

На правах рукописи

ЕПИФАНОВ Денис Александрович

ИЗУЧЕНИЕ РЕАКЦИИ $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$
В ОБЛАСТИ ϕ -МЕЗОННОГО РЕЗОНАНСА
С ДЕТЕКТОРОМ КМД-2

01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Шварц
Борис Альбертович — доктор физико-математических наук,
Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Топорков
Дмитрий Константинович — доктор физико-математических наук,
Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск.

Кожевников
Аркадий Алексеевич — доктор физико-математических наук,
Учреждение Российской академии наук
Институт математики
им. С.Л. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск.

**ВЕДУШАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ:** — ГНЦ РФ “Институт теоретической и
экспериментальной физики”, г. Москва.

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2009 г.
в “_____” часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.02
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90,
проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения
Российской академии наук Института ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН.

Автореферат разослан “_____” _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук,
профессор

В.С. Фадин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН с 1992 по 2000 год был проведен цикл экспериментов с криогенным магнитным детектором (КМД-2) на накопителе со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2М в области энергии 0.36 – 1.4 ГэВ в системе центра масс. Целью этих экспериментов было прецизионное измерение полного сечения e^+e^- аннигиляции в адроны, а также изучение свойств легких векторных мезонов: ρ , ω и ϕ .

В экспериментах по изучению ϕ мезона с детектором КМД-2 набраны данные с интегральной светимостью около 14 пб^{-1} (более 20 миллионов ϕ мезонов произведено в e^+e^- столкновениях), что позволяет изучать редкие моды распада на уровне $10^{-4} - 10^{-5}$ – на два порядка ниже, чем с предыдущим поколением детекторов.

Сечение реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области энергии ϕ изучалось различными группами в Орсе, в Новосибирске, а также с помощью метода радиационного возврата на В-фабрике в Стэнфордском центре линейного ускорителя (SLAC). Несмотря на почти сорокалетнюю историю изучения этой реакции интерес к ней по-прежнему сохраняется. Это связано с важной задачей прецизионного измерения параметров $\phi - \omega$ -интерференции, а также параметров ϕ мезона в трёхпионном канале распада.

Основной целью данной работы является измерение сечения реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области ϕ -мезонного резонанса, в диапазоне энергии в системе центра масс e^+e^- пучков $2E = 984 \div 1060 \text{ МэВ}$, а также исследование динамики распада $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Кроме того в данной работе проводился поиск распадов $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma$ и $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$.

Распад $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ является одной из основных мод распада ϕ мезона. Измерение сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области ϕ -мезонного резонанса позволяет получить информацию о структуре ϕ мезона и найти параметры $\omega - \phi$ интерференции. Большой интерес представляет также исследование динамики распада $\phi \rightarrow 3\pi$. Согласно предсказанию Гелл-Мана, Шарпа, Вагнера, этот распад идёт с образованием промежуточного $\rho\pi$ состояния. Однако, во многих работах обсуждалась возможность наличия прямого контактного перехода $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Следует отметить, что

спектр конкретных теоретических предсказаний на величину контактного члена достаточно широк.

Первое экспериментальное свидетельство доминирования $\rho\pi$ механизма в распаде $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ было опубликовано группой из Орсэ. Позднее в экспериментах на детекторах КМД-2 и СНД на большей статистике было подтверждено доминирование $\rho\pi$ механизма, помимо этого получены ограничения на величину контактной амплитуды. Последние наиболее точные измерения величины контактной амплитуды были сделаны почти одновременно в эксперименте КЛОЕ и в настоящей работе с детектором КМД-2. Результаты этих измерений хорошо согласуются между собой и не противоречат предсказаниям моделей эффективных лагранжианов, однако, как показано в данной работе, их также можно объяснить вкладом состояния $\rho'(1450)\pi$.

В настоящее время в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН начал работу e^+e^- -коллайдер ВЭПП-2000 с энергией в системе центра масс до 2 ГэВ. Для экспериментов на ВЭПП-2000 создан новый криогенный магнитный детектор КМД-3 и проведена модернизация детектора СНД.

Увеличение светимости ВЭПП-2000 по сравнению с ВЭПП-2М на порядок, более широкий диапазон энергии в экспериментах на новом накопителе, а также улучшение параметров детекторов позволят точнее измерить полные и парциальные сечения процессов e^+e^- аннигиляции в адроны, в частности сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$.

Детектор КМД-3 унаследовал общую структуру детектора КМД-2, однако основные характеристики, такие как импульсное и угловое разрешение для заряженных частиц, а также координатное и энергетическое разрешение для фотонов, будут существенно улучшены.

Одной из наиболее важных систем детектора является электромагнитный калориметр, основные задачи которого – измерение энергии и координат гамма-квантов с высоким разрешением в широком диапазоне энергии, от 10 МэВ до 1 ГэВ, разделение электронов и адронов, а также формирование сигналов для нейтрального и заряженного триггера. Цилиндрический электромагнитный калориметр детектора КМД-3 состоит из двух подсистем: ближайшего к оси пучков калориметра на основе жидкого ксенона и сцинтилляционного калориметра на основе кристаллов CsI(Na) и CsI(Tl). Существенной частью данной работы является разработка и создание CsI калориметра. При этом был использован опыт многолетней работы с калориметром детектора КМД-2, а также большой опыт создания калориметров на основе кристаллов CsI для детекторов КЕДР, WASA и Belle, накопленный в ИЯФ. В новом калориметре в ка-

честве фотоприёмников используются полупроводниковые фотодиоды с PIN-структурой. Эти компактные и нечувствительные к магнитному полю приборы позволяют обеспечить лучшую, по сравнению с КМД-2, долговременную стабильность работы калориметра. Для обработки сигнала была разработана новая электроника с высоким уровнем интеграции, которая обеспечивает достаточно низкий уровень электронных шумов. Методические разработки, сделанные в настоящей работе, будут использоваться при проектировании новых детекторов ИЯФ.

Цель работы состояла в следующем:

- Измерение сечения реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области энергии $2E = 980 \div 1060$ МэВ.
- Изучение динамики распада $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$.
- Поиск распадов $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma$ и $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$.
- Разработка и создание электромагнитного калориметра на основе сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl) и CsI(Na) для детектора КМД-3.

Научная новизна работы

В диапазоне энергии от 980 до 1060 МэВ измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Результаты имеют лучшую в мире точность и согласуются с предыдущими измерениями.

Установлены верхние пределы на относительные вероятности распадов $\phi \rightarrow \pi\pi\gamma\gamma$ и $\phi \rightarrow \pi\pi\eta$. Верхний предел на величину относительной вероятности распада $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma$ улучшен приблизительно в 4 раза по сравнению с предыдущим измерением. Верхний предел на величину относительной вероятности распада $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$, $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ улучшен приблизительно в 5 раз по сравнению с предыдущим аналогичным измерением.

Научная и практическая ценность работы

Полученные результаты по измерению сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и изучению динамики распада $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ позволяют улучшить точность вычисления параметров ϕ -мезона: массы, ширины, фазы $\phi - \omega$ -интерференции, сечения в пике. Также они позволяют проверить справедливость различных моделей, описывающих рождение трёхпионной системы, в частности модели со скрытой локальной симметрией и модели эффективных лагранжианов.

В вычислениях на основе дисперсионных соотношений часто используются адронные сечения электрон-позитронной аннигиляции. Эти сечения активно используются многими группами физиков при вычислении адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона и бегущей константы электромагнитного взаимодействия.

Калориметр на основе скинтилляционных кристаллов CsI(Tl) и CsI(Na) установлен в детектор КМД-3 и в ближайшее время начнёт набор экспериментальной информации. Методические разработки, сделанные при проектировании и изготовлении калориметра, планируется использовать в будущих детекторах ИЯФ.

Апробация работы

Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах в ИЯФ СО РАН. Кроме того, результаты работы докладывались на Сессии-конференции “Физика фундаментальных взаимодействий” (Протвино, декабрь 2008) и на Международной конференции DAFNE 2004 (Фраскати, Италия, июнь 2004).

Структура работы

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения и Приложений. Объем диссертации составляет 122 страницы, включая 75 рисунков и 15 таблиц. Список литературы включает 96 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении кратко сформулированы основные задачи данной работы. Обсуждены актуальность работы, результаты предыдущих аналогичных экспериментов. Описаны структура и содержание диссертации.

В первой главе диссертационной работы представлено описание ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2М и детектора КМД-2. Детектор КМД-2 позволяет регистрировать и измерять с высокой точностью параметры заряженных частиц и фотонов. Схема детектора представлена на Рис. 1. Координаты, углы вылета и импульсы заряженных частиц измеряются координатной системой детектора, состоящей из дрейфовой (2) и Z-камер (3), расположенных в магнитном поле, создаваемом сверхпроводящим соленоидом (4). Цилиндрический (7) и торцевой (6) электромагнитные калориметры, изготовленные из скинтилляционных кристаллов CsI и BGO соответственно, обеспечивают

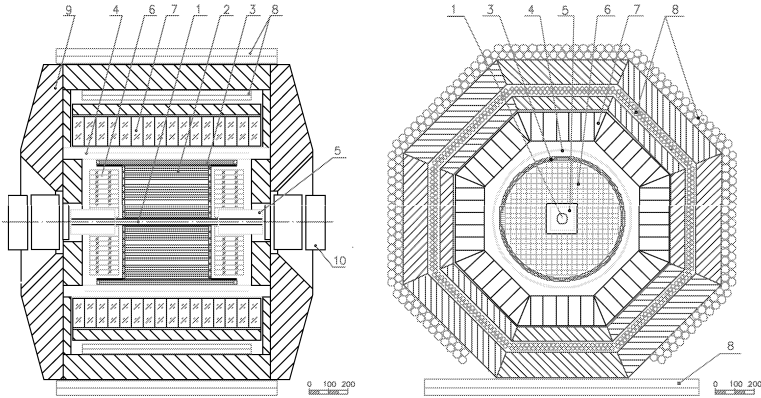


Рис. 1. Схема детектора КМД-2. 1 – вакуумная камера, 2 – дрейфовая камера, 3 – Z-камера, 4 – основной сверхпроводящий соленоид, 5 – компенсирующий соленоид, 6 – торцевой калориметр на основе BGO, 7 – цилиндрический калориметр на основе CsI, 8 – пробегная система, 9 – ярмо магнита, 10 – квадрупольные линзы.

измерение энергии и углов фотонов, а также позволяют разделять электроны и адроны. Пробегная система (8) служит для разделения мюонов и адронов.

В работе анализировались данные, набранные детектором КМД-2 в 1997–1998 г.г. Полная интегральная светимость, набранная в диапазоне энергии в системе центра масс пучков $2E_{\text{beam}} = 984 \div 1060$ МэВ, составила около 11.3 пб^{-1} .

Во второй главе изложены общие характеристики и условия отбора событий процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$.

Измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ основывается на наборе событий с полной реконструкцией трёх пионов. События, принадлежащие к основному анализируемому набору, содержат два противоположно заряженных трека, а также не менее двух реконструированных фотонных кластеров. На Рис. 2 показано распределение отобранных событий на плоскости $P_{\pi^+} - P_{\pi^-}$ при энергии пучков $E_{\text{beam}} = 509.5$ МэВ. Во всём диапазоне энергии было отобрано 104849 событий.

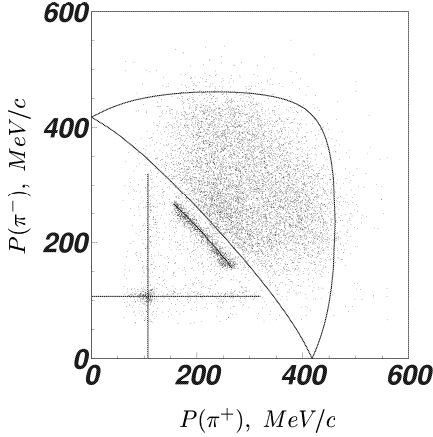


Рис. 2. Распределение экспериментальных событий на плоскости $P_{\pi^+} - P_{\pi^-}$. Показаны: граница разрешённой кинематической области для системы $\pi^+\pi^-\pi^0$, расчётная кривая зависимости $P_+(P_-)$, вдоль которой группируются события распада $\phi \rightarrow K_L K_S$, две расчётных прямых линии, вдоль которых группируются события распада $\phi \rightarrow K^+ K^-$.

Для исследуемой реакции основными фоновыми процессами являются:

- $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow K_L K_S$ или $K^+ K^-$;
- $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \eta\gamma$, $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ или $\pi^+\pi^-\gamma$;
- $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$;
- $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma(\gamma)$;
- $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma(\gamma)$;
- $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$.

Моделирование событий фоновых процессов не позволяет определить с нужной точностью их число, особенно в области энергии на краях ϕ -мезонного резонанса. Поэтому для оценки фона проводилась процедура аппроксимации экспериментального распределения по инвариантной массе двух γ -квантов π^0 -кандидатов.

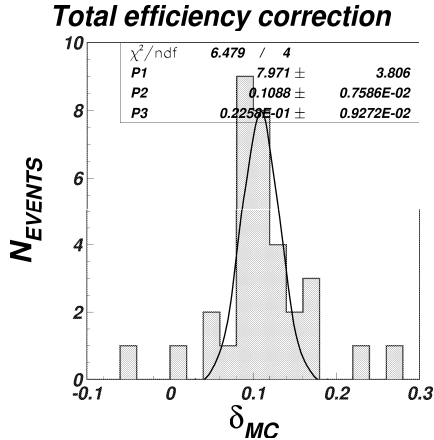


Рис. 3. Распределение по величине δ^{MC} для разных точек по энергии пучков вблизи ϕ -мезонного резонанса.

Эффективность регистрации событий изучаемого процесса, которая определялась с помощью полного моделирования, составила $\varepsilon_{3\pi}^{\text{MC}} = (4.71 \pm 0.02)\%$. Следует отметить, что моделирование не воспроизводит все особенности отклика детектора, поэтому для уменьшения неопределённости $\varepsilon_{3\pi}^{\text{MC}}$ находятся поправки к эффективности. Для этого используются экспериментальные события с двумя пионами. На Рис. 3 показано распределение по величине полной поправки к эффективности регистрации δ^{MC} для разных точек по энергии пучков вблизи ϕ -мезонного резонанса.

В третьей главе описаны основные физические результаты, полученные в данной работе.

Сечение реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в борновском приближении определяется выражением:

$$\sigma_{3\pi} = \sigma_{\text{obs}} / (1 + \delta_{\text{rad}}) = \frac{N_{3\pi}}{L \varepsilon_{\text{trig}} \varepsilon_{3\pi}^{\text{MC}} (1 + \delta_{\text{rad}}) (1 + \delta_{\text{wid}}) (1 - \delta^{\text{MC}})}, \quad (1)$$

где: $N_{3\pi}$ – число отобранных 3π событий, L – интегральная светимость, $\varepsilon_{\text{trig}}$ – эффективность триггера, $\varepsilon_{3\pi}^{\text{MC}}$ – эффективность регистрации 3π событий, δ_{rad} – поправка, связанная с излучением фотонов начальными электроном и позитроном (т.н. радиационная поправка), δ_{wid} – поправка, учитывающая влияние разброса энергии частиц в пучке, δ^{MC} – поправка

к эффективности. Наблюдаемое сечение σ_{obs} представляет из себя сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ с учётом излучения фотонов начальными e^- и e^+ . Оно связано с борновским сечением согласно формуле:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{obs}}(s) &= \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 D(x_1, s) D(x_2, s) \sigma_{3\pi}(s(1-x_1)(1-x_2)) \varepsilon(x_1, x_2) = \\ &= (1 + \delta_{\text{rad}}(s)) \sigma_{3\pi}(s), \end{aligned} \quad (2)$$

где: $D(x_{1,2}, s)$ – функция вероятности испускания начальным e^\pm фотонной струи, уносящей долю энергии $x_{1,2} = \frac{2E_{\gamma_{1,2}}}{\sqrt{s}}$, $\sigma_{3\pi}(s(1-x_1)(1-x_2))$ – борновское сечение в зависимости от энергии в новой системе центра масс, $\varepsilon(x_1, x_2)$ – функция эффективности, которая определяется как эффективность регистрации $\pi^+\pi^-\pi^0$ после испускания фотонных струй, нормированная на эффективность при $x_1 = x_2 = 0$. Зависимость борновского сечения от энергии описывается суммой амплитуд, соответствующих $\phi(A_\phi)$ и $\omega(A_\omega)$ резонансам:

$$\sigma_{3\pi}(s) = \frac{F_{3\pi}(s)}{s} \cdot |A_\omega + A_\phi e^{i\delta_{\phi-\omega}} + A_{\text{add}}|^2. \quad (3)$$

Постоянная амплитуда A_{add} добавлена для описания вкладов вышележащих радиальных возбуждений лёгких векторных мезонов, таких как ω' и ω'' в области ϕ -мезонного резонанса.

Аппроксимация наблюдаемого сечения проводилась путём минимизации функции χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{54} \frac{(\sigma_{\text{obs}}^{\text{exp}}(s_i) - \sigma_{\text{obs}}^{\text{calc}}(s_i))^2}{\Delta_{\text{exp}}^2(s_i)}, \quad (4)$$

где: $\sigma_{\text{obs}}^{\text{exp}}(s_i)$ – экспериментально измеренное наблюдаемое сечение в i -ой энергетической точке ($s_i = 4E_{\text{beam}}^2(i)$), $\sigma_{\text{obs}}^{\text{calc}}(s_i)$ – расчётное значение наблюдаемого сечения в i -ой энергетической точке, $\Delta_{\text{exp}}(s_i)$ – ошибка $\sigma_{\text{obs}}^{\text{exp}}(s_i)$.

На Рис. 4 показано наблюдаемое сечение в зависимости от энергии вместе с оптимальной кривой, полученной в результате аппроксимации. Оптимальное значение сечения оказалось равным:

$$\sigma_{\phi \rightarrow 3\pi}^{\text{peak}} = (637 \pm 23(\text{стат.}) \pm 16(\text{сист.})) \text{ нб} .$$

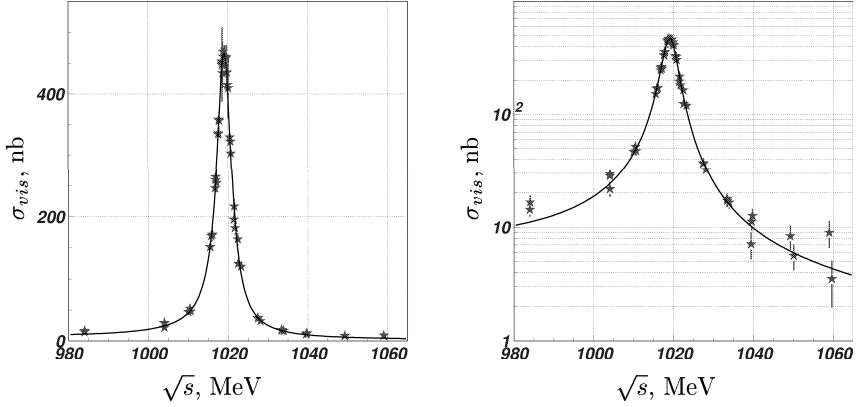


Рис. 4. Наблюдаемое сечение вместе с оптимальной кривой: слева – линейная шкала сечения, справа – логарифмическая шкала.

Важной физической величиной, связанной с сечением 3π в пике является произведение относительных вероятностей распадов $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ ($\mathcal{B}_{3\pi}$) и $\phi \rightarrow e^+e^-$ (\mathcal{B}_{ee}):

$$\mathcal{B}_{ee}\mathcal{B}_{3\pi} = \frac{\sigma_{\phi \rightarrow 3\pi}^{\text{peak}} m_\phi^2}{12\pi}. \quad (5)$$

Результат этой работы, предыдущие наиболее точные измерения, сделанные в экспериментах КМД-2, СНД и ВАВАР, а также среднемировое значение $\mathcal{B}_{ee}\mathcal{B}_{3\pi}$ приведены в Табл. 1. Как видно из Табл. 1 результат этой работы находится в хорошем согласии с предыдущими измерениями и имеет лучшую точность.

Таблица 1. Данные по измерению $\mathcal{B}_{ee}\mathcal{B}_{3\pi}$.

Эксперимент	Год	$\mathcal{B}_{ee}\mathcal{B}_{3\pi}, 10^{-5}$
КМД-2	1998	$4.35 \pm 0.27 \pm 0.08$
СНД	2001	$4.665 \pm 0.042 \pm 0.261$
ВАВАР	2004	$4.30 \pm 0.08 \pm 0.21$
PDG	2004	4.52 ± 0.19
Эта работа		$4.51 \pm 0.16 \pm 0.11$

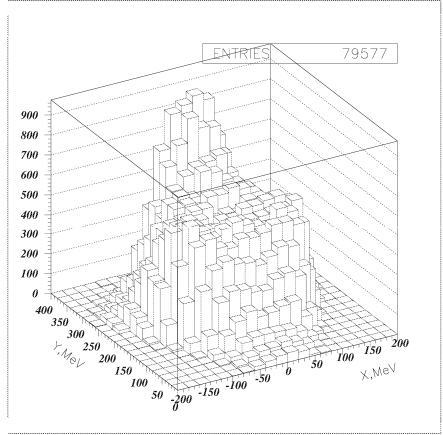
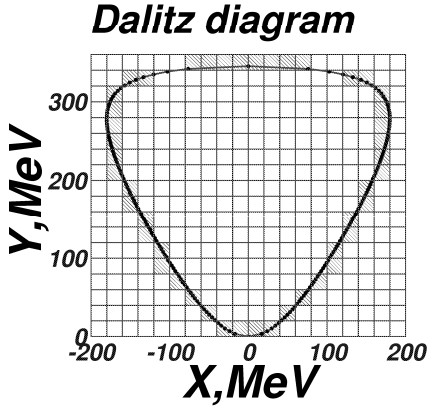


Рис. 5. Слева показана диаграмма Далица в переменных $X = \frac{E_{\pi^-} - E_{\pi^+}}{\sqrt{3}}$ и $Y = \sqrt{s} - E_{\pi^-} - E_{\pi^+} - m_{\pi^0}$. Сплошной линией показана граница кинематически разрешённой области для системы трёх пионов, которая разделена на 198 ячеек с размерами 20×20 МэВ². Заштрихованные ячейки исключались из анализа. Справа – распределение экспериментальных событий.

Изучение динамики распада $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ проводилось с помощью анализа распределения событий на диаграмме Далица, показанной на Рис. 5. Число событий, попадающих в k -тую ячейку, определяется выражением:

$$N_k^{\text{theory}} = \frac{N_0}{Z} \int_k dX dY |\vec{p}_+ \times \vec{p}_-|^2 |A_{\rho\pi} + A_n a e^{i\varphi}|^2, \quad (6)$$

где: Z – это нормировочный множитель, N_0 – полное число событий 3π , $A_{\rho\pi}$ – амплитуда, описывающая $\rho\pi$ -механизм рождения 3π , $A_n a e^{i\varphi}$ – контактная амплитуда, описывающая прямое рождение 3π ($A_n = 7.52$ – нормировочный множитель, a – абсолютная величина, φ – фаза контактной амплитуды). Расчётное число событий в i -той ячейке определяется по формуле:

$$N_i^{\text{calc}} = \sum_{k=1}^{198} \varepsilon_{ik} N_k^{\text{theory}}, \quad (7)$$

где ε_{ik} – это 198×198 матрица отклика детектора, учитывающая вероятности перехода событий из ячейки в ячейку. Распределение экспериментальных событий на диаграмме Далица показано на Рис. 5. Для

аппроксимации этого распределения минимизировался функционал χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{198} \frac{(N_i^{\text{exp}} - N_i^{\text{calc}})^2}{N_i^{\text{exp}} + \sigma_i^2(N^{\text{calc}})}, \quad (8)$$

где: N_i^{exp} – число экспериментальных событий в i -той ячейке, N_i^{calc} , $\sigma_i(N^{\text{calc}})$ – расчётное число событий и его ошибка в i -той ячейке. Свободными параметрами аппроксимации были: N_0 , a и φ . В Табл. 2 приведены оптимальные параметры аппроксимации вместе с результатами измерений контактной амплитуды группами с детекторов: КЛОЕ, СНД и КМД-2. Основным источником систематической ошибки величины и фазы контактной амплитуды является неоднородность поправки к эффективности регистрации в зависимости от точки на диаграмме Далица.

Таблица 2. Результаты измерения абсолютной величины и фазы контактной амплитуды.

КМД-2 эта работа	$a = 0.101 \pm 0.044(\text{стат.}) \pm 0.017(\text{сист.})$ $\varphi = -2.91 \pm 0.14(\text{стат.}) \pm 0.07(\text{сист.})$ $\chi^2/N_{\text{df}} = 0.95$ значимость 3.3σ
КЛОЕ (2003)	$a = 0.104 \pm 0.010(\text{стат.}) \pm 0.020(\text{сист.})$ $\varphi = -2.47 \pm 0.08(\text{стат.}) \pm 0.08(\text{сист.})$
СНД (2002)	$-0.06 < a < 0.06$ (90% CL) $\varphi = 0$ - зафиксирован
КМД-2 (1998)	$-0.15 < a < 0.10$ (90% CL) $\varphi = 0$ - зафиксирован

Из Табл. 2 видно хорошее согласие между результатами измерений КМД-2 и КЛОЕ. Следует отметить, что контактная амплитуда может быть полностью объяснена вкладом состояния $\rho'(1450)\pi$.

Поиск распадов $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma$ и $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ (где η -мезон реконструируется по двухфотонной моде распада $\eta \rightarrow \gamma\gamma$) проводился с тем же набором данных, что использовался для изучения реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Поиск событий $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma$ и $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ проводился в два этапа. На первой стадии отбирались события с двумя заряженными частицами и двумя фотонами. На Рис. 6 показано распределение отобранных событий на плоскости инвариантная масса фотонов $M_{\gamma\gamma}$ — энергия наиболее энергичного фотона $E_{\gamma\text{max}}$. В отобранном на первом этапе наборе данных

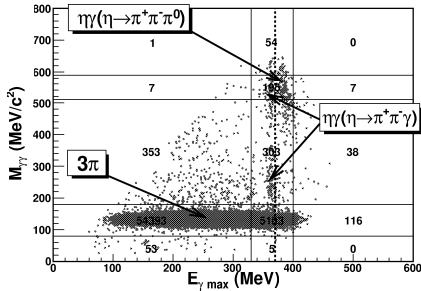


Рис. 6. Распределение экспериментальных событий на плоскости $M_{\gamma\gamma} - E_{\gamma\max}$.

доминировали события распадов $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и $\phi \rightarrow \eta\gamma(\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma, \eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$.

На втором этапе проводился анализ событий на плоскости $M_{\gamma\gamma} - E_{\gamma\max}$, для этого рассматриваются четыре области: (1) — $80 \text{ МэВ}/c^2 < M_{\gamma\gamma} < 180 \text{ МэВ}/c^2$, где доминируют события распада $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. (2) — $M_{\gamma\gamma} > 180 \text{ МэВ}/c^2$ и $330 \text{ МэВ} < E_{\gamma\max} < 400 \text{ МэВ}$, в этой области доминируют события распадов $\phi \rightarrow \eta\gamma(\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma, \eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$. (3) — $180 \text{ МэВ}/c^2 < M_{\gamma\gamma} < 510 \text{ МэВ}/c^2$ и $E_{\gamma\max} < 330 \text{ МэВ}$, в этой области сосредоточена большая часть событий искомого распада $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma$. (4) — $510 \text{ МэВ}/c^2 < M_{\gamma\gamma} < 590 \text{ МэВ}/c^2$ и ($E_{\gamma\max} < 330 \text{ МэВ}$ или $E_{\gamma\max} > 400 \text{ МэВ}$), в эту область попадают события искомого распада $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$. Для событий из каждой области вычислялось и аппроксимировалось сечение. На Рис. 7 представлены борновские сечения процессов $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma(\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma)$ (область (2)), $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma$ (область (3)) и $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$ (область (4)) вместе с оптимальными кривыми. По результатам аппроксимации определялись относительные вероятности распадов. В Табл. 3 приведено сравнение результатов, полученных в настоящей работе, с предыдущими измерениями, а также с теоретическими предсказаниями.

Четвёртая глава посвящена разработке электромагнитного калориметра на основе сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl) и CsI(Na) для детектора КМД-3. Описана технология производства и тестирования основных элементов механической конструкции калориметра. Изучены характеристики компонентов электронного тракта канала калориметра. Приведены результаты тестовых измерений с калориметром после его установки в детектор.

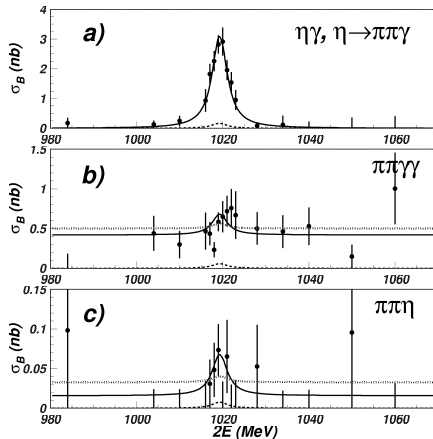


Рис. 7. Результаты измерения сечений. Точки с ошибками – экспериментальные значения, сплошными линиями показаны результаты аппроксимации.

Таблица 3. Сравнение результатов, полученных в этой работе с предыдущими измерениями (CMD98), (CMD00).

Распад	Результат этой работы	Предыдущие измерения	Теория
$\pi\pi\gamma\gamma$	$< 1.2 \times 10^{-4}$	$< 5 \times 10^{-4}$ (CMD98)	1.3×10^{-4}
$\pi\pi\eta$	$< 6.1 \times 10^{-5}$	$< 3 \times 10^{-4}$ (CMD98) $< 1.8 \times 10^{-5}$ (CMD00)	3.5×10^{-7}

В Заключение приведены основные результаты работы:

1. С лучшей в мире точностью измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в пике ϕ -мезонного резонанса:

$$\sigma_{\phi \rightarrow 3\pi}^{\text{peak}} = (637 \pm 23(\text{стат.}) \pm 16(\text{сист.})) \text{ нб},$$

$$\mathcal{B}_{e^+e^-} \mathcal{B}_{3\pi} = (4.51 \pm 0.16(\text{стат.}) \pm 0.11(\text{сист.})) \times 10^{-5}.$$

2. Проведён анализ распределения событий распада $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ на диаграмме Далица. Измерены абсолютная величина (a) и фаза (φ) амплитуды прямого рождения адронной системы $\pi^+\pi^-\pi^0$:

$$a = 0.101 \pm 0.044(\text{стат.}) \pm 0.017(\text{сист.}),$$

$$\varphi = -2.91 \pm 0.14(\text{стат.}) \pm 0.07(\text{сист.}).$$

3. Установлены верхние пределы на относительные вероятности распадов $\phi \rightarrow \pi\pi\gamma\gamma$ и $\phi \rightarrow \pi\pi\eta$:

$$\mathcal{B}(\phi \rightarrow \pi\pi\gamma\gamma) < 1.2 \times 10^{-4} \text{ (CL = 90\%)},$$

$$\mathcal{B}(\phi \rightarrow \pi\pi\eta) < 6.1 \times 10^{-5} \text{ (CL = 90\%)}.$$

4. Разработан и изготовлен электромагнитный калориметр на основе сцинтилляционных кристаллов CsI для детектора КМД-3.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. D.A. Epifanov, New Study Of $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ Decay With Cmd-2 Detector, Prepared for DAFNE 2004: Workshop on Physics at Meson Factories, Rome, Frascati, Italy, 7-11 June 2004.
2. R.R. Akhmetshin, V.M. Aulchenko, . . . , D.A. Epifanov *et al.*, Study of $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ with CMD-2 detector, Preprint Budker INP 2006-028, Novosibirsk, 2006.
3. R.R. Akhmetshin, V.M. Aulchenko, . . . , D.A. Epifanov *et al.*, Study of $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ with CMD-2 detector, Phys. Lett. B **642** (2006) 203.
4. В.М. Аульченко, Р.Р. Ахметшин, . . . , Д.А. Елифанов и др., Поиск распадов $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma$ и $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ с детектором КМД-2, Письма в ЖЭТФ **т.88, вып. 2** (2008) 93.
5. В.М. Аульченко, Р.Р. Ахметшин, . . . , Д.А. Елифанов и др., Проект детектора КМД-2М, Препринт ИЯФ 2001-45, Новосибирск, 2001.
6. В.М. Аульченко, А.Е. Бондарь, . . . , Д.А. Елифанов и др., Электромагнитный калориметр на основе сцинтилляционных кристаллов CsI для детектора КМД-3, Препринт ИЯФ 2008-39, Новосибирск, 2008.