

На правах рукописи



**Егорычев Артём Викторович**

**Изучение распадов  $B_c$ -мезонов с чармонием и многочастичными  
адронными состояниями в эксперименте LHCb**

Специальность 1.3.15. — «Физика атомных ядер и элементарных частиц,  
физика высоких энергий»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2024

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт».

Научный руководитель: **Перейма Дмитрий Юрьевич**  
кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Официальные оппоненты: **Лубсандоржиев Баярто Константинович**  
доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт ядерных исследований» РАН, г. Москва;  
**Окороков Виталий Алексеевич**  
доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва.

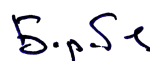
Ведущая организация: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, г. Москва.

Защита состоится 6 ноября 2024 г., начало в 15:00, на заседании диссертационного совета 02.1.003.05 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте [www.nrcki.ru](http://www.nrcki.ru)

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 02.1.003.05 доктор физ.-мат. наук, доц.



Барabanов А. Л.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы диссертации

$B_c^+$ -мезон был открыт в экспериментах на коллайдере Tevatron более 25 лет назад. Однако до проведения исследований в этой области экспериментами БАК были зарегистрированы всего лишь несколько мод его распадов. Изучение свойств этих частиц было невозможно в экспериментах на электрон-позитронных машинах. Эксперименты на ускорительном комплексе БАК предоставили новые возможности для исследований свойств  $B_c^+$ -мезонов. Благодаря высокому сечению рождения прелестных кварков при энергиях ускорительного комплекса БАК, появилась возможность изучать не только свойства нейтральных или заряженных  $B$ -мезонов, но и более тяжелых частиц, таких как  $B_c^+$ -мезоны. Установка LHCb на ускорительном комплексе БАК является уникальным спектрометром, который позволяет изучать свойства прелестных адронов и их возбужденных состояний.

Для поиска редких явлений на фоне большого количества вторичных процессов все большее значение приобретают алгоритмы машинного обучения, используемые в настоящее время для обработки и анализа данных. Машинное обучение – это область искусственного интеллекта, в которой применяются статистические методы, позволяющие компьютерным системам обучаться на основе входных данных без прямого программирования. Алгоритмы машинного обучения широко используются для классификации данных и проведения анализа в различных областях, таких как биоинформатика, техническая и медицинская диагностика, распознавание жестов и др. В физике высоких энергий и физике элементарных частиц преимущественно машинное обучение применяется для подавления фоновых и выделения редких сигнальных событий.

В научных исследованиях алгоритмы машинного обучения и нейронные сети являются обязательным условием современного эксперимента. Применение алгоритмов машинного обучения позволяет расширить возможности программно-аппаратного комплекса физических детекторов и автоматизировать процесс классификации сигнальных и фоновых распадов с высокой

эффективностью по сравнению с традиционными методами на основе ограничений. Впервые в эксперименте ЛНСб успешно применен метод восстановления редких распадов  $B_c^+$ -мезона с использованием современных достижений машинного обучения.

## Цели и задачи исследования

Исследования проводятся в рамках участия Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» в международном содружестве ЛНСб. Диссертация посвящена поиску новых распадов  $B_c^+$ -мезонов с чармонием в конечном состоянии и естественным образом объединяет три анализа. Обнаружение новых распадов  $B_c^+$ -мезонов и измерение их вероятностей распадов способствует проверке предсказаний СМ. Обнаружение новых каналов распадов и измерение парциальной ширины этих распадов обогащает экспериментальные знания об этих распадах и, как следствие, позволяет улучшить или построить новые теоретические модели.

Диссертационная работа посвящена экспериментальной проверке Стандартной модели, а именно, поиску новых редких распадов  $B_c^+$ -мезонов в конечном состоянии, содержащее S- и P-волновой чармоний ( $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$ ,  $\chi_{c1,2}$ ). Для поиска новых распадов были использованы данные, набранные экспериментом ЛНСб в первом RunI и втором RunII сеансах 2011 – 2018 гг., при энергии протон-протонных столкновений в системе центра масс 7, 8 и 13 ТэВ и соответствующих интегральной светимости 9 фб<sup>-1</sup>. Также были разработаны алгоритмы распараллеливания задач для поиска редких распадов  $B_c^+$ -мезонов, которые успешно интегрированы в общее программное обеспечение эксперимента ЛНСб.

## Научная новизна:

- впервые обнаружен распад  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^+\pi^-\pi^+$  и измерена его парциальная ширина относительно нормировочного канала  $B_c^+ \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-\pi^+$ ;
- впервые обнаружен распад  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+\pi^-\pi^+$  и измерена его парциальная ширина относительно нормировочного канала  $B_c^+ \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-\pi^+$  и

показан доминирующий вклад от распада  $K^{*0}$ -состояния;

– впервые обнаружен распад  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- K^+$  и измерена его парциальная ширина относительно нормировочного канала  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$  и показан доминирующий вклад от распада  $\phi$ -мезона;

– впервые обнаружен распад  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^+$  в канале  $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$  и измерена его парциальная ширина относительно нормировочного канала  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+$ ;

– выполнено первое наблюдение распада  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S)K^+ K^- \pi^+$  и измерена его парциальная ширина относительно нормировочного канала  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$ ;

– впервые исследована система, состоящая из трех заряженных пионов, в канале  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+$  и показан доминирующий вклад через распад  $a_1(1260)^+$ -состояния;

– впервые исследована система, состоящая из двух заряженных адронов, в канале  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$  и показан доминирующий вклад от распада  $\bar{K}^{*0}$ -мезона и подавление распада через  $\phi$ -мезон;

– впервые обнаружен распад  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$  и измерена его парциальная ширина относительно нормировочного канала  $B_c^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-$ ;

– впервые обнаружен распад  $B_c^+ \rightarrow (\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-)\pi^+ \pi^- \pi^+$  и измерена его парциальная ширина относительно нормировочного канала  $B_c^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-$ ;

– выполнено первое наблюдение распада  $B_c^+ \rightarrow J/\psi 4\pi^+ 3\pi^-$  и измерена его парциальная ширина относительно нормировочного канала

$$B_c^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-;$$

– впервые обнаружен распад  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c2}\pi^+$  и измерена его парциальная ширина относительно нормировочного канала  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$ ;

– впервые установлен верхний предел на отношение парциальных ширин распадов  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c1}\pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c2}\pi^+$ .

## Практическая полезность

Тема исследования диссертационной работы соответствует физической программе эксперимента LHCb, а именно направлению, которое включает изучение редких распадов тяжелых мезонов в конечные состояния, содержащие чармониевый резонанс ( $J/\psi$ -,  $\psi(2S)$ -,  $\chi_{c1,2}$ -мезоны). Результаты, полученные в работе, приведены в таблице свойств элементарных частиц и послужили началом для серии дальнейших исследований.

В ходе выполнения работы было разработано программное обеспечение, позволяющее улучшить существующие методы обработки и классификации данных, используемые в коллаборации LHCb. Для выполнения исследований было усовершенствовано программное обеспечение, с помощью которого производится анализ данных с применением методики распараллеливания алгоритмов. Программное обеспечение, разработанное в ходе диссертационной работы, широко используется в коллаборации для проведения других исследований.

## Основные положения, выносимые на защиту:

– метод отбора и реконструкции распадов  $B_c^+$ -мезона с чармонием и тремя легкими адронами ( $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S) \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S) K^+ K^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow (\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ \pi^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- K^+$ ) в условиях эксперимента LHCb;

– шесть отношений парциальных ширин распадов  $B_c^+$ -мезона:  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- K^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ \pi^- \pi^+$  и

$B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S) K^+ K^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$ ,  
 $B_c^+ \rightarrow \psi(2S) \pi^+ \pi^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow (\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) \pi^+$  и  
 $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+$ ;

– метод отбора и реконструкции распадов  $B_c^+$ -мезона с чармонием и многочастичными адронными состояниями ( $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,  
 $B_c^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-$ ,  $B_c^+ \rightarrow J/\psi 4\pi^+ 3\pi^-$  и  $B_c^+ \rightarrow (\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) \pi^+ \pi^- \pi^+$ )  
в условиях эксперимента ЛНСб;

– три отношения парциальных ширин распадов  $B_c^+$ -мезона:  
 $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-$ ,  $B_c^+ \rightarrow J/\psi 4\pi^+ 3\pi^-$  и  
 $B_c^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-$ ,  $B_c^+ \rightarrow (\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) \pi^+ \pi^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-$ ;

– метод отбора и реконструкции распадов  $B_c^+$ -мезона с P-волновым чармонием в конечном состоянии в условиях эксперимента ЛНСб;

– отношение парциальных ширин распадов  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c2} \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$ ;

– верхний предел на отношение парциальных ширин распадов  
 $B_c^+ \rightarrow \chi_{c1} \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c2} \pi^+$ ;

– разработка программного обеспечения для ускорения анализа и распараллеливания задач в эксперименте ЛНСб.

## Достоверность результатов и выводов

Достоверность результатов и выводов, полученных в работе, обусловлена использованием стандартных программных пакетов, разработанных специально для математического моделирования физических процессов эксперимента ЛНСб, дополнительными независимыми исследованиями внутри содружества ЛНСб и сравнением результатов с теоретическими предсказаниями Стандартной модели. Результаты и выводы исследований проходили широкое обсуждение в коллаборации ЛНСб при подготовке анализов к публикациям.

Измеренные отношения парциальных ширин представлены в таблице свойств элементарных частиц в редакции 2024 года.

### Апробация работы и публикации

Материалы, изложенные в работе, опубликованы в девяти статьях [1–9], восемь из которых удовлетворяют требованиям ВАК [1–8]. Данные материалы регулярно обсуждались на внутренних совещаниях коллаборации ЛНСб, докладывались лично автором на семинарах НИЦ «Курчатовский институт» и различных конференциях:

1. Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике, (г. Москва, Россия, 16 – 19 ноября 2020 года);
2. Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике, (г. Москва, Россия, 15 – 18 ноября 2021 года);
3. Конференция «Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных», (г. Москва, Россия, 27 – 28 апреля 2022 года);
4. 55-я Зимняя школа Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», (г. Гатчина, Россия, 13 – 18 марта 2023 года);
5. 56-я Зимняя школа Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», (г. Гатчина, Россия, 17 – 22 марта 2024 года);
6. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2024», (г. Москва, Россия, 12 – 26 апреля 2024 года).

Результаты работы неоднократно представлялись сотрудниками коллаборации ЛНСб на международных конференциях. Исследования отмечены следующими дипломами:

- почетная грамота за лучший доклад в рамках Молодежной конференции по теоретической и экспериментальной физике МКТЭФ–2021, (г. Москва, Россия, 15 – 18 ноября 2021 года);



– диплом победителя 55-й Зимней Школы ПИЯФ в номинации лучший стендовый доклад, (г. Гатчина, Россия, 13 – 18 марта 2023 года).

### Личный вклад диссертанта

Результаты, вынесенные на защиту, получены автором лично или при его решающем участии. Автор разрабатывал программное обеспечение эксперимента, участвовал в его дальнейшем внедрении и принимал активное участие в обработке данных эксперимента (методика отбора и оптимизации сигналов, вычисление эффективностей, изучение систематических ошибок, подготовка материалов к публикации в научных журналах). Автор принимал активное участие в работе международной физической группы в коллаборации LHCb по исследованию в области редких распадов с чармонием в конечном состоянии.

### Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 145 страниц, включая 34 рисунка и 61 таблицу. Список литературы содержит 106 наименований.

### **Содержание работы**

**Во введении** дается краткая характеристика исследований, представлено описание актуальности темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, показаны практическая значимость и новизна работы, приведено краткое описание содержания диссертации.

**В первой главе** представлено краткое описание спектрометра LHCb (с помощью которого были набраны данные, используемые в работе), перечислены основные подсистемы детектора, их устройство и характеристики, изложен принцип работы триггерной системы, сделан обзор программного обеспечения, используемого для обработки и хранения данных, приведена реализация современных методов программирования обработки данных эксперимента.

**В конце первой главы** представлено описание современных методов программирования для обработки экспериментальных данных. В эксперименте

LHCb программное обеспечение реализуется на языках программирования C++ и Python с использованием библиотек ROOT и pyROOT. Преимуществами языка Python являются простой и понятный синтаксис, что позволяет пользователям разрабатывать функциональные программы и интегрировать в обработку данных такие современные алгоритмы, как методы параллельного программирования, машинного обучения и устранения эффекта многократного счета.

В пакетах программного обеспечения эксперимента LHCb обработка информации обычно занимает значительное количество времени (порядка семи часов на одном вычислительном узле). Для ускорения проведения физического анализа реализована возможность распараллеливания нескольких задач на серверах, которые используются для обработки данных. Основным пакетом для реализации нового метода выбрана среда обработки данных Ostar, функционал которой расширен эффективными библиотеками для поддержки многопроцессорной и параллельной обработки задач на основе пакета Pathos с использованием языка программирования Python.

С использованием метода распараллеливания время выполнения очереди задач удалось сократить с уровня 5–8 часов (на одном вычислительном узле) до уровня всего 8–10 минут, что увеличило эффективность выполнения физического анализа и оперативного достижения научных результатов [6].

В эксперименте LHCb методы машинного обучения реализованы в пакете программ TMVA, который содержит в себе алгоритмы обучения, тестирования, оценки производительности и методы визуализации данных. В качестве основного метода для классификации данных выбран алгоритм машинного обучения на основе ускоренного дерева решений (BDTG), который реализован в пакете TMVA. Метод BDTG представляет собой ансамбль решающих деревьев, где каждое дерево обучается последовательно с использованием градиентного бустинга. Каждое дерево строится на основе ошибок предыдущих деревьев, с целью улучшения предсказательной способности модели.

Разработанный метод машинного обучения позволяет достичь высокой эффективности выделения сигнальных и уменьшения числа фоновых событий в анализируемых данных. Полученные результаты применения метода превосходят значения, оцененные без использования пакета TMVA. Таким

образом, данный алгоритм можно использовать в качестве основного метода выделения сигнальных распадов из экспериментальных данных [7, 9].

Метод устранения эффекта многократного счета может приводить к искажению наблюдаемых распределений. Такой эффект называется множественным счетом и является естественным для многих анализов. Для полного устранения эффекта многократного счета в анализе был разработан метод удаления множественных кандидатов, который решает данную проблему. Разработанный метод находит в данных те события, которые имеют несколько одинаковых параметров, задаваемых пользователем, и возвращает новую выборку данных после исключения всех повторяющихся событий. Реализованный метод устранения эффекта многократного счета позволяет улучшить финальный результат исследований и может использоваться в качестве основного метода удаления кандидатов-клонов из анализа [8].

**Во второй главе** изложены детали поиска распадов  $B_c^+ \rightarrow \psi 3h^\pm$  ( $\psi = J/\psi$  или  $\psi(2S)$ ,  $h$  – пионы или каоны). Изучаемые распады  $B_c^+$ -мезона на чармоний и легкие адроны могут быть описаны с использованием подхода факторизации квантовой хромодинамики, который характеризуется с помощью перехода  $B_c^+ \rightarrow J/\psi W^{*+}$  и универсальной спектральной функции виртуального  $W^{*+}$  бозона, распадающегося на легкие адроны. Феноменологическая модель, предложенная отечественными теоретиками А.В. Бережным, А.К. Лиходедом и А.В. Лучинским (модель BLL), основанная на этом подходе, с хорошей точностью предсказывает значения парциальных ширин ранее обнаруженных распадов  $B_c^+$ -мезонов и прекрасно описывает вклады резонансных структур в системах легких адронов. Поиски новых распадов  $B_c^+$ -мезонов с чармонием и легкими адронами в конечном состоянии позволят проверить гипотезу о факторизации, используемую при описании изучаемых процессов. Анализ по поиску распадов  $B_c^+$ -мезонов с чармонием и тремя легкими адронами ( $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S) \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S) K^+ K^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow (\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ \pi^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- K^+$ ) выполнен на данных, набранных установкой LHCb в протон-протонных соударениях в сеансах RunI и RunII и отвечающих интегральной светимости  $\mathcal{L} = 9 \text{ фб}^{-1}$ . Мода  $B_c^+ \rightarrow \psi 3h^\pm$  реконструируется, используя распад чармония на два противоположно заряженных мюона ( $\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ).

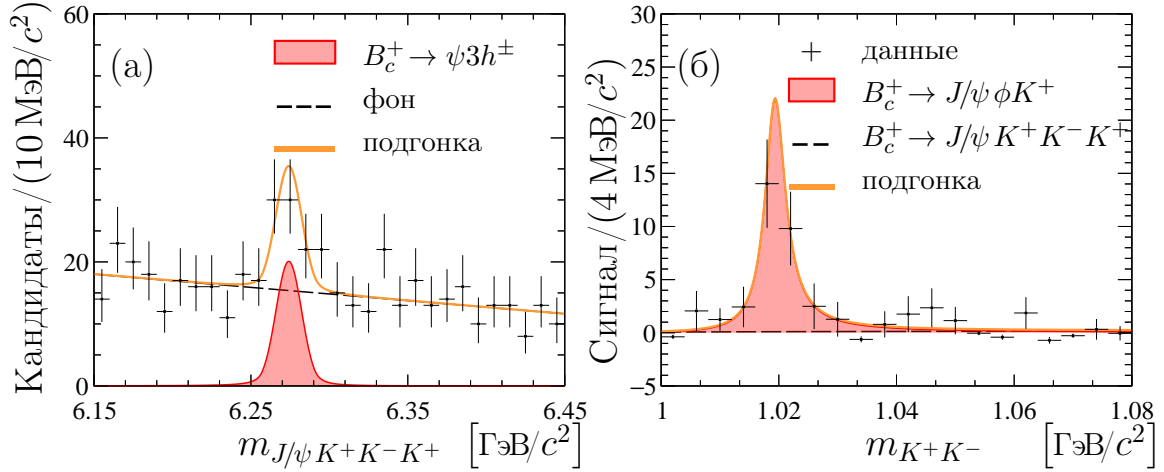


Рис. 1 — Распределение инвариантной массы  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- K^+$  кандидатов (а) и  $K^+ K^-$  комбинаций для распада  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- K^+$  (б)

При изучении распада  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^+$  применяется мода  $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ . В ходе проведения поиска на сигнальный и нормировочный каналы накладывают одинаковый набор ограничений, при этом величины этих ограничений должны быть максимально одинаковыми. Такая процедура помогает при вычислении отношения парциальных ширин получать минимальную систематическую ошибку. В анализе используется метод поиска удаленной вторичной вершины. Ограничения применяются как на кинематические переменные, так и на идентификационные.

**В разделах 2-4 второй главы** показаны наблюдаемые сигналы изучаемых распадов, приведены их основные характеристики и представлено исследование резонансных структур в распадах  $B_c^+ \rightarrow \psi 3h^\pm$  (где  $h^\pm$  – это  $\pi^\pm$ -или  $K^\pm$ -мезоны), проведен ряд проверок полученных результатов. На рис. 1 (а) показано распределение инвариантной массы отобранных  $B_c^+$ -кандидатов для распада  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- K^+$ . Количество сигнальных событий для распадов  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- K^+$  определяется с использованием одновременной аппроксимации инвариантной массы  $J/\psi K^+ K^- K^+$  комбинации. Подбор параметров функции аппроксимации осуществляется методом небинированного максимального правдоподобия. Выход сигнала для распада  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- K^+$  составляет  $43 \pm 10$ .

Статистическая значимость распада  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- K^+$  оценивается методом упрощенного моделирования данных (псевдоэксперименты). Полученная

статистическая значимость сигнала составляет 5,2 стандартных отклонений [6]. Для того чтобы оценить вклад резонансных структур, в системе комбинаций  $K^+K^-$  для распада  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+K^-K^+$  используется статистическая техника вычитания контрольных интервалов. Наибольший вклад в распад  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+K^-K^+$  дает канал  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$  –  $(90 \pm 19)\%$  (рис. 1 (б)). Канал наблюдается впервые [1]. Измеренное значение вкладов резонансных структур находится в хорошем согласии с предсказаниями BLL модели.

**В разделах 5-7 второй главы** описывается определение эффективностей восстановления исследуемых распадов и изучение систематических неопределенностей измерения отношения парциальных ширин. Полная эффективность восстановления распада включает в себя эффективность генератора Монте-Карло и углового захвата установки, эффективность реконструкции и отбора событий, эффективность идентификации адронов с учетом поправок на трековую эффективность, эффективность триггерной системы для отбора сигнального распада.

Большинство вкладов в общую систематическую неопределенность при вычислении отношения парциальных ширин распадов со схожей кинематикой сокращается. В качестве примера сокращающейся систематики можно привести идентификацию мюонов или реконструкцию чармония. Несократимые вклады в систематические неопределенности измерений связаны со следующими источниками: выбором модели аппроксимации данных, коррекцией и объемом образцов математического моделирования, эффективностью триггерной системы, идентификацией адронов и реконструкцией треков, критериями отбора. Полное значение относительной систематической неопределенности для изучаемых каналов распадов  $B_c^+$ -мезона составляет 3,3 – 5,6% и вычисляется, как корень квадратный из суммы квадратов каждого источника неопределенностей.

**В последнем разделе второй главы** представлены результаты анализа. Впервые изучены распады  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^+\pi^-\pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+\pi^-\pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+K^-K^+$ . Распад  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^+$  впервые обнаружен в канале  $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+\pi^-$  и получено первое экспериментальное свидетельство существования распада  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S)K^+K^-\pi^+$ , статистическая значимость которого составила 3,7 стандартных отклонений [2, 3]. В ходе исследования распадов  $B_c^+ \rightarrow \psi 3h^\pm$  обнаружено, что распределение инвариантной массы комбинации

трех пионов в распаде  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+$  согласуется с предсказанием BLL модели о том, что данный распад проходит через  $B_c^+ \rightarrow J/\psi a_1(1260)^+$  реакцию. Результат совпадает с предыдущими исследованиями эксперимента LHCb. Наличие в этой реакции промежуточного  $a_1(1260)^+$ -мезона подтверждается значительной долей распадов  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+$ , проходящих через промежуточный  $\rho^0(770)$ -резонанс, которая составляет  $(88,1 \pm 3,0_{-0,3}^{+12,0})\%$ , и наблюдением резонансной структуры в  $\pi^+ \pi^-$  комбинации, соответствующей распаду  $a_1(1260)^+ \rightarrow (f_0(1370) \rightarrow \pi^+ \pi^-) \pi^+$ . Доля распадов  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+$ , проходящих через это промежуточное состояние  $f_0(1370)$ , равна  $(10,4 \pm 1,4_{-1,2}^{+8,0})\%$ . Доля распадов  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$ , проходящих через промежуточный  $\bar{K}^{*0}$ -мезон, составляет  $(64,5 \pm 4,7_{-4,8}^{+3,9})\%$ . Установленный верхний предел на 90 (95)% уровне достоверности для доли распадов  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$  через промежуточный  $\phi$ -мезон равен  $< 4,2 (4,8)\%$  с учетом систематических погрешностей. Для распадов  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ \pi^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- K^+$  вычислены доли распадов через промежуточные  $K^{*0}$ - и  $\phi$ -резонансы. Доли таких распадов составляют  $(61,3 \pm 5,0_{-0,3}^{+7,7})\%$  и  $(90 \pm 19_{-7}^{+5})\%$ , соответственно.

Вычислено шесть отношений парциальных ширин распадов  $B_c^+$ -мезона:

$$\begin{aligned}
\mathcal{R}_{J/\psi K^+ K^- \pi^+}^{J/\psi K^+ K^- K^+} &= (7,0 \pm 1,8 \pm 0,2) \times 10^{-2}, \\
\mathcal{R}_{J/\psi K^+ K^- \pi^+}^{J/\psi K^+ \pi^- \pi^+} &= 0,35 \pm 0,06 \pm 0,01, \\
\mathcal{R}_{J/\psi K^+ K^- \pi^+}^{\psi(2S) K^+ K^- \pi^+} &= (3,7 \pm 1,2 \pm 0,1) \times 10^{-2}, \\
\mathcal{R}_{J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+}^{\psi(2S) \pi^+ \pi^- \pi^+} &= (1,9 \pm 0,4 \pm 0,1) \times 10^{-2} \\
\mathcal{R}_{J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+}^{\psi(2S) \pi^+} &= (3,5 \pm 0,6 \pm 0,2) \times 10^{-2}, \\
\mathcal{R}_{J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+}^{J/\psi K^+ K^- \pi^+} &= 0,185 \pm 0,013 \pm 0,006,
\end{aligned}$$

где первая погрешность является статистической, а вторая – систематической [1–3]. Полученные результаты согласуются со значениями из аналогичных исследований распадов  $B_c^+$ -,  $B^+$ -,  $B^0$ - и  $B_s^0$ -мезонов в других экспериментах.

**В третьей главе** описывается анализ по изучению характеристик распадов  $B_c^+$ -мезона с пятью адронами и семью заряженными пионами в конечном состоянии. В данной Главе изучаются четыре распада  $B_c^+$ -мезона с чармонием и многочастичными

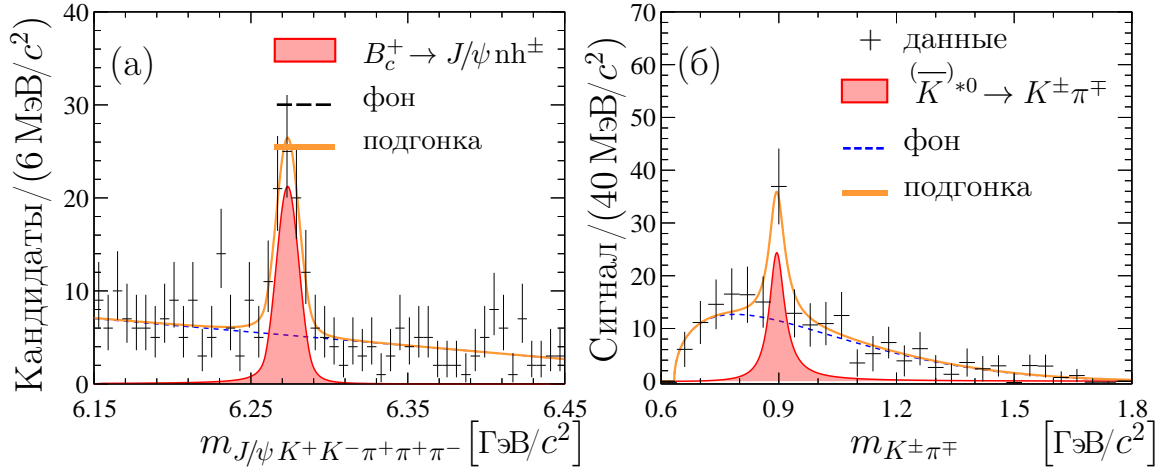


Рис. 2 — Распределение инвариантной массы  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$  кандидатов (а) и  $K^\pm \pi^\mp$  комбинаций для распада  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$  (б)

адронными состояниями ( $B_c^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-$ ,  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow (\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) \pi^+ \pi^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi 4\pi^+ 3\pi^-$ ). Анализ основан на данных, набранных спектрометром ЛНСб в  $pp$  столкновениях при энергиях в системе центра масс 7,8 и 13 ТэВ и соответствующих интегральной светимости 1,2 и 6  $\text{fb}^{-1}$ . Для поиска распадов с чармонием и многочастичными адронными состояниями используется димюонная мода распада  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ . При изучении распада  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S) \pi^+ \pi^- \pi^+$  применяется мода  $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ . В ходе проведения поиска на сигнальный и нормировочный каналы накладываются одинаковый набор ограничений, при этом величины этих ограничений должны быть максимально близкими. Такая процедура помогает при вычислении отношения парциальных ширин получать минимальную систематическую ошибку. В анализе используется метод поиска удаленной вторичной вершины. Ограничения применяются как на кинематические переменные, так и на идентификационные.

**Во втором и третьем разделах третьей главы** показаны наблюдаемые сигналы изучаемых распадов и представлено исследование резонансных структур в распадах  $B_c^+ \rightarrow \psi n h^\pm$ , проведен ряд проверок полученных результатов. На рис. 2 (а) показано распределение инвариантной массы отобранных  $B_c^+$ -кандидатов для распада  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$ . Количество сигнальных событий для распадов  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$  определяется с использованием одновременной аппроксимации инвариантной массы  $J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$

комбинации [8]. Подбор параметров функции аппроксимации осуществляется методом небинированного максимального правдоподобия. Выход сигнала для распада  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$  составляет  $69 \pm 11$ . Статистическая значимость сигнала – 9,1 стандартных отклонений без учета систематических погрешностей. Канал наблюдается впервые [4].

Для того чтобы оценить вклад резонансных структур в системе комбинаций  $K^\pm \pi^\mp$  для распада  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$  используется статистическая техника вычитания контрольных интервалов (рис. 2 (б)). Полученные результаты подгонки указывают на наличие распадов, проходящих через  $K^{*0}$ - и  $\bar{K}^{*0}$ -мезоны, что согласуется с предсказаниями теоретической модели BLL.

**В разделах 4-6 третьей главы** описывается определение эффективностей восстановления исследуемых распадов и изучение систематических неопределенностей измерения отношения парциальных ширин. Полная эффективность восстановления распада включает в себя эффективность генератора Монте-Карло и углового захвата установки, эффективность реконструкции и отбора событий, эффективность идентификации адронов с учетом поправок на трековую эффективность, эффективность триггерной системы для отбора сигнального распада.

Большинство вкладов в общую систематическую неопределенность при вычислении отношения парциальных ширин распадов со схожей кинематикой сокращается. В качестве примера сокращающейся систематики можно привести идентификацию мюонов или реконструкцию чармония. Несократимые вклады в систематические неопределенности измерений связаны со следующими источниками: выбором модели аппроксимации данных, эффективностью триггерной системы, взаимодействием адронов с веществом детектора, исключением множественных кандидатов, идентификацией адронов и реконструкцией треков, критериями отбора, коррекцией и объемом образцов математического моделирования. Полное значение относительной систематической неопределенности для изучаемых каналов распадов  $B_c^+$ -мезона составляет 4,4 – 7,1% и вычисляется, как корень квадратный из суммы квадратов каждого источника неопределенностей

**В последнем разделе третьей главы** представлены результаты анализа. Подтверждено существование распадов  $B_c^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-$



и  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^+\pi^-\pi^+$  с каналом  $\psi(2S) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ . Распад  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^+$  впервые обнаружен со значимостью 9,0 стандартных отклонений. Получено первое экспериментальное свидетельство существования распада  $B_c^+ \rightarrow J/\psi 4\pi^+3\pi^-$ , статистическая значимость которого составила 4,7 стандартных отклонений.

Вычислено три отношения парциальных ширин распадов  $B_c^+$ -мезона:

$$\begin{aligned}\mathcal{R}_{J/\psi 3\pi^+2\pi^-}^{J/\psi K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^+} &= (33,7 \pm 5,7 \pm 1,6) \times 10^{-2}, \\ \mathcal{R}_{J/\psi 3\pi^+2\pi^-}^{J/\psi 4\pi^+3\pi^-} &= (28,5 \pm 8,7 \pm 2,0) \times 10^{-2}, \\ \mathcal{R}_{J/\psi 3\pi^+2\pi^-}^{\psi(2S)\pi^+\pi^-\pi^+} &= (17,6 \pm 3,6 \pm 0,8) \times 10^{-2},\end{aligned}$$

где первая погрешность является статистической, а вторая – систематической.

В ходе исследования распадов  $B_c^+ \rightarrow \psi n h^\pm$  обнаружено, что распределение инвариантной массы трех пионов в распадах  $B_c^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+2\pi^-$  и  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^+\pi^-\pi^+$  согласуются с предсказаниями модели BLL о том, что данные распады проходят через промежуточное  $a_1(1260)^+$ -состояние. Полученные результаты подгонок согласуются с большей долей распадов, проходящих с участием  $\rho^0(770)$ -резонанса, как и ожидается в рамках BLL модели.

В распаде  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^+$  обнаружено, что распределение инвариантной массы  $K^\pm\pi^\mp$  системы указывает на наличие распадов, проходящих через  $K^{*0}$ - и  $\bar{K}^{*0}$ -мезоны. Исследование распределений инвариантной массы  $K^+K^-$  системы показывает, что вклад от  $\phi$ -мезона сильно подавлен, что согласуется с предсказаниями теоретической модели BLL [4].

**В четвертой главе** представлен анализ по изучению основных характеристик распадов  $B_c^+$ -мезона с заряженным пионом и P-волновым чармонием ( $\chi_{c1^-}$  и  $\chi_{c2^-}$ -мезон) в конечном состоянии. В главе изучаются распады  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c2}\pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c1}\pi^+$ . Анализ основан на данных, набранных экспериментом LHCb в  $pp$  столкновениях при энергии в системе центра масс 7 ТэВ (светимости  $1 \text{ фб}^{-1}$ ), 8 ТэВ (светимости  $2 \text{ фб}^{-1}$ ) и 13 ТэВ (светимости  $6 \text{ фб}^{-1}$ ).

Распады  $B_c^+$ -мезона с S-волновым чармонием ( $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -мезоны) и легкими адронами в конечном состоянии широко изучаются в литературе.

В последние годы появились теоретические работы с предсказаниями для парциальных ширин распадов  $B_c^+$ -мезона с P-волновым чармонием ( $\chi_{c1}$ - и  $\chi_{c2}$ -мезон) и легкими адронами в конечном состоянии. Теоретические оценки были получены на основе методов нерелятивистской квантовой хромодинамики. Для каналов с одним и тем же легким мезоном и разными P-волновыми чармониями в конечном состоянии предсказано, что значение абсолютных парциальных ширин с  $\chi_{c2}$ -состоянием больше, чем с  $\chi_{c1}$ -состоянием.

В экспериментах на электрон-позитронных машинах, таких как CLEO, BaBar, Belle, проводилось изучение рождения P-волнового чармония в распадах  $B^+$ - и  $B^0$ -мезонов. Было продемонстрировано в двухчастичных распадах  $B \rightarrow \chi_c K^{(*)}$ , что мода с  $\chi_{c2}$ -состоянием сильно подавлена по отношению к  $\chi_{c1}$ -моду. Это соответствует теоретическому предсказанию. Недавние анализы эксперимента LHCb по изучению трехчастичных распадов  $\Lambda_b^0$ -барионов, а именно,  $\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c1} p K^-$  и  $\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c2} p K^-$  или  $\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c1} p \pi^-$  и  $\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c2} p \pi^-$ , показали, что парциальные ширины распадов практически равны. Распады  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c1} \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c2} \pi^+$  никогда не изучались не только в эксперименте LHCb, но и в мире. Очевидно, что изучение и поиск таких распадов позволит уточнить параметры теоретических моделей и расширить понимание о динамике взаимодействия кварков. Для поиска распадов с P-волновым чармонием в конечном состоянии используется мода распада  $\chi_{c1,2} \rightarrow J/\psi \gamma$ . При изучении нормировочного распада  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$  применяется димюонная мода  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ . В процессе анализа на сигнальный и нормировочный каналы накладываются одинаковый набор ограничений, при этом величины этих ограничений должны быть максимально близкими. Такая процедура помогает при вычислении отношения парциальных ширин получать минимальную систематическую ошибку. Для последующего подавления комбинаторного фона применяется метод машинного обучения на основе ускоренного дерева решений [7].

**Во втором разделе четвертой главы** показаны наблюдаемые сигналы изучаемых распадов и их основные характеристики, проведен ряд проверок полученных результатов. На рис. 3 (а) показано распределение инвариантной массы отобранных  $B_c^+$ -кандидатов для распада  $B_c^+ \rightarrow \chi_c \pi^+$ . Подбор параметров функций аппроксимаций осуществляется методом небинированного

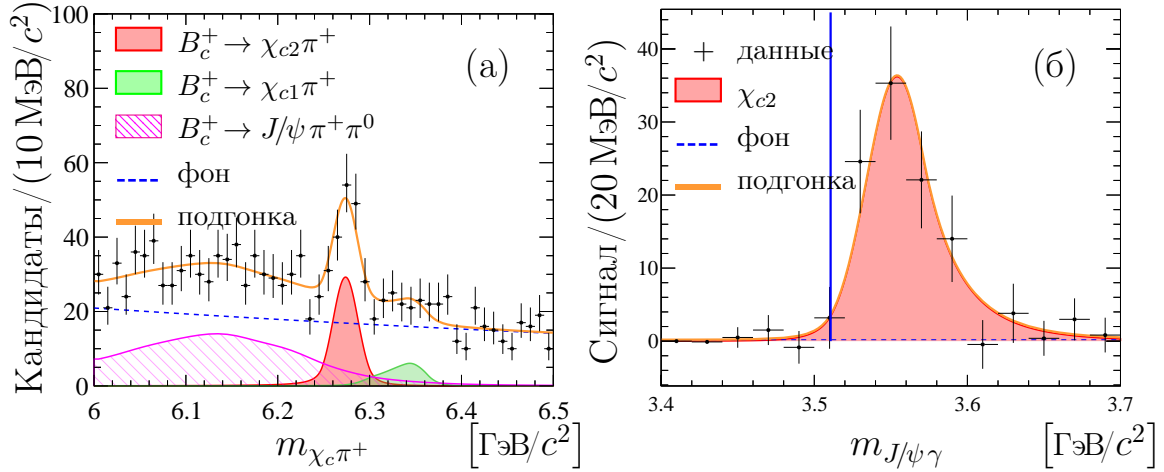


Рис. 3 — Распределение инвариантной массы  $B_c^+ \rightarrow \chi_c \pi^+$  кандидатов (а) и  $J/\psi \gamma$  комбинаций для распада  $\chi_{c2} \rightarrow J/\psi \gamma$  (б)

максимального правдоподобия. Количество событий выполняется одновременным подбором параметров аппроксимирующих функций для распределений инвариантных масс по двум комбинациям:  $J/\psi \gamma \pi^+$  и  $J/\psi \pi^+$ . Распределение инвариантной массы распадов  $B_c^+ \rightarrow \chi_c \pi^+$  включает в себя четыре компонента. Оцененная статистическая значимость распада  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c2} \pi^+$  составляет 8,1 стандартных отклонений, что свидетельствует о первом обнаружении изучаемого распада  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c2} \pi^+$ . [5].

Проверка полученных результатов подгонки для распадов  $\chi_{c2} \rightarrow J/\psi \gamma$  и  $\chi_{c1} \rightarrow J/\psi \gamma$  проведена с использованием статистической техники вычитания левых и правых контрольных интервалов по массе  $J/\psi \gamma$  системы (рис. 3 (б)). Выход сигнала для распада  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c2} \pi^+$  составляет  $104,8 \pm 15,4$ . Результаты подгонки исследуемого распада  $\chi_{c2} \rightarrow J/\psi \gamma$  согласуются с числом сигнальных событий, полученных из аппроксимации экспериментальных данных распада  $B_c^+ \rightarrow \chi_c \pi^+$ , а вклад от  $\chi_{c1}$ -состояния существенно подавлен, что также согласуется с полученными результатами аппроксимации экспериментальных данных.

**В разделах 3-5 четвертой главы** описывается определение эффективностей восстановления исследуемых распадов и изучение систематических неопределенностей измерения отношения парциальных ширины.

Полная эффективность восстановления распада включает в себя эффективность генератора Монте-Карло и углового захвата установки, эффективность реконструкции и отбора событий, эффективность триггерной

системы для отбора сигнального распада, эффективность классификатора BDTG, поправки к эффективности восстановления треков и поправки к эффективности восстановления фотонов.

Большинство вкладов в общую систематическую неопределенность при вычислении отношения парциальных ширин распадов со схожей кинематикой сокращается. В качестве примера сокращающейся систематики можно привести идентификацию мюонов или реконструкцию чармония. Несократимые вклады в систематические неопределенности измерений связаны со следующими источниками: выбором модели аппроксимации данных, эффективностью триггерной системы, исключением множественных кандидатов, реконструкцией треков и фотонов, идентификацией пионов, критериями отбора, коррекцией и объемом образцов математического моделирования. Полное значение относительной систематической неопределенности для изучаемых каналов распадов  $B_c^+$ -мезона составляет 4,4% и вычисляется, как корень квадратный из суммы квадратов каждого источника неопределенностей

**В последнем разделе четвертой главы** представлены результаты анализа. Впервые обнаружен распад  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c2}\pi^+$  со значимостью 7,6 стандартных отклонений. С использованием нормировочного канала  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$  вычислено отношение парциальной ширины распадов  $B_c^+$ -мезона:

$$\frac{\mathcal{B}_{B_c^+ \rightarrow \chi_{c2}\pi^+}}{\mathcal{B}_{B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+}} = 0,37 \pm 0,06 \pm 0,02 \pm 0,01 ,$$

где первая погрешность является статистической, вторая – систематической, а третья – значение отношения парциальных ширин распадов  $\chi_{c2} \rightarrow J/\psi \gamma$ . Полученное значение находится в согласии с теоретическими работами. Вклад от распада  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c1}\pi^+$  значительно подавлен, поэтому установлен верхний предел на отношение парциальных ширин распадов  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c1}\pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c2}\pi^+$ , который составляет  $< 0,49$  на 90% уровне достоверности. Измеренное значение верхнего предела находится в согласии с теоретическими предсказаниями [5].

**В заключении** перечислены основные результаты работы:

- разработан метод отбора и реконструкции распадов  $B_c^+$ -мезона с чармонием и тремя легкими адронами ( $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S) \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,

$B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S) K^+ K^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow (\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) \pi^+$ ,  
 $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ \pi^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- K^+$ ) в условиях эксперимента LHCb;

– измерено шесть отношений парциальных ширин распадов  $B_c^+$ -мезона:  
 $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- K^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ \pi^- \pi^+$  и  
 $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow \psi(2S) K^+ K^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$ ,  
 $B_c^+ \rightarrow \psi(2S) \pi^+ \pi^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow (\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) \pi^+$  и  
 $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,  $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^+$ ;

– разработан метод отбора и реконструкции распадов  $B_c^+$ -мезона с чармонием и многочастичными адронными состояниями ( $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,  
 $B_c^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-$ ,  $B_c^+ \rightarrow (\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) \pi^+ \pi^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi 4\pi^+ 3\pi^-$ )  
в условиях эксперимента LHCb;

– измерено три отношения парциальных ширин распадов  $B_c^+$ -мезона:  
 $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-$ ,  $B_c^+ \rightarrow J/\psi 4\pi^+ 3\pi^-$  и  
 $B_c^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-$ ,  $B_c^+ \rightarrow (\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) \pi^+ \pi^- \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-$ ;

– разработан метод отбора и реконструкции распадов  $B_c^+$ -мезона с P-волновым чармонием в конечном состоянии в условиях эксперимента LHCb;

– измерено отношение парциальных ширин распадов  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c2} \pi^+$  и  
 $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$ ;

– измерен верхний предел на отношение парциальных ширин распадов  
 $B_c^+ \rightarrow \chi_{c1} \pi^+$  и  $B_c^+ \rightarrow \chi_{c2} \pi^+$ ;

– разработано программное обеспечение для ускорения анализа и распараллеливания задач в эксперименте LHCb.

## Основные публикации по теме диссертации

### Статьи, удовлетворяющие требованиям ВАК:

- [1] R. Aaij, ... , A. Egorychev, ... , *et al.*, Study of  $B_c^+$  decays to charmonia and three light hadrons, *JHEP* **01** (2022) 065.
- [2] А. В. Егорычев, Д. Ю. Перейма, Изучение новых распадов  $B_c^+$  мезонов с чармонием и легкими адронами в эксперименте ЛНСб. *Ядерная физика и инжиниринг*, т. 13, № 4 (2022) 399.
- [3] А. В. Егорычев, Д. Ю. Перейма, Изучение новых распадов  $B_c^+$  мезонов с чармонием и легкими адронами в конечном состоянии. *Краткие сообщения по физике ФИАН*, т. 50, № 3 (2023) 14.
- [4] R. Aaij, ... , A. Egorychev, ... , *et al.*, Study of  $B_c^+$  meson decays to charmonia plus multihadron final states, *JHEP* **07** (2023) 198.
- [5] R. Aaij, ... , A. Egorychev, ... , *et al.*, Study of  $B_c^+ \rightarrow \chi_c \pi^+$  decays, *JHEP* **02** (2024) 173.
- [6] Egorychev, A. V., Belyaev, I. M., Ovsyannikova, T. A., Using parallelization in LHCb physics data analysis, *Phys. Atom. Nuclei* **84** (2021) 1938.
- [7] А. В. Егорычев, Д. Ю. Перейма, Разработка алгоритма машинного обучения для поиска новых распадов  $B_c^+$  мезонов с чармонием и многочастичными адронными состояниями, *Вестник Южно-Уральского государственного университета*, т. 16, № 1 (2023) 108.
- [8] А. В. Егорычев, И. М. Беляев, Т. А. Овсянникова, Распараллеливание в задачах анализа физических данных эксперимента ЛНСб, *Программные продукты и системы*, т. 34, № 1 (2021) 189.

## Прочие работы:

- [9] А. В. Егорычев, Д. Ю. Перейма, Использование методов машинного обучения для поиска новых распадов мезонов в эксперименте ЛНСб на большом адронном коллайдере, Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных, т. 1, (2022) 192.