



И Государственный научный центр Российской Федерации -  
**Институт физики высоких энергий**  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

2014-03

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

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», 2014

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы исследования

Первая частица из семейства тяжелых кваркониев —  $J/\psi$  — 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  $J/\psi$  представляет собой связанное состояние очарованного кварка и антикварка  $c\bar{c}$ , и её открытие дало значительный вклад в понимание 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 под 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 —  $\Upsilon$  мезона, что послужило первым доказательством существования третьего поколения кварков.

На сегодняшний день накоплено значительное количество экспериментальных данных по рождению и распадам тяжелых кваркониев. Пристальный интерес к исследованиям кваркониев как со стороны экспериментаторов, так и со стороны теоретиков обусловлен несколькими причинами. Это связано с тем, что нерелятивистская природа этих состояний позволяет успешно описывать такие системы теоретически 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, большая масса  $c$ - и  $b$ - кварков естественным образом позволяет факторизовать 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 —  $J/\psi$  и  $\Upsilon$ . Первые попытки описания процессов рождения  $J/\psi$  привели к созданию модели цветового синглета (*color singlet model*, сокращенно CSM) [5–8], а также модели испарения цвета (*color evaporation model*, сокращенно SEM) [9, 10]. Большой обзор успехов и неудач этих моделей до 1993 года можно найти в работе [11].

Появление данных по инклюзивному рождению  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$ ,  $\Upsilon(1S)$ ,  $\chi_c$  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; более того, они 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) [15–17] (также иногда называется моделью 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, возникающих в эффективном лагранжиане теории, которые являются непертурбативными параметрами модели. Эти промежуточные состояния возникают из разложения фоковского столбца наблюдаемой в ряд по относительной скорости кварка и антикварка в мезоне ( $v$ ), которая является малым параметром в разложении; наличие такого малого параметра позволяет ограничиваться конечным числом слагаемых в разложении.

Одни из последних результатов фитирования и сравнения боль-

шого числа экспериментальных данных по рождению  $J/\psi$  в экспериментах, включающих адронное рождение, фоторождение и рождение в  $e^+e^-$  аннигиляции, полученные в работах [20, 21], показали, что в целом предсказания НРКХД для спектра  $S$ -волновых чармониев находятся в согласии с экспериментом. Однако, наблюдаемую в эксперименте поляризацию  $J/\psi$  объяснить в рамках НРКХД пока не удается [20–22].

В то время как для  $J/\psi$  и  $\Upsilon$  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 по  $p_T$ -спектрам рождения  $\chi_c$  были данные установки CDF по  $p_T$ -спектру  $J/\psi$  мезонов, образованных в радиационных распадах  $\chi_{c1,2}$  [14], а также данные CDF по отношению сечений  $\sigma(\chi_{c2})/\sigma(\chi_{c1})$  в зависимости от  $p_T$  [23]. В последние годы появилось много данных с ускорителя 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  $J/\psi$  и модель симуляции их рождения в условиях PANDA. В реакции  $p\bar{p}$  прямое рождение  $J/\psi$  подавлено из закона сохранения зарядовой четности, поэтому основным источником  $J/\psi$  будут радиационные распады  $\chi_{c1,2}$ . Одной из актуальных задач данной диссертации было получение предсказаний сечений рождения  $\chi_{c1,2}$  в PANDA и создание программы 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 рождения 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 работы 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  $\chi_c$  в экспериментах при высоких энергиях и получение теоретических предсказаний сечений рождения на ускорителях Тэватрон и БАК
2. Анализ экспериментальных данных по рождению состояний  $\chi_c$  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  $\chi_c$  в реакциях протон-антипротонной аннигиляции при низких энергиях, и, в частности, построение Монте-Карло генератора рож-

дения чармониев для практического применения коллаборацией эксперимента PANDA

Для решения первой задачи были проведены вычисления сечений рождения  $Q\bar{Q}$  ( $Q = c, b$ ) 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  $\chi^2$ . 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  $\chi_c$  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  $\chi_c$  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  $pt$ -спектров сечений рождения  $\chi_c$ - и  $\chi_b(nP)$ -мезонов имеют большую практическую значимость для установления механизмов 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 сечениях рождения  $\chi_{c1,2}$ -мезонов 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 сечений  $\sigma(\chi_{c2})/\sigma(\chi_{c1})$
3. Анализ экспериментальных данных по адронному рождению  $\chi_c$ -мезонов 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 отдела 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 [34–37], а также два препринта [33, 38].

### **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  $\chi_{cJ}$ -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 фокковский столбец 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):

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

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 необходимость учитывать диаграммы с духами Фаддеева-Попова. Полученные в работе результаты совпадают с результатами работ [18, 19, 39, 40], однако не совпадают с [41]; последнее вызвано тем, что авторы работы [41], 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.

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

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  $\chi_c$  в ускорителях Тэватрон и БАК.

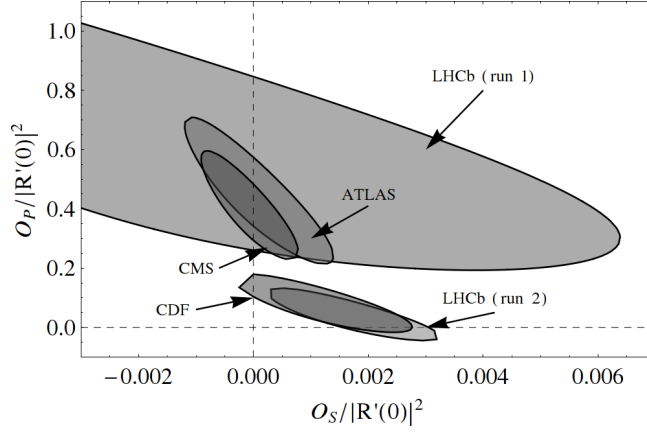


Рис. 1: Допустимые области изменения октетных параметров исходя из фита экспериментальных данных по  $p_T$ -зависимости отношения  $\sigma(\chi_{c2})/\sigma(\chi_{c1})$ .

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 (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  $\chi_c$  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  $\chi_c$  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,A4].

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

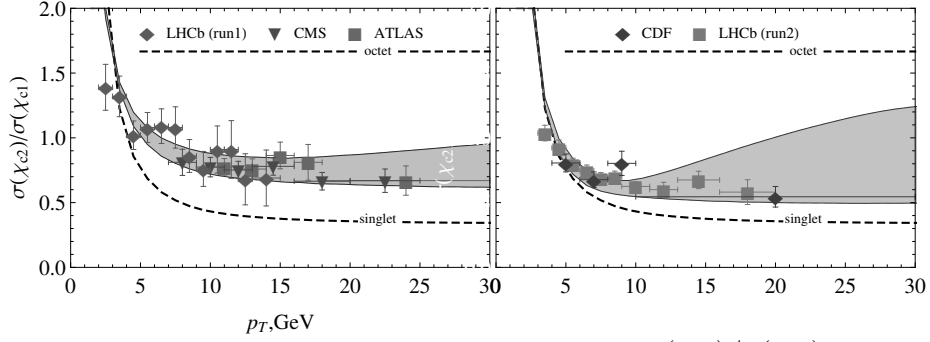


Рис. 2: Теоретические предсказания отношения  $\sigma(\chi_{c2})/\sigma(\chi_{c1})$  с параметрами фита данных LHCb [24], CMS [28] и ATLAS [27] (слева) и CDF [23] и LHCb [26] (справа).

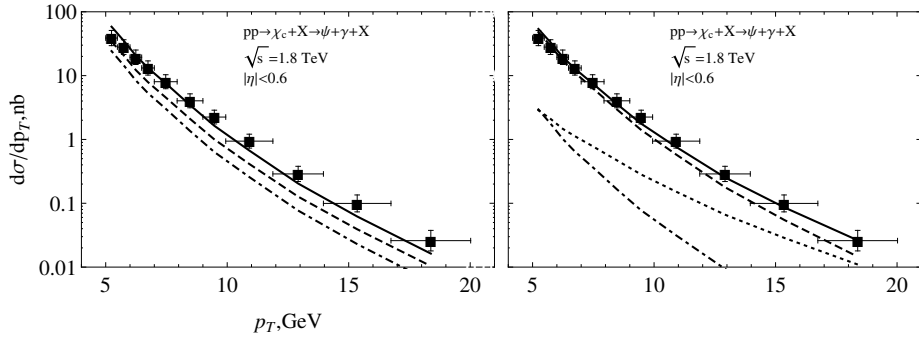


Рис. 3: Вклады различных состояний из (1) в суммарное сечение рождения  $J/\psi$  в радиационных распадах  $\chi_c$  мезонов в эксперименте CDF [14] с параметрами, полученными из фита двух групп данных (слева — [14, 24, 27, 28], справа — [14, 23, 26]). Сплошная линия — суммарное сечение, штриховая —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

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. По-

сколькx экспериментальных данных по  $p_T$ -зависимости сечений  $\chi_b$  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

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

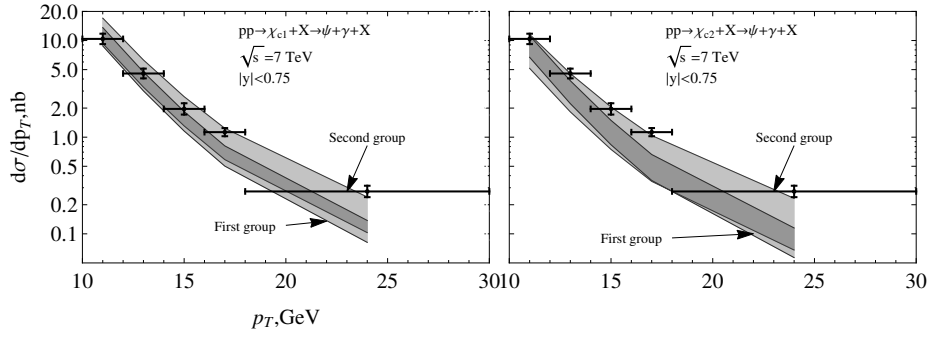


Рис. 4: Теоретические предсказания дифференциальных сечений рождения  $\chi_{c1}$  (слева) и  $\chi_{c2}$  (справа) в сравнении с данными ATLAS [27].

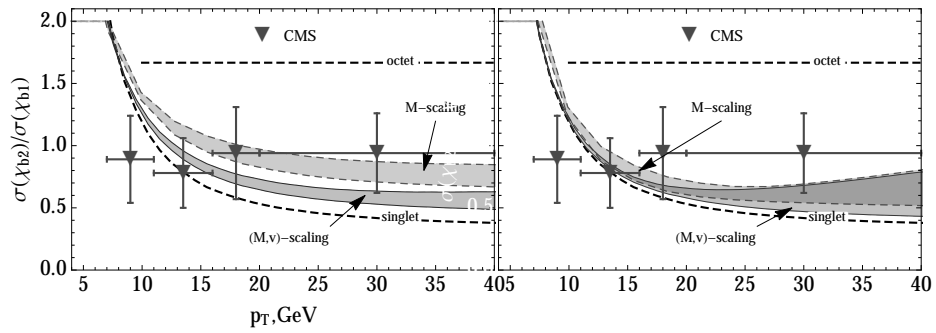


Рис. 5: Предсказание отношения  $\sigma(\chi_{b2})/\sigma(\chi_{b1})$  на основе скейлинга и полного пересчета в сравнении с данными CMS [28]. Два графика соответствуют двум группам параметров: первой — слева, второй — справа.

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  $\chi_{b2}(3P)$ .

В разделе 2.5 приведены выводы ко второй главе. Результаты, полученные в данной главе, опубликованы в работах [A2, A4, A6].

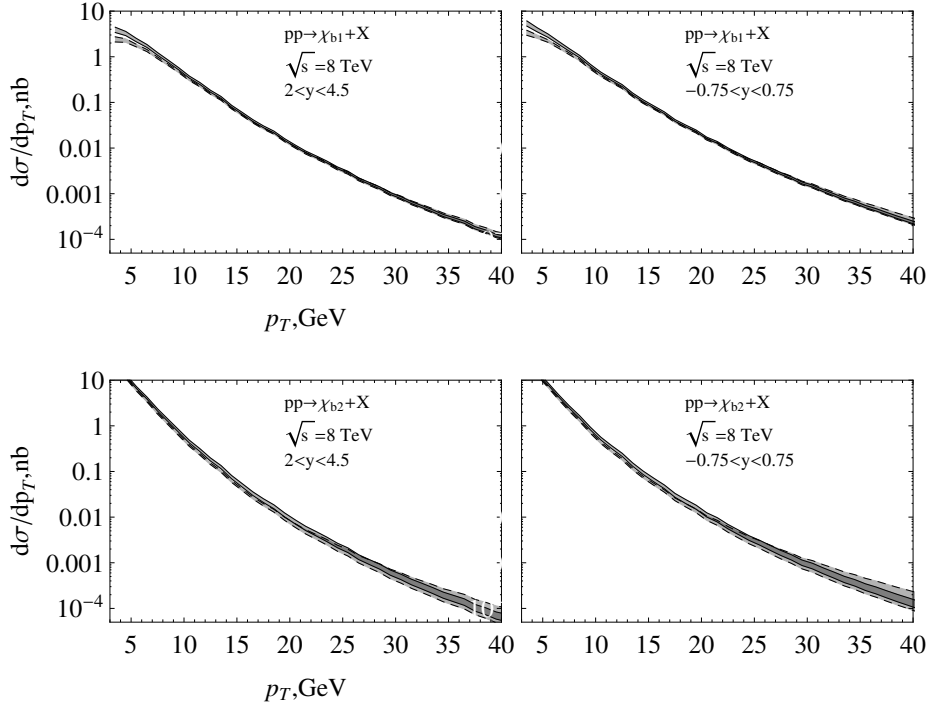


Рис. 6: Теоретические предсказания спектров  $\chi_{b1}$  (сверху) и  $\chi_{b2}$  (снизу) мезонов в условиях экспериментов LHCb (слева) и ATLAS (справа). Левые и правые графики соответствуют первой и второй группе параметров НРКХД.

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 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  $J/\psi$  в условиях PANDA. При этом показано, что доминирующим партонным каналом рождения кваркониев является канал  $u\bar{u}$ -аннигиляции. Для полных сечений получены сле-



дующие 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 компьютерных расчетов, 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] — DOI:10.1103/PhysRevD.85.074016
- [A2] A. K. Likhoded, A. V. Luchinsky and S. V. Poslavsky, Production of  $\chi_b$ -mesons at LHC // Phys. Rev. D — 2012. — Vol. 86 — P. 074027. arXiv:1203.4893 [hep-ph] — DOI:10.1103/PhysRevD.86.074027
- [A3] А. К. Лиходед, А. В. Лучинский, С. В. Пославский, Адронное рождение  $\chi_c$ -мезонов на LHC // Ядерная Физика — 2014. — Том 77 7.— Стр. 966-973. — arXiv:1305.2389 [hep-ph] — DOI:10.7868/S0044002714060099
- [A4] V. V. Braguta, A. K. Likhoded, A. V. Luchinsky and S. V. Poslavsky, Analytical calculation of heavy quarkonia production processes in computer // Journal of Physics: Conference series. — Vol. 523 — P. 012038 — Proceedings of 15th Workshop on advanced computing and analysis techniques in physics, arXiv:1309.3093 [hep-ph], Sep 2013 — DOI:10.1088/1742-6596/523/1/012038
- [A5] (*препринт*) D. A. Bolotin and S. V. Poslavsky, Introduction to Redberry: a computer algebra system designed for tensor manipulation // arXiv:1302.1219 [cs.SC], Feb 2013.
- [A6] (*препринт*) A. K. Likhoded, A. V. Luchinsky and S. V. Poslavsky Hadronic Production of  $\chi_c$ -mesons at LHC // arXiv:1305.2389 [hep-ph], May 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  $J/\psi$ - 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  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$  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  $\chi_c$  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  $J/\psi$  mesons from  $\chi_c$  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. — hep-ph/1105.0820.

- [21] Butenschoen, Mathias and Kniehl, Bernd A.  $J/\psi$  production in NRQCD: A global analysis of yield and polarization // Nucl.Phys.Proc.Suppl. — 2012. — Vol. 222-224. — P. 151–161. — hep-ph/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  $\sqrt{s} = 1.96\text{-TeV}$  // 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  $\chi_c$  production at  $\sqrt{s} = 7\text{ TeV}$  // Phys.Lett. — 2012. — Vol. B714. — P. 215–223. — hep-ex/1202.1080.
- [25] Chatrchyan S. et al. Measurement of the relative prompt production rate of  $\chi(c2)$  and  $\chi(c1)$  in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7\text{ TeV}$  // Eur.Phys.J. — 2012. — Vol. C72. — P. 2251. — hep-ex/1210.0875.
- [26] Aaij R. et al. Measurement of the relative rate of prompt  $\chi_{c0}$ ,  $\chi_{c1}$  and  $\chi_{c2}$  production at  $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$  // JHEP. — 2013. — Vol. 1310. — P. 115. — hep-ex/1307.4285.
- [27] Aad G. et al. Measurement of  $\chi_{c1}$  and  $\chi_{c2}$  production with  $\sqrt{s} = 7\text{ TeV}$   $pp$  collisions at ATLAS // CERN REPORT. — 2013. — ATLAS-CONF-2013-095, ATLAS-COM-CONF-2013-115.
- [28] Chatrchyan S. et al. Measurement of the  $\chi_{c2}/\chi_{c1}$  production cross section ratio in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8\text{ TeV}$  // CERN REPORT. — 2013. — CMS-PAS-BPH-13-005.
- [29] Aad G. et al. Observation of a new  $\chi_b$  state in radiative transitions to  $\Upsilon(1S)$  and  $\Upsilon(2S)$  at ATLAS // Phys.Rev.Lett. — 2012. — Vol. 108. — P. 152001. — hep-ex/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. — hep-ex/1203.6034.
- [31] Aaij R. et al. Observation of the  $\chi_b(3P)$  state at LHCb in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV // CERN REPORT. — 2012. — LHCb-CONF-2012-020, CERN-LHCb-CONF-2012-020.
- [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. — cs.SC/1302.1219.
- [34] Luchinsky, A.V. and Poslavsky, S.V. Inclusive charmonium production at PANDA experiment // Phys.Rev. — 2012. — Vol. D85. — P. 074016. — hep-ph/1110.4989.
- [35] Likhoded, A.K. and Luchinsky, A.V. and Poslavsky, S.V. Production of  $\chi_b$ -mesons at LHC // Phys.Rev. — 2012. — Vol. D86. — P. 074027. — hep-ph/1203.4893.
- [36] Braguta, V.V. and Likhoded, A.K. and Luchinsky, A.V. and Poslavsky, S.V. Analytical calculation of heavy quarkonia production processes in computer // Journal of Physics: Conference Series. — 2014. — Vol. 523, no. 1. — P. 012038. — Proceedings of 15th International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics (ACAT2013). hep-ph/1309.3093.
- [37] А.К. Лиходед, А.В. Лучинский, С.В. Пославский. Адронное рождение  $\chi_c$ -мезонов на ЛHC // Ядерная физика. — 2014. — Т. 77 7. — С. 966 – 973.
- [38] Likhoded, A.K. and Luchinsky, A.V. and Poslavsky, S.V. Hadronic Production of  $\chi_c$ -mesons at LHC. — 2013. — hep-ph/1305.2389.
- [39] Gastmans R., Troost W., Wu T. T. Production of heavy quarkonia from gluons // Nucl.Phys. — 1987. — Vol. B291. — P. 731.

- [40] 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. — hep-ph/0710.3090.
- [41] 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 кваркониюв в адронных взаимодействиях.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

---

Подписано к печати 16.06.2014. Формат 60×84/16.  
Цифровая печать. Печ.л. 1,4. Уч.-изд.л. 1,2. Тираж 100. Заказ 15.  
Индекс 3649.

---

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



---

АВТОРЕФЕРАТ 2014-03  
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ “Курчатовский институт”, 2014

---