

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Ильина Вячеслава Анатольевича на диссертационную работу Дудко Льва Владимировича «Физические основы и методы оптимизации исследований одиночного рождения топ-кварка на адронных коллайдерах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Диссертация Дудко Льва Владимировича «Физические основы и методы оптимизации исследований одиночного рождения топ-кварка на адронных коллайдерах» посвящена феноменологическому анализу в рамках Стандартной Модели процессов электрослабого рождения одиночного топ-кварка на адронных коллайдерах Tevatron (FermiLab) и LHC (CERN). Исследовались также возможные проявления *новой физики* (вне Стандартной Модели) в процессах с рождением трех топ-кварков в эксперименте CMS в режиме высокой светимости High Luminosity LHC. Отметим высокую актуальность этих исследований, что связано с важнейшей проблемой современной физики высоких энергий – в ситуации, когда (*почти*) все полученные на данный момент экспериментальные данные подтверждают справедливость Стандартной Модели, ее статус, как теории фундаментальных взаимодействий микромира, не признается в силу большого перечня вопросов, на которые нет ответа в рамках Стандартной Модели. Среди них: слишком большое количество свободных параметров, наличие огромного разрыва в масштабах значений масс элементарных частиц-фермионов (12 порядков между массой электронного нейтрино и топ-кварка), *независимое* вхождение в Стандартную Модель двух типов фундаментальных взаимодействий (электрослабого и сильного) при отсутствии еще одного (из известных на сегодня) типа фундаментального взаимодействия – гравитационного. Все эти вопросы имеют статус *когнитивного несогласия*. Но есть и два экспериментальных факта, которые невозможно объяснить в рамках Стандартной Модели – *темная материя* и *темная энергия*. Скорее всего, ответы на некоторые из этих вопросов будут получены не в коллайдерных экспериментах – в обозримом будущем просто не хватит энергии сталкивающихся частиц. Однако, для коллайдерных экспериментов остаются окна возможности для обнаружения проявлений *новой физики*, в том числе в связи с большой массой топ-кварка. Отметим, что теоретические исследования процессов с тремя топ-кварками в конечном (партонном) состоянии, проведенные в диссертационной работе Л.В. Дудко, представляют большой интерес для поиска проявлений *новой физики*. В эти процессы основной вклад в дают оба типа фундаментальных взаимодействий Стандартной Модели – электрослабые и сильные. Важным результатом диссертационной работы Л.В. Дудко является открытие эффекта сильной отрицательной интерференции электрослабых и сильных вкладов в сечение рождения трех топ-кварков в нескольких каналах в СМ. Например, в каналах $q, t, t, anti-t$ вклады глюонных и электрослабых диаграмм по порядку величины равны. При этом их интерференция отрицательна и того же порядка по величине. В результате полное сечение оказывается примерно равным глюонному и электрослабому вкладу. В диссертации подчеркнуто, что такое разбиение «диаграммных» вкладов является калибровочно-инвариантным. В случае же моделей, обобщающих Стандартную Модель, такой тонкой настройки параметров может и не сложиться, что приведет к аномально

высокому выходу событий с конечным партонным состоянием $q,t,t,anti-t$ – и это будет проявлением (какой-то) *новой физики*. Понятно, что такие события в высокой степени редки, и для их наблюдения, например в экспериментах на LHC, потребуется анализ огромного объема данных. Оценки, проведенные Л.В. Дудко, показывают, что окно возможности обнаружения *новой физики* в таких каналах появится в экспериментах на LHC в режиме высокой светимости (HL-LHC, High Luminosity LHC), то есть в начале 2030-х годов.

Важной составляющей диссертационной работы Л.В. Дудко является разработка комплекса методов компьютерного анализа данных, позволяющий эффективно выделять редкие сигнальные события с одним и тремя топ-кварками в конечном партонном состоянии в экспериментах на адронных коллайдерах. Разработанный комплекс создавался на протяжении двадцати лет. На начальном этапе в его основу вошли методы выделения сигнальных событий с одиночным топ-кварком в эксперименте D0, развитые им в кандидатской диссертационной работе (защищена в 2001 году). Эти методы, в ходе докторской диссертационной работы, получили системное развитие – в том числе и для анализа данных будущих экспериментов на LHC в режиме высокой светимости. В результате, был создан комплекс методов, позволяющий эффективно решать задачи по анализу данных с рождением *нечетного* числа топ-кварков и по моделированию таких событий. В составе этого комплекса отметим следующие:

1) разработка эффективных генераторов событий с рождением одного и трех топ-кварков. В том числе моделирующих события с одиночным топ-кварком с учетом не лидирующих (NLO) пертурбативных поправок – здесь большой интерес представляет новый метод «*сшивки распределений*»;

2) модернизация полного цикла моделирования процессов рождения *нечетного* числа топ-кварков - за счет использования унифицированного формата LHEF для записи партонных событий и стандартизированного формата HepML для описания параметров таких событий, в разработке которых Л.В. Дудко принимал активное участие. Здесь важное место заняла созданная Л.В. Дудко с коллегами из ОИЯИ специализированная база хранения смоделированных партонных событий MCDB, принятая в использование в практике экспериментов D0 и CMS;

3) развитие метода нейронных сетей, разработанного в кандидатской диссертационной работе для выделения событий с одиночным рождением топ-кварка в рамках подхода «*ансамбль нейронных сетей (Hansen and Salamon, 1990)*». Это развитие включает: подключение метода байесовских нейронных сетей, метод фильтрации плохо моделируемых фонов, метод оптимизации архитектуры и параметров тренировки нейронных сетей, методы проверки эффективности используемых методов с учетом систематических ошибок и методика учета влияния систематических неопределенностей.

По результатам Л.В. Дудко в части применения методов нейронных сетей отметим следующий важный аспект. В последние 10 лет мощное развитие получили методы глубокого обучения (*DL - Deep Learning*). В огромном числе приложений с помощью этих методов получены прорывные результаты с значимым прикладным эффектом. Характеристическим для DL методов является необходимость обучения таких нейронных сетей на наборах размеченных данных очень больших размеров. В первую очередь для приложений, для которых нет (или не известны) фундаментальных законов, описывающих соответствующие процессы и явления. Примеры таких

приложений – лингвистика, медицина, социальные процессы, психология и многие другие. В естественных науках (в физике, например) фундаментальные законы известны, и это обстоятельство дает возможность разработки эффективных методов применения нейронных сетей с обучением на существенно меньших наборах размеченных данных. Именно такой подход блестяще развивает Л.В. Дудко – в качестве *фундаментальной* основы, на которую опираются его разработки по применению метода нейронных сетей, он использует диаграмматику Фейнмана (благо, что исследуемая в диссертации физика относится к жестким процессам, для которых теория возмущений работает с большой точностью). В частности, отдельные нейронные сети, в разработанном методе ансамбля нейронных сетей, соотносятся с различными каналами рождения *нечетного* числа топ-кварков и с калибровочно-инвариантными поднаборами фейнмановских диаграмм. По сути, такой подход можно отнести к периоду развития методов искусственного интеллекта (ИИ) до Deep Learning эпохи, когда в основе ИИ методов лежали знания, представленные в виде правил – примером таких ИИ методов были экспертные системы. Потрясающие прикладные успехи Deep Learning в последние 10 лет практически закрыли интерес к ИИ методам, основанным на знаниях. Однако, в ИИ сообществе сейчас начинают обсуждать ограничения DL метода, и в качестве одного из возможных направлений дальнейшего развития ИИ методов начинают обсуждать «приземление» DL парадигмы на фундамент знаний. В этом отношении подход, развиваемый Л.В. Дудко, по нашему мнению, имеет большие прикладные перспективы.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационных исследованиях Л.В. Дудко подтверждается экспериментальными данными по одиночному рождению топ-кварка в экспериментах D0 и CMS, открытием эффекта сильной отрицательной интерференции вкладов от сильного и электрослабого взаимодействий в некоторые каналы рождения трех топ-кварков в экспериментах на HL-LHC, а также высокой эффективностью разработанного комплекса компьютерных методов анализа и моделирования экспериментальных данных по рождению одного и трех топ-кварков на адронных коллайдерах.

Практическая значимость результатов диссертации состоит в том, что они применяются при анализе данных в экспериментах CMS (LHC), включая моделирование данных в будущих экспериментах на LHC в режиме высокой светимости.

Личный вклад автора в исследованиях, выполненных с соавторами, заключается в разработке методов, постановке решаемых задач, проведении вычислений, анализе экспериментальных данных и получении экспериментальных результатов. Большая часть практических вычислений, результаты которых приводятся в работе, выполнена автором самостоятельно.

Публикации и апробация результатов. Соискатель имеет 67 опубликованных работ по теме диссертации, 34 из них опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационных советах МГУ.

Материалы диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах и совещаниях коллабораций D0 и CMS, а также на различных международных конференциях по физике высоких энергий в 2002 — 2022 годах.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертационной работы обеспечивается строгостью использованных методов квантовой теории поля, системным применением методов машинного обучения и статистического анализа данных, сравнением получаемых результатов компьютерного

моделирования с результатами анализа данных коллайдерных экспериментов D0 и CMS, а также с результатами моделирования будущих экспериментов, полученных с использованием альтернативных вычислительных методов.

Диссертация включает в себя Введение, четыре Главы, Заключение и список литературы из 274 источника. Объем диссертации 273 страницы.

Во Введении обоснованы актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, дана информация по структуре диссертации, раскрыты новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, описаны методы и подходы, использованные в ходе диссертационной работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, сформулированы их обоснованность и достоверность, дана информация по апробации полученных результатов.

Первая глава посвящена феноменологии электрослабого рождения топ-кварка на адронных коллайдерах. Представлен разработанный метод моделирования одиночного рождения топ-кварка с учетом не лидирующих поправок. Представлены результаты феноменологического исследования процессов рождения трех топ-кварков.

Вторая глава посвящена методам оптимизации экспериментального анализа данных на адронных коллайдерах. Представлены методы применения искусственных нейронных сетей в экспериментальном поиске электрослабого рождения топ-кварка, стандарт LHEF записи смоделированных партонных событий для использования в различном ПО экспериментальных коллабораций, методы автоматического документирования моделирования партонных событий в формате HepML, база знаний MCDB модельных партонных событий для коллайдерных экспериментов.

В Третьей главе приведены результаты применения разработанных методов анализа в задаче поиска электрослабого рождения топ-кварка в эксперименте D0. В частности, представлены результаты по обнаружению t-канального электрослабого рождения топ-кварка, с измерением ключевых его характеристик, сечения и параметра $|V_{tb}|$.

Четвертая глава посвящена поискам отклонений от предсказаний SM в процессах одиночного рождения топ-кварка, в том числе во взаимодействии топ-кварка с W бозоном и b-кварком. Представлены результаты поиска таких отклонений в эксперименте D0 и первые прямые ограничения на параметры аномальных структур взаимодействия топ-кварка с W бозоном и b-кварком а также результаты поиска таких отклонений в эксперименте CMS. На основе моделирования процессов одиночного рождения топ-кварка в нейтральных токах FCNC получены верхние ограничения на параметры таких аномальных взаимодействий.

В качестве замечания отметим многочисленные литературные и лингвистические недостатки в тексте диссертации и автореферате. Однако это не относится к научной значимости полученных результатов и не меняет высокой положительной оценки диссертации Л.В. Дудко.

Заключение.

Диссертация Л.В. Дудко «Физические основы и методы оптимизации исследований одиночного рождения топ-кварка на адронных коллайдерах» отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к научно-квалификационным работам. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.15. – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» (физико-математические науки), а также критериям,

определенным в пп.2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно приложениям № 5 и 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Таким образом, соискатель Дудко Лев Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.15. – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» (физико-математические науки).

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник

КК НБИКС-природоподобных технологий

ФГБУ Национальный исследовательский

центр «Курчатовский институт» (г. Москва),

доктор физ.-мат. наук



В.А. Ильин

22 сентября 2022 г.

Контактные данные:

тел: +7 (915) 016-00-48

Email: ilyin0048@gmail.com

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация: 01.04.02 «Теоретическая физика»

Адрес места работы: 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Рабочий телефон: +7 (499) 196-95-39,

Рабочий email: ilyin_va@nrcki.ru

Подпись сотрудника НИЦ «Курчатовский институт» Ильина В.А. заверяю

Главный ученый секретарь НИЦ «Курчатовский институт»



К.А. Сергунова

«27» 09 2022 г.