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$ и $^9\text{Be}(d, p)^{10}\text{Be}$. Для протекания последней реакции быстрые дейтроны рождаются из нейтронных реакций. Следует отметить, что мы здесь и далее используем равнозначные обозначения $^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$ и ^{10}Be .

Настоящая работа обусловлена тем, что в международной библиотеке оцененных данных TENDL (версия 2014 г. [3]) представлена ошибочная оценка сечений реакции $^9\text{Be}(d, x)^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$. В этой библиотеке оценка выполнена с помощью программного кода TALYS [4] на основании экспериментальных данных [5, 6], которые формально различаются в 2 раза, а на самом деле хорошо согласуются между собой. В работе [5], выполненной в 1955 г., сечения измерены

радиохимическим методом по регистрации β -частиц распада ядер $^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$. При обработке результатов измерений авторы [5] использовали значение периода полураспада $^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$, равное $2,7 \cdot 10^6$ лет, а его современное значение $(1,51 \pm 0,06) \cdot 10^6$ лет [7]. Использование современного значения периода полураспада понижает данные [5] в 1,788 раза. Аналогичная ситуация [8 и ссылки в ней] наблюдается для реакций $^{10}\text{Be}(d, p)^{11}\text{Be}$, $^{10}\text{Be}(d, \alpha)^8\text{Li}$ и $^{10}\text{Be}(p, \gamma)^{11}\text{B}$. Для абсолютизации сечений этих реакций толщины мишеней определялись с помощью измерения активности β -частиц распада ядер $^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$, при этом период полураспада ядер ^{10}Be принимался равным $2,7 \cdot 10^6$ лет.

В [6] сечения образования $^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$ получены суммированием измеренных парциальных сечений реакций $^9\text{Be}(d, p_i)^{10}\text{Be}^*(E_i)$: суммирование ведется до первого ядерно-нестабильного уровня 7,371 МэВ [9]. Такие же данные имеются и при энергии дейтронов 11,8 МэВ [10].

Экспериментальные сечения реакции $^9\text{Be}(d, x)^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$

Впервые сечения реакции $^9\text{Be}(d, x)^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$ были измерены в [5]: использовался метод регистрации радиоактивных ядер ^{10}Be , накопленных в облученной бериллиевой мишени, из которой эти ядра переносились в счетчик Гейгера для регистрации β -частиц их распада. По активности β -частиц определялось количество ядер $^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$, образованных в облученной мишени. Данные в этой работе получены в интервале энергий дейтронов от 1 до 22 МэВ.

Сечения реакции $^9\text{Be}(d, x)^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$ с высокой точностью можно определить (табл. 1) из суммы сечений $\sigma_{\text{пр}i}$ реакций $^9\text{Be}(d, p_0)^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$, $^9\text{Be}(d, p_1)^{10}\text{Be}^*(3,368)$,

Таблица 1

Уровни ^{10}Be [9], заселяемые в реакциях $^9\text{Be}(d, p_i)$

Номер уровня ^{10}Be	Энергия уровня, МэВ	$J^\pi; T$	$\tau_{1/2}$ или Γ (кэВ)	Тип распада ^{10}Be	Q , МэВ	Порог реакции, МэВ
0 или gs	0	$0^+; 1$	$1,51 \cdot 10^6$ лет	β^-	4,587	
1	3,368	$2^+; 1$	180 фс	γ	1,319	
2	5,958	$2^+; 1$	$\tau_m < 80$ фс	γ	-1,371	1,675
3	5,9599	$1^-; 1$		γ	-1,373	1,678
4	6,1793	$0^+; 1$	1,1 пс	γ	-1,591	1,947
5	6,2633	$2^-; 1$		γ	-1,676	2,051
6	7,371	$3^-; 1$	15,7 кэВ	n	-2,784	3,409

${}^9\text{Be}(d, p_2){}^{10}\text{Be}^*(5,958)$ ${}^9\text{Be}(d, p_3){}^{10}\text{Be}^*(5,9599)$,
 ${}^9\text{Be}(d, p_4){}^{10}\text{Be}^*(6,1793)$, ${}^9\text{Be}(d, p_5){}^{10}\text{Be}^*(6,2633)$. Так как
уровни ${}^{10}\text{Be}$, лежащие по энергии выше 5 уровня, –
ядерно-нестабильны, то реакции с их возбуждением
вносят малый вклад в образование ${}^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$.

Этим методом были получены сечения в [6] при
 $E_d = 5\text{--}11$ МэВ и в [10] при $E_d = 11,8$ МэВ (табл. 2).
В указанных работах по регистрации протонов
были измерены дифференциальные сечения (угло-
вые распределения) реакций ${}^9\text{Be}(d, p_0){}^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$.
 ${}^9\text{Be}(d, p_1){}^{10}\text{Be}^*(3,368)$, ${}^9\text{Be}(d, p_{2+3}){}^{10}\text{Be}^*(5,958 + 5,9599)$,
 ${}^9\text{Be}(d, p_{4+5}){}^{10}\text{Be}^*(6,1793 + 6,2633)$. Из полученных
дифференциальных сечений определялись инте-
гральные сечения этих реакций, в сумме составляю-
щие сечение реакции ${}^9\text{Be}(d, x){}^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$.

Таблица 2

Сечения образования ядер ${}^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$
при взаимодействии дейтрона с ${}^9\text{Be}$ [6, 10]

E_d , МэВ	$\sigma_{\Sigma p_i}$, мб	Случайная погрешность, мб	E_d , МэВ	$\sigma_{\Sigma p_i}$, мб	Случайная погрешность, мб
5,0	151	2	8,0	97,9	1,5
5,5	142	2	9,0	84,4	1,5
6,0	128	2	10,5	78,0	2,3
6,5	124	2	11,0	68,4	2,3
7,0	118	2	11,8 [10]	67,1	6,4*
7,5	107,2	1,5			

* Полная погрешность, систематическая погрешность
данных [6] – 3 %.

Как было отмечено, основная причина система-
тического завышения данных [5] связана с использо-
ванием в этой работе неверного значения периода
полураспада ${}^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$. По этой причине результаты [5]
завышены в $K(T_{1/2}) = 1,788$ раза. Однако и после уче-
та этого фактора получаем, что результаты первой
серии измерений [5] будут завышены в $(1,08 \pm 0,04)$,
а второй серии – в $(1,13 \pm 0,03)$ раза по сравнению с
данными [6], то есть в среднем завышение исправ-
ленных данных [5] по сравнению с данными [6] со-
ставит $(1,11 \pm 0,03)$ раза. Если же при $E_d = 11,8$ МэВ
сравнить исправленное значение сечения [5] с вели-
чиной [10], то завышение исправленного сечения [5]
составит $(1,19 \pm 0,11)$ раза. Таким образом, исправ-
ленные данные [5] остаются завышенными относи-
тельно данных [6, 10] в среднем в $K_S = (1,15 \pm 0,04)$
раза. В этой связи отметим, что возможно и совре-
менное значение периода полураспада ${}^{10}\text{Be}(1,51 \pm$
 $\pm 0,06) \cdot 10^6$ лет [7] завышено. Для настоящей оценки
данные [5] были снижены в $K(T_{1/2}) \cdot K_S = 2,056$ раза.

При энергиях дейтронов ниже величины поро-
гов реакций ${}^9\text{Be}(d, p_{2+3}){}^{10}\text{Be}^*(5,958+5,9599)$ и
 ${}^9\text{Be}(d, p_{4+5}){}^{10}\text{Be}^*(6,1793+6,2633)$ сечение реакции
 ${}^9\text{Be}(d, x){}^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$ равно сумме сечений реакций
 ${}^9\text{Be}(d, p_0){}^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$ и ${}^9\text{Be}(d, p_1){}^{10}\text{Be}^*(3,368)$. Наш анализ
существующих экспериментальных данных в этой
области энергии можно найти в [6], где также приве-
дены результаты наших измерений в интервале от 3
до 11 МэВ. Для оценки сечений ${}^9\text{Be}(d, x){}^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$ в этом
энергетическом диапазоне использовались данные
анализа из работы [6] (табл. 3).

Таблица 3

Сечения реакций ${}^9\text{Be}(d, p_0){}^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$ и ${}^9\text{Be}(d, p_1){}^{10}\text{Be}^*(3,368)$ при $E_d < 1,7$ МэВ

E_d , МэВ	σ_{dp_0} , мб	Полная погрешность σ_{dp_0} , мб	σ_{dp_1} , мб	Полная погрешность σ_{dp_1} , мб	$\sigma_{dp_0+\sigma_{dp_1}}$, мб	Полная погрешность $\sigma_{dp_0+\sigma_{dp_1}}$, мб	Ссылка
0,1034	0,0018	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,00535	$4 \cdot 10^{-4}$	0,00715	$4,23792 \cdot 10^{-4}$	[11]
0,123	0,00795	$4,8 \cdot 10^{-4}$	0,0106	$9 \cdot 10^{-4}$	0,01855	0,00102	
0,1425	0,0233	0,0014	0,0382	0,0024	0,0615	0,00278	
0,1504	0,0332	$5 \cdot 10^{-4}$	0,0484	$6 \cdot 10^{-4}$	0,0816	$7,81025 \cdot 10^{-4}$	
0,162	0,0472	0,003	0,0767	0,005	0,1239	0,00583	[12]
0,19	0,22	0,11	0,275	0,13	0,495	0,17029	
0,9	13,6	0,2	15,2	0,5	28,8	0,53852	[13]
1	14	0,2	17,8	0,5	31,8	0,53852	
1,1	13,2	0,2	18,5	0,6	31,7	0,63246	
1,2	13,4	0,4	19,8	0,6	33,2	0,72111	
1,3	14,2	0,2	22,6	0,7	36,8	0,72801	
1,4	15,2	0,4	24,6	0,7	39,8	0,80623	
1,5	14,5	0,6	28	0,8	42,5	1	
1,6	15,2	0,4	33,7	1	48,9	1,07703	
0,359	1,77	0,5	1,64	0,2	3,41	0,53852	[14]
0,463	4,2	0,13	3,334	0,37	7,534	0,39217	
0,567	6,8	0,2	6,09	0,65	12,89	0,68007	
0,708	9,73	0,3	8,32	0,71	18,05	0,77078	
0,718	9,93	0,3	7,17	0,75	17,1	0,80777	
0,728	10,1	0,3	9,18	0,78	19,28	0,8357	
0,739	10,1	0,3	9,59	0,81	19,69	0,86377	

E_d , МэВ	σ_{dp0} , мб	Полная погрешность σ_{dp0} , мб	σ_{dp1} , мб	Полная погрешность σ_{dp1} , мб	$\sigma_{dp0+\sigma_{dp1}}$, мб	Полная погрешность $\sigma_{dp0+\sigma_{dp1}}$, мб	Ссылка
0,749	9,9	0,3	9,85	0,85	19,75	0,90139	[14]
0,758	9,71	0,3	9,4	0,84	19,11	0,89196	
0,769	9,71	0,3	9,78	0,85	19,49	0,90139	
0,778	9,95	0,3	10,2	0,84	20,15	0,89196	
0,789	10,4	0,3	10,6	0,83	21	0,88255	
0,8	10,8	0,3	11,5	0,83	22,3	0,8825	

Оценка полных сечений реакций в библиотеке SaBa

В библиотеке SaBa экспериментальные и оцененные данные представлены в виде полных сечений реакций и астрофизических S-факторов. Для проведения оценки экспериментальные значения сечений реакций σ преобразуются в астрофизические факторы

$$S(E_{\text{цм}}) = \sigma(E_{\text{цм}}) E_{\text{цм}} \exp\left(\sqrt{\frac{E_g}{E_{\text{цм}}}}\right), \quad (1)$$

где $E_{\text{цм}}$ – энергия в системе центра масс во входном канале, E_g – энергия Гамова, определяемая как

$$\sqrt{E_g} = 0,98948 z_1 z_2 \sqrt{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}}, \quad (2)$$

z_1, z_2 – заряды налетающей частицы и ядра мишени, m_1, m_2 – массы налетающей частицы и ядра мишени в а.е.м.

Оцененная кривая в библиотеке в общем случае является суммой гладкой и резонансной частей:

$$f = S_p(E) + R_l(E). \quad (3)$$

Описание резонансной части с числом пиков n и фоном степени p проводится на основе выражения Брейта – Вигнера:

$$R_l(E) = \sum_{i=0}^{n_l-1} \frac{H_i(\Gamma_i/2)^2}{(E-E_i)^2 + (\Gamma_i/2)^2} + \delta_l \sum_{j=0}^{p_l} a_j (E-x_0)^j, \quad (4)$$

где H_i – высота пика; E_i – положение пика; Γ_i – ширина на полувысоте; $\delta_l = 0$ или 1, в зависимости от того, учитывается или нет фон резонансной области в окончательном приближении; x_0 – начало интервала, подогнанного данным R_l .

Нерезонансные части оцениваемой кривой проводятся с использованием полиномиального описания кубическими сплайнами, которые определены на сетке узлов $\{x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n\}$. В общем виде гладкая часть выражается как

$$S_p(E) = \sum_{i=0}^p a_i (E-x_0)^i, \quad (5)$$

где a_i – коэффициент сплайна; x_0 – левая граница интервала, на котором определены приближаемые данные.

Приближающая кривая строится путем поиска оптимального набора параметров сплайна – количе-

ства узлов, их энергий, дефектов, величины систематической ошибки данных. Оцененная кривая астрофизического S-фактора определяется путем минимизации величины χ^2 :

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} \left(\frac{S_i - f(E_i)}{\sigma_i} \right)^2}{N_d - N_p}, \quad (6)$$

где $\{E_i, S_i, \sigma_i\}$ – точка экспериментальных данных с полной ошибкой σ_i , N_d – число этих точек, N_p – число подгоняемых параметров.

Оцененные значения астрофизического S-фактора в SaBa хранятся в виде набора коэффициентов сплайна. При просмотре данных, записанных в библиотеку, происходит восстановление оцененной кривой по ее коэффициентам.

На рис. 1 представлены оцененные значения полных сечений реакции взаимодействия дейтронов с ядрами ${}^9\text{Be}$ с образованием ядра ${}^{10}\text{Be}$, полученные в настоящей работе. Для проведения оценки были использованы два типа подгонки, имеющиеся в SaBa – сплайнами и резонансами. Результирующие резонансные параметры представлены в табл. 4, параметры фонового полинома указаны в табл. 5. Коэффициенты аппроксимирующего сплайна оцененных значений S-фактора реакции ${}^9\text{Be}(d, x){}^{10}\text{Be}$ приведены в табл. 6.

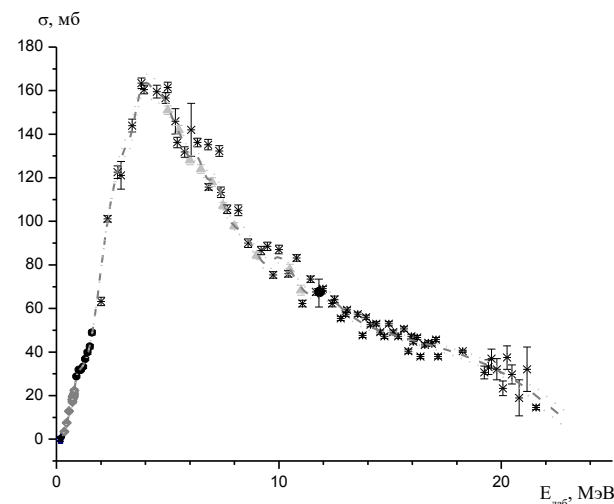


Рис. 1. Оцененные значения полных сечений реакции ${}^9\text{Be}(d, x){}^{10}\text{Be}$. * – [5], ● – [13], ▲ – [6], ▼ – [10], ◆ – [14], ◀ – [11], ★ – [12], пунктир – оцененная кривая

Таблица 4

Значения резонансных параметров оцененной кривой S-фактора реакции ${}^9\text{Be}(d, x){}^{10}\text{Be}$

Номер пика	E , МэВ	Γ , МэВ	H , мб·МэВ
1	$5,9198 \cdot 10^{-1}$	$5,7938 \cdot 10^{-2}$	$1,2988 \cdot 10^{-3}$

Таблица 5

Значения коэффициентов полинома, описывающего фон резонансной области

Степень полинома	E_0	Коэффициенты полинома		
		A_0	A_1	A_2
2	$4,9386 \cdot 10^{-1}$	$6,9993 \cdot 10^3$	$-2,8623 \cdot 10^2$	$-5,7607$

Последняя строка в табл. 6 содержит лишь значение энергии конечного узла сплайна. Это – правая граница интервала определения сплайна. После нее осуществляется переход к экстраполяционным формулам. В настоящей работе для получения продолжений оцененной кривой в область низких (менее 0,08451 МэВ) и высоких (более 17,62186 МэВ) энергий использовались полиномы первой степени. По-

лином первой степени представляет собой прямую линию с сохранением угла наклона, определенного ходом кривой в предыдущем интервале оценки. Коэффициенты экстраполирующего полинома аппроксимирующей функции S-фактора реакции ${}^9\text{Be}(d, x){}^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$ указаны в табл. 7.

Как было указано выше, при просмотре данных в библиотеке SaVa происходит восстановление оцененной кривой по ее коэффициентам. С использованием указанных в табл. 4 и табл. 5 коэффициентов по формуле (2) вычисляются значения резонансной части оцененной кривой. Гладкая часть аппроксимирующей функции астрофизического S-фактора вычисляется с применением коэффициентов сплайна (табл. 6 и 7) по следующей формуле:

$$S(E) = C_0 + C_1 h + C_2 h^2 + C_3 h^3, \quad (7)$$

где $h = E - x_0$, E – значение энергии выбранное, x_0 – значение энергии узла сплайна, $x_0 < E < x_{0+1}$, C_i , $i = 0, 1, 2, 3$ – значения коэффициентов сплайна, соответствующие данному узлу.

Из полученных значений астрофизических S-факторов полное сечение реакции ${}^9\text{Be}(d, x){}^{10}\text{Be}$ рассчитывается с использованием формулы (1).

Таблица 6

Значения коэффициентов сплайна оцененной кривой S-фактора реакции ${}^9\text{Be}(d, x){}^{10}\text{Be}$

Энергия узла сплайна, МэВ	Дефект	Коэффициенты сплайна			
		C_0	C_1	C_2	C_3
0,08451	1	$1,27268 \cdot 10^4$	$-1,33096 \cdot 10^4$	$-8,99256 \cdot 10^4$	$1,31766 \cdot 10^5$
0,65580	1	$3,42056 \cdot 10^2$	$1,29559 \cdot 10^4$	$1,35902 \cdot 10^5$	$-3,30705 \cdot 10^6$
0,69714	2	$8,76286 \cdot 10^2$	$7,23542 \cdot 10^3$	$-1,79572 \cdot 10^5$	$5,50384 \cdot 10^5$
0,83248	2	$-6,92294 \cdot 10^1$	$-1,11274 \cdot 10^4$	$2,25507 \cdot 10^4$	$-1,05022 \cdot 10^4$
1,67882	1	$2,99370 \cdot 10^2$	$4,47582 \cdot 10^3$	$-4,11460 \cdot 10^3$	$1,18356 \cdot 10^3$
2,64833	2	$1,84977 \cdot 10^3$	$-1,65022 \cdot 10^2$	$1,09227 \cdot 10^4$	$-1,43690 \cdot 10^4$
3,05768	1	$2,62688 \cdot 10^3$	$1,55409 \cdot 10^3$	$-6,72310 \cdot 10^3$	$5,11423 \cdot 10^3$
3,74710	2	$2,17865 \cdot 10^3$	$-4,23539 \cdot 10^2$	$-2,79540 \cdot 10^3$	$2,12838 \cdot 10^3$
4,50117	2	$1,18236 \cdot 10^3$	$-1,00870 \cdot 10^3$	$-4,64849 \cdot 10^3$	$9,87924 \cdot 10^3$
4,97515	2	$7,11907 \cdot 10^2$	$1,24308 \cdot 10^3$	$-7,09866 \cdot 10^3$	$6,54405 \cdot 10^3$
5,66458	2	$3,39288 \cdot 10^2$	$7,86439 \cdot 10^2$	$-3,89105 \cdot 10^3$	$1,20623 \cdot 10^3$
6,11702	2	$1,03180 \cdot 10^1$	$-1,99373 \cdot 10^3$	$3,17278 \cdot 10^3$	$-1,73088 \cdot 10^3$
6,95726	1	$-4,51684 \cdot 10^2$	$-3,27963 \cdot 10^2$	$-1,19029 \cdot 10^3$	$1,38997 \cdot 10^3$
7,92677	2	$-6,21788 \cdot 10^2$	$1,28356 \cdot 10^3$	$-2,36260 \cdot 10^3$	$9,87929 \cdot 10^2$
9,41335	2	$-6,89257 \cdot 10^2$	$8,08915 \cdot 10^2$	$-1,01520 \cdot 10^3$	$3,62104 \cdot 10^2$
10,53367	1	$-5,48036 \cdot 10^2$	$-1,02323 \cdot 10^2$	$2,01824 \cdot 10^2$	$-3,53222 \cdot 10^1$
12,19261	1	$-3,23614 \cdot 10^2$	$2,75675 \cdot 10^2$	$2,60317 \cdot 10^1$	$-7,31535$
17,62186	0	–	–	–	–

Таблица 7

Значения коэффициентов сплайна оцененной кривой S-фактора реакции ${}^9\text{Be}(d, x){}^{10}\text{Be}_{\text{gs}}$ при экстраполяции в область низких и высоких энергий

Направление экстраполяции	Тип полинома, степень	Энергия узла сплайна, МэВ	Коэффициенты сплайна			
			C_0	C_1	C_2	C_3
менее 0,08451 МэВ	1	0,08451	$1,27268 \cdot 10^4$	$-1,3310 \cdot 10^4$	0	0
более 17,62186 МэВ	1	17,62186	$7,69701 \cdot 10^2$	$-8,8558 \cdot 10^1$	0	0

Нами было проведено сравнение результатов настоящей работы с данными библиотеки TENDL, версия 2014 г. (программный код TALYS). На рис. 2 представлены зависимости оцененных значений полных сечений реакции ${}^9\text{Be}(d, x){}^{10}\text{Be}$ от энергии налетающих частиц, полученные нами, и приведенные в библиотеке TENDL.

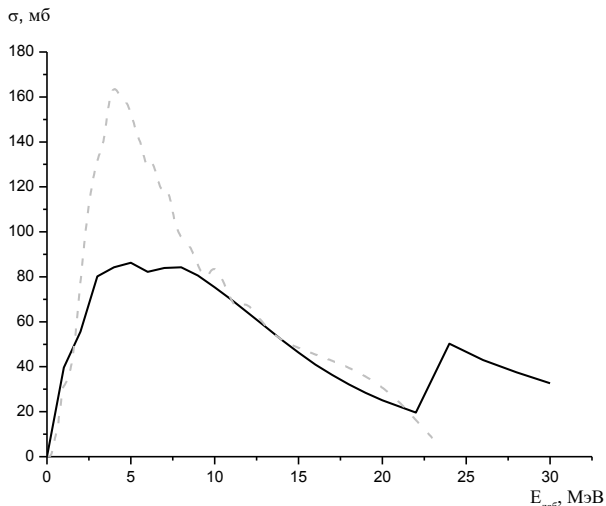


Рис. 2. Сравнение оцененных данных из библиотек SaBa (пунктирная кривая) и TENDL-2014 (сплошная кривая)

Из приведенного рисунка видно, что значительные расхождения наблюдаются в интервале энергии 2,5–10 МэВ. Максимальное отличие в значениях сечений наблюдается при энергии налетающих частиц около 5 МэВ. Оцененные значения сечений из библиотеки SaBa при этой энергии почти в два раза превышает значения сечений из библиотеки TENDL-2014.

Заключение

Выполнен подробный анализ экспериментальных данных по полным сечениям образования радиоактивных ядер ${}^{10}\text{Be}$ при взаимодействии дейтронов с ${}^9\text{Be}$. Выполнена перенормировка данных [5], которой объясняется использованием в этой работе неверного значения периода полураспада ${}^{10}\text{Be}_{gs}$. На основании проведенного анализа и отбора экспериментальных значений в библиотеке SaBa получена оценка полных сечений реакции ${}^9\text{Be}(d, x){}^{10}\text{Be}$. Сравнение оцененных данных из библиотек SaBa и

TENDL-2014 выявило наличие существенных расхождений в представленных значениях сечений.

Литература

1. Zvenigorodskij A. G., Zherebtsov V. A., Lazarev L. M., Dunaeva S. A., Generalov L. N., Taova S. M., Kamskaya E. V., Marshalkina R. I. The library of evaluated and experimental data on charged particles for fusion application // IAEA-NDS-191, Dec. 1999.
2. Beynon T. D., Sim B. S. ${}^{10}\text{Be}$ and ${}^{14}\text{C}$ production rates in NET-TYPE CTR blankets // Ann. Nucl. Energy. 1990. Vol. 17. No. 5. P. 271.
3. Koning A. J., et al. // ftp://ftp.nrg.eu/pub/www/talys/tendl2014/tendl2014.html.
4. Koning A. J., Rochman D. Modern nuclear data evaluation with the TALYS code system // Nucl. Data Sheets. 2012. V. 113. P. 2841.
5. Heft R. E., Libby W. F. Absolute cross sections for deuterons on berillium // Phys. Rev. 1955. V. 100. P. 799.
6. Генералов Л. Н., Абрамович С. Н., Звенигородский А. Г. Сечения реакций ${}^9\text{Be}(d, p_{0,1})$ и ${}^9\text{Be}(d, t_0)$ // Изв. РАН. Сер. Физ. 2000. Т. 64. С. 440.
7. Audi G. et al. The NuBase evaluation of nuclear and decay properties // Nucl. Phys. 2003. A729. P. 1.
8. Goosman D. R., Kavanagh R. W. Cross sections for ${}^{10}\text{Be}(d, p){}^{11}\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}(d, \alpha){}^8\text{Li}$ and ${}^{10}\text{Be}(p, \gamma){}^{11}\text{B}$ // Phys. Rev. C. 1973. Vol. 7. No. 4. P. 1717.
9. Ajzenberg-Selove F. Energy levels of light nuclei $A = 5-10$ // Nucl. Phys. 1979. A320. P. 1.
10. Schmidt-Rohr U. et al. The angular proton distributions from ${}^9\text{Be}(d, p){}^{10}\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}(d, p){}^{13}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}(d, p){}^{17}\text{O}$ and ${}^{40}\text{Ca}(d, p){}^{41}\text{Ca}$ reactions near energy 11,8 MeV // Nucl. Phys. 1964. Vol. 53. P. 77.
11. Yan J., Cecil F. E., McNeil J. A., Hofstee M. A., Kunz P. D. Deuteron-induced reactions on ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$, and ${}^{11}\text{B}$ at low energies // Phys. Rev. C. 1997. Vol. 55. P. 1890.
12. Perchereau J. Investigation of the deuteron-induced reactions (d, p) and (d, t) on ${}^9\text{Be}$ at the energy range 120–200 keV // Rapport CEA-R-4070. 1971.
13. Zwiegliniski B. et al. Direct and resonance processes in ${}^9\text{Be}(d, p_{0,1}){}^{10}\text{Be}$ and ${}^9\text{Be}(d, t_0){}^8\text{Be}$ at low energies // Nucl. Phys. A. 1975. Vol. 250. P. 93.
14. Annegarn J. et al. Evidence for a nuclear level in ${}^{11}\text{B}$ at 16,43 MeV // Phys. Rev. C. 1974. Vol. 9. P. 419.