

На правах рукописи

ХАРЛАМОВ Алексей Георгиевич

**ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$
В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИИ НИЖЕ 1 ГЭВ
С ДЕТЕКТОРОМ СНД**

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

АВТОРЕФЕРАТ

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

НОВОСИБИРСК – 2010

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

СЕРЕДНЯКОВ – доктор физико-математических наук,
Сергей Иванович профессор, Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

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

ФЕДОТОВИЧ – доктор физико-математических наук,
Геннадий Васильевич Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ – Научно-исследовательский институт
ОРГАНИЗАЦИЯ: ядерной физики Томского политехнического университета, г. Томск.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2010 г.
в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.02
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения 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 Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан «_____» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

В. С. Фадин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Предсказания Стандартной модели для аномального магнитного момента мюона ограничиваются сегодня точностью вычисления вклада поляризации вакуума адронами в пропагатор фотона. Поляризацию вакуума адронами условно разделяют на «низкоэнергетическую» и «высокоэнергетическую» часть. «Высокоэнергетическую» часть вычисляют с помощью пертурбативных методов квантовой хромодинамики, и эти вычисления хорошо согласуются с экспериментом. К «низкоэнергетической» части обычно относят диапазон энергии до 2 ГэВ и в данной области поляризацию вакуума адронами вычисляют с помощью дисперсионных соотношений, интегрируя экспериментально измеренные зависимости сечения аннигиляции в адроны от энергии. В Институте ядерной физики им. Будкера с 1974 года проводились эксперименты на e^+e^- коллайдере ВЭПП-2М в области энергии 0.36 – 1.4 ГэВ, в том числе, изучалось рождение адронов в e^+e^- аннигиляции.

На данный момент имеется расхождение предсказаний Стандартной модели для аномального магнитного момента мюона с прямым измерением на уровне достоверности в три стандартных отклонения, что является указанием на существование Новой физики. Для проверки значимости расхождения и определения параметров моделей Новой физики требуется улучшить точность расчета аномального магнитного момента в Стандартной модели или улучшить точность прямого измерения.

Интерес к процессу электрон-позитронной аннигиляции в четыре π -мезона связан с тем, что в диапазоне энергии до 2 ГэВ его сечение является значительным и вносит вклад в поляризацию вакуума адронами, что позволяет более точно вычислить аномальный магнитный момент мюона и проверить гипотезу сохранения векторного тока, сравнивая спектральную функцию распадов τ -лептона с данными электрон позитронной аннигиляции.

В настоящее время на месте ВЭПП-2М построен новый коллайдер – ВЭПП-2000, который обладает рядом преимуществ по сравнению с ВЭПП-2М: расширен диапазон доступной энергии до 2 ГэВ, светимость возросла на порядок. Это позволит увеличить чувствительность к редким процессам более, чем на порядок, и производить измерения в области энергии 1.4 – ГэВ. В связи с изменением конструкции места встречи, для детектора СНД была создана новая трековая система.

Вторая половина работы посвящена созданию трековой системы для экспериментов на ВЭПП-2000. Трековая система используется для измерения углов вылета ϕ , θ заряженных частиц и определения координат точки вылета, а также позволяет идентифицировать фотоны по отсутствию треков. Чувствительность детектора к процессам, содержащим заряженные частицы в конечном состоянии и, в частности, к процессу $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ зависит от

точности измерения параметров заряженных частиц и от точности моделирования этих параметров. Трековая система является необходимым элементом для изучения e^+e^- аннигиляции в адроны на ВЭПП-2000 с детектором СНД.

Цель работы состояла в разработке методики выделения событий процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ в области энергии до 1 ГэВ, измерении сечения этого процесса, разделении механизмов реакции, аппроксимации сечения и измерении вероятностей распадов $\rho, \omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ или установке верхних пределов на данные вероятности. Целью было также создать трековую систему (ТС) СНД для экспериментов на ВЭПП-2000, описать геометрию ТС в системе GEANT, разработать моделирование физических процессов, происходящих при прохождении заряженных частиц через ТС, разработать процедуру калибровки ТС.

Научная новизна работы. В области энергии до 920 МэВ сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ измерено впервые, определена вероятность распада $\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ и на два порядка улучшен верхний предел на вероятность распада $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, в области энергии 920 – 1000 МэВ сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ измерено с лучшей в мире точностью. Произведено разделение механизмов промежуточных состояний $a_1\pi$ и $\omega\pi^0$ реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ и измерено пороговое поведение для механизма $\omega\pi^0$.

Научная и практическая ценность работы. Разработанная в работе процедура выделения событий процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ может быть применена в будущем для анализа этого процесса на ВЭПП-2000 при более высокой энергии. Подобная методика также может быть использована для выделения событий процессов содержащих в конечном состоянии два или три π^0 на детекторах КЕДР, КМД-3, BESIII, а также в экспериментах на В-фабриках.

Результаты, полученные в данной работе, будут способствовать проверке существующих феноменологических моделей взаимодействия адронов при энергии до 2 ГэВ и созданию новых моделей.

Трековая система используется для экспериментов с детектором СНД на ВЭПП-2000, которые, несомненно, приведут к новым фундаментальным результатам. Разработанные в данной работе алгоритмы моделирования и калибровки трековой системы можно будет применить для улучшения дрейфовых камер детекторов КЕДР, КМД-3, BESIII.

Автор выносит на защиту следующие результаты проделанной работы:

1. В эксперименте с детектором СНД измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ в области энергии $2E < 1$ ГэВ, причем в области энергии $2E < 920$ МэВ сечение измерено впервые.

2. Измерена вероятность (Br) распада $\rho \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$: $\text{Br}(\rho \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0) = (1.60 \pm 0.74 \pm 0.18) \times 10^{-5}$, установлен верхний предел на вероятность распада $\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$ $\text{Br}(\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0) < 2 \times 10^{-4}$ на уровне достоверности 90%.
3. Создана новая трековая система детектора СНД. Создана калибровка дрейфовой камеры и программа ее моделирования.

Апробация диссертации. Материалы диссертации докладывались на Сессии отделения ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» в 2008 г. (Москва), на Международной конференции «From ϕ to ψ » в 2009 г. (Пекин), на Международной конференции «Quarks in Hadrons and Nuclei» в 2007 г. (Эриче, Италия), на других конференциях и семинарах ИЯФ, и опубликованы в научных журналах и препринтах ИЯФ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Вклад автора. Изложенные в работе результаты получены автором лично или при его определяющем вкладе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан краткий обзор экспериментов, изучающих рождение адронов на встречных e^+e^- пучках при низких энергиях. Рассмотрен вклад поляризации вакуума адронами в аномальный магнитный момент мюона и, в частности, роль процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$. Проанализированы результаты предыдущих измерений электрон-позитронной аннигиляции в 4π мезона. Сформулированы основные цели работы.

Первая глава посвящена ускорительному комплексу ВЭПП-2М. Приводится схема ускорительного комплекса ВЭПП-2М, описаны режимы его работы, основные параметры, существенные для проведения экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках.

Во второй главе описан детектор СНД. Подробно рассмотрены системы детектора: калориметр, система дрейфовых камер, мюонная система. Приводится описание экспериментов, проведенных с детектором СНД с 1995 по 2000 годы.

Сферический нейтральный детектор (СНД) – универсальный немагнитный детектор, ориентирован на регистрацию процессов с участием нескольких фотонов. До появления детектора СНД изучение чисто нейтральных реакций в области энергии ~ 1 ГэВ ограничивалось возможностями детекторов. По сравнению с предыдущими установками СНД обладает хорошей гранулированностью, большим телесным углом, высоким энергетическим разрешением и способностью обрабатывать большие потоки информации, что позволяет проводить эксперименты на новом, качественно более высоком уровне и получать нетривиальные физические результаты.

После остановки ВЭПП-2М детектор СНД был существенно модернизирован для проведения экспериментов на ВЭПП-2000.

Внутри берриллиевой вакуумной камеры радиусом 2 см и толщиной 1 мм сталкиваются пучки электронов и позитронов. Вакуумная камера окружена трековой системой, предназначенной для измерения точки вылета и направления заряженных частиц. Она состоит из двух дрейфовых камер и сцинтилляционного счетчика между ними. Полный телесный угол трековой системы составляет 98% от 4π.

Вокруг трековой системы располагается сферический трехслойный калориметр на основе кристаллов NaI(Tl). Полная толщина калориметра составляет 13,4 X₀ (34,7 см), телесный угол 90% от 4π. Калориметр измеряет энергии и углы вылета фотонов, обеспечивая высокую чувствительность к нейтральным процессам.

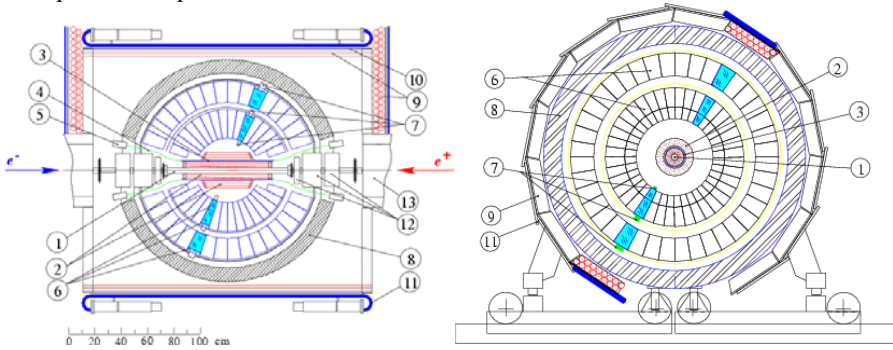


Рис. 1. Детектор СНД. 1 – вакуумная камера, 2 – дрейфовые камеры, 3 – сцинтилляционные счетчики, 4 – световоды из оптоволокна, 5 – ФЭУ, 6 – кристаллы NaI(Tl), 7 – фототриоды, 8 – поглотитель (Fe), 9 – стримерные трубки, 10 – поглотитель, 11 – сцинтилляционные счетчики, 12 – фокусирующие линзы ВЭПП-2М, 13 – поворотный магнит.

Снаружи калориметра расположен железный поглотитель толщиной 12 см, а за ним находится мюонная система, состоящая из двух слоев стримерных трубок и сцинтилляционных счетчиков, разделенных железным фильтром толщиной 1 см. Эта система обеспечивает подавление космического фона и позволяет идентифицировать мюоны, рождающиеся в e^+e^- столкновениях. Железный фильтр между трубками и счетчиками подавляет остатки электромагнитных ливней, выходящих из калориметра. Вероятность одновременного срабатывания трубок и счетчиков от фотонов с энергией 700 МэВ составляет менее 1%. Общий вид детектора показан на рис. 1.

Третья глава посвящена изучению процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области энергии $2E < 1$ ГэВ. В анализе использовались данные двух экспериментов: ОМЕ98 и ОМЕ00, набранные в 1998 и 2000 годах соответственно. Интегральная светимость в эксперименте ОМЕ98 составила 3697 нб^{-1} , в

эксперименте ОМЕ00 – 5880 нб⁻¹. Интегральная светимость измерялась двумя независимыми способами: по событиям электрон-позитронного рассеяния и аннигиляции в два фотона. Систематическая неопределенность светимости определялась как разность этих двух измерений и составила ~2%.

Для анализа отбирались события в следующих условиях:

- 2 или более заряженных частицы;
- 4 или более реконструированных фотона;
- расстояние от оси пучков до вершины события в R - ϕ плоскости < 1 см;
- $|Z| < 10$ см, где Z – координата вершины события вдоль оси пучков.

Основным фоном является процес $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ с наложением фотонов пучкового фона и фотонов, образующихся при сильном взаимодействии π -мезонов с веществом детектора, а также фотонов, испущенных из начального и конечного состояний.

Для отобранных в указанных условиях событий проводилась процедура кинематической реконструкции в гипотезах:

$$\begin{aligned} e^+e^- &\rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0, \\ e^+e^- &\rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0, \\ e^+e^- &\rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\gamma. \end{aligned}$$

Для реконструкции выбирались фотоны, удовлетворяющие следующим условиям:

- минимальная энергия фотона $E_\gamma > 20$ МэВ;
- полярный угол фотонов $30^\circ < \theta_\gamma < 150^\circ$.

Для формирования π^0 -мезонов перебирались все возможные комбинации фотонов в событии и выбиралась комбинация с минимальным значением χ^2 -реконструкции.

Далее накладывались дополнительные условия отбора:

$$\begin{aligned} \chi^2_{4\pi} &< 40, \\ \chi^2_{3\pi} &> 20. \end{aligned}$$

Для окончательного определения числа событий использовались следующие параметры: χ^2 -реконструкции в гипотезе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\gamma$; массы двух π^0 -мезонов, составленные из 4х фотонов, взятых в реконструкцию состояния $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$; масса отдачи фотона в модели состояния $\pi^+\pi^-\pi^0\gamma$; наименьшая энергия и наименьший угол фотонов, взятых в реконструкцию $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$. Из этих переменных был построен дискриминатор H-Matrix.

Этот дискриминатор определяется следующим образом: для каждого события вычисляется величина

$$H(i) = \frac{\chi^2_B(i) - \chi^2_S(i)}{\chi^2_B(i) + \chi^2_S(i)},$$

где $\chi^2_{S/B}(i)$ – χ^2 в гипотезе «сигнал» «фон» для i -того события.

На рисунках 2–3 изображены распределения по параметрам, включенным в дискриминатор H-Matrix, и их сравнение с моделированием для области энергии 800 – 1000 МэВ. Видно хорошее согласие моделирования и эксперимента.

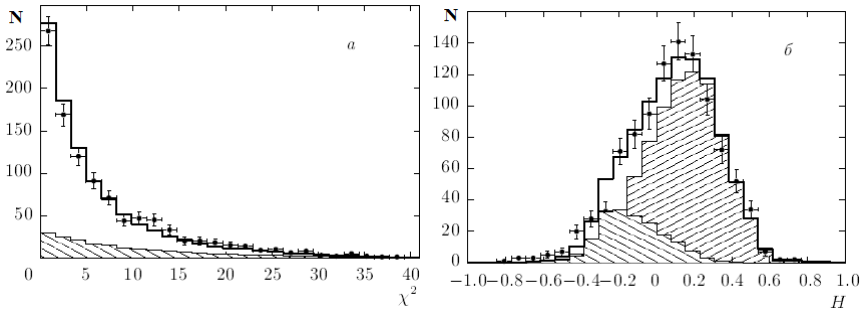


Рис. 2. Распределения по параметрам: $\chi^2(\pi^+\pi^-4\gamma)$ (а) и H-Matrix (б). Точки с ошибками – экспериментальное распределение, заштрихованные гистограммы – события моделирования фона $\pi^+\pi^-\pi^0$ (\\), события моделирования $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ (///), линия – сумма всех вкладов. События отобраны в диапазоне 800–1000 МэВ.

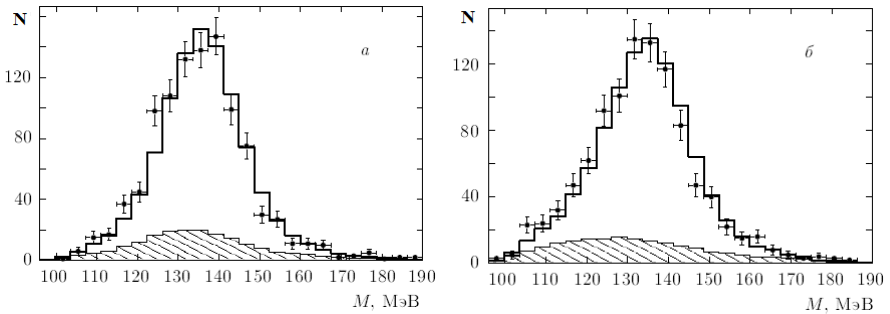


Рис. 3. Распределение по инвариантной массе π^0 -мезонов после реконструкции в модели $\pi^+\pi^-4\gamma$ наиболее энергичного (а), наименее энергичного (б). Точки с ошибками – экспериментальное распределение, заштрихованная гистограмма события моделирования фона $\pi^+\pi^-\pi^0$, линия – сумма всех вкладов. События отобраны в диапазоне 800–1000 МэВ.

Дискриминатор применялся для разделения событий процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Тренировка дискриминатора осуществлялась на событиях моделирования указанных процессов. Число событий процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ в каждой точке определялось аппроксимацией распределения по параметру H-Matrix суммой распределений фона и сигнала (рис. 4). Форма распределений фонов и сигнала фиксировалась по моделированию с помощью метода Kernel Estimation, подробное описание этой техники дано в

диссертации. Аппроксимация проводилась методом «небинированной» функции максимального правдоподобия. В функцию правдоподобия был также включен член $N_{\text{exp}} - N_{\text{obs}} \log(N_{\text{exp}})$, учитывающий флуктуации числа наблюдаемых событий согласно распределению Пуассона.

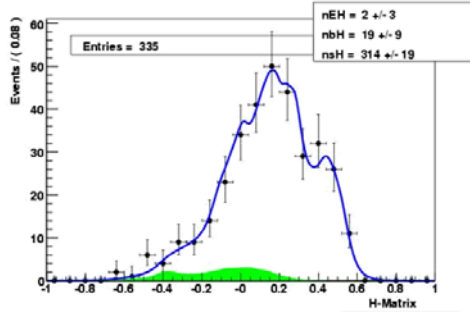


Рис. 4. Распределение по параметру H-Matrix. Точки с ошибками – экспериментальные данные, заштрихованная гистограмма – события моделирования фона $\pi^+\pi^-\pi^0$, линия – аппроксимирующая кривая. Энергия в с.ц.м. 970 МэВ. nsH – число событий сигнала, nbH – число событий фона $\pi^+\pi^-\pi^0$, nEH – число событий фона $\eta\gamma$.

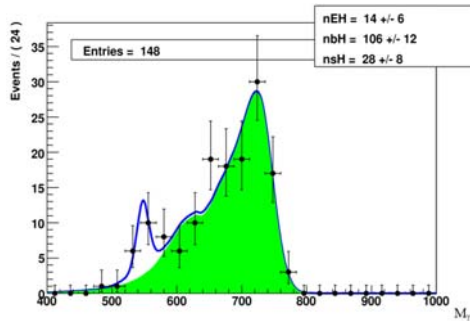


Рис. 5. Распределение по параметру M_γ – масса отдачи фотона в реконструкции $\eta\gamma$. Точки с ошибками – экспериментальные данные, заштрихованная гистограмма – сумма событий моделирования фона $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и сигнала $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\gamma$, линия – аппроксимирующая кривая. Энергия в с.ц.м. 784 МэВ.

Для вычитания событий процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ использовалось распределение по массе отдачи фотона, не включенного в π^0 при реконструкции состояния $\pi^+\pi^-\pi^0\gamma$. События такого фона группируются в районе массы η -мезона (см. рис. 5).

Таким образом производилась аппроксимация 2-мерного распределения по параметрам H-Matrix и M_γ суммой 3-х распределений: сигнала $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ и двух фонов – $\pi^+\pi^-\pi^0\gamma$ и $\eta\gamma$.

В области энергии $2E > 880$ МэВ предполагалось наличие двух механизмов реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ с промежуточными состояниями $\omega\pi^0$ и $a_1\pi$. Для выделения событий механизма $\omega\pi^0$ использовалось распределение по массе системы $\pi^+\pi^-\pi^0$ в реконструкции состояния $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, наиболее близкой к массе ω -мезона (рис. 6).

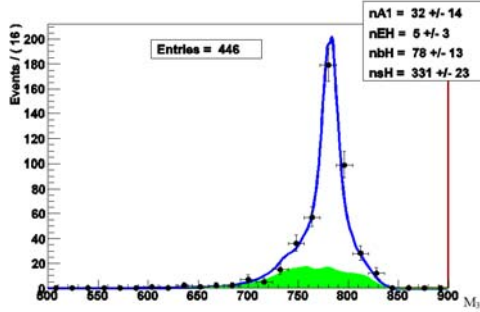


Рис. 6. Распределение по параметру $M_{3\pi}$ – массе системы 3-х π -мезонов в реконструкции состояния $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, наиболее близкой к массе ω -мезона. Точки с ошибками – экспериментальные данные, заштрихованная гистограмма – сумма событий моделирования фона $\pi^+\pi^-\pi^0$ и сигнала $a_1\pi$, линия – аппроксимирующая кривая. Энергия в с.ц.м. 950 МэВ. nsH – число событий сигнала механизма $\omega\pi^0$, nbH – число событий фона $\pi^+\pi^-\pi^0$, nEH – число событий фона $\eta\gamma$, nA1 – число событий эффекта $a_1\pi$.

В области энергии $2E > 880$ МэВ производилась аппроксимация 3-мерного распределения по параметрам H-Matrix, M_γ , $M_{3\pi}$ суммой четырех распределений: двух сигналов – механизмы $\omega\pi^0$ и $a_1\pi$ и двух фонов: $\pi^+\pi^-\pi^0\gamma$ и $\eta\gamma$.

Эффективность регистрации определялась методом Монте-Карло. При определении эффективности регистрации учитывались радиационные поправки. Для вычисления радиационных поправок были использованы сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, ранее измеренные СНД. Среднее значение эффективности регистрации для канала $a_1\pi$ – 33.5 ± 0.4 %, для канала $\omega\pi^0$ – 32.5 ± 1.4 .

Обратим внимание на высокую эффективность регистрации процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0 \sim 34\%$; примененная методика разделения сигнал/фон позволила пользоваться очень мягкими условиями отбора. Геометрическая эффективность к данному процессу составляет ~ 43 %.

Видимое сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ в каждой точке по энергии в системе центра масс E определялось по формуле:

$$\sigma_{vis}(E) = \frac{N_{4\pi}(E)}{IL(E) \cdot \varepsilon(E)},$$

где $N_{4\pi}$ – число событий искомого процесса, $IL(E)$ – интегральная светимость в данной точке, ε – эффективность регистрации.

Видимое сечение аппроксимировалось теоретически ожидаемым сечением:

$$\sigma_{th}(E) = \int_0^{X_{max}} F(x, E) \cdot \sigma_{born}(\sqrt{1-x} \cdot E) dx,$$

где $\sigma_{born}(E)$ – борновское сечение. $F(x, E)$ описывает вероятность потери доли энергии x на излучение фотонов из начального состояния. После этого радиационная поправка рассчитывалась по формуле:

$$\delta(E) = \sigma_{th}(E) / \sigma_{born}(E) - 1.$$

Борновское сечение в области $E > 880$ МэВ для механизма $\omega\pi^0$ параметризовалось в рамках модели векторной доминантности с учетом ρ -мезона и 2-х его возбуждений.

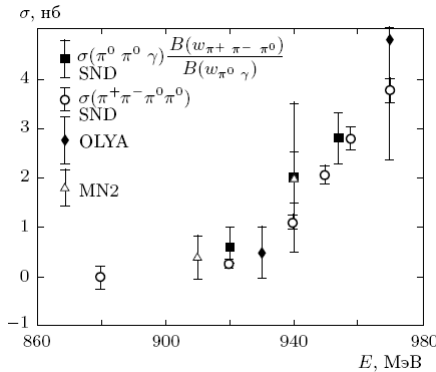


Рис. 7. Борновское сечение реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, кружки – данная работа, треугольники – данные MN2, ромбики – данные OLYA, квадратики – сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\gamma$, умноженное на отношение соответствующих вероятностей распада.

При аппроксимации свободными параметрами были A_0 , A_ρ , $A_{\rho'}$ – амплитуда в максимуме соответствующего ρ -мезона.

Сравнение борновского сечения с предыдущими экспериментами приведено на рисунке 7. Видно, что сечение согласуется с предыдущими измерениями, но имеет лучшую точность. Сечение в канале $\omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ находится в согласии с сечением в канале $\omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$.

В области $2E < 880$ МэВ сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ было измерено впервые (рис. 8). В этой области было проверено три модели сечения: не интерферирующие ρ и ω -резонансы, интерферирующие резонансы и наличие интерферирующего и не интерферирующего вкладов.

Для определения вероятности распада $\rho \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$ была выбрана первая модель. Свободными параметрами являлись сечения в максимуме резонансов σ_ρ , σ_ω , для них получены следующие значения: $\sigma_\rho = (1.84 \pm 0.85) \cdot 10^{-2}$ нб, $\sigma_\omega = (1.83 \pm 0.34) \cdot 10^{-1}$ нб при $\chi^2 = 28.1/38$. Это соответствует вероятностям распада $\text{Br}(\rho \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0) = (1.60 \pm 0.74) \cdot 10^{-5}$, $\text{Br}(\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0) = (1.06 \pm 0.20) \cdot 10^{-4}$. В данной модели предполагалось, что весь вклад ω -мезона связан с фоном и был установлен верхний предел на вероятность распада $\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$: $\text{Br}(\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0) < 2 \cdot 10^{-4}$ на уровне достоверности 90%.

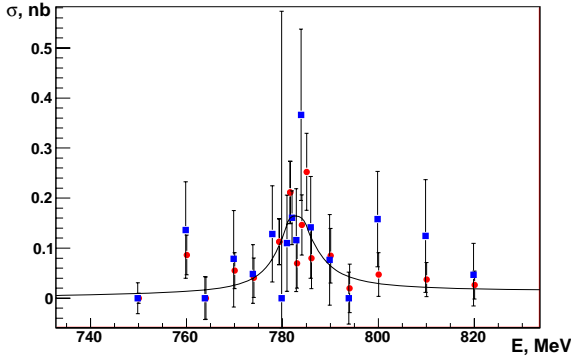


Рис. 8. Видимое сечение реакции $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$ в области ω -мезона, кружки – результаты эксперимента OME00, квадратики – OME98.

Радиационная поправка к сечению вычислялась согласно первой модели, причем сечение ω -резонанса считалось фоновым и не участвовало в вычислении радиационной поправки. При этом разность величины радиационной поправки для моделей с интерференцией и без интерференции может достигать 11%, что является основной систематической неопределенностью в диапазоне $2E < 880$ МэВ.

Для оценки систематических ошибок, связанных с условиями отбора и вычитанием фона, мы последовательно «отбрасывали» по одному условию отбора и проводили процедуру разделения сигнал/фон заново. Измеренная таким образом систематическая неопределенность составила 1.9%. К ней следует также добавить систематические неопределенности, связанные с измерением светимости ~2% и вычислением радиационной поправки ~1%. Итоговую систематическую неопределенность в диапазоне 920 – 980 МэВ мы оцениваем в 3%. В диапазоне $2E < 880$ МэВ суммарная систематическая неопределенность составила 11.5%

Точность измерения сечения процесса $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$ в области энергии $2E < 880$ МэВ ограничивается имеющейся статистикой, поэтому следует сосредоточиться на получении новых данных. Существенный прогресс в изучении процесса $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$ может быть достигнут на коллайдере

ВЭПП-2000, где ожидается несколько тысяч таких событий вместо нескольких десятков, имеющих сегодня, т.к. планируемая светимость данной установки на порядок превышает светимость ВЭПП-2М.

Четвертая и пятая главы посвящены подготовке детектора СНД к эксперименту на ВЭПП-2000. В четвертой главе описывается моделирование, а в пятой калибровка дрейфовой камеры СНД.

Целью работы, описанной в четвертой главе, является воспроизведение импульса тока, возникающего на сигнальных элементах дрейфовой камеры при пролете заряженной частицы.

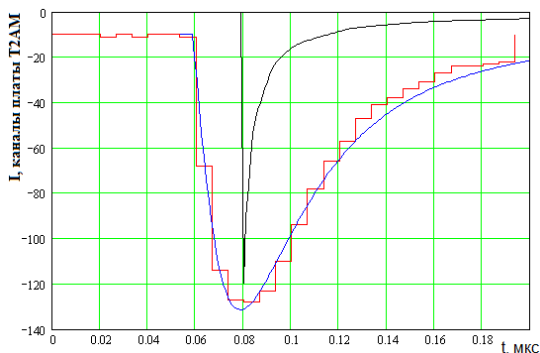


Рис. 9. Импульс тока возникающий в дрейфовой камере при регистрации фотона от изотопа Fe^{55} . Линия в центре – импульс тока без учета функции отклика электроники, сдвинутый от начала сигнала. Гистограмма – экспериментальный сигнал в каналах платы T2AM. Линия – импульс тока, полученный сверткой с функцией отклика электроники.

В моделировании учтены следующие эффекты: флуктуации ионизации вдоль трека, диффузию ионизации при дрейфе, поглощение ионизации на примесях, флуктуации газового усиления и насыщение газового усиления.

Проверка моделирования осуществлялась в экспериментах с прототипом трековой системы СНД, где проводилось тестовое включение новых плат T2AM. Платы T2AM записывают цифровую осциллограмму сигнала с дискретностью 25 нс. В качестве источника ионизации использовался изотоп Fe^{55} с энергией фотонов 5.9 КэВ. Такие фотоны образуют в газе всего один кластер, поэтому возникающий сигнал удобно сравнивать с одноэлектронными импульсами, получаемыми в моделировании (рис. 9).

Проверка моделирования также осуществлялась по событиям электрон-позитронного рассеяния, записанным в эксперименте с ВЭПП-2000 в апреле 2009 года. На рисунке 10 показано сравнение распределения ионизационных потерь в 7-м слое трековой системы с моделированием. Наблюдается хорошее согласие эксперимента с моделированием.

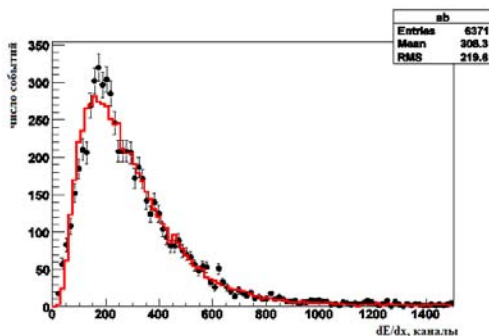


Рис. 10. Распределение ионизационных потерь dE/dx в седьмом слое трековой системы, события упругого электрон-позитронного рассеяния. Точки – экспериментальные данные, гистограмма – моделирование.

В пятой главе описан алгоритм калибровки дрейфовой камеры. Для восстановления параметров трека в R - ϕ плоскости производится измерение координат трека вдоль направления дрейфа ионизации. Координата определяется по времени дрейфа ионизации в ячейке, которое измеряется относительно сигнала триггера детектора (связанного с фазой обращения пучков в ускорителе).

Поправки к линейной зависимости расстояния от времени дрейфа легче всего определить по событиям $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$. Загрузка треками такого процесса постоянна в зависимости от угла ϕ , и если проинтегрировать временной спектр таких событий, то получится зависимость расстояния от времени дрейфа, из которой можно определить искомую поправку.

Разрешение дрейфовой камеры измерялось по событиям $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ в первом эксперименте с детектором СНД на ВЭПП-2000 (рис. 11). Эксперимент проходил в апреле 2009 г, было произведено сканирование ϕ -мезона в 5 точках. Были протестированы: трековая система, система черенковских аэрогелевых счетчиков, калориметр и мюонная система. События со всех систем считывались системой сбора данных и записывались на жесткие диски. В результате эксперимента была измерена зависимость удельной светимости от токов ВЭПП-2000 и установлено, что концепция круглых пучков верна. Максимальная светимость составила $8 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Средние токи электронов и позитронов в ВЭПП-2000 были $\sim 10 \times 10 \text{ нА}$, средняя светимость составила $2.5 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Всего был набран интеграл светимости около 300 нб^{-1} .

Разработанная в данной работе калибровка зависимости расстояния от времени дрейфа позволяет получить проектные параметры дрейфовой камеры.

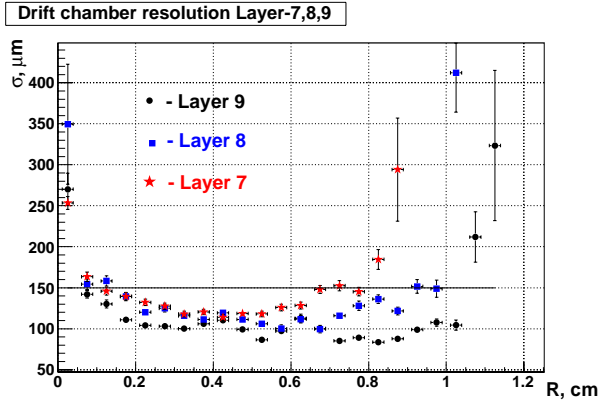


Рис. 11. Зависимость пространственного разрешения от расстояния до сигнальной проволоки, линией отмечено проектное разрешение 150 мкм.

В заключении приведены основные результаты, полученные в данной работе:

- В эксперименте с детектором СНД измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ в области энергии $2E < 1$ ГэВ, причем в области энергии $2E < 920$ МэВ сечение измерено впервые. При энергии 920 МэВ наблюдается порог реакции $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ и выше порога данный промежуточный механизм доминирует в сечении процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$. Сечение с вкладом данного механизма растет и при энергии 1 ГэВ составляет около 4 нб. В области $920 < 2E < 980$ МэВ наше измерение имеет наилучшую сегодня точность и согласуется с предыдущими измерениями.
- Разделены механизмы промежуточных состояний реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$. Выделен механизм промежуточного состояния $\omega\pi^0$. Сечение за вычетом механизма $\omega\pi^0$ определяется в основном промежуточным состоянием $a_1\pi$. Наши измерения не противоречат модели $a_1\pi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$.
- Измерена вероятность распада $\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$: $\text{Br}(\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0) = (1.60 \pm 0.74 \pm 0.18) \times 10^{-5}$, что соответствует ширине $\Gamma = 2.49 \pm 1.15 \pm 0.28$ КэВ. Верхний предел на вероятность распада $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ был улучшен на 2 порядка по сравнению с предыдущими измерениями и составил $\text{Br}(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0) < 2 \times 10^{-4}$ на уровне достоверности 90%, что соответствует $\Gamma(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0) < 1.7$ КэВ.
- При непосредственном участии автора была создана новая трековая система детектора СНД. В 2009 году трековая система СНД была установлена в вакуумной промежуточной камере ускорителя и показала устойчивую работу. В настоящее время детектор СНД работает в непрерывном режиме и набирает статистику. Автором была разработана калибровка трековой системы по космическим событиям и событиям упругого

электрон-позитронного рассеяния. Разрешение дрейфовой камеры, измеренное по событиям процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ составило 150 мкм, а в минимуме ~ 80 мкм, что согласуется с проектными параметрами. Автором так же была разработана программа моделирования отклика дрейфовой камеры, учитывающая флуктуации ионизации, диффузию ионизации при дрейфе в электрическом поле, флуктуации газового усиления и другие эффекты, влияющие на разрешение.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Г.Н. Абрамов, В.М. Аульченко, М.Н. Ачасов, ..., А.Г. Харламов и др. Статус работ по модернизации детектора СНД. // Препринт ИЯФ 2004-046, Новосибирск, ИЯФ, 2004.
2. Г.Н. Абрамов, В.В. Анашин, В.М. Аульченко, ..., А.Г. Харламов и др. СНД - статус модернизации и анализа данных. // Препринт ИЯФ 2005-35. Новосибирск, ИЯФ, 2004 г.
3. А.Г. Харламов. Моделирование отклика дрейфовой камеры СНД. - Всероссийская научная конференция студентов физиков-12 (ВНКСФ-12) Новосибирск, НГУ, март 2006 г. С.376 - 377.
4. V.M. Aulchenko, A.G. Bogdanchikov, A.A. Botov, ..., A.G. Kharlamov, et al. Spherical Neutral Detector tracking system for experiments at VEPP-2000 e^+e^- collider, NIM A , 581 (2007) 115-118.
5. Г.Н. Абрамов, П.М. Астигеевич, В.М. Аульченко, ..., А.Г. Харламов и др. Детектор СНД: модернизация систем для экспериментов на ВЭПП-2000 и некоторые предварительные результаты экспериментов на ВЭПП-2М. // Препринт ИЯФ 2007-20, Новосибирск, ИЯФ, 2007 г.
6. V.M. Aulchenko, A.G. Bogdanchikov, A.A. Botov, ..., A.G. Kharlamov, et al. SND tracking detector - tests with cosmic muons. // Nucl. Instr. Meth. A, 598 (2009) 102-104.
7. K.I. Beloborodov, A.V. Berdyugin, V.B. Golubev, ..., A.G. Kharlamov, et al. SND: New results and opportunities. // Progress in Particle and Nuclear Physics, 61 (2008) 325-327.
8. М.Н. Ачасов, К.И. Белобородов, А.В. Бердюгин, ..., А.Г. Харламов, и др. Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области энергии $\sqrt{s} < 1$ ГэВ с детектором СНД, ЖЭТФ, том 136 выпуск 3 (9) (2009) 442-457.

ХАРЛАМОВ Алексей Георгиевич

**Измерение сечения процесса
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$
в области энергии ниже 1 ГэВ
с детектором СНД**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор .13.04. 2010 г.

Подписано в печать 14.04. 2010 г.

Формат 60х90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 14

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11