

Федеральное государственное бюджетное учреждение
Государственный научный центр Российской Федерации -
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
Национальный исследовательский Центр “Курчатовский институт”

На правах рукописи

Верхеев Александр Юрьевич

**Изучение процессов с рождением прямых фотонов и
ассоциированных адронных струй в эксперименте DØ
на Тэватроне**

01.04.23 – Физика высоких энергий

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова

Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Скачков Николай Борисович (ЛЯП ОИЯИ, г. Дубна)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Салеев Владимир Анатольевич (ФГАОУ ВО СГАУ, НИУ, г. Самара),
кандидат физико-математических наук Кирсанов
Михаил Михайлович (ИЯИ РАН, г. Москва)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева
Российской академии наук (г. Москва)

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2016 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ "Курчатовский институт" по адресу: 142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, дом 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ "Курчатовский институт" и на сайте: <http://www.ihep.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов.

Общая характеристика работы

Настоящая работа посвящена изучению физики процессов с рождением прямых фотонов и ассоциированных адронных струй в эксперименте $D\bar{O}$ на Тэватроне в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (Фермилаб). Предлагаемая к защите диссертационная работа основана на результатах исследований, выполненных на установке $D\bar{O}$ в 2007–2014 годах.

Актуальность темы исследования.

Экспериментальная проверка предсказаний Стандартной модели (СМ) является одной из ключевых задач физики элементарных частиц. Начиная со второй половины XX века основным источником получения новых знаний стали ускорительные установки. На протяжении многих лет, до запуска ЛHC, ускорительный комплекс Тэватрон занимал лидирующие позиции в науке. Данные, собранные в результате работы коллайдера Тэватрон, до сих пор являются уникальным источником для изучения $p\bar{p}$ взаимодействий. Эксперимент $D\bar{O}$ собрал данные, соответствующие интегральной светимости порядка 10 фб^{-1} .

Многие теоретические предсказания рождения новых частиц, а также оценка вклада фоновых событий к ним, в проводимых на ускорителях экспериментах, основаны на использовании различных параметризаций кварк-глюонных компонент структурной функции протона при малых значениях доли партонного момента x и больших значениях квадрата переданного импульса Q^2 . Поэтому проведение измерения распределения партонов в адроне (PDF) непосредственно в тех же экспериментах представляет большой интерес.

Изучение процессов ассоциированного рождения прямого фотона и адронных струй в физике высоких энергий является одним из ключевых тестов квантовой хромодинамики (КХД), позволяющим расширить наши представления о жёстких КХД взаимодействиях. Оно может также улучшить наше представление о зависимости кварковых и глюонных распределений от передачи импульса от сталкивающихся адронов партонам.

С увеличением энергии современных ускорительных комплексов возрастает необходимость учитывать новые фоновые события, в т.ч. происходящие в процессах с множественными партонными взаимодействиями (MPI). Неопределенности, связанные с использованием различных MPI Монте-Карло (MC) моделей, могут существенно влиять на результаты измерения физических объектов, в частности на измерение массы топ-кварка. Исследование азимутальных корреляций, которые чувствительны к кинематике MPI, в $\gamma+2 \text{ jet}$ и $\gamma+3 \text{ jet}$ событиях позволяет протестировать совокупность широко используемых PDF настроек различных MC моделей.

Информация о доли двойных партонных взаимодействий необходима для понимания природы сигнальных событий и правильной оценки фона для многих редких процессов, особенно таких, в которых в конечном состоянии рождаются по несколько струй. Особенно стоит отметить, что в настоящее время форма распределения партонов внутри нуклона и возможные корреляции между партонами остаются недостаточно изученными: наблюдается существенное расхождение между результатами экспериментальных измерений и теоретических выводов.

Цель работы.

Целью настоящей работы является изучение инклюзивных процессов, в которых рождаются фотон и ассоциированные с ним струи в $p\bar{p}$ взаимодействиях при энергии 1.96 ТэВ в системе центра масс на коллайдере Тэватрон в эксперименте DØ в Run II, и сравнение их с теоретическими предсказаниями.

Научная новизна.

В работах, на которых основана диссертация, были получены следующие результаты:

- Измерено в 16 различных кинематических областях тройное дифференциальное сечение процессов с рождением прямого фотона и ассоциированной струи, что позволило покрыть весьма широкую область в $x - Q^2$ пространстве ($0.001 \leq x \leq 1$ и $400 \leq Q^2 \leq 1.6 \times 10^5 \text{ GeV}^2$) при использовании интегральной светимости $\mathcal{L} = 8.7 \text{ фб}^{-1}$. Впервые проведено измерение прямых фотонов в области быстрот с $1.5 < |y^\gamma| < 2.5$. Использование столь большого набора данных позволило достичь большей точности по сравнению с предыдущими измерениями на ускорителях Тэватрон и ЛНС.
- Осуществлены наборы событий с $\gamma + 2 \text{ jet}$ и $\gamma + 3 \text{ jet}$ партонными процессами, соответствующие $\mathcal{L} = 1.0 \text{ фб}^{-1}$. Они использованы для впервые выполненного измерения дифференциальных сечений как функций азимутальных углов и для тестирования различных вариантов структурных функций (PDF). Впервые вычислены фракции тройных партонных взаимодействий в $\gamma + 3 \text{ jet}$ событиях.
- Впервые измерено значение σ_{eff} , параметра, характеризующего поперечное партонное распределение в нуклоне, в $\gamma + b/c + 2 \text{ jet}$ событиях, содержащих струю, произошедшую из тяжёлого кварка (b или c), которые соответствуют $\mathcal{L} = 8.7 \text{ фб}^{-1}$. Также, впервые показано, что несмотря на разницу в массах между тяжелыми и легкими кварками, параметр σ_{eff} не меняется.

Практическая значимость.

Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы для:

- более детального изучения структуры протонов;
- наложения более строгих ограничений на PDF в новой кинематической области по переменным x и Q^2 ;
- уменьшения систематических неопределенностей при поиске и/или измерении физических объектов, связанных с выбором MPI MC модели;
- оценки фоновых событий, связанных с мультипартонными взаимодействиями, при поиске новых частиц.

Созданное программное обеспечение для обработки физических данных в эксперименте DØ может быть использовано для расширения исследований в новых и уже действующих экспериментах.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Впервые выполнено измерение тройного дифференциального сечения $d^3\sigma/dp_T^\gamma dy^\gamma dy^{\text{jet}}$, где p_T^γ - поперечный импульс фотона, а y^γ - его быстрота и y^{jet} - быстрота струи в $\gamma + 1 \text{ jet} + X$ событиях в 16 различных кинематических областях: $|y^\gamma| < 1.0$ или $1.5 < |y^\gamma| < 2.5$; $|y^{\text{jet}}| < 0.8$, $0.8 < |y^{\text{jet}}| < 1.6$, $1.6 < |y^{\text{jet}}| < 2.4$ или $2.4 < |y^{\text{jet}}| < 3.2$ с использованием $\mathcal{L} = 8.7 \text{ фб}^{-1}$. Также осуществлено сравнение полученных результатов с теоретическими предсказаниями. Прделанные исследования увеличили точность измерения процессов с рождением прямых фотонов.
- Полученные впервые наборы $\gamma + 3 \text{ jet}$ и $\gamma + 2 \text{ jet}$ данных были использованы для измерения дифференциальных сечений как функций азимутальных углов в четырёх интервалах по поперечному импульсу второй струи, $(1/\sigma_{\gamma 3j})d\sigma_{\gamma 3j}/d\Delta S$ и $(1/\sigma_{\gamma 2j})d\sigma_{\gamma 2j}/d\Delta\phi$, а также для тестирования различных наборов PDF. Впервые определены доли тройных партонных взаимодействий в $\gamma + 3 \text{ jet}$ событиях.
- Впервые, используя события, содержащие струю, произошедшую из тяжёлого кварка, $\gamma + b/c + 2 \text{ jet}$, были измерены значения следующих величин: доля мультипартонных взаимодействий и эффективное сечение σ_{eff} . Также, впервые установлено, что зависимости σ_{eff} в процессах $\gamma + 3 \text{ jet}$ и $\gamma + b/c + 2 \text{ jet}$ от начального аромата партона не существует.

Апробация результатов.

Результаты, изложенные в диссертации, неоднократно докладывались на совещаниях и семинарах коллаборации DØ, а также на следующих научных школах и конференциях:

1. International School of Subnuclear Physics, 24 June – 3 July, 2015, Erice, Italy.
2. XXII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, 15-20 September, 2014, JINR, Dubna, Russia.
3. Школа-семинар “Физика новых состояний материи на ускорителе ФАИР” 22-24 октября 2013, Дубна, Россия.
4. APS April Meeting 2013, April 13-16, 2013, Denver, USA.
5. Fermilab Users’ Meeting, June 12-13, 2012, Batavia, USA.
6. XVI научная конференция молодых ученых и специалистов, 6-11 февраля, 2012, Дубна, Россия.
7. XIX International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, April 11-15, 2011, Newport News, USA.

Публикации.

Материалы диссертации опубликованы в четырёх печатных работах, из них три статьи в рецензируемых журналах [1, 3, 2] и одна статья в сборнике трудов конференции [4].

Личный вклад автора.

Автор диссертации внес определяющий вклад в работы, выполненные в эксперименте DØ, по моделированию, обработке и анализу данных, написанию программного обеспечения, извлечению физических результатов и вычислению систематических неопределенностей измерений. Также автор принимал активное участие в работе групп, которые занимались идентификацией электромагнитных объектов и определением энергетической шкалы струй. Автор отвечал за набор данных и контроль их качества, а также за работу калориметра и мюонной системы в 2007-2011 годах.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и двух приложений. Общий объем диссертации 143 страницы, включая 66 рисунков и 35 таблиц. Список литературы включает 140 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В *секциях 1.1 и 1.2 первой главы* диссертации приводится краткое описание Стандартной модели и квантовой хромодинамики. Три из четырех фундаментальных взаимодействия (электромагнитное, слабое и сильное), с помощью которых объясняется большое количество явлений в физике, описываются с помощью так называемой Стандартной модели. КХД - это теория, которая описывает сильные взаимодействия в Стандартной модели. Она используется для расчета сечений взаимодействий с участием адронов в начальном и конечном состояниях.

В *секции 1.3* уделяется внимание реализации непертурбативных эффектов, которые описывают низкоэнергичные взаимодействия и адронизацию.

В *секции 1.4* даётся общее описание рассматриваемых процессов, в результате которых рождаются прямой фотон и ассоциированная с ним адронная струя. Термин “прямой” означает, что этот фотон не является производным от распада адронов, например, π^0 , η , ω , или K_S^0 мезонов. Такие события в основном происходят в КХД непосредственно в процессе комптоновского рассеяния, $gq \rightarrow \gamma q$, и через кварк-антикварк аннигиляцию, $q\bar{q} \rightarrow \gamma g$. Отбор событий с разными угловыми конфигурациями между фотоном и струей позволяют протестировать различные $x - Q^2$ кинематические области.

В *секции 1.5* рассматривается природа мультипартонных взаимодействий, а также приводятся результаты существующих теоретических и экспериментальных работ. Жёсткие МРІ являются одним из важных источников фоновых событий в физических исследованиях, проводимых на Тэватроне и ЛНС. Простейшим случаем МРІ является двойное партонное (DP) рассеяние. Доля DP взаимодействий в $p\bar{p}$ столкновениях напрямую связана с формой распределения партонов внутри нуклона, которая остается недостаточно изученной. В данной секции рассматривается параметр, эффективное сечение σ_{eff} , который не зависит от процесса и исследуемого фазового пространства. Он характеризует размер эффективной области взаимодействия нуклонов.

В *секции 1.6* приводится обзор различных Монте-Карло генераторов, которые используются в диссертации.

Во **второй главе** диссертации описывается ускорительный комплекс Тэватрон (*секция 2.1*) и детектор DØ (*секция 2.2*). Комплекс в Фермилаб состоит из нескольких ускорителей.

тельных систем, среди которых можно выделить: предускоритель, линейный ускоритель и бустер, которые используются для получения протонов (*секция 2.1.1*); источник рождения антипротонов, группирователь и аккумулятор, участвующие в производстве антипротонов (*секция 2.1.4*); и два основных кольца-синхротрона – главный инжектор (*секция 2.1.2*) и Тэватрон (*секция 2.1.3*), в котором происходит ускорение сталкивающихся частиц и их взаимодействие в детекторах CDF и DØ.

Детектор DØ является детектором общего назначения, созданный для изучения протон-антипротонных столкновений с энергией 1.96 ТэВ в системе центра масс. Система координат, используемая в детекторе DØ, описывается в *секции 2.2.1*. Для того, чтобы раскрыть природу взаимодействий, в установке используется набор поддетекторов, каждый из которых оптимизирован для решения специфических задач. Так, определение координат вершины взаимодействия в детекторе осуществляется с помощью кремниего микрострипового и центрального оптоволоконного трекеров. Трековая система (*секция 2.2.2*) помещена в магнитное поле, что приводит к искривлению траекторий движения заряженных частиц и позволяет определить их импульс и знак заряда. Жидко-аргонный и урановый калориметр (*секция 2.2.3*) обеспечивает точное измерение энергии частиц путем их полного поглощения. Мюонная система (*секция 2.2.4*) располагается вокруг калориметра и используется для идентификации мюонов с помощью сцинтилляционных счетчиков и дрейфовых трубок. Дополнительно, на большом расстоянии от центра детектора, но рядом с вакуумной трубой, по которой пролетают пучки, устанавливается система для мониторинга их светимости (*секция 2.2.5*).

В **третьей главе** диссертации рассматривается триггерная система отбора событий, которая использовалась в эксперименте DØ (*секция 3.1*). Столкновение пучков в детекторе DØ происходило с частотой 1.7 МГц в среднем. Из-за физических ограничений на количество данных, которые могли быть записаны и реконструированы, отбирались для сохранения на магнитную ленту только интересующие физиков события. Это делалось с помощью трехуровневой системы DØ условий, которая работала в соответствии с заданной стратегией отбора событий и позволяла уменьшить общее число событий с 1.7 МГц до ~ 50 -100 Гц. Набор конкретных условий отбора называется триггером.

В *секции 3.2* представлены алгоритмы реконструкции физических объектов, таких как трек (*секция 3.2.1*), первичная вершина события (*секция 3.2.2*), недостающая поперечная энергия E_T (*секция 3.2.3*), электромагнитный кластер (*секция 3.2.4*) и адронная струя (*секция 3.2.5*). Дополнительно в *секции 3.2.6* приводится обзор процедуры коррекции энергетической шкалы струй (Jet Energy Scale, JES), которая поправляет энергию,

в среднем, измеренной струи в калориметре до энергии стабильных частиц, входящих в струю, до их взаимодействия с детектором.

Четвёртая глава диссертации посвящена измерению тройного дифференциального сечения процессов с рождением прямого фотона и адронной струи в $p\bar{p}$ столкновениях с энергией $\sqrt{s} = 1.96$ ТэВ в системе центра масс. В данной работе отбираются события, в которых лидирующий прямой фотон (с максимальным значением p_T , $p_T^\gamma > 20$ ГэВ) является центральным с быстротой $|y^\gamma| < 1.0$ или передним с быстротой $1.5 < |y^\gamma| < 2.5$. Требуется наличие лидирующей струи с $p_T^{\text{jet}} > 15$ ГэВ, располагающейся в одной из четырех областей по быстрой: $|y^{\text{jet}}| < 0.8$, $0.8 < |y^{\text{jet}}| < 1.6$, $1.6 < |y^{\text{jet}}| < 2.4$ or $2.4 < |y^{\text{jet}}| < 3.2$. При восстановлении адронных струй применяется итеративный конусный алгоритм с радиусом $R = 0.7$. Фотон и струя должны быть изолированы друг от друга в конусе с $R > 0.9$ в $y-\phi$ пространстве. Сечение как функция p_T^γ измеряется дифференциально для шестнадцати угловых конфигурации быстрот лидирующих фотона и струи. Размеры p_T^γ интервалов выбраны так, чтобы они были больше, чем p_T^γ разрешение. В работе рассматриваются два случая ориентации быстрот фотона и струи: $y^\gamma y^{\text{jet}} > 0$ и $y^\gamma y^{\text{jet}} \leq 0$. Разбиение на кинематические области позволяет изучить регионы с различным вкладом кварк-глюонного процесса. Функции PDF, входящие в теоретические предсказания, имеют существенные неопределенности, особенно в глюонной компоненте при малых x , или больших x и больших Q^2 . Сечение $\gamma + \text{jet}$ тестирует различные значения долей партонных моментов двух взаимодействующих партонов.

Секция 4.1 содержит описание данных и MC моделей, используемых в измерении. Выборка $\gamma + \text{jet}$ данных была собрана детектором DØ в период с июня 2006 года по сентябрь 2011 года и соответствует интегральной светимости 8.7 ± 0.5 фб⁻¹. В силу измерения сечения *изолированного* прямого фотона был выбран критерий изоляции на уровне генерации частиц, используемый в MC: $p_T^{\text{iso}} = p_T^{\text{tot}}(0.4) - p_T^\gamma < 2.5$ ГэВ, где $p_T^{\text{tot}}(0.4)$ - это сумма поперечных энергий частиц в конусе радиуса $\Delta R = 0.4$ от центра фотона.

В *секции 4.2* приведено описание критериев отбора $\gamma + \text{jet}$ событий, после применения которых в общей сложности остается порядка 7.2 (8.3) млн событий-кандидатов с центральными (передними) фотонами.

В *секции 4.3.1* измеряется доля сигнальных прямых фотонов в $\gamma + \text{jet}$ событиях, а также рассматриваются фоновые события. Существует два основных типа фона:

- Электрослабые взаимодействия ($W(\rightarrow e\nu) + \text{jet}$, $Z/\gamma^*(\rightarrow e^+e^-) + \text{jet}$), а также даифотонные процессы, в результате которых образуются один или несколько электро-

магнитных кластеров (электроны или фотоны). Вклады от этих фоновых событий оцениваются с помощью МС моделирования и находятся на незначительном уровне, меньше, чем 0.5% для событий с центральными фотонами и менее 1.5% для событий с передними фотонами. Они вычитаются из отобранного образца данных.

- Сильные взаимодействия, рождающие струи, которые ошибочно идентифицируются как фотоны. Для вычисления доли сигнальных событий и исключения фоновых событий используются распределения выхода фотонной нейронной сети в данных и моделях МС. Затем распределения для моделируемого фотонного сигнала и двухструйного фона фитируются к данным с помощью принципа максимального правдоподобия для получения фракций сигнала и фона в данных в каждом p_T^γ интервале. Полученные таким образом доли сигнала (purity или “чистота”) во всех p_T^γ интервалах и кинематических регионах фитируются, используя трехпараметрическую функцию, $\mathcal{P} = a/(1 + b(p_T^\gamma)^c)$. Сигнальные фракции, как правило, растут с p_T^γ и зависят от быстрот фотона и струи. Измеренные доли сигнальных событий дополнительно поправляются на 1% – 3% из-за прямых фотонов, у которых значение изоляции на уровне генерации частиц $p_T^{\text{iso}} \geq 2.5$ ГэВ.

В *секции 4.3.2* рассчитываются поправки к наблюдаемому числу $\gamma + \text{jet}$ событий-кандидатов, которые учитывают эффективности обнаружения фотона и струи, а также их геометрический и кинематический аксептансы. Для вычисления этих поправок рассматриваются образцы смоделированных в PYTHIA и SHERPA $\gamma + \text{jet}$ событий. Общая эффективность критериев отбора фотонов составляет 68% – 80%, в зависимости от p_T^γ и y^γ региона. Типичное значение аксептанса изменяется в пределах 1.4 – 0.8, и учитывает корреляции между событиями с одинаковыми и разными знаками быстрот фотона и струи. Трековая система DØ используется для отбора событий, в которых есть как минимум одна $p\bar{p}$ вершина взаимодействия, которая содержит как минимум три трека и располагается в 60 см от центра детектор вдоль оси пучка. Эффективность отбора вершины варьируется в зависимости от светимости в пределах 95% – 97%.

В *секции 4.4* рассматриваются основные источники систематических неопределенностей. Доминирующие неопределенности вызваны оценкой чистоты сигнала (3% – 11%), отбором фотона и струи (3% – 10%), коррекцией энергетической шкалы струи (1% – 7%), коррекцией энергетической шкалы фотона (3% – 8%), триггерным отбором событий (6% при $20 < p_T^\gamma < 35$ ГэВ и 1% при $p_T^\gamma \geq 35$ ГэВ) и интегральной светимостью (6.1%). Полная экспериментальная систематическая неопределенность для каждой точки данных

получается сложением индивидуальных неопределенностей в квадратуре. Общая нормализационная неопределенность составляет 6.8% для событий с центральными фотонами и 11.2% с передними фотонами и складывается из неопределенности интегральной светимости, неопределенности отбора фотонов, неопределенности реконструкции z -позиции вершины происхождения фотона.

Секция 4.5 содержит результаты измеренных дифференциальных сечений в данных и их сравнения с МС предсказаниями. Тройное дифференциальное сечение $d^3\sigma/dp_T^\gamma dy^\gamma dy^{\text{jet}}$ $\gamma + \text{jet}$ процесса пропорционально числу событий данных (N) в каждом интервале после применения поправок на чистоту сигнала (P), акцептанс (A) и эффективность отбора (ϵ) и обратно пропорционально интегральной светимости (L_{int}) и размерам интервалов поперечного импульса (Δp_T^γ) и быстроты (Δy^γ) фотона, и быстроты струи (Δy^{jet}):

$$\frac{d^3\sigma}{dp_T^\gamma dy^\gamma dy^{\text{jet}}} = \frac{N P}{A \epsilon} \frac{1}{L_{\text{int}} \Delta p_T^\gamma \Delta y^\gamma \Delta y^{\text{jet}}} \quad (1)$$

Для всех регионов фиксируются интервалы $\Delta y^\gamma = 2.0$ и $\Delta y^{\text{jet}} = 1.6$. Измеренные сечения покрывают 5 – 6 порядков в каждом из диапазонов быстроты и падают быстрее для событий с большими значениями быстрот струи и/или фотона.

Данные сравниваются с рQCD NLO предсказаниями, полученными с помощью программы JETPHOX с CT10 PDF набором и VFG функциями фрагментации партонов в фотоны. Шкалы ренормализации, факторизации и фрагментации (μ_R , μ_F и μ_f) устанавливаются равными p_T^γ . Неопределенность выбора теоретической шкалы для JETPHOX предсказания изменяется от 10% – 15% для событий с центральными фотонами и струями до 35% – 40% для событий с передними фотонами и струями. CT10 PDF неопределенность обычно увеличивается с ростом p_T^γ и может достигать 40% – 45% в некоторых регионах фазового пространства, например, при больших значениях p_T^γ , $y^\gamma y^{\text{jet}} > 0$ и $2.4 < |y^{\text{jet}}| \leq 3.2$ с центральными или передними фотонами. Предсказания МС корректируются с учетом непертурбативных эффектов, вызванных фрагментацией партонов в адроны и MPI. Типичный размер поправки на эффект фрагментации составляет около 0.98 – 1.02 с 1% неопределенностью, а размер коррекции из-за MPI эффекта составляет 0.96 – 0.98 с неопределенностями 2% – 5%.

На рисунке 1 представлены отношения измеренных сечений к рQCD NLO предсказаниям в нескольких кинематических областях. Для центральных фотонов теория рQCD NLO описывает данные за исключением малых значений p_T^γ и за исключением больших значений p_T^γ с очень передними струями ($2.4 < |y^{\text{jet}}| \leq 3.2$), с отрицательным произведением быстрот фотона и струи. Качественно эти результаты очень похожи на результаты,

полученные коллаборацией ATLAS. Для событий с передними фотонами NLO теория согласуется с данными с учетом теоретических и экспериментальных неопределенностей, за исключением региона $p_T^\gamma > 70$ ГэВ в событиях, в которых фотон и очень передняя струя имеют одинаковые знаки быстрот. Результаты четвертой главы опубликованы в работе [1].

В **пятой главе** диссертации рассматривается расширение исследований по изучению физических процессов, содержащих фотон и ассоциированные адронные струи в конечном состоянии. А именно, производится измерение нормированных дифференциальных сечений как функций азимутальных углов в четырёх интервалах по поперечному импульсу второй струи: $(1/\sigma_{\gamma 3j})d\sigma_{\gamma 3j}/d\Delta S$ в $p_T^{\text{jet}2}$ интервале (15 – 30 ГэВ) для $\gamma + 3$ jet событий и $(1/\sigma_{\gamma 2j})d\sigma_{\gamma 2j}/d\Delta\phi$ в трех $p_T^{\text{jet}2}$ интервалах (15 – 20, 20 – 25 и 25 – 30 ГэВ) для $\gamma + 2$ jet событий. Эти сечения чувствительны к вкладу от струй, исходящих из дополнительных жестких партонных взаимодействий, и могут быть использованы для улучшения существующих MPI моделей, а также оценки доли мультипартонных событий.

В *секции 5.1* описываются критерии отбора физических данных. Здесь рассматриваются Run II данные, собранные детектором DØ, в период с апреля 2002 года по февраль 2006 года, соответствующие интегральной светимости 1.01 ± 0.06 фб⁻¹. Каждое событие должно содержать по крайней мере один центральный или передний фотон, $|y^\gamma| < 1.0$ или $1.5 < |y^\gamma| < 2.5$, и по крайней мере две (или три) струи с $|y^{\text{jet}}| < 3.5$. Отбираются события, содержащие фотон в интервале $50 < p_T^\gamma < 90$ ГэВ, лидирующую струю с $p_T > 30$ ГэВ, и вторую струю с $p_T > 15$ ГэВ. Если есть третья струя с $p_T > 15$ ГэВ, которая удовлетворяет критериям отбора, то это событие рассматривается в $\gamma + 3$ jet случае.

Секция 5.2 содержит определение азимутальных углов, которые используются при измерении сечений. Все исследуемые события можно разделить на два класса. В событиях первого класса фотон и все струи происходят из одного и того же $p\bar{p}$ взаимодействия (SP) с жестким глюонным тормозным излучением в начальном или конечном состояниях. Во втором классе событий, по меньшей мере, одна из струй происходит от дополнительного партонного взаимодействия и, таким образом, имеется по крайней мере два партон-партонных взаимодействия. Как результат, эти процессы имеют различные кинематические распределения в конечном состоянии. Для идентификации события с двумя независимыми партон-партонными рассеяниями, которые в конечном состоянии рожают $\gamma + 3$ jet, используется угловое распределение, чувствительное к кинематике DP событий. Азимутальный угол ΔS между p_T векторами двух пар объектов определяется уравнением:

$$\Delta S \equiv \Delta\phi\left(\vec{P}_T^A, \vec{P}_T^B\right), \quad (2)$$

где $\vec{P}_T^A = \vec{p}_T^\gamma + \vec{p}_T^{\text{jet1}}$ и $\vec{P}_T^B = \vec{p}_T^{\text{jet2}} + \vec{p}_T^{\text{jet3}}$.

Для идентификации DP событий в случае $\gamma + 2$ jet событий вводится угловая переменная, аналогичная переменной ΔS : азимутальный угол между суммой p_T векторов фотона и лидирующей струи (\vec{P}_T^A), и p_T вектором второй струи (\vec{p}_T^{jet2}):

$$\Delta\phi \equiv \Delta\phi\left(\vec{P}_T^A, \vec{p}_T^{\text{jet2}}\right). \quad (3)$$

Анализ данных и вычисление коррекций приведены в *секции 5.3*. При вычислении фотонной чистоты в $\Delta\phi$ интервалах применяется процедура, описанная в *секции 4.3.1*. Для получения более статистически значимой оценки доли сигнальных фотонов в $\Delta\phi$ интервалах, в качестве проверки, используется один объединённый p_T^{jet2} интервал: $15 < p_T^{\text{jet2}} < 30$ ГэВ. Результаты фитирования показывают, что доля $\gamma + \text{jet}$ сигнала во всех $\Delta\phi$ интервалах хорошо согласуется с постоянным значением, 0.69 ± 0.03 в центральных и 0.71 ± 0.02 в передних регионах калориметра.

Для того, чтобы получить дифференциальные сечения и сравнить их с различными MPI моделями, необходимо к данным применить три набора поправок, которые устраняют недостатки геометрии детектора и реконструкции объектов, а также учитывают эффекты миграции между интервалами. Для получения ΔS и $\Delta\phi$ распределений на уровне частиц применяется процедура анфолдинга¹, которая основана на методе регуляризации Тихонова. Размеры интервалов ΔS и $\Delta\phi$ распределений выбраны так, чтобы обладать чувствительностью к различным MPI моделям, сохраняя при этом достаточную статистику и малую миграцию в интервалах.

Результаты измерения дифференциальных сечений и сравнение их с MC предсказаниями, использующими различные варианты структурных функций, представлены в *секции 5.4*. Рисунок 2 показывает чувствительность двух угловых переменных ΔS и $\Delta\phi$ к различным MPI моделям, предсказания которых значительно отличаются друг от друга (до 2.5 раз в малых углах ΔS и $\Delta\phi$, в регионе, в котором относительный DP вклад, как ожидается, будет максимальным). На основе полученных результатов были сделаны следующие выводы:

- предсказания, полученные с помощью SP моделей, не описывают дифференциальные сечения в данных;
- данные лучше описываются новыми PYTHIA MPI моделями (P0, P-hard, P-6, P-X, P-post) и в меньшей степени S0, и SHERPA MPI моделью;

¹ Unfolding - процедура развёртки, преобразования измеренного распределения в распределение на уровне генерации частиц.

- предсказания, полученные с помощью старых PYTHIA MPI моделей (Tune A и Tune DW), не описывают данные.

В общем случае общая неопределенность при измерении дифференциального сечения варьируется между 7% и 30%. Систематическая неопределенность вызвана процедурой JES (2% – 17%), анфолдингом (5% – 18%), энергетическим разрешением струй в MC событиях (1% – 7%) и оценкой фонового вклада (до 5%).

Секция 5.5 и секция 5.6 посвящены измерению долей двойных и тройных партонных (TP) взаимодействий в $\gamma + 2 \text{ jet}$ и $\gamma + 3 \text{ jet}$ событиях. Доля DP событий во всех $p_T^{\text{jet}2}$ интервалах определяется с помощью метода максимального правдоподобия: равномерное $\Delta\phi$ распределение в сигнальной модели DP и $\Delta\phi$ предсказание в фоновой SP модели фитируются к данным. Измеренные доли DP в $\gamma + 2 \text{ jet}$ событиях уменьшаются в зависимости от $p_T^{\text{jet}2}$ с $11.6\% \pm 1.0\%$ в интервале 15 – 20 ГэВ до $5.0\% \pm 1.2\%$ в интервале 20 – 25 ГэВ и $2.2\% \pm 0.8\%$ в интервале 25 – 30 ГэВ. В $\gamma + 3 \text{ jet}$ TP событиях три струи происходят из трех различных партонных взаимодействий, образуя $\gamma + \text{jet}$ и два двухструйных конечных состояния. В каждом из двух двухструйных событий одна из струй либо не реконструировалась, либо оказалась ниже p_T порога отбора в 15 ГэВ. Вычисленные фракции тройных партонных (TP) событий в $\gamma + 3 \text{ jet}$ данных варьируются в $p_T^{\text{jet}2}$ интервалах как $5.5\% \pm 1.1\%$ при 15 – 20 ГэВ, $2.1\% \pm 0.6\%$ при 20 – 25 ГэВ и $0.9\% \pm 0.3\%$ при 25 – 30 ГэВ. Результаты шестой главы опубликованы в работе [2].

Шестая глава диссертации посвящена измерению доли двойных партонных взаимодействий и измерению эффективного сечения в $\gamma + 3 \text{ jet}$ (инклюзивный случай) и $\gamma + b/c + 2 \text{ jet}$ (HF случай) событиях. В *секции 6.1* рассматривается метод извлечения параметра σ_{eff} из данных путём сравнения числа $\gamma + 3 \text{ jet}$ событий, рождающихся в DP взаимодействиях в одном $p\bar{p}$ столкновении, с числом $\gamma + 3 \text{ jet}$ событий, которые рождаются в двух различных жёстких взаимодействиях, происходящих в двух отдельных $p\bar{p}$ столкновениях. Последний класс событий относится к событиям с двойными взаимодействиями (DI). Этот подход позволяет свести к минимуму влияние теоретических предположений.

С помощью последовательности преобразований можно получить выражение для σ_{eff} в следующем виде:

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{N_{\text{DI}}}{N_{\text{DP}}} \frac{\varepsilon_{\text{DP}}}{\varepsilon_{\text{DI}}} R_c \sigma_{\text{hard}}, \quad (4)$$

где фактор $R_c \equiv (1/2)(N_{1\text{coll}}/N_{2\text{coll}})(\varepsilon_{1\text{vtx}}/\varepsilon_{2\text{vtx}})$. В этой формуле N_{DI} (N_{DP}) - число DI (DP) событий, ε_{DI} (ε_{DP}) - эффективность прохождения геометрических и кинематических критериев отбора, $\varepsilon_{2\text{vtx}}$ ($\varepsilon_{1\text{vtx}}$) - эффективность отбора событий с двумя (одной) вершинами,

$N_{2\text{coll}}$ ($N_{1\text{coll}}$) - число пересечений пучков с двумя (одним) жесткими столкновениями, σ_{hard} - это суммарное сечение жёстких $p\bar{p}$ взаимодействий. Важно отметить, что сечения $\sigma^{\gamma j}$ и σ^{jj} не участвуют в формуле (4), а все остальные эффективности для DP и DI событий входят только как отношения, что приводит к снижению воздействия многих коррелирующих систематических неопределенностей.

Секция 6.2 содержит критерии отбора данных и обзор моделей, которые используются при измерении N_{DP} и N_{DI} , а также при вычислении эффективностей отбора, геометрического и кинематического аксептансов для DP и DI событий. Каждое отобранное событие в данных должно содержать как минимум один фотон в $|y^\gamma| < 1.0$ или $1.5 < |y^\gamma| < 2.5$ областях с $p_T^\gamma > 26$ ГэВ и, по крайней мере, три струи в области $|y^{\text{jet}}| < 2.5$ и $p_T^{\text{jet}1} > 15$ ГэВ, $15 < p_T^{\text{jet}2,3} < 35$ ГэВ. Для отбора $\gamma + \text{b/c} + 2 \text{ jet}$ событий накладываются дополнительные условия, необходимые для идентификации тяжелой струи.

Алгоритмы определения доли DP и DI событий описываются в *секции 6.3.1* и *секции 6.3.2*. Для вычисления σ_{eff} необходимо знать количество DP (DI) событий, которое определяется как произведение доли DP (DI) событий, f_{DP} (f_{DI}), и количества 1VTX (2VTX) событий. Доля f_{DP} находится с помощью метода, описанного в секции 5.5. Доля DI событий измеряется в данных с двумя $p\bar{p}$ вершинами (PV0 и PV1), используя трековую информацию струи и привязку треков либо к PV0, либо к PV1. Лидирующая струя должна рождаться в PV0. К DI событиям относятся события, в которых как минимум одна из струй (вторая или третья) происходит из PV1. Результирующие фракции DP событий в инклюзивном и HF случаях составляют: $f_{\text{DP}}^{\text{inc}} = 0.206 \pm 0.007$ (stat) ± 0.004 (syst) и $f_{\text{DP}}^{\text{HF}} = 0.173 \pm 0.020$ (stat) ± 0.002 (syst) соответственно. А DI фракции, извлеченные в инклюзивном и HF случаях, следующие: $f_{\text{DI}}^{\text{inc}} = 0.135 \pm 0.002$ (stat) ± 0.008 (syst) и $f_{\text{DI}}^{\text{HF}} = 0.131 \pm 0.010$ (stat) ± 0.011 (syst).

В *секции 6.4* описывается измерение составляющих уравнения (4) и дополнительных поправок в инклюзивном (HF) случае:

- отношение долей фотонного сигнала в DP и DI событиях: $\text{DP/DI} = 0.976 \pm 0.019$ (0.993 ± 0.104);
- отношение геометрических и кинематических аксептансов в DP и DI событиях: $A_{\text{DP}}/A_{\text{DI}} = 0.551 \pm 0.010$ (stat) ± 0.030 (syst) ($A_{\text{DP}}^{\text{HF}}/A_{\text{DI}}^{\text{HF}} = 0.567 \pm 0.021$ (stat) ± 0.052 (syst));
- отношение эффективностей восстановления 1VTX и 2VTX событий: $\varepsilon_{1\text{vtx}}/\varepsilon_{2\text{vtx}} = 1.05 \pm 0.01$;

- в HF случае дополнительно необходимо учесть отношение эффективностей определения тяжелых струй: $\varepsilon_{\text{DP}}^{\text{HF}}/\varepsilon_{\text{DI}}^{\text{HF}} = 1.085 \pm 0.019$;
- выражение $R_c\sigma_{\text{hard}} = 18.92 \pm 0.49$ мб.

Наконец, в *секции 6.5* приводятся результаты. Используя уравнение (4), были найдены следующие эффективные сечения:

$$\sigma_{\text{eff}}^{\text{incl}} = 12.7 \pm 0.2 \text{ (stat)} \pm 1.3 \text{ (syst)} \text{ mb} \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{eff}}^{\text{HF}} = 14.6 \pm 0.6 \text{ (stat)} \pm 3.2 \text{ (syst)} \text{ mb.} \quad (6)$$

С учетом неопределенностей, эффективные сечения для инклюзивного и HF набора событий совпадают между собой. Основные источники систематических неопределенностей приведены в таблице 1. Они вызваны неопределенностями измерения долей DP и DI событий, эффективностей и аксептансов в DP и DI событиях (“ $\varepsilon_{\text{DP}}/\varepsilon_{\text{DI}}$ ”), фотонной чистоты (“Purity”), количества жестких взаимодействий с одним и двумя $p\bar{p}$ жесткими столкновениями, умноженного на σ_{hard} (“ $R_c\sigma_{\text{hard}}$ ”) и JES коррекцией струй (“JES”).

Таблица 1. Систематическая (δ_{syst}), статистическая (δ_{stat}) и полная δ_{total} неопределенности (в %) для σ_{eff} полученной в $\gamma + 3 \text{ jet}$ и $\gamma + \text{b/c} + 2 \text{ jet}$ событиях. Общая неопределенность δ_{total} рассчитывается путем сложения систематической и статистической неопределенностей в квадратуре.

Источники систематических неопределенностей									
	f_{DP}	f_{DI}	$\varepsilon_{\text{DP}}/\varepsilon_{\text{DI}}$	Purity	$R_c\sigma_{\text{hard}}$	JES	δ_{syst}	δ_{stat}	δ_{total}
inclusive	3.9	6.5	5.6	2.0	2.6	2.9	10.4	1.8	10.6
HF	11.6	11.2	9.4	10.4	2.6	1.3	21.6	4.0	22.0

Рисунок 3 показывает все существующие измерения σ_{eff} . Полученные результаты для $\sigma_{\text{eff}}^{\text{incl}}$ и $\sigma_{\text{eff}}^{\text{HF}}$ согласуются как с предыдущим результатом $D\bar{O}$, так и с другими измерениями, произведенными на Тэватроне и ЛНС. Данные измерения σ_{eff} являются наиболее точными на сегодняшний день, и это первое измерение со струями, образованными тяжелыми кварками. Результаты пятой главы опубликованы в работе [3].

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

В **Приложении А** приведены таблицы, содержащие дифференциальные сечения $d^3\sigma/dp_T^\gamma dy^\gamma dy^{\text{jet}}$ в шестнадцати кинематических областях.

В **Приложении Б** исследуются различные SP модели, используемые при вычислении f_{DP} в $\gamma + 3 \text{ jet}$ и $\gamma + \text{b/c} + 2 \text{ jet}$ событиях.

Основные результаты и выводы диссертации

1. В целях обработки полученных данных, содержащих прямой фотон и ассоциированные с ним адронные струи, были разработаны программные пакеты, позволяющие производить расчёты основных кинематических параметров, характеризующие сигнальные и фоновые процессы.
2. Измерены тройные дифференциальные сечения $d^3\sigma/dp_T^\gamma dy^\gamma dy^{\text{jet}}$ для процессов с ассоциированным рождением фотона и струи, $p\bar{p} \rightarrow \gamma + \text{jet} + X$, для центральных ($|y^\gamma| < 1.0$) и передних ($1.5 < |y^\gamma| < 2.5$) фотонов и струй в одном из четырех регионах по быстроте ($|y^{\text{jet}}| < 0.8$, $0.8 < |y^{\text{jet}}| < 1.6$, $1.6 < |y^{\text{jet}}| < 2.4$ или $2.4 < |y^{\text{jet}}| < 3.2$), используя данные, соответствующие интегральной светимости 8.7 фб^{-1} . Найденные сечения сравнены с предсказаниями, полученными с помощью МС генераторов SHERPA, RUTHIA и JETPHOX.
3. Впервые изучены азимутальные корреляции в $\gamma + 3 \text{ jet}$ и $\gamma + 2 \text{ jet}$ событиях светимостью 1.0 фб^{-1} и измерены нормированные дифференциальные сечения в четырёх интервалах p_T второй струи, $(1/\sigma_{\gamma 3j})d\sigma_{\gamma 3j}/d\Delta S$ и $(1/\sigma_{\gamma 2j})d\sigma_{\gamma 2j}/d\Delta\phi$. Выполнено сравнение с МС предсказаниями, использующие различные варианты структурных функций. Также были измерены доли тройных и двойных мультипартонных событий в $\gamma + 3 \text{ jet}$ и $\gamma + 2 \text{ jet}$ данных.
4. Впервые измерено эффективное сечения σ_{eff} в $\gamma + b/c + 2 \text{ jet}$ событиях содержащих тяжелый кварк, собранных экспериментом DØ с интегральной светимостью 8.7 фб^{-1} . Ценность этого параметра состоит в том, что он несет информацию о поперечном партонном распределении в нуклоне. Выполнено сравнение σ_{eff} для процессов с тяжелыми и лёгкими кварками, которое показало независимость этого параметра от аромата исходных партонов.

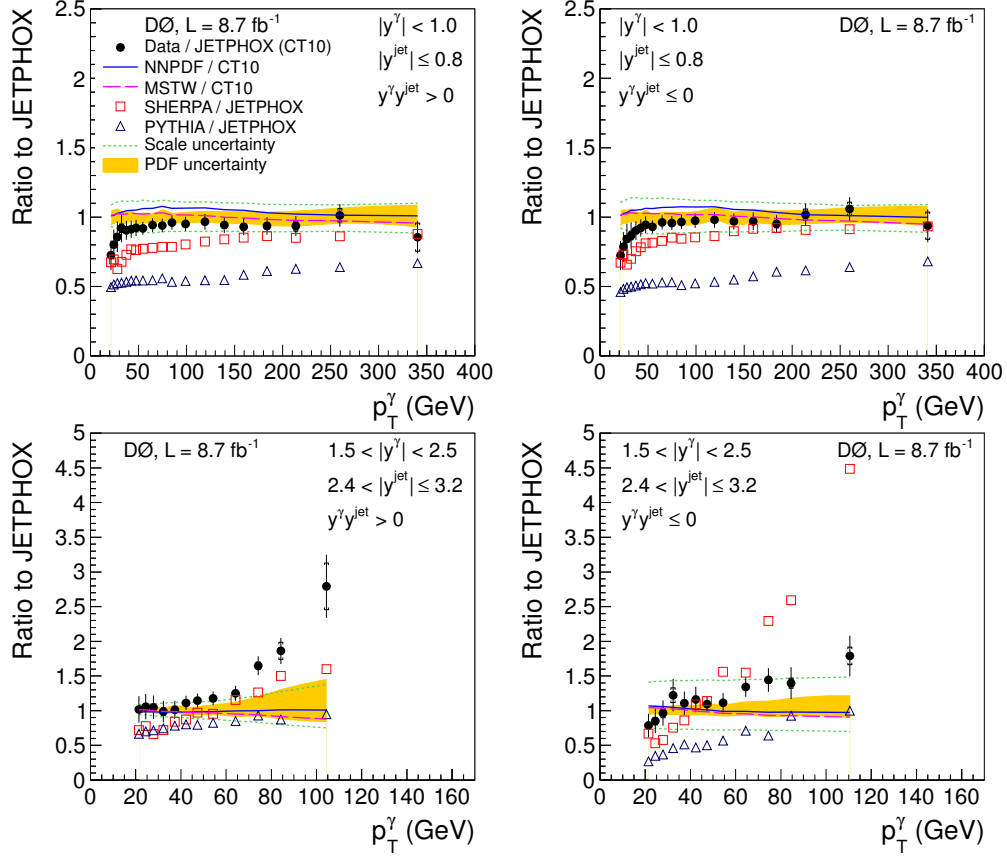


Рис. 1. Отношения измеренных дифференциальных сечений в некоторых кинематических областях к предсказаниям pQCD NLO, полученных с помощью JETPHOX MC генератора с PDF набором CT10 и $\mu_R = \mu_F = \mu_f = p_T^\gamma$. Сплошная вертикальная линия на точках показывает статистическую и p_T -зависимую систематическую неопределенности, сложенные в квадратуре, в то время как внутренняя линия представляет статистическую неопределенность. Общая нормализационная неопределенность не отображается на рисунке. Две пунктирные линии отражают эффект изменения теоретической шкалы JETPHOX в два раза. Заштрихованная область показывает CT10 PDF неопределенность. Пунктирная и штрих-пунктирная линии показывают отношения между JETPHOX предсказаниями с MSTW2008NLO и NNPDFv2.1 к CT10 набору PDF. Предсказания полученные с помощью SHERPA и PYTHIA отображены как открытые квадраты и треугольники соответственно.

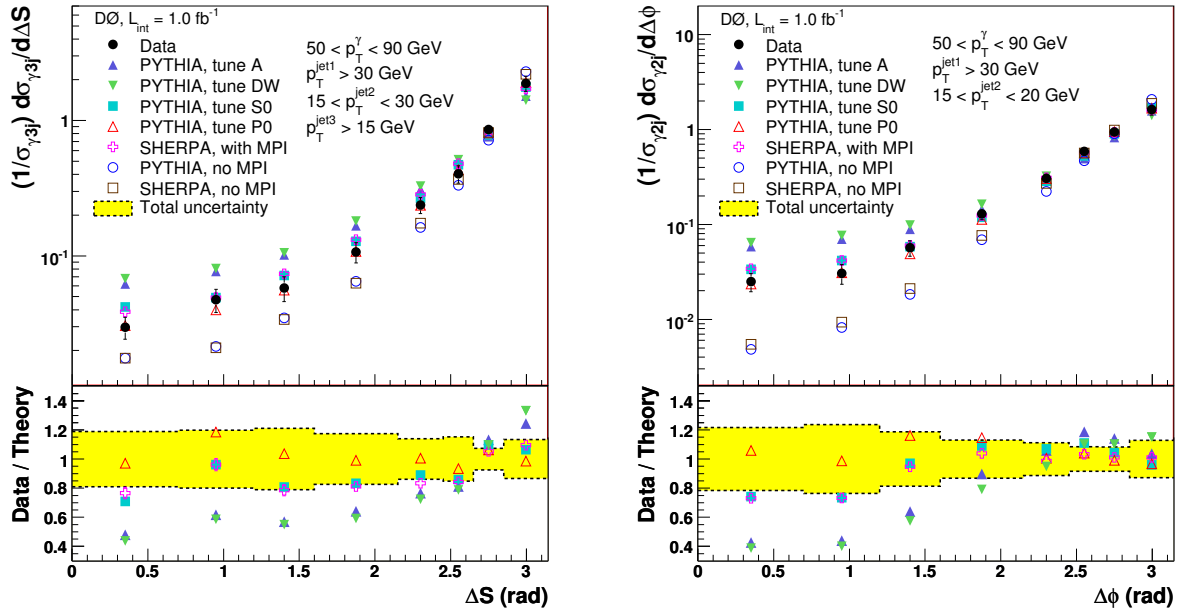


Рис. 2. Сравнение измеренного нормированного дифференциального сечения $(1/\sigma_{\gamma 3j})d\sigma_{\gamma 3j}/d\Delta S$ ($(1/\sigma_{\gamma 2j})d\sigma_{\gamma 2j}/d\Delta\phi$) в интервале $15 < p_T^{\text{jet}2} < 30$ ГэВ ($15 < p_T^{\text{jet}2} < 20$ ГэВ) с МС предсказаниями. Соотношения между данными и теорией приведены только для MPI моделей.

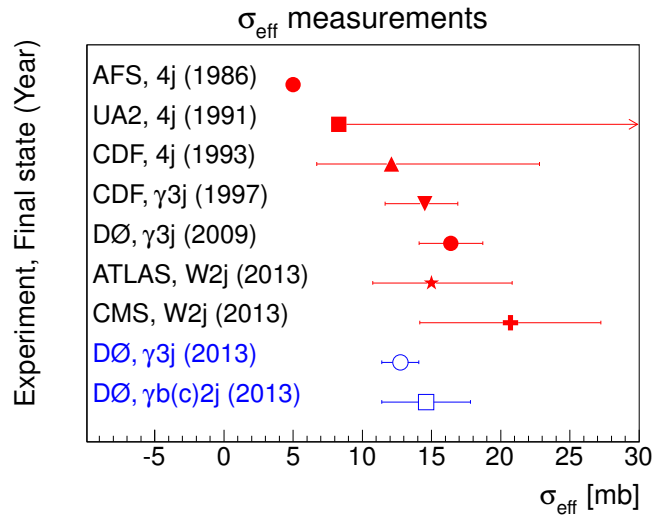


Рис. 3. Обобщение текущих измерений эффективного сечения, σ_{eff} . (AFS: не сообщает никаких неопределенностей; UA2: представлен только нижний предел).

Список литературы

1. V. M. Abazov *et al.* (DØ Collaboration). Measurement of the differential cross section of photon plus jet production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV. Phys. Rev. D **88**, 072008 (2013).
2. V. M. Abazov *et al.* (DØ Collaboration). Azimuthal decorrelations and multiple parton interactions in $\gamma + 2$ jet and $\gamma + 3$ jet jet events in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV. Phys. Rev. D **83**, 052008 (2011).
3. V. M. Abazov *et al.* (DØ Collaboration). Double parton interactions in $\gamma + 3$ jet and $\gamma + b/c + 2$ jet events in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV. Phys. Rev. D **89**, 072006 (2014).
4. A. V. Verkheev (for the DØ Collaboration) PoS(Baldin ISHEPP XXII)005. Proceedings of the XXII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, 15-20 September, 2014, JINR, Dubna, Russia.