Государственный Научный Центр Российской Федерации
Институт Теоретической и Экспериментальной Физики
имени А.И.Алиханова

На правах рукописи

Логинов
Андрей Борисович

Поиск аномального рождения событий с лептонами и фотонами высокой энергии на Теватроне

Специальность: 01.04.23 — физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2006

УДК 539.12

Работа выполнена в ГНЦ РФ — Институте Теоретической
и Экспериментальной Физики им. А.И.Алиханова

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 :	Лаборатория Ядерных Проблем Объединенного Института Ядерных Исследований, г. Дубна, Московская обл.

Защита состоится 12 сентября 2006 года в 11 часов на заседании Диссертационного совета Д.201.002.01 по защите кандидатских диссертаций в ГНЦ РФ ИТЭФ по адресу: г. Москва, ул. Большая Черёмушкинская, д. 25, Конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНЦ РФ ИТЭФ.

Автореферат разослан 10 августа 2006 г.

Учёный секретарь Диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук В.В.Васильев

1. Общая характеристика работы

Темой настоящей работы является проверка Стандартной Модели (СМ) при максимально доступной энергии столкновения $p\bar{p}$, в событиях с совместным рождением фундаментальных частиц, включая γ, Z^0, $W^{\pm}$. Поиск проводится по виду событий так, чтобы не быть привязанным к многочисленным моделям физики за пределами СМ, так называемой Новой Физики (НФ), при этом не сужая сферу поиска.

Настоящая работа основывается на 305 pb^{-1} данных, набранных за период с 2002 по 2004 гг. на обновленной экспериментальной установке CDF, работающей на ускорительном комплексе Теватрон в Лаборатории Ферми (г. Батавия, США) при максимально доступной энергии столкновения $p\bar{p}$ $\sqrt{s} = 1.96$ TeV.

1.1. Актуальность темы

Стандартная Модель (СМ) физики элементарных частиц — теория, описывающая взаимодействия элементарных частиц: тысячи сечений рождения и ширин распадов, измеренных на различных экспериментах, объясняются в рамках СМ. Тем не менее, в СМ не включено гравитационное взаимодействие, и в ней нет частиц-кандидатов для темной материи. Бозон хиггса — последняя из частиц СМ, не обнаруженная экспериментально, при теоретическом расчете его массы вычисления петлевых поправок расходятся квадратично. Еще один открытый вопрос в СМ — проблема иерархии. К решению проблем СМ существуют различные подходы в рамках других теорий, в которых при энергиях порядка ТэВ возможно проявление новых эффектов за пределами СМ.

Ускорительный комплекс Теватрон в Лаборатории Ферми, на котором осуществляются столкновения протонов (p) и антипротонов ($\bar{p}$), на сегодняшний день обладает наибольшей энергией в центре масс, $\sqrt{s} = 1.96$ TeV. Новый эксперимент, Run II, отличается от предшествующих прежде всего более высокой энергией столкновения пучков, обновленным ускорительным комплексом, более высокой светимостью, а также улучшенной эксперимен-

тальной установкой, детектором CDF. Изучение столкновений при таких энергиях может привести к открытию физики за пределами СМ, так называемой новой физики (НФ).

Совместное рождение двух калибровочных векторных бозонов рассчитывается в рамках СМ, и в событиях такого вида следует искать рождение новых частиц, которые могут быть связаны с калибровочным сектором СМ (например, свойства t-кварка изучаются в рождении $t\bar{t}$, и распадом $t \to Wb$). Часть СМ, известная как теория электрослабых взаимодействий, объединяет электромагнитные и слабые взаимодействия. Переносчики взаимодействий, фотон (γ) и массивные заряженные $W^{\pm}$ и нейтральный Z бозон, — фундаментальные частицы в этой теории, поэтому изучение их свойств важно для проверки положений СМ.

В дополнение к физическому анализу, диссертант является лидером уникального для эксперимента CDF проекта визуализации событий как в режиме реального времени для контроля данных в процессе сбора, так и для анализа программного пакета CDF Run II Event Display (EVD).

1.2. Цели и задачи исследования

Проверка СМ при максимально доступной энергии столкновения $\mathrm{p\bar{p}}$, в событиях с совместным рождением фундаментальных частиц, включая γ, $Z^0, W^{\pm}$. Поиск проводится по виду событий так, чтобы не быть привязанным к многочисленным моделям НФ и не сужать сферу поиска. Кинематические критерии отбора установлены заранее, *a priori*, и соответствуют критериям использованным в анализе, сделанном на предыдущей стадии эксперимента (Run I), в котором наблюдалось расхождение в 2.7 σ между предсказаниями в рамках СМ и экспериментальными данными для событий вида $\ell\gamma\not{E}_{\mathrm{T}}$.

Другой поставленной целью стала разработка, развитие и поддержка программного пакета CDF Run II Event Display (EVD) для визуализации данных, набранных в эксперименте, и для контроля качества набираемых данных в процессе сбора. EVD стал существенным вкладом в работу и отладку экспериментальной установки CDF, необходимым для бесперебойного и продуктивного функционирования системы.

1.3. Научная новизна

Полученный результат закрыл вопрос об аномалии, обнаруженной на предыдущей стадии эксперимента в Run I, а разработанные методы позволят продолжить поиск НФ в событиях с лептонами и фотонами высоких энергий как на большем образце данных на Теватроне, так и на данных при большей энергии столкновения на LHC. С другой стороны, обнаружено небольшое число событий "на хвостах" кинематических распределений, там где ожидание в рамках СМ мало. Эти события вносят вклад в превышение числа наблюдаемых событий над СМ ожиданием точно так же, как и событие $ee\gamma\gamma\not{E}_{\mathrm{T}}$ в Run I поиске событий вида $\ell\gamma + X$. Чтобы узнать, являются ли эти события редким фоном, или же чем-то новым, требуются новые данные.

Поскольку анализ не привязан к моделям и в нем рассматривается широкий круг различных объектов, он является одним из самых обширных и разносторонних в сотрудничестве CDF, при этом не привлекая чрезмерных людских ресурсов. Этот анализ уникален для Теватрона, и ему уделяется внимание как внутри сотрудничества CDF, так и за его пределами.

Run II Event Display (EVD) — уникальный для эксперимента CDF программный пакет для визуализации событий — является одним из наиболее важных инструментов как для понимания событий, которые могут оказаться проявлением НФ, так и для иллюстрации наблюдаемых СМ процессов.

1.4. Положения, выносимые на защиту

1. Идентификация объектов и контрольные образцы.
2. Анализ интервалов стабильности для контрольных образцов.
3. Методы оценки фонов вследствие неверной идентификации лептонов и фотонов высокой энергии.
4. Оценка вкладов СМ: мотивация, контроль, проверка.
5. Классификация $\ell\gamma+X$ событий. Сравнение экспериментальных данных с предсказаниями СМ для событий вида $\ell\gamma\not{E}_{\mathrm{T}}$, $\ell\ell\gamma$ и $\ell\gamma\gamma$.
6. Мотивация, разработка и поддержка программного пакета визуализации событий CDF Run II Event Display (EVD).

1.5. Апробация работы и публикации

Основные материалы диссертации опубликованы в работах [1, 2, 3, 4]. Материалы, изложенные в диссертации, докладывались на многих конференциях и семинарах.

Статус поиска событий вида $\ell\gamma + X$ представлен на конференции Американского Физического Общества (APS, Филадельфия, 2003 г.). Позже, поиск был анонсирован SUSY сообществу на Конференции по суперсимметрии (SUSY, Таксон AZ, 2003 г.). Результаты поиска $\ell\gamma + X$ были представлены на Конференции по суперсимметрии (SUSY, Дарам, Англия, 2005 г.), Международной Школе Субъядерной Физики (ISSP, Эриче, Сицилия, 2005 г.), Зимнем Инситуте в Лэйк Луиз (Лэйк Луиз, Канада, 2006 г.), на конференции по Физике на Адронных Коллайдерах (HCP, Дарам, США, 2006 г.). Также материалы диссертации были представлены на совещании сотрудничества CDF (Ситжес, Испания, 2005 г.) и на совещаниях рабочих групп CDF по экзотике, физике фотонов, и сверхэкзотичным явлениям.

Результаты поиска аномального рождения событий, содержащих заряженный лептон (ℓ, e или μ) и фотон (γ) высокой энергии, были представлены на семинарах в университетах, а также были рецензированы для публикации многими институтами, входящими в состав сотрудничества CDF, среди которых Университет Чикаго (UC), IPP (Канада), Университет Duke, Лаборатория Беркли (LBNL), CHEP (Корея), Университет штата Иллинойс в Урбана-Шампейн (UIUC), а также Лаборатория Ферми.

1.6. Личный вклад диссертанта

Диссертант принимал активное участие в наборе и обработке физических данных на установке CDF, применил независимую оценку фонов для неверной идентификации фотонов и лептонов, провел анализ событий с лептонами и фотонами высокой энергии и подготовку полученных результатов для публикаций.

В дополнение к физическому анализу, диссертант возглавляет проект CDF Run II Event Display (EVD) с 2001 по настоящее время. EVD является одним из наиболее важных инструментов как для иллюстрации наблюдаемых СМ процессов, так и для понимания событий, которые могут оказаться проявлением НФ. EVD используется многими сотрудниками CDF как для анализа собранных данных, так и для визуализации событий в режиме ре-

ального времени для контроля данных в процессе сбора.

Статус поиска событий вида $\ell\gamma + X$ представлен диссертантом на конференции APS'03. На Международных конференциях по физике высоких энергий (SUSY'05 и ISSP'05) диссертантом были сделаны обзорные доклады о результатах поисков НФ в событиях с фотонами высокой энергии, полученных сотрудничеством CDF, в число которых входил результат, представленный в диссертации. На Международной Школе Субъядерной Физики (Эриче, Сицилия, 2005) диссертант был удостоен награды за оригинальную работу в экспериментальной физике за доклад "Поиск новой физики в событиях с фотонами", в который вошли результаты диссертационной работы.

Для обработки и анализа данных, а также моделирования исследуемых физических процессов диссертантом было создано математическое и программное обеспечение. Исследования стабильности рождения $W-$ и $Z-$ бозонов использовались в сотрудничестве для контроля работы детектора. Смоделированные физические процессы рождения дибозонов ($W\gamma$, $Z\gamma$) и трибозонов ($W\gamma\gamma$, $Z\gamma\gamma$) широко используются в сотрудничестве CDF в различных анализах по поиску НФ. Результаты работы также используются в качестве контроля для других физических анализов.

1.7. Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, тринадцати глав, заключения и приложения. Ее объем – 143 страницы, включая 53 таблицы и 66 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 102 наименования.

2. Содержание работы

Во **Введении** формулируется постановка задачи и приводится план расположения материала.

Стандартная Модель (СМ) [см. Nucl. Phys. **22** 588, (1961), Phys. Rev. Lett. **19** 1264, (1967)] физики элементарных частиц - теория, описывающая взаимодействия элементарных частиц. Бозон хиггса - последняя из частиц в СМ, не обнаруженная экспериментально [см. "Higgs Hunter's Guide", (2000)]. При расчете массы бозона хиггса вычисления петлевых поправок расходятся квадратично. В СМ отсутствиют частицы-кандидаты для темной материи, и в СМ не включено гравитационное взаимодействие. Проблема иерархии

[см. Phys. Lett. **B260**, 447 (1991); Phys. Rev. **D44**, 817 (1991)] - еще один открытый вопрос в СМ.

Существуют различные подходы к решению проблем СМ. Например, для решения проблемы иерархии бозон хиггса полностью удаляется из теории [Техницвет, Phys. Lett. B **352** 382 (1995)], или поле хиггса включается в расширенную группу симметрии [Суперсимметрия, см. Phys. Rev. D **55**, 1372 (1997); Phys. Rev. Lett. **89**, 011801 (2002)]. Ожидается, что СМ является теорией, работающей при относительно низких энергиях, тогда как при энергиях порядка ТэВ возможно проявление новых эффектов за ее пределами.

Первая глава посвящена мотивации представленного физического анализа, дает введение в технику поиска *по виду события*, а также приводит обзор результатов, полученных на предыдущей стадии эксперимента, Run I.

Часть СМ, известная как теория электрослабых взаимодействий [см. Л.Б.Окунь, "Лептоны и кварки", (1984)], объединяет электромагнитные и слабые взаимодействия. Переносчики взаимодействий — фотон (γ) и массивные заряженные $W^{\pm}$ и нейтральный Z бозон, — фундаментальные частицы в этой теории.

Следовательно, ставится задача проверить СМ при максимально доступной энергии столкновения $p\bar{p}$, в событиях с совместным рождением фундаментальных частиц, включая γ, Z^0, $W^{\pm}$. Цель эксперимента - поиск аномального рождения событий вида $\ell\gamma + X$, т.е. содержащих заряженный лептон (ℓ, e или μ) и фотон (γ) высокой энергии. Проводимое исследование не опирается на модели НФ, и поиск осуществляется по виду события.

В то время как в эксперименте имеет смысл руководствоваться теорией, следует оставаться открытым для возможных новых эффектов. Поэтому используется техника модельнонезависимого *поиска по виду события*, и ведется поиск существенных отклонений от предсказаний СМ. На предыдущей стадии эксперимента (Run I) не было найдено доказательств существования НФ, но были указания, что СМ может оказаться неполной. Тогда было принято решение, что эти аномалии нужно искать в данных Run II, и поэтому кинематические критерии отбора следует установить заранее, *a priori*.

Стратегией для *поиска по виду события* является проверка СМ в поисках несоответствий между теоретическими предсказаниями и экспериментальными результатами. Кинематические критерии отбора, установленные заранее, позволяют проверить аномалии из Run I. Поиск и анализ событий ведется на основе частиц, которые найдены в этом событии. Таким образом,

проводится *поиск по виду события.*

В 1995 году на эксперименте CDF, в котором изучались столкновения $p\bar{p}$, при энергии центра масс 1.8 TeV на ускорительном комплексе Теватрон в Лаборатории Ферми, в образце данных, соответствующем полной светимости 86 pb^{-1}, было обнаружено [см. Phys.Rev.Lett 81, 1791 (1998); Phys. Rev. D **59**, 092002 (1999)] событие, согласующееся с рождением двух высокоэнергетичных фотонов, двух высокоэнергетичных электронов, и большой потерянной поперечной энергией (рис. 1).

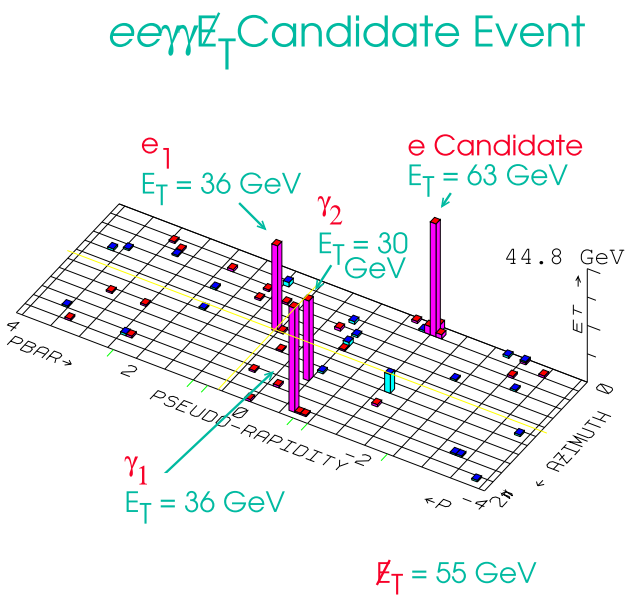


Рис. 1. Событие–кандидат $ee\gamma\gamma\not{E}_{\rm T}$ из данных Run I.

В СМ предсказывается, что события такого вида крайне редки, с доминирующим вкладом от рождения четырех векторных бозонов, двух W и двух фотонов: $WW\gamma\gamma \to (e\nu)(e\nu)\gamma\gamma \to ee\gamma\gamma\not{E}_{\rm T}$. Ожидаемое число событий от этого процесса $8{\times}10^{-7}$ событий. Другие источники, в основном неверная идентификация того или иного объекта в детекторе, дают вклад $5{\times}10^{-7}$ событий. Таким образом, ожидается $(1 \pm 1) \times 10^{-6}$ событий в 86 pb^{-1}.

Обнаружение $ee\gamma\gamma\not{E}_{\rm T}$ события привело к развитию инклюзивных поисков по виду события, так чтобы расширить сферу поиска. Одним из таких поисков стал анализ событий вида лептон + фотон + X ($\ell\gamma + X$) [см. Phys. Rev. Lett. **89**, 041802 (2002); Phys. Rev. D **66**, 012004 (2002)], где X может быть еще одним заряженным лептоном (e or μ), γ, $\not{E}_{\rm T}$, произвольным количеством адронных струй, а также комбинацией этих объектов. В целом данные согласовались с ожиданием в рамках СМ, за возможным исключением

для событий, содержащих существенную потерянную энергию в дополнение к лептону и фотону. Для этого вида событий наблюдалось 16 событий при ожидании в рамках СМ 7.6 ± 0.7 событий, что соответствует статистической флуктуации в 2.7σ.

Во **Второй главе** дается описание экспериментальной установки.

Трековая система установки CDF включает в себя центральную дрейфовую камеру (COT), а также систему кремниевых детекторов, состоящую из двустороннего пятислойного детектора SVX II, двустороннего двуслойного промежуточного детектора ISL, и однослойного детектора L00 (Layer 00), устойчивого к повышенным радиационным нагрузкам и закрепленного на трубе, в которой сталкиваются пучки. Трековая система окружена магнитом и торцевыми калориметрами.

За пределами соленоида располагаются калориметры, покрывая регион $|\eta| < 3.6$. Электромагнитный калориметр (EM) сделан на основе комбинации пластин Pb-сцинтиллятор, а адронный калориметр (HAD) сделан на основе пластин Fe-сцинтиллятор. Центральный калориметр ($|\eta| < 1.1$) унаследован из Run I, тогда как торцевые калориметры ($1.1 < |\eta| < 3.6$) разработаны специально для Run II. Район $0.77 < \eta < 1.0$, $75\ ^\circ < \phi < 90^\circ$ не оснащен калориметром, поскольку используется для криогенных систем.

На установке CDF существуют четыре независимые мюонные системы: центральный мюонный детектор (CMU), центральная обновленная мюонная система (CMP), центральное мюонное расширение (CMX), и промежуточный мюонный детектор (IMU).

Уровень неэластичного рассеяни $p\bar{p}$ используется для определения светимости ($\mathcal{L}$). Газовый черенковский счетчик светимости, CLC [см. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A 461 (2001) 540-544], измеряет число взаимодействий во время пролета пучка для определения светимости Теватрона. Две системы CLC распожоложены между трубой пучка и торцевыми калориметрами, покрывая $3.7 < |\eta| < 4.7$.

Частота столкновений на Теватроне намного выше, чем скорость записи данных, и поэтому необходим отбор записываемых событий. Трехуровневая триггерная система позволяет уменьшать объем данных на каждом этапе.

В **Третьей главе** дается подробное описание программного пакета [4], визуализации событий CDF Run II Event Display (EVD), а также относящихся к нему проектов. EVD используется для контроля данных в процессе сбора, их анализа, а также для представления результатов.

Данные, полученные на ускорителе, представляют собой поток сигналов от подсистем. Детектор воспринимает эти сигналы как последовательность импульсов, распределенных во времени, между множеством каналов различных подсистем. Сигналы обрабатываются программами распознавания и анализа, которые создают из них более сложные объекты, например треки, кластеры, трековые сегменты в мюонных камерах, адронные струи.

Как правило, физические результаты основаны на статистическом анализе *множества* событий. Стандартной формой представления таких результатов являются гистограммы, графики и таблицы. Тем не менее, графическое изображение *одного события*, включая отображение функционального состояния детектора, является мощным средством для проверки достоверности алгоритмов реконструкции и анализа событий. Для быстрой оценки качества данных и диагностики проблем, а также для публичной демонстрации визуальное представление событий является наиболее эффективным способом передачи информации.

EVD взаимодействует как с самими данными, так и с программными пакетами моделирования и реконструкции. Выделяются 3 вида объектов в EVD: *Реальные объекты, Графические объекты и Виды.* Для наглядного отображения *Реальных объектов* и доступа к информации о событии над *Видами и Графическими объектами* должны быть проведены определенные *Операции.*

EVD - уникальный для эксперимента CDF программный пакет для визуализации событий как в режиме реального времени для контроля данных в процессе сбора, так и для анализа, активно используемый сотнями членов сотрудничества. EVD является одним из наиболее важных инструментов как для понимания событий, которые могут оказаться проявлением НФ, так и для иллюстрации наблюдаемых СМ процессов. EVD, один из важнейших вкладов в отладку и работу CDF Run II детектора, является единственным графическим инструментом позволяющим наглядно *видеть* события.

Четвертая глава описывает используемые образцы данных. В ней также представлены кинематические критерии отбора для событий $\ell\gamma + X$, и интервалы взятия данных, используемые для проверки стабильности работы экспериментальной установки.

Лептон-фотонные ($\ell\gamma$) данные собраны из комбинации инклюзивных образцов высокоэнергетичных лептонов и фотонов так, чтобы обеспечить высокую триггерную эффективность для $\ell\gamma$, стабильную во времени. Для то-

го чтобы убедиться в стабильности работы подсистем установки и набора данных, строятся графики для числа событий на pb^{-1} светимости для контрольных образцов.

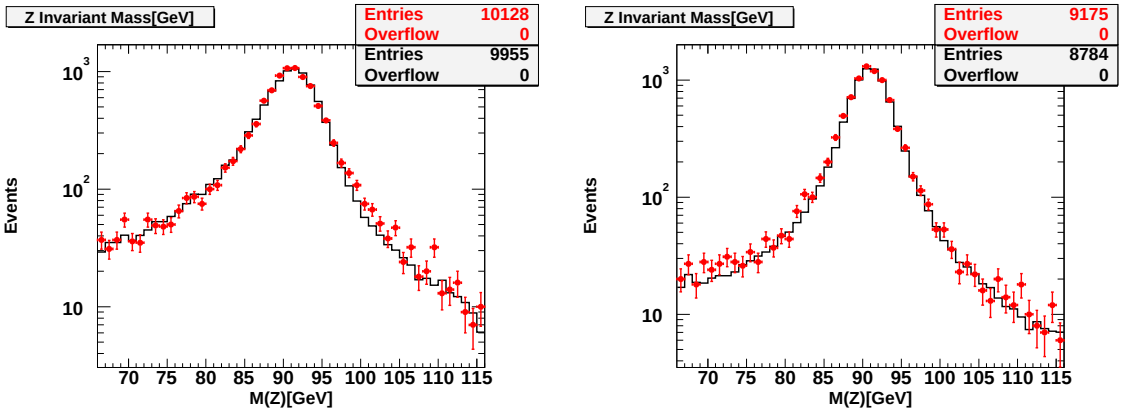
События с лептонами и фотонами высоких энергий отбираются с помощью трехуровневой триггерной системы [см. Phys. Rev. D **71**, 032001 (2005)]. На эти события накладывается требование, чтобы в событии срабатывал триггер на лептон с $\mathrm{P_T} > 18\ GeV$ или на фотон с $\mathrm{E_T} > 25\ GeV$ в центральной части детектора, $|\eta| \lesssim 1.0$. Триггерная система отбирает фотонные и электронные кандидаты на основе кластеров энергии в центральном электромагнитном калориметре. Далее электроны различаются от фотонов требованием трека в COT, направленном на этот кластер. Мюонный триггер требует, чтобы трек в COT согласовывался с трековым сегментом, восстановленным в мюонных дрейфовых камерах.

Кинематические критерии отбора установлены заранее, *a priori*, и соответствуют критериям, использованным в анализе $\ell\gamma + X$, проведенном на предыдущей стадии эксперимента, Run I: инклюзивный $\ell\gamma$ образец отбирается, так чтобы в событии был фотонный кандидат в центральном калориметре с $\mathrm{E_T^\gamma} > 25\ GeV$, лептонный кандидат($e$ или μ) в центральной части детектора с $\mathrm{E_T^\ell} > 25\ GeV$, удовлетворяющий *строгим* критериям отбора. Вершина взаимодействия должна быть в пределах 60 см от центра детектора по линии пучка, так чтобы продукты распада находились в центральной части детектора.

Критерии отбора и контрольные образцы для мюонов описаны в **Пятой главе**, для электронов в **Шестой главе** и для фотонов в **Седьмой главе**.

Мюонный кандидат, удовлетворяющий *строгим* требованиям, обладает следующими свойствами: a) достоверный трек в COT, с сигналом минимум на 6 из 8 слоев; b) энергия, оставленная в электромагнитном и адронном отделах калориметра, согласуется с ожиданием сигнала от минимально-ионизирующей частицы; c) трековый сегмент в мюонном детекторе CMX или одновременно в CMU и CMP детекторах [см. Phys. Rev. D **71**, 032001 (2005)], согласуется с экстраполированной позицией трека в COT; d) измерение времени прибытия сигнала в COT соответствует треку, происходящему из столкновения $\mathrm{p\bar{p}}$, а не космикой.

Электронный кандидат, удовлетворяющий *строгим* требованиям, обладает следующими свойствами: a) достоверный трек в COT с $\mathrm{P_T}$, составляющим как минимум половину энергии ливня в электромагнитном калориметре (ес-



(a) Масса($Z^0 \to e^+e^-$), лог.шкала (b) Масса($Z^0 \to \mu^+\mu^-$), лог.шкала

Рис. 2. Контрольные образцы $Z^0 \to e^+e^-$ и $Z^0 \to \mu^+\mu^-$. Показаны распределения по инвариантной массе $Z^0 \to e^+e^-$ (a) и по инвариантной массе $Z^0 \to \mu^+\mu^-$ (b). Точками показаны данные, гистограммами изображено предсказание из MC образцов.

ли же энергия ливня $E_T > 100\ GeV$, то требование на P_T изменяется до $25\ GeV$); b) поперечный профиль ливня в электромагнитном калориметре, согласующийся с поведением электрона, и который соответствует позиции экстраполированного трека; c) распределение энергии между двумя башнями в калориметре, содержащими электромагнитный ливень, соответствует ожидаемому распределению для электронов в данных с тестового пучка; d) минимальную утечку в адронное отделение калориметра.

Требования, налагаемые на фотонный кандидат, это отсутствие трека с $P_T > 1\ GeV$ и не более одного трека с $P_T < 1\ GeV$, указывающего на кластер в калориметре; хороший профиль электромагнитного ливня; и минимальная утечка в адронное отделение калориметра.

Чтобы уменьшить фон от фотонов или лептонов, происходящих из распадов в адронных струях, лептоны и фотоны в каждом событии должны быть изолированными: энергия E_T, оставленная в башнях калориметра в конусе $\eta-\varphi$ радиуса $R = 0.4$ вокруг позиции фотона или лептона суммируется, и из нее вычитается энергия фотона или лептона. Оставшаяся в конусе энергия E_T должна быть меньше чем $2.0\ GeV + 0.02 \times (E_T - 20\ GeV)$ для фотона, или меньше чем 10% от E_T для электронов или P_T для мюонов. В дополнение, для фотонов сумма P_T всех треков в COT в конусе должна быть меньше чем $2.0\ GeV + 0.005 \times E_T$.

Дополнительные мюоны должны обладать высоким поперечным импуль-

сом, $\mathrm{P_T} > 20\ GeV$ и удовлетворять одному из двух критериев отбора: те же требования, что и для строгого отбора мюонов, за исключением ослабленного требования на число слоев для трека в COT. Альтернативный критерий отбора для дополнительных мюонов - более строгие требования на трек, требование на сумму энергий в адронном и электромагнитном калориметрах более 0.1 GeV, но отсутствие требований на сегмент в мюонных детекторах.

Дополнительные центральные электроны должны обладать высокой поперечной энергией ($\mathrm{E_T} > 20\ GeV$) и удовлетворять критериям отбора, схожими со строгими критериями для центральных электронов, но с требованием на поперечный импульс трека $\mathrm{P_T} > 10\ GeV$ (вместо $0.5\times\mathrm{E_T}$), и без требований на измерения в CES, такие как поперечный профиль ливня и распределение энергии между двумя башнями в калориметре, содержащими электромагнитный ливень.

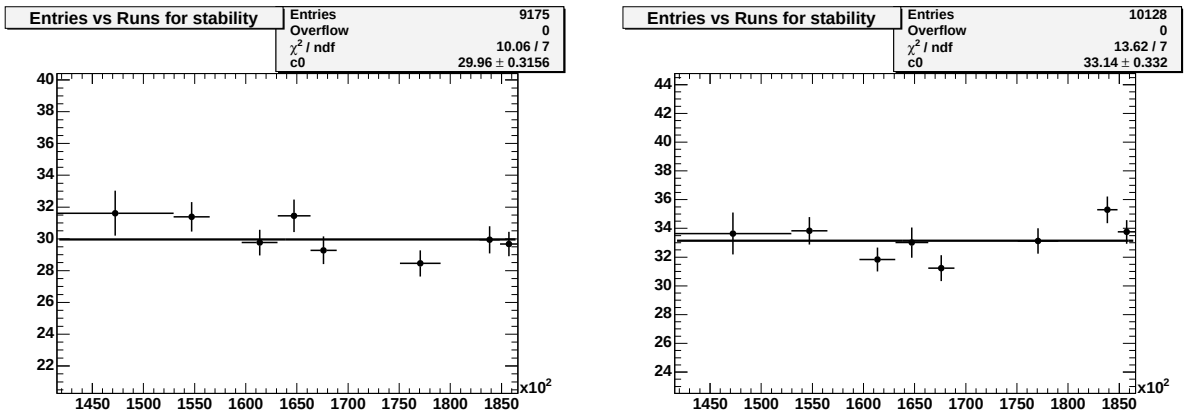
Электроны в торцевой части калориметра ($1.2 < |\eta| < 2.0$) должны обладать следующими свойствами: $\mathrm{E_T} > 15\ GeV$; минимальная утечка энергии в адронное отделение калориметра; кластеру в калориметре должен соответствовать трек в кремниевом детекторе, основанный на, по меньшей мере, трех измерениях, а также согласующийся с поведением электрона поперечный профиль ливня в электромагнитном калориметре, который соответствует позиции экстраполированного трека [см. Phys. Rev. D **71**, 051104 (2005)].

Рождение $W^{\pm}$ и Z^0 используется в качестве контрольных образцов, чтобы убедиться в хорошем понимании эффективностей для высокоэнергетичных электронов, мюонов, а также $\not\!\!E_{\mathrm{T}}$ (рис. 2). Графики временной стабильности $\mathrm{Z}^0 \to \mu^+\mu^-$ и $\mathrm{Z}^0 \to e^+e^-$ событий показаны на рис. 3.

Также создается контрольный образец для фотонов, используя события, в которых один из электронов испускает высокоэнергетичный фотон. На эти события налагается дополнительное требование, чтобы инвариантная масса $e\gamma$ была в пределах 10 GeV от массы Z^0 бозона (рис. 4).

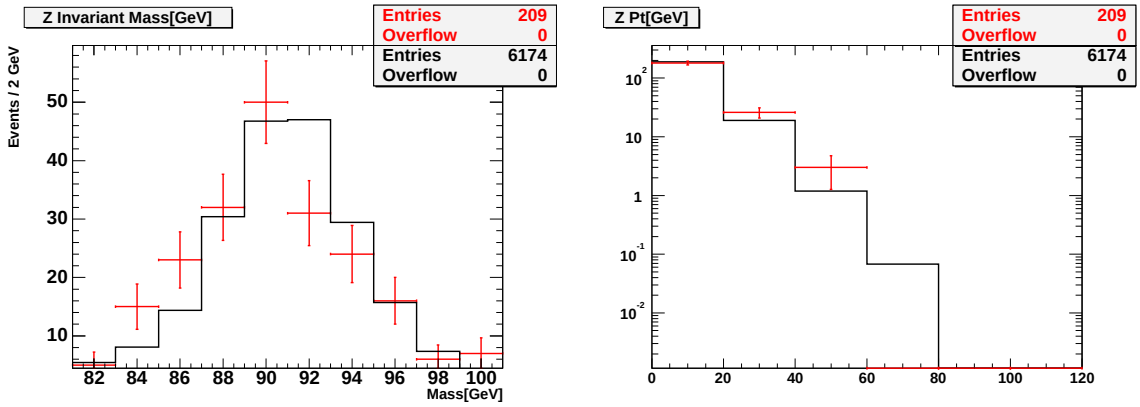
В **Восьмой главе** описывается, как считается потерянная поперечная энергия ($\not\!\!E_{\mathrm{T}}$), а также дается определение переменной H_T.

Потерянная поперечная энергия, $\not\!\!E_{\mathrm{T}}$, считается на основе энергий в калориметре в регионе $|\eta| < 3.6$. Затем делаются поправки к $\not\!\!E_{\mathrm{T}}$ на неоднородный отклик калориметра, учитывая адронные струи с непоправленной энергией $\mathrm{E_T} > 15\ GeV$ и $\eta < 2.0$, и также делаются поправки на мюоны с $\mathrm{P_T} > 20\ GeV$. H_T - это сумма поперечных энергий (импульсов) для всех объектов в событии, включая лептоны, фотоны, $\not\!\!E_{\mathrm{T}}$, адронные струи.



(a) $Z^0 \to \mu^+\mu^-$ (b) $Z^0 \to e^+e^-$

Рис. 3. Графики стабильности для (a) $Z^0 \to \mu^+\mu^-$, и (b) $Z^0 \to e^+e^-$ контрольных образцов: число событий на pb^{-1} в зависимости от номера эксперимента. Границы интервалов выбраны в соответствии с остановками в работе ускорительного комплекса Теватрон, или же изменениям в триггерной системе. Приведены только статистические ошибки на число событий $Z^0 \to \mu^+\mu^-$ и $Z^0 \to e^+e^-$, систематическая ошибка в определении светимости (6%) не показана. Тенденции в поведении $Z^0 \to \mu^+\mu^-$ схожи с $Z^0 \to e^+e^-$. Это объясняется общими эффектами, такими как светимость, триггер, работа COT.



(a) Инвариантная масса (b) P_T

Рис. 4. Распределения переменных для $Z^0 \to e^+e^-$ и $e + `\gamma`$ образцов: (a) Инвариантная масса $e + `\gamma`$, (b) $P_T(e + `\gamma`)$. Точками показан Z^0-подобный образец $e\gamma$; гистограммы показывают ee события из данных с теми же кинематическими требованиями, что и $e\gamma$. Гистограмма нормирована на число Z^0-подобных событий. Распределение по инвариантной массе $e + `\gamma`$ слегка смещено влево по сравнению с $Z^0 \to e^+e^-$; это объясняется тем что энергия излученного фотона немного меньше энергии испустившего его электрона.

В **Девятой главе** представлены оценки числа событий от СМ процессов, приводящих к рождению лептон-фотонных событий. Основной вклад вносит рождение $W\gamma$, $Z\gamma$; также оценивается вклад от трехбозонных процессов, $W\gamma\gamma$ и $Z\gamma\gamma$. Для каждой из этих оценок используется как минимум два независимых генератора событий.

Основной источник $\ell\gamma$ событий на Теватроне - это электрослабое рождение дибозонов, в котором $W-$ или Z^0/γ^*- бозон распадается в лептонной моде ($\ell\nu$ или $\ell\ell$), и фотон излучается из сталкивающихся кварков, из W, или из заряженного лептона в конечном состоянии [см. Phys. Rev. Lett. **94**, 041803 (2005)]. Число таких событий оценено при помощи программ, рассчитывающих матричные элементы в первом приближении (LO MC) [см. Comput. Phys. Commun. **81**, 357 (1994); Phys. Rev. D **48**, 5140 (1993); Phys. Rev. D **47**, 940 (1993); Nucl. Instrum. Methods A **534**, 250, (2004)]. Результат работы этих программ, 4-вектора частиц, участвующих во взаимодействии, подавался на вход программы PYTHIA [см. Comput. Phys. Commun. **82** (1994) 74; Comput. Phys. Commun. **101** (1997) 232], параметры которой настроены таким образом, чтобы воспроизводить *подложку события*[1], т.е. низкоэнергетичные треки, получающиеся в результате взаимодействия остатков протона и антипротона, а также излучения из кварков до начала взаимодействия. Для симуляции событий сгенерированные частицы затем пропускаются через смоделированный детектор, и затем эти события восстанавливаются с тем же кодом реконструкции, который используется для данных.

Ожидаемый вклад от рождения $W\gamma$ и $Z^0/\gamma^*+\gamma$ в поиске событий вида $\ell\gamma\not{E}_{\mathrm{T}}$ и $\ell\ell\gamma$ приведен в табл. 1 и 2. Поправки на фейнмановские диаграммы более высокого порядка (K-фактор), зависящие как от инвариантной массы лептонов, так и $\mathrm{E_T}$ фотона, примененены согласно [см. Phys. Rev. D **48**, 5140 (1993); Phys. Rev. D **57**, 2823 (1998)]. В событиях вида $\ell\gamma\not{E}_{\mathrm{T}}$ ожидается 22.5 $\pm$ 2.8 события от $W\gamma$ и 5.7 $\pm$ 1.0 события от $Z^0/\gamma^*+\gamma$. В событиях вида $\ell\ell\gamma$, ожидается 20.3 $\pm$ 2.4 событий от $Z^0/\gamma^*+\gamma$; вклад от $W\gamma$ пренебрежимо мал. Ошибка на ожидаемое число событий от $W\gamma$ и $Z^0/\gamma^*+\gamma$ включает в себя неопределенность на функцию распределения партонов (PDF), используемую для моделирования событий (5%), масштаб факторизации (2%) и K-фактор (3%), сравнение различных Монте Карло генераторов ($\sim$ 5%), и ошибку определения интегральной светимости (6%).

Для симуляции трехбозонных каналов, $W\gamma\gamma$ и $Z\gamma\gamma$, использовались две

[1] В англоязычной терминологии *underlying event*

События, содержащие Лептон + Фотон + $\not\!\!E_T$ ($\ell\gamma\not\!\!E_T$)			
Источник в СМ	$e\gamma\not\!\!E_T$	$\mu\gamma\not\!\!E_T$	$(e+\mu)\gamma\not\!\!E_T$
$W^{\pm}\gamma$	13.70±1.89	8.84±1.35	22.54±2.80
$Z^0/\gamma^* + \gamma$	1.16±0.40	4.49±0.64	5.65±1.03
$W^{\pm}\gamma\gamma, Z^0/\gamma^*+\gamma\gamma$	0.14±0.02	0.18±0.02	0.32±0.03
$W^{\pm}\gamma, Z^0/\gamma^*+\gamma\to\tau\gamma$	0.71±0.18	0.26±0.08	0.97±0.22
$W^{\pm}$+лже-γ	2.8±2.8	1.6±1.6	4.4±4.4
$Z^0/\gamma^*\to e^+e^-, e\to\gamma$	2.45±0.33	-	2.45±0.33
КХД(He-W/Z) фон	0.7±0.7	0.3±0.3	1.0±0.8
Предсказание в рамках СМ	**21.7±3.4**	**15.7±2.2**	**37.3±5.4**
Наблюдаемые События	**25**	**17**	**42**

Таблица 1. Сравнение числа событий, предсказываемых в рамках СМ, и экспериментально обнаруженного числа событий для событий вида $\ell\gamma\not\!\!E_T$.

События, содержащие несколько Лептонов + Фотон ($\ell\ell\gamma$)			
Источник в СМ	$ee\gamma$	$\mu\mu\gamma$	$ll\gamma$
$Z^0/\gamma^* + \gamma$	12.50±1.53	7.81±0.88	20.31±2.40
$Z^0/\gamma^* + \gamma\gamma$	0.24±0.03	0.12±0.02	0.36±0.04
Z^0/γ^*+лже-γ	0.3±0.3	0.2±0.2	0.5±0.5
$Z^0/\gamma^*\to e^+e^-, e\to\gamma$	0.23±0.09	-	0.23±0.09
КХД(He-W/Z) фон	0.6±0.6	1.0±1.0	1.6±1.2
Предсказание в рамках СМ	**13.9±1.7**	**9.1±1.4**	**23.0±2.7**
Наблюдаемые События	**19**	**12**	**31**

Таблица 2. Сравнение числа событий, предсказываемых в рамках СМ, и экспериментально обнаруженного числа событий для $\ell\ell\gamma$.

программы для рассчета матричных элементов, MADGRAPH [см. Comput. Phys. Commun. **81**, 357 (1994)] и COMPHEP [см. Nucl. Instrum. Methods A **534**, 250, (2004)]. Ожидаемый вклад от этих процессов мал, 0.32 ± 0.03 и 0.36 ± 0.04 событий для $\ell\gamma\not\!\!E_T$ и $\ell\ell\gamma$ категорий, соответственно.

Фон от событий в рамках СМ, для которых фотон или лептон неправильно идентифицированы, описывается в **Десятой главе**.

Фотоны высоких энергий в изобилии рождаются в адронных струях. Например, такие частицы как π^0 или η распадаются на фотоны, которые потом могут пройти критерии отбора фотонов в анализе. Число событий, в которых адронная струя ошибочно измерена как фотон, ожидаемых в $\ell\gamma\not\!\!E_T$ и $\ell\ell\gamma$, определяется измерением распределения E_T струй в образцах $\ell\not\!\!E_T$+jet и $\ell\ell$+jet, соответственно, и затем домножается на вероятность того, что струя

будет неправильно идентифицирована как фотон, $P_\gamma^{jet}(\mathrm{E_T})$, которая измеряется в данных, для которых сработал триггер на адронные струи.

Ошибка на число таких событий оценивается, используя измеренный спектр $\mathrm{E_T}$ адронных струй, и верхний и нижний пределы на вероятность идентифицировать адрон как фотон как функцию $\mathrm{E_T}$. Вероятность идентифицировать адрон как фотон $P_\gamma^{jet} = (6.5 \pm 3.3) \times 10^{-4}$ для $\mathrm{E_T^\gamma} = 25\ GeV$, и $(4.0 \pm 4.0) \times 10^{-4}$ для $\mathrm{E_T^\gamma} = 50\ GeV$ [Phys. Rev. Lett. **94**, 041803 (2005)]. Таким образом, число событий, в которых адроны неверно идентифицированы как фотоны, составляет 4.4 ± 4.4 для событий $\ell\gamma\not{E}_\mathrm{T}$ и 0.5 ± 0.5 для $\ell\ell\gamma$.

Вероятность того, что электрон, пролетая через трековую систему, излучит высокоэнергетичный фотон, который затем будет обнаружен в детекторе, P_γ^e, измеряется при помощи контрольного образца $e\gamma$ событий, в которых электрон и фотон разлетаются в противоположных направлениях.

В дальнейшем для отбора событий, которые согласуются с рождением Z^0 и последующим распадом на электроны, $Z^0 \to e^+e^-$, требуется, чтобы инвариантная масса $e\gamma$ была в пределах $10\ GeV$ от массы Z^0 (рис. 4).

Число неверно идентифицированных событий $e\gamma$, деленное на двойное число ee событий, дает $P_\gamma^e = (1.7 \pm 0.1)\%$. Применяя эту вероятность к электронам в инклюзивных лептонных образцах, получаем, что 2.5 ± 0.3 и 0.2 ± 0.1 события проходят критерии отбора для категорий $\ell\gamma\not{E}_\mathrm{T}$ и $\ell\ell\gamma$, соответственно.

Оценка фона, обусловленного событиями, в которых адронные струи были неверно идентифицированы, что привело к классификации события как $\ell\gamma\not{E}_\mathrm{T}$ или $\ell\ell\gamma$, производится путем изучения суммы поперечных импульсов треков, $\mathrm{P_T}$, в конусе в пространстве $\eta - \varphi$ с радиусом $R = 0.4$ вокруг лептонного трека. По оценкам этот фон составляет 1.0 ± 0.8 и 1.6 ± 1.2 событий для категорий $\ell\gamma\not{E}_\mathrm{T}$ и $\ell\ell\gamma$, соответственно.

Фон от мюонов, рождающихся в распадах адронов (как правило, каонов), и от адронов, проникающих сквозь железо и достигающих мюонных камер, а также от распада b- и c- кварков, пренебрежимо мал.

В **Одиннадцатой главе** дается обзор систематических ошибок, разделенных на экспериментальные, теоретические, и ошибку в определении светимости. В **Двенадцатой главе** представлены топологии событий, рассматриваемых в диссертации, а также приведено число событий в различных подкатегориях. На рис. 5 показаны результаты для суммы электронного и мюонного $\ell\gamma$–каналов.

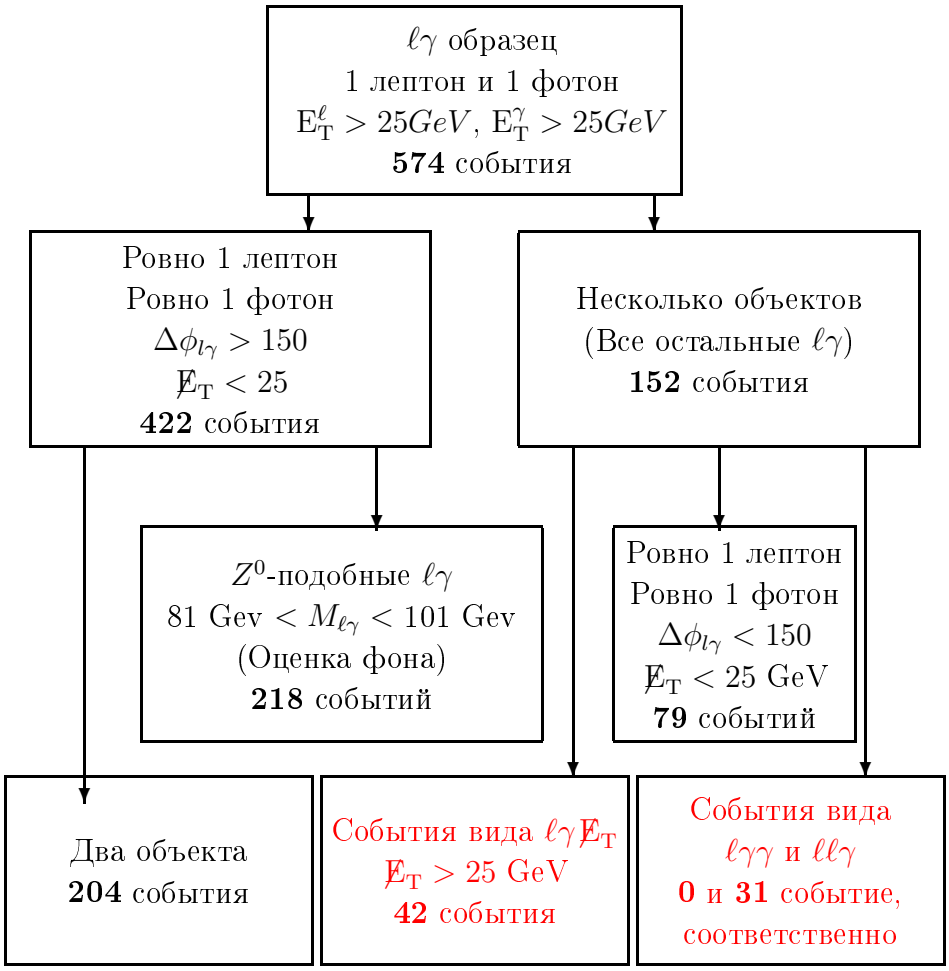


Рис. 5. Лептон-фотонный образец: категории инклюзивных $\ell\gamma$-событий.

В **Тринадцатой главе** дается сравнение экспериментальных данных с числом событий, ожидаемых в рамках СМ.

Условия отбора на $\ell\gamma$ всего проходят 574 события, из них 508 инклюзивных $e\gamma-$ и 66 инклюзивных $\mu\gamma$-кандидатов. Из 508 инклюзивных $e\gamma$ событий, 397 содержат электрон и фотон в противоположном направлении по φ в пределах 30°, $\not{E}_T < 25\ GeV$, и не содержат дополнительных електронов или фотонов. Доминирующий вклад в такие события вносит распад $Z^0 \to e^+e^-$, в котором один из электронов, пролетая через трековую систему, излучает высокоэнергетичный фотон, что приводит к обнаружению электрона и фотона приблизительно в противоположных направлениях по φ, и инвариантная масса $e\gamma$ в этом случае близка к массе Z^0.

Первая категория для поиска — события с $\ell\gamma\not{E}_T + X$, для отбора которых мы требуем, чтобы событие содержало $\not{E}_T > 25\ GeV$ в дополнение к фотону и лептону, удовлетворяющему строгим требованиям. Из полного числа $\ell\gamma$

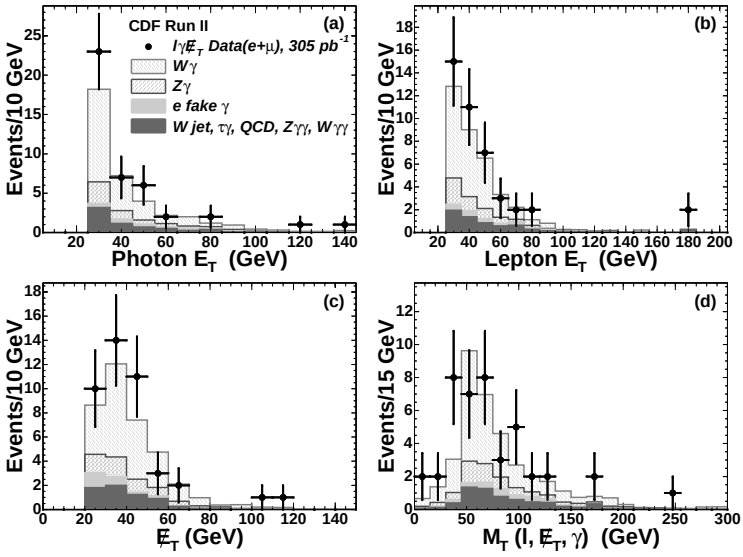


Рис. 6. Распределения для событий в образце $\ell\gamma\not{E}_{\rm T}$ (точки) для a) поперечная энергия $\rm E_T$ фотона; b) поперечная энергия $\rm E_T$ лептона (e или μ); c) потерянная поперечная энергия, $\not{E}_{\rm T}$; и d) поперечная масса системы $\ell\gamma\not{E}_{\rm T}$. Гистограммы отображают ожидаемые распределения в рамках СМ, включая фон от неверно восстановленных γ, ℓ и $\not{E}_{\rm T}$.

событий (574), требованиям на $\not{E}_{\rm T}$ удовлетворяют 25 $e\gamma\not{E}_{\rm T}$ событий и 17 $\mu\gamma\not{E}_{\rm T}$ событий.

На рис. 6 показаны получившиеся распределения для $e\gamma\not{E}_{\rm T}$ и $\mu\gamma\not{E}_{\rm T}$ событий по a) поперечной энергии $\rm E_T$ фотона; b) поперечной энергии $\rm E_T$ лептона; c) потерянной поперечной энергии, $\not{E}_{\rm T}$; и d) поперечная масса системы $\ell\gamma\not{E}_{\rm T}$, где $\rm M_T = [(E_T^\ell + E_T^\gamma + \not{E}_T)^2$ - $(\vec{E}_T^\ell + \vec{E}_T^\gamma + \vec{\not{E}}_T)^2]^{1/2}$.

Число обнаруженных экспериментально и ожидаемых согласно СМ $\ell\gamma$ событий для $\ell\gamma\not{E}_{\rm T}$, приводится в табл. 1. В эксперименте наблюдается 42 $\ell\gamma\not{E}_{\rm T}$ события, тогда как в рамках СМ ожидается 37.33 ± 5.38 событий. Доминирующий вклад в предсказание СМ для этой категории событий вносит рождение $W\gamma$. Оставшийся вклад в события такого типа происходит из рождения $Z\gamma$, а также трех бозонов ($W\gamma\gamma$ и $Z\gamma\gamma$), лептонных мод распада τ, а также от неверно идентифицированных лептонов, фотонов, или $\not{E}_{\rm T}$. "Лже-γ"означает адронные струи(например, π^0), неверно идентифицированные как фотоны. Под КХД(He-W/Z) фон мы понимаем события, в которых адронная струя идентифицирована как лептон.

Другая категория для поиска — события вида $\ell\ell\gamma+X$. Для отбора $\ell\ell\gamma+X$ мы требуем, чтобы помимо лептона и фотона, удовлетворяющих строгим критериям отбора, в событии был дополнительный электрон или мюон. Кри-

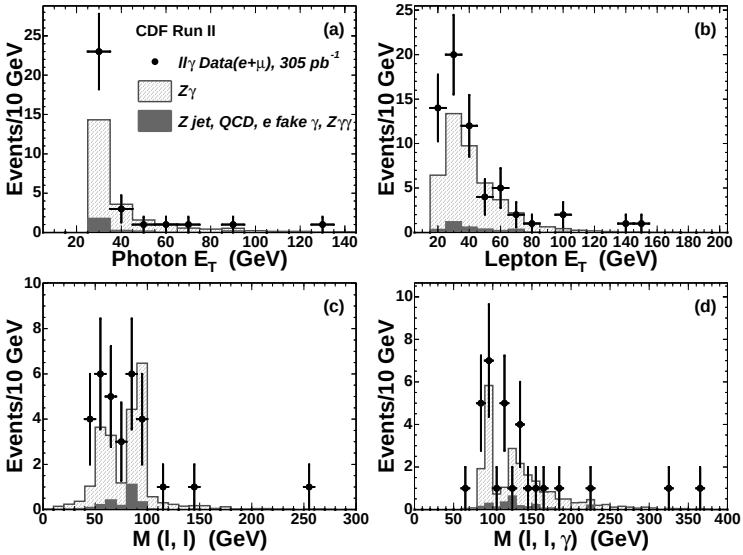


Рис. 7. Распределения для событий в образце $\ell\ell\gamma$ (точки) для a) поперечная энергия E_T фотона; b) поперечная энергия E_T лептона (два объекта на событие); c) инвариантная масса системы двух лептонов; d) инвариантная масса двух лептонов и фотона $m_{\ell\ell\gamma}$. Гистограммы отображают ожидаемые распределения в рамках СМ, включая фон от неверно восстановленных фотонов и лептонов.

терий отбора $\ell\ell\gamma$ проходят 31 событие (19 $ee\gamma$ и 12 $\mu\mu\gamma$) из 574 $\ell\gamma$ событий. Не обнаружено редких в СМ событий с разными лептонами, $e\mu\gamma$. На рис. 7 показаны экспериментальные распределения по a) поперечной энергии E_T фотона; b) поперечному импульсу E_T лептонов; c) инвариантной массе двух лептонов; d) инвариантной массе двух лептонов и фотона $m_{\ell\ell\gamma}$.

Число обнаруженных экспериментально и ожидаемых согласно СМ событий вида $\ell\ell\gamma$, приводится в табл. 2. В эксперименте наблюдается 31 $\ell\ell\gamma$ событий, тогда как в рамках СМ ожидается 22.96 ± 2.72 событий.Доминирующий вклад в предсказание СМ для этой категории событий вносит рождение $Z\gamma$. Оставшийся вклад в события такого типа происходит из рождения $Z\gamma\gamma$, а также от неверно идентифицированных лептонов и фотонов. "Лже-γ"означает адронные струи, неверно идентифицированные как фотоны. Под КХД фоном мы понимаем события, в которых струя идентифицирована как лептон.

Основываясь на предсказаниях СМ, в $\ell\ell\gamma$ не ожидается событий с большой $\not{E}_T$; $ee\gamma\gamma\not{E}_T$ событие, обнаруженное в Run I, представляло особый интерес в контексте суперсимметрии из-за большого значения $\not{E}_T$ ($55 \pm 7\ GeV$). На рисунке 8 показаны распределения для подкатегорий $\ell\ell\gamma$, $\mu\mu\gamma$ и $ee\gamma$.

Событий, обладающих $\not\!\!E_{\rm T} > 25\ GeV$, не наблюдается.

Еще одна инклюзивная категория для поиска - события вида $\ell\gamma\gamma + X$. Для отбора $\ell\gamma\gamma + X$ требуется, чтобы в $\ell\gamma$ событии был дополнительный фотон. Число обнаруженных экспериментально и ожидаемых согласно СМ событий вида $\ell\gamma\gamma$, приводится в табл. 3. В экспериментальных данных не обнаружено $\ell\gamma\gamma$ событий при ожидании 0.28 ± 0.08 событий в рамках СМ.

События, содержащие несколько Фотонов + Лептон ($\ell\gamma\gamma$)			
Источник в СМ	$e\gamma\gamma$	$\mu\gamma\gamma$	$l\gamma\gamma$
$W^{\pm}\gamma\gamma$	0.0067 ± 0.0014	0.0037 ± 0.00095	0.010 ± 0.0017
$Z^0\gamma\gamma$	0.015 ± 0.0017	0.011 ± 0.0014	0.026 ± 0.0022
$Z^0\gamma$, $e \to \gamma$	0.193 ± 0.080	-	0.193 ± 0.080
ℓjj, $\ell\gamma j$, $j \to \gamma$	0.02 ± 0.02	0.02 ± 0.02	0.04 ± 0.04
Предсказание в рамках СМ	0.24 ± 0.08	0.035 ± 0.02	0.28 ± 0.08
Наблюдаемые События	0	0	0

Таблица 3. Сравнение числа событий, предсказываемых в рамках СМ, и экспериментально обнаруженного числа событий для событий вида $\ell\gamma\gamma$.

Предсказанное и наблюдаемое число событий для $\ell\gamma\not\!\!E_{\rm T}$ и $\ell\ell\gamma$ категорий показано в табл. 1 и 2. Обнаружено 42 $\ell\gamma\not\!\!E_{\rm T}$ событие, при ожидании 37.3 $\pm$ 5.4 событий. В канале $\ell\ell\gamma$, обнаружено 31 событий, при ожидании 23.0 $\pm$ 2.7 событий. Ни в одной из категорий поиска не наблюдается существенного разногласия между СМ и экспериментом. Сравнение ожидаемых и экспериментально наблюдаемых распределений показано на рис. 6 для категории поиска $\ell\gamma\not\!\!E_{\rm T}$, и на рис. 7 и 8 для $\ell\ell\gamma$. В эксперименте не обнаружено событий вида $\ell\gamma\gamma$, при ожидании около 0.3 события (табл. 3).

В **Заключении** подводятся итоги проделанной работы. Важный вывод, основанный на анализе новых данных, состоит в том, что уровень превыше-

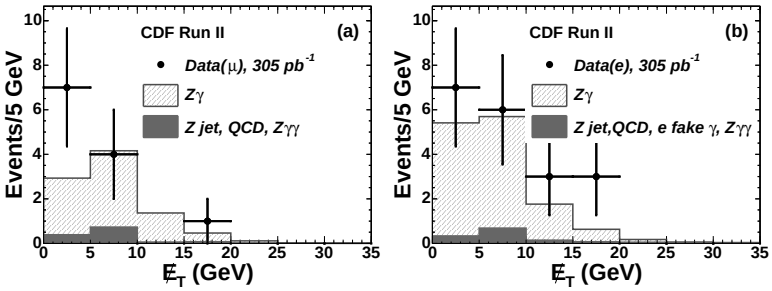


Рис. 8. Распределения по потерянной поперечной энергии, $\not\!\!E_{\rm T}$, наблюдаемой в инклюзивном поиске (a) $\mu\mu\gamma$-событий и (b) $ee\gamma$-событий. Гистограммы отображают ожидаемые распределения в рамках СМ, включая фон от неверно восстановленных фотонов и лептонов.

ния числа обнаруженных событий в Run I над предсказаниями СМ в событиях типа $\ell\gamma\not{E}_{\mathrm{T}}$, составивший 2.7 σ, оказался статистической флуктуацией. В случае, если отношение числа обнаруженных и ожидаемых событий для $\ell\gamma\not{E}_{\mathrm{T}}$ в данных Run I, 16/7.6, осталось бы на прежнем уровне, найденное превышение в 2.7 σ в этом канале привело бы к обнаружению 78$\pm$11 событий в данных Run II, тогда как экспериментально обнаруженное число событий составило 42.

Установлено, что число событий в подкатегориях $\ell\gamma\not{E}_{\mathrm{T}}$ и $\ell\ell\gamma$ $\ell\gamma + X$ образца соответствует предсказаниям СМ. Не обнаружено таких событий, как Run I событие-кандидат $ee\gamma\gamma\not{E}_{\mathrm{T}}$, и, как более общее наблюдение, не найдено $\ell\ell\gamma$ событий с аномально большой $\not{E}_{\mathrm{T}}$ или же с дополнительными фотонами.

Тем не менее, обнаружено, что в событиях вида $\ell\gamma\not{E}_{\mathrm{T}}$ в данных Run II число экспериментально обнаруженных событий несколько превышает СМ предсказание. Возможно, что теоретические вычисления на древесном уровне с поправкой на K-фактор, зависящий от энергии фотона $\mathrm{E}_{\mathrm{T}}^{\gamma}$ и от инвариантной массы дилептонов, для каналов $W\gamma$ и $Z\gamma$, в которых содержится множество диаграмм, включая излучение из начального состояния, недостаточно точны для описания имеющихся экспериментальных данных.

С другой стороны, обнаружено небольшое число событий “на хвостах” кинематических распределений, там где ожидание в рамках СМ крайне мало. Эти события вносят вклад в превышение числа наблюдаемых событий над СМ ожиданием, точно так же как и событие $ee\gamma\gamma\not{E}_{\mathrm{T}}$ в Run I поиске событий вида $\ell\gamma + X$. Для того чтобы узнать, являются ли эти события редким фоном, или же чем-то новым, требуются новые данные.

Планируется, что к концу эксперимента Run II будет набрано в 10-20 раз больше данных, чем представлено в диссертации. Большая статистика потребует улучшенного понимания фонов, равно как и лучших оценок рождения $W\gamma$ и $Z\gamma$ в рамках СМ, т.к. доминирующей ошибкой станет систематическая, что включает в себя теоретическую систематическую ошибку. Другая ошибка - неопределенность в оценке вероятности того, что адронная струя будет неправильно идентифицирована как фотон, на данный момент также ограничена статистикой и впоследствии будет существенно улучшена для новых данных. Таким образом, надежное теоретическое предсказание $Z\gamma$ и $W\gamma$ выйдет на первый план.

Подводя итог сказанному выше, хотя в новых данных не найдено событий, подобных $ee\gamma\gamma\not{E}_{\mathrm{T}}$, и разногласие между данными и теорией для $\ell\gamma\not{E}_{\mathrm{T}}$ куда

менее значимо, чем для данных Run I, дан ответ на вопрос, вызвавший большой интерес в среде физиков-теоретиков. Исследованные каналы остаются интересными и важными для проверки положений СМ, и наработанные для анализа методики, а также приобретенные знания, будут полезными для поисков НФ в этом канале как на большем образце данных на Теватроне, так и на данных при большей энергии столкновения на LHC.

В **Приложении** приводятся списки $(\ell\gamma + X)$ событий, представлены дополнительные распределения для событий вида $\ell\gamma\not{E}_{\mathrm{T}}$ и $\ell\ell\gamma$.

Список публикаций

[1] A. Abulencia *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **97**, 031801 (2006).

[2] A. Loginov (for the CDF Collaboration), Eur.Phys.J. C **46**, Supplement 2, pp. 21-31 (2006)

[3] A. Loginov for the CDF Collaboration, contributed paper to the 13th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions. FERMILAB-CONF-05-598-E

[4] D. Litvintsev, A. Loginov, I. Shreyber "CDF Run II Event Display Manual", CDF 7054; A. Loginov, Y.C. Chen "Live Events at CDF", http://evd.fnal.gov/online;
A. Loginov *et al.* "CDF Run II Event Display C++ package", http://cdfkits.fnal.gov/CdfCode/source/RootEventDisplay/, http://cdfkits.fnal.gov/CdfCode/source/RootMods/