

ISSN 1561-2430 (Print)

ISSN 2524-2415 (Online)

УДК 530.12

<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-1-52-71>

Поступила в редакцию 15.11.2023

Received 15.11.2023

А. Н. Амирханов<sup>1,2</sup>, А. В. Анисенков<sup>1,2</sup>, В. М. Аульченко<sup>1,2</sup>, Р. Р. Ахметшин<sup>1,2</sup>,  
 Н. С. Баштовой<sup>1</sup>, Д. Е. Беркаев<sup>1,2</sup>, А. Е. Бондарь<sup>1,2</sup>, А. В. Брагин<sup>1</sup>, Д. С. Василевская<sup>3</sup>,  
 А. О. Горковенко<sup>1,4</sup>, Ф. Гранканьоло<sup>5</sup>, А. А. Гребенюк<sup>1</sup>, С. С. Грибанов<sup>1,2</sup>,  
 Д. Н. Григорьев<sup>1,4</sup>, Д. А. Епифанов<sup>1,2</sup>, А. Л. Ерофеев<sup>1,2</sup>, Д. С. Жадан<sup>1</sup>,  
 И. М. Землянский<sup>1</sup>, А. С. Зубакин<sup>1</sup>, В. Л. Иванов<sup>1,2</sup>, Ф. В. Игнатов<sup>1</sup>, С. В. Карпов<sup>1</sup>,  
 В. Ф. Казанин<sup>1,2</sup>, А. Н. Кирпотин<sup>1</sup>, И. А. Кооп<sup>1,2</sup>, А. А. Коробов<sup>1,2</sup>, А. Н. Козырев<sup>1,4</sup>,  
 Е. А. Козырев<sup>1</sup>, П. П. Кроковный<sup>1,2</sup>, А. С. Кузьмин<sup>1,2</sup>, А. Е. Кузьменко<sup>1</sup>,  
 Ю. А. Курочкин<sup>3</sup>, Б. Д. Куценко<sup>1,6</sup>, И. Б. Логашенко<sup>1,2</sup>, П. А. Лукин<sup>1,2</sup>,  
 К. Ю. Михайлов<sup>1,2</sup>, В. С. Охалкин<sup>1</sup>, А. В. Отбоев<sup>1</sup>, Ю. Н. Пестов<sup>1</sup>,  
 А. С. Попов<sup>1,2</sup>, Г. П. Разуваев<sup>1,2</sup>, Ю. А. Роговский<sup>1,2</sup>, А. А. Рубан<sup>1</sup>, Н. М. Рыскулов<sup>1</sup>,  
 А. Е. Рыжененков<sup>1,2</sup>, А. В. Семенов<sup>1,2</sup>, А. И. Сенченко<sup>1</sup>, А. Л. Сибидапов<sup>1,7</sup>,  
 Е. П. Солодов<sup>1,2</sup>, А. А. Тальшев<sup>1,2</sup>, В. М. Титов<sup>1</sup>, С. С. Толмачев<sup>1</sup>, Г. В. Федотович<sup>1,2</sup>,  
 Ю. М. Шатунов<sup>1</sup>, Б. А. Шварц<sup>1,2</sup>, В. Е. Шебалин<sup>1,2</sup>, Д. Н. Шемякин<sup>1,2</sup>, Д. В. Шёлковский<sup>3</sup>,  
 Л. Б. Эпштейн<sup>1,2,4</sup>, Ю. В. Юдин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук,  
 Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация

<sup>3</sup>Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,  
 Минск, Республика Беларусь

<sup>4</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Российская Федерация

<sup>5</sup>Национальный институт ядерной физики, Лечче, Итальянская Республика

<sup>6</sup>Университет Экс-Марсель, Марсель, Французская Республика

<sup>7</sup>Университет Виктории, Виктория, Британская Колумбия, Канада

## ПЕРВОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КОНВЕРСИОННОГО РАСПАДА ОМЕГА МЕЗОНА В НЕЙТРАЛЬНЫЙ ПИОН И ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННУЮ ПАРУ НА ДЕТЕКТОРЕ КМД-3

**Аннотация.** Конверсионный распад  $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  изучался в эксперименте с детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 в Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук. В работе использованы данные первого сканирования в диапазоне энергий от 660 до 840 МэВ в системе центра масс (с. п. м.), соответствующие интегральной светимости около  $10 \text{ пбн}^{-1}$ . В результате анализа выделено  $1113 \pm 37$  сигнальных событий. Измеренные произведение относительной вероятности распада на электронную ширину  $\omega$ -мезона  $\Gamma(\omega \rightarrow e^+ e^-) \cdot Br(\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-) = (4,20 \pm 0,12 \pm 0,25) \cdot 10^{-7} \text{ МэВ}$  и относительная вероятность распада  $Br(\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-) = (6,78 \pm 0,19 \pm 0,40) \cdot 10^{-4}$  имеют точность выше среднемировых.

**Ключевые слова:** физика элементарных частиц,  $\omega$ -мезон, конверсионный распад, борновское сечение, детектор КМД-3

**Для цитирования.** Первое измерение величины конверсионного распада омега мезона в нейтральный пион и электрон-позитронную пару на детекторе КМД-3 / А. Н. Амирханов [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2024. – Т. 60, № 1. – С. 52–71. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-1-52-71>

Artem N. Amirkhanov<sup>1,2</sup>, Aleksey V. Anisenkov<sup>1,2</sup>, Vladimir M. Aulchenko<sup>1,2</sup>, Ravil R. Akhmetshin<sup>1,2</sup>,  
 Nikolay S. Bashtovoy<sup>1</sup>, Dmitry E. Berkaev<sup>1,2</sup>, Aleksandr E. Bondar<sup>1,2</sup>, Aleksey V. Bragin<sup>1</sup>, Darya S. Vasileuskaya<sup>3</sup>,  
 Anton O. Gorkovenko<sup>1,4</sup>, Francesco Grancagnolo<sup>5</sup>, Andrey A. Grebenuk<sup>1</sup>, Sergey S. Gribanov<sup>1,2</sup>,  
 Dmitry N. Grigoriev<sup>1,4</sup>, Denis A. Epifanov<sup>1,2</sup>, Andrey L. Erofeev<sup>1,2</sup>, Daniil S. Zhadan<sup>1</sup>, Ilya M. Zemlyansky<sup>1</sup>,  
 Aleksandr S. Zubakin<sup>1</sup>, Vyacheslav L. Ivanov<sup>1,2</sup>, Fedor V. Ignatov<sup>1</sup>, Sergey V. Karpov<sup>1</sup>, Vasily F. Kazanin<sup>1,2</sup>,  
 Aleksandr N. Kirpotin<sup>1</sup>, Ivan A. Koop<sup>1,2</sup>, Aleksandr A. Korobov<sup>1,2</sup>, Aleksey N. Kozyrev<sup>1,4</sup>, Evgeny A. Kozyrev<sup>1</sup>,  
 Pavel P. Krokovny<sup>1,2</sup>, Aleksandr S. Kuzmin<sup>1,2</sup>, Anastasiya E. Kuzmenko<sup>1</sup>, Yurii A. Kurochkin<sup>3</sup>,  
 Bogdan D. Kutsenko<sup>1,6</sup>, Ivan B. Logashenko<sup>1,2</sup>, Petr A. Lukin<sup>1,2</sup>, Kirill Yu. Mikhailov<sup>1,2</sup>,  
 Victor S. Okhalkin<sup>1</sup>, Aleksey V. Otboev<sup>1</sup>, Yury N. Pestov<sup>1</sup>, Aleksandr S. Popov<sup>1,2</sup>, Georgy P. Razuvaev<sup>1,2</sup>,

Yury A. Rogovsky<sup>1,2</sup>, Aleksandr A. Ruban<sup>1</sup>, Nikolay M. Ryskulov<sup>1</sup>, Artem E. Ryzhenenkov<sup>1,2</sup>,  
 Aleksandr V. Semenov<sup>1,2</sup>, Aleksandr I. Senchenko<sup>1</sup>, Aleksey L. Sibidanov<sup>1,7</sup>, Evgeny P. Solodov<sup>1,2</sup>,  
 Aleksey A. Talyshev<sup>1,2</sup>, Vitaly M. Titov<sup>1</sup>, Sergey S. Tolmachev<sup>1</sup>, Gennady V. Fedotovich<sup>1,2</sup>, Yury M. Shatunov<sup>1</sup>,  
 Boris A. Shwartz<sup>1,2</sup>, Vasily E. Shebalin<sup>1,2</sup>, Dmitry N. Shemyakin<sup>1,2</sup>, Dzmitry V. Shoukavy<sup>3</sup>,  
 Leonid B. Epshteyn<sup>1,2,4</sup>, Yury V. Yudin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
 Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>3</sup>*B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

<sup>4</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>5</sup>*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Lecce, Lecce, Italian Republic*

<sup>6</sup>*Aix-Marseille University, Marseille, French Republic*

<sup>7</sup>*University of Victoria, Victoria, BC, Canada*

## THE FIRST MEASUREMENT OF THE CONVERSION DECAY OF THE OMEGA MESON INTO A NEUTRAL PION AND AN ELECTRON-POSITRON PAIR AT THE CMD-3 DETECTOR

**Abstract.** The conversion decay  $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  with the CMD-3 detector on the VEPP-2000 electron-positron collider VEPP-2000 at the Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences was investigated. The data from the first scan were used in the work, which corresponded to an integral brightness of around  $10 \text{ pb}^{-1}$  in the energy range of 660 to 840 MeV in the center of mass system. The  $1113 \pm 37$  signal events were detected. The product of the relative decay probability and  $\omega$ -meson width  $\Gamma(\omega \rightarrow e^+ e^-) \cdot Br(\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-) = (4,20 \pm 0,12 \pm 0,25) \cdot 10^{-7} \text{ MeV}$ , as well branching ratio  $Br(\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-) = (6,78 \pm 0,19 \pm 0,40) \cdot 10^{-4}$  are measured with better precision than the world average.

**Keywords:** elementary particle physics,  $\omega$ -meson, conversion decay, Born cross-section, CMD-3 detector

**For citation.** Amirkhanov A. N., Anisenkov A. V., Aulchenko V. M., Akhmetshin R. R., Bashtovoy N. S., Berkaev D. E., Bondar A. E., Bragin A. V., Vasileuskaya D. S., Gorkovenko A. O., Grancagnolo F., Grebenuk A. A., Gribanov S. S., Grigoriev D. N., Epifanov D. A., Erofeev A. L., Zhadan D. S., Zemlyansky I. M., Zubakin A. S., Ivanov V. L., Ignatov F. V., Karpov S. V., Kazanin V. F., Kirpotin A. N., Koop I. A., Korobov A. A., Kozyrev A. N., Kozyrev E. A., Krokovny P. P., Kuzmin A. S., Kuzmenko A. E., Kurochkin Yu. A., Kutsenko B. D., Logashenko I. B., Lukin P. A., Mikhailov K. Yu., Okhapkin V. S., Otboev A. V., Pestov Yu. N., Popov A. S., Razuvaev G. P., Rogovsky Yu. A., Ruban A. A., Ryskulov N. M., Ryzhenenkov A. E., Semenov A. V., Senchenko A. I., Sibidanov A. L., Solodov E. P., Talyshev A. A., Titov V. M., Tolmachev S. S., Fedotov G. V., Shatunov Yu. M., Shwartz B. A., Shebalin V. E., Shemyakin D. N., Shoukavy Dz. V., Epshteyn L. B., Yudin Yu. V. The first measurement of the conversion decay of the omega meson into a neutral pion and an electron-positron pair at the CMD-3 detector. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2024, vol. 60, no. 1, pp. 52–71 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-1-52-71>

**Введение.** Изучение конверсионных распадов, состоящих из легких кварков адронов, позволяет проверить феноменологические модели и дает информацию, необходимую для интерпретации результатов экспериментов по изучению кварк-глюонной плазмы [1].

Эксперимент проводился на электрон-позитронном ускорительно-накопительном комплексе ВЭПП-2000 [2] в Институте ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН. Многоцелевой детектор КМД-3 [3], с которым выполнена данная работа, сочетает качества магнитного спектрометра и электромагнитного калориметра с высокими пространственными и энергетическими разрешениями. В анализе использованы экспериментальные данные в диапазоне энергии от 660 до 840 МэВ в системе центра масс с интегральной светимостью около  $10 \text{ пбн}^{-1}$ , набранные в 2013 г. Несмотря на ограниченную статистику, полученные результаты имеют точность выше среднемировых. В дальнейшем параметры детектора существенно изменились, и для обработки последующих данных требуется модифицировать методику анализа.

**Отбор событий  $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ .** Относительная вероятность изучаемого распада  $\omega$ -мезона мала, менее  $10^{-3}$ , что обуславливает сложность выделения сигнальных событий. Основными резонансными фоновыми процессами являются  $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  и  $e^+ e^- \rightarrow \pi^0 \gamma$  с последующим Далиц-распадом  $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$  или конверсией одного из фотонов в  $e^+ e^-$ -пару на веществе перед чувствительным объемом дрейфовой камеры. Наиболее опасный фон возникает при конверсии моноэнергетического фотона, так как возникающее конечное состояние близко к изучаемому процессу по всем кинематическим параметрам. Подавление этого фона детально рассмотрено ниже. Нерезонансные фоновые события связаны с процессами квантовой электродинамики (КЭД):

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma\gamma$  и  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma\gamma$  с конверсией одного из фотонов в  $e^+e^-$ -пару на веществе детектора, а также при наличии фонового фотона в калориметре с процессами  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$  и  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  с конверсией одного из фотонов в  $e^+e^-$ -пару на веществе детектора. События прохождения через детектор частиц космического излучения, а также события взаимодействия с остаточным газом в вакуумной камере тоже дают небольшой вклад в общее количество фоновых событий.

Для определения отклика детектора КМД-3 на сигнальные и фоновые процессы и расчета эффективности регистрации было выполнено полное моделирование методом Монте-Карло на основе пакета GEANT4 [4] с учетом излучения фотона начальными частицами.

Для анализа отбирались события с двумя разноименно-заряженными треками, идущими из области взаимодействия пучков, и с двумя и более фотонами. Оба трека должны удовлетворять следующим условиям:

- на каждом треке не менее 10 сработавших ячеек ДК (всего в ДК 20 слоев дрейфовых ячеек);
- поперечный импульс трека,  $P_{tr_{1,2}}$ , должен превышать 40 МэВ/с, чтобы исключить частицы, которые совершают полный оборот в дрейфовой камере;
- полярный угол каждого трека лежит в пределах  $0,9 < \theta_{1,2} < \pi - 0,9$ .

Фотоны с энергией  $E_\gamma < 40$  МэВ или малым полярным углом  $|\pi/2 - \theta_\gamma| > 0,5$  рад были исключены из анализа из-за высокого уровня фона в этом диапазоне энергий и углов. При взаимодействии заряженных частиц в калориметре периодически реконструируется дополнительный кластер, который имитирует фотон. Для подавления этого эффекта из анализа исключаются фотоны, расположенные близко от точки входа в калориметр заряженных частиц, если их угол отличается от направления из места встречи на реконструированную точку входа треков в калориметр не менее чем на 0,4 рад. Если после применения описанных выше условий в событии остается более двух фотонов, для дальнейшего анализа используются два фотона с наибольшими энергиями.

Для выделения сигнальных событий использовались следующие критерии отбора:

- углы треков в  $\rho$ - $\phi$  проекции неколлинеарны,  $|\pi - |\phi_1 - \phi_2|| > 0,15$  рад;
- пространственный угол между фотонами менее 1,6 рад;
- пространственный угол между суммарным импульсом треков и каждым фотоном больше 1,5 рад;
- пространственный угол между треками –  $\Delta\psi < 1$  рад.

Для подавления фоновых событий применялись следующие критерии отбора:

- для подавления фона космического излучения накладывались условия на координаты вершины  $e^+e^-$ -пары –  $\rho_{vert} < 1$  см,  $|z_{vert}| < 8$  см;

– для подавления событий двухфотонной аннигиляции с конверсией фотона в  $e^+e^-$  на веществе перед чувствительным объемом детектора требовалось, чтобы  $M_{inv}(e^+e^-\gamma_0) < 1,9 \cdot E_{beam}$ , где  $M_{inv}(e^+e^-\gamma_0)$  – инвариантная масса электрона, позитрона и фотона с максимальной энергией ( $\gamma_0$ ),  $E_{beam}$  – энергия пучка;

– для подавления фона от процессов КЭД, а также процессов  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  и  $\pi^0\gamma$ , с Далиц-распадом  $\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$  была использована зависимость величины суммарного импульса заряженных частиц,  $|P_{tot}|$ , от угла между направлениями суммарного импульса и фотона с максимальной энергией, показанная на рис. 1; отбирались события, лежащие выше ломаной линии;

– для подавления событий процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  использовалась зависимость суммы энергий заряженных частиц в предположении электрона и позитрона от квадрата массы отдачи двух фотонов от распада  $\pi^0$ ,  $M_{rec}^2 = (2E_{beam})^2 - 4E_{beam}E_{\pi^0} + m_{\pi^0}^2$ ; здесь  $E_{\pi^0}$  и  $m_{\pi^0}^2$  – энергия пары  $\gamma$ -квантов и квадрат массы  $\pi^0$ -мезона соответственно.

Распределения по этим параметрам и критерии отбора показаны на рис. 2 для сигнальных событий и событий  $\pi^+\pi^-\pi^0$  из моделирования.

После применения всех перечисленных критериев отобрано 1321 событие. С помощью моделирования была получена величина эффективности детектирования  $\varepsilon_{det}$ , которая описывает вероятность регистрации сигнальных событий детектором после прохождения всех отборов. Она составила около 21 % и слабо зависит от энергии эксперимента. Соответствующая систематиче-

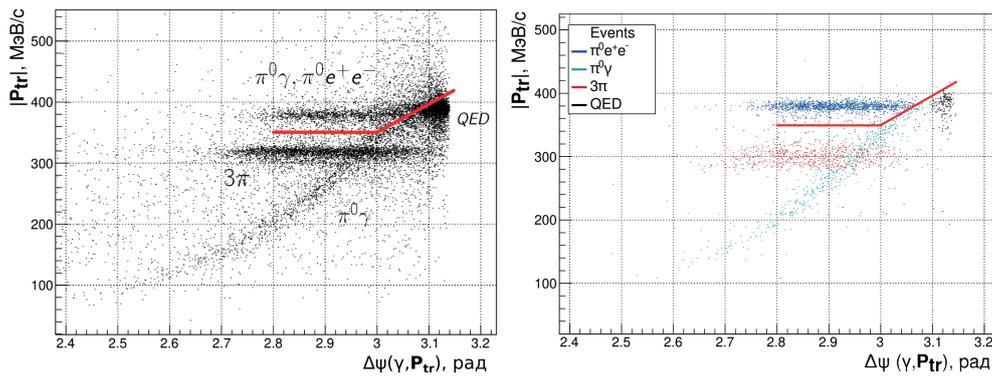


Рис. 1. Зависимость полного импульса заряженных частиц  $P_{tot}$  от угла между вектором суммарного импульса треков и фотоном максимальной энергии  $E_{\gamma_0}$  при  $\sqrt{s} = m_{\omega}$  для экспериментальных (слева) и моделированных (справа) событий. Линиями показаны критерии отбора

Fig. 1. Dependence of the total momentum of charged particles  $P_{tot}$  on the angle between the vector of the total momentum of the tracks and the photon of maximum energy  $E_{\gamma_0}$  at  $\sqrt{s} = m_{\omega}$  for experimental (left) and simulated (right) events. The solid lines show the selection criteria

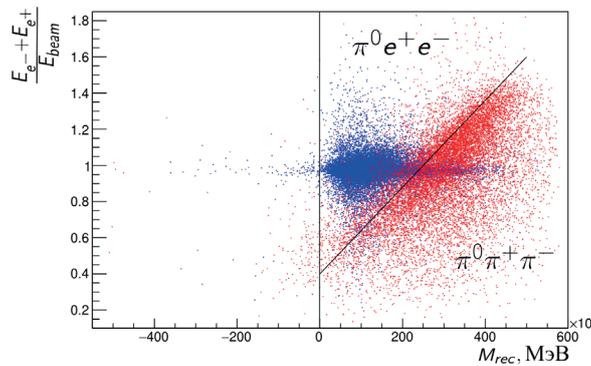


Рис. 2. Зависимость полного энергосодержания электрон-позитронной пары, нормированного на энергию пучка, от массы отдачи пары фотонов  $M_{rec}^2 = (2E_{beam})^2 - 4E_{beam}E_{\pi^0} + m_{\pi^0}^2$  (моделирование). Линиями показаны критерии отбора

Fig. 2. The dependence of the total deposited energy of an electron-positron pair normalized to the beam energy on the recoil mass of a pair of photons  $M_{rec}^2 = (2E_{beam})^2 - 4E_{beam}E_{\pi^0} + m_{\pi^0}^2$  (simulation). The solid lines show the selection criteria

ская неопределенность сечения оценивалась изменением границ отборов и сравнением количества событий в эксперименте и моделировании и была равна 4,0 %.

**Подавление фоновых событий с конверсией фотона в электрон-позитронную пару.** События процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ , в которых монохроматический фотон конвертирует в электрон-позитронную пару в материале перед чувствительным объемом ДК, по кинематическим параметрам очень близки к сигнальным событиям. Оценка количества фоновых событий  $\pi^0\gamma$  с конверсией по отношению к количеству сигнальных событий составляет примерно 2/3. Недостаточно точное знание химического состава материала не позволяет учесть их расчетным способом и необходимо выделять экспериментально. Основное отличие сигнальных и фоновых событий состоит в положении вершины  $e^+e^-$ -пары, которая в случае конверсии фотона происходит на внутреннем радиусе вакуумной камеры и далее, а не в месте встречи пучков. Так как в событиях исследуемого процесса и при конверсии фотона на веществе угол между электроном и позитроном, как правило, мал, требуется значительный отлет частиц, прежде чем их треки начнут разделяться. Это приводит к значительному ухудшению точности разрешения по положению вершины вдоль треков даже при высокой координатной точности дрейфовой камеры. На рис. 3 показаны распределения по расстоянию от оси пучка до восстановленной вершины в сигнальных и фоновых событиях  $\pi^0\gamma$  с конверсией фотона, полученные из моделирования.

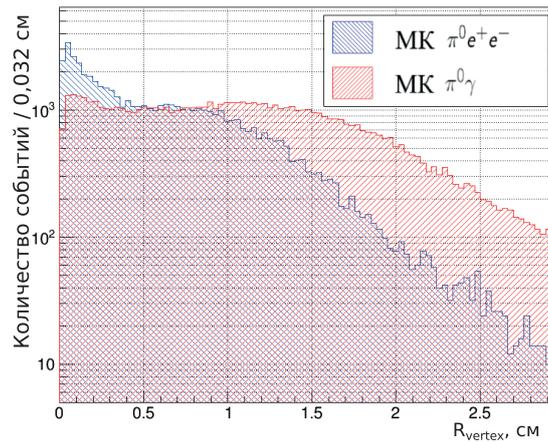


Рис. 3. Распределение событий по расстоянию от оси пучков до восстановленной вершины для распадов  $\omega$ -мезона в  $\pi^0 e^+ e^-$  и  $\pi^0 \gamma$  с конверсией на веществе перед чувствительным объемом дрейфовой камеры (моделирование)

Fig. 3. The distribution of events over the distance from the beam axis to the reconstructed vertex for  $\omega$ -meson decays into  $\pi^0 e^+ e^-$  and  $\pi^0 \gamma$  with conversion on matter in front of the sensitive volume of the drift chamber (simulation)

Как видно из этого распределения, разрешение по расстоянию от оси пучка до восстановленной вершины недостаточно для эффективного отделения событий конверсии фотона на веществе. Поэтому для эффективного подавления данного фонового процесса необходимо использовать все кинематические параметры треков. Кроме того, всегда существует вторая вершина, поскольку в проекции R- $\phi$  треки представляют собой пересекающиеся окружности. При конверсии на веществе вторая вершина может оказаться вблизи оси пучков и определиться алгоритмом реконструкции как вершина треков, что приведет к имитации сигнального события. На рис. 3 этот эффект проявляется в виде пика вблизи 0 в распределении фоновых событий. Поэтому в дополнение к найденной алгоритмом реконструкции вершине рассчитывалось положение второй вершины. Расстояниям от вершин до центра пучка присваивался следующий знак: «плюс», если угол между лучом, проведенным из пучка до вершины, и импульсом пары треков острый ( $\gamma_1$ ), и «минус», если угол тупой ( $\gamma_2$ ), как показано на рис. 4.

Для улучшения разделения реконструкция вершины проводилась в двух моделях. В первой модели не учитывалось расстояние от вершины до оси пучков. Во второй модели учитывалось расстояние от вершины до оси пучков с соответствующим разрешению 1 мм весом, что делало близкие к пучку вершины более приоритетными, но и не запрещало дальние.



Рис. 4. Схематическое описание выбора знака для расстояний от вершин до центра пучка:

$\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2$  – импульс пары треков;  $\gamma_1$  – угол между лучом от центра пучка до положительно определенной вершины и  $\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2$ ;  $\gamma_2$  – угол между лучом от центра пучка до отрицательно определенной вершины и  $\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2$

Fig. 4. The schematic description of the choice of sign for the distances from the vertices to the center of the beam:  $\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2$  – momentum of a pair of tracks;  $\gamma_1$  – angle between the ray from the beam center to the positive definite vertex and  $\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2$ ;  $\gamma_2$  – angle between the ray from the beam center to the negative definite vertex and  $\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2$

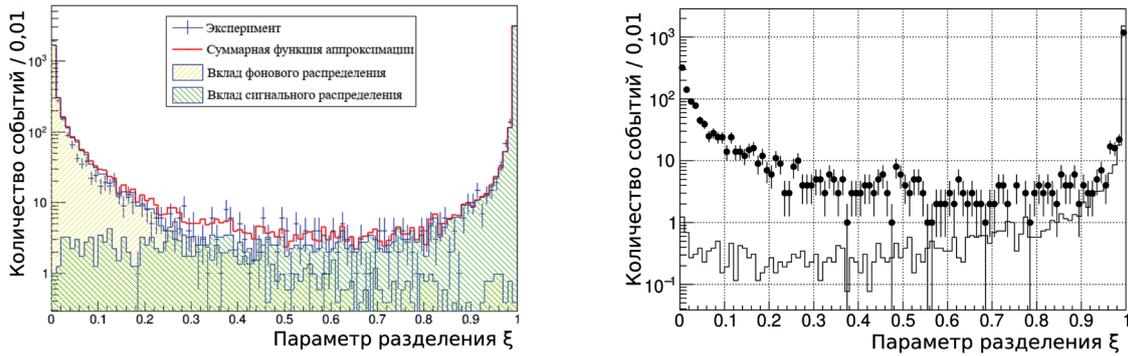


Рис. 5. Распределение параметра разделения  $\xi$  в событиях внутренней конверсии,  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$  и  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  с конверсией фотона на веществе детектора, полученное с использованием нейронной сети на событиях моделирования, крестики – экспериментальные данные (слева), в сигнальных событиях: гистограмма – моделирование, экспериментальные события – точки (справа)

Fig. 5. The distribution of the separation parameter  $\xi$  in internal conversion events  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$  and  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  with the photon conversion on matter obtained using a neural network on simulation events, crosses – experimental data (left); in signal events: histogram – simulation, experimental events – dots (right)

В дополнение к расстояниям от реконструированной и рассчитанной вершин до оси пучков и их знакам использовались следующие параметры: параметр  $\chi^2$  реконструированной вершины, пространственный угол между  $e^+e^-$ , инвариантная масса  $e^+e^-$ , полярный и азимутальные углы полного импульса  $e^+e^-$ , полный импульс  $e^+e^-$  и поперечный импульс  $e^-$  и  $e^+$ , нормированные на энергию пучка. Всего использовалось 11 параметров. Решение такой многопараметрической задачи было выполнено методами машинного обучения и позволило провести разделение сигнала и фона. Процедура разделения подробно описана в [5].

Процедура разделения настраивалась на событиях моделирования процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$  в качестве сигнала и  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  с конверсией фотона на вакуумной трубе в качестве фона, так как эти процессы хорошо рассчитываются в КЭД. Для определения эффективности и систематической неопределенности применялись экспериментальные данные, набранные при  $\sqrt{s} = 680$  МэВ и  $\sqrt{s} = 750$  МэВ. Данные энергетические точки лежат ниже  $\omega$ -резонанса, поэтому фоном для процессов КЭД на этих энергиях являются только коллинеарные события, которые легко подавляются критериями отбора, и в этих энергетических точках набрана большая интегральная светимость 2,2 и 5,2 пбн<sup>-1</sup> соответственно. Отбирались события с двумя неколлинеарными треками, одним и более фотоном, с пространственным углом между треками  $\Delta\psi < 1$  рад, пространственным углом между средним импульсом треков и фотоном более 2 рад и суммарным импульсом  $E_{\text{beam}} - 20 \text{ МэВ} < c \cdot P_{\text{tot}} < E_{\text{beam}} + 25 \text{ МэВ}$ . Распределения по параметру разделения  $\xi$  для моделирования и эксперимента приведены на рис. 5 (слева), оптимальным значением является 0,8.

Для применения параметра разделения  $\xi$  расчета эффективности к событиям изучаемого процесса  $e^+e^- \rightarrow \omega \rightarrow \pi^0 e^+e^-$  была использована модель МР, обученная на данных моделирования распада на  $\pi^0 e^+e^-$  в качестве сигнала и  $\pi^0 \gamma$  в качестве фона. В каждом событии, прошедшем все критерии отбора, рассчитывался параметр разделения  $\xi$ . Его распределение для экспериментальных событий, прошедших все отборы, и сигнальных событий в моделировании показано на рис. 5 (справа). С учетом соотношения между количеством сигнальных и фоновых событий вклад в систематическую неопределенность относительной вероятности распада составляет 2,0 %. Для отбора сигнальных событий накладывалось условие на параметр  $\xi > 0,8$ . При этом исключалось 95,6 % событий с конверсией фотона в веществе при потере около 1,2 % событий изучаемого процесса, так что эффективность отбора составила  $\varepsilon_{\text{NN}} = 0,988 \pm 0,001$  (стат.). Оставшаяся доля событий с конверсией фотона вычитается статистически с использованием данной эффективности. Отношение полного количества событий с конверсией к полному количеству отобранных событий составило около 48 %.

**Расчет эффективности регистрации и количества оставшихся фоновых событий.** Изучаемые события распада в  $\pi^0 e^+ e^-$  характеризуются малым пространственным углом между лептонными треками. В связи с этим в большинстве случаев частицы на начальном участке пути проходят через одну ячейку ДК, что приводит к ухудшению точности определения их параметров. Так как в моделировании невозможно абсолютно точно учесть все особенности детектора, возможное различие эффективности близких треков в событиях моделирования и экспериментальных событиях приводит к введению поправки к эффективности регистрации близких треков  $\varepsilon_{\Delta\psi}$ . Эффективность реконструкции положительных и отрицательных треков может отличаться из-за разницы траекторий дрейфа ионизации в скрещенных электрическом и магнитном полях в ячейках дрейфовой камеры.

Для определения эффективности  $\varepsilon_{\Delta\psi}^{\pm}$  реконструкции треков электронов и позитронов были использованы события процесса  $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  с Далиц-распадом  $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ . Использование этих событий обусловлено малостью пространственных углов между электроном и позитроном аналогично событиям изучаемого процесса. В то же время вероятность проверочных событий на порядок больше вероятности сигнального процесса, что позволяет определить поправку  $\varepsilon_{\Delta\psi}^{\pm}$  с малой статистической неопределенностью. Отбирались события с 3 или 4 треками и количеством фотонов  $N_{ph} \geq 1$ . Детали анализа приведены в [6]. Усредненное по поперечному импульсу отношение эффективностей восстановления близких треков в эксперименте и моделировании в пределах статистики одинаково для электронов и позитронов и равно

$$\varepsilon_{\Delta\psi} = 0,986 \pm 0,010 \text{ (стат.)} \pm 0,006 \text{ (сист.)} \quad (1)$$

Вклад в систематическую неопределенность составляет 0,8 % и определяется формой функции аппроксимации зависимости от импульса.

Запуск детектора осуществляется независимо двумя триггерами, работающими на основе информации координатной системы и калориметров соответственно. Высокая эффективность каждого триггера приводит к суммарной эффективности триггера  $\varepsilon_{trig}$  для всех энергетических точек в диапазоне 99,94–100 %, поэтому поправка не требуется.

Для учета событий КЭД подгонялся спектр инвариантных масс пары фотонов. Сигнальные события описывались суммой нормального и логарифмического гауссовых распределений. Из моделирования было определено значение параметра асимметрии –  $A$ , а также фиксированы отношения параметров ширины и положения пика в распределениях Гаусса и логарифмического Гаусса (рис. 6, слева). При подгонке экспериментальных данных для описания подложки событий КЭД было добавлено нормальное распределение Гаусса. Форма распределений была зафиксирована из аппроксимации спектра  $M_{\gamma\gamma}$  по всей экспериментальной статистике (рис. 6, справа).

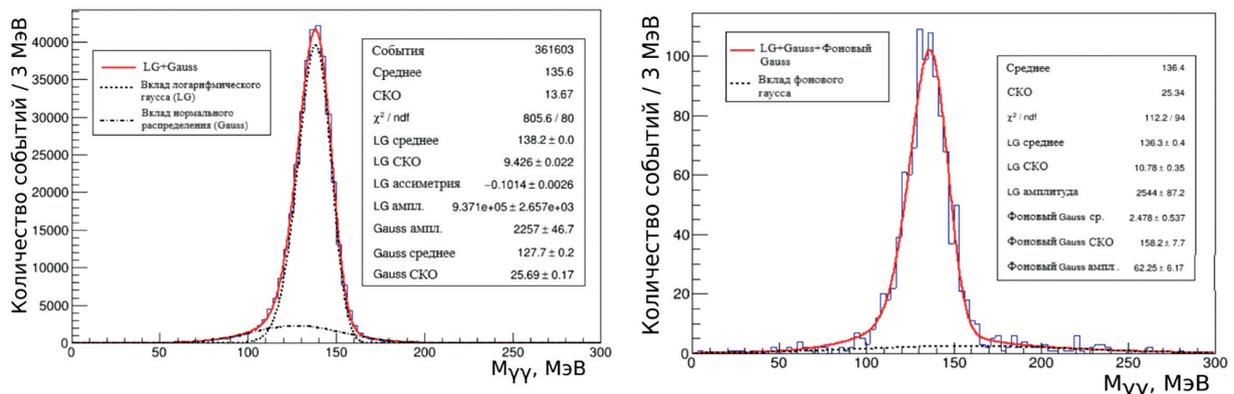


Рис. 6. Распределение событий по инвариантной массе двух фотонов, прошедших критерии отбора. Аппроксимация суммой распределений Гаусса (его вклад – штрихпунктирная линия) и логарифмического Гаусса (пунктирная линия). Слева – моделирование, справа – экспериментальные события

Fig. 6. The distribution of events in terms of the invariant mass of two photons that passed the selection criteria. Approximation by the sum of Gaussian distributions (its contribution is a dash-dotted line) and logarithmic Gaussian (dashed line). Left – simulation, right – experimental events

Спектры  $M_{\gamma\gamma}$  подгонялись в каждой энергетической точке, варьируемыми параметрами являлись количество событий сигнала  $N_{sel,i}$  и фона  $N_{bkg,i}$ . Систематическая неопределенность 1 % была определена изменением форм аппроксимирующих функций.

Для оценки количества прошедших критерии отбора событий  $\omega \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$  использовано распределение экспериментальных событий по пространственному углу между треками. Для увеличения количества событий  $3\pi$  не применялись подавляющие их отборы, а для уменьшения вклада сигнальных был добавлен отбор на отношение энергии кластера, ассоциированного с треком, к импульсу частицы  $E/p$  для обоих треков [7]. Было определено количество событий распада в  $3\pi$  в эксперименте в диапазоне пространственных углов  $0,4 < \Delta\psi < 1,2$  рад, и из них вычтен рассчитанный вклад ошибочно идентифицированных событий  $\pi^0 e^+ e^-$ . Количество событий распада в  $3\pi$  было пересчитано в диапазон углов  $\Delta\psi < 1$  рад с использованием найденной угловой зависимости и составило для всей используемой статистики  $N_{3\pi} = 55 \pm 13$ . Систематическая неопределенность определяется формой аппроксимирующей функции и составляет 0,9 %.

**Определение величины борновского сечения.** Отобранные события в каждой энергетической точке являются суммой двух типов событий:  $N_{sel} = N_{sig} + N_{3\pi}$ . Количество сигнальных событий выражается следующим образом:

$$N_{sig} = \sigma_{\pi^0 e^+ e^-}(s) L(s) (1 + \delta_{\pi^0 e^+ e^-}) Br(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) \cdot \varepsilon_{NN} \varepsilon_{\Delta\psi} \varepsilon_{geom}(s), \quad (2)$$

а событий  $3\pi$ :

$$N_{3\pi}(s) = L(s) \sigma_{3\pi}(s) (1 + \delta_{3\pi}) \varepsilon_{3\pi,geom} \varepsilon_{3\pi,NN}. \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) использованы следующие обозначения:  $L(s)$  – интегральная светимость в точке (см. [8]),  $\delta_{\pi^0 e^+ e^-}$  – радиационная поправка, рассчитанная итерационным методом [9],  $\delta_{3\pi}$  – радиационная поправка для процесса  $e^+ e^- \rightarrow 3\pi$  (см. [10]),  $\varepsilon_{geom}(s)$  и  $\varepsilon_{3\pi,geom}$  – эффективности соответствующих процессов, полученных с помощью моделирования,  $\varepsilon_{NN}$  и  $\varepsilon_{3\pi,NN}$  – эффективности отборов нейронной сетью.

Количество отобранных событий в каждой энергетической точке, интегральная светимость, радиационные поправки и другие величины, используемые в выражении (2), приведены в сводной табл. 1. Кроме того, для оценки величины борновского сечения рождения сигнальных событий в табл. 1 приведена величина, рассчитанная по формуле

$$\sigma_{\pi^0 e^+ e^-}^{est}(s) = \frac{N_{sel}(s) - N_{3\pi}(s)}{L(s) (1 + \delta_{\pi^0 e^+ e^-}) Br(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) \varepsilon_{NN} \varepsilon_{\Delta\psi} \varepsilon_{geom}(s)}, \quad (4)$$

в которой число сигнальных событий определялось вычитанием количества событий  $3\pi$  из количества отобранных событий пропорционально их числу.

Таблица 1. Результаты анализа сигнальных событий  $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  в каждой энергетической точке

Table 1. Results of the analysis of  $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  events at each energy point

$\sqrt{s}$ , МэВ	$L$ , нб <sup>-1</sup>	$\delta$	$\varepsilon_{det}$	$N_{sel}$	$\sigma_{\pi^0 e^+ e^-}^{est}$ , нб
664	433	-0,015	0,172	0	$0,000^{+0,015}_{-0,000}$
740	266	-0,113	0,202	0	$0,000^{+0,108}_{-0,000}$
758	454	-0,125	0,207	3,3	$0,039^{+0,026}_{-0,018}$
763	362	-0,152	0,211	1,7	$0,027^{+0,026}_{-0,016}$
767	160	-0,160	0,210	0,9	$0,032^{+0,046}_{-0,023}$
775	387	-0,213	0,209	28,5	$0,444^{+0,088}_{-0,078}$
778	304	-0,218	0,202	35,6	$0,719^{+0,127}_{-0,114}$
779	198	-0,222	0,208	18,8	$0,594^{+0,148}_{-0,127}$

Окончание табл. 1

$\sqrt{s}$ , МэВ	$L$ , нб <sup>-1</sup>	$\delta$	$\varepsilon_{\text{det}}$	$N_{\text{sel}}$	$\sigma_{\pi^0 e^+ e^-}^{\text{est}}$ , нб
781	1930	-0,224	0,208	303,7	$0,971_{-0,055}^{+0,057}$
783	417	-0,205	0,207	70,0	$0,008_{-0,116}^{+0,125}$
783	1969	-0,191	0,207	391,8	$0,184_{-0,059}^{+0,061}$
785	1633	-0,138	0,209	249,4	$0,848_{-0,053}^{+0,055}$
787	157	-0,092	0,208	12,5	$0,424_{-0,109}^{+0,131}$
788	345	-0,020	0,211	19,8	$0,279_{-0,052}^{+0,060}$
792	355	0,153	0,212	23,8	$0,274_{-0,013}^{+0,018}$
800	300	0,427	0,211	5,0	$0,055_{-0,021}^{+0,028}$
820	394	1,023	0,204	4,0	$0,031_{-0,013}^{+0,018}$
840	108	1,026	0,174	0	$0,000_{-0,000}^{+0,017}$

Примечание. В столбцах (слева направо) представлены: энергия столкновения пучков в с. ц. м.  $\sqrt{s}$ ; интегральная светимость в точке; радиационная поправка; геометрическая эффективность; количество событий сигнала после вычета фона  $3\pi$ ,  $N_{\text{sel}}^{\text{exp}}$ ; оценочная величина борновского сечения  $\sigma(e^+e^- \rightarrow (\omega, \rho) \rightarrow \pi^0 e^+ e^-)$ ,  $\sigma_{\pi^0 e^+ e^-}^{\text{est}}$ .

Полное количество отобранных событий по всей используемой в анализе статистике равно  $N_{\text{sel}} = 1168 \pm 35$ , после вычитания событий  $3\pi$  количество сигнальных событий  $N_{\text{sig}} = 1113 \pm 37$ . Для параметризации сечения была использована модель векторной доминантности (МВД), в которой процесс  $e^+e^- \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  в области энергии вблизи  $\omega$ - и  $\rho$ -резонансов в низшем порядке теории возмущений описывается двумя фейнмановскими диаграммами, представленными на рис. 7.

Как видно из рис. 7, диаграммы отличаются только перестановкой пропагаторов  $\rho$ - и  $\omega$ -мезонов. Вклады обеих диаграмм в матричный элемент процесса содержат одно и то же произведение констант МВД –  $|g_{\gamma\omega} g_{\omega\rho\pi} g_{\rho\gamma}|$ . Сумма комплексных пропагаторов под квадратом модуля приводит к возникновению фазы между вкладами от обеих диаграмм. Данная фаза была рассчитана в описанной параметризации в явной форме и не являлась параметром аппроксимации:

$$|g_{\gamma\omega} g_{\omega\rho\pi} g_{\rho\gamma}|^2 = \frac{48\pi Br(\omega \rightarrow e^+ e^-) Br(\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-) m_\omega^2 \Gamma_\omega^2}{R_{\pi^0 e^+ e^-}}. \tag{5}$$

Итоговая формула для аппроксимации борновского сечения  $e^+e^- \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  имеет вид

$$\sigma_{\pi^0 e^+ e^-}(s) = \frac{48\pi W_{\pi^0 e^+ e^-}(s) m_\omega^2 \Gamma_\omega^2}{4s R_{\pi^0 e^+ e^-}} \times Br(\omega \rightarrow e^+ e^-) Br(\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-). \tag{6}$$

В выражениях (5) и (6)  $W$  и  $R$  – интегралы квадрата матричного элемента, усредненного по поляризациям начальных частиц и просуммированные по поляризациям конечных частиц, определенным в [11].

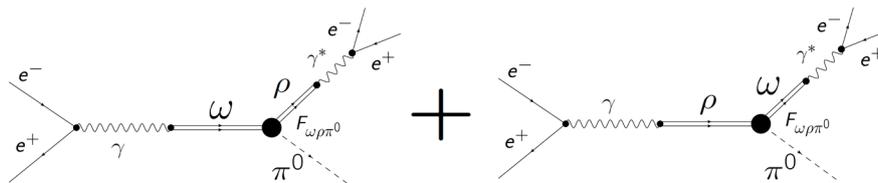


Рис. 7. Диаграммы Фейнмана, дающие вклад в изучаемый процесс  $e^+e^- \rightarrow (\omega, \rho) \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ ;  $F_{\omega\rho\pi^0}$  – переходный электромагнитный формфактор  $\omega\rho\pi^0$

Fig. 7. Feynman diagrams that contribute to the  $e^+e^- \rightarrow (\omega, \rho) \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  process;  $F_{\omega\rho\pi^0}$  – electromagnetic form factor  $\omega\rho\pi^0$

Для определения относительной вероятности распада  $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  проводилась аппроксимация количества отобранных событий, варьируемыми параметрами являлись параметры борновского сечения. Аппроксимация производилась методом максимального правдоподобия. С учетом использования статистики Пуассона минимизируемая логарифмическая функция правдоподобия имеет следующий вид:

$$\mathcal{L} = -\ln \left( W(N_{\text{sel},i}^{\text{par}}, N_{3\pi}^{\text{par}}) \right) = \sum_{i=1}^n \left( \ln(\Gamma(1 + N_{\text{sel},i})) + N_{\text{sel},i}^{\text{par}} - N_{\text{sel},i} \cdot \ln(N_{\text{sel},i}^{\text{par}}) \right) + \frac{(N_{3\pi}^{\text{par}} - N_{3\pi})^2}{2\sigma_{N_{3\pi}}^2}, \quad (7)$$

где  $W(N_{\text{sel},i}^{\text{par}}, N_{3\pi}^{\text{par}})$  – функция правдоподобия,  $N_{\text{sel},i}^{\text{par}}$  – количество событий, сумма (2) и (3). В первом слагаемом в качестве борновского сечения использовалась его параметризация (6), во втором зависимость сечения от энергии была определена, варьировалось полное количество событий  $N_{3\pi}^{\text{par}}$  как параметр аппроксимации относительно экспериментально определенного количества  $N_{3\pi}$  с учетом его неопределенности  $\sigma_{N_{3\pi}}^2$ . Методика определения количества событий  $3\pi$  описана ранее.

Минимизация выражения (7) проводилась в нескольких моделях. Во всех из них параметрами аппроксимации являлись произведение электронной ширины распада  $\omega$ -мезона на относительную вероятность распада  $\mathcal{B}_\omega = \Gamma(\omega \rightarrow e^+ e^-) Br(\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-)$  и количество событий  $3\pi$ . Далее, в зависимости от модели могли варьироваться значения массы и ширины  $\omega$ -резонанса, добавляться вклады широких резонансов в амплитуду процесса.

Оценка вклада  $\phi$ -мезона была проведена по результатам работы [12], в которой был определен бранчинг распада  $\phi \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ . Вклад высших резонансов  $\omega'$ ,  $\rho'$  при описании сечения рождения сигнальных событий от энергии ранее не изучался, поэтому их возможное влияние было оценено на основании родственного к изучаемому радиационного распада по результатам [13]. В этой работе было показано, что вклад резонансов  $\omega''$  и  $\rho''$  не существенен, а вклад резонансов  $\omega'$  и  $\rho'$  проявляется в улучшении качества аппроксимации сечения  $e^+ e^- \rightarrow \pi^0 \gamma$  при их добавлении в описание сечения. При этом вышеупомянутые резонансы были заменены одним  $V'$ , поскольку различить их вклады по отдельности было невозможно. Сечение процесса на массе  $V'$ ,  $\sigma_{V'}^0 = 3,8_{-2,4}^{+2,9} \pm 3,8$  пбн по результатам аппроксимации согласуется с нулем.

Оценка вкладов высшего резонанса  $V$ , в качестве которого выступал  $\phi$ -мезон и вышеупомянутый  $V'$ , производилась в описании зависимости сечения от энергии формулой Брейта – Вигнера, в котором пренебрегали зависимостью ширины от энергии. Так что сечение сигнальных событий, происходящих через резонанс  $V$  на энергии  $s$ , выражалось формулой

$$\frac{\sigma_V(s)}{\sigma_V(m_V^2)} = \frac{(1 - m_\pi^2/s)^3}{(1 - m_\pi^2/m_V^2)^3} \frac{m_V^2 \Gamma_V^2}{(s - m_V^2)^2 + m_V^2 \Gamma_V^2}. \quad (8)$$

Оценка амплитуды в матричном элементе проводилась следующим образом:

$$a_V = \frac{|A_V|}{|A_\omega|} \sim \sqrt{\frac{\sigma_V(m_\omega^2)}{\sigma_\omega^0}}, \quad (9)$$

при этом вклад высшего векторного резонанса учитывался множителем  $(1 + a_V e^{i\phi_V})$  к матричному элементу. Фазы были фиксированы из работы [11]:  $\phi_\phi = 158^\circ$ ,  $\phi_{V'} = 180^\circ$ , оценка относительных амплитуд дает следующие значения:  $a_\phi \sim 2,0 \cdot 10^{-3}$ ,  $a_{V'} \sim 1,9 \cdot 10^{-3}$ . Для консервативной оценки вклада резонанса  $V'$  использовались параметры более широкого  $\rho'$  [14].

Для определения относительной вероятности распада сигнальных событий применялся следующий подход. Поскольку вклад  $\phi$ -мезона статистически значим, он был добавлен в аппроксимируемую функцию во всех моделях. В модели I варьируемыми величинами были масса и ширина  $\omega$ -мезона и параметр  $\mathcal{B}_\omega$ .

Поскольку масса и ширина, полученные в модели I, не противоречат табличным значениям, они были фиксированы последними в модели II. В итоговой модели III добавлен и вклад высших резонансов  $V'$ . Различие относительных вероятностей распадов в моделях II и III принято за систематическую погрешность, происходящую от вклада высших резонансов. Результаты аппроксимации для всех моделей представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты аппроксимации борновского сечения для трех различных моделей

Table 2. The Born cross-section approximation results for three different models

Модель	I	II	III
$B_\omega, 10^{-7}$ МэВ	$3,64 \pm 0,76$	$4,17 \pm 0,12$	$4,20 \pm 0,12$
$M_\omega, \text{МэВ}$	$782 \pm 0,2$	$782,65 [13]$	$782,65 [13]$
$\Gamma_\omega, \text{МэВ}$	$8,21 \pm 0,66$	$8,49 [13]$	$8,49 [13]$
$\chi^2/\text{n.d.f.}$	18,8/15	24,5/17	24,2/17

Поскольку добавка высшего резонанса  $V'$  в модели III улучшает качество аппроксимации, в качестве итогового результата выбрано это модельное предположение. Оценочное борновское сечение сигнальных событий (4), аппроксимированное в модельном предположении III, приведено на рис. 8.

Измеренное значение произведения электронной ширины  $\omega$ -мезона и относительной вероятности распада составило

$$\Gamma(\omega \rightarrow e^+e^-) \cdot Br(\omega \rightarrow \pi^0 e^+e^-) = (4,20 \pm 0,12 \text{ (стат.)}) \cdot 10^{-7} \text{ МэВ.} \tag{10}$$

Систематическая неопределенность от неточности значений табличных параметров резонансов  $\rho$  и  $\omega$  [14] определялась вариацией параметров резонансов в пределах табличных погрешностей и была равна 3,1 %. Наибольший вклад в 2,3 % происходит от неопределенности величины относительной вероятности электронного распада  $Br(\omega \rightarrow e^+e^-) = (7,28 \pm 0,14) \cdot 10^{-5}$ . В связи с этим итоговый ответ представлен в виде произведения  $\Gamma(\omega \rightarrow e^+e^-) \cdot Br(\omega \rightarrow \pi^0 e^+e^-)$ . Аналогично определялась связанная с неточностью констант МВД систематическая неопределенность 0,5 %. Модельная неопределенность из-за неточности переходного формфактора процесса определялась по изменению эффективности отборов в зависимости от его величины и составила 1,2 %.

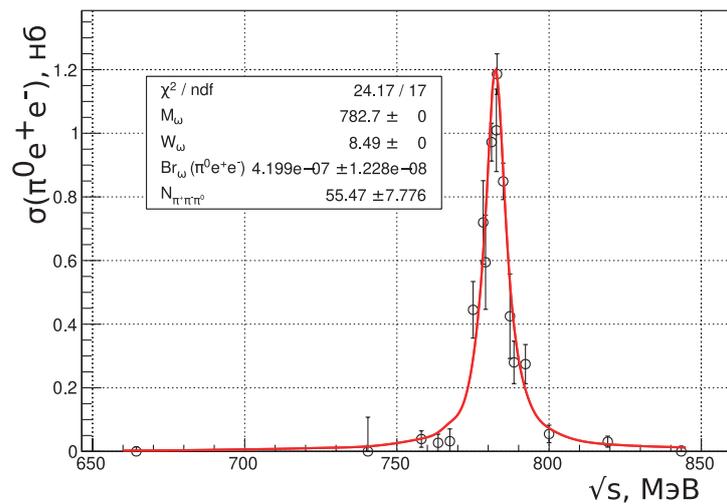


Рис. 8. Зависимость от энергии борновского сечения  $e^+e^- \rightarrow \pi^0 e^+e^-$ , полученного при аппроксимации в модели III (кривая), и оценочного борновского сечения (кружки)

Fig. 8. The energy dependence of the born cross section  $e^+e^- \rightarrow \pi^0 e^+e^-$  in the model III approximation (curve) and the evaluated born cross section (circles)

Для определения систематической неопределенности в расчете радиационной поправки был дополнительно использован метод аппроксимации экспериментальных данных видимого сечения интегралом Кураева – Фадына. Разница результатов расчетов в двух методах составила 0,5 % и принята за величину систематической неопределенности.

Аналогичным образом параметризацию сечения  $\sigma_{\pi^0 e^+ e^-}(s)$  можно произвести через параметры  $\rho$ -мезона, выразив произведение  $|g_{\gamma\omega}g_{\omega\rho\pi}g_{\rho\gamma}|^2$  через сечение реакции  $e^+e^- \rightarrow \pi^0 e^+e^-$  при  $\sqrt{s} = m_\rho$ . В этом случае формула для аппроксимации сечения изучаемого процесса принимает следующий вид:

$$\sigma_{\pi^0 e^+ e^-}(s) = \frac{48\pi W_{\pi^0 e^+ e^-}(s)m_\rho^2\Gamma_\rho^2}{4sR_{\pi^0 e^+ e^-}} \times Br(\rho \rightarrow e^+e^-)Br(\rho \rightarrow \pi^0 e^+e^-). \quad (11)$$

Параметром аппроксимации сечения является произведение электронной ширины  $\rho$ -мезона и относительной вероятности распада. В модели III с фиксированным значением ширины и массы  $\rho$ -мезона получено следующее значение:

$$\Gamma(\rho \rightarrow e^+e^-) \cdot Br(\rho \rightarrow \pi^0 e^+e^-) = (2,30 \pm 0,07 \text{ (стат.)}) \cdot 10^{-8} \text{ МэВ}. \quad (12)$$

При этом измерение относительной вероятности  $Br(\rho \rightarrow \pi^0 e^+e^-)$  полностью модельно зависимо. Для прямого измерения  $Br(\rho \rightarrow \pi^0 e^+e^-)$  требуется значительное увеличение статистики. Систематические неопределенности были определены по описанным выше методикам и представлены в табл. 3.

Таблица 3. Основные вклады в систематическую неопределенность

Table 3. The main contributions to systematic uncertainty

Процесс	$Br(\omega \rightarrow \pi^0 e^+e^-)$	$Br(\rho \rightarrow \pi^0 e^+e^-)$
Источник неопределенности	Значение, %	Значение, %
Эффективность отборов	4,0	4,0
Параметры резонансов $\rho$ и $\omega$	3,1	1,7
Подавление $\pi^0\gamma$ с конверсией на веществе	2,0	2,0
Светимость [7]	1,5	1,5
Формфактор	1,2	1,2
Подавление КЭД	1,0	1,0
Фон $3\pi$	0,9	0,9
Поправка к эффективности близких треков	0,8	0,8
Радиационная поправка	0,5	0,5
Неопределенность констант МВД	0,5	7,5
Суммарная неопределенность	6,0	9,2

**Заключение.** На основе экспериментальных данных с интегральной светимостью около  $10 \text{ пбн}^{-1}$ , набранных на КМД-3 за 2013 г. в диапазоне энергий от 660 до 840 МэВ в с. ц. м., в результате анализа выделено  $1113 \pm 37$  сигнальных событий и измерено борновское сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^0 e^+e^-$ . Из аппроксимации борновского сечения были определены произведение констант МВД и относительные вероятности распада:

$$|g_{\gamma\omega}g_{\omega\rho\pi}g_{\rho\gamma}|^2 = (5,08 \pm 0,18 \text{ (стат.)} \pm 0,29 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{11} \text{ МэВ}^6,$$

$$\Gamma(\omega \rightarrow e^+e^-) \cdot Br(\omega \rightarrow \pi^0 e^+e^-) = (4,20 \pm 0,12 \text{ (стат.)} \pm 0,25 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{-7} \text{ МэВ},$$

$$\Gamma(\rho \rightarrow e^+e^-) \cdot Br(\rho \rightarrow \pi^0 e^+e^-) = (2,11 \pm 0,07 \text{ (стат.)} \pm 0,19 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{-8} \text{ МэВ}.$$

С использованием значения и погрешности для  $\Gamma(\omega \rightarrow e^+e^-)$  и  $\Gamma(\rho \rightarrow e^+e^-)$  из PDG [14] получены относительные вероятности распадов:

$$Br(\omega \rightarrow \pi^0 e^+e^-) = (6,72 \pm 0,19 \text{ (стат.)} \pm 0,40 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{-4},$$

$$Br(\rho \rightarrow \pi^0 e^+ e^-) = (3,31 \pm 0,10 \text{ (стат.)} \pm 0,30 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{-6}.$$

Измеренная величина  $Br(\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-)$  не противоречит предсказаниям МВД и предыдущим экспериментальным измерениям [6, 15, 16] и имеет точность лучше среднемирового значения. Результат  $Br(\rho \rightarrow \pi^0 e^+ e^-)$  является первым измерением относительной вероятности распада  $\rho \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  несмотря на модельную зависимость. Обработка набранного в 2018 г. в 2 раза большего интеграла светимости в данной области энергий, и его совместный анализ с результатами этой работы позволит значительно улучшить точность измерения параметров Далиц-распадов  $\omega$ - и  $\rho$ -мезонов.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-42-10025, <https://rscf.ru/project/23-42-10025/> и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф23РНФ-118.

**Acknowledgements.** The work was supported by grants: the Russian Science Foundation no. 23-42-10025, <https://rscf.ru/project/23-42-10025/>; the Belarusian Republican Foundation for Basic Research no. Ф23РНФ-118.

### Список использованных источников

1. Quark-gluon plasma properties / G. Krintiras // PoS. – 2023. – Vol. 422. – P. 015. <https://doi.org/10.22323/1.422.0015>
2. Recommissioning and Perspectives of VEPP-2000  $e^+e^-$  Collider / D. B. Shwartz [et al.] // PoS. – 2016. – Vol. 282. – P. 54. <https://doi.org/10.22323/1.282.0054>
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. GEANT4 – a simulation toolkit / S. Agostinelli [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2003. – Vol. 506, № 3. – P. 250–303. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
5. Kutsenko, B. D. An analysis of the omega meson conversion decay using neural network-based technique with the CMD-3 experiment / B. D. Kutsenko // J. Phys.: Conf. Ser. – 2023. – Vol. 2438. – Art. ID 012070. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2438/1/012070>
6. Study of the  $\rho$  and  $\omega$  meson decays into a pseudoscalar meson and  $e^+e^-$  pair with the CMD-2 detector / R. R. Akhmetshin [et al.] // Phys. Lett. B. – 2005. – Vol. 613, № 1–2. – P. 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2005.03.019>
7. Measurement of the  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  cross section from threshold to 1.2 GeV with the CMD-3 detector [Electronic resource] / F. V. Ignatov [et al.] // Arxiv [Preprint]. – 2023. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/2302.08834>. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.08834>
8. Current status of luminosity measurement with the CMD-3 detector / A. E. Ryzhenkov [et al.] // J. Instrum. – 2017. – Vol. 12, № 07. – Art. ID C07040. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/07/c07040>
9. Griбанov, S. S. Kinematic and vertex fitting package for the CMD-3 experiment / S. S. Griбанov, A. S. Popov // J. Instrum. – 2023. – Vol. 18. – Art. ID P05030. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/05/p05030>
10. 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. – Art. ID 052006. <https://doi.org/10.1103/physrevd.68.052006>
11. Куценко, Б. Д. Изучение конверсионного распада омега мезона в нейтральный пион и электрон-позитронную пару на детекторе КМД-3 [Электронный ресурс] / Б. Д. Куценко. – Новосибирск: Новосиб. Гос. ун-т, 2022. – 60 с. – Режим доступа: [https://cmd.inp.nsk.su/publications/magister\\_kutsenko\\_bd.pdf](https://cmd.inp.nsk.su/publications/magister_kutsenko_bd.pdf)
12. Limit on the production of a new vector boson in  $e^+e^- \rightarrow U\gamma$ ,  $U \rightarrow \pi^+\pi^-$  with the KLOE experiment / A. Anastasi [et al.] (KLOE Collaboration) // Phys. Lett. B. – 2016. – Vol. 757. – P. 356–361. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.04.019>
13. Study of the reaction  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$  with the SND detector at the VEPP-2M collider / M. N. Achasov [et al.] (SND Collaboration) // Phys. Rev. D. – 2016. – Vol. 93. – Art. ID 092001. <https://doi.org/10.1103/physrevd.93.092001>
14. Review of Particle Physics / R. L. Workman [et al.] (Particle Data Group) // PTEP. – 2022. – Vol. 2022, № 8. – Art. ID 083C0. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097>
15. Radiative decays of  $\rho$  and  $\omega$  mesons / S. I. Dolinsky [et al.] // Z. Phys. C Part. Fields. – 1989. – Vol. 42. – P. 511–518. <https://doi.org/10.1007/bf01557655>
16. Измерение вероятности распадов  $\omega$ ,  $\rho \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  / М. Н. Ачасов и [др.] // ЖЭТФ. – 2008. – Т. 134, вып. 1 (7). – С. 80–88.

### References

1. Krintiras G. Quark-gluon plasma properties. *Proceedings of The Tenth Annual Conference on Large Hadron Collider Physics – PoS(LHCP2022)*, 2023, vol. 422, p. 015. <https://doi.org/10.22323/1.422.0015>
2. Shwartz D. B., Anashin V. V., Andrianov A., Astrelina K., Batrakov A. M., Belikov O., Berkaev D. E. [et al.]. Recommissioning and Perspectives of VEPP-2000  $e^+e^-$  Collider. *Proceedings of 38<sup>th</sup> International Conference on High Energy Physics – PoS(ICHEP2016)*, 2016, vol. 282, p. 54. <https://doi.org/10.22323/1.282.0054>
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. Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M. [et al.]. GEANT4 – a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research Section A*, 2003, vol. 506, № 3, pp. 250–303. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2008.09.068>
5. Kutsenko B. D. on behalf of the CMD-3 collaboration. An analysis of the omega meson conversion decay using neural network-based technique with the CMD-3 experiment. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, vol. 2438, art. ID 012070. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2438/1/012070>
6. Akhmetshin R. R., Aulchenko V. M., Banzarov V. Sh., Baratt A., Barkov L. M., Bashtovoy N. S., Bondar A. E. [et al.]. Study of the  $\rho$  and  $\omega$  meson decays into a pseudoscalar meson and  $e^+e^-$  pair with the CMD-2 detector. *Physics Letters B*, 2005, vol. 613, no. 1–2, pp. 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2005.03.019>
7. Ignatov F. V., Akhmetshin R. R., Amirkhanov A. N., Anisenkov A. V., Aulchenko V. M., Bashtovoy N. S. [et al.] (CMD-3 Collaboration). Measurement of the  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  cross section from threshold to 1.2 GeV with the CMD-3 detector. *Arxiv [Preprint]*, 2023. Available at: <https://arxiv.org/abs/2302.08834>. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.08834>
8. Ryzhenenkov A. E., Akhmetshin R. R., Amirkhanov A. N., Anisenkov A. V., Aulchenko V. M., Banzarov V. Sh., Bashtovoy N. S. [et al.]. Current status of luminosity measurement with the CMD-3 detector. *Journal of Instrumentation*, 2017, vol. 12, art. ID C07040. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/07/c07040>
9. Gribov S. S., Popov A. S. Kinematic and vertex fitting package for the CMD-3 experiment. *Journal of Instrumentation*, 2023, vol. 18, art. ID P05030. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/05/p05030>
10. Achasov M. N., Beloborodov K. I., Berdyugin A. V., Bogdanchikov A. G., Bozhenok A. V., Bukin A. D., Bukin D. A. [et al.]. Study of the process  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^0$  in the energy region below 0.98 GeV. *Physical Review D*, 2003, vol. 68, art. ID 052006. <https://doi.org/10.1103/physrevd.68.052006>
11. Kutsenko B. D. *Study of the conversion decay of the omega meson into a neutral pion and an electron-positron pair on the CMD-3 detector*. Novosibirsk: Novosibirsk State University, 2022. 60 p. Available at: [https://cmd.inp.nsk.su/publications/magister\\_kutsenko\\_bd.pdf](https://cmd.inp.nsk.su/publications/magister_kutsenko_bd.pdf)
12. Anastasi A., Babusci D., Bencivenni G., Berlowski M., Bloise C., Bossi F., Branchini P. [et al.] (KLOE Collaboration). Limit on the production of a new vector boson in  $e^+e^- \rightarrow U\gamma$ ,  $U \rightarrow \pi^+\pi^-$  with the KLOE experiment. *Physics Letters B*, 2016, vol. 757, pp. 356–361. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.04.019>
13. Achasov M. N., Beloborodov K. I., Berdyugin A. V., Bogdanchikov A. G., Dimova T. V., Druzhinin V. P., Golubev V. B. [et al.] (SND Collaboration). Study of the reaction  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$  with the SND detector at the VEPP-2M collider. *Physical Review D*, 2016, vol. 93, art. ID 092001. <https://doi.org/10.1103/physrevd.93.092001>
14. Workman R. L., Burkert V. D., Crede V., Klempt E., Thoma U., Tiator L., Agashe K. [et al.] (Particle Data Group). Review of Particle Physics. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2022, vol. 2022, no. 8, art. Id 083C0. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097>
15. Dolinsky S. I., Druzhinin V. P., Dubrovin M. S., Golubev V. B., Ivanchenko V. N., Lysenko A. P., Mikhailichenko A. A. [et al.]. Radiative decays of  $\rho$  and  $\omega$  mesons. *Zeitschrift für Physik C Particles and Fields*, 1989, vol. 42, pp. 511–518. <https://doi.org/10.1007/bf01557655>
16. Achasov M. N., Beloborodov K. I., Berdyugin A. V., Bogdanchikov A. G., Bukin A. D., Bukin D. A., Vasil'ev A. V. [et al.]. Measurement of the  $\omega$ ,  $\rho \rightarrow \pi^0 e^+e^-$  branching fractions. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2008, vol. 107, no. 1, pp. 61–68. <https://doi.org/10.1134/s1063776108070054>

### Інфармацыя аб аўтарах

**Амірханов Артем Наріманавіч** – навучны супрацоўнік, Інстытут ядзернай фізікі імяні Г. І. Будкера СО РАН (пр. Акадэміка Лаврэнцьева, 11, 630090, Новасібірск, Расійская Федэрацыя); прафэсар кафедры агульнай фізікі, Новасібірскі дзяржаўны ўніверсітэт (ул. Пірагова, 2, 630090, Новасібірск, Расійская Федэрацыя). E-mail: [A.N.Amirkhanov@inp.nsk.su](mailto:A.N.Amirkhanov@inp.nsk.su)

**Анісенков Аляксей Вадзіміравіч** – навучны супрацоўнік, Інстытут ядзернай фізікі імяні Г. І. Будкера СО РАН (пр. Акадэміка Лаврэнцьева, 11, 630090, Новасібірск, Расійская Федэрацыя); прафэсар кафедры агульнай фізікі, Новасібірскі дзяржаўны ўніверсітэт (ул. Пірагова, 2, 630090, Новасібірск, Расійская Федэрацыя). E-mail: [A.V.Anisyonkov@inp.nsk.su](mailto:A.V.Anisyonkov@inp.nsk.su)

**Аўльчэнко Вадзімір Міхайлавіч** – доктар тэхнічных навук, галоўны навучны супрацоўнік, Інстытут ядзернай фізікі імяні Г. І. Будкера СО РАН (пр. Акадэміка Лаврэнцьева, 11, 630090, Новасібірск, Расійская Федэрацыя); прафэсар кафедры агульнай фізікі, Новасібірскі дзяржаўны ўніверсітэт (ул. Пірагова, 2, 630090, Новасібірск, Расійская Федэрацыя). E-mail: [v.m.aulchenko@inp.nsk.su](mailto:v.m.aulchenko@inp.nsk.su)

### Information about the authors

**Artem N. Amirkhanov** – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: [A.N.Amirkhanov@inp.nsk.su](mailto:A.N.Amirkhanov@inp.nsk.su)

**Aleksey V. Anisenkov** – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: [A.V.Anisyonkov@inp.nsk.su](mailto:A.V.Anisyonkov@inp.nsk.su)

**Vladimir M. Aulchenko** – Dr. Sc. (Engineering), Chief Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: [v.m.aulchenko@inp.nsk.su](mailto:v.m.aulchenko@inp.nsk.su)

**Ravil R. Akhmetshin** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic

**Ахметшин Равель Равилович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); старший преподаватель кафедры физики, Специализированный учебно-научный центр, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: R.R.Akhmetshin@inp.nsk.su

**Баштовой Николай Степанович** – ведущий инженер, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация).

**Беркаев Дмитрий Евгеньевич** – кандидат физико-математических наук, заместитель директора, заведующий лабораторией, 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: D.E.Berkaev@inp.nsk.su

**Бондарь Александр Евгеньевич** – академик Российской академии наук, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); профессор кафедры физики элементарных частиц, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: A.E.Bondar@inp.nsk.su

**Барагин Алексей Владимирович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: A.V.Bragin@inp.nsk.su

**Василевская Дарья Сергеевна** – 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>

**Горковенко Антон Олегович** – инженер-исследователь, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); ассистент, Новосибирский государственный технический университет (пр. К. Маркса, 20, 630073, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: A.O.Gorkovenko@inp.nsk.su

**Гранканьо Франческо** – профессор, Национальный институт ядерной физики (Лечче, Италия). E-mail: franco.grancagnolo@le.infn.it

**Гребенюк Андрей Александрович** – старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: A.A.Grebenuk@inp.nsk.su

**Грибанов Сергей Сергеевич** – научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); старший преподаватель кафедры теоретической физики, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: S.S.Gribanov@inp.nsk.su

Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Senior Lecturer, Specialized Educational Scientific Center of the Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation).

E-mail: R.R.Akhmetshin@inp.nsk.su

**Nikolay S. Bashtovoy** – Lead Engineer, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation).

**Dmitry E. Berkaev** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Deputy Director, Head of the Laboratory, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: D.E.Berkaev@inp.nsk.su

**Aleksandr E. Bondar** – Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Professor, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: A.E.Bondar@inp.nsk.su

**Aleksey V. Bragin** – Ph. D. (Engineering) Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: A.V.Bragin@inp.nsk.s

**Darya S. Vasileuskaya** – 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>

**Anton O. Gorkovenko** – Research Engineer, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Assistant, Novosibirsk State Technical University (20, K. Marks Ave., 630073, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: A.O.Gorkovenko@inp.nsk.su

**Francesco Grancagnolo** – Professor, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Lecce (Via Provinciale per Arnesano, 73100, Lecce, Italy). E-mail: franco.grancagnolo@le.infn.it

**Andrey A. Grebenuk** – Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: A.A.Grebenuk@inp.nsk.su

**Sergey S. Gribanov** – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Senior Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: S.S.Gribanov@inp.nsk.su

**Dmitry N. Grigoriev** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Associate Professor, Novosibirsk State Technical University (20, K. Marks Ave., 630073, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: d.n.grigoriev@inp.nsk.su

**Григорьев Дмитрий Николаевич** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, 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.

**Епифанов Денис Александрович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); старший преподаватель кафедры физики элементарных частиц, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: D.A.Epifanov@inp.nsk.su

**Ерофеев Андрей Леонидович** – старший лаборант, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); магистрант, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: A.L.Erofeev@inp.nsk.su

**Жадан Даниил Сергеевич** – младший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (проспект Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, Российская Федерация, 630090). E-mail: D.S.Zhadan@inp.nsk.su

**Землянский Илья Михайлович** – научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: I.M.Zemlyansky@inp.nsk.su

**Зубакин Александр Сергеевич** – научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: A.S.Zubakin@inp.nsk.su

**Иванов Вячеслав Львович** – кандидат физико-математических наук, 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

**Игнатов Федор Владимирович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: f.v.ignatov@inp.nsk.su

**Карпов Сергей Викторович** – научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: S.V.Karpov@inp.nsk.su

**Казанин Василий Федорович** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); старший преподаватель кафедры физики, Специализированный учебно-научный центр, Новосибирский государственный

**Denis A. Epifanov** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Senior Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: D.A.Epifanov@inp.nsk.su

**Andrey L. Erofeev** – Senior Laboratory Assistant, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Master's Degree Student, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: A.L.Erofeev@inp.nsk.su

**Daniil S. Zhadan** – Junior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: D.S.Zhadan@inp.nsk.su

**Ilya M. Zemlyansky** – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: I.M.Zemlyansky@inp.nsk.su

**Aleksandr S. Zubakin** – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: A.S.Zubakin@inp.nsk.su

**Vyacheslav L. Ivanov** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: vyacheslav\_lvovich\_ivanov@mail.ru

**Fedor V. Ignatov** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: f.v.ignatov@inp.nsk.su

**Sergey V. Karpov** – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: A.S.Zubakin@inp.nsk.su

**Vasily F. Kazanin** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Senior Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: V.F.Kazanin@inp.nsk.su

**Aleksandr N. Kirpotin** – Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: A.N.Kirpotin@inp.nsk.su

**Ivan A. Koop** – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Leading Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State

университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: V.F.Kazanin@inp.nsk.su

**Кирпотин Александр Николаевич** – старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: A.N.Kurpotin@inp.nsk.su

**Кооп Иван Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); преподаватель кафедры физики ускорителей, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: I.A.Koop@inp.nsk.su

**Коробов Александр Алексеевич** – 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: A.A.Korobov@inp.nsk.su

**Козырев Алексей Николаевич** – научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); преподаватель, Новосибирский государственный технический университет (пр. К. Маркса, 20, 630073, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: A.N.Kozyrev@inp.nsk.su

**Козырев Евгений Анатольевич** – научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: E.A.Kozyrev@inp.nsk.su

**Кроковный Павел Петрович** – кандидат физико-математических наук, 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: P.P.Krokovny@inp.nsk.su

**Кузьмин Александр Степанович** – доктор физико-математических наук, ведущий 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: A.S.Kuzmin@inp.nsk.su

**Кузьменко Анастасия Евгеньевна** – младший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: anastasiya.e.kuzmenko@gmail.com

**Курочкин Юрий Андреевич** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий центра, Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: y.kurochkin@ifanbel.bas-net.by

University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: I.A.Koop@inp.nsk.su

**Aleksandr A. Korobov** – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: A.A.Korobov@inp.nsk.su

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

**Evgeny A. Kozyrev** – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: E.A.Kozyrev@inp.nsk.su

**Pavel P. Krovovny** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: P.P.Krovovny@inp.nsk.su

**Aleksandr S. Kuzmin** – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: A.S.Kuzmin@inp.nsk.su

**Anastasiya E. Kuzmenko** – Junior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: anastasiya.e.kuzmenko@gmail.com

**Yurii A. Kurochkin** – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of Center, 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: y.kurochkin@ifanbel.bas-net.by

**Bogdan D. Kutsenko** – Senior Laboratory Assistant, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Postgraduate Student, Aix-Marseille University, CNRS/IN2P3, CPPM, Marseille, France. E-mail: bdkutsenko@gmail.com

**Ivan B. Logashenko** – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Deputy Director for Sciences, Head of the Laboratory, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Head of the Department, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: I.B.Logashenko@inp.nsk.su

**Petr A. Lukin** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University

**Кущенко Богдан Дмитриевич** – старший лаборант, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); аспирант, Университет Экс-Марсель (CNRS/IN2P2, CPPM, Марсель, Франция). E-mail: bdkutsenko@gmail.com

**Логашенко Иван Борисович** – доктор физико-математических наук, профессор заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); заведующий кафедрой физики элементарных частиц, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: I.B.Logashenko@inp.nsk.su

**Лукин Петр Анатольевич** – кандидат физико-математических наук, 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: P.A.Lukin@inp.nsk.su

**Михайлов Кирилл Юрьевич** – кандидат химических наук, 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: K.Yu.Mikhailov@inp.nsk.su

**Охупкин Виктор Семенович** – ведущий инженер-конструктор, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация).

**Отбоев Алексей Валерьевич** – старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: A.V.Otboev@inp.nsk.su

**Пестов Юрий Николаевич** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: Yu.N.Pestov@inp.nsk.su

**Попов Александр Сергеевич** – кандидат физико-математических наук, 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: aspopov1113@gmail.com

**Разуваев Георгий Павлович** – научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); ассистент кафедры физики ускорителей, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация).

**Роговский Юрий Анатольевич** – старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11,

2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: P.A.Lukin@inp.nsk.su

**Kirill Yu. Mikhailov** – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: K.Yu.Mikhailov@inp.nsk.su

**Victor S. Okhapkin** – Leading Design Engineer, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation).

**Aleksey V. Otboev** – Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: A.V.Otboev@inp.nsk.su

**Yury N. Pestov** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: Yu.N.Pestov@inp.nsk.su

**Aleksandr S. Popov** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: aspopov1113@gmail.com

**Georgiy P. Razuvaev** – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Assistant of the Department, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation).

**Yury A. Rogovsky** – Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: Yu.A.Rogovsky@inp.nsk.su

**Aleksandr A. Ruban** – Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: ruban@inp.nsk.su

**Nikolay M. Ryskulov** – Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation).

**Artem E. Ryzhenkov** – Junior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Senior Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: a.e.ryzhenkov@inp.nsk.su

**Aleksandr V. Semenov** – Senior Laboratory Assistant, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Master's

630090, Новосибирск, Российская Федерация); преподаватель кафедры общей физики, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: Yu.A.Rogovsky@inp.nsk.su

**Рубан Александр Анатольевич** – старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: ruban@inp.nsk.su

**Рыскулов Николай Миржакифович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация).

**Рыжененков 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.ryzhenenkov@inp.nsk.su

**Семенов Александр Владимирович** – старший лаборант, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); магистрант, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: Al.Vl.Semenov@inp.nsk.su

**Сенченко Александр Игоревич** – научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: A.I.Senchenko@inp.nsk.su

**Сибиданов Алексей Леонидович** – научный сотрудник, Университет Виктории (Виктория, Британская Колумбия, Канада V8W 3P6).

**Солодов Евгений Петрович** – 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 кафедры физики элементарных частиц, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: E.P.Solodov@inp.nsk.su

**Талышев Алексей Александрович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); старший преподаватель кафедры физики элементарных частиц, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: A.A.Talyshev@inp.nsk.su

**Титов Виталий Михайлович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: V.M.Titov@inp.nsk.su

**Толмачев Сергей Сергеевич** – младший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090,

Degree Student, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: Al.Vl.Semenov@inp.nsk.su

**Aleksandr I. Senchenko** – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: A.I.Senchenko@inp.nsk.su

**Aleksey L. Sibidanov** – Researcher, University of Victoria (Victoria, BC, Canada V8W 3P6).

**Evgeny P. Solodov** – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Professor, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: E.P.Solodov@inp.nsk.su

**Aleksey A. Talyshev** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Senior Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: A.A.Talyshev@inp.nsk.su

**Vitaly M. Titov** – Ph. D. (Technical Sciences), Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: A.A.Talyshev@inp.nsk.su

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

**Gennady V. Fedotov** – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Professor, Head of the Department of Physics, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: fedotov@inp.nsk.su

**Yury M. Shatunov** – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: Yu.M.Shatunov@inp.nsk.su

**Boris A. Shwartz** – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Professor, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: B.A.Shwartz@inp.nsk.su

**Vasily E. Shebalin** – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: V.E.Shebalin@inp.nsk.su

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, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: fedotovich@inp.nsk.su

**Шатунов Юрий Михайлович** – доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, главный научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: Yu.M.Shatunov@inp.nsk.su

**Шварц Борис Альбертович** – 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 кафедры физики элементарных частиц, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: B.A.Shwartz@inp.nsk.su

**Шебалин Василий Евгеньевич** – 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: V.E.Shebalin@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

**Шёлковский 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. <https://orcid.org/0000-0001-7773-9637>

**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

**Юдин Юрий Валерьевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); старший преподаватель кафедры физики, Специализированный учебно-научный центр, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: Yu.V.Yudin@inp.nsk.su

**Dmitry N. Shemyakin** – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogov 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, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev 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

**Yury V. Yudin** – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Academic Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Senior Lecturer, Specialized Educational Scientific Center of the Novosibirsk State University (2, Pirogov Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: Yu.V.Yudin@inp.nsk.su