

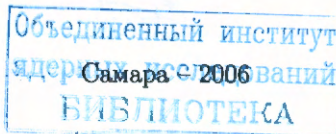
B-195

Васин Дмитрий Валериевич

РОЖДЕНИЕ СВЯЗАННЫХ СОСТОЯНИЙ ТЯЖЕЛЫХ КВАРКОВ  
В ПОДХОДЕ  $K_T$ -ФАКТОРИЗАЦИИ

01.04.16

Физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наукВас

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,  
Теряев Олег Валерьянович

доктор физико-математических наук,  
Леонидов Андрей Владимирович

**Ведущая организация**

Санкт-Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится "24" мая 2006 г. в 15<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета К 720.001.01 при Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан "17" августа 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Федотов Сергей Иванович

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Диссертация посвящена исследованию процессов рождения связанных состояний тяжелых кварков в подходе  $k_T$ -факторизации и нерелятивистской квантовой хромодинамике (НРКХД). В рамках механизмов слияния и фрагментации изучаются процессы адронного рождения тяжелых кваркониев ( $c\bar{c}$  и  $b\bar{b}$ ) и  $B_c$ -мезонов, глубоконеупругого рождения и фоторождения чармониев и  $D^*$ -мезонов, а также процессы рождения чармониев двумя фотонами.

В основе диссертации лежат результаты работ, выполненных автором в период с 2002 по 2005 годы в Самарском государственном университете, а также во время стажировки во II-м Институте теоретической физики Гамбургского университета, г.Гамбург, Германия.

*Актуальность темы.* Исследуемые в диссертации процессы рождения тяжелых кваркониев при высоких энергиях в  $p\bar{p}$ -взаимодействиях на коллайдере Tevatron, тяжелых мезонов и тяжелых кваркониев в  $e\bar{p}$ -взаимодействиях на коллайдере HERA и тяжелых кваркониев в  $\gamma\gamma$ -взаимодействиях на коллайдере LEP2 представляют значительный интерес для проверки реджевского предела квантовой хромодинамики (КХД) и КХД-мотивированных моделей, описывающих процессы адронизации тяжелых кварков. Теоретической основой моделей, претендующих на описание существующих экспериментальных данных по  $p_T$ -спектрам тяжелых мезонов и кваркониев на коллайдерах Tevatron, HERA и LEP2, является гипотеза факторизации эффектов физики больших и малых расстояний в процессах рождения тяжелых кварков при высоких энергиях.

Хорошо известно, что в процессах рождения тяжелых кваркониев в столкновениях протонов и электронов при высоких энергиях доминирующую роль играет глюон-глюонное и фотон-глюонное слияние. Взаимодействие в начальном состоянии в случае рассматриваемых процессов описывается в рамках моделей, основанных на теории возмущений КХД. В коллинеарной партонной модели динамика глюонов в начальном состоянии описывается уравнением Докшицера-Грибова-Липатова-Алтарелли-Паризи (ДГЛАП), при этом предполагается, что  $S > \mu^2 \gg \Lambda_{QCD}^2$ , где  $\sqrt{S}$  — полная энергия сталкивающихся протонов, а  $\mu$  — характерный масштаб жесткого процесса. При этом, в уравнении эволюции ДГЛАП в лидирующем логарифмическом приближении (ЛЛП) учтен лишь вклад больших логарифмов типа  $\log(\mu/\Lambda_{QCD})$ ,

и используется коллинеарное приближение, при котором поперечный импульс начальных глюонов отсутствует.

При высоких энергиях, в так называемом реджевском ( $S \gg |t| \sim \mu^2$ ) пределе, начинают доминировать процессы с обменом глюоном в  $t$ -канале, поэтому в рамках ЛЛП необходимо учитывать вклады больших логарифмов нового типа  $\log(\sqrt{S}/\mu)$ , что приводит к неколлинеарной динамике глюонов, которая описывается уравнением эволюции Балицкого-Фадина-Кураева-Липатова (БФКЛ). При этом необходимо учитывать поперечный импульс и виртуальность взаимодействующих  $t$ -канальных глюонов. Учет этих эффектов может быть выполнен в подходе  $k_T$ -факторизации или в рамках подхода квази-мульти-реджевской кинематики (КМРК), который основан на эффективной квантово-полевой теории с неабелевым калибровочным взаимодействием, являющейся высокоэнергетическим пределом КХД, предложенной Липатовым Л.Н. в 1995 году.

В последнее десятилетие для описания процессов распада и рождения тяжелых кваркониев был развит формализм, основанный на НРКХД, который позволяет представить сечение рождения кваркония в партонном подпроцессе как сумму членов, в которых факторизуются жесткие амплитуды рождения тяжелых кварков и непертурбативные матричные элементы, описывающие переход системы  $(Q\bar{Q})$  в конечный кварконий. НРКХД является пертурбативной теорией с двумя малыми параметрами:  $\alpha_s$  — константой сильного взаимодействия на масштабе массы тяжелого кварка и  $v$  — относительной скоростью тяжелых кварков в кварконии.

Одной из центральных проблем в физике высоких энергий является определение относительной роли механизмов слияния и фрагментации при адронизации кварков и глюонов. Механизмы слияния и фрагментации основаны на различных предположениях о способе обесцвечивания кварковой или глюонной струи, что напрямую связано с проблемой соотношения синглетного и октетного механизма образования тяжелых кваркониев.

Прогресс в экспериментальном изучении процессов рождения связанных состояний тяжелых кварков, связанный с вводом в строй коллайдеров нового поколения LHC и TESLA, несомненно должен улучшить теоретическое понимание процессов взаимодействий кварков и глюонов при высоких энергиях, а также правильность КХД в промежуточной области, где важны пертурбативные и непертурбативные эффекты.

*Научная новизна и практическая ценность работы.* Для партонных подпроцессов с участием  $t$ -канальных глюонов в подходе  $k_T$ -факторизации в низшем порядке теории возмущений по  $\alpha_s$  вычислены квадраты модулей амплитуд рождения тяжелых кварков, кваркониев и  $B_c$ -мезонов, и представлены их аналитические выражения. Также показано, что полученные нами аналитические выражения для квадратов модулей амплитуд рассмотренных процессов в подходе  $k_T$ -факторизации совпадают с полученными в рамках КМРК. Эти выражения могут быть использованы в генераторах Монте-Карло, которые получили широкое распространение для моделирования реальных экспериментов на ускорителях высоких энергий. Для трех неинтегрированных функций распределения глюонов в протоне получены наборы октетных по цвету непертурбативных матричных элементов НРКХД для  $S$ - и  $P$ -волновых состояний чармониев и боттомониев. Единым образом описаны экспериментальные данные по адронному рождению, глубоконеупругому и фоторождению тяжелых кваркониев. Сделаны предсказания на выход  $B_c$ -мезонов на коллайдерах Tevatron и LHC.

*Достоверность полученных результатов* обеспечивается использованием точных аналитических выражений для квадратов модулей амплитуд процессов рождения, использованием неоднократно апробированных методов, идентичностью результатов, полученных в разных подходах, и соответствием результатов полученным ранее в коллинеарной партонной модели.

*На защиту выносятся следующие основные результаты:*

1. В рамках нерелятивистской квантовой хромодинамики в низшем порядке по  $\alpha_s$  и  $v$  рассмотрено адронное рождение  $S$ - и  $P$ -волновых тяжелых кваркониев ( $c\bar{c}$ ,  $b\bar{b}$ ) при высоких энергиях в подходе  $k_T$ -факторизации. Произведено фитирование  $p_T$ -спектров различных  $S$ - и  $P$ -волновых состояний тяжелых кваркониев при энергиях коллайдера Tevatron (run I и run II), и получены наборы октетных непертурбативных матричных элементов для трех различных неколлинеарных функций распределения глюонов в протоне. Показано, что только неколлинеарная функция распределения Кимбера-Мартина-Рыскина (KMR) удовлетворительно описывает всю совокупность экспериментальных данных по рождению тя-

желых кваркониев.

2. Проведен сравнительный анализ предсказаний коллинеарной партонной модели и подхода  $k_T$ -факторизации в случае электророждения  $D^*$ -мезонов на  $ep$ -коллайдере HERA. Показано, что, в отличие от предсказаний коллинеарной партонной модели, подход  $k_T$ -факторизации, благодаря эффективному учету поправок следующего порядка по константе сильного взаимодействия  $\alpha_s$  в неколлинеарных функциях распределения, увеличивает абсолютную величину сечений электророждения очарованных мезонов примерно в 1.5–2 раза, что улучшает согласие с экспериментом за исключением спектра по псевдобыстроте, где форма спектра существенно отличается от экспериментальной и сильно зависит от выбора неколлинеарной функции распределения глюонов в протоне.
3. Рассчитан выход  $S$ -волновых состояний кваркония ( $c\bar{c}$ ) на коллайдере Tevatron в модели фрагментации и подходе  $k_T$ -факторизации. Показано, что вклад от фрагментации глюонов превосходит вклад от фрагментации  $s$ -кварков. Экспериментальные данные коллаборации CDF согласуются с предположением о доминирующей роли фрагментации глюонов в  $J/\psi$ - и  $\psi'$ -мезон через октетное состояние  $Q\bar{Q}[^3S_1^{(8)}]$  с примерно одинаковым значением непертурбативного матричного элемента в партонной модели и подходе  $k_T$ -факторизации.
4. В подходе  $k_T$ -факторизации рассчитаны спектры  $B_c$ -мезонов при энергиях коллайдеров Tevatron и ЛНС в моделях фрагментации и слияния. Расчеты в модели слияния выполнены в рамках гипотезы о возбуждении очарования в протоне. Показано, что в подходе  $k_T$ -факторизации фрагментационный механизм начинает доминировать над механизмом слияния уже при  $|p_T| > 20$  ГэВ. Это связано с тем, что в подходе  $k_T$ -факторизации распределение по  $p_T$  конечных  $B_c$ -мезонов в значительной мере обусловлено распределением начальных глюонов по поперечному импульсу, что, естественно, приводит к росту сечений рождения при больших  $p_T$ .

*Апробация результатов.* Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных форумах: конференции Института теоретической и экспериментальной физики

"Физика фундаментальных взаимодействий" (Москва, 2002 и 2005); международной школе-семинаре "Тяжелые кварки" (Дубна, 2002 и 2005); международной конференции "Глубокоупругое рассеяние" (Санкт-Петербург, 2003); международной конференции "Квантовая теория поля и физика высоких энергий" (Самара-Саратов, 2003 и Санкт-Петербург, 2004); конференции "Мы - будущее Российской науки" (Москва, 2004); конференции "Проблема связанных состояний в квантовой теории поля" (Самара, 2004); международной конференции "Структура адронов и квантовая хромодинамика" (Санкт-Петербург, 2004 и 2005); рабочем семинаре II-го Института теоретической физики (Гамбург, 2004); конференции Института Густава Штрессмана (Бонн, 2005); конференции "Концепции симметрии и фундаментальных полей в квантовой физике 21 века" (Самара, 2005); XI международной конференции "Физика спина при высоких энергиях" (Дубна, 2005); конференции "Проблемы фундаментальной физики XXI века" (Самара, 2005); 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 — 4; в сборниках трудов международных симпозиумов и конференций — 3; в других изданиях — 1. Список работ приведен в конце реферата.

*Структура и объем диссертации.* Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии из 106 наименований. Она содержит 4 таблицы и 52 рисунка. Общий объем диссертации составляет 139 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 этой главе дан краткий обзор основным существующим теоретическим моделям, которые используются

для описания процессов рождения тяжелых кварков и кваркониев при высоких энергиях, это подход  $k_T$ -факторизации, НРКХД и модель фрагментации.

*Первый параграф* посвящен подходу  $k_T$ -факторизации. В подходе  $k_T$ -факторизации, или факторизации в реджевском пределе, рассматриваются процессы с участием  $t$ -канальных глюонов. Для вычисления матричных элементов процессов с виртуальным  $t$ -канальным глюоном в низшем порядке по  $\alpha_s$  используются эффективные правила Фейнмана со специальным образом выбранным вектором поляризации начального глюона:

$$\varepsilon^\mu(k_T) = \frac{k_T^\mu}{|k_T|}, \quad (1)$$

где  $k = xP + k_T$  — 4-импульс начального глюона,  $P = \frac{\sqrt{S}}{2}(1, 0, 0, \pm 1)$  — 4-импульс начального протона,  $x$  — доля импульса протона, уносимая глюоном,  $k_T = (0, \mathbf{k}_T, 0)$ ,  $k_T^2 = -|\mathbf{k}_T|^2$ .

В подходе  $k_T$ -факторизации адронное сечение рождения кваркония  $\mathcal{H}$  в процессе  $p + p \rightarrow \mathcal{H} + X$  связано с сечением рождения в подпроцессе с участием  $t$ -канальных глюонов  $R + R \rightarrow \mathcal{H} + X$  следующим образом

$$d\sigma(p + p \rightarrow \mathcal{H} + X, S) = \int \frac{dx_1}{x_1} \int d|\mathbf{k}_{1T}|^2 \int \frac{d\varphi_1}{2\pi} \Phi(x_1, |\mathbf{k}_{1T}|^2, \mu^2) \int \frac{dx_2}{x_2} \times \\ \times \int d|\mathbf{k}_{2T}|^2 \int \frac{d\varphi_2}{2\pi} \Phi(x_2, |\mathbf{k}_{2T}|^2, \mu^2) d\hat{\sigma}(R + R \rightarrow \mathcal{H} + X, \mathbf{k}_{1T}, \mathbf{k}_{2T}, \hat{s}), \quad (2)$$

где  $\hat{s} = x_1 x_2 S - (\mathbf{k}_{1T} + \mathbf{k}_{2T})^2$ ,  $\varphi_{1,2}$  — азимутальные углы в плоскости  $XOY$  между векторами  $\mathbf{k}_{1T}$  ( $\mathbf{k}_{2T}$ ) и фиксированной осью  $OX$  ( $\mathbf{p}_T \in XOZ$ ),  $\mathbf{p}_T$  — поперечный импульс конечного кваркония,  $\Phi(x, |\mathbf{k}_T|^2, \mu^2)$  — неколлинеарная (неинтегрированная) функция распределения глюонов в протоне,  $x_{1,2}$  — доля импульса протона, уносимая глюоном,  $\mu \sim M_T = \sqrt{M^2 + |\mathbf{p}_T|^2}$  — характерный масштаб жесткого процесса.

Предполагается следующее соотношение между коллинеарной и неколлинеарной функциями распределения глюонов:

$$xG(x, \mu^2) \simeq \int d|\mathbf{k}_T|^2 \Phi(x, |\mathbf{k}_T|^2, \mu^2), \quad (3)$$

и, так как при  $\mathbf{k}_{1T} = \mathbf{k}_{2T} = 0$  квадраты модулей амплитуд процессов рождения в подходе  $k_T$ -факторизации переходят в обычные результаты для янг-миллсовских глюонов в начальном состоянии, то сечение рождения в подходе  $k_T$ -факторизации (2) приближенно нормировано на соответствующее сечение рождения в коллинеарной партонной модели.

Известно, что рассмотрение процессов следующего за низшим порядком теории возмущений по  $\alpha_s$  в подходе  $k_T$ -факторизации сталкивается с серьезными трудностями, которые в принципе могут быть решены в рамках подхода КМРК, который основан на эффективной квантово-полевой теории с неабелевым калибровочным взаимодействием, являющейся высокоэнергетическим пределом КХД, и в которой начальные  $t$ -канальные глюоны рассматриваются как реджезованные глюоны, которые взаимодействуют с кварками и обычными янг-миллсовскими глюонами особым образом.

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

$$d\hat{\sigma}(\mathcal{H}) = \sum_n d\hat{\sigma}(Q\bar{Q}[n]) \langle \mathcal{O}^{\mathcal{H}}[n] \rangle. \quad (4)$$

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  $\mathcal{H}$  описывается матричным элементом  $\langle \mathcal{O}^{\mathcal{H}}[n] \rangle$ , который может быть рассчитан в рамках непертурбативных методов КХД или извлечен из экспериментальных данных.

В НРКХД волновая функция конечного кваркония представляется в виде ряда по  $v$  — относительной скорости тяжелых кварков в кварконии. В модели цветовых синглетов (МЦС) учитывается только первое слагаемое  $\sim v^0$ . В этом случае непертурбативный матричный элемент, например для  $S$ -состояния,  $\langle \mathcal{O}^{\mathcal{H}}[{}^3S_1^{(1)}] \rangle$  напрямую связан с квадратом модуля волновой функции кваркония в нуле  $|\Psi_{\mathcal{H}}(0)|^2$ , который может быть рассчитан в рамках потенциальной кварковой модели или извлечен из экспериментальных данных по ширинам лептонных или фотонных распадов кваркония.

В третьем параграфе обсуждается механизм фрагментации. Анализ процессов рождения тяжелых мезонов и тяжелых кваркониев в рамках коллинеарной партонной модели показывает, что в области  $p_T^2 \gg m_{\mathcal{H}}^2$  в глюон-глюонном рождении 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 кваркония  $\mathcal{H}$  может быть представлено в виде

$$d\sigma(p + p \rightarrow \mathcal{H} + X) = \sum_i \int dz D_{i \rightarrow \mathcal{H}}(z) d\hat{\sigma}(p + p \rightarrow i), \quad (5)$$

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

Функции фрагментации на масштабе  $\mu^2 = m_{\mathcal{H}}^2$  могут быть получены в рамках НРКХД или путем фитирования экспериментальных данных. Например, в наших расчетах фрагментационного рождения  $D^*$ -мезонов используется феноменологическая функция фрагментации Петерсона. В то же время для расчетов фрагментационного рождения чармониев и  $B_c$ -мезонов используются функции фрагментации, полученные в рамках НРКХД и представленные простыми аналитическими формулами.

При расчетах необходимо учитывать эволюцию функции фрагментации, которая в первом приближении описывается уравнениями эволюции ДГЛАП, например для функции фрагментации партона  $i$  в тяжелый мезон или кварконий  $\mathcal{H}$  можно записать:

$$\mu^2 \frac{\partial D_{i \rightarrow \mathcal{H}}(z, \mu^2)}{\partial \mu^2} = \frac{\alpha_s(\mu^2)}{2\pi} \sum_j \int_z^1 \frac{dx}{x} P_{i \rightarrow j}\left(\frac{x}{z}\right) D_{j \rightarrow \mathcal{H}}(x, \mu^2), \quad (6)$$

где  $P_{i \rightarrow j}(z)$  — стандартная функция расщепления в низшем порядке по  $\alpha_s$ .

*Вторая глава. Элементарные процессы взаимодействия с участием  $t$ -канальных глюонов.* Эта глава посвящена выводу аналитических выражений для квадратов модулей амплитуд процессов рождения с участием  $t$ -канальных или реджезованных глюонов в начальном состоянии. Все процессы рассматриваются в низшем порядке по  $\alpha_s$  и  $v$ . Отдельно рассмотрены процессы рождения тяжелых кварков и глюонов, процессы рождения различных состояний тяжелых кваркониев, и процесс рождения  $B_c$ -мезонов.

Для всех квадратов модулей амплитуд процессов рождения с участием  $t$ -канальных глюонов проверено совпадение коллинеарного предела и квадрата модуля амплитуды соответствующего процесса в партонной модели. Показано, что квадраты модулей амплитуд рассматриваемых партонных процессов в подходе  $k_T$ -факторизации с точностью до нормировочного коэффициента совпадают с квадратами модулей амплитуд в КМРК.

Следует отметить, что почти все приведенные в настоящей работе аналитические выражения для квадратов модулей амплитуд процессов рождения с участием  $t$ -канальных глюонов получены и опубликованы впервые.

*Третья глава. Рождение тяжелых кваркониев в подходе  $k_T$ -факторизации.* Данная глава содержит результаты численных расчетов по аналитическим формулам из второй главы. Все полученные численные результаты сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.

*В первом параграфе* исследованы экспериментальные данные Коллаборации CDF на коллайдере Tevatron по рождению тяжелых кваркониев. Рассчитаны спектры по поперечному импульсу и быстрой для  $S$ - и  $P$ -волновых состояний чармония и боттомония. Для чармониев и боттомониев произведено фитирование экспериментальных данных Коллаборации CDF с целью получения неизвестных октетных непертурбативных матричных элементов, которые будут использованы для расчетов в других процессах. Проведено сравнение с экспериментальными данными коллайдера Tevatron при энергии  $\sqrt{S} = 1.96$  ТэВ, включающими область малых поперечных импульсов тяжелых кваркониев  $p_T < 5$  ГэВ, в которой наблюдается существенное противоречие между предсказаниями коллинеарной партонной модели и экспериментальными данными. Напротив, в подходе  $k_T$ -факторизации, где более адекватно учитывается глюонная динамика в неинтегрированных функциях распределения глюонов, область малых  $p_T$  хорошо описывается. Анализ полученных в результате фита экспериментальных данных, октетных непертурбативных матричных элементов НРКХД для рассмотренных неколлинеарных функций распределения глюонов в протоне показывает, что: во-первых, функции распределения JB и JS не позволяют с удовлетворительной достоверностью фитировать полный набор экспериментальных данных, напротив, функция распределения KMR позволяет непротиворечиво фитировать  $p_T$ -спектры чармониев и боттомониев; во-вторых, непертурбативные переходы из промежуточного октетного состояния в конечное синглетное приблизительно удовлетворяют условию:  $\Delta L \simeq 0$  и  $\Delta S \simeq 0$ , т.е. являются дваждыхромозетрическими и сохраняют спин и орбитальный момент тяжелых кварков, как это и предсказывается принципами спиновой симметрии процессов с участием тяжелых кварков.

*Во втором параграфе* рассмотрены экспериментальные данные по фоторождению и глубоконеупругому рождению чармониев Коллаборации H1 и ZEUS для коллайдера HERA. Рассчитаны спектры по  $p_T^2$  и  $z$  для процесса фоторождения  $J/\psi$ -мезонов на коллайдере HERA. Показано, что в подходе

$k_T$ -факторизации экспериментальные данные по фоторождению  $J/\psi$ -мезонов на коллайдере HERA могут быть описаны в рамках МЦС, а вклад октетных промежуточных состояний сильно подавлен. При описании  $z$ -спектра фоторождения  $J/\psi$ -мезонов в области малых  $z < 0.2$  доминирует вклад неинтегрированной функции распределения глюонов в фотоне. Также рассчитан  $p_T^2$ -спектр прямого рождения  $J/\psi$ -мезонов в процессе глубоконеупругого рассеяния и произведено сравнение с экспериментальными данными Коллаборации H1. Показано, что синглетный механизм хорошо описывает экспериментальные данные, а вклад октетного механизма в прямое электророждение  $J/\psi$ -мезонов и вклад от распадов  $\chi_{cJ}$ -мезонов пренебрежимо малы. Эти результаты согласуются с полученными ранее в МЦС.

Для процессов  $\gamma\gamma$ -взаимодействия на коллайдере LEP2 были рассчитаны  $p_T$ -спектры  $S$ - и  $P$ -волновых состояний чармония, и показано, что доминирующим процессом является процесс, в котором учтен вклад неколлинеарной глюонной структурной функции одного из фотонов. Однако расхождение между экспериментальными данными и теоретическими предсказаниями составляет фактор 2–3, что в значительной степени связано с большой неопределенностью при вычислении неколлинеарной глюонной функции распределения в фотоне.

В третьем параграфе для коллайдеров Tevatron и LHC были сделаны предсказания на сечение рождения  $B_c$ -мезонов, и рассчитаны их  $p_T$ -спектры. Произведен анализ неопределенностей подхода, связанных с выбором массовых и других параметров, а также связанных с выбором неколлинеарной функции распределения глюонов в протоне. Расчеты в модели слияния выполнены в рамках гипотезы о возбуждении очарования в протоне. Показано, что результаты расчета в модели возбуждения очарования в протоне и коллинеарной партонной модели, хорошо согласуются с результатами, полученными ранее для глюон-глюонного слияния. Это позволяет предположить, что и результаты, полученные в подходе  $k_T$ -факторизации и модели возбуждения очарования, воспроизводят результаты расчета подпроцесса слияния двух  $t$ -канальных глюонов.

Таким образом, в данной главе единым образом выполнено теоретическое описание экспериментальных данных по адророждению чармониев, боттомониев и  $B_c$ -мезонов на коллайдере Tevatron, электро- и фоторождению чармониев на коллайдере HERA, хорошо согласующееся с эксперименталь-

ными данными, за исключением случая процессов рождения чармониев двумя фотонами, где требуется дополнительный фактор 2–3.

*Четвертая глава. Фрагментационное рождение тяжелых мезонов и кваркониев в подходе  $k_T$ -факторизации.*

В последней главе исследован фрагментационный механизм рождения  $B_c$ -мезонов,  $J/\psi$ -мезонов и  $D^*$ -мезонов, показана область его применения.

Рассчитаны  $p_T$ -спектры прямых  $J/\psi$ - и  $\psi'$ -мезонов в  $p\bar{p}$ -взаимодействиях при энергии  $\sqrt{S} = 1.8$  ТэВ коллайдера Tevatron. Показано, что вклад от фрагментации глюонов превосходит вклад от фрагментации  $s$ -кварков, как в партонной модели, так и подходе  $k_T$ -факторизации. Экспериментальные данные коллаборации CDF согласуются с предположением о доминирующей роли фрагментации глюонов в  $J/\psi$ - и  $\psi'$ -мезон через октетное состояние  $[^3S_1^{(8)}]$  с примерно одинаковым значением непертурбативного матричного элемента  $\langle O^{J/\psi, \psi'} [^3S_1^{(8)}] \rangle$  в партонной модели и подходе  $k_T$ -факторизации.

Для коллайдера HERA были рассмотрены как область фоторождения, так и область глубоконеупругого рождения или электророждения. В случае фоторождения рассчитаны  $p_T$ - и  $\eta$ -спектры рождения  $D^*$ -мезонов. В случае электророждения рассчитаны  $p_T$ -,  $\eta$ - и  $W$ -спектры, а также распределения по  $x_{Bj}$  и  $Q^2$  для  $D^*$ -мезонов.

В подходе  $k_T$ -факторизации рассчитаны спектры  $B_c$ -мезонов при энергиях коллайдеров Tevatron и LHC в модели фрагментации. Численный анализ показывает, что учет в данном случае КХД-эволюции функции фрагментации только незначительно (меньше 5%) меняет величину  $p_T$ -спектра  $B_c$ -мезонов в рассматриваемой области, и для упрощения численных расчетов можно пользоваться скейлинговой параметризацией функции фрагментации. Показано, что в подходе  $k_T$ -факторизации фрагментационный механизм начинает доминировать над механизмом слияния уже при  $|p_T| > 20$  ГэВ. Это связано с тем, что в подходе  $k_T$ -факторизации распределение по  $p_T$  конечных  $B_c$ -мезонов в значительной мере обусловлено распределением начальных глюонов по поперечному импульсу, что, естественно, приводит к росту сечений рождения при больших  $p_T$ .

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

## ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Saleev V.A., Vasin D.V. On charmonia and charmed mesons photoproduction at high energy // Phys. Lett., 2002. V. B548. P. 161–174.
2. Saleev V.A., Vasin D.V. Direct  $J/\psi$  and  $\psi'$  hadroproduction via fragmentation in the collinear parton model and  $k_T$ -factorization approach // Phys. Rev., 2003. V. D68. P. 114013-1–114013-6.
3. Saleev V.A., Vasin D.V. Charm content of a proton in collinear parton model and in  $k_T$ -factorization approach // In Proceedings of XI International Workshop "Deep Inelastic Scattering", 2003. P. 732–736.
4. Saleev V.A., Vasin D.V. Charm content of a proton in collinear parton model and in  $k_T$ -factorization approach // Вестник Самарского государственного университета, 2003. Т. С.В.И. С.112–117.
5. Saleev V.A., Vasin D.V.  $J/\psi$  and  $D$ -meson photoproduction at HERA // Lecture Notes in Physics, 2004. V. 647. P. 401–417.
6. Saleev V.A., Vasin D.V. On the direct  $J/\psi$ -meson hadroproduction at high energies // In Proceedings of First International Workshop "Hadron Structure and QCD: from Low to High Energies", 2004. P. 73–78.
7. Салеев В.А., Васин Д.В. Фрагментационное рождение  $B_c$ -мезонов в подходе  $k_T$ -факторизации // Теоретическая Физика, 2004. Т. 5. С. 46–53.
8. Салеев В.А., Васин Д.В. Адронное рождение прямых  $J/\psi$ - и  $\psi'$ -мезонов в процессах фрагментации глюонов и  $c$ -кварков при высоких энергиях // ЯФ, 2005. Т. 68. No 1. С. 95–106.
9. Салеев В.А., Васин Д.В. Электророждение  $D^*$ -мезонов при высоких энергиях // ЯФ, 2005. Т. 68. No 9. С. 1647–1658.
10. Saleev V.A., Vasin D.V. Production of  $B_c$ -mesons via fragmentation in the  $k_T$ -factorization approach // Phys. Lett., 2005. V. B605. P. 311–318.

11. Vasin D.V. Fragmentation production of heavy mesons at high energies in the collinear parton model and in the  $k_T$ -factorization approach // Сборник материалов научного семинара стипендиатов Программы "Михаил Ломоносов", 2005. С. 126–127.
12. Салеев В.А., Васин Д.В. Адронное рождение тяжелых кваркониев в подходе квази-мульти-реджевской кинематики // Вестник Самарского государственного университета, 2005. No 6. Т. 40. С.101–127.
13. Лиходед А.К., Салеев В.А., Васин Д.В. Адронное рождение  $B_c$ -мезонов с большими поперечными импульсами в подходе  $k_T$ -факторизации // ЯФ, 2006. Т. 69. No 1. С. 98–106.

Подписано в печать 31 марта 2006г.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.

Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 438

443011, г. Самара, ул. Академика Павлова, 1.

Отпечатано ООО: "Универс-групп"