



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

98–82
На правах рукописи

Киселев Валерий Валерьевич

**УНИВЕРСАЛЬНЫЕ МАСШТАБНЫЕ СООТНОШЕНИЯ
ДЛЯ КОНСТАНТ СВЯЗИ МЕЗОНОВ,
СОДЕРЖАЩИХ ТЯЖЕЛЫЕ КВАРКИ,
И ПРЕДСКАЗАНИЕ СВОЙСТВ B_c -МЕЗОНОВ**

01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Протвино 1998

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г.Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Б.А.Арбузов, доктор физико-математических наук В.А.Ильин, доктор физико-математических наук А.Л.Катаев.

Ведущая организация — Объединенный институт ядерных исследований (г.Дубна).

Зашита диссертации состоится “___” 1999 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142284, г.Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “___” 1999 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 034.02.01

Ю.Г.Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 1998

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Полная картина прецизионных исследований Стандартной Модели и поиска эффектов новой физики предполагает прямое измерение трехбозонной электрослабой вершины, поиски хиггсовских частиц, супермультиплетов и т.п. на коллайдерах сверхвысоких энергий (LEP200, LHC), а также изучение эффектов нарушения CP-инвариантности и измерение фундаментальных параметров электрослабой теории (прежде всего в секторе тяжелых夸克ов).

Длительное время центр тяжести усилий по реализации этой программы несомненно будет находиться в области физики тяжелых夸克ов как на работающих уже коллайдерах LEP и FNAL, так и на планируемых фабриках B -мезонов в SLAC, KEK и на HERA-B.

В физике тяжелых c - и b -夸克ов высокоточные измерения характеристик электрослабой теории в редких процессах и поиски возможных эффектов, обусловленных расширениями Стандартной Модели и связанных с виртуальными поправками, которые задаются большой энергетической шкалой, предполагают их надежное и точное выделение в процессах, где доминируют эффекты сильного взаимодействия, связывающего夸克 в адроны. Поэтому значительную роль в проведении подобных исследований будут играть точность и надежность теоретических знаний о динамике КХД в секторе тяжелых夸克ов.

Масса тяжелого夸к m_Q значительно больше масштаба конфайнмента Λ , определяющего непертурбативные эффекты в адронах. Наличие малого параметра Λ/m_Q позволяет развить мощные средства в изучении мезонов с тяжелыми夸ками. Так, малая величина константы КХД $\alpha_s \sim 1/\ln(m_Q/\Lambda)$ определяет надежность вычислений жестких процессов с тяжелыми夸ками по теории возмущений КХД. Малая энергия связи тяжелого夸к в адроне, а значит, и малая виртуальность, приводят в ведущем приближении к нерелятивистскому движению тяжелого夸к в адроне, что определяет успешное применение нерелятивистских потенциальных моделей к описанию спектров масс как тяжелых кваркониев, так и мезонов с одним тяжелым夸ком, где в последнее время получила интенсив-

ное развитие также Эффективная теория тяжелых夸克ов (HQET), основанная на ковариантном разложении лагранжиана тяжелого夸кса в КХД по малому кинематическому параметру, задаваемому малым виртуальным импульсом тяжелого夸кса по сравнению с его массой (в ведущем приближении тяжелый夸к рассматривается как статический источник глюонного поля). Прочным теоретическим фундаментом для построения подобных подходов служит операторное разложение Вильсона, которое позволяет выделять эффекты пертурбативной динамики КХД с виртуальностями, большими шкалаами факторизации μ , в виде соответствующих коэффициентов $C_i(\mu^2)$ перед составными операторами $O_i(\mu^2)$, матричные элементы которых определяются непертурбативным характером КХД в инфракрасной области, где виртуальности меньше шкалы μ . В правилах сумм КХД вклады непертурбативных夸к-глюонных конденсатов являются степенными поправками к пертурбативным выражениям для спектральной плотности корреляторов токов в разложении по обратной массе тяжелого夸кса.

Наличие двух энергетических масштабов взаимодействия, задающих малый параметр, позволяет в ряде случаев разрабатывать методы получения универсальных масштабных соотношений для физических величин, характерных для процессов с рассматриваемым взаимодействием. Так, малая энергия связи夸ксов в адроне по сравнению с передачей энергии в процессах глубоконеупругого рассеяния лептонов на нуклонах позволила выявить эффект скейлинга, определяемого рассеянием на свободных партонах-夸кках. В физике мезонов и барионов с одним тяжелым夸кком удается определить в ведущем приближении по обратной массе тяжелого夸кса универсальные, не зависящие от аромата тяжелого夸кса, форм-факторы в процессах слабых эксклюзивных распадов таких адронов. В этом же приближении статических тяжелых夸ксов получено масштабное соотношение для лептонных констант тяжелых мезонов с одним тяжелым夸кком, которое означает физически, что при заданной точности рассмотрения поле статического источника не зависит от его аромата.

Нарушение подобных масштабных соотношений определяется учетом степенных поправок ($1/Q^2$ — в глубоконеупругом рассеянии, $1/m_Q$ — в теории тяжелых夸ксов), а также учетом логарифмических петлевых поправок в теории возмущений. В этом случае поправки нарушают универсальность масштабных соотношений, так как, к примеру, они явно зависят от аромата тяжелого夸кса через его массу.

Масштабное соотношение для лептонной константы мезона с одним тяжелым夸кком, а также логарифмическая поправка к нему могут быть получены при рассмотрении матричного элемента тока в Эффективной теории тяжелых夸ксов и сравнения его перенормировки с соответствующими величинами, заданными КХД. Однако подобное рассмотрение не может быть применено к системам с двумя тяжелыми夸кками типа тяжелых кваркониев, так как соответствующие выражения начинают зависеть от относительного движения этих двух夸ксов, которое явно зависит от их ароматов, т.е. от их масс.¹

¹В операторном разложении для тяжелого кваркония (NRQCD) в качестве малых параметров

В тяжелых кваркониях феноменологически наблюдается как малая энергия связи тяжелых夸рков, выраженная в ограниченном числе уровней в узкой по сравнению с массами состояний энергетической щели ниже порога распада на пару тяжелых мезонов и в надежности применения нерелятивистского рассмотрения, так и явная регулярность спектров масс, определяющая независимость разности энергий уровней от ароматов, а именно от масс c - и b -кварков. Наиболее явное выражение подобная регулярность нашла в рамках потенциальных моделей в виде утверждения о независимости средней кинетической энергии тяжелых кварков от их ароматов и в соответствующих уравнениях для плотности уровней энергии, скажем, S -волновых состояний.

Феноменологические нерелятивистские потенциальные модели тяжелых кваркониев, однако, не могут служить основой для получения масштабных соотношений для лептонных констант, определяемых в ведущем приближении волновой функцией кваркония в начале координат. Несмотря на независимость потенциала статического источника от его аромата, волновые функции тяжелых кваркониев зависят от ароматов кварков и от глобального поведения потенциала вблизи начала координат и на расстояниях $r \gg 1$ ферми, которое слабо влияет на спектр масс, так как вероятность нахождения кварков в начале координат (или на больших расстояниях) подавлена (средние расстояния между кварками в тяжелых кваркониях составляют $0.3 - 1.0$ ферми), и короткие расстояния дают малый вклад в определение средних значений, например потенциала, задающих массы уровней. Таким образом, предсказательная сила потенциальных моделей в отношении лептонных констант значительно ослаблена из-за большой модельной зависимости.

Как известно, в правилах сумм КХД при малых значениях номера момента спектральной функции существенны вклады как основного, так и возбужденных резонансных состояний, однако в рамках такого подхода невозможно выделить изолированный вклад каждого отдельного резонанса. При больших же номерах момента правила сумм насыщаются вкладом основного состояния, в то время как вклад возбужденных уровней подавлен и им обычно пренебрегают. Поэтому в рамках правил сумм КХД методически не удается использовать регулярность спектров тяжелых кваркониев.

В конечноэнергетических правилах сумм рассмотрение резонансной области приводит к существенной неопределенности, связанной с выбором интервала интегрирования, включающего в себя дельтообразный вклад резонанса. Исключение подобной неопределенности требует наложения дополнительных условий, так что и в подобном подходе также не удается получать соотношения для констант связи тяжелых кваркониев, следующие из масштабных свойств энергетической плотности уровней.

Таким образом, необходима разработка нового подхода, позволяющего использовать регулярность спектра масс и явные выражения для плотности уровней тяжелого кваркония, нерелятивистское движение кварков в кварконии, подавлен-

используют как малые виртуальности ($\Lambda/m_Q \ll 1$, как в HQET), так и малую скорость относительного движения ($v^2 \ll 1$).

ность степенных непертурбативных поправок по обратной массе тяжелых кварков и возможность определять вклады отдельных резонансов для вывода универсальных масштабных соотношений для лептонных констант тяжелых кваркониев.

Для описания состояний тяжелого кваркония, находящихся выше порога распада на пару тяжелых мезонов (например, $\Upsilon(4S)$, $B_c^{*+}(3S)$, $\psi(3770)$), существенны константы связи кваркония с мезонами. Такие константы определяются непертурбативной динамикой КХД. Поэтому их описание предполагает применение моделей инфракрасного поведения в КХД, к числу которых относятся потенциальные модели тяжелого кваркония и мезона с одним тяжелым夸рком, где вид потенциала может быть связан с формой глюонного пропагатора в непертурбативной области. В рамках такого подхода была сделана оценка ширины распада $\psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$ в модели корнельского потенциала с линейным ростом энергии взаимодействия кварков при увеличении расстояния между ними. Однако моделирование поведения глюонного пропагатора (потенциала) приводит, очевидно, к модельной зависимости результата расчета констант распадов, что значительно снижает предсказательную силу подобных оценок. В этой связи актуальной проблемой представляется построение правил сумм для мезонных токов, определяющих константы распада тяжелого векторного кваркония на пару тяжелых мезонов. Подобный кварконий, лежащий в узкой энергетической щели ниже порога распада на пару более тяжелых, чем псевдоскалярные, векторных состояний, имеет константы, подчиняющиеся масштабному соотношению в силу определенной зависимости размера щели от масс мезонов с одним тяжелым夸рком, которая следует из Эффективной теории тяжелых кварков.

Важной задачей становится проведение детального анализа практического применения полученных соотношений для предсказания соответствующих констант связи нового тяжелого кваркония ($\bar{b}c$), поиски которого ведутся в экспериментах с вершинными детекторами на коллайдерах CERN и FNAL.

Система ($\bar{b}c$) с открытыми прелестью и очарованием занимает особое место среди тяжелых кваркониев ($Q\bar{Q}'$). В отличие от подробно изученных экспериментально и достаточно точно описываемых теоретически семейств чармония ($c\bar{c}$) и боттомония ($b\bar{b}$) соответственно со скрытыми очарованием и прелестью, тяжелый кварконий ($\bar{b}c$), семейство B_c -мезонов, имеет специфические механизмы образования, распадов и спектроскопию, исследование которых позволит заметно расширить и упрочить количественное понимание динамики КХД, а также продвинуться в изучении важнейших параметров электрослабой теории.

Исследование процессов с тяжелыми кварками позволяет выделять и изучать непертурбативные эффекты КХД, обуславливающие адронизацию кварков, используя тяжелые кварки наподобие “меченых” атомов. Успешная реализация такой программы исследований становится возможной благодаря прогрессу в экспериментальной технике детектирования и идентификации частиц (главным образом, это связано с созданием и усовершенствованием вершинных детекторов, позволяющих выделять тяжелые кварки по их пробегу от первичной вершины взаимодействия).

С точки зрения спектроскопии, система $(\bar{b}c)$ является тяжелым кварконием, спектр которого может быть достаточно надежно рассчитан как в рамках КХД-мотивированных нерелятивистских потенциальных моделей, так и в правилах сумм КХД. $(\bar{b}c)$ — единственная система, состоящая из двух тяжелых夸克ов, описание спектра масс которой может служить тестом самосогласованности для потенциальных моделей и правил сумм КХД, параметры которых (массы夸克ов, например) фиксировались при фитировании спектроскопических данных чармония и боттомония. Таким образом, изучение спектроскопии семейства B_c может послужить существенному улучшению количественных характеристик夸克овых моделей и правил сумм, которые интенсивно применяются в других областях физики тяжелых夸克ов (например, при извлечении значений элементов матрицы смешивания слабых заряженных токов тяжелых夸克ов и при оценке вкладов, интерферирующих с эффектами нарушения CP-инвариантности, в распадах тяжелых адронов).

Кроме того, существует проблема точного описания расщепления Р-волновых уровней чармония и боттомония, экспериментальное измерение которого обнаружило существенное расхождение с теми значениями, которые ожидались в общепринятых夸克овых моделях. Изучение семейства B_c -мезонов может помочь в решении этой проблемы.

Не имея сильных и электромагнитных аннигиляционных каналов распада, возбужденные состояния системы $(\bar{b}c)$, находящиеся ниже порога распада на пару BD -мезонов, будут за счет каскадных радиационных переходов на низлежащие уровни распадаться в основное легчайшее псевдоскалярное состояние $B_c^+(0^-)$. Поэтому ширины электромагнитных (γ) и адронных ($\pi\pi$, η , ...) радиационных переходов данного возбуждения на другие уровни будут составлять его полную ширину. В результате этого полные ширины возбужденных уровней системы $(\bar{b}c)$ оказываются на два порядка меньше, чем полные ширины возбужденных уровней чармония и боттомония, для которых существенны аннигиляционные каналы. Кроме того, возможно, что данные о радиационных адронных распадах в семействе $(\bar{b}c)$ дадут возможность разрешить некоторые проблемы теории адронных переходов в тяжелых夸克онаиях (например, проблему аномального распределения инвариантных масс пары $\pi\pi$ в распаде $\Upsilon'' \rightarrow \Upsilon\pi\pi$).

Таким образом, с одной стороны, методы, применяемые в физике тяжелых夸克ов, способны достаточно надежно указать спектроскопические характеристики системы $(\bar{b}c)$ для того, чтобы вести целенаправленный экспериментальный поиск данного тяжелого夸克онаия, а с другой стороны, исследование и измерение спектроскопических данных в семействе B_c позволили бы улучшить эти методы и способы извлечения фундаментальных параметров Стандартной Модели как в физике B_c -мезонов, так и в других областях физики тяжелых夸克ов.

Как и другие мезоны с открытым ароматом, основное состояние семейства B_c -мезонов — псевдоскалярный мезон $B_c^+(0^-)$ — является долгоживущей частицей, распадающейся за счет слабого взаимодействия и имеющей время жизни, сравнимое с временами жизни B - и D -мезонов, что существенно отличает B_c от

тяжелых кваркониев η_c и η_b . Поэтому изучение распадов B_c -мезона является богатой областью физики тяжелых кварков, в которой можно извлекать значительную информацию как о динамике КХД, так и о слабых взаимодействиях. Спектроскопические характеристики B_c -мезона (например, лептонная константа, определяющая ширину волнового пакета системы $(\bar{b}c)$ в основном состоянии) в значительной мере определяют описание мод распада B_c , в которых следует ожидать обнаружение специфических закономерностей и эффектов.

Прежде всего наличие тяжелого валентного кварка-спектатора должно приводить к большой вероятности мод распада B_c с тяжелыми мезонами в конечном состоянии, $B_c \rightarrow \psi(\eta_c)$ и $B_c \rightarrow B_s^{(*)}$. Большой выход ψ -частиц интересен еще и тем, что ψ -частица в лептонной моде распада обладает прекрасной экспериментальной сигнатурой.

При рассмотрении полулептонных распадов $B_c^+ \rightarrow \psi(\eta_c)l^+\nu$ нерелятивистское движение тяжелых кварков в кваркониях может приводить к существенному эффекту, вызванному большими кулоноподобными α_s/v -поправками.

Как и в случае спектроскопии $(\bar{b}c)$ -системы, в теории тяжелых кварков необходимо провести исследование механизмов распадов B_c -мезона, измерение характеристик которых позволило бы не только существенно развить методы их описания, но и использовать эти методы для прецизионных исследований Стандартной Модели и возможных отклонений от ее предсказаний.

В случае рождения B_c -мезонов малое отношение Λ/m_Q , а значит, и малая величина постоянной кварк-глюонного взаимодействия $\alpha_s \sim 1/\ln(m_Q/\Lambda) \ll 1$ позволяют не только проводить рассмотрение образования пар $b\bar{b}$ - и $c\bar{c}$ -кварков, из которых формируются $(\bar{b}c)$ -мезоны, в рамках теории возмущений КХД, но и определенным образом расфакторизовать вклады, обусловленные пертурбативным рождением тяжелых кварков и их последующим непертурбативным связыванием в тяжелый кварконий. Так, для вычисления сечений рождения S-волновых состояний B_c в пике Z -бозона достаточно вычислить матричные элементы совместного рождения пар $b\bar{b}$ и $c\bar{c}$ в синглетном по цвету состоянии пары $(\bar{b}c)$ с определенным суммарным спином кварков ($S = 0, 1$), и в котором кварки движутся с одной и той же скоростью, равной скорости образуемого ими мезона. После этого нужно домножить эти матричные элементы на непертурбативный фактор, величину которого определяют спектроскопические характеристики связанного состояния (лептонная константа, задающая вероятность обнаружения кварков на малом расстоянии друг от друга в связанном состоянии, и массы кварков).

Подобное представление обусловлено тем, что характерные виртуальности тяжелых кварков в тяжелом кварконии значительно меньше их масс (так как тяжелые кварки в связанном состоянии движутся нерелятивистски), в то время как виртуальности кварков при их образовании составляют величину порядка их масс. Поэтому при рассмотрении образования B_c можно считать, что в мезоне кварки \bar{b} и c близки к массовой поверхности и практически покоятся друг относительно друга. Таким образом, после выделения непертурбативного фактора анализ ро-

ждения тяжелого кваркония B_c определяется рассмотрением матричных элементов, рассчитанных в теории возмущений КХД.

Отметим прежде всего, что необходимость рождения двух пар тяжелых夸克ов в электромагнитных и сильных процессах для формирования B_c приводит к тому, что ведущий порядок теории возмущений КХД имеет дополнительный фактор малости $\sim \alpha_s^2$ по сравнению с ведущим порядком теории возмущений для образования тяжелых夸克ов одного аромата, например, пары $b\bar{b}$, $\sigma(B_c)/\sigma(b\bar{b}) \sim \alpha_s^2 |\Psi(0)|^2/m_c^3$. Это обуславливает малый выход B_c -мезонов по сравнению с рождением B -мезонов.

Возникает необходимость проведения анализа ведущего приближения теории возмущений КХД для рождения B_c -мезонов, что позволяет получить ряд аналитических выражений для сечений рождения B_c , среди которых следует особо отметить выражения для функций фрагментаций тяжелых夸克ов в тяжелый кварконий в скейлинговом пределе $M^2/s \rightarrow 0$. Таким образом, фрагментационное рождение B_c может быть надежно описано аналитическими выражениями, что открывает новые возможности в изучении динамики КХД, существенной в полной картине физики тяжелых夸克ов.

В случае адронного рождения B_c доминируют партонные процессы при энергиях, сравнимых с массой B_c , так что существенной становится проблема изучения механизмов ассоциированного образования тяжелого кваркония и точного количественного определения условий установления режима фрагментации тяжелого夸克а в кварконий, как это следует из общей теоремы о факторизации жестких процессов в КХД. В этой связи интересно выявить роль неабелевого характера КХД путем сравнения механизмов образования B_c в адрон-адронных и фотон-фотонных столкновениях.

Численные оценки выхода B_c -мезонов на коллайдерах LEP и Tevatron показывают, что доля B_c -мезонов в рождении прелестных адронов составляет порядка 10^{-3} . Это приводит к тому, что уже на действующих экспериментальных установках рождается довольно большое количество B_c -мезонов.

Таким образом, необходимо точно указать ожидаемое число образующихся B_c -мезонов на различных коллайдерах и дифференциальные характеристики B_c , экспериментальное изучение которых значительно прояснило бы картину КХД-взаимодействий тяжелых夸克ов.

Решение проблемы экспериментального открытия и изучения B_c -мезонов определяется, во-первых, описанием теоретических характеристик семейства B_c -мезонов (спектроскопии, механизмов образования и распадов), а, во-вторых, экспериментальной методикой на действующих детекторах, которая позволила бы выделить предсказанные теорией события с рождением и распадом B_c . Что касается второй части этой проблемы, то, как уже упоминалось, к настоящему времени здесь достигнут колоссальный прогресс, связанный с использованием электронных вершинных детекторов, обладающих оперативным быстродействием и позволяющих не только отделить процессы с распадами долгоживущих частиц (B , B_c , D) от процессов рождения (техника разделения первичных и вторичных вершин), но и

пространственно точно восстанавливать вершины распада этих частиц. Наличие у B_c -мезона ярких сигнатур распада и практическая возможность регистрации подобных мод распада привели к реальной возможности открытия B_c -мезона на установках LEP и FNAL и к резкому росту теоретического интереса к системе ($\bar{b}c$).

Основные цели работы. Целью диссертации является изучение следующих проблем:

1. Формулировка метода правил сумм, позволяющая использовать регулярность спектра масс мезонов, содержащих тяжелые кварки, с целью получения масштабных соотношений для констант связи кваркониев, которые характеризуют механизм конфайнмента тяжелых кварков.
2. Детальное исследование механизмов образования и распадов систем, содержащих тяжелые кварки, на основе спектроскопических характеристик, следующих из масштабных соотношений, с целью теоретического предсказания свойств подобных систем, главным образом, B_c -мезонов.
3. Извлечение значений параметров КХД в секторе тяжелых кварков.

Научные результаты и новизна работы

1. Предложена и разработана новая квазилокальная модель правил сумм, позволяющая использовать регулярность спектра масс и явные выражения для плотности уровней тяжелого кваркония, нерелятивистское движение кварков в кварконии, подавленность степенных непертурбативных поправок по обратной массе тяжелых кварков и возможность определять вклады отдельных резонансов.
2. В рамках предлагаемого подхода получены универсальные масштабные соотношения для лептонных констант тяжелых кваркониев с различным кварковым составом, причем как для основных S-волновых состояний, так и для их радиальных возбуждений.
3. Проведен сравнительный анализ масштабных соотношений с экспериментальными данными по ширинам лептонных распадов $\Upsilon(nS) \rightarrow l^+l^-$ и $\psi(nS) \rightarrow l^+l^-$.
4. В рамках масштабных соотношений для лептонных констант чармония и боттомония по имеющимся экспериментальным данным сделаны численные оценки параметров КХД в секторе тяжелых кварков: масс c - и b -кварков и константы взаимодействия КХД, $\alpha_s(m_Z^2)$. Определены точность и границы применимости метода.
5. На основе масштабных соотношений предсказаны величины лептонных констант нового тяжелого кваркония B_c .
6. Проведено обобщение квазилокальных правил сумм на мезоны с одним тяжелым夸кком. Проанализировано масштабное соотношение для соответствующих лептонных констант в статическом пределе.

7. Получены величины размерных параметров Эффективной теории тяжелых кварков: энергии связи и среднего квадрата импульса тяжелых кварков в мезоне.
8. Предложена новая модель правил сумм для мезонных токов, определяющих константы распада тяжелого векторного кваркония на пару тяжелых мезонов, лежащего в узкой энергетической щели ниже порога распада на пару более тяжелых, чем псевдоскалярные, векторных состояний. Рассматриваемый подход позволяет использовать зависимость размера энергетической щели от масс тяжелых кварков, что дает возможность получить масштабное соотношение для констант распада тяжелого векторного кваркония с различным кварковым составом.
9. Проведен сравнительный анализ согласия масштабного соотношения с экспериментальными данными по распадам $\Upsilon \rightarrow B\bar{B}$ и $\psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$.
10. Показано практическое применение полученного соотношения для предсказания константы связи нового тяжелого кваркония ($\bar{b}c$), поиски которого ведутся в экспериментах с вершинными детекторами на коллайдерах CERN и FNAL, и предсказана величина ширины распада $B_c^{*+}(3S) \rightarrow B^+ D^0$.
11. Сделаны детальные предсказания спектра масс и ширин радиационных переходов в тяжелом кварконии ($\bar{b}c$), причем в зависящем от спинов кварков взаимодействии впервые учтена ренормгрупповая зависимость эффективной константы одноглюонного обмена от приведенной массы кварков. Проведено сравнение расчетов лептонных констант кваркония в потенциальных моделях и в рамках квазилокальных правил сумм.
12. Исследованы механизмы пертурбативного образования адронов с тяжелыми кварками (тяжелых кваркониев, тяжелых мезонов и барионов с двумя тяжелыми кварками) в различных взаимодействиях. Показано, что в e^+e^- -аннигиляции при больших энергиях ($M^2/s \ll 1$) доминирует процесс фрагментации тяжелого кварка в различные состояния и получены аналитические выражения для функций фрагментации в векторный и псевдоскалярный кварконий.
13. В рамках приближения статических кварков проведен аналитический расчет парного эксклюзивного рождения тяжелых мезонов и тяжелых кваркониев в e^+e^- -аннигиляции.
14. На основе расчета полного набора диаграмм четвертого порядка теории возмущений изучен переход к режиму фрагментации тяжелого кварка в S- и P-волновой кварконий и дваждытяжелый S-волновой дикварк в процессах образования при больших поперечных импульсах в адрон-адронных столкновениях высоких энергий. Установлена величина поперечного импульса, начиная с которой происходит факторизация жесткого образования тяжелого кварка и последующей фрагментации в тяжелый кварконий или тяжелый дикварк.
15. Установлен эффект подавления пертурбативного рождения мезонов в области фрагментации глюона за счет неабелевого характера взаимодействия в КХД.

16. Показана доминирующая роль рекомбинации при адронном рождении различных спиновых состояний системы двух тяжелых夸克ов.
17. Получены аналитические аппроксимации численных расчетов для полных сечений партонных подпроцессов глюон-глюонного и кварк-антикваркового рождения дваждыочарованных дикварков и S- и P-волновых состояний B_c -мезона.
18. Проведены аналитические расчеты парного эксклюзивного образования $B_c^+ B_c^-$ в кварк-антикварковой аннигиляции.
19. На основе расчета полного набора диаграмм четвертого порядка теории возмущений изучен переход к режиму фрагментации тяжелого кварка в S- и P-волновой кварконий и дваждытяжелый S-волновой дикварк в процессах образования при больших поперечных импульсах в фотон-фотонных столкновениях высоких энергий. Для калибровочно-инвариантной части диаграмм, отвечающей связи более тяжелого кварка с фотонами начальных пучков, установлена величина поперечного импульса, начиная с которого происходит факторизация жесткого образования тяжелого кварка и последующей фрагментации в тяжелый кварконий или тяжелый дикварк. Показано, что для двух других калибровочно-инвариантных групп диаграмм, отвечающих расщеплению фотона из начального пучка на пару менее тяжелых кварков, режим фрагментации не устанавливается, и доминирует механизм рекомбинации тяжелых кварков в связанное состояние.
20. В эксклюзивном парном рождении тяжелых мезонов с одним тяжелым кварком в фотон-фотонных столкновениях на основе ведущего приближения Эффективной теории тяжелых кварков введен универсальный скалярный формфактор, определяющий матричные элементы образования векторных и псевдоскалярных состояний, и в модели статических夸克ов получен явный вид этого формфактора. Определена область применимости универсального поведения формфакторов.
21. Сделаны предсказания полных и дифференциальных сечений образования B_c -мезонов в различных взаимодействиях и рассмотрены перспективы поиска этих мезонов на действующих установках с вершинными детекторами.
22. Построена и рассмотрена ковариантная потенциальная модель полулептонных распадов мезонов с тяжелыми кварками.
23. Сделаны предсказания времени жизни B_c -мезона и ширин эксклюзивных распадов B_c .
24. Предложено и изучено приближение жесткого глюонного обмена в двухчастичных адронных распадах B_c при больших импульсах отдачи и получены оценки ширин соответствующих распадов. Показано, что жесткий глюонный обмен приводит к приблизительному удвоению амплитуды распада B_c по сравнению с амплитудой, полученной в формализме перекрытия волновых функций тяжелых кваркониев.

Практическая ценность работы

Построенная модель правил сумм для лептонных констант тяжелых кваркониев впервые установила связь для констант радиальных возбуждений основного S-волнового состояния кваркония и, таким образом, устранила значительный пробел в теории тяжелого кваркония. Теоретически выведена наблюдаемая экспериментально связь лептонных констант Υ и ψ -частиц.

В рамках масштабных соотношений для тяжелых кваркониев сделана оценка константы взаимодействия КХД, величина которой в пределах неопределенности, обусловленной произволом в выборе точки нормировки бегущей константы, согласуется с другими способами извлечения $\alpha_s(m_Z^2)$ (при высоких энергиях в пике Z -бозона, по данным по глубоконеупругому рассеянию лептонов на нуклонах, в распадах τ -лептона), что позволяет частично снять широко обсуждавшуюся проблему о возможном расхождении в значениях α_s , извлекаемых из данных по тяжелым кваркам, и другими методами из-за проявления эффектов “новой” физики, находящейся за рамками Стандартной Модели.

Оценки параметров Эффективной теории тяжелых кварков (лептонные константы в статическом пределе, энергия связи тяжелого кварка и его средний поперечный импульс в мезоне) находят практическое применение при рассмотрении процессов с тяжелыми мезонами, позволяющим изучать динамику тяжелых кварков.

Получена связь констант наблюдаемых распадов тяжелых кваркониев на пару тяжелых мезонов. Масштабное соотношение для констант связи кваркония с тяжелыми мезонами позволяет сделать предсказание для ширины распада возбужденного векторного 3S-состояния нового семейства B_c -мезонов.

Детальные расчеты по спектроскопии, распадам и рождению B_c -мезонов в различных взаимодействиях практически используются в проводимых поисках этого состояния в экспериментах с вершинными детекторами на установках CDF (FNAL) и ALEPH, DELPHI, OPAL (CERN), о чем свидетельствуют соответствующие ссылки в оригинальных работах коллабораций. На LHC результаты диссертации служат для подготовки разделов физической программы экспериментов в той части, которая направлена на изучение физики тяжелых кварков (OPAL).

В планируемых экспериментах с фиксированной мишенью и на коллайдерах (CARM2000, HERA-B, E781) предполагается вести поиск барионов с двумя очарованными кварками, характеристики которых довольно подробно рассмотрены в диссертации и используются в подготовке соответствующих предложений по физическим программам экспериментов.

В последнее время серьезно обсуждается возможность создания фотон-фотонных коллайдеров высоких энергий и высоких светимостей. К числу реальных задач, которые могут быть исследованы на таких коллайдерах, относится и изучение процессов с тяжелыми кварками. Среди подобных процессов можно выделить рождение различных спиновых состояний B_c -мезонов, дваждытяжелых барионов и эксклюзивное образование пар тяжелых мезонов, которые рассмотрены в диссертации и,

таким образом, теоретически подготовлены к практическому экспериментальному исследованию.

Апробация работы и публикации. Результаты, полученные в диссертации, обсуждались на семинарах Отдела теоретической физики Института физики высоких энергий, на общеинститутских семинарах ИФВЭ, на семинарах Института теоретической и экспериментальной физики, докладывались на сессии Отделения ядерной физики РАН (1993 г.), обсуждались на Международных конференциях в ИФВЭ (1986, 1993, 1995 г.), на международном семинаре по многоквартовым взаимодействиям в ОИЯИ (Дубна, 1987 г.), на конференции HADRON'87 (Цукубо, 1987 г.), в Триесте (1994 г.), на совещании эксперимента DELPHI (CERN, 1994 г.), на конференции HADRON'95 (Манчестер, 1995 г.), в Риме (DIS'96), на Российско-германском семинаре по физике тяжелых夸克ов (Дубна, 1996 г.), на конференции ИЯИ РАН (QUARKS'92), на Международной конференции НИИЯФ МГУ (1994, 1996 гг.).

Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в российских и зарубежных журналах в виде 34 статей, в трудах четырех международных конференций и трех препринтах (см. список литературы [1-41]).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, а также списка литературы, 32 таблиц и 37 рисунков. Объем диссертации 248 страниц.

Содержание работы

Во Введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, показаны научная новизна проводимых исследований и их практическая ценность, а также кратко представлены содержание работы и ее апробация на конференциях и семинарах.

Глава 1 посвящена рассмотрению метода правил сумм, позволяющего использовать регулярность спектра масс мезонов, содержащих тяжелые кварки, с целью получения масштабных соотношений для констант связи кваркониев, которые характеризуют механизм конфайнмента тяжелых кварков.

В разделе 1.1 изучаются лептонные константы тяжелых кваркониев. Исходным пунктом построения квазилокальных правил сумм является рассмотрение двухточечного коррелятора векторных и псевдоскалярных токов тяжелых кварков на основе операторного разложения и дисперсионного соотношения для спектральной плотности соответствующих формфакторов. Следуя стандартной схеме правил сумм КХД для вычисления моментов спектральной плотности, отвечающих производным коррелятора токов в точке $Q^2 = 0$, где нет физических особенностей, обусловленных образованием резонансов и адронного континуума, определена область номеров моментов, где, с одной стороны, можно пренебречь вкладом от глюонно-

го конденсата, а с другой стороны, допустимо нерелятивистское приближение для вклада кварковой петли с учетом суммирования кулоноподобных α_s/v -поправок, где v — скорость относительного движения тяжелых夸克ов.

Необходимость учета таких кулоновских поправок является особенностью рассмотрения систем с двумя тяжелыми кварками в рамках операторного разложения по обратной массе тяжелых кварков, что заметно отличает этот подход от Эффективной теории тяжелых кварков. В расчеты включается также и поправка за счет обмена жестким глюоном при $v \rightarrow 0$. Показано, что в таком случае с высокой точностью моменты спектральной плотности коррелятора токов тяжелых кварков могут быть получены на основе использования вероятности образования тяжелых кварков на пороге, которая является постоянной величиной за счет кулоновского перерассеяния, причем систематический фактор подобного представления близок к единице и является величиной, имеющей слабую зависимость от номера момента, которой можно пренебречь.

Моменты спектральной плотности токов тяжелых кварков могут быть непосредственно вычислены по экспериментальным данным о ширинах лептонных распадов S-волновых состояний тяжелых кваркониев (чармония ($c\bar{c}$) и боттомония ($b\bar{b}$)). При этом вклад адронного континуума моделируется спектральной плотностью, вычисленной в КХД, выше некоторого порога s_{th} , что фактически означает использование локальной夸克-адронной дуальности при энергиях выше порога континуума. Подобное представление может приводить к слабой несущественной зависимости результатов от величины s_{th} .

Далее, что касается вклада резонансов, то в отмеченной области рассмотрения номеров моментов спектральной плотности необходимо учитывать радиальные возбуждения основного состояния. Для этих возбуждений наблюдается феноменологическая регулярность спектров тяжелых кваркониев, а именно, разности энергий уровней практически не зависят от ароматов тяжелых c - и b -夸克ов. Это означает, что плотность таких состояний является функцией номера возбуждения и не зависит от масс кварков. Наиболее явное выражение этой закономерности можно установить в рамках нерелятивистских потенциальных моделей тяжелых кваркониев, где согласно теореме Фейнмана–Хеллманна описанная ситуация имеет место при постоянной, не зависящей от ароматов кварков и уровня возбуждения величине средней кинетической энергии тяжелых кварков в связанном состоянии.

По теореме о вириале постоянная кинетическая энергия отвечает логарифмическому потенциалу в области средних расстояний между кварками в тяжелом кварконии: $0.1 < r < 1$ ферми, где происходит смена пертурбативного кулоноподобного поведения потенциала на линейный рост энергии взаимодействия, приводящий к конфайнменту кварков. Слабая зависимость разности энергий уровней от масс тяжелых кварков может быть учтена введением степенного потенциала Мартэна, который имеет в области средних расстояний в кварконии ту же форму, что и логарифмический потенциал, как, впрочем, и потенциалы, мотивированные КХД.

В этом случае можно записать явные выражения для плотности S-волновых состояний кваркония.

Сформулировано интегральное представление для вклада суммы резонансов в моменты коррелятора кварковых токов, причем систематический фактор подобного представления в рассматриваемой области номеров моментов близок к единице и пренебрежимо слабо зависит от номера момента. Спектральная плотность интегрального представления включает в себя явные выражения для плотности уровней кваркония, что позволяет сформулировать квазилокальные правила сумм на основе равенства модельной спектральной плотности адронных состояний и спектральной плотности коррелятора кварковых токов, рассчитанных в КХД, как это было описано выше. Определены точность и рамки применимости построенных правил сумм.

На основе сформулированных правил сумм для лептонных констант nS-волновых уровней тяжелого кваркония получены масштабные соотношения, которые для констант векторных состояний имеют вид

$$\frac{f_n^2}{M_n} \left(\frac{M_n}{M_1} \right)^2 \left(\frac{m_1 + m_2}{4\mu_{12}} \right)^2 = \frac{c}{n},$$

где c является величиной, которая не зависит от ароматов тяжелых夸克ов, составляющих кварконий. Она выражается следующим образом

$$c = \frac{2\alpha_s}{\pi} T \left(\frac{m_1 + m_2}{M_1} \right)^2 H_V Z_{\text{sys}},$$

где T — кинетическая энергия тяжелых夸克ов в кварконии, которая не зависит от ароматов тяжелых夸克ов; α_s определяется на масштабе энергий кулоноподобного обмена между夸克ами; H_V — фактор, отвечающий жесткой глюонной поправке; Z_{sys} — систематический фактор используемых представлений; $\mu_{12} = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ — приведенная масса夸克ов.

Полученные универсальные масштабные соотношения связывают не только константы nS-волновых возбуждений кваркония, но и константы кваркониев с различным кварковым составом. Численно выведенные закономерности находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными по лептонным распадам ψ - и Υ -частиц и позволяют сделать предсказания для кваркония ($\bar{b}c$).

Приведенные масштабные соотношения позволяют по данным о лептонных константах боттомония и чармония получить оценку константы взаимодействия КХД, которая обычно приводится к масштабу массы Z -бозона согласно ренормгрупповому поведению, так что

$$\alpha_s(m_Z^2) = 0.118 \pm 0.003,$$

при “физическом” выборе точки нормировки в кулоноподобном обмене между тяжелыми夸克ами $\mu_{Coul}^2 = T m_Q$, которая определяется средним квадратом импульса夸克а в кварконии. Отметим, что довольно широкая вариация μ_{Coul}^2 в разумных пределах в рамках однопетлевого приближения для коэффициентов Вильсона

приводит к методической неопределенности $\delta\alpha_s = 0.010$, которая снижается до $\delta\alpha_s = 0.002$ при учете двухпетлевого вклада. Полученная оценка согласуется со “среднемировым” значением константы $\alpha_s(m_Z^2)$.

Сделаны оценки масс c - и b -кварков.

В разделе 1.2 проведено обобщение квазилокальных правил сумм на мезоны с одним тяжелым кварком. Проанализировано масштабное соотношение для соответствующих лептонных констант в статическом пределе. Показано, что результаты рассмотрения находятся в согласии с ранее полученными результатами в рамках HQET. В ходе анализа сформулирован спектроскопический подход к оценке масс тяжелых кварков, исходя из закономерностей для масс тяжелых кваркониев и приблизительного совпадения уровней $\Upsilon(4S)$ и $\psi(3S)$ с удвоенными массами $m_{B(1S)}$ и $m_{D(1S)}$ соответственно, и получены величины размерных параметров Эффективной теории тяжелых кварков: энергии связи и среднего квадрата импульса тяжелых кварков в мезоне, которые находятся в согласии с оценками в других подходах.

В разделе 1.3 сформулирована новая модель правил сумм для мезонных токов, определяющих константы распада тяжелого векторного кваркония на пару тяжелых мезонов, лежащего в узкой энергетической щели ниже порога распада на пару более тяжелых, чем псевдоскалярные, векторных состояний. Рассматриваемый подход позволяет использовать зависимость размера энергетической щели от масс тяжелых кварков, который при малых номерах момента спектральной плотности задает величину константы связи. Это дает возможность получить масштабное соотношение для констант распада тяжелого векторного кваркония с различным кварковым составом, которое имеет следующий вид:

$$\frac{g^2}{M} \left(\frac{4m_{12}}{M} \right) = \text{const},$$

вследствие зависимости энергетической щели между векторным и псевдоскалярным состояниями тяжелых мезонов: $\Delta M_{1,2} \cdot M_{1,2} = \text{const}$, где $M_{1,2}$ — массы мезонов в конечном состоянии; m_{12} — их приведенная масса.

Сравнительный анализ указывает на хорошее согласие масштабного соотношения с экспериментальными данными по распадам $\Upsilon \rightarrow B\bar{B}$ и $\psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$.

Показано практическое применение полученного соотношения для предсказания константы связи нового тяжелого кваркония ($\bar{b}c$), поиски которого ведутся в экспериментах с вершинными детекторами на коллайдерах CERN и FNAL, и предсказана величина ширины распада $B_c^{*+}(3S) \rightarrow B^+ D^0$.

В Главе 2 рассмотрены спектроскопические характеристики семейства B_c -мезонов.

В разделе 2.1 рассчитан спектр масс системы ($\bar{b}c$) в нерелятивистской модели с потенциалом Мартэна и показано, что ниже порога распада на пару BD -мезонов находятся 16 узких состояний уровней 1S, 2S, 2P, 3P и 3D. Проведен сравнительный анализ предсказаний различных моделей потенциала тяжелых кварков, и сделана

оценка точности расчета положения уровней. Масштабные свойства эффективного потенциала, оттестированные при описании чармония и боттомония, в области средних расстояний между кварками указывают на приблизительное повторение структуры уровней ($\bar{b}c$) и систем ($\bar{c}c$) и ($\bar{b}b$).

Детально рассчитано зависящее от спина кварков расщепление уровней на основе зависящего от спина возмущения гамильтониана во втором порядке по обратным массам тяжелых кварков. Величина константы эффективного одноглюонного обмена фиксируется по известному расщеплению в $1S$ -состоянии чармония с учетом ренормгрупповой зависимости α_s от масштаба взаимодействия, определяемого массами кварков. Отметим, что в отличие от систем с кварками одного аромата в ($\bar{b}c$) реализуется не LS , а jj -связь при расчетах расщепления, зависящего от спина.

Точность предсказания масс основных состояний в правилах сумм КХД в каналах векторного, скалярного и псевдоскалярного токов значительно уступает точности потенциальных моделей, и в рамках этой неопределенности результаты правил сумм вполне согласуются с оценками в рамках кварковых моделей.

Модельная зависимость предсказания величины лептонной константы B_c -мезона и его радиальных возбуждений в потенциальных моделях несколько меньше, чем в семействе чармония. В рамках методической точности полученные величины согласуются с результатами правил сумм, рассмотренными в первой главе.

Не имея аннигиляционных каналов распада за счет сильного и электромагнитного взаимодействий, возбуждения системы ($\bar{b}c$) каскадно переходят в низлежащее состояние за счет радиационного излучения γ -квантов, пар пионов или η -мезонов. В результате полные ширины возбужденных уровней ($\bar{b}c$) оказываются на два порядка меньше полных ширин аналогичных состояний в чармонии и боттомонии. В разделе 2.3 приводятся парциальные ширины радиационных переходов в системе ($\bar{b}c$) и относительные вероятности доминирующих мод распадов.

Глава 3 посвящена рассмотрению механизмов образования адронов с тяжелыми кварками в различных взаимодействиях.

Амплитуда рождения системы с двумя статическими маловиртуальными кварками может быть получена из амплитуды жесткого образования рассматриваемых кварков с последующей проекцией конечного состояния кварковой системы на связанное двухкварковое состояние с заданными квантовыми числами как в импульсном пространстве (нерелятивистская волновая функция), так и по цвету образуемого состояния (синглет для мезона или антитриплет для тяжелого дикварка). При этом малая виртуальность кварка в связанном состоянии позволяет провести разложение жесткой амплитуды рождения кварков по малому относительному импульсу кварков. В итоге роль потенциальной модели сводится к непертурбативному нормировочному фактору ($R(0)$ для S-волновых состояний и $R'(0)$ для P-волновых), что еще раз подчеркивает его важность для точной оценки выхода различных состояний. Таким образом, анализ механизмов рождения состояний с тяжелыми кварками сводится к рассмотрению амплитуд процессов в теории возмущений КХД.

Образование B_c -мезонов подавлено за счет необходимости дополнительного жесткого образования второй пары тяжелых夸克ов, так что $\sigma(B_c)/\sigma(b\bar{b}) \sim 10^{-3}$.

В разделе 3.1 рассмотрено рождение связанных состояний тяжелых夸克ов в e^+e^- -аннигиляции. При больших энергиях ($M_{B_c}^2/s \ll 1$) расчет ведущих диаграмм образования B_c -мезона приводит к факторизованному скейлинговому результату для дифференциального сечения по доле энергии, уносимой мезоном, $d\sigma/dz = \sigma(\bar{b}b) \cdot D(z)$, где $z = 2E_{B_c}/\sqrt{s}$. Подобное распределение допускает интерпретацию в виде жесткого образования более тяжелого \bar{b} -夸克а с последующей фрагментацией в B_c , так что $D(z)$ — функция фрагментации. При этом удается получить аналитические выражения для функций фрагментации в различные спиновые состояния S, P, и D-волновых уровнях. Таким образом, открывается возможность явного контроля и экспериментальной проверки результатов подобного рассмотрения.

Далее рассмотрено эксклюзивное рождение пар тяжелых мезонов и кваркониев в рамках приближения статических夸克ов в связанном состоянии. Получены аналитические выражения для полных и дифференциальных сечений, которые могут быть существенны при рассмотрении околопороговых эффектов.

Показано, что при энергиях В-фабрик расчет образования дваждытяжелых барионов (в данном случае дваждыочарованных $\Xi_{cc}^{(*)}$) некорректно проводить на основе модели фрагментации, режим которой еще не установлен, и необходимо учитывать полные выражения для амплитуды процесса с высшими степенями отношения M^2/s , так что выход таких барионов при невысоких энергиях значительно больше, чем на LEP.

Численные оценки выхода B_c -мезонов (с учетом возбужденных состояний) показывают, что на LEP образуется порядка $1.5 \cdot 10^3$ этих мезонов на каждый миллион распадов Z -бозона с b -夸克ами в конечном состоянии. С учетом относительных вероятностей мод распадов и эффективностей их регистрации в условиях реальных детекторов следует ожидать лишь единичные события с B_c . Поиски событий с кандидатами на установках ALEPH, DELPHI и OPAL дают значения массы B_c -мезона и его времени жизни, которые согласуются с теоретическими оценками,

$$m^{exp}(B_c) = 6.14_{-0.09}^{+0.13} \text{ ГэВ}, \quad \tau^{exp}(B_c) = 0.55_{-0.10}^{+1.20} \text{ пс}, \quad (1)$$

$$m^{th}(B_c) = (6.25 \pm 0.03) \text{ ГэВ}, \quad \tau^{th}(B_c) = (0.55 \pm 0.15) \text{ пс}. \quad (2)$$

В разделе 3.2 рассмотрено образование состояний с тяжелыми夸克ами в фотон-фотонных столкновениях.

Для рождения B_c в ведущем приближении теории возмущений можно выделить три калибровочно-инвариантных группы диаграмм, которые можно интерпретировать, как:

1) жесткое фотон-фотонное образование $b\bar{b}$ с последующей фрагментацией $\bar{b} \rightarrow B_c^+(nL)$, где n — главное квантовое число в кварконии ($\bar{b}c$); $L = 0, 1, \dots$ — орбитальный момент,

а также как

2) соответствующие образование и фрагментацию для c -夸克ов,

3) диаграммы рекомбинации пары $(\bar{b}c)$ в B_c^+ , в которой кварки разного аромата связаны с разными фотонными линиями.

В этом случае результаты расчета полного набора диаграмм ведущего порядка теории возмущений показывают, что группа b -фрагментационных диаграмм при больших поперечных импульсах $p_T(B_c) \gg M_{B_c}$ может быть описана моделью фрагментации с функцией $D_{\bar{b} \rightarrow B_c^+}(z)$, вычисленной в e^+e^- -аннигиляции. Набор c -фрагментационных диаграмм не допускает описания в рамках фрагментационной модели. Доминирующий вклад в полное сечение фотон-фотонного образования B_c дают рекомбинационные диаграммы.

Рассмотрено также и фотон-фотонное рождение дваждытяжелых барионов на основе модели тяжелого дикварка.

В эксклюзивном парном рождении тяжелых мезонов с одним тяжелым夸рком в фотон-фотонных столкновениях на основе ведущего приближения Эффективной теории тяжелых夸рков введен универсальный скалярный формфактор, определяющий матричные элементы образования векторных и псевдоскалярных состояний, и в модели статических夸рков получен явный вид этого формфактора. Определена область применимости универсального поведения форм-факторов.

В разделе 3.3 изучается механизм образования состояний с тяжелыми夸рками в адрон-адронных взаимодействиях.

При высоких энергиях в адрон-адронном образовании B_c -мезонов преобладает партонный подпроцесс глюон-глюонного слияния $gg \rightarrow B_c^+ + b + \bar{c}$, который в ведущем приближении КХД предполагает расчет 36 диаграмм четвертого порядка по константе связи α_s . В этом случае не существует изолированных калибровочно-инвариантных групп диаграмм, которые допускали бы интерпретацию, подобную рассмотрению процессов рождения B_c в e^+e^- -аннигиляции и фотон-фотонных столкновениях.

Вычисление полного набора диаграмм $O(\alpha_s^4)$ -вклада позволяет определить величину поперечного импульса p_T^{min} , начиная с которого процесс глюон-глюонного образования B_c -мезонов входит в режим факторизации жесткого рождения пары $b\bar{b}$ с последующей фрагментацией в связанное состояние $(\bar{b}c)$, как это следует из теоремы о факторизации жестких процессов в пертурбативной КХД. Оказывается, что подобная величина p_T^{min} гораздо больше массы M_{B_c} , так что доминирующий вклад в полное сечение глюон-глюонного образования B_c дают диаграммы нефрагментационного типа, т.е. рекомбинация тяжелых夸рков. Кроме того, свертка партонного сечения с глюонными распределениями в начальных адронах приводит к подавлению вкладов как больших поперечных импульсов, так и подпроцессов с большой энергией в системе центра масс партонов, так что основной вклад в полное сечение адронного образования B_c дает область малых или сравнимых с массой мезона энергий B_c , где модель фрагментации по своему построению не может применяться. Необходим поэтому расчет с учетом всех вкладов рассматриваемого порядка в околовороговой области.

Проводятся вычисления как полных, так и дифференциальных сечений образования S- и P-волновых состояний B_c -мезонов в рамках ведущего порядка теории возмущений КХД.

Учитывается вклад кварк-антикварковой аннигиляции, существенной при малых энергиях адрон-адронных взаимодействий, где необходимо принимать во внимание наличие более жестких, чем морские глюоны и кварки, валентных кварков. Приводятся аналитические аппроксимации полных сечений подпроцессов образования B_c .

Установлен эффект подавления пертурбативного рождения мезонов в области фрагментации глюона за счет неабелевого характера взаимодействия в КХД. Показана доминирующая роль рекомбинации при адронном рождении различных спино-венных состояний системы двух тяжелых кварков.

Проведены аналитические расчеты парного эксклюзивного образования $B_c^+ B_c^-$ в кварк-антикварковой аннигиляции.

Аналогичный анализ механизма образования дваждытяжелых барионов в адрон-адронных взаимодействиях приводит к тем же выводам о режиме фрагментации тяжелого кварка, что и в случае рождения тяжелого кваркония.

Глава 4 включает в себя 4 раздела. В первом из них проводится построение ковариантной кварковой модели мезонов со статическими кварками на основе одновременного нерелятивистского формфактора S-волнового связанного состояния. Предложенная модель в отличие от наивной формулировки включает в себя релятивистский буст при ненулевых импульсах мезона отдачи, что приводит к модификации зависимости формфакторов токов перехода между мезонами от переданного импульса. Затем проводится тестирование ковариантной модели на примере интенсивно изучаемого полуlepтонного эксклюзивного распада $B \rightarrow D^{(*)} l \nu$, интерес к которому обусловлен возможностью прецизионного измерения элемента матрицы Кабибо–Кобаяши–Маскава V_{bc} при максимальной передаче импульса, как это следует из HQET. Проводится учет жестких глюонных поправок к универсальной функции Изгура–Вайза (IW). Сделаны оценки величины $|V_{bc}|$ и наклона функции IW, которые согласуются с расчетами в других подходах.

В разделе 4.2 вычислено время жизни B_c -мезона. Процессы распада B_c -мезона могут быть подразделены на три класса: 1) распад \bar{b} -кварка со спектаторным c -кварком, 2) распад c -кварка со спектаторным \bar{b} -кварком и 3) аннигиляционный канал $B_c^+ \rightarrow l^+ \nu_l (c\bar{s}, u\bar{s})$, где $l = e, \mu, \tau$. В распадах $\bar{b} \rightarrow c\bar{s}$ выделяют также вклад интерференции Паули с c -кварком из начального состояния.

Для случая аннигиляционного канала ширина $\Gamma(\text{ann.})$ может быть надежно оценена в рамках инклузивного подхода суммированием лептонных и кварковых мод распада с учетом жестких глюонных поправок к эффективному четырехкварковому взаимодействию слабых токов, определяемых фактором a_1 , и выражается через лептонную константу f_{B_c} . Такая оценка кваркового вклада не зависит от модели адронизации, так как имеет место большое энерговыделение порядка массы мезона.

Что касается неаннигиляционных распадов, в подходе операторного разложения для кварковых токов слабых распадов учитываются α_s -поправки к распадам свободных кварков, используется кварк-адронная дуальность для конечных состояний и затем рассматривается матричный элемент операторов перехода по связанному мезонному состоянию, что позволяет также учесть эффекты, обусловленные движением и виртуальностью распадающегося кварка внутри мезона за счет взаимодействия со спектатором. При этом оказывается, что мода распада $\bar{b} \rightarrow \bar{c}c\bar{s}$ почти полностью подавлена из-за интерференции Паули с очарованным кварком из начального состояния. Кроме того, весьма существенно подавлены по сравнению с распадами свободного кварка и распады c -кварка со спектаторным \bar{b} -кварком за счет большой энергии связи в начальном состоянии.

В рамках эксклюзивного подхода необходимо суммировать рассчитанные в потенциальных моделях ширины различных мод распадов. При рассмотрении полулептонных распадов за счет кварковых переходов $\bar{b} \rightarrow \bar{c}l^+\nu_l$ и $c \rightarrow sl^+\nu_l$ оказывается, что в первом случае адронное конечное состояние практически насыщается легчайшим связанным 1S-состоянием в системе $(\bar{c}c)$, т.е. частицами η_c и J/ψ , а во втором случае в доступную энергетическую щель попадают лишь 1S-состояния в системе $(\bar{b}s)$, т.е. B_s и B_s^* . Энерговыделение в последнем переходе невелико по сравнению с массами мезонов, и поэтому возможно заметное отклонение от картины кварк-адронной дуальности.

Канал $\bar{b} \rightarrow \bar{c}ud\bar{d}$, например, может быть рассчитан по известной ширине распада $\bar{b} \rightarrow \bar{c}l^+\nu_l$ с учетом цветового фактора и жестких глюонных поправок к четырехкварковому взаимодействию или суммированием по ширинам распадов со связанными состояниями системы $(ud\bar{d})$.

Результаты расчетов полной ширины B_c в инклузивном и эксклюзивном подходах дают согласованные друг с другом значения, если учесть наиболее существенную неопределенность, связанную с выбором масс кварков (в особенности для очарованного кварка), так что окончательно имеем

$$\tau(B_c^+) = (0.55 \pm 0.15) \text{ пс.}$$

Рассмотрение эксклюзивных мод распадов B_c , представленное в разделе 4.3, предполагает введение модели адронизации кварков в мезоны с заданными квантовыми числами. К числу таких моделей относятся правила сумм КХД для трехточечных корреляторов кварковых токов и потенциальные кварковые модели. Особенностью применения правил сумм к мезонам, содержащим два тяжелых кварка, является учет существенной роли кулоноподобных α_s/v -поправок за счет глюонного обмена между кварками, составляющими мезон и имеющими относительную скорость движения v . Так, в полулептонных распадах $B_c^+ \rightarrow \psi(\eta_c)l^+\nu_l$ тяжелый кварконий (\bar{Q}_1Q_2) имеется как в начальном, так и в конечном состояниях, и поэтому вклад кулоноподобных поправок проявляется особенно сильно. Использование древесного приближения для пертурбативного вклада в трехточечный коррелятор кварковых токов приводит к большому расхождению в определении величин форм-

факторов переходов, рассчитанных в правилах сумм и в потенциальных моделях, и только учет α_s/v -поправок устраниет это разногласие. Таким образом, потенциальные модели мезонов, основанные на ковариантной записи формфакторов слабых распадов B_c через перекрытие волновых функций кваркониев в начальном и конечном состояниях, и правила сумм КХД дают согласованное друг с другом описание полуlepтонных распадов B_c -мезонов.

Ширины адронных распадов могут быть получены на основе предположения о факторизации слабого перехода между кваркониями и адронизации продуктов распада виртуального W^{*+} -бозона. Точность факторизации должна увеличиваться с ростом виртуальности W -бозона, что обусловлено подавлением взаимодействия в конечном состоянии. В таком подходе адронные распады могут быть рассчитаны с использованием формфакторов полуlepтонных переходов и соответствующего описания перехода W^* в адронное состояние.

При уменьшении инвариантной массы адронной системы возрастает импульс мезона отдачи, и возникает проблема применимости формализма перекрытия волновых функций кваркониев, так как в подобной кинематике узкие волновые пакеты смещены относительно друг друга в пространстве импульсов в область перекрытия хвостов распределений. В такой ситуации необходимо учитывать жесткий глюонный обмен между конституентами кваркония, что разрушает картину спектаторного слабого перехода в потенциальном подходе. Показано, что жесткий глюонный обмен приводит к приблизительному удвоению амплитуды распада B_c по сравнению с амплитудой, полученной в формализме перекрытия волновых функций тяжелых кваркониев.

В Заключении сформулированы результаты диссертации, представленные к защите.

Список литературы

1. Киселев В.В., Лиходед А.К. *Редкие процессы в адронном образовании тяжелых кварков*. В Сб.: труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий “Мультиварковые взаимодействия и квантовая хромодинамика”, ОИЯИ, Дубна, 1987, т.1, с.200.
2. Герштейн С.С., Киселев В.В., Лиходед А.К., Слабоспицкий С.Р., Ткабладзе А.В. *Сечения рождения и спектроскопия B_c -мезонов* (часть 1). // ЯФ. 1988, **48**, с.515.
3. Киселев В.В., Ткабладзе А.В. *Распады очарованно-прелестного мезона с ψ -частичей в конечном состоянии*. ЯФ. 1988, **48**, с.536.
4. Киселев В.В., Лиходед А.К., Слабоспицкий С.Р., Ткабладзе В.В. *Свойства образования B_c -мезонов в адронных столкновениях*. // ЯФ. 1989, **49**, с.1100.
5. Киселев В.В., Лиходед А.К., Ткабладзе А.В. *Полулептонные распады B_c* . ЯФ, 1993, **56**, с.128.

6. Kiselev V.V. *Leptonic decay constants of heavy quarkonia in effective QCD sum rules.* // Nucl. Phys. 1993, **B406**, c.340.
7. Kiselev V.V., Likhoded A.K., Shevlyagin M.V. *Four heavy quarks, B_c -meson production in Z -boson pole.* // Z. Phys. 1994, **C63**, 77.
8. Kiselev V.V. *Quark model for semileptonic decays $B \rightarrow D^{(*)}l\nu$.* // Int. J. Mod. Phys. 1994, **A9**, 4987.
9. Киселев В.В. $\bar{\Lambda}$ из правил сумм КХД для тяжелого квартония. // Письма ЖЭТФ. 1994, **60**, 498.
10. Киселев В.В., Лиходед А.К., Шевлягин М.В., *Рождение четырех тяжелых квартков и B_c -мезонов в пике Z^0 -бозона.* // ЯФ. 1994, **57**, с.733.
11. Герштейн С.С., Киселев В.В., Лиходед А.К., Ткаладзе А.В. *Физика B_c -мезонов.* // УФН 1995, **165**, с.3.
12. Gershtein S.S., Kiselev V.V., Likhoded A.K., Tkabladze A.V. *B_c spectroscopy.* // Phys. Rev. 1995, **D51**, p.3613.
13. Kiselev V.V. *Exclusive production of heavy meson pairs in e^+e^- annihilation.* // Int. J. Mod. Phys. 1995, **A10**, p.465.
14. Kiselev V.V. *Semileptonic $B \rightarrow D^{(*)}l\nu$ decays, the slope of Isgur-Wise function and $|V_{bc}|$ value in potential quark model.* // Mod. Phys. Lett. 1995, **A10**, p.1049.
15. Киселев В.В., Лиходед А.К., Ткаладзе А.В. *Спектроскопия B_c -мезонов.* // ЯФ 1995, **58**, с.1045.
16. Киселев В.В., Лиходед А.К., Шевлягин М.В. *Образование дваждыочарованных барионов при энергии $\sqrt{s} = 10.58$ ГэВ.* // ЯФ. 1995, **58**, с.1092.
17. Киселев В.В., Лиходед А.К., Шевлягин М.В. *Рождение четырех тяжелых квартков и связанных состояний в процессах $e^+e^- \rightarrow Q + Q' + \bar{Q} + \bar{Q}'$ и $e^+e^- \rightarrow (QQ') + Q' + \bar{Q}$ в полюсе Z^0 -бозона.* // ЯФ. 1995, **58**, с.82.
18. Kiselev V.V., Likhoded A.K., Shevlyagin M.V. *Double charmed baryon production at B factory.* // Phys. Lett.. 1994, **B332**, p.411.
19. Киселев В.В. *Универсальный форм-фактор для эксклюзивного образования пар тяжелых мезонов в фотон-фотонных взаимодействиях.* // Письма ЖЭТФ. 1995, **61**, с.529.
20. Kiselev V.V. *Scaling relation for the $\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$, $\psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$ decay constants from sum rules.* // Mod. Phys. Lett. 1995, **A10**, p.2113.
21. Киселев В.В. *Оценка α_s из спектроскопии ψ - и Υ -частич в правилах сумм КХД.* // ЯФ. 1996, **59**, с.188.
22. Kiselev V.V. *f_B^{stat} , μ_π^2 in quasiclassical approximation of sum rules.* // Phys. Lett. 1995, **B362**, p.173.
23. Kiselev V.V. *Scaling relations in phenomenology of QCD sum rules for heavy quarkonium.* // Int. J. Mod. Phys. 1996, **A11**, p.3689.
24. Kiselev V.V. *Hard-soft factorization in $B_c^+ \rightarrow \psi\pi^+$ decay.* // Phys. Lett. 1996, **B372**, p.326.
25. Бережной А.В., Киселев В.В., Лиходед А.К. *Адронное рождение барионов, содержащих два тяжелых квартка.* // ЯФ. 1996, **59**, с.909.

26. Berezhnoy A.V., Kiselev V.V., Likhoded A.K. *Photonic production of P-wave states of B_c mesons.* // *Phys. Lett.* 1996, **B381**, p.341.
27. Kiselev V.V. *Heavy quark-meson mass gap from spectroscopy.* // *Phys. Lett.* 1996, **B373**, p.207.
28. Berezhnoy A.V., Kiselev V.V., Likhoded A.K. *Hadronic production of S-, P-wave states of ($\bar{b}c$)-quarkonium.* // *Z. Phys.* 1996, **A356**, p.79.
29. Berezhnoy A.V., Kiselev V.V., Likhoded A.K. *Photonic production of S-, P-wave B_c states, doubly heavy baryons.* // *Z. Phys.* 1996, **A356**, p.89.
30. Бережной А.В., Киселев В.В., Лиходед А.К. *Адронное образование тяжелых мезонов в пертурбативной КХД.* // *ЯФ.* 1997, **60**, с.353.
31. Kiselev V.V. *Hard approximation in two-particle decays of B_c at large recoils.* // *Preprint IHEP 96-41*, Protvino, 1996.
32. Kiselev V.V., Likhoded A.K. *B_c spectroscopy, production, decays.* In: *Proceedings of 6-th International Conference on Hadron Spectroscopy, "HADRON'95"*, eds. M.C. Birse, G.D. Lafferty, J.A. McGovern, World Scientific, p.473, 1996.
33. Бережной А.В., Киселев В.В., Лиходед А.К. *Фотонное образование P-волновых состояний B_c -мезонов.* // *ЯФ.* 1996, **59**, с.2032.
34. Kiselev V.V. *Decay of $B_c^{*+}(3S) \rightarrow B^+ D^0$.* // *Phys. Lett.* 1997, **B390**, p.427.
35. Berezhnoy A.V., Kiselev V.V., Likhoded A.K. *Hadronic production of heavy mesons in perturbative QCD.* In: *Proceedings of DIS'96*, Roma, 1996.
36. Kiselev V.V. *Hard approximation in two-particle decays of B_c at large recoils.* In: *Proceedings of III German-Russian Workshop "Heavy Quark Physics"*, Eds. M.A.Ivanov, V.E.Lyubovitsky, Dubna, p. 184, 1996.
37. Бережной А.В., Киселев В.В., Лиходед А.К. *Адронное образование S- и P-волновых состояний $\bar{b}c$ -кваркония.* // *ЯФ.* 1997, **60**, с.108.
38. Kiselev V.V. *Estimate of $\alpha_s(m_Z)$ in sum rules for bottomonium.* *Preprint IHEP 96-83*, 1996.
39. Бережной А.В., Киселев В.В., Лиходед А.К., Онищенко А.И. *B_c -мезон на LHC.* // *ЯФ.* 1997, **60**, с.1889.
40. Бережной А.В., Киселев В.В., Лиходед А.К., Онищенко А.И. *Образование дваждыочарованных барионов в адронных экспериментах.* // *ЯФ.* 1997, **60**, с.2048.
41. Бережной А.В., Киселев В.В., Лиходед А.К., Онищенко А.И. *Неабелева природа асимметрии образования B_c -мезонов в глюон-фотонном взаимодействии.* // *ЯФ.* 1998, **61**, с.302.

Рукопись поступила 7 декабря 1998 г.

В.В.Киселев.

Универсальные масштабные соотношения для констант связи мезонов, содержащих тяжелые кварки, и предсказание свойств B_c -мезонов.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 26.11.98. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.

Печ.л. 2,87. Уч.-изд.л. 2,2. Тираж 100. Заказ 317. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 98–82, И Ф В Э, 1998
