УТВЕРЖДАЮ

Проректор
по научной работе, к.ф.-м.н.

_____ Баган Виталий Анатольевич

«___» _____октября_____ 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
(МФТИ, Физтех)

Диссертация Петрова Никиты Константиновича «**Изучение многокварковых состояний в эксперименте CMS**» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий выполнена в лаборатории физики высоких энергий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации с 2021 г. по 2025 г. соискатель **Петров Никита Константинович** работал в лаборатории физики высоких энергий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» в должности младшего научного сотрудника.

В 2021 г. Петров Н.К. окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 03.04.01 Прикладные математика и физика. В 2025 г. Петров Н.К. окончил аспирантуру МФТИ по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2025 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Чистов Руслан Николаевич. Основное место работы – лаборатория тяжелых кварков и лептонов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), высококвалифицированный старший научный сотрудник.

По итогам обсуждения диссертации «Изучение многокварковых состояний в эксперименте CMS» ***принято следующее заключение.***

Тема диссертации является актуальной для развития спектроскопии экзотических состояний и тяжелых адронов. Экспериментальное изучение свойств экзотических многокварковых состояний важно для проверки предсказаний теоретических моделей, улучшения понимания природы сильного межкваркового взаимодействия и конфайнмента. Эпоха открытия и активного исследования экзотических частиц началась в 2003 году с обнаружения чармониеподобного состояния X(3872) коллаборацией Belle. С тех пор коллаборациями BESII, BESIII, BaBar, Belle, LHCb, ATLAS и CMS было обнаружено множество экзотических состояний. Только на Большом адронном коллайдере (БАК) было открыто более двадцати новых частиц. Однако, несмотря на бурное исследование данного направления физики в течение последних 20 лет, внутренняя структура X(3872) до сих пор активно исследуется и обсуждается.

Благодаря рекордным энергиям и интегральной светимости БАКа экспериментами LHCb, CMS и ATLAS были обнаружены экзотические состояния, состоящие более чем из одного тяжелого кварка, в том числе состоящие полностью из тяжелых кварков. Данные открытия еще больше подогрели интерес научного сообщества к данной теме, а также стали триумфом теоретических предсказаний. Эксперимент CMS обладает хорошим разрешением по импульсу заряженных частиц, надежным восстановлением вершин и отличной эффективностью регистрации и идентификации мюонов, что позволяет проводить поиски и изучать экзотические частицы, используя его данные. Таким образом, исследование многокварковых состояний является горячей и бурно развивающейся темой современной физики элементарных частиц. В частности, поиск и исследование экзотических многокварковых состояний на данных эксперимента CMS представляют собой актуальную и интересную тему.

Цели и задачи диссертации:

С использованием экспериментальных данных, набранных детектором CMS на Большом адронном коллайдере в 2016-2018 годах в протон-протонных столкновениях с энергией в системе центра масс $\sqrt{s}$ = 13 ТэВ, провести поиск ранее не наблюдавшегося распада $\Lambda_b^0 \to J/\psi\Lambda\phi$ и экзотических состояний в спектре инвариантной массы $J/\psi J/\psi$, а также, в случае их наблюдения, измерить физические параметры. Для этого были решены следующие задачи:

1. Разработать процедуры реконструкции и отбора кандидатов в распады $\Lambda_b^0 \to J/\psi\Lambda\phi$ и $\Lambda_b^0 \to \psi(2S)\Lambda$, а также пар J/ψ-мезонов.

2. Исследовать сигнальные и фоновые процессы с использованием моделирования методами Монте-Карло. Определить эффективности реконструкции и отбора, а также характеристики массового разрешения в исследуемых каналах.
3. Выполнить поиск распада $\Lambda_b^0 \to J/\psi\Lambda\phi$ на данных 2018 года. В случае его наблюдения измерить отношение вероятностей исследуемого распада и нормировочного канала $\Lambda_b^0 \to \psi(2S)\Lambda$.
4. Разработать программное обеспечение для описания спектра инвариантной массы $J/\psi J/\psi$ с учётом возможной интерференции.
5. Провести поиск экзотических состояний в спектре инвариантной массы $J/\psi J/\psi$ на данных 2016-2018 годов. В случае выявления сигналов оценить их статистическую значимость и измерить массы и натуральные ширины соответствующих состояний в моделях с интерференцией и без неё.

Основные результаты диссертации:

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

Все ***результаты диссертации получены лично соискателем*** при научном руководстве кандидата физико-математических наук Чистова Р.Н.

Научная новизна работы заключается в том, что распад $\Lambda_b^0 \to J/\psi\Lambda\phi$ обнаружен впервые в мире. Данный канал является барионным аналогом хорошо изученного распада $B^+ \to J/\psi\phi K^+$, где была найдена богатая резонансная структура в спектре промежуточной инвариантной массы $J/\psi\phi$. Также впервые измерена вероятность распада $\Lambda_b^0 \to J/\psi\Lambda\phi$ относительно вероятности нормировочного канала $\Lambda_b^0 \to \psi(2S)\Lambda$.

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

Обнаружено новое экзотическое состояние X(6600) и найдено первое экспериментальное указание на существование состояния X(7100). Обе частицы распадаются на пару J/ψ-мезонов и состоят из четырёх очарованных кварков. Для каждого состояния измерены массы и натуральные ширины. Кроме того, для описания спектра инвариантной массы J/ψJ/ψ впервые предложена модель, учитывающая интерференцию между всеми тремя найденными состояниями, что позволило достичь согласия с данными без необходимости введения дополнительных структур.

Практическая и теоретическая ценность результатов диссертации заключается в том, что в ходе исследования впервые обнаружен распад Λ_b^0-бариона в конечное состояние J/ψΛϕ. Данный канал представляет большой интерес для поиска тетра и пентакварков, так как содержит промежуточные подсистемы J/ψΛ, J/ψϕ и Λϕ. Дальнейшее изучение распада $\Lambda_b^0 \to$ J/ψΛϕ на большем наборе данных позволит детально исследовать спектры двухчастичных инвариантных масс на предмет наличия экзотических структур. Также измеренное отношение вероятности распада $\Lambda_b^0 \to$ J/ψΛϕ к нормировочному каналу $\Lambda_b^0 \to$ ψ(2S)Λ может быть использовано для проверки и уточнения теоретических моделей, описывающих слабые распады прелестных адронов.

В ходе исследования спектра инвариантной массы J/ψJ/ψ, подтверждено существование экзотического состояния X(6900), впервые обнаружено состояние X(6600) с статистической значимостью, превышающей 5 стандартных отклонений, а также получено первое экспериментальное указание на существование X(7100). Для всех состояний измерены массы и натуральные ширины в гипотезах без интерференции и с интерференцией между тремя частицами. Измерение свойств данных состояний является очень важной информацией для теоретических моделей квантовой хромодинамики. Полученные результаты легли в основу публикации [4], вызвавшей значительный интерес научного сообщества: за два года с момента выхода работа была процитирована более 100 раз, что подтверждает научную значимость и актуальность представленных в диссертации исследований.

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

Обоснованность и достоверность результатов и выводов

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

Достоверность наблюдения новых экзотических частиц в спектре M(J/ψJ/ψ) подтверждается согласованностью массы и натуральной ширины X(6900), измеренных коллаборациями CMS, LHCb и ATLAS. Позже, используя данные Run-3, коллаборация CMS подтвердила существование X(6600), X(6900) и сообщила об обнаружении состояния X(7100) со статистической значимостью, превышающей 5 стандартных отклонений. Дополнительно были установлены квантовые числа найденных экзотических адронов.

Материалы диссертации опубликованы соискателем достаточно полно в следующих работах:

1. A. M Sirunyan, ..., **N. Petrov**, R. Chistov, et al. (CMS Collaboration), Observation of the $\Lambda_b^0 \to J/\psi\Lambda\phi$ decay in proton-proton collisions at $\sqrt{s}$ = 13TeV // Physics Letters B. – 2020. – Vol. 802. – P. 135203, DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135203.
2. **N. K. Petrov**, Observation of the $\Lambda_b^0 \to J/\psi\Lambda\phi$ Decay in the CMS Experiment // Bulletin of the Lebedev Physics Institute – 2021. – Vol. 48, no. 1. – Pp. 27-30, DOI: 10.3103/S1068335621010061
3. **N. Petrov** on behalf of the CMS Collaboration , New results in Λ_b^0 baryon physics at CMS // Proceedings of Science – 2021. Vol. ICHEP2020. – P. 409, DOI: 10.22323/1.390.0409
4. A. Hayrapetyan, ..., **N. Petrov**, R.Chistov, et al. (CMS Collaboration), New structures in the J/ψJ/ψ mass spectrum in proton-proton collisions at $\sqrt{s}$ = 13TeV // Phys. Rev. Lett. – 2024. – Vol. 132 – P. 111901, DOI: 10.1103/PhysRevLett.132.111901
5. **N. Petrov** on behalf of the CMS Collaboration, New resonances in J/ψJ/ψ mass spectrum at CMS // Moscow Univ. Phys. Bull. – 2024. – Vol. 79, no. 1. – Pp. 78-81, DOI: 10.3103/S0027134924701546

Личный вклад соискателя в работах с соавторами заключается в следующем: в исследовании распада $\Lambda_b^0 \to J/\psi\Lambda\phi$ [1] соискатель самостоятельно выполнил все этапы физического анализа: разработал и реализовал процедуры реконструкции и отбора кандидатов в исследуемом и нормировочном каналах, провёл моделирование методами Монте-Карло и определил отношение эффективностей. Соискатель детально исследовал экспериментальные распределения, измерил отношение вероятностей распадов $B(\Lambda_b^0 \to J/\psi\Lambda\phi)/B(\Lambda_b^0 \to \psi(2S)\Lambda)$, оценил систематические неопределённости и выполнил проверку устойчивости результата. В исследовании спектра инвариантной массы J/ψJ/ψ [4] соискатель возглавлял одну из двух групп, работавших над этой задачей, и самостоятельно реализовал полный цикл обработки и анализа данных. Его вклад включал разработку процедур реконструкции и отбора пар J/ψ-мезонов, моделирование сигнальных и фоновых процессов методами Монте-Карло, определение характеристик массового разрешения и эффективности. Соискатель разработал программное обеспечение для описания массового спектра с учётом возможной интерференции, измерил массы и натуральные ширины состояний, оценил статистическую значимость сигналов и систематические неопределённости.

Основные результаты работы докладывались соискателем на следующих научных конференциях и семинарах:

1. 62-я Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Долгопрудный, Россия, ноябрь 2019)
2. 3rd EMMI Workshop: Anti-matter, hyper-matter and exotica production at the LHC (г. Вроцлав, Польша, декабрь 2019)
3. Moscow International School of Physics 2020 (г.Вороново, Россия, март 2020)
4. ICHEP2020: 40th International Conference on High Energy Physics (г. Прага, Чехия, июль 2020)
5. Физика элементарных частиц и космология 2020 (г.Москва, Россия, ноябрь 2020)
6. 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Долгопрудный, Россия, апрель 2023)
7. Lomonosov 2023: XXI Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics (г. Москва, Россия, август 2023)

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий, в частности, пунктам:

- п. 9. Структура и распадные свойства адронов, лептонов и других элементарных частиц – эксперимент и теория.
- п. 13. Методы обработки и анализа экспериментальных данных в области физики атомных ядер и элементарных частиц и физики высоких энергий.

Диссертация «Изучение многокварковых состояний в эксперименте CMS» **Петрова Никиты Константиновича** рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности ***1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.***

Заключение принято на заседании лаборатории физики высоких энергий МФТИ, Физтех. Присутствовало на заседании 13 человек. Результаты голосования: «за» – 13 чел., «против» – нет, «воздержались» – нет, протокол № б/н от «21» октября 2026.

Ахмедов Эмиль Тофик Оглы,
д-р физ.-мат. наук,
и.о. главного научного сотрудника -
заведующего лабораторией физики
высоких энергий МФТИ, Физтех