

Минобрнауки России
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИЯФ СО РАН)
Проспект ак. Лаврентьева, д. 11, г.
Новосибирск, 630090
телефон: (383) 329-47-60, факс: (383) 330-71-63
<http://www.inp.nsk.su>, e-mail: inp@inp.nsk.su
ОКПО 03533872 ОГРН 1025403658136
ИНН/КПП 5408105577 / 540801001
от 19 ИЮН 2024 № 15311 – 39/6215.1-3392

“Утверждаю”

Директор ИЯФ СО РАН, академик

П.В. Логачев

» ноября 2024 г.



Отзыв

ведущей организации –

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН)
на диссертацию Иванова Кирилла Максимовича на тему «Спектроскопия прелестно-странных Ξ_b барионов в эксперименте CMS», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 — «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»

Диссертационная работа Иванова Кирилла Максимовича относится к актуальной и быстро развивающейся области физики элементарных частиц – спектроскопии состояний с участием тяжелых夸克ов. Несмотря на долгую историю изучения этой области в целом, более узкий вопрос исследований прелестных барионов вызвал всплеск интереса только в последнее десятилетие с началом работы Большого адресного коллайдера (БАК), где благодаря рекордным энергиям и статистике данных стали возможными поиск и детальное изучения как основных, так и возбужденных состояний этих частиц.

В диссертации представлены результаты по изучению Ξ_b барионов с использованием экспериментальных данных, набранных детектором CMS на LHC в 2016-2018 годах в протон-протонных столкновениях с энергией в системе центра инерции $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$ и соответствующих интегральной светимости 140 фбн^{-1} . В частности, обсуждается восстановление основного состояния Ξ_b^- в различных каналах распада с участием чармония, в том числе впервые обнаруженный распад в канале $\psi(2S)\Xi^-$, изучение возбужденного состояния Ξ_b^{*0} , включая измерение его массы, естественной ширины и относительного сечения рождения, а также первое обнаружение орбитально-возбужденного состояния $\Xi_b(6100)^-$.

Диссертация содержит введение, три главы, заключение и список литературы из 128 наименований.

Во **введении** приведена мотивация данного исследования, изложены недавние результаты по спектроскопии тяжёлых адронов, относящиеся к предмету данной работы, описаны цели и задачи этого исследования, обоснованы актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы, указан личный вклад соискателя, а также дана общая характеристика и описана структура диссертационной работы.

Первая глава представляет из себя весьма подробный обзор спектроскопии тяжелых барионов в целом с последующим углублением в детали именно семейства Ξ_b барионов. Рассматривается их феноменология и описание в рамках эффективной теории тяжелого кварка HQET, основные принципы и предсказания различных теоретических моделей, обсуждаются квантовые числа, использующиеся для классификации барионных состояний, а также приводится современный экспериментальный статус изучения Ξ_b барионов.

В начале **второй главы** дано краткое описание Большого адронного коллайдера. Затем описан детектор CMS, с помощью которого были получены экспериментальные данные, используемые в работе, и представлены основные подсистемы этого детектора: трековая система, электромагнитный и адронный калориметры, мюонная и триггерная системы. Основной целью эксперимента CMS было обнаружение бозона Хиггса и поиски Новой физики. Однако благодаря своей универсальности эта установка предоставляет большие возможности для исследований в широкой области физики элементарных частиц. Кроме того, в этой главе подробно обсуждаются методы реконструкции частиц для основных объектов, используемых в диссертационной работе: заряженных треков вообще и мюонов в частности, а также триггерные алгоритмы, с помощью которых проводился набор данных.

Третья глава является в работе основной и посвящена анализу экспериментальных данных. Сначала описаны эти данные и сгенерированные наборы компьютерного моделирования методом Монте-Карло, после чего приведена процедура реконструкции и критериев отбора сначала для Ξ_b^- кандидатов, а затем и для их резонансов Ξ_b^{*0} и $\Xi_b(6100)^-$ в системах $\Xi_b^- \pi^+$ и $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$, т.е. к ранее восстановленному Ξ_b^- добавляется один или два заряженных π мезона. Для поиска новых резонансов в системе $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$ выполнена оптимизация критериев отбора. Основное состояние Ξ_b^- восстанавливается в каналах $J/\psi \Xi^-$, $J/\psi LK^-$ и $\psi(2S) \Xi^-$, причем последний канал обнаружен впервые в рамках диссертации с большой статистической значимостью. Для реконструкции $\psi(2S)$ используются каналы $\mu^+ \mu^-$ и $J/\psi \pi^+ \pi^-$. Для получения сигнала Ξ_b^- проводится аппроксимация распределений по инвариантной массе, далее кандидаты внутри сигнальных массовых диапазонов комбинируются с заряженными π -мезонами. В распределении $M(J/\psi LK^-)$ присутствует частично-восстановленный сигнал $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Sigma^0 K^-$, где фотон из распада $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma$ не реконструируется, который также используется для изучения резонансов. В системе $\Xi_b^- \pi^+$ идентифицируется сигнал Ξ_b^{*0} бариона, и для измерения его параметров выполняется одновременная аппроксимация четырех каналов восстановления Ξ_b^- .

Далее показано, что в системе $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$ на массе 6100 МэВ присутствует избыток событий, причем он наблюдается только в присутствии промежуточного сигнала Ξ_b^{*0} . Из одновременной аппроксимации нескольких каналов восстановления Ξ_b^- определяется статистическая значимость сигнала, которая составляет более шести стандартных отклонений, что свидетельствует о надежном обнаружении нового резонанса. Обнаруженный резонанс интерпретируется как первое наблюдение возбужденного барионного состояния $\Xi_b(6100)^-$; для него измеряется масса и ставится верхний предел на

естественную ширину. Далее в работе обсуждается вычисление эффективностей восстановления барионных состояний на основе компьютерного моделирования. Для всех измеряемых в диссертации величин (массы, ширины, число событий для отношений) проводится идентификация основных источников систематической погрешности и оценивается ее величина. В заключительной части третьей главы автор обсуждает полученные результаты, их возможную интерпретацию и связь с другими измерениями и теоретическими моделями.

В **заключении** диссертации кратко сформулированы основные результаты, полученные в данной работе.

Научная новизна данной диссертационной работы связана с тем, что впервые в рамках эксперимента CMS проведено достаточно всестороннее изучение семейства Ξ_b барионов, в результате чего получены крайне интересные результаты: первое обнаружение нового резонанса $\Xi_b(6100)^-$ и нового канала распада $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-$. Наблюдение сигнала от распада $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi LK^-$ подтверждает существование этого канала, обнаруженного ранее в эксперименте LHCb. Кроме того, выполнено новое измерение параметров Ξ_b^{*0} бариона. С учетом того, что в настоящее время только эксперименты на комплексе LHC способны проводить изучение прелестных барионов, диссертация и выполненные в ней исследования представляются весьма актуальными для развития этой области физики элементарных частиц.

Научная и практическая значимость связана с возможностью проверки и уточнения различных теоретических моделей сильного взаимодействия в квантовой хромодинамике, описывающих свойства резонансов и распадов тяжелых частиц. Безусловно, полученные результаты окажут важное влияние на развитие спектроскопии прелестных адронов в целом и Ξ_b барионов в частности, способствуют улучшению нашего понимания принципов формирования кварков в адроны. Значимость и актуальность выполненных исследований подтверждается, в том числе, большим числом цитирований работы по обнаружению $\Xi_b(6100)^-$ различными теоретическими группами.

Личный вклад автора диссертации в представленное исследование является определяющим. Все вынесенные на защиту результаты получены автором лично и самостоятельно. Помимо непосредственной работы по анализу экспериментальных данных, автор создавал наборы данных компьютерного моделирования методом Монте-Карло и принимал участие в наборе данных на установке CMS.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Один из основных результатов — обнаружение нового возбужденного $\Xi_b(6100)^-$ бариона — в 2023 году был независимо подтвержден в эксперименте LHCb. Измеренные LHCb масса и естественная ширина резонанса согласуются с результатами диссертационной работы. Достоверность обнаружения нового канала распада $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-$ подтверждается, в том числе, согласием измеренной относительной вероятности по отношению к распаду $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Xi^-$ с аналогичными отношениями для других резонансов, содержащих b -кварк. Выполненные измерения массы, ширины и отношения сечений Ξ_b^{*0} резонанса согласуются с предыдущими результатами экспериментов CMS и LHCb.

Работа в целом выполнена на высоком уровне, изложена ясно, полно и хорошим языком. Однако, можно высказать несколько замечаний.

1. В частности, следует отметить совершенно избыточное количество поясняющих комментариев, приводимых в тексте в скобках, что, к сожалению, заметно затрудняет

чтение. Причем в некоторых случаях приводится пояснение к пояснению, как на стр. 67. Некоторые пояснения практически не несут смысловой нагрузки, как на стр. 51 «Реконструкция треков (траекторий)...», а некоторые весьма развернуты, и их уместно было бы просто вставить в основной текст отдельным предложением. На одной только стр. 52 таких пояснений 10 штук!

2. Не понятно, для чего во многих случаях в дополнение к русскоязычным терминам в скобках, видимо тоже в качестве пояснения, приводятся их английские эквиваленты, которые в самостоятельном виде дальше нигде не используются. Например coupling constant на стр. 15 или constrain на стр. 73, 75, 76 и далее. Встречается и обратная ситуация, как на стр. 47 с термином Run, для которого приводится дословный перевод «пробег». При этом, далее в качестве эквивалента используется гораздо более подходящий по смыслу термин «сессия».

3. Отсутствует единый стиль оформления таблиц. Так, таблица 1 оформлена со всеми границами, в то время как в таблице 2 отсутствуют как вертикальные, так и горизонтальные границы, в таблице 3 есть горизонтальные границы, но нет вертикальных, в таблице 4 – наоборот, в таблице 5 нет вертикальных и только нижнего горизонтального, и т.д.

4. Одновременное использование различных терминов при описании эквивалентных операций. Так при анализе распределений по инвариантной массе повсеместно используется термин «аппроксимация», а при описании процедуры кинематической реконструкции – термин «фитирование», что можно отнести к научному жаргону. Аналогичное замечание относится к перекрестным ссылкам на другие разделы диссертации – иногда используется термин «раздел», а иногда «подглава», причем порой в одном предложении. Так, на стр. 64, в восьми последовательных ссылках эти термины строго чередуются.

5. Чрезмерное использование оценочных характеристик типа «хорошее» или «крайне важно». Например на стр. 62 читаем: «... детектор CMS имеет надежную мюонную систему, хорошее разрешение треков по рт и отличное восстановление вершин...». Видимо вершины восстанавливаются еще лучше, чем треки.

6. В тексте присутствуют некорректные ссылки и, по всей видимости, пропущенные данные, которые LaTeX при компиляции заменил знаками ??, как например на стр. 49, 55 и особенно на стр 45.

Среди замечаний по существу работы можно указать следующее.

1. На стр. 46 указано: «Энергия пучка в системе центра инерции (СЦИ) достигает $\sqrt{s} = 14$ ТэВ», что неверно. Вообще, первые два параграфа раздела 2.1 на стр. 46-47 дают, формально говоря, противоречивую информацию сразу по нескольким параметрам комплекса LHC.

2. В разделе 2.3 было бы полезно добавить часть, иллюстрирующую возможности детектора CMS по восстановлению вторичных вершин. В частности, достигнутое разрешение при измерении координат вершины, его зависимость от длины пробега и т.д. Восстановление вторичных вершин является важной составляющей исследования, представленного в диссертации.

3. В разделе 2.3 достаточно подробно описываются, в том числе, возможности и ограничения системы идентификации заряженных долгоживущих частиц детектора CMS, а на стр. 73 отмечается проблема «... отсутствия идентификации частиц ...», подразумевая, видимо, невозможность идентификации типа адронов, а не заряженных треков вообще.

4. В обсуждении результатов было бы полезно рассмотреть возможные экспериментальные методы прямого измерения квантовых чисел барионных резонансов.

Перечисленные выше замечания, однако, являются, по большей части, стилистическими и никак не умаляют большую работу по анализу экспериментальных данных, проделанную автором на высоком профессиональном уровне, и не снижают общей высокой оценки диссертации, представляющей собой законченное научное исследование.

Достоверность выводов и результатов диссертации, а также их новизна и актуальность не вызывают сомнений. Основные результаты работы опубликованы в ведущих научных журналах WoS и Scopus и были представлены на российских и крупных международных научных конференциях, а также обсуждались на внутренних совещаниях эксперимента CMS. Автореферат диссертации правильно и полно отражает содержание диссертации.

Работа Иванова Кирилла Максимовича заслушана на экспериментальном семинаре ИЯФ СО РАН 8 ноября 2024 года.

Диссертационная работа Иванова Кирилла Максимовича «Спектроскопия прелестно-странных Ξ -барионов в эксперименте CMS» удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 — «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Отзыв составил доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории 3-3 ИЯФ СО РАН Гармаш Алексей Юрьевич. Отзыв на диссертацию рассмотрен и утвержден на заседании Секции физики элементарных частиц Ученого Совета ФГБУН ИЯФ СО РАН.

Доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник
лаборатории 3-3 ИЯФ СО РАН
тел. +7 (383) 329-49-30, e-mail: A.Yu.Garmash@inp.nsk.su

А.Ю. Гармаш

Ученый секретарь ИЯФ СО РАН
кандидат физико-математических наук

А.В. Резниченко

Сведения о ведущей организации,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Почтовой адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, д. 11
Телефон: +7 (383) 329-47-60
E-mail: inp@inp.nsk.su



Список основных публикаций сотрудников ведущей организации Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) по тематике диссертации Иванова Кирилла Максимовича «Спектроскопия прелестно-странных Ξ_b барионов в эксперименте CMS» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

- 1) S.X. Li, ..., A. Garmash et al. (*Belle Collaboration*), “Search for charmed baryons in the $\Lambda_c + \eta$ system and measurement of the branching fractions of $\Lambda_c(2880)^+$ and $\Lambda_c(2940)^+$ decaying to $\Lambda_c^+ \eta$ and $p D^0$ relative to $\Sigma_c(2455)\pi$ ”,
Phys. Rev. D 110 (2024) 3, 032021, doi: 10.1103/PhysRevD.110.032021
- 2) Y. Ma, ..., A. Garmash et al. (*Belle Collaboration*), “First Observation of $\Lambda\pi^+$ and $\Lambda\pi^-$ Signals near the $\bar{K}N(I = 1)$ Mass Threshold in $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda\pi^+\pi^+\pi^-$ Decay”,
Phys. Rev. Lett. 130 (2023) 15, 151903, doi: 10.1103/PhysRevLett.130.151903
- 3) L.K. Li, ..., A. Garmash et al. (*Belle Collaboration*), “Measurement of branching fractions of $\Lambda_c^+ \rightarrow p K_S^0 K_S^0$ and $\Lambda_c^+ \rightarrow p K_S^0 \eta$ at Belle”,
Phys. Rev. D 107 (2023) 3, 032004 (doi: 10.1103/PhysRevD.107.032004)
- 4) Y.B. Li, ..., A. Garmash et al. (*Belle Collaboration*), “Evidence of a New Excited Charmed Baryon Decaying to $\Sigma_c(2455)^{0,++}\pi^\pm$ ”,
Phys. Rev. Lett. 130 (2023) 3, 031901, doi: 10.1103/PhysRevLett.130.031901
- 5) T.J. Moon, ..., A. Garmash et al. (*Belle Collaboration*), “First determination of the spin and parity of the charmed-strange baryon $\Xi_c(2970)^+$ ”,
Phys. Rev. D 103 (2021) 11, L111101, doi: 10.1103/PhysRevD.103.L111101
- 6) S.B. Yang, ..., A. Garmash et al. (*Belle Collaboration*), “Observation of a threshold cusp at the $\Lambda\eta$ threshold in the $p K^-$ mass spectrum with $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$ decays”,
Phys. Rev. D 108 (2023) 3, L031104, doi: 10.1103/PhysRevD.108.L031104
- 7) L.K. Li, ..., A. Garmash et al. (*Belle Collaboration*), “Search for CP violation and measurement of branching fractions and decay asymmetry parameters for $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda h^+$ and $\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^0 h^+$ ($h = K, \pi$)”,
Sci. Bull. 68 (2023), 583-592, doi: 10.1016/j.scib.2023.02.017
- 8) Y. Li, ..., A. Garmash et al. (*Belle Collaboration*), “First search for the weak radiative decays $\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^+ \gamma$ and $\Xi_c^0 \rightarrow \Xi^- \gamma$ ”,
Phys. Rev. D 107 (2023) 3, 032001, doi: 10.1103/PhysRevD.107.032001