

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

© 2022 г. В. А. Дитлов¹⁾, В. В. Дубинина¹⁾,
Н. П. Егоренкова¹⁾, Е. А. Пожарова¹⁾, В. А. Смирнитский^{1)*}

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 μ^- -мюонов в ядерной эмульсии. Измерены энергетические спектры и угловое распределение электронов Оже, сопровождающих поглощение μ^- 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 2.197×10^{-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 2β -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 Υ -квантов, возникающие при поглощении μ^- -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 μ^- -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 μ^- -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 ≈ 5 МэВ (всю энергию ≈ 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

¹⁾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 μ^- | 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_μ 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 Υ -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 (π^+e^-) и мюоний (μ^+e^-). В работах [3, 4], рассмотренных выше, аппаратура для регистрации Υ -квантов была предназначена для измерения их энергии начиная с ≈ 200 кэВ в работе [3] и ≈ 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 ≈ 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 ± 17 МэВ/с на ускорителе ОИЯИ. Примесь π^- 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 μ^- -поглощений на легких ядрах (желатине) составляет $\sim 40\%$, а на кристаллах AgBr — $\sim 60\%$ от общего числа поглощений μ^- ядрами. Но при этом время жизни τ_{μ^-} до распада $\mu^- \rightarrow e^-$ в мезоатоме тяжелого ядра в ~ 20 раз короче, чем τ_{μ^-} в легком ядре (1×10^{-7} вместо 2.2×10^{-6} с), и, как следствие этого, распадается только 4% μ^- , 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 ≥ 20 кэВ. Это дает возможность проводить поиск электронов Оже, сопутствующих взаимодействию μ^- с ядрами эмульсии. Эмульсионная камера размером $3 \times 10 \times 10$ см³, собранная из эмульсионных слоев толщиной 400 мкм, была облучена на ускорителе ОИЯИ в пучке μ^- -мюонов с импульсом 166 ± 17 МэВ/с. Наблюдалось 2520 остановок и взаимодействий мюонов. В результате просмотра все остановки μ^- 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

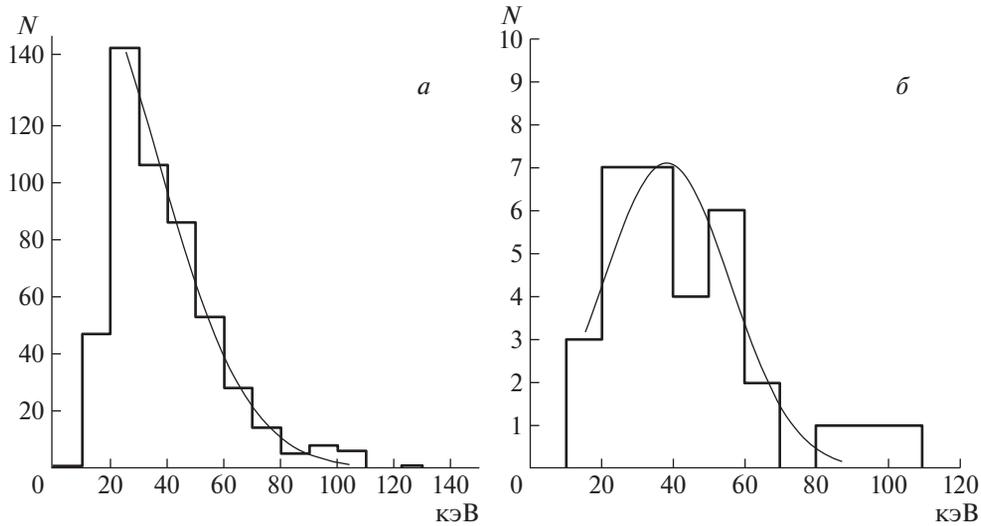


Рис. 1. Распределение по энергии электронов Оже. *а* — Все события, сопровождаемые электроном Оже, *б* — наблюдаемый распад $\mu^- \rightarrow e^- + \text{Оже}$. Гистограммы — экспериментальные измерения, сплошные кривые — результат фитирования нормальным распределением.

(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 θ 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) $^{0.61}$ [9, 11], поэтому ошибка ΔE_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 Υ -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 ≥ 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 (θ) 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 ≈ 30 кэВ, а вторая (N_{100}) в районе ≈ 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. Ditlov¹⁾, V. V. Dubinina¹⁾, N. P. Egorenkova¹⁾, E. A. Pozharova¹⁾, V. A. Smirnitsky¹⁾

¹⁾NRC “Kurchatov Institute” — IТЕР, Moscow

2500 stops and interactions of μ^- muons in nuclear emulsion were observed. The energy and angular distribution of Auger electrons accompanying the μ^- 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 $\mu^- \rightarrow e^- + \text{Auger}$.