

# Отзыв научного руководителя

на диссертацию

Прохорова Андрея Александровича

«Процессы с образованием тяжелых кваркониев и калибровочных бозонов при  
высоких энергиях»

на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 1.3.15 — «Физика атомных ядер и элементарных частиц,  
физика высоких энергий»

Диссертационная работа Прохорова А.А. выполнена на кафедре общей ядерной физики физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, где он обучался в аспирантуре в 2018 — 2022 годах по направлению «Физика высоких энергий», а также в отделе теоретической физики высоких энергий НИИЯФ МГУ.

Диссертация посвящена исследованию процессов парного рождения  $J/\psi$  мезонов при высоких энергиях, а также процессов ассоциативного рождения  $J/\psi$  мезонов и калибровочных бозонов ( $Z$ ,  $W$ ) в столкновениях протонов при энергиях Большого Адронного Коллайдера (БАК, или LHC). Эти процессы только относительно недавно стали доступны для экспериментального анализа, поэтому теоретическое описание результатов соответствующих измерений является актуальной задачей в рамках КХД. Как известно, основным теоретическим подходом для описания образования связанных состояний тяжелых ( $c$  или  $b$ ) кварков является формализм нерелятивистской КХД (NRQCD). В настоящее время проведенные расчеты в ведущем порядке теории возмущений NRQCD с учетом как синглетных, так и октетных по цвету вкладов демонстрируют существенную (более чем на порядок) недооценку экспериментальных данных для процесса парного рождения  $J/\psi$  мезонов, полученных коллаборациями ATLAS и CMS в центральной области быстрот. Учет NLO поправок к синглетному механизму и древесных (NLO\*) октетных вкладов улучшает согласие теоретических предсказаний и экспериментальных данных ATLAS и CMS только в области небольших поперечных импульсов и/или инвариантных масс пары  $J/\psi$  мезонов; при этом аккуратный учет всех NLO вкладов представляется достаточно трудоемким. Основные поправки высших порядков теории возмущений КХД, которые играют определяющую роль при высоких энергиях, могут быть эффективно учтены в рамках так называемого  $k_T$ -факторизационного подхода КХД с помощью неинтегрированных (зависящих от поперечного импульса, в англоязычной

литературе — Transverse Momentum Dependent, TMD) распределений партонных в протоне; при этом последние подчиняются уравнениям неколлинеарной эволюции VFKL-типа. Кроме того, крайне громоздкие расчеты на основании пертурбативной КХД могут быть существенно упрощены при использовании фрагментационного подхода. Следует подчеркнуть, что в ходе КХД эволюции TMD глюонных распределений, динамика которой может быть описана уравнением Катани-Чиафалони-Фиорани-Марчезини (CCFM), возникает значительное число глюонных эмиссий, влекущих за собой цепочку событий, заканчивающихся образованием адронов. Учет соответствующих комбинаторных вкладов в сечения рассматриваемых процессов в области средних и больших поперечных импульсов с помощью фрагментационного механизма представляется достаточно важным и интересным.

Во введении представлена актуальность и разработанность темы, сформулированы цели и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также достоверность полученных результатов, указана апробация работы и отмечен личный вклад автора.

В первой главе диссертации описаны основные свойства уравнений КХД эволюции кварков и глюонов, используемые при моделировании партонной динамики. Изложены основные формулы к<sub>T</sub>-факторизационного подхода, представлены некоторые TMD плотности глюонов в протоне.

Во второй главе приводится описание формализма нерелятивистской КХД (NRQCD), который основан на двойном разложении ряда теории возмущений по степеням скорости относительного движения кварков (являющейся малым параметром) и степеням константы связи КХД. Этот подход широко применяется в настоящее время в расчетах сечений процессов рождения тяжелых кваркониев при высоких энергиях. С помощью численного решения уравнений эволюции DGLAP (в ведущем приближении) вычисляется зависимость функций фрагментации очарованных кварков и глюонов в различные S- и P-волновые чармонии от масштаба фрагментации. В расчетах учитываются дополнительные (нелидирующие) вклады, которые не рассматривались ранее в других работах.

Третья глава посвящена изучению процессов парного рождения J/ψ мезонов при высоких энергиях. Вычислены полные и дифференциальные сечения рассматриваемых процессов с учетом как синглетных, так и октетных (по цвету) вкладов, при этом последние были рассчитаны в рамках

фрагментационного механизма с использованием полученных во второй главе функций фрагментации. Впервые были учтены эффекты множественных глюонных эмиссий в начальном состоянии. Показано, что учет этих эффектов играет значительную роль при описании экспериментальных данных для сечений парного рождения  $J/\psi$  мезонов в области центральных быстрот (эксперименты ATLAS и CMS) и больших поперечных импульсов и/или больших инвариантных масс пары  $J/\psi$  мезонов. В области передних быстрот (эксперимент LHCb) сечение процесса парного рождения  $J/\psi$  мезонов определяется главным образом вкладами от синглетного механизма и механизма двойного партонного рассеяния (ДПР). Из анализа экспериментальных данных коллаборации LHCb для различных наблюдаемых процесса парного рождения при энергиях 7 и 13 ТэВ получена оценка величины эффективного сечения ДПР  $\sigma_{\text{eff}}$  порядка 15 мбн. Это значение хорошо согласуется с результатами многих других измерений параметра  $\sigma_{\text{eff}}$ , проведенных в рамках экспериментальных исследований различных процессов на коллайдерах Tevatron и LHC. Значительно меньшая величина  $\sigma_{\text{eff}} \sim 2 - 5$  мбн, полученная ранее некоторыми группами из анализа данных для процессов парного рождения тяжелых кваркониев при высоких энергиях, не подтверждена.

В четвертой главе рассматриваются процессы ассоциативного рождения  $Z$  бозонов и струй  $c$ - или  $b$ -кварков в протон-протонных столкновениях на коллайдере LHC. Проведены расчеты соответствующих полных и дифференциальных сечений как в рамках  $k_T$ -факторизационного подхода, так и в рамках коллинеарного приближения КХД (с помощью Монте-Карло генератора SHERPA) с учетом вкладов лидирующего (LO) и следующего за ним (NLO) порядков теории возмущений. Показано, что в области небольших и промежуточных значений поперечных импульсов конечных частиц предсказания  $k_T$ -факторизационного подхода хорошо согласуются с результатами NLO-вычислений, выполненных в рамках коллинеарного приближения КХД. Проверяется гипотеза существования дополнительных состояний очарованных кварков в протоне, имеющих непертурбативную природу (гипотеза «внутреннего очарования»). Предложены кинематические переменные, наиболее перспективные для экспериментального обнаружения таких состояний.

Пятая глава посвящена изучению процессов ассоциативного рождения  $J/\psi$  мезонов и калибровочных бозонов ( $Z$ ,  $W$ ) при энергиях коллайдера LHC. Изучена роль эффектов множественного излучения глюонов во время неколлинеарной эволюции глюонного каскада. Предложены новые механизмы,

дающие вклад в сечения рассматриваемых процессов при высоких энергиях. Эти механизмы связаны с различными подпроцессами глюон-глюонного, кварк-глюонного и кварк-кваркового взаимодействия, которые не были рассмотрены ранее в расчетах, выполненными другими группами в NLO-приближении NRQCD. Показано, что учет таких новых вкладов позволяет существенно улучшить согласие теоретических предсказаний с экспериментальными данными LHC в области больших поперечных импульсов.

Несомненно, что все результаты, полученные в диссертационной работе, имеют научный интерес и практическую ценность. Личный вклад А.А. Прохорова состоит в том, что все результаты, включенные в диссертацию, были получены лично им или при его определяющем участии. Работа выполнена квалифицированно, на достаточно высоком уровне. Содержание диссертации отражено в научных публикациях автора, неоднократно докладывалось на различных российских и международных конференциях, а ее основные положения представлены в автореферате.

С моей точки зрения, диссертационная работа А.А. Прохорова выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и практической значимостью. Работа удовлетворяет требованиям к кандидатским диссертациям по установленным п.п. 2.1-2.5 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова.

Рекомендую диссертацию Прохорова Андрея Александровича к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 — «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Научный руководитель,  
д.ф.-м.н.

А.В. Липатов

20 октября 2022

Подпись А.В. Липатова удостоверяю

Учёный секретарь ученого совета НИИЯФ МГУ

Е.А. Сигаева