

ВЫХОД γ -КВАНТОВ ОТ РЕАКЦИЙ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА В МЮОННЫХ МОЛЕКУЛАХ $pt\mu$ И $pd\mu$

А. Адамчак^а, В. А. Баранов^б, Л. Н. Богданова^с, В. П. Вольных^б,
О. П. Визлянецев^д, С. С. Герштейн^е, К. И. Грицай^б, Д. Л. Демин^{б*},
В. Н. Дугинов^б, А. Д. Конин^б, И. П. Максимкин^д, Р. К. Мусяев^д,
А. И. Руденко^б, М. П. Файфман^ф, С. В. Фильчагин^д, А. А. Юхимчук^д

^а Институт ядерной физики Польской академии наук
31-342, Краков, Польша

^б Объединенный институт ядерных исследований
141980, Дубна, Московская обл., Россия

^с Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
117218, Москва, Россия

^д Российский федеральный ядерный центр
«Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
607188, Саров, Нижегородская обл., Россия

^е Институт физики высоких энергий им. А. А. Логанова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
142281, Протвино, Московская обл., Россия

^ф Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, Москва, Россия

Поступила в редакцию 18 июня 2021 г.,
после переработки 26 октября 2021 г.
Принята к публикации 27 октября 2021 г.

Измерен выход гамма-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 данными более ранних исследований. Экспериментально определен парциальный коэффициент прилипания мюона к ядру гелия в канале реакций pt - и pd -синтеза с выходом одного γ -кванта.

DOI: 10.31857/S0044451022020031

1. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени мюонный катализ реакций синтеза в смеси изотопов водорода достаточно хорошо изучен как экспериментально, так и теоретически. Параметры μ -катализа для процессов tt -, dt -, dd - и pd -синтеза были измерены в различных

экспериментах. Исключением является только ядерная pt -реакция, протекающая в мюонной молекуле $pt\mu$.

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 канала с конверсией мюона существенно (до

* E-mail: demin@jinr.ru

300 раз) превышали расчеты теории. Это расхождение было одним из побудительных мотивов для выполнения нового эксперимента [3].

Для исследования были выбраны параметры жидководородной смеси, наиболее близкие к используемым в эксперименте [2]. Основные преимущества нашего эксперимента заключались в низком фоне γ -квантов, связанном с работой ускорителя, использовании двух гамма-детекторов и высокой эффективности регистрации продуктов мюонного катализа.

Проведено исследование следующих каналов синтеза в мюонной молекуле $pt\mu$ с выделением энергии синтеза $E \approx 19.8$ МэВ:

$$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma, \tag{1}$$

$$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma + \gamma, \tag{2}$$

$$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + \mu_{conv}, \tag{3}$$

$$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + e^+ + e^-. \tag{4}$$

Суммарный спин $p + t$ ядер в мю-молекуле $pt\mu$ в начальном состоянии реакций (1)–(4) имеет [1] значения $I = 1^+$ или $I = 0^+$, а основное состояние ядра ${}^4\text{He}$ есть 0^+ , поэтому в конечное состояние возможен только М1-переход $1^+ \rightarrow 0^+$ в реакции (1) и Е0-переход $0^+ \rightarrow 0^+$ в реакциях (2)–(4).

Также изучались каналы ядерной pd -реакции с испусканием γ -квантов в молекуле $pd\mu$:

$$pd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + \gamma, \tag{5}$$

$$pd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + \gamma + \gamma, \tag{6}$$

для которых энергия синтеза $E \approx 5.5$ МэВ. Переход в основное состояние $(1/2)^+$ ядра ${}^3\text{He}$ в реакции (5) является переходом М1 из pd -состояний с суммарным спином $I = (1/2)^+$ и $I = (3/2)^+$, а реакция (6) осуществляется посредством Е0-перехода из pd -состояния со спином $I = (1/2)^+$. Отметим, что каналы (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 удалось впервые обнаружить каналы реакции (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.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперимент выполнялся на установке «Три-тон» [4], расположенной на пучке отрицательных

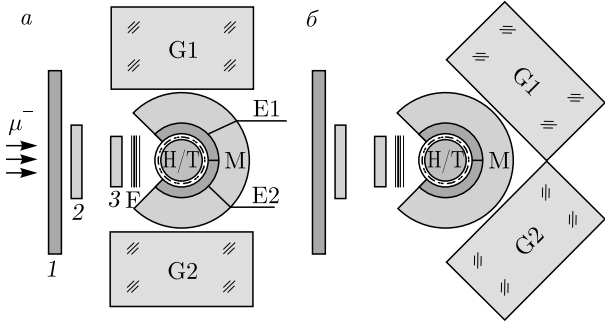


Рис. 1. Схема эксперимента: а) для экспозиций I, II, IV; б) для экспозиции III. 1, 2, 3 — счетчики пучка мюонов, F — медный замедлитель мюонов, Н/Т — мишень, Е1, Е2 — детекторы электронов, М — детектор мюонов, G1, G2 — детекторы γ -квантов

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

Эксп.	c_t , % [5]	c_d , %	α	N_μ
I	0.84 ± 0.01	0.023 ± 0.01	180°	10^7
II	0.10 ± 0.01	0.016 ± 0.01	180°	10^7
III	0.10 ± 0.01	0.016 ± 0.01	110°	10^7
IV	0	$0.011 \div 0.016$ [7]	180°	10^6

мюонов фазотрона Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова ОИЯИ. Использовался пучок с импульсом 100 МэВ/с и интенсивностью 10^4 с^{−1}. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Для проведения эксперимента была изготовлена мишень с рабочим объемом 50 см³ [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 Е1 и Е2. Конверсионные мюоны от реакции (3) регистрировались детектором мюонов М, толщина которого была выбрана из условия гарантированной остановки мюона конверсии в теле детектора. Методика эксперимента и обработки данных детально описана в работе [3].

При проведении эксперимента осуществлялась запись осциллограмм событий с детекторов G1, G2,

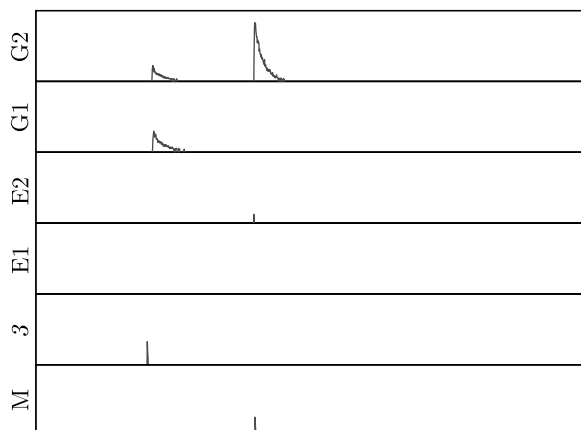


Рис. 2. Осциллограмма экспериментального события с выходом пары γ -квантов от реакции (2). Изображены сигналы с детекторов в соответствии с обозначениями на рис. 1. Масштаб рисунка по времени — 20 мкс

E1, E2, M и счетчика 3 пучка мюонов. Было выполнено четыре экспериментальные экспозиции: три с тритием (две концентрации трития при разных углах расположения γ -детекторов) и одна с водородом. Во всех экспозициях содержание дейтерия в водороде внутри мишени было близко к природной концентрации дейтерия. Параметры экспозиций, в том числе содержание дейтерия, обобщены в табл. 1.

3. НАБЛЮДЕНИЕ ДВОЙНЫХ γ -КВАНТОВ

На рис. 2 в качестве примера изображена осциллограмма впервые наблюдаемого экспериментального события мюонного катализа, соответствующего реакции (2).

Первый по времени сигнал — остановка мюона в мишени (сигнал 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 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: гистограмма на рис. 3а — спектр, соответствующий реакциям (2) и (6), наблюдался в экспозициях II+III, на рис. 3б — спектр, отвечающий только реакции (6), поскольку в экспозиции IV не было трития.

Суммарный энергетический спектр для экспозиций I и II (подобный спектру на рис. 3а) содержит γ -кванты как от реакции (2) (пик 19.8 МэВ), так

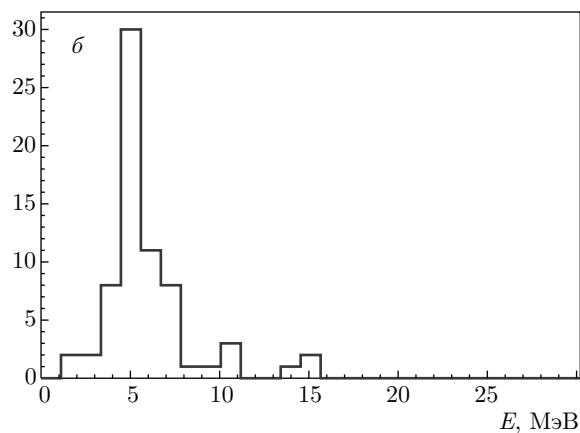
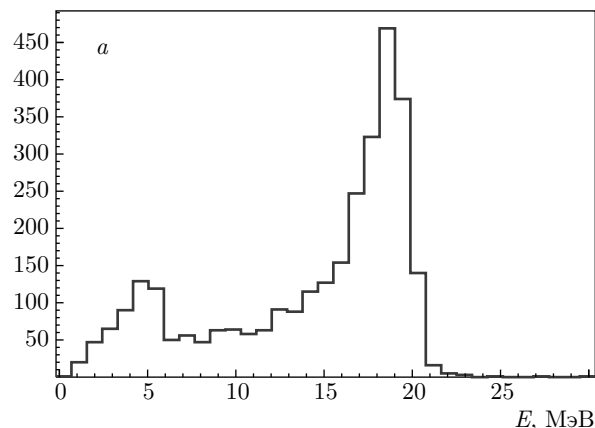


Рис. 3. Суммарный экспериментальный энергетический спектр двойных γ -квантов: а) экспозиции II+III, б) экспозиция IV

и от реакции (6) (пик 5.5 МэВ), которая протекала благодаря наличию в водороде примеси природного дейтерия. Последнее обстоятельство позволило определить процентные отношения $Y_{pd}^0(2\gamma)/Y_{pt}^0(2\gamma)$ выходов двойных γ -квантов в каналах реакций (6) и (2):

$$\frac{Y_{pd}^0(2\gamma)}{Y_{pt}^0(2\gamma)} = \begin{cases} 7.6\% & \text{для экспозиции I,} \\ 13.4\% & \text{для экспозиции II.} \end{cases} \quad (7)$$

Здесь учтен расчет эффективностей регистрации, составивших величины 0.94 % и 1.43 % для каналов реакций соответственно (6) и (2). Ошибка в определении процентного отношения выходов не превышает 15 %. Экспозиция III была исключена из рассмотрения по причине большого вклада перерасеяния γ -квантов от реакции (5), в силу взаимного расположения детекторов G1 и G2. Кроме того, из-за недостаточной статистики не удалось определить скорость ядерного перехода в реакции (6).

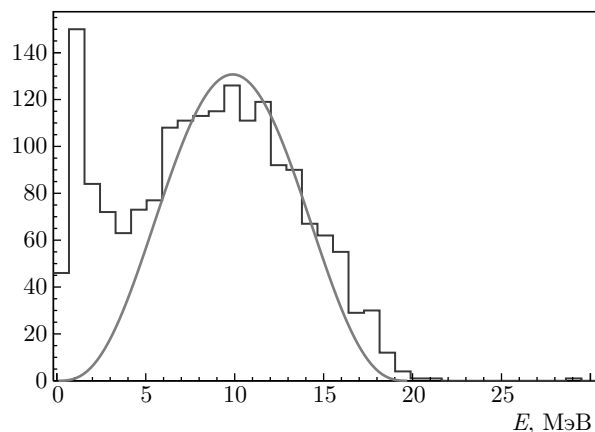


Рис. 4. Экспериментальный (гистограмма) и модельный (сплошная линия) спектры энергии одного из двух γ -квантов от реакции (2) (экспозиция III)

Экспериментальный спектр энергии одного γ -кванта от реакции (2) (энергетический спектр зарегистрированных γ -квантов в одном из γ -детекторов G1 или G2 при наличии сигнала в другом) и соответствующий ему модельный теоретический спектр изображены на рис. 4. Они находятся в хорошем качественном согласии даже при том, что крылья экспериментального распределения содержат события с перерасеянием (составившие наибольший вклад в экспозиции III, когда γ -детекторы были приближены друг к другу). 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 перерасеянием одиночных γ -квантов из одного γ -детектора в другой (из G1 в G2 и наоборот).

Спектр, изображенный на рис. 4 сплошной линией, представляет собой теоретическое распределение, которое следует из предположения о двухфотонном $E0$ -переходе между уровнями ядерной ${}^4\text{He}^*$ -системы при ее девозбуждении в основное состояние. Механизм такого монополярного перехода $0 \rightarrow 0$ хорошо известен в атомной физике, например, двухфотонный переход $2S^{1/2} \rightarrow 1S^{1/2}$ в атоме водорода, который играет важную роль в эволюции горячей Вселенной. Соответствующее распределение фотона по энергиям имеет [8] вид $\sim E_\omega^3(E - E_\omega)^3$, где E_ω — энергия одного γ -кванта из пары, а E — энергия перехода (в нашем случае $E \approx 19.8$ МэВ), причем максимум распределения отвечает значению энергии $E/2$.

С целью исследования зависимости выхода γ -квантов от угла их вылета в реакции (2) прове-

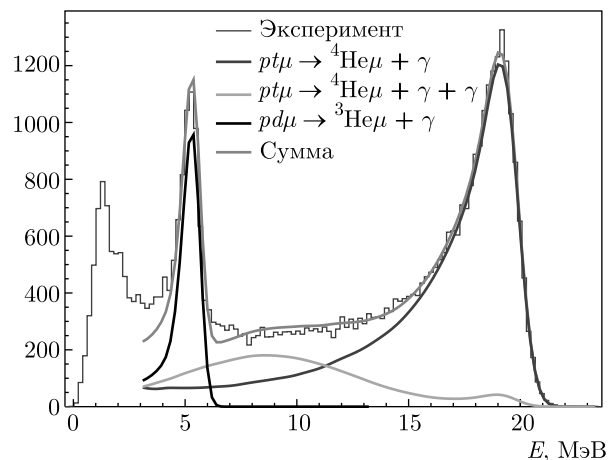


Рис. 5. (В цвете онлайн) Энергетический спектр одиночных γ -квантов для экспозиции I: гистограмма — экспериментальный спектр; синяя, зеленая, черная линии — результат моделирования отклика γ -детектора для каналов реакций (1), (2), (5) соответственно, красная линия — суммарный моделированный отклик

дены экспозиции II и III с разным расположением γ -детекторов относительно мишени. Существенной зависимости выхода γ -квантов от угла вылета в реакции (2) обнаружено не было.

4. НАБЛЮДЕНИЕ ОДИНОЧНЫХ γ -КВАНТОВ

Обнаружение новых каналов синтеза с выходом двух γ -квантов (2) и (6) способствовало выяснению причины искажения экспериментальных спектров в предыдущем исследовании [2]: имея в распоряжении всего один γ -детектор, 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 (2) при их относительно высоком выходе. Но в действительности такой экспериментальный спектр одиночных γ -квантов состоит из

- γ -квантов от каналов реакций (1), (2), (5);
- γ -квантов от каскадного излучения мюонов, перехваченных более тяжелыми атомами стенок мишени, куда диффундируют мезоатомы $d\mu$ и $t\mu$ (пик 1.6 МэВ);
- γ -квантов от реакций радиационного захвата нейтрона ядром водорода в мишени (пик 2.2 МэВ);

Таблица 2. Эффективность регистрации ϵ и экспериментальный относительный выход $Y^0(\gamma)/\sum Y^0(\gamma)$ в каналах реакций для экспозиций I и II. Ошибка в определении относительных выходов не превышает 5 %

Канал реакции	ϵ	$Y^0(\gamma)/\sum Y^0(\gamma)$	
		I	II
$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma$	11.7 %	67.3 %	28.7 %
$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + 2\gamma$ (учтен 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. Осциллограмма экспериментального события с выходом двух последовательных γ -квантов. Масштаб рисунка по времени — 20 мкс

— типичного отклика кристалла BGO на быстрые нейтроны [9].

Отметим, что источником коррелированного по времени нейтронного фона являются реакции синтеза в мюонных молекулах $dd\mu$ и $dt\mu$. Несмотря на малую концентрацию тяжелых изотопов водорода в мишени, благодаря высокой скорости образования мюонных молекул $dd\mu$ и $dt\mu$, испускаются нейтроны, которые заметно искажают левое крыло экспериментального спектра одиночных γ -квантов.

Относительные выходы (табл. 2) для каналов реакций (1), (2) и (5) 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.

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

Канал реакции	Величина	Значение	Эксп.
$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma$	λ_{pt}^γ , 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
	ω_s , %	0.991(1)	I
$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + 2\gamma$	$\lambda_{pt}^{2\gamma}$, мкс ⁻¹	0.15(6)	I
	$\lambda_{pt}^{2\gamma}$, 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
$pd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + \gamma$	λ_{pd}^γ , мкс ⁻¹	0.25(4)	IV
	$Y^0(\gamma)$, %	15.3(2.3)	IV
	ω_s , %	0.994(1)	IV
$pd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + 2\gamma$	$Y^0(2\gamma)$, %	0.5(0.1)	IV

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

Подобные события наблюдались также в экспозиции IV. Это позволило оценить парциальный (отнесенный к выходу в канале реакции с одиночным γ -квантом) коэффициент ω_s прилипания мюона к радиогенному гелию [10] при синтезе в мюонных молекулах $pt\mu$ и $pd\mu$ методом регистрации последовательных событий мюонного катализа [11].

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В табл. 3 представлены результаты обработки данных эксперимента, проведенной 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 $Y^0(y) = N_y/[N_\mu\epsilon(y)f_t]$, где N_y — число зарегистрированных продуктов реакции, N_μ — число мюонов, остановившихся в мишени, $\epsilon(y)$ — эффективность регистрации, $f_t = 0.668$ —

временной фактор, возникающий из налагаемого условия $0.5 \leq t(y) - t(e) \leq 4.5$, где $t(y)$ и $t(e)$ — времена (в мкс) регистрации продукта реакции и электрона от распада мюона соответственно. В качестве числа мюонов, остановившихся в мишени, принималось число зарегистрированных электронов при условии $t(e) - t(\mu) \geq 0.5$ мкс, где $t(\mu)$ — время останова мюона в мишени. Эффективность регистрации продуктов мюонного катализа получена моделированием физических процессов в мишени и детекторах с помощью программы GEANT4.

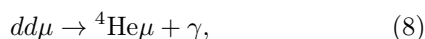
Скорость ядерной реакции λ^y определялась путем фитирования временного спектра продукта y соответствующего канала реакции.

Парциальный коэффициент прилипания ω_s вычислялся из соотношения $1 - \omega_s = N_{\gamma seq} / (N_{\gamma} \epsilon(\gamma))$, где $N_{\gamma seq}$ — число зарегистрированных событий с выходом двух последовательных γ -квантов (рис. 6). Полученные значения, представленные в табл. 3, близки к теоретическим оценкам [12].

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

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 согласованностью эксперимента и теории (двухфотонный $E0$ -переход), а также величиной полученной скорости $\lambda_{pt}^{2\gamma}$ (табл. 3), которая в пределах ошибок совпадает со скоростью $E0$ -перехода, измеренной в работе [2], в предположении, что этот переход отвечает реакции с конверсией мюона (3), обусловленной образованием виртуального фотона.

Здесь уместно отметить, что ранее в эксперименте [6] по изучению редкого радиационного канала dd -синтеза ядер в мю-молекуле $dd\mu$:



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. Одно из наиболее вероятных объяснений состоит в том, что этот процесс (1) протекает не в связанном состоянии мюонной системы $pt\mu$ (молекуле), а «на лету», когда «горячий» мюонный атом трития, образовавшийся как продукт более вероятной реакции $dd\mu \rightarrow t\mu + p$, сталкивается с молекулой HD в атмосфере плотного дейтерия. Заметим также, что в проанализированных данных того же эксперимента [6]

не удалось выделить события, которые отвечали бы реакции $dd\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + 2\gamma$.

В то же время проведенные в данной работе исследования показывают возможность измерения выхода реакции (6) даже при естественном содержании дейтерия в водороде.

Предварительные результаты настоящего эксперимента были представлены на Международной конференции NTINER-18 [13]. Обработка полученных экспериментальных данных, необходимых для детального описания каналов (3) и (4), в настоящее время продолжается.

Благодарности. Авторы признательны за помощь в работе Л. И. Пономареву, К. Петижану, Г. Д. Ширкову, Н. А. Русаковичу, В. В. Кобецу, Г. М. Тер-Акопьяну, Д. В. Философову, А. С. Фомичеву, А. П. Кустову, А. И. Богуславскому.

Финансирование. Работа авторов, являющихся сотрудниками ОИЯИ, была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-02-00089-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, С. С. Герштейн, УФН **71**, 581 (1960).
2. P. Baumann, H. Daniel, S. Grunewald, F. J. Hartmann, R. Lipowsky, E. Moser, W. Schott, T. von Egidy, P. Ackerbauer, W. H. Breunlich, M. Fuchs, M. Jeitler, P. Kammel, J. Marton, N. Nagele, J. Werner, J. Zmeskal, H. Bossy, K. M. Crowe, R. H. Sherman, K. Lou, C. Petitjean, and V. E. Markushin, Phys. Rev. Lett. **70**, 3720 (1993).
3. L. N. Bogdanova, D. L. Demin, V. N. Duginov, V. V. Filchenkov, K. I. Gritsaj, A. D. Konin, T. N. Mamedov, A. I. Rudenko, V. A. Stolupin, Yu. I. Vinogradov, V. P. Volnykh, and A. A. Yukhimchuk, Phys. Part. Nucl. Lett. **9**, 605 (2012).
4. А. А. Юхимчук, Ю. И. Виноградов, А. Н. Голубков, С. К. Гришечкин, А. М. Демин, Д. Л. Демин, В. В. Перевозчиков, А. М. Родин, Г. М. Тер-Акопьян, В. М. Харитонов, ВАНТ, сер. Термоядерный синтез **36**(3), 26 (2013).
5. А. А. Yukhimchuk, I. P. Maksimkin, R. K. Musyaev, I. L. Malkov, V. V. Baluev, S. V. Filchagin, O. P. Vikhlyantsev, A. V. Kuryakin, A. D. Tumkin, A. I. Gurkin, A. V. Buchirin, D. L. Demin, and A. D. Konin, Instr. Exp. Techniq. **62**, 464 (2019).

6. V. V. Baluev, L. N. Bogdanova, V. R. Bom, D. L. Demin, C. W. E. van Eijk, V. V. Filchenkov, N. N. Grafov, S. K. Grischechkin, K. I. Gritsaj, A. D. Konin, K. L. Mikhailyukov, A. I. Rudenko, Yu. I. Vinogradov, V. P. Volnykh, A. A. Yukhimchuk, and S. A. Yukhimchuk, JETP **113**, 68 (2011).
7. *Химическая энциклопедия*, т. 1, под ред. И. Л. Кнунянц и др., Советская энциклопедия, Москва (1988), с. 623.
8. Л. Н. Лабзовский, *Теория атома. Квантовая электродинамика электронных оболочек и процессы излучения*, Наука, Физматлит, Москва (1996).
9. O. Hausser, M. A. Lone, T. K. Alexander, S. A. Kushneriuk, and J. Gascon, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. **213**, 301 (1983).
10. С. С. Герштейн, Ю. В. Петров, Л. И. Пономарев, УФН **160**, 3 (1990).
11. Л. И. Меньшиков, Л. Н. Сомов, УФН **160**, 47 (1990).
12. D. I. Abramov, L. N. Bogdanova, V. V. Gusev, and L. I. Ponomarev, Нур. Int. **101/102**, 301 (1996).
13. A. Adamczak, V. V. Baluev, L. N. Bogdanova, D. L. Demin, V. N. Duginov, M. P. Faifman, S. V. Filchagin, K. I. Gritsaj, A. D. Konin, I. P. Maksimkin, T. N. Mamedov, R. K. Musyaev, A. I. Rudenko, Z. U. Usubov, O. P. Vikhlyantsev, V. P. Volnykh, and A. A. Yukhimchuk, *Proceedings of the Conference "New Trends in High-Energy Physics"*, Budva, Becici, Montenegro, 2018 (NTIHEP-18), Dubna: JINR, pp. 156–172 (2019).