

**ИЗМЕРЕНИЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ S -ФАКТОРОВ
И СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИИ $p(d,\gamma)^3\text{He}$
В ОБЛАСТИ УЛЬТРАНИЗКИХ ЭНЕРГИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИШЕНИ
ИЗ ДЕЙТЕРИДА ЦИРКОНИЯ**

*В. М. Быстрицкий, А. П. Кобзев, А. Р. Крылов,
С. С. Паржицкий, А. В. Филиппов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Г. Н. Дудкин, Б. А. Нечаев, В. Н. Падалко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Ф. М. Пеньков, Ю. Ж. Тулеушев

Институт ядерной физики, Алма-Ата, Казахстан

М. Филипович

Факультет энергии и топлива, Университет науки и технологий, Краков, Польша

Вит. М. Быстрицкий

Калифорнийский университет, Ирвайн, Калифорния, США

С. Гази, Й. Гуран

Институт электротехники, Братислава

Работа посвящена изучению механизма протекания реакции $p(d,\gamma)^3\text{He}$ с использованием мишени из дейтерида циркония при энергиях протонов 11–19 кэВ. Эксперимент проводился на пучке протонов сильноточного импульсного ускорителя Холла (ТПУ, Томск). Измерены зависимости астрофизического S -фактора и эффективного сечения для pd -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами. Проведено сравнение полученных результатов с имеющимися данными. Наблюдается согласие между результатами настоящей работы и эксперимента, выполненного коллаборацией LUNA с использованием мишени из газообразного дейтерия.

The article is devoted to the study of the $d(p,\gamma)^3\text{He}$ reaction mechanism with using of the zirconium deuterated target at proton energies of 11–19 keV. The experiment was carried out using the plasma high-current pulsed Hall ion accelerator (TPU, Tomsk). The dependence of the astrophysical S -factor and the effective cross section for pd -reaction on the energy of collision of protons with deuterons were measured. The results are compared with the literature. There is agreement between the results of the present work and the experiment performed by the LUNA collaboration with the target of deuterium gas.

PACS: 25.40.Ep; 26.65.+t; 95.30.-k

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению ядерной реакции



в области ультранизких энергий столкновения протонов с дейтронами (\sim кэВ) обусловлен следующими возможностями: тестированием теоретических работ, посвященных решению трехтельных задач на основе современных представлений о потенциале нуклон-нуклонного взаимодействия в рамках реалистических двухчастичных, двухчастичных плюс трехчастичных сил [1–4]; получением информации о структуре обменных мезонных токов и определением их вклада в pd -взаимодействие [5–7]; проверкой и определением величины изменения астрофизического S -фактора для pd -реакции за счет эффекта электронной экранировки взаимодействующих частиц [8]; разрешением некоторых актуальных проблем, существующих в области астрофизики [9–13].

К настоящему времени было выполнено три эксперимента [14–16] по исследованию зависимости астрофизического S -фактора для pd -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами (см. табл. 1).

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные значения астрофизических S_{pd} -факторов, а также значения параметров линейной аппроксимации величины $S_{pd}(E) = S_0 + S'_0 E$ (E — энергия столкновения протонов с дейтронами в с. п. м.)

Номер работы	S_0 , эВ · б	S'_0 , эВ · б · кэВ ⁻¹	$S_{pd}(0)$, эВ · б	$S_{pd}(E)$, эВ · б
[17]	—	—	$0,185 \pm 0,005$	—
[14]	—	—	$0,25 \pm 0,04$	—
[15]	$0,166 \pm 0,005$	$0,0071 \pm 0,0004$	$0,166 \pm 0,014$	—
[16]	$0,216 \pm 0,006$	$0,0059 \pm 0,0004$	$0,216 \pm 0,010$	—
[18]	—	—	—	$0,237 \pm 0,061$ ($E = 8,28$ кэВ)
	—	—	—	$0,277 \pm 0,064$ ($E = 9,49$ кэВ)
	—	—	—	$0,298 \pm 0,065$ ($E = 10,10$ кэВ)

Зависимость S -фактора для pd -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами носит практически линейный характер, как и следовало ожидать, на основании анализа вкладов s - и p -волн в сечение радиационного захвата протона дейтроном [14, 15].

Измеренное значение S -фактора для pd -реакции в области пика Гамова [16] больше на $\sim 15\%$ и меньше на $\sim 20\%$, чем результаты экстраполяции экспериментальных данных [15] и [14] из области более высоких энергий столкновения протонов с дейтронами в указанную область энергий соответственно. Значение S -фактора для pd -реакции при нулевой энергии pd -столкновения [16] на уровне 3σ (σ — статистическая ошибка измерения величины S) отличается как от расчетного значения величины S_{pd} [17], так

и от результата экстраполяции экспериментальных данных [15] из области более высоких энергий к значению энергии, равному 0.

Указанный экспериментальный разброс объясняется сложностью измерения сечений величиной в нанобарны при малых эффективных толщинах мишеней. Так, основной выход продуктов ядерных реакций обеспечивается толщинами в 10^{17} атом/см². Именно поэтому для постановки *pd*-эксперимента нами применялась методика с использованием созданного нами ранее сильноточного импульсного ускорителя Холла с замкнутым электронным током [19–22]. С помощью данного ускорителя можно получать пучки ускоренных ионов плазмы H^+ , D^+ , $^3He^+$, $^4He^+$ в диапазоне энергий 2–20 кэВ [18–22]. С использованием ускорителя Холла были впервые выполнены эксперименты по измерению значений астрофизического *S*-фактора и сечений *dd*-реакции в области энергий столкновения дейтронов 2,2–6,3 кэВ [19–22], а также *pd*-реакции в области энергий столкновения протонов с дейтронами 8–10 кэВ [18]. Полученные результаты [18–22] свидетельствовали о перспективности созданной методики для прецизионного измерения характеристик ядерных реакций в области ультранизких энергий. Результаты [18] (см. табл. 1) служили своеобразной гарантией возможности выполнения более трудоемкого эксперимента по изучению *pd*-реакции (выход γ -квантов из *pd*-реакции в исследуемой области энергий частиц во входном канале в среднем на 4–5 порядков меньше, чем выход нейтронов из *dd*-реакции для соответствующего интервала энергий столкновения дейтронов) в более широком диапазоне энергий столкновения протонов с дейтронами.

В настоящее время активно изучаются механизмы электронной экранировки в реакциях с участием легких ядер. В адиабатическом приближении [8] ожидаемое увеличение значения *S*-фактора для *pd*-реакции составляет $\sim 6\%$ при энергии столкновения протона с дейтроном 2,5 кэВ (в с. ц. м.) и $\sim 20\%$ при энергии столкновения 1 кэВ. Тем не менее требуется экспериментальная проверка выводов [8], необходимость которой основана на примере изучения механизма протекания *dd*-реакции в дейтериде металлов. Для реакций $d(d, n)^3He$, $d(d, p)^3H$, в области энергий пика Гамова, расчеты в адиабатическом пределе свидетельствуют о незначительном влиянии эффекта электронного экранирования на поведение *S*-фактора в области ультранизких энергий столкновения дейтронов (потенциал электронного экранирования для *dd*-реакции, протекающей в газообразном дейтерии, $U_e = 27$ эВ [8]). Однако эксперименты, выполненные на металлических мишенях, насыщенных дейтерием, показали, что величина потенциала электронного экранирования U_e в этом случае возрастает почти на порядок [23–25] ($U_e = 200$ – 300 эВ и даже 600 эВ), что приводит к значительному росту *S*-фактора с уменьшением энергий дейтронов в области энергий, соответствующих положению пика Гамова. Не исключено, что и для *pd*-реакции возможно такое же проявление эффекта экранирования взаимодействующих протонов с дейтронами в металлических мишенях, насыщенных дейтерием.

В связи с этим целью настоящей работы являлось измерение *S*-фактора для *pd*-реакции, протекающей в дейтериде циркония, в диапазоне энергий протонов 11–19 кэВ. Проведение исследований *pd*-реакции в дейтериде циркония (ZrD_2) позволит также извлечь информацию о возможном усилении процесса протекания данной реакции за счет наличия эффекта электронной экранировки.

Ниже приведены описание созданной экспериментальной установки и результаты исследования *pd*-реакции с использованием твердотельных мишеней из дейтеридов и импульсного ускорителя Холла.

1. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Экспериментальное определение значений астрофизического S -фактора и эффективного сечения pd -реакции в области астрофизических энергий основано на измерении выхода гамма-квантов с энергией 5,5 МэВ из реакции (1) и на использовании параметризации зависимости сечения данной реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами:

$$\sigma(E) = \frac{S_{pd}(E)}{E} \exp\left(-\frac{\beta}{\sqrt{E}}\right). \quad (2)$$

В случае pd -реакции $\beta = 31,29\sqrt{\mu}$, μ — приведенная масса взаимодействующих частиц во входном канале реакции в единицах а. е. м., E — энергия столкновения протонов с дейтронами в с. п. м., $S_{pd}(E)$ — астрофизический S -фактор для pd -реакции. Выражение для полного числа зарегистрированных гамма-квантов N_γ^{tot} на бесконечно толстой мишени может быть записано в виде

$$N_\gamma^{\text{tot}} = N_p \varepsilon_\gamma \int_0^\infty f(E) dE \int_E^\infty \sigma_{pd}(E') n(x) \left(-\frac{dE'}{dx}\right)^{-1} dE', \quad (3)$$

где $\sigma_{pd}(E)$ — сечение pd -реакции; dE'/dx — удельные потери энергии протонов в мишени; $n(x)$ — плотность дейтронов в мишени на глубине x ; $f(E)$ — функция распределения энергии протонов, падающих на мишень, со средним значением E_p ; ε_γ — эффективность регистрации гамма-квантов из pd -реакции; N_p — число протонов, попавших в мишень. Выражение (3) используется для дальнейших преобразований, чтобы определить экспериментальное значение S -фактора. Так, вводя функцию $P(E)$ [18, 26]:

$$P(E) = \frac{e^{-2\pi\eta} D(E) \int_E^\infty n(x(E, E')) f(E') dE'}{\int_0^\infty e^{-2\pi\eta} D(E) dE \int_E^\infty n(x(E, E')) f(E') dE'}$$

где $2\pi\eta(E) = \frac{\beta}{\sqrt{E}}$ и $D(E) = -\frac{1}{E} \frac{dx}{dE}$, $n(x)$ — плотность дейтронов мишени на глубине x , а $E'(E_{\text{cm}}, x)$ — энергия столкновения протона с дейтроном в мишени на глубине x , можно записать среднее значение S -фактора и средней энергии столкновения: $\overline{S_{pd}(E)} = \int_0^\infty S_{pd}(E) P(E) dE$, $E_{\text{col}} = \int_0^\infty E P(E) dE$. При этом $\overline{S_{pd}(E)} \approx S_{pd}(\overline{E}) = S_{pd}(E_{\text{col}})$ [18, 26]. Именно в этом смысле экспериментальные значения S -фактора для pd -реакции определяются через число зарегистрированных гамма-квантов из pd -реакции N_γ^{exp} как [18, 26]

$$S_{pd}(E_{\text{col}}) = \frac{N_\gamma^{\text{exp}}}{N_p \varepsilon_\gamma \int_0^\infty e^{-2\pi\eta} D(E) dE \int_E^\infty n(x(E, E')) f(E') dE'}. \quad (4)$$

В случае сильно подбарьерных энергий, когда функция $P(E)$ представляет собой узкий пик, для вычисления выхода (3) можно воспользоваться методом Лапласа и записать выражение для экспериментального выхода гамма-квантов N_γ^{exp} из данной реакции в простом виде через эффективное сечение реакции $\tilde{\sigma}_{pd}(E_m)$ [26]:

$$N_\gamma^{\text{exp}} = N_p n_t \varepsilon_\gamma \tilde{\sigma}_{pd}(E_m) l_{\text{eff}}(E_m) K(E_m), \quad (5)$$

где эффективный пробег протона в мишени $l_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2\pi}{-\varphi^{(2)}(E_m)}} \frac{dx}{dE}(E_m)$; E_m — значение энергии столкновения протонов с дейтронами мишени в максимуме функции $P(E)$; $\varphi^{(2)}(E_m)$ — вторая производная от $\ln(P(E))$ при E_m . Величина $K(E_m) = \int_{E_m}^{\infty} f(E) dE$ определяет долю первоначального потока протонов, дающую вклад в выход гамма-квантов из pd -реакции. При больших энергиях $K(E_m) \rightarrow 1$.

Как видно из приведенных выражений, для правильной интерпретации полученных данных необходимо иметь однозначную информацию об энергетическом распределении потока протонов, падающих на мишень, о его составе, об эффективности транспортировки пучка протонов от источника ионов до мишени, о вероятности его нейтрализации в процессе транспортировки, о распределении концентрации дейтерия по глубине мишени.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперимент по измерению астрофизических S -факторов для pd -реакции проводился на импульсном плазменном ускорителе Холла [18–22] при энергиях протонного пучка в интервале $E_p = 11\text{--}19$ кэВ. Энергетическое распределение протонов в пучке описывалось функцией Гаусса со средним разбросом $\text{FWHM} = 0,16E_p$. Интенсивность ускоренного потока протонов в импульсе составляла $5 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ при длительности импульса 10 мкс и частоте следования $\sim 5 \cdot 10^{-2}$ Гц.

В качестве мишеней использовался дейтерид циркония. Толщина нанесенного слоя из дейтерида циркония составляла $\sim 1,5\text{--}2$ мкм. Диаметр мишени — 97 мм. Регистрация гамма-квантов с энергией $E_\gamma = 5,5$ МэВ из pd -реакции осуществлялась восьмью детекторами на основе кристаллов NaI(Tl) ($100 \times 100 \times 400$ мм), расположенными вокруг мишени. Количество протонов, провазимодействовавших с мишенью в каждом импульсе ускорителя, определялось интегрированием тока мишени. При этом для подавления эмиссии электронов из мишени перед ней устанавливалась сетка (с прозрачностью 93%), находящаяся на расстоянии 1 см над потенциалом 100 В.

Для измерения распределения дейтронов по глубине мишени применялся метод дейтронов отдачи (ERD-метод) с использованием пучка альфа-частиц с энергией 2,3 МэВ, создаваемого с помощью ускорителя Ван де Граафа [27–29]. Кроме этого, одновременно с регистрацией дейтронов отдачи детектировались альфа-частицы, рассеянные на ядрах мишени в заднюю полусферу (RBS-спектр). Совместный анализ ERD- и RBS-спектров позволяет с высокой точностью определять распределение дейтронов и атомов примесей по глубине мишени. Вакуумирование измерительной камеры ускорителя осуществлялось применением сухого форвакуумного насоса с цеолитовой ловушкой, турбомолекулярного

и криогенного насосов. Уровень рабочего вакуума в измерительной камере составлял $\sim 10^{-7}$ мм рт. ст.

Эффективность регистрации гамма-квантов экспериментальной установкой определялась методом Монте-Карло. При пороге регистрирующей аппаратуры 3 МэВ она составила $E_\gamma = 0,300 \pm 0,006$. Выбор данного энергетического порога был обусловлен необходимостью подавления вклада фона за счет регистрации нейтронов из dd -реакции, протекание которой возможно из-за наличия примеси дейтронов в пучке протонов (примесь дейтерия в водороде составляла $\sim 10^{-4}$).

В течение эксперимента непрерывно проводились измерения фона, обусловленного космическим излучением и естественной радиоактивностью. Для этого в промежутках между рабочими импульсами ускорителя длительностью 10 мкс, в течение которых пучок ускоренных протонов падал на мишень из ZrD_2 , регистрировались события фона в течение такого же промежутка времени. Определенный таким образом уровень фона составлял 12–1,5 % в диапазоне энергии протонов $E_p = 11$ –19 кэВ.

На рис. 1 представлен энергетический спектр гамма-квантов, полученный в одной из экспозиций с мишенью из дейтерида циркония.

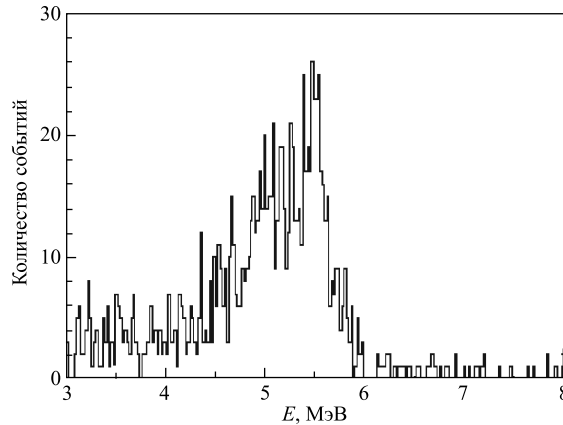


Рис. 1. Суммарное энергетическое распределение событий, зарегистрированных восьмью детекторами $\text{NaI}(\text{Tl})$ в экспозиции с мишенью из ZrD_2 при энергии протонов 19 кэВ

Калибровка спектрометрических каналов восьми гамма-детекторов осуществлялась с помощью стандартных источников гамма-квантов — ^{60}Co , ^{137}Cs , Pu-Be . Энергетическое разрешение, измеренное с помощью источника ^{60}Co и усредненное по всем восьми детекторам, составило 4,3 % на линии пика полного поглощения с энергией 2,5 МэВ.

3. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Эксперимент включал в себя экспозиции на пучке ускоренных протонов с мишенью из дейтерида циркония. Были выполнены измерения S -фактора для pd -реакции, протекающей в дейтериде циркония, в диапазоне энергий протонов $E_p = 11$ –19 кэВ. В табл. 2

Таблица 2. Экспериментальные данные (для мишени ZrD_2)

E_p , кэВ	E_{col} , кэВ	N_p , 10^{16}	E_m , кэВ	S_{pd} , эВ · б (настоящая работа)	S_0 , эВ · б [16]	S'_0 , эВ · б · кэВ ⁻¹ [16]	$\sigma_{pd}(E_m)$, 10^{-9} б
11	6,306	192,2	6,808	$0,246 \pm 0,020$			$1,85 \pm 0,21$
13	7,351	68,68	8,005	$0,255 \pm 0,020$			$4,07 \pm 0,41$
15	8,383	77,2	9,196	$0,265 \pm 0,018$	$0,192 \pm 0,048$	$0,0087 \pm 0,0055$	$6,27 \pm 0,44$
17	9,403	51,1	10,383	$0,275 \pm 0,018$			$9,08 \pm 0,53$
19	10,413	32,3	11,570	$0,281 \pm 0,016$			$13,1 \pm 0,93$

приведены основные данные, полученные при проведении pd -эксперимента. Значения астрофизического S -фактора определялись по формуле (4).

Значения $\sigma_{pd}(E_m)$ определялись из уравнения (5) с использованием экспериментально измеренных выходов гамма-квантов из pd -реакции и вычисленных значений эффективной длины пробега протона в мишени $l_{eff}(E_m)$ и величины $K(E_m)$.

На рис. 2 приведена измеренная с использованием мишени из дейтерида циркония зависимость астрофизического S -фактора для pd -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами в интервале 6,3–10,4 кэВ. На этом же рисунке представлены аналогичные зависимости, измеренные в работах [15] и [16].

Как видно из рис. 2, полученные нами значения астрофизического S -фактора находятся в хорошем согласии с результатами работы [16], выполненной в газообразном дейтерии, и превышают результаты [15], полученные с использованием мишени из тяжелой воды (D_2O). Причина такого расхождения с результатами [15] остается не ясной.

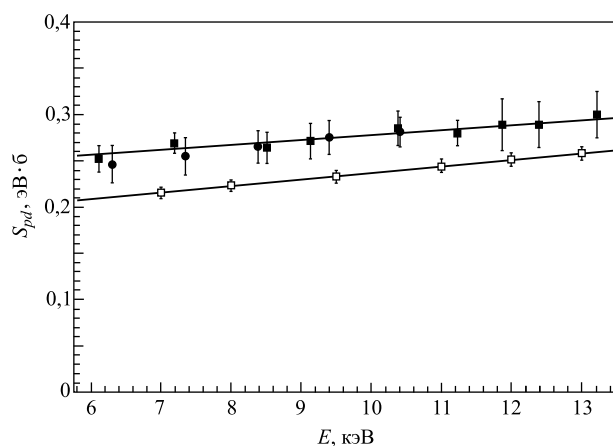


Рис. 2. Зависимости астрофизического S -фактора для pd -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами: темные кружки — настоящая работа; темные квадраты — [16] (опыт с газовой дейтериевой мишенью); светлые квадраты — [15] (опыт с мишенью из замороженной тяжелой воды). Сплошные линии — результат фитирования данных работ [15] и [16]

Наличие растущей линейной зависимости астрофизического S -фактора от энергии столкновения протонов с дейтронами, измеренной в работах [15, 16], подтверждается в пределах ошибок измерения данными настоящей работы. Следует отметить, что статистические ошибки найденных значений величины $S_{pd}(E)$ и ограниченный интервал измерения данной величины по энергии столкновения протонов с дейтронами не позволяют с высокой точностью определить параметры линейной функциональной зависимости $S_{pd}(E) = S_0 + S'_0 E$. Тем не менее результаты выполненного впервые эксперимента по измерению значений астрофизического S -фактора для pd -реакции, протекающей в мишени из дейтерида циркония, в пределах ошибок измерения не отличаются от значений соответствующей величины, измеренных в газообразном дейтерии [16]. Это свидетельствует о том, что эффект усиления pd -реакции за счет эффекта электронной экранировки, если он и существует, не проявляется на наблюдаемом уровне в дейтериде циркония. Из этого следует, что влияние данного эффекта на интенсивность протекания pd -реакции в дейтериде циркония существенно меньше, чем для dd -реакции. Данный вывод подтверждает результаты теоретических оценок.

Для определения абсолютных значений S -фактора для pd -реакции, протекающей в металлах, насыщенных дейтерием, а также параметров S_0 и S'_0 с лучшей точностью необходимо проведение pd -экспериментов в широком интервале энергий столкновения протонов с дейтронами при более высоких интенсивностях протонов пучка.

На рис. 3 приведена зависимость эффективного сечения pd -реакции $\sigma_{pd}(E_m)$ от энергии столкновения протонов с дейтронами E_m .

На этом же рисунке приведена расчетная по уравнению (2) зависимость сечения pd -реакции от энергии, полученная с использованием соответствующих значений астрофизического S -фактора, найденных в настоящей работе. Как видно, расчетная зависимость сечения pd -реакции хорошо согласуется с зависимостью экспериментально изме-

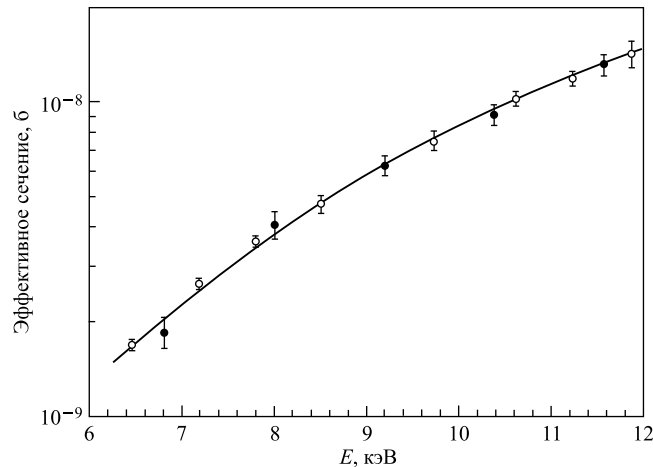


Рис. 3. Зависимость эффективного сечения pd -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами: темные кружки — результаты настоящей работы, полученные с использованием формулы (5); кривая — расчетные значения сечения pd -реакции, вычисленные по формуле (2) с использованием значений астрофизического S -фактора, найденных в настоящей работе; светлые кружки — значения эффективных сечений pd -реакции, измеренные в [16]

ренного эффективного сечения pd -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами, полученной с использованием измеренных выходов гамма-квантов из уравнения (5). Кроме этого, на рис. 3 отображены экспериментальные значения эффективного сечения pd -реакции, измеренные с газообразной дейтериевой мишенью [16].

Хорошее согласие между результатами настоящей работы и работы [16] в плане извлечения информации о величине эффективного сечения pd -реакции свидетельствует о корректности аналитического подхода определения значений величины $\sigma_{pd}(E_m)$, рассмотренного нами в [26].

Авторы выражают благодарность И. А. Чепурченко за обеспечение бесперебойной работы ускорителя Ван де Граафа и Е. И. Андрееву за помощь в оформлении рукописи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-02-00086-а), гранта полномочного представителя Правительства Польши в ОИЯИ, частично при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2.1704.2011 государственного задания НИР «Наука») и частично гранта № 2023/ГФЗ МОН РК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меркурьев С. П., Фадеев Л. Д. Квантовая теория рассеяния для систем нескольких частиц. М.: Наука, 1985.
2. Paetz gen Schieck. Experiments on Four-Nucleon Reactions // *Few Body Systems*. 1988. V. 5. P. 171.
3. Харченко В. Ф. и др. Эффекты кулоновского взаимодействия в процессах протон-дейтронного рассеяния и рационального захвата при нулевой энергии // *ЯФ*. 1992. Т. 55. С. 86.
4. Chulick H. G. S. et al. Extended Parameterization of Nuclear-Reaction Cross Section for Few-Nucleon Nuclei // *Nucl. Phys. A*. 1993. V. 551. P. 255.
5. Torre J., Goulard B. Mesonic Exchange Currents and Radiative Thermal Neutron Capture by the Deuteron // *Phys. Rev. C*. 1983. V. 28. P. 529.
6. Friar J. L. et al. Nuclear Transition Rates in μ -Catalyzed p - d Fusion // *Phys. Rev. Lett.* 1991. V. 66. P. 1827.
7. Friar J. L. et al. Thermal n - d Radiative Capture // *Phys. Lett. B*. 1990. V. 251. P. 11.
8. Assenbaum H. J. et al. Effects of Electron Screening on Low-Energy Fusion Cross Sections // *Z. Phys. A*. 1987. V. 327. P. 461.
9. Bachall J. N., Pinsonneault M. H. Standard Solar Models, with and without Helium Diffusion, and the Solar Neutrino Problem // *Rev. Mod. Phys.* 1992. V. 64. P. 885.
10. Belyaev V. B. et al. New Proposals for the Investigation of Strong Interaction of Light Nuclei at Super Low Energies // *Nucleonika*. 1995. V. 40. P. 85.
11. Fowler W. A. Experimental and Theoretical Nuclear Astrophysics: the Quest for the Origin of the Elements // *Rev. Mod. Phys.* 1984. V. 56. P. 149.
12. Rolfs C., Rodney W. S. *Cauldrons in the Cosmos*. Chicago: Univ. of Chicago Press, 1988.
13. Stahler S. W. Deuterium and the Stellar Birthline // *Astrophys. J.* 1988. V. 322. P. 804.
14. Griffiths G. M. et al. The Reaction $D(p, \gamma)^3\text{He}$ below 50 keV // *Can. J. Phys.* 1963. V. 41. P. 724.
15. Schmid G. J. et al. The $^2\text{H}(p, \gamma)^3\text{He}$ and $^1\text{H}(d, \gamma)^3\text{He}$ Reactions below 80 keV // *Phys. Rev. C*. 1997. V. 56. P. 2565.

16. Casella C. *et al.* First Measurement of the $d(p, \gamma)^3\text{He}$ Cross Section Down to the Solar Gamov Peak // Nucl. Phys. A. 2002. V. 706. P. 203.
17. Viviani M. *et al.* Theoretical Study of the Radiative Capture Reactions $^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$ and $^2\text{H}(d, \gamma)^3\text{He}$ at Low Energies // Phys. Rev. C. 1996. V. 54. P. 534.
18. Bystritsky V. M. *et al.* Study of the pd -Reaction in the Astrophysical Energy Region Using the Hall Accelerator // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 595. P. 543–548.
19. Bystritsky V. M. *et al.* Study of the $d(d, n)^3\text{He}$ Reaction in the Astrophysical Energy Region with the Use of the Hall Accelerator // Eur. Phys. J. A. 2008. V. 36. P. 151.
20. Bystritsky V. M. *et al.* Measurement of Astrophysical S -Factors and Electron Screening Potentials for $d(d, n)^3\text{He}$ Reaction in ZrD_2 , TiD_2 , D_2O and CD_2 Targets in the Ultralow Energy Region Using Plasma Accelerators // Phys. At. Nucl. 2012. V. 75. P. 53–62.
21. Bystritsky V. M. *et al.* Investigation of Temperature Dependence of Neutron Yield and Electron Screening Potential for the $d(d, n)^3\text{He}$ Reaction Proceeding in Deuterides ZrD_2 and TiD_2 // Phys. At. Nucl. 2012. V. 75. P. 913–922.
22. Bystritsky V. M. *et al.* Measurement of Astrophysical S -Factor and Electron Screening Potentials for $d(d, n)^3\text{He}$ Reaction in ZrD_2 , TiD_2 and $\text{TaD}_{0.5}$ Targets in the Ultralow Energy Region Using Plasma Accelerators // Nucl. Phys. A. 2012. V. 889. P. 93–104.
23. Raiola F. *et al.* Enhanced $d(d, p)t$ Fusion Reaction in Metals // Eur. Phys. J. A. 2006. V. 27. P. 79, and ref. therein.
24. Huke A. *et al.* Enhancement of Deuteron-Fusion Reactions in Metals and Experimental Implications // Phys. Rev. C. 2008. V. 78. P. 015803.
25. Greife U. *et al.* Oppenheimer–Phillips Effect and Electron Screening in $d + d$ Fusion Reactions // Z. Phys. A. 1995. V. 351. P. 107.
26. Bystritsky V. M., Pen'kov F. M. Analytical Estimates of the Nuclear Reaction Yields in the Ultralow Energy Range // Phys. At. Nuclei. 2003. V. 66. P. 76–81.
27. Kobzev A. P. *et al.* Investigation of Light Element Contents in Subsurface Layers of Silicon // Vacuum. 2009. V. 83. P. S124–S126.
28. Chu Wei-Kan, Mayer J. W., Nicolet M. A. Backscattering Spectrometry. N. Y.; San Francisco; London: Acad. Press, 1978.
29. Yagi H. *et al.* Elastic Recoil Detection Analysis for Hydrogen near the Surface of Chemical-Vapor-Deposited Diamond // Japan J. Appl. Phys. 1995. V. L577. P. 34.
30. Practical Surface Analysis by Auger and X-Ray Photoelectron Spectroscopy / Eds.: D. Briggs, M. P. Seah. N. Y.: Wiley, 1983.

Получено 25 апреля 2013 г.