

## ОТЗЫВ

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.

Описание различных жестких процессов при высоких энергиях является важной и актуальной задачей. При этом наиболее часто применяется коллинеарная факторизация, в которой поперечная динамика описывается уравнением Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи-Докшицера, а продольная – непертурбативными коллинеарными партонными распределениями.

Наряду с этим, когда рассматриваются малые  $x$ , в особенности важные при максимальных энергиях, возможен и другой вариант, когда продольная динамика определяется пертурбативным уравнением Балицкого-Фадиной-Кураева-Липатова (БФКЛ), а поперечная аккумулируется в импакт-факторах. неинтегрированных партонных распределениях и дипольных сечениях. При этом наиболее последовательным и элегантным способом расчета, гарантирующем калибровочную инвариантность, является метод эффективного действия для реджезованных партонов, новым применением которого и посвящена диссертация М.А. Нефедова.

Диссертация объемом 159 страниц состоит из введения, 3 глав, заключения, 5 приложений, списков рисунков, сокращений и условных обозначений, таблиц и списка цитируемой литературы, состоящего из 223 ссылок.

Введение посвящено краткому описанию теории жестких процессов, описаны задачи диссертации и ее структура, обоснованы ее новизна, научно-практическая ценность и достоверность

В первой главе излагаются основы коллинеарной факторизации (называемой везде в тексте коллинеарной партонной моделью), теории реджезации партонов, уравнение БФКЛ. Рассмотрение партонов в жестком подпроцессе как реджезованных позволяет ввести калибровочно-инвариантное определение для коэффициента жесткого рассеяния («амплитуды») жесткого процесса с партонами вне массовой поверхности в начальном состоянии. Причем, в отличие от зависящей от поперечного импульса (TMD)-факторизации, где зависимостью от виртуальности партона в подпроцессе пренебрегается, виртуальность партонов может быть любой, в том числе и сравнимой с продольной компонентой импульса партона.

Вторая, центральная, глава посвящена применению подхода реджезации партонов (ППП) в лидирующем приближении (LO) по константе связи сильного взаимодействия к ряду жестких процессов, таких как парное рождение адронных струй в протонных столкновениях, ассоциированное фоторождение фотона и струи и процесс Дрелла-Яна в протон-протонных и протон-антипротонных столкновениях. Кроме того, в рамках неполного следующего за лидирующим приближения (неполного NLO) рассматривается процесс парного рождения изолированных прямых фотонов в протон-протонных и протон-антипротонных столкновениях. Для решения поставленных задач автором получены выражения для квадратов модуля амплитуд всех древесных партонных подпроцессов  $2 \rightarrow 2$  с реджезованными партонами в начальном состоянии и написан файл-описание модели для пакета FeynArts, позволяющий генерировать древесные амплитуды партонных подпроцессов  $2 \rightarrow 2$  и  $2 \rightarrow 3$  в эффективной теории Липатова.

В результате удается описать спектры азимутальной декорреляции пар адронных струй, измеренные коллаборациями Большого Адронного Коллайдера (LHC) ATLAS и CMS при энергии протонов, равной 7 ТэВ, вплоть до  $\Delta\phi \sim \pi/2$ . Описание при меньших углах хуже, обсуждаются возможные качественные причины этого. Также в рамках LO с учетом только подпроцессов  $2 \rightarrow 2$  может быть достигнуто удовлетворительное согласие с экспериментальными данными коллабораций ZEUS и H1 для большого количества

дифференциальных наблюдаемых в процессе совместного фоторождения прямого фотона и струи. В данном процессе оказывается существенным вклад партонного подпроцесса рассеяния реджезованного глюона на фотоне, идущего через кварковую петлю типа «ящик». В работе получено точное выражение для этого вклада, учитывающее виртуальность реджезованного глюона в начальном состоянии.

Исследование процесса Дрелла-Яна в LO с учетом КХД К-фактора, возникающего за счет поправок с мягкими виртуальными глюонами к  $qq\gamma$ -вершине, показало, что могут быть удовлетворительно описаны все имеющиеся данные по сечениям инклюзивного рождения лептонных пар, дифференциальным по инвариантной массе пары и её поперечному импульсу, в области инвариантных масс пары меньших массы Z-бозона. Описаны также данные по зависимости наблюдаемых, характеризующих поляризацию виртуального фотона, полученных коллаборацией NuSea. Последний результат является достаточно тонким тестом использованной при расчетах амплитуды, содержащей вершину (реджезованный кварк)--(реджезованный кварк)--фотон (вершину Фаина-Шермана). Нетрудно убедиться, что выражения для угловых коэффициентов удовлетворяют ограничению, следующему из положительной определенности матрицы плотности ( $|A_2| < 2A_0$ ), что является дополнительной проверкой правильности результата. Приводятся качественные соображения о приближенном выполнении соотношения Лэма-Тунга. Было бы интересно рассмотреть также недавние экспериментальные результаты по поляризации Z-бозонов, опубликованные коллаборациями CMS и ATLAS, где нарушения этого соотношения весьма заметны, и вычислить другие элементы матрицы плотности.

Также во второй главе обсуждается расчет сечений парного рождения изолированных прямых фотонов в протон-протонных и протон-антипротонных столкновениях в рамках неполного NLO. При решении этой задачи, кроме LO подпроцесса  $2 \rightarrow 2$ , были учтены так же древесные NLO партонные подпроцессы  $2 \rightarrow 3$ . Для устранения двойного счета, в работе введена соответствующая процедура вычитания. Численные результаты для дифференциальных сечений находятся в хорошем согласии с экспериментом в области больших поперечных импульсов пары и малого азимутального угла между фотонами. При такой кинематике, коллинеарная факторизация испытывает наибольшие трудности. В то же время, область малых поперечных импульсов пары или область  $\Delta\phi \sim \pi$  не описывается в неполном NLO, но разумно описывается в NLO и NNLO коллинеарной факторизации. Это может восприниматься как указание на дополненность подходов.

В третьей главе диссертации приведены новые результаты в области физики рождения тяжелых кваркониев, полученные автором в рамках LO и гипотезы факторизации нерелятивистской КХД (НРКХД-факторизации). Проведен детальный анализ всех имеющихся данных по инклюзивному рождению чармониев и боттомониев в протон-протонных и протон-антипротонных столкновениях при высоких энергиях. Выполнены фиты непертурбативных (квадратов) матричных элементов, описывающих переход пары тяжелых кварка и антикварка в наблюдаемое состояние. Показано, что их небольшой набор, позволяет описать все имеющиеся данные по  $p_T$ -спектрам прямых  $J/\psi$ ,  $\Upsilon(1,2,3S)$  и  $\psi(2S)$  мезонов в протон-протонных и протон-антипротонных столкновениях при энергиях 7 ТэВ (ЛHC) и 1.96 ТэВ (Теватрон). Несмотря на хорошее описание спектров по поперечному импульсу, расчеты основанные на гипотезе НРКХД-факторизации не в состоянии описать наблюдаемого рождения неполяризованных  $\psi(2S)$ -мезонов, а предсказывают преобладание поперечной поляризации, что известно в литературе как «heavy quarkonium polarization puzzle». В целом, материал этой главы является важным шагом в создании глобального фита в области описания кваркониев.

В заключении кратко подводятся итоги работы, приложения посвящены важным техническим деталям.

Следует отметить большой объем работы, выполненный соискателем на высоком уровне.

Полученные выражения для матричных элементов и их компьютерная реализация, несомненно, найдут дальнейшие приложения. Численные расчеты и их сравнение с экспериментальными результатами позволило осуществить первые проверки полученных выражений и прояснить важные аспекты физики жестких процессов на коллайдерах.

Диссертация написано ясно и весьма подробно, число опечаток невелико. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Ее материалы своевременно опубликованы в ведущих научных журналах, докладывались на Российских и Международных конференциях.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Максим Александрович Нефедов, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук,  
начальник сектора Лаборатории теоретической  
физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ  
ул. Жолио-Кюри 6,  
141980 Дубна, Московская область,  
(7-49621) 62-166, [teryayev@theor.jinr.ru](mailto:teryayev@theor.jinr.ru)



О.В. Теряев

«29» сентября 2016 г.

Подпись О.В. Теряева удостоверяю.

Ученый секретарь ЛТФ ОИЯИ



А.В. Андреев