

На правах рукописи



Овтин Иван Валерьевич

**ИЗМЕРЕНИЕ МАСС НЕЙТРАЛЬНОГО И
ЗАРЯЖЕННОГО D -МЕЗОНОВ НА ДЕТЕКТОРЕ
КЕДР**

1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика
высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – кандидат физико-математических наук Барняков Александр Юрьевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Гуськов Алексей Вячеславович – доктор физико-математических наук, Международная межправительственная научно-исследовательская организация Объединенный институт ядерных исследований, заместитель директора Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Дзержелова по научной работе, г. Дубна

Углов Тимофей Валерьевич – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, высококвалифицированный старший научный сотрудник Лаборатории тяжелых кварков и лептонов, г. Москва

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» », г. Протвино

Защита диссертации состоится «16» июня 2026 года в «11:00» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-03>.

Автореферат разослан «15» апреля 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН

 Фадин Виктор Сергеевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В настоящее время в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН продолжается эксперимент КЕДР на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М в области энергий от 2 до 11 ГэВ в системе центра масс. Энергия пучка коллайдера ВЭПП-4М измеряется двумя методами: методом резонансной деполяризации (РД) с относительной точностью 10^{-6} и по положению края энергетического спектра γ -квантов, образующихся при обратном комптоновском рассеянии (ОКР) монохроматического лазерного излучения на электронном пучке (относительная точность $3 \cdot 10^{-5}$). Эта особенность установки позволила сформировать физическую программу экспериментов на детекторе КЕДР. Программа включает прецизионные измерения масс τ -лептона и D -мезонов, а также измерения масс и парциальных ширин резонансов J/ψ , $\psi(2S)$, $\psi(3770)$ и узких резонансов Y -семейства, требующие максимальной точности определения суммарной энергии сталкивающихся частиц. Масса и время жизни частицы являются ее наиболее фундаментальными характеристиками, которые желательно знать с предельно возможной точностью.

Измерению масс нейтрального и заряженного D -мезонов, на экспериментальной статистике набранной с детектором КЕДР, посвящена основная часть диссертационного исследования. Нейтральные и заряженные D -мезоны являются основными состояниями в семействе очарованных мезонов. Измерение их масс задает шкалу для более тяжёлых возбуждённых состояний. Кроме того, увеличение точности измерения массы D^0 -мезона необходимо для объяснения природы узкого состояния $X(3872)$, которое, в некоторых теоретических моделях, представляется как $D^0 D^{*0}$ молекула с массой близкой к сумме масс D^0 и D^{*0} -мезонов. D -мезоны являются легчайшими адронами с открытым очарованием. Поскольку их распад в частицы, не содержащие c -кварк, происходит за счет слабого взаимодействия, они служат уникальной лабораторией для изучения структуры этого взаимодействия в рамках Стандартной модели. Уточнение масс D -мезонов необходимо для снижения систематических неопределенностей при извлечении параметров матрицы Кабиббо–Кобаяси–Маскавы (СКМ) из данных по лептонным и полулептонным распадам. В частности, прецизионные значения масс являются критическими входными параметрами для расчетов в квантовой хромодинамике на решетке, результаты которых используются для проверки унитарности матрицы СКМ и поиска эффектов новой физики в секторе очарования.

Методическая часть данного диссертационного исследования посвящена настройке, калибровкам, получению параметров и моделированию системы идентификации на основе пороговых аэрогелевых черенковских счетчиков, собранных по методу АШИФ (Аэрогель, ШИФтер, Фотоумно-

житель), детектора КЕДР. Система АШИФ в полном объеме (160 счетчиков, содержащая тысячу литров аэрогеля) с 2014 г. успешно работает в эксперименте КЕДР. Наличие такой системы, с высоким качеством идентификации пионов и каонов, позволяет улучшить точность измерения массы D -мезонов, а так же позволяет измерять вероятности распадов J/ψ - и Υ -мезонов. Например, помимо использования системы для получения представленного в данной диссертации результата по измерению масс D -мезонов, система использовалась для π/K идентификации в измерении вероятности распада J/ψ в конечные состояния $2(\pi^+\pi^-)\pi^0$, $K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^0$, $2(\pi^+\pi^-)$ и $K^+K^-\pi^+\pi^-$.

Степень разработанности темы исследования

Первые измерения масс D -мезонов были выполнены в экспериментах LGW (Lead-Glass Wall), Mark II и NA32. В этих экспериментах точность измерения была невысокой. Более точные измерения массы D^0 -мезона были выполнены коллаборациями CLEO, КЕДР, LHCb, BABAR и в работе основанной на данных с детектора CLEO-c. А для D^+ -мезона более точное измерение массы было выполнено коллаборацией КЕДР.

Относительно степени разработанности темы связанной с методической частью диссертации заметим, что пороговые черенковские счетчики использовались для идентификации частиц ранее во многих экспериментах. Первыми пороговыми черенковскими счетчиками, использованными в экспериментах на электрон-позитронном коллайдере, были водяные черенковские счетчики ВЭПП-2. В детекторе МД-1 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4 применялись пороговые газовые черенковские счетчики. На электрон-позитронном коллайдере PETRA в DESY (Германия) в эксперименте TASSO использовались газовые и аэрогелевые пороговые черенковские счетчики. Аэрогелевые пороговые счетчики применялись для идентификации частиц в детекторе Belle на электрон-позитронном коллайдере КЕК-В (Япония). В детекторе СНД на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 для идентификации частиц используются аэрогелевые черенковские счетчики, созданные по методике АШИФ.

Цели и задачи

Целью данной диссертационной работы является измерение масс нейтрального и заряженного D -мезонов на экспериментальной статистике с интегральной светимостью $4,9 \text{ пб}^{-1}$, набранной детектором КЕДР в пике резонанса $\psi(3770)$, с учетом всех возможных систематических неопределенностей. Были решены следующие **задачи**: формулировка и оптимизация критериев отбора сигнальных событий; моделирование сигнальных и фоновых данных методом Монте-Карло с учетом излучений в начальном и конечном состояниях; введение поправок на импульсы частиц; введение поправок в моделирование для наилучшего соответствия условиям эксперимента; построение моделей для выделения сигнального вклада путем параметризации распределений инвариантных масс комбинаций треков-кан-

дидатов, составляющих реконструированный D мезон; обеспечение надежного π/K -разделения в эксперименте при помощи черенковских счетчиков АШИФ.

Научная новизна

1. Масса заряженного D -мезона измерена с наилучшей в мире точностью. Точность измерения массы нейтрального D -мезона улучшена в два раза по сравнению с предыдущим результатом эксперимента КЕДР. Результаты измерений будут включены в таблицу свойств частиц PDG.
2. Измерена разность масс нейтрального и заряженного D -мезонов, при прямом измерении масс каждого из них в одном эксперименте.
3. Впервые система идентификации на основе 160 аэрогелевых черенковских счетчиков, собранных по методу АШИФ, длительное время (более 10 лет) успешно работает в эксперименте на e^+e^- -коллайдере.

Теоретическая и практическая значимость работы

Измеренные значения D^0 и D^+ мезонов улучшат точность среднего значения представленного в PDG. Сравнение экспериментально измеренных масс D^0 и D^+ с высокоточными предсказаниями квантовой хромодинамики (КХД) является строгим тестом самой теории. Точные значения масс важны для тестирования пределов Стандартной Модели и поиска Новой Физики. Например, как отмечалось выше, точное измерение массы D^0 -мезона может помочь понять природу узкого состояния $X(3872)$. Хорошо известные массы используются как эталоны для калибровки детекторов частиц. Точное измерение разницы в массах D^0 и D^+ позволяет проверить теоретические модели, которые разделяют вклады от разницы масс кварков (d и u) и от электромагнитного взаимодействия.

Успешная работа системы идентификации АШИФ имеет большое значение для подавления физического фона при измерении масс D -мезонов и анализе ряда адронных процессов в эксперименте КЕДР. Система идентификации АШИФ позволила улучшить точность измерения масс D -мезонов. Методические наработки по АШИФ могут быть востребованы и в других экспериментах, например, СНД (г. Новосибирск, Россия) или STCF (г. Хэфэй, Китай).

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертационной работы являются экспериментальные методы исследования, включая методы статистической обработки данных и моделирования методом Монте-Карло. Исследование выполнялось методом компьютерной обработки при помощи программного пакета ROOT и пакета для моделирования GEANT3.21.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Масса нейтрального D -мезона, измеренная в эксперименте КЕДР, составляет $M_{D^0} = 1865,100 \pm 0,210_{\text{стат}} \pm 0,046_{\text{сист}}$ МэВ.

2. Масса заряженного D -мезона, измеренная в эксперименте КЕДР, составляет $M_{D^+} = 1869,560 \pm 0,288_{\text{стат}} \pm 0,109_{\text{сист}} \text{ МэВ}$.
3. Система питания и контроля параметров (напряжение, ток, частота собственных шумов ФЭУ МКП) для системы АШИФ из 160 счетчиков детектора КЕДР, проработавшая с 2013 по 2024 гг. Эта система позволила успешно использовать счетчики АШИФ в эксперименте КЕДР с 2014 г.
4. Программное обеспечение для реконструкции и моделирования событий в системе идентификации из 160 счетчиков АШИФ. Это позволяет использовать систему АШИФ для анализа физических процессов.
5. Измерения параметров счетчиков АШИФ в эксперименте КЕДР:
 - геометрическая эффективность регистрации частиц в системе АШИФ на $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ событиях в детекторе КЕДР составляет $95,7 \pm 0,6\%$;
 - неоднородность светосбора в среднем по счетчикам составляет порядка $\pm 30\%$;
 - амплитуда сигнала после запуска системы в эксперименте КЕДР в 2014 г. составляла $9,3 \pm 0,1$ и $12,5 \pm 0,1$ фотоэлектрона для цилиндрической и торцевой частей, соответственно, это соответствует эффективности регистрации частиц $99,991 \pm 0,001\%$ и $99,999 \pm 0,001\%$;
 - качество π/K -разделения пересчитанное из космических мюонов (3σ в 2014 г. и $2,5\sigma$ в 2023 г.) в рабочем импульсном диапазоне от 600 до 1500 МэВ/с.
6. Измерение временной стабильности амплитуды сигнала в счетчиках АШИФ в ходе эксперимента КЕДР. Амплитуда в счетчиках для частиц пересекающих аэрогель плавно уменьшилась на 38% от начальной величины за первые три года и в течении последних шести лет изменилась относительно слабо еще на 7%. Уменьшение амплитуды сигнала, в течение девяти лет эксплуатации в среднем для всех счетчиков системы, связанное с фотоумножителем и аэрогелем составляет 35% и 10%, соответственно.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов обеспечивается использованием методов контроля набора данных и работы детектора КЕДР, выполнением калибровочных измерений и использованием стандартных программных пакетов.

Работа сопровождалась процедурой внутреннего рецензирования внутри коллаборации КЕДР. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, а также были представлены в виде 7 докладов на 4 международных и 3 всероссийских конференциях: Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН (МИФИ, Москва, Россия), Тема доклада: «Статус системы

АШИФ детектора КЕДР», 17-21 ноября 2014; CERN-BINP Workshop for Young Scientists in e^+e^- Colliders (ЦЕРН, Женева, Швейцария), Тема доклада: «Aerogel Cherenkov counters of the KEDR detector», 22-25 августа 2016; INSTR17 – Instrumentation for Colliding Beam Physics (Новосибирск, Россия), Тема доклада: «Simulation of the ASHIPH Cherenkov counters of the KEDR detector», 27 февраля – 3 марта 2017; RICH2018 – The 10th International Workshop on Ring Imaging Cerenkov Detectors (Москва, Россия), Тема доклада: «Particle detection efficiency of the KEDR detector ASHIPH system», 29 июля – 4 августа 2018; TIPP2023 – 6th International conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (Кейптаун, ЮАР), Тема доклада: «ASHIPH Cherenkov counters in the KEDR experiment», 4-8 сентября 2023; Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН (Дубна, ОИЯИ, Россия), Тема доклада: «Измерение масс нейтрального и заряженного D -мезонов с детектором КЕДР», 1-5 апреля 2024; Молодежная конференция «Физика элементарных частиц и космология» (Москва, НИУ ВШЭ, Россия), Тема доклада: «Измерение масс нейтрального и заряженного D -мезонов с детектором КЕДР», 3-4 декабря 2024.

Результаты, вошедшие в состав диссертации, включены в отчёты о научно-исследовательской работе в проектах Российского фонда фундаментальных исследований: 14-02-01011 «Измерение масс D -мезонов с детектором КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М»; 14-02-31401 «Идентификация частиц системой АШИФ детектора КЕДР»; «Измерение вероятности распадов J/ψ -мезона на $\gamma\pi^+\pi^-$, γK^+K^- , $\gamma\rho\rho$ ».

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных и электронных изданиях, из них 5 изданы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК. По теме диссертации получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора

Вклад автора в получение научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Диссертант участвовал в наборе данных на детекторе КЕДР в 2016–2017 гг., используемых в физическом анализе по измерению масс D -мезонов. Автором осуществлены все этапы физического анализа по измерению масс D -мезонов, включая выделение сигнальных событий, введение поправок к измеряемым импульсам треков, моделирование данных для параметризации сигнальных и фоновых событий, а также выполнил оценки систематических погрешностей. Автор участвовал в 2013 г. в запуске полномасштабной системы АШИФ детектора КЕДР в работу, и долгое время являлся ответственным за ее работу в эксперименте. Диссертант выполнил работу по разработке и запуску в эксплуатацию систем питания и измерения частоты собственных шумов ФЭУ с МКП, а также программ мониторингования и контроля па-

раметров (напряжение, ток, частота собственных шумов) системы АШИФ содержащей 160 счетчиков. Автор с 2014 по 2018 гг. обеспечивал калибровки системы АШИФ детектора КЕДР. Диссертант разработал программное обеспечение для реконструкции событий в системе АШИФ из 160 счетчиков, распределенных в два слоя, и произвел выставку черенковских счетчиков относительно трековой системы. Автором проведено измерение геометрической эффективности, неоднородности светосбора, эффективности регистрации и качества идентификации частиц в системе АШИФ. Диссертантом проведено измерение временной стабильности амплитуды сигнала в счетчиках АШИФ в ходе эксперимента КЕДР. Автором разработано программное обеспечение для Монте-Карло моделирования системы АШИФ в составе детектора КЕДР.

Вклад соискателя в опубликованные работы по теме диссертации является определяющим. Список публикаций содержит 5 работ из списка изданий, рекомендованных ВАК. Авторский вклад соискателя в статьях [1] и [2] заключается в оценке амплитуды счетчиков АШИФ, эффективности регистрации релятивистских частиц на космических мюонах, качества разделения пионов и каонов полученное на космических мюонах, и изучении временной стабильности системы АШИФ в эксперименте КЕДР. Авторский вклад соискателя в статье [3] заключается в создании моделирования двухслойной системы АШИФ в составе детектора КЕДР. Авторский вклад соискателя в статьях [4] и [5] заключается в проведении физического анализа по измерению масс нейтрального и заряженного D -мезонов по данным, набранным в эксперименте КЕДР на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 122 страницы, включая 62 рисунка и 14 таблиц. Список литературы содержит 104 наименования.

Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, определена цель, сформулированы задачи работы, отмечена научная новизна темы исследования, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, а также представлены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описана история открытия D^0 и D^+ мезонов в 1976 г., приводится спектроскопия D -мезонов, а также дается обзор экспериментов по измерению масс D^0 и D^+ мезонов.

В настоящее время, согласно данным журнала Review of Particle Physics (PDG), среднемировое значение массы D^0 составляет $M_{D^0} =$

$1864,84 \pm 0,05$ МэВ, а среднемировое значение массы D^+ составляет $M_{D^+} = 1869,50 \pm 0,40$ МэВ. Сравнение значений измеренных масс D^0 и D^+ мезонов в различных экспериментах до 2025 г. показано на рисунке 1.

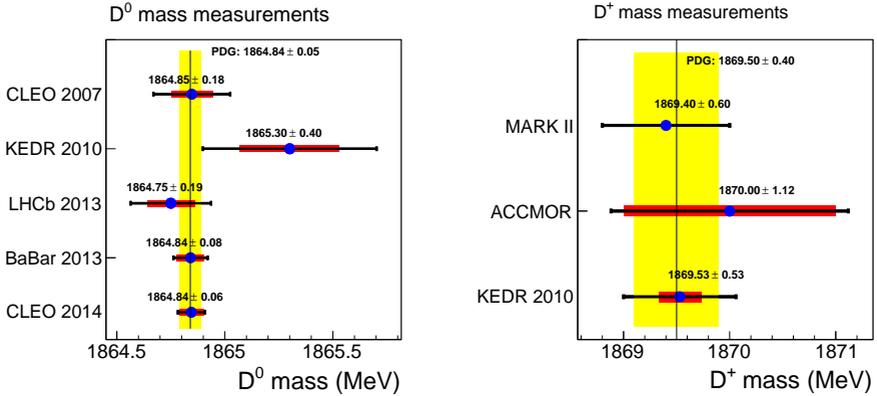


Рисунок 1 — Результаты измерений масс D^0 (слева) и D^+ (справа) мезонов в различных экспериментах до 2025 г. из таблицы PDG. Вертикальная линия показывает среднемировое значение, вертикальные полосы — их ошибки

Измерения массы D^0 -мезона выполнены коллаборациями CLEO (2007 г., 281 пб^{-1} в $e^+e^- \rightarrow \psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$, $D^0 \rightarrow K_S\phi$), КЕДР (2010 г., $0,9 \text{ пб}^{-1}$ в $e^+e^- \rightarrow \psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$, $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$), LHCb (2013 г., $1,0 \text{ фб}^{-1}$ в pp столкновениях, $D^0 \rightarrow K^+K^-K^-\pi^+$), ВАВАР (2013 г., 477 фб^{-1} в e^+e^- аннигиляции на 40 МэВ ниже резонанса $\Upsilon(4S)$, $D^*(2010)^+ \rightarrow D^0\pi^+$, $D^0 \rightarrow K^-K^-K^+\pi^+$) и на данных с детектора CLEO-c (2014 г.). Наиболее точное измерение выполнено на данных, набранных детектором CLEO-c (2014 г.) с интегральной светимостью 580 пб^{-1} в e^+e^- аннигиляции на энергии $\psi(3770)$, на которых получено значение $M_{D^0} = 1864,845 \pm 0,025_{\text{стат}} \pm 0,057_{\text{сист}}$ МэВ. Для минимизации статистических ошибок, изучался распад $D^0 \rightarrow K^-\pi^+\pi^-\pi^+$ (и зарядово-сопряженный), который имеет наибольшую вероятность распада $\mathcal{B} = 8,1 \times 10^{-2}$. Полученные коллаборацией КЕДР значения масс J/ψ и $\psi(2S)$ мезонов использовались для прецизионной калибровки импульсов заряженных пионов в распадах $\psi(2S) \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$. Поправка к импульсам контролировалась и корректировалась в различных заходах для реконструкции D^0 мезонов по массе K_S мезона ($D \rightarrow K_S + X$, $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$). Реконструировался спектр инвариантной массы для распада $D^0 \rightarrow K^-\pi^+\pi^-\pi^+$ (и зарядово-сопряженного). Число отобранных сигнальных событий составило 62557 ± 361 . Систематические ошибки в измеренной массе D^0

обусловлены, главным образом, неопределенностями масс каонов (K^\pm и K_S).

Измерения массы D^+ -мезона выполнены коллаборациями MARK II (1981 г., $e^+e^- \rightarrow \psi(3770) \rightarrow D^+\bar{D}^-$), ACCMOR (1990 г., 230 ГэВ π^- -мезоны, налетающие на медную мишень) и КЕДР (2010 г.). В первых двух экспериментах масса измерялась с использованием каналов распада $D^+ \rightarrow K_S\pi^+$ и $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ (и зарядово-сопряженные). Наиболее точное измерение массы D^+ было выполнено коллаборацией КЕДР в 2010 г.: $M_{D^+} = 1869,53 \pm 0,49_{\text{стат}} \pm 0,20_{\text{сист}}$ МэВ. В эксперименте использована статистика с интегральной светимостью $0,9 \text{ пб}^{-1}$, набранная на коллайдере ВЭПП-4М в процессе $e^+e^- \rightarrow \psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$. D^+ -мезон реконструировался в конечном состоянии $K^-\pi^+\pi^+$. Для вычисления инвариантной массы D^+ -мезона используется энергия пучка. В этом результате неопределенность, связанная с поправкой на излучение в начальном состоянии (ISR, Initial State Radiation), преобладает в общей систематической ошибке и определяет точностью зависимости сечения $\sigma(e^+e^- \rightarrow D\bar{D})$ от энергии. Также существенна систематическая неопределенность, связанная с настройкой импульсного разрешения в моделировании.

Наиболее точное измерение разницы масс D^0 и D^+ мезонов выполнила в 2013 г. коллаборация LHCb, используя распады D -мезонов произведенных в полулептонных b -адронных распадах, и получила значение $M(D^\pm) - M(D^0) = 4,76 \pm 0,12_{\text{стат}} \pm 0,07_{\text{сист}}$ МэВ. Для измерения разности масс использовались моды $D^0 \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ и $D^+ \rightarrow K^+K^-\pi^+$.

Во второй главе описывается ускорительный комплекс ВЭПП-4М и детектор КЕДР.

Комплекс ВЭПП-4М включает в себя линейный ускоритель (энергия пучка — до 50 МэВ), бустерный синхротрон Б-4 (350 МэВ), промежуточный накопитель ВЭПП-3 (до 2 ГэВ) и однокольцевой e^+e^- -коллайдер ВЭПП-4М с энергией в пучке от 1 до 5,5 ГэВ, позволяющий работать в режиме 2×2 сгустка, а также детектор КЕДР. В 2016 г. синхротрон Б-4 и линак были заменены на канал от высокопроизводительного инжекционного комплекса ВЭПП-5, и сейчас электроны и позитроны поступают в бустерное кольцо ВЭПП-3 от ВЭПП-5, снабжающего пучками также накопитель ВЭПП-2000. Установка позволяет измерять энергию сталкивающихся частиц с высокой точностью двумя независимыми методами — методом резонансной деполяризации и методом обратного комптоновского рассеяния.

Детектор КЕДР является универсальным магнитным детектором для экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках. Детектор КЕДР включает следующие системы: вершинный детектор, дрейфовую камеру, пороговые аэрогелевые черенковские счетчики, времяпролетные сцинтилляционные счетчики, цилиндрический электромагнитный калориметр на основе жидкого криптона, торцевой электромагнитный калори-

метр на основе кристаллов CsI, сверхпроводящую катушку, мюонную систему, а также систему регистрации рассеянных электронов и позитронов (СРРЭ) и монитор светимости. В главе приведено описание систем детектора, используемых в эксперименте по измерению масс нейтрального и заряженного D -мезонов.

Третья глава посвящена системе аэрогелевых черенковских счетчиков детектора КЕДР, изготовленных на основе метода АШИФ (Аэрогель, ШИфтер, Фотоумножитель). Идея метода состоит в том, чтобы собирать черенковский свет, образованный проходящей частицей в аэрогеле, с помощью пластин переизлучателей спектра (шифтер, или WLS – WaveLength Shifter), расположенных в середине счетчика, и затем с помощью них доставлять переизлученный свет как по световоду (захваченный в угол полного внутреннего отражения) на фотоумножитель. Система АШИФ состоит из 160 счетчиков, расположенных в двух слоях, и покрывает телесный угол $0,96 \times 4\pi$. Полная толщина системы 14 см. По 80 счетчиков расположены в цилиндрической и торцевых частях системы. Количество аэрогеля в системе составляет 1000 литров, с показателем преломления 1,05, что позволяет выполнять π/K -разделение в импульсном диапазоне от 0,6 до 1,5 ГэВ/с. Счётчики слоев сдвинуты друг относительно друга по азимутальному углу φ на половину корпуса, а также цилиндрические счетчики изготовлены различной длины, для того чтобы блоки с электроникой из двух слоев не перекрывались. В этом случае частица из точки взаимодействия с импульсом выше 0,6 ГэВ/с не пересекает шифтеры и боксы с электроникой в обоих слоях. В качестве фотонных детекторов в счетчиках используются фотоумножители на основе микроканальных пластин (ФЭУ с МКП). Конструкция цилиндрического и торцевого счетчиков системы АШИФ показана на рисунке 2. С 2013 г. система АШИФ работает в эксперименте КЕДР.

Заряд с анода ФЭУ преобразуется зарядово-чувствительным предусилителем в парафазный сигнал, который подается из детектора на вход плат оцифровывающей электроники по длинному кабелю (~ 40 м). Для оцифровки сигналов используется электронная плата А6 в стандарте КЛЮКВА, имеющая 6 каналов оцифровки и работающая в режиме pipe-line. Для контроля за собственными шумами ФЭУ в схеме каждого канала есть дискриминатор, сигналы с которых поступают в крейт КАМАК с блоками для счета шумов. В платах А6 на дискриминаторах подстраивались пороги во всех 160 каналах. Ограничение по порогу устанавливалось на значениях, когда амплитуда превышает однофотозлектронную амплитуду. Характерная величина собственных шумов ФЭУ с МКП составляет порядка 100 кГц. Специальное разработанное программное обеспечение выполняет on-line контроль и управление высоковольтным питанием, а также отслеживает уровень собственных шумов ФЭУ с МКП. При выходе одного из параметров за пределы, установленные для счетчика, что может происходить при

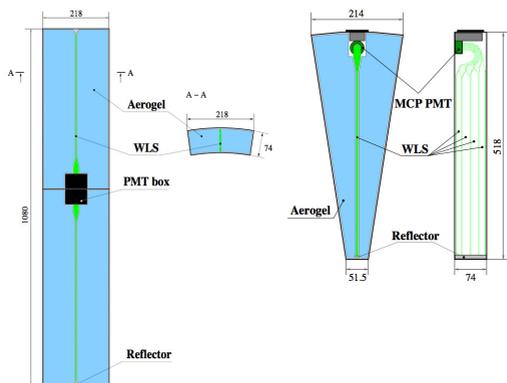


Рисунок 2 — Конструкция двух цилиндрических (слева) и торцевого (справа) счетчиков АШИФ детектора КЕДР

сбросах пучков в ускорителе или перегреве систем детектора, программа отключает счетчик индивидуально понижением напряжения до безопасного или выключает напряжение группы высоковольтных каналов, если параметры изменились сразу у нескольких счетчиков. Высоковольтное питание на счетчики системы АШИФ подается от внешнего опорного КАМАК источника, и затем распределяется на входы управляемых высоковольтных модулей-делителей (high voltage module – НVM, 10 штук), которые были разработаны в ПИЯФ, г. Гатчина. Один блок НVM, имеет 16 выходных каналов, с индивидуальной настройкой напряжения на каждом. Установка нужного номинала осуществляется путем понижения напряжения от опорного (максимальный интервал подстройки – 1500 В от опорного). Была проведена калибровка и проверка стабильности работы опорного источника питания на стенде в течение месяца с нагрузкой на канал в 2,5 МОм. Источник работает достаточно стабильно, и значение установленного напряжения находится в пределах 1,0 В, что составляет 0,026% от установленного напряжения. В ходе эксплуатации модулей НVM происходит постепенная деградация силового транзистора в схеме высоковольтного канала, что приводит к уменьшению интервала регулировки напряжения. Для выявления данной проблемы и ремонта, перед началом экспериментального сезона регулярно производились калибровки всех модулей НVM.

Во время набора экспериментальных данных один раз в неделю проводится калибровка пьедесталов, калибровка электронного тракта (генераторная калибровка) и калибровка ФЭУ с МКП с помощью встроенного в каждый счетчик светодиода.

Разработано программное обеспечение для реконструкции событий в системе АШИФ из 160 счетчиков, и выполнена выставка системы относительно центра системы координат детектора. Поскольку сигнал в счетчике от релятивистской частицы в несколько раз больше в шифтере, чем в аэро-

геле, и шифтеры счетчиков геометрически расположены через 18° , то легко находится их положение в системе координат детектора КЕДР по экспериментальным данным, полученным на космических мюонах, а для торцов дополнительно и по событиям $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$. Были определены смещения цилиндрической и двух торцевых частей системы АШИФ ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) и поворот вокруг оси ($\Delta\phi$). Сдвиг по координате z определяется по положению центра цилиндрических счетчиков системы АШИФ и заданной жестко их длине относительно системы координат детектора КЕДР. Угол поворота ϕ определяется смещением шифтера относительно нуля в локальных координатах. Полученные смещения составляют значения порядка нескольких миллиметров. Основной вклад в геометрическую неопределенность в таком подходе вносит толщина сборки переизлучателей ($3/\sqrt{12} \simeq 0,9$ мм) и координатное разрешение трековой системы детектора (~ 100 мкм).

Измеренная геометрическая эффективность системы АШИФ, которая определялась как отношение числа треков попадающих в систему АШИФ к общему числу треков, на событиях e^+e^- -рассеяния составила 96% при рассмотрении эффективной области счетчика, то есть исключалась область электроники и шифтера.

Для оценки амплитуды сигнала от релятивистской частицы в системе АШИФ рассматривается подход «Толстый счетчик», в котором суммируется число фотоэлектронов на трек из разных смежных счетчиков слоев системы. В подходе «Толстый счетчик» средняя амплитуда на момент начала эксперимента КЕДР составляла $9,3 \pm 0,1$ и $12,5 \pm 0,1$ фотоэлектрона для цилиндрической и торцевой частей системы, соответственно. Для оценки числа фотоэлектронов от K и π -мезонов, а также эффективности идентификации K -мезонов и ложной идентификации π -мезонов, отбирались мюоны с соответствующим импульсом из космических калибровочных заходов. На рисунке 3 показано хорошее соответствие между зависимостями амплитуды от импульса для π и K -мезонов пересчитанных из космических мюонов и π и K -мезонов полученных из физических процессов $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и $J/\psi \rightarrow K^+K^-$, соответственно. Данные представлены для подхода «Толстый счетчик» цилиндрической части системы, и статистики набранной в 2015-2016 гг. В 2014 г. качество π/K -разделения для системы АШИФ в подходе «Толстый счетчик» было лучше 3σ в импульсном диапазоне от 0,6 до 1,5 ГэВ/с.

Проведено исследование временной стабильности системы АШИФ в течение девяти лет эксплуатации (с 2014 по 2023 гг.). Благодаря конструктивным особенностям системы, содержащей шифтер, существует возможность разделить причины уменьшения амплитуды сигнала. Снижение амплитуды со временем связано с падением квантовой эффективности ФЭУ с МКП и снижением прозрачности аэрогеля. В то время как ранее было экспериментально показано, что прозрачность шифтера остается стабильной. Поскольку амплитуда сигнала из шифтера не изменяется со временем,

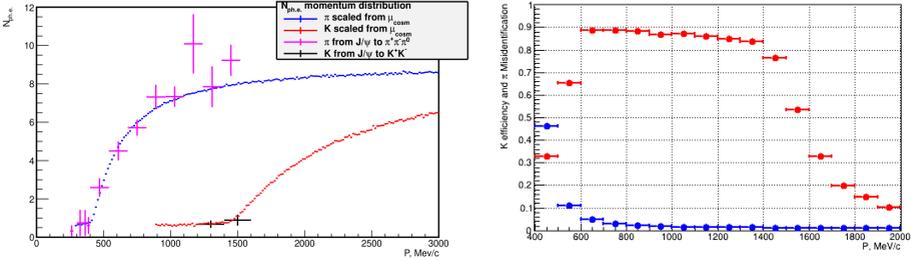


Рисунок 3 — Слева: амплитуда от импульса для π и K -мезонов пересчитанных из космических мюонов и полученных из распадов J/ψ ; справа: эффективность идентификации K -мезонов (ε_K) и ложной идентификации π -мезонов ($\varepsilon_{\pi \rightarrow K}$) от импульса (порог 1 ф.э.), красным и синим цветом, соответственно

данные из его области характеризуют деградацию квантовой эффективности ФЭУ с МКП, тогда как данные из области аэрогеля отражают суммарное уменьшение амплитуды (как за счет аэрогеля, так и за счет ФЭУ с МКП). Полученные величины относительного уменьшения сигнала от времени представлены на рисунке 4. Из них следует, что за девять лет эксплуатации среднее уменьшение амплитуды для всех счетчиков системы, связанное с фотоумножителем и аэрогелем, составляет 35% и 10%, соответственно.

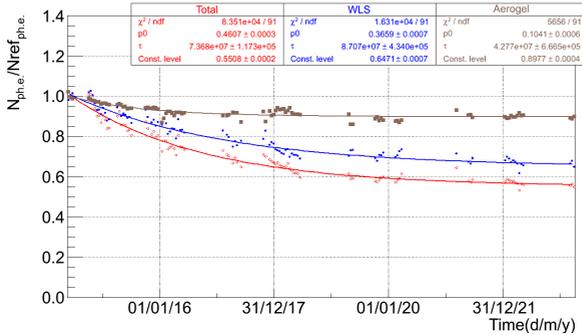


Рисунок 4 — Относительная долговременная стабильность усредненная по всем счетчикам системы АШИФ. Красным – суммарный эффект падения светосбора, синим – уменьшение сигнала связанное с ФЭУ с МКП, коричневым – уменьшение сигнала в аэрогеле

Разработано программное обеспечение для моделирования отклика счетчиков АШИФ на проходящие через них частицы. Реализовано реалистичное описание геометрии всех 160 счетчиков системы (три активные

среды – аэрогель, шифтер, тефлон; пассивные – боксы с электроникой и высоковольтные выходы) и смоделирован отклик системы. Для учёта неоднородности светосбора в счётчике реализовано разбиение аэрогеля и шифтера на мелкие геометрические области. Для каждой области по космическим мюонам с импульсами более 1 ГэВ/с определяется коэффициент пропорциональности, учитывающий неоднородность, который затем используется при вычислении сигнала от частицы. Достигнуто хорошее согласие данных моделирования и эксперимента для системы АШИФ.

В четвертой главе описан эксперимент по измерению масс нейтрального и заряженного D -мезонов на детекторе КЕДР. Анализ основан на двух наборах экспериментальных данных, набранных в пике резонанса $\psi(3770)$ с интегральной светимостью 4,9 пб⁻¹. Первый набор данных 0,9 пб⁻¹ был выполнен в 2004 г. Эти данные использовались для получения результата эксперимента КЕДР 2010 г., представленного в таблицах PDG. В этом результате систематическая неопределенность, обусловленная поправкой на излучение в начальном состоянии (ISR), доминирует в общей систематической неопределенности, и определяется точностью зависимости сечения $\sigma(e^+e^- \rightarrow D\bar{D})$ от энергии. В настоящее время коллаборация BES-III опубликовала более точные измерения энергетической зависимости сечения $\sigma(e^+e^- \rightarrow D\bar{D})$, и поэтому данные 2004 г. были повторно переработаны. Второй набор данных 4,0 пб⁻¹ был выполнен в 2016-2017 гг., после длительного перерыва, в ходе которого был выполнен частичный ремонт и модернизация подсистем детектора КЕДР. Масса D -мезонов измеряется в процессе $e^+e^- \rightarrow \psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$ с реконструкцией одного из D -мезонов. D^0 -мезоны реконструируются в конечном состоянии $K^-\pi^+$ (и зарядово-сопряженные), а D^+ -мезоны в канале распада $K^-\pi^+\pi^+$ (и зарядово-сопряженные).

Инвариантная масса D -мезона вычисляется как

$$M_{bc} = \sqrt{E_{beam}^2 - \left(\sum_i \vec{p}_{true_i} \right)^2}, \quad (1)$$

где E_{beam} – энергия пучка, \vec{p}_{true_i} – импульсы продуктов распада D -мезона. Помимо M_{bc} , D -мезоны эффективно выделяются по разнице энергий D -мезона и пучка:

$$\Delta E = \sum_i \sqrt{m_i^2 + p_{true_i}^2} - E_{beam}, \quad (2)$$

где m_i и p_{true_i} – массы и импульсы продуктов распада D -мезона. Для сигнальных событий величина ΔE близка к нулю. Для измерения массы D^0 -мезона в дополнение к переменным M_{bc} и ΔE используется переменная $\Delta|p|$, которая является разностью абсолютных значений импульсов продуктов распада D^0 -мезона.

Точность измерения импульса напрямую влияет на измерение массы D -мезонов. К значениям реконструированных импульсов применяются следующие поправки – обусловленную ионизационными потерями в веществе и поправку, связанную с абсолютной калибровкой импульса (α). Импульсное разрешение в моделировании настраивается с использованием треков от космических частиц.

Выполняется небинированная подгонка методом максимального правдоподобия экспериментальных событий с массой D -мезона в качестве одного из параметров, с учётом фонового вклада. Фон в анализе исходит из случайных комбинаций треков континуум процесса $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}(q = u, d, s)$ и других мод распадов D -мезонов. Функции распределения вероятности событий сигнала и фонов получены в результате параметризации распределений Монте-Карло (МК) моделирования. В моделировании учитываются радиационные поправки, как в начальном (ISR), так и в конечном состоянии (FSR). Для поправок ISR используется зависимость сечения $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$ от энергии, измеренная коллаборацией BESIII.

Для π/K идентификации при измерении масс D -мезонов используется система аэрогелевых счетчиков АШИФ, что помогает подавить фоновые события и уменьшает систематическую ошибку. В случае измерения массы D^+ -мезона подавление фона от пионов также выполняется с помощью время-пролётной системы и измерения ионизационных потерь (dE/dx) в ДК.

Результаты подгонки экспериментальных данных для D^0 и D^+ мезонов показаны на рисунках 5 и 6, соответственно.

Источниками систематических ошибок в измерении масс D^0 - и D^+ -мезонов являются: абсолютная калибровка импульса, ионизационные потери в веществе, импульсное разрешение, неопределенность энергии мезона, формы распределения сигнала и фонов, идентификация и калибровка энергии пучка.

Поскольку для анализа использовались два набора данных, была выполнена процедура усреднения значений масс. Взвешивание масс выполнено с учетом частичной корреляции систематических ошибок. Систематическая ошибка, связанная с неопределенностью формы сигнала и фона, рассматривается как коррелированная часть. Сравнение измеренных масс D -мезонов, полученных в этом анализе, с другими измерениями показано на рисунке 7, где KEDR 2025 — средневзвешенный результат, основанный на двух наборах данных за 2004 г. и 2016-2017 гг. Также в рамках проведенного анализа была получена разница масс между D^+ и D^0 -мезонами. Результат согласуется с текущим среднемировым значением и наиболее точным результатом LHCb.

В заключении приведены основные результаты работы.

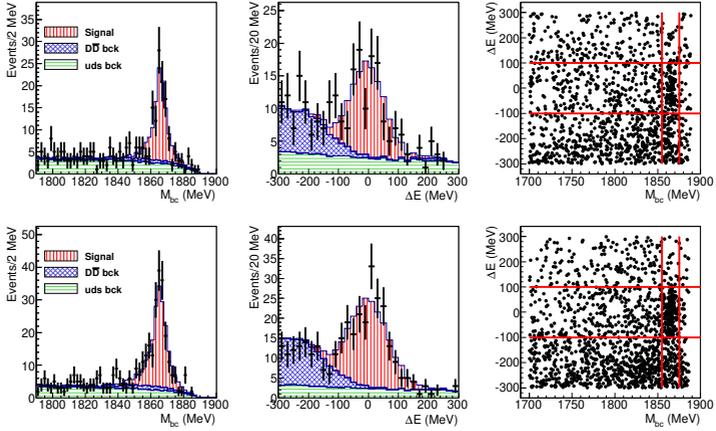


Рисунок 5 — Экспериментальные данные (точки с ошибками) и результаты параметризации (гистограмма) для распада $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$. Распределение M_{bc} для событий с $|\Delta E| < 100$ МэВ (слева), распределение ΔE для событий с $1855 \text{ МэВ} < M_{bc} < 1875 \text{ МэВ}$ (посередине) и корреляция $M_{bc} - \Delta E$ для экспериментальных данных (справа). Сверху — набор данных 2004 г., снизу — набор данных 2016-2017 гг.

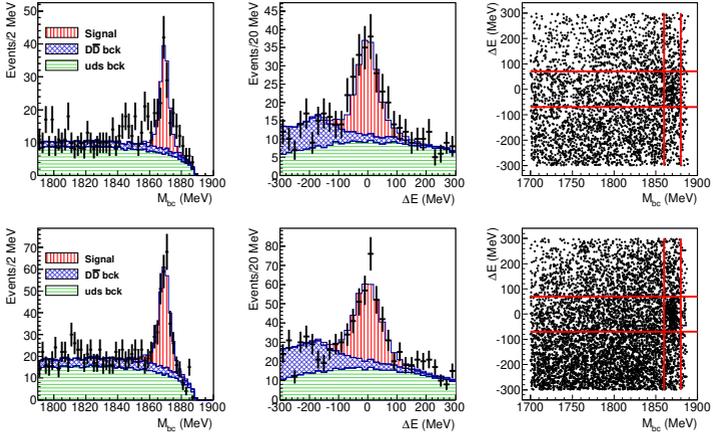


Рисунок 6 — Экспериментальные данные (точки с ошибками) и результаты параметризации (гистограмма) для распада $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$. Распределение M_{bc} для событий с $|\Delta E| < 70$ МэВ (слева), распределение ΔE для событий с $1860 \text{ МэВ} < M_{bc} < 1880 \text{ МэВ}$ (посередине) и корреляция $M_{bc} - \Delta E$ для экспериментальных данных (справа). Сверху — набор данных 2004 г., снизу — набор данных 2016-17 гг.

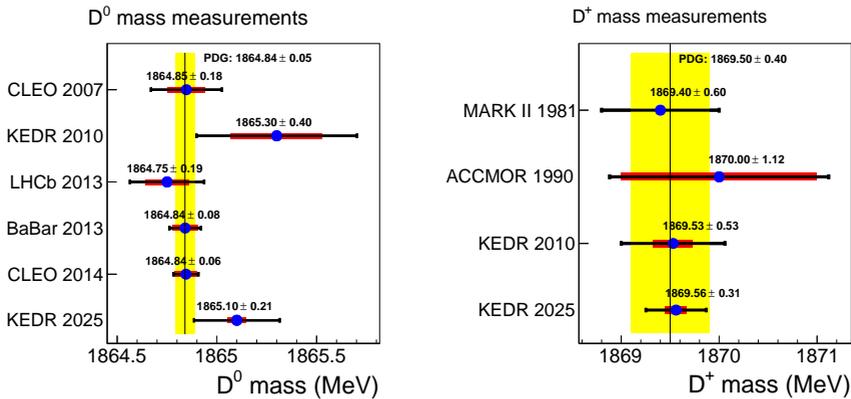


Рисунок 7 — Сравнение результатов измерений масс D^0 (слева) и D^+ (справа) мезонов в эксперименте КЕДР с данными экспериментов из таблицы PDG. Вертикальные линии показывают средние мировые значения, вертикальные полосы — их ошибки. «КЕДР 2025» соответствуют средневзвешенным результатам, полученным на данных набранных в 2004 и 2016–2017 гг.

Заключение

Основные результаты данной работы состоят в следующем:

1. Проведено измерение масс нейтрального и заряженного D -мезонов в процессе $e^+e^- \rightarrow \psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$ на основе $4,9 \text{ пб}^{-1}$ интегральной светимости, набранной в эксперименте КЕДР в 2004-м и 2016–2017 годах. D -мезоны реконструировались в распадах $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$ и $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$. Измеренное значение массы D^0 согласуется с более точными измерениями других экспериментов, в то время как значение массы D^+ на данный момент является наиболее точным измерением. Значения масс составили:

$$M_{D^0} = 1865,100 \pm 0,210_{\text{стат}} \pm 0,046_{\text{сист}} \text{ МэВ},$$

$$M_{D^+} = 1869,560 \pm 0,288_{\text{стат}} \pm 0,109_{\text{сист}} \text{ МэВ}.$$

Разница масс между D^+ и D^0 -мезонами составила:

$$M_{D^+} - M_{D^0} = 4,46 \pm 0,36_{\text{стат}} \pm 0,12_{\text{сист}} \text{ МэВ}.$$

2. Разработаны и запущены в эксплуатацию системы питания и изменения частоты собственных шумов ФЭУ МКП, а также программа мониторингования и контроля параметров (напряжение, ток, частота собственных шумов) для полномасштабной системы АШИФ из 160 счетчиков. Что позволило успешно использовать систему АШИФ в эксперименте КЕДР с 2014 г по 2025 г.

3. Разработано программное обеспечение для реконструкции событий в системе АШИФ из 160 счетчиков распределенных в два слоя. Произведена выставка системы относительно трековой системы, что позволяет использовать систему АШИФ для анализа физических процессов. Система идентификации АШИФ позволила улучшить точность измерения масс D -мезонов.
4. Измерена геометрическая эффективность регистрации частиц в системе АШИФ на $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ событиях. Эффективность двухслойной системы идентификации на основе счетчиков АШИФ в детекторе КЕДР составляет $95,7 \pm 0,6\%$.
5. Измерена неоднородность светосбора, эффективность регистрации и качество идентификации частиц на космических мюонах в системе АШИФ детектора КЕДР. Неоднородность светосбора в среднем по счетчикам составляет порядка $\pm 30\%$. В подходе «Толстый счетчик» (сумма амплитуд с двух слоев) амплитуда после запуска системы в эксперименте КЕДР в 2014 году составляла $9,3 \pm 0,1$ и $12,5 \pm 0,1$ фотоэлектрона для цилиндрической и торцевой частей, соответственно. Это соответствует эффективности регистрации частиц $99,991 \pm 0,001\%$ и $99,999 \pm 0,001\%$. Качество π/K -разделения пересчитанное из космических мюонов для системы АШИФ в подходе «Толстый счетчик» в среднем снизилось с 3σ в 2014 году до $2,5\sigma$ в 2023 году в рабочем импульсном диапазоне от 600 до 1500 МэВ/с.
6. Измерена временная стабильность амплитуды сигнала в счетчиках АШИФ в ходе эксперимента КЕДР. Амплитуда в счетчиках для частиц пересекающих аэрогель плавно уменьшилась на 38% от начальной величины за первые три года и в течении последних шести лет изменилась относительно слабо еще на 7%. Уменьшение амплитуды сигнала, в течение девяти лет эксплуатации в среднем для всех счетчиков системы, связанное с фотоумножителем и аэрогелем составляет 35% и 10%, соответственно.
7. Разработано программное обеспечение для Монте-Карло моделирования системы аэрогелевых Черенковских счетчиков АШИФ в составе детектора КЕДР. Моделирование использовалось в физическом анализе по измерению масс D -мезонов, а также в анализах по измерению вероятности распада J/Ψ в конечные состояния $2(\pi^+\pi^-)\pi^0$, $K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^0$, $2(\pi^+\pi^-)$, K^+K^- , $\pi^+\pi^-$ и $p\bar{p}$.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Particle detection efficiency of the KEDR detector ASHIPH system / A. Yu. Barnyakov, M. Yu. Barnyakov, ... I. V. Ovtin [et al.]. – Текст: электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2020. – Vol. 952. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.06.019>. – Дата публикации: 01.02.2020.
2. ASHIPH Cherenkov counters in the KEDR experiment / A. Yu. Barnyakov, M. Yu. Barnyakov, ... I. V. Ovtin [et al.]. – Текст: электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2025. – Vol. 1080. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170739>. – Дата публикации: 25.06.2025.
3. Simulation of the ASHIPH Cherenkov counters of the KEDR detector / A. Yu. Barnyakov, M. Yu. Barnyakov, ... I. V. Ovtin [et al.]. – Текст: электронный // Journal of Instrumentation. – 2017. – Vol. 12 C07041. – URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/12/07/C07041>. – Дата публикации: 28.07.2017.
4. Measurement of the Masses of Neutral and Charged D Mesons with the KEDR Detector / V. V. Anashin, O. V. Anchugov, ... I. V. Ovtin [et al.]. – Текст: электронный // Physics of Particles and Nuclei. – 2025. – Vol. 56, nr. 3. – P. 802-808. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1063779624702320>. – Дата публикации: 27.06.2025.
5. New measurement of D^0 and D^+ meson masses with the KEDR detector / V. V. Anashin, O. V. Anchugov, ... I. V. Ovtin [et al.]. – Текст: электронный // Journal of High Energy Physics. – 2025. – Vol. 2025, nr. 1. – URL: [https://doi.org/10.1007/JHEP11\(2025\)001](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2025)001). – Дата публикации: 04.11.2025.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025610059 Российская Федерация. Программное обеспечение для исследования неоднородности светосбора, долговременной стабильности и качества π/K -разделения на космических мюонах в системе АЧС детектора КЕДР : № 2024692072 : заявл. 16.12.2024 : опубл. 09.01.2025 / Овтин И. В. ; заявитель ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. – Текст: непосредственный.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025610186 Российская Федерация. Программное обеспе-

чение для моделирования событий в системе АШИФ детектора КЕДР: № 2025610186 : заявл. 16.12.2024 : опубл. 09.01.2025 / Овтин И. В. ; заявитель ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. – Текст: непосредственный.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686851 Российская Федерация. Программное обеспечение для анализа масс заряженного и нейтрального D-мезонов с детектором КЕДР: № 2024685794 : заявл. 31.10.2024 : опубл. 12.11.2024 / Овтин И. В. ; заявитель ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. – Текст: непосредственный.

Овтин Иван Валерьевич

**ИЗМЕРЕНИЕ МАСС НЕЙТРАЛЬНОГО И ЗАРЯЖЕННОГО
D-МЕЗОНОВ НА ДЕТЕКТОРЕ КЕДР**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 26.02.2026.

Подписано в печать 27.02.2026.

Формат 60×90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 4

Обработано на ИВМ РС и отпечатано на ротапринтере ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11