

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ НА ДЕТЕКТОРЕ СНД

Т. В. Димова,^{1,2,*} М. Н. Ачасов,^{1,2} А. Е. Ализзи,^{1,2} А. Ю. Барняков,^{1,3}
К. И. Белобородов,^{1,2} А. В. Бердюгин,^{1,2} А. Г. Богданчиков,¹ А. А. Ботов,¹
В. П. Дружинин,^{1,2} Р. А. Ефремов,^{1,2} В. Н. Жабин,^{1,2} П. В. Жуланова,^{1,2}
А. Р. Мамедов,^{1,2} Л. В. Кардапольцев,^{1,2} А. А. Катцин,¹ Д. П. Коврижин,¹
А. А. Король,^{1,2} А. С. Купич,^{1,2} А. П. Крюков,¹ Н. А. Мельникова,¹
Н. Ю. Мучной,^{1,2} А. Е. Образовский,¹ А. А. Ооржак,^{1,2} И. В. Овтин,^{1,2}
Е. В. Пахтусова,¹ И. А. Поломошнов,^{1,2} К. В. Пугачев,^{1,2} В. А. Романов,^{1,2}
С. И. Середняков,¹ З. К. Силагадзе,^{1,2} К. Д. Сунгуров,^{1,2} И. К. Сурин,¹
Ю. В. Усов,¹ В. Р. Хамидуллин,^{1,2} А. Г. Харламов,^{1,2} Д. А. Штоль¹

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, 630087, Новосибирск, Россия

Процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ был исследован в диапазоне энергий от 1.06 до 2.00 ГэВ на основе данных с интегральной светимостью около 600 пб⁻¹, накопленных на детекторе СНД в 2020–2024 годах. Представлен предварительный результат изучения распределений Далитта в рамках модели, включающей промежуточные состояния $\rho(770)\pi$, $\rho(1450)\pi$ и $\omega\pi^0$. Также получены энергетические зависимости сечений для указанных промежуточных состояний и относительные фазы между ними.

1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ изучался во многих экспериментах. В большинстве работ определение эффективности регистрации событий $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и аппроксимация данных по сечению проводились в предположении доминирования промежуточного

* Electronic address: baiert@inp.nsk.su

механизма $\rho(770)\pi$. Однако в измерениях SND [1, 2] и BESIII [3] было показано, что помимо вклада от промежуточного состояния $\rho(770)\pi$ существует значительный вклад от состояния $\rho(1450)\pi$, который следует учитывать.

В этой работе мы продолжаем изучение промежуточных состояний в реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области энергии от 1.060 ГэВ до 2.007 ГэВ. Исследование основано на статистике, набранной в эксперименте СНД [4] на e^+e^- коллайдере ВЭПП-2000 [5] в 2020–2024 годах. Интегральная светимость, накопленная в 74 энергетических точках, составила около 600 пб^{-1} . Для анализа распределений Далица данные были объединены в 56 энергетических интервалов. Значительное увеличение статистики и числа интервалов позволяет получить более детальную информацию о поведении сечений промежуточных состояний $e^+e^- \rightarrow \rho(770)\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \rho(1450)\pi^0$, а также об относительной фазе между их амплитудами.

2. БОРНОВСКОЕ СЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

Для отбора событий процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ применялись следующие критерии. В событии имеются 2 заряженные частицы, вылетевшие из области взаимодействия пучков ($R_{1,2} < 0.5 \text{ см}$, $|z_{1,2}| < 10 \text{ см}$ и $|z_1 - z_2| < 1.5$), и 2 фотона с энергией больше 70 МэВ каждый. При этом ограничения на нецентральные заряженные частицы не ставились. Для подавления пучкового фона и фона от процессов квантовой электродинамики накладывались ограничения на полное энергосодержание в калориметре $0.3 < E_{\text{tot}}/\sqrt{s} < 0.8$ и на энергосодержание в калориметре от заряженных частиц $E_{\text{cha}}/\sqrt{s} < 0.6$. Кроме того, для уменьшения фона от космических частиц требовалось, чтобы среднее время срабатывания калориметра относительно момента столкновения пучков [6] было в пределах 6 нс.

В связи с отсутствием магнитного поля в детекторе СНД для определения импульсов заряженных частиц проводится процедура кинематической реконструкции в определенной гипотезе, при этом также уточняются энергии и углы фотонов. На первом этапе для отобранных событий выполнялась реконструкция двух заряженных треков в общую вершину с учетом положения области взаимодействия пучков и на χ_R^2 этой реконструкции накладывалось слабое условие $\chi_R^2 < 100$. Потом применялась реконструкция в гипотезе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma$, при этом вычислялся параметр χ_E^2 , который характеризует

выполнение четырех условий сохранения энергии и импульса. Для энергий $\sqrt{s} > 1.6$ ГэВ также проводилась дополнительная реконструкция в гипотезе $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0$ при которой вычислялся параметр χ_K^2 .

На уточненные параметры частиц накладывались следующие условия: полярные углы вылета заряженных и нейтральных частиц лежат в пределах от 30° до 150° . Для исключения фона от двухчастичных процессов, $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, $\pi^+\pi^-$ и K^+K^- накладывалось условие на азимутальные углы вылета заряженных частиц $|180^\circ - |\varphi_1 - \varphi_2|| > 10^\circ$. Суммарное энергосодержание не ассоциированное с реконструированными частицами должно быть меньше 70 МэВ. Кроме того, было использовано ограничение $\chi_E^2 < 20$, а для энергий $\sqrt{s} > 1.6$ ГэВ также использовалось условие $\chi_K^2 - \chi_E^2 > 0$.

Основными источниками фона для процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в изучаемой области энергии являются процессы $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$. Кроме того, имеются вклады от многопionных процессов и процессов с каонами. Для разделения событий изучаемого и фоновых процессов в каждой точке по энергии пучка строилось распределение по инвариантной массе пары фотонов ($m_{\gamma\gamma}$). Распределение аппроксимировалось суммой распределений для эффекта и фона, полученных по моделированию. Распределение для фоновых процессов нормировалось на величину светимости в данной энергетической точке. Параметрами аппроксимации были число событий сигнала $N_{3\pi}$ и множитель к расчетному распределению для фона α_{bkg} , который учитывал неточность моделирования фоновых событий.

Используя полученные значения $N_{3\pi}$ в каждой точке по энергии и процедуру, подробно описанную в работе [2], были определены экспериментальные величины борновского сечения. В данном анализе для аппроксимации использовалась модель векторной доминантности с резонансами ω , ϕ , $\omega(1420)$, $\omega(1650)$ и дополнительным резонансом ω_X с одним промежуточным состоянием $\rho(770)\pi$. Данная модель применялась для вычисления радиационной поправки. Энергетическая зависимость борновского сечения и результат описанной выше аппроксимации показаны на рис. 1 (слева).

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

В области энергий ниже 2 ГэВ процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ может протекать не только через промежуточные состояния $\rho(770)\pi$ и $\omega\pi^0$, но и через состояния $\rho(1450)\pi$, $\rho(1700)\pi$

и $\rho_3(1690)\pi$. Процесс $e^+e^- \rightarrow \rho_3(1690)\pi$ идет в f -волне и поэтому сильно подавлен по фазовому объему (приблизительно в 26 раз по сравнению с $\rho(1450)\pi$ при $\sqrt{s} = 2$ ГэВ). Для $\rho(1700)\pi$ подавление слабее, приблизительно в 2 раза при $\sqrt{s} = 2$ ГэВ. Эти оценки подтверждаются результатами парциально-волнового анализа, проведенного в эксперименте BESIII при $\sqrt{s} = 2$ ГэВ [3]. В нашем случае ограниченная статистика и относительно высокий уровень фоновых шумов не позволяют нам разделить вклады от состояний $\rho(1450)\pi$, $\rho(1700)\pi$ и $\rho_3(1690)\pi$. Поэтому при анализе распределений Далица дифференциальное сечение $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ представляется как сумма вкладов трех промежуточных состояний:

$$\frac{d\sigma}{d\Gamma} = |\alpha A_{\rho\pi} + \beta A_{\rho'\pi} + \gamma A_{\omega\pi}|^2, \quad (1)$$

где $d\Gamma$ — элемент фазового объема. Амплитуда $A_{\rho'\pi}$ эффективно включает в себя вклады состояний $\rho(1700)\pi$ и $\rho_3(1690)\pi$. Амплитуды $A_{\rho\pi}$, $A_{\rho'\pi}$ и $A_{\omega\pi}$ являются функциями от s и импульсов пионов. Подробное описание модели приведено в работе [2]. Комплексные коэффициенты α , β и γ являются функциями от s и определяются при аппроксимации распределений Далица.

Правильный учет вклада фоновых процессов является важным аспектом при Далиц анализе, поскольку данные события могут искажать параметры модели при аппроксимации. Основным фоновым процессом является $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, доля которого начинает возрастать при энергиях $\sqrt{s} > 1.6$ ГэВ. Для подавления данного фона был использован метод машинного обучения (бустированные деревья принятия решений, BDT). В результате был получен параметр классификатора (bdt), распределения которого для событий фоновых и сигнальных процессов приведены на рис. 1 (справа). Таким образом, чтобы уменьшить вклад от фоновых процессов, условия отбора событий, описанные в секции 2, ужесточались: во всем диапазоне энергий $\sqrt{s}$ требовалось $110 < m_{\gamma\gamma} < 170$ МэВ, а для $\sqrt{s} > 1.6$ ГэВ добавлялось ограничение $\text{bdt} > 0$.

Распределение Далица строилось в переменных $M_{\pi^\pm\pi^0}^2$ и $M_{\pi^+\pi^-}^2$. Поскольку в детекторе СНД нет магнитного поля, то знак заряженной частицы не определяется. В каждом событии заряженные частицы сортировались по энергии. В комбинацию $\pi^\pm\pi^0$ в четных по номеру событиях бралась первая частица, а в нечетных — вторая. Область изменения переменных $M_{\pi^\pm\pi^0}^2$ и $M_{\pi^+\pi^-}^2$ разбивалась на 25×25 частей. Разбиение было выбрано таким образом, чтобы при максимальной энергии пик от ω мезона имел

ширину на полувысоте не менее 1.5 каналов по переменной $M_{\pi^+\pi^-}^2$.

Для того чтобы учесть разрешение детектора и зависимость эффективности регистрации от положения события в распределении Далица, аппроксимирующая функция строилась описанным в работе [2] образом. Распределения для фоновых событий определялись по моделированию процессов, перечисленных в разделе 2. Полученное распределение нормировалось на число фоновых событий, найденное при аппроксимации спектра $m_{\gamma\gamma}$. При аппроксимации распределения Далица число фоновых событий варьировалось в пределах ошибок.

Параметр $|\gamma|$ с точностью приблизительно 5% может быть определен из борновского сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ ($\sigma_{\pi^0\pi^0\gamma}$), измеренного в работе [7], с использованием соотношения:

$$\sigma_{\omega\pi}(s_i) = |\gamma(s_i)|^2 \int |A_{\omega\pi}(s_i)|^2 d\Gamma = \sigma_{\pi^0\pi^0\gamma}(s_i) \frac{B(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-)}{B(\omega \rightarrow \pi^0\gamma)}, \quad (2)$$

где $B(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-)$ и $B(\omega \rightarrow \pi^0\gamma)$ — вероятности соответствующих распадов ω -мезона [8]. При аппроксимации экспериментальных распределений параметру $|\gamma|$ разрешалось варьироваться вблизи вычисленного значения в пределах ошибок.

Экспериментальное распределение Далица искажается из-за излучения фотонов из начального состояния, и его описание с помощью формулы (1) становится не совсем корректным. Для того, чтобы учесть это искажение применялась процедура описанная в [2].

В результате аппроксимации распределений Далица определялись относительные доли событий для промежуточных состояний ($f_{\rho(770)\pi}$, $f_{\rho(1450)\pi}$), а также фазы интерференции между состояниями $\rho(1450)\pi$ и $\rho(770)\pi$ (ϕ_1), и $\omega\pi$ и $\rho(770)\pi$ (ϕ_2). Параметр $f_{\rho(770)\pi}$ связан с параметрами α , β и γ следующим образом:

$$f_{\rho(770)\pi} = \frac{\int d\Gamma |\alpha A_{\rho\pi}|^2}{\int d\Gamma |\alpha A_{\rho\pi} + \beta A_{\rho'\pi} + \gamma A_{\omega\pi}|^2}. \quad (3)$$

Начиная с $\sqrt{s} > 1.7$ ГэВ для некоторых энергетических интервалов при аппроксимации Далица распределений существуют два решения. Выбирались те решения, при которых фазы ϕ_1 и ϕ_2 не испытывают сильных изменений в соседних интервалах. Однако этот вопрос еще требует дальнейшего изучения, возможно существование альтернативного набора решений в некотором энергетическом диапазоне.

Энергетические зависимости фаз ϕ_1 и ϕ_2 , полученные в результате аппроксимации распределений Далица, приведены на рис. 2. На рис. 3 приведены измеренные сечения

процессов $e^+e^- \rightarrow \rho(770)\pi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \rho(1450)\pi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Они получены умножением полного сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, измеренного в разделе 2, на доли $f_{\rho(770)\pi}$ и $f_{\rho(1450)\pi}$.

4. АППРОКСИМАЦИЯ СЕЧЕНИЙ ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ $\rho(770)\pi$ И $\rho(1450)\pi$

В модели векторной доминантности борновское сечение процесса $e^+e^- \rightarrow S \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, где $S = \rho(770)\pi$ или $\rho(1450)\pi$ может быть представлено в следующем виде:

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow S)(s) = \frac{4\pi\alpha}{s^{3/2}} |A_S(s)|^2 P_S(s), \quad (4)$$

где $P_S(s)$ — функция, описывающая энергетическую зависимость фазового объема конечного состояния S . Для вычисления $P_{\rho(770)\pi}(s)$ использовалось выражение из работы [9]. Вычисление $P_{\rho(1450)\pi}(s)$ проводилось аналогичным образом. Амплитуда A_S является суммой вкладов векторных резонансов. Для $S = \rho(770)\pi$ использовалось выражение из работы [2] с учетом резонансов $V = \omega, \phi, \omega(1420), \omega(1650), \omega_X$. Для $S = \rho(1450)\pi$ использовались аналогичные выражения с суммированием по резонансам $V = \phi, \omega(1420)$ и $\omega(1650), \omega_X$.

Фаза $\phi_1(s)$ между амплитудами $A_{\rho(770)\pi}$ и $A_{\rho(1450)\pi}$ вычислялась следующим образом:

$$\phi_1(s) = \arg A_{\rho(1450)\pi}(s) - \arg A_{\rho(770)\pi}(s). \quad (5)$$

Массы и ширины ω - и ϕ -мезонов были взяты из таблиц [8]. При вычислении энергетической зависимости полной ширины от энергии для резонансов ω и ϕ учитывались все моды с вероятностями распадов превышающими 1%. Для резонансов $\omega(1420)$, $\omega(1650)$, ω_X использовалась не зависящая от энергии ширина. Значение фазы для $\varphi(\phi \rightarrow \rho(770)\pi) = 163^\circ$ было взято из работы [9].

Результаты аппроксимации показаны рис. 2 (слева) для фазы и на рис. 3 для сечений. Поскольку результаты предварительные, мы не приводим получившиеся параметры резонансов $\omega(1420)$, $\omega(1650)$ и ω_X .

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным с интегральной светимостью около 600 пб^{-1} , записанным в эксперименте с детектором на e^+e^- коллайдере ВЭПП-2000 в 2020-2024 годах в диапазоне энергии

от 1.060 до 2.007 ГэВ было проведено исследование процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Для 56 энергетических интервалов были проанализированы распределения Далица и получены предварительные сечения процессов $e^+e^- \rightarrow \rho(770)\pi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \rho(1450)\pi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, а также относительные фазы между амплитудами $\rho(1450)\pi$ и $\rho(770)\pi$ и $\omega\pi$ и $\rho(770)\pi$. Была проведена совместная аппроксимация измеренных сечений процессов $e^+e^- \rightarrow \rho(770)\pi$ и $e^+e^- \rightarrow \rho(1450)\pi$ и относительной фазы между амплитудами $\rho(1450)\pi$ и $\rho(770)\pi$.

-
1. M. N. Achasov *et al.* (SND Collaboration), Eur. Phys. J. C 80 (2020), 993
 2. M. N. Achasov *et al.* (SND Collaboration), Physics of Atomic Nuclei 87 (2024) 6, 747-762.
 3. M. Ablikim *et al.* (BESIII Collaboration), (2024), arXiv:2401.14711 [hep-ex]
 4. M. N. Achasov, D.E.Berkaev, A.G.Bogdanchikov *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., Sect. A **598**, 31 (2009); V. M. Aulchenko, A.G.Bogdanchikov, A.A.Botov *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., Sect. A **598**, 102 (2009); A. Yu. Barnyakov, M.Yu.Barnyakov, K.I.Beloborodov *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., Sect. A **598**, 163 (2009); V. M. Aulchenko, A.G.Bogdanchikov, A.A.Botov *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., Sect. A **598**, 340 (2009).
 5. P. Yu. Shatunov *et al.*, Part. Nucl. Lett. 13, 995 (2016).
 6. N.A.Melnikova, M.N.Achasov, A.A. Botov *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. Sect. A **1056**, 168664 (2023).
 7. M. N. Achasov *et al.* (SND Collaboration), Phys. Rev. D **94**, 112001 (2016).
 8. R.L. Workman et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022) and 2023 update
 9. M. N. Achasov *et al.* (SND Collaboration), Phys. Rev. D **68**, 052046 (2003).
 10. A. Aloisio *et al.* (KLOE Collaboration), Phys. Lett. B **561**, 55 (2003) Erratum: [Phys. Lett. B **609**, 449 (2005)].

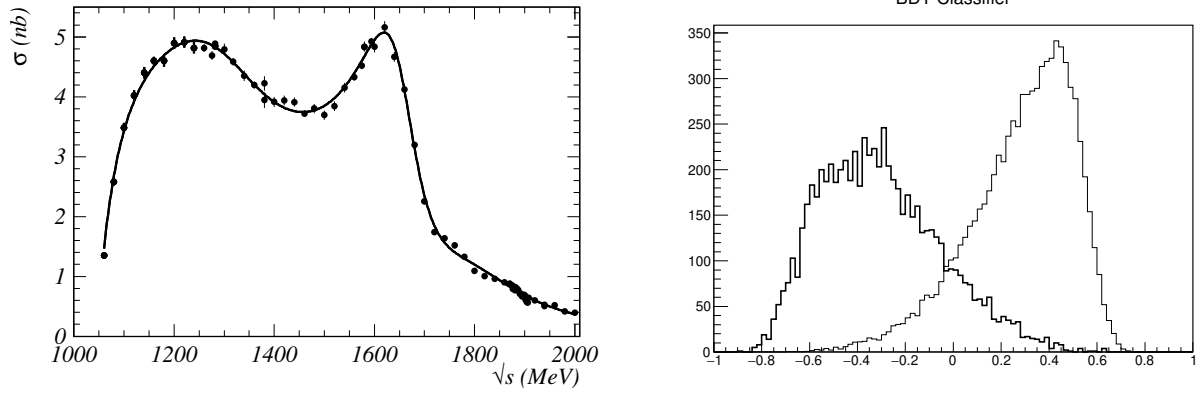


Рис. 1. Слева: Энергетическая зависимость борновского сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ (точки с ошибками). Кривая — результат аппроксимации, описанной в тексте. Справа: Распределения параметра классификатора для основного фоновое $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ (жирная гистограмма) и сигнального $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ (тонкая гистограмма) процессов в энергетической точке $\sqrt{s} = 1.8$ ГэВ.

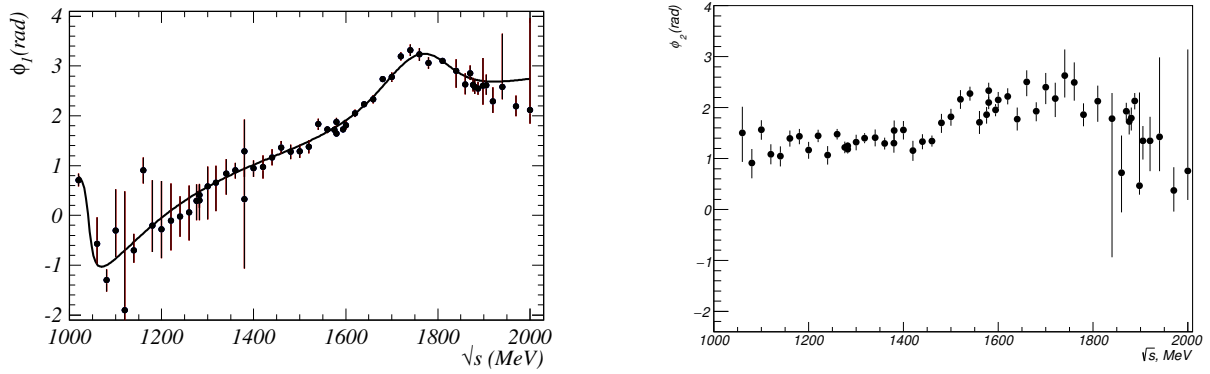


Рис. 2. Полученные в результате аппроксимации распределений Далица фазы интерференции ϕ_1 (слева) и ϕ_2 (справа). На рисунке слева также присутствует результат измерения KLOE[10] $\phi_1(m_\phi) = 0.71 \pm 0.13$. Кривая — результат аппроксимации, описанной в тексте.

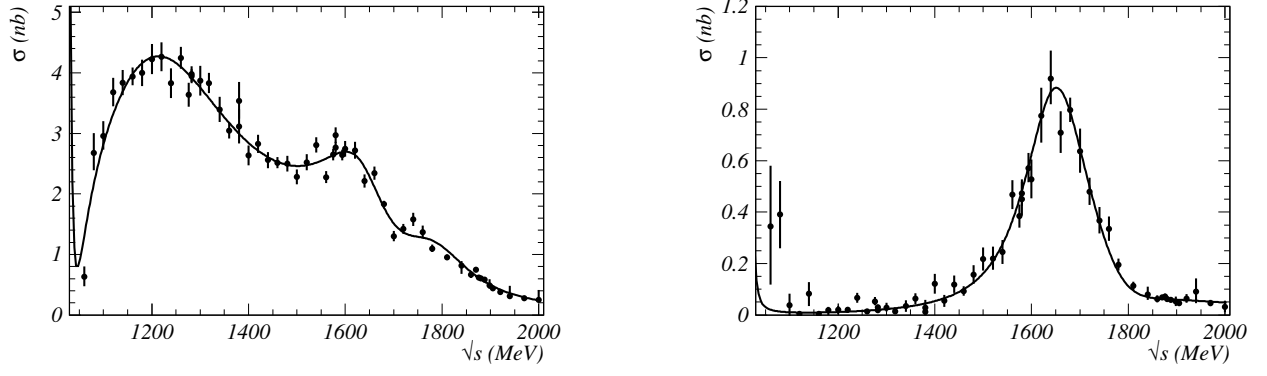


Рис. 3. Измеренные борновские сечения процессов $e^+e^- \rightarrow \rho(770)\pi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ (слева) и $e^+e^- \rightarrow \rho(1450)\pi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ (справа). Кружки — сечение, полученное в данной работе, кривые — результаты аппроксимации, описанной в тексте.

STUDY OF THE $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ PROCESS DYNAMICS AT THE SND DETECTOR

T.V. Dimova^{1,2}, M.N. Achasov^{1,2}, A.E. Alizzi^{1,2}, A.Yu. Barnyakov^{1,3}, K.I. Beloborodov^{1,2},
A.V. Berdyugin^{1,2}, A.G. Bogdanchikov¹, A.A. Botov¹, V.P. Druzhinin^{1,2}, R.A. Efremov^{1,2},
V.N. Zhabin¹, P.V. Zhulanova^{1,2}, A.R. Mamedov^{1,2}, L.V. Kardapoltsev^{1,2}, A.A. Kattzin¹,
V.R. Khamidullin^{1,2}, A.G. Kharlamov^{1,2}, D.P. Kovrizhin¹, A.A. Korol^{1,2}, A.S. Kupich^{1,2},
A.P. Kryukov¹, N.A. Melnikova¹, N.Yu. Muchnoi^{1,2}, A.E. Obrazovsky¹, A.A. Oorzhak^{1,2},
I.V. Ovtin^{1,2}, E.V. Pakhtusova¹, I.A. Polomoshnov^{1,2}, K.V. Pugachev^{1,2}, V.A. Romanov^{1,2},
S.I. Serednyakov^{1,2}, Z.K. Silagadze^{1,2}, K.D. Sungurov^{1,2}, I.K. Surin¹, Yu.V. Usov¹,
D.A. Shtol¹,

¹Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ process was investigated in the energy range from 1.06 to 2.00 GeV based on data with an integrated luminosity of about 600 pb⁻¹, accumulated at the SND detector in 2020–2024. A preliminary result of studying the Dalitz distributions is presented within the framework of a model including the intermediate states $\rho(770)\pi$, $\rho(1450)\pi$ and $\omega\pi^0$. The energy dependences of the cross sections for these intermediate states and the relative phases between them are also obtained.