

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА В МЮОННЫХ МОЛЕКУЛАХ $pt\mu$ И $pd\mu$

А. Адамчак¹, Л. Н. Богданова², В. П. Вольных³,
О. П. Вихлянцева⁴, К. И. Грицай³, Д. Л. Демин^{3,*},
А. Д. Конин³, Н. А. Кучинский³, И. П. Максимкин⁴,
Р. К. Мусяев⁴, М. П. Файфман², С. В. Фильчагин⁴,
А. А. Юхимчук⁴

¹ Институт ядерной физики Польской академии наук, Краков, Польша

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

³ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

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

Исследованы реакции ядерного синтеза, идущие из различных спиновых состояний мюонных молекул $pt\mu$ и $pd\mu$. Впервые наблюдались каналы реакций синтеза ядер этих мю-молекул с образованием пар гамма-квантов:

$$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma + \gamma, \quad pd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + \gamma + \gamma,$$

а также электрон-позитронных пар:

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

Измеренные скорости синтеза в каналах

$$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma \quad \text{и} \quad pt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + \mu_{\text{conv}}$$

хорошо согласуются с результатами других исследований. Кроме того, экспериментально подтверждено теоретическое значение отношения выхода e^+e^- -пар к выходу конверсионных мюонов в реакциях pt -синтеза.

Nuclear fusion reactions proceeding from various spin states of muonic molecules $pt\mu$ and $pd\mu$ were studied. For the first time, reaction channels for the synthesis of nuclei of these mu-molecules with the formation of gamma quanta pairs

$$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma + \gamma, \quad pd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + \gamma + \gamma,$$

as well as of electron-positron pairs

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

* E-mail: demin@jinr.ru

were observed. Measured rates for fusion channels

$$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma \quad \text{and} \quad pt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + \mu_{\text{conv}}$$

are in a good agreement with data from other studies. In addition, the value of the theoretical ratio of the yield of e^+e^- -pairs to the yield of conversion muons in pt -fusion reactions has been experimentally confirmed.

PACS: 36.10.Ee; 25.60.Pj

ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент по мю-катализу в жидкой смеси протия и трития, предложенный в работе [1], ранее был выполнен на мюонном пучке PSI (Швейцария) [2]. Однако не все возможные каналы реакций pt -синтеза были обнаружены и, кроме того, при сравнении некоторых из полученных данных с имеющимися в теории наблюдалось расхождение, требовавшее устранения. Поэтому в постановке нашего эксперимента [3] были выбраны параметры жидководородной смеси, наиболее близкие к условиям опытов [2]. Изучались следующие каналы pt -реакции в мюонной молекуле $pt\mu$:

$$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma, \quad (1)$$

$$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma + \gamma, \quad (2)$$

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

$$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + e^+ + e^-. \quad (4)$$

Также благодаря наличию естественной примеси дейтерия в протий-тритиевой смеси наблюдались и были изучены каналы pd -синтеза ядер мю-молекулы $pd\mu$:

$$pd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + \gamma, \quad (5)$$

$$pd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + \gamma + \gamma. \quad (6)$$

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперимент был проведен в мае–ноябре 2016 г. на установке «Тритон» [4], оборудованной на пучке отрицательных мюонов фазотрона Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова ОИЯИ. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Экспериментальная мишень [5] содержала жидкий водород при температуре 22 К с небольшой добавкой трития. Регистрация гамма-квантов осуществлялась гамма-детекторами G1 и G2 (кристаллы BGO) [6]. Электроны, образовавшиеся от распада мюона в процессах мю-катализа, а также при рождении e^+e^- -пары от реакции (4), регистрировались с помощью детекторов электронов E1 и E2. Конверсионные мюоны

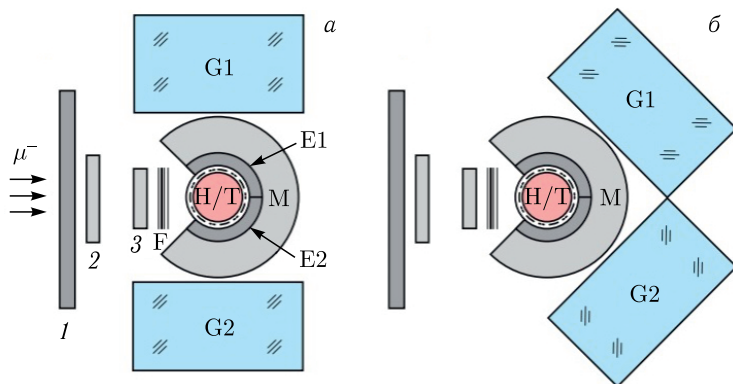


Рис. 1. Схема эксперимента: а) для экспозиций I, II, IV; б) для экспозиции III; 1, 2, 3 — счетчики пучка мюонов; F — медный замедлитель мюонов; Н/Т — мишень; Е1, Е2 — детекторы электронов; М — детектор мюонов; G1, G2 — детекторы γ -квантов

Таблица 1. Параметры 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

от реакции (3) наблюдались с помощью детектора мюонов М, толщина которого была достаточна для полной остановки конверсионного мюона в этом детекторе.

Всего в эксперименте было выполнено четыре экспозиции: три с тритием (при двух концентрациях трития и двух углах расположения γ -детекторов) и одна с водородом. Экспозиции II и III с разным расположением γ -детекторов относительно мишени проведены с целью исследования зависимости выхода γ -квантов от угла их вылета в реакции (2). Во всех экспозициях содержание дейтерия было близко к природной концентрации дейтерия [7]. Параметры экспозиций приведены в табл. 1.

2. СОБЫТИЯ С УЧАСТИЕМ ГАММА-КВАНТОВ

Примеры экспериментальных событий мюонного катализа с испусканием двойных и одиночных γ -квантов приведены на рис. 2–4 (масштаб примеров осциллограмм по времени — 20 мкс). На рис. 2 изображена осциллограмма экспериментального события мюонного катализа, соответствующего реакции (2), наблюдаемого впервые.

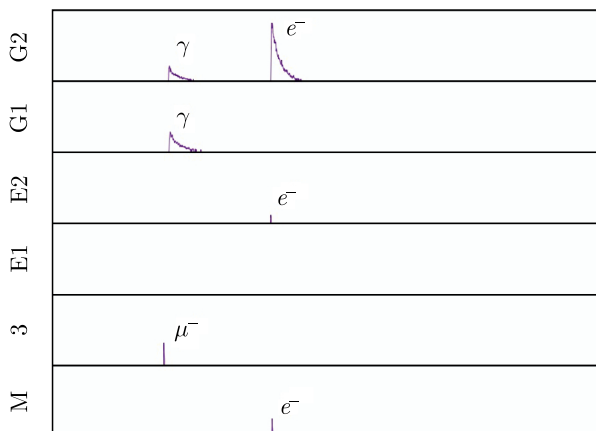


Рис. 2. Осциллограмма экспериментального события с выходом пары γ -квантов от реакции (2). Изображены отсчеты в детекторах в соответствии с обозначениями на рис. 1

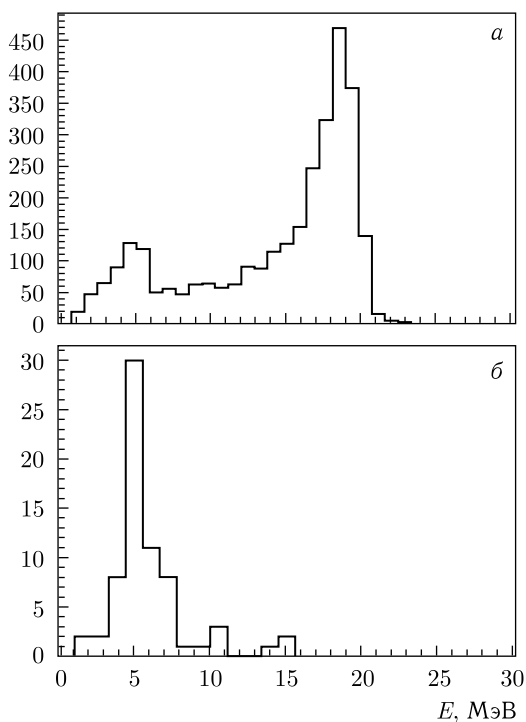


Рис. 3. Суммарный экспериментальный энергетический спектр двойных γ -квантов: а) экспозиции II + III; б) экспозиция IV

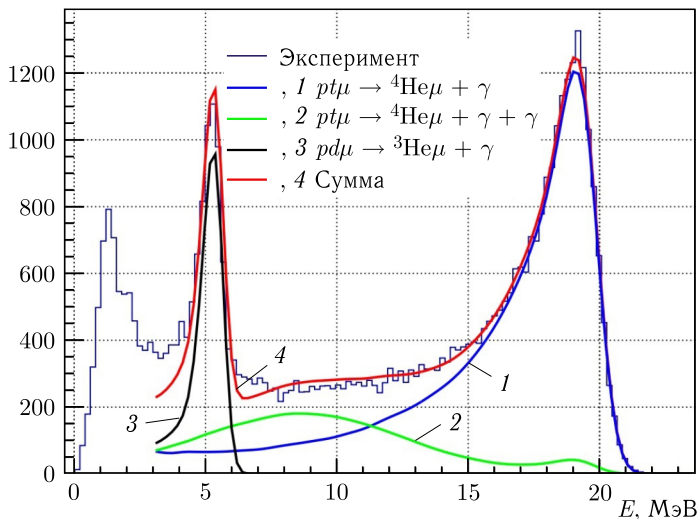


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Энергетический спектр одиночных γ -квантов для экспозиции I: гистограмма — экспериментальный спектр; линии синяя (1), зеленая (2), черная (3) — моделирование отклика γ -детектора для каналов реакций (1), (2), (5) соответственно, красная (4) — суммарный моделированный отклик

Первый по времени сигнал — остановка мюона в мишени (отсчет в счетчике 3), вторая группа сигналов — регистрация γ -квантов одновременно в двух гамма-детекторах (G1, G2), третья группа сигналов — регистрация в детекторах (M, E2, G2) одного и того же электрона от реакции распада мюона в мишени ($\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$). Отметим, что для реакции (6) осциллограмма события подобна представленной на рис. 2.

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

На рис. 3, а видно характерное отличие сумм энергий пар γ -квантов, соответствующих реакциям (2) и (6). Заметим также, что в реакции (2) существенной зависимости выхода γ -квантов от угла вылета обнаружено не было.

Обнаружение новых каналов (2) и (6) синтеза ядер мю-молекул с выходом двух γ -квантов позволяет утверждать о наличии искажения результатов анализа экспериментальных спектров более раннего исследования [2], в котором использовался лишь один гамма-детектор. В этом случае экспериментаторы не могли отделить канал с двойными γ -квантами и ошибочно регистрировали их как относящиеся к каналу реакции (1) с выходом одиночного γ -кванта. Пример (см. рис. 4),

Таблица 2. Абсолютные выходы Y^0 и скорости ядерных реакций λ

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
$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma + \gamma$	$\lambda_{pt}^{2\gamma}, \text{ мкс}^{-1}$	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
$pd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + \gamma + \gamma$	$Y^0(2\gamma), \%$	0,5(0,1)	IV
$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + \mu_{\text{conv}}$	$\lambda_{pt}^{\mu}, \text{ мкс}^{-1}$	0,13(1)	I
	$Y^0(\mu_{\text{conv}}), \%$	0,59(5)	I
	$Y^0(\mu_{\text{conv}}), \%$	0,54(4)	II
$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + e^+ + e^-$	$\lambda_{pt}^{e^+e^-}, \text{ мкс}^{-1}$	0,11(1)	I
	$Y^0(e^+e^-), \%$	0,41(3)	I
	$Y^0(e^+e^-), \%$	0,40(3)	II

полученный на основе моделирования данных нашего эксперимента при высоком относительном выходе в канале реакции (2), демонстрирует, как искажается экспериментальный энергетический спектр одиночных γ -квантов, если регистрировать только один γ -квант из пары от канала реакции (2).

В табл. 2 приведены скорости ядерных реакций λ и абсолютные выходы γ -квантов Y^0 соответствующих реакций.

3. СОБЫТИЯ С УЧАСТИЕМ КОНВЕРСИОННЫХ МЮОНОВ

На рис. 5–7 представлена информация, отвечающая событиям появления мюона конверсии в реакции (3). Первый по времени сигнал на рис. 5 — остановка мюона в мишени, вторая группа сигналов — регистрация конверсионного мюона одновременно в детекторах М, Е2, третья группа сигналов — регистрация в детекторах М, G2 одного и того же электрона от реакции распада мюона в детекторе М.

На основе экспериментального временного спектра (см. рис. 7) мюонов конверсии получена скорость ядерной реакции (3) $\lambda_{pt}^{\mu} = (0,13 \pm \pm 0,01) \text{ мкс}^{-1}$, что в пределах ошибок измерения подтверждает результат работы [2].

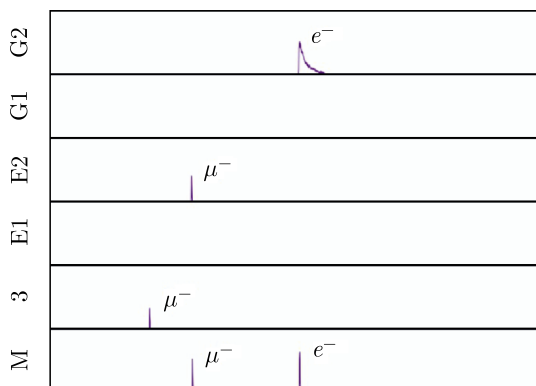


Рис. 5. Осциллограмма экспериментального события с выходом конверсионного мюона от реакции (3)

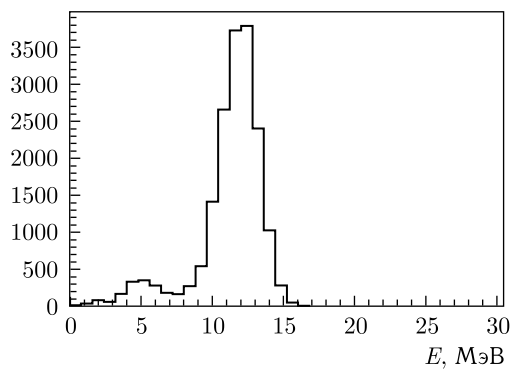


Рис. 6. Экспериментальный спектр энергетических потерь мюонов конверсии (3) в детекторах E1 + M. Особенность спектра в районе 5 МэВ соответствует одному партнеру из электрон-позитронной пары (4)

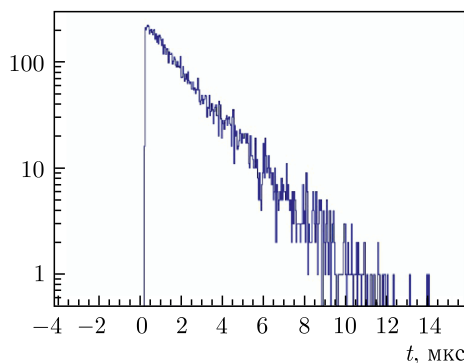


Рис. 7. Экспериментальный временной спектр мюонов конверсии (3)

4. СОБЫТИЯ С ВЫХОДОМ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ ПАР

На рис. 8 и 9 изображена экспериментальная информация по событиям с участием электрон-позитронных пар от реакции (4). После первого по времени сигнала на рис. 8 (остановка мюона в мишени) зарегистрирована вторая группа сигналов электрон-позитронной пары (e) одновременно в трех детекторах (E1, E2, M) и затем третья группа сигналов: регистрация в детекторах M, E1, G1 одного и того же электрона от реакции распада мюона в мишени.

Экспериментальные данные по мюонам конверсии и электрон-позитронным парам приведены в табл. 2.

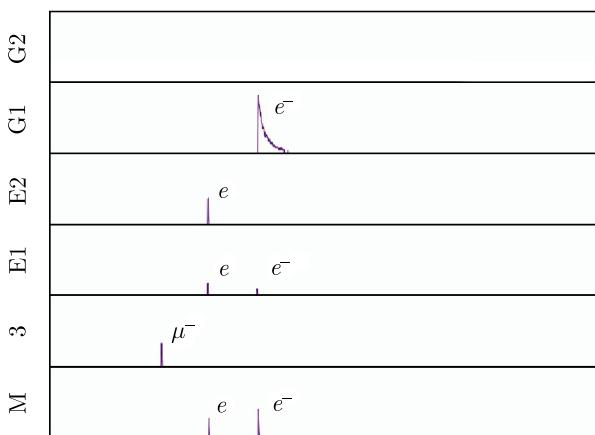


Рис. 8. Оциллограмма экспериментального события с выходом электрон-позитронной пары от реакции (4)

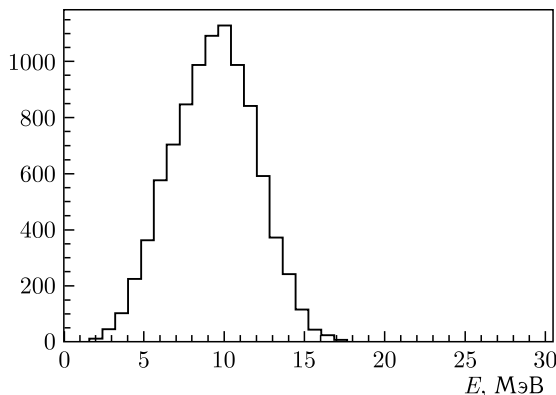


Рис. 9. Экспериментальный спектр энергетических потерь электрон-позитронных пар (4) в детекторах E1 + M

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Определенные в результате обработки измеренных данных параметры мюонного катализа синтеза ядер в мюонных молекулах $pt\mu$ и $pd\mu$ (скорости ядерной реакции; выходы продуктов реакции в пересчете на один мюон, остановившийся в мишени) приведены в табл. 2.

Впервые наблюдаются три типа (2), (4) и (6) ядерных реакций в мюонных молекулах $pt\mu$ и $pd\mu$, предсказанные в [1, 8].

Подтверждена измеренная в работе [2] высокая, превышающая на два порядка рассчитанную в [9, 10], скорость электромагнитного $E0$ -перехода в pt -синтезе (3).

Впервые экспериментально измерено (табл. 3) отношение выходов ядерной pt -реакции в каналах с испусканием электрон-позитронной пары (3) и мюона конверсии (4). Полученное значение хорошо согласуется с величиной теоретического отношения, равной 73 % [10]. Поскольку эти каналы реакции протекают из одного спинового состояния $pt\mu$ -молекулы, оно равно отношению скоростей соответствующих ядерных реакций.

Таблица 3. Отношение выходов в каналах реакции (3) и (4)

Экспозиция	$Y^0(e^+e^-)/Y^0(\mu_{\text{conv}})$, %	Ошибка измерения, %
I	69	8
II	74	8

Детальный анализ измеренных данных для описания фундаментального процесса рождения электрон-позитронных пар в каналах синтеза ядер различных мюонных молекул изотопов водорода продолжается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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., Перевозчиков В. В., Родин А. М., Тер-Акопьян 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 // *Instrum. 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 $J = 1$ // *JETP*. 2011. V. 113. P. 68–74.
7. *Химическая энциклопедия / Ред. И. Л. Кнунянц и др. М.: Сов. энцикл., 1988. Т. 1. С. 623.*
8. *Герштейн С. С., Петров Ю. В., Пономарев Л. И.* Мюонный катализ и ядерный бридинг // *УФН*. 1990. Т. 160, № 8. С. 3–46;
Меньшиков Л. И., Сомов Л. Н. Современное состояние мюонного катализа ядерных реакций синтеза // Там же. С. 47–103.
9. *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;
Bogdanova L. N. Experimental Study of Nuclear Fusion Reactions in Muonic Molecular Systems // *Yad. Fiz.* 2013. V. 76, No. 3. P. 409–414.
10. *Bogdanova L., Markushin V.* Nonradiative Fusion in $pt\mu$ Mesic Molecule // *Nucl. Phys. A*. 1990. V. 508. P. 29c–34c.