

На правах рукописи

Иванов Кирилл Максимович

Спектроскопия прелестно-странных Ξ_b барионов 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 — 2024

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: **Соколов Анатолий Александрович**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
ведущий научный сотрудник

Горелов Игорь Владимирович,
кандидат физико-математических наук,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского 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 09 декабря 2024 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 «___» _____ 2024 года

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

Баранов Сергей Павлович

Общая характеристика работы

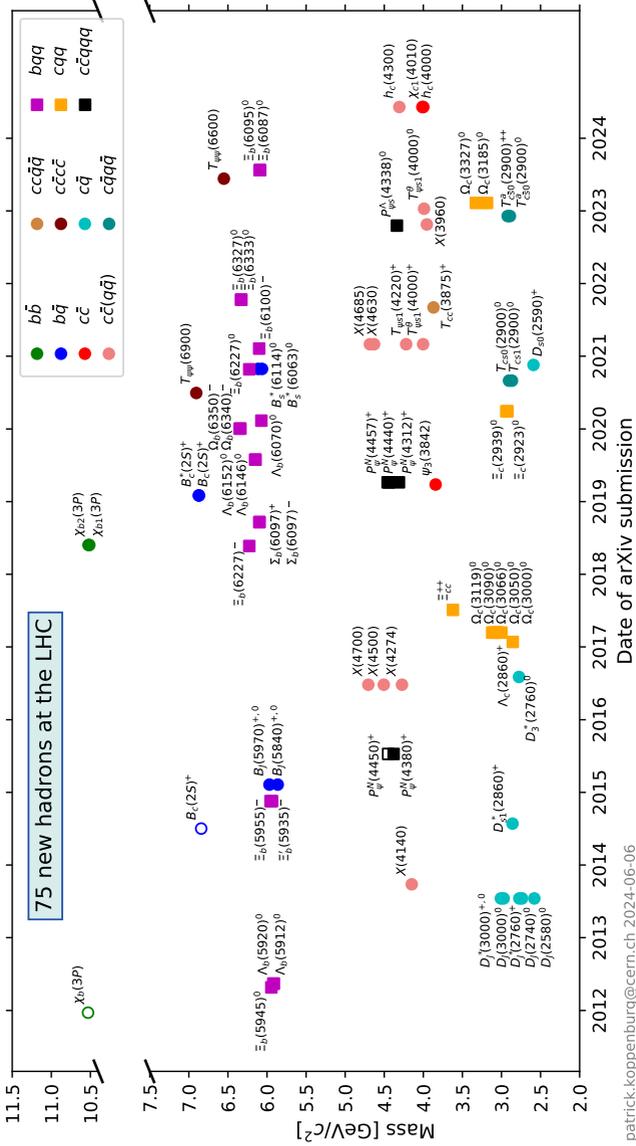
Актуальность исследования.

Современная физика высоких энергий посвящена во многом поискам различных частиц, эффектов и явлений, лежащих за пределами достаточно хорошо установленной Стандартной модели и в совокупности называемых Новой физикой. Тем не менее, весьма важным и интересным направлением является изучение спектроскопии тяжелых адронов (т.е. частиц, в составе которых есть очарованный s -кварк или прелестный b -кварк). В прошлом десятилетии с началом работы экспериментов на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРНе (г. Женева, Швейцария) была начата новая глава этой истории — более 70 новых тяжелых адронов было открыто на экспериментах БАКа за период с 2011 по 2024 годы. На Рис. 1 приведен график со схематичным списком 75 новых элементарных частиц, обнаруженных по состоянию на июнь 2024 г.

Данные по спектроскопии важны для дальнейшего развития теоретических подходов к описанию сильного взаимодействия и более глубокого понимания природы конфайнмента. Новые открытия и измерения позволяют проверять и уточнять теоретические модели сильного межкваркового взаимодействия в квантовой хромодинамике (КХД), что дает возможность в том числе проводить косвенные поиски Новой физики. В частности, важны точные измерения масс и времен жизни тяжелых адронов, вероятностей их различных распадов, а также поиск новых состояний и распадов. Так, обнаруженные значимые отклонения от расчетов предсказаний СМ могут служить свидетельством о влиянии предполагаемых частиц Новой физики на какой-то физический процесс (например, при вычислении вероятности распада, происходящего посредством электрослабых петель), тем самым давая указания на дальнейшие поиски.

В рамках спектроскопии изучаются различные типы тяжелых адронов — «классические» мезоны с целым спином (пара кварк–антикварк) и барионы с полуцелым спином (три кварка), а также «экзотические состояния», во многом представленные тетракварками (два кварка и два антикварка) и пентакварками (четыре кварка и антикварк). Адроны, в том числе тяжелые, обычно принято дополнительно группировать в мультиплеты, исходя из их кваркового состава, (изотопического) спина и других квантовых чисел.

Спектроскопия прелестных барионов является в настоящий момент бурно развивающейся областью. До начала работы БАК эти частицы изучены достаточно слабо, так как из-за большой массы они могут рождаться лишь на коллайдерах с высокой энергией пучка (которые преимущественно протонные), что накладывает естественные ограничения на возможности по анализу таких частиц — в частности, они недоступны на так называемых «фабриках прелести» Belle на коллайдере KEK в Японии и BaBar в лаборатории SLAC (США). Дополнительными сложностями являются невысокая вероятность фрагментации b -кварка в барион и значительно большее разнообразие возможных комбинаций



patrick.koppenburg@cern.ch 2024-06-06

Рис. 1 — Список новых тяжелых адронов, обнаруженных экспериментами БАК. Точки разных цветов с подписями обозначают новую частицу, причем цвет и форма точки зависит от кваркового состава этой частицы. По оси абсцисс отложены даты выхода препринта, в котором заявляется об обнаружении новой частицы, а по ординате — масса новой частицы.

состояний этих адронов в зависимости от внутренней динамики трех (зачастую сильно отличающихся друг от друга) кварков внутри бариона, в результате чего сечения рождения прелестных барионов получаются малыми. При этом стоит отметить, что при работе на адронных коллайдерах весьма высок уровень фоновых событий, и для выделения значимого и надежного сигнала приходится накладывать относительно жесткие критерии отбора, требующие большой статистики записанных столкновений.

Хотя первый прелестный барион Λ_b^0 был обнаружен коллаборацией UA1 на коллайдере $S\bar{p}pS$ в ЦЕРНе в 1991 г. (в протон-антипротонных столкновениях с $\sqrt{s} = 630$ ГэВ), более-менее стабильные результаты стали появляться только в 2000-ых на Тэватроне (FNAL), энергия и светимость которого были довольно велики (протон-антипротонные столкновения с $\sqrt{s} = 1.96$ ТэВ). Однако по-настоящему серьезные и точные измерения новых состояний в области b -барионов начали поступать только в прошлом десятилетии с экспериментов БАК (преимущественно, конечно, на специализированном для нужд флейворной физики детекторе LHCb). Так, до 2012 года предшественникам БАКа было обнаружено 8 состояний прелестных барионов, а именно:

- Прелестный Λ_b^0 барион в распаде на $J/\psi\Lambda$;
- Прелестно-странный Ξ_b^- барион в распаде на $J/\psi\Xi^-$;
- Прелестно-странный Ξ_b^0 барион в распаде на $\Xi_c^+\pi^-$;
- Прелестные Σ_b^\pm и $\Sigma_b^{*\pm}$ барионы в распаде на $\Lambda_b^0\pi^\pm$;
- Прелестный дважды-странный Ω_b^- в распаде на $J/\psi\Omega^-$.

В то же время, коллаборации LHCb и CMS за 12 лет уже открыли целых 19 резонансов:

- Возбужденные состояния Ξ_b^{*0} и $\Xi_b'^-$, Ξ_b^{*-} в распадах на $\Xi_b^-\pi^+$ и $\Xi_b^0\pi^-$;
- Пять возбужденных состояний Λ_b^0 бариона в распаде на $\Lambda_b^0\pi^+\pi^-$;
- Изодублет $\Xi_b(6227)^-$ и $\Xi_b(6227)^0$ в распадах на $\Lambda_b^0K^-$, $\Xi_b^0\pi^-$ и $\Xi_b^-\pi^+$;
- Возбужденные состояния Σ_b^\pm барионов в распадах на $\Lambda_b^0\pi^\pm$;
- Возбужденные состояния Ω_b^- бариона в распаде на $\Xi_b^0K^-$;
- Возбужденные состояния $\Xi_b(6327)^0$ и $\Xi_b(6333)^0$ в распаде на $\Lambda_b^0K^-\pi^+$;
- Возбужденные состояния $\Xi_b(6100)^-$ и $\Xi_b(6087)^0$, $\Xi_b(6095)^0$ в распадах на $\Xi_b^-\pi^+\pi^-$ и $\Xi_b^0\pi^+\pi^-$, соответственно.

Можно подытожить, что вопросы изучения спектроскопии прелестных барионов являются весьма молодой и горячей темой, и проведение экспериментальных работ по поиску и измерению параметров возбужденных состояний, а также поиск потенциальных новых распадов известных состояний представляются более чем актуальными направлениями исследований. Стоит также отметить, что благодаря экспериментальному прогрессу в последние годы существенно активизировались теоретические исследования в этой области — появилось множество новых теоретических моделей и предсказаний, нуждающихся в подтверждении на реальных данных.

Цель и задачи исследования.

Целью данной работы являлось детальное изучение спектроскопии прелестно-странных Ξ_b барионов: их свойств, распадов, а также измерение параметров различных состояний Ξ_b с использованием экспериментальных данных, набранных детектором CMS на Большом адронном коллайдере в 2016–2018 годах в протон-протонных столкновениях с энергией в системе центра инерции $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать алгоритмы и процедуры восстановления основного состояния Ξ_b^- бариона в различных конечных состояниях с участием димюонного распада чармония (J/ψ и $\psi(2S)$ мезонов). Используя разработанные алгоритмы и процедуры, провести изучение и поиск различных, в том числе новых (т.е. ранее не изучавшихся) распадов Ξ_b^- бариона. Для новых распадов в случае обнаружения провести измерение их вероятности относительно известных распадов.
2. Провести детальное изучение возбужденного состояния Ξ_b^{*0} , ранее обнаруженного коллаборацией CMS (и подтвержденного экспериментом LHCb), в его распаде на $\Xi_b^- \pi^+$, используя все возможные восстановленные моды распада Ξ_b^- бариона с целью максимального увеличения статистики данных. Выполнить измерение основных параметров Ξ_b^{*0} бариона: массы, естественной ширины, а также отношение сечений рождения Ξ_b^{*0} и Ξ_b^- барионов в протон-протонных столкновениях в доступных для CMS областях по p_T и η .
3. С использованием полученных результатов для Ξ_b^{*0} состояний, провести поиск нового, ранее не обнаруженного, P -волнового возбуждения Ξ_b^- бариона в распаде $\Xi_b^{*-} \rightarrow \Xi_b^{*0} \pi^- \rightarrow \Xi_b^- \pi^+ \pi^-$ по аналогии с известными резонансами в секторе очарованно-странных Ξ_c барионов. В случае положительного результата провести измерения его параметров: массы и естественной ширины.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Первое в мире обнаружение нового распада $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-$.
2. Измерение вероятности распада $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-$ относительного нормировочного канала $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Xi^-$.
3. Восстановление распада $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Lambda K^-$. Это является подтверждением существования этого канала, ранее обнаруженного экспериментом LHCb.
4. Разработка методов и алгоритмов восстановления Ξ_b резонансов, распадающихся на $\Xi_b^- \pi^+$ и $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$. Разработка метода учета частичного-восстановленного распада $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Sigma^0 K^-$ ($\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma$). Разработка процедуры одновременной аппроксимации сигналов Ξ_b^{*0} и Ξ_b^{*-} с использованием распадов $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Xi^-, \psi(2S)\Xi^-, J/\psi\Lambda K^-, J/\psi\Sigma^0 K^-$.

5. Измерение разницы масс $M(\Xi_b^{*0}) - M(\Xi_b^-) - m^{\text{PDG}}(\pi^+)$ и естественной ширины Ξ_b^{*0} бариона в распаде $\Xi_b^{*0} \rightarrow \Xi_b^- \pi^+$ (где $m^{\text{PDG}}(\pi^+)$ означает известную массу пиона), а также измерение отношения сечений рождения Ξ_b^{*0} и Ξ_b^- барионов в протон-протонных столкновениях в доступных для CMS областях по p_T и η .
6. Первое в мире обнаружение нового возбужденного $\Xi_b(6100)^-$ бариона в распаде на $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$.
7. Измерение разницы масс $M(\Xi_b(6100)^-) - M(\Xi_b^-) - 2 \cdot m^{\text{PDG}}(\pi^\pm)$, а также вычисление верхнего предела на естественную ширину $\Xi_b(6100)^-$ бариона.

Научная новизна исследования.

Впервые в рамках работы эксперимента CMS проведено достаточно всестороннее изучение различных распадов основного состояния Ξ_b^- бариона, а также детальное изучение состояний Ξ_b^{*0} и $\Xi_b(6100)^-$ — предыдущие результаты коллаборации CMS представляют из себя публикацию 2012 года об обнаружении нового Ξ_b^{*0} бариона в распаде $\Xi_b^- \pi^+$ и достаточно ограниченным по статистике измерением его массы с оценкой верхнего предела на его естественную ширину, причем при восстановлении Ξ_b^- бариона использовалась только мода $J/\psi \Xi^-$. В диссертационной работе используется многократно большая статистика данных, набранных в 2016–2018 годах, и сигнал Ξ_b^- бариона восстановлен в том числе посредством новых каналов $J/\psi \Lambda K^-$ и $J/\psi \Sigma^0 K^-$ (ранее изученных только в эксперименте LHCb), а также заявляется о первом обнаружении новой моды распада $\psi(2S) \Xi^-$, причем $\psi(2S)$ восстанавливается в двух каналах: $\psi(2S) \rightarrow \mu^+ \mu^-$ и $J/\psi \pi^+ \pi^-$. Далее в системе $\Xi_b^- \pi^+$ проведено новое и достаточно точное измерение параметров Ξ_b^{*0} бариона, подтверждая предыдущие измерения коллаборации LHCb и первую работу CMS. Наконец, впервые в мире обнаружена новая элементарная частица — возбужденный барион $\Xi_b(6100)^-$ в распаде на систему $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$ и проведено измерение его свойств. Новый резонанс совместим с гипотезой P -волнового состояния Ξ_b^{*-} со спин-четностью $J^P = 3/2^-$, нулевым спином легкого дикварка ds и орбитальным моментом $L = 1$ между b -кварком и дикварком ds , распадающийся по цепочке $\Xi_b(6100)^- \rightarrow \Xi_b^{*0} \pi^- \rightarrow \Xi_b^- \pi^+ \pi^-$. В этом случае новая частица является прелестным аналогом очарованного бариона $\Xi_c(2815)$, распадающегося через $\Xi_c(2815) \rightarrow \Xi_c^* \pi \rightarrow \Xi_c \pi \pi$ и имеющего такие же квантовые числа.

Теоретическая и практическая значимость работы.

В ходе настоящего исследования впервые обнаружен новый возбужденный прелестно-странный барион — $\Xi_b(6100)^-$ резонанс, совместимый с гипотезой P -волнового состояния Ξ_b^{*-} со спин-четностью $J^P = 3/2^-$. Опираясь на аналогии с очарованными Ξ_c барионами, всего должно существовать четыре таких P -волновых состояний и для Ξ_b барионов, и обнаружение первого из них в полном соответствии с ожиданиями является важнейшим подтверждением справедливости кварковой модели в секторе тяжелых барионов. Точное

знание массы такого Ξ_b^{*-} бариона и верхний предел на его естественную ширину имеют большое значение для различных теоретических моделей КХД, позволяют уточнить и улучшить подходы и методы, в рамках которых вычисляются параметры возбужденных прелестных адронов в целом. Стоит отметить и живой интерес к данному результату: за 3 года с момента публикации статья об обнаружении $\Xi_b(6100)^-$ бариона набрала более 20 цитирований в Scopus и Web of Science от различных теоретических групп, занимающихся моделями КХД и предсказаниями свойств тяжелых адронов. Первое обнаружение нового распада $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-$ и измерение его вероятности относительно канала $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Xi^-$ вносит значимый вклад в понимание природы слабых распадов b -адронов — ранее аналогичные измеренные отношения для рождения $\psi(2S)$ и J/ψ из прелестных частиц показывали несогласованность с теорией (например, результат экспериментов ATLAS и LHCb для отношения вероятностей распадов $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda$ к $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda$ значительно меньше предсказанного). Таким образом, новое измерение для распада $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-$ крайне важно для проверки теоретических моделей, используемых для описания слабых распадов прелестных адронов. Точное измерение параметров Ξ_b^{*0} бариона необходимо в качестве независимого подтверждения предыдущих результатов коллабораций LHCb и CMS и позволит уменьшить погрешность мировых средних значений, используемых, опять же, в теоретических моделях КХД, а значит — позволяет надежнее верифицировать теоретические методы и подходы. Кроме того, измерение отношения сечений рождения Ξ_b^{*0} к Ξ_b^- барионов, проведенное в отличном от эксперимента LHCb кинематическом диапазоне по (p_T, η) важно для лучшего понимания механизмов рождения прелестных барионов в pp -столкновениях. Наконец, представленные в диссертации результаты показывают в практическом смысле превосходные возможности эксперимента CMS выполнять передовые исследования в области спектроскопии прелестных адронов несмотря на то, что экспериментальная установка не была спроектирована для работ в этой области в общем случае. С учетом невозможности изучения b -барионов на «фабриках прелести», настоящая работа демонстрирует возможность для коллаборации CMS долгие годы занимать достойную позицию в мире по вопросам экспериментального изучения таких частиц и играть значимую роль в области физики прелестных барионов.

Достоверность полученных результатов.

Один из главных результатов, а именно обнаружение нового возбужденного $\Xi_b(6100)^-$ бариона, в 2023 году был независимо подтвержден коллаборацией LHCb — с использованием большей статистики они получили значимый сигнал этого состояния в том же канале, а также провели точное измерение его массы и естественной ширины, находящееся в прекрасном согласии с результатами настоящей работы. Теоретические предсказания для возможных параметров Ξ_b^{*-} также находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами. Достоверность первого обнаружения нового распада $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-$ подтверждается согласием измеренной относительной вероятности распада с

аналогичными для других прелестных адронов, а остальные сигналы Ξ_b^- бариона для различных мод распада тоже находятся в соответствии с ожиданиями и предыдущими результатами коллабораций CMS и LHCb. Масса Ξ_b^- бариона, измеренная в различных модах распада, совпадает с мировым средним значением этой величины. Это показывает корректность работы алгоритмов восстановления и полученных результатов. Проведенные измерения массы, естественной ширины и отношения сечений для Ξ_b^{*0} бариона также находятся в отличном согласии с предыдущими результатами CMS и LHCb и существенно дополняют их.

Личный вклад. Автор является членом коллаборации CMS и принимает активное участие в работе международной физической группы эксперимента CMS по физике тяжелых ароматов. Все представленные в диссертации и вынесенные на защиту результаты получены автором лично и полностью самостоятельно. Помимо разработки и написания необходимых для анализа набранных экспериментом CMS реальных данных алгоритмов восстановления Ξ_b^- барионов и их возбужденных состояний и последующего непосредственно физического анализа данных, автор также занимался генерацией данных компьютерного моделирования методом Монте-Карло и принимал участие в дежурствах на сеансах по набору данных эксперимента CMS.

Апробация работы. Результаты, полученные в настоящей диссертации, неоднократно обсуждалось на внутренних совещаниях коллаборации CMS и семинарах в ФИАН. Основные результаты также докладывались автором на следующих всероссийских и международных конференциях и школах:

- 55th Rencontres de Moriond: Electroweak Interactions and Unified Theories (Ла-Тюиль, Валле-д’Аоста, Италия, 21–27 марта 2021 г.)
- X молодежная конференция «Физика элементарных частиц и космология 2021» (г. Долгопрудный, Россия, 19–20 апреля 2021 г.)
- 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Долгопрудный, Россия, 21 ноября – 3 декабря 2021 г.)
- 21st Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics (г. Москва, Россия, 24–30 августа 2023 г.)
- Moscow International School of Physics 2024 (Московская обл., Россия, 28 февраля – 6 марта 2024 г.)
- 66-я Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Долгопрудный, Россия, 1–6 апреля 2024 г.)
- 22nd Conference on Flavor Physics and CP Violation FPCP-2024 (г. Бангкок, Таиланд, 27–31 мая 2024 г.)

За работу по обнаружению нового $\Xi_b(6100)^-$ бариона автор в 2022 г. был удостоен премии им. Д.В. Скобельцына конкурса молодежных научных работ ФИАН и медали Российской академии наук для студентов образовательных организаций высшего образования России за лучшую научную работу.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в печатных работах [1–5], из них публикации [1;2] являются статьями коллаборации

CMS в рецензируемых международных журналах, входящих в базы Web of Science и Scopus, работа [3] является публикацией по результатам выступления на конференции в рецензируемом журнале, индексируемом базой RSCI, а работы [4; 5] напечатаны в сборниках трудов конференций, причем работа [4] индексируется в базе Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, и заключения. Полный объем диссертации составляет 141 страницу, включая 36 рисунков и 17 таблиц. Список литературы содержит 128 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, обсуждается апробация работы и личный вклад автора, а также дана общая характеристика диссертационной работы.

Первая глава посвящена обзору современного состояния спектроскопии Ξ_b барионов. В начале главы обсуждается классификация тяжелых адронов в целом (содержащих тяжелый кварк Q), после чего в **первом подразделе** дается общее введение в некоторые понятия квантовой хромодинамики (КХД), в том числе обсуждаются основы эффективной теории тяжелого кварка (HQET). **Во второй подглаве** описывается устройство кварковой модели Ξ_Q барионов с точки зрения формирования $SU(3)$ мультиплетов и возможных квантовых чисел этих частиц. Семейство Ξ_b барионов представляет из себя различные изодублеты с кварковым составом qsb , где q -кварк является u - или d -кварком для Ξ_b^0 и Ξ_b^- барионов, соответственно. В кварковой модели обсуждаются квантовые числа J^P (полная спин-четность бариона), s и j (спин и полный угловой момент легкого дикварка), классификация возбужденных состояний с точки зрения радиального (n) и орбитального (L) квантовых чисел, причем для последнего вводятся дополнительные квантовые числа λ (возбуждение между легким дикварком и тяжелым кварком) и ρ (возбуждение внутри системы легкого дикварка). Изодублеты Ξ_b барионов отличаются между собой вышеупомянутыми квантовыми числами, и наглядное изображение кварковой структуры для легчайших таких изодублетов, имеющих непосредственное отношение к диссертационной работе, представлено на Рис. 2.

В **третьем разделе первой главы** рассматриваются различные теоретические модели, описывающие спектр Ξ_b барионов — правила сумм, учет цветового сверхтонкого взаимодействия, потенциальные модели и другие. Приводятся основные численные результаты для предсказаний значения масс резонансов Ξ_b^{*0} и Ξ_b^{*-} , которые являются предметом изучения настоящей работы. В **четвертой подглаве** обсуждается феноменология слабых и сильных распадов Ξ_b барионов; для последних проводится анализ с точки зрения

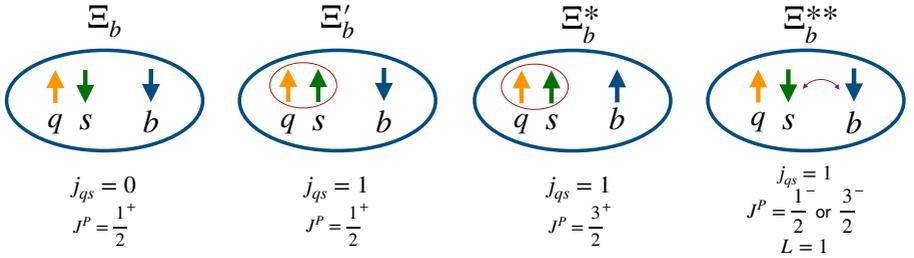


Рис. 2 — Кварковая структура и угловые моменты состояний Ξ_b , Ξ'_b , Ξ_b^* , Ξ_b^{**} (слева направо), где q кварк является u или d для Ξ_b^0 и Ξ_b^- , соответственно.

законов сохранения квантовых чисел, после чего рассматривается понятие естественной ширины сильного распада и приводятся теоретические предсказания для значений ширин резонансов Ξ_b^{*0} и Ξ_b^{*-} .

Наконец, в пятой подглаве дается обзор современного статуса Ξ_b барионов с точки зрения экспериментального изучения: обсуждаются все обнаруженные к настоящему времени резонансы и их место в спектре состояний, возможные квантовые числа. Особенно детально обсуждаются легчайшие состояния Ξ'_b , Ξ_b^* и Ξ_b^{**} (приведенные на Рис. 2), для которых приводится сравнение экспериментально обнаруженных резонансов и их распадов с приведенными в предыдущей подглаве предсказаниями с учетом их предполагаемых квантовых чисел. Из восьми этих легчайших состояний в настоящий момент обнаружено только шесть (одно из них — в рамках настоящей работы, как будет описано далее); обсуждаются возможные причины, почему барионы Ξ_b^0 и Ξ_b^{*-} , в отличие от их изоспиновых партнеров, пока что не были найдены, и делаются предсказания для их возможной массы и каналов распада по аналогиям с обнаруженными резонансами.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки CMS (Compact Muon Solenoid, т.е. «компактный мюонный соленоид») на Большом адронном коллайдере (БАК), на экспериментальных данных которой выполнена диссертационная работа. Детектор CMS является многоцелевой экспериментальной установкой, которая предназначена для детального изучения хорошо установленной Стандартной модели (в том числе — поисков и изучения бозона Хиггса, последней обнаруженной фундаментальной частицы) и поиска различных частиц, эффектов и явлений, лежащих за пределами достаточно Стандартной модели и в совокупности называемых Новой физикой. Именными особенностями детектора являются его компактность (28.7 м длины, диаметр 15 м, и вес — 14 000 тонн) по сравнению с ATLAS, а также превосходная система идентификации и измерения импульсов мюонов. Высокое качество определения импульсов обеспечивает сверхпроводящий соленоид с напряженностью магнитного поля 3.8 Тл. Схематическое изображение детектора представлено

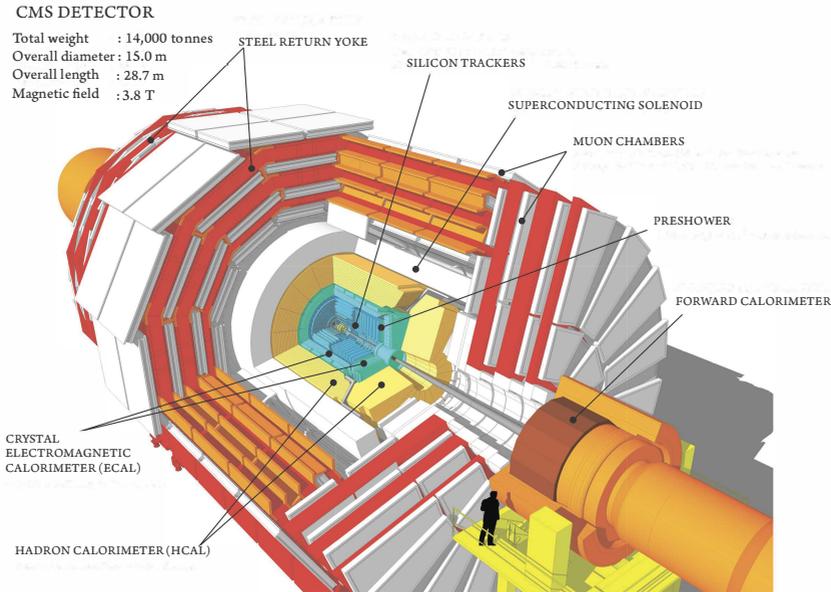


Рис. 3 — Схематический вид слоев детектора CMS.

на Рис. 3. В целом CMS выглядит как цилиндр, состоящий из множества слоев различных подсистем, закрытый в торцах другими слоями в форме дисков. Наиболее внутренним слоем является трековая система («трекер», т.е. определитель траекторий-«треков» заряженных частиц), далее идут электромагнитный и адронный калориметры, измеряющие энергии, затем — непосредственно соленоид, и за ним — мюонная система. В эксперименте CMS представляется возможным проводить изучение прелестных адронов благодаря хорошему разрешению по импульсу заряженных частиц в трековом детекторе, надежному восстановлению вершин и высокой эффективности регистрации мюонов в мюонной системе. Различные исследования можно проводить в первую очередь с восстановлением прелестных адронов по их распаду на чармоний (J/ψ или $\psi(2S)$ мезоны) плюс легкие адроны, с последующим димюонным распадом чармония.

Третья глава является основной в диссертации и посвящена анализу экспериментальных данных — спектроскопии легчайших состояний Ξ_b барионов. **В первой подглаве** описывается содержание представляемого исследования. В рамках представленной работы проведены поиск нового распада $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-$ и измерение его относительной вероятности распада относительно известного канала $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Xi^-$ с использованием следующей формулы:

$$R = \frac{B(\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-)}{B(\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Xi^-)} = \frac{N_{\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-}}{N_{\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Xi^-}} \cdot \frac{\epsilon_{\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Xi^-}}{\epsilon_{\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-}} \cdot \frac{B(J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-)}{B(\psi(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-)},$$

где N и ϵ обозначают измеренное число сигнальных событий на реальных данных pp -столкновений и полную эффективность из данных математического моделирования методом Монте-Карло, а значения вероятностей распада \mathcal{B} в последнем члене берутся из Particle Data Group (PDG).

Кроме того, в работе измеряется масса и естественная ширина Ξ_b^{*0} бариона, используя распад $\Xi_b^{*0} \rightarrow \Xi_b^- \pi^+$. Здесь Ξ_b^- барион восстанавливается посредством каналов $J/\psi \Xi^-$, $\psi(2S) \Xi^-$ и $J/\psi \Lambda K^-$. Для канала $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S) \Xi^-$ используются как мода $\psi(2S) \rightarrow \mu^+ \mu^-$, так и $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ с последующим $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$, а Ξ^- и Λ восстанавливаются так же, как и при измерении R . Для распада $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$ при аппроксимации спектра по инвариантной массе $\Xi_b^- \pi^+$ учитывается присутствие частично-восстановленной моды $J/\psi \Sigma^0 K^-$, где мягкий фотон из распада $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma$ не восстанавливается. Также измеряется отношение сечений рождения $R_{\Xi_b^{*0}}$ для Ξ_b^{*0} и Ξ_b^- барионов, используя выражение

$$R_{\Xi_b^{*0}} = \frac{\sigma(pp \rightarrow \Xi_b^{*0} X) \cdot \mathcal{B}(\Xi_b^{*0} \rightarrow \Xi_b^- \pi^+)}{\sigma(pp \rightarrow \Xi_b^- X)} = \frac{N(\Xi_b^{*0})}{N(\Xi_b^-)} \cdot \frac{\epsilon_{\Xi_b^-}}{\epsilon_{\Xi_b^{*0}}},$$

где N и ϵ обозначают те же величины, что и в уравнении выше.

Наконец, впервые проведен поиск возбужденных состояний Ξ_b^- бариона в системе $\Xi_b^{*0} \pi^-$ с последующим распадом ее на $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$, где для реконструкции Ξ_b^{*0} и Ξ_b^- используются те же каналы, что и ранее описанные, за исключением $\psi(2S) \Xi^-$.

Во втором разделе третьей главы описываются наборы реальных данных и компьютерного моделирования методом Монте-Карло, используемые в работе, в том числе обсуждаются детали генерации и наложенные на полученные наборы моделирования «генераторные фильтры» (критерии отбора при генерации).

В третьей подглаве излагается процедура реконструкции и отбора событий. Схематично основные топологии восстановленных распадов Ξ_b^- барионов изображены на Рис. 4. Процедура реконструкции начинается с отбора двух мюонов противоположного знака, значимо отделенных от первичной вершины pp -столкновений, причем инвариантная масса $\mu^+ \mu^-$ должна быть в районе массы J/ψ или $\psi(2S)$ мезонов. Далее добавляются кандидаты в Λ гиперон по его распаду $\Lambda \rightarrow p \pi^-$, формирующиеся как удаленная вершина распада с двумя исходящими треками в форме буквы V и суммарным нулевым зарядом. После этого в процедуру реконструкции добавляется еще один отрицательно заряженный трек с массовой гипотезой пиона или каона. В случае пиона его трек фитируется вместе с псевдотреком Λ в общую вершину, образуя распад Ξ^- гиперона на $\Lambda \pi^-$; далее для получения распадов $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Xi^-$ или $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S) \Xi^-$ проводится кинематический вершинный фит отобранных μ^+ , μ^- и Ξ^- кандидатов. Для $\psi(2S)$ мезона используется также канал $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ — в этом случае в вышеописанную процедуру добавляются

два трека пионов с противоположным зарядом. В случае каона при получении сигнала $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$ вместе фигурируют кандидаты μ^+ , μ^- , Λ и K^- . Для изучения Ξ_b^{*0} бариона и поиска Ξ_b^{*-} бариона посредством их распадов на $\Xi_b^- \pi^+$ и $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$, соответственно, к отобранным Ξ_b^- кандидатам добавляется один или два трека заряженных пионов, исходящие из первичной вершины. С целью улучшения детекторного разрешения по инвариантной массе $\Xi_b^- \pi^+$ и $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$, применяется специальная процедура повторного фитирования первичной вершины, а также используются переменные по разнице масс $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^+}$ и $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^+ \pi^-}$ с вычитанием разрешения по восстановленной инвариантной массе $M(\Xi_b^-)$.

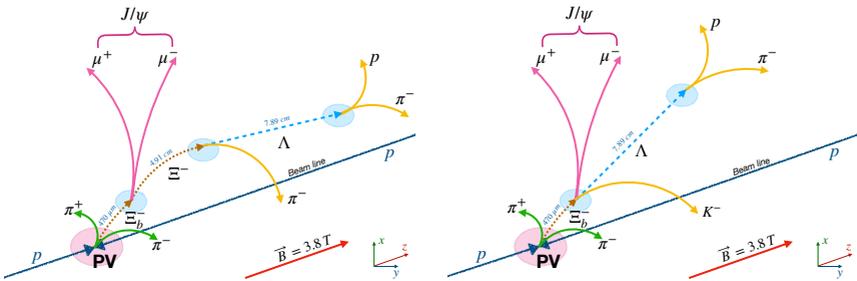


Рис. 4 — Топология распада $\Xi_b^{*-} \rightarrow \Xi_b^- \pi^+ \pi^-$, где Ξ_b^- распадается на $J/\psi \Xi^-$ (слева) or $J/\psi \Lambda K^-$ (справа). Ключевая разница топологий заключается в том, что пион из распада Ξ^- отделен от вершины Ξ_b^- , в то время как каон рождается в этой вершине.

В четвертом разделе третьей главы приводятся результаты для изучения различных сигналов Ξ_b^- бариона. Сначала сигналы восстанавливаются на сгенерированных наборах данных компьютерного моделирования, а затем и на реальных данных pp -столкновений. Как показано на Рис. 5, в работе успешно получен сигнал Ξ_b^- бариона в результате аппроксимации инвариантных масс $J/\psi \Xi^-$, $\psi(2S) \Xi^-$ и $J/\psi \Lambda K^-$ кандидатов, причем распад $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S) \Xi^-$ обнаружен впервые со статической значимостью заметно больше 5 стандартных отклонений для обоих мод распада ($\psi(2S) \rightarrow \mu^+ \mu^-$ и $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$) [2], а сигнал $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$ независимо подтверждает предыдущее обнаружение коллаборации LHCb. В инвариантной массе $J/\psi \Lambda K^-$ также присутствует сигнал от частично-восстановленного канала $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Sigma^0 K^-$, где мягкий фотон из распада $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma$ не участвует в реконструкции; этот вклад отдельно учитывается при аппроксимации с помощью формы, полученной в Монте-Карло моделировании. Для последующего изучения систем $\Xi_b^- \pi^+$ и $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$, делается отбор на массовые окно всех четырех сигналов Ξ_b^- бариона.

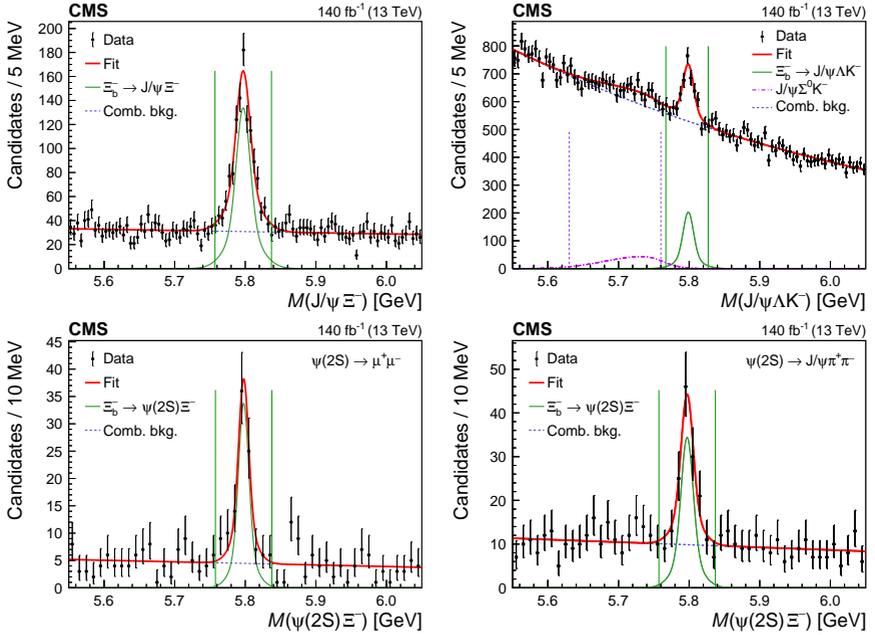


Рис. 5 — Распределение по инвариантной массе отобранных $J/\psi \Xi^-$ (слева сверху), $J/\psi \Lambda K^-$ (справа сверху) и $\psi(2S) \Xi^-$ [нижний ряд, с $\psi(2S) \rightarrow \mu^+ \mu^-$ (слева) и $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ (справа)] кандидатов [2]. Черные точки показывают данные, их вертикальные кресты отображают статистическую погрешность; результат аппроксимации показан толстой красной линией, причем тонкая зеленая линия показывает сигнал, а пунктирная синяя — комбинаторный фон. Фиолетовая штрихпунктирная линия на правом верхнем графике показывает вклад частично восстановленной компоненты $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Sigma^0 K^-$. Вертикальные сплошные зеленые или пунктирные фиолетовые линии вокруг каждого пика демонстрируют массовое окно, требуемое для Ξ_b^- кандидатов при дальнейшем изучении систем $\Xi_b^- \pi^+$ и $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$.

В пятой подглаве третьей главы описываются результаты по изучению системы $\Xi_b^- \pi^+$, т.е. отобранных Ξ_b^- кандидатов и пионов противоположного им заряда. Вблизи кинематического порога по разнице инвариантных масс $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^+}$, как показано на Рис. 6 отдельно для четырех каналов реконструкции Ξ_b^- , обнаружен явный пик, соответствующий известному сигналу Ξ_b^{*0} бариона, ранее обнаруженному экспериментами CMS и LHCb. Было проверено, что комбинаторный фон $\Xi_b^- \pi^+$ комбинаций согласуется с распределением кандидатов «неправильного знака», т.е. комбинаций $\Xi_b^- \pi^-$ (когда пион того же знака, что и Ξ_b^- барион).

Для измерения свойств Ξ_b^{*0} бариона проводится небинированная аппроксимация полученных распределений методом наибольшего правдоподобия [2]. Сигнал описывается сверткой релятивистской функции Брейта-Вигнера и

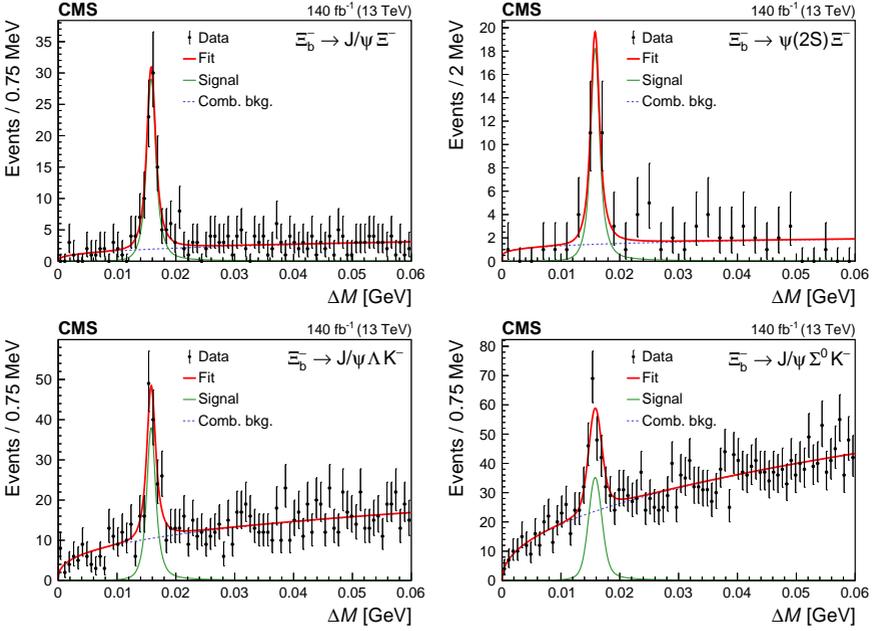


Рис. 6 — Результаты одновременной аппроксимации распределений по разнице инвариантных масс $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^\pm}$ отобранных событий $\Xi_b^- \pi^\pm$ для различных каналов восстановления $\Xi_b^- \pi^\pm$, указанных на каждом из графиков [2]. Черные точки показывают данные, их вертикальные кресты отображают статистическую погрешность; результат аппроксимации показан толстой красной линией, причем тонкая зеленая линия показывает сигнал, а пунктирная синяя — комбинаторный фон.

функции Гаусса, отвечающей за детекторное разрешение, причем параметры последней фиксированы из результатов изучения Монте-Карло моделирования. Аппроксимация производится таким образом, что параметры интереса (масса и ширина пика Ξ_b^{*0} бариона) являются общими для всех четырех каналов, в то время как число сигнальных событий, разрешение, а также описание фона — свои для каждого из распределений (simultaneous fit). В результате этой процедуры измерены разность масс и естественная ширина Ξ_b^{*0} бариона.

В шестом разделе третьей главы проводится поиск нового Ξ_b^{*-} бариона в распаде на систему $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$. Восстановлена инвариантная масса $M(\Xi_b^- \pi^+ \pi^-)$ с двумя пионами разных знаков (сигнальное распределение), а также контрольное распределение $M(\Xi_b^- \pi^\pm \pi^\pm)$, т.е. с двумя пионами одинакового знака, имеющее чисто комбинаторный характер. Вблизи кинематического порога системы $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$ в районе массы, равной 6100 МэВ, замечен избыток событий, отсутствующий в контрольном распределении $\Xi_b^- \pi^\pm \pi^\pm$; в дальнейшем этот пик интерпретируется как $\Xi_b(6100)^-$ резонанс. Согласно кварковой

модели, HQET и теоретическим предсказаниям, обсужденным в первой главе, орбитально-возбужденный Ξ_b^{*-} барион должен распадаться посредством цепочки распадов $\Xi_b(6100)^- \rightarrow \Xi_b^{*0} \pi^- \rightarrow \Xi_b^- \pi^+ \pi^-$, т.е. с участием промежуточного Ξ_b^{*0} резонанса. При изучении инвариантной массы $\Xi_b^- \pi^+$ в сигнальном диапазоне по массе $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$ (вблизи порога, т.е. $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^+ \pi^-} < 100$ МэВ), а также при изучении двумерного распределения $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^+}$ и $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^+ \pi^-}$ подтверждено присутствие промежуточного состояния Ξ_b^{*0} в сигнале $\Xi_b(6100)^-$, поэтому для дополнительного подавления комбинаторного фона накладывается ограничение на инвариантную массу $\Xi_b^- \pi^+$ в районе Ξ_b^{*0} бариона.

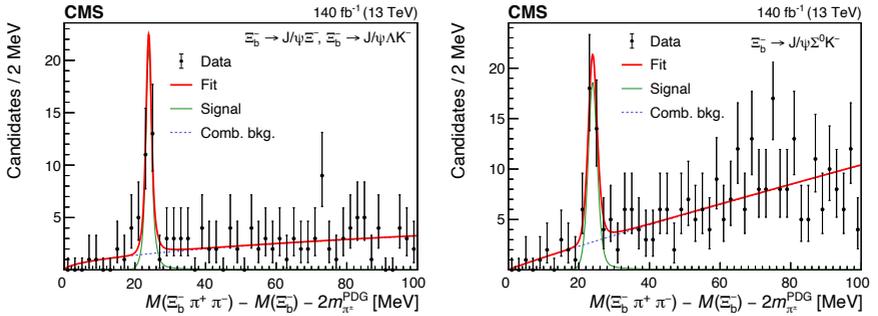


Рис. 7 — Результаты одновременной аппроксимации распределений по разнице инвариантных масс $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^+ \pi^-}$ отобранных кандидатов $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$, где Ξ_b^- барион полностью восстановлен в каналах $J/\psi \Xi^-$ и $J/\psi \Lambda K^-$ (слева) или частично восстановлен в канале $J/\psi \Sigma^0 K^-$ [1]. Черные точки показывают данные, их вертикальные кресты отображают статистическую погрешность; результат аппроксимации показан толстой красной линией, причем тонкая зеленая линия показывает сигнал, а пунктирная синяя — комбинаторный фон.

Полученные распределения по разнице инвариантных масс $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^+ \pi^-}$ приведены на Рис. 7. При изучении наборов данных компьютерного моделирования установлено, что $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$ кандидаты из полностью восстановленных каналов $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Xi^-$ и $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$ имеют почти одинаковое детекторное разрешение, в то время как у событий из частично восстановленного канала $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Sigma^0 K^-$ разрешение примерно на 30% хуже, поэтому при изучении реальных данных $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$ кандидаты сгруппированы на полностью и частично восстановленные наборы. Для описания полученных распределений, аналогично описанию Ξ_b^{*0} бариона проводится небинированная одновременная аппроксимация методом наибольшего правдоподобия, где масса и ширина сигнального пика являются общими параметрами для обоих распределений. В результате измерена разница масс $\Xi_b(6100)^-$ бариона; его естественная ширина оказалась совместимой с нулем, поэтому поставлен верхний предел на ее значение. Статистическая значимость полученного сигнала, оцененная с помощью

метода отношения функций правдоподобия, получилась более шести стандартных отклонений, что заявляет о первом обнаружении нового $\Xi_b(6100)^-$ бариона [1].

В седьмом разделе третьей главы описывается процедура подсчета эффективностей восстановления сигналов Ξ_b^- и Ξ_b^{*0} на данных компьютерного моделирования. Для аккуратного учета возможных систематических эффектов, для каждого сигнала выбран конкретный триггерный алгоритм, наиболее соответствующий топологии распада. При этом эти триггеры обладают более строгими критериями отбора, чем те, что используются в предыдущих разделах диссертации; поэтому после выбора триггерного алгоритма число кандидатов уменьшается, и аппроксимация сигналов на реальных данных проводится повторно. Далее с использованием тех же триггеров на восстановленных событиях компьютерного моделирования проводится вычисление полной эффективности реконструкции каждого из сигналов, после чего вычисляются величины R и $R_{\Xi_b^{*0}}$ в соответствии с их определениями, приведенными ранее.

В восьмой подглаве проводится оценка систематических погрешностей выполненных измерений. Для отношений R и $R_{\Xi_b^{*0}}$ по их построению, благодаря идентичным топологиям и триггерным алгоритмам в числителе и знаменателе, сокращаются многие систематические погрешности, связанные с восстановлением и идентификацией мюонов, работой триггеров, а также реконструкцией треков заряженных частиц и Λ кандидатов. Поэтому для них оценены в основном погрешности, связанные с моделью аппроксимации, выбором сигнальной и фоновой функции, а также источник, связанный с конечностью наборов Монте-Карло моделирования (приводящий к статистической ошибке в эффективности). Для измеренных значений масс и естественных ширин Ξ_b^{*0} и $\Xi_b(6100)^-$ бариона, основными источниками систематической погрешности также являются те, что связаны с моделью аппроксимации, включая моделирование релятивистской функции Брейта-Вигнера. Отдельно учтены источники выбора диапазона аппроксимации, возможного различия данных и Монте-Карло моделирования, а также сдвиг между сгенерированной и восстановленной массой в моделировании.

Наконец, **в последнем разделе третьей главы** приведены и обсуждены результаты изучения спектроскопии Ξ_b барионов. Впервые в мире обнаружен новый распад $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-$; измерена его вероятность по отношению к каналу $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Xi^-$ [2]:

$$R = \frac{\mathcal{B}(\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-)}{\mathcal{B}(\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Xi^-)} = 0.84_{-0.19}^{+0.21} \text{ (стат.)} \pm 0.10 \text{ (сист.)} \pm 0.02 \text{ (}\mathcal{B}\text{)}.$$

В работе успешно восстановлены Ξ_b^{*0} кандидаты с использованием канала $\Xi_b^{*0} \rightarrow \Xi_b^- \pi^+$, комбинируя треки из первичной вершины с Ξ_b^- кандидатами, полученными в четырех различных модах распада: $J/\psi\Xi^-$, $\psi(2S)\Xi^-$, $J/\psi\Lambda K^-$ и $J/\psi\Sigma^0 K^-$. Одновременная аппроксимация всех этих каналов использована для

измерения разницы масс и естественной ширины Ξ_b^{*0} бариона [2]:

$$M(\Xi_b^{*0}) - M(\Xi_b^-) - m^{\text{PDG}}(\pi^\pm) = 15.810 \pm 0.077 (\text{стат.}) \pm 0.052 (\text{сист.}) \text{ МэВ},$$

$$\Gamma(\Xi_b^{*0}) = 0.87_{-0.20}^{+0.22} (\text{стат.}) \pm 0.16 (\text{сист.}) \text{ МэВ}.$$

С учетом мирового среднего значения массы Ξ_b^- бариона 5797.0 \pm 0.6 МэВ, полученное в этой работе значение для $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^+}$ можно использовать для измерения массы Ξ_b^{*0} бариона [2]:

$$M(\Xi_b^{*0}) = 5952.4 \pm 0.1 (\text{stat+syst}) \pm 0.6 (m_{\Xi_b^-}) \text{ МэВ}.$$

Кроме того, измерено инклюзивное отношение сечений рождения Ξ_b^{*0} и Ξ_b^- бариона в области фазового пространства, заданной поперечным импульсом Ξ_b^- бариона $p_T > 15$ ГэВ и быстротой $|y| < 2.4$ (хотя с учетом определения эффективностей данное измерение предполагается репрезентативным во всем фазовом пространстве). Оно получилось равным [2]

$$R_{\Xi_b^{*0}} = \frac{\sigma(pp \rightarrow \Xi_b^{*0} X) \mathcal{B}(\Xi_b^{*0} \rightarrow \Xi_b^- \pi^+)}{\sigma(pp \rightarrow \Xi_b^- X)} = 0.22 \pm 0.02 (\text{стат.}) \pm 0.02 (\text{сист.}).$$

Наконец, комбинируя полученные кандидаты Ξ_b^{*0} с еще одним треком из первичной вершины, в инвариантной массе $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$ обнаружен новый резонанс — орбитально-возбужденный ($J^P = 3/2^-$) прелестно-странный барион $\Xi_b(6100)^-$. Статистическая значимость сигнала составила более 6 стандартных отклонений [1]. В результате одновременной аппроксимации полностью и частично восстановленных событий, измерена разница масс нового состояния [1]:

$$M(\Xi_b(6100)^-) - M(\Xi_b^-) - 2 m_{\pi^\pm}^{\text{PDG}} = 24.14 \pm 0.22 (\text{стат.}) \pm 0.09 (\text{сист.}) \text{ МэВ},$$

где первая погрешность является статистической, а вторая — систематической. С небольшой сигнальной статистикой и при имеющемся детекторном разрешении, естественная ширина нового резонанса оказалась совместимой с нулем, в связи с чем поставлен верхний предел $\Gamma(\Xi_b(6100)^-) < 1.9$ МэВ с 95% CL (доверительным интервалом) [1]. С использованием табличной массы Ξ_b^- , масса $\Xi_b(6100)^-$ бариона измерена равной [1]

$$M(\Xi_b(6100)^-) = 6100.3 \pm 0.2 (\text{стат.}) \pm 0.1 (\text{сист.}) \pm 0.6 (\Xi_b^-) \text{ МэВ}.$$

Измеренное значение для отношения вероятностей R находится согласуется с аналогичными отношениями для других прелестных адронов. Полученные значения для параметров Ξ_b^{*0} находятся в хорошем согласии с предыдущими результатами коллабораций CMS и LHCb; также отношение сечений $R_{\Xi_b^{*0}}$ согласуется с измерением LHCb. Впервые обнаруженный новый

$\Xi_b(6100)^-$ барион позднее был подтвержден экспериментом LHCb, а их измерение его параметров находится в согласии с диссертационной работой. Свойства этого резонанса согласуются с теоретическими предсказаниями, а многие теоретические публикации, вышедшие после обнаружения новой частицы и цитирующие этот результат, подтверждают высказанные предположения о квантовых числах и месте в спектре для этого состояния.

В **заключении** описаны основные результаты диссертации. Работа по детальному изучению спектроскопии прелестно-странных Ξ_b барионов выполнена с использованием экспериментальных данных, набранных детектором CMS на Большом адронном коллайдере в 2016–2018 годах в протон-протонных столкновениях с энергией в системе центра инерции $\sqrt{s} = 13$ ТэВ и соответствующих интегральной светимости 140 фбн^{-1} . В частности, получены следующие результаты:

- Впервые обнаружен новый распад $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-$, а также измерена его относительная вероятность относительно известного нормировочного канала $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Xi^-$.
- Восстановлен распад $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Lambda K^-$, что является подтверждением существования этого канала, ранее обнаруженного экспериментом LHCb.
- Получен сигнал Ξ_b^{*0} резонанса в распаде $\Xi_b^{*0} \rightarrow \Xi_b^- \pi^+$, где Ξ_b^- барион восстановлен через четыре различных канала: $J/\psi\Xi^-$, $\psi(2S)\Xi^-$, $J/\psi\Lambda K^-$, $J/\psi\Sigma^0 K^-$. Выполнено измерение массы и естественной ширины Ξ_b^{*0} бариона, а также измерено отношение сечений рождения Ξ_b^{*0} и Ξ_b^- барионов в протон-протонных столкновениях в доступных для CMS областях по p_T и η .
- Впервые обнаружена новая элементарная частица: возбужденный $\Xi_b(6100)^-$ барион в распаде $\Xi_b(6100)^- \rightarrow \Xi_b^{*0} \pi^- \rightarrow \Xi_b^- \pi^+ \pi^-$. Измерена масса нового резонанса, а также поставлен верхний предел на его естественную ширину. Обнаруженный $\Xi_b(6100)^-$ барион и его схема распада совместимы с гипотезой, что это легчайший орбитально-возбужденный Ξ_b^{**} барион в λ -моды, т.е. $1P$ возбуждение с угловым моментом легкого дикварка $j_{ds} = 1$ и спин-четностью $J^P = 3/2^-$ (орбитальный момент $L = 1$ между b -кварком и легким ds дикварком).

Публикации автора по теме диссертации

1. *Sirunyan Albert M et al. (CMS Collaboration)*, Observation of a new excited beauty strange baryon decaying to $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$ // *Phys. Rev. Lett.* — 2021. — Vol. 126. — P. 252003. — [arXiv:2102.04524](https://arxiv.org/abs/2102.04524).
2. *Hayrapetyan Aram et al. (CMS Collaboration)*, Observation of the $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-$ decay and studies of the $\Xi_b(5945)^0$ baryon in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // *Phys. Rev. D.* — 2024. — Vol. 110. — P. 012002. — [arXiv:2402.17738](https://arxiv.org/abs/2402.17738).
3. *К. М. Иванов*. Изучение спектроскопии Ξ_b барионов в эксперименте CMS // *Краткие сообщения по физике ФИАН.* — 2024. — Т. 51, № 8. — С. 34–42.
4. *K. Ivanov on behalf of the CMS Collaboration*. Recent B-physics results from CMS // *Proceedings of the 55th Rencontres de Moriond - 2021 Electroweak Interactions and Unified Theories, EW 2021.* — 2021. — Pp. 177–182. — URL: https://moriond.in2p3.fr/2021/download/proceedings_ew_2021.pdf.
5. *Иванов К.М.* Обнаружение нового возбужденного $\Xi_b(6100)^-$ бариона в распаде на $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$ в эксперименте CMS // *Труды 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ.* — 2022. — С. 93–95. — URL: https://old.mipt.ru/priority2030/info/64%20%D0%BD%D0%B0%D1%83%D1%87%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%20%D0%9B%D0%A4%D0%98_1.pdf.