



Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Государственный научный центр РФ-
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ»
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»

2014-02

На правах рукописи

Пославский Станислав Владимирович

**Рождение P -волновых кваркониев в адронных
взаимодействиях**

01.04.02 – теоретическая физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Протвино 2014 г.

Работа выполнена в отделе теоретической физики ФГБУ «ГНЦ РФ – Институт физики высоких энергий» НИЦ «Курчатовский институт» (г. Протвино).

Научный руководитель — доктор физико-математических наук, профессор А.К. Лиходед (ФГБУ ГНЦ ИФВЭ, г. Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор А.Л. Катаев (ИЯИ РАН, г. Троицк), доктор физико-математических А.В. Бережной (НИИЯФ МГУ, г. Москва).

Ведущая организация — ФГБУ «Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук», г. Москва.

Защита диссертации состоится «___» _____ 2014 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 142281, г. Протвино, пл. Науки, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт».

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий
НИЦ «Курчатовский институт», 2013

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Первая частица из семейства тяжелых кваркониев — J/ψ — была открыта в 1974 году двумя независимыми экспериментальными группами: группой под руководством Бертона Рихтера в Брукхейвенской национальной лаборатории [1] и группой под руководством Сэмуэля Тинга в Национальной ускорительной лаборатории SLAC (Стэнфорд) [2]. Частица J/ψ представляет собой связанное состояние очарованного кварка и антикварка $c\bar{c}$, и её открытие стало одной из важнейших вех в понимании сильного взаимодействия, в частности, оно послужило первым экспериментальным доказательством существования четвертого и самого тяжелого (из известных на тот момент) кварка — c -кварка, существование которого было предсказано в работе Шелдона Глэшоу, Джона Илиополуса и Лучиано Майани для построения единой теории электрических и слабых взаимодействий [3]. Аналогичные экспериментальные исследования проведенные в 1977 году по руководством Леона Ледермана (Национальная ускорительная лаборатория им. Энрико Ферми, Чикаго) [4] привели к открытию первой частицы из семейства боттомониев — связанных состояний b -кварка и антикварка — Υ мезона, что послужило первым доказательством существования третьего поколения кварков.

На сегодняшний момент, накоплено огромное количество экспериментальных данных по рождению и распадам тяжелых кваркониев. Существует несколько причин, по которым пристальный интерес к исследованиям кваркониев прикован как со стороны экспериментаторов, так и со стороны теоретиков. В первую очередь, это связано с тем, что нерелятивистская природа этих состояний позволяет успешно теоретически описывать такие системы в рамках эффективных теорий поля, и в первую очередь нерелятивистской Квантовой Хромодинамики. В тоже время многие кваркониевые системы обладают очень чистыми экспериментальными сигналами, что делает возможным детальное изучение их свойств на огромной экспериментальной статистике существующих адронных коллайдеров. Наконец, крайне полезным является то факт, что большая масса c - и b - кварков естественным образом позволяет отфакторизовать эффекты малых расстояний —

пертурбативные эффекты, от эффектов больших расстояний связанных с проблемой конфайнмента КХД; это свойство принято называть теоремой о факторизации.

Среди экспериментов по рождению кваркониев при высоких энергиях наибольшее количество данных накоплено по рождению S -волновых кваркониев — J/ψ и Υ . Первые попытки описания процессов рождения привели к созданию модели цветового синглета (*color singlet model*, сокращенно CSM) [5–8], а также модели испарения цвета (*color evaporation model*, сокращенно CEM) [9, 10]. Большой обзор успехов и неудач этих моделей до 1993 года можно найти в работе [11].

Появление данных по инклюзивному рождению J/ψ , $\psi(2S)$, $\Upsilon(1S)$, χ_c на больших поперечных импульсах на коллайдере Тэватрон в 1990-х годах [12–14] продемонстрировало, что экспериментальные сечения примерно в два раза выше существовавших на тот момент теоретических предсказаний, и более того, имели отличную форму p_T -спектра. Аналогичные расхождения между теорией и экспериментом были обнаружены в экспериментах с фиксированной мишенью.

Важным шагом в понимании процессов с участием тяжелых кварков было построение эффективной нерелятивистской Квантовой Хромодинамики (НРКХД) [15, 16] данное в работе [17] (также имеет общепринятое название модели цветового октета — *color octet model*, сокращенно COM). Дальнейшее развитие этих идей в применении к процессам рождения кваркониев [18, 19] позволило добиться приемлемого согласия с экспериментом. В формализме НРКХД факторизация достигается путем введения промежуточных состояний $[q\bar{q}]$ с квантовыми числами отличными от наблюдаемых, которые переходят в наблюдаемые состояния за счет взаимодействия с глюонами; при этом вероятности переходов описываются вакуумными средними четырех-фермионных операторов, которые являются непертурбативными параметрами модели. Эти промежуточные состояния возникают из разложения фокковского столбца наблюдаемой в ряд по относительной скорости v кварка и антикварка в мезоне, которая является малым параметром в разложении; наличие такого малого параметра позволяет ограничиваться конечным числом слагаемых в разложении.

Одни из последних результаты фитирования и сравнения большого числа недавних экспериментальных данных по рождению J/ψ

в экспериментах включающих адронное рождение, фоторождение и рождение в e^+e^- аннигиляции показали, что в целом, предсказания НРКХД для спектра S -волновых чармониев находятся в согласии с экспериментом. Однако, наблюдаемую в эксперименте поляризацию J/ψ объяснить в рамках НРКХД не удается [20–22].

В то время как для J/ψ и Υ накоплено значительное число экспериментальных данных, для P -волновых кваркониев ($\chi_{c0,1,2}$ и $\chi_{b0,1,2}$) данных значительно меньше. До запуска Большого адронного коллайдера (БАК) единственными данными о p_T -спектрах в рождениях χ_c были данные эксперимента CDF по p_T -спектру J/ψ мезонов полученных из радиационных распадов $\chi_{c1,2}$ [14] и данные CDF по отношению сечений χ_{c2}/χ_{c1} в зависимости от p_T [23]. В последние годы появилось много данных с БАК [24–28]. Анализ и фитирование всех имеющихся данных по рождению P -волновых кваркониев и построение теоретических предсказаний для будущего запуска БАК в данной работе проведен впервые. Такой анализ становится особенно актуальным в свете недавнего открытия новой частицы $\chi_b(3P)$ [29–31].

В ближайшие годы планируется запуск нового масштабного эксперимента по исследованию чармониев — PANDA (*anti-Proton ANnihilation at DArmstadt*) [32], строительство которого идет в ускорительном центре FAIR в Дармштадте, Германия. В этом эксперименте чармонии будут рождаться в реакциях протон-антипротонной аннигиляции. Для целей PANDA необходимо иметь оценки суммарных сечений рождения J/ψ и модель симуляции их рождения в условиях PANDA. В реакции $p\bar{p}$ прямое рождение J/ψ подавлено из закона сохранения зарядовой четности, поэтому основным источником J/ψ будут радиационные распады $\chi_{c1,2}$. Одной из актуальных задач данной работы было получение предсказаний сечений рождения $\chi_{c1,2}$ в PANDA и создание программ для симуляции этих процессов в условиях реального эксперимента.

Аналитические расчеты с которыми приходится иметь дело в физике высоких энергий, и в частности при вычислении сечений рождений тяжелых кваркониев, оказываются слишком громоздкими для их проведения вручную. Сегодня для этих целей в физике используются специализированные компьютерные программы — системы компьютерной алгебры (СКА). Исторически, первая такая система Schoonship

была создана в 1963 году Мартинусом Вельтманом для вычисления петлевых интегралов в калибровочных теориях поля (работа которая в конечном счете была удостоена Нобелевской премии 1999 года). С тех пор было создано много программ для аналитических вычислений в физике высоких энергий. С развитием компьютерной техники значительно выросла и сложность рассматриваемых задач. В связи с этим, в последнее время стала актуальной тема развития новых компьютерных алгоритмов для работы с большими выражениями. В рамках данной работы, была создана система компьютерной алгебры — Redberry [33], которая предназначена для аналитических расчетов в физике высоких энергий. Все аналитические расчеты представленные в данной работе выполнены с использованием Redberry.

Цель диссертационной работы

Целью данной работой является выяснение механизмов рождения P -волновых кваркониев ($\chi_{c0,1,2}$ и $\chi_{b0,1,2}$) в адронных взаимодействиях:

1. Построение теоретической модели рождения P -волновых чармониев χ_c в экспериментах при высоких энергиях и получение теоретических предсказаний сечений рождения ускорителях Тэватрон и БАК
2. Анализ экспериментальных данных по рождению состояний χ_c в адронных экспериментах при высоких энергиях и определение непертурбативных параметров теоретической модели
3. Получение теоретических предсказаний p_T -спектров сечений рождения $\chi_b(nP)$ для экспериментов на ускорителе БАК и получение предсказаний относительных выходов состояний $\chi_b(nP)$ с различными значениями радиального квантового числа n .
4. Получение теоретических предсказаний сечений рождения χ_c в реакциях протон-антипротонной аннигиляции при низких энергиях, и в частности построение Монте-Карло генератора рождения чармониев для практического применения коллаборацией эксперимента PANDA

Для решения первой задачи были проведены вычисления сечений рождения $q\bar{q}$ пары с различными квантовыми числами в рамках НРКХД как в синглетном так и в октетном по цвету состояниях. Было проведено численное интегрирование партонных сечений со структурными функциями глюонов для различных кинематических режимов, отвечающих различным экспериментальным установкам. Таким образом был найден p_T -спектр различных адронных каналов реакции.

Для решения второй задачи было проведено фитирование имеющихся экспериментальных данных на основе критерия Пирсона χ^2 . В результате была получена "вилка" на непертурбативные параметры НРКХД.

Для решения третьей задачи, непертурбативные матричные элементы боттомониевых переходов были оценены на основе результатов предыдущего пункта с использованием правил скейлинга НРКХД.

Для решения четвертой задачи были вычислены сечения образования χ_c в кварк-антикварковой аннигиляции и создан программный код для симуляции процессов инклюзивного рождения этих частиц в условиях эксперимента PANDA.

Научная новизна

Теоретический анализ процессов рождения P -волновых кваркониев с учетом высших по относительной скорости кварков вкладов НРКХД проведен впервые. Анализ и одновременное фитирование всей совокупности доступных экспериментальных по спектрам рождения χ_c проведены впервые. Теоретические предсказания p_T -спектров $\chi_{b0,1,2}$ для установок LHCb и ATLAS и $\chi_{c1,2}$ для установки PANDA получены впервые. Для проведения аналитических расчетов в физике высоких энергий разработана новая система компьютерной алгебры, с помощью которой проведены все аналитические расчеты в данной работе.

Практическая значимость

Теоретические предсказания p_T -спектров сечений рождения χ_c и $\chi_b(nP)$ имеют большую практическую значимость как с точки зрения теории, так и с точки зрения эксперимента для установления механиз-

мов рождения P -волновых кваркониев и прояснения структуры КХД в целом. Данные результаты использовались и могут быть использованы в дальнейшем экспериментальными группами ускорителя БАК для сравнения теории и эксперимента. Полученные предсказания относительных выходов состояний $\chi_b(nP)$ с различными значениями радиального квантового числа n имеют практическую значимость для установления эффективностей регистрации состояний с различными n . Полученные предсказания сечений и разработанный Монте-Карло генератор событий для эксперимента PANDA имеют прямое практическое применение и уже используются коллаборацией PANDA для моделирования событий рождения чармониев и оценке эффективностей системы калориметрии PANDA по регистрации и реконструкции нейтральных частиц. Наконец, разработанная система компьютерной алгебры Redberry, с помощью которой проводились все аналитические расчеты в данной статье, имеет прямое практическое применение для проведения сложных аналитических расчетов в физике высоких энергий с использованием компьютера.

Результаты выносимые на защиту

Следующие положения диссертации выносятся на защиту:

1. Продемонстрировано, что в сечение рождения $\chi_{c1,2}$ в адронных экспериментах при высоких энергиях доминирующим оказывается синглетный по цвету вклад
2. Показано, что наиболее чувствительным инструментом для нахождения относительных вкладов октетных состояний в сечения рождения кваркониев является отношение χ_{c2}/χ_{c1}
3. Анализ экспериментальных данных по адронному рождению χ_c позволил найти две независимые области параметров модели; для точного определения допустимой области НКХД параметров данных недостаточно
4. Получены предсказания сечений рождения $\chi_b(nP)$ для ускорителя БАК; показано, что отношение сечений боттомониев $\sigma(\chi_{b2})/\sigma(\chi_{b1})$ может быть получено с хорошей точностью из отношения чармониев $\sigma(\chi_{c2})/\sigma(\chi_{c1})$ заменой импульсной шкалы $p_T \rightarrow (M_{\chi_b}/M_{\chi_c})p_T$

5. Получены предсказания и разработан Монте-Карло генератор рождения $\chi_{c1,2}$ в протон-антипротонной аннигиляции при низких энергиях в эксперименте PANDA

Апробация работы

Апробация диссертации прошла на семинаре отжела теоретической физики ИФВЭ 15 апреля 2014 г. Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались на нескольких рабочих встречах коллаборации PANDA, коллаборации LHCb, ежегодной сессии РАН, семинарах ИФВЭ, семинаре ОИЯИ и семинаре кафедры теоретической физики МГУ. Работа автора диссертации поддержана грантами РФФИ, Президента РФ и грантом ассоциации Гельмгольца (Германия) и Росатома.

Публикации

По теме данной диссертации опубликовано 4 статьи в рецензируемых журналах [33–37].

Личный вклад автора

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают результаты, которые получены при определяющем участии соискателя. Вся работа по написанию программ для выполнения анализа моделируемых процессов и получения результирующих распределений была выполнена лично автором диссертации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 111 страниц, из них 98 страниц текста, включая 13 рисунков и 9 таблиц. Список литературы включает 101 наименование на 13 страницах.

Содержание работы.

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе диссертации рассматриваются процессы рождения χ_{cJ} -мезонов в адронных взаимодействиях при высоких энергиях (порядка ТэВ).

Во введении к первой главе дан краткий обзор основных положений эффективной нерелятивистской Квантовой Хромодинамики (НРКХД) в применении к описанию процессов рождения тяжелых кваркониев. Наиболее существенный вывод НРКХД заключается в том, что фоковский стодбец наблюдаемого мезона $|^3P_J\rangle$ может быть представлен в виде суперпозиции состояний кварк-антикварковой пары $c\bar{c}$ с различными квантовыми числами (в том числе как в синглете так и в октете по цвету):

$$\begin{aligned} |\chi_{cJ}\rangle &= \langle \mathcal{O}^{\chi_{cJ}}[^3P_J^{[1]}] \rangle |^3P_J^{[1]}\rangle + \langle \mathcal{O}^{\chi_{cJ}}[^3S_1^{[8]}] \rangle |^3S_1^{[8]}g\rangle + \\ &+ \langle \mathcal{O}^{\chi_{cJ}}[^1P_1^{[8]}] \rangle |^1P_1^{[8]}g\rangle + \sum_{J'} \langle \mathcal{O}^{\chi_{cJ}}[^3P_{J'}^{[8]}] \rangle |^3P_{J'}^{[8]}gg\rangle + . \end{aligned} \quad (1)$$

При этом различные состояния из разложения (1) могут быть организованы в ряд по относительной скорости v кварков в мезоне, которая является малым параметром разложения.

В разделе 1.2 приведены диаграммы Фейнмана процессов рождения кварк-антикварковой пары в партонной реакции $g + g \rightarrow g + |^{(2S+1)}L_J^{[1,8]}\rangle$ и общий вид амплитуд соответствующих процессов. В этом разделе детально разобрана базовая техника расчета сечений процессов рождения тяжелых кваркониев в рамках НРКХД и приведены необходимые формулы, используемые в дальнейшей части работы.

В разделе 1.3 аналитически вычислены дифференциальные сечения партонных процессов рождения кварк-антикварковой пары $g + g \rightarrow g + |^{(2S+1)}L_J^{[1,8]}\rangle$. При этом вычисления проведены с использованием двух различных формализмов. С одной стороны, спиральные амплитуды и затем дифференциальные сечения были вычислены с

использованием фиксированных векторов поляризации; разработанный формализм ковариантных векторов поляризации представлен в *подразделе 1.3.1*. С другой стороны, для независимой проверки результатов, просуммированные/усредненные по поляризациям дифференциальные сечения были также вычислены с использованием аксиальной калибровки КХД; в последнем подходе аксиальная калибровка КХД использовалась для того, чтобы избежать необходимости учитывать диаграммы с духами Фаддеева-Попова. Полученные в работе результаты совпадают с результатами работ [18, 19, 38, 39], однако не совпадают с [40]; последнее вызвано тем, что авторы работы [40] работая в калибровке Лоренца не учли вклады от диаграмм с духами Фаддеева-Попова. В *подразделе 1.3.2* представлены квадраты спиральных амплитуд процессов.

В *разделе 1.4* проанализированы основные свойства сечений адронных реакций процессов $p+p \rightarrow |(2S+1)L_J^{[1,8]} \rangle + X$. В частности, в *подразделе 1.4.1* дана таблица (см. Таб. 1) асимптотического поведения различных состояний при малых и больших поперечных импульсах. При этом интересным оказывается тот факт, что сечение состояния ${}^3P_1^{[1]}$ зануляется при малых p_T (в отличие от ${}^3P_1^{[2]}$). Такое поведение объясняется теоремой Ландау-Янга, которая запрещает рождение аксиального тока из двух безмассовых векторов, что приводит к занулению вершины $g^*g^* \rightarrow |{}^3P_1^{[1]}\rangle$ и, как следствие, сокращению расходимости вызванной пропагатором \hat{t} - и \hat{u} -канальных глюонов.

	${}^3P_1^{[1]}$	${}^3P_{0,2}^{[1]}$	${}^1P_1^{[8]}, {}^3P_{J'}^{[8]}$	${}^3S_1^{[8]}$
$p_T \ll M$	$\sim p_T$	$\sim 1/p_T$	$\sim 1/p_T$	$\sim p_T$
$p_T \gg M$	$\sim 1/p_T^5$	$\sim 1/p_T^5$	$\sim 1/p_T^5$	$\sim 1/p_T^3$

Таблица 1: Поведение дифференциального сечения адронной реакции $d\sigma/dp_T$ при больших и малых значениях поперечного импульса.

В *разделе 1.5* проводится детальный анализ доступных экспериментальных данных по рождению χ_c в ускорителях Тэватрон и БАК. В данном разделе проведен фит экспериментальных данных по p_T -зависимости отношения $\sigma(\chi_{c2})/\sigma(\chi_{c1})$ (см. Рис. 2). При этом обнаружено, что экспериментальные данные разбиваются на две группы

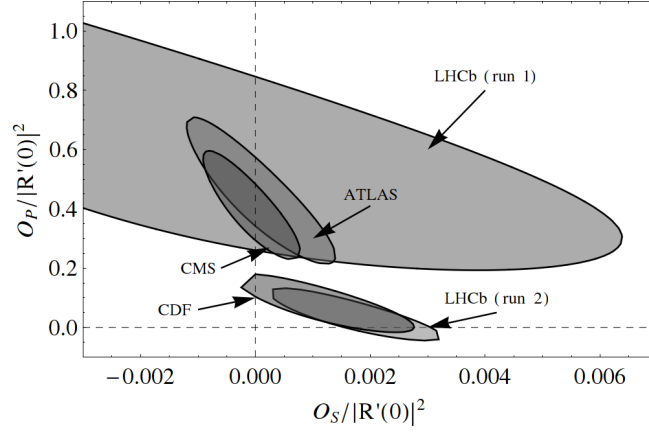


Рис. 1: Допустимые области изменения октетных параметров исходя из фита экспериментальных данных по p_T -зависимости отношения $\sigma(\chi_{c2})/\sigma(\chi_{c1})$.

(см. Рис. 1), что свидетельствует о необходимости в дополнительных измерениях в более широких интервалах p_T . Показано, что отношение $\sigma(\chi_{c2})/\sigma(\chi_{c1})$ является наиболее чувствительным индикатором роли различных октетных вкладов в разложении (1). Далее в данном разделе проведен дополнительный фит данных по p_T -спектрам рождения χ_c в эксперимента CDF. Таким образом получены все непертурбативные НРКХД параметры из разложения (1) (для каждой из групп данных). Из полученных результатов следует, что доминирующий вклад в сечение рождения χ_c дает синглетное состояние (см. Рис. 3). На Рис. 4 показаны предсказания сечений рождения $\chi_{c1,2}$ в сравнении с экспериментальными данными ATLAS [27].

В разделе 1.6 приведены выводы к первой главе. Результаты, полученные в данной главе, опубликованы в работах [A2,A3,A5].

Во второй главе диссертации рассматриваются процессы рождения $\chi_{bJ}(nP)$ -мезонов в адронных взаимодействиях при высоких энергиях.

Во введении ко второй главе приведены отличительные особенности описания процессов рождения боттомониев в рамках НРКХД.

В разделе 2.2 получены предсказания p_T -спектров рождения $\chi_{b1,2}(nP)$ для кинематических условий установок LHCb и ATLAS. Поскольку

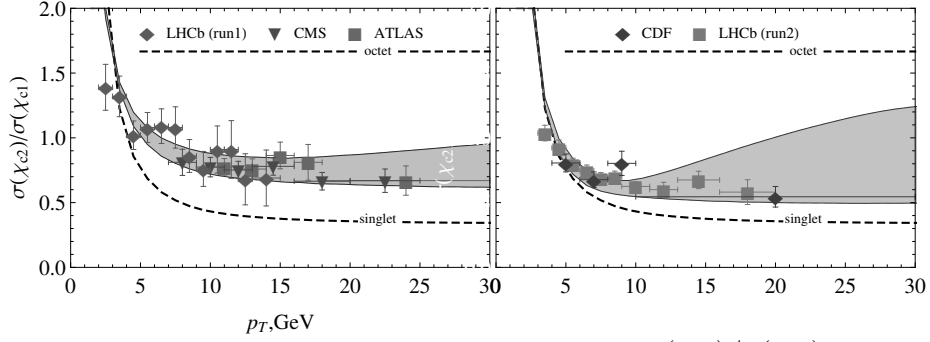


Рис. 2: Теоретические предсказания отношения $\sigma(\chi_{c2})/\sigma(\chi_{c1})$ с параметрами фита данных LHCb [24], CMS [28] и ATLAS [27] (слева) и CDF [23] и LHCb [26] (справа).

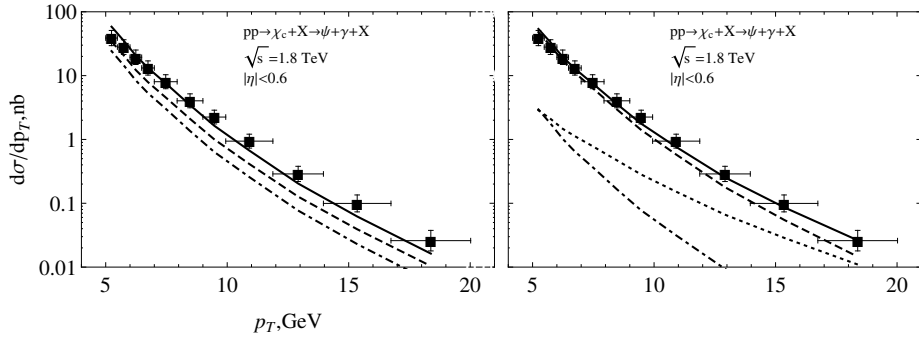


Рис. 3: Вклады различных состояний из (1) в суммарное сечение рождения J/ψ в радиационных распадах χ_c мезонов в эксперименте CDF [14] с параметрами полученными из фита двух групп данных (слева — [14, 24, 27, 28], справа — [14, 23, 26]). Сплошная линия — суммарное сечение, штриховая — вклад синглета, пунктирная — вклад S -волнового октета, штрих-пунктирная — P -волнового октета.

экспериментальных данных по p_T -зависимости сечений χ_b пока не получено, для боттомониев невозможно определить непертурбативные параметры из разложения (1) из эксперимента. Для оценки этих параметров, были использованы размерные соображения и правила отбора

НРКХД по относительной скорости кварков в мезоне. Полученные предсказания представлены на Рис. 6.

В разделе 2.3 проведен более детальный анализ свойств отношения $\sigma(\chi_2)/\sigma(\chi_1)$. В частности, исходя из простых размерных соображений получена простая приближенная формула связывающая p_T -зависимость этого отношения для чармониев и боттомониев: отношение сечений для боттомониев можно получить из отношения сечений для чармониев путем простой перешкаловки (скейлинга) $p_T \rightarrow (M_{\chi_b}/M_{\chi_c}) \times p_T$. При этом показано, что в рамках НРКХД это приближенное соотношение становится тем точнее, чем сильнее подавлены высшие по скорости октетные вклады (P -волновые). Как показал анализ предыдущей главы, такое подавление действительно имеет место. На Рис. 5 показаны теоретические предсказания отношения $\sigma(\chi_{b2})/\sigma(\chi_{b1})$ полученные как скейлингом, так и пересчетом из раздела 2.2. Также в разделе 2.3 обсуждается важное свойство отношения $\sigma(\chi_2)/\sigma(\chi_1)$ — его рост в области малых p_T . Как показано в работе, этот рост обусловлен теоремой Ландау-Янга и вероятно должен проявляться во всех порядках теории возмущений.

В разделе 2.4 даются теоретические предсказания относительно полных сечений рождения различных радиальных возбуждений $\chi_{bJ}(nP)$. В частности получены следующие оценки полных сечений:

$$\begin{aligned} (\text{LHCb}) \quad & \frac{\sigma[\chi_{b1}(nP)]}{|R'_n(0)|^2} = 34.4 \frac{\text{nb}}{\text{GeV}^5} & \frac{\sigma[\chi_{b2}(nP)]}{|R'_n(0)|^2} = 43 \frac{\text{nb}}{\text{GeV}^5} \\ (\text{ATLAS}) \quad & \frac{\sigma[\chi_{b1}(nP)]}{|R'_n(0)|^2} = 5.2 \frac{\text{nb}}{\text{GeV}^5} & \frac{\sigma[\chi_{b2}(nP)]}{|R'_n(0)|^2} = 5.6 \frac{\text{nb}}{\text{GeV}^5}, \end{aligned}$$

где $|R'_n(0)|$ — значение радиальной части волновой функции мезона в нуле. Важный наблюдаемый параметр — относительный выход $\Upsilon(1S)$ -мезонов от радиационных распадов $\chi_b(2P)$ и $\chi_b(1P)$ при этом равен

$$\frac{\sigma^{\text{th}}[2P, 1S]}{\sigma^{\text{th}}[1P, 1S]} = (0.29 \pm 0.01 \pm 0.1) \left| \frac{R'_{2P}}{R'_{1P}} \right|^2.$$

Поскольку радиационные брэнчинги $\chi_b(3P)$ пока не известны, для этих состояний оказалось возможным только связать относительный выход $\Upsilon(1S)$ -мезонов от радиационных распадов $\chi_b(3P)$ и $\chi_b(1P)$ с радиационным брэнчингом $\chi_{b2}(3P)$.

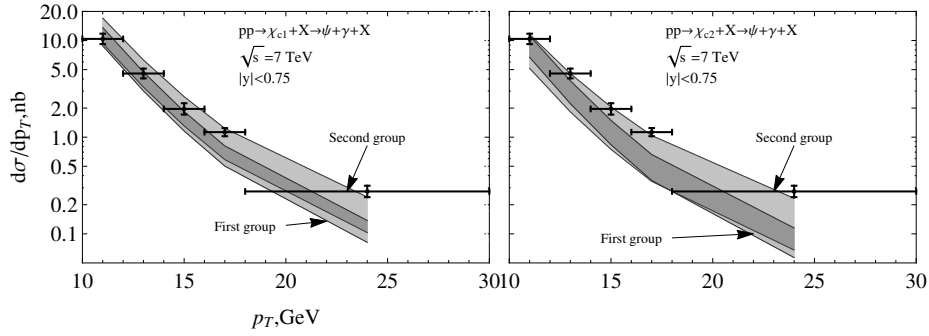


Рис. 4: Теоретические предсказания дифференциальных сечений рождения χ_{c1} (слева) и χ_{c2} (справа) в сравнении с данными ATLAS [27].

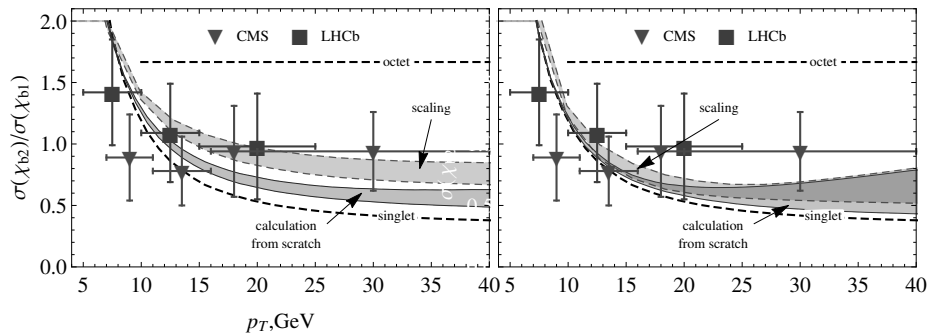


Рис. 5: Предсказание отношения $\sigma(\chi_{b2})/\sigma(\chi_{b1})$ на основе скейлинга и полного пересчета в сравнении с данными CMS [28]. Два графика соответствуют двум группам параметров: первой — слева, второй — справа.

В разделе 2.5 приведены выводы ко второй главе. Результаты, полученные в данной главе, опубликованы в работах [A2, A5].

В третьей главе диссертации рассматриваются процессы рождения $\chi_{c1,2}$ в протон-антипротонной аннигиляции при низких энергиях в условиях эксперимента PANDA [32].

Во введении к третьей главе приводятся основные отличительные особенности процессов рождения чармониев в $p\bar{p}$ аннигиляции

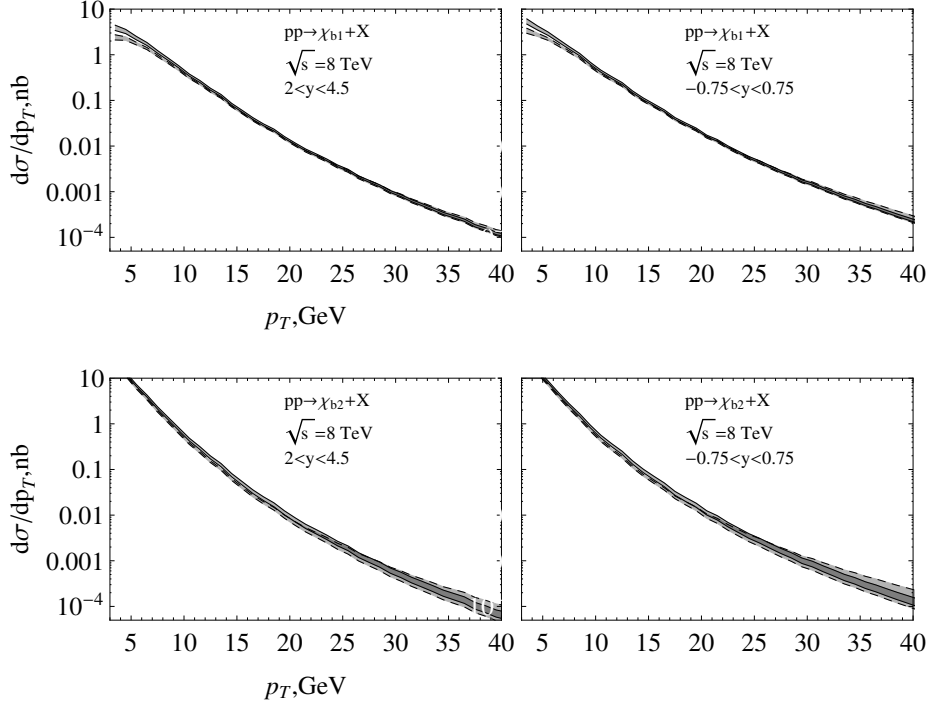


Рис. 6: Теоретические предсказания спектров χ_{b1} (сверху) и χ_{b2} (снизу) мезонов в условиях экспериментов LHCb (слева) и ATLAS (справа). Левые и правые графики соответствуют первой и второй группе параметров НРКХД.

при низких энергиях, а также краткий обзор экспериментальной установки PANDA.

В разделе 3.2 в рамках НРКХДД получены теоретические оценки сечений рождения $\chi_{c1,2}$ и J/ψ в условиях PANDA. При этом показано, что доминирующим партонным каналом рождения кваркониев является канал $u\bar{u}$ -аннигиляции. Для полных сечений получены следующие оценки:

$$\begin{aligned}
 \sigma(p\bar{p} \rightarrow \chi_{c1} + X) &= 0.20 \text{ нб.} & \sigma(p\bar{p} \rightarrow \chi_{c2} + X) &= 0.75 \text{ нб.} \\
 \sigma(p\bar{p} \rightarrow \chi_{c0} + X) &= 0.35 \text{ нб.} & \sigma(p\bar{p} \rightarrow J/\psi + X) &= 0.21 \text{ нб.}
 \end{aligned}$$

В разделе 3.3 дается обзор генератора событий рождения чармониев для эксперимента PANDA, разработанного на основе полученных теоретических результатов. Разработка и реализация такого генератора имеет большое значение для коллаборации.

В разделе 3.4 приведены выводы ко второй главе. Результаты, полученные в данной главе, опубликованы в работе [A1].

В четвертой главе диссертации дан обзор разработанной системы компьютерной алгебры (СКА) Redberry, с помощью которой были проведены все аналитические расчеты в данной работе.

Во введении к четвертой главе приводится обзор основных особенностей аналитических расчетов с использованием компьютеров, которые возникают в физике высоких энергий. Наиболее важная особенность заключается в том, что выражения с тензорами (обычно возникающие в физике частиц и теории поля), с точки зрения компьютерной реализации имеют особую структуру: свертки индексов между множителями произведений наделяют такие выражения структурой графов. Это требует разработки специальных алгоритмов для работы и упрощения таких выражений.

В разделе 4.2 функциональность Redberry продемонстрирована на примере решения двух разных задач из физики высоких энергий: вычисления квадрата матричного элемента комптоновского рассеяния в КЭД и вычисления однопетлевых контрчленов в искривленном пространстве функционального детерминанта оператора векторного поля.

В разделе 4.3 приведены выводы к четвертой главе. Результаты, полученные в данной главе, опубликованы в работах [A4, A5].

В **Заключении к диссертации** сформулированы основные результаты, представленные в ней.

Список публикаций

- [A1] A. V. Luchinsky, S. V. Poslavsky, Inclusive charmonium production at PANDA experiment // Phys. Rev. D — 2012. — Vol. 85 — P. 074016. — arXiv:1110.4989 [hep-ph].
- [A2] A. K. Likhoded, A. V. Luchinsky and S. V. Poslavsky Production of χ_b -mesons at LHC // Phys. Rev. D — 2012. — Vol. 86 — P. 074027. arXiv:1203.4893 [hep-ph].
- [A3] А. К. Лиходед, А. В. Лучинский, С. В. Пославский, Адронное рождение χ_c -мезонов на LHC // Ядерная Физика — 2014. — Том 77.— Стр. 1-8. — arXiv:1305.2389 [hep-ph].
- [A4] D. A. Bolotin and S. V. Poslavsky, Introduction to Redberry: a computer algebra system designed for tensor manipulation // arXiv:1302.1219 [cs.SC], (*принята к печати в Computer Physics Communications*), Feb 2013.
- [A5] V. V. Braguta, A. K. Likhoded, A. V. Luchinsky and S. V. Poslavsky, Analytical calculation of heavy quarkonia production processes in computer // Proceedings of 15th Workshop on advanced computing and analysis techniques in physics, arXiv:1309.3093 [hep-ph], Sep 2013.

Цитируемая литература

- [1] Aubert J. J., Becker U., Biggs P. J. et al. Experimental Observation of a Heavy Particle J // Phys. Rev. Lett. — 1974. — Dec. — Vol. 33. — P. 1404–1406.
- [2] Augustin J. E., Boyarski A. M., Breidenbach M. et al. Discovery of a Narrow Resonance in e^+e^- Annihilation // Phys. Rev. Lett. — 1974. — Dec. — Vol. 33. — P. 1406–1408.
- [3] Glashow S. L., Iliopoulos J., Maiani L. Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry // Phys. Rev. D. — 1970. — Oct. — Vol. 2. — P. 1285–1292.
- [4] Herb S. W., Hom D. C., Lederman L. M. et al. Observation of a Dimuon Resonance at 9.5 GeV in 400-GeV Proton-Nucleus Collisions // Phys. Rev. Lett. — 1977. — Aug. — Vol. 39. — P. 252–255.
- [5] В. Г. Картелишвили, А. К. Лиходед, С. Р. Слабоспицкий. Рождение D - и J/ψ - мезонов в адронных столкновениях // Ядерная Физика. — 1978. — Т. 28. — С. 1315.
- [6] В. Г. Картелишвили, А. К. Лиходед, С. Р. Слабоспицкий. Адронное рождение мезонов, содержащих тяжелые кварки // Ядерная Физика. — 1980. — Т. 32. — С. 236.
- [7] С. С. Гернштейн, А. К. Лиходед, С. Р. Слабоспицкий. Инклюзивные спектры очарованных частиц в процессах фоторождения // Ядерная Физика. — 1981. — Т. 34. — С. 227.
- [8] Baier, R. and Ruckl, R. Hadronic Collisions: A Quarkonium Factory // Z.Phys. — 1983. — Vol. C19. — P. 251.
- [9] Fritzsche, Harald. Producing Heavy Quark Flavors in Hadronic Collisions: A Test of Quantum Chromodynamics // Phys.Lett. — 1977. — Vol. B67. — P. 217.
- [10] Halzen, F. Cvc for Gluons and Hadroproduction of Quark Flavors // Phys.Lett. — 1977. — Vol. B69. — P. 105.

- [11] Schuler, Gerhard A. Quarkonium production and decays // CERN-TH-7170-94. — 1994. — hep-ph/9403387.
- [12] Abe, F. et al. Inclusive J/ψ , $\psi(2S)$ and b quark production in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV // Phys.Rev.Lett. — 1992. — Vol. 69. — P. 3704–3708.
- [13] Abe F. et al. Inclusive χ_c and b quark production in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV // Phys.Rev.Lett. — 1993. — Vol. 71. — P. 2537–2541.
- [14] Abe F. et al. Production of J/ψ mesons from χ_c meson decays in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV // Phys.Rev.Lett. — 1997. — Vol. 79. — P. 578–583.
- [15] Caswell, W.E. and Lepage, G.P. Effective Lagrangians for Bound State Problems in QED, QCD, and Other Field Theories // Phys.Lett. — 1986. — Vol. B167. — P. 437.
- [16] Lepage, G. Peter and Magnea, Lorenzo and Nakhleh, Charles and Magnea, Ulrika and Hornbostel, Kent. Improved nonrelativistic QCD for heavy quark physics // Phys.Rev. — 1992. — Vol. D46. — P. 4052–4067. — hep-lat/9205007.
- [17] Bodwin, Geoffrey T. and Braaten, Eric and Lepage, G. Peter. Rigorous QCD analysis of inclusive annihilation and production of heavy quarkonium // Phys.Rev. — 1995. — Vol. D51. — P. 1125–1171. — hep-ph/9407339.
- [18] Cho, Peter L. and Leibovich, Adam K. Color octet quarkonia production // Phys.Rev. — 1996. — Vol. D53. — P. 150–162. — hep-ph/9505329.
- [19] Cho, Peter L. and Leibovich, Adam K. Color octet quarkonia production. 2. // Phys.Rev. — 1996. — Vol. D53. — P. 6203–6217. — hep-ph/9511315.
- [20] Butenschoen, Mathias and Kniehl, Bernd A. World data of J/psi production consolidate NRQCD factorization at NLO // Phys.Rev. — 2011. — Vol. D84. — P. 051501. — 1105.0820.

- [21] Butenschoen, Mathias and Kniehl, Bernd A. J/ψ production in NRQCD: A global analysis of yield and polarization // Nucl.Phys.Proc.Suppl. — 2012. — Vol. 222-224. — P. 151–161. — 1201.3862.
- [22] Bodwin, Geoffrey T. and Braaten, Eric and Eichten, Estia and Olsen, Stephen Lars and Pedlar, Todd K. and others. Quarkonium at the Frontiers of High Energy Physics: A Snowmass White Paper. — 2013. — hep-ph/1307.7425.
- [23] Abulencia A. et al. Measurement of $\sigma_{\chi_{c2}}\mathcal{B}(\chi_{c2} \rightarrow J/\psi\gamma)/\sigma_{\chi_{c1}}\mathcal{B}(\chi_{c1} \rightarrow J/\psi\gamma)$ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ -TeV // Phys.Rev.Lett. — 2007. — Vol. 98. — P. 232001. — hep-ex/0703028.
- [24] Aaij R. et al. Measurement of the cross-section ratio $\sigma(\chi_{c2})/\sigma(\chi_{c1})$ for prompt χ_c production at $\sqrt{s} = 7$ TeV // Phys.Lett. — 2012. — Vol. B714. — P. 215–223. — 1202.1080.
- [25] Chatrchyan S. et al. Measurement of the relative prompt production rate of $\chi(c2)$ and $\chi(c1)$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // Eur.Phys.J. — 2012. — Vol. C72. — P. 2251. — 1210.0875.
- [26] Aaij R. et al. Measurement of the relative rate of prompt χ_{c0} , χ_{c1} and χ_{c2} production at $\sqrt{s} = 7$ TeV // JHEP. — 2013. — Vol. 1310. — P. 115. — 1307.4285.
- [27] collaboration T. A. Measurement of χ_{c1} and χ_{c2} production with $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at ATLAS. — 2013.
- [28] Collaboration C. Measurement of the χ_{c2}/χ_{c1} production cross section ratio in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV. — 2013.
- [29] Aad G. et al. Observation of a new χ_b state in radiative transitions to $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ at ATLAS // Phys.Rev.Lett. — 2012. — Vol. 108. — P. 152001. — 1112.5154.
- [30] Abazov V. M. et al. Observation of a narrow mass state decaying into $\Upsilon(1S) + \gamma$ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV // Phys.Rev. — 2012. — Vol. D86. — P. 031103. — 1203.6034.

- [31] Observation of the $\chi_b(3P)$ state at LHCb in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. — 2012.
- [32] Lutz M. et al. Physics Performance Report for PANDA: Strong Interaction Studies with Antiprotons. — 2009. — hep-ex/0903.3905.
- [33] Bolotin, D.A. and Poslavsky, S.V. Introduction to Redberry: the computer algebra system designed for tensor manipulation. — 2013. — 1302.1219.
- [34] Luchinsky, A.V. and Poslavsky, S.V. Inclusive charmonium production at PANDA experiment // Phys.Rev. — 2012. — Vol. D85. — P. 074016. — 1110.4989.
- [35] Likhoded, A.K. and Luchinsky, A.V. and Poslavsky, S.V. Production of χ_b -mesons at LHC // Phys.Rev. — 2012. — Vol. D86. — P. 074027. — 1203.4893.
- [36] Likhoded, A.K. and Luchinsky, A.V. and Poslavsky, S.V. Hadronic Production of χ_c -mesons at LHC. — 2013. — 1305.2389.
- [37] Braguta, V.V. and Likhoded, A.K. and Luchinsky, A.V. and Poslavsky, S.V. Analytical calculation of heavy quarkonia production processes in computer. — 2013. — 1309.3093.
- [38] Gastmans R., Troost W., Wu T. T. Production of heavy quarkonia from gluons // Nucl.Phys. — 1987. — Vol. B291. — P. 731.
- [39] Meijer M., Smith J., van Neerven W. Helicity amplitudes for charmonium production in hadron-hadron and photon-hadron collisions // Phys.Rev. — 2008. — Vol. D77. — P. 034014. — 0710.3090.
- [40] Klasen M., Kniehl B., Mihaila L., Steinhauser M. Charmonium production in polarized high-energy collisions // Phys.Rev. — 2003. — Vol. D68. — P. 034017. — hep-ph/0306080.

Автореферат отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

С.В. Пославский
Рождение P -волновых кваркониев в адронных взаимодействиях.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L^AT_EX.

Подписано к печати 31.01.2013. Формат 60×84/16.

Цифровая печать. Печ.л. 1,7. Уч.-изд.л. 2,4. Тираж 100. Заказ 6.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»
142281, Московской обл., г. Протвино, пл. Науки, д. 1

АВТОРЕФЕРАТ 2014-2,

ИФВЭ,

2014
