

На правах рукописи

П-217

Пахомова Ольга Николаевна

НЕЛЕПТОННЫЕ РАСПАДЫ B_c -МЕЗОНОВ
В РЕЛЯТИВИСТСКИХ КВАРКОВЫХ МОДЕЛЯХ

01.04.16-Физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

О.Н. Пахомова

Дубна - 2003

Работа выполнена в Самарском государственном университете

Научный руководитель

доктор физико-математических наук,
профессор

Салеев Владимир Анатольевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
кандидат физико-математических наук

Баранов Сергей Павлович

Галкин Владимир Олегович

Ведущая организация

Институт физики высоких энергий, ГНЦ РФ, г.Протвино.

Защита состоится 24 декабря 2003 г. в 15 час. 00 мин.

на заседании диссертационного совета К 720.001.01

при Лаборатории теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова

Объединенного института ядерных исследований, 141980, г.Дубна,

Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан "24" ноября 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,



Федотов Сергей Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

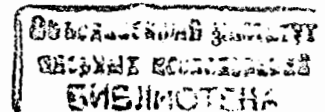
Диссертация посвящена исследованию основных адронных распадов B_c -мезона в рамках релятивистской кварковой модели и в модели жесткого одноглюонного обмена. Также рассмотрена проблема вычисления лептонных констант в потенциальном подходе нерелятивистской квантовой хромодинамики.

В основе диссертации лежат результаты работ, выполненных автором в период с 1999 по 2003 годы в Самарском государственном университете, а также во время стажировок в Отделе теоретической физики Института физики высоких энергий (г.Протвино), в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований (г.Дубна) и в группе ТНЕР Института физики при Гуттенбергском университете (г.Майнц).

Актуальность темы. B_c -мезон является тяжелым кварконием ($\bar{b}c$) с открытыми очарованием и прелестью. Это единственная долгоживущая система, состоящая из двух тяжелых кварков различного аромата (все состояния, содержащие t -кварк, вследствие его большой массы не являются стабильными). Семейство B_c -мезонов занимает промежуточное положение в спектре масс тяжелых кваркониев между чармонием ($c\bar{c}$) и боттомонием ($b\bar{b}$).

Системы со скрытым ароматом достаточно хорошо изучены экспериментально, в то время как статистика по B_c -мезонам, вследствие большого фона и трудностей в выделении сигнала, пока еще не велика. Теоретические методы, применяемые для изучения чармония и боттомония, можно распространить для описания свойств кваркония с открытым ароматом, а экспериментальное наблюдение системы ($\bar{b}c$) может послужить тестом для теоретического исследования и детального изучения сектора тяжелых кварков.

Семейство B_c -мезонов содержит 16 узких состояний, их спектр может быть достаточно надежно рассчитан, как в рамках КХД-мотивированных нерелятивистских потенциальных моделей, так и в правилах сумм КХД. Следовательно, экспериментальное описание свойств системы ($\bar{b}c$) может служить тестом самосогласованности для потенциальных моделей и правил сумм КХД, параметры которых (массы кварков, например) фиксировались



при фитировании спектроскопических данных чармония и боттомония.

Изучение семейства B_c может существенно улучшить количественные характеристики кварковых моделей и правил сумм что, в свою очередь, уточняет параметры электрослабой теории, способствует исследованию эффектов нарушения CP -инвариантности, полезно при извлечении значений элементов матрицы смешивания слабых заряженных токов тяжелых кварков. В данной работе рассматривается возможность извлечения угла Кабиббо-Кобаяши-Маскава γ из отношений амплитуд нелептонных распадов B_c -мезонов. Кроме того, изучение распадов B_c -мезонов может обеспечить информацией о массах b - и c -кварков, а также о лептонных константах, точке нормировки нелептонного слабого лагранжиана, что приведет к уменьшению теоретических неопределенностей, связанных главным образом с массами кварков и нормировкой слабого лагранжиана.

Большим плюсом при изучении мезонов с тяжелыми кварками является малость параметра Λ/m_Q (масса тяжелого кварка m_Q гораздо больше масштаба конфайнмента Λ), определяющего непертурбативные эффекты в адронах. В частности, малая величина константы КХД $\alpha_s \sim \frac{1}{\ln(m_Q/\Lambda)}$ определяет надежность вычислений жестких процессов с тяжелыми кварками по теории возмущений КХД.

Энергия связи тяжелого кварка в адроне мала, следовательно, мала виртуальность и движение тяжелого кварка в адроне можно считать нерелятивистским в ведущем приближении. Благодаря такому приближению, характеристики адронов, содержащих тяжелые кварки, с хорошей точностью описываются в рамках нерелятивистских потенциальных моделей.

Как и другие мезоны с открытым ароматом, основное состояние семейства $B_c^+(0^-)$ является долгоживущей частицей, распадающейся за счет слабого взаимодействия и имеющей время жизни с сравнимое с временами жизни B - и D - мезонов, что существенно отличает B_c от тяжелых кваркоניים η_c и Υ . Поэтому изучение распадов B_c мезона является той областью физики тяжелых кварков, в которой можно извлекать значительную информацию как о динамике КХД, так и о слабых взаимодействиях.

Слабые распады B_c -мезонов в основном идут по двум каналам: b -кварковый распад с c -кварком-спектатором и c -кварковый распад с b -квар-

ком-спектатором. Доминирующий вклад во время жизни B_c -мезона дают c -кварковые распады (около 70%) в то время как b -кварковый дает вклад примерно 20%. Наличие тяжелого валентного кварка-спектатора должно приводить к большой вероятности мод распада B_c с тяжелыми мезонами в конечном состоянии ($J/\psi(\eta_c)$, B_s^*). Большой выход J/ψ частиц интересен тем, что данная частица в лептонной моде распада обладает прекрасной экспериментальной сигнатурой, а измерение распада в возбужденные состояния чармония может дать ответ на вопрос о достоверности предсказаний КХД для распадов в возбужденные состояния. Теоретические предсказания для таких распадов были сделаны в данной работе.

Наблюдение первых 20 событий B_c -мезонов, сделанное в 1998 году коллаборацией CDF (FNAL), подтвердило существование B_c -мезона и открыло новые перспективы для его экспериментального изучения на коллайдерах LHC, Tevatron. На коллайдере LHC, светимость которого составит примерно $L = 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и энергия $\sqrt{s} = 14 \text{ ТэВ}$, ожидается около $4,5 \cdot 10^{10}$ событий рождения B_c -мезонов за год. По теоретическим оценкам, вероятность рождения S -волнового состояния в pp столкновениях при энергиях LHC достаточно велика и составит около 0.1 мкбн. Полное сечение рождения B_c -мезонов, с учетом каскадных распадов узких возбужденных состояний, предсказывается до 1 мкбн. При энергии коллайдера Tevatron ожидаемый выход должен быть меньше на порядок величины. Таким образом, предполагаемая статистика является удовлетворительной для изучения спектроскопии, исследования характеристик различных каналов распадов, а так же фиксирования времени жизни основного состояния.

Решение проблемы экспериментального открытия и изучения B_c -мезонов определяется, во-первых, описанием теоретических характеристик семейства B_c -мезонов (спектроскопии, механизмов образования и распадов). В диссертации были предсказаны ширины некоторых распадов таких кваркоניים с применением различных моделей и рассмотрена возможность детектирования как псевдоскалярных, так и векторных состояний по поляризации J/ψ .

Во-вторых, возможность открытия B_c -мезонов определяется экспериментальной методикой на действующих детекторах, которая позволила бы

выделить предсказанные теорией события с рождением и распадом B_c . К настоящему времени достигнут прогресс, связанный с использованием электронных вершинных детекторов, обладающих оперативным быстрым действием 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.

Прогресс в экспериментальном изучении распадов должен улучшить теоретическое понимание того, что же действительно происходит во взаимодействиях тяжелых кварков.

Научная новизна и практическая ценность работы. В схему вычисления лептонных констант тяжелых кваркониев в нерелятивистской КХД введен фактор нормировки тока нерелятивистских тяжелых кварков, позволяющий получить корректные значения лептонных констант при учете аномальной размерности коэффициента Вильсона в двух петлях. В модели жесткого одноглюонного обмена исследованы распады B_c -мезонов в орбитально возбужденные состояния чармония, а также в основное состояние с учетом поляризации, сделаны оценки для коэффициента асимметрии. Рассмотрены нелептонные распады $B_c \rightarrow D_s D^0 (\bar{D}^0)$ в релятивистской кварковой модели. Исследование механизмов распадов B_c -мезона и измерение их характеристик позволяет вести его целенаправленный экспериментальный поиск, который дает возможность существенно развить методы описания распадов, а также использовать полученные результаты для прецизионных исследований Стандартной Модели и возможных отклонений от ее предсказаний.

Достоверность полученных результатов. При расчетах использовались допустимые для рассматриваемых распадов приближения, в частности, пренебрежение энергией связи тяжелого кваркония, обмен жестким глюоном при больших импульсах отдачи, факторизация матричного элемента легкого кваркового тока. Конечные выражения для ширины распадов B_c -мезонов и коэффициента асимметрии приведены к максимально возможной простой форме и могут быть проверены непосредственно. При расчете наблюдаемых величин в главе 2 использовался метод интегрирования Монте-Карло. Ре-

зультаты, полученные в главе 3 хорошо согласуются с экспериментальными данными.

На защиту выносятся. Предсказания для характеристик нелептонных распадов B_c -мезона, физическая интерпретация полученных результатов. Схема вычисления лептонных констант в нерелятивистской КХД с учетом введенного фактора нормировки тока нерелятивистских тяжелых кварков.

Апробация результатов. Результаты, полученные в диссертации, обсуждались на семинарах кафедры Общей и теоретической физики Самарского государственного университета, на международной конференции НИИЯФ МГУ "Физика высоких энергий и квантовая теория поля" (2001, 2003), на семинаре Отдела теоретической физики Института физики высоких энергий (2001), на III Всероссийской конференции "Университеты России — фундаментальные исследования" (2002).

Публикации. Диссертация написана на основе 7 работ, 5 из которых опубликованы в центральной печати, 2 работы опубликованы в трудах международных конференций. Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения, библиографии из 129 наименований. Она содержит 10 таблиц, 10 рисунков. Общий объем диссертации составляет 97 страниц, напечатанных с использованием редактора \LaTeX 2 ϵ .

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *Введении* рассматривается физическая проблематика и обосновывается необходимость исследования B_c -мезонов, сформулированы цели работы, показаны научная новизна проводимых исследований и их практическая ценность. Кратко представлены содержание работы и ее апробация на конференциях.

Распады B_c -мезонов в S -, P - и D -волновые состояния чармония. В этой главе исследуются вероятности распадов B_c -мезона в различные со-

стояния чармония и спиновые эффекты в распадах векторного и псевдоскалярного состояния B_c -мезона в основное состояние чармония.

Особенностью нелептонных двухчастичных распадов, рассматриваемых в данной главе

$$B_c \rightarrow c\bar{c}^{[2s+1L_J]}\pi(\rho),$$

является довольно большой импульс отдачи чармония $c\bar{c}^{[2s+1L_J]}$, где s обозначает суммарный спин кварка и антикварка, L — орбитальное квантовое число, меняющееся от 0 до 2, а J — полный спин чармония. В рамках потенциальных моделей приближение перекрытия волновых функций начального и конечного тяжелых кваркониев для вычисления адронных форм-факторов может надежно применяться в области, где эти волновые функции не малы экспоненциально, т.е. если рассматриваемая амплитуда является достаточно мягкой и допустимо непертурбативное моделирование кварк-мезонной вершины в виде волновой функции. В то время как при больших импульсах отдачи поведение мезонных вершин для кварков, входящих в связанные состояния, значительно модифицируется из-за жестких глюонных поправок. Тогда экспоненциальное падение кварк-мезонных форм-факторов при больших импульсах отдачи заменяется степенным. В этом случае необходимо разделить жесткие и мягкие вклады в амплитуды.

В данной работе развита описанная выше техника вычисления для анализа, включающего S -, P - и D -волновые состояния $c\bar{c}$. Подход основан на том, что в тяжелом кварконии мы можем пренебречь энергией связи ϵ по сравнению с массой тяжелого кварка, т.к. по порядку величины она определяется кинетической энергией тяжелого кварка и антикварка в мезоне $\epsilon \sim m_Q \cdot v^2$, где v — относительная скорость кварков, $v \ll 1$, так что $\epsilon \ll m_Q$. Кроме того, область мягкой части волновой функции кваркония определяется размером мезона $r \sim 1/p_Q$ с импульсом кварка $p_Q \sim m_Q \cdot v$. Необходимо заметить, что надежное использование нерелятивистской волновой функции в амплитудах возможно в случае, когда виртуальности μ^2 меньше, чем $(m_Q \cdot v)^2$, в то время как при больших передачах импульса жесткие вклады в амплитуды с виртуальностями, большими чем $(m_Q \cdot v)^2$, должны быть описаны с учетом обмена жестким глюоном между конститuentами тяжелого кваркония.

Кроме того, факторизуется матричный элемент легкого кваркового тока в приближении вакуумного насыщения. Проводятся вычисления в рамках приближения жесткого одноглюонного обмена для составного оператора четырех тяжелых кварков, опуская возможные эффекты перенормировки. Учитываются пертурбативные поправки к эффективному нелептонному слабому лагранжиану.

В данной работе проверяются описанные выше условия разделения жестких и мягких вкладов и оцениваются неопределенности численных результатов, возникающие вследствие вариации массы очарованного кварка в пределах, задаваемых энергией возбуждения P - и D -уровней по отношению к S -уровню.

В рамках этого же подхода впервые рассмотрены распады B_c^* -мезонов, а так же рождение J/ψ -мезона в состояниях с различной поляризацией.

Поляризация J/ψ -мезонов в рассматриваемых распадах может быть определена через угловое распределение лептонов в распадах $J/\psi \rightarrow l^+l^-$, которое в системе покоя J/ψ имеет вид

$$\frac{d\Gamma}{d\cos\theta}(J/\psi \rightarrow l^+l^-) \sim 1 + \alpha \cos^2\theta,$$

где $\alpha = \frac{\Gamma_T - 2\Gamma_L}{\Gamma_T + 2\Gamma_L}$,

Γ_T и Γ_L — ширины распадов $B_c(B_c^*)$ -мезона на поперечно- и продольно-поляризованный J/ψ -мезон, θ — угол между вектором поляризации J/ψ и вектором импульса лептона.

Определена процедура расчета квадратов матричных элементов. Приведены значения параметров модели и представлены численные результаты. Проведена оценка суммарного выхода J/ψ в распадах B_c -мезона с учетом радиационных электромагнитных распадов P -уровней. Обсуждаются полученные результаты и их неопределенности. Громоздкие аналитические выражения для распадов с ρ мезоном в конечном состоянии приведены в Приложении.

Распады $B_c^+ \rightarrow D\bar{D}$ в релятивистской кварковой модели. Данная глава посвящена изучению нелептонных распадов B_c -мезона в рамках релятивистской кварковой модели и возможности их использования для извлечения угла Кабиббо–Кобаяши–Маскава γ .

Приведена схема расчета ширин распадов в релятивистской кварковой модели, основанной на эффективном лагранжиане взаимодействия между адронами и составляющими их кварками. Полученные результаты для вероятностей распадов B_c^- и B^- мезонов сведены в таблицу, проведен их сравнительный анализ с экспериментальными данными и теоретическими предсказаниями других подходов. Подтверждено, что вследствие ширин одного порядка, наиболее удобными для извлечения угла смешивания γ из унитарного треугольника Кабиббо-Кобаяши-Маскава являются каналы распада $B_c \rightarrow D_s D^0$.

Лептонные константы тяжелых кваркониев в потенциальном подходе нерелятивистской КХД. В этой главе рассматривается схема вычисления лептонных констант тяжелых кваркониев.

В приближении нерелятивистской КХД вычисление лептонных констант для тяжелых кваркониев с двухпетлевой точностью требует сшивки кварковых токов в нерелятивистской КХД с токами в полной КХД.

$$J_\nu^{QCD} = \mathcal{K}(\mu_{\text{hard}}; \mu_{\text{fact}}) \cdot \mathcal{J}_\nu^{NRQCD}(\mu_{\text{fact}})$$

Где $\mathcal{K}(\mu_{\text{hard}}; \mu_{\text{fact}})$ — зависящий от масштаба вычислений в нерелятивистской КХД коэффициент Вильсона, который связывает ток нерелятивистских кварков в ведущем порядке по обратной массе тяжелого кварка с электромагнитным током тяжелых кварков в полной КХД. Аномальная размерность этого коэффициента \mathcal{K} известна с точностью до двух петель. В итоге, операторное равенство токов в полной КХД и в нерелятивистской КХД однозначно определено с двухпетлевой точностью. Масштаб μ_{hard} задает точку нормировки для сшивки нерелятивистской КХД с полной КХД, то время как μ_{fact} обозначает точку нормировки для расчетов по теории возмущений в первой.

Лептонная константа тяжелого векторного кваркония определяется соотношением:

$$\langle 0 | J_\nu^{QCD} | \bar{Q}Q, \lambda \rangle = \epsilon_\nu^\lambda f_{\bar{Q}Q} M_{\bar{Q}Q},$$

где λ обозначает поляризацию векторного состояния ϵ_ν .

В полной КХД электромагнитный ток кварков сохраняется, в то время как в нерелятивистской КХД ток \mathcal{J}_ν^{NRQCD} в силу ренорминвариантности

физических величин имеет ненулевую аномальную размерность, так что

$$\langle 0 | \mathcal{J}_\nu^{NRQCD}(\mu) | \bar{Q}Q, \lambda \rangle = \mathcal{A}(\mu) \epsilon_\nu^\lambda f_{\bar{Q}Q}^{NRQCD} M_{\bar{Q}Q},$$

Фактор \mathcal{A} , обеспечивающий ренорминвариантность результатов, включен в рассмотрение впервые. При этом приходится вводить масштаб нормировки \mathcal{A} , область разумного изменения которого ограничена физическими характеристиками рассматриваемой системы кварков. В результате, сделанные оценки лептонных констант кваркониев являются стабильными в некотором интервале изменения масштаба сшивки КХД и нерелятивистской КХД μ_{hard} и точки пертурбативных расчетов в нерелятивистской КХД μ_{fact} .

Лептонная константа тяжелого кваркония для тяжелых нерелятивистских кварков задается через волновую функцию в нуле. Значение волновой функции в ведущем приближении определяется из решения уравнения Шредингера со статическим потенциалом.

Константы $f_{\bar{Q}Q}$ и $f_{\bar{Q}Q}^{NRQCD}$ связаны следующим образом:

$$f_{\bar{Q}Q} = f_{\bar{Q}Q}^{NRQCD} \mathcal{A}(\mu_{\text{fact}}) \cdot \mathcal{K}(\mu_{\text{hard}}; \mu_{\text{fact}}),$$

и для сшивки аномальная размерность фактора $\mathcal{A}(\mu_{\text{fact}})$ должна компенсировать аномальную размерность фактора $\mathcal{K}(\mu_{\text{hard}}; \mu_{\text{fact}})$

Фактор $\mathcal{A}(\mu)$ задает нормировку матричного элемента для тока нерелятивистских кварков, выраженного через волновую функцию двухчастичного кваркового состояния (в ведущем приближении нерелятивистской КХД). Очевидно, что ток нерелятивистских кварков в таком подходе отфакторизован от кварк-глюонного моря, которое является неотъемлемым атрибутом адронного состояния, и это физическое состояние, вообще говоря, лишь приближенно может быть представлено как двухкварковое связанное состояние. В случае рассмотрения лептонной константы тяжелого кваркония приближение нерелятивистской КХД требует введения нормировочного фактора $\mathcal{A}(\mu)$, зависящего от масштаба.

Уравнение ренормгруппы легко интегрируется, так что

$$\mathcal{A}(\mu) = \mathcal{A}(\mu_0) \left[\frac{\beta_0 + \beta_1 \frac{\alpha_s^{\overline{\text{MS}}}(\mu)}{4\pi}}{\beta_0 + \beta_1 \frac{\alpha_s^{\overline{\text{MS}}}(\mu_0)}{4\pi}} \right]^{\frac{\gamma^{[2]}}{2\beta_1}},$$

где $\beta_0 = \frac{11}{3}C_A - \frac{4}{3}T_F n_f$, а $\beta_1 = \frac{34}{3}C_A^2 - 4C_F T_F n_f - \frac{20}{3}C_A T_F n_f$.

Неизвестная константа интегрирования может быть определена так, чтобы при пекме μ_0 мы имели бы $\mathcal{A}(\mu_0) = 1$. Таким образом, мы получаем параметрическую зависимость вычислений лептонной константы тяжелого кваркония в NRQCD от масштаба μ_0 , который имеет простую интерпретацию: нормировка матричного элемента тока нерелятивистских тяжелых кварков в точке μ_0 задается волновой функцией двухкваркового связанного состояния. В других точках $\mu \neq \mu_0$ необходимо вводить фактор $\mathcal{A}(\mu) \neq 1$, так что аппроксимация адронного состояния двухкварковым перестает быть точной.

Дальнейшая задача состоит в вычислении лептонных констант для боттомония, чармония и анализе полученных результатов, в частности, исследуется зависимость от шкалы нормировки и обсуждаются возникающие неопределенности.

Заключение. В заключении подытожены основные результаты, представленные в диссертации.

Приложение. Приведены итоговые формулы для ширин распадов B_c -мезонов в орбитально-возбужденные состояния чармония с ρ -мезоном в конечном состоянии.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- В модели жесткого одноглюонного обмена получены ширины распадов B_c -мезонов в орбитально-возбужденные состояния чармония (S -, P -, D -волны) с $\pi(\rho)$ -мезонами в конечном состоянии. Показано, что выход P - и D -волновых J/ψ -мезонов в распадах $B_c \rightarrow c\bar{c}^{[2s+1L_J]}\pi(\rho)$ существенно больше, чем S -волновых.
- В модели жесткого одноглюонного обмена исследована поляризация основного состояния чармония, рождающегося в нелептонных распадах $B_c(B_c^*) \rightarrow J/\psi\pi(\rho)$ -мезонов. Показано, что в распадах псевдоскалярного состояния B_c -мезона рождаются продольно поляризованные J/ψ -мезоны, в то время как в распадах векторного состояния — рождаются поперечно поляризованные.
- В схему вычислений лептонных констант тяжелых кваркониев в нерелятивистской КХД введен фактор нормировки тока нерелятивистских тяжелых кварков, позволяющий получить корректные значения лептонных констант при учете аномальной размерности коэффициента Вильсона в двух петлях.
- Сделаны теоретические оценки для f_Υ и $f_{J/\psi}$ в рамках потенциального подхода нерелятивистской КХД. Проведено исследование стабильности полученных результатов и сравнение с экспериментальными данными.
- В рамках релятивистской кварковой модели, получены ширины для нелептонных распадов B_c^+ -мезона. Показано, что относительные вероятности распадов $B_c^+ \rightarrow D_s^+ D^0$ и $B_c^+ \rightarrow D_s^+ \bar{D}^0$ являются величинами одного порядка, что позволяет использовать данные распады для экспериментального извлечения угла Кабиббо-Кобаяши-Маскава γ .

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Пахомова О.Н., Салеев В.А. Спиновые эффекты в двухчастичных адронных распадах B_c -мезонов // Ядерная физика. 2000. Т.63. No 11. С.2091–2095.
2. Kiselev V.V., Pakhomova O.N., Saleev V.A. Two-particle decays of the B_c -meson into charmonium states // Journal of Physics G. 2002. V.28. P.595–606.
3. Kiselev V.V., Likhoded A.K., Pakhomova O.N., Saleev V.A. Leptonic constants of heavy quarkonia in a potential approach of nonrelativistic QCD // Physical Review D. 2002. V.65. P.034013-1–034013-10.
4. Киселев В.В., Пахомова О.Н., Салеев В.А. Двухчастичные распады B_c -мезонов в орбитально-возбужденные состояния чармония // Вестник СамГУ. 2002. Т.2. С.100–113.
5. Kiselev V.V., Pakhomova O.N., Saleev V.A. B_c -meson decays into orbitally excited charmonium states // Proceedings XVIth Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory. 2002. P.288–295.
6. Киселев В.В., Пахомова О.Н., Салеев В.А. Двухчастичные распады B_c -мезонов в состояния чармония // Сборник трудов научной сессии МИФИ–2002. III Всероссийская конференция "Университеты России — фундаментальные исследования. Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2002. С.105–106.
7. Ivanov M.A., Körner J.G., Pakhomova O.N. The nonleptonic decays $B_c^+ \rightarrow D_s^+ \bar{D}^0$ and $B_c^+ \rightarrow D_s^+ D^0$ in a relativistic quark model // Physics Letters B. 2003. V.555. P.189–196.