

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации А.М. Трунина “Релятивистские эффекты в процессах парного рождения тяжелых адронов при высоких энергиях”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Исследование процессов рождения тяжелых адронов на современных коллайдерах является важной и актуальной задачей физики высоких энергий. Сравнение теоретических предсказаний с имеющимися экспериментальными данными позволяет проверять существующие представления о рождении тяжелых кварков, основанные на различных пертурбативных и непертурбативных подходах в рамках квантовой хромодинамики (КХД). В последние годы детальные экспериментальные исследования тяжелых адронов проводились как на электрон-позитронных (B фабриках и Пекинском электрон-позитронном коллайдере), так и адронных ускорителях (Тэватроне и Большом адронном коллайдере). Был получен большой экспериментальный материал по свойствам тяжелых адронов, а также было открыто множество новых состояний тяжелых мезонов и барионов, которые ранее не наблюдались. Так, в частности, было обнаружено большое число состояний чармония и боттомония над порогом рождения открытого чарма и боттома, многие из которых обладают экзотическими свойствами. Ряд из таких состояний со скрытым чармом имеет ненулевой электрический заряд, что указывает на существование мультикварковых состояний.

При теоретическом описании процессов рождения тяжелых адронов обычно предполагается, что оно происходит в два этапа. Сначала рождаются пары тяжелых кварка и антикварка, которые затем переходят в конечные тяжелые адроны. Считается, что первый этап может быть описан пертурбативными методами, в то время как второй этап требует применения непертурбативных подходов. Сложность вычислений проявляется уже на первом этапе, где возникает большое число диаграмм, требующих трудоемких вычислений. Для описания процессов адронизации тяжелых кварков в литературе обычно используют различные феноменологические механизмы. Популярным является подход, основанный на нерелятивистской квантовой хромодинамике (НРКХД). Однако его применение сталкивается с необходимостью дополнительного учета релятивистских и радиационных поправок. Действительно, хорошо известно, что первоначальные предсказания НРКХД для сечения парного рождения чармония в электрон-позитронной аннигиляции оказались примерно на порядок меньше экспериментально измеренных величин. Для приведения в согласие теории с экспериментом потребовалось провести учет релятивистских и радиационных поправок. Это еще раз подтвердило хорошо известный факт, что чармоний только в очень грубом приближении может рассматриваться как нерелятивистская система. Как показывают оценки, средняя скорость движения c кварка в чармонии превышает половину скорости света, что делает последовательное рассмотрение релятивистских эффектов крайне важной и актуальной задачей.

Диссертация А.М. Трунина посвящена подробному теоретическому исследованию роли релятивистских эффектов в процессах рождения тяжелых адронов. В рамках ква-

зипотенциального подхода и основанной на нем релятивистской кварковой модели разработан метод вычисления сечений парного рождения мезонов и барионов, содержащих два тяжелых кварка, в электрон-позитронном и протон-протонном взаимодействиях. Данный метод позволяет последовательно учесть все релятивистские вклады в сечения рождения тяжелых адронов. Он учитывает релятивистские вклады в амплитуды рождения, релятивистские поправки к волновым функциям адронов в их системе покоя, а также релятивистские вклады, связанные с преобразованиями волновых функций адронов при переходе из системы покоя в движущуюся систему отсчета. Предложенный подход применен к вычислению сечения парного рождения P волнового чармония и дважды тяжелых барионов в e^+e^- аннигиляции, а также парного рождения чармония и дважды тяжелых дикварков в протон-протонных столкновениях. Необходимо отметить, что во всех рассмотренных процессах релятивистские эффекты играют важную роль. Особый интерес представляют полученные предсказания для сечений парного рождения дважды тяжелых барионов в pp столкновениях. Поиск таких барионов в настоящее время интенсивно ведется на Большом адронном коллайдере (БАКе).

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации и ее практическая значимость. Кратко изложены используемые подходы и основные результаты.

Первая глава диссертации посвящена исследованию парного рождения тяжелых адронов в e^+e^- аннигиляции. На этом примере разработаны и сформулированы основные положения релятивистского подхода к расчету сечений рождения тяжелых адронов. На конкретном примере парного рождения возбужденных (P -волновых) состояний чармония показан способ построения релятивистских амплитуд. Продемонстрирована важность учета преобразования волновых функций из системы центра масс в движущуюся систему отсчета. Выписаны полностью релятивистские выражения для вкладов различных диаграмм в амплитуду рождения. Данные амплитуды, учитывающие релятивистские эффекты, не содержат расходящихся членов в отличие от релятивистских поправок, возникающих в НРКХД. Однако полученные амплитуды не позволяют провести конкретные расчеты без дополнительных упрощающих разложений. Показано, что хорошая точность релятивистских расчетов может быть достигнута при разложении пропагаторов кварков и глюонов по малой величине отношения относительного импульса кварков к энергии рождающихся мезонов. При этом ведущие члены разложения описываются сходящимися интегралами. Для определения волновых функций адронов, как связанных состояний тяжелых кварков, использована релятивистская кварковая модель, основанная на квазипотенциальном подходе. Выписан релятивистский квазипотенциал взаимодействия кварков с учетом релятивистских и радиационных поправок и на его основе рассчитаны массы основных и орбитально возбужденных состояний чармония, а также дикварков с двумя тяжелыми кварками. Для спектра чармония найдено хорошее согласие с экспериментальными данными, в то время как массы дикварков хорошо согласуются с предыдущими расчетами. Полученные релятивистские волновые функции использованы для дальнейших расчетов. Сначала подробно рассмотрены процессы парного рождения возбужденных (P -волновых) состояний чармония с последовательным учетом релятивистских поправок. Установлено, что релятивистские эффекты приводят к значительному уменьшению сечения рождения пары P -волновых

чармониев, что объясняет сложность экспериментального обнаружения таких процессов. Затем этот же подход применен к исследованию рождения пары дважды тяжелых дикварков в e^+e^- аннигиляции, и даны оценки сечений парного рождения дважды тяжелых барионов, содержащих скалярный или аксиально векторный дикварки.

Во второй главе диссертации разработанные методы применены для подробного изучения влияния релятивистских эффектов на процессы парного рождения основных состояний чармония в протон-протонных столкновениях. Исследование данных процессов усложняется за счет большего числа диаграмм, а также учета цветовой структуры. Показано, что релятивистские эффекты приводят к уменьшению сечения парного рождения J/ψ в pp взаимодействиях. В результате релятивистское значение вместе с вкладом двойного партонного рассеяния и учетом процессов с промежуточным возбужденным состоянием чармония оказывается в хорошем согласии с экспериментальными данными.

В третьей главе диссертации изучено парное рождение дважды тяжелых дикварков в протон-протонных столкновениях. Впервые дан последовательный и всесторонний анализ влияния различных релятивистских вкладов в полное сечение парного рождения дикварков для конкретных условий экспериментов на БАКе. На этой основе даны оценки сечений парного рождения дважды тяжелых барионов в экспериментах коллаборации LHCb. Данный результат имеет важное практическое значение для ведущихся поисков дважды тяжелых барионов, экспериментальное обнаружение которых крайне важно для проверки существующих теоретических представлений.

В заключении дано краткое изложение полученных результатов. Приложения содержат технические детали вычислений.

В качестве замечаний и пожеланий укажем на следующее. Совсем недавно коллаборация LHCb представила ([arXiv:1407.5973 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1407.5973)) новые данные по эксклюзивному парному рождению состояний чармония в протон-протонных столкновениях. Было бы интересно понять, как эти новые данные соотносятся с представленными в диссертации предсказаниями. Также практический интерес представляют оценки сечений парного рождения дважды тяжелых барионов с двумя b кварками.

В целом диссертация А.М. Трунина является завершенным научным исследованием, содержащим новое решение актуальной научной задачи – всестороннее изучение влияния релятивистских эффектов на процессы рождения тяжелых адронов. Полученные в диссертации результаты имеют важное практическое значение для поиска новых состояний тяжелых мезонов и барионов, содержащих тяжелые кварки, на современных ускорителях. Проведенный в диссертации анализ влияния релятивистских эффектов на сечения процессов рождения тяжелых мезонов и дважды тяжелых барионов является одним из наиболее полных и последовательных. Полученные предсказания для сечений парного рождения дважды тяжелых барионов имеют важное значение для анализа экспериментов, проводимых на БАКе.

Основные результаты диссертации своевременно опубликованы в ведущих научных журналах, докладывались на международных и российских конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Подводя итог, можно с уверенностью сказать, что диссертация удовлетворяет всем

требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Трунин Антон Маратович, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Отзыв составил:

ведущий научный сотрудник

Отдела теории алгоритмов и математических основ кодирования

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Вычислительного центра им. А.А. Дородницына Российской академии наук

119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 40

тел.: +7(499)1358831

e-mail: galkin@ccas.ru

12 августа 2014 г.

Доктор физ.-мат. наук

Владимир Олегович Галкин

