

2-26
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1 - 6179

А.М. Чатрчян

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ
ЯДЕРНОГО ЗАХВАТА МЮОНОВ И ПИОНОВ
С ВЫЛЕТОМ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Специальность 040 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1971

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

старший научный сотрудник

В.Г.ЗИНОВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

О.В.ЛОЖКИН

кандидат физико-математических наук

Р.А.ЭРАМЖЯН

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова

Автореферат разослан " " "

197 г.

Защита диссертации состоится " " "

1972 г.

на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Адрес: г. Дубна, Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных проблем.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Учёный секретарь Совета

кандидат физико-математических наук

Ю.А.БАТУСОВ

1 - 6179

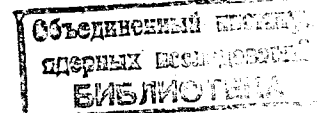
А.М.Чатрчян

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ
ЯДЕРНОГО ЗАХВАТА МЮОНОВ И ПИОНОВ
С ВЫЛЕТОМ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Специальность 040 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)



Процессы поглощения остановившихся отрицательных мюонов и пионов ядрами представляют собой весьма специфический источник информации о структуре ядра и окружающего его облака виртуальных частиц, поскольку в ядро вносится большая энергия и малый импульс. Захват отрицательных мюонов и пионов ядрами, как правило, сопровождается вылетом заряженных и нейтральных частиц. Заряженные частицы, испускаемые ядрами при поглощении мюонов или пионов, характеризуются сравнительно малыми энергиями, что ставит проблему их идентификации и определения энергетических спектров на уровень сложных экспериментальных задач. Это, в известной мере, оправдывает то положение, что несмотря на свою более чем двадцатилетнюю историю, вопросы о механизмах захвата мюонов и пионов ядрами остаются до сих пор неизученными.

Современное развитие экспериментальной техники, и, в первую очередь, техники полупроводниковых детекторов, позволило в настоящей работе поставить и успешно разрешить задачу надёжной идентификации заряженных частиц по массам, измерить их энергетические спектры и вероятности вылетов в процессах ядерного захвата остановившихся отрицательных мюонов и пионов.

Диссертация состоит из 4-х глав. В первой главе описана методика эксперимента, которая позволила успешно разделить по массам протоны / p /, дейтроны / d / и тритоны / t / и измерить их энергетические спектры.

Во второй главе описывается эксперимент по изучению эмиссии заряженных частиц от захвата остановившихся отрицательных мюонов ядрами Si , S , Ca и Cu .

В третьей главе диссертации описан эксперимент по изучению эмиссии заряженных частиц от захвата остановившихся отрицательных пионов ядрами Be , C , Al , S , Ca , Cu , Cd и Pb .

В четвертой главе сделана попытка качественного рассмотрения некоторых из полученных результатов, и в заключении приведены основные результаты и выводы из выполненных работ.

Диссертация написана на основе работ, участником которых был автор. Эксперименты выполнены на синхротронном канале Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в 1968–1971 г.г. Основные результаты диссертации изложены в опубликованных работах^{/1-3/} и доложены на 21-ом ежегодном совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Москва, 1971 г.), на 4-ой Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра (Дубна, 1971 г.).

ГЛАВА I. Для идентификации заряженных частиц по массам в области нерелятивистских энергий очень удобным является метод одновременного измерения ионизационных потерь dE/dx в тонком детекторе (dE/dx – счетчик) и полной энергии E в толстом детекторе (E – счетчик), в котором частица останавливается. Известно, что величина произведения $E(dE/dx)$ определяется самой частицей и практически не зависит от её энергии.

В настоящей работе в качестве dE/dx – счетчиков применялись тонкие полупроводниковые кремниевые поверхностно-барьерные детекторы. В качестве E – счетчиков были использованы спектрометры на основе монокристалла $CsJ(Te)$. Для успешного применения этого кристалла в целях идентификации заряженных частиц по массам и измерения их энергий необходимы точные данные по его световыхо-

дам при облучении соответствующими заряженными частицами. Ввиду отсутствия подобных сведений в настоящей работе были измерены световые выходы кристалла $CsJ(Te)$ от p , d и t в интервале энергий 10–100 Мэв.

Работа выполнена на протонном канале синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем. На рис. 1 приведена общая схема эксперимента. Первичный пучок протонов от ускорителя с энергией 680 Мэв падал на бериллиевую мишень (М). Образованные при этом вторичные заряженные частицы отбирались по импульсу с помощью отклоняющего магнита (ОМ), проходили через вакуумный тракт фокусирующего протонного канала (ВТ) и регистрировались с помощью телескопа со счетчиками dE/dx и E . На эксперименте проводился двухмерный анализ событий: измерялись энергия и ионизационные потери заряженных частиц с помощью многомерного анализатора АИ-4096 Измерительного центра ЛЯП. Эксперимент проводился на линии с ЭВМ Минск-22.

На рис. 2 приведена полученная зависимость световых выходов кристалла $CsJ(Te)$, выраженная в номерах каналов анализатора, от энергии заряженных частиц. Можно видеть, что для исследованного энергетического интервала световые выходы кристалла $CsJ(Te)$ от протонов, дейтронов и тритонов в пределах экспериментальных ошибок одинаковы и линейно зависят от энергии, выделяемой заряженными частицами в кристалле.

ГЛАВА 2. Первые экспериментальные исследования процессов поглощения остановившихся отрицательных мюонов ядрами с вылетом заряженных частиц показали, что полученную экспериментальную инфор-

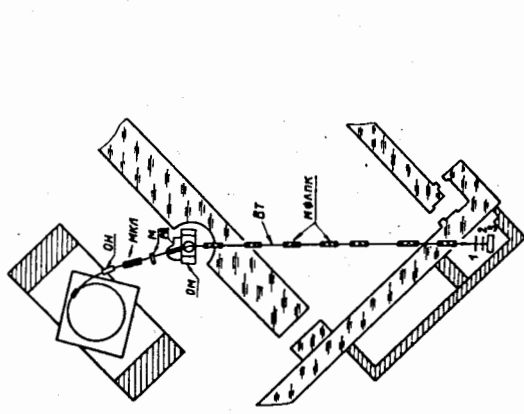


Рис. 1. Общая схема эксперимента.

ОП — отклоняющие насадки,
 МКД — магнитная квадруполь-
 ная линза,
 МФЛК — магнитная фокусиру-
 ющая линза протонно-
 го канала,
 I, 2, 3 — регистрирующий теле-
 скоп.

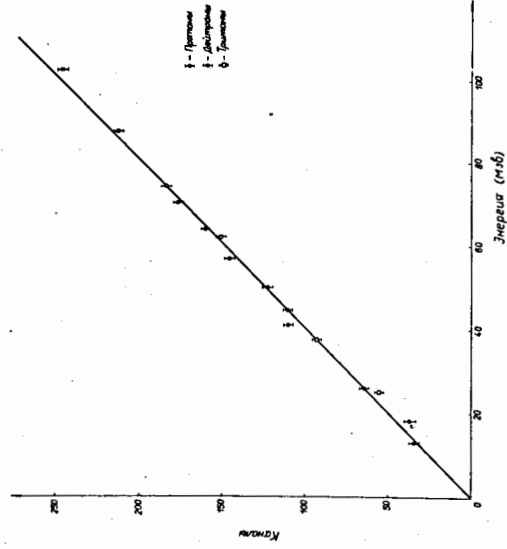


Рис. 2. Зависимость световыхода кристалла $CsJ(Te)$ от энергии заряженных частиц.

мацию невозможно истолковать на основе только исперительного механизма из-за большого выхода высокоэнергичных заряженных частиц /4/. Для интерпретации этих результатов пришлось привлечь также процессы прямого поглощения мюонов на двухнуклонных кластерах /5/. Однако недостаточно адекватная методика, использованная в предыдущих экспериментах, не позволяла вообще или позволяла только ограниченно /6/ идентификацию заряженных частиц по массам и, следовательно, сильно ограничивала возможности дальнейшего развития наших представлений о механизме захвата отрицательных мюонов сложными ядрами.

В настоящей работе удалось разделить ρ , d и t , измерить их энергетические спектры и вероятности вылетов соответственно при энергиях выше 15, 18 и 24 Мэв. Работа выполнена на мезонном канале синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем. На эксперименте использовался пучок отрицательных мюонов с импульсом 96 Мэв/с. На рис. 3 приведена блок-схема экспериментальной установки. В работе проводился трёхмерный анализ событий: измерялись энергия заряженной частицы, её ионизационные потери и время жизни мюона на данном ядре. Обработка экспериментальной информации проводилась с помощью ЭВМ БЭСМ-6.

На рис. 4 приведены энергетические спектры протонов и дейтронов, полученные от захвата мюонов на сере. Спектры, полученные на других ядрах, имеют подобный вид: они простираются до 50–60 Мэв и могут быть охарактеризованы плавной экспоненциальной зависимостью. Сравнение полученных энергетических спектров с имеющимися данными при малых энергиях заряженных частиц /7/ показывает, что с увеличением энергии испущенных частиц спектры начинают падать медленнее. Это говорит о смене доминирующего механизма захвата мюонов при пе-

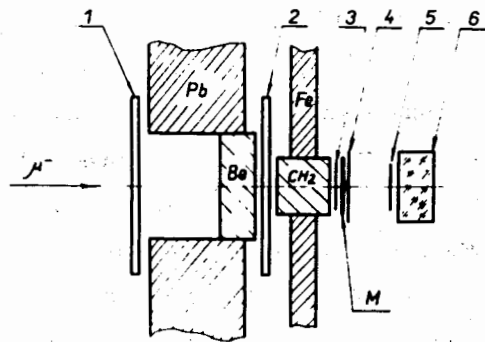


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки. 1, 2, 4 - сцинтилляционные счетчики, 3 и 5 - полупроводниковые детекторы, 6 - спектрометр, CsI , M - сменная мишень

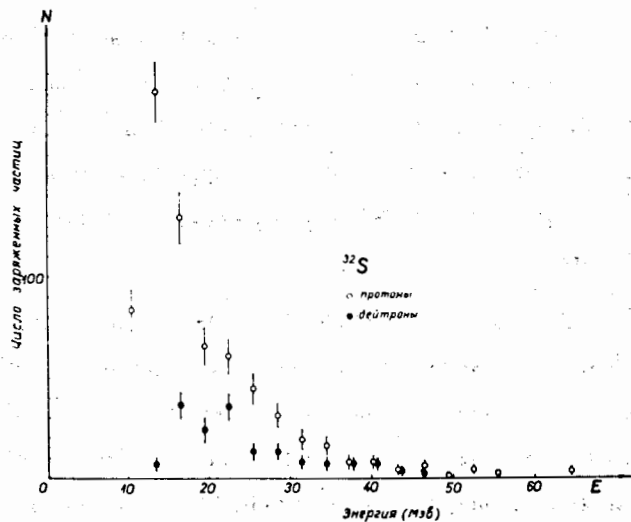


Рис. 4. Энергетические спектры протонов и дейтронов от захвата мюонов на сере.

реходе от малых энергий заряженных частиц, куда основной вклад дает резонансный механизм захвата^{/8/}, к большим энергиям, когда начинают преобладать процессы прямого захвата мюонов.

На рис. 5 приведены абсолютные вероятности вылетов протонов при разных пороговых энергиях в зависимости от заряда ядра. Плавные кривые для наглядности объединяют соответствующие экспериментальные точки. Можно видеть, что выход протонов на акт захвата при энергиях выше 15 Мэв растёт от $(8.75 \pm 0.64) \cdot 10^{-3}$ для кремния до $(13.4 \pm 1.05) \cdot 10^{-3}$ для кальция, где достигает максимума, а затем спадает до $(6.00 \pm 0.72) \cdot 10^{-3}$ для меди. В диссертации показано, что такая зависимость вероятности вылета протонов от заряда ядра может быть обусловлена эффектом поверхности и кулоновского барьера ядра.

Следует отметить полученную в работе сравнительно высокую эмиссию дейтронов и тритонов больших энергий. В частности, при захвате мюонов на кремнии относительный вклад дейтронов в полный выход заряженных частиц достигает 33%. С увеличением заряда ядра относительный выход дейтронов падает до 17% на меди (см. рис. 6). Высокий выход тяжелых однозарядных частиц больших энергий в процессах мю-захвата указывает на поглощение мюонов более сложными кластерами, чем двухнуклонными.

ГЛАВА 3. Согласно современным теоретическим представлениям и экспериментальным данным, при захвате остановившихся отрицательных пионов ядрами имеют место прямые процессы, при которых поглощение пионов идет на некоторой малонуклонной ассоциации ядра - кластере. Совокупность экспериментальных и теоретических работ, которые имеются в нашем распоряжении, ещё не в состоянии решить однозначно вопрос о механизме поглощения пионов ядрами. Поэтому дальнейшее уточ-

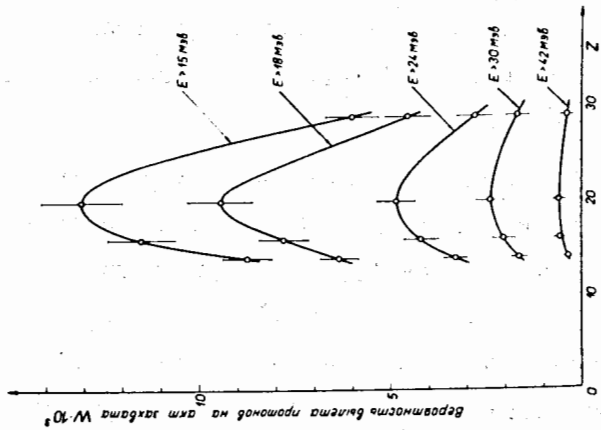


Рис. 5. Зависимость абсолютной вероятности вылета протонов при мю-захвате от заряда ядра.

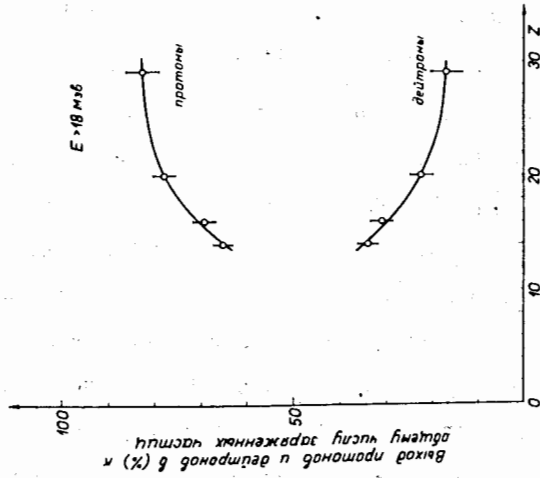


Рис. 6. Зависимость относительного выхода протонов и дейтронов при мю-захвате от заряда ядра.

нение и накопление новых экспериментальных результатов должны быть весьма желательны. Это положение, в известной мере, определило цели и задачи настоящего эксперимента, в котором со сравнительно хорошей статистикой были измерены энергетические спектры протонов, дейтронов и тритонов от захвата отрицательных пионов различными ядрами. Помимо этого, в настоящей работе были зарегистрированы случаи одновременного вылета двух высокоэнергичных ($E > 25$ Мэв у каждой) заряженных частиц под углом 180° друг к другу и дана оценка вероятности этого процесса.

Работа выполнена на мезонном канале синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем. На опыте использовался пучок отрицательных пионов с импульсом 180 Мэв/с. На рис. 7 приведена блок-схема экспериментальной установки. Регистрация заряженных частиц проводилась с помощью двухплечного телескопа с dE/dx и E -счётчиками. На эксперименте проводился четырехмерный анализ событий: для каждого события измерялись энергия и ионизационные потери заряженных частиц одновременно по обоим телескопам. Эксперимент проводился на линии с ЭВМ Минск-22.

Энергетические спектры заряженных частиц, полученные от захвата пионов на сере, показаны на рис. 8. Спектры, измеренные на остальных мишенях, имеют такой же характер и простираются до 90 ± 10 Мэв. На рис. 9 приведены вероятности вылетов протонов в зависимости от заряда ядра при разных пороговых энергиях. Плавные кривые для наглядности объединяют соответствующие экспериментальные точки. Можно видеть, что выход протонов, как и в процессах мю-захвата, имеет максимум на кальции. Есть экспериментальное указание на то, что максимум формируется в основном за счёт протонов сравнительно малых энергий.

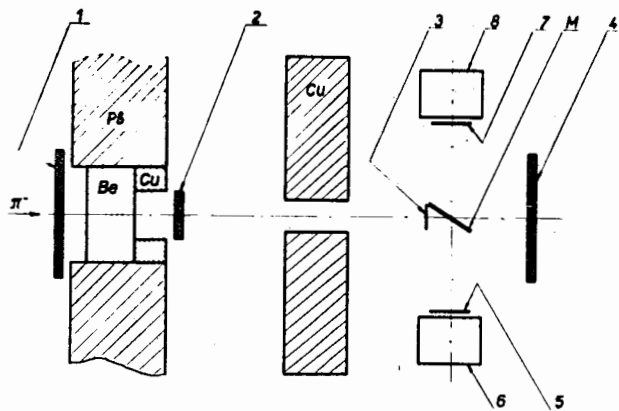


Рис. 7. Блок-схема экспериментальной установки. 1-4 - сцинтилляционные счетчики, 5 и 7 - полупроводниковые детекторы, 6 и 8 - спектрометры CsJ , M - сменная мишень.

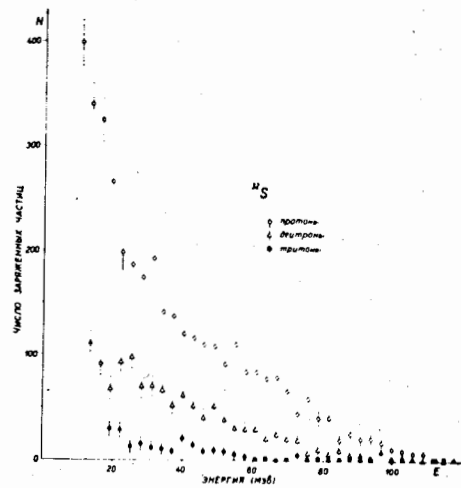


Рис. 8. Энергетические спектры заряженных частиц от захвата пионов на сере.

В области легких ядер имеет место существенное перераспределение между относительными вкладами высокоэнергичных ($E > 25$ Мэв) p , d и t : с увеличением заряда ядра доля протонов растет, а доли дейтронов и тритонов соответственно падают (см. рис. 10). В области тяжелых ядер зависимость от Z почти прекращается. Такое поведение относительных выходов заряженных частиц от заряда ядра в условиях кластерного механизма захвата пионов может быть связано со структурными свойствами легких и тяжелых ядер.

Большой выход тяжелых однозарядных частиц говорит о существенном вкладе механизма захвата пионов на более сложных кластерах, чем двухнуклонных. В связи с этим в работе проведено сравнение измеренных энергетических спектров заряженных частиц с теоретическими спектрами, рассчитанными на основе α -частичного механизма захвата пионов¹⁹⁾. Сравнение показывает, что в рамках только одного α -частичного механизма поглощения нельзя одновременно согласовать данные по эмиссии протонов, дейтронов и тритонов. В частности, наблюдается хорошее согласие в случае тритонов, однако при этом имеет место существенное расхождение между измеренным и рассчитанным спектрами для протонов. Это говорит о том, что в рассматриваемых процессах захвата к вылету высокоэнергичных протонов должен приводить и другой, по-видимому, двухнуклонный механизм захвата. Полученные результаты позволяют утверждать, что в процессах поглощения отрицательных пионов сложными ядрами нельзя говорить об одном каком-то механизме захвата. Для разных каналов реакций вклад того или иного механизма захвата должен быть разным.

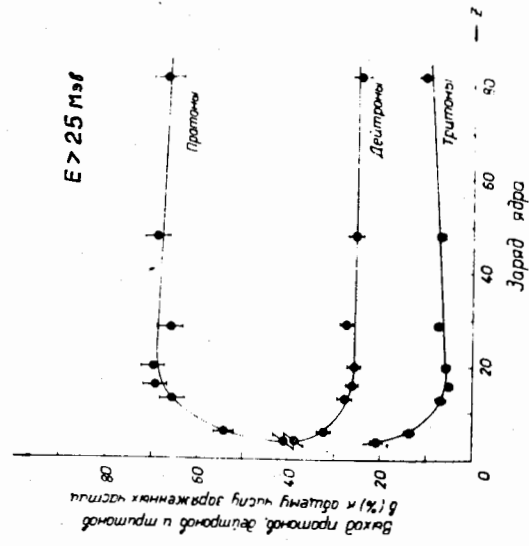


Рис. 10. Относительные выходы протонов, дейтронов и тритонов при пи-захвате в зависимости от заряда ядра

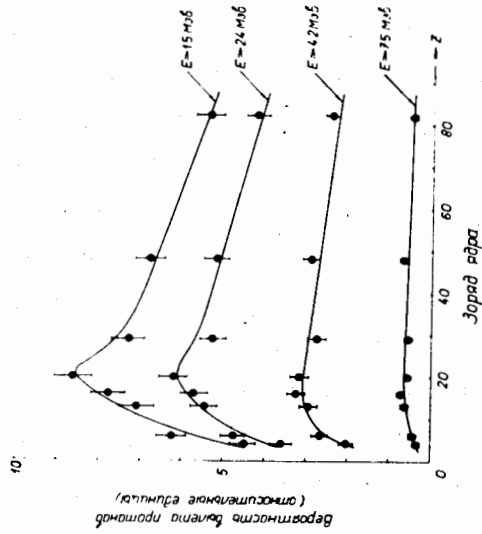


Рис. 9. Зависимость вероятности вылета протонов при пи-захвате от заряда ядра.

В ГЛАВЕ 4 отмечены качественно одинаковые результаты, полученные в экспериментах по мю-захвату и пи-захвату: вероятности вылетов протонов в зависимости от заряда ядра имеют максимумы, причем в обоих случаях на кальции, выход тяжелых однозарядных частиц на лёгких ядрах сравнительно велик и уменьшается в области тяжелых ядер, качественно одинаковую зависимость от заряда ядра испытывают относительные выходы заряженных частиц, энергетические спектры испущенных частиц в обоих процессах захвата имеют одинаковый - экспоненциальный характер и др.

Такие результаты наводят на мысль о том, что в процессах ядерного поглощения остановившихся мюонов и пионов механизмы захвата и вылета высокоэнергичных заряженных частиц настолько общие, что они практически полностью подавляют природу первоначального элементарного акта взаимодействия, в процессе которого в ядро вносится некоторая энергия (в случае мю-захвата - это слабое взаимодействие, а в случае пи-захвата - сильное). Можно полагать, что в условиях справедливости сделанного допущения процессы мю-захвата и пи-захвата, приводящие к эмиссии высокоэнергичных заряженных частиц, могут взаимно дополнять друг друга и, в известной мере, изучаться с единой точки зрения.

В этой же главе сделана попытка качественной интерпретации некоторых из полученных результатов и применительно к процессу мю-захвата проведен численный расчет для зависимости вероятности вылета протонов от заряда ядра в предположении, что захват идет на кластерах поверхностного слоя ядра. Показано, что с привлечением кулоновского барьера ядра можно смоделировать форму экспериментальной зависимости выхода протонов от заряда ядра с максимумом в области кальция.

В заключении диссертации приведены основные результаты и выводы из выполненных работ:

1) Создана экспериментальная аппаратура для идентификации однозарядных частиц по массам и измерения их энергий в области 10-100 Мэв.

2) Измерены линейность и световые выходы кристалла $CsJ(Tl)$ от протонов, дейтронов и тритонов в энергетической области 10-100 Мэв. Получено, что в рассматриваемой энергетической области световые выходы кристалла $CsJ(Tl)$ от p , d и t одинаковы и линейно зависят от энергии.

3) а) Впервые в процессах ядерного захвата мюонов проведено разделение высокоэнергичных ($E > 15$ Мэв), однозарядных частиц по массам. Со статистикой, в несколько раз превышающей суммарную мировую статистику, измерены энергетические спектры протонов и дейтронов, вылетающих при поглощении отрицательных мюонов ядрами Si , S , Ca и Cu . Измеренные энергетические спектры простираются до 50-60 Мэв и имеют плавный экспоненциальный характер.

Получены абсолютные вероятности вылетов протонов и дейтронов. Сделаны оценки для вероятностей вылетов тритонов.

б) Установлено, что вероятность вылета протонов в зависимости от заряда ядра имеет максимум на кальции. Показано, что максимум может быть обусловлен эффектом поверхности и кулоновского барьера ядра.

Абсолютный выход дейтронов падает с увеличением заряда ядра. Доля дейтронов в полном выходе заряженных частиц велика и достигает 33% для кремния.

в) На основании полученных результатов по эмиссии высокоэнергичных заряженных частиц в процессах мю-захвата сделан вывод о том, что поглощение мюонов идет и на более сложных кластерах, чем двухнуклонных.

4) а) Измерены энергетические спектры протонов, дейтронов и тритонов от захвата остановившихся отрицательных пионов ядрами Be , C , Al , S , Ca , Cu , Cd и Pb . Полученные энергетические спектры простираются до 90-110 Мэв.

б) Установлено, что вероятность вылета протонов в зависимости от заряда ядра, так же как и в процессах мю-захвата, имеет максимум на кальции.

Вероятности вылетов дейтронов и тритонов сначала быстро падают с увеличением Z , а затем остаются приблизительно постоянными. Относительные выходы дейтронов и тритонов в области лёгких ядер сравнительно велики и достигают на бериллии соответственно 40% и 20%.

в) На основании полученных и известных данных по захвату остановившихся пионов ядрами сделан вывод о том, что имеющаяся экспериментальная информация невозможно объяснить одним каким-то механизмом захвата. В частности, следует отметить существенный вклад поглощения пионов многонуклонными ассоциациями типа 3He , 4He и более сложными, особенно в лёгких ядрах.

5) Проведено сравнение результатов экспериментов по мю-захвату и пи-захвату и на основании большой общности между ними высказано предположение о том, что механизмы захвата отрицательных мюонов и пионов, приводящие к эмиссии высокоэнергичных частиц, практически не зависят от природы фундаментального взаимодействия, ответственного за

элементарный акт захвата и, в основном, определяются структурными свойствами ядер.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ю.Г.Будяшов, В.Г.Зинов, А.Д.Конин, А.И.Мухин, А.М.Чатрчян
ЖЭТФ, 60, 19 (1971).
2. Ю.Г.Будяшов, В.Г.Зинов, А.Д.Конин, А.И.Мухин, А.М.Чатрчян
ОИЯИ РІ-5682, Дубна (1971).
3. Ю.Г.Будяшов, В.Г.Зинов, А.Д.Конин, Н.В.Рабин, А.М.Чатрчян
ОИЯИ РІ-5977, Дубна (1971);
Доклад на IV Международной конференции по физике
высоких энергий и структуре ядра, Дубна, 1971.
4. S.Ishii. Prog. Theor.Phys., 21, 663 (1959).
5. P.Singer. Phys.Rev. 124, 1602 (1961).
6. А.О.Вейсенберг, Э.Д.Колганова, Н.В.Рабин. ЯФ, 1, 652 (1965).
7. S.E.Sobbotka, E.L.Wills, Phys.Rev.Lett. 20, 596 (1968).
8. V.V.Balashov, V.V.Beliaev, R.A.Gramjian, N.M.Kavachnik.
Phys.Rev.Lett. 9, 168 (1964).
9. В.М.Колыбасов. ЯФ, 3, 729 (1966).

Рукопись поступила в издательский отдел
21 декабря 1971 года.