

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ
ЭФФЕКТА ЭЛЕКТРОННОЙ ЭКРАНИРОВКИ
ДЛЯ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ $D(p, \gamma)^3\text{He}$
В ДЕЙТЕРИДЕ ТИТАНА TiD**

*В. М. Быстрицкий^а, Вит. М. Быстрицкий^б,
Г. Н. Дудкин^в, М. Филипович^г, Ш. Гажи^д, Й. Гуран^д,
Б. А. Нечаев^в, В. Н. Падалко^в, С. С. Паржицкий^а,
Ф. М. Пеньков^е, А. В. Филиппов^а, Ю. Ж. Тулеушев^е*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Калифорнийский университет, Калифорния, США

^в Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

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

^д Электротехнический институт, САН, Братислава

^е Институт ядерной физики, Алма-Ата, Казахстан

Работа посвящена исследованию характеристик pd -реакции ($p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ (5,5 МэВ)), протекающей в дейтериде титана в области астрофизических энергий столкновения протонов с дейтронами от 5,3 до 10,5 кэВ. Эксперименты выполнялись на импульсном плазменном ускорителе Холла НИТПУ (Томск, Россия). Число ускоренных протонов в импульсе длительностью 10 мкс составляло $5 \cdot 10^{14}$ при частоте следования $7 \cdot 10^{-2}$ Гц. Регистрация γ -квантов с энергией 5,5 МэВ осуществлялась с помощью восьми детекторов на основе кристаллов NaI(Tl) ($100 \times 100 \times 400$ мм), расположенных вокруг мишени из TiD. Впервые измерены зависимость астрофизического S -фактора для pd -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами, потенциал электронной экранировки взаимодействующих протонов с дейтронами в дейтериде титана.

The article is devoted to the study of the characteristics of pd -reaction ($p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ (5.5 MeV)) undergoing in titanium deuteride in the astrophysical collision energy region of protons and deuterons from 5.3 to 10.5 keV. The experiments have been performed using a pulsed plasma accelerator Hall NRTPU (Tomsk, Russia). Number of accelerated protons in the pulse of 10 μs duration was $5 \cdot 10^{14}$ at a repetition rate $7 \cdot 10^{-2}$ Hz. Detection of the gamma rays with energy 5.5 MeV was carried out using eight detectors based on crystals of NaI(Tl) ($100 \times 100 \times 400$ mm) placed around the TiD target. The dependence of the pd -reaction astrophysical S -factor from proton–deuteron collision energy, and the potential electronic screening of the interacting protons and deuterons in titanium deuteride have been measured for the first time.

PACS: 95.30.Cq; 25.45.De; 29.20.Ba

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время возрос интерес к изучению механизмов протекания реакций между легкими ядрами (pd , dd) в металлах, насыщенных изотопами водорода, в области ультранизких энергий столкновения частиц во входных каналах указанных реакций [1–11].

Результаты изучения реакций



на протяжении последнего десятилетия [1–11] свидетельствуют о существовании эффекта усиления реакции dd -синтеза в дейтеридах металлов за счет наличия электронного экранирования взаимодействующих дейтронов. Для проверки существования данного эффекта нами были проведены эксперименты на пучке ускоренных дейтронов импульсного ускорителя Холла с использованием мишеней из дейтеридов титана, циркония и тантала [8–11].

В результате выполнения данных экспериментов определены потенциалы электронного экранирования взаимодействующих дейтронов в дейтеридах различных металлов, а также измерены зависимости астрофизических S -факторов для dd -реакции от энергии столкновения дейтронов.

Аналогичные исследования необходимо выполнить для изучения эффекта усиления pd -реакции



протекающей в металлических мишенях, насыщенных дейтерием (реакция (2a)) или водородом (реакция (26)).

Следует отметить, что к настоящему времени в литературе отсутствует как экспериментальная, так и теоретическая информация о pd -реакции, протекающей в дейтеридах (гидридах) металлов в области ультранизких энергий столкновения протонов с дейтронами. Имеется лишь весьма ограниченное число публикаций, посвященных изучению pd -реакции с использованием мишеней из газообразного дейтерия [12], тяжелой воды D_2O [13–15] и дейтерированного полиэтилена [16–18].

Необходимость исследований pd -реакции в металлах, насыщенных дейтерием (водородом), основана на примере изучения механизмов протекания dd -реакции в некоторых металлах, насыщенных дейтерием. Эксперименты, выполненные с использованием мишеней из дейтеридов данных металлов, свидетельствуют о том, что потенциал электронного экранирования для dd -реакции возрастает на порядок по сравнению со случаем использования мишеней из газообразного дейтерия [18], что, в свою очередь, приводит к значительному росту астрофизического S -фактора в области энергий, соответствующих положению пика Гамова. Не исключено, что и для pd -реакции возможно такое же проявление эффекта электронного экранирования взаимодействия протонов с дейтронами.

В связи с этим нами впервые был выполнен эксперимент по изучению pd -реакции (реакция (2a)) в интервале энергий протонов в лабораторной системе 9–11 кэВ с использованием мишени из дейтерида циркония [19, 20]. Найденные значения S -фактора находятся в хорошем согласии с результатом работы [12], выполненной в газообразном дейтерии, превышающим результат [14], полученный с мишенью из тяжелой воды D_2O .

Результаты наших работ [19, 20] подтверждают в пределах ошибок измерения наличие растущей зависимости астрофизического S -фактора от энергии столкновения протонов с дейтронами, измеренной в работе [12]. Это свидетельствует о том, что если эффект электронной экранировки и существует, то, из-за своей малости, он не проявляется на экспериментально наблюдаемом уровне в дейтериде циркония. Из этого следует, что влияние эффекта электронного экранирования на интенсивность протекания pd -реакции в дейтериде циркония существенно меньше, чем для dd -реакции.

Целью настоящей работы являлось измерение зависимости астрофизического S -фактора для pd -реакции (2а) от энергии столкновения протонов с дейтронами в интервале энергий 5,3–10,5 кэВ с использованием мишени из дейтерида титана TiD. Выполнение данного эксперимента позволит также определить вклад эффекта электронной экранировки в величину S -фактора, если величина данного вклада превышает ошибку измерения астрофизического S -фактора.

1. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Экспериментальное определение значений астрофизического S -фактора и фактора усиления pd -реакции в области ультранизких энергий столкновения основано на измерении выхода γ -квантов с энергией 5,5 МэВ из реакций (2а) и (2б) и на использовании параметрической зависимости сечения данной реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами [9, 10, 15, 19, 20]:

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

$$\sigma_{pd}^{\text{scf}}(E) = \sigma_{pd}^b(E + U_e) = \sigma_{pd}^b(E) f_{pd}(E, U_e), \quad (4)$$

$$\sigma_{pd}^b(E) = \frac{S_{pd}^b(E)}{E} \exp(-2\pi\eta), \quad 2\pi\eta = 31,29 \sqrt{\frac{\mu}{E}}, \quad (5)$$

$$S_{pd}^{\text{scf}}(E) = S_{pd}^b(E) f_{pd} \text{ (согласно (5))}, \quad (6)$$

где μ — приведенная масса взаимодействующих протона и дейтрона; N_{γ}^{exp} — число зарегистрированных γ -квантов из pd -реакции; $N_{p(d)}$ — число протонов (дейтронов), попавших в мишень; E — энергия столкновения протонов с дейтронами в системе центра масс; ε_{γ} — эффективность регистрации γ -квантов из реакций (2а) и (2б); $n(x)$ — плотность дейтронов (протонов) в мишени; dE/dx — удельные потери энергии протонов (дейтронов) в мишени; $f(E)$ — функция распределения протонов (дейтронов), падающих на мишень; $S_{pd}(E)$ — астрофизический S -фактор для pd -реакции при энергии столкновения E ; η — параметр Зоммерфельда; $\sigma_{pd}^b(E)$, $S_{pd}^b(E)$ — сечение и астрофизический S -фактор для pd -реакции при взаимодействии «голых» протонов с дейтронами соответственно; $\sigma_{pd}^{\text{scf}}(E)$ — сечение pd -реакции при наличии электронной экранировки; U_e — потенциал электронной экранировки для pd -реакции; f_{pd} — фактор усиления pd -реакции за счет электронной экранировки взаимодействующих протонов с дейтронами.

Уравнение (3) получено с учетом энергетического разброса протонов (дейтронов), падающих на дейтериевую (водородную) мишень, а также кулоновских потерь энергии протонов (дейтронов) в результате взаимодействия их с атомами (молекулами) мишени.

Выражение для фактора усиления pd -реакции f_{pd} имеет вид

$$f_{pd} = \frac{E}{E + U_e} \exp(-2\pi\eta(E + U_e) + 2\pi\eta(E)). \quad (7)$$

При $U_e \ll E$ фактор усиления имеет более простой вид

$$f_{pd} \sim \exp(\pi\eta(E)U_e/E). \quad (8)$$

Значение потенциала электронного экранирования U_e определяется путем аппроксимации экспериментально измеренной зависимости выхода γ -квантов N_γ^{exp} из реакции (2а) от энергии столкновения протонов с дейтронами выражением

$$N_\gamma^{\text{exp}} = N_{p(d)}\varepsilon_\gamma \int_0^\infty f(E) dE \int_0^E \frac{S_{pd}^b(E')}{(E' + U_e)} \exp(-2\pi\eta(E' + U_e)) n(x) \left(-\frac{dE'}{dx}\right)^{-1} dE'. \quad (9)$$

Таким образом, аппроксимация экспериментально измеренной зависимости N_γ^{exp} выражением (9) с использованием в нем в качестве зависимости $S_{pd}^b(E)$ зависимости $S_{pd}(E)$, найденной в работе [12], позволяет однозначно извлечь информацию о величине потенциала электронной экранировки pd -реакции U_e , протекающей в дейтериде металла, насыщенном дейтерием.

Экспериментальное значение фактора усиления $f_{pd}^{\text{exp}}(E)$ определяется как

$$f_{pd}^{\text{exp}}(E) = N_\gamma^{\text{exp}}(E)/N_\gamma^{\text{calc}}(E, U_e = 0), \quad (10)$$

где $N_\gamma^{\text{calc}}(E, U_e = 0)$ — расчетный выход γ -квантов из реакции (2а), полученный согласно формуле (3) в предположении, что $U_e = 0$.

Определение экспериментальных значений астрофизического S -фактора $S_{pd}^{\text{scr}}(E)$ для pd -реакции, протекающей в дейтериде титана в указанном выше интервале энергий столкновения протонов с дейтронами, производилось согласно уравнению (6), в которое вместо значений $S_{pd}^b(E)$ подставлялись значения астрофизического S -фактора, найденные в работе [12].

Определенные таким образом значения астрофизического S -фактора для pd -реакции соответствуют средним значениям энергии столкновения протонов с дейтронами E_{col} в дейтериде титана:

$$E_{\text{col}} = \int_0^\infty EP(E) dE, \quad (11)$$

$$P(E) = \frac{e^{-2\pi\eta(E+U_e)} D(E) \int_E^\infty n(x(E, E')) f(E') dE'}{\int_0^\infty e^{-2\pi\eta(E+U_e)} D(E) dE \int_E^\infty n(x(E, E')) f(E') dE'}, \quad (12)$$

$$D(E) = -\frac{1}{E} \frac{dx}{dE}, \quad (13)$$

где $n(x(E, E'))$ — плотность дейтронов мишени на глубине x , имеющих энергию E при начальной энергии столкновения во входном канале E' ; $P(E)$ — функция распределения вероятности столкновения протонов с дейтронами по энергии с образованием γ -квантов из реакции (2a); E_{col} — энергия столкновения протонов с дейтронами, усредненная по функции распределения $P(E)$.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперимент по измерению астрофизического S -фактора, потенциала электронного экранирования и эффективного сечения pd -реакции, протекающей в дейтериде титана TiD, выполнялся на импульсном плазменном ускорителе Холла при энергиях ускоренных протонов в интервале 9–19 кэВ. На рис. 1 приведена схема экспериментальной уста-

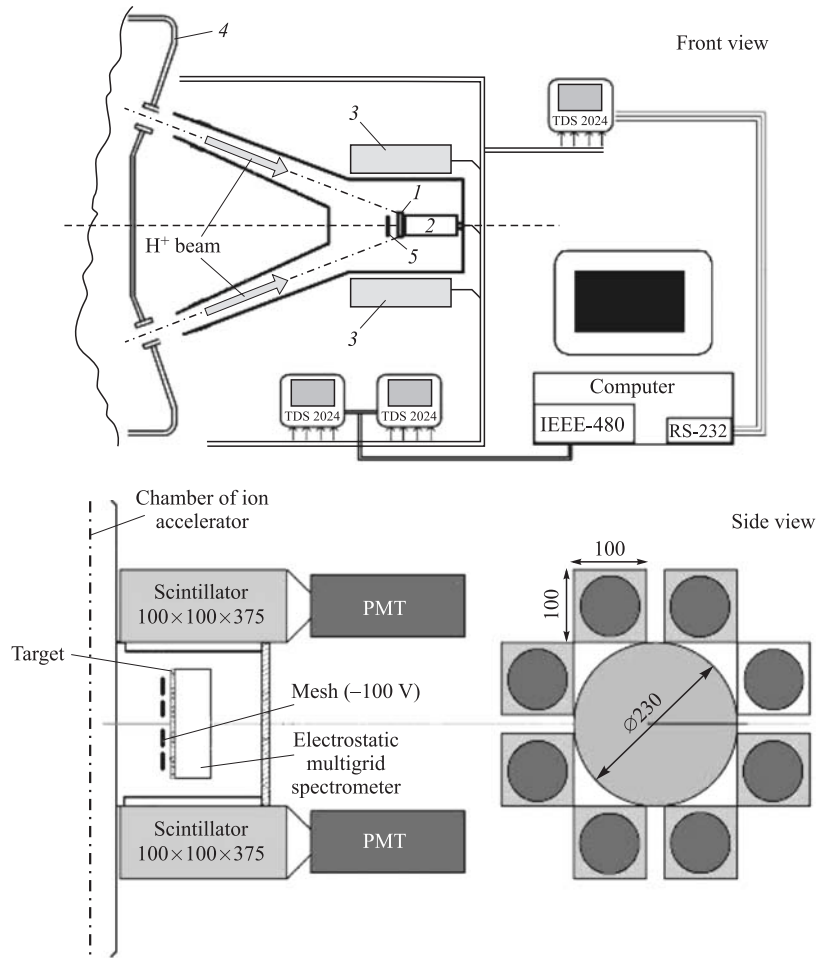


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — твердотельная мишень из TiD; 2 — многосеточный анализатор энергии; 3 — детекторы γ -квантов на основе кристаллов NaI(Tl); 4 — корпус плазменного ускорителя Холла; 5 — сетка

новки, описанная в работах [8–10, 15, 19–21]. Число ускоренных протонов в импульсе, падающих на мишень из дейтерида титана, составляло $5 \cdot 10^{14}$.

Длительность импульса составляла 10 мкс. Частота следования импульсов $7 \cdot 10^{-2}$ Гц. Энергетический разброс пучка протонов в интервале 9–19 кэВ в среднем составлял $\text{FWHM} \approx 16\%$. Измерение энергетического распределения протонов, падающих на мишень, осуществлялось с помощью многосеточного электростатического спектрометра заряженных частиц (установленного за мишенью вдоль направления падающего пучка протонов), а измерение пространственного распределения — с помощью линейки цилиндров Фарадея, установленных по радиусу мишени. Кроме этого, для правильной интерпретации экспериментальных данных в специальных опытах с использованием методики по времени пролета [22–24] измерялся ряд параметров потока ионов, падающего на мишень: эффективность транспортировки потока ускоренных протонов в диапазоне углов $0–20^\circ$ от ионного источника до места расположения мишени на базе 300 мм и состав пучка. Примесь молекулярных ионов водорода в пучке ускоренных протонов не превышает 10 %, а доля нейтралов, образующихся в результате процесса перезарядки ионов водорода на остаточном газе в измерительной камере ускорителя при транспортировке мишени, составляет 1–2 % в зависимости от условий проведения эксперимента (начального композиционного состава ионов пучка источника Холла, парциального давления остаточного газа в измерительной камере ускорителя, в которой установлена мишень из TiD).

Нанесение слоя дейтерида титана на подложку из нержавеющей стали осуществлялось методом магнетронного распыления. Толщина нанесенного слоя из дейтерида титана составляла 1,5–2 мкм, диаметр мишени — 97 мм. Измерение распределения плотности дейтронов по глубине мишени производилось методом ERD (метод ядер отдачи) с использованием пучка α -частиц с энергией 2,3 МэВ, создаваемого с помощью ускорителя Ван де Графа [25–27]. Одновременно с регистрацией дейтронов отдачи детектировались α -частицы, рассеянные на ядрах мишени в заднюю полусферу (RBS-метод). Совместный анализ ERD- и RBS-спектров позволяет с высокой точностью определять распределение дейтронов по глубине мишени.

Кроме этого, с помощью оже-спектрометра [28] и кварцевых весов [29] определялись состав и толщина «паразитной» пленки, образующейся на поверхности мишени из дейтерида титана за счет остаточного газа в измерительной камере ускорителя.

Вакуумирование измерительной камеры ускорителя осуществлялось с использованием турбомолекулярного и криогенного насосов. Уровень рабочего вакуума в измерительной камере составлял $< 10^{-7}$ мм рт. ст. Регистрация γ -квантов с энергией 5,5 МэВ из реакции (2а) осуществлялась восемью сцинтилляционными спектрометрами на основе кристаллов NaI(Tl) ($100 \times 100 \times 400$ мм), расположенными вокруг мишени. Эффективность регистрации γ -квантов из реакции (2а) определялась методом Монте-Карло. При энергетическом пороге регистрирующей аппаратуры 3 МэВ она составляла $\varepsilon_\gamma = 0,300 \pm 0,006$. Выбор данного порога был обусловлен необходимостью подавления вклада фона за счет регистрации нейтронов из реакции dd -синтеза ($d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$ (2,5 МэВ), протекание которой реально за счет наличия примеси дейтерия в пучке протонов (относительная концентрация дейтерия в водороде составляет $\sim 10^{-4}$, а сечение dd -реакции в исследуемой области энергий на 3–4 порядка больше, чем сечение pd -реакции). В течение экспериментов 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 про-

тонов падал на мишень из TiD, регистрировались фоновые события в течение такого же промежутка времени. Определенный таким образом уровень фона составлял 15–1,5 % в интервале энергий протонов, падающих на мишень, 9–19 кэВ. Энергетическое разрешение, усредненное по всем восьми γ -детекторам, измеренное на линии пика полного поглощения 2,5 МэВ источника ^{60}Co , составило 4,3 %.

3. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Эксперимент включал в себя ряд экспозиций на пучке протонов с энергией от 9 до 19 кэВ. В табл. 1 приведены основные характеристики, отражающие условия проведения эксперимента по исследованию pd -реакции, протекающей в области ультранизких энергий в мишени из дейтерида титана.

Таблица 1. Экспериментальные условия

Мишень	E_p , кэВ	E_{cm} , кэВ	N_p , 10^{16}	FWHME, %
TiD	9	6,00	472,4	16
	11	7,33	200,9	
	13	8,66	100,5	
	15	10,00	139,7	
	17	11,33	90,8	
	19	12,66	66,6	

Примечание. N_p — число протонов, попавших в мишень;
 E_p — энергия протонного пучка в л. с.; E_{cm} — энергия столкновения протонов с дейтронами в с. ц. м.

В результате анализа экспериментальных данных получен набор значений параметров pd -реакции (2а), приведенный в табл. 2.

Значения потенциала электронного экранирования U_e получены как результат фитирования выражением (9) экспериментально измеренного выхода γ -квантов из реакции (2а) как функции от энергии столкновения протонов с дейтронами. При этом в выражение (9) в качестве зависимости $S_{pd}^b(E)$ подставлялась зависимость $S_{pd}(E)$, полученная в работе [12]. Таким образом, в качестве решения было найдено значение варьируемого параметра U_e , которое приведено в табл. 2.

Таблица 2. Результаты анализа экспериментальных данных (E_{col} — средняя энергия столкновения протонов с дейтронами в дейтериде титана)

E_p , кэВ	E_{col} , кэВ	$S_{pd}^{scr}(E_{col})$, эВ · б	U_e , эВ	$f_{pd}^{exp}(E_{col})$
9	5,28	$0,30 \pm 0,04$	242 ± 64	$1,23 \pm 0,14$
11	6,35	$0,29 \pm 0,03$		$1,19 \pm 0,11$
13	7,41	$0,29 \pm 0,03$		$1,10 \pm 0,10$
15	8,45	$0,29 \pm 0,02$		$1,14 \pm 0,06$
17	9,48	$0,29 \pm 0,02$		$1,09 \pm 0,06$
19	10,49	$0,30 \pm 0,02$		$1,07 \pm 0,05$

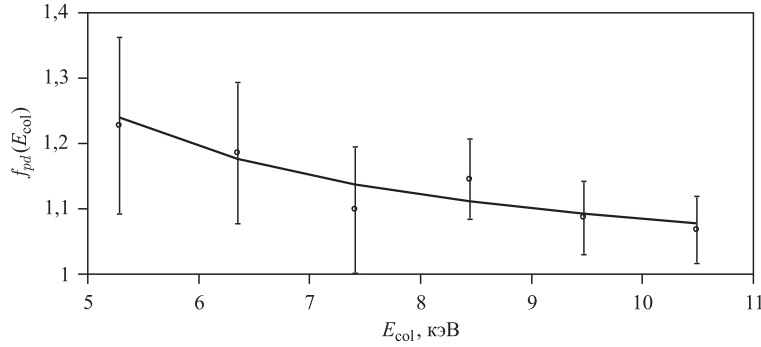


Рис. 2. Зависимость фактора усиления pd -реакции f_{pd}^{exp} от средней энергии столкновения протонов с дейтронами E_{col} . Сплошная линия — результат аппроксимации измеренной зависимости $f_{pd}^{exp}(E_{col})$ выражением (14)

На рис.2 приведены значения измеренного фактора усиления pd -реакции f_{pd}^{exp} от средней энергии столкновения протонов с дейтронами E_{col} в интервале энергий протонов 9–19 кэВ, которые вычислялись по формуле (10).

На этом же рисунке сплошной линией отражен результат аппроксимации измеренной зависимости $f_{pd}^{exp}(E)$ функцией вида

$$f_{pd}^{theor}(E) = N_{\gamma}^{fit}(E)/N_{\gamma}^{calc}(E, U_e = 0), \quad (14)$$

где $N_{\gamma}^{fit}(E)$ — функция, описывающая измеренную зависимость экспериментального выхода γ -квантов из реакции (2а) от энергии столкновения протонов с дейтронами E_{col} .

Как видно из рис.2, экспериментально найденные значения фактора усиления pd -реакции хорошо согласуются с соответствующими расчетными значениями данной величины, вычисленными по формуле (14). Данный факт свидетельствует о проявлении на наблюдаемом уровне эффекта усиления pd -реакции за счет электронной экранировки взаимодействующих протонов с дейтронами в дейтериде титана в области ультранизких энергий столкновения E_{col} от 5,3 до 10,5 кэВ.

На рис.3 приведена зависимость астрофизического S -фактора $S_{pd}^{scr}(E_{col})$ для pd -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами, полученная в интервале энергий E_{col} от 5,3 до 10,5 кэВ с использованием мишени из дейтерида титана TiD. Экспериментальные значения астрофизического S -фактора для pd -реакции в указанном диапазоне энергий столкновения протонов с дейтронами получены согласно формуле (6). Ошибки найденных экспериментальных значений $S_{pd}^{scr}(E_{col})$ определялись как результат суперпозиции ошибок измерения выхода γ -квантов из реакции (2а), числа и энергетического распределения протонов, попавших в мишень, распределения концентрации дейтерия по глубине мишени вдоль направления пучка ускоренных протонов, падающих на нее, а также ошибок, связанных с вычислением эффективности регистрации γ -квантов и величины удельных ионизационных потерь энергии протонов в дейтериде титана в области ультранизких энергий столкновения.

Найденные нами значения потенциалов электронной экранирования U_e для pd -реакции в дейтериде титана заметно превышают соответствующие величины для dd -реакции, протекающей в аналогичной мишени и в такой же области энергий столкновения дейтронов [3, 8–11]. Это совсем неожиданный результат, так как, согласно теоретическим

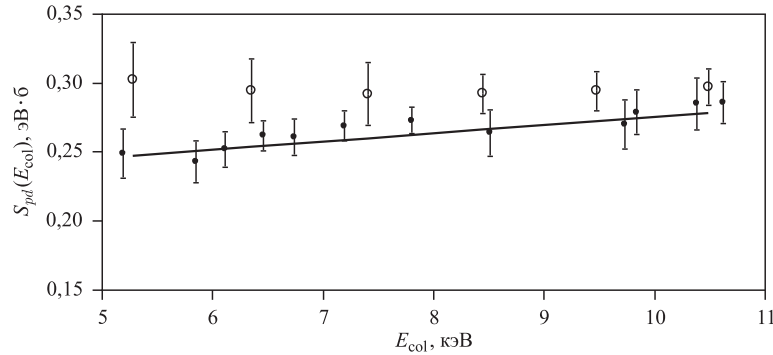


Рис. 3. Зависимость астрофизического S -фактора $S_{pd}^{scr}(E_{col})$ для pd -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами E_{col} . Светлые кружки — результат настоящей работы; темные кружки — результат работы [12]; сплошная линия — результат аппроксимации данных работы [12] линейной зависимостью: $S_{pd}(E_{col}) = 0,216 + 0,0059 E_{col}$

оценкам, проявление эффекта электронного экранирования в указанной области энергий столкновения протонов с дейтронами на экспериментально обнаруживаемом уровне практически исключено. Природа столь значимого по величине эффекта электронного экранирования для pd -реакции, протекающей в дейтериде титана, остается пока непонятной. Непонятно и то, что потенциал электронного экранирования для pd -реакции более чем в два раза превышает аналогичную величину для dd -реакции, протекающей в той же области астрофизических энергий с использованием мишени из одного и того же материала. Что касается результатов измерения зависимости астрофизического S -фактора для pd -реакции от энергии столкновения частиц во входном канале, то здесь необходимо отметить одно важное обстоятельство, связанное с характером данной зависимости. Наблюдаемое в некоторой степени постоянство зависимости $S_{pd}^{scr}(E_{col})$ в исследуемом интервале энергий столкновения протонов с дейтронами обусловлено, на наш взгляд, компенсацией падения S -фактора с уменьшением энергии столкновения за счет наличия эффекта электронной экранировки для pd -взаимодействия. Следует отметить еще один результат, который также к настоящему времени не имеет объяснения: экспериментально обнаружен эффект усиления pd -реакции в области ультранизких энергий столкновения при протекании ее в мишени из дейтерида титана и отсутствие его при проведении опытов с дейтеридом ZrD [19, 20].

Для получения ответов на существующие вопросы необходимо выполнить более прецизионные эксперименты по изучению pd -реакции в более широком интервале энергий столкновения протонов с дейтронами с использованием мишеней из дейтеридов металлов, относящихся к различным периодам и группам периодической системы химических элементов.

Исходя из анализа всей совокупности полученных нами экспериментальных данных по исследованию pd -реакции в области ультранизких энергий можно утверждать, что

- впервые на достоверном уровне экспериментально обнаружено явление электронного экранирования для pd -реакции, протекающей в дейтериде титана;
- отсутствует эффект электронного экранирования для pd -реакции, протекающей в дейтериде циркония, тяжелой воде D_2O и в дейтерированном полиэтилене.

Для прояснения природы существующего различия между механизмами протекания pd -реакции в различных веществах необходимо продолжить данные исследования в более широком интервале энергий столкновения протонов с дейтронами с использованием в качестве мишеней разнообразных веществ: металлов, насыщенных дейтерием и относящихся к разным группам и периодам системы химических элементов; полупроводников с различными типами проводимости; изоляторов.

Авторы выражают искреннюю благодарность А. П. Кобзеву за проведение измерений распределений атомарных концентраций дейтерия и титана в мишени из дейтерида титана, И. А. Чепурченко за обеспечение бесперебойной работы ускорителя Ван де Граафа, Е. И. Андрееву за помощь при оформлении рукописи.

Работа поддержана фондом фундаментальных исследований — грант РФФИ № 12-02-00086-а, грантом полномочного представителя правительства Польши в Объединенном институте ядерных исследований, Министерством образования и науки РФ, проект № 2.1704.2011, государственный заказ по программе «Наука», частично она выполнена за счет гранта № 2023/GF3 Министерства образования и науки Республики Казахстан, гранта полномочного представителя правительства Словакии в Объединенном институте ядерных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kasagi J. *et al.* Strongly Enhanced DD Fusion Reaction in Metals Observed for keV D^+ Bombardment // J. Phys. Soc. Japan. 2002. V. 71. P. 2881.
2. Czerski K. *et al.* Experimental and Theoretical Screening Energies for the $d(d,p)^3\text{He}$ Reaction in Metallic Environments // Eur. Phys. J. A. 2006. V. 27. P. 83.
3. Raiola F. *et al.* Enhanced $d(d,p)t$ Fusion Reaction in Metals // Ibid. P. 79 and references therein.
4. Huke A. *et al.* Measurement of the Enhanced Screening Effect of $d+d$ Reactions in Metals // Nucl. Instr. Meth. B. 2007. V. 256. P. 599.
5. Czerski K. *et al.* Measurements of Enhanced Electron Screening in $d+d$ Reactions under UHV Conditions // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2008. V. 35.
6. Ruprecht G. *et al.* Coherent Resonance Contributions in the Reactions ${}^6\text{Li}(d,\alpha){}^4\text{He}$ and ${}^{10}\text{B}(d,p){}^{11}\text{B}$ at sub-Coulomb Energies // Phys. Rev. C. 2004. V. 70. P. 025803.
7. Huke A. *et al.* Enhancement of Deuteron-Fusion Reactions in Metals and Experimental Implications // Phys. Rev. C. 2008. V. 78. P. 015803.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Bystritsky V. M. *et al.* Channeling Effect in the $d(d,n)^3\text{He}$ Reaction on the Deuteride Titanium Crystals // Izv. Vuzov. Fizika. 2012. V. 55, No. 11/2. P. 11.
12. Casella C. *et al.* First Measurement of the $d(p,\gamma)^3\text{He}$ Cross Section down to the Solar Gamow Peak // Nucl. Phys. A. 2002. V. 706. P. 203.

13. Griffiths G. M. et al. The Reaction $D(p, \gamma)^3\text{He}$ below 50 keV // Can. J. Phys. 1963. V. 41. P. 724.
14. 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.
15. Bystritsky V. M. et al. Study of the pd -Reaction at Ultralow Energies Using Hydrogen Liner Plasma // Yad. Fiz. 2005. V. 68. P. 1839.
16. Bystritsky V. M. et al. Application of Inverse Z-Pinch for the Study of the pd -Reaction at the keV Energy Range // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 565. P. 864.
17. 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.
18. Greife U. et al. Oppenheimer–Phillips Effect and Election Screening in $d + d$ Fusion Reactions // Z. Phys. A. 1995. V. 351. P. 107.
19. Bystritsky V. M. et al. Study of the $d(p, \gamma)^3\text{He}$ Reaction at Ultralow Energies Using a Zirconium Deuteride Target // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 737. P. 248.
20. Bystritsky V. M. et al. Measurement of Astrophysical S-Factors and Cross Sections of the $d(p, \gamma)^3\text{He}$ Reaction at the Ultralow Energy Region Using Deuterated Zirconium Target // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10, No. 7. P. 1174.
21. 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.
22. Дудкин Г. Н. и др. Контроль массовой толщины адсорбированного слоя на поверхности мишеней в экспериментах по исследованию реакции $d(d, n)^3\text{He}$ при низких энергиях столкновения дейтронов // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53, № 10/2. С. 45.
23. Dudkin G. N. et al. The Determination of True Quantity of Accelerated Particles (Ions, Neutrals) Falling on a Metal Target // 15th Intern. Symp. on High-Current Electronics (15th SHCE), Institute of High-Current Electronics Rus. Acad. of Sci. and Tomsk Polytechn. Univ., Tomsk, Russia, 2008. P. 148–150.
24. Nechaev B. M. et al. Parameters of the Flow of Accelerated Particles Generated by the Ion Source with Closed Drift of Electrons // Ibid. P. 151–153.
25. Kobzev A. P. et al. Investigation of Light Element Contents in Subsurface Layers of Silicon // Vacuum. 2009. V. 83. P. S124–S126.
26. Chu Wei-Kan, Mayer J.W., Nicolet M. A. Backscattering Spectrometry. New York; San Francisco; London: Acad. Press, 1978.
27. 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.
28. Practical Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy / Eds.: D. Briggs, M. P. Seah. N. Y.: Wiley, 1983.
29. Быстрицкий В. М. и др. Исследование параметров и оптимизация характеристик ионного источника ускоренных частиц // Изв. вузов. Физика. 2012. № 11/2. С. 51.

Получено 26 сентября 2013 г.