

53472

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

М-457

1-2005-81

На правах рукописи
УДК 539.126

МОЛОКАНОВА
Наталья Александровна

**РОЖДЕНИЕ ϕ -МЕЗОНОВ
В НЕЙТРОН-УГЛЕРОДНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ
ПРИ ЭНЕРГИЯХ СЕРПУХОВСКОГО УСКОРИТЕЛЯ**

Специальность: 01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

С 343 г 4

Дубна 2005

Работа выполнена в Лаборатории физики частиц Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель
кандидат физико-математических наук старший научный сотрудник

ПОТРЕБЕНИКОВ
Юрий Константинович

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук профессор

БУНЯТОВ
Степан Агаронович

доктор физико-математических наук доцент

СТРОКОВСКИЙ
Евгений Афанасьевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение – Московский государственный инженерно-физический институт (технический университет)

Защита состоится " _____ " _____ 2005 г. на заседании диссертационного совета Д 720.001.05 при Лаборатории физики частиц Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Московская область

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



КРИВОХИЖИН
Василий Геннадьевич

Актуальность исследования

Экспериментальные исследования рождения ϕ -мезонов – легчайших мезонов со скрытым ароматом, в адронных взаимодействиях позволяют прояснить закономерности, связанные с образованием ароматов в адронных процессах, понять механизмы рождения резонансов со скрытыми ароматами во взаимодействиях частиц, не содержащих соответствующих цветных валентных кварков, в частности, оценить в таких реакциях пределы применимости правила Окубо–Цвейга–Иизуки (ОЦИ) ¹. Согласно этому правилу, в сильных взаимодействиях запрещены или, строго говоря, сильно подавлены процессы, в которых происходит рождение и аннигиляция кварк-антикварковых пар, полностью входящих в состав одного адрона. В частности, в случае, если бы выполнялся строгий запрет, а ϕ -мезон был чистым $s\bar{s}$ -состоянием, то он не мог бы быть образован во взаимодействиях адронов, не содержащих странных кварков в начальном состоянии или дополнительных странных частиц в конечном состоянии. Объяснение природы и анализ случаев нарушения правила ОЦИ – одна из ключевых задач при исследовании процессов взаимодействия кварков. Как показали результаты многочисленных экспериментов, в большинстве случаев это правило выполняется довольно хорошо, с точностью до нескольких процентов. В то же время, имеется целый ряд экспериментальных свидетельств нарушения правила ОЦИ. При этом отклонения наблюдаемых результатов от ожидаемых могут достигать одного-двух порядков. Высказываются предположения, что эти нарушения, возможно, свидетельствуют о том, что динамика процессов гораздо сложнее, чем представляется на современном этапе. Оказалось, например, что наблюдаемое отклонение от правила ОЦИ в каналах аннигиляции с образованием ϕ -мезона сильно зависит от квантовых чисел начального состояния системы нуклон-антинуклон.

¹S. Okubo, Phys. Lett. v.5 (1963) 165; G. Zweig, CERN-TH-412, 1964; J. Iizuka, Prog. Theor. Phys. Suppl. 37 (1966) 21

При анализе и попытках объяснения наблюдаемых случаев нарушения правила ОЦИ предлагаются различные теоретические модели. Например, существует модель так называемой внутренней странности, предполагающая наличие примеси $s\bar{s}$ -пары в составе нуклона, которая может обеспечить рождение ϕ -мезона в NN или $\bar{N}N$ взаимодействиях без нарушения правила ОЦИ. Возможно, среди наблюдаемого набора конечных продуктов реакций, запрещенных правилом ОЦИ, часть частиц образуется в результате распада экзотических многокварковых состояний в систему ϕX . На феноменологическом уровне теоретическое объяснение соблюдения правила ОЦИ состоит в том, что оно обеспечивается рядом промежуточных, компенсирующих друг друга состояний. Иногда теоретически предсказываемые нарушения правила ОЦИ обусловлены учетом лишь ограниченного ряда диаграмм.

Таким образом, любая новая экспериментальная информация по исследованию процессов, в которых возможно нарушение правила ОЦИ, позволяет выявить новые детали или прояснить существующие закономерности в сложной динамике адронных взаимодействий. К числу таких процессов относится и адронное рождение ϕ -мезонов, в том числе – его ассоциативное рождение со странными частицами. Более того, в ряде случаев именно исследование рождения ϕ -мезонов является наиболее эффективным с экспериментальной точки зрения. Например, реакции адронного рождения частиц J/ψ , Υ , состоящих из систем тяжелых кварков $c\bar{c}$, $b\bar{b}$ соответственно, могут также изучаться с этой целью. Однако, в отличие от ϕ -мезонов, исследование таких процессов является чрезвычайно трудной экспериментальной задачей из-за малых величин сечений образования J/ψ и Υ , сложной топологии и малых парциальных вероятностей распадов частиц, содержащих c - и b -кварки, по отдельным каналам.

До настоящего времени исследования характеристик ассоциативного рождения ϕ со странными частицами проводились в экспериментах с различными пучками (π^\pm , K^\pm , p/\bar{p}) в широком диапазоне энергий. В то же время в нейтронных пучках

исследования ϕ -мезонов были выполнены только в экспериментах БИС-2 и ЭКСЧАРМ, проведенных на Серпуховском ускорителе У-70.

Цель диссертационной работы – исследование характеристик рождения ϕ -мезонов в реакциях с ассоциативным образованием странных частиц – Λ^0 -гиперонов и нейтральных каонов, в нейтрон-углеродных взаимодействиях, зарегистрированных в эксперименте ЭКСЧАРМ, и, на этой основе, оценка доли ассоциативного рождения ϕ со странными частицами в реакциях инклюзивного рождения ϕ . Эксперимент ЭКСЧАРМ выполнен на Серпуховском ускорителе в пучке нейтронов со средней энергией ~ 51 ГэВ. Высокое разрешение и рекордная статистическая обеспеченность сигналов от ϕ , Λ^0 и K^0/\bar{K}^0 среди аналогичных исследований, обеспечили возможность достижения поставленной цели.

Научная новизна исследования

- Впервые измерены сечения инклюзивного ассоциативного рождения ϕ -мезонов с Λ^0 -гиперонами и нейтральными каонами в нейтрон-ядерных взаимодействиях.
- Оценена доля ассоциативного рождения ϕ -мезонов со странными частицами, и получено ограничение снизу на суммарный вклад ОЦИ-разрешенных процессов в реакциях инклюзивного рождения ϕ .
- Предложены новые модели рождения ϕ -мезонов в нейтрон-нуклонных взаимодействиях; показана практическая применимость для моделирования условий эксперимента ЭКСЧАРМ разработанных моделей, построенных на основе генератора мягких адронных взаимодействий FRITIOF.

Практическая ценность работы

Изучение характеристик рождения ϕ -мезонов со странными частицами может быть полезно для понимания механизмов

рождения более тяжелых векторных мезонов со скрытыми ароматами – J/ψ и Υ , а также для определения закономерностей, проявляющихся в адронных процессах и связанных с образованием ароматов входящих в адрон кварков.

Существенно развит программный комплекс, используемый для анализа данных и моделирования эксперимента ЭКСЧАРМ.

Апробация работы

Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на XV Международном семинаре по проблемам физики высоких энергий "Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика", Дубна, 25 – 29 сентября 2000 г., на Научных конференциях молодых ученых и специалистов ОИЯИ в 1998 и 1999 гг., а также на научных сессиях Московского государственного инженерно-физического института (технического университета) в 1999 и 2001 гг., многократно обсуждались на рабочих совещаниях сотрудничества ЭКСЧАРМ и семинаре Лаборатории физики частиц Объединенного института ядерных исследований "Физика очарованных и странных кварков" и опубликованы в работах [1–6].

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 114 страниц, включая 26 рисунков и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненного исследования, сформулирована цель диссертационной работы, показана научная новизна работы и описана структура диссертации.

Первая глава содержит обзор результатов экспериментов по исследованию ассоциативного рождения ϕ -мезонов со

странными частицами и проверке правила Окубо–Цвейга–Иизуки. Большинство из этих результатов позволяет утверждать, что правило ОЦИ выполняется довольно хорошо, с точностью до нескольких процентов. В то же время, имеется целый ряд экспериментальных свидетельств его нарушения.

Описаны используемые в дальнейшем модели рождения адронов в инклюзивных реакциях: модель кварк-глюонного слияния, правила кваркового счета, феноменологическая модель фрагментации струн FRITIOF, предназначенная для описания адронных процессов, проходящих при малых передачах импульсов.

Во второй главе описаны условия проведения эксперимента ЭКСЧАРМ, а также соответствующая экспериментальная установка.

В состав установки (рис.1) входят:

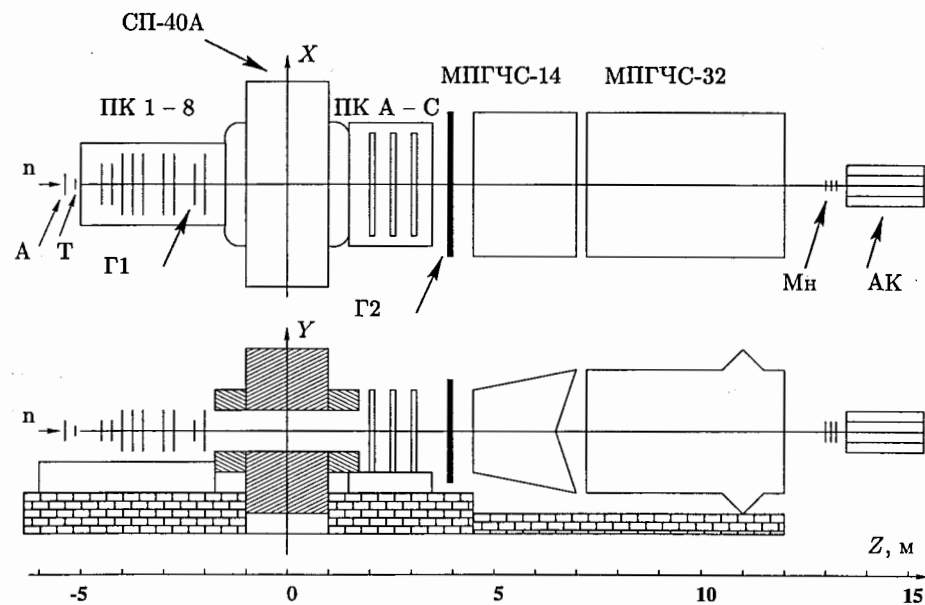


Рис. 1: Спектрометр ЭКСЧАРМ

- углеродная мишень Т толщиной $1,3 \text{ г/см}^2$ по пучку;

- анализирующий магнит СП-40А с апертурой $274 \times 49 \text{ см}^2$ и с максимальным значением напряженности поля 0,79 Тл; система электропитания магнита обеспечивает возможность оперативного переключения его полярности;
- система из 11 многопроволочных пропорциональных камер ПК (25 сигнальных плоскостей), расположенных до (ПК1 – ПК8) и после магнита (А, В и С);
- годоскопы сцинтилляционных счетчиков Г1 и Г2, используемые для выработки сигнала, запускающего установку (триггера);
- монитор нейтронного пучка Мн для контроля за длительностью и равномерностью сброса пучка протонов ускорителя на внутреннюю мишень и определения потока образованных на этой мишени нейтронов;
- адронный калориметр АК для измерения энергетического спектра нейтронного пучка;
- четырнадцатиканальный (МПГЧС-14) и тридцатидвухканальный (МПГЧС-32) пороговые газовые черенковские счетчики для идентификации заряженных частиц.

Пучок нейтронов образуется в результате взаимодействия циркулирующих в кольце ускорителя протонов с внутренней бериллиевой мишенью и формируется системой коллиматоров, расположенных вдоль оси, образующей угол $\approx 0^\circ$ к падающим протонам. Энергетический спектр пучка (рис.2) имеет максимум в районе 58 ГэВ и ширину около 12 ГэВ. Средняя энергия нейтронов составляет 51 ГэВ.

Для описания спектрометра используется правая система координат с осью OZ , направленной вдоль оси пучка нейтронов, осью OY , направленной вверх вдоль направления основной компоненты магнитного поля, и началом координат, совпадающим с центром магнита СП-40А.

Более детально спектрометр ЭКСЧАРМ описан в работе [1].

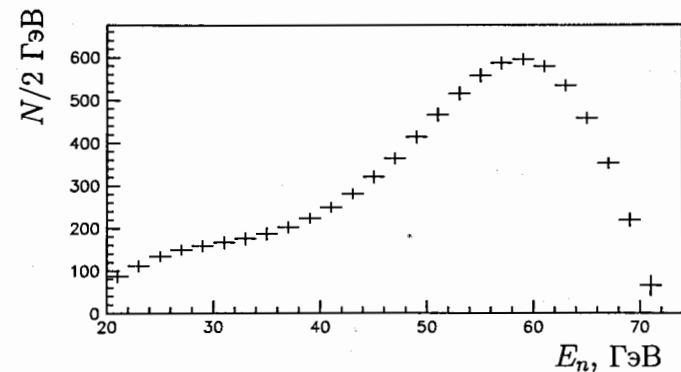


Рис. 2: Энергетический спектр нейтронов пучка. Здесь и далее N – количество комбинаций.

В третьей главе приведено описание программного обеспечения, используемого для геометрической реконструкции треков, физического анализа данных и моделирования эксперимента, а также изложена методика оценки эффективности установки при регистрации исследуемых состояний.

Обработка экспериментальной информации и отбор событий выделенных конфигураций производились в несколько этапов:

- обработка первичной информации, распознавание траекторий заряженных частиц (треков), восстановление их геометрических параметров и определение импульсов соответствующих частиц с учетом карты магнитного поля;
- отбор событий, содержащих нейтральную вилку (пара треков противоположно заряженных частиц, имеющих общую точку пересечения), являющуюся кандидатом в распад Λ^0 , $\bar{\Lambda}^0$ или K^0 ;
- запись событий на диск в компактном виде, обеспечивающем в дальнейшем быстрый доступ к отобранной информации;
- физический анализ отобранных событий с целью поиска сигналов в спектрах эффективных масс конечных состояний распада исследуемых частиц.

Моделирование изучаемых процессов осуществлялось программой SIMEX, разработанной на основе системы GEANT-3. При прослеживании частиц события используется детальное описание конфигурации установки ЭКСЧАРМ, примененных в ее конструкции материалов и существующих сред. Для решения задач, поставленных в настоящей работе, возможности программного комплекса моделирования условий эксперимента были существенно расширены:

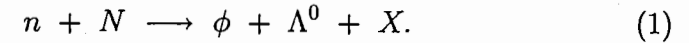
- добавлен модуль, реализующий алгоритмы ассоциативного рождения ϕ -мезонов и Λ^0/K_S^0 на основе генератора FRITIOF, а также с использованием промежуточной компаунд-частицы;
- реализован удобный интерфейс пользователя для выбора исследуемого процесса, соответствующей модели и настроек ее параметров.

В четвертой главе приведены результаты исследований ассоциативного рождения ϕ -мезонов с Λ^0 -гиперонами [2-4] и нейтральными каонами K^0/\bar{K}^0 [2, 3, 5, 6], проведенных на основе анализа экспериментальных данных, полученных с помощью спектрометра ЭКСЧАРМ. Выполненные исследования явились естественным продолжением цикла работ по изучению процессов образования ϕ -мезонов в эксперименте ЭКСЧАРМ, проведенных ранее с участием автора².

События ассоциативного рождения ϕ -мезонов с Λ^0 и K_S^0 отбирались из $\sim 172 \cdot 10^6$ исходных нейтрон-углеродных взаимодействий, зарегистрированных спектрометром в одном из сеансов экспозиции установки ЭКСЧАРМ. Для оптимального использования дискового пространства и существенного ускорения анализа отобранных данных был разработан и использовался специальный компактный формат записи события на машинные накопители информации – ХСОМРАСТ [6].

²А.Н. Алеев и др., ОИЯИ, Р13-96-437, Дубна, 1996, 20 с.; N.A. Molokanova, Vol.47(1997), No.9, p. 919-924; А.Н. Алеев и др., Краткие сообщения ОИЯИ No.1(93)-99, с. 14-29.

Топология событий с ассоциативным образованием ϕ -мезонов и Λ^0 -гиперонов соответствует реакции



При отборе кандидатов требовалось наличие в событии не менее, чем двух положительно и двух отрицательно заряженных частиц.

Поиск ϕ -мезонов и Λ^0 -гиперонов осуществлялся в спектрах эффективных масс следующих конечных состояний их распадов:

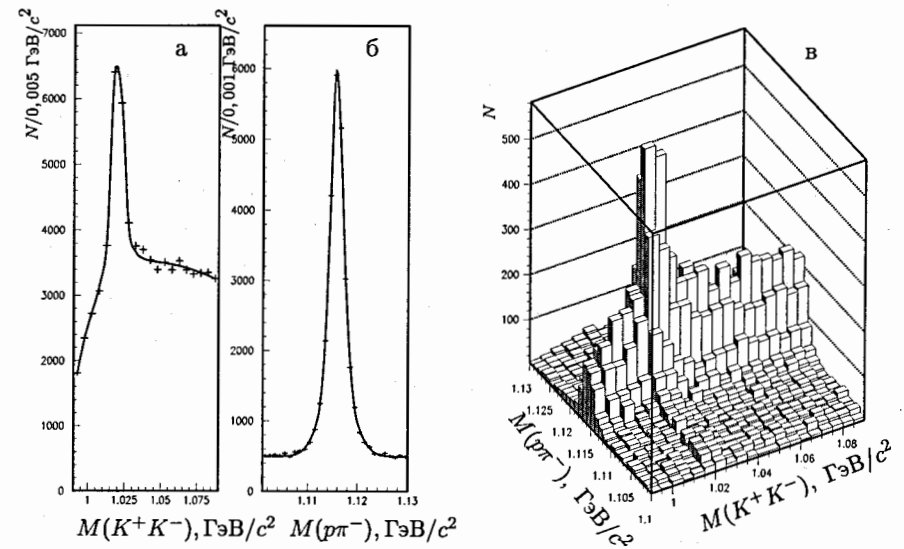


Рис. 3: Спектр эффективных масс состояний K^+K^- (а) и $p\pi^-$ (б), кривые – результат аппроксимации; (в) – распределение событий по эффективным массам $M(K^+K^-)$ и $M(p\pi^-)$

На рис. 3а и 3б представлены соответственно распределения эффективных масс (M) состояний K^+K^- ($M(K^+K^-)$) и $p\pi^-$ ($M(p\pi^-)$). Четко выделяемые сигналы на приведенных

распределениях могут быть интерпретированы, как сигналы от ϕ и Λ^0 соответственно.

Параметры сигнала в спектре $M(K^+K^-)$ были определены в результате его аппроксимации суперпозицией свертки функции Брейта-Вигнера с гауссовой функцией (для учета разрешения спектрометра). Фон был аппроксимирован гладкой функцией. Сигнал в спектре эффективных масс системы $p\pi^-$ аппроксимировался суперпозицией функций Гаусса, а фон – линейной функцией. Полученные характеристики сигналов ϕ и Λ^0 в пределах погрешностей хорошо согласуются с данными Particle Data Group (PDG) ³. Это дает основание сделать вывод о надежности примененной процедуры выделения сигналов.

Для выделения ассоциативно рожденных ϕ и Λ^0 проанализировано двумерное распределение эффективных масс комбинаций K^+K^- и $p\pi^-$ (рис. 3в). В области пересечения масс ϕ -мезона и Λ^0 -гиперона наблюдается обогащение событиями, что может служить указанием на наличие ассоциативного рождения ϕ и Λ^0 . Количество комбинаций в сигнале, обусловленном ассоциативным рождением ϕ и Λ^0 , было вычислено с использованием процедуры разбиения двумерного распределения на отдельные элементы с определенным шагом по $M(K^+K^-)$ и $M(p\pi^-)$ и составило 2818 ± 160 . Комбинаторный фон в области сигнала не превышает 3%.

Эффективность регистрации событий с ассоциативным рождением ϕ и Λ^0 получена из моделирования, которое выполнялось двумя способами: в первом применялся скорректированный генератор FRITIOF; во втором – использовалась модель рождения $\phi\Lambda^0$ через образование промежуточной компаунд-частицы. Достигнуто (см. рис. 4) хорошее согласие экспериментальных и полученных из моделирования спектров продольных и поперечных импульсов ассоциативно рожденных $\phi\Lambda^0$, распределений по множественности заряженных частиц, спектров продольного и квадрата поперечного импульсов

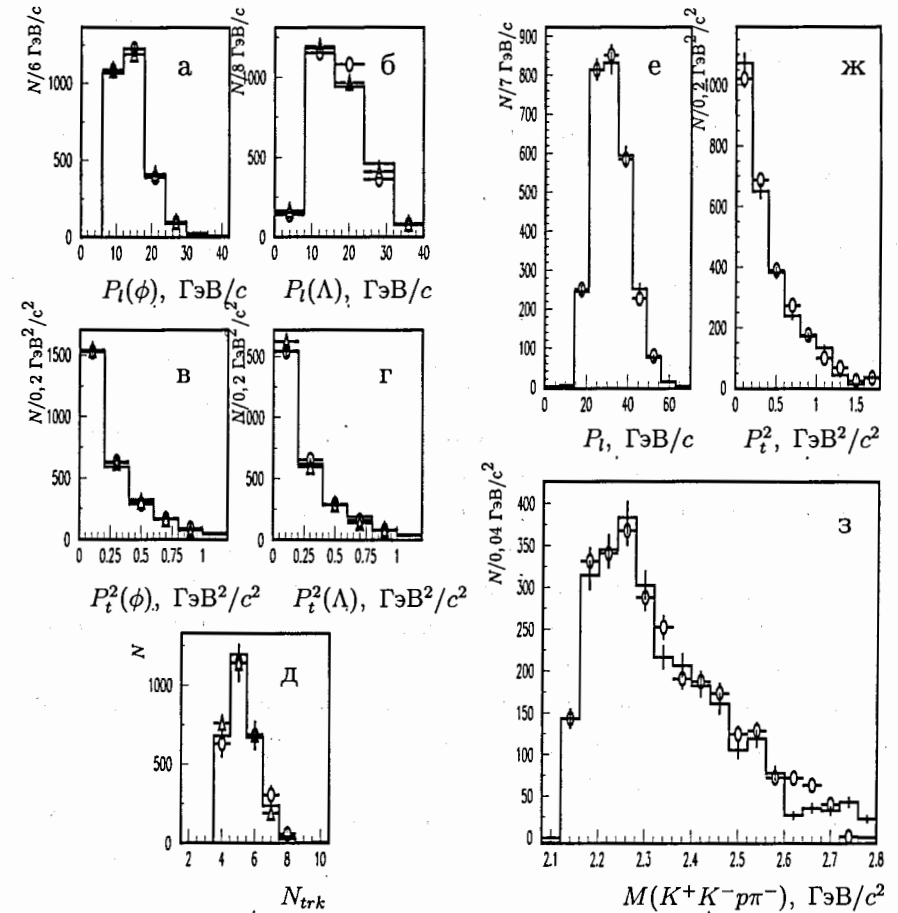


Рис. 4: (а)–(г) импульсные спектры ассоциативно рожденных ϕ и Λ^0 ; (д) – распределение по множественности заряженных частиц; спектры продольной (е) и квадрата поперечной (ж) составляющих импульсов компаунд-частицы; спектр эффективных масс $M(K^+K^-p\pi^-)$ (з). Здесь и на рис.6 гистограмма – эксперимент; Δ – скорректированная модель FRITIOF; \circ – модель компаунд-частицы.

³S. Eidelman et al., Review of Particle Physics, Phys. Lett. B 592 (2004) 1.

компаунд-частицы, а также эффективных масс $M(K^+K^-p\pi^-)$. Спектры, полученные из моделирования, нормированы на количество экспериментальных событий.

Систематическая погрешность определения эффективности регистрации при использовании скорректированной модели FRITIOF связана с подбором параметров модели и определялась путем варьирования функций отказа от разыгранных событий. Варьирование производилось таким образом, что при сравнении всех упомянутых экспериментальных и полученных из моделирования распределений, значение χ^2 , вычисляемое с помощью программы MINUIT, изменялось не более, чем на величину 1,07, определяющую 70% уровень достоверности. Это привело к вариациям эффективности регистрации на $\sim 10\%$.

При использовании модели компаунд-частицы основной вклад в систематическую погрешность дает чувствительность результата к множественности заряженных частиц в событиях. Для улучшения согласия распределений событий по множественности заряженных частиц подбирались вероятности отказа от разыгранных событий, позволившие совместить средние величины экспериментальной и полученной из моделирования множественностей. В результате изменение эффективности регистрации составило $\sim 19\%$.

Значения эффективности регистрации $\phi\Lambda^0$ для каждой модели, полученные с учетом вышеизложенного, представлены в табл. 1.

Таблица 1: Значения эффективностей регистрации $\phi\Lambda^0$

	$\epsilon, \%$
Скорректированная модель FRITIOF	$0,097 \pm 0,002_{(стат.)} \pm 0,010_{(сист.)}$
Модель компаунд-частицы	$0,100 \pm 0,004_{(стат.)} \pm 0,020_{(сист.)}$

Хорошее согласие полученных независимо результатов подчеркивает их устойчивость к критериям анализа. В качестве окончательного значения сечения инклюзивного

рождения $\phi\Lambda^0$ выбран результат, полученный при использовании скорректированной модели FRITIOF, так как в этой модели было достигнуто лучшее согласие экспериментальных и смоделированных импульсных спектров, а также распределений событий по множественности заряженных частиц. Разница значений эффективностей, полученных для разных моделей, учтена в систематической погрешности окончательного результата. Таким образом, полученная эффективность регистрации $\phi\Lambda^0$ составила

$$\epsilon = (0,097 \pm 0,002_{(стат.)} \pm 0,010_{(сист.)})\%$$

Сечение инклюзивного ассоциативного рождения ϕ и Λ^0 в нейтрон-углеродных взаимодействиях ($\sigma_{nC}(\phi\Lambda^0 X)$) вычислялось по формуле:

$$\sigma_{nC} = \frac{N \cdot A}{Mn \cdot T \cdot N_{Av} \cdot \epsilon \cdot Br_1 \cdot Br_2}, \quad (4)$$

где $N = 2818 \pm 160$ – количество событий ассоциативного образования $\phi\Lambda^0$; $A = 12,011$ – атомная масса ядра мишени; $Mn = (2,311 \pm 0,084) \cdot 10^{11}$ – число нейтронов, прошедших через установку за время экспозиции; $T = 1,3 \text{ г/см}^2$ – толщина мишени; N_{Av} – число Авогадро; $\epsilon = (0,097 \pm 0,010)\%$ – эффективность регистрации $\phi\Lambda^0$; $Br_1 = (49,1 \pm 0,8)\%$ – вероятность распада $\phi \rightarrow K^+K^-$; $Br_2 = (63,9 \pm 0,5)\%$ – вероятность распада $\Lambda^0 \rightarrow p\pi^-$.

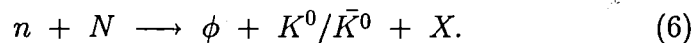
Статистическая погрешность сечений определялась погрешностью количества выделенных событий ассоциативного рождения ϕ и Λ^0 .

В систематическую погрешность определения сечения входят: погрешность эффективности регистрации ассоциативно рожденных ϕ и Λ^0 , погрешность измерения количества нейтронов, прошедших через всю установку за время экспозиции, точность измеренных вероятностей распадов $\phi \rightarrow K^+K^-$ и $\Lambda^0 \rightarrow p\pi^-$.

Таким образом, получено

$$\sigma_{nC}(\phi\Lambda^0 X) = (614 \pm 35_{(стат.)} \pm 67_{(сист.)}) \text{ мкбн.} \quad (5)$$

События с ассоциативным образованием ϕ -мезонов и нейтральных каонов имеет следующую топологию:



При отборе кандидатов требовалось наличие в событии не менее, чем двух положительно и двух отрицательно заряженных частиц.

Для выделения ϕ -мезонов рассматривался их распад на два заряженных каона (2). Нейтральные каоны идентифицировались по их распадам на два заряженных пиона в наблюдаемом состоянии



На рис. 5а и 5б представлены соответственно распределения

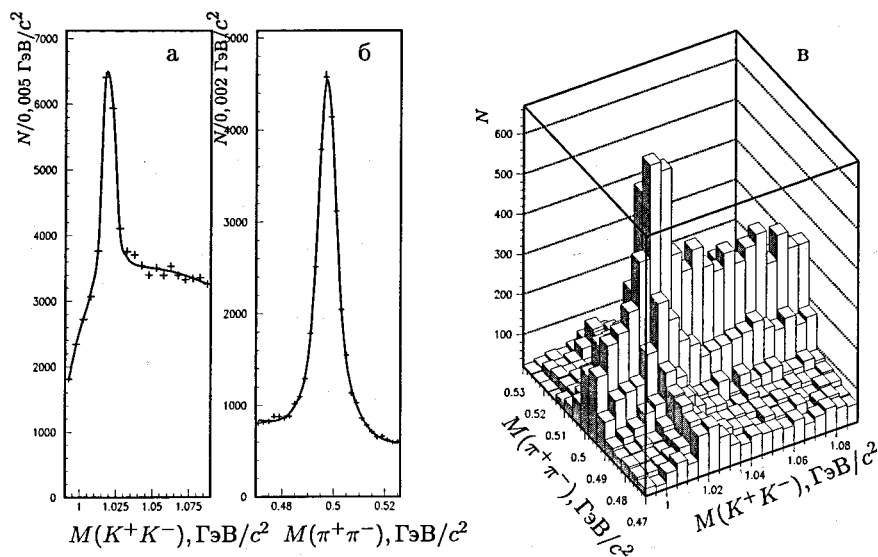


Рис. 5: Спектр эффективных масс состояний K^+K^- (а) и $\pi^+\pi^-$ (б), кривые – результат аппроксимации; (в) – распределение событий по эффективным массам $M(K^+K^-)$ и $M(\pi^+\pi^-)$

эффективных масс состояний K^+K^- и $\pi^+\pi^-$ для событий, отобранных с учетом перечисленных выше ограничений. Четко выделяемые сигналы на приведенных распределениях могут быть

интерпретированы, как сигналы от ϕ и K_S^0 соответственно. Полученные характеристики ϕ и K_S^0 в пределах погрешностей хорошо согласуются с данными PDG.

Оценка количества ассоциативно рожденных ϕ и K_S^0 была проведена на основе анализа двумерного распределения эффективных масс комбинаций K^+K^- и $\pi^+\pi^-$ (рис. 5в). Количество ассоциативно рожденных ϕK_S^0 составило 2274 ± 224 комбинаций.

Для расчета эффективности регистрации ϕ с K_S^0 использовались две модели их ассоциативного рождения: скорректированный генератор FRITIOF и модель компаунд-частицы. Экспериментальные и полученные из моделирования спектры продольных и квадратов поперечных импульсов ассоциативно рожденных ϕ и K_S^0 , а также распределения событий по множественности заряженных частиц представлены на рис. 6. Как видно, достигнуто хорошее согласие экспериментальных спектров и спектров, полученных из моделирования. Спектры продольного и квадрата поперечного импульсов компаунд-частицы, а также спектр $M(K^+K^-\pi^+\pi^-)$ приведены на рис. 6. Спектры, полученные из моделирования, отнормированы на количество экспериментальных событий.

Значения эффективности регистрации ϕK_S^0 для каждой модели представлены в табл. 2.

Таблица 2: Значения эффективностей регистрации ϕK_S^0

	$\epsilon, \%$
Скорректированная модель FRITIOF	$0,084 \pm 0,002_{(стат.)} \pm 0,021_{(сист.)}$
Модель компаунд-частицы	$0,074 \pm 0,003_{(стат.)} \pm 0,010_{(сист.)}$

Хорошее согласие этих независимых результатов подчеркивает их устойчивость к критериям анализа. В качестве окончательной величины использовано значение эффективности регистрации ϕK_S^0 , полученное методом вычисления средневзвешенного

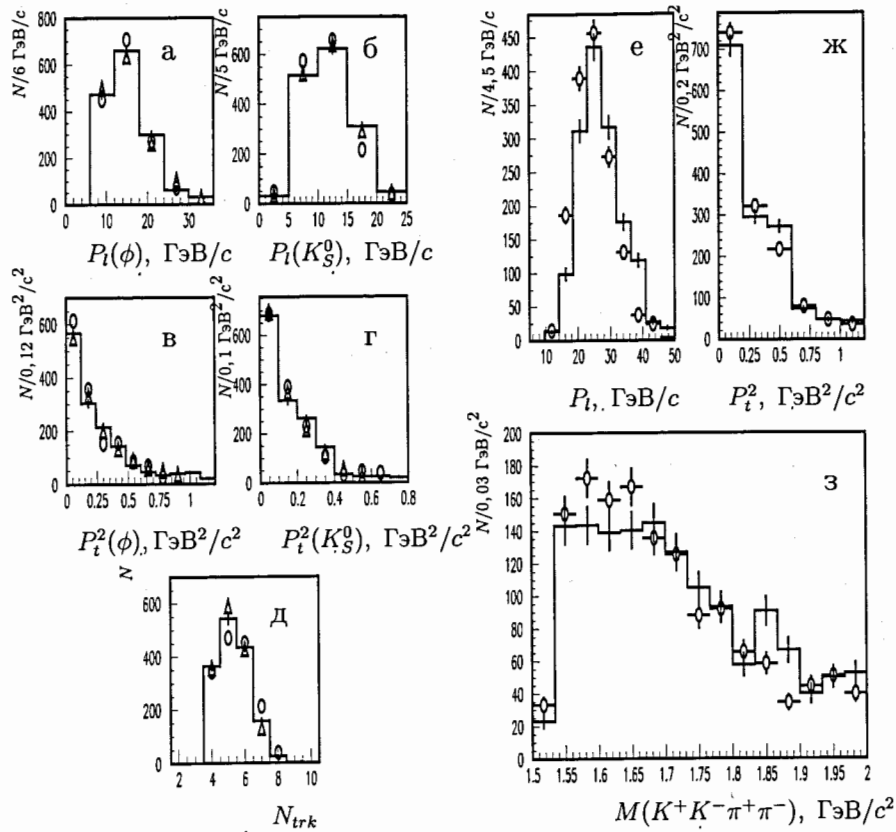


Рис. 6: (а)–(з) – импульсные спектры ассоциативно рожденных ϕ и K_S^0 ; (д) – распределение по множественности заряженных частиц; спектры продольного (е) и квадрата поперечного (ж) импульсов композитной частицы; спектр эффективных масс $M(K^+K^-\pi^+\pi^-)$ (з).

значения по результатам независимых оценок одной и той же величины:

$$\epsilon = (0,077 \pm 0,010)\% \quad (8)$$

При этом статистические и систематические погрешности вычислены с учетом весовой функции и просуммированы квадратично.

Сечение инклюзивного ассоциативного рождения ϕ и K_S^0 ($\sigma_{nC}(\phi K_S^0 X)$) вычислялось по формуле (4), где $N = 2274 \pm 224$ – количество событий ассоциативного образования ϕK_S^0 ; $\epsilon = (0,077 \pm 0,010)\%$ – эффективность регистрации ϕK_S^0 ; $Br_2 = (68,61 \pm 0,28)\%$ – вероятность распада $K^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$.

Статистическая погрешность сечений определялась из погрешности количества событий ассоциативного образования ϕK_S^0 . В систематическую погрешность определения сечения входят: погрешность эффективности регистрации ассоциативно рожденных ϕ и K_S^0 , погрешность измерения количества нейтронов, прошедших через установку за время экспозиции, точность измеренных вероятностей распадов $\phi \rightarrow K^+K^-$ и $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$.

Таким образом, после подстановки всех величин в (4) получено значение сечения инклюзивного ассоциативного рождения ϕ и K_S^0 в нейтрон-углеродных взаимодействиях:

$$\sigma_{nC}(\phi K_S^0 X) = 581 \pm 57_{\text{(стат.)}} \pm 79_{\text{(сист.)}} \text{ мкбн.} \quad (9)$$

Предполагая, что $\sigma(\phi K^0 X) + \sigma(\phi \bar{K}^0 X) \approx 2\sigma(\phi K_S^0 X)$, можно вычислить сечение инклюзивного ассоциативного рождения ϕ -мезонов и нейтральных каонов K^0/\bar{K}^0 в нейтрон-углеродных взаимодействиях ($\sigma_{nC}(\phi K^0/\bar{K}^0 X)$):

$$\sigma_{nC}(\phi K^0/\bar{K}^0 X) = 1162 \pm 114_{\text{(стат.)}} \pm 158_{\text{(сист.)}} \text{ мкбн.} \quad (10)$$

В условиях отсутствия прямых измерений сечений ассоциативного рождения ϕ -мезонов с Λ^0 и K^0/\bar{K}^0 в предшествующих экспериментах, проведено сравнение полученных в настоящей работе величин с величинами, вычисленными косвенным образом из результатов эксперимента

БИС-2⁴. Учитывая вклады процессов образования ϕ с Λ^0 и K^0/\bar{K}^0 в полное инклюзивное сечение рождения ϕ -мезонов, составляющие соответственно $(20 \pm 4)\%$ и $(55 \pm 17)\%$, используя значение сечения инклюзивного рождения ϕ и предполагая его линейную зависимость от атомной массы ядра мишени, можно получить значения сечений ассоциативного рождения ϕ с Λ^0 и K_S^0/\bar{K}^0 , равные (528 ± 216) мкбн/ядро ^{12}C и (1452 ± 696) мкбн/ядро ^{12}C , соответственно. Как видно, вычисленные таким образом сечения в пределах погрешностей хорошо согласуются с результатами, полученными в настоящей работе (см. (5) и (10) соответственно).

В пятой главе сделана оценка доли ОЦИ-разрешенных процессов ассоциативного рождения ϕ -мезонов с Λ^0 -гиперонами и каонами в полном инклюзивном рождении ϕ , т.е. отношение $\sigma_{\text{асс.}\Lambda, \text{K}}(\phi X)/\sigma(\phi X)$, где $\sigma_{\text{асс.}\Lambda, \text{K}}(\phi X)$ – сечение процессов ассоциативного рождения ϕ -мезонов с Λ^0 и каонами, $\sigma(\phi X)$ – сечение инклюзивного рождения ϕ . Сечение $\sigma_{\text{асс.}\Lambda, \text{K}}(\phi X)$ является нижней границей полного сечения $\sigma_{\text{асс.}}(\phi SX)$ ассоциативного рождения ϕ -мезонов со странными частицами ($\sigma_{\text{асс.}\Lambda, \text{K}}(\phi X) < \sigma_{\text{асс.}}(\phi SX)$), так как в этой величине не учтено, как минимум, рождение ϕ с Σ^\pm и антигиперонами (вклад таких процессов из сравнения инклюзивных сечений рождения Σ^\pm и антигиперонов в нуклон-нуклонных взаимодействиях с соответствующими инклюзивными сечениями рождения, например, Λ^0 -гиперонов⁵ ожидается на уровне нескольких процентов). Поэтому отношение $\sigma_{\text{асс.}\Lambda, \text{K}}(\phi X)/\sigma(\phi X)$ определяет ограничение снизу на суммарный вклад ОЦИ-разрешенных процессов в реакциях инклюзивного рождения ϕ . Принимая во внимание обязательное наличие среди X еще одной странной частицы :

$$\sigma_{\text{асс.}\Lambda, \text{K}}(\phi X) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^5 \sigma(\phi S_i X), \quad (11)$$

где $\sigma(\phi S_i X)$ – значения сечений инклюзивного ассоциативного

⁴A.N. Aleev et al., JINR, E1-90-316, Dubna, 1990, 9p.

⁵A.N. Aleev и др., ОИЯИ, Д1-2001-98, 2001, 16с.; A.N. Aleev et al., Eur.Phys.J. C 27 (2003) 547.

рождения ϕ и S_i , $S_i \in (\Lambda^0, K^0, \bar{K}^0, K^+, K^-)$.

Сечение инклюзивного рождения ϕ было измерено на основе анализа исследуемой экспериментальной выборки событий. Выделено около 75000 комбинаций, соответствующих этому процессу. Для определения эффективности регистрации ϕ был использован скорректированный генератор FRITIOF. Измеренная величина сечения инклюзивного рождения ϕ -мезонов составила (2095 ± 407) мкбн/ядро ^{12}C .

Учитывая результаты эксперимента БИС-2, которые позволяют сделать вывод о том, что сечение ассоциативного рождения ϕ -мезонов с K^0 и \bar{K}^0 приблизительно равно сечению ассоциативного рождения ϕ с K^+ и K^- , т.е. $\sigma(\phi K^0 X) + \sigma(\phi \bar{K}^0 X) \approx \sigma(\phi K^+ X) + \sigma(\phi K^- X)$, и предполагая, что $\sigma(\phi K^0 X) + \sigma(\phi \bar{K}^0 X) \approx 2\sigma(\phi K_S^0 X)$, имеем:

$$\frac{\sigma_{\text{асс.}\Lambda, \text{K}}(\phi X)}{\sigma(\phi X)} \approx R = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma(\phi \Lambda^0 X) + 4\sigma(\phi K_S^0 X)}{\sigma(\phi X)}. \quad (12)$$

С учетом формулы (4), последнее выражение можно привести к измеренным в эксперименте величинам $N(\phi)$, $N(\phi \Lambda)$, $N(\phi K_S)$, $\epsilon(\phi)$, $\epsilon(\phi \Lambda)$, $\epsilon(\phi K_S)$, где N – количество событий рождения соответствующих частиц или их комбинаций, указанных в скобках, ϵ – эффективности их регистрации, полученные из моделирования с использованием скорректированного генератора FRITIOF:

$$R = \frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{N(\phi \Lambda)}{\epsilon(\phi \Lambda) Br(\Lambda)} + 4 \frac{N(\phi K_S^0)}{\epsilon(\phi K_S^0) Br(K_S^0)}}{\frac{N(\phi)}{\epsilon(\phi)}} = 0,72 \pm 0,16, \quad (13)$$

где $Br(\Lambda) = (63,9 \pm 0,5)\%$ – вероятность распада $\Lambda^0 \rightarrow p\pi^-$, $Br(K_S) = (68,61 \pm 0,28)\%$ – вероятность распада $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$. При вычислении погрешности R учтены как статистические, так и систематические погрешности всех величин, используемых в формуле (13). Таким образом, показано, что рождение ϕ -мезонов в нейтрон-ядерных взаимодействиях при средней энергии пучка нейтронов ~ 51 ГэВ в основном происходит в сопровождении странных частиц, что соответствует предсказаниям правила ОЦИ.

В заключении сформулированы основные результаты работы и выводы диссертации:

1. Впервые в нейтрон-ядерных взаимодействиях измерены сечения ассоциативного рождения ϕ -мезонов с Λ -гиперонами ($\sigma_{nC}(\phi\Lambda^0 X)$) и нейтральными каонами K^0/\bar{K}^0 ($\sigma_{nC}(\phi K^0/\bar{K}^0 X)$). Для полной кинематической области по x_F ($-1 \leq x_F \leq 1$) эти сечения составили в расчете на ядро ^{12}C :

$$\sigma_{nC}(\phi\Lambda^0 X) = (614 \pm 35_{\text{(стат.)}} \pm 67_{\text{(сист.)}}) \text{ мкбн,}$$

$$\sigma_{nC}(\phi K^0/\bar{K}^0 X) = (1162 \pm 114_{\text{(стат.)}} \pm 158_{\text{(сист.)}}) \text{ мкбн.}$$

Сравнение полученных данных с данными, вычисленными на основе результатов эксперимента БИС-2, показало хорошее согласие результатов двух экспериментов, проведенных в нейтронных пучках при близких средних энергиях нейтронов.

2. На основе измеренных сечений получено ограничение снизу на суммарный вклад ОЦИ-разрешенных процессов в реакциях инклюзивного рождения ϕ -мезонов – $(72 \pm 16)\%$, что не противоречит правилу ОЦИ.
3. Разработаны и использованы различные модели рождения ϕ -мезонов со странными частицами, что позволило провести по два независимых измерения эффективностей регистрации ϕ с Λ^0 и ϕ с K_S^0 экспериментальной установкой ЭКСЧАРМ; показана практическая применимость для моделирования условий этого эксперимента разработанных моделей на основе скорректированного генератора FRITIOF.
4. Развита программные комплексы, используемые для анализа накопленной экспериментальной информации и для моделирования эксперимента; достигнуто существенное ускорение работ по анализу данных за счет применения специально разработанного формата их компактного хранения на машинных носителях.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах

- [1] А.Н. Алеев, ..., Н.А. Молоканова и др., Спектрометр ЭКСЧАРМ, ПТЭ, 4 (1999) 52.
- [2] Н.А. Молоканова, Исследование ассоциативного рождения ϕ -мезонов со странными частицами в эксперименте ЭКСЧАРМ (рождение ϕK^0 и $\phi\Lambda^0$), ОИЯИ, ISBN 5-85165-528-3, стр. 50-52, 1999.
- [3] Н.А. Молоканова, Изучение инклюзивных реакций $nC \rightarrow \phi K^0 X$ и $nC \rightarrow \phi\Lambda^0 X$ в эксперименте ЭКСЧАРМ, Научная сессия МИФИ-2001, II Всероссийская конференция "Физика элементарных частиц и атомного ядра", Сборник научных трудов, М., МИФИ, 2001, стр. 27-28.
- [4] А.Н. Алеев, ..., Н.А. Молоканова и др., Ассоциативное рождение $\phi\Lambda^0$ в эксперименте ЭКСЧАРМ, Ядерная физика, том 67, No. 8, 2004, с. 1537-1545.
A.N. Aleev, ..., N.A. Molokanova et al., Associated $\phi\Lambda^0$ Production in the EXCHARM Experiment, Physics of Atomic Nuclei, Vol.67, No. 8, 2004, pp. 1513-1522.
- [5] Н.А. Молоканова, Исследование ассоциативного рождения ϕ -мезонов со странными частицами в эксперименте ЭКСЧАРМ (рождение ϕK^0), ОИЯИ, Д-98-224, стр. 27-29, 1998.
- [6] А.Н. Алеев, ..., Н.А. Молоканова и др., Ассоциативное рождение ϕ -мезонов и нейтральных каонов в эксперименте ЭКСЧАРМ, ОИЯИ, P1-2005-44, 2005, 19 с. Направлено в журнал "Ядерная физика".

Получено 10 июня 2005 г.