

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию **Нефедова Максима Александровича «Жесткие процессы в подходе реджезации партонов»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Диссертация Нефедова Максима Александровича посвящена весьма **актуальной** проблеме исследования процессов инклюзивного пар адронных струй и пар лептонов, и ассоциированного рождения прямых фотонов и струй на коллайдерах высоких энергий, прежде всего таких как Большой адронный коллайдер (БАК–LHC) в ЦЕРН (Швейцария), а также Tevatron в Фермилабе (США) и HERA (DESY, Германия), в новой кинематической области для квантовой хромодинамики (КХД), когда полная энергия соударения много больше поперечных импульсов и масс рожденных частиц, которые в свою очередь намного превышают величину масштабного КХД параметра $\Lambda_{\text{КХД}}$ (полужесткий КХД режим или реджевский предел пертурбативной КХД). В отличии от жесткого режима КХД, когда поперечные импульсы и массы образованных частиц сравнимы с начальными энергиями и динамика процесса описывается стандартной КХД-эволюцией Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи-Докшицера (ГЛАПД), в полужестком кинематическом режиме должны появиться новые динамические эффекты, связанные с новой эволюцией Липатова-Фадина-Кураева-Балицкого (БФКЛ). Где заканчивается область применимости ГЛАПД-эволюции и начинается область требующая применения БФКЛ-эволюции? Какова кинематическая область которая может быть описана в обоих подходах? - все эти вопросы являются предметом интенсивного теоретического и экспериментального изучения физики высоких энергий в настоящее время и затронуты в представленной работе .

Как известно, в обычных инклюзивных жестких процессах, когда жесткость процесса сравнима с полной энергией соударения, имеются факторизационные теоремы о (коллинеарной) факторизации мягких непертурбативных (функции распределения партонов и функции фрагментации) и жестких пертурбативных вкладов (партонный подпроцесс). В более сложном случае реджевского режима пертурбативной КХД с двумя масштабами имеются на данный момент несколько модельных подходов, так как в настоящее время прямое применение общего БФКЛ подхода с реджезованными глюонами и кварками затруднено вследствие его большой сложности и неопределенностями с факторизацией таких процессов.

Один из популярных методов, используемых в настоящее время - это так называемый подход кТ-факторизации, который подразумевает факторизацию

сечений на функции распределения партонов, зависящие также от поперечного импульса (неинтегрированные функции партонных распределений - нФПР) и партонный подпроцесс вне массовой поверхности. В общем случае, калибровочно-зависимый подпроцесс с начальными партонами вне массовой поверхности в реджевском пределе пертурбативной КХД только в некоторых случаях является калибровочно-инвариантным. Поэтому, строго говоря, данный подход применим только для ограниченного класса партонных подпроцессов.

Подход в представленной диссертации, основанный на использовании калибровочно-инвариантных подпроцессов с реджезованными партонами Липатова свободен от подобных недостатков, однако для феноменологических приложений приходится использовать модельные неинтегрированные функции распределения партонов.

Целью данной диссертации является применение подхода реджезованных партонов (РП) в лидирующем приближении (ЛП) реджевской пертурбативной КХД, а также с элементами следующего за лидирующим приближения (СЛП) для вычислений различных инклюзивных и полуинклюзивных процессов при высоких энергиях, достижимых на современных коллайдерах.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, перечня цитируемой литературы, содержащего 223 ссылки, списка рисунков, списка таблиц и 5 приложений. В диссертации содержится 43 рисунка и 9 таблиц. Общий объем диссертации составляет 159 страниц.

Введение содержит краткую характеристику темы исследования и обоснование ее актуальности, формулировку цели и задач работы, обсуждение новизны работы и основных положений, выносимых на защиту, а также описание структуры диссертации. В конце введения отмечается личный вклад автора в полученные результаты и обсуждена апробация работы.

В первой главе содержится краткое введение в физику жестких процессов, теорию реджезации кварков и глюонов, описанию формализма калибровочно-инвариантного эффективного действия Л. Н. Липатова для реджевского предела КХД и неинтегрированной партонной функции распределения Кимбера-Мартин-Рыскина (КМР), которые являются основными элементами подхода реджезации партонов. После краткого введения в теорию коллинеарной партонной модели (КПМ) рассматривается проблема двух-масштабных полужестких процессов и представлен обзор наиболее популярных подходов к её решению, таких как Монте-Карло моделирование партонных ливней, аналитические схемы суммирования, и различные схемы кТ-факторизации в адронных процессах.

Далее после рассмотрения теории реджезации глюона в КХД на конкретных

примерах описан формализм калибровочно-инвариантного эффективного действия Л. Н. Липатова для реджевского пертурбативной предела КХД, который позволяет строить асимптотические выражения для амплитуд и новые калибровочно-инвариантные эффективные вершины реджезованных глюонов и кварков с обычными партонами. Также в данной главе затронуты проблемы, возникающие при феноменологическом применении формализма БФКЛ и дан краткий обзор основных существующих теоретических подходов, которые используются для описания процессов в реджевском пределе пертурбативной КХД. Обсуждается связь используемого в диссертации подхода с различными эволюционными уравнениями пертурбативной КХД: ГЛАПД, БФКЛ, а также уравнениями Катани-Чиафалони-Фиорани-Маркезини (КЧФМ - CCFM) и Кимбера-Мартина-Рыскина (КМР).

Вторая глава посвящена рассмотрению ряда конкретных жестких процессов в ЛП и неполном СЛП приближении подхода реджезованных партонов. Рассмотрены правила Фейнмана для эффективной теории, выводу квадратов модуля амплитуд для основных древесных КХД процессов с реджезованными партонами в начальном состоянии, технике проверки их калибровочной инвариантности и коллинеарного предела, а так же описанию разработанной программы ReggeQCD для пакета FeynArts работающего в среде компьютерной алгебры *Mathematica*. Программа позволяет строить выражения для древесных КХД амплитуд с множественностью конечного состояния вплоть до трех частиц (кварков, глюонов или фотонов).

Полученные выше результаты применяются для описания спектров пар адронных струй по азимутальному углу между поперечными импульсами струй, проводится сравнение теоретических предсказаний с экспериментальными данными по данному процессу и также по азимутальным декорреляциям изолированных фотонов, полученными коллаборациями ATLAS и CMS на БАК. Также представлены результаты работы, в которой ЛП ПРП успешно применяется к процессу совместного фоторождения фотона и струи на коллайдере DESY HERA и результаты по применению ЛП ПРП для процесса Дрелла-Яна при энергиях Фермилаба.

Третья глава посвящена исследованию феноменологии рождения тяжелых кваркониев в рамках ЛП ПРП и формализма факторизации нерелятивистской КХД (НРКХД-факторизация). После обзора современного состояния физики рождения тяжелых кваркониев представлены новые результаты, полученные для феноменологии рождения тяжелых кваркониев в рамках ПРП с использованием гипотезы НРКХД-факторизации. Полученные результаты сравниваются с данным, полученными на Тэватроне и БАК.

В **заключении** сформулированы основные результаты, представленные в диссертации.

Основные результаты диссертации выносимые на защиту:

Среди **основных положений, выносимых на защиту** отметим:

1. Показано, что октетные непертурбативные матричные элементы (НМЭ) полученные в результате фита данных Тэватрона при энергии 1.8 и 1.96 ТэВ по инклюзивным p_T -спектрам прямых очарованных кваркониев в рамках ЛП ПРП с нПФР КМР и гипотезы НРКХД-факторизации, позволяют описать данные коллабораций ATLAS, CMS и LHCb в pp -столкновениях при энергии 7 ТэВ на БАК. Продемонстрирована необходимость учета фрагментационного механизма в лидирующем логарифмическом приближении для описания данных при больших p_T . Получено хорошее описание p_T -спектров состояний боттомония, измеренных коллаборациями ATLAS, CMS и LHCb в pp -столкновениях при 7 ТэВ а так же данных Тэватрона при 1.96 ТэВ.

2. С использованием полученных в результате описанных выше фитов НМЭ в рамках ЛП ПРП и НРКХД была вычислена зависимость поляризации от p_T для кваркониев. Большая поперечная поляризация чармония находится в противоречии с данными при энергиях Тэватрона и БАК.

3. Получены аналитические выражения для квадратов модуля амплитуд основных КХД процессов $2 \rightarrow 2$ с реджезованными кварками и глюонами в начальном состоянии. Продемонстрирована их калибровочная инвариантность и выполнение коллинеарного предела. Показано, что полученные выражения в сочетании с нПФР КМР позволяют описать спектры азимутальной декорреляции пар струй при энергиях БАК. Написана программа ReggeQCD для пакета FeynArts, позволяющая сгенерировать амплитуду любого древесного КХД процесса с реджезованными кварками и глюонами в начальном состоянии и множественностью конечного состояния вплоть до 3 (кварков, глюонов или фотонов). Написан комплекс программ в системе компьютерной алгебры *Mathematica* позволяющий проверить калибровочную инвариантность полученной амплитуды и вычислить квадрат её модуля.

4. Показано, что ЛП ПРП в сочетании с нПФР КМР позволяет описать имеющиеся данные по pT -спектрам Дрелл-Яновских лептонных пар и угловым распределениям лептонов в системе покоя пары в зависимости от pT в области инвариантной массы пары Q , не превышающей массу Z -бозона. Предсказано нарушение соотношения Лама-Тунга для угловых коэффициентов области малых pT и Q в области малых значений скейлинговой переменной x .
5. Проведены расчеты сечений совместного фоторождения прямого фотона и струи, дифференциальных по поперечным энергиям, быстротам фотона и струи, азимутальному углу между поперечными импульсами фотона и струи и ряду других переменных. Получено удовлетворительное согласие расчетов в ЛП ПРП с данными для большого набора дифференциальных спектров измеренных коллаборациями ZEUS и H1 на ер-коллайдере DESY HERA.
6. Проведены расчеты сечений рождения пар прямых изолированных фотонов в протон-протонных и протон-антипротонных соударениях, дифференциальных по поперечным энергиям фотонов, инвариантной массе пары и азимутальному углу между поперечными импульсами фотонов. Получено удовлетворительное согласие теоретических предсказаний в описанном выше неполном СЛП приближении ПРП с экспериментальными данными коллабораций Тэватрона и БАК. Наилучшее согласие с экспериментом достигнуто в области больших pT , где СЛП поправка подавлена, что демонстрирует самосогласованность подхода.

Диссертация написана в кратком, но ясном стиле. Небольшим недостатком диссертации можно считать употребление сленга и некритичное использование переведенных терминов (“скрипт-описание”, “модел-файл”, “регион” и т. п.). Несмотря на довольно тщательное оформление имеются опечатки в (“открывает” на стр. 9, “коллинеарный” на стр. 14, “центр” на стр. 81 и т. п.). Также пропущена одна из важных ссылок в списке литературы на работу Липатова, Кураева и др. (2005) по фейнмановским правилам для эффективного действия (хотя в работах, на которых основана диссертация, она, естественно, имеется), но эти отмеченные недостатки не меняют общей высокой положительной оценки диссертации.

Диссертация является законченным научным трудом и выполнена на высоком научном уровне. Содержащиеся в ней многие **новые результаты** получены впервые. Ее **практическая и научная ценность** состоит в развитии нового

теоретического подхода и в успешном описании широкого набора данных уже завершённых экспериментов на ускорителях HERA (DESY, Германия), TEVATRON (Фермилаб, США) в рамках единого подхода, а также даёт основу для анализа данных современных экспериментов на LHC (ЦЕРН, Швейцария). Результаты диссертации могут быть использованы также в ПИЯФ НИЦ КИ, ИФВЭ НИЦ КИ, ИТЭФ НИЦ КИ, ОИЯИ, НИИЯФ МГУ, ФИАН, ИЯИ РАН, ИЯФ СО РАН и др.

Личный вклад автора диссертации в работах, составляющих её основу, является определяющим. Результаты, полученные в диссертации, являются новыми и оригинальными, с достаточной полнотой опубликованы в ведущих реферируемых научных журналах, неоднократно докладывались на международных научных семинарах, совещаниях и конференциях. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам. Автореферат в целом верно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Нефедова Максима Александровича «Жёсткие процессы в подходе реджезации партонов», соответствует специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика» и отвечает всем требованиям положения о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней, а её автор Нефедов Максим Александрович несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

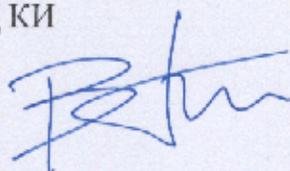
10 октября 2016 г.

Заместитель руководителя Отделения Физики

Высоких Энергий ФГБУ ПИЯФ НИЦ КИ

ведущий научный сотрудник

д.ф.-м.н. Ким Виктор Тимофеевич



Подпись В.Т. Кима удостоверяю

Заместитель Директора ФГБУ ПИЯФ НИЦ КИ

д.б.н. С.В. Саранцева

