



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б-287

1 - 12468

БАТУСОВ  
Юрий Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЯДРА  
В ПРОЦЕССАХ ДВОЙНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ  $\pi$ -МЕЗОНОВ  
И ЗАХВАТА  $\pi^-$  И  $\mu^-$ -МЕЗОНОВ ЯДРАМИ

Специальность 01.04.16 - физика ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1979

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
профессор В.И. Остроумов,

доктор физико-математических наук  
профессор Ю.А. Шербаков,

доктор физико-математических наук  
Н.С. Амаглобели.

Ведущее предприятие:

Институт физики высоких энергий (г. Серпухов).

Автореферат диссертации разослан " " 1979 г.

Защита диссертации состоится " " 1979 года  
в часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03  
при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных  
исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

За Ученого секретаря  
Специализированного совета  
доктор физико-математических наук  
профессор

Л.И. Липидус

С момента получения мезонных пучков на ускорителях исследования взаимодействий  $\Pi$ - и  $\Lambda$ -мезонов со сложными ядрами являются предметом широкого и все более возрастающего интереса. Такое положение объясняется тем, что ядерные силы в значительной степени определяются  $\Pi$ -мезонным полем, а продукт распада  $\Pi$ - мезона - мюон - есть тот загадочный "тяжелый" электрон, проникновение в тайны которого современная наука связывает с важнейшим этапом в понимании свойств элементарных частиц. Поэтому детальное исследование свойств  $\Pi$ - и  $\Lambda$ -мезонов и их взаимодействий с нуклонами и сложными ядрами может внести значительный вклад в познание природы внутриядерных сил.

В ряду таких исследований открытие явления двойной перезарядки пионов на ядрах представляет совершенно новое уникальное направление в изучении свойств ядерной материи<sup>/1/</sup>. В этих процессах при двойной перезарядке пионов атомные ядра могут испытывать переходы в изобарные состояния с изменением заряда на две единицы. Исследование же переходов с  $\Delta T_z = \pm 2$  в ядрах очень важно при изучении структуры ядер, их аналоговых состояний с большим избытком нейтронов или протонов и для детального изучения парных корреляций нуклонов в ядрах.

Интересную возможность открывает использование реакций двойной перезарядки пионов для образования новых атомных ядер, неизвестных в настоящее время. Особенно информативными могут оказаться результаты исследования таких реакций для изучения различных свойств легких ядер. Экспериментальные данные, полученные в этих процессах, из-за относительной простоты механизмов содержат прямую информацию о структуре ядер и чрезвычайно критичны к их модельному описанию. Такие исследования позволяют всесторонне изучить очень интересную особенность легких ядер - существование в них коррелированных групп нуклонов и нуклонных ассоциаций. Наряду с процессами двойной перезарядки пионов, в этих исследованиях может быть весьма эффективно использован ядерный захват медленных отрицательных  $\Pi$ -мезонов.

Чувствительность процессов поглощения  $\Pi$ -мезонов легкими ядрами к явлениям нуклонного ассоциирования объясняется тем, что  $\Pi$ -мезон может поглотиться нуклоном в присутствии других нуклонов. Согласно законам сохранения, он должен передать избыток энергии и импульса одному или нескольким партнерам. Вероятность пере-

распределения энергии и импульса, вносимых  $\Pi$ -мезонами между нуклонами, принадлежащими той или иной ассоциации, в легких ядрах будет определяться особенностями структуры, которая теоретически может быть отражена в модельных волновых функциях состояний ядер. Большая энергия, вносимая остановившимся  $\Pi$ -мезоном в ядро- $E_{\Pi} = 139,6$  МэВ, позволяет рассматривать процессы поглощения  $\Pi$ -мезонов легкими ядрами как прямые.

Хорошим дополнением к исследованиям структуры легких ядер в процессах с  $\Pi$ -мезонами служит экспериментальное и теоретическое изучение ядерного захвата мюонов с вылетом заряженных частиц. Вылет таких частиц не связан непосредственно с элементарным актом поглощения  $\mu^-$ -мезона и обусловлен наличием в ядре корреляций между нуклонами. С одной стороны, корреляции приводят к формированию в ядре различных коллективных состояний. Через коллективные состояния типа гигантского резонанса идет преимущественно процесс поглощения мюонов. Распад этих состояний в ряде случаев приводит к испусканию заряженных частиц. С другой стороны, корреляции короткоживущего типа приводят к эффектам ассоциирования нуклонов в ядре.

Таким образом, описание процессов расщепления ядер пионами и мюонами глубоко затрагивает многие аспекты ядерной структуры и механизмов реакций взаимодействия этих частиц, что позволяет всесторонне проверить многие предположения, положенные в основу построения теории взаимодействия  $\Pi$ - и  $\mu$ -мезонов с атомными ядрами.

Комплексному исследованию этих вопросов и посвящены представленные в диссертации результаты экспериментальных и теоретических работ, которые были выполнены автором в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и в Центре ядерных исследований Страсбурга-Кроненбурга (Франция) за период с 1967 по 1978 годы и опубликованы в журналах и препринтах ОИЯИ/1-24/. Основные результаты исследований докладывались на международных конференциях по физике, которые состоялись в Нью-Йорке (1969 г.), Бохуме (1969 г.), Гренобле (1970 г.), Барселоне (1970 г.), Страсбурге (1971 г.), Дубне (1971 г.), Упсале (1973 г.), Санта Фе (1975 г.), Питсбурге (1976 г.) и содержатся в материалах этих конференций.

Диссертация состоит из девяти глав, объединенных в три части, и двух приложений.

Первая часть (главы I, II и III) посвящена всестороннему

анализу явления двойной перезарядки  $\Pi$ -мезонов, открывающему новое направление в исследовании структуры атомных ядер в процессах взаимодействия частиц высоких энергий с ядрами/1-10/.

Во второй части (главы IV, V, VI) рассмотрены основные методические вопросы постановки экспериментов и обработки результатов измерений в ядерных фотоэмульсиях/2/. Представлены результаты наиболее полного в настоящее время комплексного исследования многочастичных процессов захвата  $\Pi$ -мезонов легкими ядрами ( $C, N, O$ ) в фотоэмульсии с образованием в конечном состоянии ядра  $^8Li$  и описаны поисковые эксперименты по обнаружению нейтронных ядер/11-17/.

В третьей части диссертации (главы VII, VIII и IX) приведены результаты детального изучения общих характеристик вылета заряженных частиц в процессах захвата мюонов ядрами в фотоэмульсии/19-21/. Подробно проанализированы впервые полученные экспериментальные данные по исследованию определенных реакций поглощения остановившихся  $\mu^-$ -мезонов ядрами углерода, азота и кислорода с образованием  $^8He$ ,  $^8Li$  и  $^8B$  и двух важных, с точки зрения проверки резонансной модели поглощения мюонов, каналов с испусканием заряженных частиц при захвате мюонов ядрами  $^{12}C$  и  $^6Li$ /18,22-24/.

Весь представленный в диссертации цикл исследований был выполнен автором в совместных работах, в которых на разных этапах принимали участие теоретики и экспериментаторы из ОИЯИ, ИФВЭ, НИИЯФ МГУ, ЕРФИ, ТашПИ, ТГУ, Центра ядерных исследований Страсбурга-Кроненбурга (Франция), ИЯИЯЭ и ВХТИ (София, НРБ), Ясского университета (СРР) и ИФМ (Улан-Батор, МНР).

Ниже кратко излагается содержание диссертации.

## I.

### Исследование структуры ядра в процессах двойной перезарядки $\Pi$ -мезонов

В первой главе рассматриваются результаты различных экспериментов и теоретических расчетов, посвященных анализу свойств конечных состояний ядер в процессах двойной перезарядки пионов.

В результате реакции двойной перезарядки  $\Pi$ -мезонов два протона начального ядра переходят в два нейтрона или два нейтрона - в два протона в реакции  $\Pi^+ \rightarrow \Pi^-$ . Этот процесс подобен

двухдырчному - двухчастичному возбуждению ядра-мишени. Для определенной мишени может существовать много различных типов таких возбуждений. Следовательно, для детального анализа конечных состояний, образующихся в реакциях  $\Pi^{\pm} \rightarrow \Pi^{\pm}$ , необходимо иметь достаточно большое количество событий для каждого индивидуального канала. Впервые проведенный нами систематический анализ числа вторичных заряженных частиц, испускаемых в процессах двойной перезарядки положительных и отрицательных пионов на ядрах в фотоэмульсии (рис. 1)<sup>3,25/</sup>, показал, что из всех возможных каналов реакций двойной перезарядки  $\Pi^{\pm}$ -мезонов наиболее вероятными являются те, которые соответствуют испусканию одного или двух протонов (или нейтронов при двойной перезарядке отрицательных  $\Pi$ -мезонов). А это означает, что процесс двойной перезарядки пионов происходит главным образом на паре нуклонов и что этой паре передается заметная часть кинетической энергии первичного  $\Pi$ -мезона.

Детальный анализ каналов реакций двойной перезарядки  $\Pi$ -мезонов, когда в конечном состоянии имеется два протона (или два нейтрона) и связанное ядро-остаток, очень интересен для изучения процессов двухдырчного возбуждения в ядрах. С помощью фотоэмульсионной методики была предпринята попытка найти соотношения всех возможных каналов возбуждения в процессах двойной перезарядки  $\Pi^{\pm}$ -мезонов на ядрах  $^{12}\text{C}$  в интервале энергий (100-300) МэВ<sup>3/</sup>. С этой целью был создан комплекс программ обработки ядерных взаимодействий в фотоэмульсионных камерах на основе результатов измерений пробегов и углов заряженных частиц<sup>2/</sup>. Анализ соотношений различных каналов реакций на углероде, входящем в состав фотоэмульсии, произведенный с помощью ЭВМ (БЭСМ-6, СДС-6400 и IBM 360/65), указал на большое преимущество канала  $\Pi^{\pm} + ^{12}\text{C} \rightarrow \Pi^{\pm} + 2\alpha + 4p$ , что хорошо согласуется с предположением о  $3\alpha$ -частичной модели основного состояния ядра  $^{12}\text{C}$ . Полные поперечные сечения двойной перезарядки  $\Pi^{\pm}$ -мезонов на углероде в исследуемом интервале энергий были впервые измерены в Центре ядерных исследований Страсбурга-Кроненбурга методом пропановой пузырьковой камеры, помещенной в магнитное поле (таблица 1)<sup>3/</sup>.

Таблица I

Полные поперечные сечения реакций двойной перезарядки  $\Pi^{\pm}$ -мезонов на ядрах  $^{12}\text{C}$

Кинетическая энергия первичного $\Pi^{\pm}$ -мезона (МэВ)	Полное сечение /мб/
138 $\pm 21$	1,24 $\pm 0,38$
204 $\pm 20$	1,85 $\pm 0,38$
228 $\pm 28$	4,0 $\pm 2,0$ -1,5

Следующей общей особенностью рассматриваемого процесса, исходящей из анализа конечных состояний, является очень малая вероятность двухчастичных каналов реакции двойной перезарядки, в которых осуществляется переход первичного ядра в основное или низковозбужденные состояния ядра-остатка. Примером исследования таких каналов являются эксперименты, посвященные изучению реакций  $\Pi^{\pm} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow \Pi^{\pm} + ^{209-x}\text{At} + xh$ , в которых при двойной перезарядке  $\Pi$ -мезона из ядра-мишени не испускаются заряженные частицы, и заряд исходного ядра увеличивается на две единицы<sup>4/</sup>. Идентификация изотопов астата или дочернего продукта - полония - производилась путем регистрации  $\alpha$ -частиц и измерения их энергии.

Эксперименты выполнялись на синхротронном циклотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Мишень из химически чистого препарата  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  облучалась в течение пяти часов в пучке  $\Pi^{\pm}$ -мезонов с энергией 90 МэВ. Образованные в результате реакции атомы астата после окончания облучения выделялись специальным химическим методом и наносились на серебряный диск площадью 1 см<sup>2</sup>. Спектр  $\alpha$ -частиц измерялся в течение 15 часов на полупроводниковом спектрометре с Au-Si-детектором и амплитудным анализатором на 512 каналов. Результаты измерения спектра  $\alpha$ -частиц для препаратов астата, выделенных из висмута после облучения  $\Pi^{\pm}$ -мезонами, показаны на рис. 2. На том же рисунке представлен спектр  $\alpha$ -частиц для препаратов астата, выделенных из мишени после облучения  $\Pi$ -мезонами. Потoki мезонов, прошедших через мишень, в обоих случаях были одинаковы. Облучение  $\Pi$ -мезонами является фоновым опытом, который позволяет в данном случае наиболее полно исключить

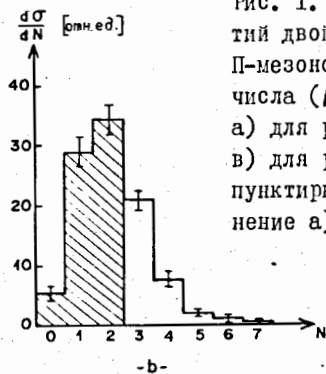
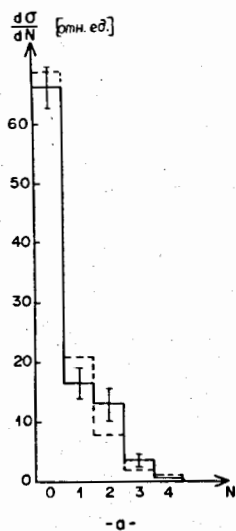


Рис. 1. Распределение событий двойной перезарядки  $\Pi$ -мезонов в зависимости от числа ( $N$ ) лучей в звезде: а) для реакции  $\Pi^- \rightarrow \Pi^+$ , в) для реакции  $\Pi^+ \rightarrow \Pi^-$ ; пунктирная линия - сравнение а) и в).

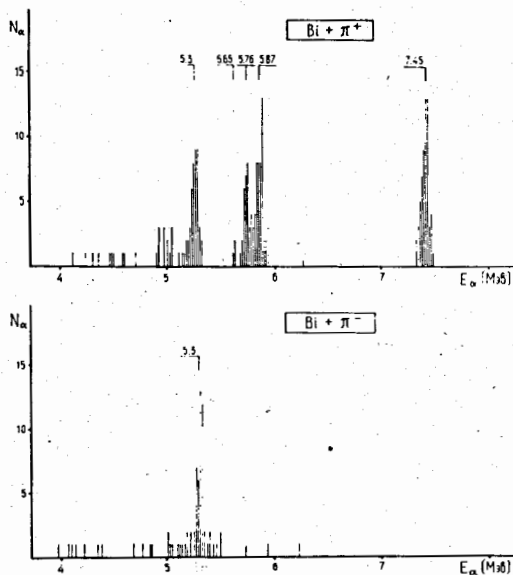


Рис. 2. Результаты измерения спектров  $\alpha$ -частиц для препаратов астата, выделенных после облучения: а)  $\Pi^+$ -мезонами, в)  $\Pi^-$ -мезонами.

возможные имитирующие эффекты. При расшифровке спектрограмм зарегистрированные линии спектра были отнесены к изотопам  $^{210}\text{Po}$  (5,3 МэВ),  $^{207}\text{At}$  (5,76 МэВ),  $^{211}\text{At}$  (5,87 МэВ) и  $^{211}\text{Po}$  (7,45 МэВ).

Эффектом реакций двойной перезарядки  $\Pi^+$ -мезонов на ядрах висмута в данном эксперименте является образование астата-207, который зарегистрирован по  $d$ -излучению,  $E_\alpha = 5,76$  МэВ. Интегральная интенсивность  $d$ -линии позволяет определить сечение реакции  $\sigma(\Pi^+ + {}^{209}\text{Bi} \rightarrow \Pi^- + {}^{207}\text{At} + 2n) = (12 \pm 3) \cdot 10^{-29} \text{ см}^2$ . Для упругой перезарядки  $\Pi^+ + {}^{209}\text{Bi} \rightarrow \Pi^+ + {}^{209}\text{At}$  может быть произведена лишь оценка верхней границы величины по трем отсчетам, соответствующим  $d$ -частицам с энергией 5,65 МэВ, она равна  $\sigma(\Pi^+ + {}^{209}\text{Bi} \rightarrow \Pi^+ + {}^{209}\text{At}) \leq 1 \cdot 10^{-29} \text{ см}^2$ .

Таким образом, при двойной перезарядке  $\Pi^+$ -мезонов на ядрах висмута в реакциях без испускания заряженных частиц преобладающую роль имеют каналы с вылетом двух или нескольких нейтронов. Этот результат находится в согласии с оценками, полученными фотоэмульсионным методом (рис. 1г) [5, 25].

Средняя энергия, которая передается ядру в процессе двойной перезарядки по результатам работ [3, 5, 25], составляет 60–80 МэВ. Воспринимая эту энергию, первичное ядро сильно возбуждается, и вероятность получить в таком процессе связанное конечное состояние очень мала. Именно этим можно объяснить малую вероятность двухчастичных каналов при двойной перезарядке пионов.

На примерах, имеющих в литературе, экспериментальных и теоретических исследований процессов двойной перезарядки пионов в диссертации описывается одно из интересных свойств таких процессов – возможность возбуждения в рамках двойной перезарядки  $\Pi$ -мезонов изобарных аналоговых состояний ядер с  $\Delta T_3 = \pm 2$ . Особый интерес представляют эти реакции для обнаружения и изучения свойств неизвестных ядерных состояний с большим избытком протонов и нейтронов. В частности, важное место в ряду таких исследований занимает вопрос о существовании ядер или резонансных состояний, в которые входили бы одни лишь нейтроны. Изучение ядер без протонов очень интересно во многих аспектах, таких, как анализ ( $n$ - $n$ ) сил,  $T = 3/2$  состояний трехнуклонных систем,  $T = 2$  состояний четырехнуклонных систем и т.д. В диссертации приведено подробное рассмотрение того, что нового было внесено

исследованиями процессов двойной перезарядки пионов в эту область. Большое количество экспериментов было выполнено по поиску тетранейтрона. Однако до сих пор имеющиеся экспериментальные данные совершенно недостаточны для того, чтобы сделать однозначное утверждение о существовании  ${}^4n$ . В наших экспериментах <sup>17/</sup> с помощью реакций двойной перезарядки  $\Pi$ -мезонов на  $(\alpha)$ -кластерах ядер свинца в реакции  ${}^{208}\text{Pb}(\pi, \gamma){}^{212}\text{Pb}$  был проведен еще один поиск нуклоностабильных тетранейтронов. Идентификация конечного ядра  ${}^{212}\text{Pb}$  и его дочерних продуктов производилась путем регистрации  $\alpha$ -частиц и измерения их энергии. Эксперименты были выполнены на синхротроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Мишени из  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  облучались в течение 8 часов в пучке  $\Pi$ -мезонов с энергией 90 МэВ. После конца экспозиции производилось химическое выделение дочерних продуктов свинца -  ${}^{212}\text{Bi}$  и регистрация в альфа-спектрометре с поверхностно-барьерным детектором  $\alpha$ -активности из облученных мишеней.

Результаты измерения спектра  $\alpha$ -частиц для препаратов висмута показаны на рис. 3. Видно, что ожидаемому эффекту соответствуют четыре импульса. Поскольку фон от естественной радиоактивности тория очень чувствителен к условиям эксперимента, при имеющейся статистике можно оценить лишь верхнюю границу сечения образования  ${}^4n$ .

После учета всех экспериментальных факторов, таких, как величина потока  $\Pi$ -мезонов, время облучения и охлаждения мишени, продолжительность и геометрия измерения, эффективность детектора и химического выхода, мы получаем, что, если обозначить  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  сечения гипотетических реакций  ${}^{208}\text{Pb}(\Pi, \Pi^+ + {}^4n + \dots)$  и  ${}^{208}\text{Pb}({}^4n, \gamma){}^{212}\text{Pb}$ , соответственно, а  $\tau$  - время жизни тетранейтрона без учета его диссоциации в результате взаимодействия со средой, то для  $\tau$  в интервале  $(10^{-18} \text{ с} - 10^{-9} \text{ с})$   $\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \tau \leq 10^{-63} \text{ см}^4 \text{ с}$ ; и для  $\tau \geq 10^{-9} \text{ с}$ ,  $\sigma_1 \cdot \sigma_2 \leq 10^{-54} \text{ см}^4$ . (Граница  $\tau > 10^{-18} \text{ с}$  определяется временем пролета релятивистской частицы межатомного расстояния,  $\tau \approx 10^{-9} \text{ с}$  - время его пролета за пределы мишени.)

В настоящее время неизвестно наименьшее число нейтронов, которые могут образовать устойчивую систему. С этой точки зрения интересны опыты, выполненные нами в Лаборатории ядерных проблем фотоэмульсионным методом, по анализу 30000 взаимодействий

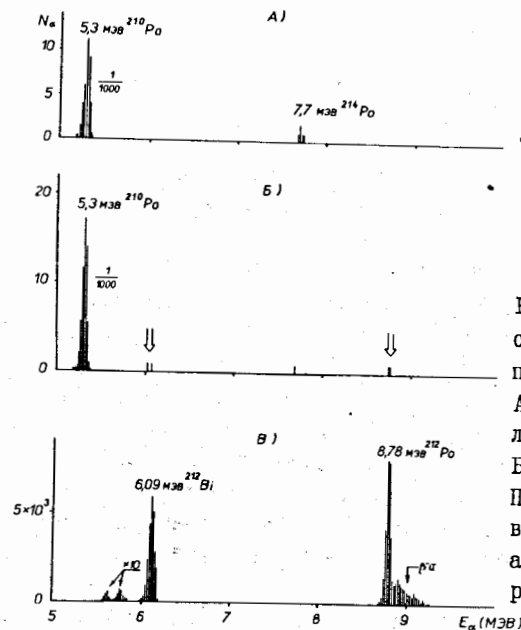


Рис. 3. Результаты измерения спектров  $\alpha$ -частиц для препаратов висмута, выделенных: А) из нитрата свинца, не облученного  $\Pi$ -мезонами, Б) после облучения мишеней  $\Pi$ -мезонами, В) калибровочные спектры от источника активной осадка радиотория ( ${}^{212}\text{Pb}$ ).

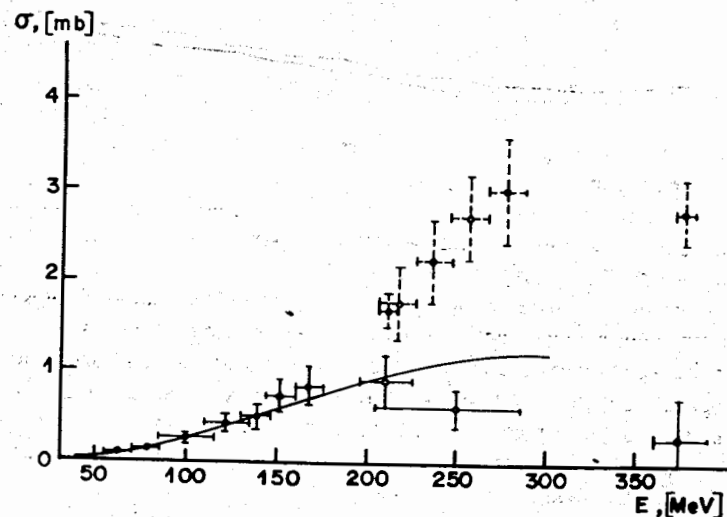
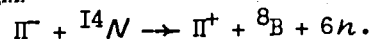


Рис. 4. Полные сечения образования  $\Pi^+$ -мезонов  $\Pi$ -мезонами на ядрах в фотоэмульсии по реакции  $\Pi + A \rightarrow \Pi^+ + A'$  (пунктир) и сечения двойной перезарядки  $\Pi$ -мезонов <sup>19/</sup>. Кривая - расчет по каскадной модели <sup>127/</sup>.

типа  $\Pi^- + \mathcal{A} \rightarrow \Pi^+ + \mathcal{A}' + \dots$  в интервале энергий первичных мезонов 200–300 МэВ<sup>9,10/</sup>. Среди всех зарегистрированных событий такого типа 120 звезд имели среди вторичных лучей T-образные следы, принадлежащие ядрам  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^8\text{B}$  и  ${}^8\text{He}$ . Анализ лучевого распределения этих звезд показывает, что два события могут быть отнесены к реакции



Исследование таких реакций может оказаться весьма перспективным в поисках связанных многонейтронных систем. В зарегистрированных нами событиях величина недостающей массы несколько больше массы шести нейтронов. Это свидетельствует о том, что не наблюдается ядро  ${}^6n$  в связанном состоянии. Полное сечение реакции  $\Pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow \Pi^+ + {}^8\text{B} + 6n$  равно  $(1,3 \pm 0,9) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2$ .

Увеличение интенсивности мезонных пучков может позволить в будущем проводить систематические поиски многонейтронных систем, которые могут быть образованы в реакциях двойной перезарядки пионов.

Круг вопросов, интересных с точки зрения использования процессов двойной перезарядки пионов для исследования структуры ядра, не исчерпывается рассмотренными примерами, в частности, интересен сам механизм возбуждения двойной перезарядки, который дает возможность увидеть, как этот процесс может быть использован для анализа структуры ядра-мишени.

Рассмотрению этих вопросов посвящена глава II. В зависимости от энергии первичного пиона – выше и ниже порога мезонообразования – в данном разделе анализируются два класса механизмов двойной перезарядки  $\Pi$ -мезонов.

В энергетической области выше порога образования мезонов мезонами необходимо прежде всего учитывать возможный вклад виртуальных нуклонных изобар. Интерес к такому механизму процесса двойной перезарядки пионов при высокой энергии вызван тем, что в этом случае появляется реальная возможность для изучения изобар-ядерного взаимодействия так называемых мезоядерных резонансов и даже изоядер ( $\mathcal{N}^{*+}$ ,  $\mathcal{B}$ ).

Экспериментальная попытка оценить вклад виртуальных нуклонных изобар в процесс двойной перезарядки пионов была предпринята нами при исследовании реакции  $\Pi^- + \mathcal{A} \rightarrow \Pi^+ + \mathcal{A}' + \dots$  в

интервале энергий 210–375 МэВ<sup>9/</sup>. С этой целью было облучено шесть фотоэмульсионных камер в пучках  $\Pi^-$ -мезонов с энергией 225, 305 и 390 МэВ на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. В результате просмотра камер было зарегистрировано 4 289 случаев реакции двойной перезарядки  $\Pi^-$ -мезонов на ядрах в фотоэмульсии, что позволило определить сечения этого процесса при энергиях 210, 215, 235, 275 и 375 МэВ. Результаты измерения полных сечений представлены на рис. 4 пунктирными линиями. На этом же рисунке показаны результаты измерения полных сечений двойной перезарядки  $\Pi^-$ -мезонов на ядрах в фотоэмульсии в интервале энергий 50–176 МэВ, полученные нами ранее<sup>26/</sup>. Основываясь на расчетах полных сечений двойной перезарядки по каскадной модели<sup>127/</sup> и используя распределения зарегистрированных событий по числу лучей в звезде (данные, характеризующие каскадный механизм перезарядки, представлены на рис. 4 сплошными линиями), мы получили, что вклад изобарного механизма в реакцию двойной перезарядки  $\Pi^-$ -мезонов не превышает 47% для энергии (195–225) МэВ, 78% – в интервале энергий (200–300) МэВ и 88% – при энергии (360–390) МэВ. Однако более тщательный анализ всех имеющихся в литературе экспериментальных и теоретических исследований показывает, что в настоящее время можно только утверждать, что ниже 300 МэВ вклад изобарного механизма в процесс двойной перезарядки пионов невелик.

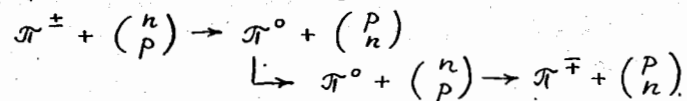
В области энергий ниже порога образования мезонов  $\Pi$ -мезонами рассмотрены два возможных механизма процессов двойной перезарядки пионов: 1) абсорбционный механизм и 2) двойная перезарядка пионов на паре нуклонов ядра-мишени. Для исследования абсорбционного механизма на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем были выполнены эксперименты по изучению двойной перезарядки остановившихся  $\Pi^-$ -мезонов при захвате их ядрами никеля по реакции  $\Pi^- + {}^{58}\text{Ni} \rightarrow \Pi^+ + {}^{58}\text{Fe}$ <sup>78/</sup>. На основании этих экспериментов получено, что с достоверностью 90% верхняя граница этой реакции равна

$$W = \frac{(\Pi^- + {}^{58}\text{Ni} \rightarrow \Pi^+ + {}^{58}\text{Fe})}{\text{полное число захватов } \Pi^- \text{-мезонов в } {}^{58}\text{Ni}} < 3 \cdot 10^{-6}.$$

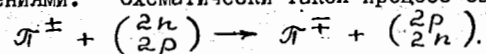
Абсорбционный механизм не является единственным возможным для объяснения экспериментально полученной оценки сечения реакции  $\Pi^- + {}^{58}\text{Ni} \rightarrow \Pi^+ + {}^{58}\text{Fe}$  при малых энергиях  $\Pi^-$ -мезонов,

поскольку такое значение сечения может быть следствием очень низкой вероятности двух последовательных перезарядок пионов в ядре в этой энергетической области.

В настоящее время наиболее общепринято предположение о том, что процесс двойной перезарядки пионов происходит главным образом путем двойного рассеяния на двух разных нуклонах в ядре, на каждом из которых происходит однократная перезарядка  $\Pi$ -мезона. В диссертации подробно рассматривается теоретическая формулировка такого механизма<sup>/3/</sup>. Показано, что в зависимости от выбранного приближения при вычислении сумм по промежуточным ядерным состояниям в выражение матричного элемента двойного рассеяния в рамках импульсного приближения входят однонуклонные плотности, когда возбуждается только одно промежуточное состояние, или двухнуклонные плотности, и появляется зависимость от корреляции нуклонов в ядре, когда в теоретических расчетах принимается во внимание возбуждение всех промежуточных состояний. Описанный в первом случае расчет механизма двойной перезарядки пионов мы называем каскадной моделью. Эта модель соответствует двум независимым однократным перезарядкам пионов на ядрах, причем в промежуточном состоянии возникают новые ядра. Такой двухступенчатый процесс схематически можно представить как



Случай с двухнуклонной плотностью был назван парным механизмом. Физически это соответствует двум однократным перезарядкам падающего мезона на нуклонных парах первоначальных ядер. Причем временной интервал, проходящий между двумя перезарядками, настолько мал, что ядра не испытывают никаких переходов между этими столкновениями. Схематически такой процесс записывается как



Для оценки порядка величины сечений и получения качественной информации о процессах двойной перезарядки по каскадной модели мы использовали простой классический метод. Предполагая, что ядерная плотность однородна внутри ядра-мишени и что в течение всего процесса ядро имеет постоянную сферическую форму, мы вывели аналитическое выражение для вычисления поперечного

сечения двойной перезарядки пионов. Несмотря на множество огрублений, такая простая модель правильно предсказывает порядки величин сечений реакций двойной перезарядки, а при введении дальнейших приближений, учитывающих эффекты спаривания нуклонов, она качественно объясняет зависимость поперечного сечения от числа нейтронов на последней оболочке ядра. Угловые распределения, вычисленные по этим формулам, согласуются с экспериментальными результатами<sup>/3,25/</sup>.

В этом же разделе детально рассмотрены спиновые переходы нуклонной пары, участвующей в процессе двойной перезарядки пионов, и зависимость матричных элементов процесса от относительной волновой функции этой пары.

На основе анализа имеющихся в литературе экспериментальных данных по исследованию реакций двойной перезарядки  $\Pi^+$ -мезонов вперед на ядрах лития, бериллия, кислорода, натрия, ванадия и циркония высказывается предположение о том, что изменение поперечных сечений этих реакций должно следовать за изменением энергии связи нейтронов в ядрах на различных последних оболочках. А зависимость поперечного сечения двойной перезарядки от числа нуклонов в последней оболочке будет изменяться при заполнении каждой новой оболочки в виде зубчатообразной линии, каждый максимум которой соответствует четному числу нуклонов в последней оболочке.

В третьей главе диссертации приведены результаты сравнения реакций двойной перезарядки положительных и отрицательных пионов на ядрах. Показано, что наблюдаемая в фотоэмульсионных экспериментах<sup>/5/</sup> большая разница между сечениями двойной перезарядки  $\Pi^+$ - и  $\Pi^-$ -мезонов может быть объяснена влиянием кулоновского барьера, увеличенным избытком нейтронов по сравнению с числом протонов в области стабильности атомных ядер и, кроме того, может быть обусловлена разницей в радиусах протонного и нейтронного распределения в ядрах. Таким образом, исследования реакций двойной перезарядки  $\Pi^+$  и  $\Pi^-$ -мезонов могут быть связаны с решением проблемы существования "нейтронного облака" вокруг центрального коря ядра.

Результаты расчетов, качественно демонстрирующие относительное влияние формы и радиуса распределения нейтронов в ядре на величину поперечного сечения реакций двойной перезарядки пионов



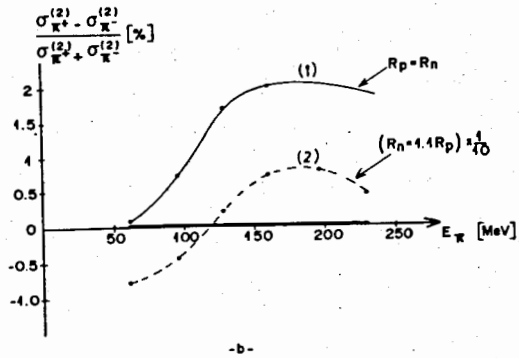
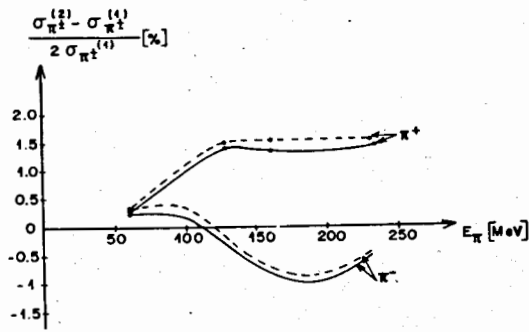


Рис. 5. Качественное влияние формы распределения нейтронов внутри ядер с  $N = Z$  на величину поперечного сечения двойной перезарядки в зависимости от первичной энергии  $\pi$ -мезонов для случая, когда кулоновские силы не принимаются во внимание.

а)  $(\sigma_{\pi^{\pm}}^{(2)} - \sigma_{\pi^{\pm}}^{(1)}) / 2 \sigma_{\pi^{\pm}}^{(1)}$  - эффект размера

в)  $(\sigma_{\pi^+}^{(2)} - \sigma_{\pi^-}^{(2)}) / (\sigma_{\pi^+}^{(2)} + \sigma_{\pi^-}^{(2)})$  - эффект асимметрии.

На обоих рисунках сплошные линии соответствуют  $R_n = R_p$ .

Пунктирные линии соответствуют  $R_n = 1,4 R_p$ .

+ (-) соответствует двойной перезарядке  $\pi^+ \rightarrow \pi^-$  (или  $\pi^- \rightarrow \pi^+$ ).

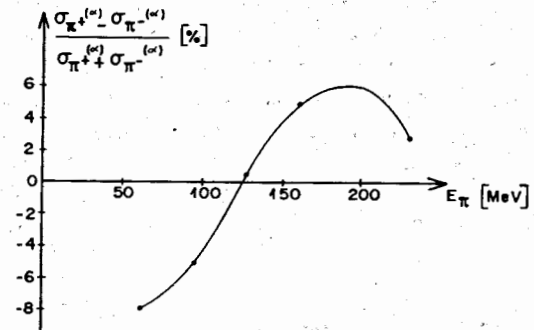
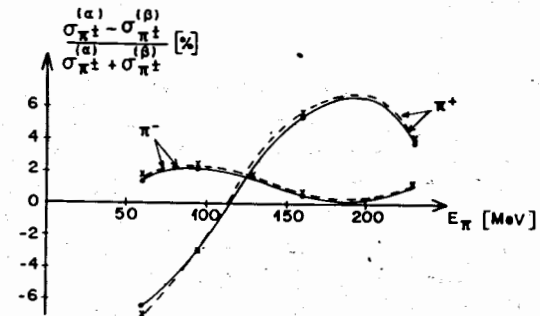


Рис. 6. Качественное влияние радиуса нейтронной плотности на величину поперечного сечения двойной перезарядки в зависимости от энергии первичного  $\pi$ -мезона для случая, когда кулоновские силы не принимаются во внимание.

а)  $(\sigma_{\pi^{\pm}}^{(\alpha)} - \sigma_{\pi^{\pm}}^{(\beta)}) / (\sigma_{\pi^{\pm}}^{(\alpha)} + \sigma_{\pi^{\pm}}^{(\beta)})$  - эффект размера,

в)  $(\sigma_{\pi^+}^{(\alpha)} - \sigma_{\pi^-}^{(\alpha)}) / (\sigma_{\pi^+}^{(\alpha)} + \sigma_{\pi^-}^{(\alpha)})$  - эффект асимметрии.

На обоих рисунках  $(\alpha)$  характеризует радиус  $R_n = 1,4 R_p$ ;  $(\beta)$  - радиус  $R_n = R_p$ . + (-) соответствует двойной перезарядке  $\pi^+ \rightarrow \pi^-$  (или  $\pi^- \rightarrow \pi^+$ ).

на ядрах с  $Z = N^*$ ) и зависимость эффектов формы и радиусов нуклонной плотности от первичной энергии пионов для случая, когда из рассмотрения исключены кулоновские эффекты, представлены на рис. 5 и 6.

Анализ результатов вычислений, приведенных на этих рисунках, показывает, что исследования процессов двойной перезарядки пионов в первую очередь будут давать информацию об относительных величинах среднеквадратичных радиусов нейтронов и протонов и только в результате более детальных опытов — об относительной форме распределений нуклонов в ядрах.

В заключении к первой части диссертации перечислены основные результаты проанализированных работ.

Современное состояние экспериментальных исследований реакций двойной перезарядки пионов и приблизительность теоретических оценок позволяют в настоящее время получить только качественные характеристики для этого богатого процесса. Для извлечения из него количественной информации, необходимой для анализа ядерной структуры, требуется значительно большее число прецизионных экспериментов. Несомненно, что ввод в действие новых высокоинтенсивных мезонных фабрик позволит в недалеком будущем широко развернуть исследования структуры ядра в процессах двойной перезарядки мезонов.

## II.

### Исследование структуры ядра в процессах захвата $\Pi^-$ -мезонов легкими ядрами в фотоэмульсии

Детальный анализ экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию поглощения  $\Pi^-$ -мезонов легкими ядрами, показал, что в этом процессе конкурируют несколько механизмов поглощения пионов: двухчастичный и многочастичные. Для того чтобы экспериментально выделить различные механизмы поглощения  $\Pi^-$ -мезонов легкими ядрами и получить информацию о существовании и роли различных нуклонных ассоциаций в ядрах, необходимо иметь подробные данные о вылетевших в результате реакции частицах.

В таких исследованиях может быть эффективно использован метод ядерных фотоэмульсий, позволяющий регистрировать все вылетевшие заряженные частицы, включая короткопробежные.

\*) Для устранения эффекта избытка нейтронов.

облегчает идентификацию каналов реакций захвата  $\Pi^-$ -мезонов ядрами в фотоэмульсии регистрация событий с Т-образным следом, который оставляет в ней ядро  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^8\text{B}$ . К тому же при захвате  $\Pi^-$ -мезонов легкими ядрами с образованием  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^8\text{B}$  происходит полный развал этих ядер, а так как выделяемая энергия точно известна — 139,6 МэВ, — то можно произвести полный кинематический анализ изучаемых событий.

Методическим вопросам, связанным с использованием ядерных фотоэмульсий, постановке и проведению экспериментов на синхротроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, поискам и измерению найденных в проявленной фотоэмульсии событий посвящена глава IV.

В экспериментах использовались фотоэмульсионные камеры, составленные из слоев эмульсии НИКФИ-БР, толщиной 400 и 600 мкм. Камеры облучались в пучке  $\Pi^-$ -мезонов с энергией (80±8) МэВ.  $\Pi^-$ -мезоны тормозились в фотоэмульсии и останавливались в зоне шириной 1 см, которая и просматривалась под микроскопом с целью поиска  $\sigma_\pi$ -звезд. В восьми просмотренных эмульсионных камерах было зарегистрировано 18 280  $\sigma_\pi$ -звезд с Т-образным следом. Измерение следов заряженных частиц производилось на микроскопах МБИ-9 при увеличении 1350х. Результаты измерений вводились в ЭВМ и обрабатывались с помощью комплекса программ "ASTRA" [2].

В диссертации дано описание этого комплекса, разработанного нами для кинематического анализа широкого класса ядерных реакций в фотоэмульсии и используемого на ЭВМ БЭСМ-6 и СДС-6500.

С помощью системы программ производится геометрическая реконструкция событий, а для их кинематического анализа используется метод наименьших квадратов. Выделение определенных каналов реакций производится с помощью критерия  $\chi^2$ .

Все экспериментальные данные, полученные в результате обсчета событий, записывались на магнитную ленту. Дальнейший анализ событий с использованием различных критериев выделения каналов реакций производился при работе с магнитной лентой.

Таким образом, разработана процедура обработки экспериментальных данных, получаемых с помощью фотоэмульсионных камер, которая позволяет эффективно использовать возможности современных ЭВМ.

Экспериментальным исследованиям многочастичных реакций с образованием  ${}^8\text{Li}$  при захвате остановившихся  $\Pi^-$ -мезонов легкими

ядрами ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  и  $^{14}\text{N}$ ) в фотозумльсии посвящена глава пятая.

Теоретической основой для анализа экспериментальных данных по изучению этих реакций послужили исследования группы В.Г. Неудачина, выполненные в рамках прямых ядерных реакций (В.Г. Неудачин, Ю.Ф. Смирнов. "Нуклонные ассоциации в легких ядрах", Москва, Изд. "Наука" (1969)). Рассматривалась модель поглощения  $\Pi$ -мезонов нуклонной ассоциацией  $X$  с применением метода импульсного приближения и генеалогического разложения волновой функции с выделением ассоциации  $X$ . При анализе наших экспериментальных данных для каждой изучаемой реакции рассматривалось несколько механизмов поглощения, т.е. поглощения различными нуклонными ассоциациями. Конечные состояния ядер-остатков, образующихся при поглощении на выделенных ассоциациях, выбирались соответственно правилам отбора по схемам Юнга и  $SU(3)$ .

Анализ реакций захвата  $\Pi$ -мезонов ядрами углерода с образованием  $^8\text{Li}/\Pi\text{-I}3/$  показал, что основным каналом для двухлучевых событий является реакция  $\Pi + ^{12}\text{C} \rightarrow ^8\text{Li} + ^3\text{He} + n$ . Установлено, что вся совокупность полученных в опыте результатов удовлетворительно согласуется с предположением, что этот канал осуществляется в результате прямого поглощения  $\Pi$ -мезона на нуклонной ассоциации  $^4\text{Li}$  в ядре  $^{12}\text{C}$ .

Наиболее вероятными каналами захвата  $\Pi$ -мезонов на углероде среди трехлучевых событий с образованием  $^8\text{Li}$  являются реакции  $\Pi + ^{12}\text{C} \rightarrow ^8\text{Li} + ^2\text{H} + p + n$  и  $\Pi + ^{12}\text{C} \rightarrow ^8\text{Li} + 2p + 2n$ . Величины их относительных вероятностей соответственно равны  $(2,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$  и  $(2,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$ . Были детально проанализированы угловые и энергетические характеристики вторичных частиц от реакции  $\Pi + ^{12}\text{C} \rightarrow ^8\text{Li} + ^2\text{H} + p + n$ . Получено, что имеется заметное отличие экспериментальных распределений от кривых, соответствующих фазовым объемам (рис. 7). Анализ экспериментальных данных по теории прямых ядерных реакций показал, что доминирующим механизмом захвата  $\Pi$ -мезона по реакции  $\Pi + ^{12}\text{C} \rightarrow ^8\text{Li} + ^2\text{H} + p + n$  является четырехнуклонное поглощение пиона.

Таким образом, на основании проведенных исследований двух- и трехлучевых событий можно заключить, что для реакции с образованием  $^8\text{Li}$  на ядрах углерода наиболее существенную роль играет захват  $\Pi$ -мезонов четырехнуклонной ассоциацией  $^4\text{Li}$ .

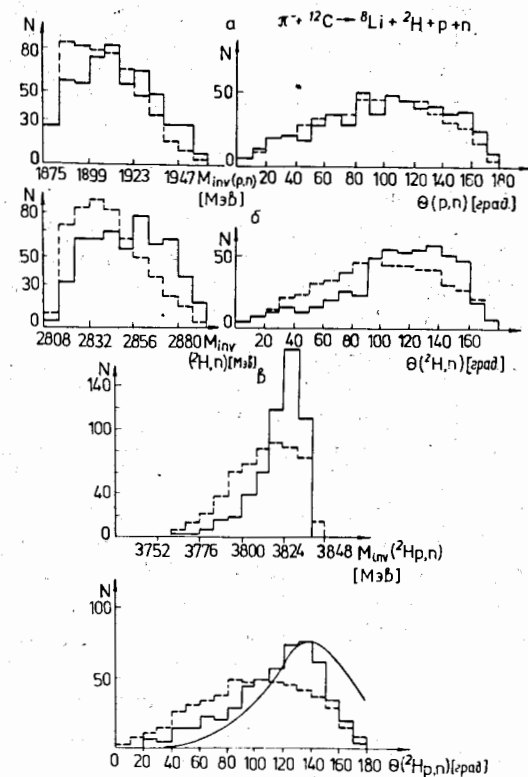


Рис. 7. Распределение по эффективным массам и углам разлета различных комбинаций конечных частиц для реакции  $\Pi + ^{12}\text{C} \rightarrow ^8\text{Li} + ^2\text{H} + p + n$ . Пунктир - фазовый объем, сплошная кривая - теоретический расчет.

Рассмотрены и проанализированы все возможные каналы поглощения  $\Pi^-$ -мезонов ядрами кислорода с образованием  ${}^8\text{Li}/{}^{14}\text{F}$ . Эти исследования особенно интересны с точки зрения сравнения механизмов поглощения пионов ядрами  ${}^{16}\text{O}$  и  ${}^{12}\text{C}$ , имеющих одинаковую  $\alpha$ -частичную структуру. Оказалось, что основным каналом захвата пионов на  ${}^{16}\text{O}$  является реакция  $\Pi^- + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^4\text{He} + {}^2\text{H} + \text{p} + \text{n}$ , происходящая с относительной вероятностью  $(1,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$ . Подробный анализ энергии относительного движения и углового распределения для системы  $({}^2\text{Hr}, \text{n})$  в этой реакции (рис. 8) и сравнение полученных результатов с аналогичными характеристиками системы  $({}^2\text{Hr}, \text{n})$  из реакции на углероде  $\Pi^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^2\text{H} + \text{p} + \text{n}$  (рис. 7) указывает на наличие в этих реакциях одинакового механизма поглощения  $\Pi^-$ -мезонов четырехнуклонной ассоциацией  ${}^4\text{Li}$ .

Исследование двухлучевых событий с  ${}^8\text{Li}$  на кислороде по реакции  $\Pi^- + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^7\text{Be} + \text{n}$  показало, что характер энергетических и угловых распределений вторичных частиц согласуется с наличием в этом канале механизма поглощения  $\Pi^-$ -мезонов восьми-нуклонной ассоциацией  ${}^8\text{B}$ .

В результате анализа трех- и четырехлучевых событий с  $\Pi^-$ -образным следом были выделены возможные реакции захвата  $\Pi^-$ -мезонов с образованием  ${}^8\text{Li}$  на ядрах азота  ${}^{15}\text{N}$ . Из изучения выделенных каналов в рамках теории прямых ядерных реакций получено, что для реакций  $\Pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^4\text{He} + \text{p} + \text{n}$ ,  $W = (2,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$  и  $\Pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{H} + \text{p} + \text{p} + \text{n}$ ,  $W = (2,2 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$ , имеющих наибольшие относительные вероятности, спектры и угловые характеристики вторичных частиц можно описать в предположении поглощения пионов на различных ассоциациях нуклонов в ядре азота. Теоретические расчеты с учетом поглощения  $\Pi^-$ -мезонов на ассоциациях  ${}^5\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Be}$  и на  $(\text{pp})$  паре удовлетворительно согласуются с энергетическими спектрами  ${}^4\text{He}$  и нейтрона от реакции  $\Pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^4\text{He} + \text{p} + \text{n}$  (рис. 9). В случае реакции  $\Pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{H} + \text{p} + \text{p} + \text{n}$ , хотя оценка вероятностей механизмов не противоречит тому, что в этом канале основную роль играют двух- и трехнуклонные механизмы, не удается полностью описать экспериментальные данные в предположении захвата  $\Pi^-$ -мезонов ядрами азота на ассоциациях  $(\text{pp})$ -пар и  ${}^3\text{Li}$ .

Таким образом, совокупность полученных экспериментальных данных по изучению реакций захвата  $\Pi^-$ -мезонов ядрами углерода, азота и кислорода с образованием  ${}^8\text{Li}$  указывает на существенную

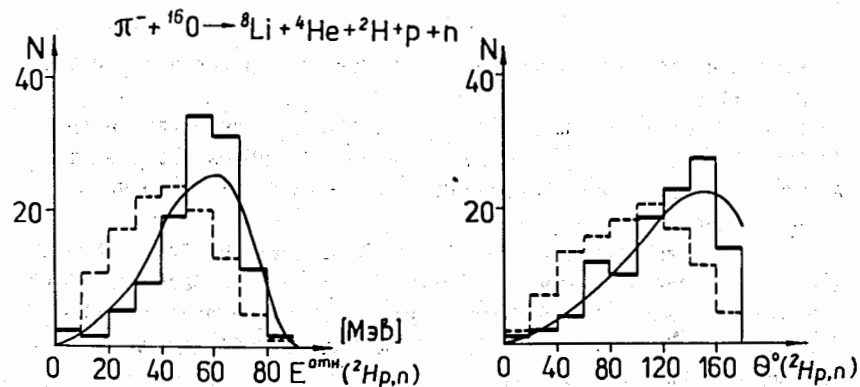


Рис. 8. Энергия относительного движения и угловое распределение для системы  $({}^2\text{Hr}, \text{n})$  в реакции  $\Pi^- + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^4\text{He} + {}^2\text{H} + \text{p} + \text{n}$ . Пунктир - распределения по фазовому объему, сплошная кривая - теоретический расчет.

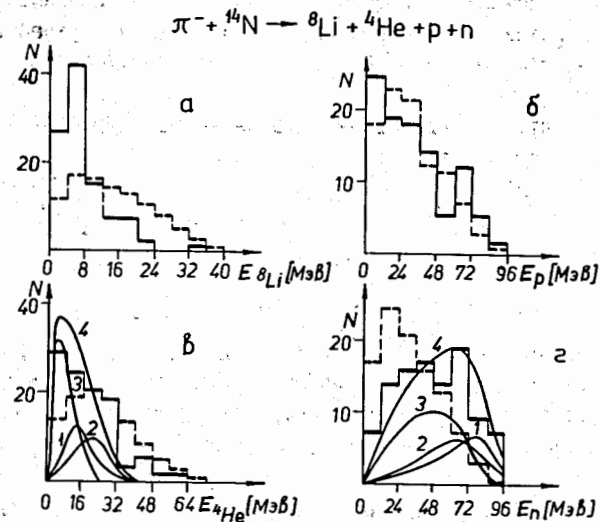


Рис. 9. Энергетические спектры вторичных частиц для реакции  $\Pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^4\text{He} + \text{p} + \text{n}$ . Кривыми показаны теоретические расчеты: 1 - поглощение на ассоциации  ${}^6\text{Be}$ ; 2 - поглощение на ассоциации  ${}^5\text{Li}$ ; 3 - на  $(\text{pp})$ -паре; 4 - суммарный спектр,  $W^1 : W^2 : W^3 = 1 : 1 : 2$ .

роль многонуклонного (кластерного) механизма поглощения в этих процессах.

Поисковым экспериментам по исследованию образования ядер, состоящих только из нейтронов, и реакций радиационного захвата в процессах поглощения медленных  $\Pi^-$ -мезонов легкими ядрами посвящена глава VI.

В результате детального анализа 1500 двухлучевых событий с T-образным следом было установлено, что ядро  ${}^8\text{B}$  образуется в основном при захвате  $\Pi^-$ -мезонов ядрами азота, входящими в состав фотоэмульсии<sup>16/</sup>. Относительная вероятность образования  ${}^8\text{B}$  в реакциях на ядрах  ${}^{14}\text{N}$  равна:

$$W = (\pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow \begin{cases} {}^8\text{B} + p + 5n \\ {}^8\text{B} + {}^2\text{H} + 4n \\ {}^8\text{B} + {}^3\text{H} + 3n \end{cases}) = (1,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}.$$

Эти реакции представляют интерес с точки зрения связанных состояний нескольких нейтронов ( ${}^3n$ ,  ${}^4n$  и  ${}^5n$ ), в двухчастичная реакция  $\Pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{B} + {}^6\text{H}$  - для нейтроноизбыточного изотопа водорода  ${}^6\text{H}$ .

Найдено, что верхние границы вероятностей образования таких систем равны соответственно:

$$\begin{aligned} W (\pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{B} + p + 5n) &< 1 \cdot 10^{-5} \\ W (\pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{B} + {}^2\text{H} + 4n) &< 1 \cdot 10^{-5} \\ W (\pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{B} + {}^3\text{H} + 3n) &< 1 \cdot 10^{-5} \\ W (\pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{B} + {}^6\text{H}) &< 5 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Рассмотрение всего набора имеющихся экспериментальных данных позволяет сделать вывод о малой вероятности существования в стабильном состоянии легчайших нейтронных ядер. Вопрос же о возможных ядерных состояниях типа резонансов до сих пор остается открытым.

Были проведены поиски ядер, состоящих из трех и четырех нейтронов, образующихся при захвате  $\Pi^-$ -мезонов ядрами лития<sup>16/</sup>. Исследовались реакции  $\Pi^- + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3n$  и  $\Pi^- + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^4n$  в фотоэмульсии, загруженной ядрами  ${}^7\text{Li}$ . Получено, что верхняя граница относительной вероятности образования ядер  ${}^3n$  и  ${}^4n$  в наших реакциях на 90% уровне достоверности не превышает  $1,2 \cdot 10^{-3}$ .

В связи с теоретическими исследованиями резонансной модели поглощения  $\mu^-$ -мезонов ядрами, разрабатываемыми группой В.В. Балашова-Р.А. Эрамжяна, в последнее время было обращено особое внимание на изучение процессов радиационного захвата  $\Pi^-$ -мезонов ядрами. В диссертации описывается поиск радиационного захвата  $\Pi^-$ -мезонов ядрами углерода с образованием  ${}^8\text{Li}$  по реакции  $\Pi^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{He} + n + \gamma$ . Выделено  $(42 \pm 17)$  случаев, оценена относительная вероятность  $W = (2,3 \pm 1,0) \cdot 10^{-5}$  и получены основные энергетические и угловые характеристики вторичных частиц для реакции  $\Pi^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{He} + n + \gamma$ .

В заключении ко второй части диссертации приведены основные выводы из рассмотренных в ней работ.

### III.

#### Испускание заряженных частиц при захвате $\mu^-$ -мезонов атомными ядрами

Описание процессов расщепления ядра мюонами глубоко затрагивает многие аспекты ядерной структуры и механизмов реакции, что позволяет всесторонне проверить многие предположения, на основании которых строится теория взаимодействия  $\mu^-$ -мезонов с атомными ядрами. Среди различных каналов расщепления ядра при поглощении мюоном особое место занимают каналы с вылетом заряженных частиц. Поскольку продуктом элементарного акта при захвате  $\mu^-$ -мезонов является нейтрон, то вылет протона или любой другой заряженной частицы в таком процессе связан со вторичными процессами и корреляцией нуклонов в ядре. Корреляции короткодействующего типа приводят к эффектам ассоциирования нуклонов в ядре. Взаимодействие  $\mu^-$ -мезонов с такими подсистемами более сложное и может приводить, как показывает, например, опыт изучения процессов  $\Pi^-$ -захвата, к проявлению особых каналов расщепления с вылетом нескольких скоррелированных между собой частиц.

Обзор результатов экспериментальных работ и теоретических расчетов, посвященных изучению процессов захвата  $\mu^-$ -мезонов с вылетом заряженных частиц, приведен во введении к III части диссертации<sup>19/</sup>. Из всей совокупности экспериментальных данных можно выявить ряд общих закономерностей, присущих этому процессу. Интегральный выход заряженных частиц из ядер Ip-оболочки ( ${}^{12}\text{C}$ - ${}^{16}\text{O}$ ) составляет около 10%. В ядрах (2s-Id)-оболочки ( ${}^{20}\text{Ne}$ -

$^{40}\text{Ca}$ ) вклад этого канала увеличивается и достигает 15-20%. Почти на таком же уровне сохраняется выход заряженных частиц и в случае несколько более тяжелого четно-четного ядра  $^{58}\text{Ni}$ . Однако уже для нечетных ядер в данной области массовых чисел  $A$  эти значения резко уменьшаются. В ядрах  $\text{Br}$  и  $\text{Ag}$ , входящих в состав фотоэмульсии, выход заряженных частиц составляет 2,9%, в ядрах с массовым числом  $A > 100$  он не превышает 1-2%. Максимум выхода приходится на ядра в области  $^{40}\text{Ca}$ .

Спектр заряженных частиц преимущественно мягкий. Это скорее всего свидетельствует о том, что механизм вылета заряженных частиц связан со вторичными процессами, протекающими в возбужденном промежуточном ядре.

Высота кулоновского барьера для ядер с массовым числом  $A = 60$  достигает 8 МэВ, что сильно препятствует вылету медленных вторичных частиц, если они заряжены. Поэтому естественно, что выход заряженных частиц в результате  $\mu$ -захвата в тяжелых ядрах мал. Вклад жесткой компоненты в полный спектр заряженных частиц не превышает 2-3%. Выход высокоэнергетических частиц также имеет максимум в области ядер с  $Z = 20$ .

В легких и средних ядрах вылет заряженной частицы довольно часто сопровождается испусканием одного или нескольких нейтронов. Испускание двух или нескольких нуклонов характерно для кластерного механизма захвата, при этом хотя бы одна вылетевшая частица должна быть быстрой. Вторичные процессы в промежуточном ядре также могут приводить к испусканию нескольких частиц, но в этом случае они скорее всего будут малоэнергичными. Поэтому для выявления механизма такого процесса необходимо исследовать энергетические и угловые характеристики вылетающих частиц. Учитывая то обстоятельство, что при  $\mu$ -захвате заряженные частицы имеют малую энергию, можно надеяться, что эмульсионная методика в таком случае будет наиболее подходящей для исследования таких процессов. Однако при этом необходимо провести последовательный кинематический анализ реакций, что может позволить выделить основные каналы вылета заряженных частиц.

Создание на синхротроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ  $\mu$ -мезонного тракта с пучками мюонов высокой степени чистоты и наличие комплекса программ обработки событий в фотоэмульсии (см. часть II гл. IV) позволило нам выполнить такие исследования.

В главе VII рассмотрены некоторые методические вопросы по измерению событий взаимодействия  $\mu^-$ -мезонов с ядрами в фотоэмульсии и общие закономерности атомного и ядерного захвата мюонов на ее легкой и тяжелой компоненте <sup>20-21/</sup>.

В экспериментах с  $\mu^-$ -мезонами было использовано 9 фотоэмульсионных камер. Четыре камеры были собраны из электроночувствительных слоев эмульсии типа НИКФИ-БР, пять остальных - из слоев ILFORQ K5, наполненных ядрами  $^6\text{Li}$ .

Камеры облучались  $\mu^-$ -мезонами в низкофоновой лаборатории на  $\mu$ -мезонном тракте синхротрона ОИЯИ. Примесь  $\pi^-$ -мезонов, измеренная нами в пучке  $\mu^-$ -мезонов, составляла 0,4%. При просмотре 500 см<sup>3</sup> объема эмульсии было прослежено 10000 треков  $\mu^-$ -мезонов до точки взаимодействия и зарегистрировано 50 000  $\sigma^-$ -звезд.

Детальный анализ зарегистрированных событий поглощения  $\mu^-$ -мезонов легкой и тяжелой компонентой в фотоэмульсии позволил построить общую схему этого взаимодействия (рис. 10).

Получено, что (44±2)%  $\mu^-$ -мезонов образуют мезоатомы на легкой и (56±2)% - на тяжелой компоненте в фотоэмульсии. Из числа мюонов, остановившихся на легкой компоненте, (88±9)% претерпевают  $\mu \rightarrow e$  распад, а (12±1)% - захватываются ядрами; в то время как на тяжелой компоненте только (5,0±0,5)% успевают распасться, а (95±9)% - захватываются ядрами.

На основе измеренных нами впервые вероятностей образования наблюдаемых оже-электронов при атомном захвате  $\mu^-$ -мезонов определены вероятности испускания и распределения по множественности заряженных частиц при захвате мюонов легкими ( $C, N, O$ ) и тяжелыми ( $\text{Ag}, \text{Br}$ ) ядрами в фотоэмульсии. Найдено, что полный выход заряженных частиц на один акт захвата составляет (7,4±1,4)% для ядер ( $C, N, O$ ) и (2,9±0,2)% - для ядер ( $\text{Ag}, \text{Br}$ ). Причем, если захват  $\mu^-$ -мезонов тяжелыми ядрами сопровождается вылетом только одной заряженной частицы (в 93% случаев), то при захвате легкими ядрами преимущественно (в 80%) вылетают две и более заряженные частицы (рис. 10).

Теоретическая оценка полного выхода заряженных частиц при захвате  $\mu^-$ -мезонов легкими ( $C, N, O$ ) ядрами в фотоэмульсии, полученная в рамках резонансного механизма поглощения, составляет < 2%, что находится в противоречии с экспериментальным значением,

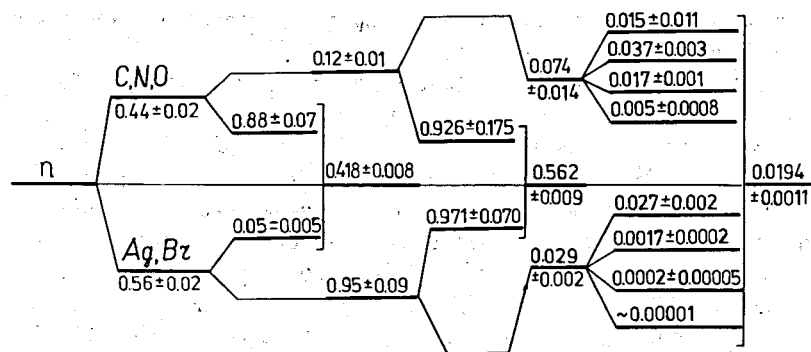


Рис. 10. Схема взаимодействия  $\mu^-$ -мезонов в ядерной фотоэмульсии.

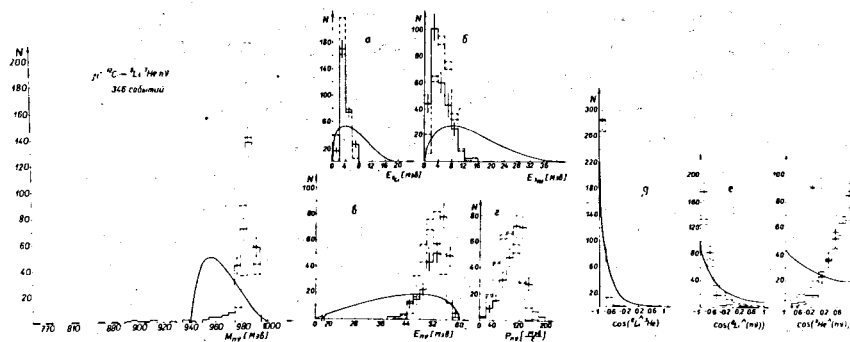


Рис. 11. Распределения событий реакции  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{He} + n + \nu$  по недостатке массы, по энергии ядер  ${}^8\text{Li}$  (а) и  ${}^3\text{He}$  (б), по энергии (в) и импульсу (г) системы  $(n + \nu)$ ; (д), (е) и (ж) — угловые корреляции для реакции  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{He} + n + \nu$ . Сплошная гистограмма — эксперимент; пунктир — результат расчета по схеме резонансного захвата  $\mu^-$ -мезонов; сплошная кривая — распределение по фазовому объему.

найденным в настоящей работе. Следовательно, для ядер середины и конца Ir-оболочки теория захвата  $\mu^-$ -мезонов сложными ядрами пока не может дать количественного объяснения одной из самых общих характеристик этого процесса — выходу заряженных частиц.

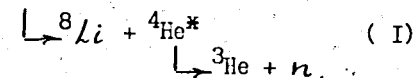
Для того чтобы получить необходимую информацию о характере таких процессов, необходимо детально проанализировать все основные каналы реакций захвата  $\mu^-$ -мезонов ядрами Ir-оболочки с испусканием заряженных частиц.

Результаты впервые проведенного экспериментального исследования всех возможных реакций  $\mu^-$ -захвата с испусканием  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^8\text{B}$  на ядра легкой компоненты фотоэмульсии (C, N, O) представлены в главе VIII.

Экспериментальные данные получены на основании анализа 685  $\beta_\mu$ -звезд с T-образным следом, зарегистрированных в 4 фотоэмульсионных камерах. Вероятность образования такой звезды на одну остановку  $\mu^-$ -мезона равна  $(0,30 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$ .

В результате анализа выделенных  $\beta_\mu$ -звезд установлено, что основным каналом является образование ядра  ${}^8\text{Li}$  при захвате  $\mu^-$ -мезонов в углероде по реакции  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{He} + n + \nu$ .

Детальное рассмотрение угловых и энергетических характеристик вторичных частиц этой реакции (рис. 11) показало, что экспериментальные данные качественно описываются при моделировании реакции по схеме резонансного механизма, согласно которому на первой стадии захвата происходит возбуждение резонанса в системе ядра  ${}^{12}\text{B}^*$ , а при дальнейшем распаде образуется возбужденное ядро  ${}^4\text{He}^*$ :  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu + {}^{12}\text{B}^*$



Наилучшее согласие с энергетическими и угловыми распределениями (рис. 11), полученными в опыте, достигается при моделировании такого процесса с ургонями возбуждения  ${}^{12}\text{B}^*$  —  $(44 \pm 3)$  МэВ и  ${}^4\text{He}^*$  —  $(22,5 \pm 2,0)$  МэВ.

Было установлено, что другим возможным механизмом захвата  $\mu^-$ -мезона ядром  ${}^{12}\text{C}$  по реакции  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{He} + n + \nu$  является захват его частью ядра углерода — кластером  ${}^4\text{Li}$ . Результаты моделирования этого процесса в предположении, что при захвате  $\mu^-$ -мезона на кластере  ${}^4\text{Li}$  образуется возбужденное ядро

Таблица II

Каналы реакций $\mu^-$ -захвата ядром углерода	$\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + \nu +$					
	$+ {}^4\text{He}$	$+ {}^3\text{He} + n$	$+ {}^3\text{H} + p$	$+ 2{}^2\text{H}$	$+ 2\text{H} + p + n$	$+ 2p + 2n$
Число всех идентифицированных событий	50	308	35	16	65	4
$W_I$	$< 2,6 \cdot 10^{-4}$	$(1,6 \pm 0,2) 10^{-3}$	$(1,9 \pm 0,4) 10^{-4}$	$(9 \pm 2) 10^{-5}$	$< 3,5 \cdot 10^{-4}$	$< 2,2 \cdot 10^{-5}$
Число однозначно идентифицированных событий		220	18	2		
$W_{II}$		$(1,1 \pm 0,2) 10^{-3}$	$(1,0 \pm 0,3) 10^{-4}$	$(1,1 \pm 0,8) 10^{-5}$		

Таблица III

Каналы реакций $\mu^-$ -захвата ядром азота	Число всех идентифицированных событий	$W_I$	Число однозначно идентифицированных событий	$W_{II}$
$\mu^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + \nu +$				
$+ {}^6\text{Li}$	12	$< 1,4 \cdot 10^{-4}$		
$+ {}^4\text{He} + {}^2\text{H}$	52	$(7,4 \pm 0,3) 10^{-4}$	7	$(1,0 \pm 0,4) 10^{-4}$
$+ {}^3\text{He} + {}^3\text{H}$	41	$(5,8 \pm 0,1) 10^{-4}$	6	$(0,9 \pm 0,4) 10^{-4}$
$+ {}^4\text{He} + p + n$	34	$< 4,8 \cdot 10^{-4}$		
$+ {}^3\text{He} + {}^2\text{H} + n$	16	$< 2,3 \cdot 10^{-4}$		
$+ {}^3\text{He} + p + 2n$	2	$< 10^{-5}$		
$+ {}^3\text{H} + {}^2\text{H} + p$	2	$< 3 \cdot 10^{-5}$		

${}^4\text{He}^*$ , распадающееся на  ${}^3\text{He}$  и нейтрон, а импульсное распределение  ${}^4\text{Li}$  совпадает с экспериментально определенным импульсным распределением ядра  ${}^8\text{Li}$ , приведены на рис. II. Видно, что рассчитанные распределения также хорошо согласуются с экспериментальными.

Определены величины относительных вероятностей всех возможных каналов захвата  $\mu^-$ -мезонов ядрами углерода с образованием  ${}^8\text{Li}$  (таблица II).

Из таблицы следует, что основной канал-реакция  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{He} + \nu$  - имеет величину относительной вероятности по крайней мере на порядок выше, чем для всех других рассмотренных каналов  $\mu^-$ -захвата. Неожиданно малая величина относительной вероятности получена для реакции  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{H} + \nu$ .

Измерены энергетические спектры и угловые корреляции вторичных частиц в реакциях  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{H} + \nu$  и  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + n + {}^2\text{H} + \nu$ . Проанализированы возможные механизмы этих процессов [24].

Из результатов исследования механизмов реакций захвата  $\mu^-$ -мезона ядрами углерода можно сделать вывод, что в реакциях с испусканием ядра  ${}^8\text{Li}$  в промежуточном состоянии образуется возбужденное ядро  ${}^4\text{He}^*$  преимущественно в состоянии  $(22,5+2,0)$  МэВ. Качественно энергетические и угловые распределения вторичных частиц в рассмотренных реакциях описываются при моделировании исследуемых процессов по механизму прямого поглощения  $\mu^-$ -мезонов малонуклонным кластером  ${}^4\text{Li}$ .

В таблицах III и IV приведены числа событий, отнесенные к возможным реакциям на азоте и кислороде, и вычисленные по этим данным значения относительных вероятностей каналов  $\mu^-$ -захвата. На основании измеренных в опыте энергетических и угловых распределений вторичных частиц от реакции  $\mu^- + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^4\text{He} + {}^4\text{He} + \nu$  были рассмотрены возможные механизмы захвата  $\mu^-$ -мезона кислородом с образованием ядра  ${}^8\text{Li}$ . Получено, что наилучшее согласие расчетных распределений с экспериментальными данными достигается при моделировании реакции  $\mu^- + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^4\text{He} + {}^4\text{He} + \nu$  по схеме захвата  $\mu^-$ -мезона кластером  ${}^8\text{Be}$ .

В реакциях  $\mu^-$ -захвата ядрами углерода и кислорода с образованием T-образного следа в фотозумльсии проведен поиск многонейтронных ядерных систем:  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^4n$  и  ${}^4\text{H}$ . Найдено, что величина относительной вероятности образования ядра  ${}^8\text{He}$  по реакции



$\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{He} + {}^3\text{He} + p + \nu$  на 90% уровне достоверности составляет  $5 \cdot 10^{-6}$ .

Значения верхних границ относительной вероятности образования тетранейтрона и тетраводорода равны:

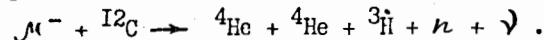
для  ${}^4\text{He}$  по реакции  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Be} + 4n$ ,  $W(4n) < 5,4 \cdot 10^{-5}$ ;  
 для  ${}^4\text{H}$  по реакции  $\mu^- + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^8\text{B} + 4n$ ,  $W(4n) < 10^{-5}$ .

Относительные вероятности реакций  $\mu^-$ -захвата с испусканием фрагментов  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^8\text{B}$  составляют доли процента, что является малой частью полной вероятности процессов захвата мюонов легкими ядрами с испусканием заряженных частиц. И хотя в ряде случаев удалось установить механизм процесса, тем не менее распространить его на случай испускания любых заряженных частиц не представляется возможным. Необходима постановка специальных экспериментов, которые позволили бы идентифицировать наиболее вероятные каналы реакций  $\mu^-$ -захвата. Экспериментальному изучению двух таких каналов посвящена глава IX<sup>22, 23</sup>.

Таблица IV

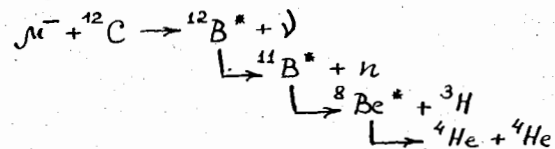
Каналы реакций $\mu^-$ -захвата ядром кислорода	Число всех идентифицированных событий	$W_I$	Число однозначно идентифицированных событий	$W_{II}$
$\mu^- + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^8\text{Li} + \nu + \dots$				
$+ {}^7\text{Be} + n$	47	$< 1,5 \cdot 10^{-4}$		
$+ {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$	62	$(2,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$	28	$(0,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$
$+ {}^6\text{Li} + {}^2\text{H}$	21	$(0,7 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$	2	$(0,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-5}$
$+ {}^7\text{Li} + p$	15	$(0,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-4}$	3	$(1,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-5}$
$+ {}^4\text{He} + {}^3\text{He} + n$	12	$< 0,4 \cdot 10^{-4}$		
$+ {}^6\text{Li} + p + n$	12	$< 0,4 \cdot 10^{-4}$		
$+ {}^3\text{He} + {}^3\text{He} + 2n$	1	$< 10^{-6}$		
$+ {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + p$	5	$< 0,2 \cdot 10^{-4}$		
$+ {}^4\text{He} + {}^2\text{H} + {}^2\text{H}$	2	$< 0,7 \cdot 10^{-5}$		

В рамках теоретической модели резонансного поглощения мюонов ядрами  ${}^{12}\text{C}$  было показано, что основным каналом с образованием заряженных частиц является захват  $\mu^-$ -мезона по реакции



С целью исследования этой реакции в эмульсионных камерах было проанализировано 19 377  $\mu^-$ -звезд, из числа которых выделено и измерено 652 трехлучерых события.

На основе кинематических ограничений, налагаемых законами сохранения энергии-импульса, было найдено, что относительная вероятность реакции  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + n + \nu$  не превышает величины  $(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$ . Анализ всех возможных механизмов реакции позволил установить, что две  $\alpha$ -частицы могут образоваться в результате развала возбужденного состояния  ${}^8\text{Be}^*$ . Экспериментальное распределение выделенных событий по эффективной массе двух заряженных частиц подтверждает этот вывод: основная часть событий группируется в интервале масс  $(7454,3 \pm 7458,3)$  МэВ. (Здесь 7454,3 МэВ - масса  ${}^8\text{Be}$  в основном состоянии.) Воспользовавшись этим обстоятельством, мы произвели окончательный отбор событий реакции  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + n + \nu$ . Экспериментальные распределения, полученные в результате такого отбора, вместе с распределениями по фазовому объему и результатам теоретических расчетов, полученных при моделировании процесса по различным схемам резонансного механизма, представлены на рис. 12. Сопоставление экспериментальных результатов с теоретическими расчетами показывает, что энергетические и угловые распределения вторичных частиц могут быть удовлетворительно описаны в предположении, что реакция происходит по схеме



Оценка величины относительной вероятности реакции  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + n + \nu$  на акт захвата по этой схеме составляет  $(1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}$ , что не противоречит значению относительной вероятности, предсказанной резонансным механизмом захвата  $\mu^-$ -мезона ядром углерода.

Был рассмотрен другой возможный механизм поглощения  $\mu^-$ -мезона ядром углерода - захват его малонуклонным кластером  ${}^4\text{He}$ .

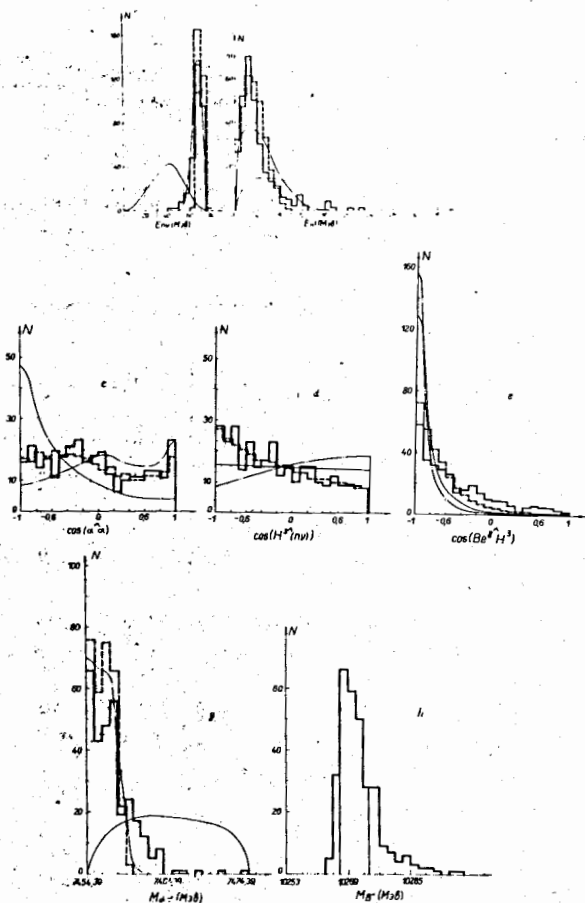


Рис. 12. Распределения событий реакции  $\mu^- \text{I}^{12}\text{C} \rightarrow 4\text{He}^4\text{He}^3\text{He} n$  по суммарной кинетической энергии  $n$ -системы (а), по кинетической энергии ядра  $^3\text{He}$  (в), по эффективной массе двух  $\alpha$ -частиц (д), по эффективной массе трех заряженных частиц (h); (с), (d) и (e) - угловые корреляции для реакции  $\mu^- \text{I}^{12}\text{C} \rightarrow 4\text{He}^4\text{He}^3\text{He} n$ . Сплошная гистограмма - эксперимент; сплошная кривая - фазовый объем; пунктир - результат расчета по схеме I резонансного захвата  $\mu^-$ -мезонов, штрихпунктир - результат расчета по схеме II.

Показано, что если основной вклад в реакции  $\mu^- \text{I}^{12}\text{C} \rightarrow 4\text{He}^4\text{He}^3\text{He} n$  и  $\mu^- \text{I}^{12}\text{C} \rightarrow 8\text{Li}^3\text{He} n$  дает кластерный механизм, то захват  $\mu^-$ -мезона [ $^4\text{Li}$ ] примерно в 50 раз вероятнее, чем кластером [ $^4\text{He}$ ].

Спектр тритонов, полученный в опыте, сравнивается с данными В.Г. Зинова и др. (препринт ОИЯИ Р15-И1215 (1978), Дубна) и теоретическими расчетами, основанными на предположении о доминирующей роли возбуждения коллективных состояний при  $\mu^-$ -захвате (рис. 13). Согласно экспериментальным данным и теоретических расчетов подтверждает вывод о том, что основным каналом  $\mu^-$ -захвата в углероде является реакция  $\mu^- \text{I}^{12}\text{C} \rightarrow 4\text{He}^4\text{He}^3\text{He} n$ .

Среди реакций захвата  $\mu^-$ -мезонов ядрами Ir-оболочки особенно информативными могут оказаться экспериментальные данные о процессах на первом стабильном ядре, в котором заполняется Ir-оболочка - ядре  $^6\text{Li}$ . В частности, интересен вопрос о расщеплении ядра  $^6\text{Li}$  на два фрагмента равной массы по реакции  $\mu^- ^6\text{Li} \rightarrow 3\text{H}^3\text{H}^3$ . Теоретические расчеты этого процесса были проведены на основе так называемых треугольных диаграмм и в рамках резонансного механизма захвата  $\mu^-$ -мезона. Сравнение расчетов показало, что результаты, полученные на основе двух различных моделей, отличаются как по скорости перехода процесса (в 3-4 раза), так и по виду спектра вторичных тритонов.

Результаты впервые проведенного экспериментального изучения реакции  $\mu^- ^6\text{Li} \rightarrow 3\text{H}^3\text{H}^3$  в фотоэмульсии, загруженной ядрами  $^6\text{Li}$ , приведены в главе IX.

Для получения экспериментального материала в пучке  $\mu^-$ -мезонов от синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ было облучено 5 фотоэмульсионных камер, наполненных ядрами  $^6\text{Li}$  в количестве  $32 \text{ мг/см}^2$ , и 2 фоновые камеры из стандартной эмульсии. В результате просмотра этих камер было зарегистрировано 33 240 одно- и двухлучевых  $\sigma_\mu$ -звезд.

С целью выделения реакции  $\mu^- ^6\text{Li} \rightarrow 3\text{H}^3\text{H}^3$  4 498 двухлучевых  $\sigma_\mu$ -звезд (3 042 в камерах с  $^6\text{Li}$  и 1 456 - в стандартной эмульсии) были просмотрены на микроскопе при большом (1350X) увеличении, и для событий без видимого ядра отдачи и электрона в центре звезды были измерены пробеги вторичных заряженных частиц и угол между ними. Измеренные события были проанализированы на ЭВМ при помощи программ кинематического анализа ядерной реакции в фотоэмульсии и по величине квадрата недостающей массы реакции

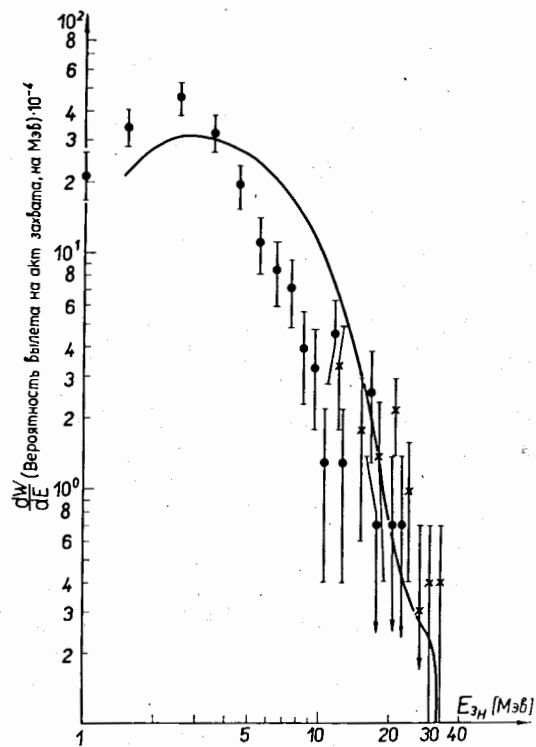


Рис. 13. Спектр вторичных тритонов от захвата  $\mu^-$ -мезонов ядрами углерода. Черные точки - результат исследования реакции  $\mu^- \text{I}_2\text{C} \rightarrow {}^4\text{He} \text{ } ^4\text{He} \text{ } ^3\text{H} \text{ } \nu$ ; кресты - результат работы В.Г. Зинова и др. ОИЯИ Р15-11215 (1978); кривая - расчет в рамках модели предравновесного распада.

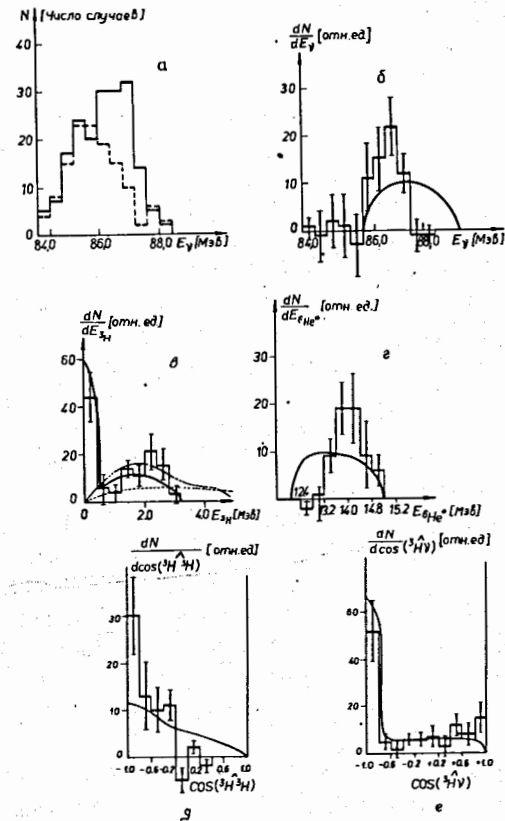


Рис. 14. Распределение событий реакции  $\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} \text{ } ^3\text{H} \text{ } \nu$  по энергии нейтрино: (а) сплошная гистограмма - события реакции, зарегистрированные в слоях, наполненных ядрами  ${}^6\text{Li}$ ; пунктир - события из фоновых камер; (б) спектр нейтрино; (в) энергетическое распределение ядер трития от реакции  $\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} \text{ } ^3\text{H} \text{ } \nu$ ; (г) распределение по энергии возбуждения промежуточного ядра  ${}^6\text{He}^*$ ; (д) распределение углов между двумя тритонами; (е) угловое распределение тритий-нейтрино. Сплошная кривая - расчет на основе кластерного механизма захвата  $\mu^-$ -мезона ядром  ${}^6\text{Li}$ . Штрихпунктирная кривая - расчет по резонансной модели поглощения. Пунктирная кривая - расчет на основе треугольных диаграмм.

$\mu^{-6}\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H} \nu$ . В результате такого анализа было выделено 203 события в камерах, заполненных  ${}^6\text{Li}$ , и 67 событий - в фоновых камерах.

Воспользовавшись энергетическими распределениями нейтрино, полученными для выделенных событий в загруженной и стандартной эмульсии, мы произвели оценку величины относительной вероятности реакции  $\mu^{-6}\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H} \nu$ . Получено, что она равна  $W(\mu^{-6}\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H} \nu) = (9,7 \pm 3,1) \cdot 10^{-2}$ . Найденное значение относительной вероятности согласуется с расчетами по резонансной модели поглощения  $\mu^{-}$ -мезонов ядрами  ${}^6\text{Li}$  и в несколько раз больше теоретических оценок, выполненных на основе треугольных диаграмм.

Полученные в опыте энергетические и угловые распределения вторичных частиц от реакции  $\mu^{-6}\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H} \nu$  приведены на рис. 14. Экспериментальный спектр тритонов (рис. 14в) не согласуется ни со спектром, рассчитанным на основе треугольных диаграмм, ни с вычислениями по резонансной модели.

Противоречие экспериментальных данных расчетам по резонансной модели может означать, что вклад прямых процессов, которыми обычно пренебрегают в таких расчетах, не мал.

Анализ прямых процессов показал, что энергетические и угловые распределения вторичных частиц от реакции  $\mu^{-6}\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H} \nu$  (рис. 14) качественно согласуются с расчетами, выполненными в предположении, что захват  $\mu^{-}$ -мезонов ядром  ${}^6\text{Li}$  в этой реакции происходит на малонуклонном кластере  $[{}^3\text{He}]$ .

В заключении приводятся основные результаты и выводы.

Представленные в диссертации результаты экспериментальных и теоретических исследований, полученные впервые в работах по изучению нового явления - двойной перезарядки пионов на ядрах - и в опытах по детальному исследованию поглощения остановившихся  $\pi^{-}$ - и  $\mu^{-}$ -мезонов ядрами с вылетом заряженных частиц, показали, что рассмотренные процессы являются не только мощным средством анализа механизмов взаимодействия частиц высоких энергий с ядрами, но и представляют хороший инструмент для всестороннего изучения структуры ядер. Основные результаты проведенных исследований могут быть кратко сформулированы следующим образом.

I. Разработана и реализована детальная программа исследований процессов двойной перезарядки  $\pi^{-}$ -мезонов на ядрах, намечены основные направления в изучении структуры атомных ядер с помощью этого нового явления:

1) установлены общие закономерности, присущие реакциям двойной перезарядки пионов в области энергий до 400 МэВ: поперечное сечение этого процесса на ядрах в фотоэмульсии изменяется от нескольких микробарн при энергии 40 МэВ до уровня единиц миллибарн в области 300 МэВ, вблизи 260 МэВ в энергетической зависимости сечения наблюдается максимум, сечение двойной перезарядки  $\pi^{-}$ -мезонов во всем исследованном интервале энергий меньше сечения двойной перезарядки  $\pi^{+}$ -мезонов;

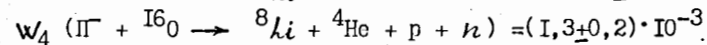
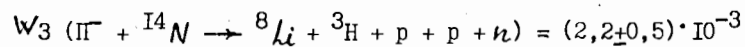
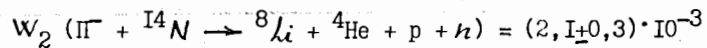
2) впервые проведен анализ конечных состояний всевозможных каналов процесса двойной перезарядки. Получено, что конечные состояния, в которых вылетают один или два протона (в процессах  $\pi^{+} \rightarrow \pi^{-}$ ) или один или два нейтрона (в процессах  $\pi^{-} \rightarrow \pi^{+}$ ), является наиболее вероятным. Найденно, что в исследуемом процессе вероятность образования ядра в основном или слабовозбужденном конечном состоянии составляет меньше 5% от полного выхода. Определено, что сечение процесса  $\pi^{-} {}^{14}\text{N} \rightarrow \pi^{+} {}^8\text{B} 6n$  равно  $(1,3 \pm 0,9) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2$ . Результаты этих исследований открывают новые возможности для изучения двухчастичных-двухдырочных возбуждений в ядрах с  $\Delta T_3 = \pm 2$ , изобарных аналоговых состояний известных стабильных ядер и для проведения поисков новых ядер с большим избытком протонов и нейтронов;

3) проведен теоретический анализ процессов двойной перезарядки пионов на ядрах в рамках парного механизма и показано, что детальная зависимость  $(d\sigma/d\Omega)_0$  как функция числа нейтронов последней оболочки ядра позволяет изучать двухнуклонные корреляции; сечение процессов  $\pi^{\pm} \rightarrow \pi^{\mp}$  зависит от среднеквадратичных радиусов распределения плотности нейтронов и протонов в ядре и в меньшей степени - от относительной формы их распределений; процесс двойной перезарядки происходит без спиновых переходов в переднем направлении и с переворотом спина под углом  $90^{\circ}$ .

II. Исследованы механизмы многочастичного поглощения пионов.

Определены относительные вероятности всех возможных каналов реакций с образованием  ${}^8\text{Li}$  при захвате  $\pi^{-}$ -мезонов ядрами углерода, азота и кислорода, входящих в состав эмульсии. Основными каналами являются:

$$W_I(\pi^{-} {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^2\text{H} + p + n) = (2,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$$



Анализ энергетических и угловых распределений вторичных частиц в рамках теории прямых ядерных реакций показал, что при поглощении  $\pi^-$ -мезонов ядрами  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{16}\text{O}$  с образованием  ${}^8\text{Li}$  основную роль играет поглощение на четырехнуклонной ассоциации [ ${}^4\text{Li}$ ], а при  $\pi^-$ -захвате на азоте существенный вклад вносят поглощения на ассоциациях [ $pp$ ], [ ${}^5\text{Li}$ ], [ ${}^6\text{Be}$ ].

Проведены поиски многонейтронных систем  ${}^3n$ ,  ${}^4n$ ,  ${}^5n$  и  ${}^6n$  и установлено, что относительные вероятности их образования в реакциях захвата  $\pi^-$ -мезонов ядрами  ${}^{14}\text{N}$  и  ${}^7\text{Li}$  не превышают  $1,2 \cdot 10^{-3}$  на ядрах лития и  $10^{-5}$  — для реакций на азоте.

III. Впервые проведенное всестороннее исследование процесса захвата  $\mu^-$ -мезонов ядрами в фотоэмульсии с испусканием вторичных заряженных частиц открывает новое направление в изучении структуры легких ядер.

Установлена общая схема взаимодействия остановившихся  $\mu^-$ -мезонов с легкими (C, N, O) и тяжелыми (Ag, W) элементами в фотоэмульсии. Найдено, что полный выход заряженных частиц при захвате мюонов легкими ядрами составляет  $(7,4 \pm 1,4)\%$ , что в настоящее время не может быть объяснено в общепринятых рамках теории резонансного захвата  $\mu^-$ -мезонов.

Фотоэмульсионным методом впервые экспериментально исследованы все возможные каналы реакций поглощения  $\mu^-$ -мезонов ядрами углерода, азота и кислорода с образованием  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^8\text{B}$ . Получено, что наиболее вероятным каналом является захват  $\mu^-$ -мезонов по реакции  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{He} + n + \nu$ . Величина относительной вероятности этой реакции  $(1, 1 \pm 0, 2) \cdot 10^{-3} \leq W_{\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{He} + n} \leq (1, 6 \pm 0, 2) \cdot 10^{-3}$  по крайней мере на порядок выше вероятностей всех других возможных каналов  $\mu^-$ -захвата с образованием ядер  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^8\text{B}$ . Энергетические спектры и угловые корреляции вторичных частиц хорошо описываются при моделировании процесса  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{He} + n + \nu$  по схеме резонансного захвата и так же, как и в случае  $\pi^-$ -захвата, могут быть описаны при расчете поглощения  $\mu^-$ -мезона частью ядра углерода — кластером [ ${}^4\text{Li}$ ].

Впервые проведенное экспериментальное исследование наиболее

вероятной реакции захвата  $\mu^-$ -мезона в углероде  $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + n + \nu$  показало, что с вероятностью  $(1, 1 \pm 0, 1) \cdot 10^{-2}$  на акт захвата она осуществляется по схеме, предсказанной резонансным механизмом захвата мюона ядром углерода.

В фотоэмульсии, загруженной ядрами  ${}^6\text{Li}$ , впервые детально изучена реакция  $\mu^- + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^3\text{H} + \nu$ . Получено, что величина относительной вероятности реакции равна  $(9, 7 \pm 3, 1) \cdot 10^{-2}$ ; энергетические и угловые распределения вторичных частиц качественно согласуются с оценками, выполненными в предположении, что захват  $\mu^-$ -мезонов ядрами  ${}^6\text{Li}$  в этой реакции происходит на малонуклонном кластере [ ${}^3\text{He}$ ].

Из анализа реакций захвата мюонов ядрами Ir-оболочки с испусканием заряженных частиц следует, что в такие процессы, наряду с механизмом резонансного поглощения  $\mu^-$ -мезонов, большой вклад вносит механизм поглощения мюонов на малонуклонных кластерах.

IV. Разработана методика кинематического анализа ядерных реакций в фотоэмульсии и внедрена система обработки экспериментальных данных, эффективно использующая возможности современных ЭВМ, что позволяет на новом уровне проводить исследования различных каналов реакций взаимодействия протонов,  $\pi^-$  и  $\mu^-$ -мезонов с ядрами фотоэмульсионным методом.

#### Литература

1. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. Диплом об открытии явления двойной перезарядки  $\pi^-$ -мезонов № 77. Бюллетень ОИПТЗ 17, 4 (1970).
2. Н.М. Агабабян, Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, Г.Р. Гулкянц, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. Сообщение ОИИИ IO-589I, Дубна (1971).
3. Yu.A. Batusov, J.-P. Massue, Y. Sakamoto, P. Guer. Nucl. Phys. B29, 515 (1971).
4. Ю.А. Батусов, Ж. Ганзориг, И.В. Дудора, Б.П. Осипенко, В.М. Сидоров, В.А. Халкин, Д. Чултэм. ЯФ 18, 485 (1973).
5. Yu.A. Batusov, F. Becker. Rivista del Nuovo Cim. 1, 309 (1971).

6. Н.М. Агабабян, Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, Г.Р. Гулканян, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. ЯФ 15, 18 (1972).
7. Ю.А. Батусов, Ж. Ганзориг, Л. Гумнерова, И.В. Дудова, В.М. Сидоров, В.А. Халкин, Д. Чултэм. Сообщение ОИЯИ Р1-7475, Дубна (1973).
8. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. ЯФ 9, 150 (1969).
9. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, В.А. Ярба, Г. Ионице, Э. Лозняну, В. Михул, Д. Турдендорж, Н. Далхажав. ЯФ 9, 378 (1969).
10. Ю.А. Батусов, Б.Ж. Залиханов, В.М. Сидоров, Д. Турдендорж, В.А. Ярба. ЯФ 11, 736 (1970).
11. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, Ю.С. Чайка, В.А. Ярба. ЯФ 10, 354 (1969).
12. Н.М. Агабабян, Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, Х.М. Чернев, П. Кюэр, Ж.-П. Массюэ, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. Препринт ОИЯИ Е1-4492, Дубна (1969).
13. Н.М. Агабабян, Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, Н.Ф. Голованова, П. Кюэр, Ж.-П. Массюэ, В.М. Сидоров, Х.М. Чернев, В.А. Ярба. ЯФ 13, 283 (1971).
14. Н.М. Агабабян, Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.И. Генчер, Н.Ф. Голованова, Г.Р. Гулканян, В.М. Сидоров, Х.М. Чернев, В.А. Ярба. ЯФ 18, 264 (1973).
15. Н.М. Агабабян, Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.И. Генчер, Н.Ф. Голованова, Г.Р. Гулканян, В.М. Сидоров, Х.М. Чернев, В.А. Ярба. ЯФ 18, 256 (1973).
16. Ю.А. Батусов, Л. Визирева, В.Б. Ковачева, П. Кюэр, Ж.-П. Массюэ, Ф. Мирсалихова, В.М. Сидоров, Х.М. Чернев. ЯФ 26, 249 (1977).
17. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, П.Н. Нечев, В.М. Сидоров, Ц.Н. Спасов, Х.М. Чернев. Препринт ОИЯИ Р1-9730, Дубна (1976).

18. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.А. Вартанян, Г.Р. Гулканян, Н. Курц, В.М. Сидоров, Х.М. Чернев, Р.А. Эремжян, В.А. Ярба. ЯФ 14, 1206 (1971).
19. Ю.А. Батусов, Р.А. Эремжян. ЭЧАЯ 8, 229 (1977).
20. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, Л. Визирева, Г.Р. Гулканян, Ф. Мирсалихова, В.М. Сидоров. ЯФ 18, 962 (1973).
21. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, Л. Визирева, Г.Р. Гулканян, Ф. Мирсалихова, В.М. Сидоров, Х. Чернев. ЯФ 21, 1215 (1975).
22. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, Л. Визирева, Г.Р. Гулканян, Ф. Мирсалихова, В.М. Сидоров, Х. Чернев, Р.А. Эремжян. ЯФ 22, 320 (1975).
23. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, Л. Визирева, Д.А. Галстян, Г.Р. Гулканян, Н.И. Костанашвили, П. Кюэр, Ж.-П. Массюэ, Ф. Мирсалихова, В.М. Сидоров, Х. Чернев, Р.А. Эремжян. ЯФ 28, 459 (1978).
24. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, Л. Визирева, Г.Р. Гулканян, Ф. Мирсалихова, В.М. Сидоров, Х. Чернев, Р.А. Эремжян. ЯФ 27, 1137 (1978).
25. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. ЯФ 6, 998 (1967).
26. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, Г. Ионице, Е. Лозняну, В. Михул, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. ЯФ 5, 354 (1967).
27. Ю.А. Батусов, В.И. Кочкин, В.М. Мальцев. ЯФ 6, 158 (1967).
28. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, Г. Ионице, Е. Лозняну, В. Михул, В.М. Сидоров, Д. Турдендорж, В.А. Ярба. Anal. Stiintifice ale Univ. "Al.I.Cuza", XVI p. 63 (1970).

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 мая 1979 года.