

## НАБЛЮДЕНИЕ “ЭФФЕКТА МИГДАЛА” В ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПРИ РАСПАДЕ МЮОНОВ В МЕЗОАТОМАХ

© 2022 г. В. А. Дитлов<sup>1)</sup>, В. В. Дубинина<sup>1)</sup>,  
Н. П. Егоренкова<sup>1)</sup>, Е. А. Пожарова<sup>1)</sup>, В. А. Смирнитский<sup>1)\*</sup>

Поступила в редакцию 08.12.2021 г.; после доработки 22.12.2021 г.; принята к публикации 27.12.2021 г.

Наблюдалось 2520 остановок и взаимодействий  $\mu^-$ -мюонов в ядерной эмульсии. Измерены энергетические спектры и угловое распределение электронов Оже, сопровождающих поглощение  $\mu^-$  ядром и распад  $\mu^- \rightarrow e^-$ . Показано, что с вероятностью  $\approx 1\%$  от числа остановок мюонов и при их распаде  $\mu^- \rightarrow e^- + \text{Оже}$  получено указание на качественное согласие с “эффектом Мигдала”.

DOI: 10.31857/S0044002722030084

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Из всех элементарных частиц, открытых за последнее столетие, только мюоны были доступны для экспериментального изучения в космических лучах еще до создания ускорителей. В монографии [1], опубликованной в 1964 г., приведен подробный обзор экспериментальных работ, в котором рассмотрены: основные свойства мюонов,  $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ -распад, поглощение отрицательных мюонов ядрами и их электромагнитное взаимодействие, молекулярные явления и деполяризация мюонов, образование и свойства мюония. После запуска ускорителей, создания сепарированных пучков различных частиц с большой интенсивностью и разными энергиями появилась возможность детально исследовать взаимодействие мюонов с ядрами. Такое исследование проводится на протонном ускорительном комплексе НИРА (Paul Scherrer Institute) [2], и предварительный результат работы опубликован в [3]. Этот комплекс имеет пучок протонов с энергией 560 МэВ рекордной мощности 1.4 МВт и оборудован сепарированными пучками мюонов с интенсивностью  $5 \times 10^8 \mu^+/\text{с}$  и  $7 \times 10^6 \mu^-/\text{с}$ . Для наблюдения остановок и взаимодействий мюонов с ядрами в эксперименте [3] использовались отрицательные мюоны с импульсом 28 МэВ/с. В работе приведен результат исследования спектров гамма-излучения, возникающего при захвате мюона разными ядрами и при его каскадных переходах в мезоатоме. Измерение сверхтонкой структуры уровней позволило определить радиус заряда ядер и их квадрупольный момент, а регистрация распадов мюонов — измерить время их жизни в различных

мезоатомах, которое изменяется от  $2.197 \times 10^{-6}$  с при  $A \approx 4$  до  $\approx 1 \times 10^{-7}$  с при  $A \approx 100$  ([3], см. Fig. 2). В работах [4] приведены результаты вычисления вероятности захвата мюона ядрами, в том числе относящимися к элементам, которые исследуются на предмет поиска  $2\beta$ -распада ([4], см. tabl. VI). Эти вычисления являются тестом способности ядерных моделей описать этот слабый процесс. В работах [4] показано с помощью метода QRPA (quasiparticle random phase approximation) описание в согласии с экспериментом захвата мюона ядрами с различными  $Z$  и  $A$ . Из этих экспериментов следует, что спектры  $\Upsilon$ -квантов, возникающие при поглощении  $\mu^-$ -мюонов, надежно идентифицируют элементы, причем для анализа достаточно иметь микрограммы вещества. Каталитические взаимодействия отрицательных мюонов рассмотрены в обзоре [5]. В этой работе приведено подробное исследование кинетики  $\mu^-$ -катализа. Идея мюонного катализа заключается в следующем. Отрицательный мюон, остановившийся в среде, содержащей ядра-изотопы, образует мюонный атом, а затем мезомолекулярный ион. В таком ионе, благодаря малым размерам, могут возникать ядерные реакции синтеза.

При остановке  $\mu^-$ -мюона в среде конкурируют два наиболее вероятных процесса: распад  $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \nu_e$  и захват  $\mu^- + z^A \rightarrow (z-1)^A + \nu_\mu$ . Во втором процессе протон, поглотивший мюон, превращается в нейтрон, и если захват происходит на покоящемся протоне, то энергия нейтрона  $\approx 5$  МэВ (всю энергию  $\approx 100$  МэВ уносит нейтрино). Вероятность поглощения мюона быстро растет с ростом заряда ядра, как  $z^4$  [1]. Это приводит к тому, что наблюдаемый распад мюона происходит в основном при его захвате легкими

<sup>1)</sup>НИЦ “Курчатовский институт” — ИТЭФ, Москва, Россия.

\*E-mail: vladimir@itep.ru

**Таблица 1.** Распределение найденных событий остановившихся мюонов по различным каналам\*

№ п/п	Остановки и взаимодействия $\mu^-$	Количество событий	
		без сопровождения Оже-электронов	с сопровождением Оже-электронов
1	Ядерное взаимодействие	82	44
2	Окончание следа с $\rho(0)$	696	432
3	Окончание следа без $\rho(0)$	429	0
4	Наблюдаемый распад $\mu^- \rightarrow e^-$	805	32

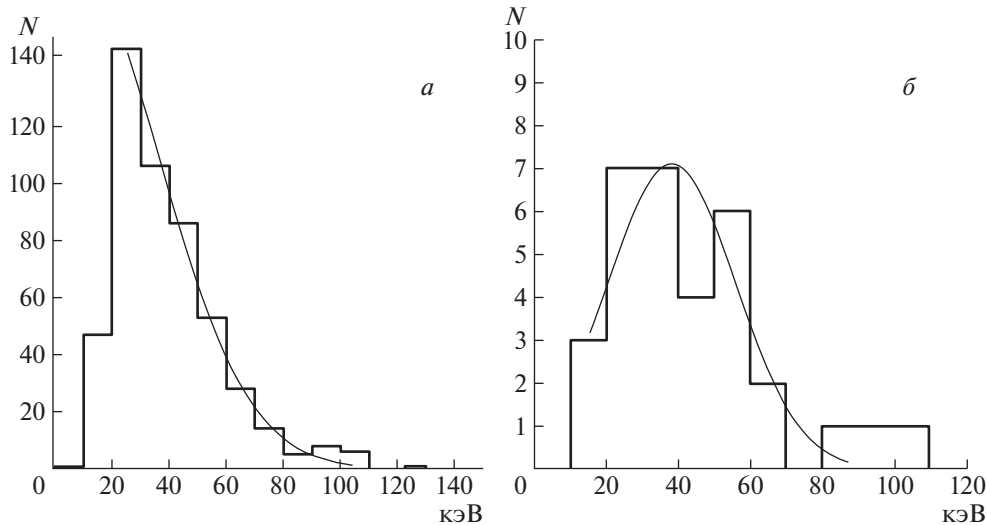
\* Примечание. В приложении [9] имеется атлас 195 микрофотографий взаимодействий, остановок и распадов элементарных частиц, в том числе и тех, что показаны в таблице.

ядрами. Действительно, борковский радиус мюонной орбиты в мезоатоме  $r_\mu = \hbar^2/m_\mu e^2$  примерно в 200 раз меньше электронного, и при  $z \approx 30$  ( $A = 65$ ) радиус  $r_\mu$  сравним с радиусом ядра. При захвате мюона ядром, кроме радиационных переходов, наблюдаются и безрадиационные, сопровождаемые испусканием электронов Оже ([1], с. 264). Если электрон Оже возникает совместно с электроном распада, то совершенно очевидно, что мюон распался, а не был поглощен ядром, и в этом случае вместо  $\Upsilon$ -кванта радиационного перехода мюона испустился электрон Оже. Экспериментальные работы по наблюдению электронов Оже подробно рассмотрены в [1]. Возможен и другой механизм возникновения электронов Оже, сопровождающих распад мюона в мезоатоме, — это “эффект Мигдала” [6, 7]. Мигдал предложил оригинальный механизм возбуждения атомных электронов. Суть его метода состоит в том, что мгновенное изменение напряженности электрического поля во внутренней электронной оболочке вызывает ее возбуждение — “встряхивание”. Такое возбуждение приводит к испусканию электронов с энергией внутренних оболочек, а иногда и значительно превышающей ее [7]. Это явление вошло в современную теоретическую физику как “эффект Мигдала”. В работе [7] эффект Мигдала наблюдался в распадах положительно заряженных пионов и мюонов, образующих системы: пионий ( $\pi^+e^-$ ) и мюоний ( $\mu^+e^-$ ). В работах [3, 4], рассмотренных выше, аппаратура для регистрации  $\Upsilon$ -квантов была предназначена для измерения их энергии начиная с  $\approx 200$  кэВ в работе [3] и  $\approx 2000$  кэВ в [4] и не могла быть непосредственно использована для регистрации электронов Оже. Одним из методов наблюдения электронов Оже, возникающих в мезоатомных переходах, является ядерная эмульсия, имеющая порог регистрации энергии электронов  $\approx 20$  кэВ. В нашем эксперименте по наблюдению эффекта Мигдала при распаде мюона в мезоатоме мы использовали эмульсионную камеру, облучен-

ную в пучке отрицательных мюонов с импульсом  $166 \pm 17$  МэВ/с на ускорителе ОИЯИ. Примесь  $\pi^-$  составляла не более  $\sim 1\%$  [8]. Чем привлекательно наблюдение эффекта Мигдала при распаде мюонов в мезоатомах? Действительно, ядерная эмульсия состоит [9] из легких (С, N, O) и тяжелых (Ag, Br) ядер, и это дает возможность наблюдать в одном эксперименте электроны Оже, возникающие при  $\mu^- \rightarrow e^-$ -распаде на легких и тяжелых мезоатомах. Кроме этого, известно [10], что число  $\mu^-$ -поглощений на легких ядрах (желатине) составляет  $\sim 40\%$ , а на кристаллах AgBr —  $\sim 60\%$  от общего числа поглощений  $\mu^-$  ядрами. Но при этом время жизни  $\tau_{\mu^-}$  до распада  $\mu^- \rightarrow e^-$  в мезоатоме тяжелого ядра в  $\sim 20$  раз короче, чем  $\tau_{\mu^-}$  в легком ядре ( $1 \times 10^{-7}$  вместо  $2.2 \times 10^{-6}$  с), и, как следствие этого, распадается только  $4\%$   $\mu^-$ , остановившихся в тяжелом ядре, а остальные поглощаются [3]. Это выравнивает вероятности наблюдения электронов Оже при  $\mu^- \rightarrow e^-$ -распадах в легких и тяжелых мезоатомах.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Метод ядерных эмульсий (типа БР-2) позволяет наблюдать электроны с энергией  $\geq 20$  кэВ. Это дает возможность проводить поиск электронов Оже, сопутствующих взаимодействию  $\mu^-$  с ядрами эмульсии. Эмульсионная камера размером  $3 \times 10 \times 10$  см<sup>3</sup>, собранная из эмульсионных слоев толщиной 400 мкм, была облучена на ускорителе ОИЯИ в пучке  $\mu^-$ -мюонов с импульсом  $166 \pm 17$  МэВ/с. Наблюдалось 2520 остановок и взаимодействий мюонов. В результате просмотра все остановки  $\mu^-$  распределялись на два массива: (а) взаимодействия с электроном Оже — 508 и (б) без сопровождения Оже — 2012 событий. Взаимодействия мюонов в (а) классифицировались следующим образом: остановка и захват мюона ядром



**Рис. 1.** Распределение по энергии электронов Оже. *а* — Все события, сопровождаемые электроном Оже, *б* — наблюдаемый распад  $\mu^- \rightarrow e^- + \text{Оже}$ . Гистограммы — экспериментальные измерения, сплошные кривые — результат фитирования нормальным распределением.

(в основном однолучевая звезда), так называемое  $\rho(0)$ -окончание ( $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$  с утолщением в месте остановки мюона или без него), и распад мюона  $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \nu_e$ . В массив (б) входят все те же взаимодействия без сопровождения вылета электрона Оже из точки остановки мюона. Распределение найденных событий по различным каналам поглощения мюонов приведено в табл. 1. Такая классификация потребует при дальнейшем обсуждении результатов измерений. Энергия электронов Оже измерялась по их пробегу в эмульсии на микроскопе KSM, связанном с компьютером. Программа сопровождения позволяла контролировать результаты измерений. Пробег электрона Оже до его остановки определялся путем измерения трех координат ( $x, y, z$ ) каждого проявленного зерна (кристалла AgBr) на его следе. По этим измерениям вычислялся пробег электрона  $R$  как сумма длин отрезков ломаной линии и угол  $\theta$  между импульсами электронов Оже и распада мюона. Ошибка в измерении пробега, зависящая, помимо страгглинга, и от конфигурации траектории, по нашим оценкам не превышает  $\Delta R \approx 15\text{--}20\%$ . Энергия электрона вычислялась по формуле  $E_e$  (кэВ) =  $8.44R$  (мкм)<sup>0.61</sup> [9, 11], поэтому ошибка  $\Delta E_e$  в измерении  $E_e$  по пробегу  $\Delta E_e \approx 0.6\Delta R$ . Используя этот результат, мы построили распределения по энергии электронов Оже для всех событий (см. рис. 1а). На рис. 1б приведен спектр электронов Оже из распада мюона  $\mu^- \rightarrow e^- + \text{Оже}$  (четвертая строка табл. 1).

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что испускание электронов Оже в основном происходит при поглощении мюонов ядрами. В этом случае основным процессом является реакция  $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$  с последующим испусканием мягких  $\Upsilon$ -квантов из возбужденного ядра и рентгеновского излучения, возникающего при каскадных переходах. Это приводит к утолщению следа мюона в точке его остановки. Таких событий наблюдается  $\approx 25\%$  от числа всех остановок. Энергетический спектр электронов Оже для этих событий приведен на рис. 1а. Гистограммой показаны экспериментальные измерения, а сплошной линией — результат фитирования нормальным распределением с  $\chi^2 \approx 1$ . Минимальное значение энергии электрона Оже обусловлено свойствами эмульсии типа БР-2, а максимальная энергия  $\geq 120$  кэВ наблюдается как в случае распада мюона в мезоатоме, так и при распаде мюония [6]. В четвертой строке табл. 1 приведены события, когда наблюдаемый  $\mu^- \rightarrow e^-$ -распад сопровождается испусканием электрона Оже из точки остановки мюона. Совершенно очевидно, что мюон в этом случае распался, а не был поглощен ядром. Такое событие происходит крайне редко,  $\approx 1\%$  от всех взаимодействий остановившихся мюонов. Рассеяние электронов на электронах среды вблизи наблюдаемых  $\mu^- \rightarrow e^-$ -распадов полностью исключается изотропным угловым ( $\theta$ ) распределением между импульсами электронов распада и Оже ( $N_{(0-90)}^\theta = 15$ ,  $N_{(90-180)}^\theta = 17$ ). На рис. 1б гистограммой показаны результаты экспериментального измерения

энергии этих электронов Оже, а сплошной линией — описание спектра нормальным распределением. Как уже отмечалось, распад отрицательного мюона, локализованного внутри электронной оболочки атома, может вызвать ее сильное возбуждение с последующей кумуляцией энергии, приводящей к испусканию Оже-электронов с большой энергией в несколько десятков кэВ [7]. Эта энергия намного превышает ионизационные потенциалы  $K$ -оболочек легких (C, N, O) и тяжелых (Ag, W) ядер эмульсии. Известно, что  $\approx 40\%$  ( $N_{40}$ ) взаимодействий мюонов происходит на легких и  $\approx 60\%$  ( $N_{60}$ ) на тяжелых ядрах эмульсии [10]. При этом 96% мюонов на легких ядрах и только 4% мюонов на тяжелых ядрах распадаются, а не поглощаются ядром [3]. В этом случае мы имеем количество распадов  $\mu^- \rightarrow e^- + \text{Оже}$  для легких ( $A_L = N_{40} \times 0.96 \approx 38$ ) и тяжелых ( $A_T = N_{60} \times 0.04 = 2.4$ ) ядер. Отсюда следует, что для таких событий должно соблюдаться отношение  $(A_L)/(A_T) \approx 10/2$ . На рис. 1б наблюдаются две группы частиц: одна ( $N_{30}$ ) со средней энергией  $\approx 30$  кэВ, а вторая ( $N_{100}$ ) в районе  $\approx 100$  кэВ. Для них отношение  $N_{30}/N_{100} \approx 10/1$ , что согласуется с отношением  $(A_L)/(A_T) \approx 10/2$ . Это дает основание считать, что эти две группы частиц ( $A_{30}$  и  $A_{100}$ ) относятся к наблюдаемым распадам  $\mu^- \rightarrow e^- + \text{Оже}$  на легких и тяжелых ядрах. Полученные результаты позволяют нам утверждать, что в эксперименте наблюдается указание на качественное согласие с предсказаниями “эффекта Мигдала”.

Авторы благодарят В.В. Шаманова за помощь при обработке результатов измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. О. Вайсенберг, *Мю-мезон* (Наука, Москва, 1964).
2. <https://www.psi.ch>
3. А. Knecht, A. Skawran, and S. M. Vogiatzi, arXiv: 2004.03314v1 [nucl-ex].
4. F. Simkovic, R. Dvornicky, and P. Vogel, arXiv: 2006.00689v1 [nucl-th]; D. Zinatulina, V. Brudanin, V. Egorov, C. Petitjean, M. Shirchenko, J. Suhonen, and I. Yutlandov, Phys. Rev. C **99**, 024327 (2019).
5. С. С. Герштейн, Ю. В. Петров, Л. И. Пономарев, УФН **160**(8), 3 (1990) [Sov. Phys. Usp. **33**(8), 591 (1990)].
6. М. В. Бяков, В. А. Дитлов, В. В. Дубинина, Н. П. Егоренкова, Е. А. Пожарова, В. А. Смирнитский, ЯФ **81**, 298 (2018) [Phys. At. Nucl. **81**, 314 (2018)].
7. М. В. Бяков, В. А. Дитлов, В. В. Дубинина, Н. П. Егоренкова, Е. А. Пожарова, В. А. Смирнитский, ЯФ **81**, 623 (2018) [Phys. At. Nucl. **81**, 676 (2018)].
8. А. О. Вайсенберг, Э. Д. Колганова, Н. В. Рабин, ЯФ **29**, 830 (1979).
9. С. Пауэлл, П. Фаулер, Д. Перкинс, *Исследование элементарных частиц фотографическим методом* (Изд-во иностр. лит., Москва, 1962).
10. А. О. Вайсенберг, Е. А. Песоцкая, В. А. Смирнитский, ЖЭТФ **41**, 1031 (1962) [Sov. Phys. JETP **14**, 734 (1962)].
11. U. Fano, *Studies in Penetration of Charged Particles in Matter* (National Akad. Sci., Washington, 1964), p. 388.

## EVIDENCE OF MIGDAL EFFECT IN NUCLEAR EMULSION IN DECAYS OF MUONS IN MESOATOMS

V. A. Ditlov<sup>1)</sup>, V. V. Dubinina<sup>1)</sup>, N. P. Egorenkova<sup>1)</sup>, E. A. Pozharova<sup>1)</sup>, V. A. Smirnitsky<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>NRC “Kurchatov Institute” — IТЕР, Moscow

2500 stops and interactions of  $\mu^-$  muons in nuclear emulsion were observed. The energy and angular distribution of Auger electrons accompanying the  $\mu^-$  absorption and decays  $\mu^- \rightarrow e^-$  have been measured. It is shown that an evidence is obtained for the qualitative confirmation of the Migdal effect with the probability of  $\approx 1\%$  from the number of stops of muons and decays  $\mu^- \rightarrow e^- + \text{Auger}$ .