

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ НА ДЕТЕКТОРЕ СНД

© 2021 г. М. Н. Ачасов^{1),2)}, А. А. Байков^{1),2)}, А. Ю. Барняков¹⁾, К. И. Белобородов^{1),2)}, А. В. Бердюгин^{1),2)}, А. Г. Богданчиков¹⁾, А. А. Ботов¹⁾, В. Б. Голубев¹⁾, Т. В. Димова^{1),2)}, В. П. Дружинин^{1),2)}, В. Н. Жабин^{1)*}, В. В. Жуланов^{1),2)}, Л. В. Кардапольцев^{1),2)}, Д. П. Коврижин¹⁾, А. А. Король^{1),2)}, А. С. Купич¹⁾, К. А. Мартин¹⁾, Н. А. Мельникова¹⁾, Н. Ю. Мучной^{1),2)}, А. Е. Образовский¹⁾, Е. В. Пахтусова¹⁾, К. В. Пугачев^{1),2)}, Я. С. Савченко^{1),2)}, С. И. Середняков^{1),2)}, З. К. Силагадзе^{1),2)}, И. К. Сурин¹⁾, Ю. В. Усов¹⁾, А. Г. Харламов^{1),2)**}, Д. А. Штоль¹⁾

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

Изучен процесс $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ в диапазоне энергий 1–2 ГэВ с лучшей в мире точностью. Данные соответствуют интегральной светимости 35 пбн^{-1} , набранной детектором СНД на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-2000. Статистическая точность измеренного сечения составляет 2–22%, в то время как систематическая неопределенность составляет 2.6–14%. Результаты согласуются с предыдущими измерениями, но имеют лучшую точность.

DOI: 10.31857/S0044002721010049

1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ является одним из процессов, доминирующих в адронном сечении в области энергий от 1 до 2 ГэВ в системе центра масс, и дает вклад в адронную поляризацию вакуума [1] и важен для вычисления аномального магнитного момента мюона $(g-2)_\mu$ [2]. При энергиях 1–2 ГэВ процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ имеет четыре основных промежуточных состояния: $\omega(782)\pi^0$, $a_1(1260)\pi$, $f_0(980)\rho$ и $\rho^+\rho^-$ (рис. 1). Механизм $\omega(782)\pi^0$ имеет наибольшее сечение в области 1–1.5 ГэВ. Пертурбативный подход в квантовой хромодинамике (КХД) не применим при энергиях ниже 2 ГэВ, и внутренняя динамика процессов обычно описывается с помощью резонансов. КХД при низких энергиях изучается уже в течение многих лет [1]. Сечение $\omega\pi^0$ используется для изучения возбужденных состояний резонансов и для проверки гипотезы сохранения векторного тока по предсказанию вероятности распада $\tau \rightarrow \omega\pi\nu$ [3]. Для описания сечения $\omega\pi^0$ обычно используется модель

векторной доминантности (VMD); в ней предполагается наличие возбужденных резонансов, ρ' и ρ'' , в промежуточном состоянии. Свойства этих резонансов извлекаются из измеренного сечения. Сечение $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ может быть независимо измерено в двух каналах: $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$. Ранее это сечение измерялось в канале $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ на НД [4] и СНД [5–8] на коллайдере ВЭПП-2М при энергиях ниже 1.4 ГэВ, на КЛОЕ [9] вблизи 1020 МэВ и на ВаВаг [10] в области 0.92–2.5 ГэВ методом радиационного возврата. Измерения в канале $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$ проводились на СНД [5, 11] и КМД-2 [12, 13].

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

СНД, сферический нейтральный детектор, представляет собой немагнитный детектор общего назначения [14], установленный на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-2000, использующем концепцию круглых пучков [15]. Также на коллайдере установлен магнитный детектор, КМД-3 [16]. СНД имеет трехслойный калориметр, состоящий из кристаллов NaI(Tl), имеющий радиационную длину $13.4 X_0$ и покрывающий 90% полного телесного угла [17]. Для детектирования заряженных частиц используется девятислойная дрейфовая камера, покрывающая 94% полного телесного угла и имеющая разрешение 0.8° [18]. Также

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

²⁾Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия.

*E-mail: V.N.Zhabin@dcsr.ru

**E-mail: A.G.Kharlamov@inp.nsk.su

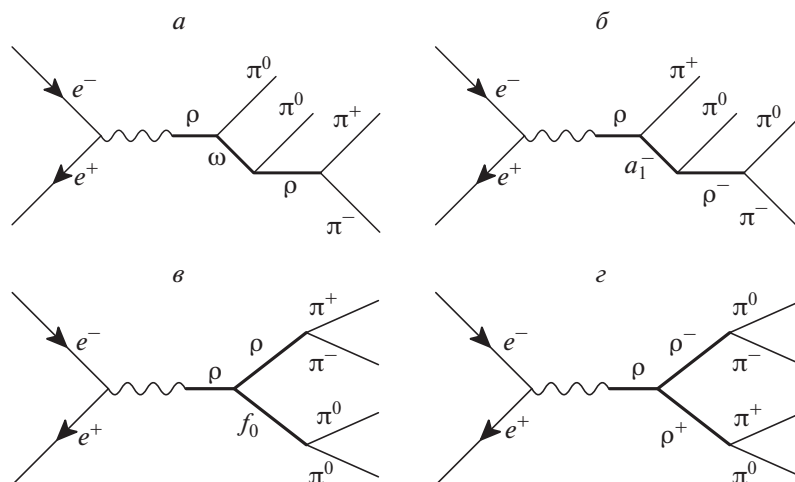


Рис. 1. Основные промежуточные состояния процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ в области 1–2 ГэВ: (а) $\omega(782)\pi^0$, (б) $a_1(1260)\pi$, (в) $f_0(980)\rho$, (з) $\rho^+\rho^-$.

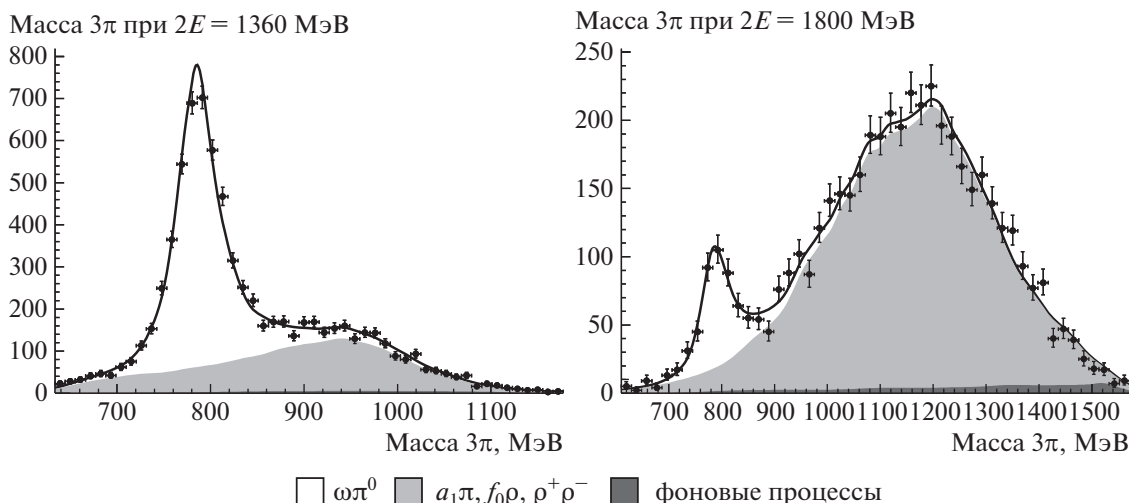


Рис. 2. Аппроксимация распределения инвариантной массы системы $\pi^+\pi^-\pi^0$, ближайшей к массе ω , в точках с различной энергией в системе центра масс.

на СНД установлен аэрогелевый черенковский счетчик и мюонная система, состоящая из пропорциональных трубок и сцинтилляционных счетчиков.

Для анализа использовались данные, набранные в 2010–2013 гг. в 56 точках по энергии от 1 до 2 ГэВ с шагом около 25 МэВ. Энергия пучков определяется с помощью методики обратного комптоновского рассеяния [19]. В анализе использовались данные экспериментов 2011 и 2012 годов с суммарной интегральной светимостью 35 пбн^{-1} . Светимость определялась с использованием событий процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$.

3. УСЛОВИЯ ОТБОРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Для анализа отбирались события с двумя треками из места встречи пучков и не менее чем с четырьмя кластерами в калориметре без ассоциированных треков, которые считались фотонами. Затем была выполнена кинематическая реконструкция в гипотезе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, требующая сохранения энергии-импульса и равенство инвариантной массы пар фотонов массе π^0 . Отбирались события, имеющие $\chi_{4\pi}^2 < 40$, где $\chi_{4\pi}^2$ — хи-квадрат использованной кинематической реконструкции.

Эффективность регистрации определялась с помощью Монте-Карло моделирования процесса

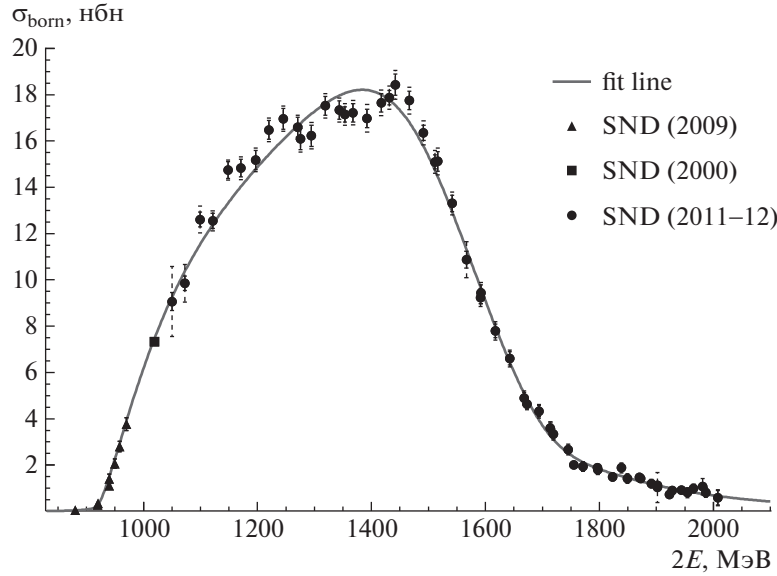


Рис. 3. Аппроксимация борновского сечения в модели векторной доминантности с учетом $\rho(770)$, $\rho(1450)$ и $\rho(1700)$. Обозначения: *fit line* — аппроксимирующая линия, *SND (2009)* [8], *SND (2000)* [5], *SND 2011–12* — точки сечения, измеренного в настоящей работе (показаны статистические и систематические ошибки).

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$. Промежуточные механизмы моделировались отдельно, чтобы найти эффективность регистрации и кинематические распределения для каждого механизма в отдельности. Использовался матричный элемент из [20], который использовался в том числе и для оценки интерференции различных механизмов. Отклик детектора моделировался с помощью Geant4 [21]. На моделированные события накладывались экспериментальные события, записанные с помощью случайного триггера, для учета влияния пучкового фона на эффективность регистрации.

Число событий процесса $\omega\pi^0$ определяется с помощью небинированной аппроксимации инвариантной массы системы $\pi^+\pi^-\pi^0$, ближайшей к массе ω мезона, в каждой точке по энергии (рис. 2) методом максимального правдоподобия с использованием RooFit [22]. Форма сигнала и фона определялась с использованием Монте-Карло моделирования каждого из процессов. Вклады промежуточных состояний процесса $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, включая сигнальный $\omega\pi^0$, были неизвестными параметрами, а остальные фоновые процессы фиксировались на основе расчета.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Видимое сечение может быть вычислено как

$$\sigma_{\text{vis}}(E) = \frac{N_{\omega\pi^0}}{\varepsilon IL},$$

где $N_{\omega\pi^0}$ — число событий процесса $\omega\pi^0$ при заданной энергии E , полученное аппроксимацией

распределения инвариантной массы, ε — эффективность регистрации с учетом условий отбора, IL — интегральная светимость в заданной точке. Эффективность регистрации определялась по Монте-Карло моделированию. К эффективности были определены поправки на неточности моделирования потери трека или фотона по экспериментальным данным с помощью кинематической реконструкции, восстанавливающей потерянный трек или фотон. Также была определена поправка, связанная с применением условия отбора $\chi^2_{4\pi} < 40$. С учетом радиационных поправок, связь между борновским и видимым сечением задается равенством

$$\sigma_{\text{vis}}(E) = \int_0^1 \sigma_{\text{born}}(E\sqrt{1-x})F(x, E)dx,$$

где $F(x, E)$ — радиатор Кураева–Фадына [23]. Полученное борновское сечение показано на рис. 3.

Борновское сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ в модели векторной доминантности записывается через сумму пропагаторов ρ -мезонов

$$\sigma_{\text{born}}(E) = \frac{4\pi\alpha^2}{E^3} \left| \sum_{i=0} \frac{g_{\rho(i)\omega\pi} M_{\rho(i)}^2 e^{i\varphi_{\rho(i)}}}{M_{\rho(i)}^2 - s - i\sqrt{s}\Gamma_{\rho(i)}(s)} \right|^2 P_f(E),$$

где $P_f(E) \approx \frac{1}{3}q_\omega^3 \text{Br}(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$ — фазовый объем конечного состояния, а $\rho(0)$ соответствует ρ , $\rho(1)$ — ρ' и т.д., $\Gamma_{\rho(i)}(s)$ — ширина $\rho(i)$ -мезона, зависящая от энергии.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведено измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ с лучшей точностью в области энергий 1–2 ГэВ в системе центра масс. Статистическая ошибка составляет 2–22%, в то время как систематическая неопределенность составляет 2.6–14%. Результаты измерения согласуются с предыдущими измерениями, но имеют лучшую точность.

Получено борновское сечение и произведена его аппроксимация в модели векторной доминантности с учетом $\rho(770)$, $\rho(1450)$ и $\rho(1700)$. Установлено, что модель векторной доминантности не способна совместно описать формфактор, измеренный в процессах $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ и $\omega \rightarrow \mu^+\mu^-\pi^0$ (измерение NA60 [24]) даже с учетом $\rho(1450)$ и $\rho(1700)$, а также параметры возбужденных $\rho(1450)$ и $\rho(1700)$ отличаются в разных каналах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Davier, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **63**, 407 (2013).
2. J. P. Miller *et al.*, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **62**, 237 (2012).
3. A. Bondar *et al.*, *Comput. Phys. Commun.* **146**, 139 (2002).
4. S. I. Dolinsky *et al.* (ND Collab.), *Phys. Lett. B* **174**, 453 (1986).
5. В. М. Аульченко и др., *ЖЭТФ* **117**, 1067 (2000).
6. M. N. Achasov *et al.* (SND Collab.), *Phys. Lett. B* **486**, 29 (2000).
7. М. Н. Ачасов и др., *ЖЭТФ* **123**, 899 (2003).
8. M. N. Achasov *et al.* (SND Collab.), *J. Exp. Theor. Phys.* **109**, 379 (2009).
9. F. Ambrosino *et al.* (KLOE Collab.), *Phys. Lett. B* **669**, 223 (2008).
10. J. P. Lees *et al.* (BaBar Collab.), *Phys. Rev. D* **96**, 092009 (2017).
11. M. N. Achasov *et al.* (SND Collab.), *Phys. Rev. D* **94**, 112001 (2016).
12. R. R. Akhmetshin *et al.* (CMD-2 Collab.), *Phys. Lett. B* **466**, 392 (1999).
13. R. R. Akhmetshin *et al.* (CMD-2 Collab.), *Phys. Lett. B* **562**, 173 (2003).
14. M. N. Achasov *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **449**, 125 (2000).
15. I. Koop, *Nucl. Phys. Proc. Suppl. B* **181–182**, 371 (2008).
16. B. Khazin, *Nucl. Phys. Proc. Suppl. B* **181–182**, 376 (2008).
17. M. N. Achasov *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **598**, 31 (2009).
18. E. G. Avdeeva *et al.*, *Phys. At. Nucl.* **73**, 1931 (2010).
19. E. V. Abakumova *et al.*, *JINST* **10**, T09001 (2015).
20. H. Czyz *et al.*, arXiv:0804.0359v2 [hep-ph].
21. Geant4 software toolkit <http://geant4.cern.ch/>
22. RooFit software toolkit <https://root.cern.ch/rootfit>
23. Э. А. Кураев, В. С. Фадин, Препринт ИЯФ 84-44.
24. NA60 Collab. (R. Arnaldi *et al.*), *Phys. Lett. B* **757**, 437 (2016).

MEASUREMENT OF $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ PROCESS CROSS SECTION USING SND DETECTOR

M. N. Achasov^{1,2)}, A. A. Baykov^{1,2)}, A. Yu. Barnyakov¹⁾, K. I. Beloborodov^{1,2)},
 A. V. Berdyugin^{1,2)}, A. G. Bogdanchikov¹⁾, A. A. Botov¹⁾, V. B. Golubev¹⁾, T. V. Dimova^{1,2)},
 V. P. Druzhinin^{1,2)}, V. N. Zhabin¹⁾, V. V. Zhulanov^{1,2)}, L. V. Kardapoltsev^{1,2)},
 D. P. Kovrizhin¹⁾, A. A. Korol^{1,2)}, A. S. Kupich¹⁾, K. A. Martin¹⁾, N. A. Melnikova¹⁾,
 N. Yu. Muchnoi^{1,2)}, A. E. Obrazovsky¹⁾, E. V. Pakhtusova¹⁾, K. V. Pugachev^{1,2)},
 Ya. S. Savchenko^{1,2)}, S. I. Serednyakov^{1,2)}, Z. K. Silagadze^{1,2)}, I. K. Surin¹⁾, Yu. V. Usov¹⁾,
 A. G. Kharlamov^{1,2)}, and D. A. Shtol¹⁾

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

²⁾*Novosibirsk State University, Russia*

The cross section of $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ process is measured in 1–2 GeV center-of-mass energy range with the world best accuracy. Analysis uses statistics collected by SND detector installed on VEPP-2000 collider with integrated luminosity 35 pb^{-1} . Statistical accuracy of the measured cross section is 2–22%, while the systematical uncertainty is 2.6–14%. The measured cross section is in the agreement with previous measurements but has better accuracy.