

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук Прохорова Андрея Александровича на
тему «Процессы с образованием тяжелых кваркониев и калибровочных
бозонов при высоких энергиях» по специальности 1.3.15 – «Физика
атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Диссертация А.А. Прохорова посвящена изучению процессов парного рождения J/ψ мезонов, а также процессов ассоциативного рождения J/ψ мезонов и калибровочных бозонов Z/W при высоких энергиях. **Актуальность темы исследования** обуславливается проблемой описания сечений рассматриваемых процессов в рамках нерелятивистской КХД, которая на данный момент не решена. В формализме нерелятивистской КХД недавно удалось достичь значительного прогресса в самосогласованном описании как дифференциальных спектров процессов одиночного рождения чармониев и боттомониев, так и их поляризационных наблюдаемых (путем учета специального механизма перехода промежуточных октетных пар тяжелых кварков в связанное состояние). Однако для процессов парного рождения J/ψ мезонов или рождения J/ψ мезонов в сопровождении калибровочных бозонов Z/W имеющиеся предсказания значительно недооценивают экспериментальные данные ЛНС (разница достигает порядков). При этом теоретические исследования указывают на существенную важность поправок высших порядков. В работе А.А. Прохорова используется подход kt -факторизации квантовой хромодинамики (КХД). Этот подход основывается на уравнении эволюции глюонов Балицкого-Фадина-Кураева-Липатова (BFKL) или Катани-Чиафалони-Фиорани-Маркезини (CCFM) и позволяет учитывать поправки высших порядков в виде неинтегрированных, или TMD (зависящих от поперечного импульса) глюонных распределений в протоне. Более того, в данной работе

предлагается учитывать фрагментационные вклады в рождение чармониев от глюонных эмиссий, возникающих в результате неколлинеарной динамики глюонных распределений, описываемой уравнением CCFM. Такие вычисления проводятся впервые, что подчеркивает **новизну представленных результатов.**

Целью диссертации является теоретическое изучение фрагментационных механизмов, которые создают дополнительные вклады в процессы парного рождения J/ψ мезонов и ассоциативного рождения J/ψ мезонов и калибровочных бозонов Z/W . Представленные результаты прошли **апробацию** на российских и международных конференциях, а также были опубликованы в 4 статьях в рецензируемых журналах, таких как Physical Review D и European Physical Journal C. **Обоснованность и достоверность** теоретических результатов обусловлена использованием методов современной физики высоких энергий, неоднократно проверенных в других работах.

Общая характеристика диссертации.

Диссертация имеет 124 страницы, состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы.

Во **введении** представлена тема исследования, обоснована ее актуальность, сформулированы цели и задачи работы, представлены новизна, значимость, апробация, а также приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведены различные уравнения эволюции партонов, обсуждены их характерные особенности и границы применимости. Кроме того кратко описаны основные идеи подхода kt -факторизации, а также представлены несколько TMD функций распределения глюонов, которые используются в данной работе.

Вторая глава посвящена описанию процессов рождения тяжелых кваркониев. Подробно приведен формализм нерелятивистской КХД, описаны механизмы образования чармониев через синглетные и октетные по цвету промежуточные состояния. Приведены основные формулы для расчета сечений инклюзивного рождения чармониев. Помимо этого, подробно описан фрагментационный механизм образования чармониев в результате фрагментации очарованных кварков и глюонов. Затронуты вопросы применимости данного подхода, связанные с факторизацией амплитуд подпроцессов.

В третьей главе рассматриваются основные механизмы парного рождения J/ψ мезонов в формализме нерелятивистской КХД, их роль для описания полного и дифференциальных сечений данного процесса. Показана важность неколлинеарной эволюции для фрагментационных механизмов рождения чармониев. Подробно описан метод учета фрагментационных вкладов, учитывающих множественные глюонные излучения в начальном состоянии с помощью уравнения эволюции ССФМ. Данный метод позволяет эффективно учесть как лидирующие вклады от синглетно-октетных и октетно-октетных механизмов, так и некоторые поправки высших порядков. Помимо этого предлагается метод включения фрагментационных вкладов в механизм двойного партонного рассеяния (ДПР). Приведены формулы для расчета сечений рассматриваемых подпроцессов. В конце главы приводятся результаты вычислений сечений парного рождения J/ψ мезонов в рамках описанных механизмов. Показано, что фрагментационные вклады играют значительную роль при описании экспериментальных данных в центральной области быстрот, в то время как в передней области быстрот такие вклады незначительны и могут быть опущены. Из экспериментальных данных ЛНСб была получена оценка эффективного сечения ДПР, которая хорошо согласуется с большим количеством оценок, основанных на анализе других конечных состояний.

В четвертой главе рассматриваются процессы ассоциативного рождения Z бозонов и тяжелых струй, образованных c/b – кварками. Проведены расчеты дифференциальных сечений как функций поперечных импульсов в подходе kt -факторизации и в коллинеарном приближении. Во втором случае вычисления выполняются с помощью Монте-Карло генератора Sherpa в лидирующем (LO) и следующим за лидирующим (NLO) порядках теории возмущений. Проведено сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными ATLAS и CMS. Исследован вопрос применимости подхода kt -факторизации для описания процессов с участием калибровочных бозонов и тяжелых кварков. Так, было показано, что в области небольших и средних поперечных импульсов калибровочных бозонов и струй подход kt -факторизации хорошо согласуется с предсказаниями коллинеарной КХД в NLO. Помимо этого, проверяется возможность обнаружения внутреннего очарования в рассматриваемых процессах.

В пятой главе обсуждаются новые вклады в процесс ассоциативного рождения J/ψ мезонов и калибровочных бозонов Z/W , которые до этого не учитывались в подходе нерелятивистской КХД. Данные вклады основаны на механизме фрагментации партонов в чармонии. Вычислены вклады рассматриваемых подпроцессов в дифференциальные сечения и проведено сравнение с имеющимися экспериментальными данными коллаборации ATLAS, а также имеющимися теоретическими предсказаниями нерелятивистской КХД, полученными другими группами. Продемонстрирована важность учета новых механизмов, в том числе важность учета эффектов от множественных глюонных излучений.

В заключении кратко сформулированы результаты работы.

Диссертация написана с использованием хорошего русского языка, что является само по себе редким явлением. Формулы приведены в форме, удобной для понимания. Все численные анализы проиллюстрированы графиками и таблицами. Единственный возможный недостаток — это частое использование фразы «в данной работе» имея в виду диссертацию, хотя из контекста видно, что диссертация содержит обзор результатов, уже опубликованных в оригинальных работах диссертанта.

Вместе с тем, указанное замечание несколько не умаляют значимости диссертационного исследования. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Результаты работы опубликованы в реферируемых журналах, докладывались на специализированных международных конференциях и представляют интерес как для текущих, так и планируемых экспериментов в физике высоких энергий.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Прохоров Андрей Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
научного отдела теории фундаментальных взаимодействий
Лаборатории теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова ОИЯИ

КОТИКОВ Анатолий Васильевич



16.02.2023

Контактные данные:

тел.: +7(496)2163339, e-mail: kotikov@theor.jinr.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.02 – Теоретическая физика

Адрес места работы:

141980, Московская обл., г. Дубна, ОИЯИ, ЛТФ
Тел.: +7(496)2163695; e-mail: bltp@theor.jinr.ru

Подпись сотрудника ЛТФ ОИЯИ Котикова Анатолия Васильевича
удостоверяю.

Ученый секретарь ЛТФ ОИЯИ



 А.В. Андреев

16.02.2023