



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2006–7

На правах рукописи

Лучинский Алексей Валерьевич

РОЖДЕНИЕ И РАСПАДЫ ТЯЖЕЛЫХ КВАРКОНИЕВ

01.04.02 – теоретическая физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Протвино 2006

УДК 539.1.01

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

Научные руководители: доктор физ.-мат. наук, профессор А.К. Лиходед, доктор физ.-мат. наук, профессор С.С. Герштейн.

Официальные оппоненты: Доктор физ.-мат наук В.В. Анисович (ПИЯФ, г. Гатчина), доктор физ.-мат наук С.П. Баранов (ФИАН, г. Москва).

Ведущая организация – Научно-исследовательский институт ядерной физики (МГУ), г. Москва.

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2006 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета К 034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 034.02.01

Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2006

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время общепризнано, что квантовая хромодинамика является теорией, которая лучше всего описывает физику сильных взаимодействий. Основные уравнения этой теории известны, но они, к сожалению, слишком сложны, чтобы их можно было решить, и в общем случае получить какие-нибудь результаты из первых принципов весьма затруднительно. Поэтому хотелось бы иметь некоторую простую систему, в которой эта задача упрощается.

Примером таких систем являются тяжелые кварконии, т.е. мезоны, состоящие из кварк-антикварковой пары $(Q\bar{Q})$, для которых масса кварка $m_Q \gg \Lambda_{\text{QCD}}$ (в случае c -кварка мы имеем дело с чармониями, а $(b\bar{b})$ -мезоны называются боттомониями). То, что масса кварка велика по сравнению с масштабом сильного взаимодействия, приводит к ряду важных следствий. Прежде всего скорость кварка в системе покоя мезона v оказывается малой по сравнению со скоростью света (для чармониев мы имеем $v^2 \sim 0.2$, для боттомониев $v^2 \sim 0.1$).

Другим следствием является то, что в силу асимптотической свободы квантовой хромодинамики константа сильного взаимодействия α_s при виртуальностях порядка массы кварка оказывается малой

(для чармония $\alpha_s(m_c) \sim 0.3$, для боттомония $\alpha_c(m_b) \sim 0.2$). Наличие этих двух малых параметров значительно упрощает теоретическое описание тяжелых кваркониев и делает возможным дополнительную проверку основных принципов квантовой хромодинамики.

Из-за малой скорости кварка в мезоне по сравнению со скоростью света процессы рождения и распадов тяжелых кваркониев разделяются на два практически независимых этапа: жесткую часть, которая соответствует аннигиляции или рождению кварк-антикварковой пары и проходит на расстояниях порядка $1/m_Q$, и адронизацию этой пары в наблюдаемый мезон (характерным расстоянием, на котором проходит этот этап, будет $1/(m_Q v) \gg 1/m_Q$). При описании первого этапа вполне можно пользоваться теорией возмущений, поскольку, как уже говорилось, на расстояниях порядка $1/m_Q$ константа сильного взаимодействия мала. Для описания адронизации кварк-антикварковой пары необходимо использовать непertурбативные методы, и при этом сильно помогает то, что скорость кварка в системе покоя мезона мала по сравнению со скоростью света. Можно, например, применять нерелятивистскую квантовую механику, т.е. решать уравнение Шредингера с подходящим образом выбранным потенциалом взаимодействия кварка и антикварка.

Еще одним методом является нерелятивистская квантовая хромодинамика (NRQCD), предложенная В.Е. Касвеллом и Г.П. Лепажем, в которой используется разложение вероятностей распадов тяжелых кваркониев и сечений процессов, в которых рождаются эти частицы в ряд по скорости кварка в системе покоя мезона.

Еще одна особенность тяжелых кваркониев заключается в том, что ширины их распадов малы по сравнению с ширинами распадов более легких мезонов. Причина такой малости состоит в том, что низшие состояния ($Q\bar{Q}$)-мезонов лежат ниже порога образования мезонов с открытым ароматом (например, масса самого легкого из чармониев $\eta_c(1S)$ -мезона равна $M_\eta = 2.98$ ГэВ, а порог рождения $D\bar{D}$ -пары есть $2M_D = 3.7$ ГэВ). В результате этого адронные распады тяжелых кваркониев проходят за счет аннигиляции кварк-антикварковой пары (т.е. запрещены правилом Цвейга) и подавлены.

Одним из следствий малости ширин полных распадов векторных кваркониев является то, что относительные вероятности из лептонных распадов велики по сравнению с относительными вероятностями лептонных распадов мезонов, составленных из легких кварков, а потому векторные чармонии и боттомонии легко наблюдаются в эксперименте. Фактически именно лептонные распады являются основными каналами, по которым регистрируются векторные чармонии и боттомонии.

Несмотря на физическую ясность нарисованной картины, в последнее время обнаружались и некоторые трудности, связанные с тем, что экспериментальные значения сечений ряда процессов оказались гораздо больше, чем сделанные в рамках NRQCD предсказания. Например Коллаборацией Belle изучалось парное рождение чармониев в электрон–позитронной аннигиляции при энергии электрон–позитронной пары в системе центра масс $\sqrt{s} = 10.6$ ГэВ, и было получено значение

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow J/\psi\eta_c) \text{Br}(\eta_c \rightarrow \geq 4 \text{ charged}) = 33 \text{ фбн},$$

которое, очевидно, будет нижним пределом на сечение $\sigma(e^+e^- \rightarrow J/\psi\eta_c)$. Предсказание сечения этого процесса, сделанное в рамках NRQCD,

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow J/\psi\eta_c) = 2.3 \text{ фбн},$$

т.е. примерно на порядок меньше.

Аналогичная ситуация наблюдается и при рождении возбужденных состояний чармония. Был предпринят ряд попыток объяснить это расхождение. Одно из объяснений связано с тем, что из-за недостаточно хорошего разрешения в канале недостающих к J/ψ массе пик в районе η_c -мезона мог бы быть связан с другим состоянием. В качестве кандидатур рассматривались еще один J/ψ -мезон, скалярный или тензорный глоболы и прочие варианты. Но последующий анализ экспериментальных данных и теоретические рассмотрения исключили все эти варианты. Поэтому остается только одна возможность — по какой-нибудь причине сечение процесса

$e^+e^- \rightarrow J/\psi\eta_c$ должно быть больше, чем это предсказывает NRQCD. Такой причиной могли бы быть, например, петлевые КХД-поправки, но оказалось, что их учет хотя и увеличивает сечение, но этого недостаточно для того, чтобы объяснить расхождение с данными. Таким образом, этот вопрос остается открытым.

Еще одно противоречие между теорией и экспериментом наблюдается в распадах скалярных и тензорных чармониев χ_c на пару легких мезонов. Например, измеренные на эксперименте относительные вероятности распадов χ_{c0} -мезонов на пару векторных равняются

$$\text{Br}(\chi_{c0} \rightarrow \phi\phi) = (1 \pm 0.6) \times 10^{-3},$$

а результаты, полученные в рамках NRQCD, есть

$$\text{Br}(\chi_{c0} \rightarrow \phi\phi) = 1.6 \times 10^{-4}.$$

Видно, что и для сечений эксклюзивного рождения чармониев и для относительных вероятностей их распадов результаты, полученные в рамках NRQCD, значительно расходятся с экспериментальными данными, причем расходятся примерно одинаково (и там и там результаты эксперимента на порядок больше теории). Такая схожесть дает надежду, что эти различия могут быть объяснены одной и той же причиной.

Как уже говорилось выше, для векторных кваркониев, масса которых лежит ниже порога образования состояний с открытым ароматом, велики относительные вероятности лептонных распадов, что значительно облегчает экспериментальную регистрацию этих мезонов. Для других состояний кваркониев это, к сожалению, не так.

К таким частицам относятся, в частности, скалярный и тензорный боттомонии, ширины лептонных распадов которых очень малы. С другой стороны, из-за связи этих частиц с двумя глюонами они должны хорошо рождаться при высоких энергиях, и хотелось бы найти способ регистрации $\chi_{b0,2}$. В качестве такого способа довольно давно предлагалось наблюдение распадов $\chi_{b0,2} \rightarrow J/\psi J/\psi$. Первые оценки их относительных вероятностей ($\sim 1.5 \cdot 10^{-5}$) давали слишком малый результат, чтобы можно было наблюдать эти распады

экспериментально. Поскольку, однако, при этих оценках использовалась NRQCD, то по аналогии с рождением чармониев в электрон-позитронной аннигиляции и распадами $\chi_{c0,2}$ -мезонов можно ожидать, что и в случае $\chi_{b0,2} \rightarrow J/\psi J/\psi$ относительные вероятности будут значительно выше теоретических предсказаний, и поэтому эти распады можно будет использовать для регистрации $\chi_{b0,2}$ -мезонов.

Таким образом, мы видим, что тяжелые кварконии дают уникальную возможность исследовать физику мезонов как на больших, так и на малых расстояниях, и что ряд вопросов, касающихся этих частиц, до сих пор остается открытым. Поэтому исследование их свойств является чрезвычайно важной и интересной задачей, которой и посвящена данная работа.

Основные цели работы

Целью диссертации является изучение следующих проблем:

1. Получение сечений рождения векторных чармониев в электрон-позитронной аннигиляции и влияние на них относительного движения кварков в мезонах.
2. Рассмотрение распадов $\chi_{0,2}$ -мезонов на пару векторных и получение относительных вероятностей этих процессов.
3. Рассмотрение инклюзивных распадов $\chi_{b0,2} \rightarrow J/\psi D\bar{D} + X$ и определение ограничений на дуальные им распады $\chi_{c0,2} \rightarrow J/\psi J/\psi$.
4. Рассмотрение возможности применения распадов $\chi_{b0,2} \rightarrow J/\psi J/\psi$ и $\chi_{b0,2} \rightarrow J/\psi D\bar{D} + X$ для наблюдения χ_b -мезонов на ускорителях Tevatron и LHC.

Научные результаты и новизна работы

1. На основании нерелятивистской квантовой хромодинамики были рассмотрены процессы инклюзивного рождения векторного кваркония в двухфотонной электрон-позитронной аннигиляции. В таких процессах при большой энергии начальных частиц основной вклад дают диаграммы с фрагментацией одного из виртуальных фотонов в векторный кварконий, что приводит к специфическим угловым

распределениям и увеличивает полные сечения соответствующих реакций.

2. Рассмотрены процессы парного рождения векторных чармониев в электрон-позитронной аннигиляции и показано, что учет подавленных по константе сильного взаимодействия членов может привести к заметному уменьшению сечений таких реакций. Например сечение процесса $e^+e^- \rightarrow 2J/\psi$ при энергии $\sqrt{s} = 10.6$ ГэВ без учета КХД-поправок равняется

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow J/\psi J/\psi) = 8.7 \text{ фбн},$$

а введение таких поправок в вершину образования J/ψ -мезона и $(c\bar{c})$ -пары приводит к уменьшению этого значения до

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow J/\psi J/\psi) = 2.3 \text{ фбн}.$$

В результате показано, что сечение парного рождения J/ψ -мезонов, которое приводится в литературе, завышено, и этот процесс не может объяснить противоречие между теорией и экспериментом в сечении реакции $e^+e^- \rightarrow J/\psi\eta_c$.

3. В диссертации подтверждаются результаты предыдущих расчетов, согласно которым учет относительного движения кварков в мезоне в жесткой части процесса $e^+e^- \rightarrow J/\psi\eta_c$ приводит к значительному увеличению сечения этой реакции. При этом в диссертации этот результат получается двумя независимыми способами: с использованием метода разложения амплитуды на световом конусе и с применением волновых функций чармониев, которые получены из решения уравнения Шредингера с КХД-мотивированным потенциалом Бухмюллера–Тая.

Также показано, что учет относительного движения кварков в мезонах приводит к увеличению сечений рождения возбужденных состояний чармония. Приведенные в диссертации результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Таким образом, можно сказать, что этим решается давно стоящий вопрос о противоречии КХД — значительном (практически на порядок) превышении экспериментальных значений этих сечений над теоретическими предсказаниями.

4. Показано, что учет относительного движения кварков приводит также к увеличению ширины распадов скалярных и тензорных мезонов на пару векторных. Результат сильно зависит от выбора волновой функции кварков в конечных мезонах, но если при выборе этих функций использовать дополнительную информацию, например результаты, полученные на основании правил сумм КХД, то получаются значения, согласующиеся с экспериментальными данными. В частности, в диссертации приведены относительные вероятности

$$\begin{aligned}\text{Br}(\chi_{c0} \rightarrow \omega\omega) &= (2.3 \pm 1.1) \times 10^{-3}, \\ \text{Br}(\chi_{c0} \rightarrow \phi\phi) &= 9.02 \times 10^{-4},\end{aligned}$$

которые практически совпадают с экспериментальными значениями

$$\begin{aligned}\text{Br}(\chi_{c0} \rightarrow \omega\omega) &= (2.29 \pm 0.58 \pm 0.41) \times 10^{-3}, \\ \text{Br}(\chi_{c0} \rightarrow \phi\phi) &= (1.0 \pm 0.6) \times 10^{-3},\end{aligned}$$

в то же время, если пренебрегать относительным движением кварков в векторных мезонах (а именно это приближение использовалось в предыдущих работах), то получаются вероятности примерно на порядок меньше.

Также представлены до сих пор экспериментально не измеренные относительные вероятности распадов $\chi_{b0,2} \rightarrow 2J/\psi$. Согласно приведенным в диссертации результатам, эти величины принимают значения в интервалах

$$0.152 \times 10^{-4} < \text{Br}(\chi_{b0} \rightarrow J/\psi J/\psi) < 2.15 \times 10^{-4}$$

для скалярного и

$$1.47 \times 10^{-4} < \text{Br}(\chi_{b2} \rightarrow J/\psi J/\psi) < 7.05 \times 10^{-4}$$

для тензорного мезонов, причем значительная погрешность в этих результатах связана с неопределенностью в волновой функции J/ψ -мезона.

5. Неопределенность в выборе волновой функции кварков в J/ψ -мезоне и вызванная ею погрешность относительной вероятности распадов $\chi_{b0,2} \rightarrow J/\psi J/\psi$ может быть устранена, если рассмотреть дуальные этим распадам реакции $\chi_{b0,2} \rightarrow D\bar{D} + X$ или на кварковом

уровне $\chi_{b0,2} \rightarrow J/\psi c\bar{c}$. Проведенное в диссертации рассмотрение позволяет ограничить выбор волновой функции c -кварка в J/ψ -мезоне и существенно сузить интервалы, в которых могут лежать относительные вероятности $\text{Br}(\chi_{b0,2} \rightarrow 2J/\psi)$. Согласно полученным в диссертации результатам

$$\begin{aligned}\text{Br}(\chi_{b0} \rightarrow J/\psi J/\psi) &= 2.88 \times 10^{-5}, \\ \text{Br}(\chi_{b0} \rightarrow J/\psi J/\psi) &= 2.5 \times 10^{-4}.\end{aligned}$$

Что касается дуальных им распадов, то предсказания их относительных вероятностей есть

$$\begin{aligned}\text{Br}(\chi_{b0} \rightarrow J/\psi D\bar{D} + X) &= 1.19 \times 10^{-4}, \\ \text{Br}(\chi_{b0} \rightarrow J/\psi D\bar{D} + X) &= 7.06 \times 10^{-4}.\end{aligned}$$

6. Рассмотрена возможность использования распадов $\chi_{b0,2} \rightarrow J/\psi J/\psi, J/\psi D\bar{D} + X$ для регистрации скалярного и тензорного боттомониев на протон–протонных ускорителях. Сечения рождения $\chi_{b0,2}$ -мезонов на ускорителях Tevatron и LHC равны:

$$\begin{aligned}\sigma(p\bar{p} \rightarrow \chi_{b0} + X)_{\text{Tevatron}} &= 0.25 \text{ мкбн}, \\ \sigma(p\bar{p} \rightarrow \chi_{b2} + X)_{\text{Tevatron}} &= 0.32 \text{ мкбн}, \\ \sigma(p\bar{p} \rightarrow \chi_{b0} + X)_{\text{LHC}} &= 1.5 \text{ мкбн}, \\ \sigma(p\bar{p} \rightarrow \chi_{b2} + X)_{\text{LHC}} &= 2 \text{ мкбн},\end{aligned}$$

что соответствует сечениям

$$\begin{aligned}\sigma(p\bar{p} \rightarrow \chi_{b0} + X)_{\text{Tevatron}} \text{Br}(\chi_{b0} \rightarrow J/\psi J/\psi) &= 53 \text{ пбн}, \\ \sigma(p\bar{p} \rightarrow \chi_{b0} + X)_{\text{Tevatron}} \text{Br}(\chi_{b0} \rightarrow J/\psi D\bar{D} + X) &= 30 \text{ пбн}, \\ \sigma(p\bar{p} \rightarrow \chi_{b2} + X)_{\text{Tevatron}} \text{Br}(\chi_{b2} \rightarrow J/\psi J/\psi) &= 170 \text{ пбн}, \\ \sigma(p\bar{p} \rightarrow \chi_{b2} + X)_{\text{Tevatron}} \text{Br}(\chi_{b2} \rightarrow J/\psi D\bar{D} + X) &= 260 \text{ пбн}, \\ \sigma(p\bar{p} \rightarrow \chi_{b0} + X)_{\text{LHC}} \text{Br}(\chi_{b0} \rightarrow J/\psi J/\psi) &= 0.03 \text{ пбн}, \\ \sigma(p\bar{p} \rightarrow \chi_{b0} + X)_{\text{LHC}} \text{Br}(\chi_{b0} \rightarrow J/\psi D\bar{D} + X) &= 0.26 \text{ пбн}, \\ \sigma(p\bar{p} \rightarrow \chi_{b2} + X)_{\text{LHC}} \text{Br}(\chi_{b2} \rightarrow J/\psi J/\psi) &= 0.18 \text{ пбн}, \\ \sigma(p\bar{p} \rightarrow \chi_{b2} + X)_{\text{LHC}} \text{Br}(\chi_{b2} \rightarrow J/\psi D\bar{D} + X) &= 1.41 \text{ пбн}.\end{aligned}$$

Сравнение этих сечений с сечениями фоновых нерезонансных процессов показывает, что выделение сигналов от рождения χ_b на их фоне вполне возможно.

Апробация диссертации и публикации

Результаты, полученные в диссертации, обсуждались на семинаре Отдела теоретической физики Института физики высоких энергий.

Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в российских и зарубежных журналах в виде статей (см. Список публикаций [1-5]).

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста и заключения, содержит список литературы (47 работ) и два приложения. Объем диссертации 69 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, показаны новизна проводимых исследований и их научная значимость.

В **Главе 2** исследуются рождение чармониев в электрон-позитронной аннигиляции и влияние на сечения этих процессов относительного движения кварков в мезонах.

В **Главе 3** рассматриваются распады скалярного и тензорного мезонов и проверяется соотношение дуальности.

В **Главе 4** исследуется возможность наблюдения этих распадов на адронных коллайдерах Tevatron и LHC.

В **Приложениях** приводятся использованные в данной работе результаты нерелятивистской квантовой хромодинамики и разложения на световом конусе.

Основные результаты диссертации, представленной к защите:

1. Вычислено сечение инклюзивного рождения векторных чармониев в двухфотонной электрон-позитронной аннигиляции. Результат опубликован в работе [1].

2. Получены выражения для сечения парного рождения векторных чармониев в результате аннигиляции электрон-позитронной пары при энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 10.6$ ГэВ и показано, что в работах предыдущих авторов была допущена ошибка, которая привела к увеличению этого сечения примерно в 4 раза. Результат опубликован в работе [2].
3. Показано, что влияние относительного движения кварков в мезонах приводит к значительному увеличению вероятностей двухчастичных процессов. Этот эффект позволяет устранить противоречия между теоретическими предсказаниями и экспериментальными данными для сечений парного рождения чармониев в электрон-позитронной аннигиляции и распадов тяжелых скалярных и тензорных кваркониев на пару векторных мезонов. Результаты представлены в работах [3–5].
4. Получены ширины инклюзивных распадов $\chi_{b0,2} \rightarrow J/\psi D\bar{D} + X$ и исследовано соотношение дуальности, которое связывает эти ширины с ширинами двухчастичных распадов $\chi_{b0,2} \rightarrow J/\psi(c\bar{c})_V$, где $(c\bar{c})_V$ — векторный чармоний. Результат опубликован в работе [5].
5. Оценены сечения процессов $p\bar{p} \rightarrow \chi_{b0,2} + X$ с последующими распадами $\chi_{b0,2} \rightarrow J/\psi J/\psi, J/\psi D\bar{D} + X$ и показано, что они могут быть использованы на установках Tevatron и LHC для регистрации $\chi_{b0,2}$ -мезонов. Эти результаты приведены в работах [3] и [5].

Список публикаций по теме диссертации:

1. А.В. Лучинский. Об инклюзивном рождении векторного чармония в двухфотонной электрон-позитронной аннигиляции. // Яд. Физ. **68** (2005), 1456.
2. А.В. Лучинский. О парном рождении векторных чармониев в электрон-позитронной аннигиляции при $\sqrt{s} = 10.6$ ГэВ. // Яд. Физ. **67** (2004), 1362.

3. V.V. Braguta, A.K. Likhoded, A.V. Luchinsky. Observation potential for χ_b at Tevatron and LHC. // Phys.Rev. **D72**, 094018 (2005)
4. V.V. Braguta, A.K. Likhoded, A.V. Luchinsky. Excited charmonium mesons production in e^+e^- annihilation at $\sqrt{s} = 10.6$ GeV. // Phys.Rev. **D72**, 074019, (2005).
5. V.V. Braguta, A.K. Likhoded, A.V. Luchinsky. Inclusive decays $\chi_{b0,2} \rightarrow J/\psi D\bar{D} + X$ and the duality relation. // Phys.Rev. **D73**, 034021, (2006).

Рукопись поступила 18 мая 2006 г.

А.В. Лучинский.
Рождение и распады тяжелых кваркониев.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **ИТ_РХ**.

Редактор Н.В.Ежела.

Подписано к печати 24.05.2006. Формат 60 × 84/8.
Офсетная печать. Печ.л. 0,8. Уч.-изд.л. 0,65 Тираж 100. Заказ .
Индекс 3649. ЛР т020498 17.04.97.

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

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2006–7, И Ф В Э, 2006
