

О Т З Ы В

официального оппонента о диссертации Карпишкова Антона Витальевича «Парные корреляции в жёстких процессах при высоких энергиях в подходе реджезации партонов», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Изучение жёстких процессов при энергиях много больших энергетического масштаба жёсткого процесса в рамках пертурбативной квантовой хромодинамики (КХД) с более, чем одним жёстким масштабом представляет собой важную и актуальную задачу. Традиционная коллинеарная партонная модель, в которой эволюция начальных кварков и глюонов описывается уравнениями Докшицера-Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи (ДГЛАП), испытывает значительные трудности при исследовании таких процессов в связи с необходимостью учёта большого числа поправок высших порядков по константе сильного взаимодействия.

Для решения данной проблемы был развит альтернативный подход k_T -факторизации, который учитывает наличие большого поперечного импульса у начальных партонов. В стандартном подходе k_T -факторизации излучение жёстких глюонов с большим поперечным импульсом на начальной стадии эволюции партонов, участвующих в жёстком процессе, суммируется в неинтегрированные партонные функции распределения. Однако такой подход имеет ряд существенных недостатков, например, невозможно калибровочно-инвариантно рассчитать поправки более высокого порядка, также отсутствует определение неинтегрированных партонных функций для кварков, что резко ограничивает применение данного приближения. Переход к пределу высоких энергий, к так называемому реджевскому пределу, открывает возможность для построения эффективной теории, в рамках которой начальные партоны представляют собой калибровочно-инвариантные степени свободы – реджезованные кварки и глюоны. Использование амплитуд с реджезованными партонами в k_T -факторизации позволяет разработать самосогласованный подход реджезации партонов, развитию которого и посвящена диссертационная работа Карпишкова А. В.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы.

Во введении сформулированы цели и задачи исследования, обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость работы. Перечислены

основные положения, выносимые на защиту, обсуждена достоверность результатов исследования, отмечен личный вклад автора.

В первой главе кратко описан формализм коллинеарной факторизации в партонной модели и КХД. Обсуждается возможность расширения коллинеарной партонной модели на случай жёстких многомасштабных процессов в области высоких энергий и сформулированы основные положения подхода реджезации партонов. Этот подход описан с помощью предельного перехода для вспомогательного подпроцесса коллинеарного приближения КХД в области мультiredжевской кинематики. Представлено также построение приближения модифицированной мультiredжевской кинематики, применяемого при выводе основной формулы подхода реджезации партонов в k_T -факторизованном виде в лидирующем порядке теории возмущений. Данное приближение позволяет воспроизвести как коллинеарный, так и мультiredжевский пределы КХД. В нём партонные функции распределения коллинеарной модели естественным образом заменяются на неинтегрированные партонные функции распределения, учитывающие наличие поперечного импульса и виртуальности у начальных партонов. При этом калибровочно-инвариантное определение партонного сечения основано на использовании эффективной теории поля с реджезованными кварками и глюонами в качестве начальных партонов вне массовой поверхности.

Во второй главе подход реджезации партонов применён к описанию одиночного и парного рождения тяжёлых D и B мезонов в лидирующем порядке теории возмущений. В расчётах сечений одиночного рождения D и B мезонов в pp и $p\bar{p}$ столкновениях при энергиях от 1.96 до 13 ТэВ показана важность учёта партонного подпроцесса реджеон-реджеон→глюон. Установлено, что он является доминирующим. Рождение тяжёлых мезонов при этом описывается в рамках подхода коллинеарной фрагментации. Отметим, что на примере расчётов сечений одиночного рождения D мезонов проведено сравнение результатов в различных моделях неинтегрированных функций распределения партонов. Продемонстрировано согласие предсказаний этих моделей в пределах теоретической погрешности, а также с экспериментальными данными. Изучены различные корреляционные наблюдаемые в процессах парного рождения D мезонов. Показано, что согласие с экспериментальными данными может быть достигнуто без привлечения подхода двойного партонного рассеяния. Важный результат получен при изучении корреляций в рождении струй, содержащих B мезоны. Рассчитанная радиационная поправка позволила описать данные коллаборации CMS в области малых значений разности азимутальных углов B мезонов, что свидетельствует о самосогласованности используемого подхода.

Описанию феноменологии совместного рождения боттомония и D мезонов в лидирующем порядке подхода реджезации партонов посвящена третья глава диссертации. В ней кратко изложен формализм нерелятивистской КХД, позволяющий описывать процессы рождения и распада тяжёлых кваркониев на основе теории возмущений. Этот формализм совместно с подходом реджезации партонов применён для изучения ассоциированного рождения $\Upsilon(1S)$ и D мезонов на ускорителе LHC при энергии 7 ТэВ. Подчеркнём, что матричные элементы с учётом октетного S -волнового состояния боттомония и глюона в конечном состоянии, а также аналогичные матричные элементы с боттомонием в P -волновом состоянии, важные для расчёта вкладов распада возбуждённых состояний Υ мезонов, были получены впервые. Кроме того, рассчитаны квадраты модулей амплитуд рождения Υ совместно с парой очарованных кварков, один из которых фрагментирует в D мезон. Найденные в рамках решения данной задачи спиральные амплитуды также являются новыми. Показано, что в лидирующем порядке подхода реджезации партонов удаётся описать около половины наблюдаемого экспериментального сечения, что значительно ограничивает возможность применения подхода двойного партонного рассеяния. Стоит, однако, отметить, что не для всех корреляционных наблюдаемых получено согласие с данными коллаборации LHCb. Нерешенной осталась проблема описания зависимости спектра от разницы азимутальных углов Υ и D мезонов.

Отдельный интерес представляет четвёртая глава диссертации. В ней представлены результаты расчётов корреляций в совместном рождении фотона с одной и двумя адронными струями в протон-антипротонных столкновениях на ускорителе Тэватрон в лидирующем порядке подхода реджезации партонов. Актуальность исследований таких процессов обусловлена возможностью более точного извлечения информации о партонных плотностях в протоне и высокой чувствительностью корреляционных наблюдаемых ко вкладу двойного партонного рассеяния. Изучены процессы прямого и фрагментационного рождения фотона и струи. Полученные результаты согласуются с вычислениями в Монте-Карло генераторе JETPHOX в следующем за лидирующем порядке теории возмущений по константе сильного взаимодействия.

Важный результат был получен при исследовании корреляций в рождении фотона совместно с двумя адронными струями. В эксперименте коллаборации D0 в разных интервалах поперечного импульса сублидирующей струи измерялись спектры по разности азимутальных углов между векторной суммой поперечных импульсов фотона и лидирующей струи и вектором поперечного импульса сублидирующей струи. Такая наблюдаемая является очень чувствительной к возможному вкладу двойного партонного

рассеяния. В диссертационной работе впервые получены аналитические выражения для квадратов модулей калибровочно-инвариантных амплитуд подпроцессов $2 \rightarrow 3$ с реджезованными партонами в начальном состоянии и фотоном и двумя партонами в конечном состоянии. Показано, что если рассматривать только ДГЛАП-эволюцию, то для описания экспериментальных спектров необходимо учитывать механизм двойного партонного рассеяния. Альтернативное решение предложено на основе анализа режима эволюции начальных партонов, учитывающего наличие у них поперечного импульса, большего чем масштаб жёсткого процесса. Для этого введён свободный параметр, определяющий долю вклада мультiredжевской кинематики в сечение изучаемого процесса, который был извлечён из данных коллаборации D0. Интересно было бы изучить поведение данного параметра в других процессах с участием струй при схожей кинематике.

В заключении перечислены основные результаты работы, а также сформулированы следующие из них выводы.

В качестве замечаний и пожеланий укажем на следующее. Во-первых, в диссертации используется большое число неочевидных сокращений, которые существенно усложняют её чтение. Во-вторых, имеется ряд опечаток, самой существенной из которых является несоответствие нумерации формул ссылкам в автореферате – нумерация ссылок сдвинута на 1 вперёд. В-третьих, все процессы рассматриваются в приближении безмассовых кварков, однако ряд вычислений проведён в широкой области импульсов, включая малые, где такое приближение неоправданно. Интересно было бы обсудить возможность выхода за рамки приближения безмассовых кварков.

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают научной ценности диссертации, а являются скорее пожеланиями по улучшению представления результатов и дальнейшему развитию исследований.

Диссертация Карпишкова Антона Витальевича является законченным научным исследованием, содержащим новое решение актуальной научной задачи – изучение парных корреляций в жёстких процессах при высоких энергиях. Полученные результаты имеют важное значение для понимания процессов рождения тяжёлых мезонов, а также рождения фотона и адронных струй в столкновениях протонов при высоких энергиях. Они могут быть использованы для анализа данных на современных ускорителях и планирования новых экспериментов.

Основные результаты диссертации своевременно опубликованы в ведущих научных журналах, докладывались на международных и российских конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

