

На правах рукописи

Шоркин Роман Андреевич

**Исследование лептонной универсальности в распадах
В-мезонов на Большом адронном коллайдере**

Специальность 1.3.15 —

«Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС).

Научный руководитель: Ведущий эксперт научного проекта Центра инфраструктурного взаимодействия MegaScience НИТУ МИСИС, к.ф.-м.н.

Холоденко Сергей Анатольевич

Официальные оппоненты: **Ким Виктор Тимофеевич**, доктор физ.-мат. наук, ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», заместитель руководителя Отделения физики высоких энергий

Слабоспицкий Сергей Ростиславович, доктор физ.-мат. наук, ФГБУ «Институт физики высоких энергий им. А. А. Логунова НИЦ «Курчатовский институт», ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН), г. Новосибирск

Защита состоится 10 декабря 2025 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.1.262.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) по адресу: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте <https://www.lebedev.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

номер 24.1.262.03, д-р физ.-мат. наук _____

С.П. Баранов

Введение

Актуальность темы диссертации

Основной теорией физики частиц и взаимодействий является Стандартная модель (СМ) – квантовая теория поля, описывающая сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия. С обнаружением бозона Хиггса в экспериментах ATLAS и CMS [1; 2] Большого адронного коллайдера (БАК) поиск предсказываемых СМ фундаментальных частиц был завершен.

Однако, некоторые из аспектов СМ и определенные экспериментальные наблюдения указывают на фундаментальную незавершенность теории. К таковым относятся: отсутствие кандидатов на роль темной материи [3], невозможность объединения СМ и общей теории относительности [4], проблема иерархии фермионных масс (включая массы нейтрино) [5] и отсутствие механизма в СМ для объяснения наблюдающейся барионной-антибарионной асимметрии вселенной [6].

Спектр моделей, расширяющих СМ, весьма широк (см., например, [7–9]). Определяющим фактором в выборе расширения может служить выполненное на его основе верное предсказание эффектов, невозможных в СМ. Таким образом, поиск гипотетической новой физики (НФ) является одной из основных задач современных экспериментов физики частиц.

Такие поиски могут быть осуществлены напрямую: обнаружением распада частиц НФ на частицы СМ. Альтернативой выступает непрямой поиск: измерение отклонений амплитуд процессов от значений, предсказываемых в рамках СМ. Выбор измеряемого процесса при этом играет ключевую роль: для возможности обнаружения вклада НФ амплитуда процесса в СМ должна быть значительно подавлена.

К таким процессам относится нейтральный ток с изменением аромата (НТИА). Процессы НТИА запрещены на древесном уровне СМ и подавлены по механизму Глэшоу-Иллиопулоса-Майани на уровне однопетлевых поправок. Эффективная низкоэнергетическая теория, описывающая процессы НТИА, позволяет определить вклад НФ модельно-независимым способом: как поправку к эффективным постоянным взаимодействия – коэффициентам Вильсона. Однако точности теоретических расчетов для НТИА-переходов ограничены систематическими погрешностями, связанными с непертурбативными эффектами КХД. Экспериментальный поиск отклонений от СМ сосредоточен на «оптимизированных параметрах» – величинах, теоретический расчет которых подвержен наименьшему влиянию указанных эффектов. Измерения параметров НТИА-распадов B мезонов с переходом $b \rightarrow sl^+\ell^-$, про-

веденные коллаборациями LHCb, Belle и BaBar, указывают на наличие отклонений от предсказаний СМ, объяснимых вкладами НФ [10]. В частности, интерес представляет отношение вероятностей распадов (branching fraction ratio) R_K :

$$R_K = \frac{\int_{q^2_{\min}}^{q^2_{\max}} \frac{d\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{dq^2} dq^2}{\int_{q^2_{\min}}^{q^2_{\max}} \frac{d\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)}{dq^2} dq^2},$$

где $\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)/\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)$ – относительные вероятности распадов B^+ мезонов на состояния $K^+ \mu^+ \mu^-/K^+ e^+ e^-$; q^2 – квадрат инвариантной массы лептонной пары. Здесь и далее при записи частицы и её канала распада подразумеваются также и зарядово-сопряженные состояния, если не сказано обратного. Другие величины интереса – определенные в работе [11] L -параметры:

$$L_{V_1 V_2} = \frac{\mathcal{B}_{b \rightarrow s} g_{b \rightarrow d} f_L^{b \rightarrow s}}{\mathcal{B}_{b \rightarrow d} g_{b \rightarrow s} f_L^{b \rightarrow d}}, \quad (1)$$

где $\mathcal{B}_{b \rightarrow q}$ – вероятность распада $B_Q \rightarrow V_1 V_2$, соответствующего переходу $b \rightarrow q$ на кварковом уровне; $f_L^{b \rightarrow q}$ – доля его продольно поляризованной компоненты; $g_{b \rightarrow q}$ – множитель фазового пространства.

Дополнительные измерения комплементарных процессов заряженного тока $b \rightarrow c\bar{\nu}$ увеличивают статистическую значимость отклонений [12]. Адронные распады B мезонов с $b \rightarrow s$ и $b \rightarrow d$ переходами также представляют интерес [11]. Однако, большинство проведенных измерений характеризуются значительными погрешностями и не позволяют сделать однозначный вывод о природе аномалий.

Представленные в тексте данной диссертации исследования полулептонных и адронных НТИА-распадов с переходом $b \rightarrow s$ нацелены на измерение величины R_K в кинематической области, ранее не изучавшейся на данных адронных коллайдеров, а также на изучение распадов $B_{(d,s)}^0 \rightarrow K_S^0 K^*(892)^0$, вероятности которых определяют значения L -параметров. Их актуальность обуславливается значительным интересом к наблюдавшимся отклонениям [13] и поиску проявлений физики за пределами СМ.

Цели и задачи исследования

Основными целями диссертационной работы являются измерение величины R_K и построение модели для отбора и параметризации распределений событий адронных распадов нейтральных $B_{(d,s)}^0$ мезонов $B_{(d,s)}^0 \rightarrow K_S^0 K^*(892)^0$ на данных эксперимента LHCb за первый (2011-2012 гг.) и второй (2015-2018 гг.) сеансы работы БАК при энергиях pp -соударений 7-8 и 13 ТэВ. Были решены следующие задачи: моделирование актуальных данных методом Монте-Карло; введение поправок в моделирование для наилучшего соответствия условиям эксперимента; формулировка и оптимизация критериев отбора сигнальных данных; вычисление

эффективности отбора на основе компьютерного моделирования; построение моделей для выделения сигнального вклада путем параметризации распределений инвариантных масс комбинаций треков-кандидатов, составляющих реконструированный B мезон.

Для достижения цели развития аппаратной и методологической базы эксперимента ЛHCb, были решены задачи исследования влияния удаления модуля адронного калориметра (HCAL, hadron calorimeter) при обновлении установки в рамках проекта «LHCb Upgrade-II» и возможности использования классификаторов типа BDT (Boosted Decision Tree, дерево решений с бустингом) для отбора редких событий в условиях неопределенного преобладающего фона.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются экспериментальные данные ЛHCb, набранные во время первого и второго сеансов работы БАК, и соответствующие им данные численного моделирования. Исследование выполнялось методом компьютерной обработки при помощи программного пакета ROOT [14], пакетов GAUSS и DAVINCI коллаборации ЛHCb [15], пакета для моделирования GEANT4 [16] и средств работы с большими данными языка программирования Python: пакетов XGBoost [17], zfit [18], scikit-learn [19] и др. При проведении методологических исследований автором использовались экспериментальные данные, полученные на выведенных пучках Супер-протонного синхротрона (СПС, SPS: Super Proton Synchrotron), а также результаты выполненного автором численного моделирования.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующих положениях:

1. Впервые выполнено измерение параметра R_K в данных эксперимента на адронном коллайдере (ЛHCb) в кинематической области $q^2 > 14,3 \text{ ГэВ}^2/c^4$. Полученное значение $R_K(q^2 > 14,3 \text{ ГэВ}^2/c^4) = 1,079_{-0,100}^{+0,114}$ является самым точным измерением параметра R_K в указанной области q^2 на момент написания текста диссертации.

2. Впервые проведено исследование распада $B_{(d,s)}^0 \rightarrow K_S^0 K^*(892)^0$ в объединенных данных эксперимента ЛHCb первого и второго сеанса работы БАК. Доступный для исследования статистический объем объединенного набора (9 фб^{-1}) в 9 раз превышает объем данных 2011-го года, на котором было проведено наиболее актуальное исследование распада $B^0 \rightarrow K_S^0 K^*(892)^0$ [20] ($\sim 1 \text{ фб}^{-1}$) и в 3 раза – объем первого сеанса, на котором было выполнено исследование распада $B_s^0 \rightarrow K_S^0 K^*(892)^0$ [21] ($\sim 3 \text{ фб}^{-1}$);

3. Проведено исследование отклика калориметрического модуля на разные типы частиц, на его основе разработан новый метод для анализа состава выведенного пучка.

Теоретическая и практическая значимость

Величина отношения лептонной универсальности R_K является одним из наиболее важных модельно-независимых параметров, определяемых в эксперименте. Полученные результаты её измерений используются в комбинированных исследованиях эффективных постоянных взаимодействия (коэффициентов Вильсона) в формализме SMEFT (Standard Model Effective Field Theory, эффективная теория поля Стандартной модели) [22], посвященных интерпретации аномалий в НТИА-распадах B -мезонов и проверке гипотез НФ [23]. Разработанные в ходе анализа подходы к измерению величины параметра R_K будут использованы в последующих анализах полуплептонных распадов (в особенности с электронами в конечном состоянии) в данных эксперимента ЛНСб третьего сеанса БАК.

Разработанные алгоритмы отбора и параметризации распределений инвариантных масс событий $B_{(d,s)}^0 \rightarrow K_S^0 K^*(892)^0$ являются основой для измерения относительных ширин двухчастичных адронных распадов B мезонов $B \rightarrow M_1 M_2 [\rightarrow hh']$.

Предложенный метод анализа отклика калориметрического модуля позволяет проводить быстрые измерения состава выведенного адронного пучка, что широко используется для отладки параметров режима работы каналов тестовых пучков при исследованиях новых детекторов.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, полученных на основе данных эксперимента ЛНСб, обеспечивается использованием методов контроля набора данных и работы детекторной установки коллаборации, выполнением калибровочных измерений и использованием стандартных программных пакетов. Анализ сопровождался процедурой внутреннего рецензирования в коллаборации ЛНСб. Полученные результаты были доложены на международных конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Значение параметра R_K для распадов $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ и $B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-$ в области квадрата инвариантной массы лептонной пары $q^2 > 14,3 \text{ ГэВ}^2/c^4$, измеренное на данных pp -соударений при энергиях $\sqrt{s} = 7, 8$ и 13 ТэВ эксперимента ЛНСб, составляет $R_K(q^2 > 14,3 \text{ ГэВ}^2/c^4) = 1,079_{-0,100}^{+0,114}$, что соответствует лептонной универсальности Стандартной модели в пределах 1σ .

2. Разработанный алгоритм анализа инклюзивных распадов $B_{(d,s)}^0 \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^-$ в объединенном наборе данных pp -соударений при энергиях $\sqrt{s} = 7, 8$ и 13 ТэВ эксперимента

ЛНСб, включая обученный классификатор для подавления преобладающего комбинаторного фона, позволяет впервые выделить резонансное состояние $B_{(d,s)}^0 \rightarrow K_S^0 K^*(892)^0$.

3. Разработанный метод позволяет осуществить быстрый анализ состава пучка по откликам в модуле электромагнитного калориметра типа «шашлык», трековой системы и счетчика черенковского излучения.

4. Эффективность отбора, основанного на применении многомерных классификаторов типа BDT, не зависит от абсолютного вклада сигнальных событий в фоновую выборку при уровне относительного смешивания сигнального и фонового наборов данных 1:1000.

Апробация работы и публикации

Результаты работы диссертанта докладывались и обсуждались на рабочих совещаниях группы редких распадов, группы безчармониевых распадов B -мезонов и группы модернизацией калориметра ECAL Upgrade II коллаборации ЛНСб. Автор выступал с докладами на конференциях: Шестой международной конференции по физике частиц и астрофизике «ICPPA-2022», Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2024» и «Ломоносов-2025», а также на XI Всероссийском молодежном научном форуме с международным участием «Open Science 2024». Результаты измерений R_K были отмечены публикацией в периодическом издании CERN Courier [24].

Основные результаты по теме диссертации были опубликованы в 3 статьях в рецензируемых журналах списка ВАК, из них 2 – в журналах, индексируемых Scopus (список опубликованных работ приведен в конце автореферата)

Диссертант является соавтором 134 опубликованных работ коллаборации ЛНСб.

Личный вклад диссертанта

Автором был разработан и реализован алгоритм введения поправок к моделированным распределениям, учитывающих влияние разрешения детекторной установки на размытие и сдвиг измеряемых импульсов треков. Автор выполнил исследование вклада фона от процессов с неверной идентификацией частиц. Диссертант выполнил работу по изучению вклада фона от резонансной инклюзивной моды $B^+ \rightarrow \psi(2S)K^+X$ в общую структуру спектра электронных событий: выполнил оценку выхода событий множества каналов, составляющих инклюзивную моду, составил модель для описания формы вклада данной компоненты в спектр инвариантных масс реконструированных B мезонов, провел оценку связанного с данным вкладом систематического эффекта при параметризации распределения инвариантных масс B . Автор внес определяющий вклад в работу над измерением величины R_K и подготовку публикации в составе международной группы.

Диссертант выполнил работы по изучению резонансной адронной моды распада $B_{(d,s)}^0 \rightarrow K_S^0 K^{*}(892)^0$ и канала $B_{(d,s)}^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$: сформулировал и реализовал критерии отбора, выполнил расчет эффективностей отбора, внес поправки к моделированным распределениям с использованием средств коллаборации LHCb, провел обучение, проверку и применение классификатора BDT, предложил и реализовал параметризации актуальных распределений.

Автор выполнил моделирование адронных, электронных и мюонных взаимодействий в тестовом модуле электромагнитного калориметра LHCb и провел исследование экспериментальных данных на тестовом пучке H8. Диссертантом была измерена зависимость чистоты адронного пучка от выбранного режима работы канала.

Работа по изучению оптимизации отбора редких событий в присутствии неопределенного преобладающего фона на основе BDT также была выполнена диссертантом.

Автор принимал участие в качестве сменного персонала в контроле над обеспечением работы и сбора данных установкой LHCb в 2022 и 2023 годах на объектах Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН, CERN: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) и в сменах при тестировании прототипа будущего электромагнитного калориметра на выведенных пучках СПС в июне 2022 года.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 183 страницы, включая 56 рисунков и 38 таблиц. Библиография содержит 167 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность проведенных исследований, их научная новизна и практическая полезность. Сформулированы цели и задачи научной работы. Описаны объекты и методы исследования, приведены обоснования достоверности полученных результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту. Приведена информация о личном вкладе диссертанта.

Первая глава диссертации содержит описание теории исследуемых процессов. Излагаются актуальные положения СМ, рассмотрены появляющиеся на однопетлевом уровне нейтральные токи с изменением аромата (НТИА). Представлен аппарат низкоэнергетической эффективной теории для описания адронных процессов НТИА. Ниже приведено краткое содержание разделов § 1.3 и § 1.4, описывающих теоретическую проблематику диссертационного исследования.

Описание НТИА-процессов на адронном уровне обязано включать в себя пертурба-

тивные и непертурбативные КХД-поправки (см. Рис 1 для примера диаграммы распада $B^- \rightarrow K^- \ell^+ \ell^-$), учитывающие эффекты малых и больших расстояний. Теоретические расчеты производятся в формализме низкоэнергетичной эффективной теории поля (ЭТП).

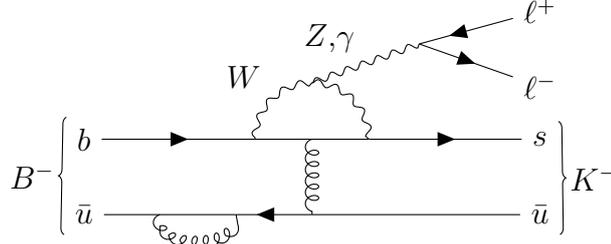


Рисунок 1 – Пример диаграммы распада $B^- \rightarrow K^- \ell^+ \ell^-$

В общем случае, переход $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ описывается эффективным гамильтонианом

$$\mathcal{H}_{\text{эфф.}} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{ts}^* \sum_{i=1}^{12} C_i(\mu) \mathcal{O}_i(\mu), \quad (2)$$

где \mathcal{O}_i – локальные операторы, описывающие конкретный рассматриваемый процесс [25]; C_i – коэффициенты Вильсона, характеризующие силу взаимодействия (эффективные константы взаимодействия) [26]. Параметр μ задает энергетический масштаб теории, $V_{qq'}$ – элементы матрицы Кабиббо-Кобаяси-Маскавы, G_F – постоянная Ферми.

При спуске по шкале перенормировки до $\mu \sim m_b$ происходит смешивание операторов [27]. В то время как тяжелые внутренние линии (t -кварк, и W^\pm/Z бозоны) сводятся к вершинам эффективной теории, пропагаторы s -кварков остаются динамической степенью свободы. Это приводит к возникновению нелокальных эффектов: разделению эффективной вершины перехода $b \rightarrow s$ и вершины с испусканием виртуального фотона. Наиболее значительные нелокальные эффекты вызваны операторами ток-ток $\mathcal{O}_{1,2}$ с s -кварками, формирующими петли. При величине передачи четырехимпульса $q^2 \geq m_{J/\psi}^2$ s -кварковые петли становятся промежуточными векторными состояниями (J/ψ , $\psi(2S)$ и пр.), рождающимися на массовой поверхности и распадающимися на лептонную пару $\ell^+ \ell^-$ [28]. Нелокальные адронные матричные элементы, описывающие непертурбативные эффекты КХД, вычисляются путём разложения на форм-факторы – скалярные функции передающегося четырехимпульса q^2 , параметризующие адронные распады. Каждый из подходов для расчета форм-факторов – КХД-факторизация [29; 30] и интерполяция экспериментальных измерений [31] – характеризуется значительными систематическими погрешностями, ограничивающими точность теоретических предсказаний амплитуд НТИА-процессов.

Во **второй главе** приведен обзор актуальных для темы диссертации экспериментальных результатов в области исследований НТИА-процессов. Введено понятие «оптимизиро-

ванных параметров»: величин, теоретические предсказания значений которых особенно точны и не подвержены влиянию больших систематических погрешностей. Наибольший интерес представляют два класса оптимизированных параметров:

— Отношения парциальных ширин полуплептонных распадов B мезонов R_M (отношения лептонной универсальности):

$$R_M[q_{min}^2, q_{max}^2] \equiv \frac{\int_{q_{min}^2}^{q_{max}^2} dq^2 \frac{d\Gamma(B \rightarrow M \mu^+ \mu^-)}{dq^2}}{\int_{q_{min}^2}^{q_{max}^2} dq^2 \frac{d\Gamma(B \rightarrow M e^+ e^-)}{dq^2}}, \quad (3)$$

где Γ – парциальная ширина распада, M – мезон в конечном состоянии (K, K^*, ϕ и пр.), q^2 – квадрат инвариантной массы лептонной пары. В СМ $R_M^{CM} = 1 + O(m_\mu^2/m_b^2)$ при интегрировании по всему пространству q^2 [32]. Основное преимущество величины R_M – при её вычислении в любой области q^2 все пертурбативные и непертурбативные вклады КХД сокращаются.

— Введенные в работе [33] « L -параметры» – вероятности адронных распадов $\bar{B}_{(d,s)}^0 \rightarrow K^{(*)0} \bar{K}^{(*)0}$ с продольной поляризацией конечного состояния:

$$L_{V_1 V_2} = \frac{\mathcal{B}_{b \rightarrow s} g_{b \rightarrow d} f_L^{b \rightarrow s}}{\mathcal{B}_{b \rightarrow d} g_{b \rightarrow s} f_L^{b \rightarrow d}}, \quad (4)$$

где $\mathcal{B}_{b \rightarrow q}$ – вероятность распада $B_Q \rightarrow V_1 V_2$, соответствующего переходу $b \rightarrow q$ на кварковом уровне; $f_L^{b \rightarrow q}$ – доля его продольно поляризованной компоненты; $g_{b \rightarrow q}$ – множитель фазового пространства соответствующего распада. Экспериментальное измерение L -параметров требует анализ процессов $\bar{B}_{s,d} \rightarrow \bar{K}^*(892)^0 K^*(892)^0$, $B_{s,d} \rightarrow K^0 K^*(892)^0$ и $\bar{B}_{s,d} \rightarrow \bar{K}^0 K^0$ [11], часть из которых ранее не наблюдалась [34].

Третья глава посвящена описанию эксперимента ЛНСб Большого адронного коллайдера (БАК) в конфигурации первого и второго сеансов.

ЛНСб является специализированным экспериментом, направленным на изучение процессов с прелестными фермионами СМ [35]. Детекторная установка ЛНСб представляет собой спектрометр с угловой областью регистрации событий в $10 < \theta < 250$ мрад. Выбор геометрии детектора вызван тем, что при высоких энергиях БАК кинематически предпочтительная область рождения пар $b\bar{b}$ кварков представляет собой конус вдоль направления движения протонных пучков. Схематическое изображение детектора ЛНСб на период 2011-2018 годов представлено на Рис. 2.

Основные компоненты детектора:

— Трекинговая система ЛНСб, состоящая из вершинного детектора VELO [36], трекинговых станций ТТ и Т1-Т3 [37] и дипольного магнита;

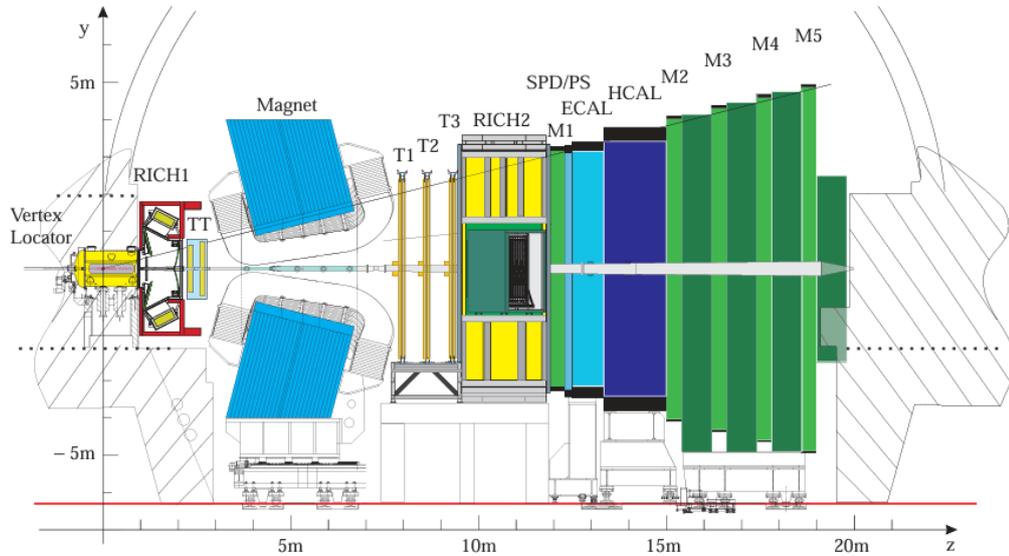


Рисунок 2 – Детектор ЛНСб БАК в конфигурации первого и второго сеансов [35]

- Система идентификации частиц [38], включающая в себя детектор колец излучения Вавилова-Черенкова RICH, калориметрическую подсистему и мюонные станции;
- Триггер эксперимента [39; 40], позволяющий снизить поток данных за счет быстрой обработки информации и выделения интересных событий;
- Программное обеспечение для моделирования и обработки данных.

В **четвертой главе** представлен анализ отношения лептонной универсальности R_K в области значений инвариантной массы лептонной пары $q^2 > 14,3 \text{ ГэВ}^2/c^4$ с использованием данных коллаборации ЛНСб первого и второго сеансов БАК. Результаты приведенного исследования опубликованы в работе [41].

Для отбора событий в анализе использовался набор кинематических критериев, вето-критериев для исключения фона от частично-реконструированных событий и критериев к переменным идентификации частиц. Отбор событий электронной моды осуществлялся с использованием параметра q_{track}^2 – квадрата инвариантной массы лептонной пары, рассчитанного на основе исключительно трековой информации и не подверженного потенциальным ошибкам алгоритма восстановления тормозного излучения. Для исключения ложных событий, являющихся случайными комбинациями треков, использовался многомерный классификатор BDT.

Расчет эффективностей отбора осуществлялся на основе продуктов численного моделирования событий сигнальных и фоновых каналов. Численное моделирование было подвергнуто процедуре введения поправок для наилучшего согласия с контрольными данными.

Рассмотрены ошибки в моделировании разрешения детектора для систем с электрон-

ными треками. Для их решения была разработана и применена процедура введения поправок для учета детекторных эффектов разрешения, основанная на параметризации моделированных и экспериментальных спектров инвариантных масс для контрольного канала $B^+ \rightarrow K^+ J/\psi (\rightarrow e^+ e^-)$. Результаты применения поправочной процедуры представлены на Рис. 3. События разделены в зависимости от числа электронных треков, чья энергия была изменена в ходе процедуры восстановления тормозного излучения.

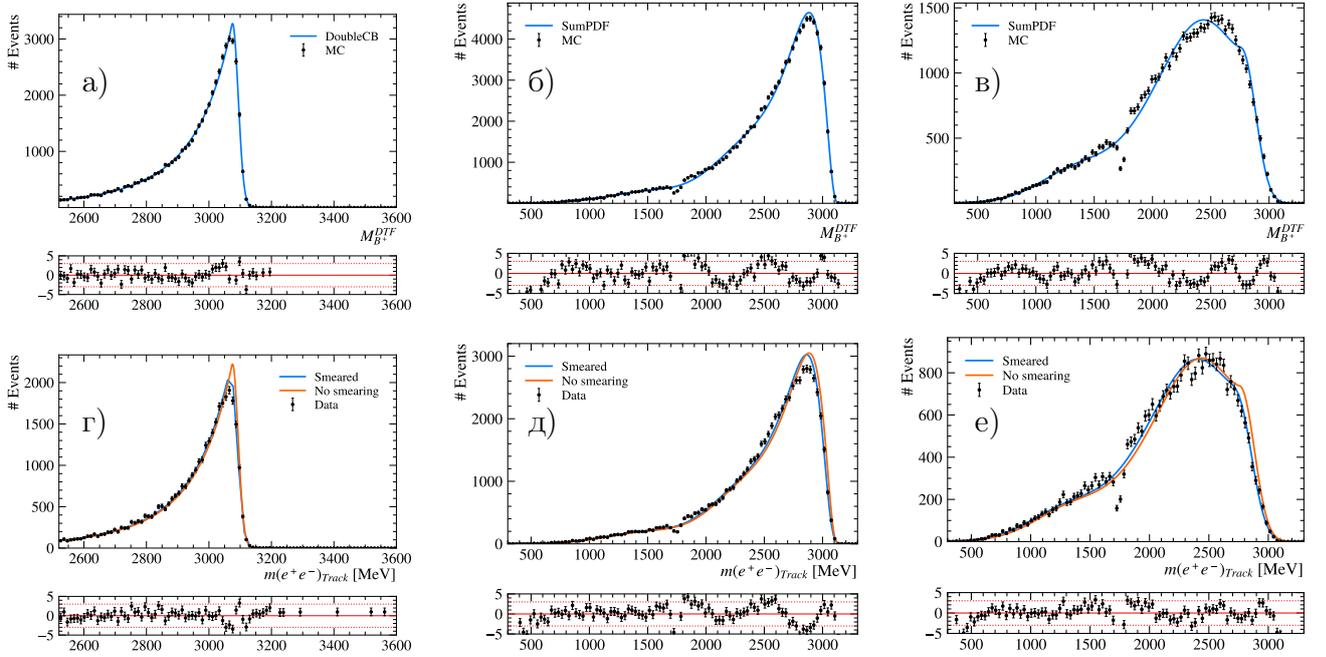


Рисунок 3 – Аппроксимации моделированных (а, б, в) и экспериментальных (г, д, е) распределений инвариантной массы пары электронных треков для $B^+ \rightarrow K^+ J/\psi(e^+e^-)$ (2018) в категориях 0γ (а, г), 1γ (б, д) и 2γ (в, е)

Выход каналов $B^+ \rightarrow K^+ \ell^+ \ell^-$ вычислялся методом параметризации распределений инвариантных масс отобранных кандидатов. Каждый из компонентов суммарной модели подробно исследовался на основе численного моделирования. К фоновым компонентам относятся исследованные диссертантом инклюзивные каналы $B \rightarrow \psi(2S)X$, а также каналы с ошибкой идентификации частиц, параметризованные спектры которых приведены на Рис. 4а и Рис. 4б.

Итоговые результаты параметризации распределений мюонной и электронной моды представлены на Рис. 5а и Рис. 5б.

Расчет систематических погрешностей осуществлялся посредством проведения численных псевдоэкспериментов и вычисления относительных невязок значения R_K . Настройки псевдоэкспериментов учитывали альтернативные подходы к введению поправок к моделиро-

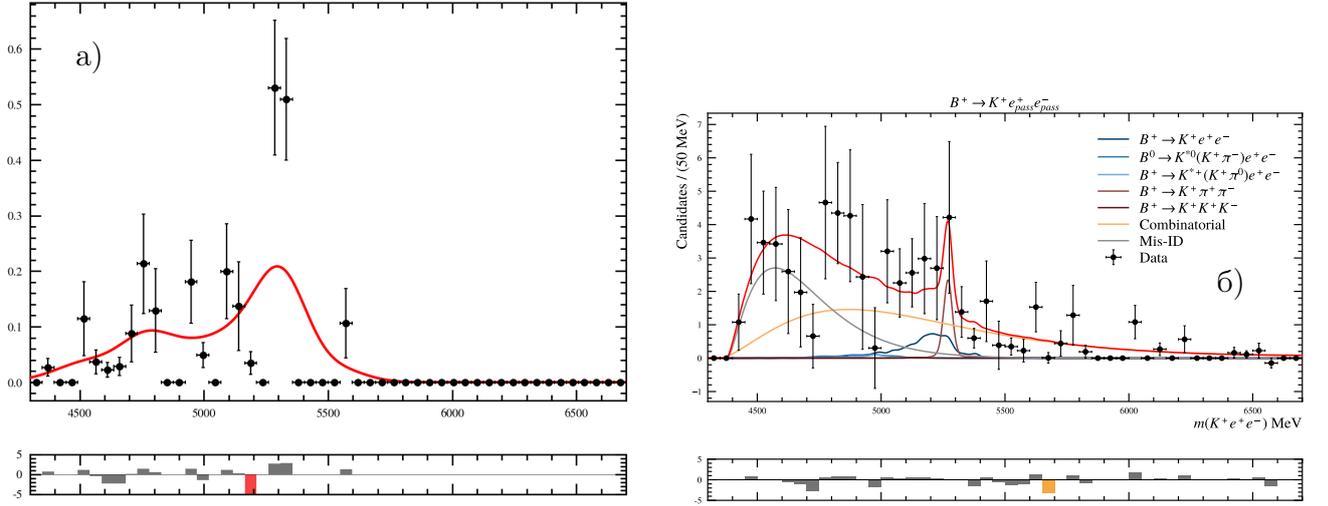


Рисунок 4 – Параметризация а) рассмотренных каналов инклюзивного распада $B \rightarrow \psi(2S)X$; б) распределения весов переноса по инвариантной массе $m(K^+e^+e^-)$

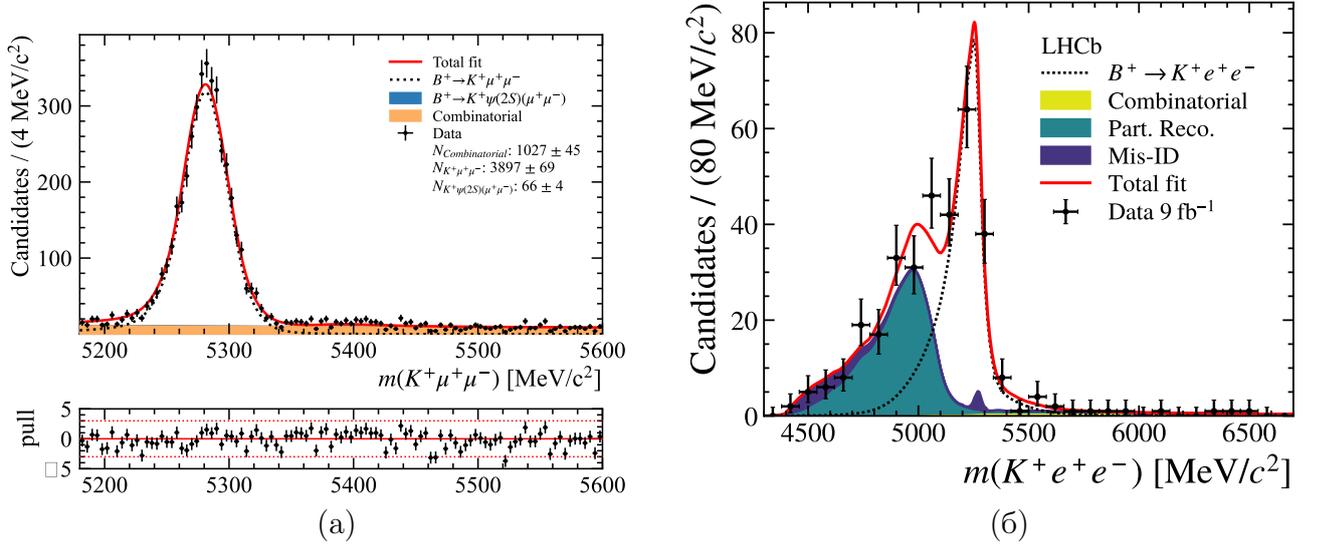


Рисунок 5 – Результаты параметризации распределения инвариантных масс событий а) мюонной, б) электронной сигнальной моды

ванию и альтернативные модели параметризации вкладов различных компонентов распределения отобранных событий.

Полученное значение R_K составило

$$R_K = 1,079^{+0,106}_{-0,092}(\text{стат.})^{+0,044}_{-0,040}(\text{сист.}) \quad (5)$$

что согласуется с лептонной универсальностью СМ в пределах 1σ и с измерениями, выполненными LHCb в области $q^2 \in [1,1; 6,0]$ ГэВ²/c⁴ [42].

В пятой главе изложена проведенная работа над реконструкцией и параметризацией распределений инвариантных масс событий $B_{(s,d)}^0 \rightarrow K_S^0 K^*(892)^0$.

Данные коллаборации LHCb по резонансному распаду $B_{s,d}^0 \rightarrow K_S^0 K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ были разделены на две категории по числу детекторов, предоставляющих информацию о треках пионов от распада короткоживущего каона K_S^0 : LL (Long-Long) для треков с данными от всей системы и DD (Downstream-Downstream) для треков с данными от станций после дипольного магнита. События должны удовлетворять требованиям подходящего триггера и проходить алгоритм предварительной фильтрации. Введенные дополнительные критерии на разделение вершин распада B и K_S^0 , изоляцию вершины распада B и кинематические характеристики продуктов позволили подавить вклад от комбинаторных и частично-реконструированных фонов. Дополнительно, были введены вето-критерии для исключения каскадных процессов и требования к идентификации продуктов распада. Исключение вклада комбинаторного фона обеспечивалось применением специально обученного классификатора, чья эффективность представлена на Рис 6.

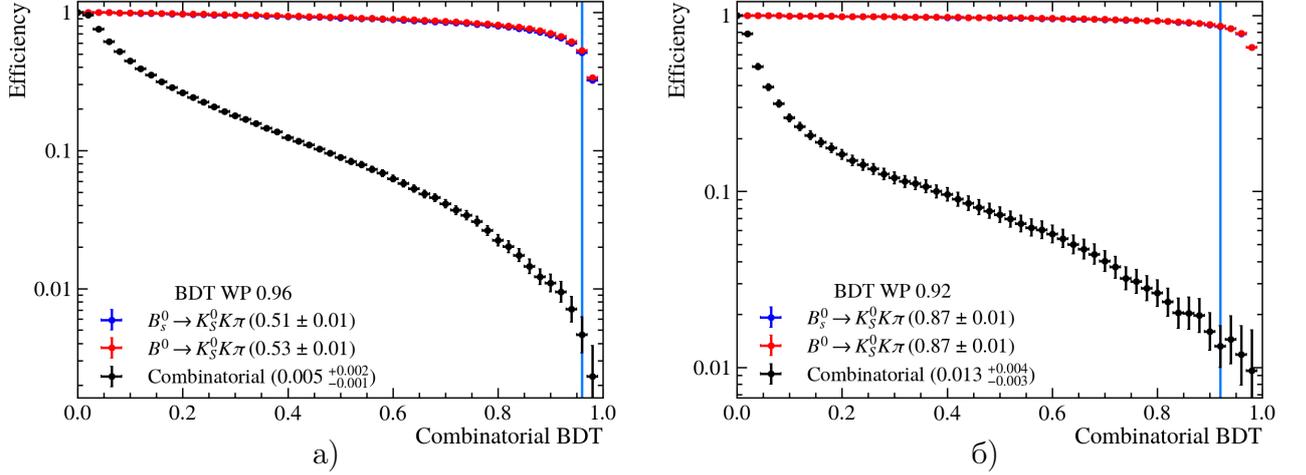


Рисунок 6 – Эффективности отбора классификатором по отношению к сигнальным каналам (красный и синий) и комбинаторному фону (черный) в данных категорий а) DD и б) LL второго сеанса. Вертикальная полоса – оптимальный критерий

Для улучшения соответствия численного моделирования эксперименту были введены процедуры поправок к распределения параметров идентификации частиц. Результаты моделирования с поправками использовались для вычисления эффективностей отбора.

Была проведена параметризация распределения инвариантных масс отобранных событий. Результаты параметризации массы $m(K_S^0 \pi \pi)$ для контрольных каналов $B_{s,d}^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ представлены на Рис. 7. Как следует из графиков относительных невязок, представленных в нижней части рисунков, параметризующая модель достаточно точно описывает распределение.

Разработанные в ходе работы алгоритмы отбора событий позволяют эффективно выде-

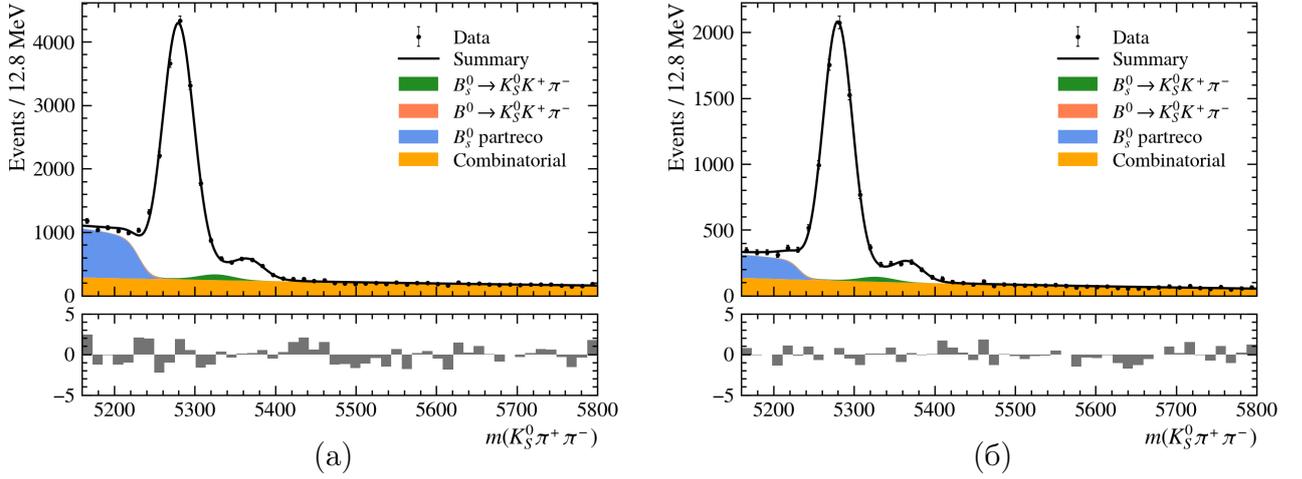


Рисунок 7 – Результаты параметризации распределений инвариантных масс контрольных каналов $B_{s,d}^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ данных сеанса 2 категории а) DD, б) LL

лить вклад резонансного сигнала из общего распределения набора $B^0 \rightarrow K_S^0 h h'$ (где h, h' – адроны в конечном состоянии) эксперимента LHCb. Реализованные программные средства параметризации распределений инвариантных масс точно описывают вклады искомого распада и основных источников фона: случайной комбинации треков, частично-реконструированных событий и событий с ошибкой идентификации. Результаты исследования служат основой для измерения отношения коэффициентов ветвления распадов $B_{(s,d)}^0 \rightarrow K_S^0 K^* (892)^0$.

Шестая глава посвящена описанию методологических исследований в области анализа данных. Она включает в себя изложение выполненной работы по исследованию способности ячейки электромагнитного калориметра (ECAL) LHCb к идентификации частиц. Также представлены проведенные модельные исследования применимости классификаторов для отбора событий в условиях неопределенного доминирующего фона.

Исследования, посвященные калориметрической подсистеме эксперимента LHCb, особенно актуальны в контексте проекта модификации детекторной установки Upgrade II [43]. Модификации установки включают в себя возможную замену адронного калориметра на пассивный поглощающий материал, а также изменения в структуре ECAL для работы в условиях повышенной светимости. Первое из указанных изменений может отрицательно сказаться на способности детектора к идентификации частиц, в особенности адронов. Для исследования возможностей идентификации на основе информации с модуля ECAL были проведены исследования на тестовых пучках ускорительного комплекса СПС. Их подробное описание представлено в разделе § 6.1 диссертации и в работе [44] диссертанта.

В ходе работы были разработаны программные средства для отбора событий регистрации энергии электронов, адронов и мюонов экспериментальной установкой с модулем

ESCAL. Разработан метод вероятностной идентификации на основе аппроксимации распределений энерговыделений. Характеристики параметризующих функций были получены на основе данных выполненного численного моделирования событий. Пример параметризации распределения энерговыделений в ячейке для смешанного тестового пучка, включающего адроны и мюоны, приведен на Рис. 8.

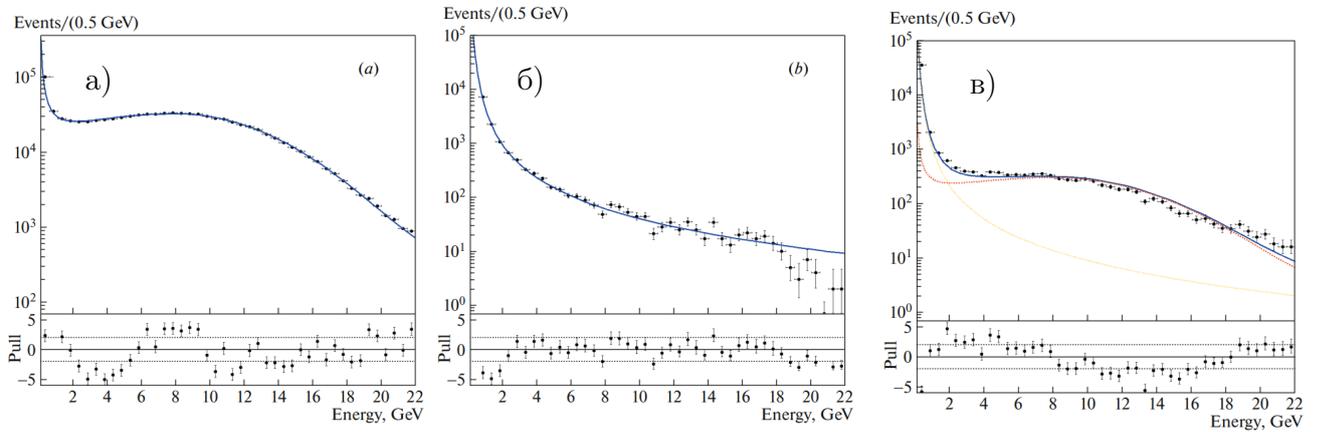


Рисунок 8 – Параметризация энергетического спектра событий для пучка $p = 150$ ГэВ/с: моделированных событий с а) мюонами и б) пионами; в) экспериментальных событий с адронным пучком (зеленая линия – мюонный компонент; красная – пионный ; синия – сумма)

Эффективность разработанного метода успешно продемонстрирована на примере адронных пучков в широком диапазоне энергий (20 – 150 ГэВ).

Раздел § 6.3 посвящен исследованию оптимизации классификаторов в условиях неопределенного доминирующего фона, результаты которого опубликованы в работе [45] автора. В работе был рассмотрен сценарий обучения, проверки и оптимизации отбора на основе ВДТ. Особенность исследования состояла в использовании смешанной выборки «фоновых» событий, включающей в себя малую сигнальную компоненту (1000:1). Объем выборки варьировался в пределах от 0,1 до 5 % от числа событий в полном наборе (10^6) для исследования влияния увеличенного абсолютного вклада неверно идентифицированного сигнала на работу классификатора. Были проведены сравнительные исследования показателей добротности обученных классификаторов, а также эффективностей отбора с использованием оптимизированного критерия. Сравнение между характеристиками классификаторов, обученных на «смешанных» и «чистых» фоновых выборках, показало пренебрежимый эффект от сигнального вклада. Таким образом, методами численного моделирования продемонстрирована обоснованность использования классификаторов в описанных условиях.

Заключение

Данное диссертационное исследование посвящено поиску эффектов новой физики в петлевых распадах B мезонов. Современные исследования в данной области сосредоточены на измерении «оптимизированных параметров»: экспериментальных параметров, чьи теоретические предсказания наименьшим образом подвержены влиянию систематических погрешностей, связанных с применением непertурбативных вычислений КХД.

Основным экспериментальным результатом, полученным в ходе данной работы, является измерение отношения вероятностей R_K полуплеptonных распадов $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ и $B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-$, характеризующее выполнение симметрии лептонной универсальности СМ, в области инвариантных масс лептонной пары $q^2 > 14,3 \text{ ГэВ}^2/c^4$. Полученное значение составило

$$R_K(q^2 > 14,3 \text{ ГэВ}^2/c^4) = 1,079_{-0,092}^{+0,106}(\text{стат.})_{-0,040}^{+0,044}(\text{сист.}). \quad (6)$$

Проведенное измерение было впервые выполнено на данных эксперимента адронного коллайдера и является самым точным определением величины R_K в области инвариантных масс выше чармониевых резонансов. Совместно с измерением $R_{K^{(*)}}$, опубликованным в работе [42], оно указывает на согласие экспериментальных наблюдений и теоретических предсказаний СМ: лептонная универсальность сохраняется в переходах $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$.

В процессе работы над данным измерением диссертантом были решены следующие задачи:

— Разработка и реализация программного алгоритма введения поправок к моделированным распределениям для учета влияния разрешения детекторной установки на размытие и сдвиг измеряемых импульсов треков. Были установлены параметры «смазывающих» нормальных распределений $\mu \in (-38,0; 1,5)$ и $\sigma \in (0,8; 45,0)$ в зависимости от года набора данных и числа кластеров энерговыделений в калориметре, восстановленных как фотоны тормозного излучения электронного трека-кандидата. Измеренный систематический эффект, связанный с применением поправочной процедуры, составил 3,18 % от контрольного отношения $r_{J/\psi}$, 0,18 % от контрольного параметра $R_{\psi(2S)}$ и 0,32 % от величины R_K .

— Определение (измерение выхода и параметризация формы распределения инвариантных масс реконструированного B^+ мезона) вклада фона от процессов с однократной и двукратной неверной идентификацией частиц типа $K^\pm \rightarrow e^\pm$ и $\pi^\pm \rightarrow e^\pm$ в общий набор данных эксперимента ЛНСб по распаду $B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-$. Величина систематической погрешности, связанной с учетом и обработкой данных каналов, составляет 0,22 % от величины статистической погрешности R_K , что является одним из наиболее значимых вкладов в общую оценку

систематической погрешности выполненного измерения.

— Измерение вклада фона от резонансной инклюзивной моды $B^+ \rightarrow \psi(2S)K^+X$ в общую структуру спектра реконструированных событий распада $B^+ \rightarrow K^+e^+e^-$: оценка выхода событий входящих в моду каналов и создание модели для описания формы вклада инклюзивной компоненты в спектр инвариантных масс реконструированных B^+ мезонов. Измеренный систематический эффект, связанный с моделированием данного вклада, составляет 6,7% от величины статистической погрешности R_K .

В качестве перспективных оптимизированных параметров возможно рассматривать предложенные авторами работ [11; 33] L -параметры, состоящие из отношения вероятностей адронных распадов нейтральных $B_{(d,s)}^0$ мезонов $B_{(d,s)}^0 \rightarrow M_1M_2$, отношения долей продольно поляризованных компонент тех же распадов и отношения множителей их фазового пространства. Вычисление L -параметров требует экспериментального измерения вероятностей распадов $\bar{B}_{(d,s)}^0 \rightarrow K^{(*)0}\bar{K}^{(*)0}$. В связи с этим была выполнена оценка возможности измерения относительных вероятностей распадов $B_{s,d}^0 \rightarrow K^0K^*(892)^0$ в данных эксперимента ЛНСб. При этом были решены следующие задачи:

— Разработка алгоритма отбора сигнальных событий сигнального канала $B_{(d,s)}^0 \rightarrow K_S^0K^*(892)^0$ и контрольного канала $B_{(d,s)}^0 \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$. Продемонстрирована эффективность адронного триггера ЛНСб для выделения интересующих распадов.

— Обучение и оптимизация классификатора VDT для подавления фонового вклада от случайных комбинаций треков при реконструкции событий. В ходе выполнения данной задачи были определены наиболее эффективные классифицирующие характеристики событий (в частности, конические асимметрии импульсов и псевдобыстроты треков). Эффективность оптимального критерия отбора на основе применения классификатора составила 51% (87%) по отношению к сигналу и 0,5% (1,3%) по отношению к фону для двух рассмотренных наборов событий.

— Определение моделей параметризации распределений инвариантных масс реконструированных B мезонов (комбинаций трех треков). Полученные результаты для контрольного канала $B_{(d,s)}^0 \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$ находятся в согласии с прошлыми результатами коллаборации ЛНСб.

В рамках работы по развитию аппаратной и методологической базы эксперимента ЛНСб, определено влияние отклика модуля электромагнитного калориметра на идентификацию адронов. Проведена калибровка энергетической шкалы ячейки электромагнитного калориметра с использованием электронной примеси адронных пучков. Выполнена оценка разрешения ячейки по энергии, полученные величины коэффициента энергетической зави-

симости $(9,1 \pm 0,7)\%$ и постоянного члена кривой разрешения $(0,42 \pm 0,15)\%$ совпадают в пределах погрешностей со значениями, представленными в проектном документе ЕСАЛ. Разработан метод анализа состава выведенного пучка ускорителя СПС на основе данных по энерговыделениям в модуле электромагнитного калориметра ЛНСб типа «шашлык», отклику черенковского счетчика и системы многопроволочных камер. Эффективность разработанного метода успешно продемонстрирована на примере адронных пучков в широком диапазоне энергий (20 – 150 ГэВ).

Наконец, выполнен анализ особенностей использования классификаторов типа BDT для отбора редких событий в условиях неопределенного преобладающего фона. Результаты показали, что эффективность основанного на BDT отбора не зависит от абсолютного вклада сигнальных событий в фоновую выборку при рассматриваемом уровне относительного смешивания сигнального и фонового наборов данных (1:1000).

Список опубликованных работ

Публикации

1. Measurement of the branching fraction ratio R_K at large dilepton invariant mass / R. Aaij, . . . , R. Shorkin [и др.] // Journal of High Energy Physics. – 2025. – Т. 2025, № 7. – С. 198. doi: 10.1007/JHEP07(2025)198, (SCOPUS, IF: 5.5)
2. *Shorkin R. A.*, Beam Composition Analysis Using a Single SHASHLIK-Type Calorimeter Module // Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Т. 86, № 6. – С. 1421-1425. doi: 10.1134/S1063778823060236, (SCOPUS, IF: 0.4)
3. *Шоркин Р.А.*, Оптимизация отбора редких событий в присутствии неопределенного преобладающего фона // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2025. – № 9. – С. 56-71

Тезисы конференций

1. *Шоркин Р. А.* Измерение отношения вероятностей распадов R_K в области высоких значений инвариантной массы лептонной пары // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2025». [Электронный ресурс] – Москва: МАКС Пресс, 2025. – Режим доступа: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2025/data/section_36_36736.htm
2. *Шоркин Р. А.* Современные методы анализа данных в применении к эксперименту ЛНСб // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2024». [Электронный ресурс] — Москва: МОО СИПНН Н.Д. Кондратьева, 2024. – Режим доступа: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2024/data/section_37_32339.htm

3. *Шоркин Р. А.* Оптимизация отбора в присутствии неопределённого фона // Сборник тезисов XI Всероссийского молодежного научного форума с международным участием «Open Science 2024». [Электронный ресурс] — Гатчина, 2024. — Режим доступа: <https://openscience.pnpi.nrcki.ru/sbornik-tezisev-open-science-2024/>

4. *Shorkin R.* Beam composition analysis using a single shashlik-type calorimetry module // The 6th international conference on particle physics and astrophysics (ICPPA-2022), постерный доклад. — 2022.

Использованная литература

1. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC / G. Aad [и др.] // *Physics Letters B.* — 2012. — Т. 716, № 1. — С. 1–29.
2. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC / S. Chatrchyan [и др.] // *Physics Letters B.* — 2012. — Т. 716, № 1. — С. 30–61.
3. Planck2018 results: VI. Cosmological parameters / N. Aghanim [и др.] // *Astronomy and Astrophysics.* — 2020. — Т. 641. — A6.
4. *Capozziello S., De Laurentis M.* Extended Theories of Gravity // *Physics Reports.* — 2011. — Т. 509, № 4. — С. 167–321.
5. Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos / Y. Fukuda [и др.] // *Physical Review Letters.* — 1998. — Т. 81, № 8. — С. 1562–1567.
6. *Morrissey D. E., Ramsey-Musolf M. J.* Electroweak baryogenesis // *New Journal of Physics.* — 2012. — Т. 14, № 12. — С. 125003.
7. *Ivanov I. P.* Building and testing models with extended Higgs sectors // *Progress in Particle and Nuclear Physics.* — 2017. — Т. 95. — С. 160–208.
8. Effective description of general extensions of the Standard Model: the complete tree-level dictionary / J. de Blas [и др.] // *Journal of High Energy Physics.* — 2018. — Т. 2018, № 3. — С. 109.
9. *Langacker P.* The Physics of Heavy Z' Gauge Bosons // *Reviews of Modern Physics.* — 2009. — Т. 81, № 3. — С. 1199–1228.
10. New physics in $b \rightarrow s\ell\ell$ anomalies and its implications for the complementary neutral current decays / F. M. Bhutta [и др.] // *Nuclear Physics B.* — 2022. — Т. 979. — С. 115763.

11. A new puzzle in non-leptonic B decays / A. Biswas [и др.] // Journal of High Energy Physics. — 2023. — Т. 2023, № 6. — С. 108.
12. Anatomy of $b \rightarrow c\tau\nu$ anomalies / A. Azatov [и др.] // Journal of High Energy Physics. — 2018. — Т. 2018, № 11. — С. 187.
13. *London D., Matias J. B Flavor Anomalies: 2021 Theoretical Status Report* // Annual Review of Nuclear and Particle Science. — 2022. — Т. 72, № 1. — С. 37–68.
14. root-project/root: v6.18/02 / R. Brun [и др.]. — Вер. v6-18-02. — 2019. — Электронный ресурс. — Режим доступа: <https://doi.org/10.5281/zenodo.848818>.
15. The LHCb simulation application, Gauss: Design, evolution and experience / M. Clemencic [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2011. — Т. 331. — С. 032023.
16. Geant4: A simulation toolkit / S. Agostinelli [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — Т. 506, № 3. — С. 250–303.
17. *Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System* // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. — ACM, 2016. — С. 785–794.
18. zfit: Scalable pythonic fitting / J. Eschle [и др.] // SoftwareX. — 2020. — Т. 11. — С. 100508.
19. Scikit-learn: Machine learning in Python / F. Pedregosa [и др.] // Journal of Machine Learning Research. — 2011. — Т. 12. — С. 2825.
20. First observation of the decay $B_s^0 \rightarrow K_S^0 K^{*}(892)^0$ at LHCb / R. Aaij [и др.] // Journal of High Energy Physics. — 2016. — Т. 2016, № 1. — С. 12.
21. Amplitude analysis of $B_s^0 \rightarrow K_S^0 K^{\pm} \pi^{\mp}$ decays / R. Aaij [и др.] // Journal of High Energy Physics. — 2019. — Т. 2019, № 6. — С. 114.
22. *Brivio I., Trott M. The standard model as an effective field theory* // Physics Reports. — 2019. — Т. 793. — С. 1–98.
23. Rare b decays meet high-mass Drell-Yan / A. Greljo [и др.] // Journal of High Energy Physics. — 2023. — Т. 2023, № 5. — С. 87.
24. Breaking new grounds in flavour universality / R. Aaij [и др.] // CERN Courier - digital edition. — 2025. — Т. 65, № 2. — С. 13–14.

25. Symmetries and asymmetries of $B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ decays in the Standard Model and beyond / W. Altmannshofer [и др.] // Journal of High Energy Physics. — 2009. — Т. 2009, № 01. — С. 019.
26. *Wilson K. G.* Non-Lagrangian Models of Current Algebra // Physical Review Journal. — 1969. — Т. 179, № 5. — С. 1499–1512.
27. *Khodjamirian A., Mannel T., Wang Y.-M.* $B \rightarrow K \ell^+ \ell^-$ decay at large hadronic recoil // Journal of High Energy Physics. — 2013. — Т. 2013, № 2. — С. 10.
28. Short- vs. long-distance physics in $B \rightarrow K^{(*)} \ell^+ \ell^-$: a data-driven analysis / M. Bordone [и др.] // The European Physical Journal C. — 2024. — Т. 84, № 5. — С. 547.
29. Heavy-to-light form factors in the final hadron large energy limit of QCD / J. Charles [и др.] // Physical Review D. — 1999. — Т. 60, № 1. — С. 014001.
30. *Beneke M., Feldmann T., Seidel D.* Exclusive radiative and electroweak $b \rightarrow d$ and $b \rightarrow s$ penguin decays at NLO // The European Physical Journal C. — 2005. — Т. 41, № 2. — С. 173–188.
31. *Gubernari N., Dyk D. van, Virto J.* Non-local matrix elements in $B_s \rightarrow K^{(*)}, \phi \ell^+ \ell^-$ // Journal of High Energy Physics. — 2021. — Т. 2021, № 2. — С. 88.
32. *Bobeth C., Hiller G., Piranishvili G.* Angular distributions of $\bar{B} \rightarrow K \bar{\ell} \ell$ decays // Journal of High Energy Physics. — 2007. — Т. 2007, № 12. — С. 040.
33. A new B-flavour anomaly in $B_{d,s} \rightarrow K^{*0} \bar{K}^{*0}$: anatomy and interpretation / M. Algueró [и др.] // Journal of High Energy Physics. — 2021. — Т. 2021, № 4. — С. 66.
34. Review of particle physics / R. L. Workman [и др.] // Progress of Theoretical and Experimental Physics. — 2022. — Т. 2022, № 8. — С. 083C01.
35. LHCb detector performance / R. Aaij [и др.] // International Journal of Modern Physics. — 2015. — Т. 30, № 07. — С. 1530022.
36. Performance of the LHCb Vertex Locator / R. Aaij [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2014. — Т. 9, № 09. — P09007.
37. Performance of the LHCb Outer Tracker / R. Arink [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2014. — Т. 9, № 01. — P01002.
38. Selection and processing of calibration samples to measure the particle identification performance of the LHCb experiment in Run 2 / R. Aaij [и др.] // European Physical Journal: Techniques and Instrumentation. — 2019. — Т. 6, № 1. — С. 1.

39. The LHCb trigger and its performance in 2011 / R. Aaij [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2013. — Т. 8, № 04. — P04022.
40. Performance of the LHCb trigger and full real-time reconstruction in Run 2 of the LHC / R. Aaij [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2019. — Т. 14, № 04. — P04013.
41. Measurement of the branching fraction ratio R_K at large dilepton invariant mass / R. Aaij [и др.] // Journal of High Energy Physics. — 2025. — Т. 2025, № 7. — С. 198.
42. Measurement of lepton universality parameters in $B^+ \rightarrow K^+ \ell^+ \ell^-$ and $B^0 \rightarrow K^{*0} \ell^+ \ell^-$ decays / R. Aaij [и др.] // Physical Review D. — 2023. — Т. 108, № 3. — С. 032002.
43. Physics case for an LHCb Upgrade II — Opportunities in flavour physics, and beyond, in the HL-LHC era : тех. отч. / ЦЕРН. — Женева, 2018. — LHCb-PUB-2018—009.
44. *Shorkin R. A.* Beam Composition Analysis Using a Single SHASHLIK-Type Calorimeter Module // Physics of Atomic Nuclei. — 2023. — Т. 86, № 6. — С. 1421—1425.
45. *Шоркин Р. А.* Оптимизация отбора редких событий в присутствии неопределенного преобладающего фона // Краткие сообщения по физике ФИАН. — 2025. — № 9. — С. 56—71.