

УТВЕРЖДАЮ

Вице-директор Объединенного  
института ядерных исследований  
доктор физ.-мат. наук



*М. Г. Иткис* М. Г. Иткис

*20* " *марта* 2020 г

## ОТЗЫВ

ведущей организации — Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна на диссертационную работу Мандрика Петра Сергеевича «**ПОИСК АНОМАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ТОП-КВАРКОВ НА АДРОННЫХ КОЛЛАЙДЕРАХ**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 — физика высоких энергий

Диссертационная работа Мандрика П. С. посвящена актуальной проблеме поиска физики за рамками Стандартной модели (СМ), а именно, исследованию возможности обнаружения редких распадов топ-кварка, протекающих посредством обмена нейтральными токами, в планируемых экспериментах на Большом адронном коллайдере в режиме высокой светимости (HL-LHC) и Будущем кольцевом коллайдере в адронной моде (FCC-hh).

В настоящее время в физике высоких энергий, особенно, понимаемой в контексте ускорительного эксперимента, сложилась интригующая и весьма озадачивающая ситуация. По окончании второго цикла работы ускорителя LHC (RUN1 и RUN2) мы по-прежнему не обнаружили ни сигналов новой физики за рамками стандартной модели взаимодействий элементарных частиц, ни даже указаний на подобные сигналы. Ни одно из основных направлений выхода за пределы СМ, еще десять лет назад представлявшихся перспективными и годными для изучения вариантами «теоретического канона», будь то суперсимметрия, модели с дополнительными пространственными измерениями или теории с расширенными группами симметрии, так и не реализовалось в реальности. В результате, экспериментальная физика, обычно направляемая теоретической мыслью, в какой-то степени оказалась лишенной ориентиров. В то же время, достижимая на LHC энергия взаимодействий и точность измерений все еще не позволяют «закрывать до конца», т. е. достоверно отвергнуть, хотя бы один из изучаемых классов моделей новой физики. Поэтому и в период третьего цикла LHC (RUN3) в 2021–2024 гг., и впоследствии, в режиме HL-LHC и на новом планируемом ускорителе FCC, поставленные ранее исследовательские задачи все еще останутся актуальными, даже несмотря на текущую ситуацию с отсутствием результатов. В этой связи особенный интерес и важность приобретают экспериментальные сигнатуры, до того имевшие меньший приоритет. Среди них, в том числе, явления, обусловленные процессами, идущими через обмен нейтральными токами с нарушением аромата (FCNC). Как известно, СМ запрещает FCNC на древесном уровне по построению, однако меняющие аромат процессы все же могут быть обусловлены петлевыми поправками (их вклады очень сильно подавлены на уровне, не позволяющем их зарегистрировать на ускорителях в настоящем времени и в обозримом будущем). Однако ряд теоретических конструкций, содержащих новую физику за рамками СМ, может увеличивать вероятность процессов с FCNC либо за счет вкладов новых частиц в петлевые диаграммы (сохраняющие R-четность варианты



суперсимметрии, включая наиболее простую конструкцию – МССМ, сохраняющие аромат модели с расширенным хиггсовским сектором, включая минимальные FC 2HDM, и ряд других), либо непосредственно из-за присутствия в теории FCNC на древесном уровне (RPV SUSY, FV 2HDM и пр.). Исследуемые в диссертационной работе процессы рождения и распада топ-кварка в различных каналах с FCNC являются одним из чувствительных маркеров наличия или отсутствия новой физики, характерной для упомянутых типов моделей. Топ-кварк как объект особенно удобен потому, что позволяет связать априори неизвестный в эксперименте возможный вклад новой физики со свойствами уже хорошо измеренной и хорошо изученной частицы, то есть свести теоретическую неопределенность в вершине взаимодействия только к одной неизвестной частице. Распад топ-кварка, идущий через нестандартную вершину и обмен новой неизвестной частицей, на другие частицы SM, которые могут быть полностью реконструированы, позволяет сильно понизить различные связанные с процессом неопределенности. В частности, для несохраняющих аромат двухдублетных моделей хиггсовского сектора регистрация распада топ-кварка с обменом хиггсовским состоянием из расширенного сектора позволила бы установить характеристики этого нового хиггсовского состояния. Аналогичная логика экспериментального анализа, с привязкой нового вклада к частице с хорошо изученными свойствами, применяется, например, при изучении нестандартных распадов и/или каналов рождения открытого хиггсовского бозона. Таким образом, направление исследований, подход и методика, выбранные автором диссертационной работы, **являются очень важными и актуальными** для современного физического анализа на LHC, и эти разработки могут быть непосредственно перенесены на будущие ускорители. Как уже говорилось, существующие в настоящий момент верхние ограничения на процессы с FCNC в каналах рождения и распада топ-кварка (одиночного или пары топ-антиотоп), а также в других каналах, имеющих хороший исследовательский потенциал, пока не позволяют наложить существенные ограничения на пространство параметров изучаемых моделей новой физики, поскольку достижимая экспериментальная точность во всех случаях все еще на несколько порядков ниже требуемой. Поэтому наши надежды связаны с будущими ускорителями, которые позволят нам продвинуться дальше по точности измерений. В этом свете работа, нацеленная на изучение потенциала этих ускорителей в контексте проблемы FCNC (являющейся, наряду с другими, одним из важнейших пунктов в моделях новой физики), имеет безусловную научную ценность и значимость.

Попытки обнаружить подобные процессы предпринимались ранее в экспериментах на ускорительном комплексе Tevatron, а также в экспериментах на сталкивающихся протонных пучках LHC во время RUN1 и RUN2 соответственно при энергии 8 и 13 ТэВ в с.ц.м. Продемонстрировав отсутствие значимого сигнала, накопленные данные позволили установить ограничения на вероятности процессов с нейтральными токами на уровне значений, гораздо больших, чем предсказывается как в SM ( $10^{-12}$ – $10^{-17}$ ), так и в рамках различных модельных предположений. По сравнению с RUN1 и RUN2 на HL-LHC ожидается увеличение объема данных более чем в 20 раз, а на FCC-hh — более чем в 2000 раз при увеличении энергии более чем в 7 раз. Это позволяет надеяться на существенное увеличение чувствительности поисковых экспериментов.

В данной работе для изучения чувствительности планируемых экспериментальных комплексов к различным процессам с FCNC были выбраны конфигурации модернизированной установки CMS для работы во время второй фазы LHC (CMS Phase II Upgrade) и проектируемого детектора коллайдера FCC-hh. С данной точки зрения диссертационная работа представляет несомненную **практическую ценность**, так как разработанные в ней методы анализа данных и полученные результаты будут востребованы при формировании программы физических исследований планируемых экспериментальных комплексов и при выборе концепции конкретных детекторных систем.



Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Список литературы включает 116 наименований.

Постановка проблемы изложена во введении.

Первая глава содержит обзор результатов предыдущих экспериментов по поиску процессов с FCNC, в частности, результатов не сохраняющих аромат взаимодействий топ-кварка, а также приводится краткое описание планируемых экспериментальных установок на HL-LHC и FCC-hh.

Стратегия поискового анализа, используемая в работе, рассмотрена во второй главе: описаны способы моделирования сигнальных и фоновых событий, используемых в представленном анализе, а также моделирования отклика детекторных систем, обсуждены условия отбора и реконструкции физических объектов, проводится сравнение методов статистического анализа данных и интерпретации результатов.

В третьей главе проводится анализ возможности наблюдения на HL-LHC процесса обмена нейтральным током со сменой аромата в вершине  $tq\gamma$ . На основе анализа данных Монте Карло были получены верхние ограничения на вероятности распада  $t \rightarrow u\gamma$  и  $t \rightarrow c\gamma$  для двух сценариев набора данных — одного года фазы 2 LHC ( $300 \text{ фб}^{-1}$ ) и полной ожидаемой статистики фазы 2 ( $3000 \text{ фб}^{-1}$ ).

В четвертой главе проводится анализ возможности наблюдения на HL-LHC процесса обмена нейтральным током со сменой аромата в вершине  $tq\gamma$ . На основе анализа данных Монте Карло были получены верхние ограничения на вероятности распада  $t \rightarrow qg$ , также для двух сценариев набора данных.

В пятой главе проводится анализ возможности наблюдения на FCC-hh процесса обмена нейтральным током со сменой аромата в вершине  $tq\gamma$  и  $tqH$  для значений интегральной светимости  $3000 \text{ фб}^{-1}$  и  $30000 \text{ фб}^{-1}$ . Продемонстрировано, что для вершин  $tq\gamma$  и  $tqH$  по сравнению с LHC условия FCC-hh позволяют улучшить верхние ограничения на вероятности распада примерно на один-два порядка. Для вершины  $tq\gamma$  улучшение не такое значимое (примерно в полтора раза).

В заключении диссертации сформулированы основные выводы и выдвигаемые на защиту положения.

Характеризуя диссертацию в целом, можно сказать, что в ней проведено исследование в актуальной области современной физики высоких энергий, представляющее интерес как для развития теоретических моделей в рассматриваемой области новой физики, так и для анализа современных экспериментальных данных. Качество и объем проведенных работ, использованные в диссертации статистические методы характеризуют соискателя как сложившегося исследователя высокого уровня.

Диссертация хорошо структурирована, содержит обширный графический материал. Основные результаты сведены в наглядные таблицы.

По существу работы можно высказать следующие основные вопросы и замечания:

1. При обсуждении экспериментальных ограничений на процессы с FCNC из физики тяжелых ароматов и указанных в таблице 1.4 (стр. 27) ограничений нигде не отмечается, что эти ограничения верны только в предположении стандартной интенсивности связи хиггсовских бозонов с фермионами разных поколений. В отсутствие же таких предположений (как, например, для FV 2HDM) эти ограничения значительно ослабевают, вплоть до полного исчезновения.
2. При перечислении коллайдерных ограничений на рождение и распад топ-кварка через FCNC в качестве результатов, полученных коллаборацией CMS, почему-то приведены работы, выполненные, в основном, на основании данных RUN1 при энергии 8 ТэВ, тогда как уже больше года существуют официальные публикации коллаборации по данным RUN2 при 13 ТэВ (довольно существенно меняющие предыдущие ограничения). Это же касается ограничений, демонстрируемых на рис. 1.8 (стр. 30) и в таблице 1.5 (стр. 31).



3. В главе 3 не совсем четко описана процедура регистрации продуктов распада  $t$ -кварка. С методической точки зрения было бы хорошо уделить больше внимания обсуждению эффективности и точности регистрации струй и фотонов. Также не совсем понятно, как предлагается (если предлагается) разделять в эксперименте сигналы от  $u$ - и  $s$ -кварков? Глюонов?
4. Результаты пятой главы демонстрируют значительное улучшение для  $FCC-hh$  по сравнению с ЛНС верхних ограничений на вероятности процессов с вершиной  $tq$  и  $tqH$  (до двух порядков), в то же время для вершины  $tcu$  улучшение не такое значимое (примерно в полтора раза). С чем это связано?
5. В работе приводятся таблицы, где сравниваются полученные для  $HL-LHC$  и  $FCC-hh$  ожидаемые верхние ограничения распадов топ-кварка с существующими результатами ЛНС. Вместе с тем, отсутствуют прямые сравнения с результатами теоретических предсказаний в рамках различных моделей: было бы наглядно и удобно представить полученные результаты по аналогии с рис. 1.8 (стр. 30) и обсудить их с точки зрения достижимости теоретически предсказываемых значений — какой вывод для теории можно сделать из установленных пределов?

Работа также не лишена ряда формальных недостатков, среди которых можно указать следующие:

1. Представляется несколько неудачным название диссертации, содержащее упоминание “топ-кварков” во множественном числе, в то время как топ-кварк (аромат кварка) всего один.
2. Текст диссертации содержит опечатки, в тексте часто используется профессиональный жаргон и присутствуют неточности перевода англоязычных терминов, чего следовало бы избегать, а также перенос правил английской орфографии на русский язык. Неоднократно повторяющиеся примеры — “Лагранжиан” и “Новая Физика” с заглавной буквы, что совершенно неуместно в русском языке. Присутствуют непереуведенные на русский язык англоязычные единицы измерений (например, “TeV”, “fb” и пр.), в целом вводная часть написана довольно небрежно.
3. В тексте присутствуют множественные формулы, которые в диссертации не выводятся, и для них даются ссылки на материалы научных школ и конференций. Было бы корректнее приводить ссылки на оригинальные статьи. Также можно отметить практически отсутствующее описание используемых в разделе 1.4 альтернативных моделей новой физики за рамками СМ и отсутствие ссылок в литературе на оригинальные работы, в которых были введены эти модели.
4. Во вступительном параграфе 1.1 (стр. 18) приведены с ошибками измеренные значения времени жизни  $t$ - и  $b$ -кварков, например, порядка “ $10^{24}$ ” сек. вместо “ $10^{-24}$ ” сек.

Отмеченные недостатки не влияют на положительную оценку диссертационной работы, которая является детальным и завершенным научным исследованием.

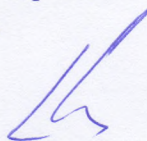
Апробация работы состоялась на ряде представительных международных конференций и семинаров, основные результаты диссертации опубликованы в научных журналах, входящих в базы данных Scopus и Web of Science. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

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, установленным 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.



Отзыв составил:

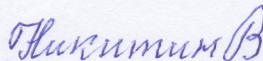
Кандидат физико-математических наук,  
Ученый секретарь Лаборатории физики высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований,  
141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри 6,  
[pdv@lhe.jinr.ru](mailto:pdv@lhe.jinr.ru), тел. 8(496) 2163807



Д. В. Пешехонов

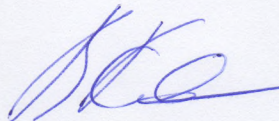
Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на семинаре Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина (ЛФВЭ) Объединенного института ядерных исследований 13 марта 2020 года.

Руководитель общелабораторного семинара  
ЛФВЭ ОИЯИ, д.ф.-м.н., профессор



В. А. Никитин

Директор ЛФВЭ ОИЯИ,  
Член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н.



В. Д. Кекелидзе



Сведения об организации:

Объединенный институт ядерных исследований Международная Межправительственная Организация Объединенный институт ядерных исследований (ММО ОИЯИ)

Адрес: г. Дубна Московской области, ул. Жолио Кюри д.6, 141980 Россия.

Электронная почта: [post@jinr.ru](mailto:post@jinr.ru)

Сайт: [www.jinr.ru](http://www.jinr.ru)

Тел. +7 (49621) 65-059, Факс +7 (49621) 65-146; +7 (495) 632-78-80

Публикации сотрудников ОИЯИ за последние 5 лет по теме диссертации:

1. G. Aad et al. (ATLAS Collaboration), "Search for flavour-changing neutral currents in processes with one top quark and a photon using  $81 \text{ fb}^{-1}$  of pp collisions at 13 TeV with the ATLAS experiment," *Phys. Lett. B* 800 (2020) 135082.
2. M. Aaboud et al. (ATLAS Collaboration), "Measurements of inclusive and differential fiducial cross-section of  $t\bar{b}\gamma$  production in leptonic final states at 13 TeV in ATLAS, *Eur. Phys. J. C* 79 (2019) no.5, 382.
3. H. Abramowicz et al. (CLICdp Collaboration), "Top-Quark Physics at the CLIC Electron-Positron Linear Collider," *JHEP* 11 (2019) 003.
4. A. M. Sirunyan et al. (CMS Collaboration), "Search for the flavor-changing neutral current interactions of the top quark and the Higgs boson which decays into a pair of b quarks at 13 TeV," *JHEP* 06, 102 (2018).
5. A. Bednyakov and V. Rutberg, "FCNC decays of the Higgs bosons in the BGL model", *Mod. Phys. Lett. A* 33 (2018) no.31, 1850152.
6. V. Khachatryan et al. (CMS Collaboration), "Search for anomalous  $Wtb$  couplings and flavour-changing neutral currents in t-channel single top quark production in pp collisions at 7 and 8 TeV," *JHEP* 02, 028 (2017).
7. A. M. Sirunyan et al. (CMS Collaboration), "Search for associated production of a Z boson with a single top quark and for  $tZ$  flavour-changing interactions in pp collisions at 8 TeV", *JHEP* 07 (2017) 003.
8. V. Khachatryan et al. (CMS Collaboration), "Search for CP violation in  $t\bar{b}$  production and decay in proton-proton collisions at 8 TeV", *JHEP* 03 (2017) 101.
9. V. Khachatryan et al. (CMS Collaboration), "Search for top quark decays via Higgs-boson-mediated flavor-changing neutral currents in pp collisions at 8 TeV", *JHEP* 02 (2017) 079.
10. V. Khachatryan et al. (CMS Collaboration), "Search for Anomalous Single Top Quark Production in Association with a Photon in pp Collisions at 8 TeV," *JHEP* 04 (2016) 035.