

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание учёной степени доктора физико-
математических наук Дудко Льва Владимировича
на тему: «Физические основы и методы оптимизации исследований
одионого рождения топ-кварка на адронных коллайдерах»
по специальности 1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий»

Стандартная модель физики элементарных частиц с применением математического аппарата квантовой теории поля замечательно описывает все экспериментальные результаты физики высоких энергий, за исключением нейтринных осцилляций. Стандартная модель была построена в результате анализа большой совокупности данных, и к моменту открытия топ-кварка его квантовые свойства были фиксированы в рамках этой модели, заметная неопределённость имела лишь в величине массы топ-кварка, которая как и массы всех известных элементарных частиц фермионов является вообще говоря свободным параметром, определяемым экспериментально. Отличие топ-кварка от остальных кварков в том, что он не успевает сформировать адроны, бесцветные мезоны или барионы, из-за слабых взаимодействий, инициирующих его распад в основном в b -кварк и заряженный массивный векторный бозон. На сегодняшний день топ-кварк – самая тяжёлая из обнаруженных элементарных частиц с самой большой юкавской константой связи с хиггсовским бозоном, поэтому на квантовом уровне именно этот кварк должен оказывать самое большое влияние на хиггсовский потенциал, определяющий вакуум теории, а значит и масштаб масс всех элементарных частиц. Можно отметить, но небольшое уменьшение массы этого кварка, совместное с имеющимися в её измерении неопределённостями, переводит электрослабый вакуум из глобально метастабильного в стабильное состояние. Прямое изучение характеристик этого кварка и уточнение его физических параметров возможно только в процессах рассеяния очень

энергичных частиц, и было доступно только на адронных коллайдерах TeVatron и LHC.

В рассматриваемой диссертации развиваются методы экспериментального обнаружения и теоретического описания процессов с одиночным (и не только) рождением топ-кварка в протон-протонных и протон-антипротонных столкновениях при высоких энергиях. Автор диссертации является ведущим мировым экспертом в этой области, и его работа и внедрение полученных им результатов в анализ экспериментальных данных на этих коллайдерах позволили впервые обнаружить эти процессы и проводить всё более аккуратные проверки предсказаний Стандартной модели и других обобщающих её теорий в секторе топ-кварка.

Диссертация состоит из Введения, четырёх глав основного текста и Заключения. Во Введении традиционно демонстрируется актуальность темы исследования, описываются объект и предмет исследований, степень проработанности темы исследований, формулируются цели и задачи исследований, излагается структура диссертации, выделяется научная новизна, отражается теоретическая и практическая значимость выполненной работы, отмечаются методология и методы исследований, перечисляются положения, выносимые на защиту, указывается личный вклад автора, приводятся сведения, подтверждающие достоверность полученных результатов и апробацию работы. В Первой главе описываются свойства топ-кварка, механизмы его одиночного рождения, проводятся вычисления перспективных наблюдаемых с учётом лидирующих квантовых поправок, рассматривается рождение трёх топ-кварков. Вторая глава посвящена оптимизации методов экспериментального исследования топ-кварка. Здесь продемонстрированы преимущества методов машинного обучения в сочетании с аналитическими расчётами, что повысило чувствительность более чем в два раза. В Третьей главе последовательно описывается внедрение этого метода для обработки данных эксперимента DØ, и как это с увеличением статистики, усовершенствованием детектора и развитием

метода привело к открытию этого процесса и подтверждению предсказаний Стандартной модели. Эти же методы позволили протестировать на TeVatron и LHC предсказания некоторых обобщений Стандартной модели, затрагивающих сектор топ-кварка, соответствующие результаты приведены в главе 4. В Заключение сформулированы основные результаты, представленные в диссертации.

Текст написан очень хорошим языком, используемые методы ясно и чётко изложены, при необходимости дополнены ссылками на оригинальную литературу. Несмотря на большой объём здесь очень мало опечаток, в том числе в формулах. На этом фоне бросается лишь в глаза несоблюдение пунктуации, в особенности в причастных оборотах и ближе к концу текста. Некоторые англоязычные термины по-разному отражаются, причём на одной странице, а иногда и в одном предложении, например акцептанс и аксептанс. D0 и DØ, СКМ и ККМ, рb и пб. Мне представлялось, что в русскоязычной литературе закреплёны термины псевдобыстрота и уровень достоверности, не используются квантили и *measured peak* это не мода распределения. Во многих местах опущены единицы измерения величин (начиная с первой страницы Первой главы). Местами используются необъяснённые величины (см. обрезание на стр.49, величина F в Таблице 3.3).

Во Введении используются неудачные для физической литературы термины точечных фермионов и полной плотности массы и энергии в нашей Вселенной, а также оставлено без внимания, что один из фермионов – анти тау-нейтрино – пока не был экспериментально открыт в том смысле, как были открыты топ-кварк и тау-нейтрино, а с этого начинается диссертация. На мой взгляд, в отведённом месте не раскрыта степень разработанности темы исследований, и не объяснено, почему именно в секторе топ кварка следует ожидать отклонения от предсказаний Стандартной модели.

В начале Первой главы много повторов при описании Стандартной модели и свойств топ-кварка. Непонятно, как изучение топ-кварка может

пролить свет на природу механизма нарушения электрослабой симметрии, ведь все необходимые частицы найдены и их свойства подтверждены в рамках Стандартной модели. Вообще эта часть выглядит как состыкованной из многих кусков очень старых статей. Местами упоминается четвёртое поколение фермионов (см. также главу 4), давно закрытое экспериментально. При изложении моделирования одиночного рождения непонятно, что за первый член функции расщепления глюона предлагается вычесть на стр.26. При описании результатов этой главы не могу согласиться, что показана возможность экспериментального обнаружения рождения трёх топ-кварков: ни фоны, ни эффективности регистрации не обсуждались в тексте.

Во Второй главе на стр.76 сказано, что оптимизация анализа предполагает первую рекомендацию, сводящуюся к единому масштабу для переменных. Но при применении результатов этой главы в главе 3 на графиках многие переменные NN не нормированы, распределены на более широком интервале чем единичный, хотя судя по уравнению (2.6) единица отвечает сигналу, а нуль фону, как можно вывалиться за эти границы никак не объясняется. Не всегда указано, как суммируются систематические неопределённости, например в Таблице 3.31, наивные варианты не дают представленного результата. Опять же наивное сравнение данных и ожиданий от фона и сигнала по разным каналам в Таблице 3.33 говорит, что никакого сигнала нет, поскольку по всем параметрам данные ниже ожиданий, по трём каналам они даже ниже фона. А анализ показывает, что сигнал есть и даже приведена оценка сечения на стр. 162, которая выше предсказаний со стр.117. Это выглядит странно на мой взгляд: сразу две загадки (возможно предсказания для существенно другой массы топ-кварка?) Те же вопросы про Таблицу 3.38 и сечение на стр.166. В разделе 4.2 утверждается, что поскольку распады топ-кварка чувствительны к возможным нестандартным взаимодействиям с b -кварком и W , то именно в одиночном рождении топ-кварка надо смотреть эти проявления. Почему не в парном рождении, непонятно. Более того, дальнейшее изложение в этой

главе показывает, что парное рождение также весьма чувствительно к такой новой физике. Непонятно, о какой будущей модернизации давно остановленного TeVatron идёт речь на стр.206. В Таблице 4.2 не указана светимость, необходимая для достижения таких точностей. Из сравнения многочисленных таблиц у меня создалось впечатление, что многоструйные события систематически дают больше ожиданий. Это так и есть? При обсуждении ограничений на гипотетические нарушающие ароматы константы связи топ-кварка не затрагивается перемешивание с аналогичными операторами других кварков вследствие квантовых поправок и следующие из анализа редких процессов с легкими кварками ограничения.

Говоря о работе в целом, заметно, что основные результаты были получены до 2015 или даже до 2012 года, и вызывает удивление задержка с написанием диссертации. Из-за этого некоторые части излагаются в исторической ретроспективе, что занимает много места, и не всегда оправдано. Текст изобилует числами с большим числом значащих цифр (чего стоит 5.03 стандартных отклонения в подтверждение открытия одиночного рождения), но например в подавляющем большинстве мест (есть пара исключений) обрезания по наблюдаемым проведены довольно грубо: шаг 10 ГэВ, редко 5 ГэВ (например для импульсов). Почему тут не оптимизировать, в особенности если боремся за процентную точность?

Должен подчеркнуть, что вышеуказанные замечания ни в коей мере не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация 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» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно

приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Подводя итог, заключаю, что соискатель Дудко Лев Владимирович несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.15 – «физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник Отдела теоретической физики
Института ядерных исследований РАН,
ФГБУН «Институт ядерных исследований Российской академии наук»

Горбунов Дмитрий Сергеевич



Дата подписания

02.11.2022

Контактные данные:

тел.: +7(499)7839291, e-mail: gorby@ms2.inr.ac.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.02 – теоретическая физика

Адрес места работы:

117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук,
Отдел теоретической физики
Тел.: +7 499 135 77 60; e-mail: inr@inr.ru

Подпись сотрудника Института ядерных исследований РАН.
Д.С. Горбунова удостоверяю:
Заместитель директора ИЯИ РАН, д.ф.м.н.



Г.И. Рубцов