



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1 - 8863

3-634 Валентин Григорьевич ЗИНОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ МЮОНОВ И ПИОНОВ ЯДРАМИ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1975

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

член-корреспондент АН СССР

И.И.Гуревич,

доктор физико-математических наук

А.П.Онучин,

доктор физико-математических наук

С.С.Герштейн.

Ведущее предприятие:

Институт экспериментальной и теоретической физики.

Автореферат разослан " " 1975 г.

Защита диссертации состоится " " 1975 г. в
часов на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проб-
лем Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических наук

Ю.А.Бетусов

1 - 8863

Валентин Григорьевич ЗИНОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ МЮОНОВ И ПИОНОВ ЯДРАМИ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Процесс поглощения остановившихся отрицательных мюонов и пионов является ценным и весьма специфическим источником физической информации. Это обусловлено тем, что при захвате в ядро вносится большая энергия и нулевой импульс. Идентификация продуктов реакции, взаимная корреляция вылета, их энергетические спектры дают возможность получить интересные сведения как о структуре ядра, так и механизме прямых реакций.

Несмотря на свою четвертьвековую историю, процессы поглощения мюонов и пионов оставались слабо изученными экспериментально. Это, в первую очередь, обусловлено трудностью постановки соответствующих экспериментов.

В физике частиц высоких энергий в последнее время идет серьезное обновление методики исследований, в основе которого лежит бурное качественное развитие электроники. Увеличилась надежность, долговечность элементов, расширились их функциональные возможности. Электронная аппаратура является сейчас материальной базой физического эксперимента. Мы убедились в этом на собственном опыте. Только серьезные и целенаправленные разработки системы логических блоков наносекундного диапазона, разработки пропорциональных камер с аналоговым съемом информации позволили нам успешно завершить цикл исследований по захвату мюонов и пионов ядрами, выполнить прецизионные измерения времени жизни положительного мюона. Именно поэтому в диссертации уделено большое внимание освещению методических вопросов.

Диссертация состоит из 5 глав. В первой главе описана система логических блоков наносекундного диапазона. Разработке пропорциональных камер с аналоговым съемом информации посвящена вторая глава. Описанию физических исследований посвящены остальные разделы диссертации, а именно: третья глава — испускание заряженных

частиц при захвате отрицательных мюонов ядрами Si, S, Ca и Cu , четвертая глава – испускание заряженных частиц при захвате отрицательных пионов ядрами Be, C, Al, S, Ca, Cu, Cd и Pb , и пятая глава – прецизионное измерение времени жизни положительного мюона.

Диссертация написана на основе работ, выполненных под руководством автора в 1967–1974 г.г. в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований. Основные результаты исследований опубликованы в статьях, сообщениях ОИЯИ и авторских свидетельствах /I-20/.

I.

К 1970 г. крупные исследовательские центры во всех экспериментах уже использовали системы логических блоков, способных работать по времени разрешения вплоть до диапазона наносекундных длительностей. Блоки взаимосогласованы по входным и выходным электрическим параметрам, питанию, выполнены в едином механическом стандарте. Это вызвано тем, что только блоки единой системы в состоянии обеспечить необходимую гибкость и взаимозаменяемость при проведении экспериментов. Весьма существенные и специфические требования на схемные решения приборов накладывает производство при массовом выпуске блоков. Желательно, чтобы блоки были просты, в том числе и в самой важной и квалифицированной части – настройке. Они должны быть просты не на бумаге, а по общему количеству затраченного на их производство времени, включая настройку. Полная система, разработанная нами с учетом высказанных выше положений, содержит около 40 наименований блоков /I-9/. Дополнительно принималось во внимание то, что она должна работать как единое целое в комплексе с измерительно-вычислительным центром ЛЯП. При

разработке мы стандартизовали не только механические размеры, но и многие схемные решения – такие, как защита входа от перенапряжений, выход, элементы формирования длительности сигналов и др. Это убыстрило и упростило разработку электрических схем, печатных плат и настройку готовых блоков. С помощью центральных экспериментальных мастерских ОИЯИ производство блоков было организовано в таком масштабе, что мы смогли обеспечить аппаратурой потребности всей лаборатории. К настоящему моменту выпущено и эксплуатируется более 2500 блоков. К аппаратуре проявили интерес страны-участницы ОИЯИ и многие организации. Многие из них смогли удовлетворить свои потребности через ЦЭМ, что указывает на надежность и технологичность наших разработок.

С учетом сказанного, сочтено возможным ограничиться описанием малой части блоков разного типа. Сюда относятся те из них, которые наиболее интересны, поскольку содержат нестандартные решения и могут дать общее представление о системе в целом. Среди них широкодиапазонный преобразователь время-амплитуда с электрическим разрешением 1,4 псек (см. рис. 1), совпадения с быстродействием свыше 100 Мгц и минимальным временным разрешением 1 нсек (см. рис. 2).

II.

Сами по себе плоские многоярусные пропорциональные счетчики известны давно. Работе их хорошо изучена. Тем не менее, возврат к пропорциональным счетчикам есть серьезный скачок в технике физического эксперимента. Основой этого скачка явилась могучая электронная техника современного периода – интегральные схемы, ЭВМ.

Пропорциональные камеры, используемые в повседневной практике физического эксперимента отличаются большим конструктивным

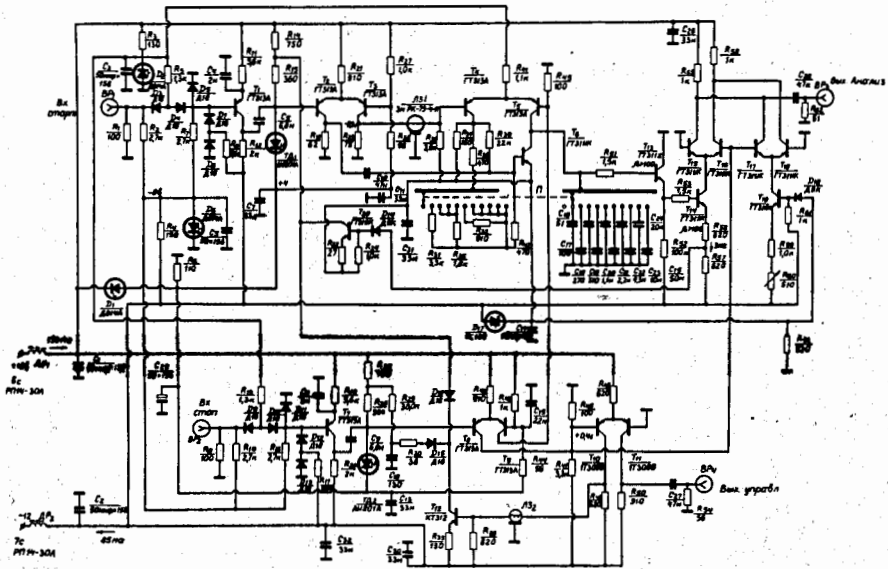


Рис. 1. Принципиальная схема широкодиапазонного преобразователя время-амплитуда с разрешением 1,4 псек.

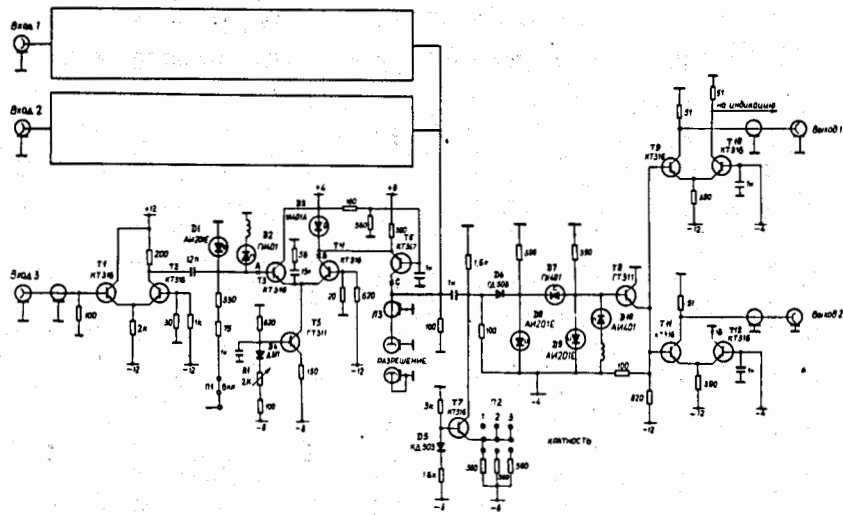


Рис. 2. Принципиальная схема блока совпадений с разрешением 1 нсек и быстродействием 100 Мгц.

многообразием. Тем не менее принципы съема информации с них довольно просты. С помощью пропорциональных камер для заряженных частиц можно определить координаты места пролета, время, ионизационные потери, число одновременно пролетевших частиц. Если определять все параметры для нескольких одновременно пролетевших частиц, то потребуется шифратор номера нитей, а на каждую нить - кодировщик времени, кодировщик ионизационных потерь. Пока этот случай нерешен. В жизни нужно от чего-то отказаться, тогда система информации упростится.

В области средних энергий множественность процессов невелика. Гораздо большее значение имеет сохранение возможности измерения ионизационных потерь частиц. Наши усилия как раз и были сосредоточены на разработке методов аналогового съема информации с пропорциональных камер и повышения точности определения координат частиц^{/10-16/}. В диссертации изложены только те методы, которые развиты нами впервые.

Предложения по использованию пропорциональной камеры для одновременного определения обеих координат места пролета заряженной частицы и ее ионизационных потерь очень экономичны и просты (см. рис. 3). Рассматривается обычная трехэлектродная конструкция камеры. Ток нити I , возникший после прохождения заряженной частицы через камеру, делится на две составляющие I_A и I_B обратно пропорционально сопротивлениям соответствующих участков цепи. Отношение токов I_A/I дает возможность определить одну координату, I_C/I - другую. При этом сам ток I пропорционален ионизационным потерям частицы.

Здесь необходимо обратить внимание на то, что на катодном электроде сигналы наводятся одновременно на несколько нитей. Величина сигнала на каждой нити определяется ее расстоянием от места

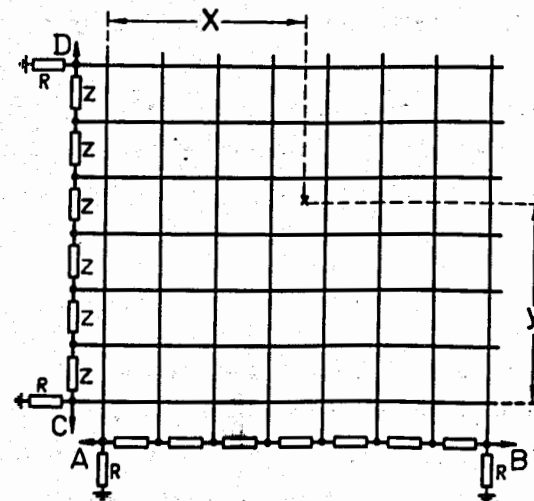


Рис. 3. Схема соединения нитей в пропорциональной камере.

возникновения лавины ионов на анодной нити. Ясно, что распределение наведенных зарядов на катодных нитях будет иметь симметричную форму. Возникшие токи будут суммироваться на концах потенциометра с весом, пропорциональным номеру нити. Фактически при этом будет измерено положение центра тяжести распределения наведенных зарядов. Это и позволяет измерять координату частицы с точностью, намного лучше, чем расстояние между нитями (см. рис. 4). И в ряде случаев потенциометрический метод съема информации имеет преимущество перед цифровым, например, таких, как измерение координат частиц падающих наклонно к плоскости камеры, измерение координат центра тяжести пучка, измерение координат гамма-квантов по положению центра тяжести образованного в конверторе электронно-фотонного ливня.

III.

Первые экспериментальные исследования процессов поглощения остановившихся отрицательных мюонов ядрами с вылетом заряженных частиц показали, что полученную экспериментальную информацию невозможно истолковать на основе только испарительного механизма из-за большого выхода высокоэнергичных заряженных частиц. Для интерпретации этих результатов пришлось привлечь также процессы прямого поглощения мюонов на двухнуклонных кластерах. Однако недостаточно адекватная методика, использованная в предыдущих экспериментах, не позволяла вообще или позволяла только ограниченно идентифицировать заряженные частицы по массам и, следовательно, сильно ограничивала возможности дальнейшего развития наших представлений о механизме захвата отрицательных мюонов сложными ядрами.

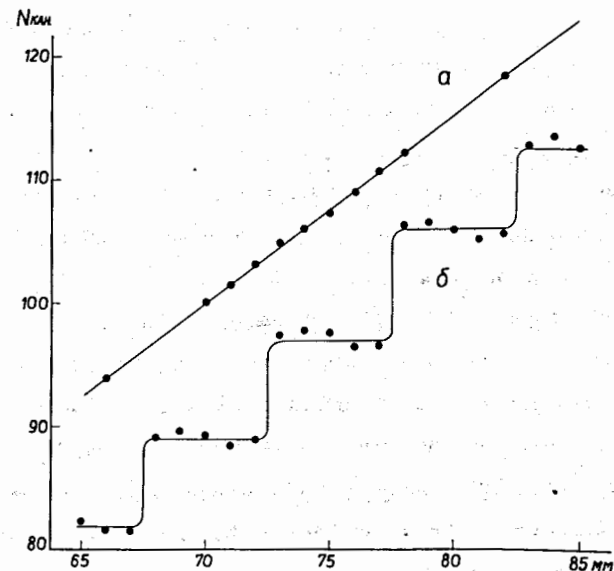


Рис. 4. Результаты измерения координат места пролета частиц при снятии сигналов с анодного (б) и катодного (а) электродов.

В наших работах /17, 18/ удалось разделить протоны, дейтроны и тритоны, 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. В эксперименте использовался пучок отрицательных мюонов с импульсом 96 Мэв/с. На рис. 5 приведена блок-схема экспериментальной установки. В работе проводился трехмерный анализ событий: измерялись энергия заряженной частицы, ее ионизационные потери и время жизни мюона на данном ядре. Обработка экспериментальной информации проводилась с помощью ЭВМ БЭСМ-6.

На рис. 6 приведены энергетические спектры протонов и дейтронов, полученные от захвата мюонов на сере и кремнии. 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 показывает, что с увеличением энергии испущенных частиц спектры начинают падать медленнее. Это говорит о смене доминирующего механизма захвата при переходе от малых энергий заряженных частиц, где основной вклад дает резонансный механизм захвата, к большим энергиям, когда начинают преобладать процессы прямого захвата мюонов.

На рис. 7 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 растет от $(8.7 \pm 0.6) \cdot 10^{-3}$ для кремния до $(13.4 \pm 1.0) \cdot 10^{-3}$ для кальция, где достигает максимума, а затем спадает до $(6.0 \pm 0.7) \cdot 10^{-3}$ для меди.

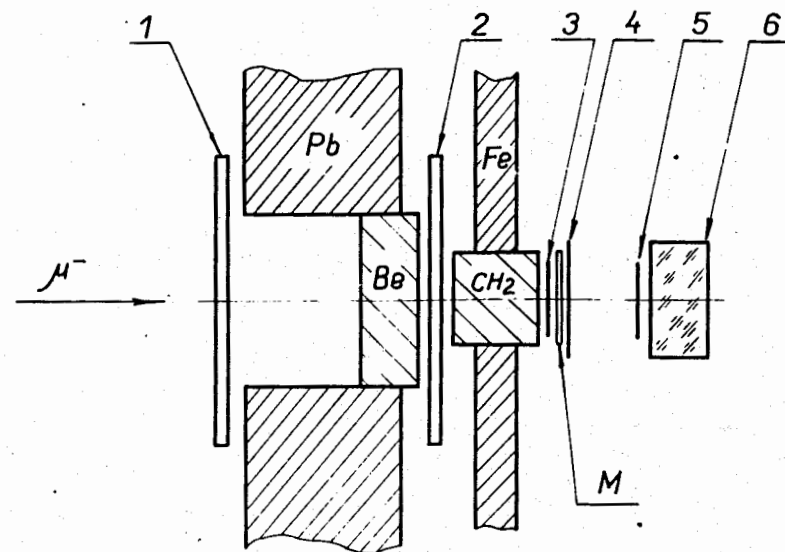


Рис. 5. Блок-схема установки (захват мюонов). 1, 2, 4 - сцинтилляционные счетчики; 3, 5 - полупроводниковые детекторы; 6 - спектрометр CsI; M - мишень.

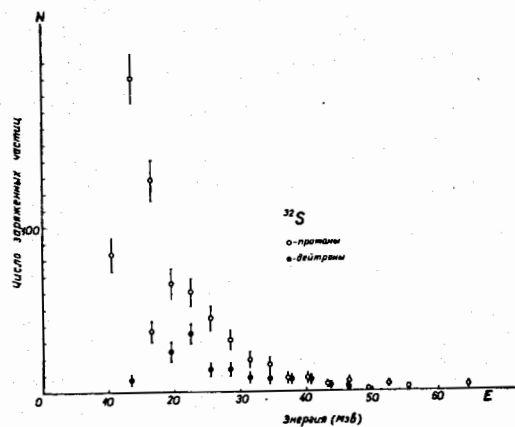
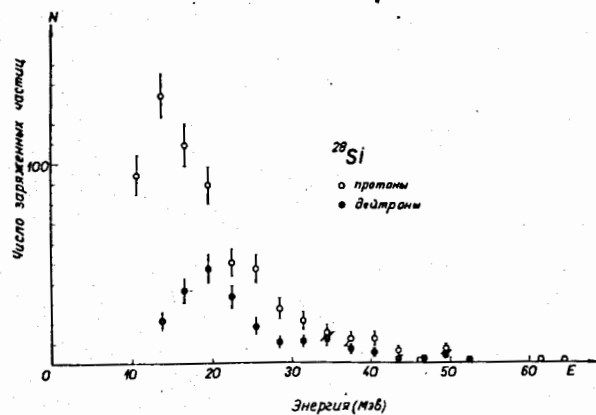


Рис. 6. Энергетические спектры протонов и дейтронов при захвате мюонов кремнием и серой.

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. Высокий выход тяжелых однозарядных частиц больших энергий в процессах мю-захвата указывает на поглощение мюонов более сложными кластерами, чем двухнуклонные.

IV.

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, еще не в состоянии решить однозначно вопрос о механизме поглощения пионов ядрами. Поэтому дальнейшее уточнение и накопление новых экспериментальных результатов весьма желательно. 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/19/.

Работа выполнена на мезонном канале синхротрона Лаборатории ядерных проблем. В опыте использовался пучок отрицательных пионов с импульсом 180 МэВ/с. На рис. 8 приведена блок-схема экспериментальной установки. Регистрация заряженных частиц проводилась с помощью двух телескопов с dE/dx и E -счетчиками. В эксперименте проводился четырехмерный анализ событий: для каждого

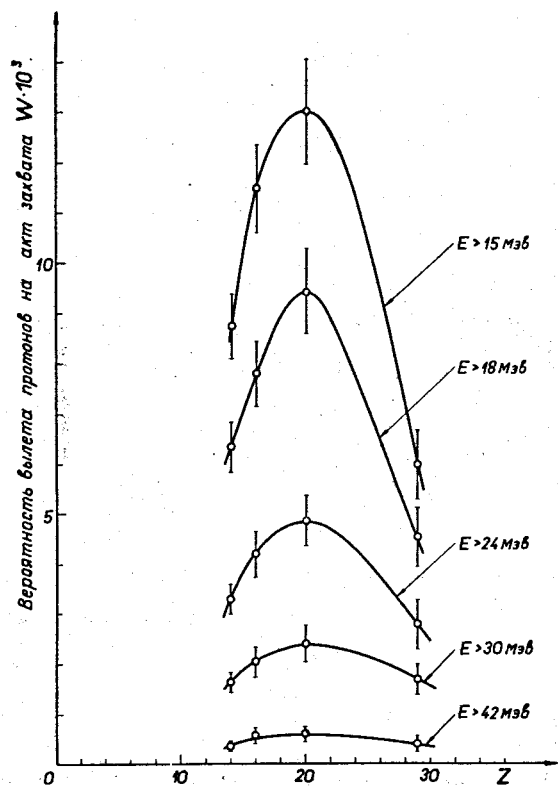


Рис. 7. Абсолютная вероятность вылета протонов (для разных порогов регистрации) при захвате мюонными ядрами в зависимости от их заряда.

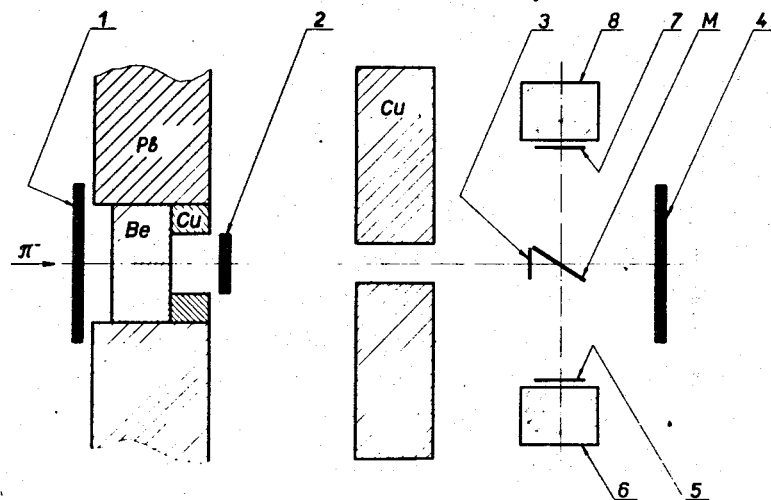


Рис. 8. Блок-схема установки (захват пионов). 1-4 - сцинтилляционные счетчики; 5-7 - полупроводниковые детекторы; 6, 8 - спектрометры Cu ; M - мишень.

события измерялись энергия и ионизационные потери заряженных частиц. Эксперимент проводился на линии с ЭВМ Минск-22.

Энергетические спектры заряженных частиц, полученные от захвата пионов на бериллии, показаны на рис. 9. Спектры, измеренные на остальных мишенях, имеют такой же характер и простираются до 90+110 Мэв. На рис. 10 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 счет протонов сравнительно малых энергий.

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 нейтронов и тритонов соответственно падают (см. рис. 11). 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 двухнуклонные. связи с этим в работе проведено сравнение измеренных энергетических спектров заряженных частиц с теоретическими спектрами, рассчитанными на основе α -частичного механизма захвата пионов^{/23/}. 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 (см.

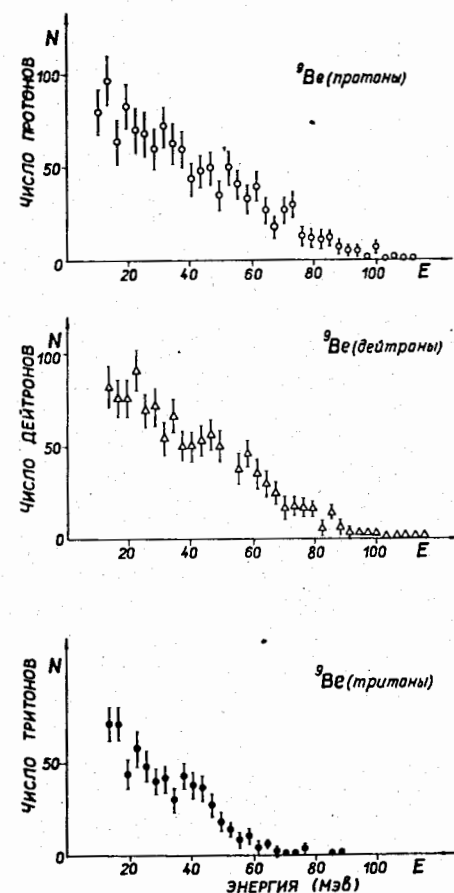


Рис. 9. Энергетические спектры заряженных частиц при захвате пионов бериллием.

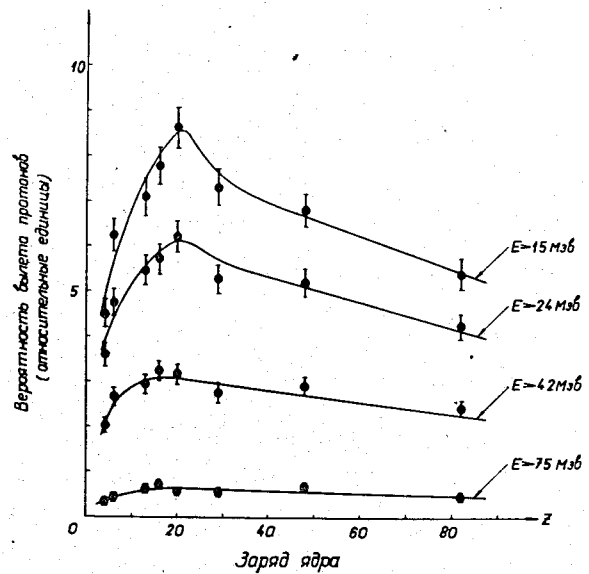


Рис. 10. Вероятность вылета протонов (для разных порогов регистрации) при захвате пионов ядрами в зависимости от их заряда.

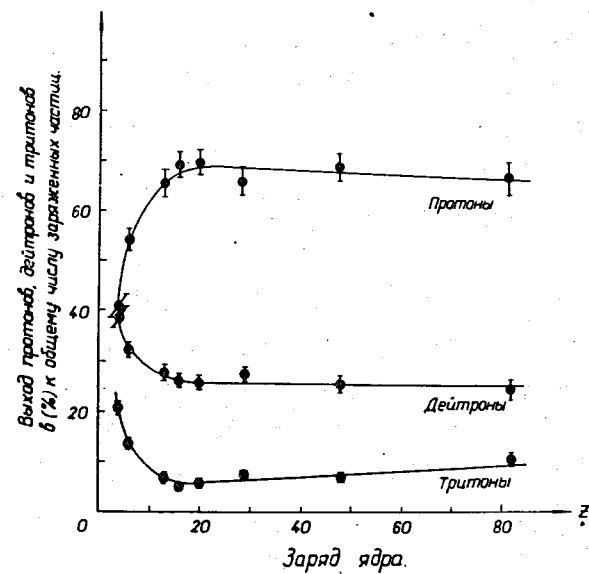


Рис. 11. Относительные выходы протонов, дейтронов и тритонов при захвате пионов ядрами в зависимости от их заряда.

рис. 12), 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.

У.

Прецизионное измерение времени жизни положительного мюона имеет большое значение для теории. Скорость распада мюона определяется процессом $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$, в котором участвуют только лептоны. В рамках (V-A)-теории это позволяет точно вычислить одну из фундаментальных величин физики - константу слабого взаимодействия^{/24/}:

$$G^2 = \frac{192 \pi^3 \hbar^7}{\tau_\mu m_\mu^5 c^4 (1 - m_e^2/m_\mu^2)} (1 + \delta),$$

где m_μ - масса мюона, m_e - масса электрона, δ - радиационная поправка, τ_μ - время жизни мюона. Существенно, что в настоящее время основная погрешность значения константы обусловлена ошибкой величины времени жизни мюона.

Анализ опубликованных работ выявил некоторые существенные методические ограничения на достижимую точность измерений времени жизни мюона. Так, в традиционной постановке аппаратура, регистрирующая позитрон от распада мюона, имеет малый телесный угол. Это снижает скорость набора статистики и затрудняет отбор полезных событий при сопоставлении актов регистрации позитрона с остано-

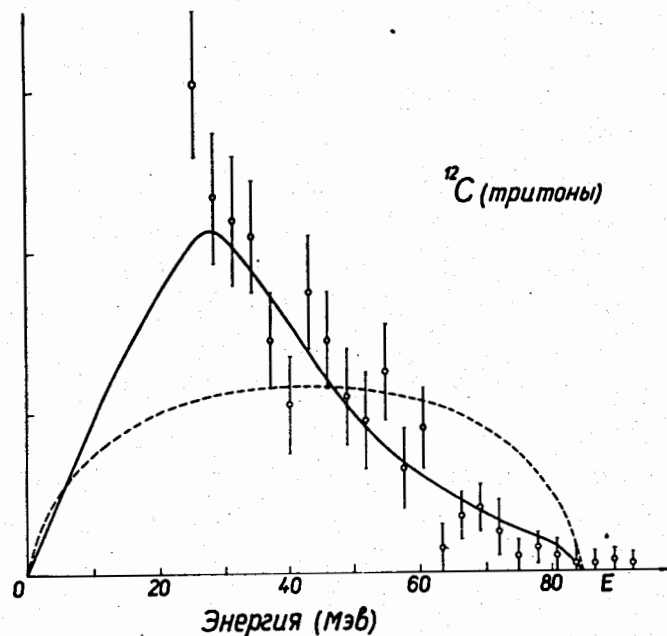


Рис. 12. Энергетический спектр тритонов при захвате пионов углеродом. Пунктир - спектр в приближении фазового объема, сплошная линия - расчет на основе альфа-частичного механизма захвата^{/23/}.

кой мюна. Остается много возможностей для проникновения фоновых событий. Малый телесный угол создает и другое существенное затруднение. Приходится считаться с возможным вкладом эффекта асимметрии вылетающих позитронов. Поэтому остаточное магнитное поле в месте остановки мюна необходимо доводить до уровня сотых и даже тысячных долей эрстеда. Кроме того, до сих пор недостаточно эффективно использовался тот факт, что позитроны распада высокоэнергетичны.

В основу методики измерений нами положена идея регистрации позитронов черенковским детектором в условиях 4π -геометрии^[20-22]. Это позволило резко повысить скорость набора статистики, уменьшить фон и подавить вклад эффекта асимметрии вылета позитронов.

На рис. 13 представлена блок-схема установки. Она состоит всего из трех детекторов. Сцинтилляционные счетчики 1 и 2 служат для регистрации влетающих мюонов. Водяной пороговый черенковский счетчик (ФЭУ 3, 4) регистрирует только позитроны распада. Энергия мюонов подбиралась такой, чтобы они останавливались в центре объема радиатора черенковского счетчика. В этих условиях телесный угол регистрации позитронов составляет 4π . При измерениях отбирались лишь те события, которые соответствуют появлению только одного мюона (стартового) и одного позитрона в течение длительности импульса ворот. В этом случае полученная кривая распада описывается простейшей формулой:

$$P(t) = A e^{-\lambda t} + B,$$

где t - время, λ - скорость распада мюона, A и B - постоянные.

Суммарная статистика, набранная нами за 100 часов работы ускорителя, составляет 10^9 полезных событий (см. рис. 14). Тща-

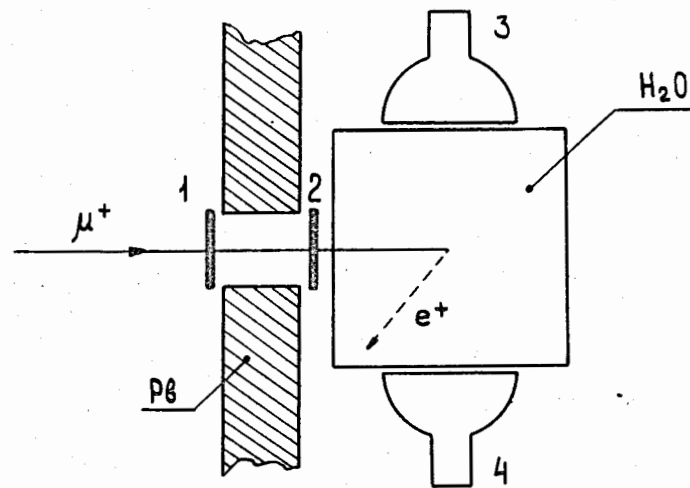


Рис. 13. Блок-схема установки (измерение времени жизни мюона)

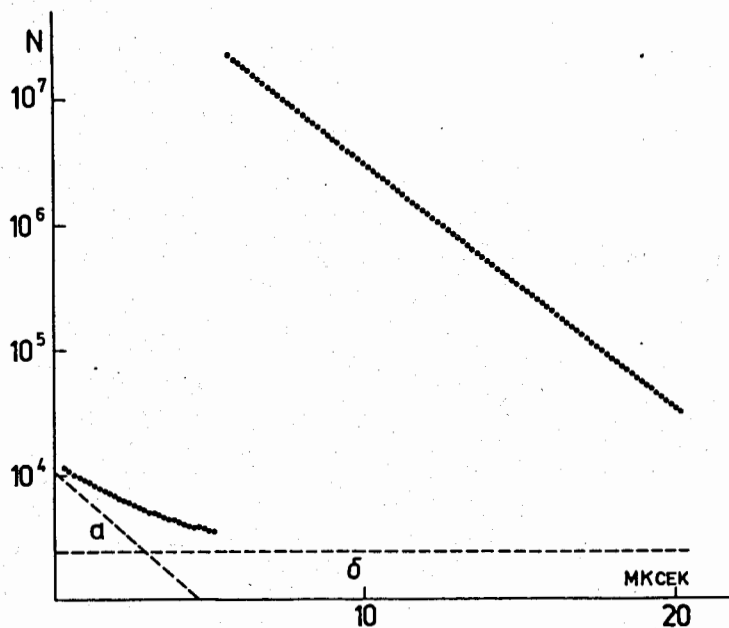


Рис. 14. Временной спектр позитронов от распада мюонов (за один сеанс).

тельный анализ возможных систематических ошибок показал, что они намного ниже достигнутого нами уровня статистической точности.

В качестве итога всего эксперимента (4 сеанса на ускорителе) мы получили следующее значение времени жизни положительного мюона:

$$\tau_{\mu} = (2,19711 \pm 0,00008) \text{ мксек.}$$

Для сравнения в таблице I оно приводится вместе с результатами предшествующих работ.

Таблица I

Лаборатория	Год	Время жизни мюона (мксек)
ЦЕРН	1962	$2,198 \pm 0,001$
Сиэтл	1972	$2,2026 \pm 0,0008$
Сакле	1973	$2,1973 \pm 0,0003$
Данная работа	1974	$2,19711 \pm 0,00008$

В итоге проделанной работы у нас имеется возможность существенно уточнить значение величины константы слабого взаимодействия, которая теперь равна:

$$G = (1,43583 \pm 0,00003) \cdot 10^{-49} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3.$$

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

I. Разработан широкий комплекс системы электронных логических блоков наносекундного диапазона. Новизна конструктивных решений закреплена авторскими свидетельствами. Организован мелкосерийный выпуск блоков в рамках ЛАП ОИЯИ, что позволило обеспечить стандартными блоками (2.500 шт) практически все эксперименты.

2. Впервые предложены и реализованы методы аналогового съема информации с пропорциональных камер, что позволяет одновременно измерять ионизационные потери частиц и две координаты места их пролета. Показано, что в ряде случаев потенциометрический метод съема информации, в отличие от цифрового, позволяет получить пространственное разрешение намного лучше, чем расстояние между нитями в камере.

3. Впервые измерены высокоэнергетические части спектров ($E > 15$ Мэв) протонов и дейтронов при захвате отрицательных мюонов ядрами Si, S, Ca, Cu . Показано, что энергетические спектры экспоненциально спадают до 50–60 Мэв. Получены абсолютные вероятности вылетов протонов и дейтронов. Сделаны оценки вероятностей вылетов тритонов.

4. Установлено, что выход протонов в зависимости от заряда ядра имеет максимум в районе кальция. Выход дейтронов с уменьшением заряда ядра увеличивается и достигает 30% от общего количества заряженных частиц для кремния. На основании полученных результатов можно утверждать, что при захвате мюонов ядрами процесс идет и на более сложных кластерах, чем двухнуклонные.

5. Измерены энергетические спектры протонов, дейтронов и тритонов при захвате пионов ядрами $Be, C, Al, S, Ca, Cu, Cd, Pb$. Все спектры простираются до 100 Мэв. Установлено, что вероятность вылета протонов в зависимости от заряда ядра так же, как и при мюонном захвате, имеет максимум в районе кальция.

6. Установлено, что выходы дейтронов и тритонов с уменьшением заряда ядра существенно увеличиваются и достигают, соответственно, 40% и 20% от общего выхода заряженных частиц на бериллии. На основании полученных нами и имеющихся данных можно утверждать, что процесс захвата отрицательных пионов невозможно описать каким-то

одним механизмом. Следует отметить существенный вклад поглощения пионов кластерами типа ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ и выше, особенно в области легких ядер.

7. Проведено измерение времени жизни положительного мюона. Регистрация позитронов черенковским детектором в условиях 4 - геометрии позволила резко увеличить скорость набора статистики, уменьшить фон, подавить ряд мешающих эффектов. Достигнутая точность в 4 раза лучше существующего мирового уровня.

$$\tau_{\mu} = (2,19711 \pm 0,00008) \text{ мксек.}$$

8. Измеренное значение времени жизни положительного мюона позволило уточнить величину константы слабого взаимодействия:

$$G = (1,43544 \pm 0,00003) \cdot 10^{-49} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3.$$

Достигнутая точность настоятельно требует дальнейшего улучшения точности расчетов радиационной поправки.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ю.Г.Будяшов, В.Г.Зинов. ПТЭ, 4, 102 (1968).
2. Ю.Г.Будяшов, В.Г.Зинов. Авторское свидетельство № 246576, Бюлл. изобр. № 21, 1969; ПТЭ, 1, 129 (1970).
3. Ю.Г.Будяшов, Ю.М.Валуев, В.Г.Зинов, Б.С.Краснобородов. ПТЭ, 6, 85 (1970).
4. Ю.Г.Будяшов, В.Г.Зинов, Б.С.Краснобородов. ПТЭ, 1, 114 (1972).
5. Ю.Г.Будяшов, В.Г.Зинов, В.М.Королев. Авторское свидетельство № 362427, Бюлл. изобр. № 2, 1973; ПТЭ, 1, 101 (1972).
6. В.М.Гребенюк, В.Г.Зинов, В.И.Николаев. ОИЯИ, 13-6510, Дубна, 1972.

7. В.Г.Зинов, Б.С.Краснобородов. ПТЭ, 1, 89 (1974).
8. В.Ф.Борейко, В.Г.Зинов. ОИЯИ, Р13-8324, Дубна, 1974.
9. В.Ф.Борейко, Ю.Г.Будяшов, Ю.М.Валуев, В.М.Гребенюк, В.Г.Зинов, Б.С.Краснобородов. ОИЯИ, 13-6396, Дубна, 1972.
10. В.Г.Зинов. Труды УІ Международного симпозиума по ядерной электронике. Сентябрь 1971 г., Варшава. ОИЯИ Д13-6210, Дубна, 1972.
11. В.Г.Зинов. Авторское свидетельство № 241553, Бюлл. изобр. № 14, 1969.
12. В.А.Биряков, В.Г.Зинов, А.Д.Конин. ЖЭТФ, 58, 104 (1970).
13. В.А.Биряков, В.Г.Зинов, А.Д.Конин. ПТЭ 2, 36 (1971).
14. В.А.Биряков, В.Г.Зинов, А.Д.Конин. ПТЭ 2, 65 (1971).
15. В.А.Биряков, В.Г.Зинов, А.Д.Конин, А.Н.Пономарев. ПТЭ 2, 4 (1972).
16. В.А.Биряков, В.М.Вехтель, Н.А.Головков, В.Г.Зинов, А.Д.Конин, С.И.Ормэнджиев. ОИЯИ, Р13-7755, Дубна, 1974 г.
17. Ю.Г.Будяшов, В.Г.Зинов, А.Д.Конин, А.И.Мухин, А.М.Четрчан. ЖЭТФ, 60, 19 (1971).
18. Ю.Г.Будяшов, В.Г.Зинов, А.Д.Конин, А.И.Мухин, А.М.Четрчан. ОИЯИ, Р1-5682, Дубна, 1971.
19. Ю.Г.Будяшов, В.Г.Зинов, А.Д.Конин, Н.В.Рабин, А.М.Четрчан. ЖЭТФ, 62, 21 (1972).
20. М.П.Белендин, В.М.Гребенюк, В.Г.Зинов, А.Д.Конин, А.Н.Пономарев. ЖЭТФ, 67, 1631 (1974).
21. М.П.Белендин, В.Г.Зинов, А.Н.Пономарев. ОИЯИ Б1-13-8761, Дубна, 1975.
22. М.П.Белендин, В.Г.Зинов, А.Н.Пономарев. ОИЯИ, Б1-13-8762, Дубна, 1975.
23. В.М.Колыбасов. ЯФ, 3, 729 (1966); ЯФ, 3, 964 (1966).
24. M. Roos, A. Sirling, Nucl. Phys. B29, 296 (1971).

Рукопись поступила в издательский отдел
13 мая 1975 года.