

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 201.004.01,
созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения

«Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова

Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

по диссертации на соискание учёной степени кандидата наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 25.05.2020 № 2020-6

О присуждении **Мандрику Петру Сергеевичу**, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Поиск аномальных взаимодействий топ-кварков на адронных коллайдерах» по специальности 01.04.23 — физика высоких энергий принята к защите 30.01.2020, протокол № 2020-1 диссертационным советом Д 201.004.01, на базе Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 142281, пл. Науки, д. 1, г. Протвино Московской области, приказ Минобрнауки РФ № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Мандрик Пётр Сергеевич, 1991 года рождения, в 2019-м году окончил аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», работает младшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Диссертация выполнена в Отделении экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Научный руководитель — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отделения экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, Слабоспицкий Сергей Ростиславович.

Официальные оппоненты:

Сергей Павлович Баранов, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Физического института им. П.Н. Лебедева РАН;

Лидия Николаевна Смирнова доктор физико-математических наук, профессор МГУ имени М.В. Ломоносова;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация — Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, в своём положительном отзыве, подписанном Д. В. Пешехоновым, кандидатом физико-математических наук, учёным секретарём Лаборатории физики высоких энергий Объединённого института ядерных исследований, В. А. Никитиным, доктором физико-математических наук, профессором, руководителем общелабораторного семинара ЛФВЭ ОИЯИ, В. Д. Кекелидзе, доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН, директором ЛФВЭ ОИЯИ, указала, что по своей актуальности, новизне полученных результатов и важности выводов, диссертация Мандрика П.С. «Поиск аномальных взаимодействий топ-кварков на адронных коллайдерах» соответствует всем критериям на соискание учёной степени кандидата наук, установленном в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 №842 с дополнениями от 21 апреля 2016 г. №335. Мандрик Пётр Сергеевич полностью заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 — физика высоких энергий.

Соискатель имеет 10 работ по теме диссертации, в том числе 4 работы, опубликованных в рецензируемых научных изданиях:

1. P. Azzi, ..., P. Mandrik *et al.*, «Report from Working Group 1: Standard Model Physics at the HL-LHC and HE-LHC», CERN Yellow Rep. Monogr. 7, 1 (2019), doi:10.23731/CYRM-2019-007.1, arXiv:1902.04070 [hep-ph];
2. A. Cerri, ..., P. Mandrik *et al.*, «Report from Working Group 4: Opportunities in Flavour Physics at the HL-LHC and HE-LHC», CERN Yellow Rep. Monogr. 7, 867 (2019), doi:10.23731/CYRM-2019-007.867, arXiv:1812.07638 [hep-ph];
3. A. Abada, ..., P. Mandrik *et al.* [FCC Collaboration], «FCC Physics Opportunities: Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 1», Eur. Phys. J. C 79, no. 6, 474 (2019), doi:10.1140/epjc/s10052-019-6904-3;
4. P. Mandrik [FCC study Group], «Prospect for top quark FCNC searches at the FCC-hh», J. Phys. Conf. Ser. 1390, no. 1, 012044 (2019), doi:10.1088/1742-6596/1390/1/012044,[arXiv:1812.00902 [hep-ex]];
5. P. Mandrik [CMS Collaboration], «Top FCNC searches at HL-LHC with the CMS experiment», EPJ Web Conf. 191, 02009 (2018), doi:10.1051/epjconf/201819102009, [arXiv:1808.09915 [hep-ex]];

6. P. S. Mandrik, «Methods of statistical analysis in collider experiments by incorporating different types of systematic and statistical uncertainties», Phys. Part. Nucl. **49**, no. 1, 73 (2018), Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra **49**, no. 1 (2018), doi:10.1134/S1063779618010288;
7. P. Mandrik, «The evaluation of the systematic uncertainties for the finite MC samples in the presence of negative weights», EPJ Web Conf. **158**, 06005 (2017), doi:10.1051/epjconf/201715806005, arXiv:1708.07708 [physics.data-an];
8. P. Azzi, ..., P. Mandrik *et al.* [CMS Collaboration], «The Phase-2 Upgrade of the CMS Endcap Calorimeter», CERN-LHCC-2017-023, CMS-TDR-019;
9. P. Azzi, ..., P. Mandrik, ..., et al., [ATLAS and CMS Collaborations], «Addendum to the report on the physics at the HL-LHC, and perspectives for the HE-LHC: Collection of notes from ATLAS and CMS», CERN Yellow Rep. Monogr. 7, Addendum (2019)
10. E. Boos, L. Dudko, P. Mandrik, S. Slabospitskii, «Top Quark: Results and Prospects», Phys. Part. Nucl. **50**, no. 3, 231 (2019), Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra **50**, no. 3 (2019), doi:10.1134/S106377961903002X;

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

- 1) оппонента Сергея Павловича Баранова, который сделал следующие замечания к диссертационной работе:
 - 1) Имеется опечатка в формуле (1.4): выражение $2W$ следует читать как $2cW$.
 - 2) на рис. 3.4: в главе обсуждается кварк-фотонные вершины типа $tq\gamma$, но на рисунках же обозначены кварк-глюонные вершины tsg и tug .
 - 3) Имеется опечатка в Таблице 5.2 в размерности светимости: fb^{-1}
- 2) оппонента Лидии Николаевны Смирновой, которая сделала следующие замечания к диссертационной работе:
 - 1) на стр. 19 при описании критериев отбора полуплептонных каналов распада топ-кварков не упомянуты две струи от адронного распада W бозона;
 - 2) рисунок 1.3 на стр. 20 содержит существенно неполные данные измерений сечений одиночного рождения топ-кварка;
 - 3) нет пояснения для реакции в нижней строке таблицы 1.2 на стр. 21, использованного обозначения l' ;
 - 4) на стр. 38 выпали номера разделов 2.4-2.6 при описании структуры главы 2;
 - 5) на стр. 79 приведена неизвестная реакция распада $H \rightarrow \gamma \bar{\nu}$
 - 6) нет определения переменных τ , используемых для анализа многоструйных объектов с помощью пакета TMVA.

Во всех поступивших отзывах дана общая положительная оценка на диссертацию, а также указано, что соискатель заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 — физика высоких энергий.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что Сергей Павлович Баранов и Лидия Николаевна Смирнова являются известными российскими учеными, активно работающими в области физики высоких энергий и обладающими высочайшим уровнем экспертизы в вопросах, на которых сосредоточена диссертация. Выбор ведущей организации обосновывается тем, что Объединённый институт ядерных исследований является лидирующим международным центром в области экспериментальной и теоретической физики высоких энергий и атомного ядра и обладает исключительной компетенцией по теме диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- впервые получены ожидаемые верхние ограничения на уровне достоверности 95% для величин $B(t \rightarrow u\gamma) < 0.9 \times 10^{-5}$ и $B(t \rightarrow c\gamma) < 7.4 \times 10^{-5}$ для реалистичных условий детектора CMS Phase II Upgrade при интегральной светимости 3000 фб^{-1} и энергии $\sqrt{s} = 14 \text{ ТэВ}$ ускорителя HL-LHC;
- впервые получены ожидаемые верхние ограничения на уровне достоверности 95% для величин $B(t \rightarrow ug) < 3.8 \times 10^{-6}$ и $B(t \rightarrow cg) < 32.1 \times 10^{-6}$ для реалистичных условий детектора CMS Phase II Upgrade при интегральной светимости 3000 фб^{-1} и энергии $\sqrt{s} = 14 \text{ ТэВ}$ ускорителя HL-LHC;
- впервые получены ожидаемые верхние ограничения на уровне достоверности 95% для величин $B(t \rightarrow u\gamma) < 1.8 \times 10^{-7}$ и $B(t \rightarrow c\gamma) < 2.4 \times 10^{-7}$ для реалистичных экспериментальных условий интегральной светимости 30000 фб^{-1} и энергии протон-протонных соударений $\sqrt{s} = 100 \text{ ТэВ}$ ускорителя FCC-hh;
- впервые получены ожидаемые верхние ограничения на уровне достоверности 95% для величин: $B(t \rightarrow uH) < 4.8 \times 10^{-5}$ и $B(t \rightarrow cH) < 4.3 \times 10^{-5}$ для реалистичных экспериментальных условий интегральной светимости 30000 фб^{-1} и энергии протон-протонных соударений $\sqrt{s} = 100 \text{ ТэВ}$ ускорителя FCC-hh;

- разработан алгоритм построения функции правдоподобия с учётом систематической ошибки, связанной с конечностью статистики Монте-Карло для случая наличия событий с отрицательными генераторными весами.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что рассматриваемы в работе нейтральные токи, меняющие аромат кварков, представляют собой одну из областей поиска новой физики, где существование неучтённых в Стандартной Модели взаимодействий могло бы проявиться наиболее заметным образом. проведения статистического анализа. Нейтральные токи, меняющие аромат кварков, являлись и остаются одним из важных направлений проведения исследований в области физики t -кварка в экспериментах ATLAS и CMS на основе данных, полученных в течении периодов работы Run I и Run II ускорителя LHC. Данный интерес обусловлен сложившейся по итогам работы LHC ситуацией отсутствия определённого выделенного направления для поиска проявлений физики за пределами Стандартной модели, при которой различные альтернативные модели, в том числе и предсказывающие усиление сигнала нейтральных токов, меняющих аромат кварков, являются в равной степени перспективными. В настоящий момент доказательств наличия отклонения величины вероятности распада t -кварка через нейтральные токи со сменой аромата от предсказываемой Стандартной моделью не обнаружено. Дальнейшие перспективы поиска аномальных распадов связывают с будущими экспериментами на проектируемых в данный момент коллайдерах, таких как HL-LHC и FCC-hh.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что поиск нейтральных токов, меняющих аромат кварков, в секторе t -кварка является одним из пунктов программы физических исследований в экспериментах на проектируемых будущих ускорителях, таких как HL-LHC, HE-LHC, FCC-hh, FCC-ee, ILC, CLIC, CepC, SppS. Принятие окончательного решения об одобрении и выделении финансирования на разрабатываемый проект ускорителя зависит от многих факторов, в том числе и от достигаемой при проектировании чувствительности экспериментов к поиску проявлений новой физики, от широты физической программы и заинтересованности научного сообщества в проведении анализов физических данных и получении результатов. Нахождение данной чувствительности и оценка возможностей, заложенных в детектор, являются важной задачей, требующей проведения процедуры физического анализа, во многом аналогичной таковой для реальных данных. Также проведение анализов на основе Монте-Карло моделирования детекторов позволяет на раннем этапе обнаружить возможные ошибки, допущенные при проектировании эксперимента, предоставить материал, анализ которого позволит произвести улучшения, начиная от

компоновки и размещения детектирующих приборов до оптимизации алгоритмов реконструкции

объектов и программного обеспечения в целом. В представленной диссертации впервые изучается влияние на эффективность анализа таких факторов, как значительный рост (в сравнении с экспериментами на LHC в течение периодов работы Run I и Run II) числа сопутствующих взаимодействий, рост сечений и светимости ускорителей, увеличения числа событий, имеющих “ускоренную” топологию. Результаты, включённые в диссертацию, решают проблему нахождения чувствительности экспериментов на HL-LHC к поиску распадов $t \rightarrow qg$ и $t \rightarrow q\gamma$ ($q = u$ или c) и проблему нахождения чувствительности экспериментов на FCC-hh к поиску распадов $t \rightarrow c\gamma$ и $t \rightarrow qH$ ($q = u$ или c). Приведённые в работе анализы событий и списки выбранных переменных, используемых при многомерном анализе, при “тренировке” классификаторов, могут быть использованы в последующих анализах физических данных. Сравнение функциональности пакетов для статистического анализа было мотивировано необходимостью выбора наилучшим образом отвечающего потребностям проведения Байесовского статистического анализа и может быть использовано другими группами, занимающимися поиском проявлений новой физики. Приведённый в работе метод учёта систематической ошибки, связанной с конечностью статистики Монте-Карло, может быть применён при проведении статистических анализов, использующих наборы Монте-Карло событий, содержащие отрицательные веса. Решение об использовании данного метода зависит от условий рассматриваемой задачи и таких факторов как статистическая обеспеченность Монте-Карло наборов, доли событий с отрицательными весами, величин вклада прочих систематических ошибок.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: исследование аномальных FCNC взаимодействий топ-кварка в вершинах tqg и $tq\gamma$ при реалистичных условиях работы детектора при интегральной светимости 3000 fb^{-1} и энергии $\sqrt{s} = 14 \text{ ТэВ}$ ускорителя HL-LHC были выполнены в рамках научной программы CMS Phase II Upgrade модернизации эксперимента CMS. Результаты соискателя были получены на основе официального Монте-Карло моделирования физических процессов и отклика детектора коллаборации CMS. Основные результаты включены в коллаборационные публикации, проходящие многоступенчатую проверку внутри коллаборации, что обеспечивает надежность опубликованных результатов. Результаты диссертации были утверждены коллаборацией CMS, имеющей значительный опыт успешного выполнения подобных работ. Исследование аномальных FCNC

взаимодействий топ-кварка в вершинах $tq\bar{q}$ и tqH для реалистичных экспериментальных условий интегральной светимости 30000 fb^{-1} и энергии протон-протонных соударений $\sqrt{s} = 100 \text{ ТэВ}$ ускорителя FCC-hh выполнены в рамках работы в составе коллаборации FCC, результаты, включённые в диссертацию, были одобрены внутри коллаборации. Результаты диссертации докладывались автором устно на международных конференциях: "Международная сессия-конференция Секции ядерной физики Отделения физических наук РАН" (Дубна – 2016 г.); "International work shop on Quantum Field Theory and High Energy Physics" – QFTHEP (Ярославль - 2017 г.); "International seminar on High Energy Physics" – QUARKS" (Валдай - 2018 г.); "IV International conference on Particle Physics and Astrophysics" ICPPA (Москва - 2018 г.); представлялись в качестве постера на конференции "The 2017 European School of High Energy Physics" (Evora, Portugal 2017); а также включались в доклады, представленные другими членами коллаборации CMS: by C.Helsens, at "XXXIX International conference on High Energy Physics" ICHEP (Seoul, Korea - 2018); by G.Vorotnikov and M.Perfilov, at "5th CMS Single Top workshop" (Oviedo - 2018).

Личный вклад соискателя состоит в том, что для задачи изучения чувствительности детектора CMS Phase II Upgrade ускорителя HL-LHC к процессам ассоциативного рождения t -кварка и фотона через нейтральный ток, меняющий аромат, на основе Монте-Карло моделирования проектируемого детектора, автор лично проводил статистический анализ, а также участвовал в подготовке программного обеспечения для этапа первичного отбора данных в системе GRID, в написании текста статьи и защите результатов в коллаборации CMS. Для задачи изучения чувствительности детектора CMS Phase II Upgrade ускорителя HL-LHC к процессам ассоциативного рождения t -кварка и струи через нейтральный ток в вершине $tq\bar{q}$ ($q = u$ или c), меняющий аромат кварка, на основе Монте-Карло моделирования проектируемого детектора, автор лично производил статистический анализ, подготовил соответствующее программное обеспечение и произвёл первичный отбор данных в системе GRID. Также автором внесён вклад в адаптацию существующего программного обеспечения для нужд анализа, в написание текста статьи и в защиту результатов в коллаборации CMS. Для задачи изучения чувствительности проектируемого "тестового" детектора ускорителя FCC-hh к событиям парного рождения $t\bar{t}$ с распадом t -кварка по каналам $t \rightarrow \gamma q$, $t \rightarrow Hq$, ($H \rightarrow b\bar{b}$, $q = u$ или c) через нейтральные токи со сменой аромата кварка на основе Монте-Карло моделирования детектора с использованием при проведении анализов "ускоренной" топологии сигнальных событий автор лично производил Монте-Карло генерацию сигнальных и ряда фоновых процессов, отбор и анализ событий,

многомерный анализ, статистический анализ. Также автор внёс вклад в подготовке текста коллаборационной статьи, включающей полученные результаты. Диссертант является единственным автором работы, посвящённой алгоритму построения функции правдоподобия с учётом систематической ошибки, связанной с конечностью статистики Монте-Карло для случая наличия событий с отрицательными генераторными весами и его программной реализации.

На заседании 25 июня 2020 г. диссертационный совет принял решение присудить Мандрику П.С. ученую степень кандидата физико-математических наук.

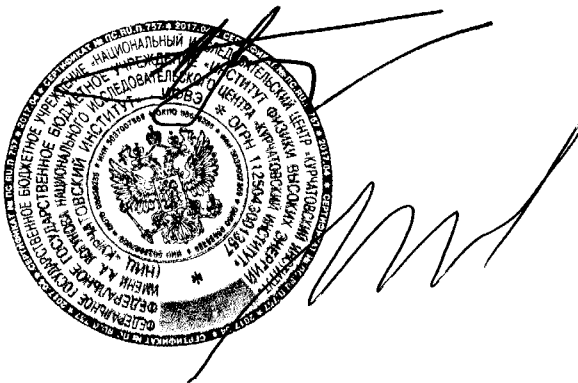
При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 6 докторов наук по научной специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 19, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель
диссертационного совета

Тюрин Н.Е.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Рябов Ю.Г.



25 июня 2020 г.