

1-2004-57

Б-23

На правах рукописи

БАНДУРИН
Дмитрий Владимирович

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СОБЫТИЙ
АССОЦИАТИВНОГО РОЖДЕНИЯ ПРЯМЫХ ФОТОНОВ
И АДРОННЫХ СТРУЙ НА ТЭВАТРОНЕ
ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОЙ ШКАЛЫ
ЭНЕРГИИ СТРУИ И ИЗУЧЕНИЯ
ГЛЮОННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ПРОТОНЕ

Специальность: 01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

346 8

Москва 2004
[Дубна]

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Дзепелова
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор

Скачков
Николай Борисович
(ЛЯП ОИЯИ)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Дубинин
Михаил Николаевич
(НИИЯФ МГУ)

кандидат физико-математических наук

Кузнецов
Олег Михайлович
(ЛФЧ ОИЯИ)

Ведущая организация:

Институт физики высоких энергий,
г. Протвино

Защита диссертации состоится “ ” _____ 2004 г. в _____
часов на заседании диссертационного совета К501.001.03 в Московском
государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992,
г. Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, корпус 19, аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-исследовательского
института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского госу-
дарственного университета им. М.В. Ломоносова

Автореферат разослан “ ” _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К501.001.03
кандидат физико-математических наук

А.К. Манагадзе

Общая характеристика работы

Настоящая работа основана на результатах исследований физики процессов «прямой фотон + струя» («Z-бозон + струя»), выполненных при участии автора в 1995–2004 гг. в Лаборатории Физики Частиц и Лаборатории Ядерных Проблем ОИЯИ. С помощью проведенного моделирования данных процессов при энергиях Тэватрона и Большого Адронного Коллайдера (ЛНС) и анализа экспериментальных данных детектора D0 (Лаборатория им. Ферми), выработаны новые критерии отбора упомянутых выше событий, позволяющие улучшить точность определения шкалы энергии струи, а также показано, что этот отбор допускает хорошую статистическую обеспеченность для измерения глюонного распределения в протоне в данных коллайдерных экспериментах при планируемой светимости.

Актуальность темы.

Установление абсолютной шкалы энергии струи, детектируемой преимущественно адронным и электромагнитным калориметрами, является одной из приоритетных задач для любого pp или $p\bar{p}$ коллайдерного эксперимента. Точность ее определения оказывает значительное влияние на решение многих важнейших задач современной физики.

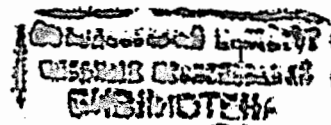
Это является особенно важным для планируемого на Тэватроне в Run II более точного измерения массы топ-кварка (m_t). По результатам Run I, значения m_t , установленные в D0 и CDF, соответственно равны:

$$m_t = 173.3 \pm 5.6(\text{стат.}) \pm 5.5(\text{сист.}) \text{ ГэВ}/c^2 \text{ (D0)},$$
$$176.1 \pm 5.1(\text{стат.}) \pm 5.3(\text{сист.}) \text{ ГэВ}/c^2 \text{ (CDF)}. \quad (1)$$

Наибольшее значение систематической ошибки в обоих экспериментах (около 4 ГэВ/ c^2) обусловлено неопределенностью шкалы энергии струи.

Ошибка в шкале энергии струи также доминирует в определении сечений рождения $t\bar{t}$ -пар (составляя в некоторых каналах их образования до 70% от общей ошибки), а также в процессе «одиночного» рождения топ-кварка (например, в процессах $u\bar{d} \rightarrow \bar{b}t$, $ug \rightarrow \bar{b}dt$).

Исследования спектра инвариантной массы двух струй (M_{jj}), а также скалярной суммы поперечных энергий всех струй (H_T) в данном событии являются хорошими тестами для проверки существующих моделей



составной структуры кварков и лептонов. Однако, главная причина систематической неопределенности в полученных на Тэватроне спектрах по M_{jj} и H_T — точность определения шкалы энергии струи. Так, по данным эксперимента D0 эта неопределенность составляет 17% при $H_T \sim 500$ ГэВ и 34% при $H_T \sim 1000$ ГэВ. В спектре по M_{jj} соответствующая систематическая неопределенность составила 7% при $M_{jj} \sim 200$ ГэВ/с² и 30% при $M_{jj} \sim 1000$ ГэВ/с².

Поиск суперсимметричных частиц, предсказываемых различными моделями суперсимметрии (SUSY), также входит в программу исследований на адронных коллайдерах Тэватрон и LHC. Поскольку среди каналов распада многих SUSY частиц преобладают (2-, 4- и даже 6-) струйные каналы, неопределенности в шкале энергии струи могут непосредственно влиять на ошибку установления масс этих частиц. Точное определение энергии струи также необходимо для правильной оценки вклада фоновых событий (процессы с рождением $t\bar{t}$ пар, $W^\pm/Z^0 + N$ струй). Так, в эксперименте D0 по поиску скварков и глюино в оценке фона к их рождению, которая делалась на основе предсказаний Монте-Карло, неопределенности в шкале энергии струи являлись доминирующими.

Известно, что многие теоретические предсказания по рождению новых частиц (бозоны Хиггса, SUSY частицы), а также по оценке фона к ним, в экспериментах, проводимых на Тэватроне, и будущих экспериментах на LHC, основаны на использовании разных параметризаций глюонной компоненты структурной функции протона при малых x и больших значениях квадрата переданного импульса Q^2 . Поэтому проведение измерения глюонной плотности непосредственно в тех же экспериментах позволит иметь самосогласованную физическую картину изучаемых процессов, и, несомненно, представляет большой интерес.

Очевидно, что обоснование возможности такого измерения с правильной оценкой выхода необходимых для этой цели событий и определением вклада фоновых процессов является важным этапом в подготовке такого измерения.

Таким образом, увеличение точности определения энергии струи и измерение глюонного распределения в экспериментах на Тэватроне и LHC являются актуальными проблемами в современной физике высоких энергий.

Общая характеристика работы

Настоящая работа основана на результатах исследований физики процессов «прямой фотон + струя» («Z-бозон + струя»), выполненных при участии автора в 1995–2004 гг. в Лаборатории Физики Частиц и Лаборатории Ядерных Проблем ОИЯИ. С помощью проведенного моделирования данных процессов при энергиях Тэватрона и Большого Адронного Коллайдера (LHC) и анализа экспериментальных данных детектора D0 (Лаборатория им. Ферми), выработаны новые критерии отбора упомянутых выше событий, позволяющие улучшить точность определения шкалы энергии струи, а также показано, что этот отбор допускает хорошую статистическую обеспеченность для измерения глюонного распределения в протоне в данных коллайдерных экспериментах при планируемой светимости.

Актуальность темы.

Установление абсолютной шкалы энергии струи, детектируемой преимущественно адронным и электромагнитным калориметрами, является одной из приоритетных задач для любого pp или $p\bar{p}$ коллайдерного эксперимента. Точность ее определения оказывает значительное влияние на решение многих важнейших задач современной физики.

Это является особенно важным для планируемого на Тэватроне в Run II более точного измерения массы топ-кварка (m_t). По результатам Run I, значения m_t , установленные в D0 и CDF, соответственно равны:

$$m_t = 173.3 \pm 5.6(\text{стат.}) \pm 5.5(\text{сист.}) \text{ ГэВ}/c^2 \quad (\text{D0}),$$

$$176.1 \pm 5.1(\text{стат.}) \pm 5.3(\text{сист.}) \text{ ГэВ}/c^2 \quad (\text{CDF}). \quad (1)$$

Наибольшее значение систематической ошибки в обоих экспериментах (около 4 ГэВ/с²) обусловлено неопределенностью шкалы энергии струи.

Ошибка в шкале энергии струи также доминирует в определении сечений рождения $t\bar{t}$ -пар (составляя в некоторых каналах их образования до 70% от общей ошибки), а также в процессе «одиночного» рождения топ-кварка (например, в процессах $u\bar{d} \rightarrow b\bar{t}$, $u\bar{g} \rightarrow b\bar{d}t$).

Исследования спектра инвариантной массы двух струй (M_{jj}), а также скалярной суммы поперечных энергий всех струй (H_T) в данном событии являются хорошими тестами для проверки существующих моделей

составной структуры кварков и лептонов. Однако, главная причина систематической неопределенности в полученных на Тэватроне спектрах по M_{jj} и H_T — точность определения шкалы энергии струи. Так, по данным эксперимента D0 эта неопределенность составляет 17% при $H_T \sim 500$ ГэВ и 34% при $H_T \sim 1000$ ГэВ. В спектре по M_{jj} соответствующая систематическая неопределенность составила 7% при $M_{jj} \sim 200$ ГэВ/ c^2 и 30% при $M_{jj} \sim 1000$ ГэВ/ c^2 .

Поиск суперсимметричных частиц, предсказываемых различными моделями суперсимметрии (SUSY), также входит в программу исследований на адронных коллайдерах Тэватрон и LHC. Поскольку среди каналов распада многих SUSY частиц преобладают (2-, 4- и даже 6-) струйные каналы, неопределенности в шкале энергии струи могут непосредственно влиять на ошибку установления масс этих частиц. Точное определение энергии струи также необходимо для правильной оценки вклада фоновых событий (процессы с рождением $t\bar{t}$ пар, $W^\pm/Z^0 + N$ струй). Так, в эксперименте D0 по поиску скварков и глюино в оценке фона к их рождению, которая делалась на основе предсказаний Монте-Карло, неопределенности в шкале энергии струи являлись доминирующими.

Известно, что многие теоретические предсказания по рождению новых частиц (бозоны Хиггса, SUSY частицы), а также по оценке фона к ним, в экспериментах, проводимых на Тэватроне, и будущих экспериментах на LHC, основаны на использовании разных параметризации глюонной компоненты структурной функции протона при малых x и больших значениях квадрата переданного импульса Q^2 . Поэтому проведение измерения глюонной плотности непосредственно в тех же экспериментах позволит иметь самосогласованную физическую картину изучаемых процессов, и, несомненно, представляет большой интерес.

Очевидно, что обоснование возможности такого измерения с правильной оценкой выхода необходимых для этой цели событий и определением вклада фоновых процессов является важным этапом в подготовке такого измерения.

Таким образом, увеличение точности определения энергии струи и измерение глюонного распределения в экспериментах на Тэватроне и LHC являются актуальными проблемами в современной физике высоких энергий.

Подход к решению этих двух задач, изложенный в диссертации, основан на изучении событий «прямой фотон (Z -бозон) + струя», анализ которых проводился как на основе моделирования этих событий, так и на реальных экспериментальных данных детектора D0 (Тэватрон).

Стоит также отметить, что обе задачи связаны между собой как по методам отбора и анализа данных, так и по физической природе изучаемых в них фундаментальных кварк-глюонных процессов.

Цель работы.

Совместное рождение прямых фотонов (Z -бозонов) и адронных струй является хорошим инструментом для установления энергии адронных струй в действующей экспериментальной установке.

Целью настоящей работы является разработка метода, который позволил бы выделить такие события из множества других процессов (сечение которых в сумме превышает сечение сигнального процесса «прямой фотон + струя» примерно на 3 порядка), а также уменьшил бы существующее значение ошибки в определении энергии струи.

Другой целью данной работы является демонстрация возможности применения событий «прямой фотон (Z -бозон) + струя», которые могут быть отобраны по новым критериям с целью проведения калибровки энергии струи, для изучения глюонной плотности в протоне в экспериментах на Тэватроне и LHC.

Научная новизна.

1) В диссертации на основе Монте-Карло моделирования процесса рождения прямого фотона и струи впервые предложены методы отбора событий с высокой степенью баланса между поперечными импульсами прямого фотона (Z -бозона) $P_t^{\gamma(Z)}$ и струи P_t^{jet} .

Для этой цели впервые предложены новые измеряемые физические переменные, не использованные ранее в других экспериментах. ограничения на которые могут позволить отбирать события с улучшенным значением баланса $P_t^{\gamma(Z)} - P_t^{jet}$.

2) Впервые проведена детальная классификация физических процессов, которые могут приводить к образованию фоновых событий, содер-

жащих кандидаты на прямые фотоны. Показано, что применение новых критериев отбора событий «прямой фотон + струя», использованных для задачи калибровки энергии струи, позволяет также значительно снизить вклад фона.

3) На основе детального моделирования процессов, происходящих в детекторах D0 и CMS показаны аппаратные возможности подсистем детекторов для подавления вклада фоновых событий.

4) Впервые количественно аргументировано, что числа событий «прямой фотон (Z-бозон) + струя», отбираемых по предложенным критериям для проведения калибровки энергии струи, при выходе ускорителей на планируемые светимости допускают высокую статистическую обеспеченность для проведения изучения глюонного распределения в протоне непосредственно в экспериментах на Тэватроне в Run II и LHC. Оценена кинематическая область по $x - Q^2$, которая может быть покрыта при проведении такого изучения. Показано, что значения Q^2 в области малых x , в среднем, на 1–2 порядка превышают те значения, которые были достигнуты в экспериментах H1 и ZEUS, проводимых на ускорителе HERA.

Для различных интервалов по x и Q^2 сделана оценка по распределению вкладов фоновых событий.

Практическая ценность.

В диссертации на основе детального изучения физики процесса рождения «прямой фотон + струя» при энергиях Тэватрона, а также «Z-бозон + струя» при энергиях LHC разработан новый метод проведения калибровки энергии струи. Введены новые критерии отбора событий «прямой фотон (Z-бозон) + струя» с улучшенным значением баланса поперечных импульсов прямого фотона (Z-бозона) и струи.

Написаны программные коды для отбора событий «прямой фотон + струя» в соответствии с предложенным методом. С помощью этих программ осуществлен отбор данных, собранных коллаборацией D0 в 2002–2003 гг., и проведена калибровка энергии струи в области $25 < P_t^{\gamma} < 55$ ГэВ/с.

Продемонстрированная в работе высокая статистическая обеспеченность событий «прямой фотон (Z-бозон) + струя», которые могут быть

отобраны по предложенным критериям в широком интервале изменений по переменным x и Q^2 и низкий вклад фоновых событий, делает также возможным использование данных событий для изучения глюонной плотности в протоне в экспериментах на Тэватроне и LHC. Показано, что даже при использовании согласно предложенному методу весьма жестких критериев отбора возможен набор такого количества данных, которое достаточно для измерения глюонного распределения в протоне в новой кинематической области по $x - Q^2$ в экспериментах на Тэватроне и LHC при условии их выхода на планируемую светимость.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Выявлены источники нарушения баланса между поперечными импульсами прямого фотона (Z-бозона) $P_t^{\gamma(Z)}$ и струи P_t^{jet} .
2. Предложены измеряемые физические переменные, введение ограничений на которые позволяет отбирать события с приемлемым значением баланса $P_t^{\gamma(Z)} - P_t^{jet}$.
3. Показано, что найденные критерии отбора событий «прямой фотон + струя» также позволяют значительно снизить вклад фоновых событий. Проведена классификация фоновых событий по физическим процессам, приводящим к образованию кандидатов на прямые фотоны. Оценен их вклад при различных значениях поперечных импульсов прямого фотона.
4. Найден критерий, позволяющий на основе информации с центрального предливневого детектора и электромагнитного калориметра D0 увеличить вероятность выделения сигнала от прямого фотона.
5. На основе отобранных данных эксперимента D0 исследована зависимость отклика калориметра на адронную струю, а также точности нахождения калибровочных коэффициентов от энергии струи и применения введенных критериев отбора событий «фотон + струя».
6. Показано, что число событий «прямой фотон (Z-бозон) + струя», которое может быть отобрано по предложенным критериям для проведения калибровки энергии струи, является достаточным для проведения изучения глюонного распределения в протоне в новой, ранее не изученной, кинематической области по $x - Q^2$ непосредственно в экспериментах на Тэватроне в Run II и LHC при их выходе на планируемую светимость.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на научных семинарах Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, многочисленных семинарах рабочих групп коллабораций CMS (LHC, CERN) и D0 (Тэватрон, Fermilab), на коллаборационных митингах экспериментов D0, CMS, а также на следующих конференциях:

1. Third Annual RDMS CMS Collaboration Meeting // ЦЕРН, Швейцария, 16–17 декабря 1997.
2. XV International Seminar "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics" // ОИЯИ, Дубна, 25–29 сентября 2000.
3. XV International Workshop "High Energy Physics and Quantum Field Theory" // Тверь, 14–20 сентября 2000.
4. Пятая научная конференция молодых ученых и специалистов // ОИЯИ, Дубна, 5–10 февраля 2001.
5. XVI International Seminar "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics" // ОИЯИ, Дубна, 17–22 июня 2002.
6. XI International Workshop on Deep Inelastic Scattering "DIS 2003" // Санкт-Петербург, 23–27 апреля 2003.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано (и принято к опубликованию) 18 работ. Из них 5 работ — в журналах, 4 — в материалах международных конференций, 1 — в материалах совещаний RDMS CMS коллаборации, 4 — как D0 Notes, 4 — как Сообщения и препринты ОИЯИ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация объемом 164 страницы состоит из введения, 8 глав, включающих 36 параграфов, заключения, приложения, списка литературы из 112 наименований. Она также содержит 80 рисунков и 51 таблицу.

Содержание работы.

Диссертация начинается с **введения**, в котором делается обзор физических перспектив и задач, которые предстоит решить на существующих (Тэватрон) и создаваемых (LHC) коллайдерах ТэВ-ных энергий. На нескольких примерах решаемых физических задач на Тэватроне и LHC демонстрируется актуальность рассматриваемой в диссертации темы и формулируется цель работы. Делается краткий обзор задач и методов, описанных в диссертации. Кратко изложено содержание диссертации.

Поскольку наибольшее внимание в диссертации уделяется изучению событий ассоциативного рождения прямых фотонов и струй в детекторе D0 и возможностям применения найденного метода установления энергии струи к физическим процессам на детекторе D0, в **первой главе** дается краткое описание детектора, а также рассматривается проводимая на нем модернизация по сравнению с Run I. Программа модернизации диктуется физическими задачами, которые предстоит решить в Run II (поиск бозонов Хиггса промежуточных масс, частиц вне Стандартной Модели, физика топ-кварка, В-физика и т.д.). Она состоит, прежде всего, из *замены трековой системы* в центральной и передней областях детектора с введением силиконового микрострипового трекера, трекера на сцинтилляционных волокнах и суперпроводящего магнита, обеспечивающего магнитное поле в 2 Тесла, *добавления центрального и переднего предливневых детекторов (preshower)*, *замены передней мюонной системы, реструктуризации триггерной системы и системы сбора данных* с целью адаптации к более высокой интенсивности событий и к новой трековой системе.

Так как основными наблюдаемыми объектами в рассматриваемом процессе являются фотон и адронная струя, во **второй главе** дается краткое введение в квантовую хромодинамику и физику струй (§2.1), описание основных алгоритмов поиска струй с уделением основного внимания «конусному» алгоритму с поиском прекластеров (§2.2). В §2.3 перечислены экспериментальные качественные критерии отбора струй, используемые в физическом анализе эксперимента D0. В §2.4 рассмотрены критерии, применяемые для отбора фотонных кандидатов в эксперимента D0. Дополнительные критерии отбора фотонов, изученные в диссертации, рассмотрены

в пятой главе. В §2.5 изложены основные факторы, влияющие на изменение начальной (на уровне частиц) энергии струи.

Третья глава посвящена физике процессов рождения прямого фотона и струи. В §3.1 дается общее описание особенностей рассматриваемого процесса, определяемого на партонном уровне подпроцессами «комптоновского» рассеяния $qg \rightarrow q + \gamma$ (дающего основной вклад в сечение) и аннигиляции $q\bar{q} \rightarrow g + \gamma$, а также задач, которые могут быть решены при регистрации/выделении соответствующих им реальных событий $p\bar{p}(pp) \rightarrow \gamma + \text{струя} + X$ в экспериментах на Тэватроне (и LHC). Ими являются установление шкалы энергии струи на уровне частиц (т.е. энергии струи в момент ее образования, до регистрации в детекторе) и измерение глюонного распределения в протоне.

В §3.2 основное внимание сосредоточено на возможности проведения калибровки энергии струи с использованием информации об энергии фотона, достаточно точно определяемой в электромагнитном калориметре.

При этом показана неприменимость наивной идеи калибровки, основанной на рассмотрении только процессов партонного рассеяния в лидирующем порядке теории возмущений, и исходящей из предположения нулевого суммарного поперечного импульса фотона \vec{P}_t^γ и партона \vec{P}_t^{part} в конечном состоянии. В этом случае P_t^{part} может быть восстановлено по P_t^γ простым присвоением: $\vec{P}_t^{part} = -\vec{P}_t^\gamma$. И, следовательно, поперечный импульс струи P_t^{jet} , образуемой при фрагментации кварка/глюона конечного состояния подпроцесса жесткого рассеяния, будет достаточно близок по величине к P_t^γ : $\vec{P}_t^{jet} \approx -\vec{P}_t^\gamma$.

Однако в силу ряда факторов (главным образом, из-за излучения в начальном и конечном состояниях процесса партонного рассеяния, адронизации и k_T -эффекта), рассмотренных в этом параграфе, поперечные импульсы фотона и струи оказываются сильно разбалансированными.

Отдельно оценивается влияние k_T -эффекта и адронизации на величину баланса $P_t^\gamma - P_t^{jet}$ (§§3.7,3.9).

В §3.3 проводится классификация физических объектов, которые входят в событие «фотон+струя», и вводятся соответствующие им измеряемые кинематические переменные. На основе данных переменных выписывается уравнение баланса поперечных импульсов фотона и струи, объединяющее в себе характеристики основных физических объектов события.

Данное уравнение может быть представлено в следующем скалярном виде:

$$\frac{P_t^\gamma - P_t^{jet}}{P_t^\gamma} = (1 - \cos\Delta\phi) + P_t(O+\eta > 4.2)/P_t^\gamma, \quad (2)$$

где $P_t(O+\eta > 4.2) \equiv (\vec{P}_t^{out} + \vec{P}_t^{|\eta|>4.2}) \cdot \vec{n}^{jet}$, а \vec{n}^{jet} — единичный вектор в направлении поперечного импульса струи $\vec{n}^{jet} = \vec{P}_t^{jet}/P_t^{jet}$. Величина \vec{P}_t^{out} определена как векторная сумма поперечных импульсов частиц, находящихся в детектируемой области установки D0, но не включающая в себя частицы струи и прямой фотон (т.е. вне системы «фотон+струя»). Величина $\vec{P}_t^{|\eta|>4.2}$ — векторная сумма поперечных импульсов частиц в недетектируемой области установки D0 ($|\eta| > 4.2$).

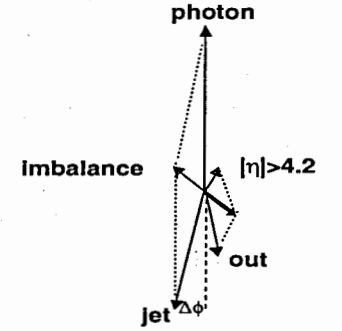


Рис. 1: Одна из возможных ориентаций векторов \vec{P}_t , входящих в уравнение P_t -баланса события $p\bar{p} \rightarrow \gamma + jet + X$.

В этом же параграфе проводится сравнение с уравнением, лежащим в основе метода калибровки, который использовался в экспериментах D0, CDF на Тэватроне в Run I. Приводятся критерии, использованные для отбора событий «фотон+струя» для их изучения на уровне частиц.

Обсуждается роль новых критериев, не использованных ранее как в экспериментах на Тэватроне в Run I, так и ни в одной из других коллабораций. Это, прежде всего, жесткое ограничение поперечного импульса кластеров (мини-струй) P_t^{clust} , регистрируемых вне системы «фотон+струя». Эти кластеры являются частью другой экспериментально измеряемой величины, входящей непосредственно в уравнение баланса, $-P_t^{out}$. Как отмечается в §3.9 и §4.2 диссертации, жесткие ограничения, вводимые на P_t^{clust} и P_t^{out} , приводят, с одной стороны, к существенному увеличению точности определения энергии струи (уменьшению систематической неопределенности такого определения), а с другой стороны, к значительному подавлению вклада фоновых событий. Также показано влияние ограничений

величины P_t^{clust} на основные кинематические переменные, характеризующие процесс «фотон+струя» ($P_t^{ISR}, \Delta\phi_{(\gamma,jet)}, P_t^{|\eta|>4.2}, P_t^{out}, P_t$ -баланс на партонном уровне).

В этом же параграфе объясняется введение нового понятия — «изолированных» струй. Как показано в §4.2, требование «изолированности» струи также приводит к заметному улучшению баланса $P_t^\gamma - P_t^{jet}$.

В §3.4 определяется число событий «фотон+струя», пригодных для проведения калибровки энергии струи, которые могут быть набраны в эксперименте D0 в Run II в различных областях по P_t^γ и псевдобыстроте струи η^{jet} . В §3.5 показано влияние ограничения P_t^{clust} на отбор событий с малым излучением в начальном состоянии. В §3.6 исследуется распределение по P_t внутри и вне струи (найденной простым конусным алгоритмом) с рассмотрением отношения этого P_t к P_t^γ . §3.7 посвящен исследованию зависимости баланса $P_t^\gamma - P_t^{jet}$ от значения внутреннего поперечного импульса партона (k_T -эффект). В §3.8 оценивается доля поперечного импульса струи, уносимая недетектируемыми частицами (нейтрино, мюонами с $|\eta^\mu| > 2.5$). В §3.9 проводится рассмотрение зависимости баланса $P_t^\gamma - P_t^{jet}$ от ограничений на P_t^{clust} и P_t^{out} в сигнальных событиях со струей в центральной области калориметра D0.

Четвертая глава посвящена рассмотрению и анализу фоновых событий к рождению прямых фотонов и струй. Перечислены их основные источники, к которым относятся события с высокоэнергетичными фотонами, рожденными в нейтральных каналах распада π^0, η, ω и K_s^0 мезонов, а также события с фотонами тормозного излучения, образованных, главным образом, в процессах $qg \rightarrow qg, qq \rightarrow qq$ и $gg \rightarrow q\bar{q}$ рассеяния. Обсуждается вклад событий, содержащих e^\pm в качестве кандидата на прямой фотон. На различных уровнях применения критериев отбора событий «фотон+струя» приводятся относительные вклады различных типов фоновых событий. Оценен вклад событий с фотонами тормозного излучения как неприводимых фоновых событий.

В широком диапазоне изменения ограничений на введенные величины P_t^{clust} и P_t^{out} демонстрируется их влияние на сокращение вклада фоновых событий. Так например, при отборе событий на Тэватроне с $P_t^\gamma > 40$ ГэВ/с ужесточение верхнего ограничения от $P_t^{clust} < 30$ ГэВ/с (P_t^{out} не ограничен) до $P_t^{clust} < 5$ ГэВ/с и $P_t^{out} < 5$ ГэВ/с приводит к почти двукратному

улучшению отношения сигнал/фон. При аналогичной вариации ограничений на величины P_t^{clust} и P_t^{out} показана динамика улучшения точности определения энергии струи и число событий, которые могут быть набраны в эксперименте D0.

Пятая глава содержит результаты исследования детекторных возможностей для выделения событий «прямой фотон+струя» на Тэватроне и ЛНС. В §5.1 приведены результаты по разделению сигнальных и фоновых событий при анализе информации об энерговыделениях в ячейках калориметра и предливневом детекторе (preshower) установки D0. Так, показано, что введенные критерии позволяют при эффективности отбора прямых фотонов $\epsilon_S = 30 - 40\%$ отсеять $\sim 80 - 90\%$ фоновых событий с использованием только калориметрических данных и при $\epsilon_S = 84 - 87\%$ отсеять $\sim 60 - 65\%$ фона, используя только информацию о кластерах в предливневом детекторе. Аналогичные оценки возможностей подавления вклада фоновых событий к ассоциативному рождению прямых фотонов и струй в детекторе CMS приведены в §5.2.

Шестая глава содержит общее описание процедуры калибровки энергии струи. В §6.1 описывается процедура и критерии, применяемые для предварительного отбора данных. В §6.2 даются определения новых физических объектов, использованных для отбора событий «фотон+струя», а также приводятся их спектры в экспериментальных данных. В §6.3 продемонстрирована процедура нахождения отклика калориметра детектора D0 на энергию струи с проведением анализа основных источников ошибок. Здесь также описан используемый метод минимизации * и поиска калибровочных коэффициентов, необходимых для восстановления энергии струи по наблюдаемым энерговыделениям в калориметре. Показано влияние критериев отбора событий «фотон+струя» на точности «присвоения» энергии струе в событиях «фотон+струя» и нахождения калибровочных коэффициентов. В §6.4 подводятся итоги по процедуре определения отклика. В §6.5 проводится сравнение некоторых характеристик, полученных в реальных данных с результатами Монте-Карло моделирования.

Седьмая глава посвящена перспективам применения событий «прямой фотон + струя» для изучения глюонного распределения в протоне

*Метод основан на использовании пакета MINUIT.

$f_g^p(x, Q^2)$ в экспериментах на Тэватроне и LHC. Дается обоснование возможности использования событий «прямой фотон + струя» для определения $f_g^p(x, Q^2)$, показаны преимущества по сравнению со случаем извлечения $f_g^p(x, Q^2)$ из данных по регистрации инклюзивных фотонов.

В §7.1 перечислены основные источники фоновых событий. В §7.2 проведена классификация основных типов фоновых событий по фундаментальным КХД процессам рассеяния $2 \rightarrow 2$. Показано, как для случая Тэватрона, так и для случая LHC, что на основными источниками фоновых событий на партонном уровне являются подпроцессы рассеяния $qg \rightarrow qg$ и $qq \rightarrow qq, q\bar{q} \rightarrow q\bar{q}$ с более чем 50% вкладом от процесса $qg \rightarrow qg$ рассеяния.

В §7.3 определяются числа событий «прямой фотон+струя», которые могут быть набраны на LHC при $L_{\text{инт}} = 10 \text{ fb}^{-1}$. Делается оценка вкладов различных типов событий, прошедших критерии отбора, как функция поперечного импульса прямого фотона (или его кандидата). Также определяются числа отобранных событий «прямой фотон+струя» из $p\bar{p}$ -взаимодействий на Тэватроне в Run II при интегральной светимости $L_{\text{инт}} = 3 \text{ fb}^{-1}$ (§7.4). В §7.5 делаются некоторые выводы. Показаны новые кинематические области по $x - Q^2$, которые могут быть покрыты при изучении глюонной плотности с помощью данных процессов. Проводится сравнение с кинематическими областями, покрытыми в других экспериментах по изучению структурных функций протона.

В §7.6 определяется число событий, основанных на КХД подпроцессах $g c(b) \rightarrow \gamma^{\text{dir}} + c(b)$ в разных интервалах по x и Q^2 , которые могут быть использованы для определения функций распределения $c(b)$ -кварков в протоне на Тэватроне и LHC.

Кинематическая область, которая может быть покрыта при изучении процесса $qg \rightarrow \gamma + q$ в экспериментах на Тэватроне и LHC представлена на рис. 2.

В восьмой главе показана возможность использования событий рождения «Z-бозон+струя» (с распадами Z-бозона по мюонному и электронному каналам) в экспериментах на LHC для проведения калибровки энергии струи и определения глюонного распределения в протоне. После применения введенных критериев отбора продемонстрированы результаты оценки вклада фоновых событий к их рождению. Практическое отсутствие фона к событиям «Z-бозон+струя» и достаточное число этих событий

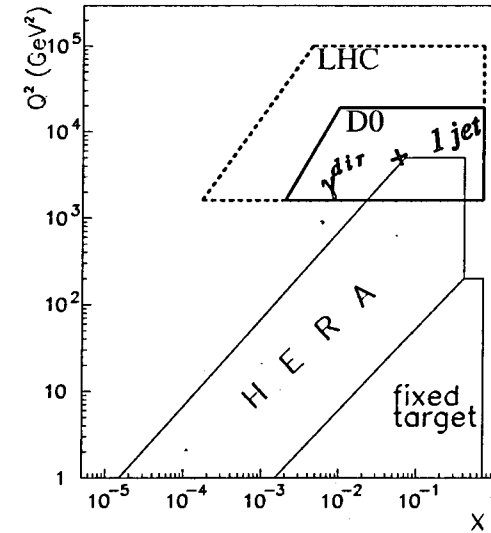


Рис. 2: Кинематическая область (x, Q^2) процесса $p\bar{p} \rightarrow \gamma^{\text{dir}} + jet$ на Тэватроне и LHC.

делает весьма перспективным их использование для изучения глюонного распределения в протоне.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты и выводы диссертации:

1. С помощью моделирования методом Монте-Карло событий «прямой фотон + струя» в условиях эксперимента D0, а также событий «Z-бозон + струя» при энергиях LHC и их анализа установлены основные факторы, приводящие к нарушению баланса между поперечными импульсами фотона (Z-бозона) $P_t^{\gamma(Z)}$ и струи P_t^{jet} . Ими являются излучения в начальном и конечном состояниях фундаментального партонного процесса рассеяния, адронизация партона в струю.

Показано, что эффект поперечного движения импульса партона внутри протона (k_T -эффект) дает значительно меньший вклад в величину дисбаланса $P_t^{\gamma} - P_t^{\text{jet}}$ по сравнению с излучением в начальном состоянии.

2. Предложены новые критерии отбора событий «фотон (Z-бозон) + струя»,

которые позволяют значительно уменьшить значения дисбаланса между поперечными импульсами фотона (Z -бозона) $P_t^{\gamma(Z)}$ и струи P_t^{jet} .

Данные критерии основаны на использовании новых физических наблюдаемых, таких как измеряемый поперечный импульс всех частиц вне системы «фотон (Z -бозон) + струя», поперечный импульс кластеров (мини-струй), а также на рассмотрении событий с «изолированными» струями.

3. Определено число событий «прямой фотон + струя», которое может быть набрано на Тэватроне в Run II в разных областях по псевдобыстроте струи и поперечному импульсу фотона. Показано, что полученная статистика является достаточной для проведения калибровки энергии струи в экспериментах на Тэватроне.

Аналогичная оценка числа событий « Z -бозон + струя» (с распадом $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ и $\mu^+\mu^-$ пары), которые могут быть собраны на LHC при светимости $L = 10 \text{ fb}^{-1}$ и пригодны для проведения калибровки энергии струи, показывает, что ожидаемая статистика является достаточной для проведения такой калибровки с помощью данных событий.

4. На основе Монте-Карло моделирования процессов $p\bar{p}$ -взаимодействия при энергиях Тэватрона с использованием пакета PYTHIA, оценены относительные вклады основных источников фоновых событий к рождению сигнальных событий «прямой фотон + струя», к которым относятся события с высокоэнергетичными фотонами, рожденными в нейтральных каналах распада π^0, η, ω и K_s^0 мезонов; события с фотонами тормозного излучения; события, содержащие e^\pm в качестве кандидата на прямой фотон.

Оценены относительные вклады различных типов фоновых событий при разных значениях поперечных импульсов фотона в зависимости от жесткости применения критериев отбора событий «фотон+струя».

При этом показано, что критерии, найденные для увеличения точности определения энергии струи, также весьма эффективны и для подавления фоновых событий.

Приведены значения отношения сигнал/фон, баланса $P_t^\gamma - P_t^{jet}$, а также ожидаемой статистики изучаемых событий.

5. На основе анализа реальных данных эксперимента D0 и применения программ моделирования отклика и реконструкции физических объектов в установке D0 (пакетов D0Gstar/D0Sim/D0Reco), на основе аппаратурных возможностей найдены критерии для выделения сигнала от прямого

фотона и подавления вклада фоновых КХД событий, содержащими фотонные кандидаты.

Показано, что введенные критерии позволяют, например, при эффективности отбора прямых фотонов $\epsilon_S = 30-40\%$ отсеять $\sim 80-90\%$ фоновых событий с использованием только калориметрических данных и при $\epsilon_S = 84-87\%$ отсеять $\sim 60-65\%$ фона, используя только информацию о кластерах в предливневом детекторе (preshower).

С использованием программы моделирования отклика установки CMS (пакет CMSIM) определены эффективности выделения фотонного сигнала в баррельной области ($|\eta| < 1.4$) на основе только калориметрической информации. С помощью пакета CMSIM и основываясь на данных ячеек калориметра установки CMS также определены эффективности выделения кварковых и отсева глюонных струй, что необходимо для дальнейшего сокращения вклада фоновых событий, содержащих глюонные струи.

6. На основе найденного метода проведения калибровки энергии струи, написана компьютерная программа для отбора событий «фотон + струя» в экспериментальных данных, собираемых в эксперименте D0.

С использованием пакета минимизации MINUIT создана программа для проведения калибровки энергии струи по поперечному импульсу фотона и оттестирована как на Монте-Карло событиях в детекторе D0, так и на экспериментальных данных, которые были собраны в установке D0 в 2002-2003 годах.

В рамках этой программы исследована зависимость точности нахождения калибровочных коэффициентов, а также отклика калориметра на адронную струю от начальных критериев отбора событий «фотон + струя». Исследованы основные факторы, влияющие на величину ошибки отклика калориметра и показана его зависимость от энергии струи.

7. На основе Монте-Карло моделирования, показано, что банки событий «прямой фотон + струя», отобранные для решения задачи установки шкалы энергии струи, могут быть использованы для изучения глюонного распределения в протоне в экспериментах на Тэватроне в Run II и LHC в течение первых двух лет работы при низкой светимости ($10^{33} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$). При этом может быть покрыта новая, ранее не изученная, кинематическая область по $x - Q^2$: $2 \cdot 10^{-3} \leq x \leq 1.0$ при $1.6 \cdot 10^3 \leq Q^2 \leq 2 \cdot 10^4$ (ГэВ/с)² на Тэватроне и $2 \cdot 10^{-4} \leq x \leq 1.0$ при $1.6 \cdot 10^3 \leq Q^2 \leq 2 \cdot 10^5$ (ГэВ/с)² на

ЛНС. Ожидаемая статистика для Тэватрона в Run II составляет примерно 1 000 000 событий при интегральной светимости $L_{int} = 3 \text{ fb}^{-1}$ и для ЛНС — около 11 000 000 событий «прямой фотон + струя» при $L_{int} = 10 \text{ fb}^{-1}$.

Как для случая Тэватрона, так и для ЛНС, в каждом интервале по Q^2 вклады сигнальных и основных типов фоновых событий[†] дифференцированы по основным партонным подпроцессам жесткого рассеяния $2 \rightarrow 2$: $q\bar{q} \rightarrow q\gamma^{dir}, q\bar{q} \rightarrow g\gamma^{dir}$, ведущих к рождению событий « γ^{dir} + струя», а также $qg \rightarrow qg, q\bar{q} \rightarrow q\bar{q}, gg \rightarrow q\bar{q}$ и $gg \rightarrow gg$, определяющих рождение фоновых событий « γ^{dir} -кандидат + струя».

Для данного интервала по Q^2 вклады сигнальных и основных типов фоновых событий¹ оценены в различных интервалах значений x партона.

Для случая ЛНС аналогичные вклады в разных интервалах по x и Q^2 оценены также с учетом полученных эффективностей разделения фотонов и нейтральных мезонов, а также кварковых и глюонных струй в калориметре CMS (п.5). При этом показано, что вклад партонного подпроцесса $q\bar{q} \rightarrow q\gamma^{dir}$ составляет 70–90% (от общего числа отбираемых событий) в зависимости от интервала по Q^2 и эффективности отбора событий « γ^{dir} + струя».

8. На основе Монте-Карло моделирования процессов pp -взаимодействия при энергиях ЛНС показана возможность подавления фоновых КХД событий к рождению событий «Z-бозон + струя».

Показано, что отобранные события «Z-бозон + струя» (с каналами распада Z-бозона на e^+e^- или $\mu^+\mu^-$ пару), позволяют набрать на ЛНС статистику около 600 000 событий при интегральной светимости $L_{int} = 20 \text{ fb}^{-1}$ для определения глюонной плотности в интервале $2 \cdot 10^{-4} \leq x \leq 1.0$ при значениях $Q^2: 0.9 \cdot 10^3 \leq Q^2 \leq 4 \cdot 10^4 \text{ (ГэВ/с)}^2$.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. *D.V. Bandourin, V.F. Konoplyanikov, N.B. Skachkov*, Third Annual RDMS CMS Collaboration Meeting. CERN, December 16-17, 1997. CMS Document, 1997–168, p.139-153.
2. *D.V. Bandourin, V.F. Konoplyanikov, N.B. Skachkov*, "Events rate estimation for gluon distribution determination at LHC", Proceedings of

[†]Для случая ЛНС данные вклады в каждом интервале по Q^2 были оценены ранее.

the XV International Workshop on QFTHEP, Tver, Russia, September 14-20, 2000, Eds. M.N. Dubinin and V.I. Savrin, p.9–15.

3. *D.V. Bandourin, V.F. Konoplyanikov, N.B. Skachkov*, Proceedings of the XV ISHEP "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics", Dubna, 2000. Eds. A.M. Baldin, V.V. Burov, A.I. Malakhov. Dubna, 2001, v.I, p.375-383.
4. *D.V. Bandourin, V.F. Konoplyanikov, N.B. Skachkov*, "Photon+jet events rate estimation for gluon distribution determination at LHC", Part.Nucl.Lett. **103**(2000), p.34-41, hep-ex/0011015.
5. *D.V. Bandourin, V.F. Konoplyanikov, N.B. Skachkov*, "On the possibility of $\pi^0, \eta, \omega, K_s^0$ mesons and a photon discrimination basing on the calorimeter information in the CMS detector", JINR Communication E1-2001-261, hep-ex/0108050.
6. *D.V. Bandourin, N.B. Skachkov*, "Separation of a single photon and products of the π^0, η, K_s^0 mesons neutral decay channels in the CMS electromagnetic calorimeter using neural network", JINR Communication E2-2001-259, JHEP **04** (2004) 007, hep-ex/0108051.
7. *D.V. Bandourin, N.B. Skachkov*, "Separation of quark and gluon jets in the direct photon production processes at the LHC using the neural network approach", JINR Communication E2-2001-260, hep-ex/0109001.
8. *D.V. Bandourin, N.B. Skachkov*, " γ -jet process application for setting the absolute scale of jet energy and determining the gluon distribution at the Tevatron Run II". 2002, D0 Note 3948 [98 pages], hep-ex/0203003.
9. *D.V. Bandourin, N.B. Skachkov*, "Photon+jet event rate estimation for gluon distribution determination at the Tevatron RUN II". Proceedings of XVI ISHEP "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics", Dubna, June 17–22, 2002. Eds. A.N. Sissakian, V.V. Burov, A.I. Malakhov. Dubna, 2004 (in press). JINR Preprint E2-2002-154, hep-ex/0206040.
10. *D.V. Bandourin, N.B. Skachkov*, "On the possibilities of measuring the gluon distribution using ' γ/Z^0 +jet' events at Tevatron Run II and LHC". Contributed to Proceedings of XI International Workshop on Deep Inelastic Scattering "DIS 2003", St. Petersburg, April 23–27, 2003. JINR Preprint E1-2004-56, hep-ex/0403024.
11. *D.V. Bandourin, N.B. Skachkov*, "On the possibility of measuring the gluon distribution in proton with ' γ +jet' events at LHC", JINR Preprint E2-2003-164. Subm. to "European Physical Journal C", hep-ex/0210004.

12. *D. V. Bandurin, N. B. Skachkov*, "Setting the absolute scale of jet energy with ' $Z^0 + jet$ ' events at LHC", JINR Communication E1-2003-163, hep-ex/0209039.
13. *D. V. Bandourin, N. B. Skachkov*, "On the application of ' $Z^0 + jet$ ' events for determining the gluon distribution in a proton at the LHC". Part.Nucl.Lett. 118(2004), p.25-32, hep-ex/0403028.
14. *M. Alexeev, D. Bandurin, D. Kirillov, N. Skachkov*, "On the suppression of background to direct photon using calorimeter information". 2003, D0 Note 4305 [26 pages].
15. *M. Alexeev, D. Bandurin, G. Golovanov, N. Skachkov*, "Isolated jets in γ +jet Run II D0 data and their application for jet energy scale setting". 2003, D0 Note 4313 [51 pages].
16. *Д.В. Бандурин, Н.Б. Скачков*, "О применении процесса «фотон + струя» для установления абсолютной шкалы энергии струи и определения глюонного распределения на Тэватроне в Run II", Физика элементарных частиц и атомного ядра, т.35, вып. 1, 2004, стр. 113-177, hep-ex/0304010.
17. *Д.В. Бандурин, Н.Б. Скачков*, "Оценка числа событий «фотон+струя» для определения глюонного распределения на Тэватроне в Run II". Ядерная физика, т.67, номер 4, 2004, стр. 710-714.
18. *M. Alexeev, D. Bandurin, G. Golovanov, D. Kirillov, N. Skachkov*, " γ +jet Run II D0 data with isolated jets in the End Calorimeter and their application for jet energy scale setting". 2004, D0 Note 4372 [16 pages].

Получено 19 апреля 2004 г.