ОТЗЫВ

Официального оппонента Соколова Анатолия Александровича 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 К.М. Иванова посвящена исследованию спектроскопии прелестно-странных Ξ_b барионов, в частности, изучению основного состояния Ξ_b^- и его слабых распадов, резонанса Ξ_b^{*0} в системе $\Xi_b^-\pi^+$ и поиску P-волновых возбуждений в системе $\Xi_b^-\pi^+\pi^-$.

Актуальность и научная новизна темы исследования

Изучение спектроскопии прелестных частиц позволяет проверять предсказания различных теоретических моделей. В настоящее время экспериментальная информация по изучению прелестных барионов в целом и Ξ_b в частности ограничена — это связано в том числе с невозможностью образования этих частиц на e^+e^- коллайдерах, работающих на энергии в с.ц.и. в районе $\Upsilon(4S)$, $\Upsilon(5S)$ резонансов и предоставивших рекордное количество информации о B-мезонах. Эксперименты Большого адресного коллайдера (БАК), в частности на детекторе CMS, используют данные pp-столкновений с рекордной энергией и большим сечением рождения b-кварков, что делает возможным изучение в том числе прелестных барионов. Точное измерение масс и ширин Ξ_b резонансов, обнаружение новых состояний и распадов обогатит экспериментальные знания о семействе Ξ_b барионов, что позволит проверить различные теоретические предсказания и произвести настройку теоретических моделей.

Достоверность полученных результатов

Обнаруженный в представленной работе новый $\Xi_b(6100)^-$ барион (орбитальное возбуждение), был позднее также обнаружен в эксперименте LHCb с параметрами, согласующимися с измерениями диссертации. Эти параметры находятся в разумном согласии с теоретическими предсказаниями для легчайших орбитальных P-волновых возбуждений Ξ_b. Измеренное отношение вероятности впервые обнаруженного распада $\Xi_b^- \to \psi(2S)\Xi^-$ к нормировочному каналу $\Xi_b^- \to J/\psi\Xi^-$ согласуется с аналогичными отношениями для других прелестных адронов. Измеренная масса и ширина Ξ_b^{*0} бариона, а также его сечение рождения по отношению к аналогичным параметрам Ξ_b^- барион согласуются с предыдущими результатами коллабораций CMS и LHCb.

Теоретическая и практическая ценность

Результаты, представленные в диссертационной работе, играют важное значение для проверки теоретических предсказаний и настройки моделей, предсказывающих свойства прелестных барионов и объясняющих механизмы сильного взаимодействия, которые отвечают за формирование кварков в адроны. Впервые обнаруженное P -волновое возбуждение Ξ_b позволит точнее сравнить спектр легчайших изодублетов Ξ_b и Ξ_c барионов и обогатит наше понимание симметрии тяжелых барионов относительно замены тяжелого кварка, в результате чего можно значительно улучшить дальнейшие предсказания свойств прелестных барионов, опираясь на хорошо изученные очарованные аналоги. Аналогичный

интерес для теоретических моделей представляет и точное измерение параметров Ξ_b^{*0} резонанса. Обнаруженный распад $\Xi_b^- \to \psi(2S)\Xi^-$ и его относительная вероятность важны с точки зрения построения моделей HQET, которые описывают слабые распады прелестных частиц.

Оценка содержания диссертации

Диссертация является завершенной работой. Ее содержание и структура соответствуют заявленной специальности и цели исследования. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

Во **введении** изложены недавние результаты по спектроскопии тяжёлых барионов, а также дана общая характеристика диссертационной работы. Здесь обоснована актуальность работы, сформулированы цели и предмет исследования, а также описана структура диссертации.

В **первой главе** приведен обстоятельный обзор спектроскопии Ξ_b барионов. Даны основные определения, связанные с феноменологией этих частиц с точки зрения кварковой модели, $SU(N)$ симметрии и квантовых чисел. Подробно обсуждаются основные принципы работы теоретических моделей, предсказывающих массу Ξ_b барионов, описаны возможные слабые и сильные распады для различных состояний, и приведены конкретные предсказания для изучаемых в работе резонансов. Также представлен обзор предыдущих экспериментальных результатов по этой теме.

Во **второй главе** описана экспериментальная установка CMS (Компактный Мюонный Соленоид) на ускорителе БАК, с помощью которой были получены данные, используемые в работе. В частности, представлены основные поддетекторы экспериментальной установки, методы реконструкции частиц и описание работы триггерной системы, с помощью которой записывались использованные в диссертации данные.

В **третьей главе** описан анализ экспериментальных данных, на которых и проводилось изучение различных состояний Ξ_b барионов. Дано краткое содержание представляемого исследования, а также описание наборов реальных данных и алгоритмов генерации получения наборов компьютерного Монте-Карло моделирования.
Приведены методы отбора и восстановления Ξ_b^- кандидатов для нескольких каналов распада, а также методы реконструкции резонансов в системах $\Xi_b^-\pi^+$ и $\Xi_b^-\pi^+\pi^-$. Описана процедура оптимизации критериев отбора по методу Punzi, использованная для поиска сигнала в системе $\Xi_b^-\pi^+\pi^-$.
Описано исследование распределения инвариантных масс отобранных Ξ_b^- кандидатов в модах $J/\psi\Xi^-$, $J/\psi\Lambda K^-$ (включая частично-восстановленную $J/\psi\Sigma^0 K^-$ компоненту с потерянным фотоном из распада Σ^0) и $\psi(2S)\Xi^-$. Последний канал обнаружен в эксперименте впервые; для него вычислена статистическая значимость, составившая значительно больше 5 стандартных отклонений. Представлен метод измерения параметров Ξ_b^{*0} бариона с помощью одновременной аппроксимации распределений по инвариантной массе $\Xi_b^-\pi^+$ для разных каналов реконструкции Ξ_b^-. Описано исследование инвариантной массы системы $\Xi_b^-\pi^+\pi^-$ для полностью и частично-восстановленных Ξ_b^- кандидатов. Для обнаруженного вблизи порога пика $\Xi_b(6100)^-$ бариона проводится одновременная аппроксимация распределений, измеряется его масса и ставится верхний предел на естественную ширину, вычисляется статистическая значимость, получившаяся более 6 стандартных отклонений.
Вычислены отношения полных эффективностей изучаемых распадов, необходимые для вычисления отношения вероятности распадов $\Xi_b^- \to \psi(2S)\Xi^-$ к $\Xi_b^- \to J/\psi\Xi^-$ и отношения

сечений рождения Ξ_b^{*0} бариона к Ξ_b^-. Описаны систематические погрешности измеряемых величин: отношение вероятности распадов; отношение сечений рождения; массы и естественные ширины Ξ_b^{*0} и $\Xi_b(6100)^-$ барионов. Для каждого источника систематических погрешностей приведён алгоритм вычисления соответствующей погрешности.
В последней части третьей главы приведены и обсуждены основные результаты исследования: впервые обнаружен новый распад $\Xi_b^- \to \psi(2S)\Xi^-$ и измерена его вероятность по отношению к каналу $\Xi_b^- \to J/\psi\Xi^-$; измерены масса, естественная ширина и относительное сечение рождения для Ξ_b^{*0} бариона; впервые обнаружен новый $\Xi_b(6100)^-$ барион, измерена его масса и поставлен верхний предел на естественную ширину.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые выносятся на защиту.

Соответствие автореферата диссертации её содержанию

Автореферат полно и корректно отражает содержание диссертации. В автореферате обоснована актуальность темы, приведены цели работы, кратко изложено основное содержание работы, представлены результаты работы и список публикаций, содержащий основные результаты работы.

Личный вклад диссертанта

Автор принимал активное участие в работе международной физической группы коллаборации CMS по исследованиям в области B-физики. Вынесенные на защиту результаты получены автором лично, представленное исследование выполнено автором полностью. Кроме этого, автор занимался генерацией наборов наборов компьютерного Монте-Карло моделирования и участвовал в сменах по набору данных на установке CMS.

Замечания по диссертации:

1. В работе измеряется отношение сечений рождения Ξ_b^{*0} бариона к Ξ_b^-. При этом предположительно возможно выполнить также измерение отношения сечений $\Xi_b(6100)^-$ бариона и Ξ_b^- и, возможно, отношение сечений $\Xi_b(6100)^-$ и Ξ_b^{*0} бариона. Однако, по-видимому, такие измерения не предпринимались (это не обсуждается в диссертации) — не до конца понятно, почему это так. Возможно, это планируется в будущих исследованиях?

2. В качестве одного из выносимых на защиту результатов представлено восстановление распада $\Xi_b^- \to J/\psi\Lambda K^-$, что подтверждает его существование (ранее этот канал был обнаружен в эксперименте LHCb). Это упоминается при анализе экспериментальных данных и аппроксимации распределения по инвариантной массе $M(J/\psi\Lambda K^-)$ в разделе 3.4.2 на стр. 87. Однако, нигде в тексте не обсуждается статистическая значимость сигнала $\Xi_b^- \to J/\psi\Lambda K^-$. Хотя в целом качественно не вызывает сомнений, что значимость пика справа сверху на Рис. 3.8 велика и превышает 5 стандартных отклонений. Это можно было бы подкрепить количественной оценкой и указать на той же стр. 87.
Кроме того, при обнаружении или подтверждения нового распада обычно принято измерять его (в т.ч. относительную) вероятность (как, например, сделано в статье LHCb по обнаружению этого распада). В представленной же диссертации вероятность распада $\Xi_b^- \to J/\psi\Lambda K^-$ также не обсуждается.

3. В разделе 3.8.2 при обсуждении систематических погрешностей в измерении массы и ширины Ξ_b^{*0} и $\Xi_b(6100)^-$ на стр. 114-115 и в Таблице 16 присутствует погрешность, связанная с диапазоном аппроксимации, причем для Ξ_b^{*0} она является лидирующей для

ширины и второй по величине для измерения разницы масс. Это представляется несколько неожиданным, и в целом мотивация добавления такого источника систематики не до конца понятна, и полученные большие значения не комментируются в тексте.

Заключение

Отмеченные недостатки не влияют на качество исследования, а также на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты. Результаты диссертации имеют большую научную и практическую ценность и могут быть использованы при проведении других экспериментов подобного типа.
Рассмотренная диссертация является законченной научно-исследовательской работой и характеризуется высоким научным уровнем. Работы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в рецензируемых научных изданиях и являются достоверными и оригинальными.

Диссертационная работа Иванова Кирилла Максимовича «Спектроскопия прелестно-странных Ξ_b барионов в эксперименте CMS» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Считаю, что диссертационная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 — «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Официальный оппонент
Соколов Анатолий Александрович
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отделения экспериментальной физики Федерального Государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
Адрес: 142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, д.1
Телефон: 8 (916) 912 99 04
Электронный адрес: sokolov_a@ihep.ru

подпись
06.11.2024
дата

Подпись Соколова Анатолия Александровича заверяю:

Учёный секретарь Федерального Государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
Прокопенко Николай Николаевич

подпись
дата

Список основных публикаций официального оппонента доктора физико-математических наук Соколова Анатолия Александровича по теме диссертации Иванова Кирилла Максимовича «Спектроскопия прелестно-странных Ξ_b барионов в эксперименте CMS» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. J. Yelton, …A. Sokolov et al. (Belle Collaboration),
   "Study of Electromagnetic Decays of Orbitally Excited Ξ_c",
   Phys. Rev. D **102**, 071103® (2020).

2. J.Y. Lee, …A. Sokolov et al. (Belle Collaboration),
   "Measurement of Branching Fractions of $\Lambda_c^+ \to \eta\, \Lambda\, \pi^+$, $\eta\, \Sigma^0\, \pi^+$, $\Lambda(1670)\, \pi^+$, $\eta\, \Lambda\, \pi^+$, and $\eta\, \Sigma(1385)^+$",
   Phys. Rev. D **103**, 052005 (2021).

3. Y.B. Li, …A. Sokolov et al. (Belle Collaboration),
   "Measurements of the branching fractions of semileptonic decays $\Xi_c^0 \to \Xi^- \ell^+ \nu_\ell$ and asymmetry parameter of $\Xi_c^0 \to \Xi^- \pi^+$ decay",
   Phys. Rev. Lett. **127**, 121803 (2021).

4. S. Jia, …A. Sokolov et al. (Belle Collaboration),
   "Measurements of branching fractions and asymmetry parameters of $\Xi_c^0 \to \Lambda\, K^{*0}$, $\Xi_c^0 \to \Sigma^0\, K^{*0}$, and $\Xi_c^0 \to \Sigma^+\, K^{*-}$ decays at Belle",
   JHEP 2106, 160 (2021).

5. Y. Li, …A. Sokolov et al. (Belle Collaboration),
   "Evidence for the decay $\Omega_c^0 \to \pi^+\, \Omega(2012)^- \to \pi^+$(K-bar$\Xi$)$^-$",
   Phys. Rev. D **104**, 052005 (2021).

6. J. Yelton, …A. Sokolov et al. (Belle Collaboration),
   "Measurement of the masses and widths of the $\Sigma_c(2455)^+$ and $\Sigma_c(2520)^+$ baryons",
   Phys. Rev. D **104**, 052003 (2021).

7. Y. Li, …A. Sokolov et al. (Belle Collaboration),
   "Measurements of the branching fractions of decays $\Xi_c^0 \to \Lambda\, K_S^0$ / $\Sigma^0\, K_S^0$ / $\Sigma^+\, K^-$ at Belle",
   Phys. Rev. D **105**, 011103 (2022).

8. Y.B. Li, …A. Sokolov et al. (Belle Collaboration),
   "First test of Lepton Flavor Universality in the charmed baryon decays $\Omega_c^0 \to \Omega^- \ell^+ \nu_\ell$ using data of the Belle experiment",
   Phys. Rev. D **105**, 091101 (2022).

9. S.S. Tang, …A. Sokolov et al. (Belle Collaboration),
   "Measurement of the branching fraction of $\Xi_c^0 \to \Lambda_c^+ \pi^-$ at Belle",
   Phys. Rev. D **107**, 032005 (2023).

10. D. Wang, …A. Sokolov et al. (Belle Collaboration),
    "Measurement of the mass and width of the $\Lambda_c(2625)^+$ and the branching ratios of $\Lambda_c(2625)^+ \to \Sigma_c^0 \pi^+$ and $\Lambda_c(2625)^+ \to \Sigma_c^{++} \pi^-$",
    Phys. Rev. D **107**, 032008 (2023).

11. J.X. Cui, …A. Sokolov et al. (Belle Collaboration),
"Search for the semiletptonic decays $\Xi_c^0 \to \Xi^0 \ell^+ \ell^-$ at Belle",
Phys. Rev. D **109**, 052003 (2024).