

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ  
ИМ А.И.АЛИХАНОВА

На правах рукописи

ШРЕЙБЕР ИРИНА ВЛАДИМИРОВНА

**Измерение процесса радиационного рождения  
пары топ-кварк–антикварк  
на ускорителе TEVATRON  
в эксперименте CDF**

специальность 01.04.23 – физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2009 г.

УДК 539.126

Работа выполнена в ФГУП ГНЦ РФ Институт Теоретической и Экспериментальной Физики им. А. И. Алиханова, г. Москва.

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук А. А. Ростовцев  
(ГНЦ РФ ИТЭФ, г. Москва)

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук Л. К. Гладилин  
(НИИЯФ МГУ, г. Москва)  
доктор физ.-мат. наук В. Б. Гаврилов  
(ГНЦ РФ ИТЭФ, г. Москва)

Ведущая организация: ИПМ им. М. В. Келдыша РАН (г. Москва)

Защита состоится 22 декабря 2009 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 201.002.01 в конференц-зале ГНЦ РФ ИТЭФ по адресу: г. Москва, ул. Б. Черемушкинская д. 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТЭФ.

Автореферат разослан 20 ноября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук  
Васильев В.В.

## 1. Общая характеристика работы

В диссертации представлен поиск физических явлений, неописываемых в рамках Стандартной Модели (СМ). Произведен поиск событий, содержащих лептон, фотон, адронную струю b-кварка (b-струю) и значительную потерянную поперечную энергию ( $E_T$ ) —  $l\gamma E_T b$ . Также, впервые на экспериментальных данных был изучен процесс радиационного рождения пары топ-кварк–антикварк ( $t\bar{t}\gamma$ ) и было измерено сечение рождения  $t\bar{t}\gamma$ . В работе используется техника поиска “*по виду события*”: для выбранного типа события оценивается вклад от процессов СМ, учитывается неверная идентификация тех или иных объектов в детекторе, и затем проверяется, описывает ли СМ результат, полученный экспериментально. В настоящей работе использованы данные, набранные за период с 2002 по 2007 гг. на экспериментальной установке CDF, работающей на ускорительном комплексе Tevatron, при энергии столкновения  $p\bar{p} \sqrt{s} = 1.96$  ТэВ. Данные соответствуют интегральной светимости  $1.9\text{fb}^{-1}$ .

### 1.1. Актуальность темы

Несмотря на то, что самый тяжелый кварк в СМ, t-кварк, был открыт уже более 10 лет назад, многие его свойства до сих пор остаются неизученными. Большая масса t-кварка предполагает, что он может играть значительную роль в электрослабом нарушении симметрии. Следовательно, Новая Физика (НФ), связанная с электрослабым нарушением симметрии, может быть впервые обнаружена при изучении свойств t-кварка. Согласно СМ, вероятность образования  $t\bar{t}$ -пары совместно с высоко-энергетичным фотоном примерно в 100 раз меньше, чем просто образования  $t\bar{t}$ -пары. Возможными указаниями на физику за пределами СМ будут являться отклонения, обнаруженные при изучении ассоциативного рождения t-кварка с переносчиками электрослабого взаимодействия.

Tevatron, как наиболее высоко-энергетичный ускорительный комплекс, ускоряющий в кольце протоны и антипротоны до энергии 0,98 ТэВ,

обладает уникальной возможностью для поиска физики за пределами СМ. На предыдущей стадии эксперимента CDF Run I были обнаружены события, которые можно было интерпретировать как отклонения от СМ. Хотя величина отклонения не была статистически значимой, этот эксперимент привел к активности в теоретическом сообществе. Были сделаны предсказания рождения частиц с массами порядка 100-200 ГэВ в рамках теорий Техницвета и Суперсимметрии.

Изучение свойств t-кварка является одной из основных экспериментальных задач на пути дальнейшего развития физики элементарных частиц. Проверка предсказаний различных теорий НФ представляет собой важный этап поиска физики за пределами СМ. Таким образом, тема настоящей диссертационной работы является актуальной.

## 1.2. Цель и задачи исследования

Целью диссертации является поиск событий вида  $l\gamma E_T b$  и  $t\bar{t}\gamma$  при максимально доступной энергии столкновения  $p\bar{p}$ ; получения оценки вероятности этих событий и сравнение полученных данных с предсказаниями СМ; измерение сечения процесса радиационного рождения  $t\bar{t}$ . Обнаружение отклонений от предсказаний СМ в искомым событиях может являться указанием на физику за ее пределами.

Другой задачей исследования была разработка, развитие и поддержка программы контроля высокого напряжения калориметра, которая обеспечивает непрерывный контроль соответствующего параметра в калориметрической системе CDF, а также разработка, поддержка и развитие программного пакета визуализации событий в эксперименте CDF Run II Event Display (EVD).

## 1.3. Научная новизна

В эксперименте CDF Run II впервые изучался процесс радиационного рождения кварковой пары  $t\bar{t}$  и полученные в диссертации результаты представляют новые знания о свойствах самой тяжелой из открытых фундаментальных частиц и процессах с ее участием. Впервые был наблюден процесс излучения фотона t-кварком и было экспериментально оценено сечение процесса  $t\bar{t}\gamma$ .

Кроме того, был сформулирован критерий отбора событий, позволяющий снизить влияние фона. Именно, требуется, чтобы наряду с лептоном, фотоном и  $b$ -струей со смещенной вершиной, событие характеризовалось бы большой полной поперечной энергией события  $N_T > 200$  ГэВ, причем наблюдались бы еще (как минимум) две адронные струи, хотя бы одна из которых –  $b$ -струя.

В практике обработки данных, получаемых с детекторов событий, впервые использовались программные коды контроля высокого напряжения калориметра, обеспечившие непрерывный режим обработки, а также использовались программы визуализации единичных событий, что способствовало более точной идентификации событий, наблюдаемых в эксперименте.

#### 1.4. Научная и практическая значимость

Диссертантом представлены на защиту следующие результаты:

1. Идентификация объектов, методы оценки фонов из-за неверной идентификации лептонов и фотонов высокой энергии, оценка вкладов СМ.

2. Поиск событий вида  $l\gamma E_T b$ , содержащих лептон, фотон, адронную струю  $b$ -кварка ( $b$ -струю) и значительную потерянную поперечную энергию ( $E_T$ ) в эксперименте CDF Run II, и сравнение полученных результатов с предсказаниями СМ.

3. Впервые представлен поиск событий вида  $t\bar{t}\gamma$ , для которых помимо критериев отбора  $l\gamma E_T b$  были применены дополнительные критерии отбора.

4. Результаты наблюдения излучения фотона  $t$ -кварком и экспериментальное определение сечения рождения процесса  $t\bar{t}\gamma$ . Оно составило  $\sigma_{t\bar{t}\gamma} = 0.15 \pm 0.08$  pb.

Результаты настоящей диссертации имеют методическую, научную и практическую значимость.

Методическая значимость работы состоит в том, что соискателю удалось в процессе эксперимента, результаты которого рассмотрены в диссертации, не только собрать статистику основных событий, но и продемонстрировать эффективность работы программы их детектирования и визуализации, что имеет большое значение в задаче поиска событий, которые при большей энергии столкновения могли бы быть интерпретированы в рамках НФ.

Также важно, что радиационное рождение пары  $t\bar{t}$  может быть использовано как контрольный класс событий для изучения ассоциативного рождения бозона Хиггса,  $t\bar{t}H^0$  в ожидающихся экспериментах на ЛНС. Разработаны эффективные критерии отбора для события радиационного рождения пары  $t\bar{t}$ .

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что экспериментально было оценено сечение процесса  $t\bar{t}\gamma$ . Кроме того, были усовершенствованы программные комплексы сбора и обработки данных, что в значительной мере способствовало успешному проведению эксперимента.

Результаты работы используются в ГНЦ РФ ИТЭФ и в Лаборатории Ферми (США, Чикаго). Выводы и методики диссертации могут быть использованы также ЦЕРН в экспериментах на ЛНС, в ФГУП ГНЦ РФ ИФВЭ, в ОИЯИ (Дубна), в расчетно-аналитических исследованиях в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, в ВЦ РАН, в ИММ РАН, в учебных планах МГУ им. М.В. Ломоносова, МИФИ, МФТИ и других научных и учебных организациях, в программах работ которых существуют задачи, связанные с теоретическим или практическим изучением свойств элементарных частиц.

### **1.5. Апробация работы и публикации**

Материалы, изложенные в диссертационной работе, опубликованы в [1–4], докладывались на международных конференциях, включая ICHEP-2006 (Москва, Россия), New Trends in High Energy Physics (Ялта, Украина), SUSY (Карлсруе, Германия), DIS08 (Лондон, Великобритания), ICHEP-2008 (Филадельфия, США), EPS09 (Краков, Польша), а также были представлены на совещании сотрудничества CDF и на совещаниях рабочих групп CDF по экзотике и физике фотонов. Результаты исследований рецензировались на научных семинарах ведущих организаций в области физики высоких энергий, в том числе входящих в состав сотрудничества CDF (Университет Чикаго, Университет Женевы и др.)

### **1.6. Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, приложения и списка литературы из 64 наименований. Каждая глава разбита на разделы, имеющие двойную нумерацию с указанием на соответствующую главу, и подпункты с тройной нумерацией с указанием на главу и

соответствующий раздел. Формулы и рисунки внутри каждой главы имеют двойную нумерацию, с указанием на главу.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** кратко описываются постановка задачи, расположение материала и формулируются основные результаты работы.

В диссертации изучается процесс радиационного рождения пары  $t\bar{t}$  и проверяются предсказания СМ. Несмотря на то, что в настоящее время СМ физики элементарных частиц очень хорошо описывает огромную совокупность экспериментальных данных с ускорительных экспериментов, проявление физики за пределами СМ (так называемой "Новой Физики", НФ) возможно при энергиях порядка ТэВ. Проверка предсказаний СМ, поиск эффектов за ее пределами, а также точное измерение свойств частиц и их взаимодействий являются целью экспериментальных исследований на современных ускорителях.

Наиболее высокая энергия столкновения (1,96 ТэВ) в системе центра масс протона и антипротона достигается в настоящее время в Лаборатории Ферми (США, Чикаго) на установке Tevatron. Эксперимент CDF Run II, результаты которого представлены в диссертации, отличается от предшествующей стадии Run I более высокой энергией пучков, обновленным ускорительным комплексом, более высокой светимостью, а также улучшением экспериментальной установки. Изучение столкновений при таких энергиях может привести к открытию физики за пределами СМ.

**Первая глава** носит вводный характер. В ней даются основные положения Стандартной Модели и направления исследований процессов за ее пределами, а также описываются стратегии поиска по виду события.

СМ – это квантово-полевая теория. Распространяющиеся колебания этих полей наблюдаются в лаборатории как элементарные частицы. Взаимодействия между частицами в СМ вводятся с помощью калибровочных симметрий. Это симметрия цветового заряда  $SU(3)$  и электрослабая симметрия  $SU(2) \otimes U(1)$ . На ускорительном комплексе Tevatron изучаются предсказания от иных моделей, в которых допускается существование новых частиц массой 100-200 ГэВ, а также проверяются и предсказания СМ.

В частности, возможными указаниями на физику за пределами СМ

будут являться отклонения, обнаруженные при изучении ассоциативного рождения t-кварка с переносчиками электрослабого взаимодействия в СМ ( $t\bar{t}\gamma$ ,  $t\bar{t}W$ ,  $t\bar{t}Z$ ).

В данной работе представлена проверка предсказаний СМ для событий вида  $\ell\gamma E_T$  с дополнительной b-струей –  $\ell\gamma E_T b$ . Необходимо заметить, что  $\ell\gamma E_T b$  – это наиболее общий вид событий, в которых происходит рождение пары  $t\bar{t}$  совместно с фотоном. Последующий распад пары  $t\bar{t}$  приводит к значительной потерянной энергии (более 20 ГэВ) и к наблюдению в детекторе лептона и b-струи со смещенной вершиной, а также фотона.

Разумеется, помимо искомым  $t\bar{t}\gamma$  событий в детекторе схожим образом выглядят и некоторые другие события, для которых t-кварки или фотоны отсутствуют. Для подавления фоновых событий накладываются дополнительные критерии отбора: минимум три адронные струи, из которых хотя бы одна b-струя, а также большая полная поперечная энергия события (более 200 ГэВ). При таком отборе, согласно СМ, наиболее вероятным является рождение  $t\bar{t}$ -пары.

Поиск распадов с фотонами в конечном состоянии (в данном случае, совместно с парой  $t\bar{t}$ ) имеет ряд преимуществ. Фотон – это одна из фундаментальных частиц в электрослабой теории (в дополнение к массивным W- и Z-бозонам). Фотон связан с электрическим зарядом и поэтому излучается всеми заряженными частицами, включая частицы до взаимодействия (то есть кварки из взаимодействующего протона и антипротона), что важно для поиска невидимых конечных состояний.

Также, изучение рождения процесса  $t\bar{t}$  совместно с фотоном позволяет лучше понять схожие процессы – рождение пары  $t\bar{t}$  с другими бозонами, а также с бозоном Хиггса. Наконец, одна из важнейших мод распада бозона Хиггса – это распад на два фотона.

t-кварк распадается на b-кварк (более легкий долгоживущий кварк из того же поколения, что и t-кварк) и W (массивную заряженную частицу), которые в свою очередь распадаются дальше; b-кварк до распада пролетает заметную дистанцию и приводит к рождению адронной струи со смещенной вершиной, так называемой b-струи. Первая мода распада W-бозона – заряженный лептон и нейтрино. Это приводит к обнаружению заряженной частицы (электрон или мюон) и так называемой потерянной

энергии: нейтрино практически не взаимодействует с веществом и покидает детектор без прямого обнаружения. Вторая мода распада – адронные струи.  $\bar{t}$  распадается схожим образом.

Следовательно, идеальное событие вида  $t\bar{t}\gamma$  выглядит как две b-струи (две адронные струи со смещенной вершиной, поскольку b-кварк до распада пролетает заметную дистанцию), лептон, потерянная энергия, две адронные струи с вершиной в точке взаимодействия, и фотон. Таким образом, поиск событий вида  $\ell\gamma E_T b$ , содержащих лептоны и фотоны высокой энергии, а также b-струи, представляет хорошую возможность для проверки предсказаний СМ, а также для поиска явлений за ее пределами. Поиск  $t\bar{t}\gamma$  является естественным продолжением поиска событий вида  $\ell\gamma E_T b$ .

Следует подчеркнуть, что до проведения настоящих исследований процесс излучения жесткого фотона при рождении  $t\bar{t}$  не был экспериментально обнаружен. Также, константа электромагнитной связи – одно из наиболее важных свойств t-кварка – не была измерена. В настоящей работе приводятся первые экспериментальные результаты в этой области.

Во **второй главе** описывается ускорительный комплекс Tevatron и эксперимент CDF Run II.

Tevatron – это синхротрон, кольцевой ускоритель-коллайдер, ускоряющий протоны и антипротоны в подземном кольце длиной 6,3 км до энергии 1.96 ТэВ в системе центра масс. Ускорение частиц происходит в шесть этапов. На первой стадии используется предускоритель-генератор Кокрофта-Волтона, где отрицательно заряженные ионы водорода ускоряются до энергии 750 кэВ. На второй стадии используется линейный ускоритель (150 м), ускоряющий ионы в переменном поле до энергии 400 МэВ. На третьей стадии ионы проходят углеродную фольгу, теряя электроны, и влетают в бустер (синхротрон диаметром 74.5 м), где за 20 тыс. оборотов разгоняются до 8 ГэВ. Из бустера протоны попадают в главный инжектор, где происходит их ускорение до 150 ГэВ, инжектирование (при энергии 120 ГэВ) в антипротонный источник, ускорение антипротонов до 150 ГэВ и инжекция протонов и антипротонов в главное ускорительное кольцо. В этом кольце они ускоряются до конечной энергии 980 ГэВ, совершая обороты в противоположных направлениях, и сталкиваются в двух точках ускорительного кольца, где расположены установки CDF и D0.

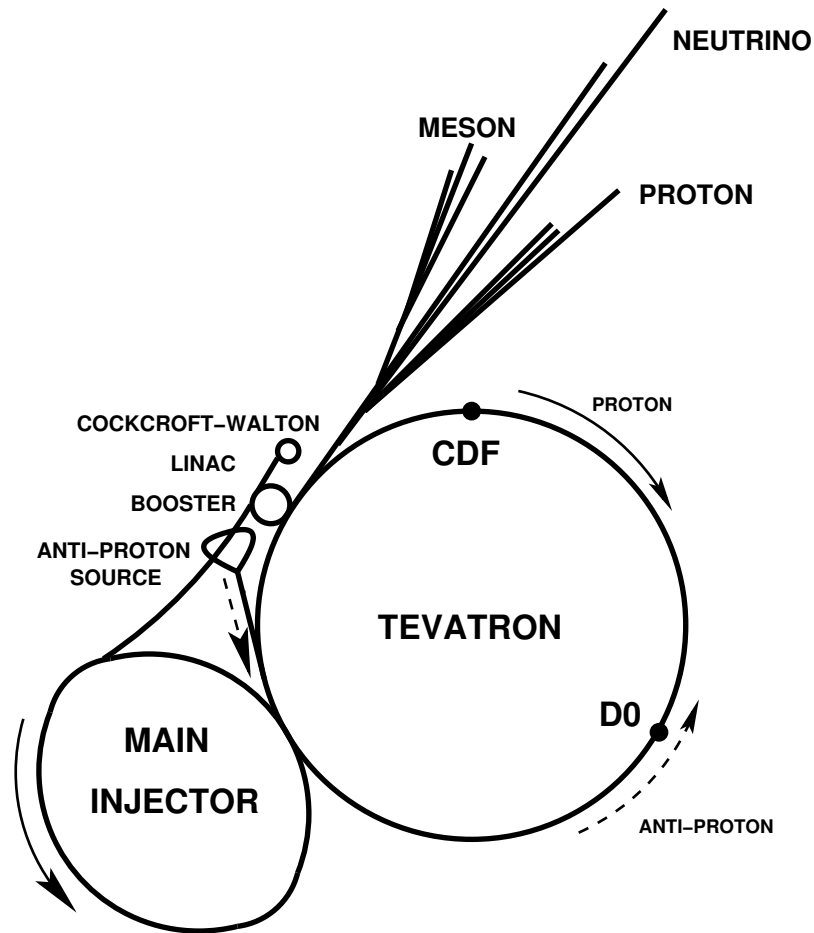


Рис. 1: Схематический вид ускорительного комплекса Tevatron. Протоны показаны сплошной стрелкой, антипротоны – прерывистой стрелкой.

На рис. 1 изображена схема разгона протонов ( $p$ ) и антипротонов ( $\bar{p}$ ).

Установка CDF – один из основных детекторов Tevatron. В диссертации представлена схема эксперимента и описаны основные узлы установки CDF: трековая система, кремниевый детектор, центральная дрейфовая камера, система измерения времени пролета частиц, система калориметров, мюонная система, черенковские счетчики светимости, триггерная система.

Приведены также основные моменты усовершенствования установки для Run II. Они включают в себя:

- новую систему сбора данных, оптимизированную для работы в режиме 132 нс между столкновениями сгустков протонов и антипротонов;

- новый кремниевый детектор;

- радиальное покрытие от 1.35 до 28 см, и покрытие по псевдобыстроте  $|\eta| < 2$ ;

- новую центральную трековую камеру (COT) с меньшим временем дрейфа

и возможностью проведения до 96 измерений на трек;

калориметр на основе быстрых сцинтилляторов вплоть до  $|\eta| \simeq 3$ ;

расширенное покрытие мюонных систем, вплоть до  $|\eta| \simeq 1.5$ ;

новую улучшенную трехуровневую триггерную систему;

систему времени регистрации пролета частиц.

**Третья глава** посвящена описанию методики отбора событий. События  $\ell\gamma E_T b$  и  $t\bar{t}\gamma$  отбираются с помощью трехуровневой триггерной системы. На эти события накладывается требование, чтобы в них срабатывал триггер на лептон с  $P_T > 18$  ГэВ в центральной части детектора,  $|\eta| < 1$ . Инклюзивный  $\ell\gamma E_T b$  образец отбирается так, чтобы в событии был лептонный кандидат в центральной части детектора с потерянйной поперечной энергией более 20 ГэВ, удовлетворяющий строгим критериям отбора, фотонный кандидат в центральном калориметре с  $P_T > 10$  ГэВ, а также  $b$ -струя. Вершина взаимодействия должна быть в пределах 60 см от центра детектора по линии пучка.

В разделе 3.2 описаны критерии идентификации электронов в центральной и торцевой частях калориметра, в разделе 3.3 – критерии идентификации мюонов, в разделе 3.4 – критерии идентификации фотонов.

К электронному кандидату, удовлетворяющему “*строгим*” критериям отбора, применяются следующие требования:

трек в СОТ с  $P_T$ , равным как минимум половине энергии ливня в электромагнитном калориметре;

поперечный профиль ливня в электромагнитном калориметре, соответствующий позиции трека;

распределение энергии между башнями в калориметре соответствует ожидаемому распределению для электронов;

минимальная утечка в адронный калориметр.

Критерий “Строгий100” используется для идентификации высокоэнергетичных электронов с  $E_T^e > 100$  ГэВ. Критерий “Свободный” используется для идентификации дополнительных электронов в событии.

Мюонный кандидат, удовлетворяющий “*строгим*” требованиям, обладает следующими свойствами:

достоверный трек в СОТ,

трековый сегмент в мюонном детекторе согласуется с ожидаемым

сигналом от мюона,

энергия в электромагнитном и адронном калориметрах соответствует ожидаемой энергии от мюона,

время прибытия сигнала в COT соответствует треку, происходящему из  $p\bar{p}$  столкновения.

Для фотона требуется отсутствие трека с  $P_T > 1$  ГэВ, и не более одного трека с  $P_T < 1$  ГэВ, указывающего на кластер в калориметре. Также, для фотона ожидается хороший профиль электромагнитного ливня и минимальная утечка в адронный калориметр.

Идентификация  $b$ -струй описана в разделе 3.5. Поскольку  $b$ -кварки, образующиеся в результате распада пары  $t\bar{t}$ , успевают пролететь несколько миллиметров до момента своего распада, то они могут быть идентифицированы по вторичной вершине в струях с  $E_T > 15$  ГэВ. Для определения вторичной вершины используются все треки с  $P_T > 0.5$  ГэВ в пределах конуса радиуса 0.4 вокруг струи. Для определения первичной вершины выбираются треки, для которых прицельный параметр меньше 1 см.

По инвариантной массе вторичной вершины отбрасываются треки от распадов долгоживущих нейтральных частиц, а также конверсии фотона. Отбрасываются и вершины, координаты которых совпадают в пространстве с веществом детектора, как вторичные взаимодействия. Эффективность таггирования  $b$ -струй как функция  $E_T$  и  $\eta$  показана на рис. 2.

В разделах 3.6 и 3.7 описана методика реконструкции потерянной энергии и расчета полной поперечной энергии события.

В **четвертой главе** представлены результаты расчета вероятности искомого процесса в рамках СМ средствами математического моделирования.

Числа событий  $l\gamma E_T b$  и  $t\bar{t}\gamma$  рассчитываются при помощи программ генерации MadGraph и Pythia методом Монте-Карло. Выходные текстовые файлы программы симуляции обрабатываются с помощью разработанного для этих целей программного модуля LesHouches, после чего эта информация подается на вход программы моделирования данных экспериментальной установки CDF, в результате чего получают симулированные данные в формате, идентичном реальным данным.

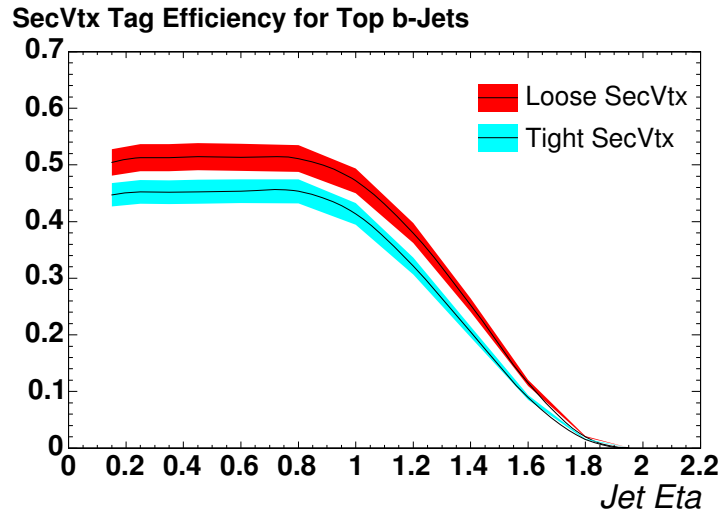
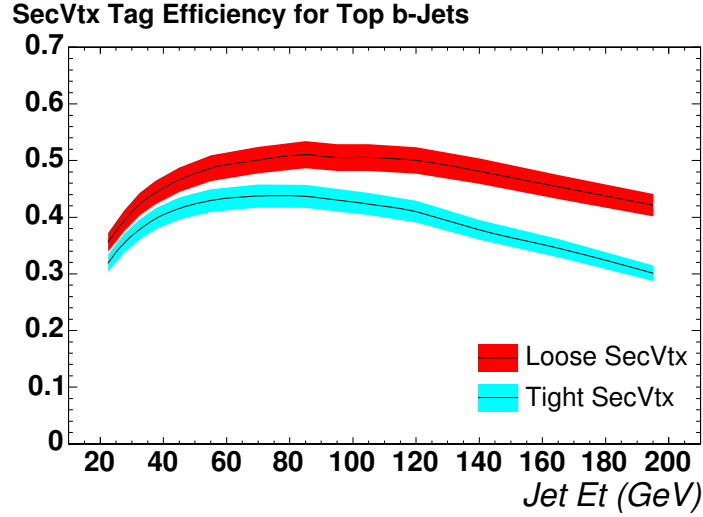


Рис. 2: Эффективность определения b-струй с помощью строгого (Tight)/нестрогого (Loose) SecVtx алгоритма как функция  $E_T$  и  $|\eta|$  в эксперименте CDF.

Поскольку процесс радиационного рождения пары  $t\bar{t}$  оставался малоизученным, теоретические вычисления поправок к основным диаграммам (LO MC) события  $t\bar{t}\gamma$  не были завершены. В связи с этим были использованы оценочные поправки на основе поправок для  $t\bar{t}Z$ ,  $t\bar{t}H$  и  $t\bar{t}$ .

Моделировались также и другие процессы, которые в СМ служат источниками для событий  $l\gamma E_T b$  и  $t\bar{t}\gamma$ . Это процессы рождения  $WZ$ ,  $Wc\bar{c}\gamma$ ,  $Wb\bar{b}\gamma$ ,  $Wc\gamma$  и  $Z(\tau\tau)\gamma$ . Была проведена и оценка числа изучаемых событий для выборок  $WW$ ,  $ZZ$  и  $t+\gamma$ ; они оказались пренебрежимо малыми и далее не рассматривались.

В **пятой главе** проводится анализ фоновых процессов, таких как фотоны

от тормозного излучения электронов, фотоны из адронных струй, неверная идентификация  $b$ -струй, а также КХД фон. В разделе 5.1 рассматриваются три источника фоновых фотонов. Первый источник фона – это фотоны от тормозного излучения электронов. Электрон, пролетая через трековую систему, излучает высокоэнергетичный фотон, а сам теряет энергию и отклоняется от первоначального направления, что приводит к обнаружению фотона вместо (или вместе) с электроном. Второй источник фона – это адронные струи, в которых  $\pi^0$  или фотон из распада адрона имитирует фотон, рожденный напрямую в исследуемом событии. Третий источник фона, дающий относительно небольшой вклад, – это фотон, полученный из  $\tau$ -распада. В первом и втором случаях вероятность фоновых событий была рассчитана на основе данных, а в третьем случае – на основе Монте-Карло. Пример зависимости вероятности ложной идентификации адронной струи как функция поперечной энергии струи приведен на рис. 3.

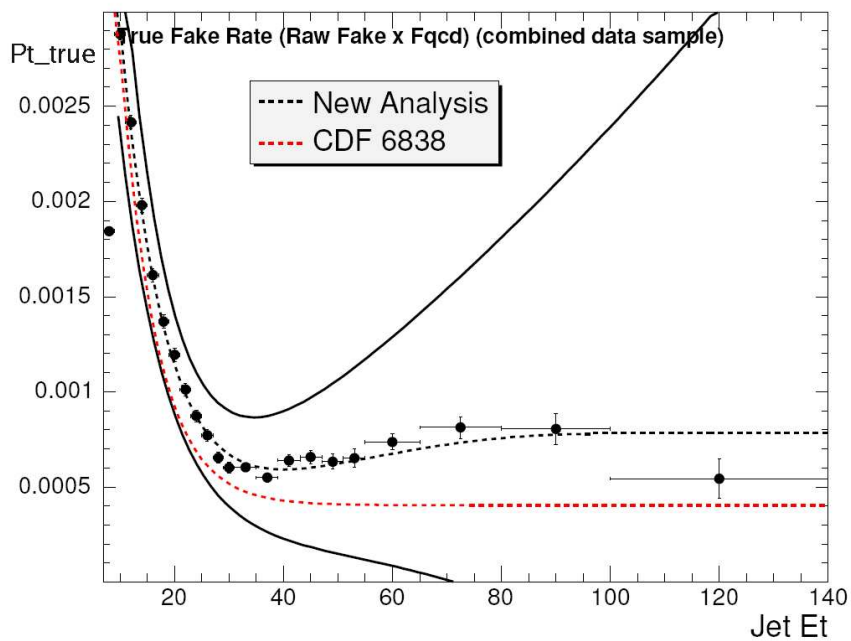


Рис. 3: Зависимость вероятности ложной идентификации адронной струи как функции поперечной энергии струи.

В разделе 5.2 оценивается фон от лептонов. Требование присутствия в событии высокоэнергетичного изолированного лептона и потерянной поперечной энергии значительно увеличивает число реальных  $W$ -бозонов

в отобранной выборке. Однако КХД события, которые не содержат реальных  $W$ -бозонов, могут пройти критерии отбора. Источниками фона от лептонов могут быть фотонная конверсия (для электронов), неверно идентифицированные пионы и каоны (для мюонов) и полулептонный распад тяжелых кварков. Для измерения фона от событий, не содержащих  $W/Z$ , формируется “не- $W/Z$ ” (КХД) выборка, в которой ожидается минимум настоящих лептонов: отбираются лептоны, проходящие нестрогие требования идентификации, и отсекаются события с  $W$  или  $Z$  кандидатами.

В разделе 5.3 проводится оценка числа неверно оцененных  $b$ -струй. Треки в пределах струи от распада легких ароматов могут удовлетворять условиям определения вторичной вершины, а, следовательно, струя может быть неверно идентифицирована как  $b$ -струя. Причинами, по которым такие струи могут быть неверно идентифицированы, являются:

- ограниченная разрешающая способность детектора,
- распад долгоживущих частиц,
- взаимодействие с веществом детектора.

Для оценки числа неверно идентифицированных  $b$ -струй используется SecVtx-алгоритм.

В **шестой главе** проводится анализ систематических ошибок. Ошибки подразделяются на экспериментальные (раздел 6.1), теоретические (раздел 6.2) и ошибку в определении светимости (раздел 6.3).

Вклад в систематические ошибки для предсказаний СМ дают следующие составляющие:

- ошибка на теоретические предсказания, включая неопределенности на NLO вычисления;
- ошибка в определении светимости (6%);
- ошибка в определении триггерных эффективностей (2% для мюонов и 1% для электронов);
- $|z_{\text{vert}}| < 60$  – 1%;
- эффективность идентификации мюона – 2%;
- эффективность идентификации электрона – 1%;
- эффективность идентификации фотона – 4%;
- эффективность идентификации  $b$ -струи – 5%.

Суммарная теоретическая систематическая ошибка для  $t\bar{t}\gamma$  образцов

(полулептонного и дилептонного) составляет 15%, а для образцов  $W\gamma$  + тяжелые частицы – 50% в связи с большой ошибкой на k-фактор.

Систематическая ошибка в определении светимости составляет 6%. Эта ошибка включает неопределенность акцептанса и работы CLC (4.4%), а также неопределенность теоретического расчета полного сечения (4%).

В **седьмой главе** представлены результаты поиска событий  $l\gamma E_T b$  и  $t\bar{t}\gamma$  в данных эксперимента CDF Run II в электронном и мюонном каналах.

В категории  $l\gamma E_T b$  обнаружено 28 событий, из которых 16 событий – в электронном канале и 12 событий – в мюонном канале. После наложения требования  $H_T > 200$  ГэВ было обнаружено 19 событий (10 в электронном и 9 в мюонном каналах). Для категории  $t\bar{t}\gamma$  после наложения требования на число струй найдено 16 событий, удовлетворяющих критериям отбора, по 8 в каждом канале.

Одно из событий, прошедших критерию отбора для  $t\bar{t}\gamma$ , является наиболее интересным. Оно содержит 4 высокоэнергетичных струи, две из которых – b-струи. Восстановленная масса t-кварка для этого события составила 166.5 ГэВ. На рис. 4 показан EVD COT дисплей для данного события.

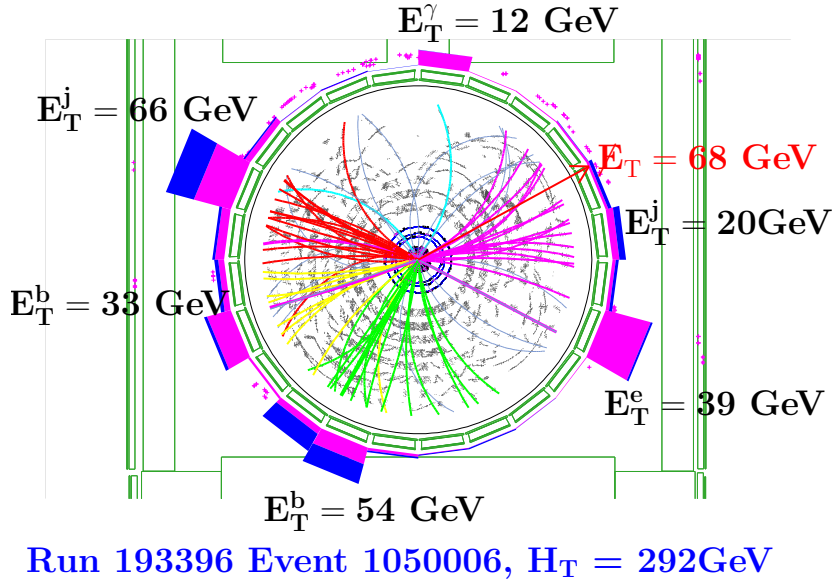


Рис. 4: Event Display COT для  $t\bar{t}\gamma$  события.

Число наблюдаемых экспериментально и ожидаемых согласно СМ  $l\gamma E_T b$  событий приводится в табл. 1, а  $t\bar{t}\gamma$  событий – в табл. 2. Число обнаруженных

$\ell\gamma\cancel{E}_T b$  событий равно 28, тогда как в рамках СМ ожидается  $31.0_{-3.9}^{+4.1}$  событий. Для  $t\bar{t}\gamma$  в эксперименте обнаружено 16  $t\bar{t}\gamma$  событий, при ожидании  $11.2_{-2.1}^{+2.3}$  событий. Таким образом, было установлено, что число событий в категориях  $\ell\gamma\cancel{E}_T b$  и  $t\bar{t}\gamma$  соответствует предсказаниям СМ.

Таблица 1: Число наблюдаемых экспериментально и ожидаемых согласно СМ  $\ell\gamma\cancel{E}_T b$  событий.

Lepton + Photon + $\cancel{E}_T$ + $b$ Events			
СМ	$e\gamma b\cancel{E}_T$	$\mu\gamma b\cancel{E}_T$	$(e + \mu)\gamma b\cancel{E}_T$
$t\bar{t}\gamma$ полулептонные	$2.06 \pm 0.38$	$1.52 \pm 0.28$	$3.58 \pm 0.65$
$t\bar{t}\gamma$ дилептонные	$1.30 \pm 0.23$	$1.02 \pm 0.18$	$2.32 \pm 0.41$
$W^\pm c\gamma$	$1.58 \pm 0.83$	$1.51 \pm 0.80$	$3.09 \pm 1.59$
$W^\pm cc\gamma$	$0.17 \pm 0.12$	$0.46 \pm 0.26$	$0.63 \pm 0.35$
$W^\pm bb\gamma$	$1.30 \pm 0.67$	$0.88 \pm 0.46$	$2.18 \pm 1.11$
$Z(\tau\tau)\gamma$	$0.13 \pm 0.09$	$0.11 \pm 0.08$	$0.24 \pm 0.12$
$WZ$	$0.08 \pm 0.04$	$0.01 \pm 0.01$	$0.09 \pm 0.04$
$\tau \rightarrow \gamma$	$0.12 \pm 0.04$	$0.10 \pm 0.03$	$0.22 \pm 0.05$
Jet faking $\gamma$	$4.56 \pm 1.92$	$3.02 \pm 1.19$	$7.58 \pm 3.11$
Mistagged $b$ -jets	$4.11 \pm 0.41$	$3.54 \pm 0.37$	$7.65 \pm 0.70$
QCD	$1.5 \pm 0.8$	$0.0_{-0.0}^{+1.0}$	$1.5_{-0.8}^{+1.3}$
$ee\cancel{E}_T b, e \rightarrow \gamma$	$1.50 \pm 0.28$	–	$1.50 \pm 0.28$
$\mu e\cancel{E}_T b, e \rightarrow \gamma$	–	$0.45 \pm 0.10$	$0.45 \pm 0.10$
Предсказания СМ	$18.4 \pm 2.4(tot)$	$12.6_{-1.6}^{+1.9}(tot)$	$31.0_{-3.9}^{+4.1}(tot)$
Наблюдено	16	12	28

В результате проведенных экспериментов оказалось возможным определить сечение рождения  $t\bar{t}\gamma$ . Недостаток количества данных не позволяет получить большую точность этой оценки. Ожидается, что такая возможность появится на данных ЛНС. Тем не менее, это первый экспериментальный результат определения сечения данного процесса. Сечение определяется по формуле

$$\sigma_{t\bar{t}\gamma} = \frac{N_{obs} - N_{bgd}}{A_{t\bar{t}\gamma} \times \epsilon_{t\bar{t}\gamma} \times \mathcal{L}}, \quad (1)$$

где  $N_{obs}$  есть число обнаруженных событий  $t\bar{t}\gamma$ ,  $N_{bgd}$  – число событий фона,  $A_{t\bar{t}\gamma}$  – акцептанс для  $t\bar{t}\gamma$ ,  $\epsilon_{t\bar{t}\gamma}$  – эффективность отбора событий,  $\mathcal{L}$  – интегральная светимость.

Акцептанс и эффективность были рассчитаны с помощью Mad-Graph

Таблица 2: Число наблюдаемых экспериментально и ожидаемых согласно СМ  $t\bar{t}\gamma$  событий.

СМ	$t\bar{t}\gamma$		
	$e\gamma b\cancel{E}_T$	$\mu\gamma b\cancel{E}_T$	$(e + \mu)\gamma b\cancel{E}_T$
$t\bar{t}\gamma$ полулептонные	$1.97 \pm 0.36$	$1.47 \pm 0.27$	$3.44 \pm 0.62$
$t\bar{t}\gamma$ дилептонные	$0.52 \pm 0.10$	$0.43 \pm 0.08$	$0.95 \pm 0.17$
$W^\pm c\gamma$	$0.0_{-0}^{+0.05}$	$0.0_{-0}^{+0.05}$	$0_{-0}^{+0.07}$
$W^\pm cc\gamma$	$0.0_{-0}^{+0.04}$	$0.03 \pm 0.03$	$0.03_{-0.03}^{+0.05}$
$W^\pm bb\gamma$	$0.13 \pm 0.08$	$0.02 \pm 0.02$	$0.15 \pm 0.09$
$WZ$	$0.02 \pm 0.02$	$0.0_{-0}^{+0.02}$	$0.02 \pm 0.02$
$\tau \rightarrow \gamma$	$0.08 \pm 0.01$	$0.02 \pm 0.01$	$0.10 \pm 0.01$
Jet faking $\gamma$	$2.37 \pm 1.22$	$1.42 \pm 0.70$	$3.79 \pm 1.92$
Mistagged $b$ -jets	$0.78 \pm 0.20$	$0.83 \pm 0.22$	$1.61 \pm 0.31$
QCD	$0.5 \pm 0.5$	$0.0_{-0.0}^{+1.0}$	$0.5_{-0.5}^{+1.1}$
$ee\cancel{E}_T b, e \rightarrow \gamma$	$0.34 \pm 0.11$	–	$0.34 \pm 0.11$
$\mu e\cancel{E}_T b, e \rightarrow \gamma$	–	$0.20 \pm 0.06$	$0.20 \pm 0.06$
Предсказания СМ	$6.7 \pm 1.4(tot)$	$4.4_{-0.8}^{+1.3}(tot)$	$11.2_{-2.1}^{+2.3}(tot)$
Наблюдено	8	8	16

образца  $t\bar{t}\gamma$ . Сечение для данного образца равно 0.073 pb. Полный образец, после симуляции и реконструкции, содержит 43724 события. Число событий, прошедших критерии отбора, с учетом поправочных коэффициентов и триггерной эффективности, составляет 681 для электронного канала и 484 для мюонного канала.

Статистическая ошибка в расчете полной ошибки измерения сечения рождения является доминирующей в связи с очень малой статистикой. Ошибка же на эффективность, аксептанс и светимость равна 11%.

Таким образом, сечение рождения  $t\bar{t}\gamma$  равно

$$\sigma_{t\bar{t}\gamma} = 0.15 \pm 0.08 \text{ pb}. \quad (2)$$

Теоретическое предсказание для сечения рождения  $t\bar{t}\gamma$  было получено из MadGraph полулептонного образца и составляет  $\sigma_{t\bar{t}\gamma} = 0.08 \pm 0.01 \text{ pb}$ .

**Восьмая глава** посвящена описанию программных кодов, разработанных и внедренных диссертантом в эксперимент CDF Run II для сбора, обработки и визуализации результатов.

В разделе 8.1 описана программа контроля высокого напряжения калориметра, разработанная диссертантом. Программа обеспечила

непрерывный контроль за высоким напряжением калориметров СЕМ, СНА и WНА, что позволило избежать остановок в работе детектора и сборе данных. Эта программа была интегрирована в среду MCS Run II и использовала коммерческое программное оборудование iFix для создания баз данных. Находясь в режиме AUTO-READ в реальном времени, программа обеспечивала последовательное считывание значений напряжения с калориметров СЕМ, СНА и WНА, заполнение соответствующей базы данных на локальном компьютере и на сервере центра контроля CDF. Интервал между считываниями составлял 2 часа, что позволяло осуществить необходимую подстройку и своевременный ремонт аппаратного обеспечения между последовательными считываниями. Кроме того, каждые 12 минут посылался сигнал на сервер центра контроля, что позволяло диагностировать случаи остановки работы системы. Данная программа, находясь в режиме EXPERT, позволяла также осуществлять проверку, управление и тестирование высокого напряжения, и диагностику необходимого ремонта.

В разделе 8.2 описан программный продукт Event Display (EVD) [4], разработанный группой ИТЭФ для визуализации результатов эксперимента CDF Run II. С 2008 г. диссертант является ответственным исполнителем данного проекта. Программный пакет EVD является частью детектора CDF Run II и используется для контроля за сбором и обработкой данных в режиме реального времени и для анализа наблюдаемых событий. Таким образом, этот продукт является важной составляющей в работе системы как на стадии сбора, так и на стадии обработки информации.

Данные, полученные на Tevatron воспринимаются детектором как последовательность импульсов. Обработка данных происходит с помощью программ распознавания и анализа. Формой представления результатов являются, как правило, таблицы, графики и гистограммы, основанные на статистической обработке множества событий. Графическое же изображение одиночного события является важным средством проверки алгоритма реконструкции события, анализа физических данных, диагностики работы системы, и необходимо для осмысления происходящих физических процессов. Цель программы EVD – дать наглядное изображение событий и обеспечить доступ к необработанным и реконструированным данным.

В **заключении** представлены основные результаты диссертации, указывается уровень их теоретической и практической значимости, а также очерчиваются перспективы дальнейших исследований, в том числе на LHC, использующих настоящие данные как контрольные.

1. В работе представлен поиск физики за пределами Стандартной Модели (СМ) при максимально доступной на сегодняшний день энергии столкновения  $p\bar{p}$  в эксперименте CDF Run II на данных с общей светимостью  $1.9 \text{ fb}^{-1}$ . Областью исследования стали события вида  $\ell\gamma E_T b$  и  $t\bar{t}\gamma$ , содержащие лептоны и фотоны высокой энергии.

2. Был осуществлен поиск событий вида  $\ell\gamma E_T + b$ -кварк в эксперименте CDF Run II на данных с общей светимостью  $1.9 \text{ fb}^{-1}$  на ускорителе Теватрон.

3. Был осуществлен поиск событий вида  $t\bar{t}\gamma$ . При наложении дополнительных условий на число струй и полную поперечную энергию в событиях вида  $\ell\gamma E_T b$ , основной вклад вносит радиационное рождение пары  $t\bar{t}$  – события вида  $t\bar{t}\gamma$ .

4. Было проведено сравнение полученных результатов с предсказаниями СМ. На основе изученных данных для событий вида  $\ell\gamma E_T b$  и  $t\bar{t}\gamma$  было установлено, что число экспериментально обнаруженных событий соответствует предсказаниям СМ.

5. Было измерено сечение рождения процесса  $t\bar{t}\gamma$ , что составило  $\sigma_{t\bar{t}\gamma} = 0.15 \pm 0.08 \text{ pb}$  по сравнению с теоретическими предсказаниями  $\sigma_{t\bar{t}\gamma} = 0.08 \pm 0.01 \text{ pb}$ . Более точная оценка поперечного сечения не представляется возможной на данной стадии эксперимента в связи с очень низкой статистикой.

6. Исследованные каналы событий важны как для проверки СМ, так и для поиска событий, интерпретируемых в рамках НФ при большей энергии столкновения. Важно, что радиационное рождение пары  $t\bar{t}$  может быть использовано как контрольный класс событий для изучения ассоциативного рождения  $t\bar{t}H^0$  на LHC. Ожидается, что с началом работы LHC и гораздо большей статистикой, радиационное рождение  $t\bar{t}$  может быть измерено на экспериментах ATLAS и CMS с гораздо большей точностью, что позволит измерить заряд топ-кварка.

7. Была произведена разработка и поддержка программного обеспечения, которое позволило осуществлять непрерывный контроль за высоким

напряжением калориметрической системы CDF, а также поддержка и развитие программы визуализации событий EVD.

В **приложении** приведены списки зафиксированных событий для электронов и мюонов. Представлены экспериментальные кинематические распределения инвариантных масс для лептон-фотонной системы. Приведены также поправочные коэффициенты и триггерная эффективность, используемые при расчетном усреднении событий по методу Монте-Карло.

## Публикации автора по теме диссертации

- [1] T. Aaltonen, ..., I. Shreyber *et al.*, "Searching the Inclusive Lepton + Photon + Missing ET + b-quark Signature for Radiative Top Quark Decay and Non-Standard-Model Processes," Phys. Rev. D **80**, 011102 (2009).
- [2] I. Shreyber [CDF Collaboration], "Searching for new physics at CDF," FERMILAB-CONF-06-410-E (2006).
- [3] A. Abulencia, ..., I. Shreyber *et al.*, "Search for new physics in lepton + photon + X events with 929 pb(-1) of collision at TeV," Phys. Rev. D **75**, 112001 (2007).
- [4] D. Litvintsev, A. Loginov, I. Shreyber, "The CDF Run II Event Display," CDF Note 7054 (2006).