

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Липатова Артема Владимировича
«Жесткие процессы КХД за рамками коллинеарного приближения»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических
наук по специальности 01.04.23 — «Физика высоких энергий».

Диссертационная работа Липатова А.В. выполнена в отделе
теоретической физики высоких энергий НИИЯФ МГУ.

Актуальность темы исследований связана с необходимостью дальнейшего развития методов вычислений в пертурбативной квантовой хромодинамике (КХД) в пределе высоких энергий, а также их применением к различным жестким процессам, которые в настоящее время активно изучаются в экспериментах на современных коллайдерах — процессам рождения тяжелых кварков, их связанных состояний (тяжелых кваркониев), инклюзивного и ассоциативного рождения прямых фотонов, тяжелых калибровочных бозонов и хиггсовских частиц. С теоретической точки зрения исследования этих процессов обычно основываются на гипотезе факторизации эффектов физики больших и малых расстояний. Взаимодействие партонов (кварков и глюонов) на малых расстояниях описывается методами теории возмущений КХД, а непертурбативные эффекты больших расстояний учитываются с помощью партонных функций распределения в протоне и/или волновых функций связанных конечных состояний. Уже один из первых этапов расчетов — вычисление сечений партонных подпроцессов рассеяния — часто сопровождается существенными трудностями, связанными с необходимостью последовательного учета большого вклада поправок высших порядков теории возмущений КХД. Однако значительная часть таких поправок может быть учтена в рамках k_T -факторизационного подхода КХД, основанного на уравнениях Балицкого-Фадина-Кураева-Липатова (BFKL) или Катани-Чиафалони-Фиорани-Маркезини (CCFM) для неинтегрированных (зависящих от поперечного импульса — Transverse Momentum Dependent, или TMD) функций распределения глюонов. С помощью этих уравнений производится суммирование вкладов, пропорциональных $\sim \ln 1/x$, которые являются существенными в области малых долей продольных импульсов x и определяют сечение жестких процессов КХД при энергиях современных коллайдеров. В связи с этим изучение TMD функций распределения глюонов в протоне и, в частности, определение начальных условий для этих функций представляет значительный интерес. Кроме того, получение реалистичных оценок для сечений рассматриваемых в диссертации жестких процессов КХД (с учетом вкладов высших порядков теории возмущений) необходимо для планирования и постановки будущих экспериментов и следовательно является весьма

актуальной задачей. Следует отметить, однако, что достаточно часто результаты расчетов оказываются в противоречии с экспериментальными данными. В качестве примера можно привести процессы рождения чармониев и боттомониев при высоких энергиях, где до сих пор не удалось достигнуть удовлетворительного одновременного описания данных для распределений по поперечному импульсу и поляризационных свойств наблюдаемых частиц. В этом свете значительный интерес представляет непосредственное применение k_T -факторизационного подхода КХД в феноменологических расчетах.

Целью диссертационной работы является улучшение понимания динамики адронных взаимодействий и развитие методов вычислений сечений жестких процессов КХД в рамках k_T -факторизационного подхода. Представленные результаты обладают **научной новизной**, хорошо **обоснованы** и прошли **апробацию** на различных российских и международных конференциях, а также были опубликованы в 42 статьях в рецензируемых журналах, большинство из которых высокорейтинговые, такие как Physical Review D, European Physical Journal C, Journal of High Energy Physics, Physics Letters B. **Достоверность** подтверждается использованием апробированных методов современной теоретической физики высоких энергий.

Общая характеристика диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка цитированной литературы. Объем диссертации составляет 259 страниц, включая 115 рисунков и 11 таблиц. Список литературы содержит 448 наименований.

Введение содержит краткую характеристику темы исследования, обоснование ее актуальности, формулировку цели и задач работы, обсуждение научной новизны работы и основных положений, выносимых на защиту. Отмечается личный вклад автора в работы, выполненные в соавторстве и обсуждается апробация работы.

В первой главе диссертации излагаются основные положения k_T -факторизационного подхода КХД, приводится явный вид и решение некоторых уравнений эволюции партонных распределений в лидирующем логарифмическом приближении. Представлены используемые в работе TMD функции распределения глюонов и кварков, в том числе и две функции, предложенные автором. Продемонстрировано, что применение последней — уже включенной в состав общедоступной библиотеки TMDLib — для описания ряда жестких процессов КХД приводит к лучшему согласию результатов расчетов с экспериментальными данными (по сравнению с TMD распределениями, предложенными в недавнее время другими группами). Обсуждаются различные методы вычисления амплитуд партонных подпроцессов вне массовой поверхности.

Во второй главе k_T -факторизационный подход применяется для изучения процессов рождения тяжелых кварков при высоких энергиях. Вычисляются вклады s и b кварков в структурные функции протона $F_2(x, Q^2)$ и $F_L(x, Q^2)$ в широком диапазоне изменения значений x и Q^2 . Рассматриваются процессы инклюзивного рождения b -струй, процессов одиночного и парного рождения $\psi(2S)$ и J/ψ мезонов, возникающих из распада b -адронов и процессы одиночного рождения t -кварков в протон-протонных столкновениях на коллайдере LHC. Эти процессы позволяют непосредственно получать информацию о функции распределения глюонов в протоне, поскольку в рамках теории возмущений КХД тяжелые кварки рождаются в основном через фундаментальный подпроцесс фотон-глюонного или глюон-глюонного слияния. Проводится сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными коллаборациями ZEUS, H1, CMS, ATLAS и LHCb. Выявлены и изучены кинематические переменные, наиболее чувствительные к выбору TMD распределений глюонов в протоне.

В третьей главе исследуются процессы рождения связанных состояний тяжелых кварков: процессы инклюзивного рождения S - и P -волновых чармониев, боттомониев, а также B_c мезонов на коллайдерах Tevatron и LHC. Вычисляются полные и дифференциальные сечения этих процессов, производится определение численных значений соответствующих непертурбативных матричных элементов и изучаются поляризационные свойства рассматриваемых частиц. С помощью специальной модели перехода пары тяжелых кварков в связанное состояние достигнуто одновременное и самосогласованное описание полного набора экспериментальных данных для процессов инклюзивного рождения J/ψ , $\psi(2S)$, η_c , χ_c , $Y(nS)$ и $\chi_b(mP)$ мезонов, полученных в последнее время на коллайдере LHC — а именно, распределений по поперечному импульсу чармониев и боттомониев, различных отношений их сечений и поляризационных наблюдаемых, что позволяет решить одну из интригующих проблем современной физики высоких энергий. Кроме того, предложен метод, позволяющий получить оценку значения волновой функции B_c мезонов из анализа экспериментальных данных коллабораций CDF и LHCb для отношений сечений рождения B_c и B^+ мезонов.

Четвертая и пятая главы посвящены исследованию процессов рождения прямых фотонов, калибровочных бозонов в сопровождении как струй тяжелых (s или b) кварков, так и струй адронов, а также изучению процессов инклюзивного и ассоциативного рождения хиггсовских частиц на коллайдере LHC. Такие (полуинклюзивные) процессы чувствительны к динамике эволюции глюонов и кварков в протоне и поэтому представляют существенный интерес. Отсутствие необходимости учитывать в расчетах дополнительные механизмы адронизации в конечном состоянии лишь усиливает последний. Вычисляются полные и дифференциальные сечения этих процессов, при этом учет основного вклада механизма глюон-глюонного слияния производится в рамках k_T -

факторизационного подхода. Вклад подпроцессов с участием кварков в начальном состоянии, существенных в области достаточно больших поперечных импульсов (или больших значений переменной x) производится в рамках обычного коллинеарного приближения. Проводится сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными в последние годы на коллайдере LHC. Получена оценка вклада внутреннего очарования в сечение процессов ассоциативного рождения фотонов и струй очарованных кварков. Установлено взаимное соответствие между результатами вычислений с использованием различных уравнений КХД эволюции (CCFM и RB) для TMD глюонных и кварковых распределений в протоне. Выделен спектр наблюдаемых, чувствительных к динамике эволюции этих распределений.

В шестой главе обсуждаются основные возможности и характеристики Монте-Карло генератора событий PEGASUS, разработанного автором диссертации и его коллегами. Этот генератор предназначен для проведения расчетов сечений широкого ряда процессов КХД в протон-протонных или протон-антипротонных столкновениях высоких энергий с учетом TMD динамики партонных распределений и обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с аналогичными инструментами (Монте-Карло генераторами CASCADE и KaTie). Детально описаны процедуры установки, запуска и последующая работа с генератором.

В заключении приводятся полученные автором результаты:

1. Предложены две новые TMD функции распределения глюонов в протоне. Первая из них была получена с помощью численного решения уравнения эволюции CCFM, при этом выражение для соответствующего начального распределения было вычислено в рамках модели кварк-глюонных струн с учетом эффектов насыщения глюонной плотности. Вторая функция была получена аналитически в рамках подхода KMR (в ведущем порядке) с использованием в качестве начальных условий партонных плотностей, вычисленных в приближении двойного скейлинга. Соответствующие феноменологические параметры определены с помощью экспериментальных данных HERA, LHC и RHIC. Показано, что использование в расчетах этих глюонных плотностей приводит к лучшему согласию предсказаний (по сравнению с TMD распределениями, полученными недавно другими группами) с экспериментальными данными для сечений ряда жестких процессов, изучаемых на коллайдерах HERA и LHC.
2. Впервые в рамках k_T -факторизационного подхода КХД достигнуто одновременное описание экспериментальных данных LHC для сечений процессов рождения одной или двух b -струй и процессов одиночного и парного рождения $\psi(2S)$ и J/ψ мезонов, возникающих из распадов b -адронов. Продемонстрировано, что распределения по разности

азимутальных углов между импульсами конечных частиц, разности их быстрот, расстоянию между этими частицами в плоскости азимутальных углов и быстрот, а также распределения по инвариантной массе и поперечному импульсу конечного состояния наиболее чувствительны к выбору TMD глюонной плотности в протоне. Вклад механизма двойного партонного рассеяния в сечения рассматриваемых процессов весьма мал и составляет около 2%.

3. Определены значения непертурбативных матричных элементов η_c , $\psi(2S)$, J/ψ и χ_c мезонов из экспериментальных данных LHC для некоторых TMD функций распределения глюонов. Показано, что использование специальной модели (основанной на теории мультипольного разложения излучения) для описания перехода промежуточных октетных состояний пары очарованных кварков в наблюдаемое синглетное позволяет достичь самосогласованного описания как распределений по поперечному импульсу всего семейства чармониев, так и их поляризационных наблюдаемых.
4. Впервые достигнуто хорошее согласие предсказаний k_T -факторизационного подхода КХД и полного набора экспериментальных данных (включая отношения сечений и поляризационные характеристики) для процессов инклюзивного рождения различных S- и P-волновых боттомониев, полученных на коллайдерах Tevatron и LHC.
5. Показано, что предсказания k_T -факторизационного подхода КХД (с учетом вычисленных в рамках коллинеарного приближения вкладов подпроцессов, включающих кварки в начальном состоянии) находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными LHC для широкого ряда процессов высоких энергий: процессов рождения фотонов или калибровочных бозонов в сопровождении адронных струй или тяжелых (с или b) кварков, процессов одиночного рождения t -кварков, процессов инклюзивного и ассоциативного (в сопровождении струй адронов) рождения бозонов Хиггса, наблюдаемых в различных модах распада. Продемонстрировано, что наиболее чувствительны к выбору TMD глюонной плотности в протоне наблюдаемые, связанные с кинематикой адронных струй (такие, как, например, распределения по разности быстрот конечной частицы и лидирующей струи, инвариантной массе этой системы, разности быстрот двух лидирующих струй).
6. Разработан новый общедоступный Монте-Карло генератор событий PEGASUS, который позволяет в автоматическом режиме вычислять сечения различных жестких процессов КХД с учетом TMD динамики глюонных распределений в протоне. Отличительными особенностями генератора являются обширная библиотека амплитуд вне массовой поверхности партонных подпроцессов (многие из которых которые

отсутствуют в других генераторах) и исключительная простота использования.

В качестве **замечаний** стоит отметить следующие:

1. Не совсем удачно выбрана нумерация глав в диссертации. Так, первая глава идет под номером 2 (под номером 1 — Введение), вторая — под номером 3 и т. д., что сбивает и затрудняет иногда восприятие текста, особенно при сравнении с текстом реферата.
2. В автореферате и тексте работы при описании схемы факторизации введен значок свертки функций распределения с сечениями партонных подпроцессов (уравнения (1) и (2)), о смысле которого читателю предстоит только догадываться.
3. Интересно было бы обсудить также возможность обобщения k_T -факторизационного подхода КХД на случай протон-ядерных соударений, которые являются важной частью программы исследований на LHC.

Сделанные замечания ни в коей мере не снижают общей высокой оценки диссертационной работы, которая несомненно вносит большой вклад в актуальное научное направление. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.23 — «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 Липатов Артем Владимирович несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 — «физика высоких энергий».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сильных взаимодействий отдела экспериментальной физики высоких энергий

Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова

Снигирев Александр Михайлович



15.02.2022

Контактные данные:

Тел.: +74959391257; e-mail: snig@mail.cern.ch

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.04.16 — «физика ядра и элементарных частиц», доктор физико-математических наук

Адрес места работы:

119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, НИИЯФ МГУ

Тел. +7(495)939-1818; e-mail: info@sinp.msu.ru

Подпись А.М. Снигирева удостоверяю

Ученый секретарь НИИЯФ МГУ
кандидат физико-математических наук



Е.А. Сигаева