ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2021, том 84, № 1, с. 44–47

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$ НА ДЕТЕКТОРЕ СНД ПРИ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ЦЕНТРА МАСС $\sqrt{s} = 1.3–2.0$ ГэВ

© 2021 г. М. Н. Ачасов[1),2)], А. Ю. Барняков[1)], М. Ю. Барняков[1)], К. И. Белобородов[1),2)], А. В. Бердюгин[1),2)], А. Г. Богданчиков[1)], А. А. Ботов[1)], А. Р. Бузыкаев[1)], В. Б. Голубев[1)], Т. В. Димова[1),2)], В. П. Дружинин[1),2)], Л. В. Кардапольцев[1),2)], Д. П. Коврижин[1)], А. А. Король[1),2)], Е. А. Кравченко[1),2)], А. С. Купич[1)], К. А. Мартин[1)], Н. А. Мельникова[1)], А. Е. Образовский[1)], А. П. Онучин[1)], Е. В. Пахтусова[1)*], К. В. Пугачев[1),2)], С. И. Середняков[1),2)], З. К. Силагадзе[1),2)], И. К. Сурин[1)], Ю. В. Усов[1)], А. Г. Харламов[1),2)], Д. А. Штоль[1)]

Поступила в редакцию 22.04.2020 г.; после доработки 22.04.2020 г.; принята к публикации 22.04.2020 г.

В эксперименте с детектором СНД на e^+e^--коллайдере ВЭПП-2000 в диапазоне энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 1.28–2.00$ ГэВ измерены сечения процессов $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$ и $e^+e^- \to \phi\pi^0$. Результаты согласуются с предыдущими измерениями в эксперименте BABAR и имеют сравнимую точность.

DOI: 10.31857/S0044002721010050

1. ВВЕДЕНИЕ

Реакция $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$ является одним из трех зарядовых состояний процесса $e^+e^- \to K\bar{K}\pi$, который дает значимый вклад (около 12% при энергии в системе центра масс $\sqrt{s} \approx 1.65$ ГэВ) в полное сечение e^+e^--аннигиляции в адроны и является ключевым процессом для измерения параметров резонанса $\phi(1680)$. Реакция $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$ впервые наблюдалась в эксперименте DM2 [1]. Точность измерения ее сечения была существенно улучшена в эксперименте BABAR [2], в котором процесс $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$ исследовался методом радиационного возврата. В этой же работе было показано, что при $\sqrt{s} < 2$ ГэВ процесс $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$ идет через промежуточные состояния $K^{*\pm}(892)K^{\mp}$ и $\phi(1020)\pi^0$.

2. ДЕТЕКТОР И ЭКСПЕРИМЕНТ

Детектор СНД [3] представляет собой немагнитный детектор общего назначения и состоит из трековой системы, системы идентификации частиц на основе порогового аэрогелевого черенковского счетчика, трехслойного сферического калориметра, состоящего из 1640 кристаллов NaI(Tl), и мюонной системы. Для анализа использовались данные с интегральной светимостью 26.4 пбн$^{-1}$, накопленные на e^+e^--коллайдере ВЭПП-2000 при сканировании области энергии $\sqrt{s} = 1.28–2.00$ ГэВ.

3. ОТБОР СОБЫТИЙ

События процесса $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$ регистрируются как пара заряженных частиц, сопровождаемая двумя фотонами от распада π^0. Отбирались события с двумя заряженными частицами, вылетающими из области встречи пучков и идентифицированными как каоны, и двумя и более фотонами. Для идентификации каонов используется информация о срабатывании пороговых черенковских счетчиков и об удельных ионизационных потерях в дрейфовой камере. Отобранные события подвергались процедуре кинематической реконструкции в гипотезе, что они происходят от процесса $e^+e^- \to K^+K^-\gamma\gamma$. Качество реконструкции описывалось параметром $\chi^2(KK2\gamma)$. По параметрам фотонов, подправленным в результате кинематической реконструкции, вычислялась инвариантная масса $m_{\gamma\gamma}$. Проводилась также кинематическая реконструкция в гипотезах $\pi^+\pi^-\gamma\gamma$ и $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, вычислялись соответ-

[1)]Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия.
[2)]Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия.
[*]E-mail: E.V.Pakhtusova@inp.nsk.su

ствующие χ^2. В анализе использовались события с $\chi^2(KK2\gamma) < 40$, $\chi^2(\pi\pi2\gamma) > 20$ и $\chi^2(\pi\pi2\pi^0) > 20$.

Для подавления фона от многоадронных процессов отбрасывались события с энерговыделением дополнительных фотонов больше $0.15\sqrt{s}$ и вводились ограничения на минимальный и максимальный импульсы каонов, полученные при кинематической реконструкции. Отбрасывались также события с двумя коллинеарными заряженными частицами.

4. ПРОЦЕСС $e^+e^- \to K^{*\pm}(892)K^{\mp} \to K^+K^-\pi^0$

При изучении процесса $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$ события процесса $e^+e^- \to \phi\pi^0$ исключались из рассмотрения с помощью условия $m_{\text{rec}} > 1.05$ ГэВ/c^2, где m_{rec} — масса отдачи пары фотонов, вычисленная после кинематической реконструкции.

Распределение отобранных событий по массе $m_{\gamma\gamma}$ для $\sqrt{s} = 1.60{-}1.72$ ГэВ приведено на рис. 1. Это распределение аппроксимировалось суммой распределений для сигнала и фона. Распределение для сигнала было получено по моделированию процесса $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$. Распределение для фона являлось суммой вычисленных по моделированию вкладов многоадронных процессов и неучтенного фона, который описывался линейной функцией. Результат аппроксимации показан на рис. 1.

Видимое сечение процесса $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$ вычисляется как $\sigma_{\text{vis},i} = N_{\text{exp},i}/(L_i\varepsilon_i)$, где $N_{\text{exp},i}$ — число отобранных событий изучаемого процесса, L_i — интегральная светимость, а ε_i — эффективность регистрации для i-той энергетической точки. Эффективность регистрации событий процесса $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$ как функция $\sqrt{s}$ определялась по моделированию и корректировалась, чтобы учесть неидеальность моделирования. Она растет от 1% при $\sqrt{s} = 1.2$ ГэВ до 9% при $\sqrt{s} = 1.6$ ГэВ, а затем уменьшается до 4% при $\sqrt{s} = 2$ ГэВ. Для получения экспериментальных значений борновского сечения σ_0 измеренная энергетическая зависимость видимого сечения аппроксимировалась выражением, в котором для борновского сечения использовалась упрощенная двухрезонансная модель. В результате аппроксимации определялись параметры модели и вычислялась радиационная поправка $1 + \delta(s) = \sigma_{\text{vis}}(s)/\sigma_0(s)$.

Полученные значения борновского сечения и теоретическая кривая приведены на рис. 2. Там же приведены результаты эксперимента BABAR [2]. Два измерения неплохо согласуются и сравнимы по точности.

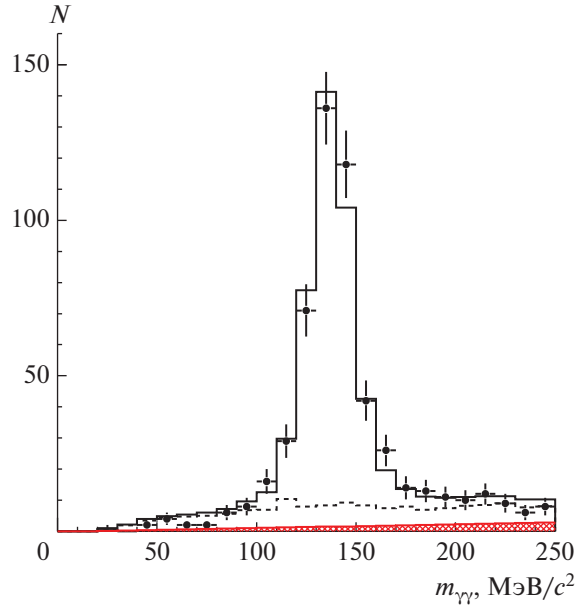

Рис. 1. Распределение по инвариантной массе двух фотонов для отобранных экспериментальных событий при $\sqrt{s} = 1.6{-}1.72$ ГэВ (точки с ошибками). Гистограмма — результат аппроксимации экспериментального распределения суммой эффекта и фона. Штриховая гистограмма показывает распределение фона. Сплошная гистограмма — вклад линейного фона.

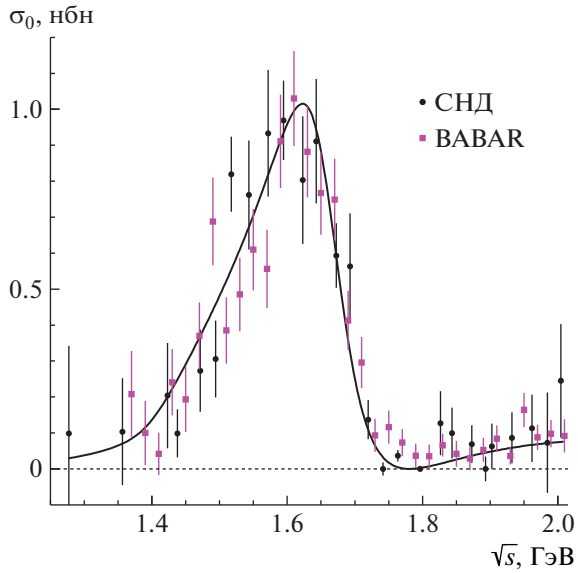

Рис. 2. Сечение процесса $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$, измеренное в эксперименте СНД (кружки), в сравнении с данными BABAR [2] (квадраты). Кривая — результат аппроксимации сечения.

5. ПРОЦЕСС $e^+e^- \to \phi\pi^0 \to K^+K^-\pi^0$

Условия отбора событий процесса $e^+e^- \to \phi\pi^0 \to K^+K^-\pi^0$ близки к условиям, описанным в разд. 3. Анализировались события с массой

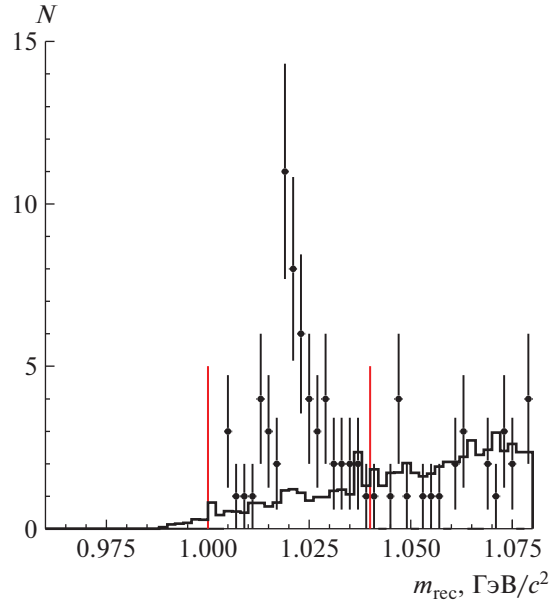

Рис. 3. Распределения по параметру m_{rec} для экспериментальных событий (точки с ошибками) и расчетного по моделированию фона (гистограмма).

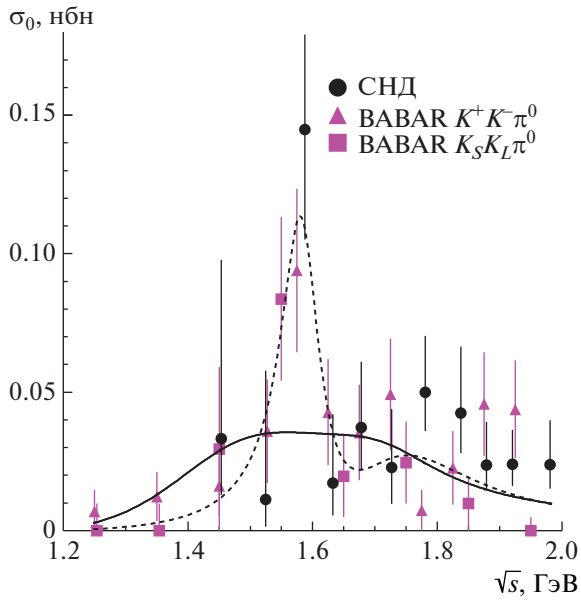

Рис. 4. Сечение процесса $e^+e^- \to \phi\pi^0$, измеренное в эксперименте СНД, в сравнении с результатами эксперимента BABAR [2, 4]. Сплошная и штриховая кривые показывают результаты аппроксимации в моделях 1 и 2 соответственно.

отдачи пары фотонов $m_{\text{rec}} < 1.11$ ГэВ/c^2. При этом мы отказались от требований на величину минимального и максимального импульсов заряженной частицы, восстановленных в модели $e^+e^- \to K^+K^-\gamma\gamma$. Для подавления фона от процесса радиационного возврата на резонанс $e^+e^- \to \phi(1020)\gamma \to K^+K^-\gamma$ было дополнительно введено ограничение на энергию наиболее энергичного фотона в событии. На рис. 3 приведено распределение по m_{rec}, полученное при ограничении $0.1 < m_{\gamma\gamma} < 0.17$ ГэВ/c^2, в котором ясно виден пик от $\phi(1020)$. На рис. 3 приведено также ожидаемое по моделированию распределение фона. Доминирующими источниками фона являются процессы $e^+e^- \to K^*K \to K^+K^-\pi^0$ и $e^+e^- \to K^+K^-(\gamma)$. Видно, что моделирование хорошо воспроизводит как полное число фоновых событий, так и форму фонового распределения.

В распределении по m_{rec} выделялись две области: сигнальная $1.00 < m_{\text{rec}} < 1.04$ ГэВ/c^2 и фоновая $1.04 < m_{\text{rec}} < 1.08$ ГэВ/c^2. Используя соотношения числа событий эффекта и фона в сигнальной и фоновой областях, полученные по моделированию, определялось число событий процесса $e^+e^- \to \phi\pi^0 \to K^+K^-\pi^0$ в каждой точке по энергии.

Для вычисления радиационных поправок и получения борновского сечения процесса $e^+e^- \to \phi\pi^0$ проводилась совместная аппроксимация данных СНД и данных двух измерений BABAR [2, 4]. Борновское сечение описывалось когерентной суммой вкладов резонансов $\rho(1450)$ и $\rho(1700)$ (модель 1). В этой модели массы и ширины резонансов фиксировались на табличных значениях [5], а сечения в максимуме резонансов и относительная фаза между их амплитудами были свободными параметрами. Полученное борновское сечение процесса $e^+e^- \to \phi\pi^0$ показано на рис. 4 вместе с измерениями BABAR и аппроксимирующей кривой. Видно, что все три измерения неплохо согласуются друг с другом ниже 1.75 ГэВ. В диапазоне 1.75–2 ГэВ имеется не статистический разброс измерений. Аппроксимирующая кривая описывает поведение сечения, наблюдаемое в эксперименте, везде, кроме узкого интервала вблизи $\sqrt{s} = 1.58$ ГэВ, где превышение над кривой наблюдается во всех трех измерениях. В целом качество аппроксимации является неудовлетворительным ($\chi^2/\text{ndf} = 50/28$). Лучшее описание данных дает модель с двумя резонансами, в которой масса и ширина одного из них фиксировалась на табличных значениях для $\rho(1700)$, а параметры второго были свободными (модель 2). В результате аппроксимации были получены следующие значения массы и ширины для этого резонанса: 1585 ± 15 МэВ и 75 ± 30 МэВ. Для этой модели $\chi^2/\text{ndf} = 38/26$ ($P(\chi^2) = 6\%$). Аппроксимирующая кривая для модели 2 также показана на рис. 4. Следует отметить, что векторный резонанс с такими параметрами в таблице свойств частиц [5] отсутствует.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты изучения процесса $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$ в диапазоне энергий в системе центра масс от 1.28 до 2 ГэВ в эксперименте СНД на e^+e^--коллайдере ВЭПП-2000. В работе показано, что в исследуемом диапазоне энергий процесс $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$ идет в основном через промежуточное состояние $K^*(892)^\pm K^\mp$. Имеется также сигнал от промежуточного состояния $\phi\pi^0$. Отдельно измерены сечения процессов $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$ (без $\phi\pi^0$) и $e^+e^- \to \phi\pi^0$. Измеренные сечения неплохо согласуются с предыдущими измерениями в эксперименте BABAR и имеют сравнимую точность.

Работа выполнена на базе УНУ “Комплекс ВЭПП-4 — ВЭПП-2000”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Bisello, G. Busetio, A. Castro, M. Nigro, L. Pescara, P. Sartori, L. Stanco, A. Antonelli, R. Baldini, M. E. Biagini, M. Schioppa, J. E. Augustin, A. Calcaterra, G. Cosme, F. Couchot, F. Fulda, *et al.*, Z. Phys. C **52**, 227 (1991).

2. B. Aubert *et al.* (BABAR Collab.), Phys. Rev. D **77**, 092002 (2008).

3. M. N. Achasov *et al.* (SND Collab.), Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **598**, 31 (2009); V. M. Aulchenko *et al.* (SND Collab.), Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **598**, 102 (2009); A. Yu. Barnyakov *et al.* (SND Collab.), Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **598**, 163 (2009); V. M. Aulchenko *et al.* (SND Collab.), Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **598**, 340 (2009).

4. J. P. Lees *et al.* (BABAR Collab.), Phys. Rev. D **95**, 052001 (2017).

5. M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018).

MEASUREMENT OF THE $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$ CROSS SECTION WITH THE SND DETECTOR IN THE CENTER-OF-MASS ENERGY $\sqrt{s} = 1.3-2.0$ GeV

M. N. Achasov[1),2)], A. Yu. Barnyakov[1)], M. Yu. Barnyakov[1)], K. I. Beloborodov[1),2)], A. V. Berdyugin[1),2)], A. G. Bogdanchikov[1)], A. A. Botov[1)], A. R. Buzykaev[1)], T. V. Dimova[1),2)], V. P. Druzhinin[1),2)], V. B. Golubev[1)], L. V. Kardapoltsev[1),2)], A. G. Kharlamov[1),2)], A. A. Korol[1),2)], D. P. Kovrizhin[1)], E. A. Kravchenko[1)], A. S. Kupich[1)], K. A. Martin[1)], N. A. Melnikova[1)], A. E. Obrazovsky[1)], A. P. Onuchin[1)], E. V. Pakhtusova[1)], K. V. Pugachev[1),2)], S. I. Serednyakov[1),2)], D. A. Shtol[1)], Z. K. Silagadze[1),2)], I. K. Surin[1)], Yu. V. Usov[1)]

[1)] *Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS, Novosibirsk, Russia*
[2)] *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

The $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0$ and $e^+e^- \to \phi\pi^0$ cross sections have been measured with the SND detector in the center-of-mass energy range $\sqrt{s} = 1.28-2.00$ GeV. The results are consistent with previous measurements in the BABAR experiment and have comparable accuracy.