

Ярославский государственный университет
имени П.Г. Демидова

На правах рукописи
УДК 539.125

ПАРХОМЕНКО
Александр Яковлевич

**Многочастичные распады
тяжелых кваркониев и Z-бозона**

Специальность 01.04.02. – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ярославль – 1997 г.

Работа выполнена на кафедре теоретической физики Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент СМИРНОВ А.Д.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор ЛИХОДЕД А.К.
доктор физико-математических наук,
профессор ФАУСТОВ Р.Н.

Ведущая организация: Санкт-Петербургский институт ядерной
физики им. Константинова

Защита диссертации состоится _____ 1998 г. в _____
часов на заседании Специализированного совета НИИЯФ МГУ по адресу:
117234, г. Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан _____ 1998 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета
кандидат физико-математических наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

Несмотря на уже четвертьвековую историю, физика тяжелых кваркониев и по сей день привлекает внимание физиков. Интерес к изучению этой области в 90-х годах был частично подогрет экспериментом, проведенным коллаборацией E760 в FERMILAB, где удалось с беспрецедентной точностью измерить массы, ширины и относительные вероятности мод распада уровней чармония в $p\bar{p}$ аннигиляции. Использувавшиеся в течение практически двадцати лет предположения (факторизация вкладов от больших и малых расстояний, и т. д.), необходимые для проведения конкретных расчетов распадов кваркониев и процессов их рождения, примерно в это же время получили свое обоснование в рамках эффективной полевой теории для связанных кварка и антикварка – нерелятивистской КХД (НРКХД). Эта теория также позволила элегантно решить проблему расходимостей в некоторых распадах P -волновых состояний. Еще одна привлекательная особенность НРКХД состоит в том, что вклады больших расстояний можно получить численными расчетами на решетке методами Монте-Карло. При этом результаты, полученные аналитически или численно ранее в рамках пертурбативной КХД, определяют вклад малых расстояний. Однако такой “кваркониевый ренесанс”, базирующийся на преимуществах НРКХД, не исключает проведения расчетов многочастичных распадов в рамках непертурбативной КХД, поскольку полученные в рамках КХД результаты позволяют фиксировать значения коэффициентов НРКХД. К тому же, набор статистики распадов кваркониев, наблюдаемых как в $p\bar{p}$, так и e^+e^- аннигиляции, позволя-

ет и напрямую (экспериментально) проверять предсказания для вероятностей распада редких (неосновных) каналов.

Создание и довольно длительное функционирование электрон-позитронных и протон-антипротонных ускорителей с энергиями достаточными для рождения калибровочных W - и Z -бозонов позволили набрать достаточную для изучения их редких распадов статистику событий. К числу таких редких процессов следует отнести распады, обусловленные как петлевыми диаграммами, так и диаграммами с многочастичными конечными состояниями, в частности, четырехчастичные распады Z -бозонов. При этом, если конечное многочастичное состояние не содержит сильно взаимодействующих частиц (кварков и глюонов), то такой процесс может служить тестом для проверки электрослабого сектора стандартной модели. Более того, проведение теоретических расчетов четырехчастичных распадов представляется особенно важным по причине интенсивного экспериментального поиска отклонений от стандартной модели, как возможных проявлений новой физики.

Цель работы состоит в теоретическом исследовании четырехчастичных кварк-глюонных распадов тяжелого ортокваркония, трехчастичных распадов тяжелого паракваркония и четырехчастичных фермион-фотонных распадов Z -бозона.

Научная новизна результатов. Следующие результаты, представленные в диссертации, являются новыми :

– Вычислены в аналитическом виде кварковые и глюонные функции распределения четырехчастичного кварк-глюонного распада ортокваркония. Указывается на наличие коллинеарного усиления в кварковых функциях распре-

деления для всех реальных распадов J/ψ - и Υ -мезонов за исключением одного – $\Upsilon \rightarrow \bar{c}cgg$. В указанном распаде усиление отсутствует полностью из-за относительно большой массы $m_c/m_b \simeq 0,3$ конечных кварков.

– Вычислены в компактной форме дифференциальные вероятности трех-глюонного и кварк-глюонного распадов паракваркония. С учетом масс конечных кварков получены полная вероятность, а также кварковая и глюонная функции распределения. Во всех процессах, за исключением одного $\eta_b \rightarrow \bar{c}cg$, указывается на наличие коллинарного усиления, а также усиления, обусловленного испусканием мягкого глюона. Теоретически рассчитанное значение $Br_{th}(\eta_c \rightarrow \bar{s}sg) \simeq 12,4\%$ относительной вероятности распада находится в хорошем согласии с экспериментальным значением вероятности распада $Br_{exp}(\eta_c \rightarrow \bar{K}K + X) \leq 13,1\%$, где под X понимаются любые нестранные адроны. Также предсказываются следующие значения для вероятностей распадов η_b -мезона: $Br(\eta_b \rightarrow \bar{K}K + X) \simeq 13,4\%$ и $Br(\eta_b \rightarrow \bar{D}D + X) \simeq 2,5\%$.

– Получено простое аналитическое выражение для функции распределения по инвариантным массам фотонной и фермионной пар в приближении главных логарифмов для четырехчастичных распадов Z -бозона вида $Z \rightarrow \bar{f}f\gamma\gamma$. Указывается на характерное гребнеобразное усиление этой функции вблизи границы физической области. Полученный результат хорошо согласуется с экспериментальным распределением, полученным на LEP.

Практическая ценность. Полученные в диссертации результаты представляют практический интерес как в теоретических, так и экспериментальных исследованиях. Указываются распады пара- и отработтомония, наиболее вероят-

ные для экспериментального проявления трех- и четырехструйной структуры. Предсказываются относительные вероятности некоторых редких распадов параболтомония. Полученное аналитическое выражение для функции распределения по инвариантным массам фермионной и фотонной пар в распаде Z -бозона позволяет легко и с хорошей точностью оценивать ожидаемый исход событий в экспериментах по изучению Z -бозона. Полученные дифференциальные вероятности распадов могут быть использованы как для аналитического, так и для численного определения таких характеристик изучаемых распадов, как траст, сферичность, некомпланарность.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на научных конференциях ОЯФ РАН по фундаментальным взаимодействиям элементарных частиц (Москва, апрель 1994 г., октябрь 1995 г.), VIII международном семинаре “Кварки-94” (Владимир, май 1994 г.), IX международном семинаре “Кварки-96” (Ярославль, май 1996 г.), 5 Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц “Элементарные частицы и внешние поля” (Ярославль, апрель 1992 г.), 6 Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц “Космомикрофизика и калибровочные поля” (Москва, август 1993 г.), обсуждались на семинарах НИИЯФ МГУ, ПИЯФ.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в восьми печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, четырех приложений, четырнадцати рисунков, трех таблиц и списка цитируемой литературы, включающего 135 наименований. Общий объем дис-

сертации составляет 104 машинописных страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность темы диссертации, дается обзор литературы. Кратко изложено содержание глав диссертации.

В первой главе изучается четырехчастичный кварк-глюонный распад тяжелого ортокваркония $n^3S_1(\bar{Q}Q) \rightarrow \bar{q}qgg$.

В первом разделе дается обзор работ, в которых рассматривались сильные основные (трехглюонные) и неосновные (четырёхчастичные) распады тяжелых ортокваркониев.

Во втором и третьем разделах приводятся амплитуда и дифференциальная вероятность кварк-глюонного распада тяжелого ортокваркония, вычисленные в произвольной группе цветовой симметрии $SU(N_c)$ (в Приложении А содержатся групповые соотношения для унитарной группы $SU(N_c)$).

В четвертом разделе приведены функции распределения по глюонным и кварковым переменным – энергиям частиц и углам разлета между ними. В Приложении Б рассматривается метод инвариантного интегрирования, использованный при вычислении функций распределения, а также приводятся значения некоторых интегралов. Анализ кварковой функции распределения выявил наличие коллинеарного усиления. В частности, при равных относительных энергиях кварка и антикварка $y_1 = y_2 = 0,4$ эффект коллинеаризации кварков становится существенным при относительной массе конечных кварков $\mu = m_q/m \leq 0,15$ и угле разлета между ними $\theta_q \leq 30^\circ$. Указанный эффект будет наблюдаться во всех кварк-глюонных распадах орточармония и ортоботтомо-

ния за исключением одного $-\Upsilon \rightarrow \bar{c}sgg$, в котором в силу достаточно большого значения относительной массы c -кварка ($\mu \approx 0,3$) область малых углов разлета θ_q становится кинематически запрещенной. Как кварковая, так и глюонная функции распределения содержат также инфракрасные усиления, соответствующие испусканию как пары мягких глюонов, так и пары мягких кварков. Следует заметить, что наиболее приемлимым для обнаружения четырехчастичных кварк-глюонных распадов процесса следует рассматривать следующий распад ортоботтомония $-\Upsilon \rightarrow \bar{c}sgg$, в котором кварковые и глюонные струи разлетаются практически изотропно во всем интервале разрешенных углов.

Во второй главе исследуются трехчастичные распады тяжелого паракваркония $n^1S_0(\bar{Q}Q) \rightarrow 3g$ и $n^1S_0(\bar{Q}Q) \rightarrow \bar{q}qq$.

В первом разделе дается обзор работ, в которых анализировались сильные распады S -волновых тяжелых паракваркониев.

Во втором разделе приведены амплитуды трехглюонного и кварк-глюонного распадов паракваркония в наиболее простом и компактном виде с использованием физической (трехмерно-поперечной) калибровки глюонов. Выражение для амплитуды кварк-глюонного распада дается также в релятивистски и калибровочно инвариантном виде.

В третьем разделе дается выражение для дифференциальной вероятности трехглюонного распада в зависимости как от энергетических, так и от угловых переменных.

В четвертом разделе представлены выражения для дифференциальной и полной вероятностей распада тяжелого паракваркония с учетом влияния масс

конечных кварков. Выражение для полной вероятности распада анализируется в применении к конкретным распадам η_c - и η_b -мезонов. Указывается, что расчеты в рамках теории возмущений не применимы к распадам этих мезонов с рождением легких u - и d -кварков. Применение выражения для относительной вероятности к распаду $\eta_c \rightarrow \bar{s}sg$ дает следующую оценку – $Br_{th} \approx 12 \div 5\%$, где масса конечного s -кварка меняет свое значение от токового значения $m_s \simeq 150$ МэВ до конституэнтного $m_s \simeq 450$ МэВ. Сравнение этого выражения с экспериментальным значением $Br_{exp} \leq 13,1\%$ относительной вероятности распада $\eta_c \rightarrow \bar{K}K + X$ (под X понимаются любые нестранные частицы) показывает, что данный процесс на партонном уровне может быть насыщен распадом $\eta_c \rightarrow \bar{b}arccg$, если массу родившегося s -кварка держать токовой. Аналогичным образом можно оценить относительные вероятности распадов η_b -мезона $Br(\eta_b \rightarrow \bar{K}K + X) \approx 13\%$ и $Br(\eta_b \rightarrow \bar{D}D + X) \approx 2,5\%$, считая, что они определяются распадами $\eta_b \rightarrow \bar{s}sg$ и $\eta_b \rightarrow \bar{c}cg$ с токовыми s - и c -кварками в конечном состоянии.

В пятом разделе рассматриваются энергетические и угловые функции распределения в кварк-глюонном распаде паракваркония, методика вычисления которых указана в Приложении Б. Анализ распределения по энергиям глюона показывает, что все функции распределения, соответствующие реальным распадам η_c - и η_b -мезонов за исключением одного – $\eta_b \rightarrow \bar{c}cg$, имеют характерный пик в области энергий глюона порядка массы кварка в кварконии. Причиной такого поведения является эффект коллинеаризации родившихся кварков, и при этом наиболее вероятной конфигурацией распада будет двухструйная,

когда одна струя адронов инициируется парой кварков, а вторая, летящая в противоположном направлении, – жестким глюоном. В распаде $\eta_b \rightarrow \bar{c}sg$ эффект коллинеаризации полностью отсутствует, поскольку из-за относительно большой массы $m_c/m_b \approx 0,33$ конечных кварков область значений $\geq 0,9m_b$ для энергии конечного глюона, куда и попадает коллинеарный пик, является кинематически запрещенной. Отсутствие коллинеаризации кварков выделяет указанный распад в качестве наиболее вероятного кандидата для наблюдения трехструйных событий в распадах η_b -мезона. Функции распределения по энергиям кварков тоже содержат усиление в области энергии порядка массы кварка в кварконии, но существенно менее ярко выраженное. Причиной этого усиления является испускание мягкого глюона. Также приводятся выражения для функций распределения по углам разлета между кварками и между кварком и глюоном, вычисленные для безмассовых кварков.

В шестом разделе приведены точные выражения для полных вероятностей трехглюонного и кварк-глюонного (в пределе безмассовых кварков) распадов. Эти вероятности имеют физический смысл и могут быть вычислены только в усеченной области фазового пространства конечных частиц, чему эффективно можно придать смысл использования простейшей модели адронной струи в виде конуса с углом полураствора δ , причем струя образуется достаточно энергичным глюоном с относительной энергией, большей ε . В пределе малых ε и δ вероятность трехглюонного распада имеет дважды логарифмическую асимптотику $\sim \ln \varepsilon \ln \delta$, что отражает одновременное наличие как инфракрасной, так и коллинеарной расходимостей. В этом же пределе вероятность кварк-глюонного

распада содержит всего лишь логарифмическую расходимость $\sim \ln \delta$, соответствующую эффекту коллинеаризации конечных кварков. Следует заметить, что в выражении для трехглюонной вероятности содержится специальная функция – дилогарифм Эйлера, некоторые свойства которого приведены в Приложении В.

В третьей главе изучается четырехчастичный фермион-фотонный распад Z -бозона $Z \rightarrow \bar{f}f\gamma\gamma$, где под f понимается произвольный фермион.

В первом разделе дается обзор экспериментальных и теоретических работ, в которых исследовались четырехчастичные фермион-фотонные распады Z -бозона.

Во втором и третьем разделах приводятся амплитуда, а также дифференциальная и полная вероятности фермион-фотонного распада Z -бозона в приближении главных логарифмов. Для функции распределения по инвариантным массам фотонной $m_{\gamma\gamma}$ и фермионной $m_{\bar{f}f}$ пар получено простое аналитическое выражение, интерполирующее поведение этой функции в двух различных областях изменения указанных переменных: вдали от границы физической области $m_{\bar{f}f} + m_{\gamma\gamma} = m_Z$ и в непосредственной близости от этой границы. Подробности вычисления функции распределения в указанных выше областях приводятся в Приложении Г.

В четвертом разделе проводится анализ полученной функции распределения с учетом конкретных экспериментальных условий ускорителя LEP в CERN. В частности, указывается на зависимость рассматриваемого распределения от инвариантной массы фермион-фотонной пары $m_{f\gamma}$, минимальное значение кото-

рой в реальном эксперименте отличается для каждого фермиона. Оценки для относительной вероятности с образованием заряженных лептонов и жесткой фотонной парой $m_{\gamma\gamma} \leq 0,5m_Z$ следующие: $Br_e \simeq 2,1 \cdot 10^{-6}$, $Br_\mu \simeq 2,8 \cdot 10^{-6}$ и $Br_\tau \simeq 1,1 \cdot 10^{-6}$ при соответствующем выборе обрезания по лептон-фотонной паре $m_{e\gamma} \simeq 3$ ГэВ, $m_{\mu\gamma} \simeq 2$ ГэВ и $m_{\tau\gamma} \simeq 6$ ГэВ. Указано, что распады Z -бозона на пару жестких нейтрино и два фотона могут происходить, в основном, за счет излучения фотонов из начального состояния, и полученным нами выражением описаны быть не могут. При распадах с образованием кварков, в дальнейшем адронизирующихся в струи, отмечается преимущественное рождение верхних кварков $Br_u/Br_d \approx 4,7$. Условие, что обрезание по инвариантной массе кварк-фотонной пары $m_{q\gamma} \geq 6$ ГэВ, приводит к оценке $Br_{had} \leq 2,4 \cdot 10^{-6}$. Эти оценки согласуются с результатами экспериментов на LEP, где при статистике в несколько миллионов распадов события подобного типа наблюдаются. Следует обратить внимание на характерное гребнеобразное поведение функции распределения, что соответствует (в согласии с экспериментом) преимущественному распределению событий вблизи границы $m_{\gamma\gamma} + m_{\bar{f}f} \approx m_Z$. Сравнение сечений e^+e^- аннигиляции в области Z -резонанса в рассматриваемое конечное состояние, вычисленное в приближении главных логарифмов, находится в удовлетворительном согласии с результатами численного счета.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ

1. Вычислена дифференциальная вероятность четырехчастичного сильного

кварк-глюонного распада $n^3S_1(\bar{Q}Q) \rightarrow \bar{q}qgg$ тяжелого ортокваркония. Рассмотренный процесс идет в следующем по константе сильного взаимодействия α_s порядке теории возмущений по отношению к основному трехглюонному распаду $n^3S_1(\bar{Q}Q) \rightarrow 3g$. Полученное выражение представлено в явно релятивистски инвариантной форме с учетом масс конечных кварков.

2. Получены функции распределения по энергиям и углам разлета как для кварков, так и для глюонов. Эти распределения анализировались в применении к четырехструйным распадам J/ψ - и Υ -мезонов. Указывается на проявление коллинеарного усиления в кварковом распределении во всех четырехчастичных кварк-глюонных распадах за исключением одного $\Upsilon \rightarrow \bar{c}cgg$, где эффект коллинеаризации кварков полностью отсутствует как следствие влияния достаточно большой относительной массы c -кварка в этом распаде. Также указывается на наличие инфракрасного усиления как в кварковом, так и в глюонном распределениях.

3. Вычислены амплитуды и дифференциальные вероятности трехглюонного и кварк-глюонного распадов $n^1S_0(\bar{Q}Q) \rightarrow 3g, \bar{q}qg$ тяжелого паракваркония, идущих в следующем по α_s порядке теории возмущений по отношению к основному двухглюонному распаду $n^1S_0(\bar{Q}Q) \rightarrow 2g$. Полученные выражения представлены в компактной форме.

4. Анализ функций распределения трехчастичных распадов паракваркония показал, что как трехглюонное, так и кварк-глюонное (в пределе безмассовых конечных кварков) распределения содержат особенности полюсного типа, так что полные вероятности этих распадов расходятся. Это означает, что интеграль-

ная вероятность имеет физический смысл только при условии усечения фазового объема родившихся частиц, устраняющего инфракрасную и коллинеарную расходимости. Для кварков и глюонов такое усечение эквивалентно их адронизации в струи, определяемые простейшей моделью – конусом. Вычисленная в этой модели полная вероятность трехглюонного распада имеет дважды логарифмическую расходимость, обусловленную как испусканием мягкого глюона, так и эффектом коллинеаризации глюонов. Полная вероятность кварк-глюонного распада имеет всего лишь логарифмическую расходимость за счет коллинеаризации безмассовых кварков.

5. Исследовано влияние массы родившихся кварков на кварк-глюонный распад паракваркония. Вычисленное выражение для полной вероятности использовано для получения оценок для распадов η_c - и η_b -мезонов. Показано, что процесс $\eta_c \rightarrow \bar{s}sg$, идущий на партонном уровне с относительной вероятностью 12,4%, полностью насыщает наблюдаемые на эксперименте странные распады η_c -мезона вида $\eta_c \rightarrow \bar{K}K + X$ с суммарной относительной вероятностью $< 13,1\%$. Предсказываются значения в 13,4% и 2,5% для суммарных относительных вероятностей аналогичных распадов η_b -мезона вида $\eta_b \rightarrow \bar{K}K + X$ и $\eta_b \rightarrow \bar{D}D + X$.

6. Указывается на полное отсутствие коллинеарного усиления в распаде $\eta_b \rightarrow \bar{c}sg$, обусловленное влиянием относительно большой массы c -кварка $m_c/m_b \simeq 0,3$ в конечном состоянии. В кварковых функциях распределения для всех остальных распадов η_c - и η_b -мезонов наблюдается подобное усиление. В глюонных функциях распределения наблюдается значительно более слабо выра-

женное инфракрасное усиление, связанное с испусканием мягкого глюона.

7. В приближении главных логарифмов вычислены дифференциальная и полная вероятности редкого четырехчастичного распада Z -бозона $Z \rightarrow \bar{f}f\gamma\gamma$. Построена функция распределения по инвариантным массам фермионной $m_{\bar{f}f}$ и фотонной $m_{\gamma\gamma}$ пар, имеющая характерное “гребнеобразное” поведение. Указывается на преимущественное распределение событий вблизи границы $m_{\bar{f}f} + m_{\gamma\gamma} = m_Z$ физической области указанных инвариантных масс, что в действительности и наблюдается в соответствующих экспериментальных распределениях от распадов Z -бозона на LEP.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. Parkhomenko A.Ya., Smirnov A.D. On collinearization of quarks in the quark-gluon decays of heavy orthoquarkonia // Mod. Phys. Lett. - 1994. - V. A9, N 2. - P. 115-121.
2. Mikheev N.V., Parkhomenko A.Ya. Double radiative decay $Z \rightarrow f\bar{f}\gamma\gamma$ in the standard model // Mod. Phys. Lett. - 1994. - V. A9, N 13. - P. 1175-1181.
3. Михеев Н.В., Пархоменко А.Я. Дваждырадиационный распад $Z \rightarrow \ell^+\ell^-\gamma\gamma$ в стандартной теории // ЯФ. - 1994. - Т. 57, N 2. - С. 281-284.
4. Parkhomenko A.Ya., Smirnov A.D. Quark-gluon decay of heavy orthoquarkonium // In Proceedings of 5th and 6th Lomonosov Conferences on Elementary Particale Physics, ed. by A.I. Studenikin. Accademia Nazionale dei Lincei, Rome, Italy. 1994. - P. 210-214.

5. Parkhomenko A.Ya., Smirnov A.D. On collinearization of quarks in the quark-gluon decays of heavy orthoquarkonia // In Proceedings of the Eighth International Seminar "Quarks-94 eds. by D.Yu. Grigoriev, V.A. Matveev, V.A. Rubakov, T.D. Son, A.N. Tavkhelidze. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore. 1995. - P. 569-573.
6. Пархоменко А.Я., Смирнов А.Д. Кварк-глюонный распад тяжелого паракваркония // Тезисы юбилейной конференции “Актуальные проблемы естественных и гуманитарных наук. Физика”, ред. А.В. Кузнецов. - Ярославль, 1995. - С. 16-18.
7. Пархоменко А.Я., Смирнов А.Д. Угловые и энергетические распределения в трехчастичных распадах тяжелого паракваркония // Сборник тезисов областной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Современные проблемы естествознания. Физика”, ред. А.В. Кузнецов. - Ярославль, 1997. - С. 12-14.