

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Дудко Лев Владимирович

**“Физические основы и методы оптимизации исследований  
одионого рождения топ-кварка на адронных коллайдерах”**

специальность 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц,  
физика высоких энергий»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва - 2022

Работа выполнена в Отделе экспериментальной физики высоких энергий  
Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный консультант: БООС Эдуард Эрнстович,  
член-корреспондент РАН, профессор,  
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: БЕДНЯКОВ Вадим Александрович,  
доктор физико-математических наук,  
Объединенный институт ядерных исследований,  
Директор Лаборатории ядерных проблем  
имени В.П. Дзелепова

ГОРБУНОВ Дмитрий Сергеевич,  
доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН,  
ФГБУН Институт ядерных исследований РАН,  
Отдел теоретической физики,  
главный научный сотрудник

ИЛЬИН Вячеслав Анатольевич,  
доктор физико-математических наук,  
НИЦ “Курчатовский институт”,  
главный научный сотрудник

Защита диссертации состоится 25 ноября 2022 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета **МГУ.013.2** Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5 (19-й корпус Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына на МГУ имени М.В. Ломоносова), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:  
<https://istina.msu.ru/dissertations/465886625/>

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2022 года.  
Телефон совета для справок: +7-916-871-7750  
E-mail: galan\_lidiya@mail.ru

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



Л.И. Галанина

# Общая характеристика работы

Диссертация посвящена феноменологическим и экспериментальным исследованиям процессов рождения топ-кварка в электрослабых взаимодействиях. Основными доступными инструментами исследования таких процессов являются эксперименты на современных адронных коллайдерах Теватрон и LHC. Проведены феноменологические исследования процессов одиночного рождения топ-кварка в  $t$ - и  $s$ -каналах рождения, создан метод моделирования этих процессов учитывающий поправки следующего за лидирующим порядком теории возмущений. Проведено исследование фоновых процессов и предложены методы экспериментального обнаружения одиночного рождения топ-кварка. Исследованы существенно более редкие процессы с рождением трех топ-кварков, топологически подобные процессам одиночного рождения топ-кварка. Разработаны методы оптимизации экспериментального поиска редких процессов, основанные на применении нейронных сетей. Сформулированы и предложены методы оптимизации цепочки моделирования коллайдерных экспериментов, часть разработанных методов принята в качестве стандартов для современных программных пакетов моделирования. Созданное моделирование и разработанные методы применены в эксперименте D0 коллайдера Теватрон для поиска одиночного рождения топ-кварка. По мере набора экспериментальной статистики было проведено наблюдение таких процессов, экспериментальное открытие и измерение сечений  $t$ - и  $s$ -канальных процессов, и измерение параметра  $V_{tb}$  матрицы Каббиво-Кобаяши-Маскава (ККМ). Проведены феноменологические исследования возможных отклонений от предсказаний Стандартной модели (СМ) проявляющихся в модификации взаимодействия топ-кварка с  $W$  бозоном и  $b$ -кварком, и в появлении нейтральных токов меняющих аромат кварков (FCNC) во взаимодействии топ-кварка с  $u$ - или  $s$ -кварком и глюоном. Проведен экспериментальный поиск таких отклонений в экспериментах D0 и в эксперименте CMS коллайдера LHC. Отклонений от предсказаний СМ экспериментально не обнаружено и были установлены верхние модельно-независимые ограничения на параметры характеризующие возможное проявление таких отклонений.

## **Актуальность темы и степень ее разработанности**

Одной из важнейших задач современной физики элементарных частиц является проверка и анализ предсказаний СМ. Электрослабая модель, объединенная с КХД, описывает феноменологию взаимодействий элементарных частиц на уровне радиационных поправок и может рассматриваться, как современная теория калибровочных полей. Однако, существует ряд открытых вопросов, говорящих о том, что СМ не может быть признана окончательной теорией. Экспериментально открытые кварки и лептоны имеют

различные массы, спектр которых не может быть вычислен в рамках СМ. Кварки и лептоны группируются в 3 поколения. СМ не может дать ответ о причине существования именно такого числа поколений фермионов. Серьезный вопрос вызывает и хиггсовский сектор. Скалярный хиггсовский бозон необходим теории для того, чтобы "слабые" бозоны стали массивными, а фермионы приобрели массы через юкавские константы связи, вводимые в теорию как свободные параметры. Масса бозона Хиггса не фиксируется теорией. Константы электрослабых и сильных взаимодействий не связаны друг с другом, что говорит о возможном существовании более фундаментальной калибровочной группы, объединяющей КХД и электрослабые взаимодействия. Массы кварков и лептонов вместе с параметрами смешивания матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскавы (ККМ), параметрами хиггсовского потенциала и константами связи калибровочных полей составляют 18 параметров, которые не определяются Стандартной Моделью.  $(V - A)$ -структура слабых взаимодействий не является внутренним свойством теории, а в соответствии с экспериментом вносится в модель "руками". Непонятна причина большой разницы в массах фермионов и большая масса топ-кварка ( $m_t = 173$  ГэВ). СМ не полна на концептуальном уровне, и это говорит о том, что нам еще предстоит открыть более фундаментальную физическую теорию. Создаваемые и существующие коллайдеры ТэВ-ных энергий призваны дать ответ о границах применимости СМ и о том, какая "Новая физика" может лежать за ее пределами. Как было отмечено выше, топ-кварк является чрезвычайно тяжелым и при этом точечным объектом одновременно. Это свойство очень необычно, поэтому, многие ученые полагают, что именно изучение свойств топ-кварка и его взаимодействий может быть ключевым в СМ, где отклонения от ее предсказаний проявляются в первую очередь [1]. Изучение одиночного рождения топ-кварка предоставляет в этом плане уникальные возможности.

### **Объект и предмет исследований**

Объектом и предметом исследований диссертации является топ-кварк. Топ-кварк был открыт в 1995 году на коллайдере Tevatron (США) в парном рождении топ и анти-топ кварков, проходящем через сильные взаимодействия. После его экспериментального открытия основными вопросами в физике топ-кварка являются изучение его свойств и исследования сектора топ-кварка СМ на предмет возможных отклонений от ее предсказаний. Наиболее интересными, с этой точки зрения, являются процессы электрослабого одиночного рождения топ-кварка. Исследуя эти процессы мы можем дать ответ о структуре  $Wtb$  вершины и параметре смешивания ККМ матрицы  $V_{tb}$ , возможных аномалий в структуре вершины (например  $(V + A)$  структура или аномальные операторы магнитного типа), провести проверку ряда новых теорий, вплоть до теорий с дополнительными

измерениями, предсказывающих серьезные отклонения именно в электрослабых процессах с рождением топ-кварка (например FCNC процессы с аномальными вершинами  $tcg$ ,  $tug$  и дополнительные векторные или скалярные бозоны  $W'$ ,  $H^\pm$ ), помимо поиска “Новой физики”, исследование этих процессов важно для исследования свойств недавно обнаруженного бозона Хиггса, так как электрослабое рождение топ-кварка имитирует в ряде важных случаев рождение Хиггсовского бозона.

### **Цели и задачи**

Решение этих задач требует максимально точных расчетов и теоретического моделирования исследуемых процессов для конкретных коллайдеров. При этом в феноменологическом анализе процессов проходящих на коллайдере, необходимо учитывать и моделировать все возможные процессы приводящие к тем же конечным состояниям, по которым планируется выделить исследуемый физический эффект. Исследуемые процессы являются редкими и проходят в присутствии большого количества фоновых событий, поэтому экспериментальное исследование таких процессов требует максимальной оптимизации всех этапов анализа. Часть последующих глав посвящена вопросам оптимизации вычислений и различных этапов анализа в применении к экспериментальным исследованиям электрослабого рождения топ-кварка на коллайдерах Теватрон и LHC. Можно сформулировать следующие цели и задачи исследований представленных в диссертации и описанных в каждой главе, соответственно. Первое, проведение феноменологических исследований электрослабого рождения топ-кварка с целью понимания этих процессов и выработки рецептов их экспериментальных исследований. Второе, оптимизация различных этапов экспериментальных исследований с целью снижения неопределенности экспериментальных измерений. Третье, внедрение разработанных методов в экспериментальном поиске электрослабого рождения топ-кварка в эксперименте D0 коллайдера Теватрон. Четвертое, феноменологические и экспериментальные исследования возможных отклонений от предсказаний SM проявляющихся в процессах одиночного рождения топ-кварка.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

На защиту диссертации выносятся следующие положения.

1. Созданный новый метод моделирования процессов электрослабого рождения топ-кварка на адронных коллайдерах позволяет моделировать события на уровне точности, учитывающей следующий за лидирующим порядок теории возмущений.
2. Стратегия экспериментального поиска одиночного рождения топ-кварка и выделение этого процесса из фона определяется моделированием сигнальных и фоновых процессов в рамках предложенного метода.

3. В процессах рождения трех топ-кварков выявлены ранее неизвестные эффекты: большой электрослабый вклад относительно вклада сильных взаимодействий и большая отрицательная интерференция электрослабых и сильных вкладов, приводящая к сокращению основных вкладов. Моделирование показало принципиальную возможность экспериментального открытия процессов рождения трех топ-кварков на модернизированном коллайдере с высокой светимостью HL-LHC.
4. Разработка и внедрение в экспериментальных анализах методики применения нейронных сетей оптимизировали поиск и повысили точность экспериментальных результатов, в частности, измерения сечений процессов в рамках СМ и установленных ограничений на проявления эффектов за рамками СМ.
5. Создание и реализация в экспериментальных анализах универсального метода выбора оптимальных наблюдаемых, основанного на анализе диаграмм Фейнмана, дающих вклад в сигнальные и фоновые процессы, дали понятное физическое объяснение выбора конкретных наблюдаемых и позволили сформировать полный оптимальный набор таких наблюдаемых для экспериментального анализа методом нейронных сетей.
6. Создание нового формата записи смоделированных событий LHEF и дальнейшее его использование сделали этот формат общепринятым стандартом для современных цепочек моделирования коллайдерных экспериментов. Предложение формата HerML для автоматической документации проводимого моделирования жестких процессов и предложение идеи создания базы знаний моделируемых событий MCDB упростило цепочку моделирования коллайдерных экспериментов.
7. Экспериментальное открытие  $t$ - и  $s$ -канальных процессов рождения топ-кварка, измерение сечений этих процессов и параметра  $|V_{tb}|$  матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава, на основе разработанных методик моделирования и оптимизации экспериментального анализа, подтвердили предсказания СМ.
8. Верхние ограничения на параметры, характеризующие возможный вклад аномальных заряженных токов векторного и магнитного типов во взаимодействии топ-кварка с  $W$  бозоном и  $b$ -кварком, полученные на основе феноменологического и экспериментального анализа, составили  $f_V^L > 0.98$ ,  $|f_V^R| < 0.16$ ,  $|f_T^L| < 0.057$  и  $-0.046 < f_T^R < 0.039$  на уровне достоверности 95%.
9. Верхние ограничения на редкие распады топ-кварка, характеризую-

щие возможный вклад нейтральных токов, меняющих аромат кварков (FCNC), во взаимодействии топ-кварка с  $u$ - или  $s$ -кварком и глюоном, полученные на основе феноменологического и экспериментального анализа в эксперименте D0, составили  $\mathcal{B}(t \rightarrow gu) < 2.0 \times 10^{-4}$ ,  $\mathcal{B}(t \rightarrow gc) < 3.9 \times 10^{-3}$  на уровне достоверности 95%.

### **Научная новизна**

Впервые были созданы методы моделирования процессов одиночного рождения топ-кварка на уровне точности учитывающей следующие порядки теории возмущений. На основе моделирования проведено феноменологическое исследование сигнальных и фоновых процессов электрослабого, одиночного рождения топ-кварка. Впервые были детально исследованы процессы рождения трех топ-кварков и обнаружены: значительный электрослабый вклад в эти процессы, на уровне вклада сильных взаимодействий, значительный вклад отрицательной интерференции электрослабых и сильных вкладов, и эффект сокращения этих вкладов за счет отрицательной интерференции. На этапе зарождения таких методов, был обнаружен высокий потенциал применения метода нейронных сетей и разработаны методы применения нейронных сетей в экспериментальном анализе жестких процессов проходящих на коллайдерах. Был сформулирован метод формирования пространства наблюдаемых для нейронных сетей, метод основан на анализе диаграмм Фейнмана дающих вклад в сигнальные и фоновые процессы. Были разработаны методы унификации различных этапов моделирования жестких процессов на коллайдерах, позволивших сильно упростить цепочку моделирования и повысить достоверность правильного использования смоделированных образцов событий. Разработанные методы были применены в эксперименте D0 коллайдера Теватрон и впервые экспериментально были обнаружены процессы  $t$ - и  $s$ -канального рождения одиночного топ-кварка, измерены их сечения и параметр  $|V_{tb}|$  матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава. Разработаны методы поиска отклонений от предсказаний СМ проявляющихся в заряженных токах  $Wtb$  взаимодействий и нейтральных токах FCNC  $tqg$ . Проведен первый прямой поиск таких отклонений в экспериментах D0 и CMS (коллайдера LHC) и получены экспериментальные ограничения на такие отклонения от предсказаний СМ.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Созданные Монте-Карло генераторы событий электрослабого рождения топ-кварка и возможных отклонений от предсказаний СМ были использованы во всех экспериментальных анализах одиночного рождения топ-кварка в эксперименте D0 и в ряде анализов в эксперименте CMS. Разработанные феноменологически методы исследования таких процессов были напрямую внедрены в экспериментальных анализах экспериментов

D0 и CMS. Разработанные методы применения нейронных сетей и выбора оптимальных наблюдаемых стали частью экспериментальных исследований в D0 и CMS и привели к важным экспериментальным результатам связанным с открытием одиночного рождения топ-кварка и ограничениям на возможные отклонения от предсказаний СМ в этих процессах. Разработанные методы и экспериментальные результаты используются для дальнейших измерений в рамках СМ и поисках отклонений от предсказаний СМ.

### **Методология и методы исследований**

Методология феноменологических исследований основывается на вычислениях в рамках квантовой теории поля и проведении всех необходимых этапов моделирования исследуемых процессов методом Монте-Карло. В основе проведенных вычислений лежит программный пакет символьных и численных вычислений CompHEP [2,3], для моделирования жестких процессов, пакет RUTHIA [4] для моделирования адронизации и фрагментации кварков и излучений из начальных и конечных линий, и ряд других программных пакетов отмеченных в соответствующих главах. Все экспериментальные исследования были проведены на основе требований и методов принятых в соответствующих коллаборациях, и описаны в соответствующих главах диссертации.

### **Личный вклад автора**

Все представленные результаты были получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

### **Достоверность**

Достоверность полученных результатов обеспечивается строгостью используемых методов квантовой теории поля, современных статистических и экспериментальных методов прошедших многостороннюю проверку и одобрение мирового научного сообщества. Все использованные программы прошли проверку различными методами, сравнение с доступными аналогами или независимыми результатами, и получили одобрение в экспертном сообществе. Достоверность результатов подтверждается одобрением рецензентов на этапе публикации методов и результатов в ведущих научных журналах.

### **Апробация работы**

Разработанные методы и результаты представляемые к защите многократно представлялись и обсуждались на различных международных конференциях, в частности, на конференциях Moriond'98, AINENP'98, ACAT'2000, QFTHEP-97,99,2000,2001,2003,2004,2010,2011,2013,2015,2017, QUARKS-2016,2018, Сессия-конференция Секции ядерной физики Отделения физических наук РАН в 2013, 2016, 2020 годах, рабочих совещаниях международных коллабораций D0 и CMS, и ряде других конференций.



Все экспериментальные результаты прошли многократную проверку в экспертной среде международных экспериментальных коллабораций D0 и CMS.

Разработанные методы и полученные результаты используются в последующих исследованиях проводимых в экспериментах на коллайдере LHC и для оценки ожидаемых результатов на будущих коллайдерах HL-LHC, HE-LHC, FCC.

### Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка цитированной литературы. Объем диссертации составляет 273 страницы, включая 113 рисунков и 77 таблиц. Список литературы содержит 274 наименования.

## Содержание Диссертации

**Во введении** содержится краткое описание темы исследований, обоснование актуальности и формулировка целей и задач исследований описанных в диссертации. Описана структура диссертации и положения выносимые на защиту. Изложены научная новизна, практическая значимость, достоверность и апробация полученных результатов.

**Первая глава** посвящена феноменологическим исследованиям электрослабого рождения топ-кварка на адронных коллайдерах. Описаны основные свойства топ-кварка, процессы рождения и распада топ-кварка в рамках SM, публикации по теме диссертации (1.,2.). Детально представлен разработанный метод моделирования одиночного рождения топ-кварка с точностью, учитывающей радиационные поправки, публикация по теме диссертации (3.). Проведено полное моделирование процессов сигнала и фона имеющих конечную сигнатуру аналогичную электрослабому рождению топ-кварка, публикация по теме диссертации (4.). Представлены феноменологические исследования процессов рождения трех топ-кварков, являющихся топологически схожими с процессами одиночного рождения топ-кварка, публикация по теме диссертации (5.).

В секции 1.1 представлено описание лагранжиана взаимодействий топ-кварка в рамках SM:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{SM}} = & -\frac{y_t}{\sqrt{2}} \bar{t}tH - g_s \bar{t}\gamma^\mu t^a t G_\mu^a - \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_{q=d,s,b} \frac{V_{tq}}{2} \bar{t}\gamma^\mu (1 - \gamma_5) q W_\mu^+ - Q_t e \bar{t}\gamma^\mu t A_\mu \\ & - \frac{g}{2 \cos \vartheta_W} \bar{t}\gamma^\mu \left[ \left( \frac{1}{2} - 2Q_t \sin^2 \vartheta_W \right) - \frac{1}{2} \gamma_5 \right] t Z_\mu + \text{h.c.} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $g_s$ ,  $e$  и  $g$  константы связи сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий,  $Q_t = +2/3$ ,  $\vartheta_W$  – угол Вайнберга ( $\sin^2 \vartheta_W \approx 0.23$  [5]),  $V_{tq}$  –

	$\sigma_{\text{NLO}}$ (пб)	$q\bar{q} \rightarrow tt$	$gg \rightarrow tt$
Tevatron ( $\sqrt{s} = 1.8$ ТэВ $p\bar{p}$ )	$4.87 \pm 10\%$	90%	10%
Tevatron ( $\sqrt{s} = 1.96$ ТэВ $p\bar{p}$ )	$7.08 \pm 5\%$	85%	15%
LHC ( $\sqrt{s} = 7$ ТэВ $pp$ )	$165 \pm 6\%$	25%	75%
LHC ( $\sqrt{s} = 8$ ТэВ $pp$ )	$234 \pm 4\%$	20%	80%
LHC ( $\sqrt{s} = 14$ ТэВ $pp$ )	$920 \pm 5\%$	10%	90%

Таблица 1: Теоретические сечения парного рождения топ-кварков при различных энергиях [6].

элемент матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава.

$$y_t = \sqrt{2} \frac{m_t}{v_{ew}}, \quad v_{ew} \approx 246 \text{ ГэВ} \quad (2)$$

где  $v_{ew}$  - электрослабый масштаб - вакуумное среднее поля Хиггса.

Описаны процессы парного и одиночного рождения топ-кварка, характерные диаграммы представлены на рисунках 1,2.

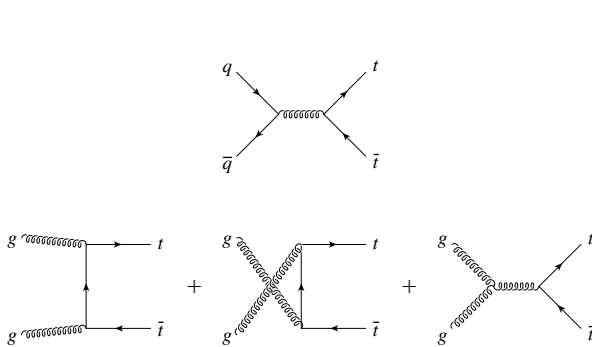


Рис. 1: Характерные диаграммы парного рождения топ кварков

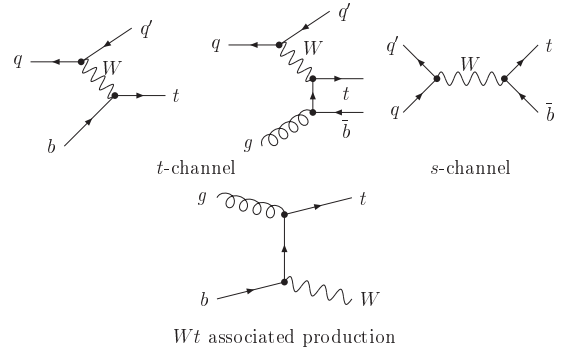


Рис. 2: Характерные диаграммы одиночного рождения топ кварков

в таблицах 1 и 2 представлены теоретические сечения этих процессов при различных энергиях.

	s channel	t channel	$Wt$
Tevatron [7] ( $\sqrt{s} = 1.96$ TeV $p\bar{p}$ , пб)	$1.04 \pm 4\%$	$2.26 \pm 5\%$	$0.14 \pm 20\%$
LHC [8, 9] ( $\sqrt{s} = 7$ TeV $pp$ , пб)	$4.6 \pm 5\%$	$64 \pm 4\%$	$15.6 \pm 8\%$
LHC [10] ( $\sqrt{s} = 8$ TeV $pp$ , пб)	$5.55 \pm 4\%$	$87.2_{-3}^{+4}\%$	$11.1 \pm 7\%$
LHC [11] ( $\sqrt{s} = 14$ TeV $pp$ , пб)	$12 \pm 6\%$	$243 \pm 4\%$	$75 \pm 10\%$

Таблица 2: Теоретические сечения процессов одиночного рождения топ-кварка при различных энергиях.

В секции 1.2 приведены основные свойства топ-кварка связанные с такими характеристиками, как масса, ширина и каналы распада, юкавская

константа связи и параметры матрицы смешивания в секторе топ-кварка СМ.

В секции 1.3 описывается метод моделирования процессов одиночного рождения топ-кварка в эффективном NLO приближении учитывающем поправки следующих порядков теории возмущений и позволяющем моделировать события с правильными кинематическими распределениями, на соответствующем уровне точности. Предложенный метод позволяет решить такие проблемы, как появление событий с отрицательными весами и двойной учет ряда фейнмановских диаграмм. Продемонстрировано различие в результатах при использовании разных способов моделирования. Проведена проверка получаемых распределений путем сравнения с точными NLO вычислениями наиболее важных дифференциальных сечений, приведенных на рисунках 3 и 4. Приведенные точные NLO вычисления позволяют получить форму распределений дифференциальных сечений, но не позволят моделировать события, что критически важно для моделирования реальных экспериментов. С помощью разработанного метода были приготовлены различные образцы событий рождения одиночного топ-кварка в  $t$ - и  $s$ -канальных процессах для коллайдеров Тэватрон и ЛHC. Созданные события были использованы научными группами Коллабораций D0 и CMS в экспериментальных анализах

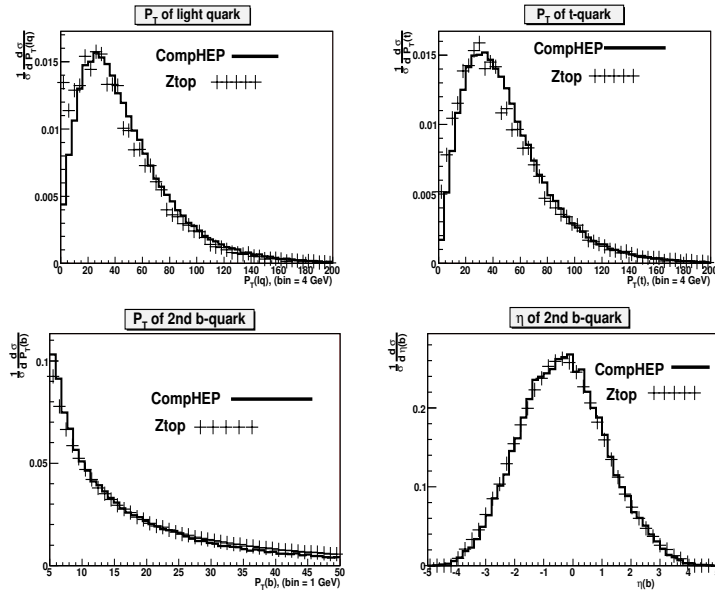


Рис. 3: Распределения по поперечному импульсу и псевдобыстроте конечных кварков в эффективном NLO-приближении ("SingleTop") и в точных NLO вычислениях (программа ZTOP [12]) для коллайдера Тэватрон.

В секции 1.4 описано моделирование процессов являющихся фоновыми к одиночному рождению топ-кварка. Рассмотрены фоновые процессы

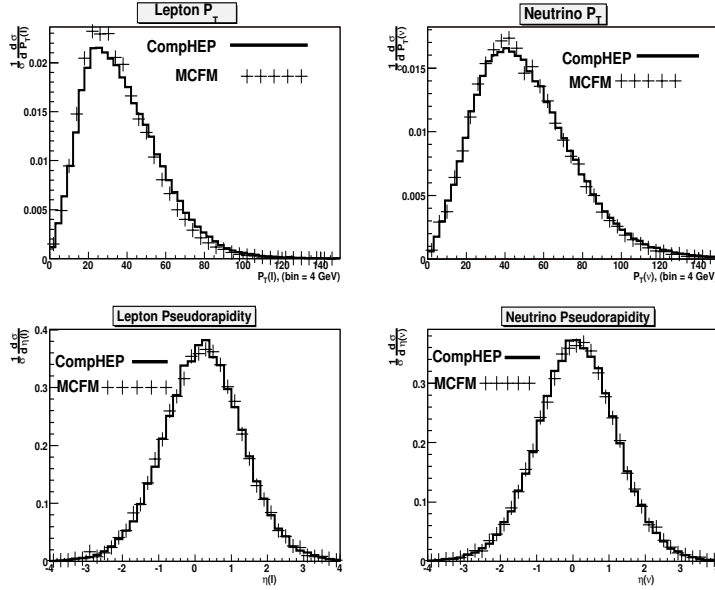


Рис. 4: Распределения по поперечному импульсу и псевдобыстроте лептона и нейтрино из распавшегося  $t$ -кварка в эффективном NLO-приближении ("SingleTop") и в точном NLO вычислении (программа MCFM [13]) для коллайдера Теватрон.

двух типов: неприводимого (имеющего точно такое-же конечное состояние) и приводимого (отличное конечное состояние, но может давать вклад в сигнальный отбор с определенной вероятностью). Посчитаны необходимые сечения и на основе моделирования предложен набор обрезаний для классического метода анализа, на основе прямоугольных кинематических обрезаний доступных наблюдаемых. Проведена оценка ожидаемого количества событий сигнала и фона, после применения предложенных обрезаний.

В секции 1.5 представлен феноменологический анализ рождения трех топ-кварков. Эти процессы топологически схожи с процессами одиночного рождения топ-кварка, но существенно более редкие и практически не рассматривались ранее. Обнаружены интересные эффекты связанные с большим вкладом электрослабых диаграмм, существенной отрицательной интерференции электрослабых и глюонных диаграмм, и конечное сокращение этих вкладов, что может быть использовано для поиска отклонений от предсказаний СМ. Показана возможность экспериментального обнаружения процессов рождения трех топ-кварков на модернизированном коллайдере HL-LHC. Вычисленные сечения процессов рождения трех топ-кварков при энергии  $\sqrt{s} = 14$  ТэВ приведены в таблице 3.

**Вторая глава** посвящена разработанным методам оптимизации экспериментального анализа данных на адронных коллайдерах. Основные результаты опубликованы в работах (6.-11.) основного списка публикаций по теме диссертации. В данной главе описан ряд новых методов позволяющих

Таблица 3: Полные сечения различных процессов рождения трех топ-кварков при энергии протон-протонных столкновений  $\sqrt{s} = 14$  ТэВ. Применено требование  $P_T^{q,b} > 10$  ГэВ.

Процесс	Сечение [пб]	$\delta\sigma_Q$ , %	$\delta\sigma_{PDF}$ , %
$p, p \rightarrow W^-, t, t, \bar{t}$	6.8e-04	13	6
$p, p \rightarrow W^+, t, \bar{t}, \bar{t}$	6.8e-04	13	6
$p, p \rightarrow q', t, t, \bar{t}$	2.7e-04	12	14
$p, p \rightarrow q', t, \bar{t}, \bar{t}$	1.1e-04	13	4
$p, p \rightarrow \bar{b}, t, t, \bar{t}$	1.1e-04	35	13
$p, p \rightarrow b, t, \bar{t}, \bar{t}$	4.9e-05	35	4
Сумма $p, p \rightarrow X, t, t (t), t$	1.9e-03	15	7

повысить эффективность экспериментальных исследований проводимых на коллайдерах. Точность экспериментальных измерений определяется систематическими и статистическими ошибками результата. Статистическая ошибка определяется не только характеристиками коллайдера и детектора, но и эффективностью методов отбора событий. Систематическая ошибка состоит из двух основных вкладов, первый связан с характеристиками детектора и программами реконструкции, вторая часть ошибок связана с теоретическими вычислениями процессов проходящих на коллайдерах.

Секция 2.1. На первом этапе была разработана методология применения нейронных сетей в анализе данных коллайдерных экспериментов, позволившая существенно повысить эффективность отбора и, тем самым, уменьшить статистическую ошибку и часть систематической ошибки получаемых результатов. Разработаны методы применения искусственных нейронных сетей в экспериментальном поиске электрослабого рождения топ-кварка [14–19].

Секция 2.2. На втором этапе, был разработан новый универсальный метод, позволяющий выбрать оптимальный набор кинематических переменных, отражающих полный набор кинематических различий между процессами сигнала и фона. Метод позволяет дать понятное физическое объяснение выбора той или иной кинематической переменной. Метод выбора оптимальных наблюдаемых является универсальным и может быть применен вместе с различными современными методами многомерного статистического анализа. Одним из наиболее эффективных таких методов является метод нейронных сетей, позволяющий учитывать различные многомерные корреляций в пространстве кинематических переменных. В контексте применения нейронных сетей была продемонстрирована эффективность предложенного подхода [16, 17, 19]. Практическая демонстрация метода проведена для задачи поиска бозона Хиггса на коллайдере Теватрон [20, 21] и

для задачи электрослабого рождения топ-кварка [22].

Секция 2.3. Заключительная часть предложенных методов оптимизации анализа связана с унификацией различных этапов моделирования процессов проходящих на коллайдерах, методом Монте-Карло. Был предложен универсальный формат записи смоделированных партонных событий LHEF, в настоящий момент признанный стандартом в цепочке моделирования для коллайдеров [23–27]. Далее был предложен и разработан формат документирования процесса моделирования HerML, позволяющий повысить достоверность используемых смоделированных событий, за счет автоматической документации всех параметров моделирования [28, 29]. На последнем шаге, была предложена и внедрена идея публичной базы знаний смоделированных событий MCDB [28, 30–32]. Предложенные методы позволяют упростить цепочку моделирования процессов проходящих на коллайдерах, и как следствие, приводят к снижению теоретических неопределенностей получаемых экспериментальных результатов.

**Третья глава** описывает применение разработанных методов анализа в задаче поиска электрослабого рождения топ-кварка, в рамках CM, в эксперименте D0 коллайдера Теватрон. Основные результаты опубликованы в работах (12.-25.) основного списка публикаций по теме диссертации.

Секция 3.1. Первые результаты поиска одиночного рождения топ-кварка, в пером запуске (Run I) коллайдера Теватрон при энергии протон-антипротонных столкновений  $\sqrt{s} = 1.8$  ТэВ, были получены классическими методами анализа [33–36]

Секция 3.2. Применение разработанных методов анализа на основе нейронных сетей позволило улучшить результаты классического анализа примерно в два раза [37–40], на том же наборе данных и моделировании (описанном в первой главе).

Секция 3.3.1. Далее проводился анализ данных второго запуска коллайдера Теватрон (Run II) при энергии  $\sqrt{s} = 1.96$  ТэВ [41–50].

Секция 3.3.2. Увеличение светимости коллайдера позволило провести первые наблюдения t-канального рождения одиночного топ-кварка [51, 52] и первые прямые измерения [51, 53] элемента  $V_{tb}$  матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава.

Секции 3.3.3, 3.3.4. Дальнейший набор экспериментальной статистики позволил заявить об экспериментальном открытии t-канального электрослабого рождения топ-кварка [54, 55] измерении сечения этого процесса [56, 57] и параметра  $|V_{tb}|$ .

Секция 3.3.5. Чувствительность эксперимента к s-канальному рождению одиночного топ-кварка значительно ниже и первое экспериментальное наблюдение такого процесса состоялось только в 2013 году [58], а экспериментальное открытие состоялось только после объединения данных двух

экспериментов D0 и CDF [59, 60].

Секция 3.4. Заключительные результаты измерений Теватрон представлены на рисунках 5 и 6. Измеренные значения для полной статистики набранных данных по каждому эксперименту и объединенные по результатам двух экспериментов приведены на рисунке 5. Предсказанные в рамках СМ значения и их ошибки приведены с NLO+NNLL точностью [8,9]. На основании полученных дискриминантов были построены соответствующие плотности вероятности и измерен параметр  $|V_{tb}|$  матрицы ККМ по результатам объединения данных экспериментов D0 и CDF. На рисунке 6 показаны полученные плотности вероятности для значения параметра  $|V_{tb}|^2$  для двух случаев, в предположении значений этого параметра (плоское априорное распределение) в диапазоне  $[0, \infty]$  и ограниченный рамками СМ диапазон  $[0, 1]$ . Измеренные значения, для первого диапазона, и нижние ограничения, для второго диапазона, показаны на рисунке 6. Проведенные измерения s-канального процесса остаются наиболее точными, на сегодняшний день, так как этот процесс подавлен на коллайдере ЛНС, в силу кварк-кваркового начального состояния. Все измерения согласуются с предсказаниями СМ.

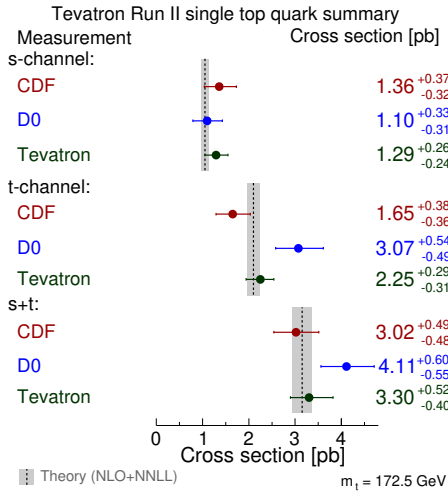


Рис. 5: Измеренные сечения s-, t-канальных процессов и их суммы для полной статистики экспериментов D0 и CDF, и для комбинации результатов двух экспериментов с общими измерениями коллайдера Теватрон. Показаны теоретические предсказания СМ с NLO+NNLL точностью и соответствующей ошибкой.

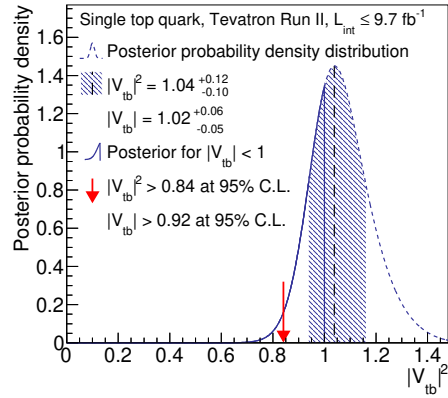


Рис. 6: Измеренная плотность вероятности для значений параметра  $|V_{tb}|^2$  в предположении области значений  $[0, \infty]$  и ограниченная рамками СМ в диапазоне  $[0, 1]$ . Приведены измеренные значения для первого случая, и нижние ограничения на 95% уровне достоверности для второго случая.

**Четвертая глава** посвящена поискам отклонений от предсказаний СМ проявляющихся в процессах одиночного рождения топ-кварка. Рассмотрены два возможных модельно-независимых отклонения, проявляющихся в аномальных заряженных токах во взаимодействии топ-кварка с  $W$  бозоном и  $b$ -кварком, и проявление нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействии топ-кварка с  $u$ - или  $s$ -кварком и глюоном (FCNC). Представлены результаты феноменологического рассмотрения данных отклонений от предсказаний СМ и экспериментальные результаты прямого поиска таких возможных отклонений в экспериментах D0 и CMS. Экспериментальные исследования были проведены на основе результатов феноменологического анализа и созданного моделирования соответствующих сигнальных процессов. Статистически значимых отклонений от предсказаний СМ экспериментально не обнаружено и были установлены верхние ограничения на соответствующие параметры характеризующие вклад “новой физики”. Основные результаты опубликованы в работах (26.-34.) основного списка публикаций по теме диссертации.

В секции 4.1 представлена феноменология модельно-независимого теоретического описания возможных отклонений от предсказаний СМ в секторе топ-кварка. По историческим причинам, при анализе экспериментальных данных широко используется эффективный лагранжиан в унитарной калибровке следующего вида:

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{anom} = & \left. \begin{aligned}
& -\frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{q=u,c,t} \bar{t} (v_{tq}^H + \gamma_5 a_{tq}^H) q H \\
& -\frac{g}{\sqrt{2}} \bar{t} \gamma^\mu (f_V^L P_L + f_V^R P_R) b W_\mu^+ \\
& -\frac{g}{2 \cos \vartheta_W} \sum_{q=u,c,t} \bar{t} \gamma^\mu (v_{tq}^Z - a_{tq}^Z \gamma_5) q Z_\mu \\
& -g_s \sum_{q=u,c,t} \frac{\kappa_{tq}^g}{\Lambda} \bar{t} \sigma^{\mu\nu} t^a (f_{tq}^g + i h_{tq}^g \gamma_5) q G_{\mu\nu}^a \\
& -\frac{g}{\sqrt{2}} \bar{t} \frac{\sigma^{\mu\nu} \partial_\nu W_\mu^+}{M_W} (f_T^L P_L + f_T^R P_R) b \\
& -e \sum_{q=u,c,t} \frac{\kappa_{tq}^\gamma}{\Lambda} \bar{t} \sigma^{\mu\nu} (f_{tq}^\gamma + i h_{tq}^\gamma \gamma_5) q A_{\mu\nu} \\
& -\frac{g}{2 \cos \vartheta_W} \sum_{q=u,c,t} \frac{\kappa_{tq}^Z}{\Lambda} \bar{t} \sigma^{\mu\nu} (f_{tq}^Z + i h_{tq}^Z \gamma_5) q Z_{\mu\nu}
\end{aligned} \right\} + \text{h.c.} \quad (3)
\end{aligned}$$

где  $g$  - это константа взаимодействия калибровочной группы слабого изоспина  $SU(2)_L$ ,  $P_{L,R} = (1 \mp \gamma_5)/2$ ,  $\sigma_{\mu\nu} = i/2(\gamma_\mu \gamma_\nu - \gamma_\nu \gamma_\mu)$ , тензоры напряжен-



ности полей определены как обычно ( $G_{\mu\nu}^q = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a, \dots$ );  $\Lambda$  - масштаб новой физики порядка нескольких ТэВ; аномальные константы  $\kappa$  обычно полагают реальными числами, а “относительные” константы  $f$  и  $h$  в общем случае рассматриваются как комплексные числа с нормировкой:

$$|f|^2 + |h|^2 = 1$$

Напомним, что в рамках СМ значения параметров из лагранжиана (3) следующие:

$$\left. \begin{aligned} v_{tt}^H &= y_t = \sqrt{2} \frac{m_t}{v_{ew}}, & a_{tt}^H &= 0, \\ v_{tq}^H &= a_{tq}^H = 0, & q &\neq t \\ f_V^L &= \frac{V_{tq}}{2} & f_V^R &= f_T^L = f_T^R = 0 \\ v_{tt}^Z &= \frac{1}{2} - 2Q_t \sin^2 \vartheta_W, & a_{tt}^Z &= \frac{1}{2} \\ v_{tq}^Z &= a_{tq}^Z = 0, & q &\neq t \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В таком подходе экспериментальные результаты представляются в виде ограничений на величины аномальных констант взаимодействия, стоящих перед соответствующими членами эффективного лагранжиана. В ряде случаев полученные ограничения перевыражаются через пределы на вероятности определенных редких распадов  $t$ -кварка.

В секции 4.2 проведен феноменологический анализ и моделирование отклонений от предсказаний СМ во взаимодействии топ-кварка с  $W$  бозоном и  $b$ -кварком [61], показана принципиальная чувствительность к этим отклонениям в экспериментах на коллайдерах Теватрон и ЛНС.

В секции 4.3 представлен экспериментальный поиск таких отклонений в эксперименте D0 и найдены первые прямые ограничения на параметры характеризующие аномальные структуры во взаимодействии топ-кварка с  $W$  бозоном и  $b$ -кварком [62–65]. Полученные экспериментальные результаты поиска аномальных  $Wtb$  взаимодействий в эксперименте D0 приведены в таблице 4. Полученные скомбинированные ограничения на аномальные параметры можно выразить в виде ограничений на коэффициенты при EFT операторах. Соответствующие ограничения составили:  $|C_{\phi q}^{(3,3+3)}| < 14.7$ ,  $|C_{\phi\phi}^{33}| < 18.0$ ,  $|C_{dW}^{33}| < 2.5$ , и  $|C_{uW}^{33}| < 4.1$ , предполагая масштаб  $\Lambda = 1$  ТэВ.

В секции 4.4 представлен поиск таких отклонений в эксперименте CMS коллайдера ЛНС. Экспериментальные ограничения на возможный вклад таких отклонений был существенно улучшен [66]. Полученные одномерные ограничения на аномальные параметры приведены в таблице 5. Полученные контуры ограничений для трехмерных сценариев, при одновременной вариации трех аномальных параметров показаны на рисунке 7.

Таблица 4: Верхние ограничения на аномальные параметры соответствующие 95% уровню достоверности. Показаны измерения в анализе поляризации  $W$  бозона в распаде топ-кварка в предположении  $f_V^L = 1$ , прямые измерения в одиночном рождении топ-кварка, и скомбинированные измерения на основании двух анализов.

Сценарий	только $W$ поляризация	только одиночный топ-кварк	объединенные измерения
$ f_V^R ^2$	0.62	0.89	0.30
$ f_T^L ^2$	0.14	0.07	0.05
$ f_T^R ^2$	0.18	0.18	0.12

Таблица 5: Одномерные ограничения на аномальные параметры, полученные в различных рассматриваемых сценариях. Показаны ограничения найденные при объединении данных набранных при энергии  $\sqrt{s} = 7$  и 8 ТэВ. Первый столбец показывает аномальные параметры одновременно варьируемые в статистическом анализе распределений BNN. Остальные столбцы показывают верхние ( $<$ ) и нижние ( $>$ ) ограничения на соответствующий аномальный параметр в конкретном сценарии. Приведены измеренные (ожидаемые) ограничения на 95% уровне статистической достоверности.

Сценарий	$f_V^L >$	$ f_V^R  <$	$ f_T^L  <$	$< f_T^R <$
$\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ				
$(f_V^L, f_V^R)$	0.97 (0.92)	0.28 (0.31)		
$(f_V^L, f_T^L)$	0.92 (0.92)		0.10 (0.14)	
$(f_V^L, f_T^R)$	0.94 (0.93)			-0.046 (-0.050) 0.046 (0.041)
$(f_V^L, f_T^L, f_T^R)$	0.98 (0.97)		0.057 (0.10)	-0.049 (-0.051) 0.048 (0.046)
$(f_V^L, f_V^R, f_T^R)$	0.98 (0.97)	0.16 (0.22)		-0.049 (-0.049) 0.039 (0.037)

В секции 4.5 проведено моделирование процессов одиночного рождения топ-кварков в нейтральных токах меняющих аромат кварков проходящих во взаимодействии топ-кварка с  $u$ - или  $s$ -кварком через обмен глюоном (FCNC) [67]. Характерные диаграммы Фейнмана представлены на рисунке 8.

В секции 4.6 феноменологические исследования FCNC были внедрены в экспериментальный поиск FCNC в эксперименте D0 коллайдера Теватрон. Найдены верхние ограничения на параметры характеризующие такие аномальные взаимодействия [68, 69]. Измеренные верхние ограничения приведены в таблице 6 в интерпретации верхних ограничений на сечения, ограничений на аномальные параметры  $\kappa_{tqf}/\Lambda$  и в виде верхних ограничений на вероятности (бренчинги) редких распадов топ-кварка в глюон и  $s$ - или  $u$ -кварк.

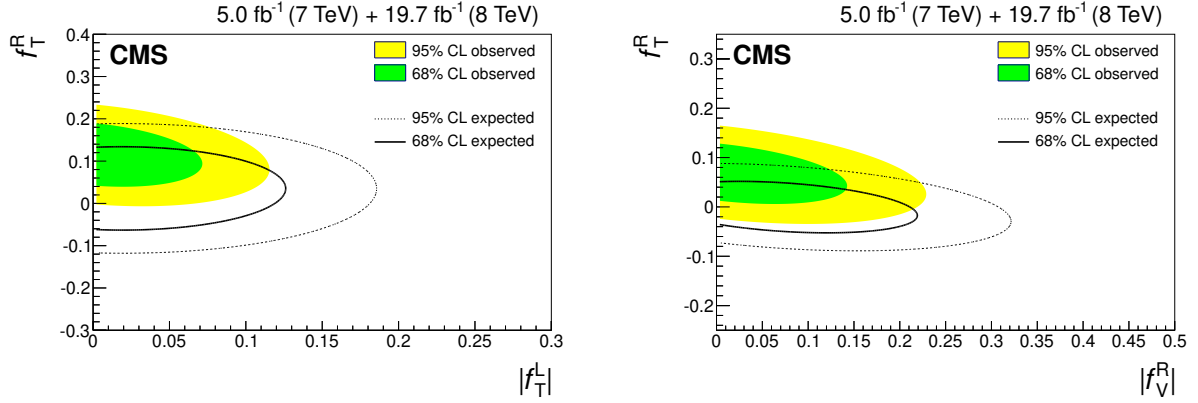


Рис. 7: Контуры ограничений на аномальные параметры в трехмерных сценариях  $(f_V^L, f_T^L, f_T^R)$  и  $(f_V^L, f_V^R, f_T^R)$ , скомбинированные на данных  $\sqrt{s} = 7$  и 8 ТэВ. Для получения двухмерных контуров было проведено интегрирование по значениям третьего параметра. Показаны ожидаемые и измеренные ограничения на соответствующем уровне статистической достоверности.

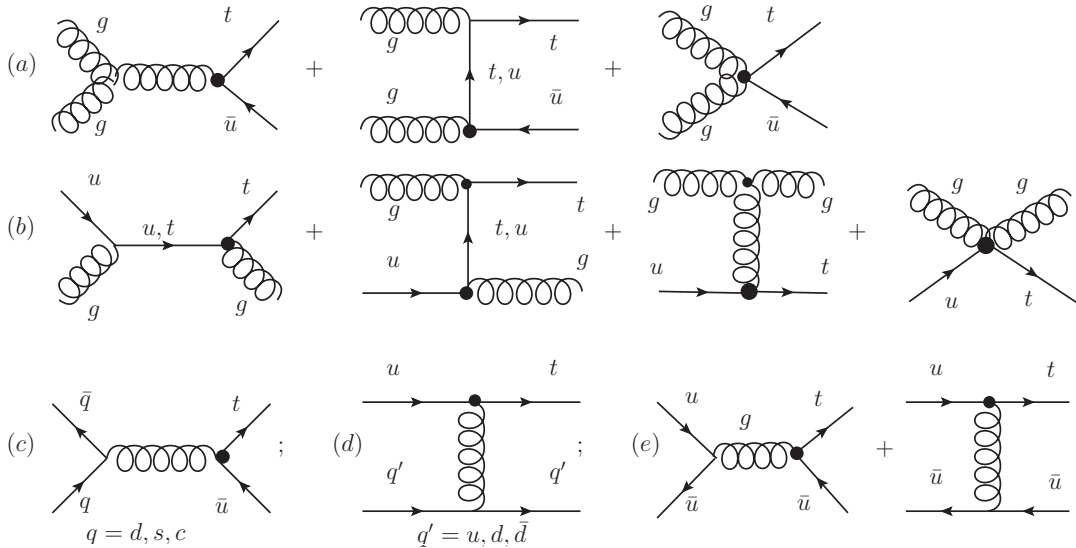


Рис. 8: Характерные диаграммы Фейнмана для процесса одиночного рождения топ-кварка в  $tug$  FCNC взаимодействиях.

Таблица 6: Измеренные в эксперименте D0 на статистике  $2.3 \text{ fb}^{-1}$  верхние ограничения на аномальные FCNC взаимодействия, представленные в виде ограничений на сечения соответствующих процессов, в виде ограничений на аномальные константы связи, и в виде ограничений на соответствующие редкие распады топ-кварка. Числа соответствуют 95% уровню достоверности.

	$tgu$	$tgc$
Сечения	0.20 пб	0.27 пб
$\kappa_{tgf}/\Lambda$	0.013 ТэВ $^{-1}$	0.057 ТэВ $^{-1}$
$\mathcal{B}(t \rightarrow fg)$	$2.0 \times 10^{-4}$	$3.9 \times 10^{-3}$

**В заключении** сформулированы основные полученные результаты, представленные в диссертации.

1. Создан метод моделирования процессов электрослабого рождения топ-кварка на адронных коллайдерах, учитывающий поправки следующего за лидирующим порядком теории возмущений. Созданное моделирование было использовано во всех анализах одиночного рождения топ-кварка в эксперименте D0 коллайдера Теватрон и в ряде анализов в эксперименте CMS коллайдера LHC.
2. На основе моделирования сигнальных и фоновых процессов, проведен феноменологический анализ одиночного рождения топ-кварка и выработаны основные принципы экспериментального поиска таких процессов, внедренные в анализ данных эксперимента D0.
3. Проведено моделирование и феноменологическое исследование процессов рождения трех топ-кварков, обнаружены ранее неизвестные эффекты в этих процессах, в частности, большой электрослабый вклад, сравнимый с вкладом сильных взаимодействий, большая отрицательная интерференция электрослабых и сильных вкладов и эффект сокращения основных вкладов за счет отрицательной интерференции. Показана принципиальная возможность экспериментального открытия таких процессов на модернизированном коллайдере HL-LHC.
4. Разработана и внедрена в экспериментальных анализах методика применения нейронных сетей, позволяющая существенно повысить точность экспериментального результата. Нейронные сети позволяют наиболее эффективно учитывать корреляции между наблюдаемыми, и за счет этого, наиболее точно выделять события сигнала из фона. Применение разработанных методов в эксперименте D0 позволило в Run I достичь точности экспериментальной регистрации одиночного рождения топ-кварка, сравнимой с точностью параллельного эксперимента CDF, имевшего дополнительный вершинный детектор, резко увеличивающий эффективность выделения событий с топ-кварком, в эксперименте D0 в Run I такая часть детектора не была реализована.
5. Разработан и внедрен в экспериментальных анализах универсальный метод выбора оптимальных наблюдаемых, основанный на анализе диаграмм Фейнмана, дающих вклад в сигнальные и фоновые процессы. Метод позволил дать понятное физическое объяснение выбора конкретных наблюдаемых и сформировать полный оптимальный набор таких наблюдаемых для экспериментального анализа методом нейронных сетей.

6. Разработаны и внедрены методы унификации и оптимизации цепочки моделирования жестких процессов проходящих на коллайдерах. В частности, предложен формат LHEF, позволяющий унифицировать запись событий, полученных при моделировании, и ставший общепринятым стандартом для современных цепочек моделирования коллайдерных экспериментов. Предложен универсальный формат HepML для автоматической документации моделирования. Предложена идея создания базы знаний моделируемых событий MCDB. Все предложенные методы оптимизации были реализованы в различных проектах. Предложенные методы позволили упростить цепочку моделирования коллайдерных экспериментов и, как следствие, снизить теоретические неопределенности получаемых экспериментальных результатов.
7. Феноменологически разработанные методы анализа, моделирование и методы оптимизации были поэтапно внедрены в экспериментальный поиск одиночного рождения топ-кварка в эксперименте D0 коллайдера Теватрон. По мере набора полной экспериментальной статистики в течении Run I и II эксперимента D0, были экспериментально открыты t- и s-канальные процессы рождения одиночного топ-кварка, измерены сечения этих процессов и параметр  $|V_{tb}|$  матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава. Заключительные, наиболее точные, результаты измерений составили: сечение s-канального процесса  $1.29^{+0.26}_{-0.24}$  пб, сечение t-канального процесса  $2.25^{+0.29}_{-0.31}$  пб, и  $|V_{tb}| = 1.02^{+0.06}_{-0.05}$ . Результаты измерений согласуются с предсказаниями СМ.
8. Проведены феноменологические и экспериментальные исследования возможных отклонений от предсказаний СМ во взаимодействии топ-кварка с W бозоном и b-кварком. Представлены результаты феноменологических проявлений таких отклонений. Сформулированные рекомендации и моделирование таких отклонений были напрямую внедрены в экспериментальный поиск, в эксперименте D0, а затем в эксперименте CMS. Статистически значимых отклонений от предсказаний СМ не обнаружено, установлены верхние ограничения на параметры, характеризующие вклад аномальных заряженных токов векторного и магнитного типов. Наиболее жесткие ограничения эксперимента D0 на безразмерные константы аномальных взаимодействий составили:  $|f_V^R| < 0.55$ ,  $|f_T^L| < 0.22$  и  $|f_T^R| < 0.35$  на 95% уровне достоверности. Наиболее жесткие ограничения эксперимента CMS составили:  $f_V^L > 0.98$ ,  $|f_V^R| < 0.16$ ,  $|f_T^L| < 0.057$  и  $-0.046 < f_T^R < 0.039$  на уровне достоверности 95%.

9. Проведено моделирование и экспериментальный поиск нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействии топ-кварка с  $u$ - или  $s$ -кварком и глюоном. Проведенный поиск в эксперименте D0 не выявил статистически значимых отклонений от предсказаний СМ, установлены верхние ограничения на параметры, характеризующие нейтральные токи FCNC, наиболее жесткие полученные ограничения на константы взаимодействий этих токов с глюонами составили:  $\kappa_{tgu}/\Lambda < 0.013 \text{ ТэВ}^{-1}$ ,  $\kappa_{tgc}/\Lambda < 0.057 \text{ ТэВ}^{-1}$ . Эти ограничения, выраженные в терминах брэнчингов редких распадов топ-кварка, составили:  $\mathcal{B}(t \rightarrow gu) < 2.0 \times 10^{-4}$ ,  $\mathcal{B}(t \rightarrow gc) < 3.9 \times 10^{-3}$ .

**В разделе Благодарности** автор диссертации благодарит научного консультанта докторской диссертации д.ф.-м.н., профессору, член.-корр. РАН Эдуарда Эрнстовича Бооса за полученные знания, помощь в постановке задач, постоянную поддержку и возможность проводить совместные исследования. Выражает глубокую благодарность коллегам из НИИЯФ МГУ, и коллегам в коллаборациях D0 и CMS, за глубокие научные обсуждения, всестороннюю поддержку и саму возможность проводить совместные исследования по таким актуальным темам. Автор благодарен за финансовую поддержку проведенных исследований полученную в рамках грантов РФФИ 16-12-10280, 22-12-00152 и поддержку в рамках Научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова "Фундаментальные и прикладные исследования космоса".

## Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus:

1. E. Boos, L. Dudko, P. Mandrik and S. Slabospitskii, "Top Quark: Results and Prospects," ЭЧАЯ, №3 (Том 50) 2019; Phys. Part. Nucl. **50**, no.3, 231-258 (2019) doi:10.1134/S106377961903002X; импакт-фактор журнала 0.68 (Scopus 2020).
2. E. Boos and L. Dudko, "The Single Top Quark Physics," Int. J. Mod. Phys. A **27**, 1230026 (2012) doi:10.1142/S0217751X12300268 [arXiv:1211.7146 [hep-ph]]; импакт-фактор журнала 1.95 (Scopus 2020).
3. Э. Э. Боос, В. Е. Буничев, Л. В. Дудко, В. И. Саврин, А. В. Шерстнев «Метод моделирования событий электрослабого рождения  $t$ -кварка в NLO-приближении. Генератор событий SingleTop.» Яд. физ. **69**, 1352 (2006);  
E. E. Boos, V. E. Bunichev, L. V. Dudko, V. I. Savrin

- and A. V. Sherstnev, Phys. Atom. Nucl. **69**, 1317 (2006) doi:10.1134/S1063778806080084; импакт-фактор журнала 0.594 (Scopus 2020).
4. A. S. Belyaev, E. E. Boos and L. V. Dudko, “Single top quark at future hadron colliders: Complete signal and background study,” Phys. Rev. D **59**, 075001 (1999) doi:10.1103/PhysRevD.59.075001 [hep-ph/9806332]; импакт-фактор журнала 8.311 (Scopus 2020).
  5. E. Boos and L. Dudko, “Triple top quark production in standard model,” Int. J. Mod. Phys. A **37**, no.05, 2250023 (2022) doi:10.1142/S0217751X22500233 [arXiv:2107.07629 [hep-ph]]; импакт-фактор журнала 1.95 (Scopus 2020).
  6. E. E. Boos, V. E. Bunichev, L. V. Dudko, A.A. Markina, «Метод “оптимальных наблюдаемых” и применение нейронных сетей в физических исследованиях» Яд. Физ. **71**, 2 (2008); Phys. Atom. Nucl. **71**, 1317 (2008); doi:10.1134/S1063778808020191 ; импакт-фактор журнала 0.594 (Scopus 2020).
  7. E. Boos and L. Dudko, “Optimized neural networks to search for Higgs boson production at the Tevatron” Nucl. Instrum. Meth. A **502**, 486 (2003) doi:10.1016/S0168-9002(03)00477-7 [hep-ph/0302088]; импакт-фактор журнала 1.915 (Scopus 2020).
  8. E. E. Boos, V. E. Bunichev, L. V. Dudko, A. A. Markina and M. A. Perfilov, “Optimization of the analysis of single top-quark production at the Large Hadron Collider (LHC),” Яд. Физ. **73**, 1007 (2010); Phys. Atom. Nucl. **73**, 971 (2010); импакт-фактор журнала 0.594 (Scopus 2020).
  9. J. Alwall *et al.*, “A Standard format for Les Houches event files,” Comput. Phys. Commun. **176**, 300 (2007) doi:10.1016/j.cpc.2006.11.010 [hep-ph/0609017]; импакт-фактор журнала 6.36 (Scopus 2020).
  10. S. Belov, L. Dudko, D. Kekelidze and A. Sherstnev, “HepML, an XML-based format for describing simulated data in high energy physic,” Comput. Phys. Commun. **181**, 1758-1768 (2010) doi:10.1016/j.cpc.2010.06.026 [arXiv:1001.2576 [hep-ph]]; импакт-фактор журнала 6.36 (Scopus 2020).
  11. S. Belov, L. Dudko, E. Galkin, A. Gusev, W. Pokorski and A. Sherstnev, “LCG MCDB: A Knowledgebase of Monte Carlo Simulated Events,” Comput. Phys. Commun. **178**, 222-229 (2008) doi:10.1016/j.cpc.2007.08.010 [arXiv:hep-ph/0703287 [hep-ph]]; импакт-фактор журнала 6.36 (Scopus 2020).

12. B. Abbott *et al.* [D0 Collaboration], “Search for electroweak production of single top quarks in  $p\bar{p}$  collisions,” Phys. Rev. D **63**, 031101 (2000) [arXiv:hep-ex/0008024]; импакт-фактор журнала 8.311 (Scopus 2020).
13. A. P. Heinson for the D0 Collaboration, “Search for Electroweak Production of Single Top Quarks at D0,” Int. J. Mod. Phys. A **16S1A**, 386-388 (2001) doi:10.1142/S0217751X01007005 [arXiv:hep-ex/0105003 [hep-ex]]; импакт-фактор журнала 1.95 (Scopus 2020).
14. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Search for single top quark production at DØ using neural networks,” Phys. Lett. B **517**, 282 (2001) [arXiv:hep-ex/0106059]; импакт-фактор журнала 7.177 (Scopus 2020).
15. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Search for single top quark production in p anti-p collisions at  $s^{*(1/2)} = 1.96$ -TeV,” Phys. Lett. B **622**, 265 (2005) [arXiv:hep-ex/0505063]; импакт-фактор журнала 7.177 (Scopus 2020).
16. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Multivariate searches for single top quark production with the D0 detector,” Phys. Rev. D **75**, 092007 (2007) [arXiv:hep-ex/0604020]; импакт-фактор журнала 8.311 (Scopus 2020).
17. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Evidence for production of single top quarks and first direct measurement of  $|V(tb)|$ ,” Phys. Rev. Lett. **98**, 181802 (2007) [arXiv:hep-ex/0612052]; импакт-фактор журнала 14.105 (Scopus 2020).
18. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Evidence for production of single top quarks” Phys. Rev. D **78**, 012005 (2008) doi:10.1103/PhysRevD.78.012005 [arXiv:0803.0739 [hep-ex]]; импакт-фактор журнала 8.311 (Scopus 2020).
19. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Observation of Single Top Quark Production” Phys. Rev. Lett. **103**, 092001 (2009) doi:10.1103/PhysRevLett.103.092001 [arXiv:0903.0850 [hep-ex]]; импакт-фактор журнала 14.105 (Scopus 2020).
20. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Measurement of the t-channel single top quark production cross section,” Phys. Lett. B **682**, 363 (2010) doi:10.1016/j.physletb.2009.11.038 [arXiv:0907.4259 [hep-ex]]; импакт-фактор журнала 7.177 (Scopus 2020).
21. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Model-independent measurement of  $t$ -channel single top quark production in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,” Phys. Lett. B **705**, 313 (2011) doi:10.1016/j.physletb.2011.10.035 [arXiv:1105.2788 [hep-ex]]; импакт-фактор журнала 7.177 (Scopus 2020).



22. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Measurements of single top quark production cross sections and  $|V_{tb}|$  in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,” Phys. Rev. D **84**, 112001 (2011) doi:10.1103/PhysRevD.84.112001 [arXiv:1108.3091 [hep-ex]]; импакт-фактор журнала 8.311 (Scopus 2020).
23. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Evidence for s-channel single top quark production in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,” Phys. Lett. B **726**, 656 (2013) doi:10.1016/j.physletb.2013.09.048 [arXiv:1307.0731 [hep-ex]]; импакт-фактор журнала 7.177 (Scopus 2020).
24. T. A. Aaltonen *et al.* [CDF and D0 Collaborations], “Observation of s-channel production of single top quarks at the Tevatron,” Phys. Rev. Lett. **112**, 231803 (2014) doi:10.1103/PhysRevLett.112.231803 [arXiv:1402.5126 [hep-ex]]; импакт-фактор журнала 14.105 (Scopus 2020).
25. T. A. Aaltonen *et al.* [CDF and D0 Collaborations], “Tevatron Combination of Single-Top-Quark Cross Sections and Determination of the Magnitude of the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa Matrix Element  $V_{tb}$ ,” Phys. Rev. Lett. **115**, no. 15, 152003 (2015) doi:10.1103/PhysRevLett.115.152003 [arXiv:1503.05027 [hep-ex]]; импакт-фактор журнала 14.105 (Scopus 2020).
26. E. Boos, L. Dudko and T. Ohl, “Complete calculations of  $Wb\bar{b}$  and  $Wb\bar{b} +$  jet production at Tevatron and LHC: Probing anomalous  $Wtb$  couplings in single top production,” Eur. Phys. J. C **11**, 473 (1999); импакт-фактор журнала 7.709 (Scopus 2020).
27. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Search for anomalous  $Wtb$  couplings in single top quark production,” Phys. Rev. Lett. **101**, 221801 (2008) doi:10.1103/PhysRevLett.101.221801 [arXiv:0807.1692 [hep-ex]]; импакт-фактор журнала 14.105 (Scopus 2020).
28. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Search for anomalous top quark couplings with the D0 detector,” Phys. Rev. Lett. **102**, 092002 (2009) doi:10.1103/PhysRevLett.102.092002 [arXiv:0901.0151 [hep-ex]]; импакт-фактор журнала 14.105 (Scopus 2020).
29. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Search for anomalous  $Wtb$  couplings in single top quark production in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,” Phys. Lett. B **708**, 21 (2012) doi:10.1016/j.physletb.2012.01.014 [arXiv:1110.4592 [hep-ex]]; импакт-фактор журнала 7.177 (Scopus 2020).
30. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Combination of searches for anomalous top quark couplings with  $5.4 \text{ fb}^{-1}$  of  $p\bar{p}$  collisions,” Phys. Lett.

- В **713**, 165 (2012) doi:10.1016/j.physletb.2012.05.048 [arXiv:1204.2332 [hep-ex]]; импакт-фактор журнала 7.177 (Scopus 2020).
31. V. Khachatryan *et al.* [CMS], “Search for anomalous Wtb couplings and flavour-changing neutral currents in t-channel single top quark production in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV,” JHEP **02**, 028 (2017) doi:10.1007/JHEP02(2017)028 [arXiv:1610.03545 [hep-ex]]; импакт-фактор журнала 7.197 (Scopus 2020).
32. E. E. Boos, V. E. Bunichev, L. V. Dudko, M. A. Perfilov and G. A. Vorotnikov, “Eligibility of EFT Approach to Search for tqg FCNC Phenomenon,” Phys. Atom. Nucl. **83**, no.6, 984-988 (2020) doi:10.1134/S1063778820060083 [arXiv:2004.14498 [hep-ph]]; импакт-фактор журнала 0.594 (Scopus 2020).
33. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Search for production of single top quarks via tcg and tug flavor-changing neutral current couplings,” Phys. Rev. Lett. **99**, 191802 (2007) doi:10.1103/PhysRevLett.99.191802 [hep-ex/0702005 [HEP-EX], arXiv:0801.2556 [HEP-EX]]; импакт-фактор журнала 14.105 (Scopus 2020).
34. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Search for flavor changing neutral currents via quark-gluon couplings in single top quark production using  $2.3 \text{ fb}^{-1}$  of  $p\bar{p}$  collisions,” Phys. Lett. B **693**, 81 (2010) doi:10.1016/j.physletb.2010.08.011 [arXiv:1006.3575 [hep-ex]]; импакт-фактор журнала 7.177 (Scopus 2020).

## Список литературы

- [1] Боос Э.Э., Дудко Л.В., Слабоспицкий С.Р. «Удивительный топ-кварк», «В глубь материи. Физика XXI века глазами создателей экспериментального комплекса на Большом адронном коллайдере в Женеве.» М.: место издания Этерна, 2009, Москва, Россия, том 1, с. 415-435
- [2] E. Boos, V. Bunichev, M. Dubinin, L. Dudko, V. Edneral, V. Ilyin, A. Kryukov, V. Savrin, A. Semenov, and A. Sherstnev [CompHEP Collaboration], “CompHEP 4.4: Automatic computations from Lagrangians to events,” Nucl. Instrum. Methods A **534**, 250 (2004) [hep-ph/0403113]
- [3] A. Pukhov, E. Boos, M. Dubinin, V. Edneral, V. Ilyin, D. Kovalenko, A. Kryukov, V. Savrin, S. Shichanin and A. Semenov, “CompHEP: A Package for evaluation of Feynman diagrams and integration over multiparticle phase space,” [arXiv:hep-ph/9908288 [hep-ph]].

- [4] T. Sjostrand *et al.*, Comput. Phys. Commun. 135, 238 (2001) [hep-ph/0010017]
- [5] M. Tanabashi *et al.* [Particle Data Group], Phys. Rev. D **98**, no. 3, 030001 (2018). doi:10.1103/PhysRevD.98.030001
- [6] N. Kidonakis, Phys. Rev. D **82**, 114030 (2010) [arXiv:1009.4935 [hep-ph]].
- [7] N. Kidonakis, Phys. Rev. D **74**, 114012 (2006) [arXiv:hep-ph/0609287].
- [8] N. Kidonakis, Phys. Rev. D **83**, 091503 (2011) [arXiv:1103.2792 [hep-ph]].
- [9] N. Kidonakis, Phys. Rev. D **81**, 054028 (2010) [arXiv:1001.5034 [hep-ph]].
- [10] N. Kidonakis, arXiv:1205.3453 [hep-ph].
- [11] N. Kidonakis, Phys. Rev. D **75**, 071501 (2007) [arXiv:hep-ph/0701080].
- [12] Z. Sullivan, Phys. Rev. D 70, 114012 (2004) [hep-ph/0408049].
- [13] J. Campbell, R. K. Ellis, and F. Tramontano, Phys. Rev. D 70, 094012 (2004) [hep-ph/0408158].
- [14] B. Abbott *et al.* [D0 Collaboration], “Neural networks for analysis of top quark production,” in *Proc. of the 19th Intl. Symp. on Photon and Lepton Interactions at High Energy LP99* ed. J.A. Jaros and M.E. Peskin, arXiv:hep-ex/9907041.
- [15] L. Dudko [D0 Collaboration], “Use of neural networks in a search for single top quark production at D0,” AIP Conf. Proc. **583**, 83 (2001).
- [16] D0-Note-3612 (1999) “Singularities of Feynman Diagrams and Optimal Kinematic Variables for Neural Networks.” E.E. Boos and L.V. Dudko
- [17] D0-Note-5000 (2006) “"Best Variables" Method and Implementation of Neural Networks in Physics Analysis” A.A.Berezina, E.E.Boos, V.E.Bunichev, L.V.Dudko
- [18] CMS NOTE-2007/045 “Investigation of the single top quark production in t-channel process by a Neural Network approach with the CMS detector” V. Abramov, E. Boos, L. Dudko, D. Konstantinov, A. Markina, M. Mohammadi Najafabadi, V. Savrin, A. Sherstnev, S. Slabospitsky
- [19] E. E. Boos, V. E. Bunichev, L. V. Dudko, A.A. Markina, «Метод “оптимальных наблюдаемых” и применение нейронных сетей в физических исследованиях» Яд. Физ. **71**, 2 (2008); Phys. Atom. Nucl. **71**, 1317 (2008); doi:10.1134/S1063778808020191

- [20] E. Boos and L. Dudko, “Optimized neural networks to search for Higgs boson production at the Tevatron” Nucl. Instrum. Meth. A **502**, 486 (2003) doi:10.1016/S0168-9002(03)00477-7 [hep-ph/0302088].
- [21] K. A. Assamagan *et al.* [Higgs Working Group Collaboration], “The Higgs working group: Summary report 2003,” arXiv:hep-ph/0406152.
- [22] E. E. Boos, V. E. Bunichev, L. V. Dudko, A. A. Markina and M. A. Perfilov, “Optimization of the analysis of single top-quark production at the Large Hadron Collider (LHC),” Yad. Fiz. **73**, 1007 (2010); Phys. Atom. Nucl. **73**, 971 (2010).
- [23] M. Dobbs *et al.*, “The QCD/SM working group: Summary report,” Contributed to 3rd Les Houches Workshop arXiv:hep-ph/0403100.
- [24] J. Alwall *et al.*, “A Standard format for Les Houches event files,” Comput. Phys. Commun. **176**, 300 (2007) doi:10.1016/j.cpc.2006.11.010 [hep-ph/0609017].
- [25] J. Alwall *et al.*, doi:10.2172/921331 arXiv:0712.3311 [hep-ph].
- [26] G. H. Brooijmans *et al.*, arXiv:0802.3715 [hep-ph].
- [27] J. M. Butterworth, A. Arbey, L. Basso, S. Belov, A. Bharucha, F. Braam, A. Buckley, M. Campanelli, R. Chierici and A. Djouadi, *et al.* [arXiv:1003.1643 [hep-ph]].
- [28] S. Belov, L. Dudko and A. Sherstnev, PoS **ACAT08**, 115 (2008) doi:10.22323/1.070.0115
- [29] S. Belov, L. Dudko, D. Kekelidze and A. Sherstnev, Comput. Phys. Commun. **181**, 1758-1768 (2010) doi:10.1016/j.cpc.2010.06.026 [arXiv:1001.2576 [hep-ph]].
- [30] P. Bartalini, L. Dudko, A. Kryukov, I. V. Selyuzhenkov, A. Sherstnev and A. Vologdin, [arXiv:hep-ph/0404241 [hep-ph]].
- [31] S. Belov, L. Dudko, A. Gusev, W. Pokorski and A. Sherstnev, PoS **ACAT**, 030 (2007) doi:10.22323/1.050.0030
- [32] S. Belov, L. Dudko, E. Galkin, A. Gusev, W. Pokorski and A. Sherstnev, Comput. Phys. Commun. **178**, 222-229 (2008) doi:10.1016/j.cpc.2007.08.010 [arXiv:hep-ph/0703287 [hep-ph]].

- [33] D0-Note-3283 (1997) “Jet and Missing Energy Corrections for the D0 Single Top Analyses” M.Mason, M. and Wimpenny, S.J. - Univ. of California, Riverside; Dudko, L.V. and Sotnikova, N. - Moscow State University
- [34] D0-Note-3441 (1998) “Status of Single Top Analysis for e+jets/mu” A.Belyaev, E.Boos, L.Dudko, P.Ermolov, A.Heinson, N.Sotnikova
- [35] D0-Note-3772 (2000) “Electroweak Production of Single Top Quarks at DZero” A.S. Belyaev, P.C. Bhat, E.E. Boos, L.V. Dudko, K. Gounder, A.P. Heinson, M.S. Mason, J.E. McDonald, H.B. Prosper, N.A. Sotnikova, S.J. Wimpenny
- [36] B. Abbott *et al.* [D0 Collaboration], “Search for electroweak production of single top quarks in  $p\bar{p}$  collisions,” Phys. Rev. D **63**, 031101 (2000) [arXiv:hep-ex/0008024].
- [37] D0-Note-3856 (2001) “Search for Single Top Quark Production at DZero Using Neural Networks” E.E. Boos, L.V. Dudko, A.P. Heinson, N.A. Sotnikova
- [38] A. P. Heinson for the D0 Collaboration, “Search for Electroweak Production of Single Top Quarks at D0,” Int. J. Mod. Phys. A **16S1A**, 386-388 (2001) doi:10.1142/S0217751X01007005 [arXiv:hep-ex/0105003 [hep-ex]]. Contribution to: DPF 2000: The Meeting of the Division of Particles and Fields of the American Physical Society
- [39] L. Dudko [CDF and D0], “Search for single top quark production at the Tevatron,” Contribution to: 35th Rencontres de Moriond: QCD and High Energy Hadronic Interactions, 63-66
- [40] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Search for single top quark production at  $D\bar{O}$  using neural networks,” Phys. Lett. B **517**, 282 (2001) [arXiv:hep-ex/0106059].
- [41] D0-Note-4398 (2004) “Search for Single Top Quark Production at DZero in Run II” M.Agelou, B.Andrieu, P.Baringer, A.Bean, D.Bloch, E.Boos, V.Bunichev, E.Busato, L.Christofek, B.Clement, L.Dudko, T.Gadfort, A.Garcia-Bellido, G.Gaudio, D.Gele, P.Gutierrez, A.Heinson, S.Jabeen, S.Jain, A.Juste, D.Kau, Kopal, J.Mitrevski, J.Parsons, P.Perea, E.Perez, H.Prospere, A.Quadt, V.Rud, R.Schwienhorst, M.Strauss, B.Vachon, M.Warsinsky, G.Watts
- [42] D0-Note-4510 (2004) “Search for Single Top Quark Production at DZero in Run II” M.Agelou, B.Andrieu, P.Baringer, A.Bean, D.Bloch, E.Boos,

V.Bunichev, E.Busato, L.Christofek, B.Clement, L.Dudko, T.Gadfort, A.Garcia-Bellido, G.Gaudio, D.Gele, P.Gutierrez, A.Heinson, S.Jabeen, S.Jain, A.Juste, D.Kau, Kopal, J.Mitrevski, J.Parsons, P.Perea, E.Perez, H.Prosper, A.Quadt, V.Rud, R.Schwienhorst, M.Strauss, B.Vachon, M.Warsinsky, G.Watts

- [43] D0-Note-4670 (2004) “Improved Search for Single Top Quark Production” M.Agelou, B.Andrieu, P.Baringer, A.Bean, D.Bloch, E.Boos, V.Bunichev, E.Busato, L.Christofek, B.Clement, L.Dudko, T.Gadfort, A.Garcia-Bellido, G.Gaudio, D.Gele, P.Gutierrez, A.Heinson, S.Jabeen, S.Jain, A.Juste, D.Kau, Kopal, J.Mitrevski, J.Parsons, P.Perea, E.Perez, H.Prosper, A.Quadt, V.Rud, R.Schwienhorst, M.Strauss, B.Vachon, M.Warsinsky, G.Watts
- [44] D0-Note-4722 (2005) “Improved Search for Single Top Quark Production at D0 in Run II” M.Agelou, B.B.Andrieu, P.Baringer, A.Bean, D.Bloch, E.Boos, V.Bunichev, Burnett, E.Busato, L.Christofek, B.Clement, L.Dudko, T.Gadfort, A.Garcia-Bellido, D.Gele, P.Gutierrez, A.Heinson, S.Jabeen, S.Jain, A.Juste, D.Kau, J.Mitrevski, J.Parsons, P.Perea, E.Perez, H.Prosper, V.Rud, R.Schwienhorst, M.Strauss, C.Tully, B.Vachon, G.Watts
- [45] D0-Note-5285 (2006) “Search for Single Top Quark Production in  $1\text{ fb}^{-1}$  of Data” E. Aguilo, P. Baringer, A. Bean, C. Belanger-Champagne, J.A. Benitez, E.E. Boos, R. Brock, V. Bunichev, K. Chan, L. Christofek, Y. Coadou, L.V. Dudko, M. Erdmann, T. Gadfort, A. Garcia-Bellido, C. Gerber, D. Gillberg, G. Gutierrez, P. Gutierrez, A.P. Heinson, U. Heintz, S. Herrin, S. Jabeen, S. Jain, A. Juste, S. Kappler, D. Kau, G. Kertscher, M. Kirsch, L. Li, J. Mitrevski, R. Moore, M. Narain, D. O’Neil, M. Pangilinan, J. J.Parsons, M. Perfilov, C. Potter, H.B. Prosper, R. Schwienhorst, E. Shabalina, J. Steggemann, T. Tim, C. Tully, M. Vetterli, B. Vachon, G. Watts, M. Weber
- [46] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Search for single top quark production in p anti-p collisions at  $s^{*(1/2)} = 1.96\text{-TeV}$ ,” Phys. Lett. B **622**, 265 (2005) [arXiv:hep-ex/0505063].
- [47] D0-Note-5288 (2006) “Using Bayesian Neural Networks to Search for Single Top Quarks in  $1\text{ fb}^{-1}$  of Data” E. Aguilo, P. Baringer, A. Bean, C. Belanger-Champagne, J.A. Benitez, E.E. Boos, R. Brock, V. Bunichev, K. Chan, L. Christofek, Y. Coadou, L.V. Dudko, M. Erdmann, T. Gadfort, A. Garcia-Bellido, C. Gerber, D. Gillberg, G. Gutierrez, P. Gutierrez, A.P. Heinson, U. Heintz, S. Herrin, S. Jabeen, S. Jain, A. Juste, S. Kappler,

- D. Kau, G. Kertzscher, M. Kirsch, L. Li, J. Mitrevski, R. Moore, M. Narain, D. O’Neil, M. Pangilinan, J. J.Parsons, M. Perfilov, C. Potter, H.B. Prosper, R. Schwienhorst, E. Shabalina, J. Steggemann, T. Tim, C. Tully, M. Vetterli, B. Vachon, G. Watts, M. Weber
- [48] D0-Note-5289 (2006) “A Neural Network Search for Single Top Quarks in  $1 fb^{-1}$  of Data” E. Aguilo, P. Baringer, A. Bean, C. Belanger-Champagne, J.A. Benitez, E.E. Boos, R. Brock, V. Bunichev, K. Chan, L. Christofek, Y. Coadou, L.V. Dudko, M. Erdmann, T. Gadfort, A. Garcia-Bellido, C. Gerber, D. Gillberg, G. Gutierrez, P. Gutierrez, A.P. Heinson, U. Heintz, S. Herrin, S. Jabeen, S. Jain, A. Juste, S. Kappler, D. Kau, G. Kertzscher, M. Kirsch, L. Li, J. Mitrevski, R. Moore, M. Narain, D. O’Neil, M. Pangilinan, J. J.Parsons, M. Perfilov, C. Potter, H.B. Prosper, R. Schwienhorst, E. Shabalina, J. Steggemann, T. Tim, C. Tully, M. Vetterli, B. Vachon, G. Watts, M. Weber
- [49] D0-Note-5361 (2007) “A Second Look at Bayesian Neural Networks in the Search for Single Top Quarks in  $1 fb^{-1}$  of Data” E. Aguilo, P. Baringer, A. Bean, C. Belanger-Champagne, J.A. Benitez, E.E. Boos, R. Brock, V. Bunichev, K. Chan, L. Christofek, Y. Coadou, L.V. Dudko, M. Erdmann, T. Gadfort, A. Garcia-Bellido, C. Gerber, D. Gillberg, G. Gutierrez, P. Gutierrez, A.P. Heinson, U. Heintz, S. Herrin, S. Jabeen, S. Jain, A. Juste, S. Kappler, D. Kau, G. Kertzscher, M. Kirsch, L. Li, J. Mitrevski, R. Moore, M. Narain, D. O’Neil, M. Pangilinan, J. J.Parsons, M. Perfilov, C. Potter, H.B. Prosper, R. Schwienhorst, E. Shabalina, J. Steggemann, T. Tim, C. Tully, M. Vetterli, B. Vachon, G. Watts, M. Weber
- [50] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Multivariate searches for single top quark production with the D0 detector,” *Phys. Rev. D* **75**, 092007 (2007) [arXiv:hep-ex/0604020].
- [51] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Evidence for production of single top quarks and first direct measurement of  $|V(tb)|$ ,” *Phys. Rev. Lett.* **98**, 181802 (2007) [arXiv:hep-ex/0612052].
- [52] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Evidence for production of single top quarks,” *Phys. Rev. D* **78**, 012005 (2008) doi:10.1103/PhysRevD.78.012005 [arXiv:0803.0739 [hep-ex]].
- [53] D0-Note-5440 (2007) “First direct measurement of  $|V_{tb}|$ ” E. Aguilo, P. Baringer, A. Bean, C. Belanger-Champagne, J.A. Benitez, E.E. Boos, R. Brock, V. Bunichev, K. Chan, L. Christofek, Y. Coadou, L.V. Dudko, M. Erdmann, T. Gadfort, A. Garcia-Bellido, C. Gerber, D. Gillberg, G.

Gutierrez, P. Gutierrez, A.P. Heinson, U. Heintz, S. Herrin, S. Jabeen, S. Jain, A. Juste, S. Kappler, D. Kau, G. Kertzsch, M. Kirsch, L. Li, J. Mitrevski, R. Moore, M. Narain, D. O’Neil, M. Pangilinan, J. J.Parsons, M. Perfilov, C. Potter, H.B. Prosper, R. Schwienhorst, E. Shabalina, J. Steggemann, T. Tim, C. Tully, M. Vetterli, B. Vachon, G. Watts, M. Weber

- [54] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Observation of Single Top Quark Production,” *Phys. Rev. Lett.* **103**, 092001 (2009) doi:10.1103/PhysRevLett.103.092001 [arXiv:0903.0850 [hep-ex]].
- [55] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Measurement of the t-channel single top quark production cross section,” *Phys. Lett. B* **682**, 363 (2010) doi:10.1016/j.physletb.2009.11.038 [arXiv:0907.4259 [hep-ex]].
- [56] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Model-independent measurement of  $t$ -channel single top quark production in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,” *Phys. Lett. B* **705**, 313 (2011) doi:10.1016/j.physletb.2011.10.035 [arXiv:1105.2788 [hep-ex]].
- [57] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Measurements of single top quark production cross sections and  $|V_{tb}|$  in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,” *Phys. Rev. D* **84**, 112001 (2011) doi:10.1103/PhysRevD.84.112001 [arXiv:1108.3091 [hep-ex]].
- [58] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Evidence for s-channel single top quark production in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,” *Phys. Lett. B* **726**, 656 (2013) doi:10.1016/j.physletb.2013.09.048 [arXiv:1307.0731 [hep-ex]].
- [59] T. A. Aaltonen *et al.* [CDF and D0 Collaborations], “Observation of s-channel production of single top quarks at the Tevatron,” *Phys. Rev. Lett.* **112**, 231803 (2014) doi:10.1103/PhysRevLett.112.231803 [arXiv:1402.5126 [hep-ex]].
- [60] T. A. Aaltonen *et al.* [CDF and D0 Collaborations], “Tevatron Combination of Single-Top-Quark Cross Sections and Determination of the Magnitude of the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa Matrix Element  $\mathbf{V}_{tb}$ ,” *Phys. Rev. Lett.* **115**, no. 15, 152003 (2015) doi:10.1103/PhysRevLett.115.152003 [arXiv:1503.05027 [hep-ex]].
- [61] E. Boos, L. Dudko and T. Ohl, “Complete calculations of  $Wb\bar{b}$  and  $Wb\bar{b} + \text{jet}$  production at Tevatron and LHC: Probing anomalous  $Wtb$  couplings in single top production,” *Eur. Phys. J. C* **11**, 473 (1999)



- [62] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Search for anomalous  $Wtb$  couplings in single top quark production,” *Phys. Rev. Lett.* **101**, 221801 (2008) doi:10.1103/PhysRevLett.101.221801 [arXiv:0807.1692 [hep-ex]].
- [63] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Search for anomalous top quark couplings with the D0 detector,” *Phys. Rev. Lett.* **102**, 092002 (2009) doi:10.1103/PhysRevLett.102.092002 [arXiv:0901.0151 [hep-ex]].
- [64] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Search for anomalous  $Wtb$  couplings in single top quark production in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,” *Phys. Lett. B* **708**, 21 (2012) doi:10.1016/j.physletb.2012.01.014 [arXiv:1110.4592 [hep-ex]].
- [65] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Combination of searches for anomalous top quark couplings with  $5.4 \text{ fb}^{-1}$  of  $p\bar{p}$  collisions,” *Phys. Lett. B* **713**, 165 (2012) doi:10.1016/j.physletb.2012.05.048 [arXiv:1204.2332 [hep-ex]].
- [66] 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  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV,” *JHEP* **02**, 028 (2017) doi:10.1007/JHEP02(2017)028 [arXiv:1610.03545 [hep-ex]].
- [67] E. E. Boos, V. E. Bunichev, L. V. Dudko, M. A. Perfilov and G. A. Vorotnikov, *Phys. Atom. Nucl.* **83**, no.6, 984-988 (2020) doi:10.1134/S1063778820060083 [arXiv:2004.14498 [hep-ph]].
- [68] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Search for production of single top quarks via tcg and tug flavor- changing neutral current couplings,” *Phys. Rev. Lett.* **99**, 191802 (2007) doi:10.1103/PhysRevLett.99.191802 [hep-ex/0702005 [HEP-EX], arXiv:0801.2556 [HEP-EX]].
- [69] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], “Search for flavor changing neutral currents via quark-gluon couplings in single top quark production using  $2.3 \text{ fb}^{-1}$  of  $p\bar{p}$  collisions,” *Phys. Lett. B* **693**, 81 (2010) doi:10.1016/j.physletb.2010.08.011 [arXiv:1006.3575 [hep-ex]].