

ИЗМЕРЕНИЕ АДРОННЫХ СЕЧЕНИЙ
 $e^+e^- \rightarrow K^+K^-n\pi$ ($n = 1, 2, 3$) С ДЕТЕКТОРОМ
КМД-3 НА ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОМ
КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-2000

Г. В. Федотович^{1,2,*} от имени коллаборации КМД-3:
А. В. Анисёнков^{1,2}, *В. М. Аульченко*^{1,2}, *Р. Р. Ахметшин*^{1,2},
*В. С. Банзаров*¹, *Н. С. Баштовой*¹, *Д. Е. Беркаев*^{1,2},
А. Е. Бондарь^{1,2}, *А. В. Брагин*¹, *А. И. Воробьев*¹, *С. Е. Гаязов*^{1,2},
А. А. Гребенюк^{1,2}, *С. С. Грибанов*^{1,2}, *Д. Н. Григорьев*^{1,2,3},
Д. А. Епифанов^{1,2}, *А. Л. Ерофеев*^{1,2}, *Ю. М. Жаринов*¹,
В. Л. Иванов^{1,2}, *Ф. В. Игнатов*¹, *В. Ф. Казанин*^{1,2}, *С. В. Карпов*¹,
*А. Н. Кирпотин*¹, *О. А. Коваленко*^{1,2}, *А. Н. Козырев*^{1,2,3},
Е. А. Козырев^{1,2}, *И. А. Кооп*^{1,3}, *П. П. Кроковный*^{1,2},
А. Е. Кузьменко^{1,2}, *А. С. Кузьмин*^{1,2}, *И. Б. Логащенко*^{1,2},
П. А. Лукин^{1,2}, *А. П. Лысенко*¹, *К. Ю. Михайлов*^{1,2}, *В. С. Охапкин*¹,
Е. А. Переведенцев^{1,2}, *Ю. Н. Пестов*¹, *А. С. Попов*^{1,2},
Г. П. Разуваев^{1,2}, *Ю. А. Роговский*¹, *А. Л. Романов*¹, *А. А. Рубан*¹,
А. Е. Рыжененков^{1,2}, *Н. М. Рыскулов*¹, *А. Л. Сибиданов*⁴,
Е. П. Солодов^{1,2}, *А. А. Тальшев*^{1,2}, *В. М. Титов*^{1,2},
*П. Ю. Шатунов*¹, *Ю. М. Шатунов*¹, *Б. А. Шварц*^{1,2},
Д. Б. Шварц^{1,2}, *В. Е. Шебалин*^{1,2}, *Д. Н. Шемякин*^{1,2},
С. И. Эйдельман^{1,2}, *Л. Б. Эпштейн*^{1,2,3}, *Ю. В. Юдин*^{1,2}

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

⁴ Университет Сиднея, Сидней, Австралия

В Институте ядерной физики СО РАН детектор КМД-3, установленный на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-2000, в течение 2011–2013 гг. набирал статистику в области значений энергии в системе центра масс пары e^+e^- от 0,32 до 2 ГэВ. Всего было

*E-mail: g.v.fedotovich@inp.nsk.su

набрано $\sim 60 \text{ pb}^{-1}$ интегральной светимости. В статье представлены предварительные результаты изучения процессов $e^+e^- \rightarrow K^+K^-n\pi$ ($n = 1, 2, 3$) с двумя заряженными каонами в конечном состоянии вместе с описанием процедуры и текущих результатов измерения интегральной светимости, набранной КМД-3 в каждой точке по энергии.

At the Budker Institute of Nuclear Physics the CMD-3 detector, mounted at VEPP-2000 e^+e^- collider, was gaining the statistics in the e^+e^- center of mass energy range from 0.32 to 2 GeV during the years 2011–2013. The amount of the data collected corresponds to an integrated luminosity of about 60 pb^{-1} . The article presents the preliminary results on the study of $e^+e^- \rightarrow K^+K^-n\pi$ ($n = 1, 2, 3$) processes with two charged kaons in the final state along with the description of procedure and current results of the measurements of integral luminosity, collected by CMD-3 at each energy point.

PACS: 13.66.Bc

ВВЕДЕНИЕ

Детекторы КМД-3 и СНД, установленные в противоположных местах встречи пучков электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-2000 (ИЯФ СО РАН), набирали экспериментальные данные в заходах 2011–2013 гг. В целях достижения проектной светимости в $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на коллайдере впервые реализована идея круглых пучков [1]. Физические программы детекторов КМД-3 и СНД приведены в работах [2–4] и включают широкий круг вопросов физики легких кварков, прецизионные измерения эксклюзивных сечений e^+e^- -аннигиляции в адроны и параметров промежуточных векторных мезонов, изучение динамики рождения многоадронных состояний, поиск экзотических частиц и резонансов.

Прецизионные данные об эксклюзивных сечениях e^+e^- -аннигиляции в адроны необходимы, в частности, для вычисления адронного вклада в аномальный магнитный момент (АММ) мюона $a_\mu = (g-2)_\mu/2$. Область энергии ВЭПП-2000 дает основной вклад ($\sim 92\%$) в величину a_μ^{had} и определяет ее точность [5].

Интегральная светимость коллайдера является ключевым фактором многих экспериментов, в которых изучаются адронные сечения. Систематическая ошибка в определении светимости представляет один из самых серьезных источников неопределенности величины a_μ^{had} . Для измерения светимости используются процессы $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $\mu^+\mu^-$, $\gamma\gamma$, и их совместное применение помогает достоверно оценить ее систематическую погрешность.

1. ДЕТЕКТОР КМД-3

Общий вид детектора КМД-3 показан на рис. 1. Координаты треков, углы и импульсы заряженных частиц измеряются в цилиндрической дрейфовой камере (ДК). Цилиндрическая двухслойная пропорциональная Z -камера

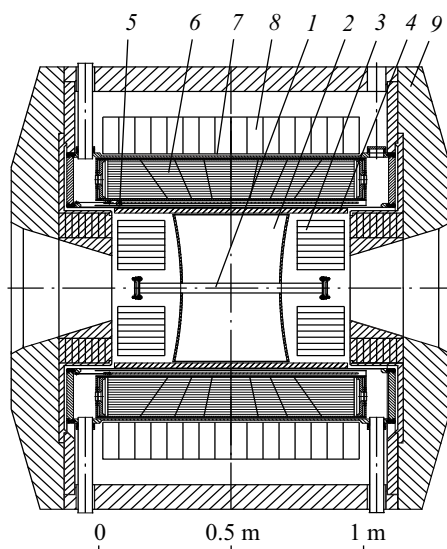


Рис. 1. Детектор КМД-3: 1 — вакуумная камера; 2 — дрейфовая камера; 3 — BGO-калориметр; 4 — Z-камера; 5 — сверхпроводящий соленоид ($0,13X_0$, 13 кГс); 6 — жидкоксеноновый калориметр; 7 — времяпролетная система (TOF); 8 — CsI-калориметр; 9 — обратный магнитопровод (внешняя мюонная пробегная система не показана)

расположена сразу за ДК и обеспечивает определение z -координаты трека с точностью $\sim 0,5$ мм. Калориметр детектора состоит из трех подсистем [6]: калориметр на основе кристаллов BGO, расположенный по торцам ДК; цилиндрический калориметр, расположенный снаружи сверхпроводящего соленоида с магнитным полем 1,3 Тл и состоящий из внутреннего жидкоксенонового (LXe) и внешнего (на основе кристаллов CsI) калориметров.

2. СКАНИРОВАНИЕ ПО ЭНЕРГИИ И ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТИМОСТИ

Область энергии от 1 до 2 ГэВ была просканирована дважды вверх и вниз с шагом 50 МэВ. В каждой точке по энергии набирался интеграл светимости порядка 500 нб^{-1} . При сканировании вниз точки по энергии, в которых набиралась статистика, были сдвинуты относительно предыдущих на 25 МэВ. Энергия пучка мониторировалась с точностью $\sim 1\text{--}3$ МэВ путем измерения тока в дипольных магнитах кольца ВЭПП-2000. Кроме того, в некоторых

точках по энергии в окрестности ϕ -мезона и в области 2 ГэВ энергия измерялась с помощью методики обратного комптоновского рассеяния с точностью ~ 50 кэВ [7].

События $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ отбирались наложением условий на центральность и коллинеарность треков в ДК. Фоновые события процессов $\mu^+\mu^-$, $\pi^+\pi^-$, K^+K^- и космические мюоны отделялись с использованием информации об энерговыделении частиц в калориметре.

Процесс $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ удобен в качестве независимого инструмента для определения светимости [8], поскольку диаграммы этого процесса не содержат излучения конечных частиц и их кулоновского взаимодействия, а также эффектов, связанных с поляризацией вакуума. Для отбора событий этого процесса использовались следующие критерии: имеются два противоположных кластера в цилиндрическом калориметре; энергия каждого кластера лежит в пределах от $0,5E_{\text{beam}}$ до $1,5E_{\text{beam}}$; нет треков в ДК, идущих из места взаимодействия пучков.

За три года работы ВЭПП-2000 набранный КМД-3 интеграл светимости составил ~ 60 пб $^{-1}$: $\sim 34,5$ пб $^{-1}$ выше ϕ -мезона; 8,3 и 8,4 пб $^{-1}$ в окрестностях ω - и ϕ -резонансов соответственно; 9,4 пб $^{-1}$ при сканировании в области энергии ниже ϕ -мезона. Отношение светимостей, определенных с помощью процессов баба-рассеяния и $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$, в зависимости от энергии пучка (сканирование 2012 г.) представлено на рис. 2, где показаны только статистические ошибки. Горизонтальная линия обозначает аппроксимацию этого отношения. Видно, что различие между светимостями в диапазоне значений энергии от ϕ -мезона до 2 ГэВ в среднем составляет $(0,2 \pm 0,3)\%$. Главными источниками систематических ошибок являются взаимодействие с ве-

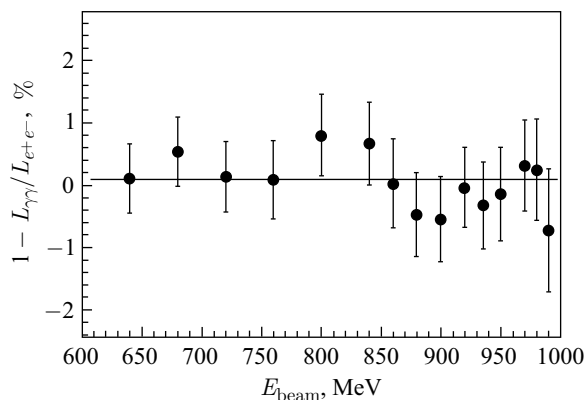


Рис. 2. Отношение интегральных светимостей $1 - L_{\gamma\gamma}/L_{e^+e^-}$ в зависимости от энергии пучка (сканирование 2012 г.). Горизонтальная линия — средневзвешенное значение. Показаны только статистические ошибки

ществом стенки вакуумной камеры ($\sim 0,3\%$) и точность калибровки шкалы z -координат проволочек ДК ($\sim 0,6\%$). На сегодняшний день мы оцениваем систематическую погрешность в определении светимости порядка $\sim 1\%$ для энергии выше 1 ГэВ.

В экспериментальных заходах 2011–2013 гг. пиковая светимость коллайдера была ограничена скоростью накопления позитронов и максимальной энергией бустера (825 МэВ), при которой идет инжекция в кольцо ВЭПП-2000. Проектная светимость будет достигнута после реализации новой схемы инжекции электронов и позитронов, которая должна быть закончена в 2016 г.

3. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0$

Изучение этого процесса основано на интегральной светимости порядка 34 пб^{-1} , набранной в области энергии от 1,2 до 2 ГэВ. При отборе сигнальных событий требуется наличие двух центральных треков с ионизационными потерями в ДК, характерными для каонов, и двух или более фотонов в калориметре. Для каждой пары фотонов и двух треков выполняется кинематическая реконструкция (в предположении, что полный импульс всех частиц равен нулю и их полная энергия равна удвоенной энергии пучка) и выбирается комбинация с наименьшим χ^2 . Основной фон дают процессы $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-2\pi^0$, $K^+K^-2\pi^0$ и K^+K^- . В результате анализа было выделено (940 ± 63) сигнальных событий. Эффективность регистрации определялась из моделирования с использованием первичного генератора и пакета

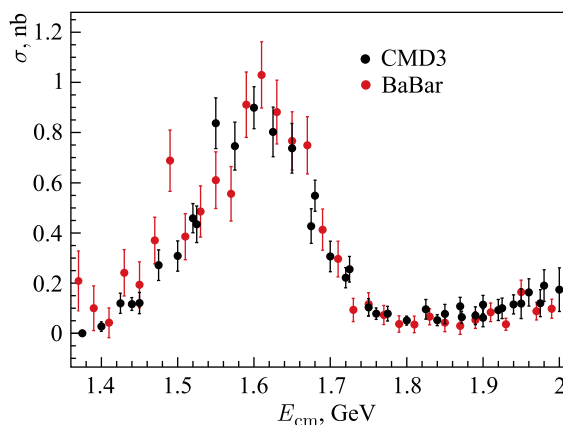


Рис. 3. Предварительные результаты измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0$ детектором КМД-3 в сравнении с данными BaBar

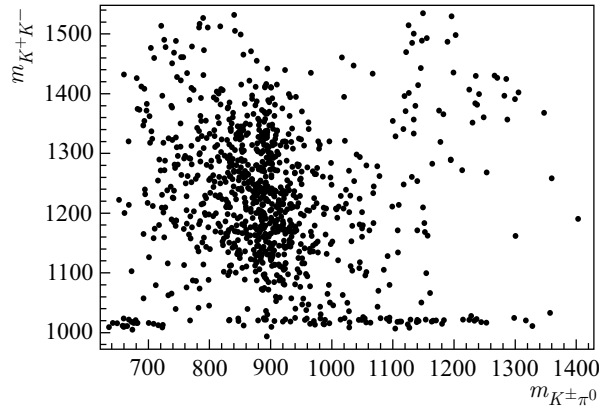


Рис. 4. Спектр инвариантной массы системы $K^\pm\pi^0$ в зависимости от массы системы K^+K^-

GEANT4 с теми же программами реконструкции, что и для экспериментальных данных с учетом излучения фотонных струй начальными электронами и позитронами [9]. Предварительные результаты измерения сечения данного процесса представлены на рис. 3 (показаны только статистические ошибки). Видно, что наши результаты согласуются с результатами детектора ВаВаг, но в среднем имеют лучшую точность. Систематическая погрешность измерения в настоящее время оценивается в 10%. И анализ ВаВаг, и наш предварительный анализ показывают, что изучаемый процесс имеет два доминирующих промежуточных состояния: $\phi\pi^0$ и $K^{*\pm}(892)K^\mp$. Это видно из рис. 4, где представлена зависимость инвариантной массы системы $K^\pm\pi^0$ от массы системы K^+K^- .

4. ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ПРОЦЕССОВ $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ И $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\omega$

Процесс $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ ранее изучался коллаборацией ВаВаг в диапазоне значений энергии от 1,56 до 3,48 ГэВ в канале распада $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ и от 1,56 до 2,64 ГэВ в канале $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ [10], причем было установлено, что процесс идет через рождение и распад $\phi'(1680)$: $e^+e^- \rightarrow \phi'(1680) \rightarrow \phi(1020)\eta$. Наш анализ данного процесса основан на интегральной светимости $\sim 22 \text{ пб}^{-1}$, набранной в диапазоне значений энергии от 1,59 до 2 ГэВ. При отборе кандидатов в сигнальные события требовалось наличие от двух до четырех центральных треков в ДК. Далее на основе информации об ионизационных потерях треков в ДК проводилась процедура разделения каонов и пионов,

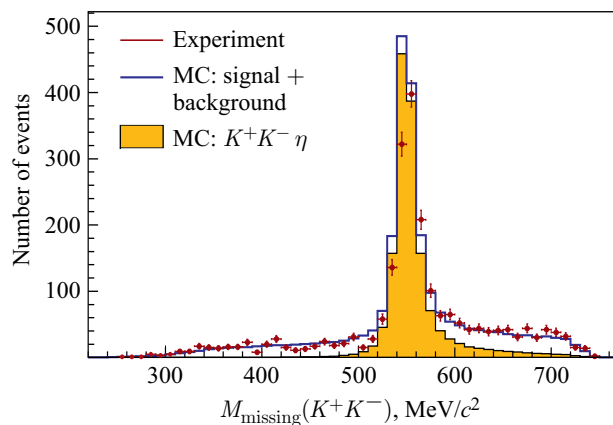


Рис. 5. Спектр недостающих масс в системе K^+K^- . Точки с ошибками соответствуют эксперименту, гистограммы — моделированию сигнального и фоновых процессов

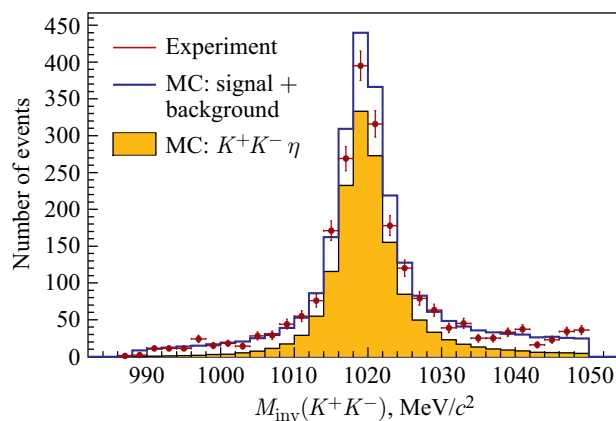


Рис. 6. Спектр инвариантной массы системы K^+K^- в области энергии вблизи ϕ -мезона. Точки с ошибками соответствуют эксперименту, гистограммы — моделированию сигнального и фоновых процессов

причем требовалось, чтобы в событии было не менее двух каонов с инвариантной массой, близкой к массе $\phi(1020)$ -мезона. Для разделения сигнала и фона использовался спектр недостающей массы системы K^+K^- , изображенный на рис. 5, где виден пик, соответствующий η -мезону. На рис. 6 представлен спектр инвариантной массы системы K^+K^- в окрестности ϕ -мезона. В результате анализа было выделено (1268 ± 43) сигнальных событий. Пред-

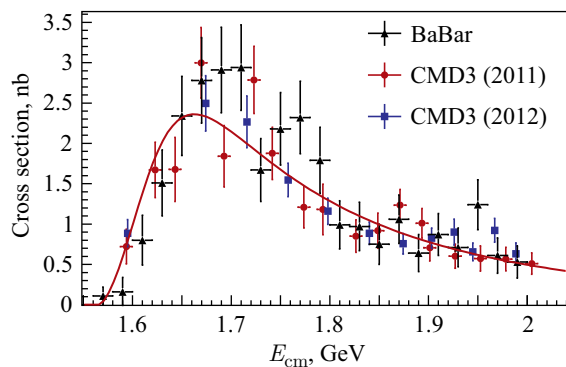


Рис. 7. Предварительные результаты измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$ детектором КМД-3. Круги и квадраты — КМД-3; треугольники — данные ВаВар. Показаны только статистические ошибки

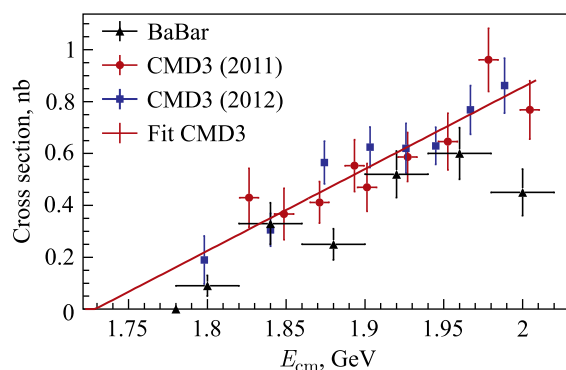


Рис. 8. Предварительные результаты измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\omega$ детектором КМД-3. Круги и квадраты — КМД-3; треугольники — данные ВаВар. Показаны только статистические ошибки

варительные результаты измерения сечения процесса вместе с данными детектора ВаВар представлены на рис. 7. Уровень текущей статистики не позволяет сделать вывод о существовании иных, кроме $\phi\eta$, промежуточных механизмов в данном процессе. Систематическая погрешность сечения оценивается в 7%.

Процесс $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\omega$ изучался в интервале значений энергии от 1,8 до 2 ГэВ, где набранный КМД-3 интеграл светимости составляет $\sim 12 \text{ пб}^{-1}$. Процедура выделения сигнальных событий аналогична приведенной выше. Поскольку массы трех частиц порядка 1,8 ГэВ (порог рождения), то события данного типа появляются только в конце энергетического диапазона коллай-

дера ВЭПП-2000. Всего было выделено (854 ± 29) сигнальных событий. Предварительные результаты измерения сечения изучаемого процесса представлены на рис. 8 вместе с результатами детектора ВаВаг. Анализ систематических ошибок продолжается, и в настоящее время они оцениваются в 7%.

5. ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$

Сечение данного процесса ранее было измерено в экспериментах ВаВаг с использованием метода радиационного возврата (ISR [12]). Наш анализ основан на интегральной светимости $\sim 22 \text{ пб}^{-1}$, набранной в области значений энергии от 1,5 до 2 ГэВ [11]. В процедуре отбора сигнальных событий требуется наличие трех или четырех треков в ДК, имеющих общую вершину, находящуюся в области взаимодействия пучков. Треки, принадлежащие каонам, должны иметь большие ионизационные потери в ДК. На рис. 9 представлена двумерная гистограмма для кандидатов в сигнальные события. По вертикальной оси отложена измеренная энергия четырех частиц минус удвоенная энергия пучка, а по горизонтальной оси — модуль векторной суммы импульсов этих частиц. Видно, что в начале координат концентрируются события $K^+K^-\pi^+\pi^-$. Кроме того, наблюдается шельф событий, энергия и импульс которых коррелированы. Появление этих событий объясняется излучением фотонных струй начальными электронами и позитронами. В результате анализа было отобрано $\sim 13\,300$ четырехтрековых и $\sim 16\,000$ трехтрековых событий. На рис. 10 показаны результаты нашего измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ (темные кружки), согласующиеся с

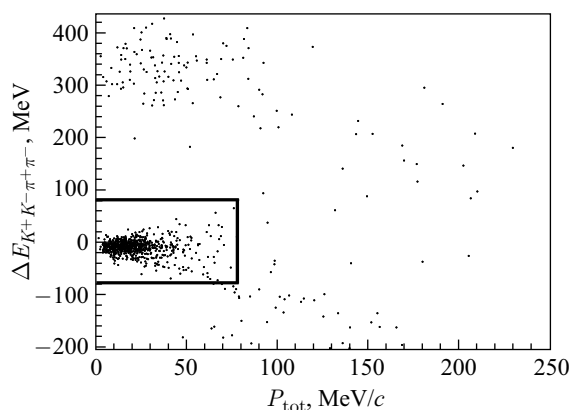


Рис. 9. Измеренная разность энергии четырех частиц и удвоенной энергии пучка в зависимости от модуля векторной суммы импульсов этих частиц

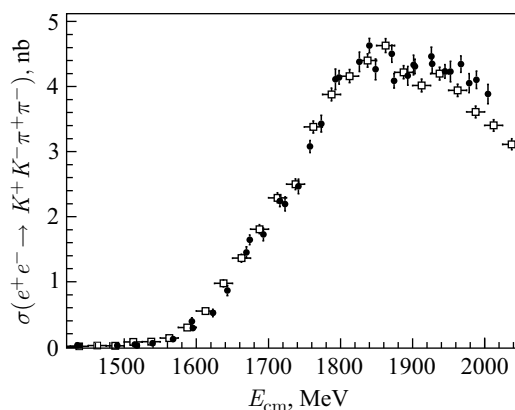


Рис. 10. Результаты измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ детектором КМД-3. ● — КМД-3; □ — данные ВаВаг

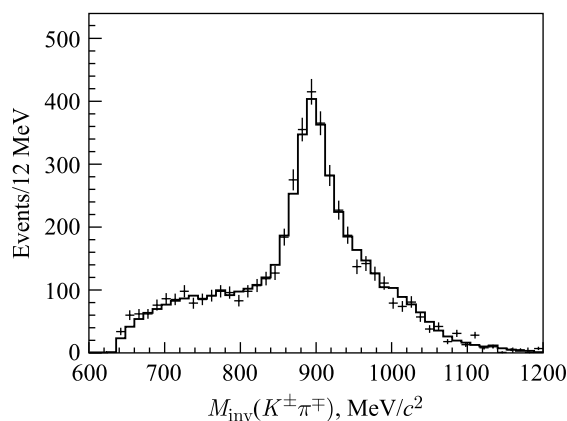


Рис. 11. Спектр инвариантных масс пар $K^\pm\pi^\mp$. Точки с ошибками обозначают экспериментальные данные, гистограмма — моделирование

данными ВаВаг (светлые квадраты), но имеющие лучшую точность. Систематические ошибки оцениваются в 6% и связаны главным образом с модельной неопределенностью эффективности регистрации.

Изучение динамики рождения событий подтверждает наличие нескольких промежуточных состояний ($K_1^*(1270, 1400)K \rightarrow K^*(892)K\pi$, $K_1^*(1270)K \rightarrow \rho K K$, $\phi\pi\pi$), которых достаточно для описания угловых распределений и спектров инвариантных масс конечных частиц с точностью $\sim 5\%$. Из рис. 11 видно, что промежуточный векторный мезон $K^*(892)$ доминирует в спектре

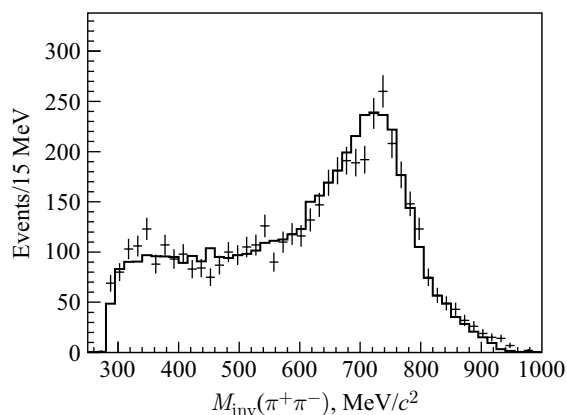


Рис. 12. Спектр инвариантных масс пар $\pi^+\pi^-$. Точки с ошибками обозначают экспериментальные данные, гистограмма — моделирование

инвариантных масс $K\pi$; в спектре инвариантной массы $\pi^+\pi^-$ виден ρ -мезон (рис. 12). Более детальный анализ станет возможным только при увеличении статистики как минимум в 10 раз, что планируется достичь в новых экспериментах на ВЭПП-2000.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интегральная светимость e^+e^- -коллайдера ВЭПП-2000, набравшаяся детектором КМД-3 в экспериментах 2011–2013 гг. (всего $\sim 60 \text{ пб}^{-1}$), определялась по процессам $e^+e^- \rightarrow e^+e^-, \gamma\gamma$. В настоящее время систематическая погрешность определения светимости оценивается в $\sim 1\%$. Были получены предварительные результаты измерения сечений процессов $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0, K^+K^-\eta, K^+K^-\omega$ и $K^+K^-\pi^+\pi^-$, имеющие сопоставимую или лучшую точность в сравнении с результатами детектора ВаВаг. Показано, что рождение конечных состояний $K^+K^-n\pi$ ($n = 1, 2, 3$) опосредовано множеством промежуточных механизмов, детальное изучение которых станет возможным при увеличении статистики.

Благодарности. Авторы благодарят команду ВЭПП-2000 за плодотворное сотрудничество во время набора данных.

Эта работа поддержана российским Министерством образования и науки посредством Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России в 2009–2013 гг.» по соглашению 14.В37.21.07777, а также Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 10-02-00695-а, 10-02-00253-а, 11-02-00328-а, 11-02-00112-а,

12-02-31501-mol-a, 12-02-31499-mol-a, 12-02-31498-mol-a, 12-02-01032-a, 13-02-00215-a, 13-02-01134, 14-02-31275, 14-02-00047, 14-02-91332, 14-02-31478, 15-02-05674) и Российским научным фондом (грант 1457/9-1). Исследование ионизационных потерь LXe-калориметра было поддержано РФФ (проект 14-50-00080).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Berkaev D. E. et al.* // ЖЭТФ. 2011. V. 113. P. 213.
2. *Khazin B. I. et al.* // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2008. V. 181–182. P. 376.
3. *Achasov M. N. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 598. P. 31.
4. *Eidelman S.* // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2006. V. 162. P. 323–326.
5. *Hagiwara K. et al.* // J. Phys. G. 2011. V. 38. P. 085003.
6. *Shebalin V. E. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 824. P. 710–712;
Aulchenko V. M. et al. // JINST. 2015. V. 10. P. P10006.
7. *Abakumova E. V. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 140402.
8. *Akhmetshin R. R. et al.* // JINST. 2014. V. 9. P. C09003.
9. *Kuraev E. A., Fadin V. S.* // Sov. J. Nucl. Phys. 1985. V. 41. P. 466.
10. *Aubert B. et al.* // Phys. Rev. D. 2008. V. 77. P. 092002;
Aubert B. et al. // Phys. Rev. D. 2007. V. 76. P. 092005.
11. *Shemyakin D. N. et al.* // Phys. Lett. B. 2016. V. 756. P. 153–160.
12. *Aubert B. et al.* // Phys. Rev. D. 2007. V. 76. P. 012008;
Lees J. P. et al. // Phys. Rev. D. 2012. V. 86. P. 012008;
Aubert B. et al. // Phys. Rev. D. 2008. V. 77. P. 092002.