

*На правах рукописи*

Шипилова Александра Викторовна

ИНКЛЮЗИВНОЕ И АССОЦИАТИВНОЕ РОЖДЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ КВАРКОВ  
В РЕДЖЕВСКОМ ПРЕДЕЛЕ КВАНТОВОЙ ХРОМОДИНАМИКИ

*01.04.16*

*Физика атомного ядра и элементарных частиц*

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

Самара – 2010

Работа выполнена на кафедре общей и теоретической физики в ГОУ ВПО  
«Самарский государственный университет»

### **Научный руководитель**

доктор физико–математических наук, профессор,  
Салеев Владимир Анатольевич

### **Официальные оппоненты:**

доктор физико–математических наук, профессор  
Кураев Эдуард Алексеевич

доктор физико–математических наук, профессор  
Фадин Виктор Сергеевич

### **Ведущая организация**

Петербургский Институт Ядерной Физики  
им. Б.П. Константинова

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2011 г. в 15<sup>00</sup> на заседании  
диссертационного совета Д 720.001.01 при Лаборатории теоретической физи-  
ки им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г.  
Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института  
ядерных исследований.

Автореферат разослан «\_\_\_\_»\_\_\_\_\_

Ученый секретарь

диссертационного совета Арбузов Андрей Борисович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию процессов инклюзивного и ассоциативного рождения тяжелых кварков при высоких энергиях в подходе квазимультиреджевской кинематики (КМРК). В рамках гипотезы реджезации глюонов и кварков изучается инклюзивное и парное рождение  $b$ -струй, ассоциативное рождение  $b\gamma$ - и  $c\gamma$ -струй, инклюзивное фоторождение и адророждение  $D$ -мезонов. С использованием формализма нерелятивистской квантовой хромодинамики (НРКХД) рассматриваются процессы инклюзивного фоторождения  $J/\psi$ -мезонов.

В основе диссертации лежат результаты работ, выполненных автором в период с 2007 по 2010 годы в Самарском государственном университете, а также во время стажировки по Российско-Германской программе научных обменов «Михаил Ломоносов» во II-м Институте теоретической физики Гамбургского университета, г. Гамбург, Германия.

Исследования выполнялись в рамках реализации проекта П-1338 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (мероприятия № 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук»), а также при поддержке некоммерческого фонда «Династия».

### *Актуальность темы.*

Исследуемые в диссертации процессы инклюзивного и ассоциативного рождения тяжелых кварков с большими поперечными импульсами на коллайдерах высоких энергий, прежде всего таких как Tevatron и ЛНС, представляют значительный интерес для проверки пертурбативной квантовой хромодинамики (КХД) и КХД-мотивированных моделей, описывающих процессы адронизации тяжелых кварков, а также дают информацию о партонных распределениях в протоне. Эти процессы относятся к так называемым жестким процессам, то есть процессам с большой передачей импульса  $\mu$ , для которых  $\mu^2 \gg \Lambda_{\text{КХД}}^2$ , где  $\Lambda_{\text{КХД}}$  — асимптотический масштабный параметр КХД. Они изучаются в терминах кварковых и глюонных полей, то есть непосредственно с помощью лагранжиана КХД и построенной на его основе теории возмущений по малой на масштабе  $\mu$  константе сильного взаимодействия  $\alpha_s(\mu)$ . В роли характерного масштаба  $\mu$  жесткого процесса, в результате которого рождается тяжелый кварк с массой  $m_q$  и поперечным импульсом  $\mathbf{p}_T$ ,

обычно выбирается поперечная масса кварка  $m_T = \sqrt{m_q^2 + \mathbf{p}_T^2}$ . Таким образом, наличие достаточно тяжелого кварка ( $m_T \gg \Lambda_{\text{КХД}}$ ) гарантирует, что передачи импульса в партонном подпроцессе велики, даже в процессах рождения тяжелых кварков с малыми поперечными импульсами, и константа сильного взаимодействия на масштабах больших, чем масса тяжелого кварка, достаточно мала для расчетов по теории возмущений  $\alpha_s(m_T) \leq 0.2$ .

Теоретической основой моделей, претендующих на описание существующих экспериментальных данных по различным спектрам рождения тяжелых кварков и кваркониев на коллайдерах высоких энергий, является гипотеза факторизации мягких и жестких взаимодействий, которая позволяет учесть непертурбативные эффекты путем введения коллинеарных или неколлинеарных функций распределения партонов в протоне, а также функций фрагментации партонов в конечные адроны. В феноменологии сильных взаимодействий при высоких энергиях необходимо описывать КХД-эволюцию функций распределения партонов в сталкивающихся адронах начиная с некоторого масштаба  $\mu_0$ , который отвечает за их непертурбативное поведение, до некоторого характерного энергетического масштаба жесткого процесса рассеяния  $\mu$ . Эти функции подчиняются уравнениям Докшицера-Грибова-Липатова-Алтарелли-Паризи (ДГЛАП), которые позволяют суммировать члены, усиленные в каждом порядке теории возмущений степенями «больших логарифмов»  $\ln(\mu/\Lambda_{\text{КХД}})$ . В области очень высоких энергий, в так называемом реджевском пределе, характерное значение  $x = \mu/\sqrt{S}$  становится очень малым  $x \ll 1$ . Это приводит к большим вкладам логарифмов типа  $\ln(1/x)$  в процедуре суммирования ряда теории возмущений по константе сильного взаимодействия, которая описывается уравнением эволюции Балицкого-Фадина-Кураева-Липатова (БФКЛ) или другими уравнениями подобного типа для неинтегрированных по поперечному импульсу глюонных и кварковых функций распределения  $\Phi_a(x, \mathbf{q}_T^2, \mu^2)$ ,  $a = q, g$ .

В этом высокоэнергетическом пределе партонные подпроцессы с обмени партонами (кварками или глюонами) в  $t$ -канале дают основной вклад в сечения взаимодействия адронов, и мы имеем дело с мультiredжевской или квазимультiredжевской кинематикой процессов рождения. В мультiredжевской кинематике частицы в конечном состоянии разделены на струи с конечными (не растущими с  $S$ ) инвариантными массами; при этом инвариантные

массы любой пары струй растут с  $S$ . Иначе говоря, поперечные к оси столкновения импульсы рожденных частиц конечны, а продольные импульсы имеют один порядок величины в каждой из струй; при этом отношение характерных продольных импульсов в разных струях сильно отличается от единицы, и это отличие растет с  $S$ . Квазимультiredжевская кинематика (КМРК) включает струи частиц с инвариантной массой порядка характерного поперечного импульса, то есть все частицы, за исключением одной пары, имеют большие инвариантные массы и фиксированные поперечные импульсы, а инвариантная масса упомянутой пары частиц сравнима с их поперечными импульсами.

В рассматриваемой области уже нельзя пренебрегать поперечными импульсами партонов и их немассовыми свойствами, как это предполагается в стандартной партонной модели. Теоретической основой такой реджевской феноменологии является подход квазимультiredжевской кинематики, основанный на неабелевой калибровочно-инвариантной квантовой теории поля, предложенной Л. Н. Липатовым в 1995 г. Эффективное действие этой теории содержит поля реджезованных глюонов и реджезованных кварков, наряду с полями обычных кварков и Янг-Миллсовских глюонов. Реджезация элементарной частицы со спином  $j$  означает тот факт, что при больших энергиях  $\sqrt{S}$  сталкивающихся частиц и фиксированных переданных импульсах  $\sqrt{-t}$  амплитуды процессов с обменом этой частицей с учетом радиационных поправок имеют тот же вид, что и в борновском приближении, но со спином, отличным от  $j$  и зависящим от передачи импульса. Подход КМРК позволяет эффективно учесть главные вклады в амплитуды процессов в реджевском пределе, просуммированные во всех порядках теории возмущений КХД по константе сильного взаимодействия, что представляет высокую практическую ценность, так как расчеты в фиксированном порядке по  $\alpha_s$  в коллинеарном приближении не описывают многочисленные данные, полученные на коллайдере Tevatron. Также, развитие подхода КМРК представляется актуальным потому, что проверка Стандартной Модели и поиск эффектов новой физики, лежащей за ее пределами, на современных ускорителях высоких энергий требует максимально точного описания процессов рождения уже известных и гипотетических частиц в рамках КХД.

*Научная новизна и практическая ценность работы.* В работе впервые, наряду с известным эффектом реджезации глюонов, исследован эффект реджезации кварков в процессах инклюзивного и ассоциативного рождения тяжелых кварков при высоких энергиях. Показана важность учета борновских процессов  $2 \rightarrow 1$  в подходе КМРК при описании инклюзивных спектров частиц по поперечному импульсу. Для партонных подпроцессов  $2 \rightarrow 2$  с участием реджезованных  $t$ -канальных глюонов и кварков в подходе КМРК впервые получен ряд неизвестных ранее аналитических выражений для квадратов модулей амплитуд рождения тяжелых кварков, фотонов и глюонов. Эти результаты могут быть использованы в генераторах Монте-Карло, которые получили широкое распространение для моделирования реальных экспериментов на ускорителях высоких энергий.

Впервые в подходе КМРК единым образом описаны данные по спектрам инклюзивного рождения с участием тяжелых кварков ( $c$  и  $b$ ):  $D$ - и  $J/\psi$ -мезонов, собственно  $b$ -струй, корреляции между  $b$  и  $\bar{b}$  струями, спектры фотонов по поперечному импульсу в процессах ассоциативного рождения  $b\gamma$ - и  $c\gamma$ -пар. Сделаны предсказания для спектров ассоциативного рождения  $b\gamma$ - и  $c\gamma$ -пар по инвариантной массе пары и азимутальному углу между поперечными импульсами фотона и тяжелого кварка.

Успешное применение подхода КМРК для описания приведенных выше экспериментальных данных открывает возможность как для изучения других процессов, происходящих при условиях (квази)мультiredжевской кинематики, в рамках этого подхода, так и для дальнейшего теоретического развития высокоэнергетической КХД.

*Достоверность полученных результатов* обеспечивается использованием точных аналитических выражений для квадратов модулей амплитуд процессов рождения, совпадением их в коллинеарном пределе с результатами, полученными ранее в коллинеарной партонной модели, использованием неоднократно апробированных методов при численных расчетах и согласованностью результатов, полученных для наблюдаемых в различных процессах рождения частиц.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Получены впервые аналитические формулы для квадратов модулей амплитуд процессов  $2 \rightarrow 2$  с участием реджезованных кварков и глюонов:  $Q_r \bar{Q}_r \rightarrow q_f \bar{q}_f$ ,  $Q_f \bar{Q}_f \rightarrow q_f \bar{q}_f$ ,  $Q_r Q_f \rightarrow q_r q_f$ ,  $Q_f Q_f \rightarrow q_f q_f$ ,  $Q\mathcal{R} \rightarrow q\gamma$ ,  $Q\bar{Q} \rightarrow g\gamma$ ,  $Q\gamma \rightarrow qg$ . Показано, что в коллинеарном пределе полученные выражения совпадают с известными в КХД результатами.

2. Показана нетривиальная роль партонных подпроцессов  $2 \rightarrow 1$  с участием реджезованных кварков в подходе КМРК, при описании процессов инклюзивного рождения тяжелых кварков с большими поперечными импульсами. С учетом таких процессов, получено хорошее описание данных по спектрам  $D$ -мезонов на коллайдерах HERA и Tevatron, а также  $b$ -кварковых струй на коллайдере Tevatron.

3. Выполнен расчет различных корреляционных спектров в парном рождении  $b\bar{b}$ -струй на коллайдере Tevatron в подходе КМРК. Результаты расчетов, полученные с учетом вкладов подпроцессов  $\mathcal{R}\mathcal{R} \rightarrow b\bar{b}$  и  $Q\bar{Q} \rightarrow b\bar{b}$ , хорошо описывают экспериментальные данные.

4. Показано, что данные по ассоциативному рождению тяжелых кварков ( $b$  или  $c$ ) и фотонов с большими поперечными импульсами на коллайдере Tevatron хорошо описываются в борновском приближении подхода КМРК, где основной вклад дает партонный подпроцесс рассеяния реджезованного кварка на реджезованном глюоне  $Q_{b,c}\mathcal{R} \rightarrow b(c)\gamma$ .

5. Исследована относительная роль механизмов фрагментации и слияния в процессах фоторождения  $J/\psi$ -мезонов в подходе КМРК и НКХД. Показано, что при рождении  $J/\psi$ -мезонов механизм слияния доминирует над механизмом фрагментации для значений поперечных импульсов вплоть до  $p_T = 20$  ГэВ в подходе КМРК, в то время как в коллинеарной партонной модели вклад механизма фрагментации начинает превышать вклад механизма слияния при значительно более высоком значении поперечного импульса  $p_T = 40$  ГэВ.

### *Апробация результатов.*

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных форумах: Международной Школе «Вычисления для современных и будущих коллайдеров» (ОИЯИ, Дубна, 2006); Научной Сессии Отделения ядерной физики РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (ИТЭФ, Москва, 2007 и 2009); конференции «Структура адронов и КХД: от низких до высоких энергий», (ПИЯФ, Гатчина, 2008, 2010); рабочем семинаре II-го Института теоретической физики (DESY, Гамбург, 2008); конференции Института Густава Штрессмана (Бонн, 2008); рабочего семинара DESY (DESY, Гамбург, 2009); методологической школе-конференции «Математическая физика и нанотехнологии» (Самара, 2009); международной конференции «Photon 2009» (DESY, Гамбург, 2009); международной конференции «Physics at the LHC 2010» (DESY, Гамбург, 2010); международной конференции «Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects» (Флоренция, 2010); международной конференции «Quarks-2010» (ИЯИ, Москва); Второй международной конференции «Математическая физика и ее приложения» (Самара, 2010); Международном совещании «Боголюбовские чтения» (ОИЯИ, Дубна, 2010), а также на регулярных научно-практических конференциях и научных семинарах в Самарском государственном университете.

### *Публикации.*

По теме диссертационной работы опубликовано 13 работ, в том числе: в журналах из списка рекомендуемых ВАК — 5; в иностранных журналах — 3; в сборниках трудов международных симпозиумов и конференций — 4; в других изданиях — 4.

### *Структура и объем диссертации.*

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографии из 96 наименований. Она содержит 19 рисунков. Общий объем диссертации составляет 97 страниц.



## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Введение* содержит краткую характеристику темы исследования, формулировку целей работы и описание структуры диссертации. В конце введения отмечается личный вклад автора в полученные результаты и апробация работы.

*Первая глава. Теоретические модели.* В первой главе дан краткий обзор основным существующим теоретическим моделям, которые используются для описания процессов с участием тяжелых кварков, рождения струй и тяжелых кваркониев при высоких энергиях, это подход КМРК, НРКХД и модель фрагментации.

*Первый параграф* посвящен подходу КМРК, который основан на эффективной квантово-полевой теории с неабелевым калибровочным действием, являющейся высокоэнергетическим пределом КХД. В подходе КМРК начальные  $t$ -канальные глюоны и кварки рассматриваются как Реджеоны, или реджезованные глюоны ( $\mathcal{R}$ ) и реджезованные кварки ( $\mathcal{Q}$ ). Реджеоны находятся вне массовой поверхности и переносят конечный двумерный поперечный импульс  $\mathbf{q}_T$ , относительно адронов, из которых они были испущены.

Реджеоны взаимодействуют с обычными Янг-Миллсовскими глюонами и кварками особым образом, и для вычисления амплитуд процессов с их участием в низшем порядке по  $\alpha_s$  используются эффективные правила Фейнмана, полученные ранее в работах Л.Н.Липатова и М.И.Вязовского (2001) и Е.Н.Антонова, Л.Н.Липатова, Е.А. Кураева и И.О.Чередникова (2005), для индуцированных и некоторых важных эффективных вершин. Реджезация амплитуд это прием, который дает возможность эффективно учесть большие радиационные поправки к процессам в реджевском пределе высоких энергий, вне рамок коллинеарного приближения.

В рамках гипотезы факторизации жестких процессов при высоких энергиях адронное сечение рождения кваркония  $H$  в процессе  $p + p \rightarrow H + X$  связано с сечением рождения в подпроцессе с участием Реджеонов ( $a$  и  $b$ )  $a + b \rightarrow H + X'$  следующим образом

$$\begin{aligned} d\sigma(p + \bar{p} \rightarrow H + X) &= \int \frac{dx_1}{x_1} \int \frac{d^2q_{1T}}{\pi} \int \frac{dx_2}{x_2} \int \frac{d^2q_{2T}}{\pi} \times \\ & \left[ \Phi_a^p(x_1, t_1, \mu^2) \Phi_b^{\bar{p}}(x_2, t_2, \mu^2) + \Phi_b^p(x_1, t_1, \mu^2) \Phi_a^{\bar{p}}(x_2, t_2, \mu^2) \right] \times \\ & d\hat{\sigma}(a + b \rightarrow H + X'), \end{aligned} \tag{1}$$

где  $q_1$  и  $q_2$  — 4-импульсы Реджеонов  $a$  и  $b$ , соответственно,  $t_{1,2} = -q_{1,2}^2$ ,  $x_{1,2}$  — доли импульса адронов, уносимые Реджеонами,  $\mu \sim M_T = \sqrt{m_H^2 + |\mathbf{p}_T|^2}$  — характерный масштаб жесткого процесса. Неинтегрированные функции распределения  $\Phi_a^h(x, t, \mu^2)$  связаны с коллинеарными  $F_a^h(x, \mu^2)$  условием нормировки

$$xF_a^h(x, \mu^2) = \int^{\mu^2} dt \Phi_a^h(x, t, \mu^2), \quad (2)$$

обеспечивающим правильный переход от формул подхода КМРК к коллинеарной партонной модели, в которой поперечными импульсами партонов пренебрегают. На стадии численных расчетов мы используем предписание Кимбера, Мартина и Рыскина (КМР) для неинтегрированных кварковых и глюонных функций распределения, используя протонные коллинеарные функции Мартина-Робертса-Стирлинга-Торна в качестве затравочных. Следует заметить, что поход КМР для получения неинтегрированных функций распределения кварков и глюонов по существу близок к методу нахождения эффективных вершин в подходе КМРК.

Во втором параграфе рассматривается НРКХД. В рамках подхода НРКХД сечение рождения тяжелого кваркония  $H$  в партон-партонном взаимодействии  $\hat{\sigma}(a + b \rightarrow H + X)$  может быть представлено как сумма членов, в которых факторизуются коэффициенты, определяемые физикой жесткого взаимодействия, и матричные элементы, описывающие эффекты физики больших расстояний:

$$d\hat{\sigma}(H) = \sum_n d\hat{\sigma}(Q\bar{Q}[n]) \langle \mathcal{O}^H[n] \rangle. \quad (3)$$

Здесь  $n$  обозначает набор цветовых, спиновых и орбитальных квантовых чисел  $Q\bar{Q}$ -пары, сечение рождения которой  $\hat{\sigma}(Q\bar{Q}[n])$ . Непертурбативный переход  $Q\bar{Q}$ -пары в конечный кварконий  $H$  описывается матричным элементом  $\langle \mathcal{O}^H[n] \rangle$ , который может быть рассчитан в рамках непертурбативных методов КХД или извлечен из экспериментальных данных.

В третьем параграфе обсуждается механизм фрагментации. Анализ процессов рождения тяжелых мезонов и тяжелых кваркониев в рамках коллинеарной партонной модели показывает, что в области  $p_T^2 \gg m_H^2$  реализуются условия фрагментационного приближения, при котором имеет место факторизация процесса рождения тяжелого кварка и его превращения в конечный мезон. В этой области сечение рождения тяжелого мезона или квар-

кония  $H$  может быть представлено в виде

$$d\sigma(p + \bar{p} \rightarrow H + X) = \sum_i \int d\xi D_{i \rightarrow H}(\xi, \mu^2) d\hat{\sigma}(p + \bar{p} \rightarrow i), \quad (4)$$

где сумма берется по всем типам партонов  $i = q, g$ .

*Вторая глава. Амплитуды процессов с участием реджезованных глюонов и кварков в подходе КМПК.* Вторая глава посвящена выводу аналитических выражений для квадратов модулей амплитуд процессов рождения с участием Реджеонов в начальном состоянии. Все процессы исследуются в низшем порядке по константе сильного взаимодействия  $\alpha_s$ . Отдельно рассмотрены процессы рождения тяжелых кварков и глюонов  $2 \rightarrow 1$  (вершины Реджеон-Реджеон-частица:  $\mathcal{R}\mathcal{R} \rightarrow g, \mathcal{R}\mathcal{Q} \rightarrow q, \mathcal{Q}\bar{\mathcal{Q}} \rightarrow g, \mathcal{Q}\mathcal{Q} \rightarrow \gamma$ ; вершины Реджеон-частица-частица:  $\mathcal{Q}g \rightarrow q, \mathcal{R}\mathcal{Q} \rightarrow q, \mathcal{Q}\gamma \rightarrow q$ ) и  $2 \rightarrow 2$  ( $\mathcal{Q}_r\bar{\mathcal{Q}}_r \rightarrow q_f\bar{q}_f, \mathcal{Q}_f\bar{\mathcal{Q}}_f \rightarrow q_f\bar{q}_f, \mathcal{Q}_r\mathcal{Q}_f \rightarrow q_rq_f, \mathcal{Q}_f\mathcal{Q}_f \rightarrow q_fq_f, \mathcal{Q}\mathcal{R} \rightarrow q\gamma, \mathcal{Q}\bar{\mathcal{Q}} \rightarrow g\gamma, \mathcal{Q}\gamma \rightarrow qg$ .)

Для всех квадратов модулей амплитуд процессов рождения с участием реджезованных глюонов и кварков проверено совпадение коллинеарного предела и квадрата модуля амплитуды соответствующего процесса в партонной модели.

Следует отметить, что большинство приведенных в настоящей работе аналитических выражений для квадратов модулей амплитуд процессов рождения с участием реджезованных глюонов и кварков получены и опубликованы впервые

Третья, четвертая и пятая главы содержат результаты численных расчетов, использующих аналитические формулы, представленные во второй главе. Все полученные численные результаты сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.

*Третья глава. Инклюзивное и ассоциативное рождение тяжелых кварков.* В третьей главе в рамках гипотезы реджезации кварков подхода КМПК мы изучаем рождение струй тяжелых кварков на коллайдере Tevatron.

В первом параграфе мы изучаем инклюзивное рождение  $b$ -кварковой струи в протон-антипротонных взаимодействиях в рамках подхода КМПК. Был проведен расчет спектров по поперечному импульсу  $b$ -кварковых струй и сравнение их с предварительными результатами Коллаборации CDF, полученными на коллайдере Tevatron. Показано, что в рамках гипотезы реджеза-

ции кварков учет основного вклада в лидирующем порядке по  $\alpha_s$ , вносимого подпроцессом  $Q_b + \mathcal{R} \rightarrow b$ , позволяет хорошо описать экспериментальные данные на всем интервале поперечных импульсов  $b$ -кварковой струи. Также продемонстрировано, что в центральной области по быстроте рождение пары  $b\bar{b}$ -кварковых струй в подпроцессе слияния реджезованных глюонов  $\mathcal{R} + \mathcal{R} \rightarrow b + \bar{b}$  происходит значительно реже, чем вышеупомянутое одиночное.

Во втором параграфе исследуется ассоциативное рождение  $b\bar{b}$ -кварковых пар, для которого в лидирующем порядке по  $\alpha_s$  подхода КМРК мы имеем 2 подпроцесса: слияния реджезованных глюонов  $\mathcal{R} + \mathcal{R} \rightarrow b + \bar{b}$  и аннигиляции реджезованных кварка и антикварка  $Q_q + \bar{Q}_q \rightarrow b + \bar{b}$ , где  $q = u, d, s, c$ . Рассчитаны спектры по поперечной энергии  $b$ -кварков, инвариантной массе  $b\bar{b}$ -пары и азимутальному углу между  $b$ - и  $\bar{b}$ -струями, после чего проведено сравнение теоретических расчетов с предварительными экспериментальными данными Коллаборации CDF, в результате которого получено хорошее согласие.

В третьем параграфе рассматривается ассоциативное адророждение  $b$ - и  $c$ -кварковых струй совместно с прямыми фотонами на коллайдере Tevatron. Мы изучаем как прямое рождение фотонов в подпроцессе  $Q_{b(c)} + \mathcal{R} \rightarrow b(c) + \gamma$ , так и фрагментационное, в котором конечный фотон рождается в результате фрагментации кварка. Мы сравниваем результаты наших расчетов с экспериментальными данными Коллаборации D0 по  $k_{\gamma T}$ -спектрам ассоциативного рождения  $b(c)\gamma$ -пар. Для  $b\gamma$ -пар получена высокая степень согласия теоретических кривых с экспериментальными, а для  $c\gamma$ -пар — удовлетворительная. Установлено, что для обоих видов пар вклад прямого рождения фотонов доминирует для всех значений поперечного импульса фотона и практически обеспечивает суммарный результат от всех вкладов. Мы также приводим предсказания, выполненные в подходе КМРК для спектров по инвариантной массе  $b(c)\gamma$ -струй и по азимутальному углу между струями при энергиях коллайдера Tevatron.

*Четвертая глава. Инклюзивное рождение  $D$ -мезонов.* В четвертой главе в рамках гипотезы реджезации кварков рассмотрено фрагментационное фоторождение и адророждение  $D$ -мезонов в лидирующем порядке по константе  $\alpha_s$  подхода КМРК.

В первом параграфе были рассчитаны  $p_T$ -спектры фрагментационного

адророждения  $D^0$ -,  $D^\pm$ -,  $D^{*\pm}$ -, и  $D_s^\pm$ -мезонов на коллайдере Tevatron и проведено их сравнение с экспериментальными данными Коллаборации CDF, которое показывает хорошее согласие. Однако, теоретическое предсказание имеет тенденцию к превышению экспериментальных данных при больших  $p_T$  и к недооценке — при малых. Проведение расчетов в более высоких порядках по  $\alpha_s$  подхода КМПК предоставляет возможность для устранения этих расхождений.

*Во втором параграфе* для случая фоторождения  $D^{*\pm}$ - и  $D_s^\pm$ -мезонов в  $ep$ -взаимодействиях на коллайдере HERA рассчитаны  $p_T$ -спектры с учетом процессов как прямого рождения  $D$ -мезонов, так и с участием кварк-глюонной компоненты фотона. Мы показываем, что в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 4$  ГэВ) доминирует вклад прямого фоторождения, в то время как вклад, обусловленный взаимодействием фотона через свою кварк-глюонную компоненту, характерен для малых  $p_T$ . Полученные результаты обнаруживают высокую степень согласия с экспериментальными данными Коллаборации ZEUS на всем интервале поперечных импульсов  $D$ -мезонов.

Таким образом, в данной главе единым образом выполнено теоретическое описание экспериментальных данных по адророждению  $D$ -мезонов на коллайдере Tevatron и фоторождению  $D$ -мезонов на коллайдере HERA, хорошо согласующееся с экспериментальными данными.

*Пятая глава. Относительная роль фрагментации и слияния в фоторождении  $J/\psi$ -мезонов.* В данной главе исследованы экспериментальные данные Коллабораций ZEUS и H1 на коллайдере HERA по рождению  $J/\psi$ -мезонов.

*В первом параграфе* рассчитана КХД-эволюция функций фрагментации  $c$ -кварков и глюонов в  $c\bar{c}$ -кварконии, подчиняющаяся системе уравнений эволюции ДГЛАП с учетом недиагональных переходов между  $c$ -кварками и глюонами. Данные функции были использованы для нахождения спектров рождения  $J/\psi$ -мезонов.

*Во втором и третьем параграфе* в подходе КМПК в рамках механизма слияния в модели цветового синглета получено хорошее согласие с экспериментальными данными с коллайдера HERA для всех имеющихся значений поперечного импульса  $J/\psi$ -мезонов. В КПИМ учтен вклад октетных по

цвету промежуточных состояний  $c\bar{c}$ -пары, что позволило также описать экспериментальные данные с коллайдера HERA в рамках механизма слияния и получить увеличение вклада механизма фрагментации. В работе предсказывается, что при рождении  $J/\psi$ -мезонов механизм слияния доминирует над механизмом фрагментации для значений поперечного импульса вплоть до  $p_T = 20$  ГэВ в подходе КМРК, в то время как в коллинеарной партонной модели вклад механизма фрагментации начинает превышать вклад механизма слияния при значительно более высоком значении  $p_T = 40$  ГэВ.

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

## ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Saleev V.A., Shipilova A.V. Relative contributions of fusion and fragmentation mechanisms in  $J/\psi$  photoproduction at high energy // Phys. Rev. D. – 2007. – V. 75. – P. 034012-1 – 034012-7.
2. Салеев В. А., Шипилова А. В. Фрагментационное фоторождение  $J/\psi$  мезонов в подходе квази-мульти-реджевской кинематики // Вестник Самарского государственного университета. – 2007. – No 6. – Т. 56. – С. 354–369.
3. Салеев В. А., Шипилова А. В. Глубоконеупругое рассеяние электронов на протонах и гипотеза реджезации кварков // Вестник Самарского государственного университета. – 2008. – No 8/1(67). – С. 598–610.
4. Kniehl B. A., Saleev V. A., Shipilova A. V. Open charm production at high energy within the framework of the quark Reggeization hypothesis // Phys. Rev. D. – 2009. – V. 79. – P. 034007-1 – 024007-7.
5. Kniehl B. A., Saleev V. A., Shipilova A. V. Inclusive  $b$  and  $b\bar{b}$  production with quasi-multi-Regge kinematics at the Tevatron // Phys. Rev. D. 2010. – V. 81. – P. 094010-1–094010-13.
6. Шипилова А. В. Рождение  $b$ -кварковых струй на коллайдере Tevatron в квази-мульти-реджевской кинематике // Труды методологической школы-конференции «Математическая физика и нанотехнологии», Самара, 2010, С. 120–124.
7. Saleev V.A., Shipilova A.V. D meson production at Tevatron and HERA in QMRK // Тезисы конференции «Hadron structure and QCD: from low to high energies», Гатчина, Санкт-Петербург, ПИЯФ, 2008. P. 177–181.
8. Saleev V. A., Shipilova A. V. Quasi-Multi-Regge-Kinematics Approach, Quark Reggeization and Applications // Труды Международной конференции по структуре и взаимодействиям фотона Photon09, DESY, 2009, С. 241–246.

9. Салеев В.А., Шипилова А.В. Ассоциативное рождение кварков в квази-мультимедийной кинематике на коллайдерах высоких энергий // Тезисы Второй международной конференции «Математическая физика и ее приложения», Самара, изд-во «Книга», 2010.
10. Шипилова А. Длиннодействующие спиновые силы и свойства тяжелых кваркониев // Тезисы XXXVII научной конференции студентов, Самара, СамГУ, 2007, С. 53.
11. Шипилова А. Фрагментационное рождение связанных состояний тяжелых кварков при высоких энергиях // Тезисы XXXVIII научной конференции студентов, Самара, СамГУ, 2007, С. 32.
12. Saleev V.A., Shipilova A.V., Yatsenko E. V. Inclusive jet production at Tevatron in the Regge limit of QCD // arXiv:1011.3131v1 [hep-ph].
13. Saleev V.A., Shipilova A.V. Inclusive and Associated b-jet Production at the Tevatron in the Regge Limit of QCD // arXiv:1011.4590v1 [hep-ph].
14. Салеев В. А., Шипилова А. В. Рождение  $b$ -кварков на коллайдере Tevatron в реджевском пределе квантовой хромодинамики // ЯФ. – 2011. – Т.74. – №1. – С.151–157. Принята в печать.