

ОТЗЫВ

Официального оппонента Горелова Игоря Владимировича
на диссертацию Иванова Кирилла Максимовича

«Спектроскопия прелестно-странных Ξ_b барионов в эксперименте CMS»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика
высоких энергий»

Диссертация Кирилла Максимовича Иванова написана о фундаментальной проблеме современной физики высоких энергий, а именно о спектроскопии тяжелых кварков. В представленном исследовании представлены несколько новых, актуальных измерений основного и резонансных состояний прелестно-странного бариона Ξ_b^- . Проведен поиск и измерение нового распада частицы Ξ_b^- в моде $\Psi(2S)\Xi^-$, а также реконструирован и измерен распад $\Xi_b^- \rightarrow J/\Psi \Lambda K^-$. $1S$ -волновое $J^P = 3/2^+$ состояние прелестно-странного бариона Ξ_b^{*0} измерено в моде $\Xi_b^- \pi^+$. Впервые идентифицировано и измерено $1P$ -возбужденное, со спин-четностью $J^P = 3/2^-$, состояние Ξ_b^{*-} . Исследование проведено в коллаборации CMS, проводящей эксперимент на Большом Адронном Коллайдере (БАК). Результаты получены в анализе образца данных с рекордной интегральной светимостью $\int \mathcal{L} dt = 140 \text{ fb}^{-1}$, набранной универсальным детектором CMS в Run-2 период в течение 2016-2018 годов, при энергии \sqrt{s} протон-протонных столкновений, составляющей 13 TeV.

Адроны, содержащие тяжелый кварк, являются физической системой с хорошими условиями для изучения различных подходов КХД в непертурбативном режиме в силу непертурбативной сущности адронов, в частности тяжелых, где кварки связаны силами конфайнмента. Экспериментальные исследования массовых спектров, а также вероятностей распадов адронных состояний, содержащих прелестный кварк b , составляют набор критических проверок применяемых моделей, дающих предсказания для спектров b -адронов. Примерами непертурбативных методов КХД являются

Правила сумм КХД, Эффективная теория тяжелых кварков (HQET), алгоритмы массивных вычислений КХД на решетках.

Изучение основных и резонансных состояний прелестно-странного Ξ_b бариона с кварковым содержанием $(b s q)$ мотивировано теоретическими предсказаниями и последовавшими первыми наблюдениями коллаборацией CDF обоих изоспиновых партнеров (Ξ_b^-, Ξ_b^0) в слабых распадах, $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Xi^-, \Xi_c^0 \pi^-$ и $\Xi_b^0 \rightarrow \Xi_c^+ \pi^-$ и последующими наблюдениями и измерениями проведенными в экспериментах CMS и LHCb. Результаты в представленной диссертации, вне сомнений, являются актуальными, соответствующими переднему краю экспериментальных исследований, выполняющими тесты КХД моделей и дающие ценную информацию для теоретического и экспериментального сообщества Физики Высоких Энергий (ФВЭ).

К. М. Иванов расширил разнообразие слабых мод распада частиц Ξ_b и впервые обнаружил распад частицы Ξ_b^- через $2S$ -чармониум, $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)(\rightarrow \mu^+ \mu^-, J/\psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) \pi^+ \pi^-) \Xi^- (\rightarrow \Lambda(\rightarrow p \pi^-) \pi^-)$. Особо следует отметить успешное решение задачи реконструкции и кинематического фита распадов довольно сложной топологии, где присутствуют вершина распада коротко-живущей Ξ_b^- , одно-трековой вершины от распада каскадного гиперона Ξ^- , и V^0 вершины от распада гиперона Λ . Впервые сделанное измерение отношения вероятностей $\mathcal{B}(\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-) / \mathcal{B}(\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Xi^-)$, полученное на рекордной статистике CMS эксперимента, согласуется с теоретическими предсказаниями и дает новый вклад для разрешения проблематичного трения предсказаний с измерениями физически подобного отношения $\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda) / \mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda)$, выполненными коллаборациями ATLAS и LHCb. Наконец, сигнал частицы Ξ_b^- , восстановленный в моде $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$, подтверждает предыдущее измерение этого распада, сделанное экспериментом LHCb в первый раз.

Успешно реконструированная на большой статистике коллекция распадов основного состояния Ξ_b в модах $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Xi^-, J/\psi \Lambda K^-, J/\psi \Sigma^0 K^-$, включая статистику впервые обнаруженного распада $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S)\Xi^-$, позволяет К. М. Иванову распространить исследование на прелестно-странные резонансы Ξ_b , распадающиеся с сильным взаимодействием. А именно, был осуществлен поиск $1S$ -дублета $J^P = (1/2^+, 3/2^+)$ в моде $\Xi_b^- \pi^+$ и поиск $1P$ -дублета $J^P = (1/2^-, 3/2^-)$ в моде $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$.

Кандидаты резонансного состояния, $\Xi_b^{0*} (\rightarrow \Xi_b^- \pi^+)$ реконструируются в спектре разности масс, $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^+} = M(\Xi_b^- \pi^+) - M(\Xi_b^-) - m^{PDG}(\pi^+)$, где разрешение сигнала $\sigma_M(\Xi_b^-)$ вычитается, и разрешение разности масс определяется мягким пионом π^+ ,

исходящим из первичной вершины, где вблизи от кинематического порога рождается и распадается резонанс Ξ_b^{0*} . В спектре $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^+}$ с большой значимостью идентифицируется узкая структура, соответствующая резонансу Ξ_b^{0*} , положение и натуральная ширина которого извлекаются в результате одновременного небинированного фита структуры в спектре $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^+}$, реконструированном для каждой из четырех мод $\Xi_b^- \rightarrow J/\Psi \Xi^-, J/\Psi \Lambda K^-, J/\Psi \Sigma^0 K^-$, включая впервые обнаруженную $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S) \Xi^-$. Измеренные абсолютное значение массы и величины ширины составляют $M(\Xi_b^{0*}) = 5952.4 \pm 0.1 (syst + stat) \pm 0.6 (m_{\Xi_b^-}) MeV/c^2$ и $\Gamma(\Xi_b^{0*}) = 0.87_{-0.20}^{+0.22} (stat) \pm 0.16 (syst) MeV/c^2$. Следует подчеркнуть, что экспериментальная неопределенность новых измерений в несколько раз меньше предыдущих результатов CMS, а новые измерения массы и ширины находятся в прекрасном согласии с опубликованными в конце 2023 года данными от LHCb коллаборации. Используя данные выходов сигнала $N(\Xi_b^{0*})$, извлекаемые из фита для наиболее статистически многочисленных образцов распадов $\Xi_b^- \rightarrow J/\Psi \Xi^-, J/\Psi \Lambda K^-$, К. М. Иванов, представил измерения отношения сечений рождения

$$R_{\Xi_b^{0*}} = \frac{\sigma \cdot \mathcal{B}(\Xi_b^{0*} \rightarrow \Xi_b^- \pi^+)}{\sigma \cdot \mathcal{B}(\Xi_b^- \rightarrow J/\Psi \Xi^-, J/\Psi \Lambda K^-)} = 0.22 \pm 0.02 \pm 0.02 .$$

$R_{\Xi_b^{0*}}$ находится в хорошем согласии с таким же измерением от LHCb и имеет сравнимые неопределенности, что является замечательным фактом. Полученный результат позволяет сделать интересную оценку, а именно, $\sim 1/3$ Ξ_b^- барионов основного состояния происходит из распадов $1S$ -волновых, резонансов Ξ_b^* с квантовым числом $J^P = 3/2^+$.

Следует отметить, что всего лишь через полгода после упомянутой выше публикации LHCb, результаты первого наблюдения и измерения распада частицы $\Xi_b^- \rightarrow \psi(2S) \Xi^-$, результаты измерения резонансного состояния Ξ_b^{*0} , сделанные К. М. Ивановым, были опубликованы в статье *Phys. Rev. D 110 (2024) 012002* престижного международного научного журнала. Несомненно, эти результаты войдут в регистр PDG и внесут весомый вклад в оценки мировых средних.

Следующий поиск Ξ_b -резонансов, предпринятый К. М. Ивановым, сфокусирован на возбужденных прелестно-странных состояниях. Поиск происходит в трех спектрах разности масс, $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^+ \pi^-} = M(\Xi_b^{0*} (\rightarrow \Xi_b^- \pi^+) \pi^-) - M(\Xi_b^-) - 2 \cdot m^{PDG}(\pi^+)$, причем используются уже изученные кандидаты $\Xi_b^{0*} \rightarrow \Xi_b^- \pi^+$ в комбинации с дополнительным треком исходящим из первичной вершины, а основное состояние Ξ_b^- идентифицируется в трех наиболее статистически мощных модах $\Xi_b^- \rightarrow J/\Psi \Xi^-, J/\Psi \Lambda K^-, J/\Psi \Sigma^0 K^-$. В результате, в каждом из трех $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^+ \pi^-}$ спектров

обнаружена узкая структура. Одновременный фит трех индивидуальных разностных спектров дает положение сигнала $\Delta M_{\Xi_b^- \pi^+ \pi^-}^{fit} = (24.14 \pm 0.22 \pm 0.09) \text{ MeV}/c^2$. Значимость сигнала превышает 6 стандартных отклонений, а естественная ширина совместима с нулем. Сигнал интерпретируется как орбитальное $1P$ -возбуждение $\Xi_b(6100)^-$ со спин-четностью $J^P = 3/2^-$ и измеренной массой $M(\Xi_b(6100)^-) = 6100.3 \pm 0.2(stat) \pm 0.1(syst) \pm 0.6(\Xi_b)$. Таким образом $\Xi_b(6100)^-$ является членом легчайшего $1P$ -дублета $(1/2^-, 3/2^-)$, являющегося партнером хорошо установленного низко-лежащего $1P$ -дублета Λ_b^{*0} ($J^P = (1/2^-, 3/2^-)$) в секторе Λ_b^0 -барионов и их резонансов. Следует подчеркнуть, что сигнал $\Xi_b(6100)^-$ обнаружен К. М. Ивановым в первый раз и статистическая значимость сигнала превышает 6 стандартных отклонений. Соответственно научной новизне и важности, данное исследование опубликовано в статье престижного международного научного журнала, *Phys. Rev. Lett.* 126, 252003 (2021). Результат вошел в регистр PDG. Обнаружение нового резонанса вызвало широкий отклик в теоретическом сообществе, последовавшие вскоре публикации модельных предсказаний находятся в хорошем согласии с достигнутым экспериментальным результатом. Позже, в 2023 году, результат первого наблюдения $\Xi_b(6100)^-$, подтвержден в эксперименте LHCb со сравнимыми неопределенностями, как статистическими так и систематическими.

В целом следует отметить высокий методический уровень, примененный К. М. Ивановым в представленном исследовании. Текст диссертации удобно и логично структурирован. Особенно следует отметить прекрасный литературный стиль изложения.

Достоверность представленных в диссертации научных результатов не вызывает сомнений и подтверждается тем, что выполненные измерения согласуются с другими экспериментальными работами и теоретическими предсказаниями. Важно подчеркнуть, что личный вклад соискателя в представленной работе и публикациях коллаборации CMS является ключевым. Все результаты и измерения выполнены К.М. Ивановым лично, после чего результаты готовились к публикации в соответствии с многоступенчатой процедурой внутреннего рецензирования установленной в коллаборации CMS. Все этапы внутреннего рецензирования, также как и работа с редакциями журналов *Physical Review* были пройдены соискателем К. М. Ивановым.

По прочтении представленной диссертации имеется несколько замечаний формального характера, а именно, текст содержит некоторое количество опечаток, неточностей стиля, а также требует иногда дополнительных разъяснений деталей анализа. Замечания перечислены ниже.

На стр. 6, строка 16 (гл. «Введение») предлагается добавить также ссылку на последующую публикацию CDF, *Phys. Rev. D* 85, 092011 (2012), где были опубликованы более точные измерения резонанса $\Sigma_b^{(*)\pm}$.

На стр. 8, строка 2 (гл. «Введение») предлагается упростить выражение, следуя установившемуся стилю в ФВЭ, и поправить «Первое в мире обнаружение...» на «Первое обнаружение...». Ту же самую коррекцию можно применить для строки 18 той же страницы.

На стр. 9, строка 1-2 (гл. «Введение») предлагается заменить фразу «новое и достаточно точное измерение» на «новое точное измерение». На этой же странице, строка 4, предлагается опустить выражение «в мире».

На стр. 10, строка 21 («Достоверность...») предлагается упростить выражение и использовать выражение «... они получили результат, находящийся в прекрасном согласии с данным исследованием.».

На стр. 11, строка 8 следует исправить опечатку на «экспериментом».

На стр. 45, Табл. 5, в двух первых строчках значения измеренных масс не соответствуют публикациям и PDG, предлагается поправить и добавить ссылки на результат CDF эксперимента. Числа должны быть такими: $M_{CDF}(\Xi_b^0) = 5788.7 \pm 4.3 \pm 1.4 \text{ MeV}/c^2$ (используйте, пожалуйста, статью 2014 года), $M_{CDF}(\Xi_b^-) = 5793.4 \pm 1.8 \pm 0.7 \text{ MeV}/c^2$ (используйте, пожалуйста, статью 2014 года), $M_{D0}(\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Xi^-) = 5774 \pm 11 \pm 15 \text{ MeV}/c^2$ (2007 год).

На стр. 55, последний параграф, «В соответствии со схемой на Рис. ??» , пожалуйста, поправьте ссылку на рисунок, `\ref{<рисунок id>}`.

На стр. 68, строка 18 (параграф 2), «Дальнейшее изучение...», в описании моделируемых распадов пакетом *EVTGEN*, пожалуйста поясните, что каждый из распадов моделировался, например, равномерным распределением по фазовому объему определяемому кинематикой распада. Я предполагаю, что использовался этот подход, по крайней мере для первичных распадов Ξ_b^- , Ξ_b^{*0} , Ξ_b^{**0} . Конечно, вторичные моды, как $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$, $\Lambda \rightarrow p \pi^-$ могут распадаться в соответствие уже доступных в *EVTGEN* моделей, применение которых, однако, определяется внутренним консенсусом в CMS.

На стр. 107, строка 21-22, из предложения «...в том числе выполнение требований одного из выше обсужденных триггерных HLT путей...» не ясно, проводилась ли верификация/подтверждение на уровне выбранного по критериям *off-*

line анализа димюонного кандидата $J/\Psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ с $\mu^+\mu^-$ -комбинацией, выбранной CMS триггером, и активизировавшей выбранный в *off-line* анализе триггерный HLT путь (пути). При соблюдении этого условия, соответствующие триггерные эффективности будут максимальным образом сокращаться в числителе и знаменателе отношения R , то же самое произойдет и с систематической неопределенностью. Предлагается пояснить эту деталь. Конечно, в подсекции 3.8.1, стр. 111, строка 14-24, говорится о проверке отношения R_{B^+} используя образец $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$, однако при этом возникает систематическая неопределенность $\delta R = 5\%$.

В подсекции 3.2 отсутствует описание коррекции формы спектров бариона Ξ_b в MC данных к форме в экспериментальных данных, это замечание связано с предыдущим. Точность описания MC данными формы спектров в экспериментальных данных, является источником систематической неопределенности эффективностей. Не ясно, применялась ли какая-либо процедура взвешивания, например, MC спектров пары $(y(\Xi_b), p_T(\Xi_b))$, чтобы достичь согласия с формой тех же экспериментальных спектров. Такую проверку согласия и, если необходимо, взвешивания можно, например, провести, используя более статистически мощные образцы b - барионов, например, $\Lambda_b \rightarrow J/\psi \Lambda$ или $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K^-$ или b -мезонов в моде $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$. Предлагается пояснить эту деталь.

На стр. 117, подпись к Рис. 3.19, пожалуйста исправьте опечатку в LaTeX коде на $\mathrm{\{H_b\}}$.

На стр. 121, строка 24 (последний параграф), пожалуйста исправьте очевидную опечатку «...является ρ -возбуждением...».

Следует подчеркнуть, что приведенные выше замечания и предложения коррекций, однако, ни в коей мере не уменьшают научную ценность, важность представленного в диссертации исследования и полученных физических результатов.

В заключение, диссертация Кирилла Максимовича Иванова выполнена на высоком научном уровне, результаты диссертации опубликованы в высокорейтинговых рецензируемых международных научных журналах, таких как *Phys. Rev. Lett.* и *Phys. Rev. D*. Все публикации процитированы в базах данных Web of Science и Scopus. Результаты диссертации докладывались на различных крупных международных и всероссийских конференциях.

Автореферат полно и корректно отражает содержание диссертации, эффективно суммируя достигнутые результаты.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Кирилл Максимович Иванов заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Официальный оппонент:

Горелов Игорь Владимирович,

кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник,
Отдела Экспериментальной Физики Высоких Энергий,
Научно-исследовательского Института Ядерной Физики
имени Д. В. Скобельцына,
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Московский государственный
университет имени М. В. Ломоносова».
119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 58.
E-mail: igor.v.gorelov@gmail.com
Телефон: +7 495 939-3064



подпись

13 ноября 2024

дата

Подпись канд. физ.-мат. наук, старшего науч. сотр. ОЭФВЭ,
НИИЯФ МГУ, Горелова Игоря Владимировича заверяю:
Ученый секретарь НИИЯФ МГУ, канд. физ.-мат. наук,
Е. А. Сигаева.



подпись

дата

Список основных работ Горелова И. В.,
опубликованных в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет по теме
диссертации Иванова Кирилла Максимовича
«Спектроскопия прелестно-странных Ξ_b барионов в эксперименте CMS»

- (1) Aaij, R., Abdelmotteleb, A.S.W. et al. (LHCb collaboration), "Study of b -hadron decays to final states", *J. High Energ. Phys.* 2024, 132 (2024).
- (2) R. Aaij, et al. (LHCb collaboration), "First Observation of $\Lambda_b^0 \rightarrow \Sigma_c^{(*)++} D^{(*)-} K^-$ decays", *Phys. Rev. D* 110, L031104 (2024).
- (3) Aaij, R. et al. (LHCb collaboration), "Observation of $\Xi_b^0 \rightarrow \Xi_c^+ D_s^-$ and $\Xi_b^- \rightarrow \Xi_c^0 D_s^-$ ", *Eur. Phys. J. C* 84 (2024) 3, 237.
- (4) Aaij, R. et al. (LHCb collaboration), "Observation of New Baryons in the $\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$ and $\Xi_b^0 \pi^+ \pi^-$ Systems", *Phys. Rev. Lett.* 131, 171901 (2023).
- (5) Aaij, R. et al. (LHCb collaboration), "Measurement of the mass difference and relative production rate of the Ω_b^- and Ξ_b^- baryons", *Phys. Rev. D* 108, 052008 (2023).
- (6) Aaij, R., Abdelmotteleb, A.S.W. et al. (LHCb collaboration), "Observation of $\Lambda_b^0 \rightarrow D^+ p \pi^- \pi^-$ and $\Lambda_b^0 \rightarrow D^{*+} p \pi^- \pi^-$ ", *J. High Energ. Phys.* 2022, 153 (2022).
- (7) Aaij, R. et al. (LHCb collaboration), "Observation of Two New Excited Ξ_b^0 States decaying to $\Lambda_b^0 K^- \pi^+$ ", *Phys. Rev. Lett.* 128 (2022), 16. 162001.
- (8) R. Aaij, et al. (LHCb collaboration), "Observation of a New Ξ_b^0 state", *Phys. Rev. D* 103 (2021) 1, 012004.
- (9) R. Aaij, et al. (LHCb collaboration), "Observation of excited Ω_c^0 baryons in $\Omega_b^- \rightarrow \Xi_c^+ K^- \pi^-$ ", *Phys. Rev. D* 104 (2021) 9, L091102.
- (10) Aaij, R., Abellán Beteta, C. et al. (LHCb collaboration), "Observation of a new baryon state in $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ spectrum", *J. High Energ. Phys.* 06 (2020), 136 (2020).
- (11) Aaij, R. et al. (LHCb collaboration), "Observation of New Resonances in the $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ System", *Phys. Rev. Lett.* 123 (2019), 56, 152001.