

УДК 539.172.13

СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИИ ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$

© 2023 г. Л. Н. Генералов¹, В. А. Жеребцов¹, С. М. Селянкина¹, *

¹Федеральное государственное унитарное предприятие
“Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики”, Саров, Россия

*E-mail: otd4@expd.vniief.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.

Принята к публикации 28.04.2023 г.

Представлена новая оценка интегральных сечений реакции ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$, полученная в нашей электронной библиотеке SaBa (Sarov Base) математическими средствами (сплайн-аппроксимацией) этой библиотеки. Мотивацией исследований послужили результаты наших измерений дифференциальных сечений этой реакции в интервале энергий 3.75–8 МэВ.

DOI: 10.31857/S0367676523702095, EDN: ZCOWCK

ВВЕДЕНИЕ

В наших исследованиях [1] выполнена оценка сечений реакций ${}^6\text{Li}(d, p_{0,1,2,4})$ и соответствующих им зеркальных реакций ${}^6\text{Li}(d, n_{0,1,2,4})$, а также ${}^6\text{Li}(d, x){}^7\text{Be}$. Теперь мы представляем оценку сечений реакции ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$, которая является рекордной по энерговыделению $Q = 22.372$ МэВ, поэтому представляет повышенный интерес в ядерных технологиях с использованием лития.

Она изучалась в большом числе работ и в широком диапазоне энергии (см. далее). В этой реакции образуются две тождественные α -частицы, что определяет характер их угловых распределений: в системе центра масс (с.ц.м.) они должны быть симметричны относительно 90° , что позволяет проводить измерения либо в интервале углов 0° – 90° , либо в интервале 90° – 180° . Обычно измерения угловых распределений α -частиц проводят без регистрации совпадения их образования. Поэтому при получении дифференциальных сечений измеренный выход α -частиц необходимо делить на два. В работах (см. далее) часто эта процедура не проводится. В области энергии дейтронов $E_d < 0.18$ МэВ распределение изотропное, за исключением энергетического интервала 60–120 кэВ, где наблюдается небольшое отклонение от этой формы.

Оценка интегральных сечений получена в нашей электронной библиотеке SaBa (Sarov Base) [2] математическими средствами этой библиотеки, краткое описание приводится далее. Мотивацией исследования, как и в [1], послужили результаты наших измерений дифференциальных сечений в

интервале E_d от 3.75 до 8 МэВ. Эти данные получены в измерениях сечений каналов реакций ${}^6, {}^7\text{Li} + d$ [3]. В этой статье они относятся к измерениям [3] (рис. 1).

В [3] основные измерения дифференциальных сечений реакции ${}^6\text{Li} + d$ выполнены спектрометром заряженных частиц, состоящим из шести телескопов ΔE - E кремниевых детекторов. Исследование реакций ${}^6, {}^7\text{Li} + d$ проводилось на мишенях LiF, нанесенных на алюминиевые и углеродные подложки и подложку из поли- n -кселилена (C_8H_6). В двумерных спектрах присутствовали люксы от регистрации $p, d, t, {}^3, {}^4\text{He}$. Для задания необходимых полярных углов регистрации частиц телескопы располагались на вращающейся платформе. В этих измерениях с помощью отмеченного свойства симметричности угловых распределений α -частиц реакции ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ выявлялись и исправлялись искажения (на уровне 10–15%) в угловых распределениях частиц других каналов реакции ${}^6\text{Li} + d$, что связано с большими изменениями углов каждого телескопа и относительно небольшими расстояниями от этих телескопов до мишени. В этом первоначально использованы данные [4], где дифференциальные сечения измерены со случайными погрешностями на уровне 1% в энергетическом интервале от 1 до 11.5 МэВ с шагом в 0.5 МэВ. К сожалению, они имеют большую систематическую ошибку, 20%. Затем мы получили свои данные в измерениях с двумя телескопами, один из которых находился на самом большом возможном расстоянии от мишени – 157 мм. По относительной угловой зависимости наши результаты хорошо согласуются с данными [4], а

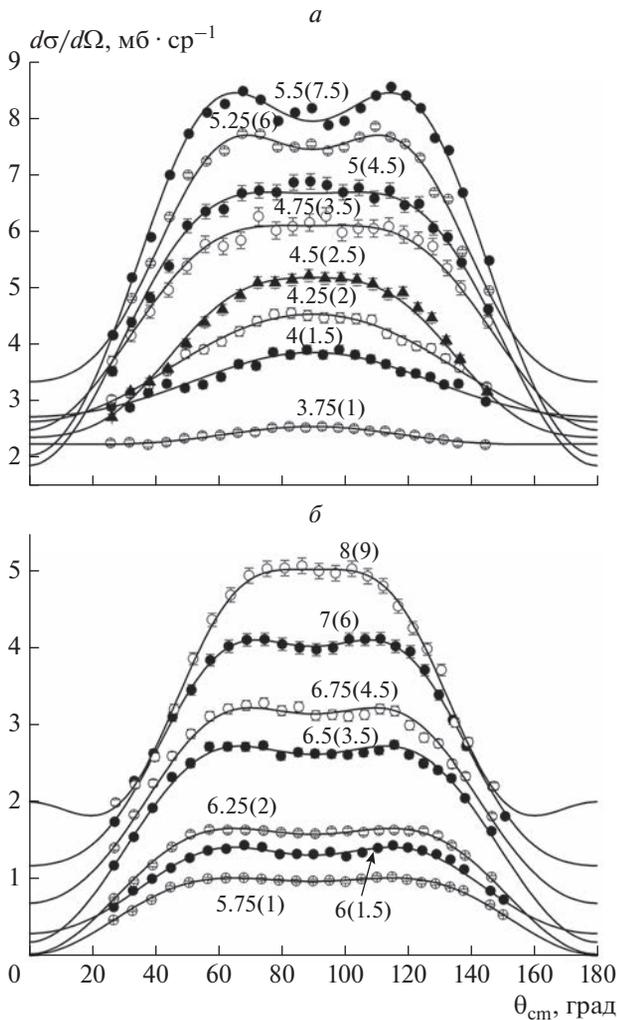


Рис. 1. Дифференциальные сечения реакции ${}^6\text{Li}(d, \alpha_0)$ [3]: при $E_d^0 = 3.75\text{--}5.5$ (а) $5.75\text{--}8$ МэВ (б); линии – описание полиномами Лежандра для получения интегральных сечений. Цифры в скобках указывают на величину, на которую умножены данные для демонстрации.

в абсолютных значениях выше их в среднем на 9%. При некоторых задних углах регистрации на α -пики реакции ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ в зависимости от энергии налетающих дейтронов последовательно накладывались пики реакций ${}^{19}\text{F}(d, \alpha_{0,1,2,3})$. Разделение этих вкладов в пики с наложением проводилось по измеренным выходам α -частиц указанных реакций интерполяцией из областей углов и энергий дейтронов, где пики разделяются. Систематическая погрешность наших данных (4%) определена по погрешностям толщины эталонной мишени (3.5%) и дейтронного потока (2%).

В табл. 1 приведена краткая характеристика работ, данные которых использовались для проведения настоящей оценки. В своих ранних оцен-

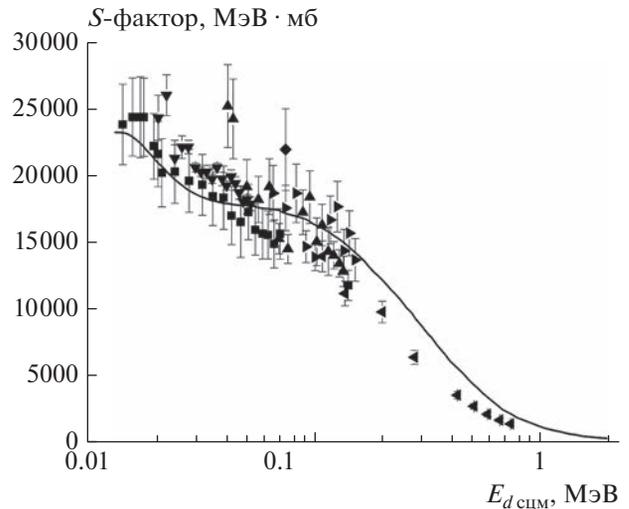


Рис. 2. Экспериментальные и оцененные значения астрофизического S -фактора в области энергий менее 1 МэВ: \blacksquare – [24], \blacktriangle – экспериментальные точки [25], сплошная линия – расчет [25], \blacktriangledown – [20], \blacklozenge – [22], \blacktriangleleft – [5], \blacktriangleright – [19].

ках мы использовали данные [12], измеренные на пучке поляризованных дейтронов в энергетическом интервале 3–11 МэВ. Они были нормированы на данные [18] (снижены по величине в 2.6 раза и по энергии на 100 кэВ). Эти данные оставлены и в новой оценке. В последние годы изучается эффект влияния электронного экранирования на экспериментальные данные в области низких энергий взаимодействия заряженных частиц (менее 50 кэВ) [24]. С целью получения голаядерных данных в библиотеке SaVa мы учитываем этот эффект (рис. 2). Он присутствует и в экспериментальных данных реакции ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$, при этом сильно замаскирован подпороговым резонансом.

ОЦЕНКА СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИЙ В БИБЛИОТЕКЕ SAVA

Подробное описание математического аппарата библиотеки приведено в [27]. Аппарат и математические выражения основаны на [28]. Мы не будем повторять все выкладки, приведем только основные моменты. Для проведения оценки в SaVa используется разложение полиномиального сплайна третьей степени, заданного на сетке $E_0 = x_0 < x_1 \dots < x_{n-1} < x_n = E_n$:

$$S(x) = \sum_{l=0}^3 C_l^{(i+1)} (x - x_i)^l = C_0^{i+1} + C_1^{i+1} h + C_2^{i+1} h^2 + C_3^{i+1} h^3 \quad (1)$$

с набором определяемых в оценке коэффициентов $\{C_0^{i+1}, C_1^{i+1}, C_2^{i+1}, C_3^{i+1}\}$ и $h = x - x_0$ некоторого текущего узла x_0 и точки $x > x_0$. Опустив в этих коэф-

Таблица 1. Краткая характеристика работ, данные из которых использованы в оценке

Ссылка	Тип данных	Энергия E_d , МэВ	Угол рассеяния, град	$S(0)$, МэВ · мб
[3]	$d\sigma/d\Omega$	3.75–8	35–150	–
[4]	$d\sigma/d\Omega, \sigma$	1–11.5	20–90	–
[5]	$d\sigma/d\Omega, \sigma$	0.118–0.975	0–180	–
[6]	$d\sigma/d\Omega, \sigma$	0.4–3.5	15–170	–
[7]	$d\sigma/d\Omega, \sigma$ (поделены на 2)	4–12	90	–
[8]	$d\sigma/d\Omega, \sigma$	2.25–6	20–160	–
[9]	$d\sigma/d\Omega$ (поделены на 2)	1.8, 2	0–170	–
[10]	$d\sigma/d\Omega, \sigma$	2.5–4.5	10–90	–
[11]	$d\sigma/d\Omega$	9.05	20–150	–
[12]	Коэффициенты разложения в ряд по полиномам Лежандра A_0 (поделены на 2)	3–11	–	–
[13]	$d\sigma/d\Omega$	3.7	23–155	–
[14]	$d\sigma/d\Omega$	5.03	30–165	–
[15]	$d\sigma/d\Omega$ (поделены на 2)	14.8	10–100	–
[16]	$d\sigma/d\Omega, \sigma$	0.39–2.5	112.5	–
[17]	$d\sigma/d\Omega, \sigma$	0.3–1	90	–
[18]	$d\sigma/d\Omega, \sigma$ (поделены на 2)	1–5	85–155	–
[19]	σ	0.050–0.180	–	23000 ± 2000
[20]	S -фактор	0.0225–0.070	–	16900, 18800, 19700
[21]	σ	0.400–5	–	–
[22]	σ, S -фактор	0.100	–	–
[23]	S -фактор	0.013–0.75	–	16900 ± 500
[24]	S -фактор	0.015–1	–	17400
[25]	S -фактор (эксперимент и теория)	0.020–0.080	–	23000 ± 2500
[26]	S -фактор	–	–	20500 ± 500
Наст.	S -фактор	–	–	21220 ± 42

фициентах верхние индексы, получим следующую формулу представления оцененных данных:

$$S(x) = C_0 + C_1 h + C_2 h^2 + C_3 h^3. \quad (2)$$

Коридор ошибок оцененной кривой получается из метода максимального правдоподобия. Находится ковариационная матрица $C(a_I, a_J)$ коэффициентов разложения a_I, a_J сплайна. По ней определяется дисперсия в узлах сплайн-оценки

$$\sigma^2(S) = \sum_{I,J} C(a_I, a_J) Q_I(x) Q_J(x), \quad (3)$$

где Q_I, Q_J – базисные функции, определенные нами в [27].

В библиотеке SaVa экспериментальные и оцененные данные представлены интегральными сечениями реакций σ и связанными с ними значе-

ниями астрофизического S -фактора, которые оцениваются в библиотеке:

$$S(E_c) = \sigma(E_c) E_c \exp(\sqrt{E_g/E_c}), \quad (4)$$

где E_c – энергетическая точка, $E_g = (0.98948 z_1 z_2 \sqrt{m_1 m_2 / (m_1 + m_2)})^2$ – энергия Гамова для сталкивающихся частиц с массами m_1, m_2 и зарядами z_1, z_2 , выраженными соответственно в а.е.м. и через заряд электрона; E_c (в с.ц.м.) для частицы с m_1 и энергией E_1 , налетающей на покоящееся ядро-мишень с m_2 , равна

$$E_c = \frac{m_2}{m_1 + m_2} E_1. \quad (5)$$

В библиотеке SaVa при аппроксимации функции возбуждения в области ее определения используется приближающая функция, в общем

случае состоящая из суммы резонансных и нерезонансных (сплайн) частей. Резонансная составляющая выражается как сумма брейт–вигнеровских изолированных резонансов [29]. В настоящих исследованиях оценка сечений реакций проводилась только с использованием сплайнов в системе координат, у которой оси абсцисс и ординат имеют логарифмический масштаб. Выражение для сплайна оцененной кривой записывается как:

$$S(x) = \exp(C_0 + C_1 h + C_2 h^2 + C_3 h^3), \quad (6)$$

где $h = \ln E_i - \ln x_0$ для узла сплайна с энергией x_0 , E_i – выбранное значение энергии налетающей частицы.

ОЦЕНКА АСТРОФИЗИЧЕСКОГО S -ФАКТОРА РЕАКЦИИ ${}^6\text{Li}(d, \alpha)$

Как было указано выше, оценка в библиотеке проводится для астрофизического S -фактора. В рассматриваемой области энергий (менее 100 кэВ) существенным становится влияние электронного экранирования на величины значений интегральных сечений (и астрофизического S -фактора). Поэтому экспериментальные данные демонстрируют в этой области подъем хода экспериментальной кривой S -фактора. В SaVa рассматриваются “голые” ядра, т.е. ядра без окружающей их электронной оболочки. Это означает, что влияние эффекта электронного экранирования должно быть опущено при проведении оценки. Поэтому при выполнении настоящей оценки в этой области энергий ориентировались на расчетные данные [24, 25]. Кроме того, не были использованы две точки из работы [17] при $E_d = 0.2996$ и 0.3994 МэВ. Ход этих точек при низких энергиях демонстрирует падение значений S -фактора с уменьшением E_d , в то время как все остальные наборы данных обнаруживают рост значений астрофизического фактора при уменьшении энергии дейтрона. Значения S -фактора, полученные из сечений [21], демонстрируют некоторый пик в диапазоне энергий 4.2–6 МэВ (в лабораторной системе координат, л.с.к.), который не обнаруживается в наборах данных других авторов. Кроме того, в [21] данные получены методом троянского коня путем вычитания, что может явиться источником дополнительных ошибок в определении итоговых сечений. Поэтому оцененная кривая проведена без учета данного подъема. На рис. 3а и 3б все опущенные из оценки точки представлены для демонстрации.

Итоговые оцененные данные астрофизического S -фактора (или интегрального сечения реакции) записываются и хранятся в SaVa в виде коэффициентов сплайна, по которым при обращении к данным библиотеки восстанавливается оцененная кривая. В табл. 2 приведены полученные в насто-

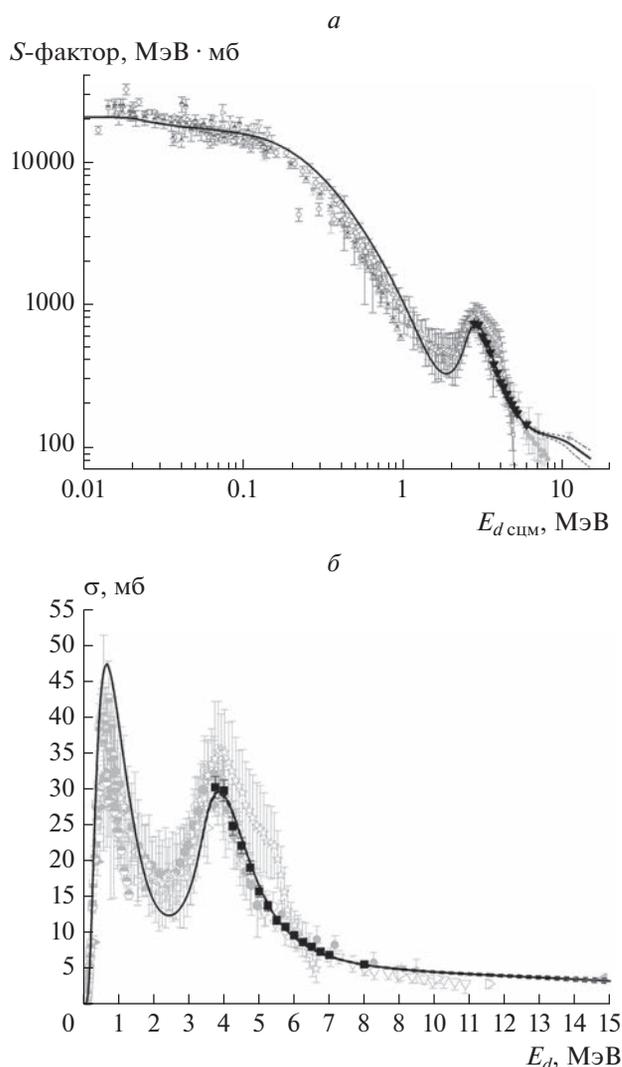


Рис. 3. Экспериментальные и оцененные значения: астрофизического S -фактора реакции ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ (а); интегральных сечений реакции ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ (б). Светлые точки – литературные данные, темные – наши, сплошная и пунктирная линии – оцененная кривая и ее коридор ошибок.

ящей работе коэффициенты аппроксимирующего сплайна, с использованием которых по формуле (6) рассчитывается кривая оцененных значений астрофизического S -фактора (рис. 3а). Затем по полученным значениям S -фактора с применением формулы (4) можно вычислить оцененные значения интегрального сечения, которые вместе с экспериментальными точками представлены на рис. 3б. На рис. 3а и 3б каждый набор данных из табл. 1 не обозначен отдельно в соответствии с литературным источником, за исключением наших данных. Это сделано для наглядности и демонстрации хода кривой экспериментальных и оцененных данных.

Таблица 2. Значения коэффициентов аппроксимирующего сплайна

Энергия узла сплайна x_0 , МэВ	Значения коэффициентов			
	C_0	C_1	C_2	C_3
0.01937	$9.9626 \cdot 10^0$	0	—	—
0.01937	$9.9626 \cdot 10^0$	$-3.1338 \cdot 10^{-1}$	$2.0714 \cdot 10^{-1}$	$-7.0190 \cdot 10^{-2}$
0.10105	$9.6938 \cdot 10^0$	$-2.0356 \cdot 10^{-1}$	$-2.1711 \cdot 10^{-1}$	$-1.3130 \cdot 10^{-1}$
0.22718	$9.3166 \cdot 10^0$	$-8.1389 \cdot 10^{-1}$	$-5.3623 \cdot 10^{-1}$	$2.5161 \cdot 10^{-2}$
1.16669	$6.6596 \cdot 10^0$	$-2.3665 \cdot 10^0$	$-4.1272 \cdot 10^{-1}$	$3.7001 \cdot 10^0$
1.98962	$5.8415 \cdot 10^0$	$3.5549 \cdot 10^{-1}$	$5.5124 \cdot 10^0$	$-5.4793 \cdot 10^{-1}$
2.64361	$6.3752 \cdot 10^0$	$3.3560 \cdot 10^0$	$5.0452 \cdot 10^0$	$-1.8870 \cdot 10^2$
2.76588	$6.5198 \cdot 10^0$	$2.6549 \cdot 10^0$	$-2.0550 \cdot 10^1$	$2.1567 \cdot 10^1$
4.12813	$5.6725 \cdot 10^0$	$-3.4277 \cdot 10^0$	$5.3612 \cdot 10^0$	$-2.9959 \cdot 10^0$
11.52854	$4.5617 \cdot 10^0$	$-1.8954 \cdot 10^0$	—	—

Следующий этап после проведения интерполяции в интервале энергий налетающих частиц, где имеются экспериментальные данные, — получение экстраполяционных кривых при энергиях вне области определения экспериментальных данных. Ввиду того, что в библиотеке SaVa рассматривается голаяядерное взаимодействие, т.е. с исключением эффекта электронного экранирования, в качестве экстраполяционной кривой в область низких энергий выбран полином нулевой степени — постоянная величина. Экстраполирующая кривая в области высоких энергий — более 11.5 МэВ — представляет собой полином первой степени. Коэффициенты экстраполирующих кривых для астрофизического S -фактора при энергиях

вне диапазона экспериментальных данных представлены в первой и последней строках табл. 2.

Следующим этапом работы было получение значения астрофизического S -фактора при нулевом значении энергии налетающих частиц. Оцененная нами величина составила $S(0) = 21220 \pm 42$ МэВ · мб. На рис. 4 представлены значения $S(0)$, полученные в настоящем исследовании, и имеющиеся в литературе. Видим, что наш результат находится в согласии с литературными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием математического аппарата библиотеки SaVa проведена оценка астрофизического S -фактора реакции ${}^6\text{Li}(d, \alpha_0){}^4\text{He}$ в интервале энергий дейтронов от 0.016 до 14.8 МэВ. Представлены коэффициенты аппроксимирующего сплайна в этом интервале и экстраполирующего полинома в областях энергий меньше 0.016 и более 14.8 МэВ. Получено значение $S(0) = 21220 \pm 42$ МэВ · мб, согласующееся в пределах ошибок с литературными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генералов Л.Н., Жеребцов В.А., Селянкина С.М. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 8. С. 1134; Generalov L.N., Zherebtsov V.A., Selyankina S.M. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 8. P. 937.
2. Zvenigorodskij A.G., Zherebtsov V.A., Lazarev L.M. et al. The library of evaluated and experimental data on charged particles for fusion application. IAEA-NDS-191, 1999.
3. Генералов Л.Н., Вихлянцев О.П., Карпов И.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 12. С. 1774; Generalov L.N., Vikhlyantsev O.P., Karpov I.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 12. P. 1511.
4. Risler R., Gruebler W., Debenham A.A. et al. // Nucl. Phys. A. 1977. V. 286. P. 115.

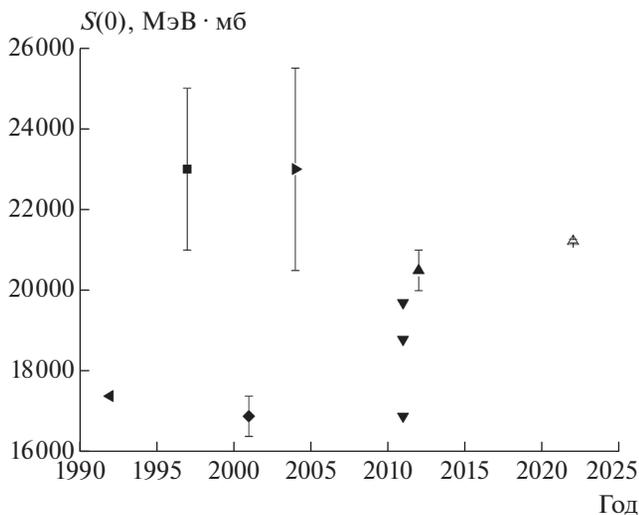


Рис. 4. Значения астрофизического S -фактора при нулевой энергии налетающих дейтронов, полученные в настоящей работе и взятые из литературы: \triangle — настоящая работа, \blacksquare — [19], \blacktriangledown — [20], \blacklozenge — [23], \blacktriangleleft — [24], \blacktriangleright — [25], \blacktriangle — [26].

5. *Elwyn A.J., Holland R.E., Davids C.N. et al.* // Phys. Rev. C. 1977. V. 16. P. 1744.
6. *McClenahan C.R., Segel R.E.* // Phys. Rev. C. 1975. V. 11. P. 370.
7. *Mani G.S., Freeman R.M., Ricard F. et al.* // Proc. Phys. Soc. 1965. V. 85. P. 281.
8. *Could C.R., Joyce J.M., Boyce J.R.* // Proc. Conf. Nucl. Cross Sect. Tech. V. 1. (Washington, 1975). P. 697.
9. *Bruno G., Decharge J., Perrin A. et al.* // J. Physics. 1966. V. 27. P. 517.
10. *Meyer V., Pfeifer W., Staub H.H.* // Helv. Phys. Acta. 1962. V. 36. P. 465.
11. *Yuan Rongfang, Wang Zhifu, Ye Binqi et al.* // Chin. J. Nucl. Phys. 1981. V. 3. P. 155.
12. *Durr W., Clausnitzer G., Fick D. et al.* // Nucl. Phys. A. 1968. V. 120. P. 678.
13. *Huang Bingyin, Sun Zuxun, Zhuang Yoxing et al.* // Proc. Conf. Nucl. Phys. (Shanghai, 1974). P. 89.
14. *Mao Zhenlin, Zhuang Youxiang, Sun Zuxun et al.* // Proc. Conf. Low Energy Nucl. Phys. (Lanzhou, 1972). P. 72.
15. *Hamburger E.W., Cameron J.R.* // Phys. Rev. 1960. V. 117. P. 781.
16. *Cai Duniu, Zhou Enchen, Jiang Chenglie.* EXFOR S0017.
17. *Bertrand F., Grenier G., Pornet J.* Report CEA-R-3428. 1968.
18. *Jeronymo G.M., Mani G.S., Picard F. et al.* // Nucl. Phys. 1962. V. 38. P. 11.
19. *Czerski K., Huke A., Bucka H. et al.* // Phys. Rev. C. 1997. V. 55. P. 1517.
20. *Fang K., Wang T., Yonemura H. et al.* // J. Phys. Soc. Japan. 2011. V. 80. Art. No. 084201.
21. *Pizzone R.G., Spitaleri C., Lamia L. et al.* // Phys. Rev. C. 2011. V. 83. Art. No. 045801.
22. *Lalremruata B., Mulik V.K., Dhole S.D. et al.* // Phys. Rev. C. 2009. V. 80. Art. No. 044617.
23. *Spitaleri C., Typel S., Pizzone R.G. et al.* // Phys. Rev. C. 2001. V. 63. Art. No. 055801.
24. *Engstler S., Raimann G., Angulo C. et al.* // Phys. Lett. B. 1992. V. 279. P. 20.
25. *Ruprecht G., Czerski K.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 70. Art. No. 025803.
26. *Wang T.S., Guan X.C., Fang K.H.* // J. Physics G. 2012. V. 39. Art. No. 015201.
27. *Генералов Л.Н., Селянкина С.М., Таова С.М. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 6. С. 699; *Generalov L.N., Selyankina S.M., Taova S.M. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 6. P. 620.
28. *Horsley A., Parker J.B., Parker K. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. 1968. V. 62. P. 29.
29. *Таова С.М., Селянкина С.М., Генералов Л.Н. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 6. С. 732; *Taova S.M., Selyankina S.M., Generalov L.N. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 6. P. 658.

${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ reaction cross sections

L. N. Generalov^a, V. A. Zhrebtsov^a, S. M. Selyankina^a, *

^a Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, 607188 Russia

*e-mail: otd4@expd.vniief.ru

New evaluation of ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ reaction integral cross sections obtained in our electronic SaBa (Sarov Base) library by mathematic tools (spline-approximation) of this library is presented. The motivation of the research is the results of our measurements of this reaction differential cross sections at energy range 3.75–8 MeV.