



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИЯФ СО РАН

чл.-корр. РАН

П.В. Логачев

« 31 » августа 2016г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации **Нефедова Максима Александровича** "Жесткие процессы в подходе реджезации партонов", представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – "теоретическая физика".

Исследование процессов с большими передачами импульса (жестких процессов) – одна из основных задач современных лептон-адронных и адрон-адронных коллайдеров. Кроме того, что в жестких процессах наиболее вероятно проявление новой физики, они обладает еще и тем достоинством, что могут быть количественно описаны в рамках существующей теории элементарных частиц, так что экспериментальные данные могут быть сопоставлены с предсказаниями теории. Поэтому актуальность темы диссертации несомненна.

К сожалению, теоретическое описание не является полностью модельно независимым, так как и в жестких процессах есть связанная с начальными адронами "мягкая" стадия, которая не описывается теорией возмущений. Поэтому сечения таких процессов представляются свертками распределений партонов (кварков и глюонов) в адронах с сечениями жестких партонных процессов. Партонные сечения вычисляются в теории возмущений. Что же касается партонных распределений, то для них могут быть получены только уравнения эволюции (либо по поперечному, либо по продольному импульсам), а начальные условия для этих уравнений должны извлекаться из эксперимента. Достоинством такого описания является универсальность партонных распределений: они не зависят от типа партонного жесткого процесса.

Наиболее распространенным способом теоретического описания жестких процессов является подход, называемый коллинеарной партонной моделью (КПМ). В этой модели при вычислении сечений жестких партонных процессов не учитываются поперечные импульсы партонов, приобретенные процессе эволюции, так что распределение по поперечным импульсам определяется начальными условиями и является характеристикой адронов. Для ряда процессов это оказывается недостатком, создающим трудности при описании экспериментальных данных, увеличивающиеся с увеличением жесткости процессов. Другой недостаток проявляется при описании процессов с полной энергией столкновения адронов много большей характерного масштаба жесткости партонного взаимодействия. Он связан с "продольными" логарифмическими поправками, которые не учитываются в КПМ. В настоящее

время активно развиваются другие подходы, в которых учитывается поперечные импульсы партонов, приобретаемые в процессе эволюции, и продольные логарифмические поправки. В этих подходах вводятся так называемые неинтегрированные партонные распределения, зависящие не только от продольного, но и от поперечного импульса. Один из таких подходов (так называемая  $k_t$ -факторизация), использующий так называемое неинтегрированное глюонное распределение (или распределение реджезованных глюонов), возник довольно давно. В диссертации развивается сравнительно новый подход, называемый подходом реджезованных партонов (ПРП), в котором наряду с глюонным используются также неинтегрированные кварковые распределения. Использование в качестве партонов реджезованных глюонов и кварков позволяет определять сечения жестких партонных процессов калибровочно инвариантным образом, с помощью предложенной Л.Н. Липатовым эффективной теории поля для КХД-амплитуд в мульти-реджевской кинематике.

Основная часть диссертации состоит из введения, трех глав и заключения. Кроме этого, диссертация содержит списки сокращений и условных обозначений, литературы, рисунков, таблиц и пять Приложений.

Во введении определена тема исследования, обоснована её актуальность, сформулированы цели работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, обоснованы значимость и достоверность полученных результатов, описана их апробация, определен личный вклад автора в их получение и приведена структура диссертации.

В первой главе диссертации дается краткий обзор теории жестких процессов в КХД и теоретико-полевых оснований коллинеарной факторизации, рассматривается явление реджезации глюонов и кварков в КХД, вводится эффективное действие для процессов в мульти-реджевской кинематике с глюонами и кварками в  $t$ -канале, обсуждается уравнение БФКЛ в лидирующем логарифмическом приближении и большие радиационные поправки от следующего за лидирующим приближения. В последнем параграфе первой главы формулируются основные положения подхода реджезованных партонов.

В первом параграфе второй главы диссертации подробно рассматриваются правила Фейнмана эффективной теории. Для решения поставленных феноменологических задач, автором диссертации был разработан файл описания модели для пакета FeynArts, работающего в среде компьютерной алгебры Mathematica, который автоматически генерирует амплитуды процессов  $2\rightarrow 2$  и  $2\rightarrow 3$  по правилам Фейнмана эффективной теории поля Л.Н. Липатова с начальными реджезованными глюонами или кварками и вычисляет их квадраты модулей. Далее во второй главе диссертации, в рамках подхода реджезованных партонов, рассматривается ряд жестких процессов при высоких энергиях на коллайдерах Tevatron, HERA и LHC: процесс парного рождения струй в адронных столкновениях, совместное фоторождение на протоне фотона и струи, процесс адронного рождения Дрелл-Яновских лептонных пар и процесс адронного рождение пар изолированных прямых фотонов. Впервые были вычислены амплитуды ряда древесных подпроцессов  $2\rightarrow 2$  и  $2\rightarrow 3$  с реджезованными партонами в начальном состоянии, а так же однопетлевых диаграмм типа "ящик" с одним и двумя реджезованными глюонами в начальном состоянии. Эти результа-

ты были использованы для описания процессов парного рождения струй, струи и фотона и дифотонов. В работах по рождению дифотонов и совместному рождению фотона и струи впервые в ПРП был учтен вклад реальных радиационных поправок следующего порядка малости по константе сильного взаимодействия и разработана схема вычитания двойного счета, связанного с разделением по быстротам в жестком подпроцессе в партонном каскаде.

Во второй главе диссертации дан обзор наиболее значимых феноменологических результатов, полученные в работах автора: описание азимутальных декорреляций в парном рождении струй на ЛНС, описание спектров массивных лептонных пар в ПРП при учете только аннигиляции реджезованных кварков в виртуальный фотон, описание различных корреляционных спектров в совместном фоторождении фотона и струи и парном рождении фотонов.

В третьей главе диссертации был проведен расчет  $p_t$ -спектров тяжелых кваркониев. Для описания образования связанных кваркониев парой тяжелых кварка и антикварка использовалась модель, основанная на нерелятивистской квантовой хромодинамике. Специально исследовались поляризационные эффекты и роль фрагментационного механизма рождения тяжелых кваркониев при больших поперечных импульсах. Показано, что спектры чармониев и боттомониев хорошо описываются в ПРП, получено удовлетворительное описание зависимости поляризации боттомониев от поперечного импульса. Однако предсказания для поляризации чармониев находятся в противоречии с экспериментальными данными. Это скорее связано с грубостью нерелятивистского приближения при чармония, чем с динамикой жесткого взаимодействия кварков и глюонов.

В заключении суммируются основные результаты работы и сделанные выводы. Полученные результаты, изложенные в диссертации, говорят о применимости ПРП для описания многомасштабных наблюдаемых чувствительных к многократным дополнительным излучениям жестких партонов.

Следует заметить, что некоторые части теоретического обзора в первой главе диссертации (таких как описание "регионов обсуждение следующих за лидирующим приближений в подходе БФКЛ) можно было бы опустить без всякого вреда (а скорее с пользой) для диссертации, так что весь обзор можно было бы заметно сократить. С имеющимся в обзоре утверждением, что "последний шаг эволюции можно включить в жесткий процесс" (стр. 39) нельзя согласиться, поскольку эволюция означает переход от меньшего масштаба виртуальности к большему, а в жестком процессе виртуальность фиксирована. К сожалению, остается неясным, насколько согласованным является использование неинтегрированных партонных функций распределений Кимбера-Мартина-Рыскина с реджеонами в качестве партонов.

Имеются в диссертации и грамматические и стилистические погрешности. Наряду со случайными опечатками (такими, как "коллениарными" на стр. 14), систематически встречается употребление "так же" вместо "также" "по этому" вместо "поэтому". Встречаются и жаргонные выражения типа "кластерировать и неудачные на мой взгляд термины типа "регион" (для фейнмановской диаграммы) и "релевантный и

обороты типа "находясь в конфайнменте внутри наблюдаемых адронов". В Списке литературы встречается "смесь французского с нижегородским" (как в [92] Atwall J. и др.). Но подобные погрешности практически неизбежны в работе большого объема. В диссертации их число невелико и не мешает восприятию текста. В целом можно сказать что диссертация написана хорошим грамотным языком.

Сделанные выше замечания не умаляют общей высокой оценки диссертации.

В целом работа выполнена на высоком теоретическом и математическом уровне. Безусловно, она не могла быть проделана без высокой квалификации автора.

Результаты диссертации представляют несомненный научный интерес и имеют значимую практическую ценность. Они полностью отражены в публикациях автора, большинство из которых – в ведущих физических журналах, неоднократно докладывались на российских и международных научных конференциях и известны научной общественности.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертация Максима Александровича Нефедова является законченным научным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Диссертация безусловно удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Её автор несомненно заслуживает ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Отзыв составил

доктор физико-математических наук, профессор

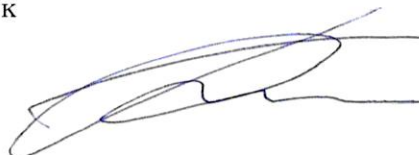


Фадин В.С.

Отзыв рассмотрен и одобрен

на заседании секции физики высоких энергий Ученого Совета ИЯФ  
протокол N.34 от 31 августа 2016 г.

Председатель секции физики высоких энергий Ученого Совета ИЯФ  
доктор физико-математических наук  
член-корреспондент РАН



Бондарь А.Е.