

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 «08» апреля 2026 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 «__» _____ 20__ 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 неперетурбативными 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 $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$, 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.

Дополнительные измерения комплементарных процессов заряженного тока $b \rightarrow c \ell \bar{\nu}$ увеличивают статистическую значимость отклонений [11]. Адронные распады B мезонов с $b \rightarrow s$ и $b \rightarrow d$ переходами также представляют интерес [12]. 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. Их актуальность обуславливается значительным интересом к наблюдавшимся отклонениям [13] и поиску проявлений физики за пределами СМ.

Цели и задачи исследования

Основной целью диссертационной работы являются измерение величины R_K 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 LHCb, 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 ре-

шений с бустингом) для отбора редких событий в условиях неопределенного преобладающего фона.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются экспериментальные данные LHCb, 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 LHCb [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 (LHCb) в кинематической области $q^2 > 14,3 \text{ ГэВ}^2/c^4$. Полученное значение $R_K(q^2 > 14,3 \text{ ГэВ}^2/c^4) = 1,079^{+0,114}_{-0,100}$ является самым точным измерением параметра R_K в указанной области q^2 на момент написания текста диссертации.
2. Проведено исследование отклика калориметрического модуля на разные типы частиц, на его основе разработан новый метод для анализа состава выведенного пучка.
3. Исследовано влияние вклада ошибочно меченных событий в составе выборок для обучения и оптимизации классификатора BDT для отбора событий. Вычислено изменение эффективностей отбора сигнала и подавления фона для классификаторов с различной добротностью, оцениваемой по площади под кривой ошибок.

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) [20], посвященных интерпретации аномалий в НТИА-распадах B -мезонов и проверке гипотез НФ [21]. Разработанные в ходе анализа подходы к измерению величины параметра R_K будут использованы в

последующих анализах полулептонных распадов (в особенности с электронами в конечном состоянии) в данных эксперимента LHCb третьего сеанса БАК.

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.

Проведенное исследование применимости методов классификации актуально в рамках решения задач по поиску прямых проявлений гипотетических процессов НФ. В частности, представлено обоснование для использования классификаторов, обученных на фоновых данных с возможным малым вкладом сигнала, при отборе событий.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, полученных на основе данных эксперимента LHCb, 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 LHCb. 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 LHCb, 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 метод позволяет осуществить быстрый анализ состава выведенного адронного пучка по откликам в модуле электромагнитного калориметра типа «шашлык», трековой системы и счетчика черенковского излучения.

3. 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 модерни-

зацией калориметра ECAL Upgrade II коллаборации LHCb. 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 [22].

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

Диссертант является соавтором 134 опубликованных работ коллаборации LHCb.

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.

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 149 страниц, включая 39 рисунков и 21 таблицу. Библиография содержит 161 наименование.

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 пертурбативные 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).

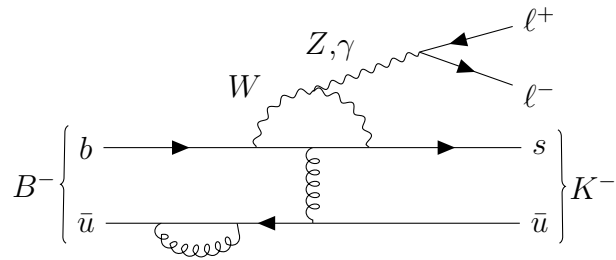


Рисунок 1 – Пример диаграммы распада $B^- \rightarrow K^- \ell^+ \ell^-$

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

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

где \mathcal{O}_i – локальные операторы, описывающие конкретный рассматриваемый процесс [23]; C_i – коэффициенты Вильсона, характеризующие силу взаимодействия (эффективные константы

взаимодействия) [24]. 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 [25]. В то время как тяжелые внутренние линии (t -кварк, и W^\pm/Z бозоны) сводятся к вершинам эффективной теории, пропагаторы c -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 c -кварками, формирующими петли. При величине передачи четырехимпульса $q^2 \geq m_{J/\psi}^2$ c -кварковые петли становятся промежуточными векторными состояниями (J/ψ , $\psi(2S)$ и пр.), рождающимися на массовой поверхности и распадающимися на лептонную пару $\ell^+\ell^-$ [26]. Нелокальные адронные матричные элементы, описывающие непertурбативные 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 [27; 28] и интерполяция экспериментальных измерений [29] – характеризуется значительными систематическими погрешностями, ограничивающими прецизионность теоретических предсказаний амплитуд НТИА-процессов.

Во **второй главе** приведен обзор актуальных для темы диссертации экспериментальных результатов в области исследований НТИА-процессов. Введено понятие «оптимизированных параметров»: величин, теоретические предсказания значений которых особенно точны и не подвержены влиянию больших систематических погрешностей. Выделены три класса оптимизированных параметров:

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

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

где Γ – парциальная ширина распада, M – мезон в конечном состоянии (K, K^*, ϕ и пр.), q^2 – квадрат инвариантной массы лептонной пары. В СМ $R_M^{\text{СМ}} = 1 + O(m_\mu^2/m_b^2)$ при интегрировании по всему пространству q^2 [30]. Основное преимущество величины R_M – при её вычислении в любой области q^2 все пертурбативные и непertурбативные вклады КХД сокращаются.

— Угловые наблюдаемые

$$P_1 = \frac{2S_3}{(1 - F_L)} = A_T^{(2)}, \quad P_2 = \frac{2}{3} \frac{A_{\text{FB}}}{(1 - F_L)}, \quad (3)$$

$$P_3 = -\frac{S_9}{(1 - F_L)}, \quad P'_{4,5,8} = \frac{S_{4,5,8}}{\sqrt{F_L(1 - F_L)}}, \quad (4)$$

$$P'_6 = \frac{S_7}{\sqrt{F_L(1 - F_L)}}, \quad (5)$$

Здесь F_L – доля продольно поляризованных K^* мезонов, $A_{\text{FB}} \equiv S_6$ – асимметрия вперед-назад лептонной пары, базис CP -усредненных угловых коэффициентов S_i построен на основе восьми поперечных амплитуд $A_{\perp,\parallel,0}^{L,R}$, A_t и A_S [31]. Их теоретические расчеты также не подвержены влиянию больших систематических погрешностей от непертурбативных адронных форм-факторов перехода $B \rightarrow K^*$ [32].

— 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:

$$L_{V_1 V_2} = \frac{\mathcal{B}_{b \rightarrow s} g_{b \rightarrow d} f_L^{b \rightarrow s}}{\mathcal{B}_{b \rightarrow d} g_{b \rightarrow s} f_L^{b \rightarrow d}}, \quad (6)$$

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.

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

ЛНСь является специализированным экспериментом, направленным на изучение процессов с прелестными фермионами СМ [34]. Детекторная установка ЛНСь 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 ЛНСь на период 2011-2018 годов представлено на Рис. 2.

Основные компоненты детектора:

- Трекинговая система ЛНСь, состоящая из вершинного детектора VELO [35], трекинговых станций ТТ и Т1-Т3 [36] и дипольного магнита;
- Система идентификации частиц [37], включающая в себя детектор колец излучения Вавилова-Черенкова RICH, калориметрическую подсистему и мюонные станции;
- Триггер эксперимента [38], позволяющий снизить поток данных за счет быстрой обработки информации и выделения интересных событий;

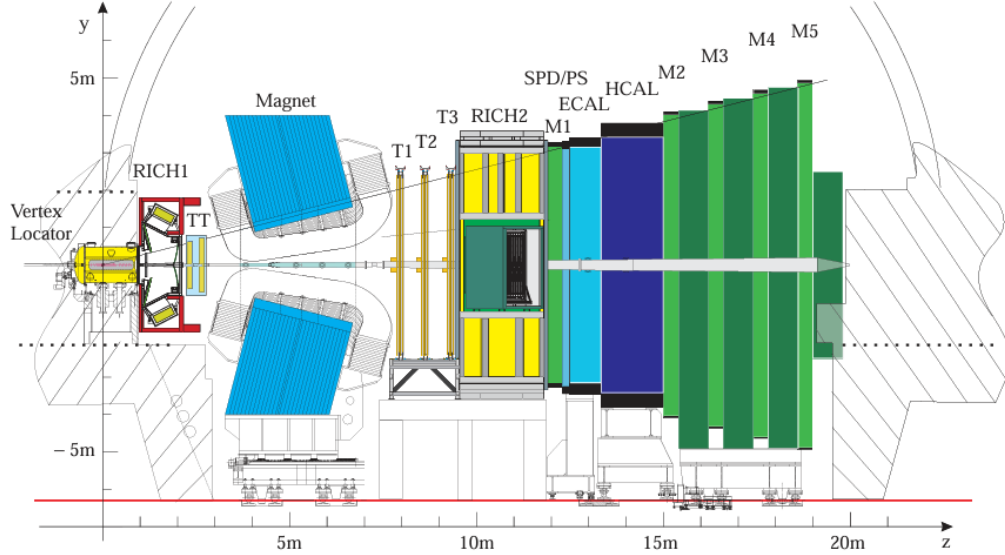


Рисунок 2 – Детектор ЛНСб БАК в конфигурации первого и второго сеансов [34]

— 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 [39].

Стратегия экспериментального измерения отношения R_K базируется на двух основных принципах. Во-первых, измерение должно проводиться в области q^2 , не подверженной вкладу от распадов с промежуточными чармониевыми резонансами (на Рис. 3 выделены области нерезонансного $B^+ \rightarrow K^+ \ell^+ \ell^-$ распада и распадов с промежуточными чармониями J/ψ и $\psi(2S)$). Во-вторых, необходимо произвести учет всех возможных фоновых вкладов в спектр отобранных событий. Исследование в области инвариантных масс $q^2 > 14,3 \text{ ГэВ}^2/c^4$ позволяет реализовать оба принципа.

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 численного моделирования

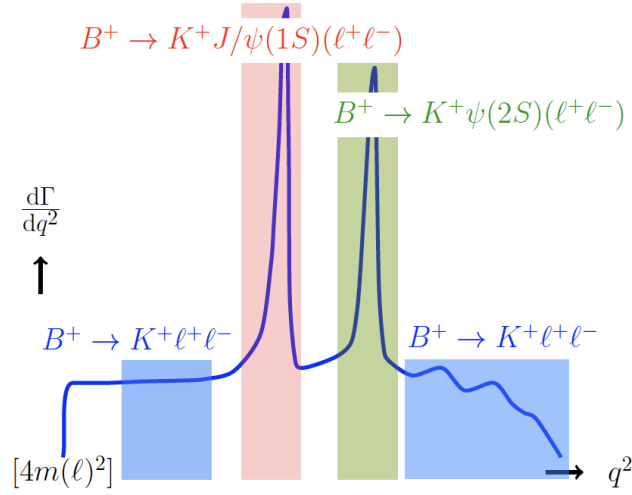


Рисунок 3 – Спектр канала $B^+ \rightarrow K^+ \ell^+ \ell^-$ по инвариантной массе лептонной пары q^2

событий сигнальных и фоновых каналов. Продукты моделирования были подвергнуты процедуре введения поправок для наилучшего согласия с контрольными данными.

Рассмотрены ошибки в моделировании разрешения детектора для систем с электронными треками. Выделены два основных источника ошибок. Во-первых, разница в количестве вещества детектора в модели и действительности приводит к разнице в числе испущенных фотонов тормозного излучения, что оказывает эффект на разрешение по импульсу электронных треков. Во-вторых, неидеальное моделирование множественности треков и работы ЕСАЛ влияет на эффективность процедуры восстановления фотонов тормозного излучения. Для решения указанных проблем 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. 4. События разделены в зависимости от числа электронных треков, чья энергия была изменена в ходе процедуры восстановления тормозного излучения.

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. 5а и Рис. 5б.

Итоговые результаты параметризации распределений мюонной и электронной моды представлены на Рис. 6а и Рис. 6б.

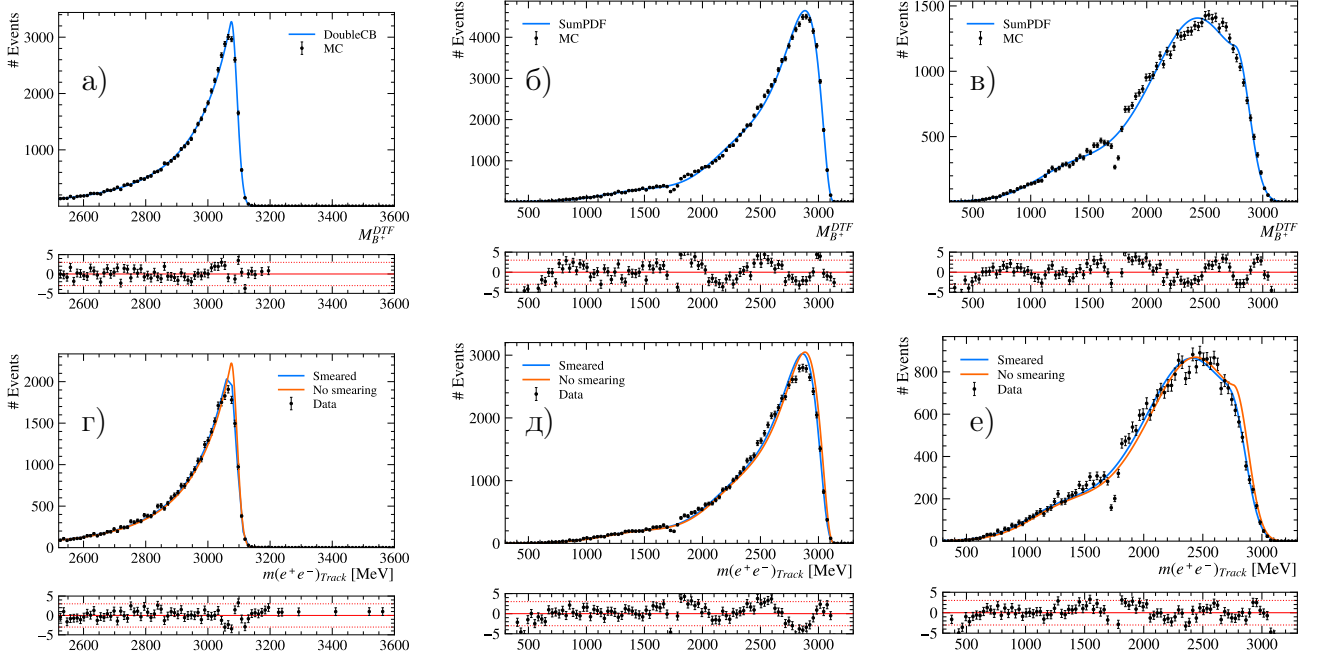


Рисунок 4 – Аппроксимации моделированных (а, б, в) и экспериментальных (г, д, е) распределений инвариантной массы пары электронных треков для $B^+ \rightarrow K^+ J/\psi(e^+e^-)$ (2018) в категориях 0γ (а, г), 1γ (б, д) и 2γ (в, е)

Расчет систематических погрешностей осуществлялся посредством проведения численных псевдоэкспериментов и вычисления относительных невязок значения R_K . Настройки псевдоэкспериментов учитывали альтернативные подходы к введению поправок к моделированию и альтернативные модели параметризации вкладов различных компонентов распределения отобранных событий.

Полученное значение R_K составило

$$R_K = 1,079^{+0,106}_{-0,092}(\text{стат.})^{+0,044}_{-0,040}(\text{сист.}) \quad (7)$$

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 [40].

Пятая 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 [41].

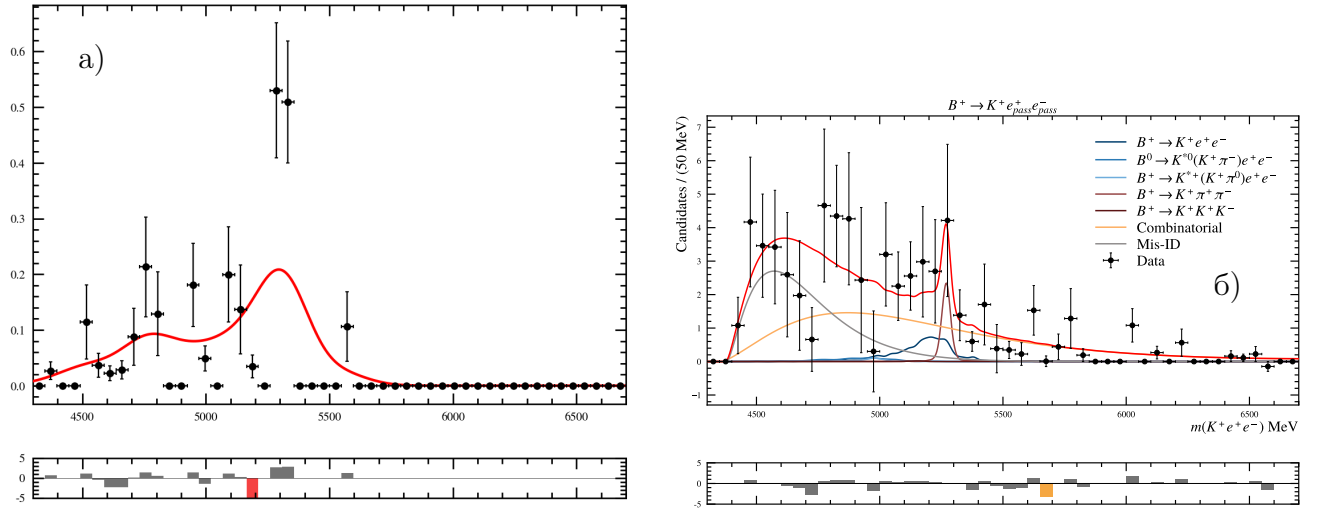


Рисунок 5 – Параметризация а) рассмотренных каналов инклюзивного распада $B \rightarrow \psi(2S)X$; б) распределения весов переноса по инвариантной массе $m(K^+e^+e^-)$

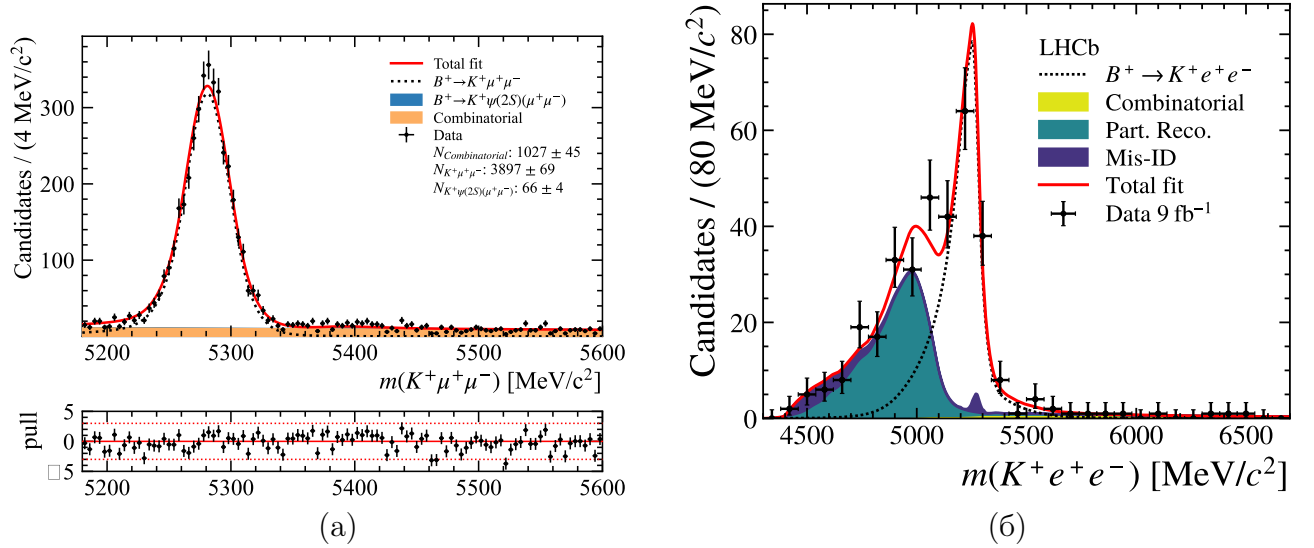


Рисунок 6 – Результаты параметризации распределения инвариантных масс событий а) мюонной, б) электронной сигнальной моды

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 разделах § 5.1 и 5.2 диссертации и в работе [42] диссертанта.

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

ECAL. Разработан метод вероятностной идентификации на основе аппроксимации распределений энерговывделений. Характеристики параметризующих функций были получены на основе данных выполненного численного моделирования событий. Пример параметризации распределения энерговывделений в ячейке для смешанного тестового пучка, включающего адроны и мюоны, приведен на Рис. 7.

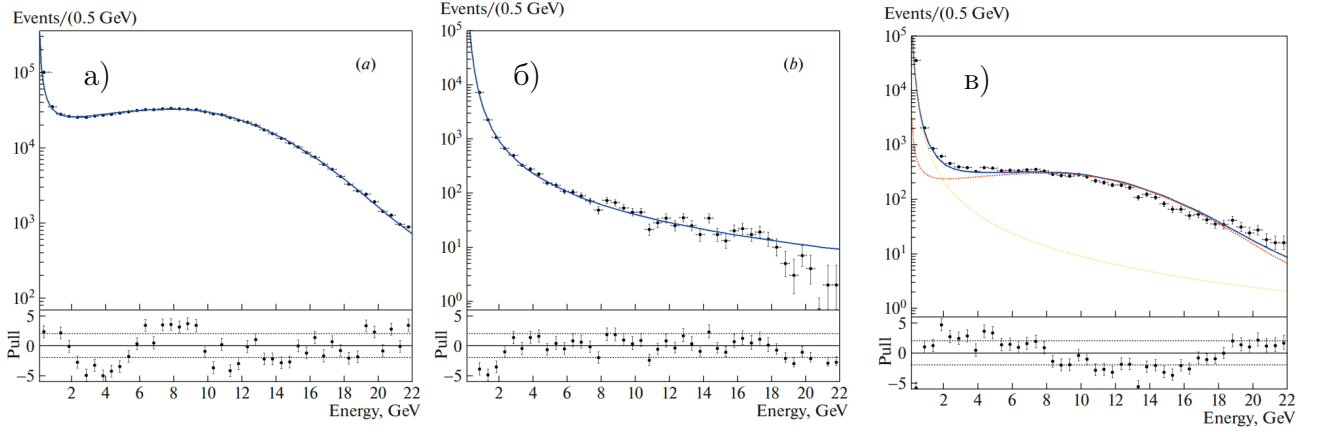


Рисунок 7 – Параметризация энергетического спектра событий для пучка $p = 150$ ГэВ/с: моделированных событий с а) мюонами и б) пионами; в) экспериментальных событий с адронным пучком (зеленая линия – мюонный компонент; красная – пионный ; синия – сумма)

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

Разделы § 5.3 и 5.4 посвящены исследованию оптимизации классификаторов в условиях неопределенного доминирующего фона, результаты которого опубликованы в работе [43] автора. Указанная проблема связана с задачей поиска гипотетических частиц новой физики по их распадам на частицы СМ, чья масса не может быть точно предсказана. В качестве эффективного средства отбора сигнала из спектра с преобладающим фоном может выступать многомерный классификатор BDT (Boosted Decision Tree) [17]. Однако существует проблема формирования выборки для его обучения: экспериментальные данные включают в себя смесь множества фоновых процессов с малым вкладом сигнала. В работе был рассмотрен сценарий обучения, проверки и оптимизации отбора на основе BDT. 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. Для

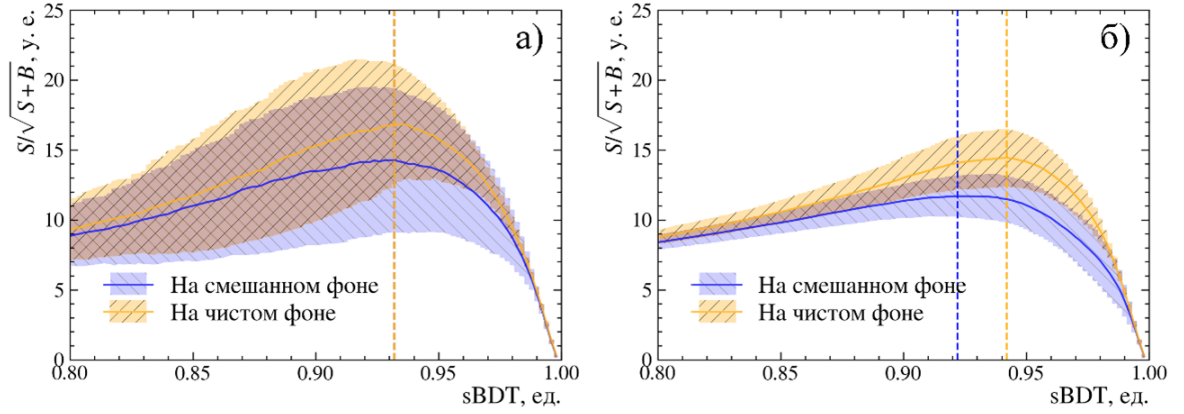


Рисунок 8 – Добротность классификаторов, обученных и оптимизированных на наборах «чистый сигнал и смешанный фон» (синий) и «чистый сигнал и чистый фон» (оранжевый). Размер тестовой фоновой выборки: (а) 1'000 и (б) 10'000 событий. Значения $sBDT$ для максимума добротности – пунктир

оценки влияния ввода неверно идентифицированных сигнальных событий в выборку, используемую в качестве фона при оптимизации отбора, была проведена процедура оптимизации классификаторов путем выбора границы между классами по оси предсказательной переменной $sBDT$ классификатора (BDT score). В качестве показателя добротности была выбрана статистическая значимость сигнала $S/\sqrt{S+B}$, где S и B – суммы весов сигнальных и фоновых событий соответственно. 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. Исследования оптимизации классификаторов в условиях неопределенного доминирующего фона посвящены проблеме поиска гипотетических частиц новой физике по их распадам на частицы СМ. Такие распады должны проявляться в виде резонансных структур (пиков) в распределении инвариантных масс частиц-продуктов распада. Обыкновенно положение пика не может быть известно априори: масса гипотетической частицы не может быть точно предсказана. Поскольку спектр продуктов распада состоит во многом из «фоновых» для целей исследования частиц (продуктов процессов СМ или артефактов реконструкции детектора), необходимо разработать алгоритм отбора сигнальных событий. В качестве эффективно средства отбора может выступать многомерный классификатор. Существует проблема формирования выборки для его обучения: экспериментальные данные включают в себя смесь фоновых процессов с гипотетическим малым вкладом сигнала.

В работе был рассмотрен сценарий обучения, проверки и оптимизации отбора на основе многомерного классификатора рода «ансамбль деревьев решений с бустингом». Особенность исследования состояла в использовании смешанной выборки «фоновых» событий, включающей в себя малую сигнальную компоненту. 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 непертурбативных вычислений КХД.

Основным экспериментальным результатом, полученным в ходе данной работы, является измерение отношения вероятностей R_K полулептонных 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

$$R_K(q^2 > 14,3 \text{ ГэВ}^2/c^4) = 1,079_{-0,092}^{+0,106}(\text{стат.})_{-0,040}^{+0,044}(\text{сист.}). \quad (8)$$

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 [40], 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 LHCb по распаду $B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-$. Величина систематической погрешности, связанной с учетом и обработкой данных каналов, составляет 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 рамках работы по развитию аппаратной и методологической базы эксперимента LHCb, 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 зависимости $(9,1 \pm 0,7) \%$ и постоянного члена кривой разрешения $(0,42 \pm 0,15) \%$ совпадают в пределах погрешностей со значениями, представленными в проектном документе ECAL. Разработан метод анализа состава выведенного пучка ускорителя СПС на основе данных по энерговыделениям в модуле электромагнитного калориметра LHCb 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. *Shorkin R. A.*, Optimization of Rare Event Selection in the Presence of Unextractable Dominant Background // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2025. – Т. 52, № 9. – С. 456-465. doi: 10.3103/S1068335625602882, (SCOPUS, IF: 0,7)

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 LHCb // 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-tezisov-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. Anatomy of $b \rightarrow c\tau\nu$ anomalies / A. Azatov [и др.] // *Journal of High Energy Physics*. — 2018. — Т. 2018, № 11. — С. 187.
12. A new puzzle in non-leptonic B decays / A. Biswas [и др.] // *Journal of High Energy Physics*. — 2023. — Т. 2023, № 6. — С. 108.
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. *Brivio I., Trott M.* The standard model as an effective field theory // Physics Reports. — 2019. — Т. 793. — С. 1—98.
21. Rare b decays meet high-mass Drell-Yan / A. Greljo [и др.] // Journal of High Energy Physics. — 2023. — Т. 2023, № 5. — С. 87.
22. Breaking new grounds in flavour universality / R. Aaij [и др.] // CERN Courier - digital edition. — 2025. — Т. 65, № 2. — С. 13—14.
23. 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.
24. *Wilson K. G.* Non-Lagrangian Models of Current Algebra // Physical Review Journal. — 1969. — Т. 179, № 5. — С. 1499—1512.
25. *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.
26. 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.
27. 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.
28. *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.
29. *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.

30. *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.
31. Angular analysis of the $B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-$ decay using 3 fb^{-1} of integrated luminosity / R. Aaij [и др.] // Journal of High Energy Physics. — 2016. — Т. 2016, № 02. — С. 104.
32. Complete anatomy of $B_d \rightarrow \bar{K}^{*0}(\rightarrow K\pi)\ell^+\ell^-$ and its angular distribution / J. Matias [и др.] // Journal of High Energy Physics. — 2012. — Т. 2012, № 4. — С. 104.
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. LHCb detector performance / R. Aaij [и др.] // International Journal of Modern Physics. — 2015. — Т. 30, № 07. — С. 1530022.
35. Performance of the LHCb Vertex Locator / R. Aaij [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2014. — Т. 9, № 09. — P09007.
36. Performance of the LHCb Outer Tracker / R. Arink [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2014. — Т. 9, № 01. — P01002.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. *Shorkin R. A.* Beam Composition Analysis Using a Single SHASHLIK-Type Calorimeter Module // Physics of Atomic Nuclei. — 2023. — Т. 86, № 6. — С. 1421—1425.
43. *Shorkin R. A.* Optimization of Rare Event Selection in the Presence of Unextractable Dominant Background // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. — 2025. — Т. 52, № 9. — С. 456—465.