

15 - 11421

ГАНЗОРИГ
Жигжиддоржийн

ДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР
ОСТАНОВИВШИМИСЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ МЮОНАМИ
И ПИОНАМИ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1978

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Д.ЧУЛТЭМ.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
В.П.ПОПОВ,
доктор физико-математических наук
Р.Я.ЗУЛЬКАРНЕЕВ.

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт
атомной энергии им. И.В.Курчатова, Москва.

Автореферат разослан " " 1978 г.
Защита диссертации состоится " " 1978 г. на засе-
дании Специализированного Ученого совета при Лаборатории
ядерных проблем ОИЯИ, Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук Ю.А.БАТУСОВ.

После остановки в веществе отрицательный мю-мезон захватывается на атомную орбиту с большим значением главного квантового числа n , образуя мезоатом /1/. Затем мюон, путем Оже- и радиационных переходов достигает нижней мезоатомной орбиты $1s$, откуда захватывается атомным ядром по реакции $\mu^- + (Z, N) \rightarrow (Z-1, N+1) + \gamma$ или распадается на электрон, нейтрино и антинейтрино. Энергия возбуждения образовавшегося ядра составляет $15 + 20$ МэВ, что достаточно для последующего деления ядра. Деление при этом происходит с запаздыванием по отношению к моменту образования мюонного атома с характерным временем жизни отрицательного мюона на нижней орбите $1s$ мезоатома (запаздывающее деление).

Существование безрадиационных переходов в тяжелых мезоатомах было предсказано Уилером /2/ и теоретически разработано Варецки и Новикова /3/. Первое экспериментальное наблюдение эффекта было сделано в 1960 году группой Б.И.Понтекорво /4/. При безрадиационном переходе вместо испускания мезорентгеновского излучения происходит непосредственная передача энергии ядру, приводя его в возбужденное состояние. Поскольку $2p-1s$ переход является электрически дипольным, можно говорить о том, что безрадиационное возбуждение атомного ядра аналогично дипольному поглощению моноэнергетического электромагнитного излучения. Энергия $2p-1s$ перехода для делящихся ядер несколько превышает 6 КэВ, что приводит к безрадиационному делению или, как принято обычно говорить, к мгновенному делению атомного ядра.

В последние годы в ОИЯИ была поставлена серия экспериментов /5,6,7/ по изучению деления различных тяжелых ядер отрицательными мюонами, причем основное внимание было обращено на процесс безрадиационного возбуждения атомного ядра. По существу мы имеем здесь дело с фотоделением, но только в присутствии отрицательного мюона на мезоатомной орбите $1s$. Для тяжелых делящихся ядер орбита $1s$ находится очень близко к ядру, так что мюон почти половину своего времени жизни проводит внутри мезоатомного ядра, изменяя его кулоновскую энергию. С изменением формы ядра при его деформации происходит изменение энергии кулоновского взаимодействия мюона с атомным ядром. Это означает также изменение энергии связи мюона в мезоатоме делящегося ядра по мере изменения его формы, что приводит к изменению барьера деления ядра мезоатома /3/.

В работе /8/ барьер деления ядра вычислялся с учетом оболочечных поправок, и расчеты показали, что в присутствии мюона на нижней орбите $1s$ происходит уменьшение проницаемости потенциального барьера. Позже Леандер и Мюллер /9/ провели более точные оценки влияния отрицательного мюона на барьер деления в случае ядра мезоатома ^{236}U . Согласно их расчетам, форма двугорбого барьера деления изменяется довольно сильно, особенно в области второго минимума. Величина сдвига изомерного состояния достигает нескольких сот электронвольт.

Изменение формы барьера в случае мюонного атома спонтанно делящегося изомера, как ранее указывалось в работе /10/, может привести к изменению его свойств. Так, вследствие уменьшения высоты внутреннего барьера по отношению к внешнему, должно уменьшиться и время электромагнитного перехода из второй ямы в первую.

Блум /11/ из сравнения величин времени жизни мюонного атома ^{238}U , установленных при регистрации актов запаздывающего деления (76 ± 1 нс) и путем наблюдения электронов от распада мюона (88 ± 4 нс), пришел к предположению о большой вероятности заселения спонтанно делящегося изомера мезоатома ^{238}U в безрадиационных переходах мюона. С появлением этой гипотезы последовало много экспериментальных работ с целью наблюдения распада спонтанно делящегося изомера мюонного атома и уточнения времени жизни мезоатома.

В работах /6,7/ впервые сделано сопоставление данных о вероятности деления ядер ^{232}Th , $^{235,238}\text{U}$, ^{237}Np и $^{239,242}\text{Pu}$ отрицательными мюонами, и оно отражено в диссертации. В диссертации также приводятся результаты исследования относительной вероятности деления ряда средних и тяжелых ядер пионами, которые получены с помощью диэлектрических детекторов /12,13/.

Известно, что при поглощении остановившихся отрицательных пионов атомным ядром происходит большая передача энергии, и в принципе вся масса пиона (~ 140 МэВ) может перейти в энергию возбуждения ядра. Согласно оценкам /14/, энергия возбуждения составляет величину $50 \text{ МэВ} \ll E^* < 80 \text{ МэВ}$. При такой энергии возбуждения основным каналом распада атомного ядра является испарение нейтронов и деление. Поэтому исследование относительной вероятности деления ядер отрицательными пионами в широком диапазоне массового числа A представляет определенный интерес с точки зрения изучения распада сильновозбужденных ядер. Кроме того, систематика данных об относительной вероятности деления ядер медленными пионами позволяет проверить те или иные модельные представления, используемые при описании процесса поглощения пионов делящимися ядрами /15/.

Диссертация состоит из пяти глав, введения и заключения. В первой главе рассмотрена вероятность захвата отрицательного мюона атомными ядрами. Этот вопрос теоретически был изучен Примаковым /16/, им же получено выражение для вероятности данного процесса. Согласно /16/, в процессе атомного захвата мюона должен существовать изотопный эффект, который приводит к уменьшению вероятности захвата с увеличением числа нейтронов $(A-Z)$ при данном числе протонов Z . Например, если время жизни мезоатома ^{238}U составляет 76 нс, то для ^{235}U оно должно составлять величину, близкую к 65 нс. Однако, как показывают последние эксперименты, времена жизни мезоатомов указанных изотопов урана практически не различаются между собой.

В работе /17/ получена более слабая зависимость вероятности ядерного захвата мюона от числа нейтронов, чем в /16/.

Во второй главе описаны методические разработки, обеспечивающие высокое временное разрешение при регистрации осколков деления ионизационной камерой деления, которая позволяет провести измерения одновременно с разными делящимися веществами, что важно в определении относительного выхода деления ядер для разных изотопов.

Для обеспечения лучшей разрешающей способности ионизационной камеры мы использовали полупроводниковые предусилители с быстрым временным каналом /18/ для регистрации импульсов тока, появляющихся при делении ядер в ионизационной камере /19/. Достигнутое временное разрешение составляет $FWHM = 2,4$ нс.

Блок-схема опыта по исследованию деления ядер на пучке отрицательных мюонов и пионов представлена на рис. 1. Система для измерения временного распределения актов деления ядер

мюонами состоит из мониторинговых сцинтилляционных счетчиков 1, 2, 3, 4 и камеры деления. Третий счетчик представляет собой диск толщиной 1 мм и диаметром, совпадающим с поверхностью слоя делящегося вещества, нанесенного на алюминиевой фольге. Счетчик антисовпадения 4, выделяющий акт остановки мюона в камере, выполнен в виде стакана, в котором вставляется камера деления.

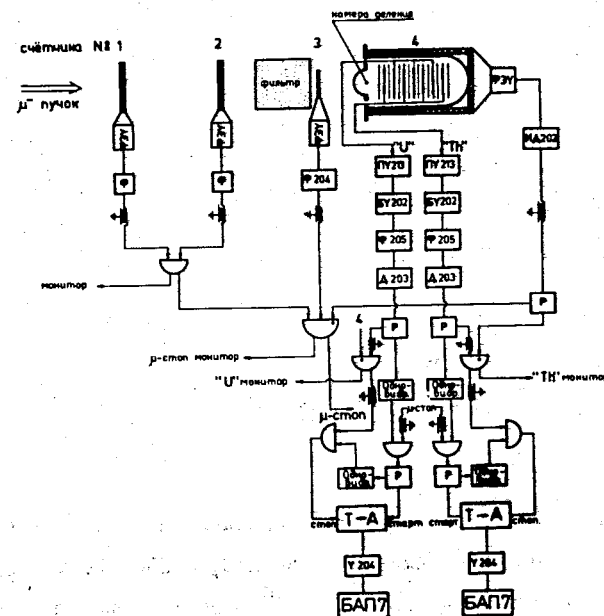


Рис. 1. Блок-схема системы для измерения временного распределения актов деления ядер остановившимися отрицательными мюонами и пионами.

Сигналы с камеры деления, после прохождения предусилителя и быстрого усилителя, отбираются формирователем, позволяющим эффективно отбрасывать шумовые импульсы. Полученную в реальных экспериментальных условиях разрешающую способность системы для регистрации актов деления характеризует рис. 2.

Применение линий задержки и одновибраторов в данной схеме обеспечивает необходимую последовательность появления сигналов "Старт" и "Стоп" для правильной работы время-амплитудного преобразователя.

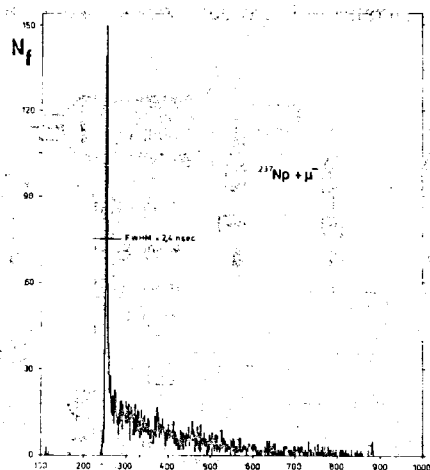


Рис. 2. Спектр временного распределения актов деления мюонами. Ёмкость камеры $C_F = 250$ пФ; уровень альфа-активности $\sim 10^6$ расп./с; цена кан.- 0,43 нс.

Первым шагом определения относительной вероятности деления для всех исследованных ядер было измерение относительной вероятности деления для двух изотопов урана. В дальнейшем, для других ядер, она была определена относительно одного из изотопов урана.

Абсолютная вероятность деления ядер отрицательными мюонами определялась нами для урана-238. Для этого мы одновременно с

регистрацией осколков деления урана измерили интенсивность мезорентгеновского излучения алюминия, используемого в качестве держателя мишени и электродов. Используя известную величину /20/ интенсивности $2p\text{-}I_5$ перехода на один акт остановки мюона в алюминии, мы определили число остановок в нем. Число остановок мюона в уране было определено по известной "Z" - зависимости для вероятности посадки мюона в различных веществах /1,21/.

Третья глава посвящена экспериментальным результатам и их сравнению с другими имеющимися данными. Один из типичных спектров временного распределения событий деления, вызванного остановившимися отрицательными мюонами, показан на рис. 2. Как видно из рисунка, это распределение состоит из двух компонент: мгновенной и запаздывающей частей спектра. По запаздывающей части устанавливается время жизни мюонного атома, и оно впервые определено для ^{237}Np и ^{242}Pu /7/ (табл. I.).

Полученные из этих распределений отношения выходов мгновенного и запаздывающего делений для каждого изотопа даны в табл. 2.

Выход деления на один акт остановки мюона, вместе с другими аналогичными данными, приведен в табл. 3. Наблюдается сильное расхождение выхода, определенного, с одной стороны, нашим методом /6,23/, с другой - фотоэмульсионным и радиохимическим методами /22/.

Таблица I. Среднее время жизни мюона в делящихся ядрах (нс.)

^{232}Th	^{235}U	^{238}U	^{237}Np	^{239}Pu	^{242}Pu
87 ± 4	$75,6 \pm 2,3$	76 ± 1	72 ± 2	70 ± 3	79 ± 5

Таблица 2. Отношение выхода мгновенного деления к запаздывающему.

Изотопы	Работы		
	Диац и др. ^{/27/}	Бадик и др. ^{/27/}	наст. работа
²³² Th	0,064±0,022	-	0,030±0,012
²³⁵ U	0,111±0,021	0,094±0,027	0,17 ± 0,01
²³⁸ U	0,072±0,014	0,080±0,024	0,071±0,003

	Работы		
	Кожокару и др. ^{/27/}	Буца и др. ^{/27/}	наст. работа
²³⁷ Np	-	-	0,33 ± 0,01
²³⁹ Pu	0,43 ± 0,09	0,28 ± 0,04	0,42 ± 0,02
²⁴² Pu	-	-	0,41 ± 0,04

Таблица 3. Данные по выходу деления на один акт остановки мюона.

Работы	²³² Th	²³⁸ U
Галбрайт и др. ^{/22/}	-	< 0,25
Джон и др. ^{/22/}	-	{ 0,15 ± 0,06 0,07 ± 0,03
Петрашку и др. ^{/22/}	0,018 ± 0,012	-
Беловицкий и др. ^{/22/}	-	0,07 ± 0,008
Чултэм и др. ^{/16/}	0,0043 ± 0,0010	0,031 ± 0,007
Гаврилов и др. ^{/23/}	0,0049 ± 0,0009	-
Баертши и др. ^{/22/}	-	0,13 ± 0,05

Сравнение определенного нами времени жизни мезоатома с данными других авторов, полученными как регистрацией актов деления, так и путем наблюдения электронов от распада мюона, показывает, в основном, их хорошее согласие. Обращает на себя внимание совпадение времен жизни мюона в уране-238, определенных нами и в работе^{/24/} разными методами (о ранее наблюдавшемся расхождении мы уже говорили выше).

В четвертой главе обсуждаются результаты исследования деления ядер отрицательными мюонами.

Время жизни различных мюонных атомов определялось, в основном, при регистрации электронов от распада мюона на мезоатомной орбите. Для делящихся ядер оно также было определено путем измерения временного распределения актов деления, вызванного поглощением мюона атомным ядром.

Величина времени жизни мюона на атомной орбите определяется обратной величиной вероятности ядерного захвата мюона, обсужденной в первой главе. Теоретические значения вероятности захвата в области делящихся ядер, как правило, превышают экспериментально установленные величины, хотя в случае изотопов плутония разница времен жизни для этих ядер находится в пределах теоретически ожидаемого.

Экспериментально наблюдаемую тенденцию хода вероятности ядерного захвата мюона тяжелыми ядрами в зависимости от числа нейтронов хорошо описывают расчеты^{/17/}.

Как уже отмечалось, мгновенное деление ядер при безрадиационном возбуждении мы рассматриваем как фотоделение. Поэтому мы сравниваем вероятность безрадиационного деления с вероятностью фотоделения при возбуждении ядер моноэнергетическими гамма-квантами соответствующей энергии. Сечение фотоделения подробно изучено многими группами^{/25/}.

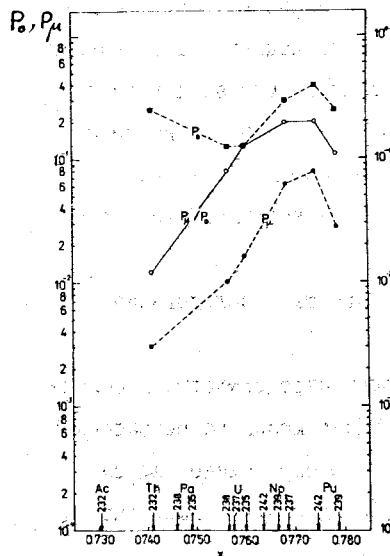


Рис. 3. Сравнение вероятности безрадиационного деления (P_0) ядер актинилов с вероятностью фотоделения (P_μ).

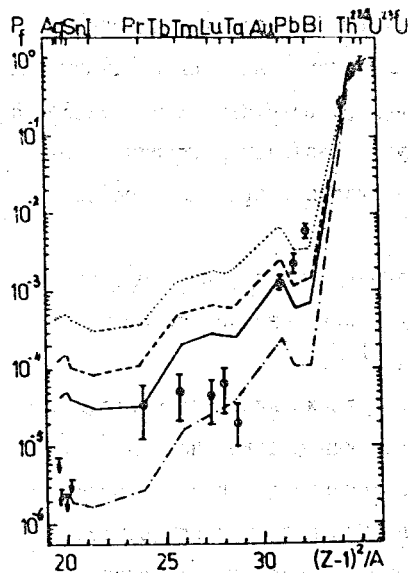


Рис. 4. Относительная вероятность деления ядер остановившимися пионами. Точки - наши данные; кривые - расчеты [15].

Полученная систематика вероятности безрадиационного деления для шести исследованных нами ядер приведена на рис. 3. Она показывает влияние находящегося на орбите $1s$ мюна на барьер деления. Если принять простой потенциальный барьер с параметром кривизны $\hbar\omega = 0,6$ МэВ, то, как показывает эта систематика, в присутствии мюна барьер деления повышается на $0,2 \pm 0,4$ МэВ.

Последняя, пятая глава посвящена исследованию деления ядер $Ag, Cd, In, Sn, Pr, Tb, Tm, Lu, Ta, Au, Pb, Bi, ^{232}Th, ^{235}U$ и ^{238}U остановившимися отрицательными пионами [12, 13].

Облучение мишеней производилось на медико-биологическом пионном пучке синхротрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Относительная вероятность деления указанных ядер была определена с помощью хорошо отоженных слядяных детекторов, находившихся в контакте с облучаемыми мишенями. При этом были сделаны отдельные измерения для определения возможного фона, обусловленного примесью урана в материалах мишеней и детекторов с применением лавсановых детекторов.

Полученная экспериментальная зависимость относительной вероятности деления ядер с $Z = 50 \div 92$ не противоречит теоретическим расчетам по жидко-капельной модели.

Кроме того, в работе [15] Ильиным и др. были проведены расчеты по вероятности деления ядер отрицательными пионами в предположении различных механизмов поглощения отрицательного пиона сложными ядрами, которые качественно описывают полученные нами данные (рис. 4.).

В этой главе также описывается результат исследования конкуренции между эмиссией нейтронов и делением в случае поглощения пионов ядрами ^{232}Th . Из экспериментальных исследований

реакции поглощения пионов на тяжелых ядрах известно, что множественность испаряемых при этом нуклонов, главным образом нейтронов, имеет широкое распределение. Для делящихся ядер конкуренция между делением и испарением нейтронов приводит к сужению распределения множественности нейтронов /15/, что и показано экспериментально в нашей работе /26/.

В заключении перечислены основные результаты работ, отраженных в диссертации, которые могут быть сформулированы следующим образом:

- 1). Создана быстродействующая многослойная ионизационная камера деления, позволяющая работать одновременно с разными изотопами делящегося вещества. Применение полупроводникового токового преусилителя, разработанного для ионизационной камеры деления, в сочетании с блоками быстрой электроники позволило получить разрешающую способность до 2,4 нс при большом фоне от альфа-частиц ($\sim 10^6$ распад. с^{-1}) в камере.
- 2). Разработаны система и методика измерения временного распределения актов деления, вызванного остановившимися отрицательными мюонами и пионами.
- 3). Разработана методика определения числа остановок мюонов в делящемся веществе путем одновременной регистрации актов деления (камера деления) и мезорентгеновского излучения (германиевый детектор).
- 4) Измерено временное распределение событий деления, вызванного остановившимися отрицательными мюонами для изотопов ^{232}Th , $^{235,238}\text{U}$, ^{237}Np и $^{239,242}\text{Pu}$. Это распределение для изотопов ^{237}Np и ^{242}Pu получено впервые.
- 5). Установлено соотношение мгновенного и запаздывающего делений для каждого из перечисленных элементов.

6). Определен выход деления на один акт остановки мюона для всех исследованных элементов.

7). Проведено сравнение вероятности безрадиационного деления с вероятностью фотodelения, которое показывает увеличение барьера деления в присутствии мюона на мезоатомной орбите $1s$. В предположении одногорбого потенциального барьера с параметром кривизны $\hbar\omega = 0,6$ МэВ указанное увеличение барьера составляет $0,2 \pm 0,4$ МэВ.

8). Измерена относительная вероятность деления ядер 15 элементов от серебра до урана остановившимися отрицательными пионами. Полученные значения относительной вероятности деления соответствуют расчетам, проведенным на основе капельной модели.

Исследования, результаты которых изложены в диссертации, проводились на синхротроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Результаты докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории, на заседаниях Комитета по структуре ядра, на Ученом совете ОИЯИ по физике низких энергий, на международных конференциях по ядерной физике в Мюнхене; по физике высоких энергий и структуре ядра в Санта-Фе и Лос-Аламосе. Они опубликованы в виде препринтов ОИЯИ и в журналах "Ядерная физика", "Nuclear Physics", "Nuclear Instruments and Methods", трудах упомянутых совещаний и конференций /5,6,7,12,13,18,26/.

1. E.Fermi et al. Phys. Rev., 71, 314, 1947.
2. J.A.Wheeler Phys. Rev., 73, 1252, 1948.
3. D.F.Zaretski and V.V.Novikov Nucl. Phys., 28, 177, 1961.
4. М.Я. Балац и др. ЭЭФ, 39, 1168, 1960.
5. K.Andert et al. Proc. of the Int.Conf. on Nucl. Physics, Munich, 1973, vol.1, p.609.
6. D.Chultem et al. Nucl. Phys., A247, 452, 1975.
7. В.М.Александров et al. Phys. Lett., 57B, 238, 1975.
8. J.Blocki et al. Phys. Lett., 42B, 415, 1972.
9. G.Leander and P.Moller Phys. Lett., 57B, 245, 1975.
10. С.М.Поликанов УФН, 107, 685, 1972.
11. S.D.Bloom Phys. Lett., 48B, 420, 1974.
12. Yu.A.Batusov et al. VI Int.Conf. on High Energy Phys. and Nucl. Structure, Santa-Fe and Los Alamos, Cont.Papers, p.117.
13. Ю.А.Батусов и др. Ядерная физика, 23, 1169, 1976.
14. Н.С.Иванова ЭЭФ, 29, 551, 1955.
15. A.S.Iljinov et al. Nucl. Phys., A268, 513, 1976.
16. H.Primakoff Rev. Mod. Phys., 31, 802, 1959.
17. B.Goulard and H.Primakoff Phys. Rev., C10, 2034, 1974.
18. K.Andert et al. Nucl. Inst. and Methods, 129, 397, 1975.
19. В.Н.Кононов и др. Препринт ФЭИ-143, 1968.
20. H.Backe Z. Phys., 241, 435, 1971.
21. В.Г.Винов и др. Ядерная физика, 2, 859, 1965.
22. W.Galbraith e.a. Phys.Mag., 44, 77, 1953; W.John e.a. Phys.Rev., 91, 1234, 1953; М.Петрашку и др. Докл. АН СССР, 126, 752, 1959; Г.Е.Беловицкий и др. ЭЭФ, 38, 404, 1960; P.Baertschi e.a. Helvetica Phys. Acta 4, 187, 1976.

23. Ю.К.Гаврилов и др. Ядерная физика, 24, 241, 1976.
24. M.W.Johnson et al. Phys. Rev., C15, 2169, 1977.
25. А.В.Игнатюк и др. ЭЭФ, 61, 1284, 1971; А.С.Солдатов и др. ЯФ, II, 992, 1970; Н.С.Работнов и др. ЯФ, II, 508, 1970; А.М.Khan et al. Nucl. Phys., A179, 333, 1972.
26. В.С.Бутцев и др. Препринт ОИЯИ, П5-10665, Дубна, 1977.
27. J.A.Diaz e.a. Nucl. Phys., 40, 54, 1963; B.Budick e.a. Phys. Rev. Lett., 24, 604, 1970; V.Cojocaru e.a. Phys. Lett., 20, 53, 1966; A.Buta e.a. Revue Roumaine de Phys., 16, 215, 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 марта 1978 года.