

*На правах рукописи*

**БЕЛОБОРОДОВ Константин Иванович**

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  И  
 $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  НА ДЕТЕКТОРЕ СНД**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**НОВОСИБИРСК — 2017**

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

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Дружинин Владимир Прокопьевич — доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Шестаков Георгий Николаевич — доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, ведущий научный сотрудник.

Хохлов Юрий Анатольевич — кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"», "Государственный научный центр Российской Федерации" Институт физики высоких энергий, г. Протвино, ведущий научный сотрудник.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: — ГНЦ РФ "Объединенный институт ядерных исследований", г. Дубна.

Защита диссертации состоится « 15 » июня 2017 г. в « 10 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАН

В. С. Фадин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Эксперименты на встречных электрон-позитронных пучках являются одним из главных методов получения новых данных в физике элементарных частиц. Важное место среди этих экспериментов занимают исследования при низких энергиях в области рождения резонансов  $\rho$ ,  $\omega$  и  $\phi$ , и их возбужденных состояний. Интерес к этой области связан с тем, что для ряда прецизионных вычислений в рамках Стандартной модели, например, аномального магнитного момента мюона  $(g - 2)_\mu$  и бегущей константы связи электромагнитных взаимодействий требуется знание полного сечения  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны. В области низких энергий, где в сечении  $e^+e^-$  аннигиляции доминируют резонансные вклады, даже феноменологическая параметризация полного адронного сечения является нерешенной задачей. Поэтому в расчетах используются экспериментальные данные. Следует отметить, что в настоящее время имеется заметное  $(3.3 - 3.6\sigma)$  отклонение измеренного значения  $(g - 2)_\mu$  от расчета по Стандартной модели. В ошибку этой разницы примерно одинаковый вклад вносят погрешности эксперимента и расчета. Причем последняя в значительной мере определяется неточностью измерения адронного сечения при низких энергиях.

Отдельный интерес представляют исследования эксклюзивных процессов  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны. Сечения данных процессов несут богатую информацию о промежуточных векторных мезонах и их возбужденных состояниях, а также о механизмах их распада.

Данная работа посвящена изучению процессов  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  и  $e^+e^- \rightarrow K^+ K^-$  при энергии в системе центра масс  $\sqrt{s}$  выше  $\phi$ -мезонного резонанса. Сечение аннигиляции в пару каонов в исследуемой области энергии составляет значительную часть полного адронного сечения: 50% при  $\sqrt{s} = 1.05$  ГэВ; 20% при  $\sqrt{s} = 1.15$  ГэВ; 12% при  $\sqrt{s} = 1.25$  ГэВ.

В амплитуды обоих процессов дают вклады как изоскалярные резонансы  $\omega(783)$ ,  $\phi(1020)$ ,  $\omega(1420)$ ,  $\omega(1650)$  и  $\phi(1680)$ , так и изовекторные  $\rho(770)$ ,  $\rho(1450)$  и  $\rho(1700)$ . Это приводит к сложной энергетической зависимости сечений и трудности их теоретического описания. Из измеренных сечений извлекаются квадраты модулей электромагнитных формфакторов нейтральных и заряженных каонов, которые являются разностью и суммой изоскалярного и изовекторного каонных формфакторов. Квадрат модуля изовекторного каонного формфактора с использованием гипотезы сохранения векторного тока и изоспиновой симметрии может быть извлечен из измерения спектральной адронной функции в распаде  $\tau^- \rightarrow K^- K^0 \nu_\tau$ . Таким образом, из совместного анализа данных по

сечениям процессов  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  и  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  и адронного спектра в распаде  $\tau^- \rightarrow K^- K^0 \nu_\tau$  могут быть получены экспериментальные значения модулей изоскалярного и изовекторного каонных формфакторов и фазы между ними, нужные, в частности, для построения моделей каонных формфакторов и их параметризации. Измерение спектральной адронной функции в распаде  $\tau^- \rightarrow K^- K^0 \nu_\tau$  с достаточно высокой точностью можно провести по уже имеющимся данным, накопленным в экспериментах BABAR и Belle.

**Цель работы** состояла в разработке методики выделения событий и измерения сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  и  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  в области энергий выше  $\phi$ -мезонного резонанса по данным, накопленным детектором SND на  $e^+e^-$  коллайдерах ВЭПП-2М и ВЭПП-2000, а также в создании метода измерения ядерной неупругой длины  $K_L$  в NaI.

**Личный вклад автора.** Приведенные результаты получены автором лично или при его определяющем вкладе.

**Научная новизна.** Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  измерено с точностью, не уступающей лучшим измерениям этого процесса, выполненным в экспериментах КМД-2 и BABAR.  $K_S$  мезон реконструировался по распаду  $K_S \rightarrow 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma$ . Поэтому источники систематических погрешностей в этом измерении и измерениях КМД-2 и BABAR, использующих моду  $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ , сильно различаются.

Измеренное сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  является на данный момент наиболее точным в области энергии от 1.05 до 2.0 ГэВ. Полученные данные согласуются с предыдущим измерением на детекторе BABAR.

Впервые измерена ядерная неупругая длина  $K_L$  в NaI в области импульсов от 0.11 до 0.48 ГэВ/с.

**Научная и практическая ценность работы.** Полученные данные по сечениям процессов  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  и  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  используются для вычисления полного сечения  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны, для построения феноменологической модели каонных электромагнитных формфакторов и получения параметров возбужденных состояний векторных мезонов, для проверки гипотезы сохранения векторного тока.

Полученные данные по измерению ядерной неупругой длины  $K_L$  в NaI используются для проверки и коррекции моделирования.

Разработанные методики выделения процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  и измерения ядерной неупругой длины  $K_L$  в NaI будут применены при анализе данных SND, накопленных на ВЭПП-2000.

Разработана методика выделения процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ , использу-

ющая информацию с аэрогелевых черенковских счетчиков. Она обеспечивает высокую эффективность выделения заряженных каонов с малой систематической неопределенностью и будет использована при анализе других процессов с заряженными каонами в эксперименте СНД.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- Измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  в диапазоне энергий в системе центра масс от 1.04 до 1.38 ГэВ.
- Измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+ K^-$  в диапазоне энергий в системе центра масс от 1.05 до 2.00 ГэВ.
- Измерение длины ядерного неупругого взаимодействия  $K_L$  мезона с NaI(Tl) в диапазоне импульсов от 0.11 до 0.48 ГэВ/с.

**Апробация работы.** Результаты диссертации докладывались на международных конференциях: International workshop on e+e- collisions from Phi to Psi (Новосибирск, Россия, 1999), International workshop on e+e- collisions from Phi to Psi (Фраскати, Италия, 2008), 10th International workshop on e+e- collisions from Phi to Psi (Хейфей, Китай, 2015), на экспериментальных семинарах ИЯФ СО РАН.

Основные результаты опубликованы в статьях 1–3, входящих в список ВАК по направлению «Физика».

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения. Объем диссертации составляет 112 страниц, включая 21 рисунок и 7 таблиц. Список литературы содержит 46 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность работы, формулируется ее цель, дается краткий обзор предыдущих экспериментов.

**В первой главе** описываются  $e^+e^-$  коллайдеры ВЭПП-2М и ВЭПП-2000 и их характеристики.

**Во второй главе** дано описание детектора СНД. Во время экспериментов на ВЭПП-2М (1995-2000) детектор состоял из трековой системы, электромагнитного калориметра и мюонной системы. Цилиндрическая трековая система, окружающая вакуумную камеру, состояла из двух пятислойных дрейфовых камер с расположенным между ними цилиндрическим сцинтилляционным счетчиком. Треки реконструировались в телесном угле 98% от  $4\pi$ .

В анализе процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  с распадом  $K_S \rightarrow 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma$  основную роль играет электромагнитный калориметр. Он состоит из 1632 кристаллов на основе NaI(Tl), объединенных в три концентрических сферических слоя. Полная толщина калориметра составляет 13.4 радиационных длин, его телесный угол — 95% от  $4\pi$ . Зависимости энергетического и углового разрешений от энергии фотона описываются следующими формулами:  $\sigma_{E_\gamma}/E_\gamma(\%) = 4.2\%/^4 \sqrt{E_\gamma(\text{ГэВ})}$  и  $\sigma_{\phi, \theta} = 0.82^\circ/\sqrt{E_\gamma(\text{ГэВ})} \oplus 0.63^\circ$ . Непосредственно за калориметром располагаются железный поглотитель толщиной 12 см и мюонная система, состоящая из двух слоев стримерных трубок, железного фильтра толщиной 1 см и сцинтилляционных счетчиков толщиной 1 см.

Для экспериментов на ВЭПП-2000 детектор СЧД был модернизирован. Трековая система была заменена на новую, состоящую из 12-слойной дрейфовой камеры и однослойной пропорциональной. Была добавлена система идентификации заряженных частиц на основе пороговых аэрогелевых черенковских счетчиков (АСС). Эта система играет важную роль в выделении событий процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ . Она состоит из 9 счетчиков, которые образуют цилиндр, расположенный непосредственно за трековой системой. Толщина аэрогеля составляет около 30 мм. Счетчики покрывают область полярных углов  $50^\circ < \theta < 132^\circ$ . Вывод черенковского света осуществляется с помощью спектросмещающих пластин, расположенных внутри аэрогелевого радиатора. При анализе данных вычисляются координаты входа частицы в АСС. Информация о срабатывании счетчиков используется только при попадании частицы в «рабочую область» АСС, из которой исключены области щелей между счетчиками и области спектросмещающих пластин. Рабочая область составляет 81% от площади АСС. Имеется два варианта АСС с показателями преломления  $n = 1.05$  и  $1.13$ . При энергиях выше порога рождения каонов используются счетчики с показателем преломления  $1.13$ , и каоны идентифицируются требованием отсутствия сигнала АСС.

Измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  основано на данных с интегральной светимостью  $9.1 \text{ пб}^{-1}$ , накопленных в экспериментах на коллайдере ВЭПП-2М в 1997 и 1999 годах в диапазоне энергий 1.04-1.38 ГэВ. При измерении неупругой ядерной длины  $K_L$  мезона дополнительно использовалась статистика эксперимента 1998 года, набранная в пике  $\phi$ -мезонного резонанса. В анализе процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  использованы данные с интегральной светимостью  $34.6 \text{ пб}^{-1}$ , накопленные в 2011 и 2012 годах в эксперименте на коллайдере ВЭПП-2000 в диапазоне энергий 1.05 – 2.00 ГэВ.

**Третья глава** посвящена анализу процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  в области энергии 1.04–1.38 ГэВ. Основная особенность анализа этого процесса — это невозможность надежной реконструкции  $K_L$  мезона. Из-за большого времени жизни и относительно большой ядерной длины  $K_L$  мезон приблизительно в 30% случаев не дает сигнала в детекторе. При распаде или ядерном взаимодействии внутри калориметра детектора он порождает конфигурации сработавших кристаллов, которые реконструируются как один или несколько фотонов. Поэтому анализ процесса основывался на реконструкции  $K_S$  мезона по распаду  $K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0 \rightarrow 4\gamma$  и анализу распределения по его массе отдачи. Никаких условий на сигнал от  $K_L$  мезона не накладывалось.

Отбирались события с четырьмя или более фотонами и нулем заряженных частиц. По всем четырехфотонным комбинациям искался кандидат в  $K_S$  мезон. Для этого проводилась кинематическая реконструкция с условиями, что две пары фотонов имеют инвариантные массы равные массе  $\pi^0$ -мезона и что инвариантная масса кандидатов в  $\pi^0$ -мезоны равна массе  $K_S$  мезона. Выбиралась комбинация с наилучшим  $\chi^2$  кинематической реконструкции ( $\chi^2_{K_S \rightarrow 2\pi^0}$ ) и требовалось, чтобы  $\chi^2_{K_S \rightarrow 2\pi^0} < 25$ . Дополнительные условия на параметры фотонов, а также на распределение сработавших кристаллов в калориметре использовались для подавления пучкового, физического фона и фона от космических частиц. Для событий с числом фотонов большим или равным пяти проводилась кинематическая реконструкция в гипотезе  $e^+e^- \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ . Отбрасывались события с  $\chi^2$  реконструкции меньше 60. Для отделения процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  от других процессов, содержащих  $K_S$  мезоны, применялось условие на массу отдачи реконструированного  $K_S$ -мезона  $400 < M_{rec} < 550$  МэВ.

Основными фоновыми процессами, не содержащими  $K_S$  мезонов, являются  $e^+e^- \rightarrow \omega \pi^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$  и  $e^+e^- \rightarrow \eta \gamma (\gamma) \rightarrow 3\pi^0 \gamma (\gamma)$ . Их вклады вычислялись с помощью моделирования и вычитались. Вклад пучкового фона оценивался из экспериментального распределения по параметру  $\chi^2_{K_S \rightarrow 2\pi^0}$  для событий с энергосвободением в калориметре меньше энергии пучка и также вычитался. Доля фона от этих трех источников меняется от 1% при  $\sqrt{s} = 1.05$  ГэВ до 10% при  $\sqrt{s} = 1.2$  ГэВ и достигает 25% при  $\sqrt{s} > 1.3$  ГэВ. Систематическая погрешность в определении фона составляет около 10%.

Основным фоновым процессом, содержащим  $K_S$  мезон, является процесс «возврата» на  $\phi$ -мезон  $e^+e^- \rightarrow \phi \gamma \rightarrow K_S K_L \gamma$ , в котором фотон испускается начальными частицами. В большинстве случаев он излучается под малым углом к оси пучков и не регистрируется. На рисунке 1 показаны спектры массы отдачи реконструированного  $K_S$ -мезона в че-

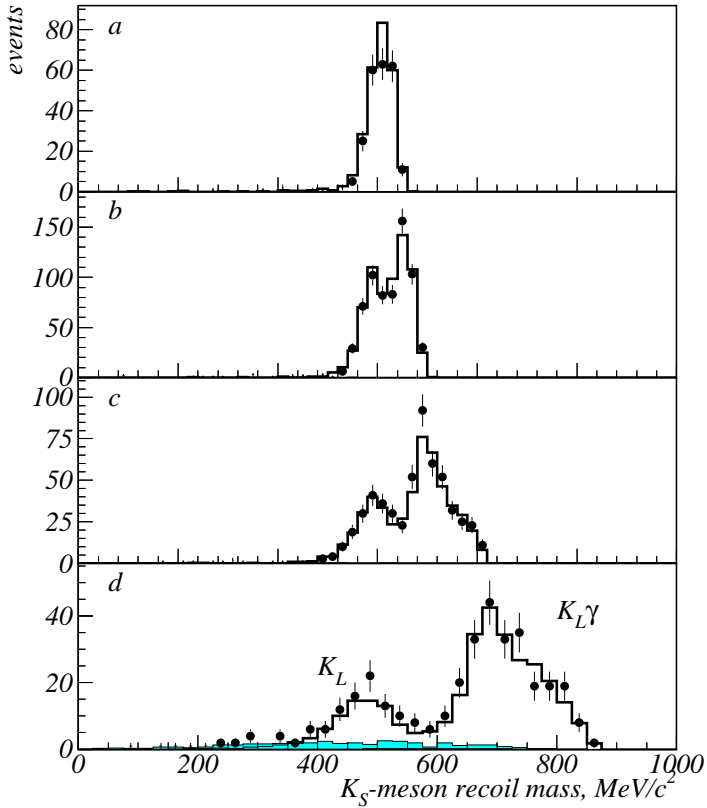


Рис. 1. Экспериментальный спектр массы отдачи реконструированного  $K_S$ -мезона (точки с ошибками) в четырех энергетических областях:  $a)$   $\sqrt{s} = 1.04 - 1.05$  ГэВ;  $b)$   $\sqrt{s} = 1.06 - 1.09$  ГэВ;  $c)$   $\sqrt{s} = 1.10 - 1.20$  ГэВ;  $d)$   $\sqrt{s} = 1.20 - 1.38$  ГэВ. Гистограмма — расчет по моделированию, заштрихованная гистограмма — моделированный спектр для событий процесса  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ .



тырех диапазонах энергии. Процессу  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  соответствует пик со средним значением вблизи массы  $K_L$ -мезона, процессу  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \gamma$  — второй пик. Хорошее разделение процессов достигается при полной энергии события выше 1.1–1.2 ГэВ. При меньшей энергии процессы  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  и  $e^+e^- \rightarrow \phi \gamma \rightarrow K_S K_L \gamma$  не разделяются. Для решения этой проблемы применялся способ аппроксимации полученных данных, в котором кроме изменения эффективности регистрации ( $\varepsilon$ ) в зависимости от полной энергии, также учитывается ее изменение в зависимости от энергии фотона, излученного начальными частицами.

Видимое сечение изучаемого процесса связано с борновским сечением  $\sigma_0$  соотношением:

$$\sigma_{vis}(\sqrt{s}) = \int_0^1 dz \sigma_0(\sqrt{s}(1-z)) F(z, s) \varepsilon(\sqrt{s}, z), \quad (1)$$

где  $F(z, s)$  — плотность вероятности потери энергии  $z\sqrt{s}$  на излучение фотонов начальными частицами.

Для определения экспериментальных значений борновского сечения используется следующая процедура. Измеренное видимое сечение  $\sigma_{vis,i}$  аппроксимируется функцией, вычисленной по формуле (1) с использованием борновского сечения  $\sigma_0(s)$ , определенного в рамках некоторой модели. В результате аппроксимации определяются параметры этой модели и вычисляется функция  $R(s) = \sigma_{vis}(s)/\sigma_0(s)$ . Экспериментальные значения борновского сечения в соответствующих экспериментальных точках по энергии определяются затем по формуле:

$$\sigma_{0,i} = \frac{\sigma_{vis,i}}{R(s_i)} \quad (2)$$

и показаны на рис. 2. Единственным критерием для подбора модели борновского сечения при вычислении функции  $R(s)$  является статистическое согласие экспериментального и теоретического видимого сечения, полученного в результате аппроксимации. Множество моделей, хорошо согласующихся с экспериментальными данными, определяет степень так называемой модельной неопределенности результата для найденного борновского сечения. Для уменьшения неоправданного «раздувания» модельной неопределенности можно рассматривать только класс «разумных» физических моделей.

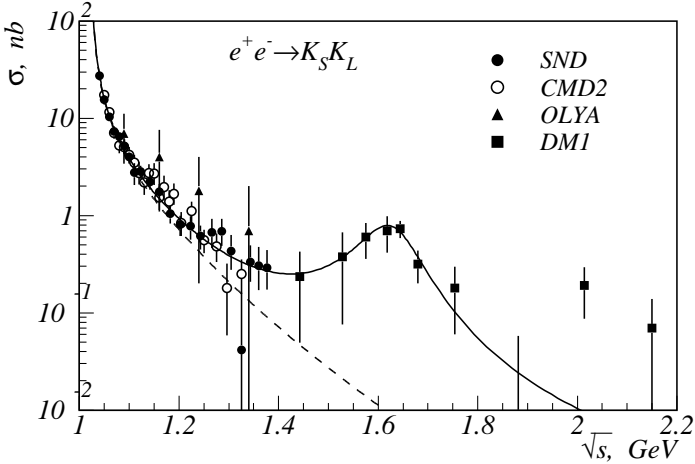


Рис. 2. Борновское сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ . Точками представлены экспериментальные данные, полученные на детекторах СНД (настоящая работа), КМД-2, ОЛЯ и DM1. Сплошной линией показан результат аппроксимации данных СНД и DM1 в модели векторной доминантности с резонансами  $\rho(770)$ ,  $\omega(782)$ ,  $\phi(1020)$ ,  $\phi(1680)$ . Пунктирная линия показывает суммарный вклад  $\rho(770)$ ,  $\omega(782)$  и  $\phi(1020)$ .

Борновское сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  рассматривалось в рамках модели векторной доминантности:

$$\sigma_0(s) = \frac{12\pi}{s^{3/2}} \left| \sum_{V=\rho,\omega,\phi,\dots} \frac{\sqrt{\Gamma_{V \rightarrow K_S K_L}(s) \Gamma_{V \rightarrow e e} m_V^3} e^{i\theta_V}}{s - m_V^2 + im_V \Gamma_V(s)} \right|^2, \quad (3)$$

где суммирование идет по всем резонансам семейств  $\rho$ ,  $\omega$  и  $\phi$ . Массы и ширины всех резонансов, а также парциальная ширина  $\Gamma_{\phi \rightarrow K_S K_L}(m_\phi)$  были взяты из таблицы свойств частиц. Для вычисления парциальных ширин для распадов  $\rho$  и  $\omega$  мезонов, а также относительных фаз их амплитуд использовались соотношения SU(3):  $\Gamma_{\rho \rightarrow K_S K_L}(s) = \Gamma_{\omega \rightarrow K_S K_L}(s) = 2\Gamma_{\phi \rightarrow K_S K_L}(s)$ ;  $\theta_\omega - \theta_\rho = \theta_\phi - \theta_\rho = \pi$ . Для хорошего описания экспериментальных данных оказалось достаточно модели с одним возбужденным резонансом. В результате аппроксимации была определена функция  $R(s)$  и вычислены экспериментальные значения борновского сечения. Далее детально описан анализ систематических погрешностей из-за

измерения светимости, определения эффективности регистрации, вычитания фона, определения радиационной поправки. Суммарная систематическая ошибка измеренного сечения меняется от 3% при 1.04 ГэВ до 5% при 1.38 ГэВ.

Измеренное сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  показано на рис. 2 вместе с результатами предыдущих измерений. Данные СНД хорошо согласуются с данными ОЛЯ и КМД-2. На рисунке также приведен результат аппроксимации данных СНД и DM1 в модели векторной доминантности с резонансами  $\rho(770)$ ,  $\omega(782)$ ,  $\phi(1020)$ ,  $\phi(1680)$ . Видно, что эта модель удовлетворительно описывает данные вплоть до 2 ГэВ.

**В четвертой главе** описан метод измерения длины неупругого ядерного взаимодействия  $K_L$ -мезона в NaI(Tl), изучены систематические погрешности метода. Результат измерения сравнивается с модельным расчетом (рис. 3), сделанным на основе данных по полному сечению ядерного взаимодействия  $K_L$ -мезона, и с неупругими ядерными длинами, используемыми в программах моделирования UNIMOD2 и GEANT4.

Отбор событий процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ , описанный в третьей главе, основан на реконструкции  $K_S$ -мезона по его распаду  $K_S \rightarrow 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma$ . При этом никаких ограничений на число дополнительных кластеров в калориметре не накладывается. Такой подход позволяет выделять как события, в которых  $K_L$ -мезон зарегистрировался в калориметре вследствие ядерного взаимодействия или распада, так и события, в которых  $K_L$ -мезон никакого сигнала в калориметре не дал. Соотношение событий, попавших в эти два класса определяется, в основном, ядерным неупругим взаимодействием  $K_L$ -мезона в веществе калориметра и может быть использовано для определения  $\lambda_{in}$ , длины неупругого ядерного взаимодействия  $K_L$ -мезона в NaI(Tl). Далее идет подробное описание метода, учитывающего распределение как «активного» (NaI), так и «мертвого» вещества детектора. Выводится формула, связывающая вероятность регистрации события, в котором  $K_L$ -мезон не зарегистрирован в детекторе, с  $\lambda_{in}$ . Далее вычисляются поправки, учитывающие влияние упругого ядерного взаимодействия и немонохроматичность  $K_L$ -мезонов. Немонохроматичность возникает из-за излучения фотонов из начального состояния. Метод определения  $\lambda_{in}$  проверялся на событиях моделирования. Проверка показала, что найденные при разных энергиях значения  $\lambda_{in}$  совпадают с хорошей точностью со значениями ядерной неупругой длины, используемыми при моделировании.

Разработанный метод был применен к экспериментальным событиям. Ядерная неупругая длина была измерена как функция от энергии  $K_L$ -мезона. Были детально проанализированы источники систематических

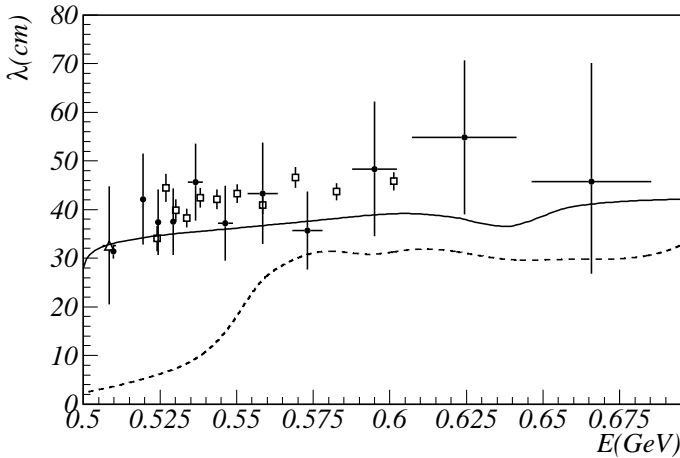


Рис. 3. Измеренная зависимость неупругой ядерной длины  $K_L$ -мезона в NaI от его энергии (черные кружки). Расчет на основе данных по  $\sigma_{tot}(K_L + Be)$ , выполненных на Принстон-Пенсильванском укорителе, показан квадратиками, а на КМД-2 — треугольником. Сплошная кривая представляет энергетическую зависимость неупругой ядерной длины, используемую в моделировании с помощью программы UNIMOD2. Пунктирная кривая — та же зависимость из программы GEANT4 (версия 9.5).

погрешностей: ложные фотоны от пучкового фона; неточность используемых в моделировании упругого ядерного сечения и неупругого ядерного сечения в «мертвом» веществе; неточность моделирования эффективности регистрации событий; вычитание фона; монохроматичность  $K_L$ -мезонов. Суммарная систематическая ошибка измерения составила 5–6%. Результаты измерения длины неупругого ядерного взаимодействия  $K_L$ -мезона с NaI(Tl) приведены на рис. 3. Измерения СНД сравниваются с модельным расчетом, сделанным на основе данных по полному ядерному сечению  $K_L$ -мезона на бериллии  $\sigma_{tot}(K_L + Be)$ . Результат этого расчета хорошо согласуется с данными СНД. Сплошная кривая на рис. 3 показывает энергетическую зависимость неупругой ядерной длины, используемую в моделировании UNIMOD2. Эта программа использовалась при анализе процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  на детекторе СНД по данным, накопленным на коллайдере ВЭПП-2М. Видно, что измеренная длина  $\lambda_{in}$  статистически согласуется с расчетом. При анализе данных, накоплен-

ных с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2000, используется моделирование, основанное на пакете программа GEANT4. Пунктирная кривая на рис. 3 показывает энергетическую зависимость ядерной длины, используемой в GEANT4 (версия 9.5). Видно, что при энергиях  $K_L$ -мезона меньших 0.55 ГэВ, экспериментальные данные находятся в противоречии с моделью, используемой в моделировании. Это сильно затрудняет анализ процессов с нейтральными каонами в эксперименте с детектором СНД на ВЭПП-2000.

**Пятая глава** посвящена анализу процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ , наиболее точным измерением которого до настоящего момента являлось измерение детектора BABAR (рис. 4). В качестве кандидатов в  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  отбирались события, содержащие две коллинеарные заряженные частицы, вылетающие из места встречи пучков. Требовалось, чтобы одна из частиц была идентифицирована как каон, т.е. попала в рабочую область АСС и не дала сигнала в ней. Дополнительное подавление событий коллинеарных фоновых процессов в области энергии  $\sqrt{s} \leq 1.2$  ГэВ обеспечивалось условиями на ионизационные потери  $(dE/dx)$ , измеренные в дрейфовой камере. При  $\sqrt{s} \geq 1.9$  для подавления фона от событий процесса  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  использовалось условие, что ионизационные потери  $(dE/dx)$  одной из заряженных частиц не превышают  $1.5(dE/dx)_e$ , где  $(dE/dx)_e$  — средние ионизационные потери для электронов.

События фоновых процессов можно разделить на две основные группы: коллинеарные и неколлинеарные. К первой группе относятся двухчастичные процессы  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-, \pi^+\pi^-$  и  $p\bar{p}$ , а также события с космическими мюонами, прошедшими вблизи места встречи пучков. Вторую группу составляют в основном многочастичные процессы с двумя заряженными частицами:  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0; \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0; K^+K^-\pi^0$  и т.п. Отдельно можно выделить процесс  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\gamma$ , в котором фотон испускается первичными  $e^+, e^-$  частицами. Этот процесс дает существенный вклад только вблизи  $\phi$ -мезонного резонанса. При  $\sqrt{s} > 1.06$  ГэВ он практически полностью подавлен условием на коллинеарность заряженных частиц.

Вклад неколлинеарных фоновых событий определялся из экспериментального двумерного распределения по  $\Delta\phi$  и  $\Delta\theta$  и вычитался. Фон от мюонов и электронов вычитался при аппроксимации распределения по полному энергосодержанию в калориметре. В этом распределении имеется три пика: от мюонов; от каонов с примесью пионов и от электронов. Фон от пионов вычитался расчетным образом.

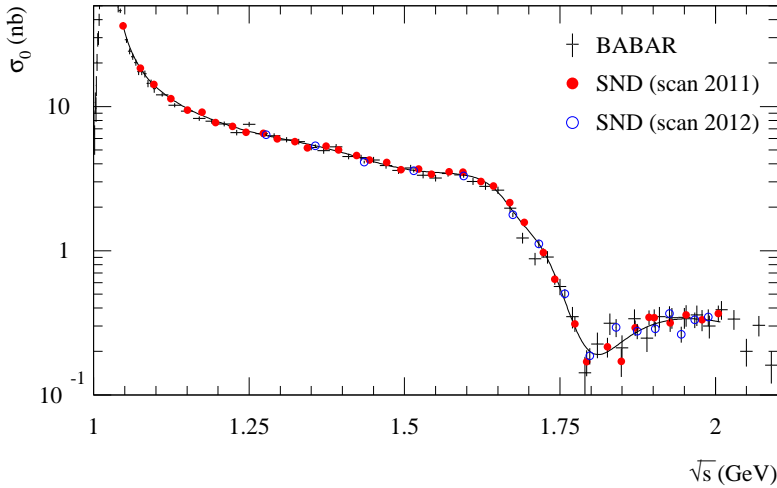


Рис. 4. Борновское сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ , измеренное в данной работе и в эксперименте BABAR. Точки с ошибками — экспериментальные данные. Кривая — результат аппроксимации.

Эффективность регистрации исследуемого процесса определялась по моделированию методом Монте-Карло. В моделировании учитывалось излучение фотонов начальными частицами, что позволило учесть зависимость эффективности как от  $\sqrt{s}$ , так и от энергии излученного фотона. Радиационные поправки вычислялись при аппроксимации видимого сечения изучаемого процесса. Для аппроксимации использовалась модель векторной доминантности.

После получения экспериментальных значений борновского сечения были детально проанализированы систематические погрешности. Их основными источниками являются неточности в определении светимости, эффективности регистрации и вычитании фона. Мощным способом проверки систематики в определении эффективности регистрации было сравнение сечений, измеренных при отборе событий с одним или двумя идентифицированными каонами. Суммарная систематическая ошибка сечения составляет около 1.5% при  $\sqrt{s} < 1.8$  ГэВ и около 4.4% при  $\sqrt{s} > 1.8$  ГэВ.

Измеренное сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  приведено на рис. 4 в сравнении с данными эксперимента BABAR. Сложное поведение сечения

в зависимости от энергии объясняется тем, что конечное исследуемое состояние  $K^+K^-$  может обладать изоспином как 0, так и 1. Поэтому вклад в амплитуду процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  дают все резонансы семейств  $\rho$ ,  $\omega$  и  $\phi$ . Измерения СНД на ВЭПП-2000 находятся в согласии с данными BABAR и имеют сравнимые или лучшие точности. Подтверждено значительное расхождение новых данных с измерениями СНД на ВЭПП-2М и DM2, обнаруженное BABAR.

**В заключении** приведены основные результаты работы:

1. В эксперименте с детектором СНД на  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-2М измерено сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  в области энергий в системе центра масс от 1.04 ГэВ до 1.38 ГэВ. Несмотря на то, что измерение сделано 10 лет назад, оно не уступает по точности более поздним измерениям.
2. В эксперименте с детектором СНД на  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-2000 измерено сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  в области энергий в системе центра масс от 1.05 ГэВ до 2.0 ГэВ. На сегодняшний день это самое точное измерение сечения  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  в указанной области энергий.
3. В эксперименте с детектором СНД на  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-2М измерена длина неупругого ядерного взаимодействия  $K_L$  мезона в NaI(Tl) в диапазоне энергий  $K_L$  мезона от 510 МэВ до 690 МэВ. Это первое измерение энергетической зависимости неупругой ядерной длины  $K_L$  мезона при низких энергиях.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

1. M.N. Achasov, . . . , K.I. Beloborodov et al.  
Experimental Study of the Reaction  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  in the Energy Range  $\sqrt{s} = 1.04$  GeV. J. Exp. Theor. Phys. **103** 720 (2006).
2. M.N. Achasov, . . . , K.I. Beloborodov et al.  
Measurement of the  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  cross section in the energy range  $\sqrt{s} = 1.05 - 2.0$  GeV. Phys. Rev. D **94**, 112006 (2016).
3. M.N. Achasov, . . . , K.I. Beloborodov et al.  
Measurement of the  $K_L$  nuclear interaction length in the NaI(Tl) calorimeter. JINST **10**, P09006 (2015).

4. M.N. Achasov, . . . , K.I. Beloborodov et al.  
Proc. of the Int. Workshop “ $e^+e^-$  Collisions from  $\phi$  to  $J/\psi$ ”. Novosibirsk, 1999, p. 196.
5. K.I. Beloborodov.  
Experimental study of the  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  process cross section with the SND detector at the VEPP-2000  $e^+e^-$  collider. Journal of University of Science and Technology of China, **46**, 279 (2016).
6. K. I. Beloborodov et al.  
CVC test in  $e^+e^- \rightarrow K\bar{K}$  and  $\tau^- \rightarrow K^-K^0\nu_\tau$  processes. Nucl. Phys. Proc. Suppl. **181-182**, 306 (2008).



**БЕЛОБОРОДОВ Константин Иванович**

**Изучение процессов  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  и  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$   
на детекторе SND**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 5.04.2017 г.

Подписано к печати 5.04.2017 г.

Формат 60×90 1/16 Объём 1,0 печ.л., 0,8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 3

---

Обработано на IBM PC и отпечатано

на ротапинтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,  
*Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*