

На правах рукописи

**Петров Никита Константинович**

**Изучение многокварковых состояний в  
эксперименте CMS**

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 «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **кандидат физико-математических наук  
Чистов Руслан Николаевич**

Официальные оппоненты: **Цукерман Илья Ильич,**  
доктор физико-математических наук,  
Курчатовский комплекс фундаментальных  
исследований Федерального государствен-  
ного бюджетного учреждения «Национальный  
исследовательский центр "Курчатовский ин-  
ститут"»,  
старший научный сотрудник

**Горелов Игорь Владимирович,**  
кандидат физико-математических наук,  
Научно-исследовательский институт ядерной  
физики имени Д.В.Скобельцына Москов-  
ского государственного университета имени  
М.В.Ломоносова,  
старший научный сотрудник

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки «Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера» Сибирского отделения  
Российской академии наук**

Защита состоится 25 марта 2026 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.1.262.03 на базе ФИАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53.

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

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ года

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.1.262.03,  
д-р физ.-мат. наук

Баранов Сергей Павлович

## Общая характеристика работы

### Актуальность исследования.

Большой адронный коллайдер (БАК) проектировался как комплекс из экспериментов, нацеленных на самый широкий спектр задач в физике элементарных частиц. Одним из самых значимых открытий является обнаружение бозона Хиггса коллаборациями CMS и ATLAS в 2012 году. В настоящее время основными направлениями исследований на БАКе являются прецизионное измерение параметров Стандартной модели (СМ), поиск ее расширений (так называемой Новой физики), изучение физики столкновений тяжелых ионов, а также спектроскопия тяжелых адронов (частиц, в составе которых есть очарованный  $c$ -кварк или прелестный  $b$ -кварк). Последнее включает в себя поиски новых элементарных частиц, а также изучение интересных распадов уже существующих. За время работы БАКа было открыто более 70 тяжелых адронов. Измерение физических параметров частиц и их распадов позволяет проверять и уточнять теоретические модели квантовой хромодинамики (КХД), описывающие сильное межкварковое взаимодействие и механизм конфайнмента. Такие исследования возможны благодаря огромной энергии столкновения протонов в системе центра масс, что способствует более интенсивному рождению очарованных и прелестных адронов, в том числе частиц, состоящих из более двух тяжелых кварков. Последнее невозможно на В-фабриках.

Особый интерес представляют экзотические адроны. Кварковая модель достаточно успешно описывает структуру обнаруженных мезонов ( $q\bar{q}$ ) и барионов ( $qqq$  и  $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ ). Она группирует частицы в мультиплеты, что позволяет лучше понимать природу симметрий, которым подчиняются адроны. Однако кварковая модель допускает существование и 4-(тетракварки), 5-(пентакварки) и даже 6-кварковых состояний. Помимо так называемых компактных мультикварков, существует также ряд моделей, предлагающих альтернативные внутренние конфигурации экзотических состояний, например, мезон-антимезонные молекулы, адрочармоний, гибриды и так далее.

Эпоха открытия и активного исследования экзотических частиц началась в 2003 году с обнаружения чармониеподобного состояния  $X(3872)$  коллаборацией Belle. С тех пор экспериментами BESII, BESIII, BaBar, Belle, LHCb, ATLAS и CMS было обнаружено множество экзотических состояний. Только на БАКе было открыто более двадцати новых частиц, см. Рис. 1. Однако, несмотря на интенсивное изучение данного направления физики на протяжении двух десятилетий, внутренняя структура  $X(3872)$  до сих пор остаётся предметом дискуссий и исследований.

За последние 5 лет коллаборациями LHCb, CMS и ATLAS были открыты экзотические частицы, состоящие полностью из тяжелых кварков,

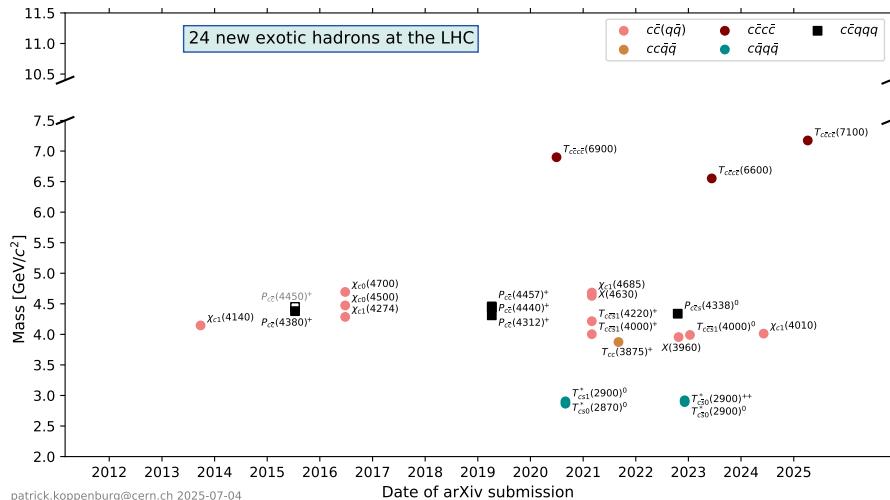


Рис. 1 — Экзотические адроны, открытые на БАКе. Точки различной формы и цвета обозначают отдельные состояния и отражают их кварковый состав. По оси абсцисс показаны даты публикаций, в которых сообщалось об открытии, а по оси ординат — соответствующие массы.

что еще сильнее подогрело интерес научного сообщества к данной теме. Также данные открытия стали триумфом теоретических предсказаний, так как существование подобных состояний предсказывалось еще в начале 80-х годов.

Подытоживая вышеизложенное, исследование многокварковых состояний является горячей и бурно развивающейся темой современной физики элементарных частиц. Поиск и изучение экзотических состояний представляют собой актуальное направление исследований.

### Цели и задачи исследования.

Основными целями работы были:

- Поиск распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \bar{\phi}$  на данных Run-2 и, при наблюдении, измерение его вероятности относительно вероятности известных распадов.
- Разработка алгоритмов и процедур восстановления спектра инвариантной массы  $J/\psi J/\psi$  на данных Run-2.
- Изучение Монте-Карло симуляций сигнальных и фоновых процессов парного рождения  $J/\psi$ -мезонов.
- Разработка программного обеспечения для описания массовых спектров пар  $J/\psi$ -мезонов с учётом интерференции.

- Поиск экзотических состояний в спектре инвариантной массы  $J/\psi J/\psi$  вблизи порога. В случае их наблюдения — измерение масс и натуральных ширин в различных аппроксимирующих моделях.

### Научные результаты, выносимые на защиту.

- Впервые в мире обнаружен распад  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \Phi$ .
- Измерена вероятность распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \Phi$  относительно вероятности нормировочного канала  $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda$ .
- Разработаны методы и алгоритмы восстановления спектра инвариантной массы  $J/\psi J/\psi$ .
- Подтверждено существование экзотической частицы  $X(6900)$ , распадающейся на  $J/\psi J/\psi$ .
- Впервые в мире обнаружено новое экзотическое состояние  $X(6600)$ , распадающееся на пару  $J/\psi$ -мезонов.
- Найдено первое экспериментальное указание на существование экзотического состояния  $X(7100)$ , распадающегося на  $J/\psi J/\psi$ .
- Измерены массы и натуральные ширинны найденных частиц в различных аппроксимирующих моделях.

### Научная новизна работы.

Впервые в мире обнаружен распад  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \Phi$ . Данный канал является барионным аналогом хорошо изученного распада  $B^+ \rightarrow J/\psi \bar{K}^+$ , где была найдена богатая резонансная структура в спектре промежуточной инвариантной массы  $J/\psi \Phi$ . Также впервые измерена вероятность распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \Phi$  относительно вероятности нормировочного канала  $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda$ .

В результате детального исследования спектра инвариантной массы  $J/\psi J/\psi$  подтверждено существование состояния  $X(6900)$ , ранее заявленного коллаборацией LHCb. Подтверждение наличия данного состояния, а также измерение его параметров на данных CMS, предоставляет дополнительные сведения о спектроскопии полностью тяжёлых тетракварков.

Обнаружено новое экзотическое состояние  $X(6600)$  и найдено первое экспериментальное указание на существование состояния  $X(7100)$ . Обе частицы распадаются на пару  $J/\psi$ -мезонов и состоят из четырёх очарованных кварков ( $c\bar{c}c\bar{c}$ ). Для каждого состояния измерены массы и натуральные ширинны. Кроме того, для описания спектра инвариантной массы  $J/\psi J/\psi$  впервые предложена модель, учитывающая интерференцию между всеми

тремя найденными состояниями, что позволило достичь согласия с данными без необходимости введения дополнительных структур.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

В ходе настоящего исследования впервые обнаружен распад  $\Lambda_b^0$ -бариона в конечное состояние  $J/\psi\Lambda\phi$ . Данный канал представляет большой интерес для поиска тетра и пентакварков, так как содержит промежуточные подсистемы  $J/\psi\Lambda$ ,  $J/\psi\phi$  и  $\Lambda\phi$ . Дальнейшее изучение распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda\phi$  на большем наборе данных позволит детально исследовать спектры двухчастичных инвариантных масс на предмет наличия экзотических структур. Также измеренное отношение вероятностей распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda\phi$  к нормировочному каналу  $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda$  может быть использовано для проверки и уточнения теоретических моделей, описывающих слабые распады прелестных адронов.

В ходе исследования спектра инвариантной массы  $J/\psi J/\psi$  подтверждено существование экзотического состояния  $X(6900)$ , впервые обнаружено состояние  $X(6600)$  со статистической значимостью, превышающей 5 стандартных отклонений, а также получено первое экспериментальное указание на существование  $X(7100)$ . Для всех состояний измерены массы и натуральные ширины в гипотезах без интерференции и с интерференцией между тремя частицами. Измерение свойств данных состояний является очень важной информацией для теоретических моделей КХД. Полученные результаты легли в основу публикации [1], вызвавшей значительный интерес научного сообщества: за два года с момента выхода работа была процитирована более 100 раз, что подтверждает научную значимость и актуальность представленных в диссертации исследований.

Наконец, полученные результаты демонстрируют высокий потенциал эксперимента CMS для проведения передовых исследований в области спектроскопии экзотических состояний и тяжёлых адронов, а также намечают направления дальнейших работ в данной области.

### **Достоверность полученных результатов.**

Достоверность обнаружения распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda\phi$  обеспечивается соответствием измеренной относительной вероятности распада аналогичным значениям, полученным для  $B^+$  и  $B^0$ -мезонов. Масса  $\Lambda_b^0$ -бариона, восстановленная в каналах  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda\phi$  и  $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda$ , согласуется с мировым средним значением.

Достоверность наблюдения новых экзотических частиц в спектре  $M(J/\psi J/\psi)$  подтверждается согласованностью массы и натуральной ширины  $X(6900)$ , измеренных коллаборациями CMS, LHCb и ATLAS. Позже, используя данные Run-3, коллаборация CMS подтвердила существование  $X(6600)$ ,  $X(6900)$  и сообщила об обнаружении состояния  $X(7100)$  со

статистической значимостью, превышающей 5 стандартных отклонений. Дополнительно были установлены квантовые числа найденных экзотических адронов.

### Личный вклад.

Автор является членом международной коллаборации CMS и принимает активное участие в работе группы физики тяжелых夸克ов. Вынесенные на защиту результаты получены автором единолично, либо при его определяющем участии. А именно, в работу по наблюдению новых экзотических состояний в спектре  $M(J/\psi J/\psi)$  автор внес ключевой вклад, возглавляя одну из групп, занимавшихся данным анализом. Обнаружение распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi$ , а также измерение отношения вероятностей  $\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi) / \mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda)$  выполнены лично и самостоятельно. В дополнение к подготовке публикаций и разработке кода для физических анализов, автор принимал участие в дежурствах на сеансах по набору данных эксперимента CMS.

### Апробация работы.

Результаты, представленные в данной диссертации, опубликованы в научных статьях [1–5], которые полностью соответствуют требованиям ВАК. Работы [1; 2] являются коллаборационными статьями CMS, опубликованными в ведущих международных рецензируемых журналах, а [3–5] – тезисами докладов с конференций, изданными в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus. Также результаты регулярно докладывались на всероссийских и международных конференциях, в том числе самого высокого уровня:

- 62-я Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Долгопрудный, Россия, ноябрь 2019).
- 3rd EMMI Workshop: Anti-matter, hyper-matter and exotica production at the LHC (г. Вроцлав, Польша, декабрь 2019).
- Moscow International School of Physics 2020 (г. Вороново, Россия, март 2020).
- ICHEP2020: 40th International Conference on High Energy Physics (г. Прага, Чехия, июль 2020).
- Физика элементарных частиц и космология 2020 (г. Москва, Россия, ноябрь 2020).
- 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Долгопрудный, Россия, апрель 2023).

- Lomonosov 2023: XXI Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics (г. Москва, Россия, август 2023).

Кроме того, материалы исследований многократно представлялись и обсуждались на внутренних совещаниях коллаборации CMS и семинарах в ФИАН.

### Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из пяти глав: общей характеристики работы, трёх основных глав и заключения. Полный объём работы составляет 127 страниц, включая 57 рисунков и 16 таблиц. Список литературы содержит 168 наименований.

Во второй главе представлено описание экспериментальной установки CMS, с помощью которой были набраны данные для анализов, изложенных в настоящей работе.

Третья глава посвящена обнаружению распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \bar{b}$ . В ней приведены обзор экспериментальной картины в спектроскопии экзотических адронов, описание процедуры реконструкции и отбора событий, методы аппроксимации распределений, результаты анализа Монте-Карло симуляций и данных. Также в главе представлено вычисление отношения вероятностей распадов с учётом систематических погрешностей и обсуждение полученных результатов.

Четвёртая глава содержит исследование спектра  $M(J/\psi J/\psi)$  вблизи массового порога. В ней рассмотрены теоретические и экспериментальные результаты, связанные с поиском экзотических состояний, полностью состоящих из тяжёлых кварков. Описана процедура реконструкции и отбора событий, представлено исследование данных и Монте-Карло симуляций. Существенное внимание уделено оценке систематических неопределенностей и обсуждению полученных результатов.

В заключении подведены итоги работы и выражены благодарности всем сопричастным к данному труду.

## **Содержание работы**

**В первых трех разделах первой главы** описываются актуальность исследования, поставленные задачи, и научные результаты, выносимые на защиту. **Четвёртый раздел** посвящен научной новизне исследований, представленных в диссертации. **В пятом разделе** излагается теоретическая и практическая значимость работы. **В шестом разделе** рассказывается, чем обеспечивается достоверность полученных результатов. **В седьмом и восьмом разделах** описываются личный вклад соискателя в настоящее исследование и апробация работы. Наконец,

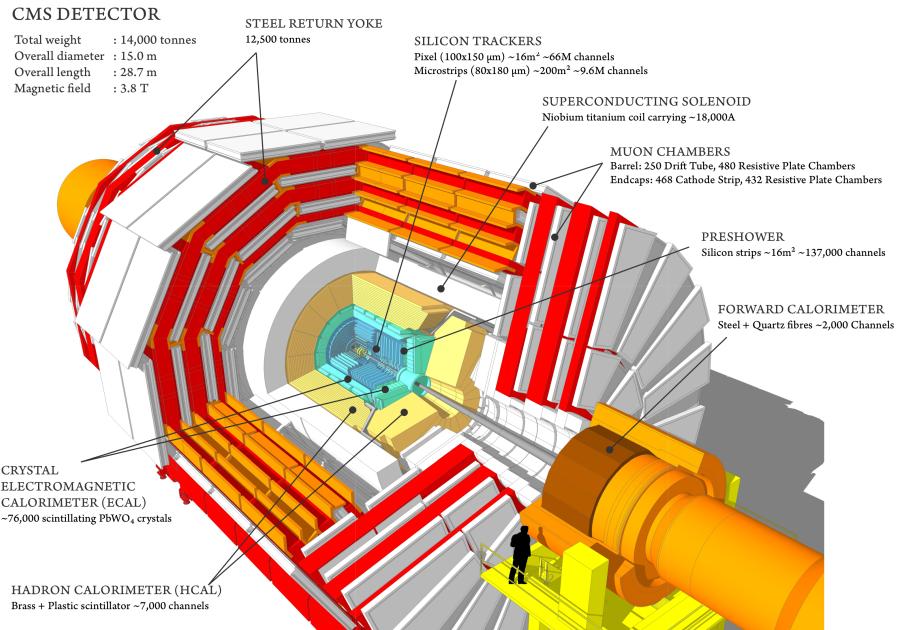


Рис. 2 — Схематическое изображение детектора CMS

**в девятом разделе** представлена краткая информация о структуре и объеме диссертации.

**Вторая глава** посвящена описанию детектора CMS на Большом адронном коллайдере (БАК), с помощью которого были получены все данные для настоящей работы. Аббревиатура CMS расшифровывается как Compact Muon Solenoid, то есть компактный мюонный соленоид. Схематическое изображение детектора представлено на Рис. 2.

**В первом разделе** рассказывается о Большом адронном коллайдере, его экспериментах и хронологии работы. Также в данном разделе описываются этапы ускорения частиц, позволяющие получить энергию столкновения протонов в системе центра масс  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ.

**Во втором разделе** излагается общая характеристика детектора CMS: его длина, диаметр, напряженность поля сверхпроводящего соленоида. Также дается пояснение, что детектор назван компактным по причине того, что трековая система и калориметры расположены внутри магнита. Кроме того, приводятся основные переменные, используемые для описания событий в эксперименте.

**В третьем разделе** описывается трековая система. Данная часть детектора является одной из важнейших для настоящей работы, так как она позволяет определять траектории заряженных частиц и восстанавливать первичные и вторичные вершины.

**Четвертый и пятый разделы** описывают электромагнитный и адронный калориметры соответственно. Электромагнитный калориметр CMS является гомогенным и состоит из кристаллов вольфрамата свинца, в то время как адронный калориметр является гетерогенным, и содержит чередующиеся слои активного вещества (пластиковый сцинтиллятор) и поглотителя (сталь и латунь). Для каждого из калориметров приведена зависимость энергетического разрешения от энергии поглощаемой частицы.

**В шестом разделе** рассказывается про мюонную систему эксперимента CMS. Данная часть детектора наряду с трековой системой является одной из важнейших для настоящего исследования, так как во всех конечных изучаемых состояниях присутствуют мюоны. Основными задачами мюонной системы являются регистрация мюонов, измерение их импульсов и участие в работе триггерной системы. Именно превосходная работа мюонных детекторов совместно с трекером позволяют проводить поиски и изучать экзотические состояния в эксперименте CMS.

Наконец, **в седьмом разделе** описана двухуровневая триггерная система эксперимента CMS, позволяющая оперативно отбирать потенциально интересные события. Она снижает частоту с 40 МГц до  $\sim 1$  кГц, что соответствует техническим ограничениям на скорость записи и доступный объем хранения данных.

**Третья глава** посвящена первому обнаружению распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \Phi$ . **В первом разделе** представлен экспериментальный обзор экзотических адронов. Повествование начинается с истории изучения чармонания. Приводится феноменология  $c\bar{c}$ -состояний и перечисляются частицы, открытые до 1980 года. Затем рассказывается история обнаружения и изучения состояния  $X(3872)$ . Указываются характеристики данной частицы, и объясняются причины, почему данное состояние не является обычным чармонием. Также приводятся основные интерпретации внутренней структуры  $X(3872)$ . После этого дается обзор открытых экзотических состояний на момент обнаружения распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \Phi$ . В конце раздела приводится современная нотация экзотических адронов.

**Во втором разделе** представлено содержание исследования распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \Phi$ . В рамках проделанной работы впервые в мире обнаружен распад  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \Phi$  и измерено отношение вероятностей  $\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \Phi)/\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda)$ . Канал  $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda$  был выбран как нормировочный, благодаря очень схожей топологии с основным. Отношение вероятностей распадов вычисляется по следующей формуле:

$$\frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \Phi)}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda)} = \frac{N(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \Phi) \epsilon(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda) \mathcal{B}(\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-)}{N(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda) \epsilon(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \Phi) \mathcal{B}(\phi \rightarrow K^+ K^-)}, \quad (1)$$

где  $N(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \Phi)$  и  $N(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda)$  — измеренные количества сигнальных событий  $\Lambda_b^0$  в основном и нормировочном каналах соответственно;

$\epsilon(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi)$  и  $\epsilon(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) \Lambda)$  — полные эффективности, включающие акцептанс детектора и эффективность реконструкции;  $\mathcal{B}(\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-)$  и  $\mathcal{B}(\phi \rightarrow K^+ K^-)$  — общемировые значения вероятностей распадов. В этом разделе также отмечается, что новый распад включает промежуточные инвариантные массы  $J/\psi \phi$  и  $J/\psi \Lambda$ , что в перспективе открывает возможность поиска тетракварков и пентакварков в соответствующих спектрах при накоплении достаточной статистики.

**В третьем разделе** описана процедура реконструкции и отбора событий для анализа. Для восстановления распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi$  комбинируются пара противоположно заряженных мюонов с кандидатом в  $\Lambda$ -барион и двумя противоположно заряженными треками с массовыми гипотезами каона. Для нормировочного канала  $\psi(2S)$ -мезон восстанавливается в канале  $J/\psi \pi^+ \pi^-$ , поэтому трекам присваивается массовая гипотеза пиона. Для уменьшения комбинаторного фона применяются требования на инвариантные массы восстановленных частиц, для долгоживущих частиц накладываются требования на значимость отлета (отношение расстояния между первичной и вторичной вершинами к его погрешности) и угол между направлением вылета и импульсом в поперечной плоскости. Топологии распадов представлены на Рис. 3.

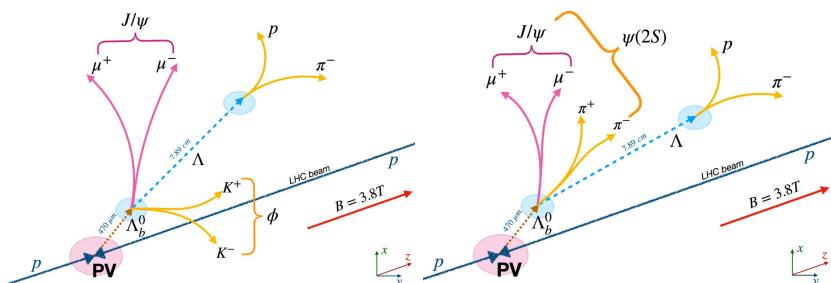


Рис. 3 — Топологии распадов  $\Lambda_b^0$ : основной канал  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi$  (слева) и нормировочный канал  $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) \Lambda$  (справа).

**Четвертый раздел** посвящен методам аппроксимации распределений в кандидатской диссертации. Приведены программное обеспечение и основные функции плотности вероятности, использованные в данной работе.

**В пятом разделе** описывается моделирование методами Монте-Карло основного и нормировочного каналов. Описана процедура вычисления эффективностей восстановления распадов, и метод определения детекторного разрешения для сигналов.

**В шестом разделе** приводятся результаты исследования данных. Для извлечения числа сигнальных событий в распаде  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \Phi$  вначале аппроксимируется распределение инвариантной массы  $M(J/\psi \Lambda K^+ K^-)$ . Аппроксимация дает  $380 \pm 32$  сигнальных событий  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda K^+ K^-$ , а локальная значимость сигнала составляет 9.7 стандартных отклонений. Затем полученная модель используется для разделения сигнальной и фоновой компонент методом *sPlot* (техника статистического взвешивания событий, позволяющая восстанавливать распределения отдельных вкладов модели), что позволяет получить распределение  $M(K^+ K^-)$ , соответствующее сигнальным распадам  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda K^+ K^-$ . Из полученного распределения  $M(K^+ K^-)$  определено число сигнальных событий распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \Phi$ , равное  $286 \pm 29$ . Распределения  $M(J/\psi \Lambda K^+ K^-)$  и  $M(K^+ K^-)$  представлены на Рис. 4.

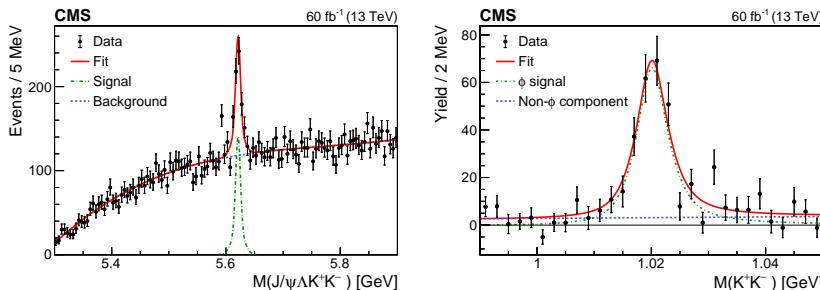


Рис. 4 — Распределения инвариантной массы  $J/\psi \Lambda K^+ K^-$  (слева) и инвариантной массы  $K^+ K^-$  из сигнала  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda K^+ K^-$  (справа). Точки показывают данные, вертикальные полосы — статистические погрешности, линии — результаты аппроксимаций [2].

Количество событий нормировочного канала было получено из аппроксимации распределения  $M(\psi(2S)\Lambda)$  и составило  $884 \pm 37$  сигнальных события. Распределение представлено на Рис. 5.

**В седьмом разделе** обсуждаются различные источники систематических неопределенностей. Благодаря идентичным топологиям распадов много потенциальных источников систематических погрешностей сокращаются в отношении. Были оценены неопределенностии, связанные с разницей между данными и симуляциями в кинематических распределениях; с вариациями моделей фона и сигнала в распределениях  $M(J/\psi \Lambda K^+ K^-)$ ,  $M(\psi(2S)\Lambda)$  и  $M(K^+ K^-)$ ; с разницей между данными и симуляциями в разрешениях  $\Lambda_b^0$ -бариона и ф-мезона; а также с конечностью наборов Монте-Карло симуляций. Наибольший вклад в полную систематическую погрешность внесло отличие между данными и результатами моделирования в разрешении  $\Lambda_b^0$  в распаде  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda K^+ K^-$ .

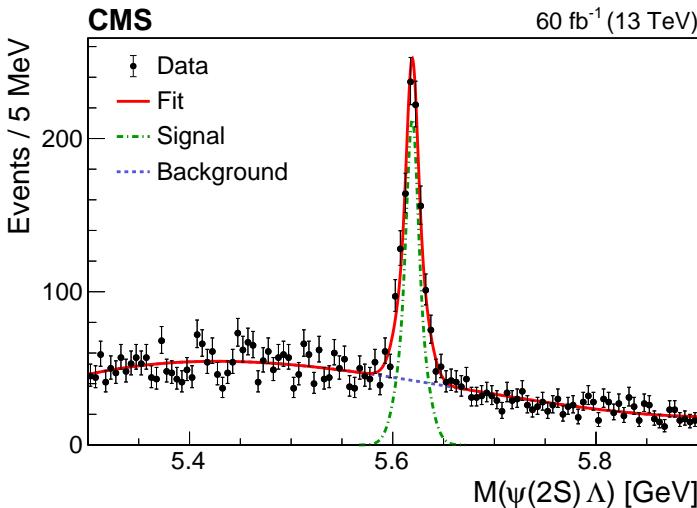


Рис. 5 — Распределение инвариантной массы  $\psi(2S)\Lambda$ . Точки показывают данные, линии — результаты аппроксимации [2].

**В восьмом разделе** вычисляется отношение вероятностей распадов [2]  $\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \bar{\phi})/\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda) = (8.26 \pm 0.90 \text{ (стат.)} \pm 0.68 \text{ (систем.)} \pm 0.11(\mathcal{B})) \times 10^{-2}$ , где первая погрешность — статистическая, вторая — систематическая, а третья связана с неопределенностями табличных значений, использованных в формуле 1. Далее приводится обсуждение полученных результатов, сравнение отношения вероятностей с аналогичными значениями для В-мезонов, а также рассматриваются открытия новых экзотических состояний, последовавшие после обнаружения распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \bar{\phi}$ .

Четвертая глава посвящена обнаружению новых экзотических состояний в спектре инвариантной массы  $J/\psi J/\psi$  в эксперименте CMS. **В первом разделе** представлена история исследования парного рождения кваркония. Сначала дается теоретическая справка о данном физическом процессе, объясняются механизмы рождения. После чего приводится краткий исторический обзор открытия парного рождения  $J/\psi$  и исследования сечения данного процесса коллаборациями LHCb и CMS. Во второй части первого раздела рассказывается о теоретических предсказаниях экзотических частиц в системах парного кваркония, поисках состояний в спектре инвариантной массы  $\Upsilon(1S)\mu^+\mu^-$  и об открытии  $X(6900)$  коллаборацией LHCb.

**Второй раздел** повествует о содержании исследования спектра  $M(J/\psi J/\psi)$ . В процессе анализа данных было найдено три экзотических состояния. Наиболее статистически значимое совместимо с зарегистрированным коллаборацией LHCb  $X(6900)$ . Обнаружено новое состояние

$X(6600)$  со значимостью, превышающей 5 стандартных отклонений и найдено свидетельство существования  $X(7100)$  со значимостью, превышающей  $3\sigma$ . Данные были описаны двумя основными моделями: без интерференции и с интерференцией между тремя найденными структурами. Для каждого состояния были измерены масса и натуральная ширина в обеих аппроксимирующих гипотезах.

В третьем разделе описана процедура реконструкции и отбора событий для исследования. Для восстановления спектра инвариантной массы  $J/\psi J/\psi$  требуются две пары противоположно заряженных мюонов. Для уменьшения вклада комбинаторных событий на димюоны накладываются ограничения на качество восстановления вершины, их инвариантную массу и поперечный импульс. Также требования качества применяются к аппроксимации 4-х мюонов в одну вершину и к аппроксимации двух  $J/\psi$ -кандидатов. Рис. 6 иллюстрирует реконструированное событие с кандидатом в распад состояния  $X(6600)$  на пару  $J/\psi$ -мезонов, каждый из которых распадается на пару мюонов.

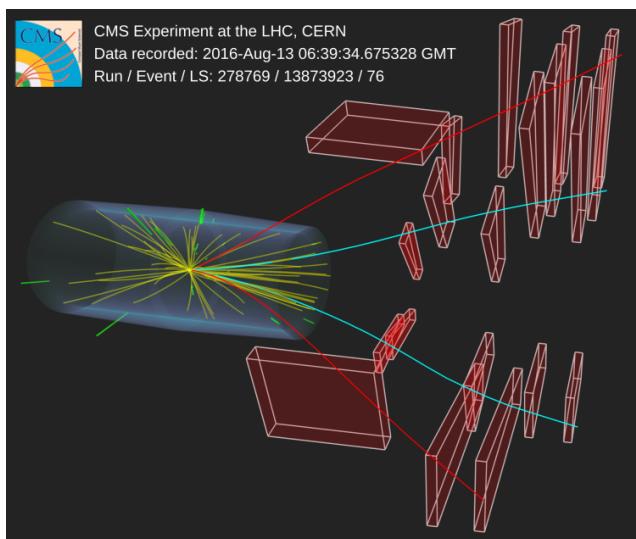


Рис. 6 — Иллюстрация реконструированного события на данных с кандидатом в распад состояния  $X(6600)$  на пару  $J/\psi$ -мезонов, с дальнейшим распадом каждого на два мюона. Восстановленная масса мюонной пары, изображённой красными (синими) линиями, составляет 3.12 ГэВ (3.05 ГэВ), а инвариантная масса  $J/\psi J/\psi$  — 6.52 ГэВ.

**Четвертый раздел** посвящен моделированию методами Монте-Карло (МК). Из анализа сигнальных МК наборов были получены зависимости эффективности восстановления и разрешения от  $M(J/\psi J/\psi)$ . Изучение

потенциальных сигнальных отражений (например,  $X \rightarrow \psi(2S)J/\psi \rightarrow J/\psi J/\psi \pi^+ \pi^-$ , где  $\pi$ -мезоны не восстанавливаются) позволяет в дальнейшем оценить систематические погрешности, связанные с возможностью их наличия в рассматриваемом спектре на данных. Также детально были изучены физические процессы парного рождения  $J/\psi$ -мезонов через одиночное рассеяние partонов (NRSPS - Nonresonant Single Parton Scattering) и двойное (DPS - Double Parton Scattering), являющиеся фоновыми для поиска экзотических частиц. Однако понимание данных процессов крайне важно, чтобы правильно оценить вклад новых состояний. В дальнейшем формы NRSPS, DPS, а также сигнальное разрешение используются для описания данных.

**В пятом разделе** описывается анализ нескрытых данных. Так как целью данного исследования являлся поиск новых экзотических состояний вблизи массового порога, проводился так называемый «слепой» анализ, то есть интересующая нас часть данных изначально была скрыта. Данная стратегия применяется чтобы избежать возможных предвзятостей людей, занимающихся анализом. Однако данные с инвариантной массой  $J/\psi J/\psi$ , превышающей 7.8 ГэВ, были доступны для анализа. В процессе их изучения было выявлено, что моделирование NRSPS не полностью согласуется с экспериментальными данными, в связи с чем один из параметров NRSPS компоненты оставался свободным при последующих аппроксимациях.

**Шестой раздел** посвящен описанию данных различными аппрокси- мирующими гипотезами. Основная гипотеза без интерференции состоит из фоновой компоненты и трех сигнальных состояний. Фоновая компонента включает в себя NRSPS, DPS и функцию релятивистского Брейт-Вигнера, свернутую с детекторным разрешением ( $BW_0$ ), которая введена для описания спектра вблизи массового порога. Все сигнальные состояния также описаны функцией S-волнового релятивистского Брейт-Вигнера, свернутой с детекторным разрешением. Распределение инвариантной массы  $J/\psi J/\psi$ , описанное моделью без интерференции, представлено на Рис. 7 (слева). Локальная значимость состояний  $BW_1$ ,  $BW_2$ ,  $BW_3$  в неинтерфе- риющей гипотезе с учетом систематических погрешностей составляет  $5.7\sigma$ ,  $9.4\sigma$  и  $4.1\sigma$ , соответственно. Состояние  $BW_2$  согласуется с обнару- женным коллаборацией LHCb  $X(6900)$ , в то время как сигналам  $BW_1$  и  $BW_3$  присвоены имена  $X(6600)$  и  $X(7100)$  соответственно. Однако модель без интерференции достаточно плохо описывает углубления в спектре в области 6750 и 7150 МэВ. Модель, разрешающая интерференцию между тремя сигнальными состояниями, позволяет существенно лучше описать данные, локальная значимость основной аппроксимации с интерференци- ей против главной модели без интерференции составляет  $4.2\sigma$ . Локальные значимости  $BW_1$ ,  $BW_2$ ,  $BW_3$  в интерфириющей модели с учетом си- стематических погрешностей составили  $7.9\sigma$ ,  $9.8\sigma$  и  $4.7\sigma$ , соответственно.

Распределение инвариантной массы  $J/\psi J/\psi$ , описанное моделью с интерференцией, показано на Рис. 7 (справа). Параметры сигнальных состояний в двух основных моделях представлены в Таблице 1. Глобальная значимость состояния  $X(7100)$  составила  $3.4\sigma$  в обеих аппроксимирующих гипотезах. В конце раздела приводятся аппроксимации наших данных моделями, предложенными коллаборацией LHCb в статье об обнаружении  $X(6900)$ . В том числе была опробована модель, допускающая интерференцию между NRSPS и одной из сигнальных компонент, однако эта гипотеза достаточно посредственно описывает данные.

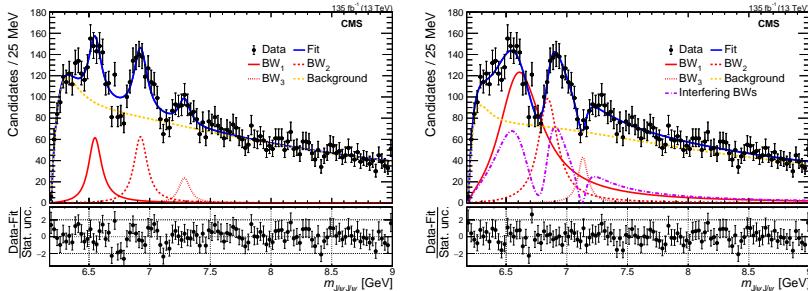


Рис. 7 — Распределение инвариантной массы  $J/\psi J/\psi$  на данных Run-2, описанное моделями без интерференции (слева) и с интерференцией между тремя сигнальными компонентами (справа) [1].

Таблица 1 — Результаты аппроксимаций распределения инвариантной массы  $J/\psi J/\psi$  [1]. В таблице приведены массы  $M$ , натуральные ширины  $\Gamma$  и локальные значимости для трех сигнальных состояний в основных моделях без и с интерференцией. В погрешностях сначала указана статистическая, а затем систематическая составляющая.

Модель	Переменная	$BW_1$	$BW_2$	$BW_3$
Без интерференции	$M$ (МэВ)	$6552 \pm 10 \pm 12$	$6927 \pm 9 \pm 4$	$7287^{+20}_{-18} \pm 5$
	$\Gamma$ (МэВ)	$124^{+32}_{-26} \pm 33$	$122^{+24}_{-21} \pm 18$	$95^{+59}_{-40} \pm 19$
	Значимость ( $\sigma$ )	5.7	9.4	4.1
С интерференцией	$M$ (МэВ)	$6638^{+43+16}_{-38-31}$	$6847^{+44+48}_{-28-20}$	$7134^{+48+41}_{-25-15}$
	$\Gamma$ (МэВ)	$440^{+230+110}_{-200-240}$	$191^{+66+25}_{-49-17}$	$97^{+40+29}_{-29-26}$
	Значимость ( $\sigma$ )	7.9	9.8	4.7

**Седьмой раздел** является наиболее объемным в диссертации и рассказывает об источниках систематических погрешностей в измерении параметров найденных состояний. Первым источником систематики является выбор формы Брейт-Вигнера. В основных аппроксимациях все сигнальные структуры описываются функцией S-волнового релятивистского Брейт-Вигнера, а при оценке систематической неопределенности были

опробованы различные квантовые числа, влекущие за собой изменение формы сигнала. Другим источником систематики являются формы, использующиеся для описания NRSPS и DPS вкладов. Для NRSPS были опробованы смена свободного параметра, другая параметризация данной компоненты, форма с учетом отражений (например от NRSPS  $\psi(2S)J/\psi$ , распадающегося на  $J/\psi J/\psi \pi^+ \pi^-$ ), а также формы, полученные из других МК генераторов. Для DPS были применены вариация с отражениями и форма, полученная на данных путем перемешивания событий. Следующим источником является функция разрешения детектора. Для оценки эффекта была опробована функция разрешения, полученная из другого МК генератора, а для аппроксимации с интерференцией были протестированы различные опции включения разрешения в модель (по умолчанию интерферирующая компонента не сворачивается с разрешением). Также была проведена оценка вклада комбинаторного фона в спектр  $M(J/\psi J/\psi)$ , и эффект от учета данной компоненты при измерении масс и натуральных ширин экзотических состояний. Одним из важных источников систематических неопределенностей является учет потенциальных сигнальных отражений; данный эффект был оценен путем ввода различных гипотетических отражений в аппроксимирующие модели. Следующей погрешностью выступает учет небольшого смещения среднего значения восстановленной массы  $J/\psi$ -мезонов от общемирового значения. Последним изученным источником систематических неопределенностей является учет зависимости эффективности от инвариантной массы  $J/\psi J/\psi$ . Наибольшие вклады в общую систематическую погрешность внесли неидеальность знания формы NRSPS и потенциальное наличие сигнальных отражений в спектре. Также в данном разделе приводится методика вычисления влияния систематических вариаций на статистическую значимость найденных состояний.

**Восьмой раздел** посвящен подытоживанию и обсуждению результатов. Проводится сравнение с результатами коллабораций LHCb и ATLAS, объясняется возможная интерпретация обнаруженных состояний. Также приводятся свежие результаты коллаборации CMS по измерению квантовых чисел найденных частиц, обсуждается изучение конечного состояния  $\psi(2S)J/\psi$  коллаборациями CMS и ATLAS, а также исследование спектра  $M(J/\psi J/\psi)$  на данных Run-3. Наконец, описывается дальнейшее направление исследований и поисков.

В заключении подводятся основные итоги работы. Результаты были получены, используя данные эксперимента CMS, набранные в протон-протонных столкновениях с энергией в системе центра масс  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ в 2016–2018 годах, соответствующие интегральной светимости  $135 \text{ фб}^{-1}$ . Основные результаты заключаются в следующем:

- Впервые обнаружен распад  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi$  и измерена его вероятность относительно нормировочного канала  $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda$ . Эти

результаты были получены на данных 2018 года (интегральная светимость  $60 \text{ фб}^{-1}$ ).

- Подтверждено существование состояния  $X(6900)$ , измерены его масса и натуральная ширина в основных аппроксимирующих гипотезах. Полученные значения параметров находятся в хорошем согласии между экспериментами БАКа, несмотря на использование различных интерференционных моделей.
- Впервые обнаружено новое экзотическое состояние  $X(6600)$  и получено свидетельство существования  $X(7100)$ , распадающихся на пару  $J/\psi$ -мезонов. Для каждого состояния измерены масса и натуральная ширина в аппроксимирующих моделях, как исключающих, так и позволяющих интерференцию между сигнальными состояниями. Все найденные частицы являются кандидатами в полностью очарованные тетракварки.

## Публикации автора по теме диссертации

1. *Hayrapetyan A. et al. (CMS Collaboration)*, New structures in the  $J/\psi J/\psi$  mass spectrum in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // *Phys. Rev. Lett.* — 2024. — Vol. 132. — P. 111901. — [arXiv:2306.07164](https://arxiv.org/abs/2306.07164).
2. *Sirunyan A. et al. (CMS Collaboration)*, Observation of the  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi$  decay in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // *Physics Letters B.* — 2020. — Vol. 802. — P. 135203. — [arXiv:1911.03789](https://arxiv.org/abs/1911.03789).
3. *Petrov N.* Observation of the  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi$  decay in the CMS Experiment // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute.* — 2021. — Vol. 48, no. 1. — Pp. 27–30.
4. *Petrov N.* New results in  $\Lambda_b^0$  baryon physics at CMS // *PoS.* — 2021. — Vol. ICHEP2020. — P. 409.
5. *Petrov N.* New Resonances in  $J/\psi J/\psi$  Mass Spectrum at CMS // *Moscow University Physics Bulletin.* — 2024. — Vol. 79, no. 1. — Pp. 78–81.