

ISSN 1561-2430 (Print)
 ISSN 2524-2415 (Online)
 УДК 539.12
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2022-58-3-327-336>

Поступила в редакцию 31.03.2022
 Received 31.03.2022

Д. С. Василевская¹, Д. Н. Григорьев^{2,3,4}, В. Л. Иванов^{2,3}, В. Ф. Казанин^{2,3},
 А. Н. Козырев^{2,3}, А. А. Рубан^{2,3}, А. Е. Рыжененков^{2,3}, С. С. Толмачев², Г. В. Федотович^{2,3},
 Д. Н. Шемякин^{2,3}, Д. В. Шёлковий¹, Л. Б. Эпштейн^{2,4}

¹Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
 Минск, Республика Беларусь

²Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук,
 Новосибирск, Российская Федерация

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация

⁴Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Российская Федерация

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОМЕГА-МЕЗОНА С ДЕТЕКТОРОМ КМД-3 НА ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-2000

Аннотация. Измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области энергий ω -мезона с использованием интегральной светимости 40 пб^{-1} , набранной детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 в 2013–2018 гг. Параметры ω -мезона: $M_\omega = 782,67 \pm 0,01 \pm 0,1 \text{ МэВ}$, $\Gamma_\omega = 8,56 \pm 0,02 \pm 0,07 \text{ МэВ}$, $\sigma_0(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi) = 1629 \pm 3 \pm 36 \text{ нб}$ получены с точностью, сопоставимой и даже превышающей предыдущие эксперименты.

Ключевые слова: физика элементарных частиц, процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, борновское сечение, детектор КМД-3, параметры ω -мезона

Для цитирования. Измерение параметров омега-мезона с детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 / Д. С. Василевская [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2022. – Т. 58, № 3. – С. 327–336. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2022-58-3-327-336>

Darya S. Vasileuskaya¹, Dmitry N. Grigoriev^{2,3,4}, Vyacheslav L. Ivanov^{2,3}, Vasily F. Kazanin^{2,3},
 Aleksey N. Kozyrev^{2,3}, Aleksandr A. Ruban^{2,3}, Artem E. Ryzhenenkov^{2,3}, Sergey S. Tolmachev²,
 Gennady V. Fedotovitch^{2,3}, Dmitry N. Shemyakin^{2,3}, Dzmitry V. Shoukavy¹, Leonid B. Epshteyn^{2,4}

¹B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
 Novosibirsk, Russian Federation

³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

⁴Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

THE MEASUREMENT OF THE OMEGA MESON PARAMETERS WITH THE CMD-3 DETECTOR AT THE ELECTRON-POSITRON COLLIDER VEPP-2000

Abstract. The cross section of the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ was measured with the CMD-3 detector at the electron-positron collider VEPP-2000 in the ω meson energy region based on the data collected in 2013–2018 and corresponding to an integrated luminosity of 40 pb^{-1} . The parameters of the ω -meson: $M_\omega = 782.67 \pm 0.01 \pm 0.1 \text{ MeV}$, $\Gamma_\omega = 8.56 \pm 0.02 \pm 0.07 \text{ MeV}$, $\sigma_0(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi) = 1629 \pm 3 \pm 36 \text{ nb}$ with the precision match or even exceeding the previous data are obtained.

Keywords: elementary particle physics, process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, Born cross section, CMD-3 detector, ω -meson parameters

For citation. Vasileuskaya D. S., Grigoriev D. N., Ivanov V. L., Kazanin V. F., Kozyrev A. N., Ruban A. A., Ryzhenenkov A. E., Tolmachev S. S., Fedotovitch G. V., Shemyakin D. N., Shoukavy Dz. V., Epshteyn L. B. The measurement of the omega meson parameters with the CMD-3 detector at the electron-positron collider VEPP-2000. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2022, vol. 58, no. 3, pp. 327–336 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2022-58-3-327-336>

Введение. Стандартная модель (СМ) позволяет с хорошей точностью описать большинство полученных экспериментальных данных в физике элементарных частиц. Несмотря на успехи СМ в мире ведутся эксперименты поиска физических явлений, выходящих за ее рамки, поскольку Стандартную модель нельзя считать полностью завершенной теорией. Ряд астрофизических наблюдений указывают, что СМ неполна на фундаментальном уровне, поэтому для решения

этих проблем был предложен целый ряд ее расширений: суперсимметричные теории, теории великого объединения, модели с дополнительными измерениями пространства-времени и др. Теории, выходящие за рамки СМ, называют физикой за пределами Стандартной модели, или Новой физикой. В настоящее время имеющиеся экспериментальные данные не позволяют сделать выбор в пользу какого-либо варианта таких теорий. В связи с этим одним из основных направлений исследований в области физики частиц является поиск явлений и процессов, которые не могут быть описаны в рамках СМ. Данный поиск проводится в таких экспериментах, как ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере, на котором возможно рождение частиц с массой до нескольких тераэлектронвольт. Другой класс экспериментов осуществляется при относительно низких энергиях, но с высокой точностью для поиска сильно подавленных или запрещенных в рамках СМ явлений или отличий измеренного значения наблюдаемой величины от ее значения, предсказанного теорией.

Измерение аномального магнитного момента мюона (АММ) представляет собой пример эксперимента последнего типа. В вышедшей в 2021 г. статье [1] были опубликованы первые результаты эксперимента Muon g-2, проводимого в Национальной ускорительной лаборатории (FNAL, США) по измерению значения АММ. Полученное значение АММ отличается на 3,3 стандартных отклонения от теоретического значения, рассчитанного в рамках СМ, и практически совпало с результатами аналогичного эксперимента E821 в Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL, США) [2]. Объединение результатов обоих экспериментов увеличивает расхождение между экспериментом и теорией до 4,2 стандартных отклонений. Такое отклонение от теории при дальнейшем уменьшении погрешности измерений может указывать на существование еще не открытых частиц или сил в рамках Новой физики.

Вклады электромагнитных и слабых взаимодействий в АММ мюона могут быть рассчитаны теоретически с помощью теории возмущений с необходимой точностью. В то же время адронный вклад a_{μ}^{had} в рамках СМ рассчитывается путем интегрирования экспериментального полного сечения рождения адронов при аннигиляции электрона и позитрона, поскольку эти сечения не могут быть вычислены исходя из первых принципов в рамках квантовой хромодинамики. Соответственно повышение точности прецизионного измерения полного сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ позволяет улучшить точность расчета адронного вклада в АММ мюона, которая на текущий момент сопоставима с экспериментом.

В настоящее время в Институте ядерной физики СО РАН ведутся эксперименты с Криогенным магнитным детектором (КМД-3) на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 [3]. Основная физическая программа экспериментов – прецизионное измерение эксклюзивных адронных сечений, изучение динамики рождения многоадронных состояний и физики адронных взаимодействий в секторе легких кварков. Область энергий коллайдера ВЭПП-2000 обеспечивает основной вклад (~91 %) в a_{μ}^{had} и определяет точность вычисления этой величины. Здесь вторым по важности (после процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$) является процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области энергий ω и ϕ -мезонов. В настоящий момент одна из основных систематических ошибок при вычислении адронного вклада в АММ мюона связана с расхождением результатов измерений данного сечения детекторами СНД [4] и КМД-2 [5]. Это различие приводит к неточности при вычислении АММ мюона порядка 0,1 ppm, что сравнимо с проектной точностью измерений данной величины в эксперименте Muon g-2.

Нами продолжают работы по обработке экспериментальных данных, накопленных детектором КМД-3 с целью прецизионного измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. В [6] была разработана процедура выделения событий с тремя пионами в конечном состоянии и вычисления борновского сечения на части статистики, набранной в 2013 г. (интеграл светимости $7,8 \text{ пб}^{-1}$) детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000. В настоящей работе приводятся результаты анализа процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ с интегральной светимостью порядка 40 пб^{-1} , набранной детектором КМД-3 в 2013–2018 гг. в различных точках в широком диапазоне энергий с большой статистикой вокруг пика ω -мезона. Систематическая погрешность измерения энергий пучков в коллайдере с применением методики обратного комптоновского рассеяния составляла ~50 кэВ, а средний разброс энергии в пучке – ~250 кэВ [7]. Интегральная светимость измерялась

с использованием процесса рассеяния Баба на большие углы и процесса двухквантовой аннигиляции с точностью $\sim 2\%$ [8].

Детектор КМД-3. Критерии отбора событий $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. На рис. 1 представлен общий вид детектора, основными элементами которого являются центральная дрейфовая камера (ДК), помещенная в магнитное поле 1,3 Тл и электромагнитный калориметр, состоящий из трех частей. Цилиндрическая часть состоит из двух систем: жидко-ксенонового калориметра LXe общей толщиной 5,1 радиационных длин (5,1 X0) и калориметра на основе кристаллов йодида цезия CsI (8,3 X0). В торцах фланцев ДК расположен калориметр на основе кристаллов германата висмута BGO толщиной 13,4 X0. Снаружи детектор покрыт мюонными счетчиками для подавления фона от частиц космического излучения. Более подробное описание детектора можно найти в статье [3].

Характерная сигнатура событий процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ – два неколлинеарных трека, выходящих из области взаимодействия пучков. Физическим фоном являются события процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ с двумя неколлинеарными треками в дрейфовой камере при излучении жесткого фотона начальными частицами в коллинеарной области. Однако события этих процессов имеют существенно другое распределение по углу расколлинеарности треков. Дополнительный фон создают космические частицы и частицы, вылетающие из пучков коллайдера. Однако такие события будут отличаться местоположением вершины треков, не совпадающей с местом встречи пучков. На начальном этапе отбираются события с двумя треками, выходящими из области взаимодействия пучков, т. е. восстановленные в дрейфовой камере треки удовлетворяют условиям:

- сработал заряженный триггер;
- наличие двух треков противоположных знаков в дрейфовой камере;
- количество точек на треке $n_{\text{hits}} \geq 10$ (оба трека восстановлены без ошибок);
- полярный угол трека $\theta_i \in [1, \pi - 1]$;
- расстояние от вершины трека до оси пучка в $\rho - \phi$ плоскости $\rho_{\pm} < 0,1$ см;
- расстояние от точки трека ближайшей к оси пучков до места встречи пучков $Z_{\pm} < 10$ см;
- расколлинеарность по азимутальному углу $\Delta\phi = |\phi_- - \phi_+| \geq 0,25$ рад;
- средний нормированный импульс $0,35 < \frac{P_+ + P_-}{2E_{\text{beam}}} < 0,8$;
- полный нормированный импульс $\frac{P_{\pm}}{E_{\text{beam}}} < 0,85$.

Данный анализ основан на том факте, что события процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и фоновые события имеют существенно разные распределения по квадрату недостающей массы системы частиц M_{miss}^2 в предположении, что зарегистрированные заряженные частицы имеют массу пионов

$$M_{\text{miss}}^2 = E_{\text{miss}}^2 - \vec{P}_{\text{miss}}^2, \tag{1}$$

где

$$\vec{P}_{\text{miss}} = \vec{P}_+ + \vec{P}_-, \tag{2}$$

$$E_{\text{miss}} = 2E_{\text{beam}} - \sqrt{(\vec{P}_+^2 + M_{\pi}^2)} - \sqrt{(\vec{P}_-^2 + M_{\pi}^2)}. \tag{3}$$

Распределение сигнальных событий по квадрату недостающей массы должно иметь пик вокруг массы π^0 мезона, в то время как распределение фоновых событий имеет плавную подложку (рис. 2).

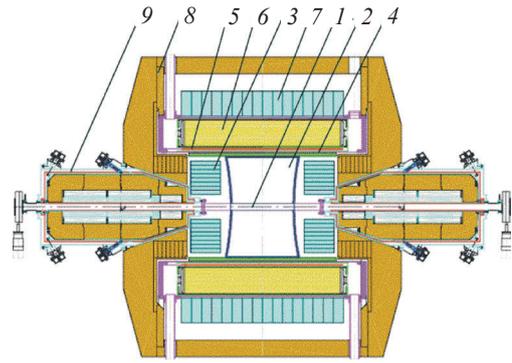


Рис. 1. Криогенный магнитный детектор КМД-3: 1 – вакуумная камера; 2 – дрейфовая камера; 3 – калориметр BGO; 4 – Z-камера; 5 – сверхпроводящий соленоид; 6 – жидкоксеноновый калориметр; 7 – калориметр CsI; 8 – ярмо магнита; 9 – соленоиды ВЭПП-2000

Fig. 1. The Cryogenic Magnetic Detector (CMD-3) layout: 1 – vacuum chamber; 2 – drift chamber; 3 – endcap BGO calorimeter; 4 – Z-chamber; 5 – superconducting solenoid; 6 – Liquid Xenon calorimeter; 7 – CsI calorimeter; 8 – yoke; 9 – VEPP-2000 solenoid

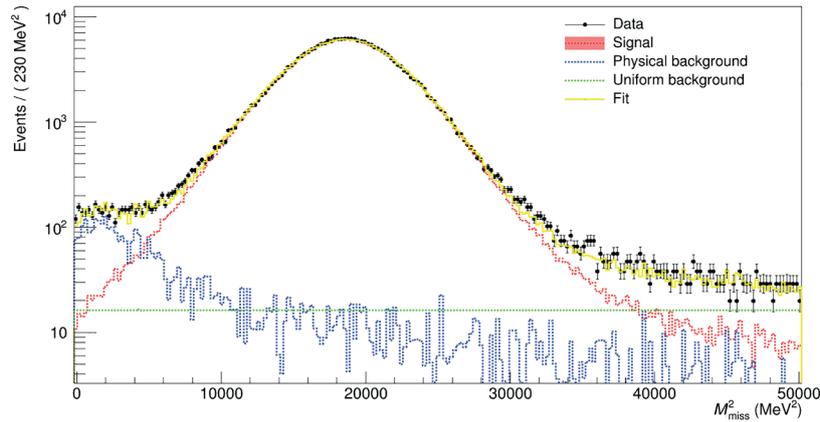


Рис. 2. Аппроксимация экспериментального распределения по квадрату недостающей массы на энергии в с.ц.м. $E_{c.m.} = 783,0$ МэВ. Черные точки – эксперимент, желтая гистограмма – результат аппроксимации, красная штрихованная линия – форма сигнала, синяя – форма физического фона, зеленый – равномерный фон

Fig. 2. Fitting of the experimental squared missing mass distribution at $E_{c.m.} = 783.0$ MeV. The black dots are the experimental data. The yellow line is the fitting line. The dashed lines correspond to: red – signal, blue – physical background, green – uniform background

Оценка фона. Определение числа событий. События физического фона значительно подавляются условием отбора только неколлинеарных треков. К ним относятся события процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, которые «просачиваются» через кинематические критерии отбора. Кроме того, наблюдается небольшая доля событий, в которых заряженная пара частиц летит почти параллельно относительно друг друга – это события процесса двухквантовой аннигиляции $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ с дальнейшей конверсией фотона в пару e^+e^- .

Вычитание фона производилось путем аппроксимации гистограммы распределения квадрата недостающей массы для экспериментальных данных. Гистограммы распределения сигнальных событий и физического фона определялись из моделирования. Кроме того, добавлялась равномерная подложка для описания нефизического фона, и аппроксимация выполнялась при помощи программного пакета RooFit [9]:

$$N_{\text{tot}} = N_{\text{sig}}H_{\text{sig}} + N_{\text{phys_bkg}}H_{\text{phys_bkg}} + N_{\text{unif_bkg}}. \quad (4)$$

Параметрами аппроксимации служили число событий сигнала N_{sig} , физического фона $N_{\text{phys_bkg}}$ и равномерно распределенного фона $N_{\text{unif_bkg}}$. В качестве функций H_{sig} и $H_{\text{phys_bkg}}$ брались нормированные гистограммы моделирования сигнальных событий и суммарного физического фона соответственно. Результат аппроксимации представлен на рис. 2.

Результаты и их обсуждение. После определения числа полезных событий вычислялось видимое сечение:

$$\sigma_{\text{vis}}(E) = \frac{N_{\text{sig}}(E)}{L(E)\varepsilon_{MC}(E)(1 + \delta_{\text{trig}}(E))}, \quad (5)$$

где N_{sig} – количество событий 3π после вычитания фона; $L(E)$ – интегральная светимость; ε_{MC} – эффективность регистрации событий 3π , поправленная на эффективность реконструкции π^\pm ; $\delta_{\text{trig}}(E)$ – поправка на эффективность срабатывания заряженного и нейтрального триггеров (меньше 0,1 % и дальше не обсуждается).

Эффективность регистрации событий изучаемого процесса определялась с использованием пакета программ CMD3SIM, разработанного на основе пакета GEANT4, и в области ω -мезона составляет ~ 10 % (рис. 3). Падение эффективности в области больше 0,8 ГэВ в с.ц.м. связано с тем, что в анализе применялось моделирование с учетом излучения из начального состояния. События моделирования обрабатывались тем же пакетом программ, что и экспериментальные данные с учетом всех критериев отбора.

Анализ набранной статистики показал, что существует малая доля событий, в которых один из треков (в силу разных причин) программа реконструкции не восстанавливает, хотя трек «находится» в чувствительной зоне дрейфовой камеры в области полярных углов $(1, \pi - 1)$ рад.

Эффект «потери» треков учитывается в моделировании. Однако моделирование полностью не описывает этот эффект, и поэтому необходимо определить дополнительную поправку на отличие эффективности реконструкции треков в эксперименте и моделировании.

Расчет этой поправки состоит из следующих шагов:

- по моделированию определяется число событий (треков), которые «пропадают», хотя частицы летят в чувствительную область ДК;
- с жесткими условиями отбираются экспериментальные тестовые события с реконструированным π^0 и определяется число событий, в которых «пропадает» трек, летящий в чувствительную область ДК;
- поправка вычисляется как отношение числа таких событий в эксперименте и в моделировании.

Как было уже сказано выше, тестовые экспериментальные события отбираются с жесткими условиями, в которых зарегистрированы только 1 или 2 трека с требованием присутствия в событии нейтрального пиона. Импульс и направление недостающего трека находятся из закона сохранения энергии-импульса. Количество сигнальных одотрековых событий N_{1tr} определялось из распределения по квадрату недостающей массы методом сайд-бэнда с сигнальной областью, равной ± 4 стандартных отклонения от $m_{\pi}^{\pm 2}$. Таким же образом определялось количество двухтрековых N_{2tr} событий в той же сигнальной области. Эффективность регистрации положительно / отрицательно заряженных треков ε_{exp}^{\pm} можно рассчитать через число событий из двух тестовых наборов следующим образом:

$$\varepsilon_{exp}^{\pm} = \frac{1}{1 + \frac{N_{1tr}^{\pm}}{N_{2tr}}} \tag{6}$$

Для определения поправки к эффективности необходимо по такому же алгоритму рассчитать эффективность регистрации для событий моделирования и найти отношение:

$$\delta^+(\theta_{miss}) = \frac{\varepsilon_{exp}^+(\theta_{miss})}{\varepsilon_{MC}^+(\theta_{miss})} \tag{7}$$

– в случае потери положительно заряженного трека и

$$\delta^-(\theta_{miss}) = \frac{\varepsilon_{exp}^-(\theta_{miss})}{\varepsilon_{MC}^-(\theta_{miss})} \tag{8}$$

– в случае потери отрицательно заряженного трека.

Большой объем экспериментальных данных позволяет построить зависимость эффективности регистрации заряженного пиона от полярного угла потеряннного трека для каждого сканирования, которая представлена на рис. 4, а. Для этого диапазон полярных углов от $0,7$ до $\pi - 0,7$ рад разбивается на 40 равных сегментов и проводится та же самая процедура определения эффективности, только в каждом отдельном угловом сегменте.

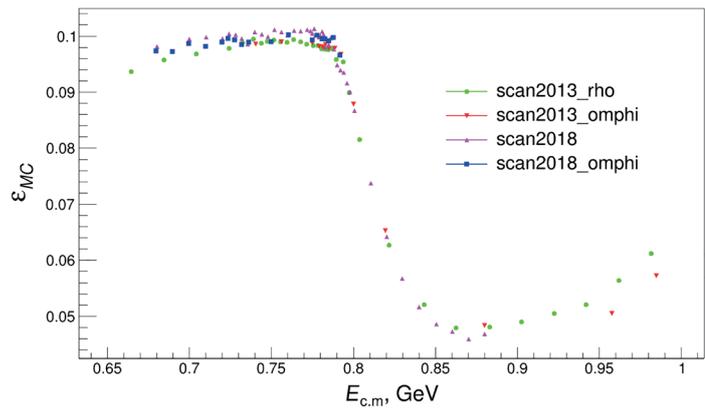


Рис. 3. Эффективность регистрации событий $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в зависимости от энергии в с.ц.м.

Fig. 3. The detection efficiency of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ process dependence on the c.m. energy

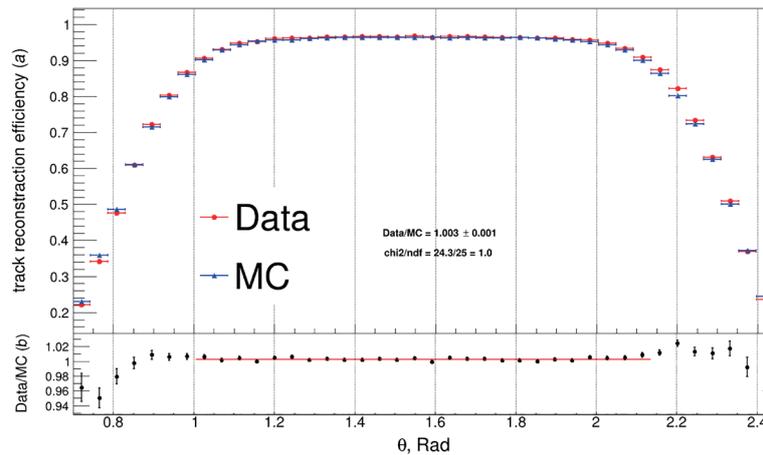


Рис. 4. Эффективность регистрации в зависимости от полярного угла при потере π^+ для скана (scan2018_omphi) с наибольшей интегральной светимостью $\sim 20 \text{ pb}^{-1}$ (a); красные круги – экспериментальные данные, синие треугольники – моделирование. Отношение эффективности в экспериментальных данных к моделированию в зависимости от полярного угла трека при потере π^+ (b); красная линия соответствует аппроксимации в области используемых критериев отбора

Fig. 4. The detection efficiency dependence on the polar angle at a π^+ loss for a scan (scan2018_omphi) with the highest integral luminosity $\sim 20 \text{ pb}^{-1}$ (a); the red circles are the experimental data, the blue triangles – the simulation. The experimental data to simulation ratio depending on the polar angle of the track at a π^+ loss (b); the red line corresponds to the approximation in the region of the selection criteria

После определения поправок в зависимости от полярного угла (рис. 4, b), каждому событию моделирования, в котором есть два трека, сопоставлялся вес в соответствии с тем, в каком сегменте полярного угла зарегистрирован трек:

$$K = \delta^+(\theta_+) \delta^-(\theta_-), \tag{9}$$

где θ_{\pm} – полярные углы π^{\pm} .

Из представленного выше графика видно, что при углах ~ 1 рад поправка составляет $\sim 0,3 \%$ на один трек.

В настоящее время продолжается анализ набранной статистики и изучение систематических ошибок. Основными источниками систематической погрешности является неточность измерения светимости, которая оценивается на уровне $\sim 2 \%$, неточность измерения энергии пучков коллайдера ВЭПП-2000 и разброс энергии в пучке также дают вклад в погрешность измерения сечения на уровне $\sim 1 \%$, вариация критериев отбора изменяет сечение изучаемого процесса внутри коридора на уровне $\sim 1,7 \%$. Оценка неточности поправок на распад пионов и их ядерное взаимодействие с веществом детектора составляет не более чем 1% . В итоге при квадратичном сложении этих ошибок наши результаты измерения сечения имеют систематическую погрешность $\sim 3 \%$.

Борновское сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ восстанавливается из видимого путем учета поправки, связанной с излучением фотонов начальными частицами:

$$\sigma_{\text{born}}(E) = \frac{\sigma_{\text{vis}}(E)}{1 + \delta_{\text{rad}}}. \tag{10}$$

Расчет радиационной поправки δ_{rad} производился согласно работе [10] итерационным методом с учетом разброса энергии в пучке, при этом использованные формулы имели точность $0,2 \%$. В качестве нулевой итерации $\sigma^{(0)}$ бралась аппроксимация видимого сечения в виде суммы трех функций Гаусса. Сечение первой итерации $\sigma^{(1)}$ определяется следующим интегралом:

$$\sigma^{(1)}(E_0) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(E-E_0)^2}{2\sigma_e^2}} dE \int_0^{x_0} \sigma^{(0)}(E^2(1-x)) F(x, E), \tag{11}$$

где $x_0 = 1 - \frac{E_{thr}^2}{E^2}$, $E_{thr} = 0,414$ ГэВ, σ_E – разброс энергии в с.ц.м., равный 350 кэВ. Далее эта процедура повторяется несколько раз (достаточно пяти) до тех пор, пока различие сечений не станет меньше 0,5 %.

Полученное борновское сечение аппроксимировалось функцией, учитывающей интерференцию ρ , ρ , ϕ , ω' и ω'' резонансов в рамках модели векторной доминантности (МВД):

$$\sigma(s) = \frac{F_{\pi^+\pi^-\pi^0}(s)}{s^{3/2}} \left| \sum_{V=\rho,\omega,\phi,\omega',\omega''} e^{i\phi_{\omega V}} \sqrt{\frac{\sigma_0(V \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)M_V}{F_{\pi^+\pi^-\pi^0}(M_V^2)} \frac{\Gamma_V M_V^2}{D_V(s)}} \right|^2, \quad (12)$$

$$D_V(s) = s - M_V^2 + i\sqrt{s}\Gamma_V(s), \quad (13)$$

где V – векторный мезон; $\phi_{\omega V}$ – относительная фаза смешивания векторных мезонов; $\phi_{\omega\omega} = 0$; $\sigma(V \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$, M_V , Γ_V – сечение в пике, масса и полная ширина векторного мезона V соответственно; $F_{\pi^+\pi^-\pi^0}(s)$ – фазовый объем системы трех пионов, численно рассчитанный в механизме рождения трех пионов через промежуточное состояние $\rho - \pi$.

Определение оптимальных параметров резонансов производилось путем минимизации функции χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{112} \frac{(\sigma_{\text{born}}^{\text{exp}}(E_i) - \sigma_{\text{born}}^{\text{theor}}(E_i))^2}{\Delta_{\text{exp}}^2(E_i)}, \quad (14)$$

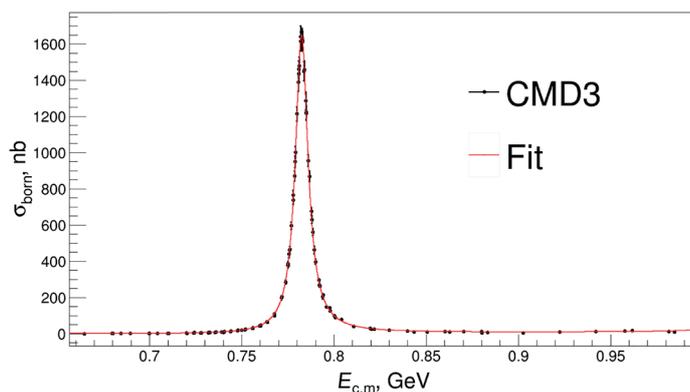
где $\sigma_{\text{born}}^{\text{exp}}(E_i)$ – борновское сечение в i -й точке по энергии; $\sigma_{\text{born}}^{\text{theor}}(E_i)$ – сечение в модели в векторной доминантности; $\Delta_{\text{exp}}^2(E_i)$ – квадрат погрешности измерения сечения $\sigma_{\text{born}}^{\text{exp}}(E_i)$, которая включает статистическую и систематическую неопределенность; E_i – энергия в системе центра масс.

Параметрами, которые определялись при аппроксимации, являлись ширина Γ_{ω} , масса M_{ω} , сечение в пике для ω -мезона $\sigma_0(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$, относительная фаза $\omega - \phi$ смешивания $\phi_{\omega\phi}$, сечение в пике для ρ -мезона $\sigma_0(\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$ и относительная фаза $\rho - \omega$ смешивания $\phi_{\omega\rho}$. Вероятности распадов и параметры ϕ -мезона брались из справочника (PDG). Параметры ω' и ω'' резонансов фиксировались на значениях из работы [4].

Параметры ω -мезона, полученные в результате оптимизации

The ω meson parameters obtained as a result of optimization

Параметры	Значения
M_{ω} , МэВ	$782,67 \pm 0,01 \pm 0,1$
Γ_{ω} , МэВ	$8,56 \pm 0,02 \pm 0,07$
$\sigma_0(\omega \rightarrow 3\pi)$, нб	$1629 \pm 3 \pm 36$
$\phi_{\omega\phi}$	$117 \pm 10 \pm 23$
$\sigma_0(\rho \rightarrow 3\pi)$, нб	$0,77 \pm 0,05 \pm 0,1$
$\phi_{\omega\rho}$	$249 \pm 2 \pm 5$
χ^2/NDF	92/106



Параметры аппроксимации борновского сечения функцией (12), полученные в результате минимизации χ^2 (14), приведены в таблице, где первая ошибка представляет статистическую точность, а вторая – систематическую погрешность.

На рис. 5 показаны результаты аппроксимации измеренных сечений процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$.

Рис. 5. Аппроксимация борновского сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области энергий ω -мезона; точки – экспериментальные данные КМД-3, кривая – аппроксимация с параметрами, приведенными в таблице

Fig. 5. Fit to the Born cross section of $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ in the energy range of the ω -meson the CMD-3 data and the curve is the fit result with the parameters given in the Table

Заклучение. В работе представлены предварительные результаты измерения борновского сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в широком диапазоне энергий и с большой статистикой вокруг ω -мезона. Полученные результаты основаны на интегральной светимости $\sim 40 \text{ пб}^{-1}$, которая превышает статистику предыдущих экспериментов [4, 5] минимум в 4 раза. Параметры ω -мезона измерены с лучшей статистической точностью, а систематическая погрешность сопоставима с точностью лучших предыдущих экспериментов [4, 5, 11]. В настоящее время систематическая погрешность измерения сечения оценивается на уровне 3 % и в дальнейшем будет уменьшена до величины не более 2 %.

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллективу ВЭПП-2000 за обеспечение отличной работы комплекса во время набора статистики. Исследование поддержано Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (грант № Ф20Р-053) и Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 20-52-00008 Бел_а).

Acknowledgements. The authors would like to express their sincere gratitude to the VEPP-2000 team for ensuring excellent operation of the complex during the data-taking run. The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (grant no. Ф20Р-053) and the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 20-52-00008 Бел_а).

Список использованных источников

1. Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm / B. Abi [et al.] (Muon $g - 2$ Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* – 2021. – Vol. 126, № 14. – P. 141801.
2. Precise Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment / H. N. Brown [et al.] (Muon $g - 2$ Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – Vol. 86, № 11. – P. 2227–2231.
3. Khazin, B. Physics and Detectors for VEPP-2000 / B. Khazin // *Nucl. Phys. B – Proc. Supplements.* – 2008. – Vol. 181–182. – P. 376–380. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2008.09.068>
4. Study of the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ in the energy region below 0.98 GeV / M. N. Achasov [et al.] // *Phys. Rev. D.* – 2003. – Vol. 68, № 5. – P. 052006–052006-20.
5. Measurement of ω meson parameters in $\pi^+\pi^-\pi^0$ decay mode with CMD-2 / R. R. Akhmetshin [et al.] // *Phys. Lett. B.* – 2000. – Vol. 476, № 1–2. – P. 33–39. [https://doi.org/10.1016/s0370-2693\(00\)00123-4](https://doi.org/10.1016/s0370-2693(00)00123-4)
6. Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ с детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 / Д. С. Василевская [и др.] // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук.* – 2020. – Т. 56, № 4. – С. 449–458. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-4-449-458>
7. Backscattering of Laser Radiation on Ultrarelativistic Electrons in a Transverse Magnetic Field: Evidence of MeV-Scale Photon Interference / E. V. Abakumova [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2010. – Vol. 110, № 14. – P. 140402.
8. Current status of luminosity measurement with the CMD-3 detector at the VEPP-2000 collider / A. E. Ryzhenkov [et al.] // *J. Instrum.* – 2017. – Vol. 12, № 07. – P. C07040. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/07/c07040>
9. Verkerke, W. The RooFit toolkit for data modeling [Electronic resource] / W. Verkerke, D. Kirkby // *Arxiv [Preprint]*. – 2003. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/physics/0306116>. – Date of access: 15.10.2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.physics/0306116>
10. Kuraev, E. A. On Radiative Corrections to e^+e^- Single Photon Annihilation at High-Energy / E. A. Kuraev, V. S. Fadin // *Sov. J. Nucl. Phys.* – 1985. – Vol. 41. – P. 466–472.
11. Study of the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ using initial state radiation with BABAR / J. P. Lees [et al.] (BABAR Collaboration) // *Phys. Rev. D.* – 2021. – Vol. 104, № 11. – P. 112003. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.104.112003>

References

1. Abi B., Albahri T., Al-Kilani S., Allspach D., Alonzi L. P., Anastasi A. et al. (Muon $g - 2$ Collaboration). Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm. *Physical Review Letters*, 2021, vol. 126, no. 14, pp. 141801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.141801>
2. Brown H. N., Bunce G., Carey R. M., Cushman P., Danby G. T., Debevec P. T. et al. (Muon $g - 2$ Collaboration). Precise Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment. *Physical Review Letters*, 2001, vol. 86, no. 11, pp. 2227–2231. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.2227>
3. Khazin B. Physics and Detectors for VEPP-2000. *Nuclear Physics B – Proceedings Supplements*, 2008, vol. 181–182, pp. 376–380. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2008.09.068>
4. Achasov M. N., Beloborodov K. I., Berdyugin A. V., Bogdanchikov A. G., Bozhenok A. V., Bukin A. D., Bukin D. A., Dimova T. V., Druzhinin V. P., Golubev V. B., Koop I. A., Korol A. A., Koshuba S. V., Lysenko A. P., Pakhtusova E. V., Serednyakov S. I., Shary V. V., Shatunov Yu. M., Silagadze Z. K., Skrinisky A. N., Valishev A. A., Vasiljev A. V. Study of the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ in the energy region below 0.98 GeV. *Physical Review D*, 2003, vol. 68, no. 5, pp. 052006–052006-20. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.68.052006>

5. Akhmetshin R. R., Anashkin E. V., Aulchenko V. M., Banzarov V. S., Barkov L. M., Baru S. E. et al. Measurement of ω meson parameters in $\pi^+\pi^-\pi^0$ decay mode with CMD-2. *Physics Letters B*, 2000, vol. 476, no. 1–2, pp. 33–39. [https://doi.org/10.1016/s0370-2693\(00\)00123-4](https://doi.org/10.1016/s0370-2693(00)00123-4)

6. Vasileuskaya D. S., Grigoriev D. N., Dudko I. G., Ivanov V. L., Kazanin V. F., Kozyrev A. N., Ruban A. A., Ryzhenkov A. E., Tolmachev S. S., Fedotov G. V., Shemyakin D. N., Shoukavy D. V., Epshteyn L. B. Study of the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ with the CMD-3 detector at the electron-positron collider VEPP-2000. *Vesti Natsyional'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-matematichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 449–458 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-4-449-458>

7. Abakumova E. V., Achasov M. N., Berkaev D. E., Kaminsky V. V., Muchnoi N. Y., Perevedentsev E. A., Pyata E. E., Shatunov Yu. M. Backscattering of Laser Radiation on Ultrarelativistic Electrons in a Transverse Magnetic Field: Evidence of MeV-Scale Photon Interference. *Physical Review Letters*, 2010, vol. 110, no. 14, pp. 140402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.140402>

8. Ryzhenkov A. E., Akhmetshin R. R., Amirkhanov A. N., Anisenkov A. V., Aulchenko V. M., Banzarov V. S. et al. Current status of luminosity measurement with the CMD-3 detector at the VEPP-2000 collider. *Journal of Instrumentation*, 2017, vol. 12, no. 07, pp. C07040. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/07/c07040>

9. Verkerke W., Kirkby D. The RooFit toolkit for data modeling. *Arxiv [Preprint]*, 2003. Available at: <https://arxiv.org/abs/physics/0306116> (accessed 15 October 2020). <https://doi.org/10.48550/arXiv.physics/0306116>

10. Kuraev E. A., Fadin V. S. On Radiative Corrections to e^+e^- Single Photon Annihilation at High-Energy. *Soviet Journal of Nuclear Physics*, 1985, vol. 41, pp. 466–472.

11. Lees J. P., Poireau V., Tisserand V., Grauges E., Palano A., Eigen G. et al. (BABAR Collaboration). Study of the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ using initial state radiation with BABAR. *Physical Review D*, 2021, vol. 104, no. 11, pp. 112003. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.104.112003>

Информация об авторах

Василевская Дарья Сергеевна – младший научный сотрудник, Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: d.vasilevskaya@dragon.bas-net.by. <https://orcid.org/0000-0002-1193-5237>

Григорьев Дмитрий Николаевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); заведующий лабораторией, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); доцент, Новосибирский государственный технический университет (пр. К. Маркса, 20, 630073, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: d.n.grigoriev@inp.nsk.su

Иванов Вячеслав Львович – научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); преподаватель кафедры общей физики, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: vyacheslav_lvovich_ivanov@mail.ru

Казанин Василий Федорович – старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); старший преподаватель кафедры общей физики, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: v.kazanine@mail.ru

Козырев Алексей Николаевич – научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); преподаватель кафедры общей физики, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: AKozyrev@inp.nsk.su

Information about the authors

Darya S. Vasileuskaya – Junior Researcher, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: d.vasilevskaya@dragon.bas-net.by. <https://orcid.org/0000-0002-1193-5237>

Dmitry N. Grigoriev – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of Laboratory, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Head of Laboratory, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Group Leader, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., Novosibirsk, Russia, 630090); Associate Professor, Novosibirsk State Technical University, (20, K. Marksa Ave., 630073, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: d.n.grigoriev@inp.nsk.su

Vyacheslav L. Ivanov – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: vyacheslav_lvovich_ivanov@mail.ru

Vasily F. Kazanin – Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Senior Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: v.kazanine@mail.ru

Aleksey N. Kozyrev – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: AKozyrev@inp.nsk.su

Aleksandr A. Ruban – Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva

Рубан Александр Анатольевич – старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); преподаватель кафедры общей физики, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: ruban@inp.nsk.su

Рыженков Артем Евгеньевич – младший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); старший преподаватель кафедры общей физики, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация).

E-mail: a.e.ryzhenkov@inp.nsk.su

Толмачев Сергей Сергеевич – младший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); ассистент кафедры теоретической физики, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: s.s.tolmachev@inp.nsk.su

Федотович Геннадий Васильевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); профессор, заведующий кафедрой физики ФФ и СУНЦ НГУ, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: fedotovich@inp.nsk.su

Шемякин Дмитрий Николаевич – научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); старший преподаватель кафедры общей физики, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: dimnsh@yandex.ru

Шёлковий Дмитрий Викторович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shoukavy@ifanbel.bas-net.by

Эпштейн Леонид Борисович – научный сотрудник, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); старший преподаватель, Новосибирский государственный технический университет (пр. К. Маркса, 20, 630073, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: l.b.epshteyn@inp.nsk.su

Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: ruban@inp.nsk.su

Artem E. Ryzhenkov – Junior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Senior Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation).

E-mail: a.e.ryzhenkov@inp.nsk.su

Sergey S. Tolmachev – Junior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Assistant, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: s.s.tolmachev@inp.nsk.su

Gennady V. Fedotovich – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Professor, Head of the Physics Department of PF and SUNC NSU, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: fedotovich@inp.nsk.su

Dmitry N. Shemyakin – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Senior Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: dimnsh@yandex.ru

Dzmitry V. Shoukavy – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shoukavy@ifanbel.bas-net.by

Leonid B. Epshteyn – Researcher, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Senior Lecturer, Novosibirsk State Technical University (20, K. Marks Ave., 630073, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: l.b.epshteyn@inp.nsk.su