

На правах рукописи

АЧАСОВ Михаил Николаевич

**ИЗУЧЕНИЕ ЛЁГКИХ ВЕКТОРНЫХ МЕЗОНОВ
В ПРОЦЕССАХ РОЖДЕНИЯ АДРОНОВ
В $e^+ e^-$ АННИГИЛЯЦИИ**

**01.04.16 – физика атомного ядра
и элементарных частиц**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ:

СЕРЕДНЯКОВ – доктор физико-математических наук, профессор,
Сергей Иванович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КОЖЕВНИКОВ – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Аркадий Алексеевич Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, ведущий научный сотрудник.

ПАХЛОВ – доктор физико-математических наук,
Павел Николаевич член корр. РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение «ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики», г. Москва, начальник лаборатории.

ФЕДОТОВИЧ – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Геннадий Васильевич Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, ведущий научный сотрудник.

ВЕДУЩАЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение «ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий», г. Протвино, Московская обл.
ОРГАНИЗАЦИЯ

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2013 г. в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 2013 г.

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

В.С. Фадин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Метод встречных e^+e^- пучков развивается более 50 лет и стал ведущим экспериментальным методом изучения элементарных частиц. Одна из основных задач, решаемая в e^+e^- экспериментах, – исследование электрон-позитронной аннигиляции в адроны. Сечение процессов аннигиляции $e^+e^- \rightarrow$ адроны изучено в энергетической области $\sqrt{s} \approx 0.4 - 190$ ГэВ. Область энергии коллайдера ВЭПП-2М (Новосибирск, ИЯФ СО РАН) лежит ниже 1.4 ГэВ и до порога рождения легчайших адронов – $2m_{\pi^\pm}$, т.е. находится в самом начале энергетической шкалы. В этой области энергии сечение процесса аннигиляции $e^+e^- \rightarrow$ адроны достигает наибольших значений и рождается половина из известных кварков (u, d, s). В области низких энергий, кроме ВЭПП-2М, работали коллайдеры ВЭПП-2 (Новосибирск), АСО и DCI (Орсе), ADONE и DAΦNE (Фраскати). Кроме того, этот энергетический диапазон исследуется в экспериментах на B -фабрике PEP-II (SLAC) методом радиационного возврата ISR (initial state radiation).

Интерес к исследованиям e^+e^- аннигиляции в области энергии ВЭПП-2М всегда был высок. В значительной степени он связан с экспериментами по измерению аномального магнитного момента мюона – одной из наиболее точно измеренных физических величин. Сравнение этих измерений с теоретическим расчётом является одной из наиболее чувствительных проверок Стандартной Модели. В расчётах для определения адронного вклада в поляризацию вакуума используется экспериментально измеренное сечение аннигиляции $e^+e^- \rightarrow$ адроны. При этом область энергии ВЭПП-2М определяет величину этого вклада.

В области энергии ВЭПП-2М в e^+e^- аннигиляции рождаются лёгкие векторные мезоны ρ, ω и ϕ и их возбуждённые состояния, в частности, ρ' и ω' . Большой интерес для изучения сильных взаимодействий при низких энергиях представляет экспериментальное исследование свойств этих мезонов. Исследования ρ, ω и ϕ резонансов идут в двух направлениях: ведётся поиск редких распадов этих состояний и увеличивается точность измерения основных параметров резонансов – масс, полных ширин, основных мод распада. Возбуждённые состояния ρ, ω и ϕ мезонов – $\rho', \rho'', \omega', \omega''$ и ϕ' изучены с гораздо худшей точностью, чем основные состояния. Практически, известно только то, что они существуют.

В период с 1995 по 2000 годы на e^+e^- коллайдере ВЭПП-2М были проведены эксперименты со Сферическим нейтральным детектором (СНД). Калориметр СНД имеет сферическую форму, что обеспечило равномерную чувствительность по телесному углу. В качестве трековой системы для измерения углов заряженных частиц в детекторе была создана систе-

ма из двух дрейфовых камер. СНД является универсальным детектором, способным зарегистрировать и полностью восстановить события, содержащие как заряженные, так и нейтральные частицы. Сочетание высокой светимости коллайдера, хорошего разрешения, большого телесного угла и высокой сегментации детектора позволило выполнить успешные измерения и получить важные физические результаты.

В диссертации представлены результаты изучения следующих процессов $e^+e^- \rightarrow$ адроны: $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в области энергии до 1 ГэВ, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ во всём диапазоне энергии ВЭПП-2М ($\sqrt{s} < 1.4$ ГэВ), $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ и $K_S K_L$ в области рождения ϕ -резонанса. Исследования СНД базируются на рекордном числе отобранных событий изучаемых процессов, существенно превосходящем статистику предыдущих экспериментов. Это обстоятельство позволило не только понизить статистическую ошибку определения параметров векторных мезонов (например, статистические ошибки значений произведений ширин распадов ρ , ω и ϕ по основным каналам на соответствующие лептонные ширины не превышают 1%), но и тщательно исследовать систематические погрешности измерений, что в конечном итоге привело к снижению систематических ошибок. Как результат точность определения параметров резонансов была существенно улучшена в сравнении с предыдущими измерениями.

Прецизионное измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в области рождения ρ и ω ($\sqrt{s} < 1$ ГэВ) мезонов имеет первостепенное значение для определения адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона, поскольку даёт около 70% величины этого вклада. В эксперименте СНД удалось измерить величину этого сечения с точностью около 1%. Изучение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в этой области энергии на большой статистике позволяет с высокой точностью исследовать интерференцию между ρ и ω мезонами. Полученные данные по сечению процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ позволяют проверить и развить теоретические модели его описания, основанные на $\rho - \omega$ смешивании.

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ было впервые измерено с одним детектором во всём энергетическом диапазоне рождения лёгких векторных мезонов ρ , ω , ϕ и ω' . Это в сочетании с высокой статистикой, набранной в экспериментах СНД, позволило на новом экспериментальном уровне исследовать интерференцию между векторными мезонами. Анализ сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ указывает на существование запрещенного по G -четности распада $\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ на уровне трех стандартных отклонений. Полученные данные по сечению процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ позволяют уточнить и развить теоретические модели описания процесса, основанные на $\rho - \omega$ и $\phi - \omega$ смешивании. В области энергии выше 1 ГэВ был экспериментально обнаружен новый механизм процесса

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 - e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, идущий за счёт распада $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-$. Путём анализа спектра масс $\pi^+\pi^-$ была впервые измерена фаза интерференции между амплитудами процессов $e^+e^- \rightarrow \rho\pi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Увеличение точности измерения сечения в области энергии $\sqrt{s} = 1.1\text{--}1.4$ ГэВ дало экспериментальные доказательства существования резонансной структуры, которая отождествляется с резонансом ω' .

Наряду с процессами $e^+e^- \rightarrow$ адроны в области ВЭПП-2М представляет интерес исследовать процессы квантовой электродинамики. В частности, процесс $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, который является одним из наиболее важных в физике высоких энергий. Он является фундаментальным для изучения электромагнитного и слабого взаимодействия, электромагнитных свойств адронов. Этот процесс использовался для проверки квантовой электродинамики (КЭД), для измерения электрослабой интерференции, лептонных ширин векторных мезонов с квантовыми числами $I^G J^{PC} = 0^{-1}--$ и Z -бозона, а также для измерения значений бегущей электромагнитной константы $\alpha(s)$ во времениподобной области. До эксперимента СНД процесс $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ в области энергии ВЭПП-2М изучался только в двух экспериментах на небольшом числе событий. В представленной работе сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ измерено в области энергии $1 - 1.4$ ГэВ с точностью лучше 2%. Впервые в энергетической области $\sqrt{s} \approx 1 - 1.4$ ГэВ определено значение константы $\alpha(s)$ электромагнитного взаимодействия.

Большинство точечных фермионов (кварки, нейтрино) участвуют в процессах с изменением аромата: в распаде кварков и в осцилляции нейтрино. В то же время, процессы с изменением аромата заряженных лептонов пока не наблюдались. Теоретически такие процессы не исключаются и присутствуют во многих расширениях Стандартной Модели. Поиск изменения аромата заряженных лептонов проводится в распадах μ и τ -лептона, K, B, D, η мезонов, в процессе конверсии $\mu N \rightarrow eN$. Для таких исследований также подходят процессы аннигиляции $e^+e^- \rightarrow e\mu, e\tau, \mu\tau$. Ранее проводились поиски распадов $J/\psi(\Upsilon, Z) \rightarrow e\mu, e\tau, \mu\tau$, процессов $e^+e^- \rightarrow e\mu, e\tau$ и $\mu\tau$ в области рождения $\Upsilon(4S)$ -мезона и при $\sqrt{s} = 189 - 209$ ГэВ. В частности, были установлены верхние пределы на уровне 10^{-6} на распады $J/\psi \rightarrow e\mu$ и $Z \rightarrow e\mu$. При энергии ниже рождения J/ψ подобные исследования впервые были выполнены с детектором СНД. В диссертации представлен поиск распада $\phi \rightarrow e\mu$. Впервые установлен верхний предел на относительную вероятность распада.

Цель работы

Цель работы состояла в измерении сечений процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в области энергии $\sqrt{s} < 1$ ГэВ, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области энергии $\sqrt{s} < 1.4$ ГэВ, $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ и $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ в области рождения ϕ -мезона, анализе сечений и определении основных параметров ρ, ω, ϕ -мезонов, изучении интерференции между ними, исследовании свойств ω' резонанса, поиске подавленного по G -чётности распада $\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, изучении посредством анализа спектра инвариантных масс $\pi\pi$ пар свойств ρ -мезона и механизмов перехода векторных мезонов в конечное состояние $\pi^+\pi^-\pi^0$, измерении сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ в области энергии 1 – 1.4 ГэВ, поиске распада $\phi \rightarrow e\mu$, подготовке калориметра детектора СНД к экспериментам на новом коллайдере ВЭПП-2000, проведении первого измерения светимости ВЭПП-2000.

Личный вклад автора

Личный вклад автора в получении результатов диссертации является определяющим. В ходе эксперимента автор принимал участие в обеспечении работоспособности калориметра детектора СНД, обеспечил его энергетическую калибровку, принимал участие в наборе данных, на основе которых выполнены измерения, представленные в работе. Автор лично проводил анализ данных: разработал методику отбора событий изучаемых процессов и определения систематических ошибок измерений, аппроксимировал измеренные сечения и спектры масс пар пионов теоретическими моделями, разработал часть необходимого программного обеспечения. Под руководством автора и с его непосредственным участием калориметр СНД был подготовлен к экспериментам на новом коллайдере ВЭПП-2000, выполнены первые измерения светимости ВЭПП-2000.

Научная новизна работы

На рекордной статистике проведены исследования процессов аннигиляции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в области рождения ρ и ω -мезонов, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области рождения ρ, ω, ϕ -мезонов и ω' резонанса, $e^+e^- \rightarrow K^+K^-, K_S K_L$ в области рождения ϕ -мезона. Сечение $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ впервые измерено в одном эксперименте в широком диапазоне энергии \sqrt{s} от 660 до 1380 ГэВ. С лучшей, по сравнению с предыдущими экспериментами, точностью измерены основные параметры ρ, ω, ϕ -мезонов – массы, ширины, произведения ширин распадов по основным каналам на соответствующие лептонные ширины. Улучшена точность определения фаз интерференции между векторными мезонами. Показано, что значение фазы $\varphi_{\omega\phi}$ между амплитудами процессов $e^+e^- \rightarrow \omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ согласуется с предсказанием, основанном на $\phi - \omega$

смешивании за счёт общих каналов распада. Значение фазы $\varphi_{\rho\omega}$ между амплитудами процессов $e^+e^- \rightarrow \rho \rightarrow \pi^+\pi^-$ и $e^+e^- \rightarrow \omega \rightarrow \pi^+\pi^-$ превышает величину, ожидаемую из $\rho - \omega$ смешивания.

В области энергии выше 1 ГэВ был экспериментально обнаружен и исследован новый процесс $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Впервые измерена фаза интерференции между амплитудами процессов $e^+e^- \rightarrow \rho\pi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Получены экспериментальные доказательства существования резонанса ω' .

Анализ сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ указывает на существование запрещенного по G -четности распада $\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ на уровне трёх стандартных отклонений. Полученные значения относительной вероятности распада и фаза между амплитудами ω и ρ согласуются со значениями, ожидаемыми из $\rho - \omega$ смешивания.

С лучшей точностью измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$. Впервые в этой энергетической области определено значение константы α электромагнитного взаимодействия.

Впервые установлен верхний предел на величину распада с нарушением аромата заряженных лептонов $\phi \rightarrow e\mu$.

Научная и практическая ценность работы

Разработаны методика выделения событий процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, $\pi^+\pi^-\pi^0$, K^+K^- , $K_S K_L$ из массива экспериментальных данных на детекторе СНД и методика оценки систематических погрешностей определения эффективности регистрации.

Результаты работы внесены в таблицу свойств частиц и в базы данных сечений процессов в физике высоких энергий, используются для построения теоретических моделей описания изученных процессов, в обработке и интерпретации данных других экспериментов. Измеренные сечения используются для расчётов адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона.

Калориметр детектора СНД был подготовлен и в настоящее время работает в экспериментах на новом коллайдере ВЭПП-2000. Первые измерения светимости нового коллайдера ВЭПП-2000, выполненные калориметром СНД, подтвердили справедливость концепции круглых пучков, применённой для многократного увеличения светимости коллайдера.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Измерение сечений процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, $\pi^+\pi^-\pi^0$, $K_S K_L$, K^+K^- и $\mu^+\mu^-$ с высокой точностью в экспериментах с детектором СНД на e^+e^- коллайдере ВЭПП-2М.
2. Определение основных параметров лёгких векторных мезонов ρ, ω, ϕ .

3. Экспериментальное обнаружение нового механизма процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 - e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области энергии $\sqrt{s} > 1$ ГэВ.
4. Первое измерение значения бегущей константы электромагнитного взаимодействия $\alpha(s)$ в области энергии $\sqrt{s} = 1040 - 1400$ МэВ.
5. Первое установление верхнего предел на относительную вероятность распада $\phi \rightarrow e\mu$.

Апробация работы

Материалы диссертации неоднократно докладывались на международных конференциях, на семинарах экспериментальных лабораторий ИЯФ СО РАН и опубликованы в российских и зарубежных научных журналах.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 206 страницах, включает список литературы, содержащий 226 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко рассказано об экспериментах по изучению e^+e^- аннигиляции, об эксперименте СНД на ВЭПП-2М и обоснована актуальность работы.

Первая глава посвящена описанию экспериментальной установки. Приведена схема электрон-позитронного накопителя ВЭПП-2М и его основные параметры. Описаны системы детектора СНД (Рис.1). Детектор СНД состоит из трековой системы, включающей в себя две цилиндрические дрейфовые камеры, трехслойного сферического калориметра на основе кристаллов NaI(Tl) и мюонной системы, состоящей из двух слоев стримерных трубок и пластмассовых сцинтилляционных счетчиков. Энергетическое и угловое разрешение калориметра для фотонов с энергией E составляет $\sigma_E/E(\%) = 4.2\%/ \sqrt[4]{E(\text{ГэВ})}$ и $\sigma_{\phi,\theta} = 0.82^\circ / \sqrt{E(\text{ГэВ})} \oplus 0.63^\circ$ Угловое разрешение трековой системы для заряженных частиц по азимутальному углу составляет $\sigma_\phi = 0.5^\circ$, по полярному – $\sigma_\theta = 2.0^\circ$. Описаны системы сбора и обработки данных, моделирование детектора.

В период с 1995 по 2000 годы с детектором СНД на ВЭПП-2М были проведены эксперименты, в ходе которых получены данные в области энергии $\sqrt{s} = 360 - 1380$ МэВ. Данные набирались методом сканирования энергии. Суммарный интеграл светимости составил около 30 пбн^{-1} .

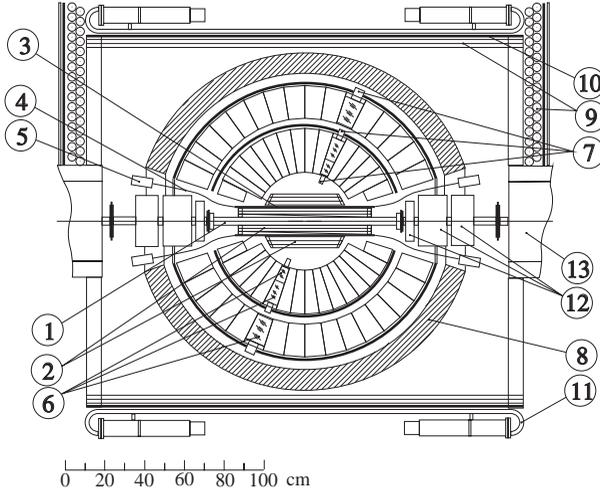


Рис. 1. Детектор СНД - сечение вдоль оси пучков; 1 - вакуумная камера, 2 - дрейфовые камеры, 3 - цилиндрический сцинтилляционный счетчик, 4 - световоды, 5 - ФЭУ, 6 - кристаллы NaI(Tl), 7 - вакуумные фототриоды, 8 - железный поглотитель, 9 - стримерные трубки, 10 - 1 см железные пластины, 11 - сцинтилляционные счетчики, 12 - магнитные линзы, 13 - поворотные магниты.

Вторая глава посвящена изучению свойств лёгких векторных мезонов посредством измерения сечений процессов $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$, $K_S K_L$, $\pi^+\pi^-\pi^0$ и $\pi^+\pi^-$. Кратко описывается методика измерения сечений процессов $e^+e^- \rightarrow f$ рождения конечного состояния f в e^+e^- аннигиляции. Сечение такого процесса в энергетической точке s_0 определяется как

$$\sigma_0(s_0) = \frac{N}{IL\varepsilon(1 + \delta_r)(1 + \delta_e)}, \quad (1)$$

где N – число отобранных событий изучаемого процесса, IL – интегральная светимость, ε – эффективность регистрации событий в применённых условиях отбора, δ_r – радиационная поправка, δ_e – поправка на разброс энергии в пучках коллайдера.

Для определения поправок δ_r и δ_e , эффективности регистрации необходимо иметь предположение (модель) об энергетическом поведении сечения. В рамках модели доминантности векторных мезонов (ДВМ) (Рис. 2) сечение процесса аннигиляции $e^+e^- \rightarrow f$ записывается следующим образом:

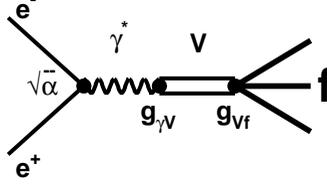


Рис. 2. Диаграмма процесса аннигиляции $e^+e^- \rightarrow f$ в модели ДВМ.

$$\sigma_f = \frac{P_f(s)}{s^{3/2}} \left| \sum_V \frac{\Gamma_V m_V^2 \sqrt{\sigma(V \rightarrow f) m_V}}{D_V(s)} \frac{e^{i\varphi_V}}{\sqrt{P_f(m_V)}} \right|^2. \quad (2)$$

Здесь V обозначает векторный мезон $\rho, \omega, \phi, \dots$, D_V – обратный пропагатор векторного мезона V , $P_f(s)$ – фактор фазового объёма конечного состояния f , $\sigma(V \rightarrow f) = 12\pi B(V \rightarrow f)B(V \rightarrow e^+e^-)/m_V^2$. В рамках модели ДВМ приведены теоретические выражения для сечений изучаемых процессов.

Сечения процессов $e^+e^- \rightarrow K\bar{K}$ (K^+K^- или $K_S K_L$) измерялись с использованием данных, набранных в области рождения $\phi(1020)$ -резонанса ($\sqrt{s} = 984 - 1060$ МэВ) с суммарным интегралом светимости около 8.5 пбн^{-1} . Измерения основаны на 10^6 событий процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$, 0.5×10^6 событий процесса $K_S K_L$. Описаны условия отбора событий. В рассматриваемой энергетической области события процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ имеют следующие характерные особенности:

- заряженные каоны относительно медленные ($\beta\gamma \sim 0.2 - 0.4$) и, как следствие, имеют большие ионизационные потери в дрейфовой камере;
- в событиях $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ в калориметре часто регистрируются фотоны за счет распадов каонов ($K^\pm \rightarrow \pi^\pm\pi^0$, $\pi^\pm\pi^0\pi^0$, $\pi^0\mu^\pm\nu_\mu$, $\pi^0e^\pm\nu_e$) в детекторе;
- в событиях находятся дополнительные треки (вторичные частицы), связанные с распадами каонов в трековой системе.

Эти особенности были использованы для выработки основных условий отбора. Отбирались события, в которых были зарегистрированы две коллинеарные заряженные частицы с большими ионизационными потерями (dE/dx) в дрейфовой камере. Событие должно содержать не менее двух фотонов и хотя бы одну вторичную частицу от распада каона в трековой системе.

В изучаемой энергетической области распадные длины K_S и K_L мезонов равны соответственно $c\tau\beta\gamma \sim 0.3 - 1$ см и $2 - 5.6$ м. K_S распадается внутри вакуумной камеры коллайдера или трековой системы, а K_L достигает калориметра, где дает срабатывания («фотоны») за счёт распадов на лету или взаимодействия с веществом, или вообще не регистрируется. Анализ процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ построен на выделении событий, в которых регистрируются распады $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ и $K_S \rightarrow \pi^0\pi^0$.

В первом случае (заряженная мода) отбирались события, содержащие две заряженные частицы и хотя бы один «фотон». Так как K_S мезоны имеют распадную длину около 0.5 см, то основным условием отбора являлось требование, чтобы наименьшее расстояние r от оси пучков до траектории заряженных частиц в $r - \phi$ проекции удовлетворяло условию $0.2 \text{ см} < r < 1.0 \text{ см}$.

Для анализа процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ по нейтральной моде распада K_S ($K_S \rightarrow \pi^0\pi^0$) отбирались события, в которых были зарегистрированы не менее четырех фотонов и отсутствовали заряженные частицы. Основой дальнейшего отбора служила кинематическая реконструкция распада $K_S \rightarrow \pi^0\pi^0$.

Эффективность регистрации определялась по моделированию методом Монте-Карло. Для оценки фона использовались данные, набранные ниже порога рождения $K\bar{K}$. Оценены систематические ошибки и определены поправки к эффективности регистрации, связанные с неточностью моделирования параметров отбора. Число отобранных экспериментальных событий аппроксимировалось числом ожидаемых событий, которое определялась с использованием эффективности регистрации и теоретической модели энергетического поведения сечений. В результате были определены параметры модели, что позволило вычислить поправки δ_r и δ_e и определить полное сечение процессов. Результаты измерений – сечения процессов $e^+e^- \rightarrow K\bar{K}$ в энергетических точках представлены в виде таблиц. Систематические ошибки измерения сечений определяются систематическими ошибками измерения эффективностей регистрации и светимости и составляют 7.1% и 3.2% для $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ и $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ соответственно.

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ измерялось во всём диапазоне энергии ВЭПП-2М ($\sqrt{s} = 660 - 1380$ МэВ) с суммарным интегралом светимости 28 пбн^{-1} . Измерения основаны на 1.7×10^6 отобранных событий, основная часть которых набрана в области рождения ω и ϕ мезонов.

Анализ процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ основан на кинематической реконструкции событий, содержащих две заряженные частицы и два и более фотонов. Кинематическая реконструкция проводилась в предположении, что заряженные частицы – пионы, полный импульс системы равен нулю,

полная энергия равна \sqrt{s} и что фотоны появились в результате распада $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$.

Описаны условия отбора, определена эффективность регистрации. Число фоновых событий оценивалось по моделированию. В области пика ϕ -мезона ($\sqrt{s} = 1016 - 1030$ МэВ) фон определяется событиями процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$. В области энергии $\sqrt{s} > 1030$ МэВ основным фоном являются события процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$. В области энергии ниже пика ϕ -мезона фон определяется процессами КЭД ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$, $e^+e^-\gamma\gamma$), $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-(\gamma)$, $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma)$. Процесс $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ не даёт вклада ниже $\sqrt{s} \sim 900$ МэВ.

Оценены систематические ошибки и определены поправки к эффективности регистрации, связанные с неточностью моделирования параметров отбора. Оценена систематика вычитания фона. По отобранному событию определено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Результат представлен в виде таблицы. Систематическая ошибка измерения составила 3.5% при энергии $\sqrt{s} < 900$ МэВ, 4.5% при $900 \leq \sqrt{s} < 980$ МэВ, 5% при $980 \leq \sqrt{s} \leq 1060$ МэВ и 5.5% при $1060 < \sqrt{s}$ МэВ.

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ измерялось в области рождения ρ и ω мезонов $390 < \sqrt{s} < 1000$ МэВ. Была использована статистика в 12.4×10^6 коллинеарных событий, из которых 7.4×10^6 события процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, 4.5×10^6 события процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ и 0.5×10^6 события процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$.

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ измерялось следующим образом.

1. Отбирались коллинеарные события $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $\pi^+\pi^-$, $\mu^+\mu^-$.
2. Используя энерговыделение в слоях калориметра, проводилось разделение событий по типам на e^+e^- и на $\pi^+\pi^-$ ($\mu^+\mu^-$) и определялось их число.
3. По событиям $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ измерялась светимость. Для определения числа событий процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ число событий реакции $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ рассчитывалось по теоретическому сечению и вычиталось.
4. Для определения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ число событий $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в каждой энергетической точке нормировалось на светимость, делилось на эффективность регистрации и на радиационную поправку.

Разделение электронов и пионов в детекторе СНД основано на различии энерговыделений этих частиц в слоях калориметра. Процедура разделения основывается на нейронной сети – многослойном перцептроне.

Описаны условия отбора событий, методика определения фона от космических частиц и событий процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, определены систе-

матические погрешности. Систематическая ошибка измерения сечения составила 1.3% при энергии $\sqrt{s} \geq 420$ МэВ и 3.2% при $\sqrt{s} < 420$ МэВ. Результаты измерения сечения представлены в виде таблицы.

Описано изучение динамики процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ посредством анализа спектров инвариантных масс $\pi^+\pi^-$ и $\pi^\pm\pi^0$ мезонов в области рождения ϕ -мезона ($\sqrt{s} \simeq 1020$ МэВ) и в диапазоне энергии $\sqrt{s} = 1100 - 1380$ МэВ. В области рождения ϕ -резонанса основной целью являлось измерение масс и ширин ρ^0 и ρ^\pm -мезонов, а в области $\sqrt{s} \geq 1100$ МэВ – поиск процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и определение фазы между амплитудами процессов $e^+e^- \rightarrow \rho\pi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$.

Изложена методика построения распределений по инвариантным массам $\pi\pi$, вычитания фона и подгонки спектров (Рис. 3,4) и оценки систематической погрешности определения параметров. Подгонки показали, что при данной точности экспериментальные данные могут быть полностью описаны с помощью $\rho\pi$ перехода. Массы заряженного и нейтрального ρ -мезонов и их разница составили

$$m_{\rho^0} = 775.8 \pm 0.9 \pm 2.0 \text{ МэВ},$$

$$m_{\rho^\pm} = 774.5 \pm 0.7 \pm 1.5 \text{ МэВ},$$

$$m_{\rho^\pm} - m_{\rho^0} = -1.3 \pm 1.1 \pm 2.0 \text{ МэВ}.$$

Ширины заряженного и нейтрального ρ - мезонов составили

$$\Gamma_{\rho^0} = 151.1 \pm 2.6 \pm 3.0 \text{ МэВ},$$

$$\Gamma_{\rho^\pm} = 149.9 \pm 2.3 \pm 2.0 \text{ МэВ}.$$

Эти значения согласуются с предположением о равенстве констант связи $g_{\rho^0\pi\pi} = g_{\rho^\pm\pi\pi}$. Измеренные параметры ρ -мезона согласуются с результатами других экспериментов, проведенных на установках с e^+e^- пучками $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, $e^+e^- \rightarrow \rho\pi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и $\tau^- \rightarrow \pi^-\pi^0\nu_\tau$. Масса ρ -мезона, измеренная по другим методикам (в фоторождении, адронных столкновениях и т.д.), равна 768.1 ± 0.6 и противоречит этим результатам. Это может быть связано с тем, что в этих экспериментах ρ -мезон рождается на нуклонах и взаимодействует с ними в конечном состоянии. Такого рода эффекты трудно учитывать, и это может приводить к смещению измеряемой массы резонанса.

В области энергии выше пика ϕ -мезона в спектре масс $\pi^+\pi^-$ ясно виден вклад от ω мезона (Рис. 4), что свидетельствует о существовании процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. В области энергии $\sqrt{s} = 1100 - 1380$ МэВ в каждой энергетической точке проводилась аппроксимация спектров масс $\pi^+\pi^-$ моделью, в которой учитывались два механизма реакции

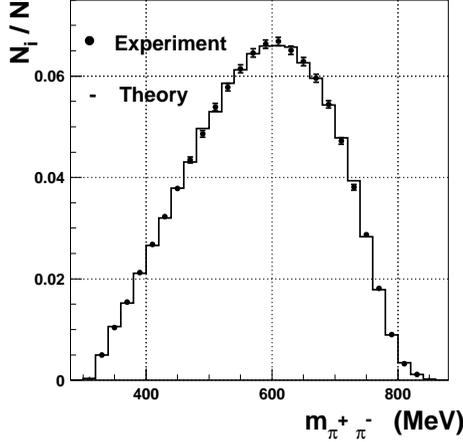


Рис. 3. Результат подгонки спектра масс $\pi^+\pi^-$ в процессе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области энергии $\sqrt{s} \approx m_\phi$.

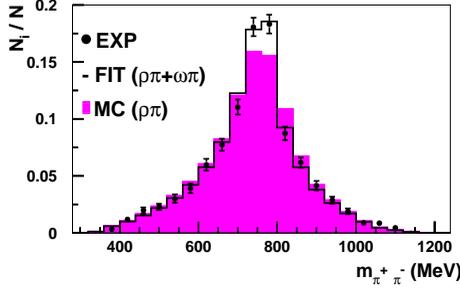


Рис. 4. Спектр масс $\pi^+\pi^-$ в процессе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области энергии \sqrt{s} от 1200 до 1380 МэВ.

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$: $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \rho\pi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. При этом определялась фаза интерференции между амплитудами процессов. Зависимость фазы от энергии в системе центра масс e^+e^- пучков приведена в таблице. Для определения параметров ϕ -мезона использовались сечения процессов $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$, $K_S K_L$ и $\pi^+\pi^-\pi^0$, измеренные в области ϕ -резонанса. Данные совместно аппроксимировались теоретическими сечениями, записанными в рамках модели ДВМ (Рис. 5, 6). Определены

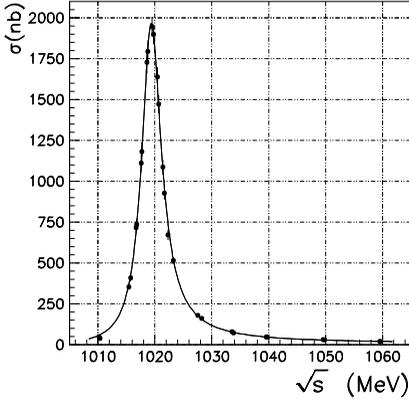


Рис. 5. Измеренное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ с подгоночной кривой.

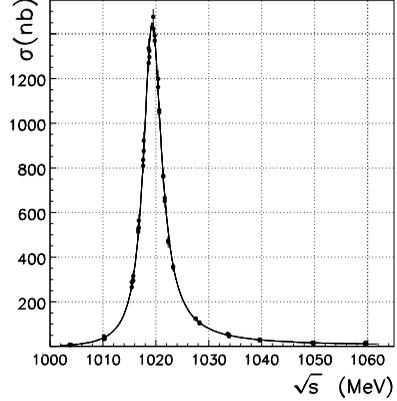


Рис. 6. Измеренное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ с подгоночной кривой.

основные параметры ϕ -мезона:

$$m_\phi = 1019.42 \pm 0.02 \pm 0.04 \text{ МэВ},$$

$$\Gamma_\phi = 4.21 \pm 0.03 \pm 0.02 \text{ МэВ},$$

$$B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow K^+K^-) = (13.93 \pm 0.14 \pm 0.99) \times 10^{-5}$$

$$B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow K_S K_L) = (10.27 \pm 0.07 \pm 0.34) \times 10^{-5},$$

$$B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) = (4.67 \pm 0.04 \pm 0.26) \times 10^{-5}.$$

Сравнение полученных значений с результатами других экспериментов показывает, что они имеют, как правило, лучшую точность по сравнению с предыдущими измерениями. С использованием полученных результатов по основным распадам ϕ удалось определить вероятность распада ϕ -мезона на электрон-позитронную пару

$$B(\phi \rightarrow e^+e^-) = 2.93 \pm 0.14.$$

Целью анализа сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ являлось определение параметров ω, ω' и ω'' -мезонов, значений фазы интерференции $\varphi_{\omega\phi}$ между процессами $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$ и поиск распада $\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$.

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ измерено в диапазоне энергии $\sqrt{s} < 1.4$ ГэВ, который не перекрывает область рождения ω'' . На момент измерения СНД единственным результатом выше 1.4 ГэВ являлось

измерение DM2, которое противоречит данным СНД. Для того, чтобы определить массу и ширину ω'' , сечение, измеренное СНД, аппроксимировалось одновременно с сечением процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$, измеренным DM2 в области энергии \sqrt{s} от 1340 до 2200 МэВ.

Для описания данных использовались две модели. В первой были учтены вклады ω , ϕ , ω' и ω'' , а также процесс $e^+e^- \rightarrow \rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Во второй не учитывался распад $\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, но использовался формфактор, который ограничивал рост с энергией парциальных ширин распадов векторных мезонов. Параметром формфактора является r_0 – параметр обрезания (эффективный «радиус» векторного мезона), характеризующий размер области взаимодействия.

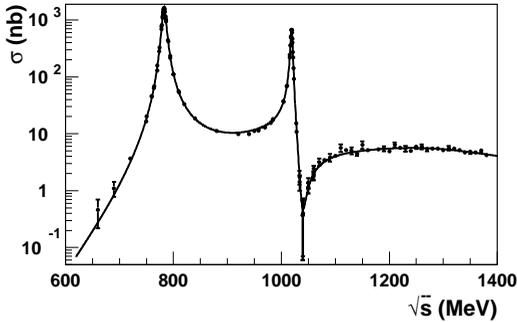


Рис. 7. Измеренное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ с подгоночной кривой, учитывающей ω , ϕ , ρ , ω' , ω'' резонансы.

Обе модели удовлетворительно описывают экспериментальные данные. В результате аппроксимации данных (Рис. 7) были определены параметры ω -мезона:

$$m_\omega = 782.79 \pm 0.08 \pm 0.09 \text{ МэВ},$$

$$\Gamma_\omega = 8.68 \pm 0.04 \pm 0.15 \text{ МэВ},$$

$$B(\omega \rightarrow e^+e^-)B(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) = (6.74 \pm 0.04 \pm 0.24) \times 10^{-5}.$$

Сравнение полученных значений с результатами других экспериментов показывает, что они имеют, как правило, лучшую точность по сравнению с предыдущими измерениями. С использованием полученных результатов по основным распадам ω удалось определить вероятность распада ϕ -мезона на электрон-позитронную пару

$$B(\omega \rightarrow e^+e^-) = (7.51 \pm 0.04 \pm 0.24) \times 10^{-5}.$$

Аппроксимация первой моделью даёт:

$$\varphi_{\omega\phi} = 163 \pm 3 \pm 6 \text{ град},$$

$$B(\rho \rightarrow e^+e^-)B(\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) = (4.58 \pm_{1.64}^{2.46} \pm 1.56) \times 10^{-9},$$

$$\varphi_{\omega\rho} = -135 \pm_{13}^{17} \pm 9 \text{ град}.$$

Полученное значение фазы $\varphi_{\omega\phi}$ согласуется с теоретическим предсказанием $\varphi_{\omega\phi} = 163^\circ$, которое учитывает $\phi - \omega$ смешивание за счёт общих каналов распада. Значения $B(\rho \rightarrow e^+e^-)B(\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$ и $\varphi_{\omega\rho}$ согласуются с теоретическими значениями, ожидаемыми из $\rho - \omega$ смешивания.

Для второй модели было получено

$$r_0 = 2.5 \pm_{0.8}^{1.1} \pm 0.5 \text{ ГэВ}^{-1}.$$

Это значение согласуется с ожидаемым эффективным «радиусом» векторного мезона. При этом $\varphi_{\omega\phi} = 190 \pm 5 \pm 10$, что не согласуется с теоретическим предсказанием. Если при аппроксимации сечения одновременно учитывать и распад $\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и формфактор, ограничивающий рост парциальных ширин, то значения фазы $\varphi_{\omega\rho}$ и произведения $B(\rho \rightarrow e^+e^-)B(\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$ практически не изменятся, а величина «радиуса» r_0 становится малой и совместима с нулём.

Показано, что отношение электронных ширин ω , ϕ мезонов, измеренных на СНД, и J/ψ , $\Upsilon(1S)$ (взяты из таблицы свойств частиц) согласуются с предсказаниями кварковой модели для случая, когда волновая функция векторного мезона в нуле пропорциональна квадрату его массы. Проведен анализ отношения электронных ширин ω и ϕ мезонов и констант связи этих мезонов с $\rho\pi$, полученных по данным СНД. Результаты анализа указывают на то, что прямой переход предпочтительнее, чем $\phi - \omega$ смешивание в качестве механизма распада $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$.

Были получены следующие параметры ω' и ω'' :

$$m_{\omega'} = 1350 \pm_{50}^{70} \pm 100 \text{ МэВ},$$

$$\Gamma_{\omega'} = 670 \pm_{200}^{300} \pm 340 \text{ МэВ},$$

$$B(\omega' \rightarrow e^+e^-)B(\omega' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) = (0.76 \pm 0.12 \pm 0.20) \times 10^{-6},$$

$$\varphi_{\omega\omega'} = 180^\circ,$$

$$\Gamma(\omega' \rightarrow e^+e^-) \sim 500 \text{ эВ},$$

$$m_{\omega''} = 1800 \pm_{50}^{90} \pm 50 \text{ МэВ},$$

$$\Gamma_{\omega''} = 570 \pm_{200}^{450} \pm 230 \text{ МэВ},$$

$$\begin{aligned}
B(\omega'' \rightarrow e^+e^-)B(\omega'' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) &= (1.52 \pm 0.44 \pm 0.53) \times 10^{-6}, \\
B(\omega'' \rightarrow e^+e^-)B(\omega'' \rightarrow \omega\pi^+\pi^-) &= (0.31 \pm 0.07 \pm 0.09) \times 10^{-6}, \\
\varphi_{\omega\omega''} &= 0^\circ, \\
\Gamma(\omega'' \rightarrow e^+e^-) &\sim 980 \text{ эВ}.
\end{aligned}$$

Эти результаты согласуются с последовавшими измерениями BABAR, выполненными методом радиационного возврата. Энергетическая зависимость сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, полученная в этом анализе, качественно правильно описывает данные BABAR в области энергии $\sqrt{s} > 1400$ МэВ (Рис. 8).

Используя приведенные электронные ширины ω' и ω'' , в рамках нерелятивистской кварковой модели можно получить следующие отношения:

$$\begin{aligned}
\left| \frac{\Psi_{\omega'}^S(0)}{\Psi_{\omega}^S(0)} \right|^2 &= \left(\frac{m_{\omega'}}{m_{\omega}} \right)^2 \cdot \frac{\Gamma(\omega' \rightarrow e^+e^-)}{\Gamma(\omega \rightarrow e^+e^-)} \sim 2, \\
\left| \frac{\Psi_{\omega''}^S(0)}{\Psi_{\omega}^S(0)} \right|^2 &= \left(\frac{m_{\omega''}}{m_{\omega}} \right)^2 \cdot \frac{\Gamma(\omega'' \rightarrow e^+e^-)}{\Gamma(\omega \rightarrow e^+e^-)} \sim 8,
\end{aligned}$$

где $\Psi_V^S(0)$ радиальная волновая функция связанного $q\bar{q}$ состояния в нуле. Для кварк-антикварковых потенциалов, используемых для описания тяжелых кваркониев, эти отношения всегда меньше единицы. Приведённые отношения могут указывать на необычную природу ω' и ω'' резонансов или на большие модельные неточности в их описании. В любом случае требуются более точные данные и более глубокий анализ для получения чётких выводов.

Целью анализа сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ являлось определение параметров ρ^0 -мезона и произведения $B(\omega \rightarrow e^+e^-)B(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-)$. При аппроксимации данных учитывались вклады ρ, ω, ρ' и ρ'' мезонов. Так как в данной работе сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ измерено в области $\sqrt{s} < 1$ ГэВ, то для определения параметров ρ' и ρ'' использовались результаты других измерений. С этой целью были проанализированы данные по реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, полученные в экспериментах с детектором ОЛЯ в области энергии $\sqrt{s} < 1400$ МэВ и с детектором DM2 для $1350 < \sqrt{s} < 2400$ МэВ, и данные CLEO2 по спектральной функции τ -лептона в распаде $\tau^- \rightarrow \pi^-\pi^0\nu_\tau$. Полученные параметры ρ' и ρ'' использовались при аппроксимации данных СНД (Рис. 9).

Были определены параметры ρ мезона, $B(\omega \rightarrow e^+e^-)B(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-)$ и фаза интерференции $\phi_{\rho\omega}$ между процессами $e^+e^- \rightarrow \rho \rightarrow \pi^+\pi^-$ и $e^+e^- \rightarrow \omega \rightarrow \pi^+\pi^-$:

$$m_\rho = 774.6 \pm 0.04 \pm 0.05 \text{ МэВ},$$

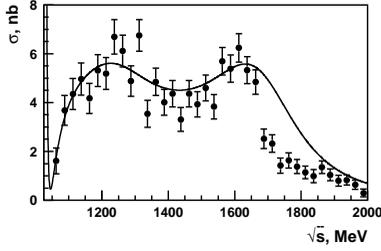


Рис. 8. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, измеренное BABAR (точки), и подгоночная кривая, полученная в результате анализа экспериментальных данных, проведенного в этой работе.

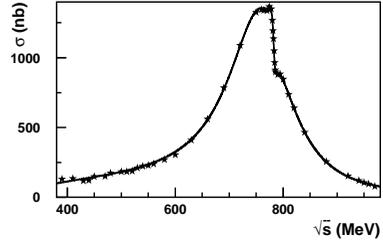


Рис. 9. Измеренное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ с подгоночной кривой.

$$\Gamma_\rho = 146.1 \pm 0.8 \pm 1.5 \text{ МэВ},$$

$$B(\rho \rightarrow e^+e^-)B(\rho \rightarrow \pi^+\pi^-) = (4.876 \pm 0.023 \pm 0.064) \times 10^{-5},$$

$$\Gamma(\rho \rightarrow e^+e^-) = 7.12 \pm 0.02 \pm 0.11 \text{ кэВ},$$

$$B(\omega \rightarrow e^+e^-)B(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) = (6.74 \pm 0.04 \pm 0.24) \times 10^{-5},$$

$$\phi_{\rho\omega} = 113.7 \pm 1.3 \pm 2.0 \text{ град.}$$

Сравнение полученных значений с результатами других экспериментов показывает, что они имеют, как правило, лучшую точность по сравнению с предыдущими измерениями. Значение $\phi_{\rho\omega}$ превышает величину 101° , которая ожидается из $\rho - \omega$ смешивания.

Третья глава посвящена измерению значения бегущей константы электромагнитного взаимодействия $\alpha(s)$ во времениподобной области при энергии $\sqrt{s} = 1040 - 1400$ МэВ. Величина бегущей константы электромагнитного взаимодействия определялась посредством изучения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$. Для изучения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ с детектором СНД более всего подходит область энергии $\sqrt{s} > 980$ МэВ. Здесь величина сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ больше или равна сечению основного фонового процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ и большинство мюонов регистрируются мюонной системой. Измерение и анализ сечения процесса были проведены в области энергии $\sqrt{s} = 980, 1040 - 1380$ МэВ с использованием суммарного интеграла светимости около 6.3 пб^{-1} .

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ измерялось следующим образом.

1. Отбирались коллинеарные события $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$.
2. События процессов $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ использовались для измерения светимости.
3. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ определялось следующим образом:

$$\sigma_{\mu\mu}(s) = \frac{N_{\mu\mu}}{IL\varepsilon(1 + \delta_r)(1 + \delta_e)}. \quad (3)$$

Здесь $N_{\mu\mu}$ – число отобранных событий процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, радиационная поправка δ_r учитывает излучение фотонов начальными и конечными частицами.

Описаны условия отбора событий, методика определения фона от космических частиц и событий процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$. Эффективность регистрации определялась по моделированию. Определены систематические погрешности эффективности регистрации и вычитания фона. Систематическая ошибка измерения сечения составила 1.6 и 1.8 % при использовании светимости, определённой по событиям процессов $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ соответственно. Также было измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$ с использованием светимости, определённой по процессу $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$. Результаты измерения сечений представлены в виде таблицы.

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ аппроксимировалось зависимостью

$$\sigma_{ee(\gamma)} = C_{fit} \times \frac{C_{BHWIDE}}{s},$$

где C_{BHWIDE} – коэффициент посчитанный с помощью программы BHWIDE. Точность расчёта составляет 0.5 %. Коэффициент C_{fit} – свободный параметр подгонки и является отношением измеренного сечения к теоретически ожидаемому (расчётному) значению. В результате подгонки (Рис. 10) было найдено

$$C_{fit} = 0.999 \pm 0.002 \pm 0.011.$$

Измеренное значение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ согласуется с расчётом.

Для аппроксимации сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ использовалась формула

$$\sigma_{\mu\mu} = \frac{4\pi}{3s} \frac{\alpha(0)^2}{|1 - \Pi(s)|^2} \frac{\beta}{4} \left(6 - 2\beta^2\right)^2 \times C_{fit}, \quad \beta = \sqrt{1 - \frac{4m_\mu}{s}}. \quad (4)$$

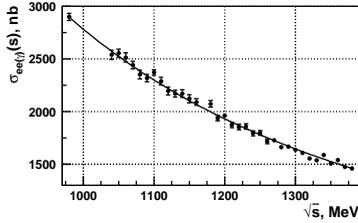


Рис. 10. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ в области углов $30^\circ < \theta_{e^\pm} < 150^\circ$, измеренное в этой работе (точки), и подгоночная кривая ($\chi^2/N_{df} = 48.1/34$).

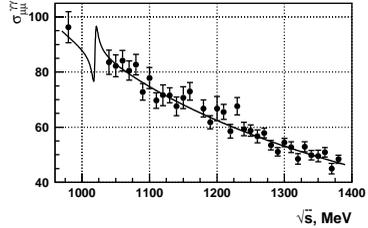


Рис. 11. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, измеренное в этой работе при нормировке на $IL_{\gamma\gamma}$ (точки), и подгоночная кривая ($\chi^2/N_{df} = 37.2/34$).

Здесь $\Pi(s)$ – поляризация вакуума.

В результате подгонки сечения было получено

$$C_{fit} = 1.006 \pm 0.007 \pm 0.016$$

для случая, когда светимость определялась по процессу $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, и

$$C_{fit} = 1.005 \pm 0.007 \pm 0.018$$

в случае измерения светимости по событиям процесса $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ (рис. 11). Полученные значения согласуются с теоретическими ожиданиями. Если во втором случае параметром подгонки сделать среднее значение $\langle 1/\alpha \rangle$, т.е. в качестве подгоночной функции использовать выражение

$$\sigma_{\mu\mu} = \frac{4\pi}{3s} \frac{\beta}{4} \left(6 - 2\beta^2\right)^2 \times \left[\frac{1}{\langle 1/\alpha \rangle} \right]^2,$$

то получим

$$\langle 1/\alpha \rangle = 134.1 \pm 0.5 \pm 1.2,$$

что согласуется с расчётом значения $\alpha(s)$ при этой энергии в рамках Стандартной Модели.

Четвёртая глава посвящена поиску распада $\phi \rightarrow e\mu$. Использовались данные, набранные в диапазоне энергии $\sqrt{s} = 984 - 1060$ МэВ с интегралом светимости 8.5 пб^{-1} . В реакции $e^+e^- \rightarrow e\mu$ конечные частицы регистрируются трековой системой и дают существенно различные энергосигналы в калориметре. Мюонная система регистрирует мюоны с эффективностью более 90%, а электроны менее 0.2%. Отбор был

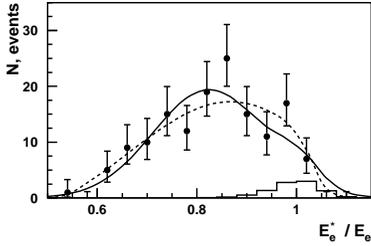


Рис. 12. Аппроксимация спектра отношения E_e^*/E_e энергии E_e^* , измеренной калориметром, к энергии E_e частицы кандидата в электроны.

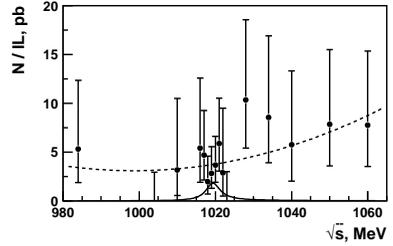


Рис. 13. Сечение регистрации кандидатов в $e^+e^- \rightarrow e\mu$ события. Сплошная линия – резонансная кривая, соответствующая верхнему пределу на $B(\phi \rightarrow e\mu)$, пунктирная кривая – описание фона.

построен на выделении коллинеарных событий с двумя заряженными частицами, из которых одна вызвала срабатывание мюонной системы СНД и её энерговыделение в слоях калориметра соответствует ионизационным потерям энергии (кандидат в мюоны), а для второй мюонная система не сработала, а энерговыделение в слоях соответствует энерговыделению электромагнитного ливня, вызванного электроном с энергией пучка (кандидат в электроны).

В результате было отобрано 146 событий. Сечение регистрации (число событий, нормированных на интегральную светимость) практически не меняется в зависимости от энергии. Чтобы определить число событий процесса $e^+e^- \rightarrow e\mu$, было проанализировано распределение по энергии кандидатов в электроны, измеренное калориметром. Число событий процесса $e^+e^- \rightarrow e\mu$ определялось путём аппроксимации спектра суммой распределений для электронов и фона (Рис. 12). Распределение для измеренной энергии электронов было получено по экспериментальным событиям $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$. В качестве распределения для фона бралось нормальное распределение или многочлен третьего порядка. Свободными параметрами подгонки являлись число событий изучаемого процесса $N_{e\mu}$ и параметры функций, описывающих распределение фона. Было найдено

$$N_{e\mu} = 12 \pm 14,$$

что соответствует верхнему пределу

$$N_{e\mu} < 21(90\%).$$

Для определения эффективности регистрации событий процесса $e^+e^- \rightarrow e\mu$ трековой системой использовалось моделирование. Первичные частицы моделирования распределялись по полярному углу в соответствии с $1 + \cos^2\theta$. Эффективности регистрации частиц мюонной системой и калориметром определялись по экспериментальным событиям $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$.

С использованием полученной эффективности был установлен верхний предел на сечение процесса $e^+e^- \rightarrow e\mu$

$$\sigma_{e\mu} < 8 \text{ пб} \quad \text{CL}=90\%.$$

Верхний предел на относительную вероятность распада $\phi \rightarrow e\mu$ был установлен в предположении отсутствия нерезонансного вклада в сечение процесса $e^+e^- \rightarrow e\mu$ и при дополнительном условии отбора на энергию кандидата в электроны $0.9 < E_e^*/E_0 < 1.1$. Здесь E_e^* – энергия, измеренная калориметром, E_e – энергия частицы кандидата в электроны, ожидаемой из кинематики $e\mu$ событий.

На Рис. 13 показана зависимость сечения регистрации от энергии. Сечение аппроксимировалось суммой функций

$$\sigma = \varepsilon_{e\mu} \times (1 + \delta_r) \times \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \left| \frac{3}{\alpha} \frac{\sqrt{B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow e\mu)}m_\phi\Gamma_\phi}{m_\phi^2 - s - i\sqrt{s}\Gamma_\phi(s)} \right|^2 + P_2(s),$$

где δ_r – радиационная поправка на излучение начальными частицами, $P_2(s)$ – многочлен второго порядка для описания фона. Параметрами подгонки являлись $B(\phi \rightarrow e\mu)$ и коэффициенты многочлена $P_2(s)$. Было получено

$$B(\phi \rightarrow e\mu) = (0.0 \pm 1.5) \times 10^{-6},$$

что соответствует верхнему пределу

$$B(\phi \rightarrow e\mu) < 2 \times 10^{-6} \quad \text{CL}=90\%.$$

Пятая глава посвящена описанию калориметра детектора СНД и начала его работы на новом коллайдере ВЭПП-2000. Трехслойный калориметр детектора СНД на основе кристаллов NaI(Tl) имеет сферическую форму, что обеспечивает равномерную чувствительность по телесному углу. Калориметр является основной частью СНД. Счетчики первых двух слоев толщиной $2.9X_0$ и $4.8X_0$, где $X_0 = 2.6$ см – радиационная длина NaI(Tl), находятся в общем контейнере из алюминиевой фольги толщиной 0.1 мм (Рис. 14). Контейнеры укреплены на несущей алюминиевой сфере толщиной 5 мм. За ней находится третий слой счетчиков

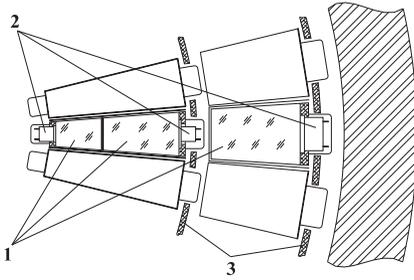


Рис. 14. Вид кристаллов NaI(Tl) в калориметре; 1 – кристаллы NaI(Tl), 2 – вакуумные фототриоды, 3 – алюминиевая полусфера.

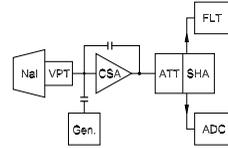


Рис. 15. Схема электроники канала калориметра ЧНД; NaI – кристалл NaI(Tl), VPT – вакуумный фототриод, CSA – зарядо-чувствительный предусилитель, ADC – аналого-цифровой преобразователь, Gen – калибровочный генератор, SHA – усилитель-формирователь, ATT – аттенуатор, FLT – первичный триггер.

($5.7X_0$). Общее число счетчиков калориметра – 1632, число кристаллов в слое – $520 \div 560$. Полный вес калориметра составляет 3.5 т.

Коэффициент светосбора в кристаллах разных слоев составляет $7 \div 15\%$. В качестве фотоприемников используются компактные вакуумные фототриоды с диаметром фотокатода 17 мм на первом и втором слоях и 42 мм на третьем слое. Средний квантовый выход фототриодов в спектре излучения NaI(Tl) составляет $\sim 15\%$, коэффициент усиления ~ 10 . Канал электроники калориметра (Рис. 15) включает в себя:

1. Зарядо-чувствительный предусилитель (ЗЧУ) с коэффициентом преобразования 0.7 В/пКл,
2. 12-ти каналный усилитель-формирователь (УФ) с регулируемым коэффициентом усиления, относительные коэффициенты усиления УФ устанавливаются с помощью входных аттенуаторов в пределах от 0 до 1 с шагом $1/255$,
3. 24-х каналный 12-ти разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с максимальным входным сигналом $U_{max} = 2$ В.

Эквивалентный шум электроники составляет $150 \div 350$ кэВ для разных счетчиков. На ЗЧУ каждого канала может подаваться сигнал с калиб-

ровочного генератора с управляемой амплитудой $0 \leq U \leq 1$ В и с шагом 1/4096.

Процедура калибровки калориметра состоит из двух этапов:

1. Предварительная калибровка с использованием космических мюонов, проводимая во время эксперимента,
2. Калибровка по событиям процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, проводимая при обработке набранной статистики.

Основу калибровки по космическим мюонам составляет сравнение экспериментальных данных по энерговыделениям в кристаллах с результатами моделирования методом Монте-Карло. Для уменьшения влияния различий в угловых распределениях космических мюонов в эксперименте и моделировании среднее энерговыделение в счетчике нормировалось на среднюю длину пробега в нем. Описаны алгоритмы процедуры калибровки и обработки калибровочных событий.

Для улучшения энергетического разрешения детектора необходимо увеличение точности калибровки, которое можно достичь, используя экспериментальные события процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, зарегистрированные во время набора статистики. Метод калибровки основан на сравнении коэффициентов, полученных путем минимизации ширины спектра энерговыделения электронов одинаковой энергии в моделировании и эксперименте. В результате калибровки удалось на 10% улучшить энергетическое разрешение калориметра для фотонов и электронов.

Описаны проблемы, возникшие во время эксплуатации калориметра в экспериментах на ВЭПП-2М, и этапы подготовки установки к экспериментам на новом коллайдере ВЭПП-2000, в котором впервые для подавления эффектов встречи, и как следствие увеличения светимости, был применён метод круглых пучков. В заключение описан эксперимент по первому измерению светимости ВЭПП-2000, выполненному с помощью калориметра детектора СНД. Эти измерения продемонстрировали подавление эффектов встречи и подтвердили справедливость концепции круглых пучков.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в работе.

1. Измерены полные сечения процессов:
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в диапазоне энергии $\sqrt{s} = 390 - 980$ МэВ (область рождения ρ и ω мезонов) с точностью 3.2% при энергии $\sqrt{s} < 420$ МэВ и 1.3% при $\sqrt{s} \geq 420$ МэВ,
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в диапазоне энергии $\sqrt{s} = 660 - 1380$ МэВ, включающем области рождения ρ , ω , ϕ и ω' мезонов, точность измерения

составила 3.5% при энергии $\sqrt{s} < 900$ МэВ, 4.5% при $900 \leq \sqrt{s} < 980$ МэВ, 5% при $980 \leq \sqrt{s} \leq 1060$ МэВ и 5.5% при $1060 < \sqrt{s}$ МэВ, $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ в области рождения ϕ -мезона ($\sqrt{s} = 1004 - 1060$ МэВ) с точностью 3%,

$e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ в области рождения ϕ -мезона ($\sqrt{s} = 1010 - 1060$ МэВ) с точностью 7%.

Точность измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ соответствует прецизионным мировым измерениям. Сечение $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ впервые измерено в широком диапазоне энергии $\sqrt{s} = 660 - 1380$ МэВ в одном эксперименте с точностью лучшей, чем в предыдущих экспериментах.

2. Проведён анализ полученных экспериментальных данных в рамках модели ДВМ, который показал, что измеренные сечения процессов $e^+e^- \rightarrow K\bar{K}$, $\pi^+\pi^-\pi^0$ и $\pi^+\pi^-$ описываются с учетом ρ, ω, ϕ -резонансов и их возбужденных состояний ρ', ω', \dots

3. Определены основные параметры лёгких векторных мезонов ρ, ω, ϕ – массы, полные и лептонные ширины, произведения вероятностей распадов по основным каналам на вероятность распада в e^+e^- :

$$m_\rho = 774.6 \pm 0.4 \pm 0.5 \text{ МэВ},$$

$$\Gamma_\rho = 146.1 \pm 0.8 \pm 1.5 \text{ МэВ},$$

$$B(\rho \rightarrow e^+e^-)B(\rho \rightarrow \pi^+\pi^-) = (4.876 \pm 0.023 \pm 0.064) \times 10^{-5},$$

$$m_\omega = 782.79 \pm 0.08 \pm 0.09 \text{ МэВ},$$

$$\Gamma_\omega = 8.68 \pm 0.04 \pm 0.15 \text{ МэВ},$$

$$B(\omega \rightarrow e^+e^-)B(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) = (6.74 \pm 0.04 \pm 0.24) \times 10^{-5},$$

$$B(\omega \rightarrow e^+e^-)B(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-) = (1.225 \pm 0.058 \pm 0.041) \times 10^{-6},$$

$$m_\phi = 1019.42 \pm 0.02 \pm 0.04 \text{ МэВ},$$

$$\Gamma_\phi = 4.21 \pm 0.03 \pm 0.02 \text{ МэВ},$$

$$B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow K^+K^-) = (13.93 \pm 0.14 \pm 0.99) \times 10^{-5},$$

$$B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow K_S K_L) = (10.27 \pm 0.07 \pm 0.34) \times 10^{-5},$$

$$B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) = (4.67 \pm 0.04 \pm 0.26) \times 10^{-5}.$$

Многие из этих результатов на момент опубликования имели наилучшую точность.

4. Измерены фазы интерференции между амплитудами ρ и ω мезонов в процессе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ и между амплитудами ω и ϕ мезонов в процессе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$:

$$\varphi_{\rho\omega} = 113.7 \pm 1.3 \pm 2.0 \text{ град},$$

$$\varphi_{\omega\phi} = 163 \pm 3 \pm 6 \text{ град}.$$

Значение фазы $\varphi_{\rho\omega}$ превышает величину, ожидаемую из $\rho - \omega$ смешивания. Значение фазы $\varphi_{\omega\phi}$ согласуется с предсказанием, основанным на $\phi - \omega$ смешивании за счёт общих каналов распада.

5. Измеренное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ предоставило чёт-

кие экспериментальные доказательства существования резонансной структуры в районе $\sqrt{s} = 1100 - 1400$ МэВ, которая отождествляется с резонансом ω' .

6. Проведён анализ сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, который указывает на существование запрещённого по G -чётности распада $\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Значения произведения вероятности распада $\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ на вероятность распада $\rho \rightarrow e^+e^-$ и фазы интерференции между ω и ρ мезонами в процессе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

$$B(\rho \rightarrow e^+e^-)B(\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) = (4.58 \pm_{1.64}^{2.46} \pm 1.56) \times 10^{-9},$$

$$\varphi_{\omega\rho} = -135 \pm_{13}^{17} \pm 9 \text{ град}$$
согласуются с теоретическими значениями, ожидаемыми из $\rho - \omega$ смешивания.
7. Проведен анализ спектров инвариантных масс пар пионов в процессе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в областях энергии $\sqrt{s} \simeq m_\phi$ и $\sqrt{s} = 1100 \div 1380$ МэВ. Показано, что в реакции доминирует промежуточное состояние $\rho\pi$. Измерены масса ρ^\pm , разность масс ρ^\pm и ρ^0 , ширины ρ^\pm и ρ^0 :
$$m_{\rho^\pm} = 774.5 \pm 0.7 \pm 1.5 \text{ МэВ},$$

$$m_{\rho^\pm} - m_{\rho^0} = -1.3 \pm 1.1 \pm 2.0 \text{ МэВ},$$

$$\Gamma_{\rho^0} = 151.1 \pm 2.6 \pm 3.0 \text{ МэВ},$$

$$\Gamma_{\rho^\pm} = 149.9 \pm 2.3 \pm 2.0 \text{ МэВ}.$$
В области энергии $\sqrt{s} = 1100 - 1380$ МэВ впервые наблюдался вклад в процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ промежуточного состояния $\omega\pi^0$ за счёт распада $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-$. Впервые измерена относительная фаза между амплитудами процессов $e^+e^- \rightarrow \rho\pi$ и $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$.
8. Измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ в области энергии $\sqrt{s} = 1040 - 1400$ МэВ с точностью 1.8%. Впервые измерено значение константы электромагнитного взаимодействия $\alpha(s)$ во времениподобной области при энергии $\sqrt{s} = 1040 - 1400$ МэВ
$$\langle 1/\alpha \rangle = 134.1 \pm 0.5 \pm 1.2.$$
9. Впервые проведён поиск распада $\phi \rightarrow e\mu$ с нарушением аромата заряженных лептонов. Установлен верхний предел на относительную вероятность распада
$$B(\phi \rightarrow e\mu) < 2 \times 10^{-6} \text{ CL}=90\%$$
и верхний предел на сечение процесса $e^+e^- \rightarrow e\mu$ при энергии $\sqrt{s} \simeq 1020$ МэВ
$$\sigma_{e\mu} < 8 \text{ пб CL}=90\%.$$
10. Калориметр детектора СНД был подготовлен к экспериментам на новом коллайдере ВЭПП-2000. Выполнено первое измерение светимости ВЭПП-2000, которое продемонстрировало верность концепции круглых пучков, применённой для многократного увеличения светимости коллайдера.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. M.N. Achasov, V.M. Aulchenko, S.E. Baru et. al. Spherical neutral detector for VEPP-2M collider. // Nucl. Instr. and Meth. – 2000. – Vol.449A, – P.125-139.
2. M.N. Achasov, K.I. Beloborodov, A.V. Berdyugin et. al. Study of the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ in the energy region $400 < \sqrt{s} < 1000$ MeV. // ЖЭТФ. – 2005. – Т.128, вып.6. – С.1201-1219.
3. M.N. Achasov, K.I. Beloborodov, A.V. Berdyugin et. al. Update of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ cross section measured by SND detector in the energy region $400 < \sqrt{s} < 1000$ MeV. // ЖЭТФ. – 2006. – Т.130, вып.3. – С.437-441.
4. M.N. Achasov, K.I. Beloborodov, A.V. Berdyugin et. al. Measurements of the parameters of the $\phi(1020)$ resonance through studies of the processes $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$, $K_S K_L$, and $\pi^+\pi^-\pi^0$. // Phys. Rev. – 2001. – Vol.63D. – 072002.
5. M.N. Achasov, V.M. Aulchenko, K.I. Beloborodov et. al. Study of the $\pi\pi$ mass spectra in the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ at $\sqrt{s} \simeq 1020$ MeV. // Phys. Rev. – 2002. – Vol.65D. – 032002.
6. M.N. Achasov, V.M. Aulchenko, K.I. Beloborodov et. al. Study of the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ in the energy region \sqrt{s} from 0.98 GeV to 1.38 GeV. // Phys. Rev. – 2002. – Vol.66D. – 032001.
7. M.N. Achasov, K.I. Beloborodov, A.V. Berdyugin et. al. Study of the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ in the energy region \sqrt{s} below 0.98 GeV. // Phys. Rev. – 2003. – Vol.68D. – 052006.
8. M.N. Achasov, V.M. Aulchenko, K.I. Beloborodov et. al. Study of the process $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ in the energy region $\sqrt{s} = 980, 1040-1380$ MeV. // Phys. Rev. – 2009. – Vol.79D, №11. – P.112012.
9. M.N. Achasov, K.I. Beloborodov, A.V. Bergyugin, et. al. Search for lepton flavor violation process $e^+e^- \rightarrow e\mu$ in the energy region $\sqrt{s} = 984 - 1060$ MeV and $\phi \rightarrow e\mu$ decay, Phys.Rev.–2010.Vol.81D №5.– P.057102
10. M.N. Achasov, A.D. Bukin, D.A. Bukin et. al. Energy calibration of the NaI(Tl) calorimeter of the SND detector using cosmic muons. // Nucl. Instr. and Meth. – 1997. – Vol.A401. – P.179-186.
11. M.N. Achasov, D.A. Bukin, T.V. Dimova et. al. Energy calibration of the NaI(Tl) calorimeter of the SND detector using $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ events. // Nucl. Instr. and Meth. – 1998. – Vol.A411. – P.337-342.

12. S.I. Serednyakov, M.N. Achasov, K.I. Beloborodov et. al. New results on $e^+e^- \rightarrow$ hadrons exclusive cross sections from experiments with SND detector at VEPP-2M e^+e^- collider in the energy range $\sqrt{s} = 0.4 - 1.4$ GeV. // Proc. of the Intern. European Conference on High Energy Physics, Lisboa, Portugal, July 21-27, 2005. – PoS HEP2005. – 2006. – P.284-287.
13. M.N. Achasov, V.M. Aulchenko, S.E. Baru et. al. Detector SND for VEPP-2M. // Proc. of the Intern. workshop on e^+e^- collisions from ϕ to J/ψ , Novosibirsk, Russia, March 1-5, 1999. – Новосибирск, 2000. – С.193-195.
14. M.N. Achasov, V.M. Aulchenko, S.E. Baru et. al. The process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ above ϕ at VEPP-2M from SND. Results of preliminary study. // Proc. of the Intern. workshop on e^+e^- collisions from ϕ to J/ψ , Novosibirsk, Russia, March 1-5, 1999. – Новосибирск, 2000. – С.87-90.
15. M.N. Achasov, V.M. Aulchenko, K.I. Beloborodov et. al. Resent results from SND experiment at the VEPP-2M e^+e^- collider. // Proc. of the Workshop for hadron spectroscopy, Frascaty, Italy, March 8-13, 1999. Frascaty physics series. – 1999. – Vol.XV. – P.489-497.
16. M.N. Achasov, V.M. Aulchenko, K.I. Beloborodov et. al. New data from SND detector in Novosibirsk. // Proc. of the 8th Intern. conference on hadron spectroscopy, Beijing, China, August 24-28, 1999. Nucl. Phys. Proc. Suppl. – 2000. – Vol.675A. – P.391-397.
17. M.N. Achasov, K.I. Beloborodov, A.V. Berdyugin et. al. Review of experimental results from SND detector at VEPP-2M. // Proc. of the III Intern. workshop on physics and detectors for DAΦNE, Frascaty, Italy, November 16-19, 1999. Frascaty physics series. – 1999. – Vol.XVI. – P.523-532.
18. M.N. Achasov, V.M. Aulchenko, K.I. Beloborodov et. al. Review of experimental results from SND detector. // Proc. of the IX Intern. Conference on Hadron Spectroskopy, Protvino, Russia, August 25 - September 1, 2001. AIP Conf. Proc. – 2002. – Vol.619. – P.30-39.
19. M.N. Achasov, K.I. Beloborodov, A.V. Berdyugin et. al. Experimental study of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ reaction by SND detector in the energy range $\sqrt{s} = 0.42 - 1.38$ -GeV. // Proc. of the X Intern. Conference on Hadron Spectroskopy, Aschaffenburg, Germany, August 31 - September 6, 2003. AIP Conf.Proc. – 2004. – Vol.717. – P.60-64.
20. M.N. Achasov, R.R. Akhmetshin, V.M. Aulchenko, et. al. Recent results of the study of hadronic production with the CMD-2 and SND detectors at the VEPP-2M collider. // Proc. of the Intern. Europhysics conference

- on high-energy physics, Aachen, Germany, July 17-23, 2003. Eur. Phys. J. – 2004. – Vol.33C. – P.583-585.
21. Ачасов М.Н. Измерение сечений процессов e^+e^- аннигиляции в адроны на коллайдере ВЭПП-2М. // Юбилейная научная сессия- конференция секции ЯФ ОФН РАН ‘Физика фундаментальных взаимодействий’, посвященная 60 летию ИТЭФ, Москва, 5-9 декабря, 2005. Я.Ф. – 2007. – Т.70, №7. – С.1276-1288.
 22. M.N. Achasov, K.I. Beloborodov, A.V. Berdyugin et. al. Pion Form Factor at SND (new edition). // Proc. of the Intern. workshop on e^+e^- collisions from ϕ to Ψ , Novosibirsk, Russia, February 27 - March 2, 2006. – Nucl. Phys. Proc.Suppl. – 2006. – Vol.162. – P.11-12.
 23. Achasov M.N. CMD-2 and SND results on the ρ , ω and ϕ . // Proc. of the Int. workshop on e^+e^- collisions from ϕ to Ψ , Novosibirsk, Russia, February 27 - March 2, 2006. – Nucl. Phys. Proc.Suppl. – 2006. – Vol.162. – P.114-121.
 24. M.N. Achasov, D.E. Berkaev, A.G. Bogdanchikov et. al. First experience with SND calorimeter at VEPP-2000 collider. // Proc. of the 10th Intern. Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics, Novosibirsk, February 28 - March 5, 2008. – Nucl. Instr. and Meth. – 2009. – Vol.598, №1. – P.31-32.
 25. M.N. Achasov. Search for lepton flavor violation in e^+e^- interactions. // Proc. of Intern. workshop on e^+e^- collisions from Phi to Psi, Novosibirsk, September 2011. Nucl. Phys. (Proc. Suppl). – 2012. – Vol.225-227. – P.241-243.

АЧАСОВ Михаил Николаевич

**Изучение лёгких векторных мезонов
в процессах рождения адронов
в e^+e^- аннигиляции**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Подписано в печать 23.09.2013 г.

Сдано в набор 27.09.2013 г.

Формат бумаги 100×90 1/16 Объем 1.8 печ.л., 1.5 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 22

Обработано на РС и отпечатано на

ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.