

Г-697

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-89-387

УДК 539.121.32

ГОРНУШКИН
Юрий Алексеевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ
КОНСТАНТЫ СВЯЗИ
АНОМАЛЬНОЙ ВЕРШИНЫ $\gamma \rightarrow 3\pi$
В РЕАКЦИИ ОКОЛОПОРОВОГО РОЖДЕНИЯ
ПИОННЫХ ПАР
В КУЛОНОВСКОМ ПОЛЕ ЯДЕР**

**Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1989

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук Г.В. Мицельмахер


Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук В.Н. Первушин
доктор физико-математических наук Э.П. Кистенёв

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт теоретической и экспериментальной физики (Москва)

Защита состоится "___" _____ 1989 г. 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.

Автореферат разослан "___" _____ 1989 г.

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук  Д.А. Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

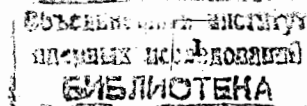
Актуальность проблемы. Исследование вершины $\gamma \rightarrow 3\pi$ представляет большой интерес в связи с возможностью проверки гипотезы киральных аномалий, которая положена в основу эффективных киральных лагранжианов (ЭКЛ). Метод ЭКЛ рассматривается в настоящее время как наиболее удобный подход к описанию мезонных процессов в низкоэнергетическом пределе квантовой хромодинамики. Справедливость предложенной более 20 лет назад Терентьевым и Адлером низкоэнергетической теоремы, связывающей амплитуды процессов $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ и $\gamma \rightarrow 3\pi$, как неоднократно отмечалось многими авторами, имеет большое значение для проверки гипотезы киральных аномалий. Кроме того, амплитуда $\gamma \rightarrow 3\pi$, так же как и $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$, определяется одной кварковой петлевой диаграммой, что делает этот процесс удобным средством проверки теории цветных кварков. Амплитуда $\gamma \rightarrow 3\pi$ рассчитывалась в разное время в ряде моделей, поэтому экспериментальное исследование этой вершины представляет интерес также и с точки зрения проверки этих моделей. Диссертация посвящена экспериментальному исследованию вершины $\gamma \rightarrow 3\pi$ в реакции диссоциации $\pi^- \rightarrow \pi^0$ в кулоновском поле ядра вблизи порога рождения пионных пар. До исследования, положенного в основу диссертации, константа связи вершины $\gamma \rightarrow 3\pi$ и сечение реакции $\pi^-(A, Z) \rightarrow \pi^+ \pi^0 (A, Z)$ не были измерены, несмотря на неоднократные попытки таких измерений.

Целью диссертационной работы являлось экспериментальное исследование аномальной вершины $\gamma \rightarrow 3\pi$ в реакции образования пионных пар пионами в кулоновском поле ядер $\pi^-(A, Z) \rightarrow \pi^+ \pi^0 (A, Z)$: измерение сечения этой реакции в области малых значений инвариантных масс системы $\pi^- \pi^0$ и определение константы связи $F^{3\pi}$ вершины $\gamma \rightarrow 3\pi$.

Исследования, положенные в основу диссертационной работы, были выполнены при участии автора совместной группой ОИЯИ-ИФВЭ-ИФ АН СССР-ИНФН (Милан, Италия).

Научная новизна исследования

Впервые экспериментально изучена реакция диссоциации $\pi^- \rightarrow \pi^0$ в кулоновском поле ядер вблизи порога рождения пионных пар, измерено полное сечение процесса в области: $s = (p_{\pi^-} + p_{\pi^0})^2 \leq 10 \frac{m_{\pi}^2}{\mu} q^2 \leq 2 \cdot 10^{-3} (\text{ГэВ}/c)^2$. Впервые экспериментально определено значение



константы связи аномальной вершины $\gamma \rightarrow 3\pi$, что позволило проверить гипотезу киральных аномалий и теорию цветных кварков.

Практическая ценность

Полученный результат для константы связи $F^{3\pi}$ в пределах экспериментальных ошибок и теоретических приближений согласуется со значением, которое следует из низкоэнергетической теоремы Терентьева-Адлера, тем самым подтверждается гипотеза киральных аномалий, лежащая в основе эффективных киральных лагранжианов Весса-Зумино-Виттена - современного способа описания низкоэнергетического предела КХД. Согласие полученного значения $F^{3\pi}$ с теоретическим расчетом в кварковой модели при числе цветов кварков, равном 3, подтверждает также цветовую SU(3) симметрию кварков.

Автором был разработан комплекс программ моделирования и анализа физических данных, обеспечивший определение исследуемых физических величин. Он может быть использован в дальнейшем для прецизионных исследований вершины $\gamma \rightarrow 3\pi$.

Автор защищает:

Результаты экспериментальных исследований, выполненные с применением разработанной методики и программного обеспечения:

а) измерение сечения процесса кулоновской диссоциации $\pi^- \rightarrow \pi^- \pi^0$ в околороговой области $S < 10 \text{ мк}^2$;

б) экспериментальное определение константы связи $F^{3\pi}(0)$.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения, содержит 96 страниц машинописного текста, включая 23 рисунка и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе обсуждается значение вершины $\gamma \rightarrow 3\pi$ для теории киральных аномалий. Отмечено, что измерение константы связи $F^{3\pi}$ этой вершины позволило бы проверить низкоэнергетическую теорему Терентьева-Адлера, связывающую амплитуды процессов $\gamma \rightarrow 3\pi$ и $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ (рис.1), которая имеет важнейшее значение для гипотезы киральных

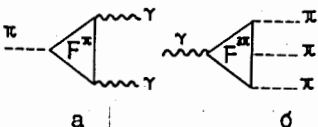


Рис.1 Диаграммы, описывающие в низкоэнергетическом пределе аномальные процессы:

а) $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$; б) $\gamma \rightarrow 3\pi$

аномалий - принципа, лежащего в основе эффективных киральных лагранжианов (ЭКЛ). Метод ЭКЛ является современным способом описания мезонных процессов в низкоэнергетическом пределе КХД и интенсивно развивается в настоящее время. Низкоэнергетическая теорема и прямой расчет петлевой диаграммы в кварковой модели при $N_c=3$ дают $F^{3\pi}(0)=9,5 \text{ ГэВ}^{-3}$ (точность теоретических приближений -10%). Рассматриваются результаты расчета константы $F^{3\pi}$ в различных теоретических моделях. Обсуждаются возможные схемы постановки эксперимента для изучения вершины $\gamma \rightarrow 3\pi$. Подробно рассмотрен реализованный в данной работе способ экспериментального исследования данной вершины в реакции рождения пионных пар пионами в кулоновском поле ядер и отмечены его преимущества по сравнению с другими методами. Приведены выражения для сечения этой реакции, используемые в дальнейшем. Обсуждаются особенности реакции, определяющие необходимые условия проведения эксперимента: высокая энергия пучка начальных пионов, хорошее разрешение по передаче импульса ядру.

Во второй главе описана экспериментальная установка "Сигма", с помощью которой был исследован процесс рождения пионных пар в кулоновском поле ядер I/I . Приведены характеристики ее узлов, а также критерии отбора событий изучаемой реакции, использованные при организации триггера, указана набранная в эксперименте статистика.

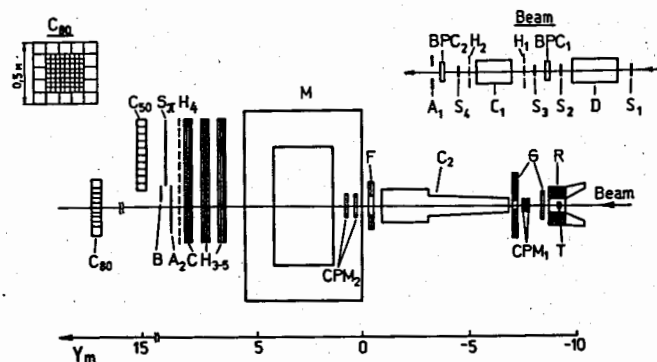


Рис.2 Схема экспериментальной установки "Сигма".

Схема экспериментальной установки приведена на рис.2. Пучок отрицательных пионов с импульсом 40 ГэВ/с, падающий на мишень Т, определялся сцинтилляционными счетчиками S_1-S_4, A_1 , газовым пороговым C_1 и дифференциальным D черенковскими счетчиками.

Интенсивность мониторингового сигнала "beam" = $S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4 \cdot D \cdot C_1 \cdot A_1$ составляла 10^6с^{-1} , разброс частиц по импульсам в пучке составлял $\Delta p/p = \pm 2,5\%$. Координаты и углы частиц в пучке измерялись при помощи сцинтилляционных годоскопов H_1 и H_2 и двух блоков пропорциональных камер BPC_1 и BPC_2 с разрешением: $\sigma(x,z) = 0,6 \text{ мм}$, $\sigma(\theta) = 0,12 \text{ мрад}$. Содержание пионов в пучке было 95%.

Основная статистика была набрана на мишенях C, Al, и Fe. Толщина мишеней - 0,25 рад. длин выбиралась в соответствии с требованием малого вклада многократного рассеяния в разрешение установки по передаче импульса ядру. Система счетчиков антисовпадений, состоящая из счетчиков R, G и F типа "сэндвич" (слои сцинтиллятора - вольфрам, сцинтиллятор - свинец), окружавших мишень, порогового черенковского счетчика C_2 , работавшего в режиме антисовпадений с порогом для пионов 18 ГэВ, сцинтилляционного счетчика A_2 , расположенного перед гамма-детектором и использовавшегося для исключения событий с попаданием заряженных частиц в гамма-детектор, сцинтилляционного счетчика B, запрещавшего формирование триггера при наличии непроизводивших пионов, использовалась при формировании логического сигнала "anti" = $R + G + F + C_2 + A_2 + B$, подчеркивающего в триггере нужный тип реакции.

Импульс рассеянного π^- -мезона измерялся при помощи магнитного спектрометра, состоящего из магнита M, системы пропорциональных камер $SPM_{1,2}$ и системы искровых камер SN_{3-5} . Система пропорциональных камер $SPM_{1,2}$ обеспечивала точности при измерении координат и углов рассеянных частиц: $\sigma(x,z) = 0,6 \text{ мм}$, $\sigma(\theta) = 0,12 \text{ мрад}$, а искровых - с точностью $\sigma(\theta) = 0,38 \text{ мрад}$. Импульс заряженных частиц измерялся в приближении однородного магнитного поля с точностью $\Delta p/p < 1\%$. Счетчик S_π использовался для временной привязки треков в искровых камерах. Для регистрации фотонов от распада π^0 -мезонов использовался годоскопический черенковский спектрометр C_{80} (рис.2), имеющий апертуру $50 \times 50 \text{ см}^2$. Гамма-спектрометр был собран из 80 черенковских счетчиков полного поглощения с радиаторами из свинцового стекла, счетчики внешнего слоя (16 штук) имели размер $10 \times 10 \times 42 \text{ см}^2$ (-14 рад. длин). Внутренние 64 счетчика имели геометрический размер радиаторов $3,8 \times 3,8 \times 42 \text{ см}^2$. Амплитуды анодных сигналов ФЭУ всех счетчиков измерялись при помощи преобразователей заряд-код. Импульсы с последних динодов внутренних 64 счетчиков пассивно суммировались, образуя сигнал "E $_\gamma$ ". Координата γ -кванта во внутренних счетчиках вычислялась по

центру тяжести ливня, с последующей коррекцией нелинейности. Ошибка в определении координаты γ -кванта во внутренних счетчиках составляла $\sigma(x,z) \approx 0,3 \text{ см}$. Координата фотона при регистрации его во внешнем счетчике определялась по форме электромагнитного ливня^{1/2}, измеренной в специальном методическом сеансе. В том же случае, когда сигналов в соседних счетчиках (по отношению к тому, в который попал фотон) не было, за координату фотона принимался центр счетчика. Таким образом, ошибка в определении координаты во внешнем счетчике в среднем была $\sigma(x,z) \leq 2,8 \text{ см}$.

Энергетическое разрешение 64 внутренних счетчиков при калибровке их в электронном пучке с импульсом 26,6 ГэВ составляло $\sigma(E)/E = 3,5\%$. Энергетическое разрешение внешних 16 счетчиков при калибровке было того же порядка, однако оно зависело от места попадания фотона в счетчик из-за "вытекания" энергии из счетчика при попадании фотона в его край. Сигналы: "beam" - от пучковых сцинтилляционных и черенковских счетчиков, "anti" - от системы антисовпадательных счетчиков, от сцинтилляционного годоскопа - "S $_\pi$ ", а также сигнал "E $_\gamma$ ", означающий существенное энерговыделение в γ -детекторе, использовались для формирования триггера: "Триггер" = "beam" \cdot "anti" \cdot "S $_\pi$ " \cdot "E $_\gamma$ ". Уровень триггера составлял 10^{-5} . По приходу триггерного сигнала информация с детекторов передавалась в ЭВМ, которая осуществляла технический контроль за состоянием аппаратуры, запись информации на магнитные ленты.

В третьей главе изложены схема и результаты моделирования эксперимента. В частности, приведены результаты расчета аксептанса установки в зависимости от разных кинематических переменных, расчета эффективности использованных при анализе данных критериев отбора, а также определено разрешение установки при измерении поперечной передачи импульса ядру в исследуемой реакции. Полученная зависимость аксептанса от α и q^2 представлена на рис.3.

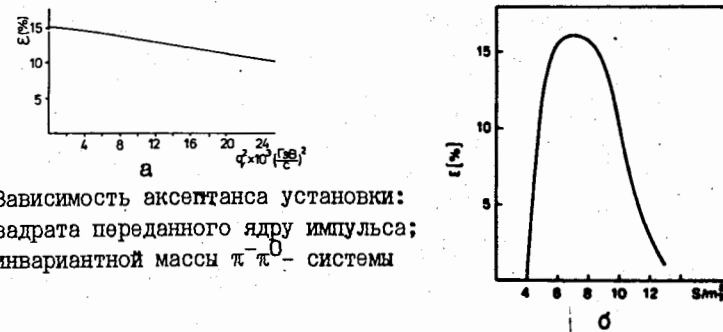


Рис.3 Зависимость аксептанса установки: а) от квадрата переданного ядру импульса; б) от инвариантной массы $\pi^- \pi^0$ - системы

Из рисунка видно, что акцептанс плавно меняется в интервале $q^2 < 25 \cdot 10^{-3} (\text{ГэВ}/c)^2$. Это обстоятельство важно с точки зрения наблюдения пика в этом распределении. Падение акцептанса в области больших s ограничивало интервал регистрируемых значений этой переменной интересующей областью малых инвариантных масс $\pi^-\pi^0$ системы. С помощью программы моделирования было также определено разрешение установки при измерении поперечной передачи импульса ядру $\sigma(q_T) = 17 \text{ МэВ}$ и эффективности отбора событий при наложении различных ограничений на кинематическую область. При расчете с помощью моделирования всех перечисленных параметров учитывались реальные погрешности в определении импульса первичных π^- -мезонов, координат и углов в трековых детекторах, точность определения координат и энергии фотонов в гамма-детекторе, многократное рассеяние π^- -мезона в мишени. При моделировании параметры, характеризующие геометрию установки, варьировались, чтобы определить погрешность акцептанса, связанную с ошибками в их измерении. Ошибка в определении акцептанса не превышала $\Delta\varepsilon/\varepsilon < 4\%$. Точность в определении разрешения установки была около 10%. Эти погрешности в дальнейшем вошли в систематическую ошибку результатов.

В четвертой главе изложена процедура обработки экспериментальных данных на этапе выделения событий реакции $\pi^-(A, Z) \rightarrow \pi^-\pi^0(A, Z)$. Работа основана на статистике $\sim 8 \cdot 10^{10}$ π^- -мезонов, пропущенных через C, Al и Fe мишени, а также через "пустую" мишень. Записанная информация ($\sim 1,1 \cdot 10^6$ триггеров) была обработана с помощью программы геометрической реконструкции. В результате были восстановлены параметры треков заряженных частиц, а также энергии и координаты фотонов в гамма-детекторе.

Отбор событий изучаемой реакции производился с помощью следующих критериев:

- только одна отрицательно заряженная частица с импульсом $< 18 \text{ ГэВ}/c$ зарегистрирована в магнитном спектрометре;
- угол рассеяния π^- -мезона $\theta_{\text{лаб}} > 3,5$ мрад (этот критерий использовался для более точного определения координат точки взаимодействия);
- треки первичного и рассеянного пионов хорошо "сшиваются" в мишени;
- в гамма-спектрометре зарегистрировано два фотона с энергией больше 2 ГэВ каждый.

Для отобранных событий в распределении по эффективной массе

двух фотонов (рис.4) имеется пик, соответствующий π^0 -мезону. Для

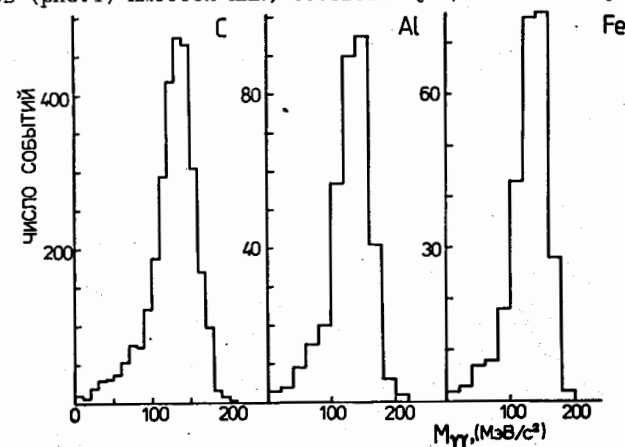


Рис.4 Распределение зарегистрированных событий по эффективной массе двух фотонов для разных ядер.

событий с π^0 было построено распределение по полной энергии продуктов реакции $E_{\text{tot}} = E_{\pi^-} + E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2}$ (рис.5), в котором

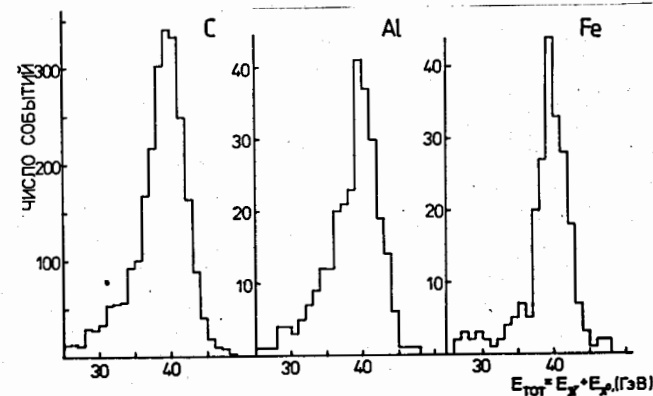


Рис.5 Распределение событий с π^0 -мезонами в конечном состоянии по полной энергии $E_{\text{tot}} = E_{\pi^-} + E_{\gamma}$.

наблюдается пик при 40 ГэВ. Эффективность отбора событий на каждом этапе обработки оценивалась с помощью программы моделирования. События, в которых полная энергия π^- и π^0 в

конечном состоянии соответствовала начальной энергии, идентифицировались как события реакции диссоциации $\pi \rightarrow \pi\pi^0$. Для этих событий в распределении по q^2 -квадрату переданного ядру импульса (рис.6) на всех ядрах хорошо виден характерный для

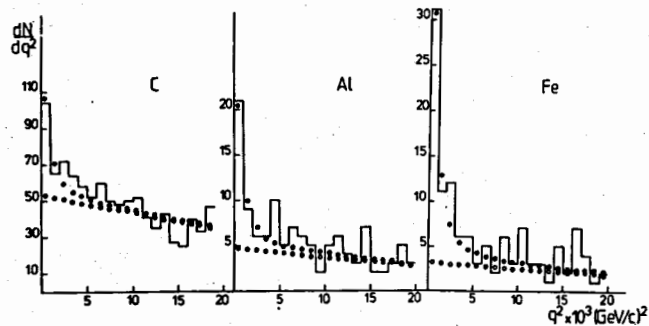


Рис.6 Экспериментальное распределение событий по q^2 , для разных мишеней: \bullet - фитирующая экспериментальное распределение сумма кулоновских событий и фона; \circ - вклад фона.

кулоновских процессов пик в области малых передач. Ширина пика определяется разрешением установки. В главе также анализируются источники фоновых событий и оценивается их возможный вклад в конечную выборку событий.

В пятой главе представлена процедура определения сечения изучаемой реакции и константы связи вершины $\gamma \rightarrow 3\pi$. Обсуждаются два способа вычитания фона ядерных взаимодействий при обработке распределения по передаче импульса. В одном случае количество событий реакции кулоновской диссоциации $\pi \rightarrow \pi\pi^0$ в области $q^2 < 2 \cdot 10^{-3}$ (ГэВ/с)² было определено путем вычитания подложки фоновых событий после ее экстраполяции из области больших передач. В результате было получено сечение реакции на разных ядрах^[3] (табл.1). Систематическая ошибка связана с погрешностью процедуры вычитания фона под пиком. Во втором случае для определения числа кулоновских событий экспериментальное распределение событий по квадрату передачи импульса ядру аппроксимировалось суммой кулоновского распределения и фона (для когерентного ядерного фона

Таблица 1.

Мишень	Экспериментальное значение сечения σ/Z^2 , [нб]
C	$1,2 \pm 0,3_{\text{стат}} \pm 0,8_{\text{сист}}$
Al	$1,48 \pm 0,40_{\text{стат}} \pm 0,29_{\text{сист}}$
Fe	$1,62 \pm 0,33_{\text{стат}} \pm 0,15_{\text{сист}}$

использовалась глауберовская форма, относительно некогерентного фона и фона от событий, в которых часть продуктов реакции не зарегистрирована, считалось, что они дают вклад только в постоянную подложку под пиком). Переход от количества событий к сечению в обоих случаях осуществлялся с помощью нормировки на одновременно исследуемый процесс радиационного рассеяния пионов в кулоновском поле ядер (Z.Phys.C,26,(1985),495). Сечение этого чисто электродинамического процесса точно рассчитывается теоретически, а количество набранных событий более чем на два порядка превышает статистику реакции кулоновской диссоциации $\pi \rightarrow \pi\pi$. В результате аппроксимации было определено значение $F^{3\pi}$ и сечение исследуемой реакции на разных ядрах (табл.2)^[1,4].

Таблица 2.

Мишень	$F^{3\pi}$, (ГэВ ⁻³)	σ , (нб)	σ/Z^2 , (нб)
C	$13,4 \pm 1,8$	64 ± 20	$1,78 \pm 0,56$
Al	$12,4 \pm 1,4$	260 ± 57	$1,54 \pm 0,34$
Fe	$12,9 \pm 1,5$	1110 ± 250	$1,64 \pm 0,37$

После усреднения значений $F^{3\pi}$, полученных на разных ядрах, было получено $F^{3\pi} = 12,9 \pm 0,9$ ГэВ⁻³. Ошибка является статистической. Суммарная систематическая ошибка в значении $F^{3\pi}$, в которую вошли погрешности разрешения, нормировки и определения акцептанса, составила 0,5 ГэВ⁻³. Из рис.7 видно, что полученные значения сечения для разных ядер хорошо согласуются с теоретической Z^2 зависимостью. Усредняя значения σ/Z^2 , полученные на разных ядрах, имеем $\sigma/Z^2 = 1,63 \pm 0,23_{\text{стат}} \pm 0,13_{\text{сист}}$ (нб). Попытка фита

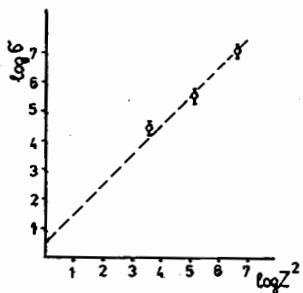


Рис.7 Зависимость измеренного сечения изучаемой реакции от Z^2 (ошибки статистические)

экспериментального распределения без вклада кулоновского процесса имела вероятность $< 10^{-6}$ для всех ядер.

Шестая глава посвящена оценке возможного отклонения найденного экспериментально в области малых значений инвариантных переменных значения константы $\gamma \rightarrow 3\pi$ от $F^{3\pi}(0)$ за счет перехода от низкоэнергетического предела в физическую область. Показано, что при использовании различных экстраполяционных формул это отличие составляет $\approx 1 \text{ ГэВ}^{-3}$. В главе также обсуждаются полученные результаты, дается сравнение с расчетами $F^{3\pi}$ в различных моделях.

Результаты и основные выводы приводятся в заключении:

1. Путем математического моделирования показана возможность экспериментального изучения процесса $\pi^- + (A, Z) \rightarrow \pi^- + \pi^0 + (A, Z)$ на установке СИГМА. Создан комплекс программ, с помощью которого определен аксептанс установки, ее разрешение по различным кинематическим переменным при регистрации событий изучаемой реакции на установке СИГМА, эффективность отбора событий при наложении кинематических ограничений.

2. Разработано программное обеспечение, с помощью которого был выполнен анализ данных ($\sim 10^6$ триггеров), впервые выделен процесс и определено сечение рождения пионных пар пионами в кулоновском поле ядер в околороговой области ($s < 10 m_\pi^2$) для ядер C, Al, Fe:

$$\sigma/Z^2 = 1,63 \pm 0,23_{\text{стат}} \pm 0,13_{\text{сист}} \text{ (нб)}.$$

3. Из анализа экспериментальных данных впервые получено значение константы связи $F^{3\pi}$ аномальной вершины $\gamma \rightarrow 3\pi$:

$$F^{3\pi} = 12,9 \pm 0,9_{\text{стат}} \pm 0,5_{\text{сист}} \text{ (ГэВ}^{-3}\text{)},$$

что позволило впервые проверить низкоэнергетическую теорему Терентьева-Адлера и подтвердить теорию киральных аномалий - важный

принцип, лежащий в основе получения эффективных киральных лагранжианов - современного способа описания низкоэнергетического предела КХД.

4. Сделана оценка возможного отличия экспериментального значения $F^{3\pi}$, измеренного в физической области, от $F^{3\pi}(0)$ - значения в низкоэнергетическом пределе. Показано, что при использовании имеющихся теоретических моделей для описания поведения $F^{3\pi}$ при переходе в низкоэнергетический предел такая экстраполяция приводит к изменению результата на величину $\approx 1 \text{ ГэВ}^{-3}$.

5. Согласие полученного экспериментального значения $F^{3\pi}$ с расчетом в кварковой модели только при числе цветов кварков $N_c=3$ служит подтверждением также и цветной симметрии кварков.

6. Полученные результаты согласуются также с расчетами $F^{3\pi}$ и сечения реакции, выполненными в тех теоретических моделях, где в низкоэнергетическом пределе имеется согласие с теоремой Терентьева-Адлера.

Эти результаты докладывались на научных семинарах ОИЯИ и ФИАН, на Ученых советах ОИЯИ, на НКС ИФВЭ, на сессии ОЯФ АН СССР, на международном семинаре "Quarks-84" (Тбилиси, 1984), на XXII Международной конференции по физике высоких энергий (Лейпциг, 1984). Они опубликованы в виде препринтов и статей в журналах, трудах конференций.^{1-5/}

ЛИТЕРАТУРА

- 1.. Antipov Yu.M., Batarin V.A., Bessubov V.A., Budanov N.P., Gorin Yu.P., Gornushkin Yu.A. Denisov S.P., Klimenko S.V., Kotov I.V., Kulinich P.A., Lebedev A.A., Micelmacher G.V., Olshevski A.G., Palombo F., Petrukhin A.I., Pirtzkhalava R.V., Polovnikov S.A., Roinishvili V.N., Sedlak J., Stoyanova D.A., Travkin V.I.: "Investigation of the chiral anomaly $\gamma \rightarrow 3\pi$ in pion pair production by pion in the nuclear Coulomb field", Phys.Rev.D36,21, (1987); препринт ОИЯИ PI-86-498, Дубна, 1986.
2. Antipov Yu.M., Batarin V.A., Bessubov V.A., Budanov N.P., Gorin Yu.P., Gornushkin Yu.A. Denisov S.P., Klimenko S.V., Kotov I.V., Kulinich P.A., Lebedev A.A., Micelmacher G.V., Olshevski A.G., Palombo F., Petrukhin A.I., Pirtzkhalava R.V., Polovnikov S.A., Roinishvili V.N., Sedlak J., Stoyanova D.A., Travkin V.I.: "Study of $\pi\pi^0$ Production by Pions in Nuclear Coulomb Field at Threshold", Z.Phys.C Part. and Fields, 1985, 27, p.21;

- preprint JINR EI-84-514; Материалы Международного совещания "Quarks-84", Тбилиси, 1984; Материалы XII Международной конференции по физике высоких энергий, Лейпциг, 1984.
3. Antipov Yu.M., Batarin V.A., Bessubov V.A., Budanov N.P., Gorin Yu.P., Gornushkin Yu.A., Denisov S.P., Klimenko S.V., Kotov I.V., Kulinich P.A., Lebedev A.A., Micelmacher G.V., Olshevski A.G., Palombo F., Petrukhin A.I., Pirtzkhalava R.V., Polovnikov S.A., Roinishvili V.N., Sedlak J., Stoyanova D.A., Travkin V.I.: "Experimental Measurement of the $\gamma \rightarrow 3\pi$ Coupling Constant", Phys.Rev.Lett., 1986, 56, p.796; Краткие сообщения ОИЯИ №11-85, Дубна, 1985
4. Ю.П.Горин, Ю.А.Горнушкин, В.Г.Карташева, И.В.Котов, Р.Лейтнер, А.Г.Ольшевский, А.И.Петрухин : "Обработка информации с гамма-детектора установки Сигма-АЯКС", Сообщение ОИЯИ PI-89-206, Дубна, 1989.
5. Ю.А.Горнушкин "Об экстраполяции константы связи вершины $\gamma \rightarrow 3\pi$ в низкоэнергетический предел", Препринт ОИЯИ PI-89-53, Дубна, 1989; Письма ЯФ, 12, 1989.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 мая 1989 года.