

Д15-2021-35

А. Адамчак и др.

ВЫХОД γ -КВАНТОВ ОТ РЕАКЦИИ ЯДЕРНОГО
СИНТЕЗА В МЮОННЫХ МОЛЕКУЛАХ $pt\mu$ и $pd\mu$

Направлено в «Журнал экспериментальной и теоретической физики»

А. Адамчак¹, В. А. Баранов², Л. Н. Богданова³,
В. П. Вольных², О. П. Вихлянцев⁴, С. С. Герштейн⁵,
К. И. Грицай², Д. Л. Демин², В. Н. Дугинов², А. Д. Конин²,
И. П. Максимкин⁴, Р. К. Мусяев⁴, А. И. Руденко²,
М. П. Файфман⁶, С. В. Фильчагин⁴, А. А. Юхимчук⁴

¹ Институт ядерной физики Польской академии наук, Краков, Польша

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

³ Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва

⁴ Российский федеральный ядерный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», Саров, Россия

⁵ Институт физики высоких энергий им. А. А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Протвино, Россия

⁶ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Выход γ -квантов от реакции ядерного синтеза в мюонных молекулах
 $pt\mu$ и $pd\mu$

Измерен выход γ -квантов от реакций ядерного синтеза, идущих из различных спиновых состояний мюонных молекул $pt\mu$ и $pd\mu$. Работа выполнена на установке «Тритон» в ЛЯП ОИЯИ с применением специально созданной жидкотритиевой мишени. Впервые наблюдались каналы реакции синтеза с выходом двойных γ -квантов: $pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma + \gamma$, $pd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + \gamma + \gamma$.

Полученные данные по выходу одиночных γ -квантов в канале реакции синтеза $pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma$ хорошо согласуются с более ранними исследованиями. Экспериментально определен парциальный коэффициент прилипания мюона в канале реакций pt - и pd -синтеза с выходом одного γ -кванта.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова ОИЯИ.

The Yield of γ Quanta from the Reaction of Nuclear Fusion in Muonic Molecules
 $pt\mu$ and $pd\mu$

The yield of γ quanta from nuclear fusion reactions proceeding from various spin states of muonic molecules $pt\mu$ and $pd\mu$ has been measured. The work was performed at the Triton facility at JINR DLNP using a specially designed liquid-tritium target. For the first time, channels of the synthesis reaction with the yield of double γ quanta were observed: $pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma + \gamma$, $pd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + \gamma + \gamma$.

The data obtained for the yield of single γ quanta in the channel of the fusion reaction $pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma$ is consistent with earlier research. The partial sticking coefficient of a muon in the channel of pt - and pd -fusion reactions with the yield of single γ quantum was determined experimentally.

The investigation has been performed at the Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени мюонный катализ реакций синтеза в смеси изотопов водорода достаточно хорошо изучен как экспериментально, так и теоретически. Параметры мю-катализа для процессов tt -, dt -, dd - и pd -синтеза были измерены в различных экспериментах. Исключением является только ядерная реакция, протекающая в мюонной молекуле $pt\mu$ между ее ядрами.

Эксперимент по изучению мюонного катализа в молекуле $pt\mu$ впервые был предложен в обзоре [1] и проведен (в жидкой смеси изотопов водорода) в конце 1980-х гг. на мюонном пучке PSI (Швейцария) международной коллаборацией ученых [2]. Измеренные в этом эксперименте скорости pt -синтеза в молекуле $pt\mu$ для E0-канала существенно (до 300 раз) превышали теоретические расчеты. Это расхождение было одним из побудительных мотивов для выполнения нами нового эксперимента [3].

В данном исследовании были выбраны параметры жидководородной смеси, наиболее близкие к эксперименту [2]. Основные преимущества эксперимента заключались в низком фоне γ -квантов, связанном с работой ускорителя, использовании двух γ -детекторов и высокой эффективности регистрации продуктов реакций цикла мюонного катализа.

Проведено исследование следующих каналов синтеза в мюонной молекуле $pt\mu$:



где энергия синтеза E составляет $\approx 19,8$ МэВ. Кроме того, изучались следующие каналы ядерной pd -реакции в молекуле $pd\mu$:



для которой энергия синтеза E составляет $\approx 5,5$ МэВ.

Отметим, что каналы реакции (1) и (3) наблюдались ранее в единственном эксперименте [2] по изучению реакций мюонного катализа в мюонной молекуле $pt\mu$. Реакции (2) и (4) не наблюдались, в том числе и в экспериментах на пучках. Только в ходе настоящих экспериментальных

исследований с участием мюона удалось впервые обнаружить каналы реакций (2), (4) и (6). Также наблюдалась реакция (1) с освободившимся мюоном. В данной работе представлено исследование каналов реакции (1), (2) и (5), (6) с выходом γ -квантов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперимент выполнялся на установке «Тритон» [4], расположенной на пучке отрицательных мюонов фазотрона Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзельепова ОИЯИ. Использовался пучок с импульсом 100 МэВ/с и интенсивностью 10^4 с^{-1} . Схема эксперимента представлена на рис. 1.

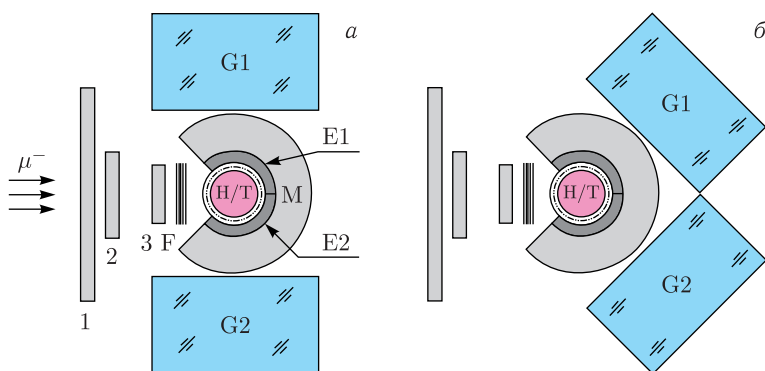


Рис. 1. Схема эксперимента: а) для экспозиций I, II, IV; б) для экспозиции III; 1–3 — счетчики пучка мюонов, F — медный замедлитель мюонов, Н/Т — мишень, E1, E2 — детекторы электронов, М — детектор мюонов, G1, G2 — детекторы γ -квантов

Для проведения эксперимента была изготовлена мишень с рабочим объемом 50 см^3 [5]. Мишень заполнялась жидким водородом при температуре 22 К с небольшим содержанием тяжелых изотопов водорода. Для регистрации γ -квантов использовались те же γ -детекторы G1 и G2 на основе кристаллов BGO, которые применялись ранее в эксперименте [6]. Электроны от распада мюонов в мишени и e^+e^- -пары от реакции (4) регистрировались детекторами электронов E1 и E2. Конверсионные мюоны от реакции (3) регистрировались детектором мюонов М, толщина которого была выбрана из условия гарантированной остановки конверсионного мюона в теле детектора. Методика эксперимента и обработки данных детально описана в работе [3].

При проведении эксперимента проводилась запись осциллограмм событий с детекторов G1, G2, E1, E2, М и счетчика 3 пучка мюонов. Пример такой осциллограммы представлен на рис. 2. Было выполнено 4 экспозиции: три с тритием (две концентрации трития и два угла расположения γ -детекторов) и одна с водородом. Во всех экспозициях содержание дей-

Таблица 1. Параметры экспозиций: c_t и c_d — содержание трития и дейтерия, α — угол между γ -детекторами, N_μ — число остановившихся в мишени мюонов

Экспозиция	c_t , % [5]	c_d , %	α , °	N_μ
I	$0,84 \pm 0,01$	$0,023 \pm 0,01$	180	10^7
II	$0,1 \pm 0,01$	$0,016 \pm 0,01$	180	10^7
III	$0,1 \pm 0,01$	$0,016 \pm 0,01$	110	10^7
IV	0	$0,011 - 0,016$ [7]	180	10^6

терия было близко к его природной концентрации. Параметры экспозиций обобщены в табл. 1.

2. НАБЛЮДЕНИЕ ДВОЙНЫХ γ -КВАНТОВ

На рис. 2 изображена осциллограмма экспериментального события мюонного катализа, соответствующего реакции (2), которую удалось наблюдать впервые.

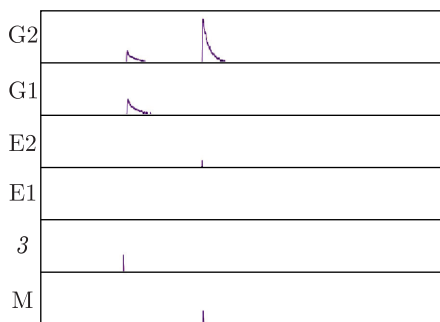


Рис. 2. Осциллограмма экспериментального события с выходом пары γ -квантов от реакции (2). Изображены отсчеты в детекторах в соответствии с обозначениями на рис. 1. Масштаб рисунка по времени — 20 мкс

Первый по времени сигнал — остановка мюона в мишени (отсчет в счетчике 3), вторая группа сигналов (G1, G2) — регистрация γ -квантов одновременно в двух γ -детекторах, третья группа сигналов (M, E2, G2) — регистрация одного и того же электрона от реакции распада мюона в мишени ($\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$). Для реакции (6) осциллограмма события подобна, отличие заключается в сумме энергий двух γ -квантов.

Суммарный по двум γ -детекторам энергетический спектр показан на рис. 3. Спектр на рис. 3, а, соответствующий реакциям (2) и (6), наблюдался в экспозициях II + III, а на рис. 3, б отвечает только реакции (6), так как в экспозиции IV не было трития.

Суммарный энергетический спектр для экспозиции I (подобный спектру, представленному на рис. 3, а) содержит γ -кванты как от реакции (2)

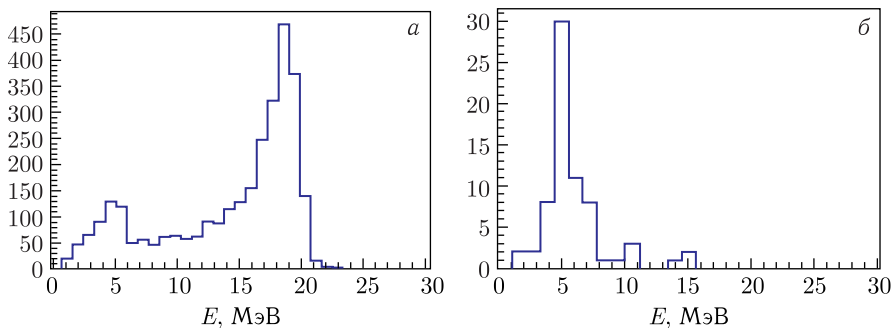


Рис. 3. Суммарный экспериментальный энергетический спектр двойных γ -квантов: а) экспозиции II + III, б) экспозиция IV

(пик 19,8 МэВ), так и от реакции (6) (пик 5,5 МэВ), которая протекает благодаря наличию примеси дейтерия. Последнее обстоятельство позволило определить процентное отношение выходов двойных γ -квантов в каналах реакции (2) и (6) для экспозиций I и II (табл. 2). Экспозиция III была исключена из рассмотрения по причине большого вклада перерассеяния γ -квантов от реакции (5), в силу взаимного расположения детекторов G1 и G2. Кроме того, не удалось определить и скорость ядерного перехода в реакции (6) из-за недостаточной статистики.

Экспериментальный спектр энергии одного γ -кванта от реакции (2) (энергетический спектр зарегистрированных γ -квантов в одном из γ -детекторов (G1 или G2) при наличии отсчета в другом) и соответствующий ему модельный теоретический спектр изображены на рис. 4. Они находятся в хорошем качественном согласии при том, что крылья экспериментального распределения содержат события с перерассеянием (внесшие наибольший вклад в экспозиции III, где γ -детекторы были приближены). Для определения скорости ядерного перехода в реакции (2) отбирались γ -кванты из центральной области этого спектра с целью уменьшения систематической ошибки. Пик в районе 1 МэВ обусловлен перерассеянием одиночных γ -квантов из одного γ -детектора в другой (из G1 в G2 и наоборот).

Модельный спектр, изображенный на рис. 4, представляет собой теоретическое распределение, которое следует из предположения о двухфотонном $E0$ -переходе между уровнями ядерной системы ${}^4\text{He}^*$ при ее девозбуждении в основное состояние. Такой механизм $0 \rightarrow 0$ -перехода хорошо известен в атомной физике (например, $2S^{1/2} \rightarrow 1S^{1/2}$ в атоме водорода, который играет важную роль в эволюции горячей Вселенной). Это распределение имеет вид $x^3(E-x)^3$, где x — энергия одного γ -кванта из пары, а E — энергия перехода (в нашем случае $E \approx 19,8$ МэВ), причем максимум распределения соответствует значению энергии $E/2$.

С целью исследования зависимости выхода γ -квантов от угла их вылета в реакции (2) проведены экспозиции II и III с разным расположением

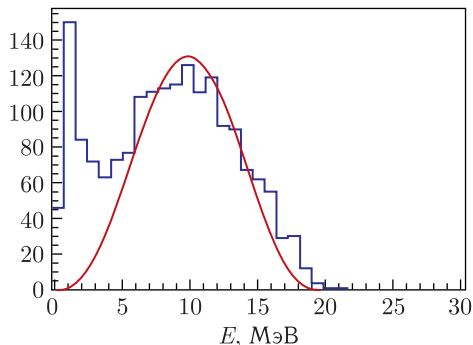


Рис. 4. Экспериментальный (гистограмма) и модельный (сплошная линия) спектры энергии одного из двух γ -квантов от реакции (2) (экспозиция III)

γ -детекторов относительно мишени. Существенной зависимости выхода γ -квантов от угла вылета в реакции (2) обнаружено не было.

3. НАБЛЮДЕНИЕ ОДИНОЧНЫХ γ -КВАНТОВ

Обнаружение новых каналов синтеза ядер мюонных молекул с выходом двух γ -квантов (2) и (6) способствовало выяснению причины искажения экспериментальных спектров в предыдущем исследовании [2]: располагая всего одним гамма-детектором, экспериментаторы не могли отделить канал с двойными γ -квантами и регистрировали их как относящиеся к каналу реакции (1) с выходом одиночного γ -кванта. На примере рис. 5 видно, как искажается экспериментальный энергетический спектр одиночных γ -квантов, если регистрировать только один γ -квант из пары от канала реакции с выходом двух γ -квантов при высоком относительном выходе в канале реакции (2). В действительности экспериментальный спектр одиночных γ -квантов состоит из следующих γ -квантов:

- от каналов реакций (1), (2), (5);
- пик 1,6 МэВ — от каскадного излучения мюонов, перехваченных более тяжелыми атомами стенок мишени, куда диффундируют мезоатомы $d\mu$ и $t\mu$;
- пик 2,2 МэВ — от радиационного захвата нейтрона водородом в мишени;
- от типичного отклика кристалла BGO на быстрые нейтроны [8].

Отметим, что источником коррелированного по времени нейтронного фона являются реакции синтеза в мюонных молекулах $dd\mu$ и $dt\mu$, которые наряду с $pt\mu$ также образуются в мишени при остановке там мюона из пучка, но, несмотря на малую концентрацию тяжелых изотопов в водороде и благодаря высокой скорости их образования с последующим испусканием нейтронов, заметно искажают левое крыло экспериментального спектра одиночных γ -квантов.

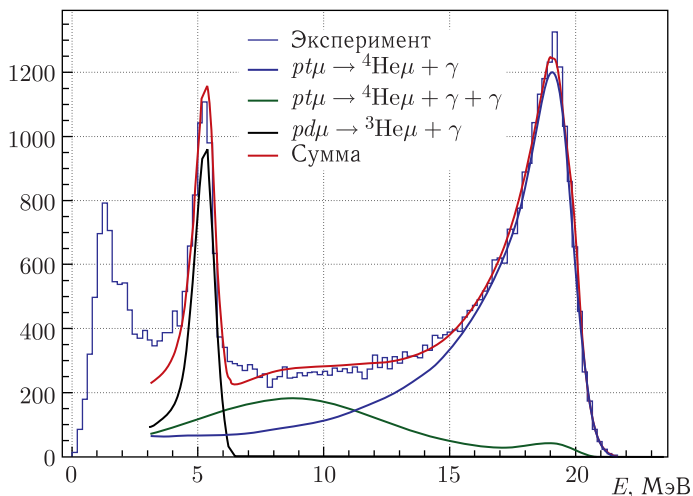


Рис. 5. Энергетический спектр одиночных γ -квантов для экспозиции I: гистограмма — экспериментальный спектр; линии синяя, зеленая, черная — моделирование отклика γ -детектора для каналов реакций (1), (2), (5) соответственно, красная — суммарный моделированный отклик

Относительные выходы (табл. 2) для каналов реакций (1), (2), (5) и (6) были определены в результате фитирования экспериментального спектра функцией суммарного моделированного отклика детектора с учетом расчетных эффективностей. Расчет эффективностей регистрации ε проводился методом Монте-Карло с использованием программы GEANT4.

В каждой экспозиции с тритием удалось зарегистрировать несколько десятков последовательных одиночных γ -квантов. Пример осциллограммы такого события (с использованием обозначений рис. 1) приведен на рис. 6.

Таблица 2. Эффективность регистрации ε и экспериментальный относительный выход в каналах реакций для экспозиций I и II. Ошибка в определении относительных выходов не превышает 15 %

Канал реакций	ε , %	Относительный выход, %	
		Эксп. I	Эксп. II
Двойные γ -кванты			
$(pd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + \gamma + \gamma)/(pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma + \gamma)$	0,94/1,43	7,6	13,4
Одиночные γ -кванты			
$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma$	11,7	67,3	28,7
$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma + \gamma$ (один из пары)	18,2	14,3	7,4
$pd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + \gamma$	10,2	18,4	63,9

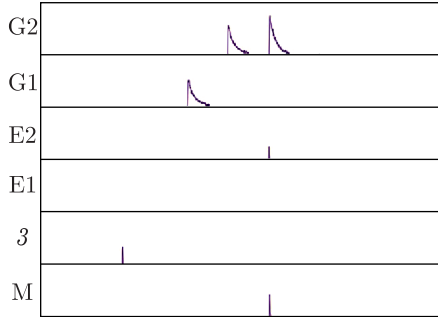


Рис. 6. Оциллограмма экспериментального события с выходом двух последовательных γ -квантов. Масштаб рисунка по времени — 20 мкс

Подобные события наблюдались также в экспозиции IV. Это позволило оценить парциальный (отношенный к выходу в канале реакции с одиночным γ -квантом) коэффициент прилипания мюона [9] к радиогенному гелию ω_s при синтезе в мюонных молекулах $pt\mu$ и $pd\mu$ методом регистрации последовательных событий мюонного катализа [10]. Полученные значения представлены в табл. 3 и близки к теоретическим оценкам [11]. В этой же таблице приведены абсолютные выходы γ -квантов Y^0 соответствующих реакций.

Таблица 3. Абсолютные выходы Y^0 , скорости реакций λ и парциальный коэффициент прилипания ω_s

Канал реакции	Величина	Значение	Экспозиция
$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma$	$\lambda_{pt}^\gamma, \text{ мкс}^{-1}$	0,078(4)	I
	$Y^0(\gamma), \%$	3,28(5)	I
	$Y^0(\gamma), \%$	2,47(5)	II
	$Y^0(\gamma), \%$	2,55(25)	III
	$\omega_s, \%$	0,991(1)	I
$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma + \gamma$	$\lambda_{pt}^{2\gamma}, \text{ мкс}^{-1}$	0,15(6)	I
	$\lambda_{pt}^{2\gamma}, \text{ мкс}^{-1}$	0,14(5)	II, III
	$Y^0(2\gamma), \%$	1,61(6)	I
	$Y^0(2\gamma), \%$	1,44(6)	II
	$Y^0(2\gamma), \%$	1,51(16)	III
$pd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + \gamma$	$\lambda_{pd}^\gamma, \text{ мкс}^{-1}$	0,25(4)	IV
	$Y^0(\gamma), \%$	15,3(2,3)	IV
	$\omega_s, \%$	0,994(1)	IV
$pd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + \gamma + \gamma$	$Y^0(2\gamma), \%$	0,5(0,1)	IV

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обработка данных эксперимента, результаты которого представлены в табл. 3, проходила по методике, детально описанной в работе [3]. Основные систематические ошибки возникали при выделении одиночных γ -квантов на фоне двойных и в обратном случае.

Абсолютные выходы $Y^0(y)$ продуктов y реакций вычислялись по формуле $Y^0(y) = N_y / (N_\mu \varepsilon(y) f_t)$, где N_y — число зарегистрированных продуктов реакции, N_μ — число мюонов, остановившихся в мишени, $\varepsilon(y)$ — эффективность регистрации и $f_t = 0,668$ — временной фактор, возникающий из налагаемого условия $0,5 \leq t(y) - t(e) \leq 4,5$, где $t(y)$ и $t(e)$ — времена (мкс) регистрации продукта реакции и электрона от распада мюона соответственно. В качестве числа мюонов, остановившихся в мишени, принято число зарегистрированных электронов при условии $t(e) - t(\mu) \geq 0,5$ мкс, где $t(\mu)$ — время остановки мюона в мишени. Эффективность регистрации продуктов мюонного катализа получена моделированием физических процессов в мишени и детекторах с помощью программы GEANT4.

Скорость ядерной реакции λ^y определялась путем фитирования временного спектра продукта y соответствующего канала реакции.

Парциальный коэффициент прилипания ω_s вычислялся из соотношения $1 - \omega_s = N_{\gamma \text{ seq}} / (N_\gamma \varepsilon(\gamma))$, где $N_{\gamma \text{ seq}}$ — число зарегистрированных событий с выходом двух последовательных γ -квантов (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом данной работы является первое наблюдение двойных γ -квантов в выходном канале реакции pt -синтеза, протекающей в мюонной молекуле $pt\mu$. Достоверность такого события подтверждается согласованием эксперимента и теории (двухфотонный $E0$ -переход), а также полученной скоростью $\lambda_{pt}^{2\gamma}$, которая в пределах ошибок совпадает со скоростью $E0$ -перехода, измеренной в работе [2].

Выход в канале реакции (2) остался на том же уровне при уменьшении концентрации трития, что следует из расчетов кинетики мюонного катализа (см. рис. 13 из работы [4]) и совпадает с подобными расчетами статьи [2].

Следует добавить, что ранее в эксперименте [6] наблюдалось порядка ста событий, удовлетворяющих критериям отбора для γ -квантов, имеющих энергию в соответствии с конечным состоянием реакции синтеза (1) с выходом одиночных γ -квантов. Можно предположить, что этот процесс протекает не в мюонной молекуле $pt\mu$, а «на лету», когда «горячий» мюонный атом трития от реакции $dd\mu \rightarrow t\mu + p$ сталкивается с молекулой HD в атмосфере плотного дейтерия. Другого объяснения этому факту на сегодня нет. Отметим также, что в данных того же эксперимента [6] не удалось выделить событий, которые отвечали бы реакции $dd\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + 2\gamma$.

Предварительные результаты эксперимента были представлены на Международной конференции «NTINER-18» [12]. Обработка полученных

экспериментальных данных, необходимых для детального описания каналов (3) и (4), в настоящее время продолжается.

Проведенные в настоящей работе исследования показывают возможность измерения выхода реакции (6) даже при естественном содержании дейтерия в водороде.

Авторы признательны за помощь в работе Л. И. Пономареву, К. Петижану, Г. Д. Ширкову, Н. А. Русаковичу, В. В. Кобецу, Г. М. Тер-Акопяну, Д. В. Философову, А. С. Фомичеву, А. П. Кустову и А. И. Богуславскому. Работа авторов, являющихся сотрудниками ОИЯИ, была выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-02-00089-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я.Б., Герштейн С.С. Ядерные реакции в холодном водороде // УФН. 1960. Т. 71. С. 581–630.
2. Baumann P., Daniel H., Grunewald S., Hartmann F.J., Lipowsky R., Moser E., Schott W., von Egidy T., Ackerbauer P., Breunlich W.H., Fuchs M., Jeitler M., Kammel P., Marton J., Nagele N., Werner J., Zmeskal J., Bossy H., Crowe K.M., Sherman R.H., Lou K., Petitjean C., Markushin V.E. Muon-Catalyzed pt Fusion // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. P. 3720–3723.
3. Bogdanova L.N., Demin D.L., Duginov V.N., Filchenkov V.V., Gritsaj K.I., Konin A.D., Mamedov T.N., Rudenko A.I., Stolupin V.A., Vinogradov Yu.I., Volnykh V.P., Yukhimchuk A.A. Experimental Study of Nuclear Fusion Reactions in a $pt\mu$ System // Phys. Part. Nucl. Lett. 2012. V.9. P. 605–614.
4. Юхимчук А.А., Виноградов Ю.И., Голубков А.Н., Гришечкин С.К., Демин А.М., Демин Д.Л., Первозчиков В.В., Родин А.М., Тер-Акопян Г.М., Харитонов В.М. Научно-экспериментальные комплексы для безопасного обращения с тритием и его соединениями в интересах фундаментальных и прикладных исследований // ВАНТ. Сер.: Термоядерный синтез. 2013. Т. 36(3). С. 26–52.
5. Yukhimchuk A.A., Maksimkin I.P., Musyaev R.K., Malkov I.L., Baluev V.V., Filchagin S.V., Vikhlyantsev O.P., Kuryakin A.V., Tumkin A.D., Gurkin A.I., Buchirin A.V., Demin D.L., Konin A.D. A Liquid Tritium Target for Studying $pt\mu$ -Fusion Reactions // Instr. Exp. Tech. 2019. V. 62. P. 464–472.
6. Baluev V.V., Bogdanova L.N., Bom V.R., Demin D.L., van Eijk C.W.E., Filchenkov V.V., Grafov N.N., Grishechkin S.K., Gritsaj K.I., Konin A.D., Mikhailyukov K.L., Rudenko A.I., Vinogradov Yu.I., Volnykh V.P., Yukhimchuk A.A., Yukhimchuk S.A. Experimental Search for the Radiative Capture Reaction $d + d \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$ from the $dd\mu$ Muonic Molecule State $J = 1$ // J. Exp. Theor. Phys. 2011. V. 113. P. 68–74.
7. Химическая энциклопедия / Под ред. И.Л. Кнунянц и др. М.: Сов. энцикл., 1988. Т. 1. С. 623.
8. Hausser O., Lone M.A., Alexander T.K., Kushneriuk S.A., Gascon J. The Prompt Response of Bismuth Germanate and NaI(Tl) Scintillation Detectors to Fast Neutrons // Nucl. Instr. Meth. 1983. V. 213 (2–3). P. 301–309.
9. Герштейн С.С., Петров Ю.В., Пономарев Л.И. Мюонный катализ и ядерный бридинг // УФН. 1990. Т. 160 (8). С. 3–46.

10. *Меньшиков Л.И., Сомов Л.Н.* Современное состояние мюонного катализа ядерных реакций синтеза // УФН. 1990. Т. 160 (8). С. 47–103.
11. *Abramov D.I., Bogdanova L.N., Gusev V.V., Ponomarev L.I.* The Local Characteristics of the Bound States of Muonic Molecules // *Hyp. Int.* 1996. V. 101/102. P. 301–306.
12. *Adamczak A., Baluev V.V., Bogdanova L.N., Demin D.L., Duginov V.N., Faijman M.P., Filchagin S.V., Gritsaj K.I., Konin A.D., Maksimkin I.P., Mamedov T.N., Musyaev R.K., Rudenko A.I., Usubov Z.U., Vikhlyantsev O.P., Volnykh V.P., Yukhimchuk A.A.* Experimental Search of Nuclear Fusion Reactions in a $p\mu$ System // Proc. of the Conf. “New Trends in High-Energy Physics”, Budva, Becici, Montenegro, 24–30 Sept. 2018 (NTIHEP-18). Dubna: JINR, 2019. P. 156–172.

Получено 30 июля 2021 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 7.09.2021.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 135 экз. Заказ № 60238.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/