

На правах рукописи

Мандрик Пётр Сергеевич

**Поиск аномальных взаимодействий топ-кварков
на адронных коллайдерах**

01.04.23 – физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Протвино 2020

УДК 539.12

Работа выполнена в НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ (г. Протвино).

Научный руководитель – доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ, С.Р. Слабоспицкий.

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, С.П. Баранов; доктор физ.-мат. наук, профессор МГУ имени М.В. Ломоносова, Л.Н. Смирнова.

Ведущая организация – Объединённый институт ядерных исследований. Почтовый адрес: ул. Жолио-Кюри, 6, г. Дубна, Московская обл., Россия, 141980.

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2020 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ по адресу: 142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, дом 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.ihep.ru/pages/main/6582/6745/index.shtml>
НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю. Г. Рябов

Общая характеристика работы

Данная диссертация посвящена исследованию перспектив поиска нейтральных токов, меняющих аромат кварков, в экспериментах на будущих коллайдерных ускорителях HL-LHC и FCC-hh, а также исследованию перспектив использования “ускоренной” топологии применительно к поиску нейтральных токов, меняющих аромат кварков, и методологии проведения статистического анализа.

Актуальность работы. 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. С другой стороны, ATLAS и CMS являются на сегодняшний день наилучшими экспериментальными установками для изучения физики t -кварков, а LHC является единственной действующей “фабрикой” t -кварка. 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. Инициированная международной коллаборацией CMS разработка программы физических исследований модернизированной установки включает в себя задачу исследования чув-

ствительности проектируемого детектора к поиску распада t -кварка через нейтральный ток со сменой аромата. В настоящее время аналогичные задачи также решаются коллаборацией ATLAS для HL-LHC, международной коллаборацией, разрабатывающей программу физических исследований для FCC-hh, и другими группами, проектирующими будущие ускорители. Перед планируемыми экспериментами стоит задача адаптации существующих методов поиска новой физики к новым показателям работы ускорителей и разработка новых методов. Так, особенностью ускорителя FCC-hh является рекордное значение энергии протон-протонных соударений $\sqrt{s} = 100$ ТэВ, приводящей к росту эффективного сечения событий процессов с большими значениями поперечных импульсов ($p_T > 100$ ГэВ). С другой стороны, рекордные значения светимости, которые могут быть достигнуты на FCC-hh, сопряжены с ростом числа сопутствующих протон-протонных взаимодействий за единичное пересечение пучковых сгустков, наибольшим образом ухудшающих разрешение для струй с низкой энергией. В связи с этим одной из активно разрабатываемых стратегий анализа является эксплуатация “ускоренной” топологии, при которой тяжёлые объекты, такие как W -бозон, t -кварк и бозон Хиггса, идентифицируются в событии в качестве одной струи. В представленной работе “ускоренная” топология применительно к вопросу поиска нейтральных токов, меняющих аромат кварка, в распаде t -кварка была рассмотрена впервые.

Практическая ценность работы. 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 нетривиальной 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.

Целями диссертационной работы являются:

1. Изучение 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.
2. Изучение чувствительности детектора CMS Phase II Upgrade ускорителя HL-LHC к процессам ассоциативного рождения t -кварка и струи через нейтральный ток в вершине tqg ($q = u$ или c), меняющий аромат кварка, на основе Монте-Карло моделирования проектируемого детектора.
3. Изучение 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.
4. Разработка метода учёта систематической ошибки, связанной с конечностью статистики Монте-Карло для случая наличия событий с отрицательными генераторными весами, при построении функции правдоподобия.

Научная новизна. Впервые было проведено изучение 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, и были получены значения ожидаемых ограничений на величины вероятностей распада $\mathcal{B}(t \rightarrow u\gamma)$ и $\mathcal{B}(t \rightarrow c\gamma)$. Впервые было проведено изучение чувствительности детектора CMS Phase II Upgrade ускорителя HL-LHC к процессам ассоциативного рождения t -кварка и струи через нейтральный ток

в вершине tqg ($q = u$ или c), меняющий аромат кварка, на основе Монте-Карло моделирования проектируемого детектора, и получены значения ожидаемых ограничений на величины $\mathcal{B}(t \rightarrow ug)$ и $\mathcal{B}(t \rightarrow cg)$. Впервые было проведено изучение 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 и получены значения ожидаемых ограничений на величины $\mathcal{B}(t \rightarrow uH)$, $\mathcal{B}(t \rightarrow cH)$, $\mathcal{B}(t \rightarrow u\gamma)$ и $\mathcal{B}(t \rightarrow c\gamma)$. Впервые в явном виде приведён и обоснован алгоритм построения функции правдоподобия с учётом систематической ошибки, связанной с конечностью статистики Монте-Карло для случая наличия событий с отрицательными генераторными весами и произведена реализация программного кода для построения подобной функции правдоподобия для проведения Байесовского статистического анализа. Проведено сравнение актуальных версий пакетов (на момент исследования) для статистического анализа, рекомендованных для использования коллаборацией CMS, с точки зрения проведения Байесовского статистического анализа и нахождения апостериорной функции плотности вероятности информативного параметра методом Марковских цепей по схеме Монте-Карло.

Личный вклад автора. 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 tqg ($q = u$ или c), меняющий аромат кварка, на основе Монте-Карло моделирования проектируемого де-

тектора, 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.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в научных статьях [1, 2, 3, 4, 5]. Основные результаты диссертации доложены диссертантом на семинарах НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, на совещаниях коллаборации CMS по физике процессов с одиночным рождением t -кварка и на совещаниях, посвящённых обсуждению физических задач эксперимента CMS Phase II Upgrade, совещаниях статистического комитета коллаборации CMS и совещаниях группы физических исследований FCC-hh; на секциях, посвящённых обсуждению физических задач HL-LHC. Результаты диссертации доложены диссертантом на следующих профильных международных научных конференциях по физике высоких энергий:

1. International Session-Conference of the Section of Nuclear Physics of PSD RAS: Physics of Fundamental Interactions, Dubna, Russia, April 12 - April 15, 2016.

2. QFTHEP'2017, The XXIII International Workshop "High Energy Physics and Quantum Field Theory", Yaroslavl, Russia, June 26 – July 3, 2017.
3. QUARKS-2018, 20th International Seminar on High Energy Physics, Valday, Russia, May 27 - June 2, 2018.
4. ICPPA 2018, IV International Conference on Particle Physics and Astrophysics, Moscow, Russia, October 22 - October 26, 2018.

В качестве постера результаты, включённые в диссертацию, были представлены автором на:

ESHEP2017, The 2017 European School of High-Energy Physics, Evora, Portugal, September 6 - September 19, 2017.

Кроме того, научные результаты, полученные диссертантом и включённые в диссертацию, в явном виде входят в доклады, представленные членами коллаборации CMS и соавторами на следующих конференциях:

1. ICHEP-2018, XXXIX International Conference on High Energy Physics, COEX, Seoul, July 4 - July 11, 2018 - C. Helsens "Top-quark physics at the Future Circular Colliders".
2. 5th CMS Single Top Workshop, Oviedo, 28-30 November 2018 - G. Vorochnikov, M. Perfilov "Prospects for the search of FCNC at the HL-LHC".

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Диссертация содержит 121 страницу, в том числе 43 рисунка и 19 таблиц. Список литературы содержит 116 ссылок.

Краткое содержание работы

Во введении диссертации обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы задачи и цели исследования, показаны научная новизна и практическая ценность работы, представлены выносимые на защиту научные положения. Приводятся сведения об апробации работы и публикациях, а также информация о личном вкладе автора.

В первой главе диссертации содержится обоснование и описание текущего экспериментального состояния задачи поиска нейтральных токов, меняющих аромат кварков, в физике t -кварка. Также приведены характеристики экспериментальной установки CMS большого адронного коллайдера, цели и задачи модернизации данной установки Phase II Upgrade для работы на ускорителе HL-LHC и целевые характеристики ускорителя FCC-hh и разрабатываемого для него детектора.

В Стандартной Модели (СМ) на древесном уровне нет нейтральных токов, меняющих аромат кварков (FCNC). С другой стороны, нейтральные токи, меняющие аромат кварков, могут идти в СМ через петлевые поправки. Однако, данные процессы оказываются существенно подавлены за счёт GIM-механизма (Glashow-Пиоролос-Маiani) и вероятности FCNC распадов t -кварка в СМ являются величинами порядка 10^{-11} - 10^{-17} , находясь за пределами чувствительности современных экспериментов. С другой стороны сектор t -кварка является чувствительным к отклонениям от СМ и исследование процессов с его участием может привести к наблюдению проявлений новой физики. Существенное усиление вероятности FCNC распадов t -кварка возможно в ряде альтернативных моделей: моделях класса 2HDM с нарушением аромата непосредственно на древесном уровне, либо за счёт вклада взаимодействий новых бозонов (FC), минимальная суперсимметричная стандартная модели (MSSM), в классе суперсимметричных моделей с нарушением R -чётности (RV), в классе моделей Рэндалл-Сундрума (RS). Результаты вычисленных в рамках альтернативных моделей вероятностей распадов t -кварка через нейтральные токи, меняющие аромат, приведены в таблице 1. Прямой

Таблица 1: Предсказания вероятностей FCNC распадов t -кварка в СМ и в рамках альтернативных моделей.

Процесс	СМ	2HDM (FC)	MSSM	RPV	RS
$t \rightarrow Zu$	7×10^{-17}	– (–)	$\leq 10^{-7}$	$\leq 10^{-6}$	–
$t \rightarrow Zc$	1×10^{-14}	$\leq 10^{-6}$ ($\leq 10^{-10}$)	$\leq 10^{-7}$	$\leq 10^{-6}$	$\leq 10^{-5}$
$t \rightarrow gu$	4×10^{-14}	– (–)	$\leq 10^{-7}$	$\leq 10^{-6}$	–
$t \rightarrow gc$	5×10^{-12}	$\leq 10^{-4}$ ($\leq 10^{-8}$)	$\leq 10^{-7}$	$\leq 10^{-6}$	$\leq 10^{-10}$
$t \rightarrow \gamma u$	4×10^{-16}	– (–)	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-9}$	–
$t \rightarrow \gamma c$	5×10^{-14}	$\leq 10^{-7}$ ($\leq 10^{-9}$)	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-9}$	$\leq 10^{-9}$
$t \rightarrow Hu$	2×10^{-17}	6×10^{-6} (–)	$\leq 10^{-5}$	$\leq 10^{-9}$	–
$t \rightarrow Hc$	3×10^{-15}	2×10^{-3} ($\leq 10^{-5}$)	$\leq 10^{-5}$	$\leq 10^{-9}$	$\leq 10^{-4}$

поиск нейтральных токов со сменой аромата в распаде t -кварка к настоящему моменту производился в экспериментах на ускорителях ЛHC и Tevatron в протон-протонных и протон-антипротонных столкновениях соответственно, показав отрицательный результат. Результаты экспериментов на ЛHC в виде верхних ограничений на вероятности распадов представлены на рисунке 1.

Далее в данной главе приводится описание и основные характеристики одного из крупнейших универсальных детекторов элементарных частиц, работающих на Большом Адронном Коллайдере (БАК, ЛHC) в ЦЕРН при протон-протонных, протон-ионных и ион-ионных столкновениях - Compact Muon Solenoid (CMS) (см. рисунок 2). Затем следует описание проектов ускорителей High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) и Future Circular Collider (FCC-hh). HL-LHC - утверждённый проект модернизации ускорителя ЛHC, целью которого является достижение пиковой светимости $5 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в протон-протонных столкновениях при энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 14 \text{ ТэВ}$. Запуск HL-LHC позволит экспериментам CMS и ATLAS собирать интегральную светимости на уровне 300 фб^{-1} за год и порядка 3000 фб^{-1} в течение полного срока работы ускорителя в десять лет. Проект модернизации эксперимента CMS, извест-

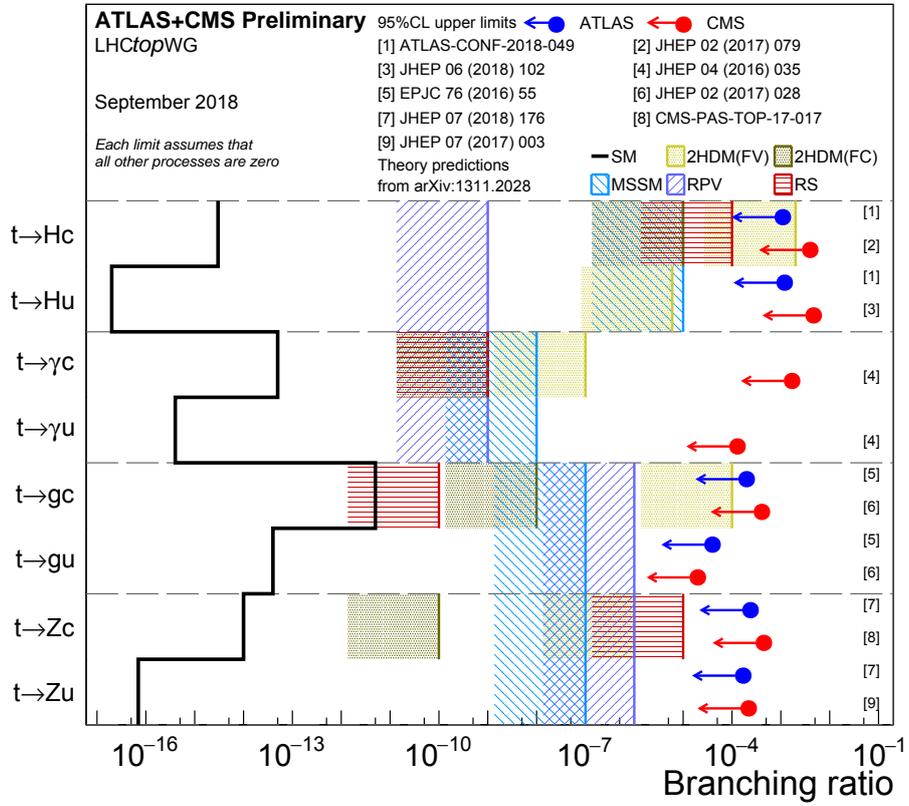


Рис. 1: Текущие экспериментальные верхние ограничения на уровне достоверности 95% на вероятности FCNC распадов t -кварка, полученные в экспериментах ATLAS и CMS, в сравнении с предсказаниями ряда физических моделей.

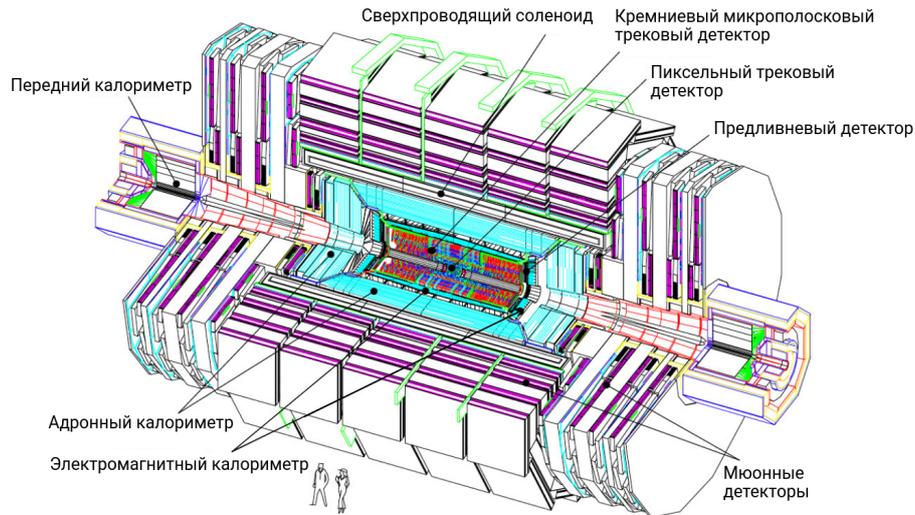


Рис. 2: Схема детектора CMS с указанием основных систем.

ный как “Phase-II Upgrade”, предназначен для подготовки детектора к работе в условиях рекордных показателей светимости HL-LHC, превышающей рабочую светимость детектора CMS, заложенную при проектировании. FCC-hh - проектируемый адронный коллайдер, являющийся одним из кандидатов на роль следующего главного Европейского ускорителя после завершения работы LHC и HL-LHC. К основным целевым параметрам FCC-hh, приведённым в таблице 2, относятся достижение энергии пучка 50 ТэВ, пиковая светимость на уровне $3 \times 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и интегральная светимость порядка 30 аб^{-1} ($30 \times 10^3 \text{ фб}^{-1}$) в течении полного проектного срока работы ускорителя. Основные характеристики ускорителей HL-LHC и FCC-hh в сравнении с LHC представлены в таблице 2.

Во второй главе диссертации приведено описание стратегии обработки данных, являющейся общей для анализов, приведённых в третьей, четвёртой и пятой главах диссертации. Приведено краткое описание инструментов, используемых для решения задач моделирования сигнальных и фоновых событий и моделирования отклика

Таблица 2: Сравнение пиковой светимости \mathcal{L} , интегральной светимости $\int \mathcal{L}$ и среднего числа протон-протонных взаимодействий $\langle \mu \rangle$ за единичное пересечение пучковых сгустков для ускорителей LHC (за время работы в течение 2017-го года, эксперимент CMS), HL-LHC и FCC-hh.

Характеристика	LHC (2017)	HL-LHC	FCC-hh
\sqrt{s} , ТэВ	13	14	100
\mathcal{L} , $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	2×10^{34}	5×10^{34}	3×10^{35}
$\int \mathcal{L}$, фб^{-1}	45	3000	30000
$\langle \mu \rangle$	33	140-200	500-1000

детектора соответственно. Задача реконструкции и отбора событий приведена в разделе 2.3. Приложение методов многомерного и статистического анализа отобранных событий описано в разделах 2.4 и 2.5 соответственно. В разделе 2.6 дополнительно приведено описание метода построения цепей Маркова по схеме Монте-Карло, имеющего широкое приложение в ФВЭ и в частности при проведении статистического анализа в рамках Байесовского формализма. В разделе 2.7 приведены результаты исследования функциональности и производительности рекомендованных статистическим комитетом коллаборации CMS пакетов для статистического анализа. Распространённым способом учёта систематической ошибки, связанной с конечностью статистики используемых в анализе МК наборов сигнальных и фоновых процессов, при построении функции правдоподобия является метод Барлоу и Бистон. Однако данный метод, использующий в своей оригинальной формулировке распределения Пуассона для установления связи между неизвестным “истинным” числом событий из моделирования в пределе бесконечной статистики и полученным из МК набора конечного размера, не учитывает возможность наличия событий с отрицательными весами, встречающихся в ряде современных генераторов. В разделе 2.8 приведены результаты

исследования методов учёта систематической ошибки, связанной с конечностью статистики МК, в случае наличия отрицательных весов.

В третьей главе диссертации приведены результаты исследования чувствительности к FCNC взаимодействию t -кварка в вершине $tq\gamma$ ($q = u$ или c) модернизированного детектора CMS, которая может быть достигнута на ускорителе HL-LHC. Ограничения на вероятности распада $t \rightarrow q\gamma$ находятся путём анализа реакций с одиночным рождением t -кварка в паре с фотоном через FCNC взаимодействие. Конечное состояние сигнального процесса характеризуется наличием изолированного высокоэнергетичного фотона и продуктов SM распада t -кварка.

В данной главе описано моделирование сигнальных и фоновых процессов, приведено программное обеспечение, использованное для генерации событий, моделирования адронизации и развития ливня, детекторных эффектов. После этого перечисляются требования к событиям, направленные на выделения сигнала и подавления числа фоновых событий. Полученные после данных отборов распределения p_T фотона из центрального региона EE $|\eta| < 1.4$ и E из передней области $1.6 < |\eta| < 2.8$ были использованы в качестве дискриминирующего распределения в статистическом анализе.

Для нахождения ожидаемых верхних ограничений на основе модели, включающей в себя только фон, была использована асимптотическая формула для модифицированного частотного подхода к проверке гипотез CL_s . При этом предполагалось, что в модели, содержащей сигнал и фон, в качестве сигнала используется только один из рассматриваемых FCNC процессов. При построении статистической модели были учтены систематические неопределённости, дающие вклад в точность измерения.

Далее в диссертации приводятся ожидаемые верхние ограничения на уровне достоверности 95% для вероятности распада $t \rightarrow q\gamma$ (см. 3). Зависимость величины верхних ограничений на вероятности распадов от интегральной светимости приведена на рис. 4. Зависимость величины верхних ограничений на константы связи $|\lambda_{ut}|$ и $|\lambda_{ct}|$ от интегральной светимости приведена на рис. 5.

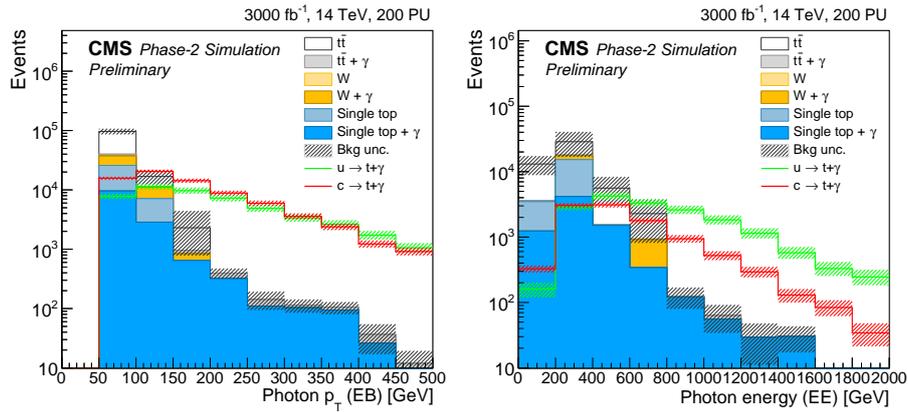


Рис. 3: Распределение по поперечному импульсу p_T реконструированных фотонов для центрального региона $EE |\eta| < 1.4$ (слева) и по энергии E в передней области $EB 1.6 < |\eta| < 2.8$ (справа). Сечение рождения сигнальных процессов взято равным 1 пб для наглядности.

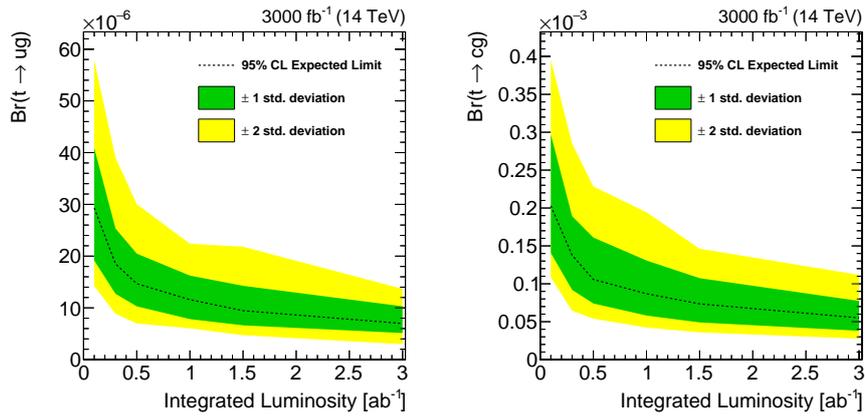


Рис. 4: Зависимость величины ожидаемых верхних ограничений на уровне достоверности 95% для вероятностей распадов $t \rightarrow u\gamma$ (слева) и $t \rightarrow c\gamma$ (справа) для модернизированной установки CMS ускорителя HL-LHC от интегральной светимости.

Таблица 3: Сравнение экспериментальных верхних ограничений на уровне достоверности 95% вероятности распада $t \rightarrow q\gamma$ из анализа с одиночным рождением t -кварка с ожидаемым значением для модернизированной установки CMS ускорителя HL-LHC.

Детектор (светимость, энергия)	$\mathcal{B}(t \rightarrow u\gamma)$	$\mathcal{B}(t \rightarrow c\gamma)$
CMS (19.8 fb ⁻¹ , 8 TeV)	0.013%	0.17%
CMS Phase-2 (300 fb ⁻¹ , 14 TeV)	0.0021%	0.015%
CMS Phase-2 (3000 fb ⁻¹ , 14 TeV)	0.0009%	0.0074%

В четвёртой главе диссертации приведены результаты исследования чувствительности к FCNC взаимодействию t -кварка в вершине tqg ($q = u$ или c) модернизированного детектора CMS, которая может быть достигнута на ускорителе HL-LHC. Следуя анализу на реальных данных, ограничения на вероятности распада $t \rightarrow qg$ найдутся путём анализа реакций с одиночным рождением t -кварка в сопровождении глюона через FCNC взаимодействие. Конечное состояние сигнального процесса характеризуется наличием изолированного высокоэнергетичного фотона и продуктов SM распада t -кварка.

В данной главе описано моделирование сигнальных и фоновых процессов, приведено программное обеспечение, использованное для генерации событий, моделирования адронизации и развития ливня, детекторных эффектов. Описывается метод получения многоструйного КХД фона на основе использования экспериментальных данных эксперимента CMS за 2016-й года. После этого перечисляются требования к событиям, направленные на выделения сигнала и подавления числа фоновых событий. Далее представляется описание методов многомерного анализа, использованных для выделения сигнальных событий в данном анализе, приводится список использованных при тренировке переменных.

Далее приведено описание статистического анализа и показаны графики зависимости ожидаемых верхних ограничений на уровне

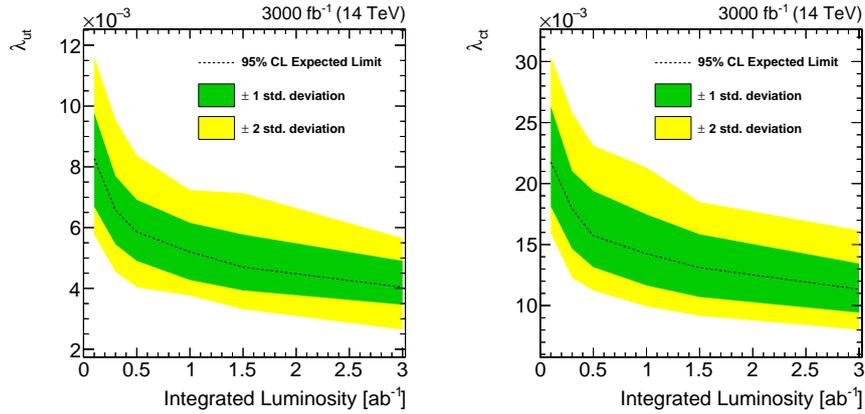


Рис. 5: Зависимость величины ожидаемых верхних ограничений на уровне достоверности 95% для $|\lambda_{ut}|$ (слева) и $|\lambda_{ct}|$ (справа) для модернизированной установки CMS ускорителя HL-LHC от интегральной светимости.

достоверности 95% на FCNC константы связи и соответствующие вероятности распада от интегральной светимости приведены (см. рис. 6). Дополнительно приводятся двухмерные ожидаемые ограничения на FCNC константы связи в предположении одновременного наличия $t\bar{c}\bar{q}$ и $t\bar{u}\bar{q}$ сигнальных каналов и соответствующие вероятности распада на уровнях достоверности 68% и 95%. Также приводятся результаты исследования вклада индивидуальной систематической неопределённости в величину значения верхнего ограничения, вычисленные путём вариации отвечающих им неинформативных параметров.

В таблице 4 приведены ожидаемые верхние ограничения на уровне достоверности 95% на величину FCNC констант связи и соответствующие им вероятности распадов для интегральной светимости 300 fb^{-1} и 3000 fb^{-1} , полученные в предположении наличия только одного из сигнальных каналов.

В пятой главе диссертации приведены результаты исследования чувствительности к FCNC взаимодействию t -кварка в вершинах $tq\gamma$

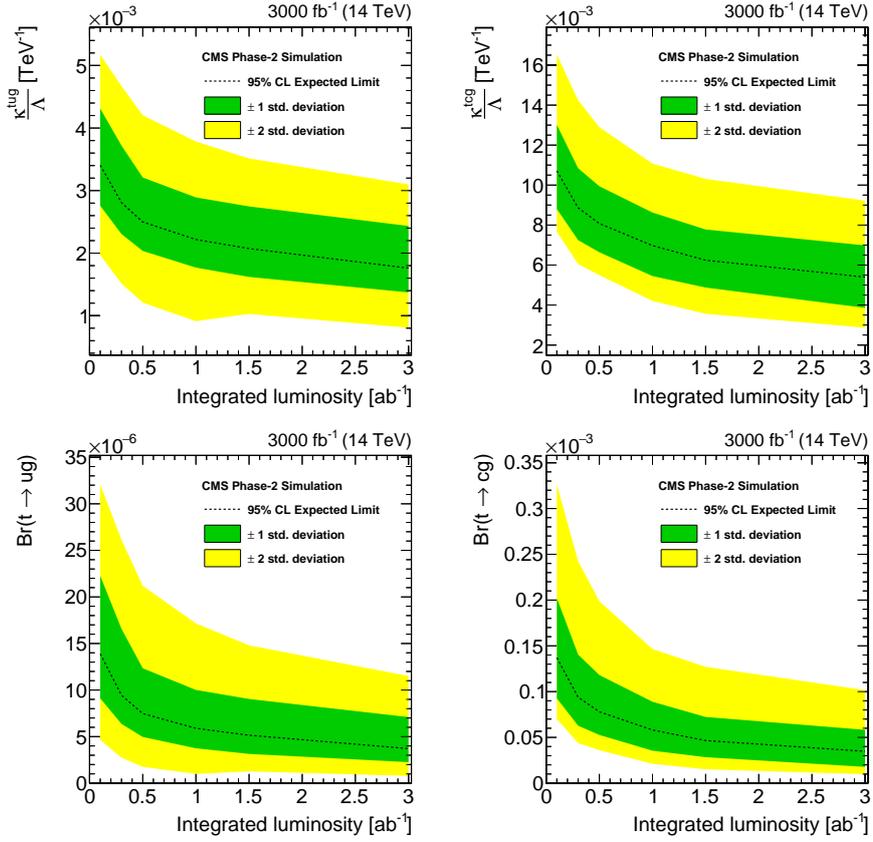


Рис. 6: Ожидаемые верхние ограничения на уровне достоверности 95% на FCNC константы связи и соответствующие вероятности распада в зависимости от интегральной светимости.

и tqH ($q = u$ или c), которая может быть достигнута на ускорителе FCC-hh. Особенностью ускорителя FCC-hh является рекордное значение энергии соударения $\sqrt{s} = 100$ ТэВ, приводящее к росту эффективного сечения событий процессов с большими значениями поперечных импульсов ($p_T > 100$ ГэВ). С другой стороны, рекордные значения светимости, которые могут быть достигнуты на FCC-hh,

Таблица 4: Ожидаемые верхние ограничения на уровне достоверности 95% на величину FCNC констант связи и соответствующие им вероятности распадов для интегральной светимости 300 фб⁻¹ и 3000 фб⁻¹. Также приведены ограничения для случая наличия только статистической ошибки без учёта имеющихся систематических неопределённостей.

$\int L, \text{ фб}^{-1}$	$\mathcal{B}(t \rightarrow ug)$	κ_{tug}/Λ	$\mathcal{B}(t \rightarrow cg)$	κ_{tcg}/Λ
300	9.8×10^{-6}	0.0029 ТэВ ⁻¹	99.4×10^{-6}	0.0091 ТэВ ⁻¹
3000	3.8×10^{-6}	0.0018 ТэВ ⁻¹	32.1×10^{-6}	0.0052 ТэВ ⁻¹
3000, стат.	1.0×10^{-6}	0.0009 ТэВ ⁻¹	4.9×10^{-6}	0.0020 ТэВ ⁻¹

сопряжены с ростом числа сопутствующих протон-протонных взаимодействий за единичное пересечение пучковых сгустков. Приведённый в диссертации анализ основывается на использовании топологии высокоэнергетических событий в процессе с парным рождением t -кварка, в которых один из t -кварков распадается по доминирующему СМ распаду $t \rightarrow bW$, а другой через FCNC. В случае поиска FCNC в $tq\gamma$ вершине конечное состояние характеризуется наличием двух больших “толстых” (fat) высокоэнергетических струй, одна из которых содержит b -помеченную струю меньшего размера, а другая - высокоэнергетичный фотон. В случае поиска FCNC в tqH вершине конечное состояние будет включать в себя две “толстые” высокоэнергетичные струи, одна из которых содержит одну b -помеченную струю меньшего размера, отвечающую СМ распаду t -кварка, а другая - две, отвечающие распаду бозона Хиггса по каналу $H \rightarrow b\bar{b}$. Для моделирования сигнальных и фоновых событий был использован генератор MadGraph5_aMC@NLO. Моделирование адронизации и развития ливня производилось в пакете Pythia 8. Моделирование эффектов реконструкции в детекторе проводилось с помощью пакета Delphes. При генерации в качестве PDF был использован набор NNPDF3.0. Следующие процессы были использованы в качестве фоновых для сигнального процесса $tq\gamma$: $t\bar{t}$, $t\bar{t} + \gamma$, $t+$ струи, $t + \gamma$

струи, Z + струи, W + струи, γ + струи (многоструйный КХД фон). Следующие процессы были использованы в качестве фоновых для сигнального процесса tqH : $t\bar{t}$ + струи, W + струи, Z + струи, $t\bar{t}$ + Z , $t\bar{t}$ + W , $t\bar{t}$ + H , многоструйный КХД фон. Сигнальные события были сгенерированы с отбором по $p_T > 500$ ГэВ t -кварка - начиная с данного промежутка по p_T более 50% событий отвечают рассматриваемой топологии анализа. Дополнительные взаимодействия протонов за единичное пересечение пучковых сгустков при генерации событий не учитывались.

Выделение сигнальных $tq\gamma$ и tqH FCNC событий и подавление фоновых событий происходит в два этапа. На первом этапе на события накладывается последовательность первичных отборов, разная для $tq\gamma$ и tqH анализов. На втором этапе используется метод многомерного анализа ВДТ, использующий различиям в кинематических переменных между сигнальными и фоновыми событиями для классификации данных.

Для нахождения ожидаемых верхних ограничений используется асимптотическая формула для модифицированного частотного подхода к проверке гипотез CL_s . Ошибки в определении нормировки фоновых процессов оцениваются консервативно в 30%.

Зависимость величины верхних ожидаемых ограничений на вероятности распадов от интегральной светимости приведены на рисунке 7. Сравнение полученных верхних ожидаемых ограничений для экспериментов на FCC-hh для значений интегральной светимости 30 аб⁻¹ и 3 аб⁻¹ с актуальными экспериментальными результатами и оценками для HL-LHC приведено в таблице 5.

В заключении диссертации перечислены основные результаты диссертационной работы:

1. Получены ожидаемые верхние ограничения на уровне достоверности 95% для величин $\mathcal{B}(t \rightarrow u\gamma) < 0.9 \times 10^{-5}$ и $\mathcal{B}(t \rightarrow c\gamma) < 7.4 \times 10^{-5}$ для реалистичных условий детектора CMS Phase II Upgrade при интегральной светимости 3000 фб⁻¹ и энергии $\sqrt{s} = 14$ ТэВ ускорителя HL-LHC.
2. Получены ожидаемые верхние ограничения на уровне досто-

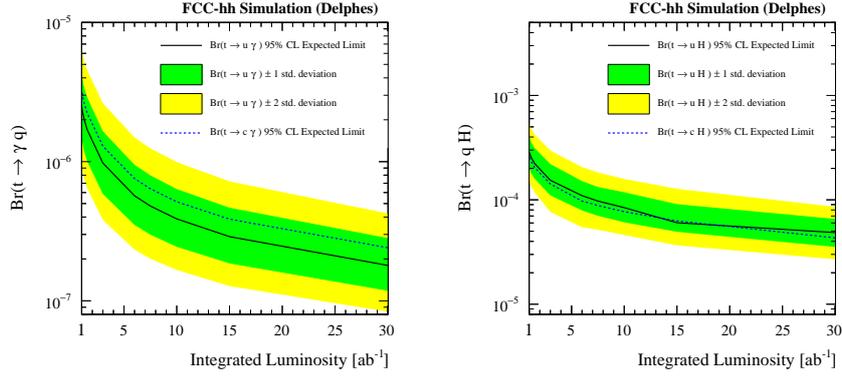


Рис. 7: Зависимость ожидаемых верхних ограничений на уровне достоверности 95% от интегральной светимости FCC-hh для вероятностей распада $t \rightarrow q\gamma$ (слева) и $t \rightarrow qH$ (справа).

верности 95% для величин $\mathcal{B}(t \rightarrow ug) < 3.8 \times 10^{-6}$ и $\mathcal{B}(t \rightarrow cg) < 32.1 \times 10^{-6}$ для реалистичных условий детектора CMS Phase II Upgrade при интегральной светимости 3000 фб^{-1} и энергии $\sqrt{s} = 14 \text{ ТэВ}$ ускорителя HL-LHC.

3. Получены ожидаемые верхние ограничения на уровне достоверности 95% для величин: $\mathcal{B}(t \rightarrow u\gamma) < 1.8 \times 10^{-7}$ и $\mathcal{B}(t \rightarrow c\gamma) < 2.4 \times 10^{-7}$ для реалистичных экспериментальных условий интегральной светимости 30000 фб^{-1} и энергии протон-протонных соударений $\sqrt{s} = 100 \text{ ТэВ}$ ускорителя FCC-hh.
4. Получены ожидаемые верхние ограничения на уровне достоверности 95% для величин: $\mathcal{B}(t \rightarrow uH) < 4.8 \times 10^{-5}$ и $\mathcal{B}(t \rightarrow cH) < 4.3 \times 10^{-5}$ для реалистичных экспериментальных условий интегральной светимости 30000 фб^{-1} и энергии протон-протонных соударений $\sqrt{s} = 100 \text{ ТэВ}$ ускорителя FCC-hh.
5. Разработан алгоритм построения функции правдоподобия с учётом систематической ошибки, связанной с конечностью стати-

Таблица 5: Ожидаемые значения верхних ограничений на уровне достоверности 95% на вероятности распадов в эксперименте на FCC-hh для значений интегральной светимости 30 аб^{-1} и 3 аб^{-1} в сравнении с актуальными экспериментальными результатами и оценками для HL-LHC.

Детектор	$\mathcal{B}(t \rightarrow u\gamma)$	$\mathcal{B}(t \rightarrow c\gamma)$
CMS (19.8 фб^{-1} , 8 ТэВ)	13×10^{-5}	170×10^{-5}
CMS Phase-2 (300 фб^{-1} , 14 ТэВ)	2.1×10^{-5}	15×10^{-5}
CMS Phase-2 (3 аб^{-1} , 14 ТэВ)	0.9×10^{-5}	7.4×10^{-5}
FCC-hh (3 аб^{-1} , 100 ТэВ)	9.8×10^{-7}	12.9×10^{-7}
FCC-hh (30 аб^{-1} , 100 ТэВ)	1.8×10^{-7}	2.4×10^{-7}
Детектор	$\mathcal{B}(t \rightarrow uH)$	$\mathcal{B}(t \rightarrow cH)$
CMS (36.1 фб^{-1} , 13 ТэВ)	4.7×10^{-3}	4.7×10^{-3}
ATLAS (36.1 фб^{-1} , 13 ТэВ)	1.9×10^{-3}	1.6×10^{-3}
FCC-hh (3 аб^{-1} , 100 ТэВ)	8.4×10^{-5}	7.7×10^{-5}
FCC-hh (30 аб^{-1} , 100 ТэВ)	4.8×10^{-5}	4.3×10^{-5}

стики Монте-Карло для случая наличия событий с отрицательными генераторными весами.

Список литературы

- [1] 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

- [2] A. Abada, ..., **P. Mandrik**, ..., *et al.* [FCC Collaboration], “FCC-hh: The Hadron Collider : Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 3,” Eur. Phys. J. ST **228**, no. 4, 755 (2019). doi:10.1140/epjst/e2019-900087-0
- [3] **Mandrik, Petr**. The evaluation of the systematic uncertainties for the finite MC samples in the presence of negative weights [Text] / Petr Mandrik // EPJ Web Conf. — 2017. — Vol. 158. — P. 06005. — 1708.07708.
- [4] **Mandrik, Petr**. Top FCNC searches at HL-LHC with the CMS experiment [Text] / Petr Mandrik // EPJ Web Conf. — 2018. — Vol. 191. — P. 02009. — 1808.09915.
- [5] **Mandrik, Petr**. Prospect for top quark FCNC searches at the FCC-hh [Text] / Petr Mandrik // 4th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA 2018) Moscow, Russia, October 22-26, 2018. — [S. l. : s. n.], 2018. — 1812.00902.

Рукопись поступила 10 февраля 2020 года.

Автореферат отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

П.С. Мандрик

Поиск аномальных взаимодействий топ-кварков на адронных коллайдерах.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **Л^AT_EX**.

Подписано к печати 13.02.2020. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 1,62. Уч.-изд.л. 1,15. Тираж 100. Заказ 4. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ

142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ, 2020
