

На правах рукописи

КАРДАПОЛЬЦЕВ Леонид Васильевич

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА

$e^+ e^- \rightarrow \omega \pi^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИИ

ОТ 1.05 ДО 2.00 ГэВ

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

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата 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 РУКОВОДИТЕЛЬ:

ДРУЖИНИН – доктор физико-математических наук,
Владимир Прокопьевич Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

СОЛОДОВ – доктор физико-математических наук,
Евгений Петрович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, главный научный сотрудник.

АРБУЗОВ – доктор физико-математических наук,
Андрей Борисович Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл., заместитель директора лаборатории.

ВЕДУЩАЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение «ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики», г. Москва.

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 работы

С 2010 года в ИЯФ СО РАН начались эксперименты на e^+e^- коллайдере ВЭПП-2000, имеющем максимальную энергию в системе центра масс 2 ГэВ.

Важными направлениями исследований на ВЭПП-2000 являются измерение сечения e^+e^- аннигиляции в адроны и изучение возбужденных состояний векторных мезонов, рождающихся в диапазоне энергии 1 – 2 ГэВ. Изучение процесса

$$e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma \quad (1)$$

на данных с ВЭПП-2000, которому посвящена данная работа, представляется очень актуальным для этих направлений исследований.

Процесс $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ — один из доминирующих процессов e^+e^- аннигиляции в адроны в области энергии в системе центра масс $E = 1 - 2$ ГэВ. Поскольку при энергии около 1.5 ГэВ главный вклад в его сечение дает распад $\rho(1450)$ -мезона на $\omega\pi^0$, он является ключевым для определения параметров резонанса $\rho(1450)$.

Кроме того, в диапазоне энергии $E = 1.4 - 2.0$ ГэВ сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ не было измерено. Его прецизионное измерение поможет улучшить точность вычисления адронного вклада в поляризацию вакуума в диапазоне энергии 1.4 – 2.0 ГэВ. Этот вклад необходимо учитывать при расчете аномального магнитного момента мюона a_μ и значения бегущей константы электромагнитного взаимодействия на массе Z -бозона.

Данные по сечению процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ могут быть использованы для проверки гипотезы о сохранении векторного тока. Эта теоретическая идея впервые была сформулирована Y. S. Tsai в 1971 году и затем подтверждена H. V. Thacker и J. J. Sakurai. Гипотеза позволяет связать спектральную функцию $\nu_1(q^2)$ распада τ лептона $\tau \rightarrow h^\pm\nu_\tau$ с сечением $e^+e^- \rightarrow h^0$, где h^\pm — система адронов с квадратом инвариантной массы q^2 , имеющая с квантовые числа $I^G = 1^+$ и $J^{PC} = 1^{--}$.

При помощи данных, набранных с детектором СНД, планируется провести поиск электрических дипольных распадов векторных мезонов $\rho(1450)$ и $\rho(1700)$. Их изучение важно для понимания кварковой структуры этих резонансов. Измерение ширин радиационных переходов является очень чувствительным способом исследования

кварковой структуры. Так, для пары $q\bar{q}$ в состоянии $2S$ доминирующими каналами распада являются $f_2(1270)\gamma$ и $f_1(1285)\gamma$, а для состояния $1D$ — $f_1(1285)\gamma$ и $f_0(1350)\gamma$. Поиск электрических дипольных переходов в состояния $f_2(1270)$ и $f_0(1350)$ удобно вести в конечном состоянии $\pi^0\pi^0\gamma$. Главным фоновым процессом для этих переходов является процесс $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$. Таким образом, прецизионное измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ является первым шагом в изучении электрических дипольных распадов $\rho(1450)$ и $\rho(1700)$.

Методическая часть работы посвящена разработке генератора первичных событий методом Монте-Карло для процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$, $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$, $e^+e^- \rightarrow \omega\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$, $e^+e^- \rightarrow \phi\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$. При обработке экспериментальных данных для измерения сечений и исследования фоновых условий требуется моделирование всех возможных процессов e^+e^- аннигиляции, происходящих в исследуемом интервале энергии. В области энергии выше 1.2 ГэВ, где рождаются возбужденные состояния векторных мезонов ρ , ω и ϕ , число возможных адронных конечных состояний исчисляется десятками. Динамика большинства этих процессов исследована слабо. Для некоторых процессов экспериментальная информация отсутствует вообще. В связи с этим и возникла необходимость разработать генератор событий, позволяющий легко менять физическую модель процесса, а также добавлять новые процессы.

Цель работы состояла в разработке методики выделения событий процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ и измерении сечения этого процесса в области энергии 1.05 – 2.00 ГэВ. Целью работы также была разработка генератора первичных событий методом Монте-Карло для наиболее существенных в области ВЭПП-2000 процессов e^+e^- аннигиляции в конечные адронные состояния.

Личный вклад автора

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

Научная новизна работы

В эксперименте с детектором СНД на ВЭПП-2000 измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ в области энергии в системе центра масс от 1.05 ГэВ до 2.00 ГэВ. При энергии ниже 1.4 ГэВ полученные данные

хорошо согласуются предыдущими измерениями на детекторах СНД и КМД-2. В области энергии выше 1.4 ГэВ наши данные являются наиболее точным измерением сечения $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ и первым измерением этого сечения в конечном состоянии $\pi^0\pi^0\gamma$.

Научная и практическая ценность работы

- Полученные данные по сечению $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ используются для определения параметров резонансов $\rho(1450)$ и $\rho(1700)$.
- Так как в диапазоне энергии $E=1.4-2.0$ ГэВ сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ было известно с плохой точностью, полученные новые данные позволят улучшить точность вычисления адронного вклада в поляризацию вакуума.
- Данные по сечению процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ используются для проверки гипотезы о сохранении векторного тока.
- Процесс $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ является основным фоновым процессом для ряда редких радиационных процессов, например, $\rho(1450, 1700) \rightarrow f_2(1270)\gamma$. Прецизионное измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ является первым шагом в изучении этих процессов.
- Разработанный генератор первичных событий активно используется при обработке данных, накопленных детектором СНД на ВЭПП-2000.

На защиту выносятся следующие положения:

- В эксперименте с детектором СНД на ВЭПП-2000 измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ в области энергии в системе центра масс от 1.05 ГэВ до 2.00 ГэВ.
- По измеренному сечению был вычислен переходной формфактор $\gamma^* \rightarrow \omega\pi^0$.
- С использованием гипотезы сохранения векторного тока было проведено сравнение наших данных по сечению процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ с данными по распаду $\tau^- \rightarrow \omega\pi^-\nu_\tau$.
- Разработан генератор первичных событий методом Монте-Карло для наиболее существенных в области ВЭПП-2000 процессов e^+e^- аннигиляции в адронные конечные состояния.

Апробация диссертации

Материалы диссертации докладывались на Международном симпозиуме MesonNet (Краков, Польша) в 2012 г., на Экспериментальном семинаре ИЯФ и опубликованы в научных журналах и препринтах ИЯФ.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем работы 100 страниц. Диссертация содержит 36 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 61 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследования, описана цель работы и возможные области применения результатов. Также дан краткий обзор предыдущих экспериментов.

Первая глава посвящена описанию экспериментальной установки, на которой было измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$. В этой главе описано устройство ускорительного комплекса ВЭПП-2000 и детектора СНД, приведены основные параметры коллайдера и характеристики различных систем детектора.

СНД является универсальным немагнитным детектором, предназначенным для экспериментов на e^+e^- коллайдере ВЭПП-2000. Общий вид детектора приведен на рис. 1. Пучки электронов и позитронов сталкиваются внутри вакуумной камеры диаметром 40 мм, сделанной из бериллия. Вакуумная камера окружена трековой системой, состоящей из девятислойной дрейфовой камеры и пропорциональной камеры, расположенных в общем газовом объеме. Телесный угол, перекрываемый трековой системой, составляет 94% от 4π .

Вокруг трековой системы располагается система пороговых аэрогелевых черенковских счетчиков, которая предназначена для выделения К-мезонов.

Основной частью детектора СНД является трехслойный электромагнитный калориметр, состоящий из 1630 кристаллов NaI(Tl). Полная толщина калориметра для частиц, летящих из центра, составляет 34.7 см или 13.4 радиационных длин. Полный телесный угол калориметра составляет 90% от 4π . Калориметр позволяет измерять энергии и углы вылета

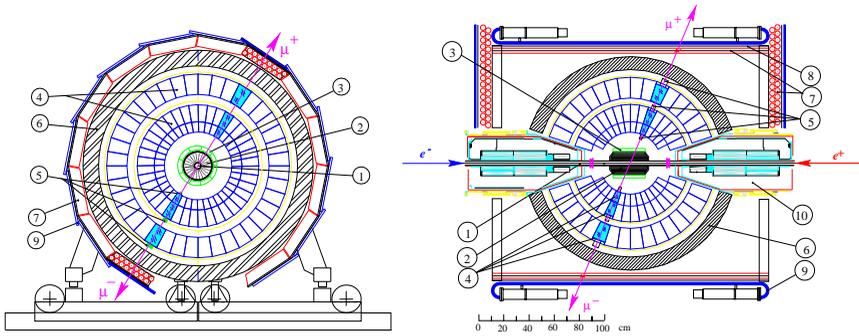


Рис. 1. Схема детектора СЧД (сечение вдоль оси пучков): 1 – вакуумная камера, 2 – трековая система, 3 – аэрогелевые черенковские счетчики, 4 – кристаллы NaI(Tl), 5 – вакуумные фототриоды, 6 – поглотитель, 7 – пропорциональные трубки, 8 – железный фильтр, 9 – сцинтилляционные счетчики, 10 – фокусирующие соленоиды ВЭПП-2000.

фотонов, энергии электронов и обеспечивает высокую чувствительность детектора к событиям с нейтральными частицами в конечном состоянии.

Снаружи калориметра находится железный поглотитель толщиной 12 см, за которым следует мюонная система, состоящая из двух слоев пропорциональных трубок, железного фильтра толщиной 1 см и пластиковых сцинтилляционных счетчиков. Она предназначена для идентификации мюонов при энергии больше 450 МэВ и подавления фона от космических частиц.

Вторая глава посвящена генератору первичных событий методом Монте-Карло для наиболее существенных в области ВЭПП-2000 процессов e^+e^- аннигиляции в адронные конечные состояния.

При обработке экспериментальных данных для измерения сечений и исследования фоновых условий требуется моделирование всех возможных процессов e^+e^- аннигиляции, происходящих в исследуемом интервале энергии. В области энергии выше 1.2 ГэВ, где рождаются возбужденные состояния векторных мезонов ρ , ω и ϕ , число возможных адронных конечных состояний исчисляется десятками. Динамика большинства этих процессов исследована слабо. Для некоторых процессов экспериментальная информация отсутствует вообще. Поэтому для моделирования процессов e^+e^- аннигиляции в этой области хотелось бы иметь генератор событий, позволяющий легко менять физическую модель процесса, а также добавлять новые процессы.

Такой подход был реализован в генераторах EVA и PNOKHARA, предназначенных для моделирования рождения адронов в процессах радиационным возвратом $e^+e^- \rightarrow X\gamma$, в которых фотон излучается начальным позитроном или электроном. В генераторе PNOKHARA лептонная ($e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma^*$) и адронная ($\gamma^* \rightarrow hadrons$) части матричного элемента описываются в виде соответствующих тензоров, свертка которых осуществляется внутри программы. Такой подход удобен потому, что адронный тензор выглядит, как правило, гораздо проще, чем его свертка с лептонным тензором. Это существенно упрощает программирование, позволяет легко модифицировать физическую модель процесса, легко добавлять новые процессы.

В данной работе подход, разработанный для генератора PNOKHARA, был применен к моделированию процессов e^+e^- -аннигиляции в адроны. В настоящее время в программу моделирования включены процессы рождения следующих конечных состояний: $\pi^+\pi^-$, $\pi^+\pi^-\pi^0$, $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, $\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$, $\pi^0\pi^0\gamma$ и $\pi^+\pi^-\pi^0\eta$. При написании программы особое внимание уделялось прозрачности кода для описания физической модели и возможности легко ее модифицировать.

Третья глава посвящена анализу процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ в области энергии 1.05–2.0 ГэВ. В анализе использовались данные, набранные с детектором СНД на ВЭПП-2000 в 2010 и 2011 годах.

Для нормировки (определения светимости) в данной работе использован процесс $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$, который, так же как и изучаемый процесс, не содержит заряженных частиц в конечном состоянии. Условия отбора событий процесса $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ были выбраны так, чтобы в результате нормировки сокращались систематические неопределенности за счет наложений на события фоновых заряженных треков и за счет неточностей моделирования триггера. Измеренная таким образом интегральная светимость составила 24.6 пб^{-1} . Систематическая погрешность измерения светимости составила 2%.

Для выделения событий изучаемого процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ были использованы следующие условия отбора:

- найдены пять или более фотонов и ни одной заряженной частицы;
- число сработавших проволочек в дрейфовой камере меньше либо равно пяти;
- $\chi_{5\gamma}^2 < 30$ для $E < 1.7$ ГэВ и $\chi_{5\gamma}^2 < 15$ для $E \geq 1.7$ ГэВ;
- $\chi_{\pi^0\pi^0\gamma}^2 - \chi_{5\gamma}^2 < 10$;

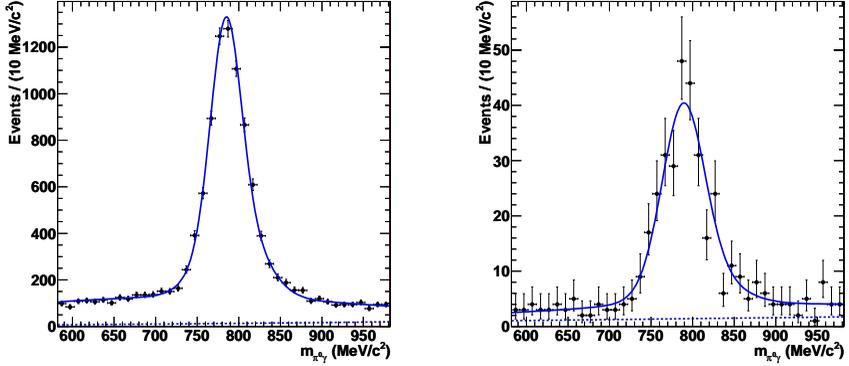


Рис. 2. Распределение по инвариантной массе $m_{\pi^0\gamma}$ для отобранных экспериментальных событий (точки с ошибками). Слева показано распределение для событий с $E < 1.7$ ГэВ, справа для событий с $E \geq 1.7$ ГэВ. Кривая – результат аппроксимации, описанной в тексте. Пунктирная линия показывает вклад фона.

- инвариантная масса хотя бы одной из двух комбинаций $\pi^0\gamma$ удовлетворяет условию $|m_{\pi^0\gamma} - m_\omega| < 200$ МэВ, где m_ω – табличное значение массы ω -мезона.

Здесь $\chi_{5\gamma}^2$ и $\chi_{\pi^0\pi^0\gamma}^2$ – значения функции χ^2 , полученные в результате процедуры кинематической реконструкции событий, которая проверяет совместимость кинематики зарегистрированного события с кинематикой процессов $e^+e^- \rightarrow 5\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ соответственно.

После применения описанных выше условий было отобрано 7899 событий с $E < 1.7$ ГэВ и 331 событие с $E \geq 1.7$ ГэВ. На рис. 2 показаны распределения по инвариантной массе системы $\pi^0\gamma$, полученные для этих интервалов по энергии. Пик от ω мезона хорошо виден в обоих распределениях. Так как при заполнении гистограммы использовались обе комбинации $\pi^0\gamma$ в событиях, нерезонансная часть распределения также определяется в основном событиями изучаемого процесса.

Источниками фона являются электродинамические процессы $e^+e^- \rightarrow 3\gamma, 4\gamma, 5\gamma$ и процессы с адронами $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\pi^0$. Кроме того возможен вклад от процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ с промежуточными состояниями отличными от $\omega\pi^0$. Наиболее важными среди них представляются $\rho^0\pi^0$, $f_2\gamma$ и $f_0\gamma$. Распределение по инвариантной массе для событий про-

цессов $K\bar{K}D$, $\eta\gamma$, $f_2\gamma$ и $f_0\gamma$ является плоским и с достаточной точностью может быть описано линейной функцией. Этот фон легко отделяется от сигнала при аппроксимации спектра масс $\pi^0\gamma$. Распределение по $m_{\pi^0\gamma}$ для событий процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\pi^0$ имеет более сложную форму и не описывается линейной функцией. Фон от этого процесса существенен в диапазоне энергии $E = 1.7 - 1.9$ ГэВ, где не превышает 6% от числа событий изучаемого процесса. Этот фон учитывался при аппроксимации спектра масс $\pi^0\gamma$ для точек с энергией $E \geq 1.7$ ГэВ.

Расчетное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \rho^0\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ пренебрежимо мало по сравнению с сечением изучаемого процесса. Несмотря на это вклад процесса $e^+e^- \rightarrow \rho\pi^0$ должен учитываться из-за его интерференции с изучаемым процессом, причем спектр масс для интерференционного члена практически не отличим от спектра масс для состояния $\omega\pi^0$. Поскольку фаза между амплитудами для конечных состояний $\rho\pi^0$ и $\omega\pi^0$ неизвестна, вычислялся максимальный сдвиг величины сечения $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ при добавлении промежуточного состояния $\rho\pi^0$, который был использован в качестве оценки систематической неопределенности из-за интерференции с промежуточным состоянием $\rho^0\pi^0$. Систематическая неопределенность составила не более 2% при $E < 1.6$ ГэВ, и 3.4–8.0% при $E \geq 1.6$ ГэВ.

Для того, чтобы определить число событий изучаемого процесса (N_s), распределение по инвариантной массе системы $\pi^0\gamma$ было аппроксимировано суммой распределений для сигнала и фона. Распределение для событий изучаемого процесса было получено при помощи непараметрической аппроксимации спектра масс для событий моделирования изучаемого процесса. Распределение для фона описывалось линейной функцией, к которой при энергии $E \geq 1.7$ ГэВ добавлялся расчетный фон от процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\pi^0$. Число событий изучаемого процесса и фона, полученное в результате аппроксимации, составляет 7533 ± 110 и 366 ± 70 при $E < 1.7$ и 282 ± 22 и 49 ± 15 при $E \geq 1.7$.

Эффективность регистрации событий изучаемого процесса определялась при помощи моделирования методом Монте-Карло. При моделировании учитывались радиационные поправки, в частности, излучение дополнительного фотона из начального состояния. Эффективность регистрации ϵ_r вычислялась как функция двух параметров: энергии в системе центра масс начальной e^+e^- пары и энергии дополнительного фотона E_r , излученного из начального состояния.

Видимое сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$, которое определяется как $\sigma_{vis} = N_s/L$, связано следующим образом с борновским сечением σ :

$$\sigma_{vis}(E) = \int_0^{x_{max}} \epsilon_r(E, xE_b) F(x, E) \sigma(E\sqrt{1-x}) dx, \quad (2)$$

где $F(x, E)$ — так называемая функция-радиатор, описывающая распределение по доле энергии $x = E_r/E_b$, излученной из начального состояния. Выражение (2) может быть переписано в традиционном виде

$$\sigma_{vis}(E) = \epsilon(E) \sigma(E) (1 + \delta(E)), \quad (3)$$

где $\delta(E)$ — это радиационная поправка, а параметр $\epsilon(E)$ определен следующим образом

$$\epsilon(E) \equiv \epsilon_r(E, 0). \quad (4)$$

В эксперименте непосредственно измеряется видимое сечение. Процедура определения борновского сечения выглядит следующим образом. При помощи формулы (2) аппроксимируется энергетическая зависимость измеренного видимого сечения. Для этого борновское сечение параметризуется теоретической моделью, хорошо описывающей экспериментальные данные. При помощи найденных в результате аппроксимации параметров теоретической модели вычисляется радиационная поправка $\delta(E)$. После этого по формуле (3) вычисляется экспериментальное борновское сечение.

Основные вклады в систематическую неопределенность борновского сечения и поправки к эффективности регистрации приведены в таблице 1. Ниже 1.6 ГэВ систематическая неопределенность не превышает 4.5%, выше 1.6 ГэВ она начинает сильно расти за счет модельной зависимости радиационных поправок.

Измеренное сечение, показанное на рис. 3, было аппроксимировано выражением, основанным на модели векторной доминантности с учетом возбужденных состояний ρ -мезона. Было установлено, что в рамках этой модели не удастся описать энергетическое поведение сечения вкладами только двух резонансов $\rho(770)$ и $\rho(1450)$. Вклад резонанса $\rho(1700)$ является необходимым. Из параметров, полученных в результате аппроксимации, были вычислены произведения относительных вероятностей распадов $\rho(1450)$ и $\rho(1700)$

Таблица 1. Источники систематической неопределенности борновского сечения и поправка к эффективности регистрации.

Источник	Вклад, %	Поправка, %
Светимость	2.2	—
Эффективность регистрации	0.7	−2.5
Конверсия фотонов в веществе	0.9	—
Пучковый фон	0.5	0.8
Интерференция с когерентным фоном ($E < 1.6$ ГэВ)	2 – 3.6	—
Радиационная поправка ($E < 1.6$ ГэВ)	1	—
Итого	3.4 – 4.5	−1.7

$$\begin{aligned}
 B(\rho' \rightarrow e^+e^-)B(\rho' \rightarrow \omega\pi^0) &= (5.3 \pm 0.4) \times 10^{-6}, \\
 B(\rho'' \rightarrow e^+e^-)B(\rho'' \rightarrow \omega\pi^0) &= (1.7 \pm 0.4) \times 10^{-6}.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

На рисунке 3 кроме сечения, полученного в этой работе, приведены результаты измерений на коллайдере ВЭПП-2М с детекторами СНД и КМД-2 и результаты эксперимента DM2, в котором сечение $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ измерялось в моде распада $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Наши данные хорошо согласуются с измерениями СНД и КМД-2, но существенно, на 20–30%, превышают данные DM2. Показанная кривая — это результат описанной выше совместной аппроксимации данных СНД, полученных в этой работе и в работе, основанной на данных с ВЭПП-2М.

Сечение изучаемого процесса может быть выражено через переходный формфактор вершины $\omega \rightarrow \pi^0\gamma^*$. Это дает возможность совместно анализировать данные, полученные в этой работе и данные с эксперимента NA60, полученные при изучении распада $\omega \rightarrow \pi^0\mu^+\mu^-$. Кроме того, представление данных в виде формфактора убирает сильную энергетическую зависимость фазового объема $P_f(E)$ конечного состояния $\omega\pi^0$, маскирующую резонансную структуру изучаемого процесса. Переходный формфактор связан с сечением процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ следующим образом:

$$\sigma_{\omega\pi^0}(E) = \frac{4\pi\alpha^2}{E^3} |F_{\omega\pi\gamma}(E^2)| P_f(E).
 \tag{6}$$

На рисунке 4 приведен квадрат нормированного переходного формфактора $(|F_{\omega\pi\gamma}(q^2)/F_{\omega\pi\gamma}(0)|)^2$, полученный из данных СНД по реакции

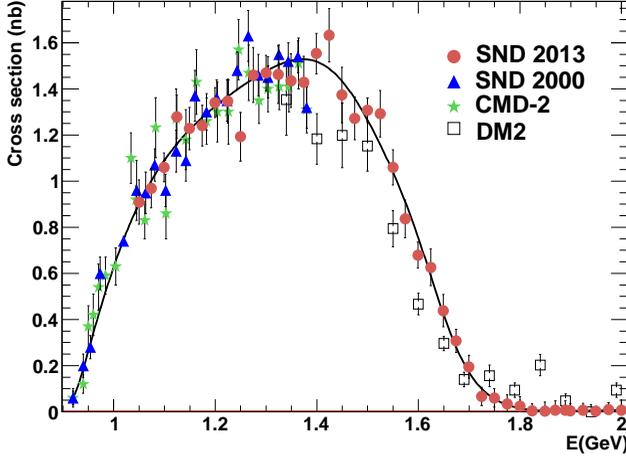


Рис. 3. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$. На рисунке представлены результаты СНД 2013(эта работа), СНД 2000 и КМД-2 – данные СНД и КМД-2, полученные на ВЭПП-2М, DM2 – данные с эксперимента DM2. Кривая – результат совместной аппроксимации данных СНД 2012 и СНД 2000.

$e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ и из данных по распаду $\omega \rightarrow \pi^0\mu^+\mu^-$. Кривая – это предсказания теоретической модели, использованной при аппроксимации сечения. Пунктирной линией показан вклад от резонанса $\rho(770)$. Как видно из рисунка, вклады от распадов возбужденных состояний ρ -мезона доминируют начиная уже с 1.2 ГэВ. Видно, что невозможно описать оба набора данных по формфактору в рамках модели, используемой нами для аппроксимации сечения.

Гипотеза о сохранении векторного тока позволяет установить связь между заряженным адронным током в распадах τ лептона и изовекторной частью электромагнитного тока. Это приводит к связи спектральной функции распада $\tau^- \rightarrow \omega\pi^-$ ($V_{\omega\pi}$) и сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$:

$$\sigma_{\omega\pi^0}(E) = \frac{4\pi^2\alpha^2}{q^2} V_{\omega\pi}(E). \quad (7)$$

Было проведено сравнение сечения $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$, измеренного детектором СНД, и данных, полученных из спектральной функции распада $\tau^- \rightarrow \omega\pi^-$, измеренной в эксперименте CLEO. Данные хорошо

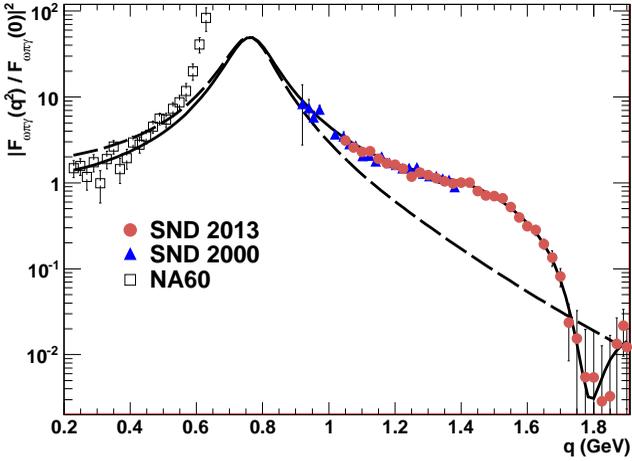


Рис. 4. Переходный формфактор для вершины $\omega \rightarrow \pi^0 \gamma^*$. Точки с ошибками – экспериментальные данные (СНД 2013 – эта работа, СНД 2000 – измерение, выполненное СНД на ВЭПП-2М, NA60 – данные эксперимента NA60). Кривая – результат совместной аппроксимации данных СНД 2013 и СНД 2000. Пунктирной линией показан вклад резонанса $\rho(770)$.

согласуются друг с другом: χ^2/ν (ν – число степеней свободы) сравнения данных CLEO и теоретической кривой, приведенной на рисунке 3, составил 19.7/16.

Для количественной проверки гипотезы сохранения векторного тока было проведено сравнение экспериментального значения относительной вероятности распада $\tau^- \rightarrow \omega \pi^- \nu_\tau$ с величиной, вычисленной согласно формуле:

$$\Gamma(\tau \rightarrow \omega \pi^-) = \frac{G_F^2 |V_{ud}|^2}{64\pi^4 \alpha^2 m_\tau^3} \int^{m_\tau} q^3 (m_\tau^2 - q^2)^2 (m_\tau^2 + 2q^2) \sigma_{\omega\pi^0}(q) dq, \quad (8)$$

где V_{ud} – это элемент матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскавы, m_τ – масса τ -лептона, а G_F – константа Ферми. Интегрируя методом трапеций данные СНД, полученные на ВЭПП-2М (при $E < 1.05$ ГэВ), и данные, полученные в этой работе, мы нашли следующее значение для произведения ширины распада $\tau^- \rightarrow \omega \pi^- \nu_\tau$ и относительной вероятности распада

$\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$

$$\Gamma(\tau^- \rightarrow \omega \pi^- \nu_\tau) B(\omega \rightarrow \pi^0 \gamma) = (3.68 \pm 0.04 \pm 0.13) \times 10^{-6} \text{ эВ}. \quad (9)$$

Используя табличные значения для времени жизни τ лептона и $B(\omega \rightarrow \pi^0 \gamma)$, можно вычислить относительную вероятность распада $\tau \rightarrow \omega \pi^-$:

$$B(\tau \rightarrow \omega \pi^-) = (1.96 \pm 0.02 \pm 0.10) \times 10^{-2}, \quad (10)$$

которая согласуется с табличным значением $B(\tau \rightarrow \omega \pi^-) = (1.95 \pm 0.08) \times 10^{-2}$. Можно сделать вывод, что гипотеза сохранения векторного тока для системы $\omega \pi$ является справедливой в пределах достигнутой на настоящий момент 5%-ой экспериментальной точности.

В заключении приведены основные результаты, полученные в данной работе:

- В эксперименте с детектором СНД на ВЭПП-2000 измерено сечение процесса $e^+ e^- \rightarrow \omega \pi^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ в области $E = 1.05\text{--}2.00$ ГэВ. Сечение имеет максимум при энергии $E = 1.4$ ГэВ, величина которого составляет около 1.5 нб. В диапазоне энергии 1.5–1.7 ГэВ наблюдается резкое падение сечения.

Проведено сравнение результатов данной работы с результатами предыдущих измерений. При энергии ниже 1.4 ГэВ полученные данные хорошо согласуются предыдущими измерениями СНД и КМД-2. Обнаружено значительное расхождение между данными, полученными в этой работе, и на детекторе DM2 в области энергии $E = 1.35\text{--}2.00$ ГэВ. Выше 1.4 ГэВ наши данные являются наиболее точным измерением сечения $e^+ e^- \rightarrow \omega \pi^0$ и первым измерением этого сечения в конечном состоянии $\pi^0 \pi^0 \gamma$.

- Измеренное сечение было аппроксимировано выражением, основанном на модели векторной доминантности с учетом возбужденных состояний ρ -мезона. Было установлено, что в рамках используемой модели не удастся описать энергетическое поведение сечения вкладом только двух резонансов $\rho(770)$ и $\rho(1450)$. Вклад третьего резонанса $\rho(1700)$ является необходимым. Из параметров, полученных в результате аппроксимации, были вычислены произведения относительных вероятностей распадов $\rho(1450)$ и $\rho(1700)$

$$\begin{aligned}
B(\rho' \rightarrow e^+e^-)B(\rho' \rightarrow \omega\pi^0) &= (5.3 \pm 0.4) \times 10^{-6}, \\
B(\rho'' \rightarrow e^+e^-)B(\rho'' \rightarrow \omega\pi^0) &= (1.7 \pm 0.4) \times 10^{-6}.
\end{aligned}
\tag{11}$$

- Из полученных данных по сечению $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ был вычислен переходный формфактор для вершины $\gamma^* \rightarrow \omega\pi^0$. Было установлено, что в рамках модели векторной доминантности не удается одновременно описать данные, полученные из e^+e^- аннигиляции и из распада $\omega \rightarrow \pi^0\mu^+\mu^-$.
- Была проведена проверка гипотезы сохранения векторного тока. Наш результат по сечению процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ сравнивался со спектральной функцией для распада $\tau^- \rightarrow \omega\pi^-\nu_\tau$, измеренной на детекторе CLEO. Данные хорошо согласуются друг с другом. Кроме того, при помощи выражения, основанного на гипотезе о сохранении векторного тока, из измеренного сечения была вычислена относительная вероятность распада $\tau \rightarrow \omega\pi^-\nu_\tau$

$$B(\tau \rightarrow \omega\pi^-\nu_\tau) = (1.96 \pm 0.02 \pm 0.10) \times 10^{-2}, \tag{12}$$

которая хорошо согласуется с табличным значением $(1.95 \pm 0.08) \times 10^{-2}$.

- Разработан генератор первичных событий для целого ряда процессов e^+e^- аннигиляции в адронные конечные состояния. Генератор встроен в программное обеспечение СНД и активно используется при обработке данных.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. M. N. Achasov, A. Yu. Barnyakov, K. I. Beloborodov, ..., L. V. Kardapoltsev, et al. Measurement of the cross section for the $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ process in the energy range of 1.1–1.9-GeV. // JETP Lett. – 2012 – Vol. 9 – Pp. 2-6.
2. M. N. Achasov, V. M. Aulchenko, A. Y. Barnyakov, ..., L. V. Kardapoltsev, et al. Study of $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ in the energy range 1.05–2.00 GeV with the SND detector. // arXiv:1303.5198[hep-ex], Phys. Rev. D. – 2013 – Vol. 88 – P.054013.

3. M. N. Achasov, K. I. Beloborodov, A. V. Berdyugin ..., L. V. Kardapoltsev, et al. Search for $e^+e^- \rightarrow f_0(600)\gamma$, $f_0(980)\gamma$, $f_0(1350)\gamma$, and $f_2(1270)\gamma$ processes in the energy range from 1.05-GeV to 1.38-GeV. // J. Exp. Theor. Phys. – 2011 – Vol. 113 – P. 75.
4. M. N. Achasov, V. M. Aulchenko, A. Y. Barnyakov ..., L. V. Kardapoltsev, et al. Recent results from SND experiment at VEPP-2000 collider. // EPJ Web Conf. – 2012 – Vol. 37, P. 09020.
5. П. М. Астигеевич, В. М. Аульченко, М. Н. Ачасов, ..., Л. В. Кардапольцев ..., и др. Начало экспериментов с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2000. // Препринт ИЯФ 2011-021, Новосибирск, 2011.
6. Е. Б. Абакумова, В. М. Аульченко, М. Н. Ачасов, ..., Л. В. Кардапольцев ..., и др. Статус экспериментов с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2000. // Препринт ИЯФ 2012-020, Новосибирск, 2012.

КАРДАПОЛЬЦЕВ Леонид Васильевич

Измерение сечения процесса
 $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$
в области энергии от 1.05 до 2.00 ГэВ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 14.10.2013 г.

Сдано в набор 15.10.2013 г.

Формат бумаги 100×90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 24

Обработано на РС и отпечатано на

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

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.