

УДК 539.172.12

ОЦЕНЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИИ ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$, ПОЛУЧЕННЫЕ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОННОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

© 2020 г. С. М. Таова¹ *, Л. Н. Генералов¹, В. А. Жеребцов¹

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 11.05.2020 г.

После доработки 02.06.2020 г.

Принята к публикации 26.06.2020 г.

Представлены результаты анализа экспериментальных данных по реакции ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$, полученные с учетом электронного экранирования. Анализируются данные для реакции, протекающей в газовой среде. Усовершенствован алгоритм описания экспериментальных данных в низкоэнергетической области, описанный авторами ранее. Полученный потенциал электронного экранирования составил 356 эВ. С полученным потенциалом электронного экранирования рассчитаны сечения реакции ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ и определены коэффициенты усиления при малых энергиях столкновения частиц.

DOI: 10.31857/S0367676520100245

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени накоплен большой экспериментальный и теоретический материал, посвященный вопросу изучения эффекта электронного экранирования [1–9]. При измерении сечений в лабораторных условиях, когда имеется ионизованная налетающая частица и нейтральный атом ядра-мишени, кулоновское поле взаимодействующих ядер экранируется облаком электронов, окружающих ядро-мишень. Таким образом, налетающая частица встречается с более низким и узким кулоновским барьером, и вероятность ее проникновения в ядро возрастает.

Обычно сечения ядерных реакций σ , протекающих при взаимодействии заряженных частиц низких энергий, выражаются через астрофизический S -фактор, определяемый как

$$S = \sigma E \exp(2\pi\eta), \quad (1)$$

где E – энергия в системе центра масс во входном канале, η – параметр Зоммерфельда. Из-за существующего кулоновского барьера между сталкивающимися частицами сечение σ при стремлении $E \rightarrow 0$ быстро уменьшается, в то же время S -фактор изменяется относительно медленно.

Эффект электронного экранирования характеризуется наличием эффективной энергии столкновения

$$E_{\text{eff}} = E + U_e, \quad (2)$$

где U_e – потенциал электронного экранирования (предполагается независимым от энергии). При этом наблюдаемое сечение $\sigma(E)$ представляется в виде:

$$\sigma(E) = \sigma_b(E + U_e), \quad (3)$$

где b (bare) – обозначение для голоядерного взаимодействия.

Для подбарьерных реакций даже небольшое смещение энергии столкновения может вызвать значительное изменение в наблюдаемом сечении реакции. Пренебрегая энергетической зависимостью астрофизического S -фактора

$$S_b(E + U_e) \cong S_b(E) \quad (4)$$

по сравнению с сильной зависимостью проницаемости кулоновского барьера, можно записать

$$\sigma(E) = \sigma_b(E + U_e) = \sigma_b(E)f(E), \quad (5)$$

где f – коэффициент усиления, который с учетом соотношений (1), (2) и (4) равен

$$f \equiv \frac{\sigma(E)}{\sigma_b(E)} = \frac{\sigma_b(E + U_e)}{\sigma_b(E)} = \frac{S_b(E + U_e)}{S_b(E)} \frac{E}{E + U_e} \frac{\exp[-2\pi\eta(E + U_e)]}{\exp[-2\pi\eta(E)]}. \quad (6)$$

При $E \gg U_e$ коэффициент усиления записывается в виде:

$$f \approx \exp\left(\pi\eta(E)\frac{U_e}{E}\right). \quad (7)$$

При $U_e/E \leq 0.1$ для коэффициента усиления используется следующее выражение:

$$f \approx \frac{E}{E + U_e} \exp\left(\pi\eta(E)\frac{U_e}{E}\right). \quad (8)$$

В настоящей работе представлены результаты анализа экспериментальных данных по реакции ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$, протекающей в газовой среде [1–6] при взаимодействии пучка ионов гелия (${}^3\text{He}^+$) с атомарным гелием. Для описания экспериментальных данных предложен новый способ определения потенциала электронного экранирования, который позволяет получить более точное значение U_e , чем при использовании варианта расчета, описанного ранее в [10].

1. ОЦЕНКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОННОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

Подробное описание используемой нами методики оценки экспериментальных данных с учетом электронного экранирования представлено в [10]. Суть метода заключается в разбиении экспериментальных данных энергетической точкой E_b на две области: при $E > E_b$ S -фактор принимается голоядерным, а при $E \leq E_b$ – экранированным. Экспериментальные данные в области $E > E_b$ описываются кубическими сплайнами, обычно, с дефектом 1 – кусочно-полиномиальной функцией третьей степени с непрерывными вторыми производными. Параметрами описания являются положения узлов и сплайн-коэффициенты. Голоядерный S -фактор вычисляется по формуле:

$$S_b(E) = C_0 + C_1 h + C_2 h^2 + C_3 h^3, \quad (9)$$

где $h = E - E_0$, E – выбранная энергия, E_0 – значение энергии узла сплайна, $E_0 < E < E_{0+1}$, C_i , $i = 0, 1, 2, 3$ – значения коэффициентов сплайна, соответствующие данному узлу.

В области $E \leq E_b$ для описания экспериментальных данных используется экспоненциальная зависимость (7). В этом случае экранированный S -фактор записывается в виде:

$$S_s(E) = b \exp\left(\pi\eta\frac{U_e}{E}\right), \quad (10)$$

где b является значением голоядерного S -фактора в точке сшивки, деленным на коэффициент усиления f , (s (screening) – обозначение экранированного взаимодействия). В точке E_b оба типа описания сшиваются [10].

Использование приближенного выражения (10) для описания экспериментальных данных в низкоэнергетичной области существенно упрощает проведение вычислений. Однако, это выражение верно лишь в случае, когда $U_e \ll E$. Для области энергий взаимодействия сопоставимых или немногим превышающих потенциал электронного экранирования для нахождения коэффициента усиления необходимо использовать другую зависимость.

Следует отметить, что в нашей методике сделано одно упрощение, которое справедливо при отсутствии околопороговых резонансов, а именно: $S_b(E) = \text{const}$. Другими словами, величина голоядерного S -фактора не зависит от энергии. С учетом этого допущения, множитель $S_b(E + U_e)/S_b(E)$ в (6) будет всегда равен 1. Таким образом, коэффициент усиления определяется в виде:

$$f = \frac{E}{E + U_e} \exp[-2\pi\eta(E + U_e) + 2\pi\eta(E)]. \quad (11)$$

Именно это выражение используется нами для получения итогового описания экспериментальных данных.

Алгоритм, применяемый для анализа экспериментальных данных в этой работе, заключается в следующем. На первом этапе в области $E \leq E_b$ для описания экспериментальных данных используется упрощенное выражение (10). С его помощью определяются параметры описания E_b , $S_b(E)$ и U_e (см. [10]). На втором этапе полученное значение U_e используется в качестве начального приближения для расчета по формуле (8). Результирующее описание и конечное значение U_e получаем, используя зависимость (11) (этап 3).

На втором этапе для описания экспериментальных данных используется выражение:

$$S_s(E, U_e) = b \frac{E}{E + U_e} \exp\left(\pi\eta\frac{U_e}{E}\right). \quad (12)$$

b определяется из условия непрерывности в точке E_b

$$S_b(E_b) = b \frac{E_b}{E_b + U_e} \exp\left(\pi\eta\frac{U_e}{E_b}\right). \quad (13)$$

Далее, используя известную зависимость

$$\pi\eta = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\hbar V}, \quad (14)$$

в которой Z_1, Z_2 – атомные номера сталкивающихся частиц 1 и 2, e – заряд электрона, V – скорость столкновения, с учетом соотношения между V и E получим выражение

$$b = \frac{S_b(E_b)(E_b + U_e)}{E_b} \exp\left(-k_z \frac{U_e}{E_b^{3/2}}\right), \quad (15)$$

где $k_z = \pi\eta(E)$.

Таблица 1. Значения коэффициентов сплайна аппроксимирующей функции S -фактора реакции ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$

№	Узел, $\ln E$	Дефект	Коэффициенты сплайна			
			C_0	C_1	C_2	C_3
1	-1.9486	1	$4.8693 \cdot 10^3$	$-2.7109 \cdot 10^3$	$3.5612 \cdot 10^3$	$-1.6614 \cdot 10^0$
2	-0.9446	1	$4.0558 \cdot 10^3$	$-5.8426 \cdot 10^2$	$-1.4430 \cdot 10^0$	$1.1513 \cdot 10^3$
3	0.0760	0	—	—	—	—

Таблица 2. Параметры экстраполяции S -фактора в область энергий выше 1079 кэВ

Узел, $\ln E$	Коэффициенты сплайна	
	C_0	C_1
0.0760	$3.1804 \cdot 10^3$	$6.8095 \cdot 10^1$

В результате для экранированного S -фактора имеем

$$S_s(E, U_e) = \frac{S_b(E_b)(E_b + U_e)E}{E_b(E + U_e)} \exp(k_z U_e (E^{-3/2} - E_b^{-3/2})). \quad (16)$$

Для этого выражения используем известный метод нахождения минимума функции – метод Ньютона. Ищется минимум функции

$$\Phi(U_e) = \sum_{E_i < E_b} (S_i - S_b(E, U_e))^2 \omega_i^2, \quad (17)$$

где $\omega_i = \Delta S_i / S_i$ – вес экспериментальной точки. Экспериментальная ошибка ΔS_i делится на S_i

(значение S -фактора в i -точке) потому, что описание проводится в логарифмическом масштабе. Первая и вторая производные Φ выводятся через производные (16) по U_e , а в качестве начального приближения берется U_e , полученное на первом шаге (выражение (10)).

В результате этих вычислений определяем параметры для построения описания с использованием выражения (11). Экранированный S -фактор при этом записывается в следующем виде:

$$S_s(E, U_e) = b \frac{E}{E + U_e} \exp(2\pi(\eta(E) - \eta(E + U_e))), \quad (18)$$

b , как и раньше, определяется из условия непрерывности в точке E_b . Выражение для b не приводится из-за громоздкости. Далее применяется метод Ньютона для нахождения U_e . Для начального приближения берем значение, полученное на втором шаге. В итоге получаем результирующее описание и определяем конечное значение U_e . При таком трехступенчатом подходе не встречается трудностей со сходимостью метода Ньютона.

2. ОЦЕНКА S -ФАКТОРА РЕАКЦИИ ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$

Анализ реакции ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ проводился при условиях, когда в качестве ядра-мишени рассматривался атомарный гелий, а в качестве налетающей частицы выступал ион гелия ${}^3\text{He}^+$. Использовались экспериментальные данные, полученные в работах [1–6], рис. 1. Охватываемый энергетический диапазон составил от 20 до 1079 кэВ.

Постепенный рост значений S -фактора становится заметным при энергиях взаимодействующих частиц менее 200 кэВ. Наилучшее описание всей совокупности экспериментальных данных было получено для $E_b = 142.48$ кэВ, $S_b(E) = 4869.3 \pm 50.0$ МэВ · мб, $U_e = 356 \pm 36$ эВ и при значениях коэффициентов сплайна, представленных в табл. 1. Последняя строка таблицы содержит лишь значение энергии конечного узла сплайна. После этой границы осуществляется переход к экстраполяционной формуле. Экстраполяция значений S -фактора в область энергий выше 1079 кэВ выполнена с помощью полинома 1-ой степени, табл. 2.

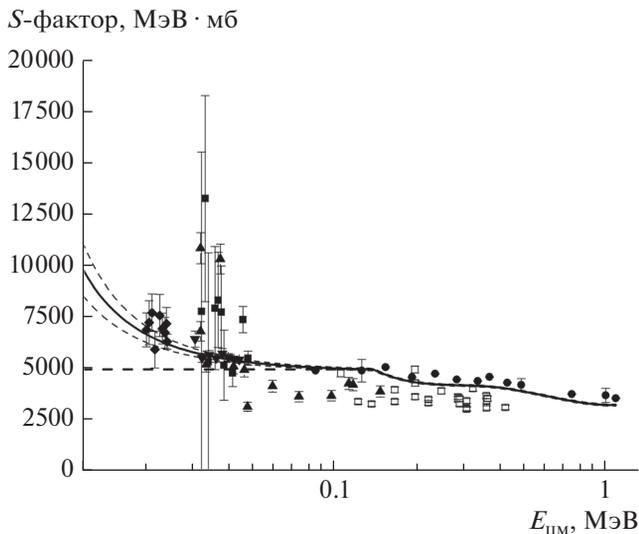


Рис. 1. Оцененная кривая для экранированного S -фактора реакции ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ (сплошная кривая). Штриховая линия – голоядерное взаимодействие. Экспериментальные данные: \blacklozenge – [1], \blacksquare – [2], \bullet – [3], \blacktriangle – [4], \square – [5], \blacktriangledown – [6].

Определенное в работе значение $U_e = 356 \pm 36$ эВ превосходит значение потенциала электронного экранирования, которое приводится в публикации [2], где в результате полиномиальной подгонки было получено значение 294 ± 47 эВ. В [1] значения U_e составили 240 эВ, 323 ± 51 эВ и 432 ± 29 эВ при использовании полиномиального приближения с различными подгоночными параметрами. В работе [11] R -матричная параметризация позволила получить значение $U_e = 400 \pm 40$ эВ. В [12] потенциал составил $U_e = 327 \pm 42$ эВ. В теоретической работе [13] для этого вида взаимодействия приводится значение 254 эВ. Таким образом, полученное значение потенциала электронного экранирования $U_e = 356 \pm 36$ эВ наиболее близко к значению $U_e = 323 \pm 51$ эВ и $U_e = 327 \pm 42$ эВ из работ [1] и [12], соответственно. Параметры экстраполяции S -фактора в область низких энергий с учетом электронного экранирования представлены в табл. 3.

С использованием потенциала электронного экранирования $U_e = 356 \pm 36$ эВ были получены значения экранированного сечения и рассчитаны коэффициенты усиления при энергии взаимодействия частиц от 0.3 до 140.13 кэВ в с.д.м. Результаты расчета представлены на рис. 2 и в табл. 4. Хотя

Таблица 3. Параметры экстраполяции S -фактора в область низких энергий для реакции ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$

E_b , МэВ	$S_b(E_b)$, МэВ · мб	U_e , эВ
0.14248	4869.3 ± 50.0	356 ± 36

Таблица 4. Сечения реакции ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ без учета и с учетом электронного экранирования и коэффициент усиления

№	$E_{\text{цм}}$, МэВ	$\sigma_b(E)$, мб	$\sigma_s(E)$, мб	$f(E)$
1	0.0003	$2.19414 \cdot 10^{-115}$	$3.00946 \cdot 10^{-76}$	$1.372 \cdot 10^{39}$
2	0.0004	$3.49690 \cdot 10^{-99}$	$1.13583 \cdot 10^{-70}$	$3.248 \cdot 10^{28}$
3	0.0005	$3.88247 \cdot 10^{-88}$	$4.17767 \cdot 10^{-66}$	$1.076 \cdot 10^{22}$
4	0.001	$8.64995 \cdot 10^{-61}$	$1.72267 \cdot 10^{-51}$	$1.992 \cdot 10^{09}$
5	0.003	$4.69836 \cdot 10^{-33}$	$5.26083 \cdot 10^{-31}$	$1.120 \cdot 10^2$
6	0.005	$1.37018 \cdot 10^{-24}$	$1.29218 \cdot 10^{-23}$	$9.431 \cdot 10^0$
7	0.007	$4.10259 \cdot 10^{-20}$	$1.60108 \cdot 10^{-19}$	$3.903 \cdot 10^0$
8	0.01	$3.79409 \cdot 10^{-16}$	$8.40316 \cdot 10^{-16}$	$2.215 \cdot 10^0$
9	0.015	$1.89003 \cdot 10^{-12}$	$2.89456 \cdot 10^{-12}$	$1.531 \cdot 10^0$
10	0.05	$3.53624 \cdot 10^{-5}$	$3.74147 \cdot 10^{-5}$	$1.058 \cdot 10^0$
11	0.1	$1.02898 \cdot 10^{-2}$	$1.03954 \cdot 10^{-2}$	$1.010 \cdot 10^0$
12	0.11	$1.91272 \cdot 10^{-2}$	$1.92597 \cdot 10^{-2}$	$1.007 \cdot 10^0$
13	0.12	$3.27201 \cdot 10^{-2}$	$3.28603 \cdot 10^{-2}$	$1.004 \cdot 10^0$
14	0.13	$5.23727 \cdot 10^{-2}$	$5.24858 \cdot 10^{-2}$	$1.002 \cdot 10^0$
15	0.14248	$8.74034 \cdot 10^{-2}$	$8.74060 \cdot 10^{-2}$	$1.000 \cdot 10^0$

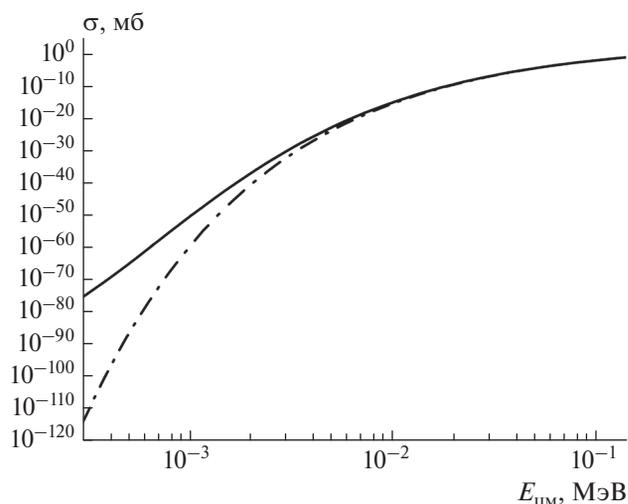


Рис. 2. Оцененные значения сечения реакции ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$. Сплошная кривая — экранированное сечение, штрихпунктирная кривая — голоядерное сечение.

в работе и осуществлена экстраполяция вплоть до энергии 300 эВ, надежными авторы считают сечения, рассчитанные для энергий взаимодействия выше 4 кэВ. Данные, полученные в диапазоне $E < 4$ кэВ, характеризуются высокими значениями погрешности. В табл. 4 приводятся значения голоядерного и экранированного сечений и коэффициента усиления, полученные при различных энергиях взаимодействия ($\sigma_b(E)$ — голоядерное сечение, $\sigma_s(E)$ — экранированное сечение). Значения ко-

ээффициента усиления, приведенные в табл. 4, позволяют сделать вывод о сильном влиянии электронного экранирования на процесс протекания реакции ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ экспериментальных данных по реакции ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ в низкоэнергетической области. При энергиях взаимодействия частиц менее 200 кэВ наблюдается заметный рост значений S -фактора, обусловленный проявлением эффекта электронного экранирования.

Для описания экспериментальных данных предложен новый способ определения потенциала электронного экранирования, который позволяет получить более точное значение U_e , чем при использовании варианта расчета, описанного ранее в [10]. Этот способ предусматривает поэтапное уточнение значения потенциала электронного экранирования: значение U_e , полученное на предыдущем этапе вычислений, используется в качестве начального приближения в текущем расчете.

Потенциал электронного экранирования, полученный в работе, составил 356 эВ. Значения сечений, рассчитанные с этим потенциалом, свидетельствуют о необходимости учета эффекта электронного экранирования при анализе низкоэнергетических данных по реакции ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Junker M., D'alessandro A., Zavatarelli S. et al.* // Phys. Rev. C. 1998. V. 57. P. 2700.
2. *Bonetti R., Brogginì C., Campajola L. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. P. 5205.
3. *Dwarakanath M.R., Winkler H.* // Phys. Rev. C. 1971. V. 4. P. 1532.
4. *Dwarakanath M.R.* // Phys. Rev. C. 1974. V. 9. P. 805.
5. *Нен-Мун В., Новацкий В.Н., Осетинский Г.М. и др.* // ЯФ. 1966. Т. 3. С. 1064.
6. *Itahashia T., Komori M., Kudomi N. et al.* // Nucl. Phys. A. 2003. V. 718. P. 466.
7. *Assenbaum H.J., Langanke K., Rolfs C.* // Z. Phys. A. 1987. V. 327. P. 461.
8. *Engstler S., Krauss A., Neldner K. et al.* // Phys. Lett. B. 1988. V. 202. P. 179.
9. *Langanke K., Barnes C.A.* // Ad. Nucl. Phys. 1996. V. 22. P. 173.
10. *Таова С.М., Генералов Л.Н., Жеребцов В.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. С. 705; *Taova S.M., Generalov L.N., Zherebtsov V.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 6. P. 626.
11. *Angulo C., Descouvemont P.* // Nucl. Phys. A. 1998. V. 639. P. 733.
12. *Messahel L, Ouichaoui S., Belhout A. et al.* // AIP Conf. Proc. 2008. V. 1012. P. 410.
13. *Bracci L., Fiorentini G., Melezhik V.S. et al.* // Nucl. Phys. A. 1990. V. 513. P. 316.