

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ С ДЕТЕКТОРОМ КМД-3 НА ВЭПП-2000

Г. В. Федотович^{1,2}, С. С. Толмачев^{1,2,*}, В. Д. Кольжецов^{1,2},
Д. В. Шёлковый³, Д. С. Василевская³
от имени коллаборации КМД-3

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

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Институт физики НАН Беларуси, Минск

Представлены результаты измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области энергии в системе центра масс ниже 1 ГэВ на основе интегральной светимости $51,4 \text{ пб}^{-1}$. Систематическая погрешность измерения сечения оценивается в $\sim 2,4\%$. Измеренное сечение анализируется в рамках модели векторной доминантности с учетом интерференции резонансов $\rho, \omega, \phi, \omega', \omega''$. Получены предварительные параметры ρ - и ω -мезонов.

The paper presents the results of the measurement of the cross section of the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ in the energy region in the center-of-mass system below 1 GeV based on an integrated luminosity of 51.4 pb^{-1} . The systematic error in the measured cross section is estimated to be $\sim 2.4\%$. The measured cross section is analyzed within the framework of the vector dominance model taking into account the interference of resonances $\rho, \omega, \phi, \omega', \omega''$. The preliminary parameters of ρ and ω mesons are obtained.

PACS: 13.66.Bc; 13.60.Le

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Институте ядерной физики Сибирского отделения РАН ведутся эксперименты с криогенным магнитным детектором (КМД-3) на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 [1]. Основная физическая программа [2] экспериментов включает прецизионное измерение адронных сечений, исследование динамики образования многоадронных состояний и физики адронных взаимодействий в диапазоне энергий легких кварков. Энергетический диапазон коллайдера ВЭПП-2000 дает основной вклад ($\sim 91\%$) для расчетов адронного вклада в аномальный магнитный момент (АММ) мюона и определяет его точность [3].

* E-mail: S.S.Tolmachev@inp.nsk.su

В последние несколько лет в области ρ - ω -мезонов в экспериментах с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000 проведена серия экспериментов по повышению точности измерения адронных сечений, где в основном доминируют каналы $e^+e^- \rightarrow 2\pi$ и $e^+e^- \rightarrow 3\pi$. Процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ дает наибольший вклад в адронную поляризацию вакуума и имеет первостепенное значение для улучшения точности вычисления адронного вклада в АММ. Недавно коллаборация КМД-3 сообщила новые результаты в измерении сечения этого процесса [4, 5]. Это измерение показывает большее сечение $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в сравнении с результатами предыдущих экспериментов, что приводит к релаксации напряжения между экспериментально измеренным значением АММ мюона и его предсказанием в рамках СМ. Канал $e^+e^- \rightarrow 3\pi$ является вторым по величине при вычислении адронного вклада в АММ мюона, погрешность которого составляет $\sim 20\%$ от полной.

Предварительный результат измерения сечения процесса $\pi^+\pi^-\pi^0$ детектором BESIII [6] с использованием метода Initial State Radiation является более близким к значению, полученному коллаборацией SND [7]. Та же ситуация относится и к новому измерению BaBar [8], которое показало в области ω -мезона разницу в 7% в сравнении с сечениями, полученными на КМД-2. Эта разница сравнима с точностью измерения АММ мюона в эксперименте E969 (0,1 ppm), что, в свою очередь, требует более точных измерений адронных сечений в каналах реакции $e^+e^- \rightarrow 2\pi$ и $e^+e^- \rightarrow 3\pi$.

В статье представлены предварительные результаты анализа процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ на основе статистики, набранной в сезонах 2013 и 2018 гг., соответствующей интегральной светимости $51,4 \text{ пб}^{-1}$ в области энергий от 740 до 984 МэВ в системе центра масс. Светимость коллайдера ВЭПП-2000 измерялась с использованием процесса Vhabh -рассеяния на большие углы вместе с процессом двухквантовой аннигиляции с систематической неопределенностью около 1,5% [9].

ДЕТЕКТОР КМД-3 И КОЛЛАЙДЕР ВЭПП-2000

Криогенный магнитный детектор КМД-3 — детектор общего назначения, предназначенный для измерения адронных сечений в диапазоне энергий центра масс ниже 2 ГэВ. Схема детектора представлена на рис. 1.

Детектор КМД-3 состоит из центральной дрейфовой камеры (ДК), размещенной внутри соленоида с магнитным полем 1,3 Тл, и электромагнитной калориметрической системы. Цилиндрическая часть системы электромагнитного калориметра включает жидкоксероновый калориметр (LXe) общей толщиной 5,1 радиационной длины ($5,1X_0$) и калориметр на основе кристаллов йодида цезия (CsI) ($8,3X_0$). Торцевой калориметр на основе кристаллов германата висмута (BGO) толщиной $13,4X_0$ размещен по обе стороны от фланцев ДК. Подробное описание детектора КМД-3 можно найти в [10].

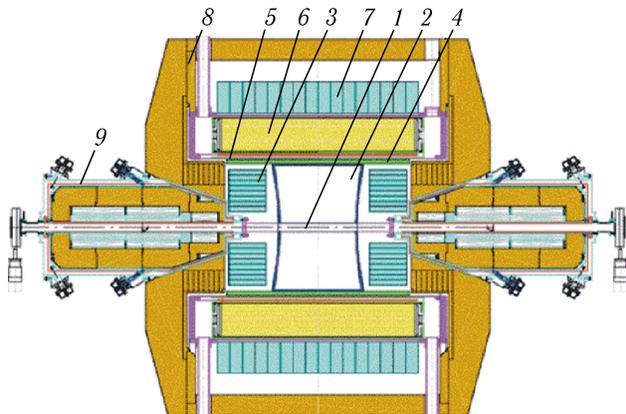


Рис. 1. Криогенный магнитный детектор КМД-3: 1 — вакуумная камера; 2 — дрейфовая камера; 3 — калориметр ВГО; 4 — Z-камера; 5 — сверхпроводящий соленоид; 6 — калориметр LXe; 7 — калориметр CsI; 8 — ярмо магнита; 9 — соленоиды ВЭПП-2000

Коллайдер ВЭПП-2000 охватывает диапазон энергий от $\sqrt{s} = 0,32$ до 2,07 ГэВ. Уникальная оптика «круглых пучков» позволила достичь пиковой светимости до $9 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Для мониторинга энергии пучка использовались комптоновские фотоны, образующиеся в результате обратного рассеяния лазерного света на позитронах встречного пучка. Этот метод позволил нам контролировать разброс энергии пучка и отслеживать его с систематической погрешностью с точностью 40 кэВ [11].

КРИТЕРИИ ОТБОРА СОБЫТИЙ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

Типичное событие процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ содержит два неколлинеарных противоположно заряженных трека, исходящих из области взаимодействия пучков, и два фотона в калориметрической системе. Физические фоновые события в области энергий ниже $\sqrt{s} < 1$ ГэВ в основном принадлежат следующим процессам: $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$, $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$, $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$, которые также дают два неколлинеарных противоположно заряженных трека в дрейфовой камере, когда начальными частицами испускается жесткий радиационный фотон. Если к таким событиям случайным образом подмешивается дополнительный фоновый фотон, то такие события могут имитировать сигнальные события, и необходимы критерии отбора для их подавления.

Дополнительный фон создают также космические частицы и частицы из пучка при их рассеянии и последующем взаимодействии с веществом детектора и элементами ускорителя. Однако такие события чаще всего имеют вершину вне области взаимодействия пучков.

Выбранные двухтрековые события вместе с любыми двумя фотонами являются кандидатами для дальнейшего анализа и подвергаются кинематической реконструкции в четырех гипотезах: $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$, $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$. Используемый пакет кинематической реконструкции описан в [12]. Для отбора сигнальных событий применяются ограничения на значения χ^2 , которые уменьшают вклад фоновых событий до незначительного уровня. Предварительные результаты по измерению параметров ω -мезона с детектором КМД-3 без использования пакета кинематической реконструкции изложены в статье [13].

Алгоритм выделения кандидатов в сигнальные события основан на том факте, что квадрат распределения недостающей массы двух пионов M_{miss}^2 из $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ имеет пик в районе квадрата массы π^0 -мезона. Количество сигнальных событий определяется из аппроксимации экспериментального распределения по M_{miss}^2 суммой функций, описывающих форму сигнала и фона, с использованием программного пакета RootFit [14] (рис. 2).

Эффективность регистрации событий изучаемого процесса ϵ_{MC} определяется из моделирования с промежуточным состоянием $\rho\pi$ программой CMD3SIM, разработанной на основе пакета GEANT4 [15].

Детектор КМД-3 имеет заряженный и нейтральный триггеры. Заряженный триггер обрабатывает информацию только с трековой системы, а нейтральный — данные только с калориметров. Поскольку режимы работы триггеров независимы, это позволяет определять эффективность на основе экспериментальных данных. Средняя поправка на эффективность триггера δ_{trig} составила менее 0,1 %.

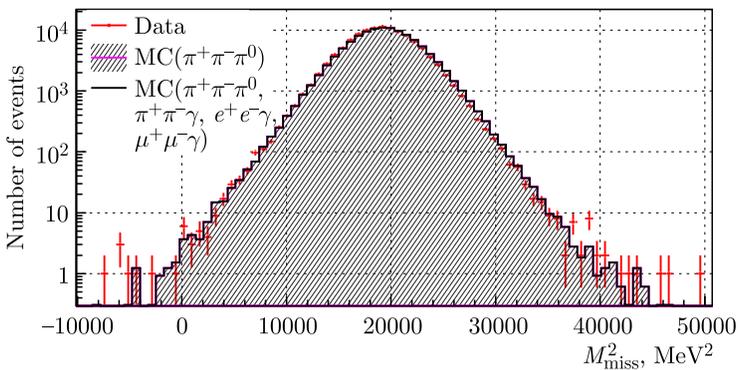


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Распределение M_{miss}^2 . Красные точки — экспериментальные данные; пурпурная гистограмма — распределение по M_{miss}^2 моделирования сигнала процесса; черная линия — сумма моделирований сигнала и фонов. Используется логарифмическая шкала

Анализ экспериментальных данных показывает, что существует часть событий, где один из треков или π^0 -мезон должны быть зарегистрированы в чувствительном объеме ДК или калориметра, но по разным причинам не восстанавливаются. Моделирование Монте-Карло не воспроизводит все детали отклика детектора и, следовательно, не полностью описывает эффекты потери треков или фотонов. В ходе изучения событий с одним недостающим треком или невосстановленным π^0 в экспериментальных данных и моделировании были определены поправки к эффективности $\delta_{\pm}(s)$ и $\delta_{\pi^0}(s)$.

Анализ поведения измеренного сечения в зависимости от критериев отбора показал, что систематические отклонения сечения не превышают 2%. Таким образом, суммарная систематическая погрешность измерения сечения с учетом систематической погрешности измерения светимости составляет $\sim 2,4\%$.

СЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

Борновское сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ вычисляется согласно выражению

$$\sigma = \frac{N_{\text{sig}}}{L \varepsilon_{\text{MC}} (1 + \delta_{\text{trig}}) (1 + \delta_{\pi^0}) (1 + \delta_{\pm}) (1 + \delta_{\text{rad}})}, \quad (1)$$

где N_{sig} — количество событий 3π ; L — интегральная светимость. Радиационная поправка [16], $1 + \delta_{\text{rad}}$, рассчитывается итерационным методом с учетом разброса энергии электронов (позитронов) в с. с. м., $\sigma_E = 350$ кэВ. Полученные значения борновского сечения аппроксимируются функцией в рамках модели векторной доминантности, учитывающей интерференцию резонансов $\rho, \omega, \phi, \omega', \omega''$, а также зависимость полных ширин от энергии. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ записывается следующим образом:

$$\sigma(s) = \frac{F_{3\pi}(s)}{s^{3/2}} \left| \sum_V e^{i\phi_{\omega V}} \sqrt{\frac{\sigma(V \rightarrow 3\pi) M_V}{F_{3\pi}(M_V^2)}} \frac{\Gamma_V M_V^2}{D_V(s)} \right|^2, \quad (2)$$

где

$$D_V(s) = s - M_V^2 + i\sqrt{s}\Gamma_V(s); \quad (3)$$

$F_{3\pi}(s)$ — фазовый объем в предположении $\rho\pi$ -механизма образования $\pi^+\pi^-\pi^0$; $V = \rho, \omega, \phi, \omega', \omega''$; M_V — масса векторного мезона; $\Gamma_V(s)$ — полная ширина; $\phi_{\omega V}$ — фаза относительной интерференции между векторным мезоном V и ω .

При аппроксимации параметры $\rho, \phi, \omega', \omega''$ фиксируются согласно PDG [18], а параметры $M_\omega, \Gamma_\omega, \sigma(\omega \rightarrow 3\pi), \sigma(\rho \rightarrow 3\pi), \phi_{\omega\rho}$ являются свободными. Результаты аппроксимации показаны в таблице. На рис. 3 собраны результаты измерения борновского сечения детектором КМД-3, а также в экспериментах СНД, КМД-2 и ВаВаг.

Результаты аппроксимации борновского сечения. Первая погрешность — статистическая, вторая — систематическая

Параметр	Значение
M_ω , МэВ	$782,83 \pm 0,02 \pm 0,05$
Γ_ω , МэВ	$8,62 \pm 0,06 \pm 0,09$
$\sigma(\omega \rightarrow 3\pi)$, нб	$1660 \pm 8 \pm 39$
$\sigma(\rho \rightarrow 3\pi)$, нб	$0,5 \pm 0,1 \pm 0,4$
$\phi_{\omega\rho}$, °	$-114 \pm 7 \pm 25$
χ^2/ndf	106/96

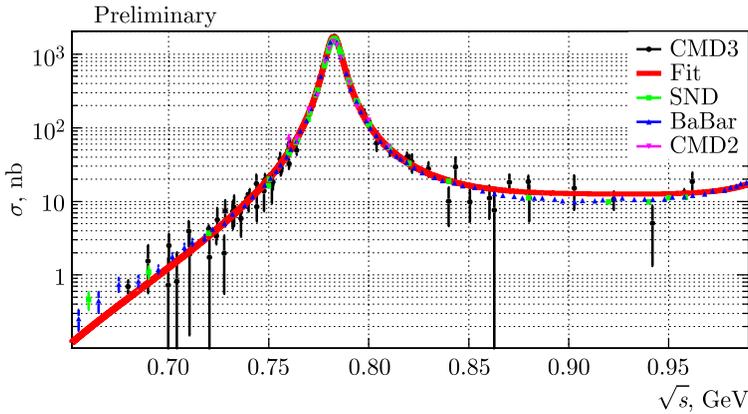


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Борновское сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Черные кружки соответствуют измерениям КМД-3, зеленые квадраты — эксперимент SND [7]; синие треугольники — эксперимент BaBar [8]; пурпурные перевернутые треугольники — эксперимент КМД-2 [17]; красная линия — результат аппроксимации данных КМД-3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены предварительные результаты измерений борновского сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области энергий от 0,66 до 0,98 ГэВ. Анализ основан на статистике, набранной в 2013 и 2018 гг., и соответствует интегральной светимости $\sim 51,4 \text{ пб}^{-1}$.

Экспериментальные данные подгоняются в рамках модели векторной доминантности суммой вкладов следующих векторных мезонов: $\rho, \omega, \phi, \omega', \omega''$. В результате получены параметры резонансов ω и ρ , которые согласуются с SND [7] и BaBar [8].

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность коллегам ВЭПП-2000 за обеспечение безупречной работы комплекса ВЭПП-2000 во время набора статистики.

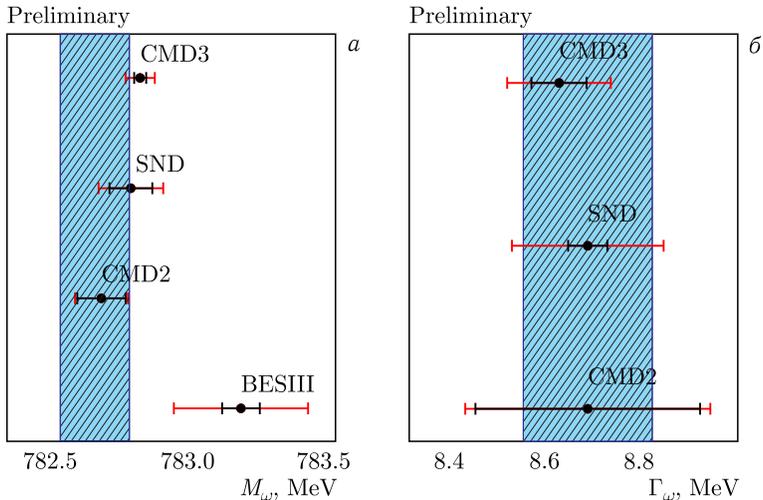


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Сравнение результатов аппроксимации: а) масса ω -мезона; б) ширина ω -мезона. Синяя заштрихованная полоса указывает на среднемировое значение; черные полосы — статистическая неопределенность; красные — полная неопределенность

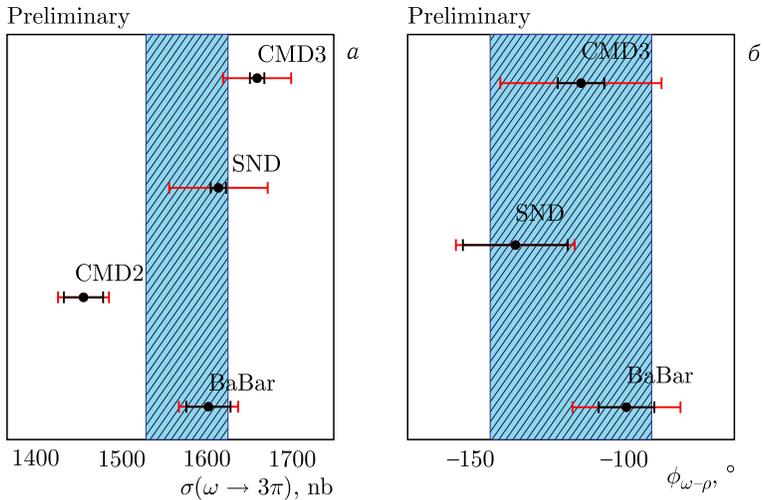


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Сравнение результатов аппроксимации: а) сечение в пике ω -мезона в канале 3π ; б) относительная фаза смешивания ρ - и ω -мезонов. Синяя заштрихованная полоса указывает на среднемировое значение; черные полосы — статистическая неопределенность; красные — полная неопределенность

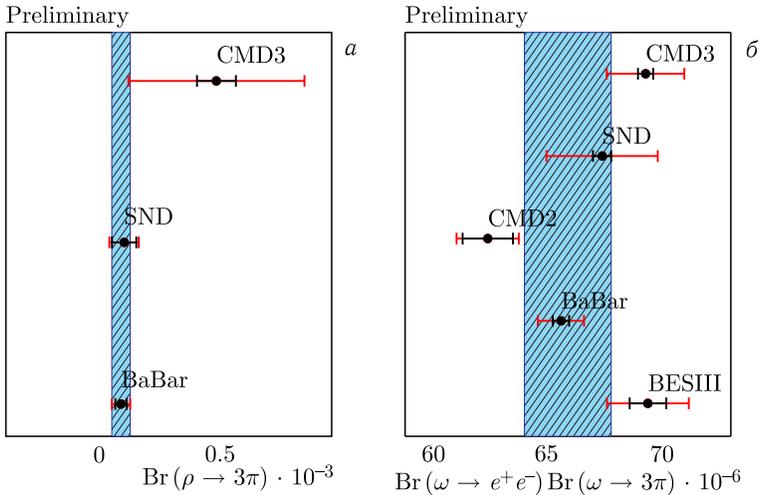


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Сравнение результатов аппроксимации: а) бранчинг распада ρ -мезона в 3π ; б) произведение бранчингов распада $\omega \rightarrow e^+e^-$, $\omega \rightarrow 3\pi$. Синяя заштрихованная полоса указывает на среднее значение согласно PDG; черные полосы — статистическая неопределенность; красные — полная неопределенность

Финансирование. Работа поддержана грантами Российского научно-го фонда № 23-42-10025, Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № F23RSF-118.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shatunov P. Y., Berkaev D. E., Zharinov Y. M., Zemlyansky I. M., Kasaev A. S., Kyrpotin A. N., Koop I. A., Lysenko A. P., Otboev A. V., Perevedentsev E. A., Prosvetov V. P., Rogovsky Y. A., Romanov A. L., Senchenko A. I., Skrinsky A. N., Shatunov Y. M., Shwartz D. B. Status and Perspectives of the VEPP-2000 // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, No. 7. P. 995–1001; <http://dx.doi.org/10.1134/S154747711607044X>.
2. Khazin B. Physics and Detectors for VEPP-2000 // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2008. V. 181–182. P. 376–380; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2008.09.068>.
3. Abi B. et al. (Muon $g-2$ Collab.). Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 126. P. 141801; [arXiv:2104.03281](https://arxiv.org/abs/2104.03281).
4. Ignatov F. V. et al. (CMD-3 Collab.). Measurement of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ Cross Section from Threshold to 1.2 GeV with the CMD-3 Detector // Phys. Rev. D. 2024. V. 109. P. 112002; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.109.112002>.

5. *Ignatov F. V. et al. (CMD-3 Collab.)*. Measurement of the Pion Form Factor with CMD-3 Detector and Its Implication to the Hadronic Contribution to Muon ($g - 2$) // *Phys. Rev. Lett.* 2024. V. 132. P. 231903; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.132.231903>.
6. *Ablikim M. et al. (BESIII Collab.)*. Measurement of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ Cross Section from 0.7 GeV to 3.0 GeV via Initial-State Radiation. arXiv:1912.11208. 2019.
7. *Achasov M. N. et al. (SND Collab.)*. Study of the Process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ in the Energy Region \sqrt{s} below 0.98-GeV // *Phys. Rev. D.* 2003. V. 68. P. 052006; arXiv:hep-ex/0305049.
8. *Lees J. P. et al. (BaBar Collab.)*. Study of the Process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ Using Initial State Radiation with BaBar // *Phys. Rev. D.* 2021. V. 104, No. 11. P. 112003; arXiv:2110.00520.
9. *Ryzhenenkov A. et al. (CMD-3 Collab.)*. Current Status of Luminosity Measurement with the CMD-3 Detector at the VEPP-2000 Collider // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2019. V. 212. P. 04011; <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201921204011>.
10. *Fedotov G. V. et al. (CMD-3 Collab.)*. CMD-3 Detector for VEPP-2000 // *Nucl. Phys. B. Proc. Suppl.* 2006. V. 162. P. 332–338.
11. *Abakumova E. V., Achasov M. N., Berkaev D. E., Kaminsky V. V., Muchnoi N. Y., Perevedentsev E. A., Pyata E. E., Shatunov Y. M.* Backscattering of Laser Radiation on Ultrarelativistic Electrons in a Transverse Magnetic Field: Evidence of MeV-Scale Photon Interference // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 110, No. 14; <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.140402>.
12. *Gribanov S., Popov A.* Kinematic and Vertex Fitting Package for the CMD-3 Experiment // *J. Instrum.* 2023. V. 18, No. 05. P. P05030; <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/18/05/P05030>.
13. *Vasileuskaya D. S., Grigoriev D. N., Ivanov V. L., Kazanin V. F., Kozyrev A. N., Ruban A. A., Ryzhenenkov A. E., Tolmachev S. S., Fedotov G. V., Shemyakin D. N., Shoukavy D. V., Epshteyn L. B.* The Measurement of the Omega Meson Parameters with the CMD-3 Detector at the Electron–Positron Collider VEPP-2000 // *Proc. Nat. Acad. Sci. Belarus. Phys. Math. Ser.* 2022. V. 58, No. 3. P. 327–336.
14. *Brun R., Rademakers F.* ROOT — An Object Oriented Data Analysis Framework // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1997. V. 389. P. 81–86.
15. *Agostinelli S. et al. (GEANT4 Collab.)*. GEANT4 — A Simulation Toolkit // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2003. V. 506. P. 250–303.
16. *Gribanov S. S., Popov A. S.* A New Method for Obtaining a Born Cross Section Using Visible Cross Section Data from e^+e^- Colliders // *JHEP.* 2021. V. 11. P. 203; arXiv:2108.07539.
17. *Akhmetshin R. R. et al. (CMD-2 Collab.)*. Reanalysis of Hadronic Cross-Section Measurements at CMD-2 // *Phys. Lett. B.* 2004. V. 578. P. 285–289; arXiv:hep-ex/0308008.
18. *Zyla P. et al. (Particle Data Group Collab.)*. Review of Particle Physics // *PTEP.* 2020. V. 2020, No. 8. P. 083C01.