

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$ С ДЕТЕКТОРОМ КМД-3

© 2021 г. А. А. Усков^{1),2)}*, Г. В. Федотович^{1),2)}, В. Л. Иванов^{1),2)}, Д. Н. Шемякин^{1),2)}
(от имени коллаборации КМД-3)

Поступила в редакцию 07.05.2020 г.; после доработки 07.05.2020 г.; принята к публикации 07.05.2020 г.

Представлен предварительный результат анализа процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$, сечение которого измерено в интервале энергий от 1.2 до 2 ГэВ в системе центра масс. Анализ данных основан на статистике ~ 120 пбн⁻¹, набранной детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000. Разработана методика выделения сигнальных событий, а также подтверждено доминирование нейтральной моды $K^*(892)K$. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$ измерено с лучшей по сравнению с предыдущими экспериментами статистической точностью, что позволяет улучшить точность измерения массы и ширины $\phi(1680)$, проверить точность изотопических соотношений, повысить точность вычисления адронного вклада ($g-2$) мюона.

DOI: 10.31857/S0044002721010220

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе представлены предварительные результаты измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$ с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000 в Институте ядерной физики

им. Г. И. Будкера в Новосибирске. Результаты анализа основаны на статистике примерно 120 пбн⁻¹, набранной в интервале от 1.2 до 2 ГэВ в сезонах 2011, 2012, 2017, 2019 гг. В итоге выделено порядка 4500 ± 70 сигнальных событий. Для сравнения, в экспериментах BaBar в анализе было всего примерно 1400 событий [1]. Показано, что доминирующий вклад в сечение дает процесс, который идет через промежуточное состояние $KK^*(892)$.

Данный процесс интересен своей промежуточной динамикой. В этой работе подтверждается значительная асимметрия между нейтральной KK^* - и заряженной $K^\pm K^{*\mp}$ -модой [1]. На рис. 1 изображены диаграммы Фейнмана для обеих мод. Как будет видно далее, в диапазоне энергий меньше 2 ГэВ мода $KK^*(892)$ доминирует. Поскольку K и K^* имеют изоспин 1/2, то в промежуточном состоянии возможны изовекторные (ρ -подобные) или изоскалярные (ϕ -, ω -подобные) состояния. Поэтому изучение данного процесса позволит исследовать оба вклада.

ДЕТЕКТОР КМД-3

Одним из двух детекторов, установленных на коллайдере ВЭПП-2000, является детектор КМД-3 — магнитный криогенный детектор третьего поколения [2]. На рис. 2 показана схема детектора. Позитронные и электронные пучки сталкиваются в центре вакуумной камеры, которая имеет внутренний диаметр 34 мм, ее центральная часть длиной 20 см состоит из алюминиевой трубы с толщиной стенки 0.5 мм.

*E-mail: a.uskov@g.nsu.ru

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

²⁾Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ), Новосибирск, Россия.

³⁾Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), Россия.

⁴⁾Университет Виктории, Канада.

⁵⁾Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва. Коллаборация КМД-3: Р. Р. Ахметшин^{1),2)}, А. Н. Амириханов^{1),2)}, А. В. Анисенков^{1),2)}, В. М. Аульченко^{1),2)}, В. Ш. Банзаров¹⁾, Н. С. Баштовой¹⁾, Д. Е. Беркаев^{1),2)}, А. Е. Бондарь^{1),2)}, А. В. Брагин¹⁾, А. И. Воробьев¹⁾, С. Е. Гаязов^{1),2)}, А. А. Гребенюк^{1),2)}, С. С. Грибанов^{1),2)}, Д. Н. Григорьев^{1),2),3)}, Д. А. Епифанов¹⁾, А. Л. Ерофеев^{1),2)}, Ф. В. Игнатов¹⁾, С. В. Карпов¹⁾, В. Ф. Казанин^{1),2)}, А. Н. Козырев¹⁾, Е. А. Козырев^{1),2)}, И. А. Кооп^{1),2)}, А. А. Коробов^{1),2)}, П. П. Кроковный^{1),2)}, А. Е. Кузменко^{3),1)}, А. С. Кузьмин^{1),2)}, И. Б. Логашенко^{1),2)}, П. А. Лукин^{1),2)}, К. Ю. Михайлов^{1),2)}, В. С. Охапкин¹⁾, Ю. Н. Пестов¹⁾, А. С. Попов^{1),2)}, Г. П. Разуваев²⁾, А. А. Рубан¹⁾, А. Е. Рыжененков^{1),2)}, Н. М. Рыскулов¹⁾, А. В. Семенов^{1),2)}, А. Л. Сибидапов⁴⁾, Е. П. Солодов^{1),2)}, А. А. Талышев^{1),2)}, В. М. Титов¹⁾, С. С. Толмачев^{1),2)}, В. Е. Шебакин^{1),2)}, Б. А. Шварц^{1),2)}, Д. Б. Шварц^{1),2)}, Ю. М. Шатунов¹⁾, С. И. Эйфельман^{2),1),5)}, Л. Б. Эпштейн^{1),3)}, Ю. В. Юдин¹⁾

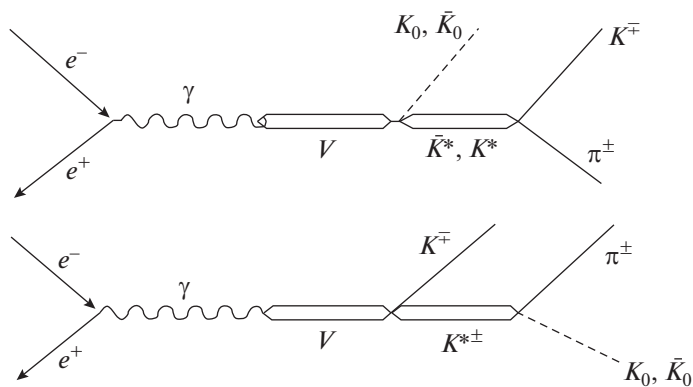
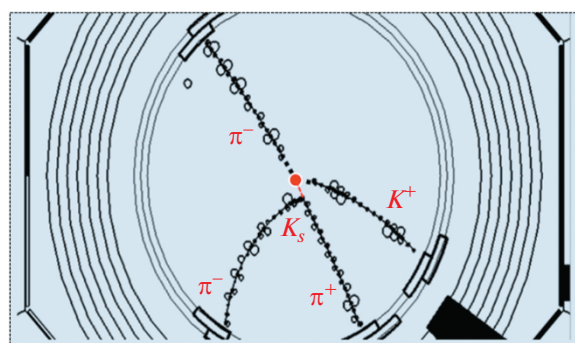


Рис. 1. Диаграммы Фейнмана для процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$



$E_{\text{beam}} = 875$ МэВ, ● ось пучков, \ отлет K_S

Рис. 3. Типичное событие $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$ на визуализаторе детектора КМД-3.

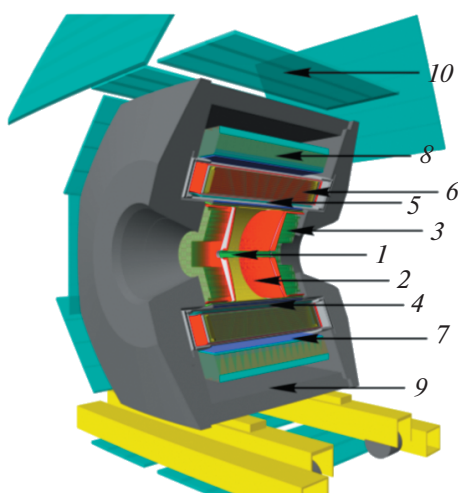


Рис. 2. Схема детектора КМД-3. 1 — вакуумная камера, 2 — дрейфовая камера, 3 — калориметр BGO, 4 — Z-камера, 5 — СП-соленоид, 6 — калориметр LXe, 7 — времяпролетная система, 8 — калориметр CsI, 9 — ярмо магнита, 10 — мюонная система.

Для определения координат, углов и импульсов заряженных частиц область столкновения пучков окружает трековая система, которая находится внутри тонкого сверхпроводящего соленоида. Трековая система состоит из дрейфовой камеры и Z-камеры. С обоих торцов дрейфовой камеры, вплотную к ее фланцам, установлен калориметр BGO на основе кристаллов германата висмута.

Вне магнитного поля в цилиндрической части детектора находятся жидко-ксеноновый калориметр LXe и калориметр на основе кристаллов CsI. Между ними в узком зазоре (7 мм) установлены времяпролетные счетчики. Снаружи детектор окружен мюонной пробежной системой на основе сцинтилляционных счетчиков, которая служит

для подавления фона космических частиц. Энергия пучков ВЭПП-2000 определяется методом обратного комптоновского рассеяния [3].

Типичное событие искомого процесса показано на рис. 3, на визуализаторе событий КМД-3. На этом рисунке видны вершина распада K_S -мезона с двумя пионными треками, а также треки заряженного каона и пиона, летящие из места встречи пучков.

МЕТОДИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОТБОРА СОБЫТИЙ

Для отбора событий в кандидаты изучаемого процесса мы рассматриваем моду, когда K_S распадается в два заряженных пиона. Кандидатом в K_S является пара треков, инвариантная масса которых лежит в диапазоне от 420 до 580 МэВ/ c^2 , а χ^2 реконструкции этих треков с общей вершиной < 100. Гистограмму инвариантной массы K_S на данном этапе можно увидеть на рис. 4.

Сигнальные события должны иметь минимум четыре “хороших трека” в дрейфовой камере (ДК), которые должны удовлетворять следующим условиям:

1. Полярный угол треков Θ от 0.8 до $\pi - 0.8$ рад.
2. Z-координата трека вдоль оси пучков менее 12 см.
3. Количество хитов (кластеров ионизации вдоль трека) более 10.
4. Импульс треков от 80 до 600 МэВ/с.

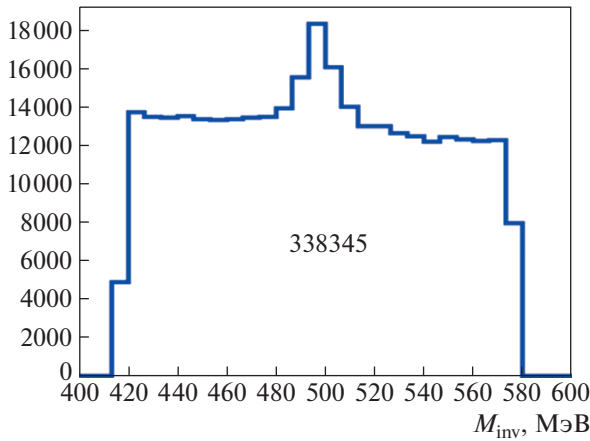


Рис. 4. Инвариантная масса K_S после предварительного отбора.

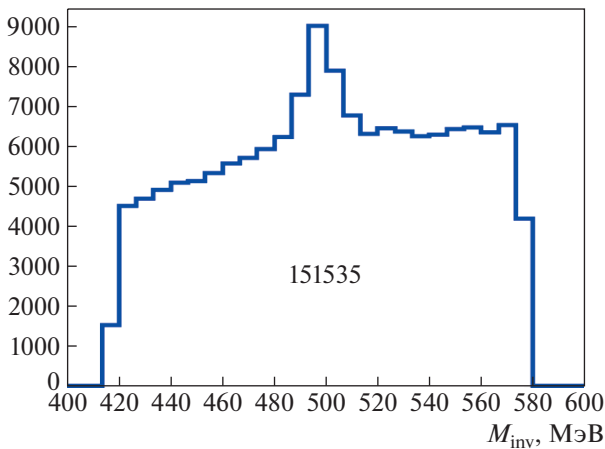


Рис. 5. Распределение по массе K_S после отбора "хороших" треков.

5. Два других трека, не связанные с K_S , которые выходят из области взаимодействия пучков, имеют прицельный параметр меньше 0.2 см.

Инвариантная масса K_S после предварительного отбора представлена на рис. 5 с применением условий на "хороший трек", после которого, согласно моделированию, теряется менее процента сигнальных событий.

МЕТОДИКА ПОДАВЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ФОНА

Существенный вклад в физический фон идет от процесса рождения четырех заряженных пионов, сечение которого примерно на порядок выше. Однако все четыре трека имеют общую вершину в

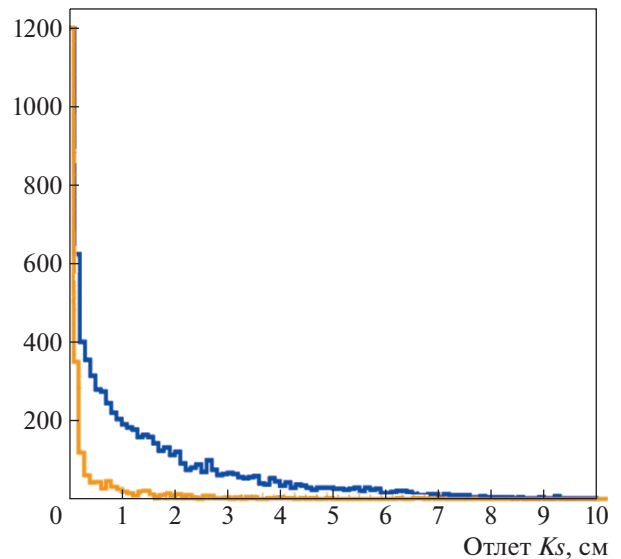


Рис. 6. Гистограмма отлета K_S , см.

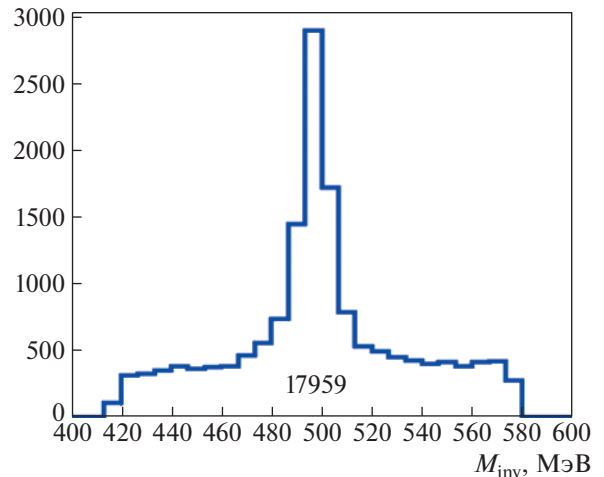


Рис. 7. Распределение событий по инвариантной массе K_S после отбора "хороших" треков и применения условия на длину отлета K_S -мезона.

области взаимодействия пучков, в то время как реальный кандидат в K_S имеет длину отлета порядка нескольких сантиметров. На рис. 6 приведены результаты моделирования: верхняя гистограмма — события искомого процесса, нижняя гистограмма — события с четырьмя пионами. Видно, что условие на отлет K_S больше 0.2 см значительно подавляет фоновую подложку, как это видно на рис. 7.

МЕТОДИКА ОТБОРА СОБЫТИЙ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$

Дальнейший отбор сигнальных событий процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$ основан на анализе

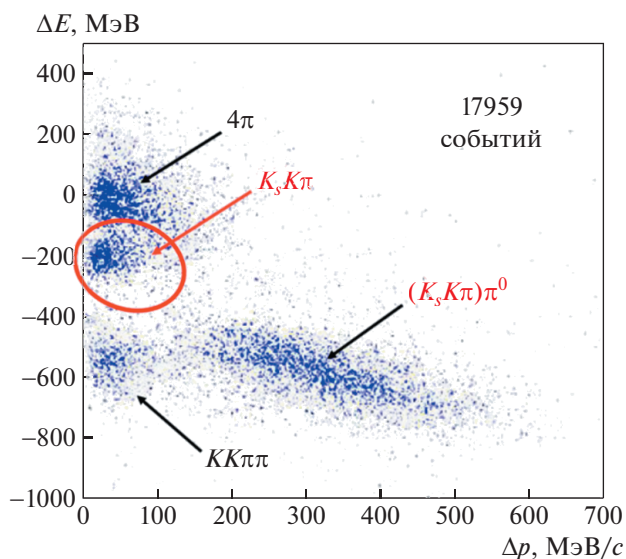


Рис. 8. Двумерное распределение событий на плоскости с осями ΔE , Δp .

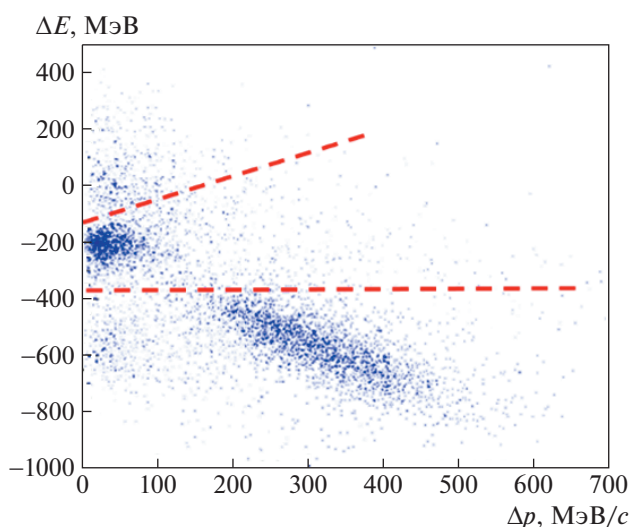


Рис. 9. Финальное распределение событий после применения всех критериев отбора сигнальных событий на плоскости ΔE , Δp (штриховые линии — границы отбора).

двумерного распределения четырехтрековых событий, которое представлено на рис. 8, когда всем трекам приписывается масса пиона. По горизонтальной оси отложен модуль векторной суммы импульсов всех четырех частиц Δp , где $\Delta p = |\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \mathbf{p}_3 + \mathbf{p}_4|$, а по вертикальной оси — дисбаланс энергии ΔE , где $\Delta E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 - 2E_{\text{beam}}$, а E_{beam} — энергия пучка ВЭПП-2000 [3].

На этом распределении четко видны четыре кластера: самый верхний с ΔE , равным нулю, — события 4π , по центру в области ΔE , примерно

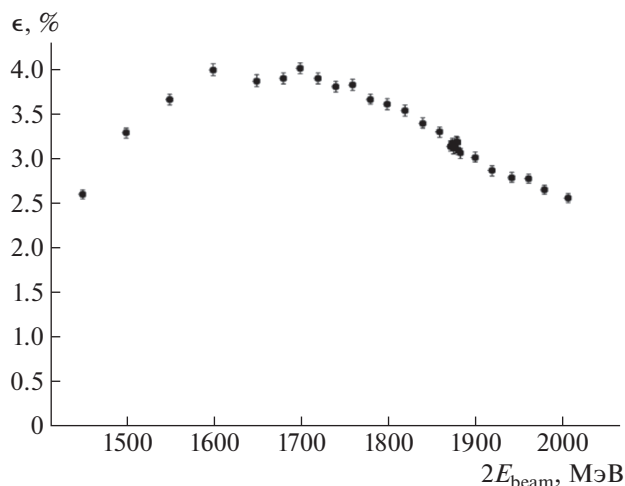


Рис. 10. Зависимость эффективности регистрации ϵ от энергии пучков в СЦМ.

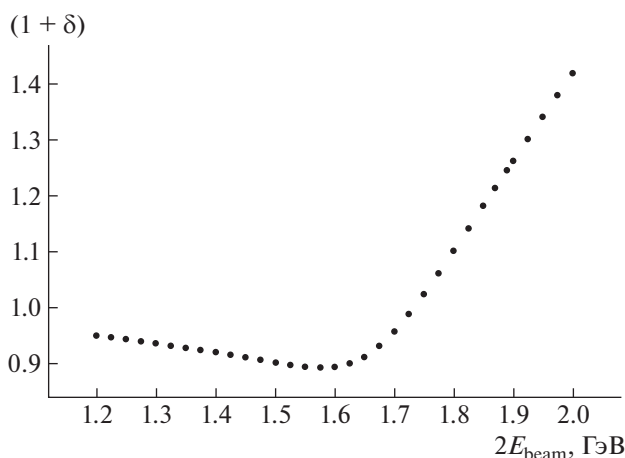


Рис. 11. Зависимость радиационной поправки от энергии.

равным -200 МэВ, находятся события искомого процесса, самый нижний кластер в области ΔE , примерно -550 МэВ, — события $KK\pi\pi$, кластер событий с большим импульсом Δp — это события $(K_S K \pi)\pi^0$.

Поскольку кластер событий 4π частично перекрывается с кластером сигнальных событий, то дальнейшее разделение оставшихся событий основано на отборе по функции максимального правдоподобия, аргументами которой являются импульс частицы и ее энерговыделение dE/dx в дрейфовой камере [4]. После этого этапа распределение событий на двумерной диаграмме ΔE от Δp примет вид, показанный на рис. 9, где также приведены две штриховые линии, между которыми находится основная доля сигнальных событий.

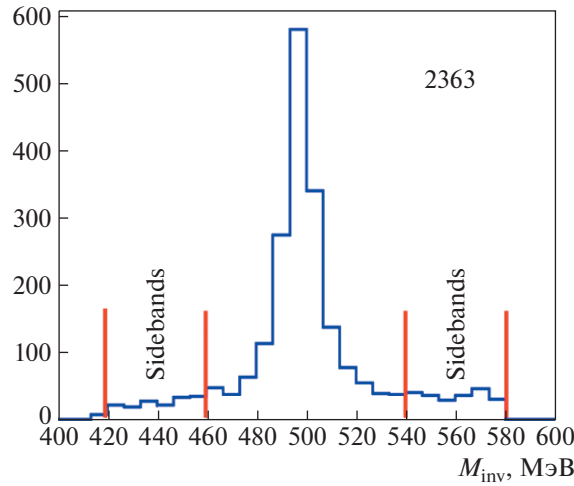


Рис. 12. Гистограмма инвариантной массы K_S -мезона для сигнальных событий после всех отборов.

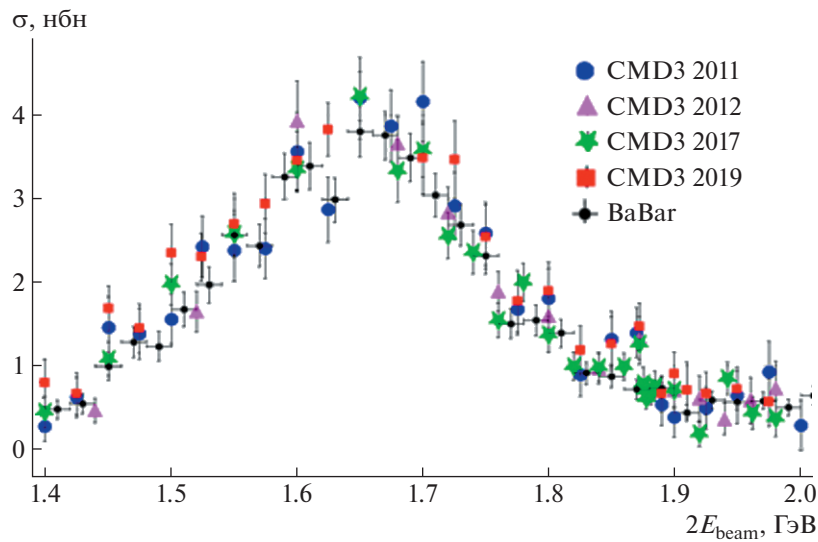


Рис. 13. Борновское сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$ для четырех сканирований. Маленькие черные кружки — результаты эксперимента BaBar.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ВЫЧИСЛЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПОПРАВОК

Эффективность регистрации событий процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$ определяется с использованием пакета GEANT4. Распределение частиц по углам вылета и импульсам разыгрывается в соответствии с квадратом матричного элемента данного процесса. В моделирование заложена геометрия детектора и прохождение частиц через вещество детектора. События моделирования обрабатываются тем же пакетом программ, что и экспериментальные данные. На рис. 10 приведена зависимость эффективности регистрации ε от энергии пучков в системе центра масс.

Радиационные поправки, которые мы исполь-

зуем при расчете сечения, основаны на работе В. С. Фадына и Э. А. Кураева [5] и вычисляются в соответствии с формулой

$$\sigma_{\text{visible}}(s) = \int_0^\varepsilon dx \sigma_{\text{born}}(s(1-x)) F(x, s),$$

где $F(x, s)$ — функция Фадына–Кураева. Зависимость радиационной поправки от энергии представлена на рис. 11. Видимое сечение определяется как $\sigma_{\text{visible}}(s) = \frac{N_{\text{signal}}}{L \Delta \varepsilon}$. N_{signal} — количество сигнальных событий после всех отборов, ε — эффективность регистрации, которая включает ак-

септанс детектора, эффективность триггера, эф-

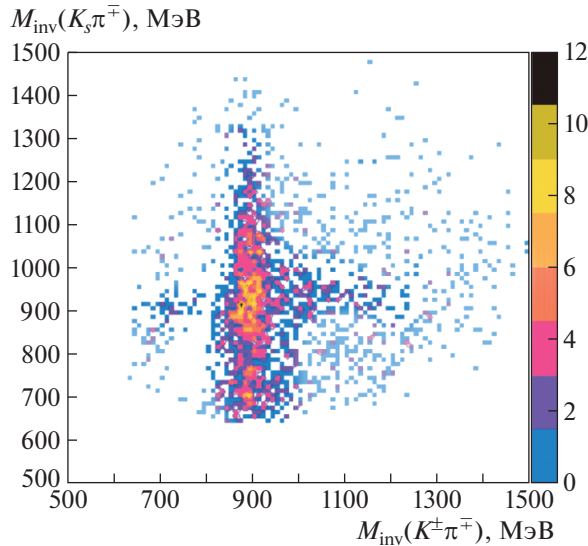


Рис. 14. Двумерное распределение по инвариантным массам K^* (нейтрального и заряженного).

фektivность реконструкции треков и все условия отбора, L — интегральная светимость [6].

ВЫЧИСЛЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА

$$e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$$

На рис. 12 представлена гистограмма инвариантной массы K_S -мезона для событий, которые находятся внутри штриховых линий на распределении ΔE от Δp (рис. 9), содержащая всю статистику, набранную в 2017 г. с интегральной светимостью ~ 43 пбн⁻¹.

Число событий в этой гистограмме 2363, а фоновая подложка под пиком составляет около 5%. Поскольку количество фоновых событий невелико, можно воспользоваться простейшим способом их вычитания — методом “сайдбэнд”, который основан на предположении о линейном распределении фона.

На рис. 13 представлены результаты вычисления борновского сечения, полученные по статистике, набранной в 2011 г. (круг), в 2012 г. (треугольник), в 2017 г. (звезда) и в 2019 (квадрат). Также на рисунке приведены результаты коллаборации ВаВаг (маленькие кружки). Видно, что данные между разными сезонами согласуются между собой и согласуются с данными ВаВаг.

На рис. 14 представлено двумерное распределение инвариантной массы нейтральной моды $K^\pm \pi^\mp$ (горизонтальная ось) в зависимости от инвариантной массы заряженной моды $K_S \pi^\pm$ (вертикальная ось). Четко виден кластер событий, который группируется вокруг 900 МэВ/ c^2 и который можно интерпретировать как доминирование нейтральной моды $K^*(892)K$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Разработана методика отбора событий процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$ с применением функции максимального правдоподобия с использованием информации об ионизационных потерях dE/dx в дрейфовой камере. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$ по совокупной статистике четырех сезонов имеет наилучшую точность в сравнении с предыдущими экспериментами. Подтверждено доминирование нейтральной моды $K^*(892)K$. Полученное сечение важно для проверки изотопических соотношений и анализа промежуточной динамики, определения массы и ширины резонанса $\phi(1680)$.

Анализ динамики процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$ проведен при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 20-52-00008 Бел_а. Метод отбора сигнальных событий разработан при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 17-02-00897. Благодарим команду ВЭПП-2000 за отличную работу ускорителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Aubert *et al.* (BaBar Collab.), Phys. Rev. D **77**, 092002 (2008).
2. B. Khazin *et al.* (CMD-3 Collab.), Nucl. Phys. B Proc. Suppl. **181–182**, 376 (2008).
3. E. V. Abakumova, M. N. Achasov, D. E. Berkaev, V. V. Kaminsky, I. A. Koop, A. A. Korol, S. V. Koshuba, A. A. Krasnov, N. Yu. Muchnoi, E. A. Perevedentsev, E. E. Pyata, P. Yu. Shatunov, and D. B. Shwartz, Nucl. Instrum. Methods A **744**, 35 (2014).

4. D. N. Shemyakin, G. V. Fedotov, R. R. Akhmetshin, A. N. Amirkhanov, A. V. Anisenkov, V. M. Aulchenko, V. Sh. Banzarov, N. S. Bashtovoy, A. E. Bondar, A. V. Bragin, S. I. Eidelman, D. A. Epifanov, L. B. Epshteyn, A. L. Erofeev, S. E. Gayazov, A. A. Grebenuk, *et al.*, Phys. Lett. B **756**, 153 (2016).
5. E. A. Kuraev and V. S. Fadin, Sov. J. Nucl. Phys. **41**, 466 (1985).
6. A. E. Ryzhenkov, R. R. Akhmetshin, A. N. Amirkhanov, A. V. Anisenkov, V. M. Aulchenko, V. Sh. Banzarov, N. S. Bashtovoy, D. E. Berkaev, A. E. Bondar, A. V. Bragin, S. I. Eidelman, D. A. Epifanov, L. B. Epshteyn, A. L. Erofeev, G. V. Fedotov, S. E. Gayazov, *et al.*, JINST **12**, C07040 (2017).

STUDYING $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$ PROCESS WITH THE CMD-3 DETECTOR

A. A. Uskov^{1),2)}, G. V. Fedotov^{1),2)}, V. L. Ivanov^{1),2)}, D. N. Shemyakin^{1),2)}
(on behalf of the CMD-3 collaboration)

¹⁾*Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia*

²⁾*Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Russia*

³⁾*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630092, Russia*

⁴⁾*University of Victoria, Victoria, BC, Canada V8W 3P6*

⁵⁾*Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, 119333, Russia*

CMD-3 collaboration: R. R. Akhmetshin^{1),2)}, A. N. Amirkhanov^{1),2)}, A. V. Anisenkov^{1),2)}, V. M. Aulchenko^{1),2)}, V. Sh. Banzarov¹⁾, N. S. Bashtovoy¹⁾, D. E. Berkaev^{1),2)}, A. E. Bondar^{1),2)}, A. V. Bragin¹⁾, S. I. Eidelman^{2),1),5)}, D. A. Epifanov¹⁾, L. B. Epshteyn^{1),3)}, A. L. Erofeev^{1),2)}, S. E. Gayazov^{1),2)}, A. A. Grebenuk^{1),2)}, S. S. Gribov^{1),2)}, D. N. Grigoriev^{1),2),3)}, F. V. Ignatov¹⁾, S. V. Karpov¹⁾, V. F. Kazanin^{1),2)}, I. A. Koop^{1),2)}, A. A. Korobov^{1),2)}, A. N. Kozyrev¹⁾, E. A. Kozyrev^{1),2)}, P. P. Krovovny^{1),2)}, A. E. Kuzmenko^{3),1)}, A. S. Kuzmin^{1),2)}, I. B. Logashenko^{1),2)}, P. A. Lukin^{1),2)}, K. Yu. Mikhailov^{1),2)}, V. S. Okhapkin¹⁾, Yu. N. Pestov¹⁾, A. S. Popov^{1),2)}, G. P. Razuvaev²⁾, A. A. Ruban¹⁾, N. M. Ryskulov¹⁾, A. E. Ryzhenkov^{1),2)}, A. V. Semenov^{1),2)}, V. E. Shebalin^{1),2)}, B. A. Shwartz^{1),2)}, D. B. Shwartz^{1),2)}, A. L. Sibidanov⁴⁾, E. P. Solodov^{1),2)}, A. A. Talyshv^{1),2)}, V. M. Titov¹⁾, S. S. Tolmachev^{1),2)}, Yu. M. Shatunov¹⁾, A. I. Vorobiov¹⁾, Yu. V. Yudin¹⁾

We present a preliminary result of the $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$ process analysis, including its cross-section measured in the 1.2–2 GeV center-of-mass energy range. The analysis is based on $\sim 120 \text{ pb}^{-1}$ of data collected by the CMD-3 detector on VEPP-2000, Novosibirsk. We developed a method to select the signal events of $e^+e^- \rightarrow K_S^\pm \pi^\mp$, and confirmed the dominance of the neutral mode $K^*(892)K$. The cross section of the process $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp$ was measured with the top statistical accuracy. So, this study allows improving the accuracy of the resonance $\phi(1680)$ width and mass measurement, checking the accuracy of isospin symmetry predictions for ratios of cross-sections, and increasing the accuracy of the hadron contribution to $(g - 2)$ of the muon.