

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Захарова Бронислава Глебовича “Радиационные энергетические потери и эффект Ландау-Померанчука-Мигдала в аморфных средах в КЭД и КХД: метод интеграла по путям на световом конусе”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа Б.Г.Захарова посвящена исследованию радиационных энергетических потерь быстрых частиц и эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в аморфных средах в КЭД и КХД. Актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений. Эта работа особенно важна для случая КХД. Она актуальна как с общетеоретической точки зрения, так и с точки зрения практических приложений к физике соударений тяжелых ядер. Эксперименты по соударениям тяжелых ядер на современных коллайдерах RHIC и LHC впервые позволили изучать рождение горячей КХД-материи в состоянии кварк-глюонной плазмы в лабораторных условиях. В настоящее время одним из наиболее явных сигналов рождения кварк-глюонной плазмы в соударениях ядер при энергиях RHIC-LHC является сильное подавление спектров частиц с большими поперечными импульсами в ядерных соударениях по сравнению с предсказаниями пертурбативной КХД. Это подавление, характеризующееся фактором ядерной модификации R_{AA} , свидетельствует о значительной роли эффектов взаимодействия струй в конечном состоянии из-за энергетических потерь партонов в горячей КХД-материи. Для извлечения информации о параметрах КХД-материи из данных по спектрам частиц в AA-соударениях необходимо понимание механизмов энергетических потерь быстрых партонов в среде. Считается, что основным механизмом этих потерь является радиационный механизм, связанный с излучением глюонов, индуцированным многократными перерасеяниями партонов в среде. Актуальность расчета радиационных энергетических потерь в КХД-материи приводит к необходимости построения теории неабелевого эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала, который может быть важен при индуцированном излучении глюонов. Проведенный в диссертационной работе анализ этого эффекта в КЭД также актуален в связи с появлением первых высокоточных данных по эффекту Ландау-Померанчука-Мигдала для излучения фотонов электронами.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы

Достоверность результатов автора обеспечивается обоснованностью используемых приближений. Основным исходным приближением развитого автором подхода к процессам типа $a \rightarrow bc$ является малоугловое приближение. В случае КЭД применимость

этого приближения при высоких энергиях не вызывает сомнения. В КЭД результаты автора подтверждаются сравнением теоретических расчетов с высокоточными данными по процессу $e \rightarrow \gamma e$, которое дает согласие теории и эксперимента на уровне радиационных поправок. Для случая КХД в условиях взаимодействия быстрых партонов с кварк-глюонной плазмой в соударениях ядер автор доказывает применимость пренебрегающего кинематическими ограничениями малоуглового приближения прямыми расчетами возможных погрешностей в рамках импульсного представления. Аналитические результаты для индуцированного спектра глюонов в КХД-материи, полученные в диссертации, позднее были подтверждены в работах других авторов. Результаты, полученные в диссертации для неабелевого синхротронного излучения глюонов, также позднее были подтверждены другими авторами.

Научная новизна диссертационной работы

Развитый в диссертационной работе подход интеграла по путям на световом конусе к процессам типа $a \rightarrow bc$ в среде является концептуально новым. Разработка этого подхода — несомненно главный результат диссертационной работы. Этот результат имеет фундаментальное общетеоретическое значение. Подход автора позволил впервые провести последовательный анализ эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в КХД. К другим наиболее значительным новым результатам, полученным в диссертационной работе, можно отнести:

1. Построение квазиклассической теории неабелевого синхротронного излучения.
2. Доказательство зануления сечения индуцированного излучения глюонов для безмассовых партонов при коллинеарном разложении в методе высших твистов при учете только однократных перерасеяний в среде.
3. Доказательство возрастания радиационных энергетических потерь с увеличением массы кварка в пределе больших энергий.
4. Первое описание высокоточных экспериментальных данных по эффекту Ландау-Померанчука-Мигдала для процесса $e \rightarrow \gamma e$ с аккуратной трактовкой кулоновских эффектов в многократном рассеянии электронов и с учетом многофотонных процессов.

Практическая значимость диссертационной работы

Практическая значимость результатов диссертационной работы в части, касающейся КХД, связана с возможностью их применения для расчета эффектов взаимодействия в конечном состоянии для быстрых партонов, рождающихся в жестких процессах в соударениях ядер, при их прохождении через горячую КХД-материю. Развитый в диссертации формализм в настоящее время является наиболее общим подходом

для расчета радиационных энергетических потерь быстрых партонов в КХД-материи. Предложенный в диссертации формализм широко используется в работах других авторов при анализе явления охлаждения струй в соударениях ядер.

Структура диссертационной работы

Диссертационная работа Б.Г.Захарова включает в себя введение, семь глав, заключение, список литературы из 251 наименования, шесть приложений. Полный объем диссертации 200 страниц, диссертация содержит 50 рисунков.

Во **введении** дается обоснование актуальности темы диссертации. Обсуждается история развития теории радиационных энергетических потерь в КЭД и КХД. Представлен план диссертации.

Первая глава посвящена формулировке основных положений подхода автора к процессам перехода одной частицы в две в среде. Для упрощения обсуждения автор рассматривает случай скалярных частиц, взаимодействующих с электромагнитным полем среды. Рассматривается произвольный процесс $a \rightarrow bc$, в котором допускается, что все частицы могут иметь заряд. Это допущение близко к случаю КХД, когда все частицы могут взаимодействовать со средой. Сначала автор получает выражение для спектра перехода $a \rightarrow bc$ через функцию Грина двумерного уравнения Шредингера, описывающего фиктивную систему $bc\bar{a}$. В этом уравнении роль времени играет продольная координата вдоль импульса начальной частицы, а потенциал пропорционален сечению взаимодействия трехчастичной системы $bc\bar{a}$ с конститuentом среды. Затем автор, используя это представление, получает два других представления, в которых спектр уже выражен через решение уравнения Шредингера с плавными начальными условиями. Эти представления более удобны для численных расчетов, так как не требуют вычисления сингулярной функции Грина.

Во **второй главе** формулы для скалярных частиц обобщаются на случай реальной КЭД. В процессе $e \rightarrow \gamma e$ спиновые эффекты рассматриваются с использованием базиса спиральных состояний в системе бесконечно большого импульса. Показано, что для процесса $e \rightarrow \gamma e$ в формулах для спектра, полученного для скалярных частиц, достаточно заменить вершинный фактор, который теперь становится дифференциальным оператором по поперечным координатам. Автор проводит сравнение теоретических расчетов с высокоточными экспериментальными данными по процессу $e \rightarrow \gamma e$, полученными в SLAC и CERN SPS. Это сравнение сделано с учетом многофотонных процессов. Автор ограничивается учетом однофотонных и двухфотонных процессов. В этом приближении получена простая аналитическая формула, позволяющая выразить спектр по суммарной излученной энергии, который измерялся экспериментально, через однофотонный спектр. Получено превосходное согласие теории с экспериментом.

В **третьей главе** обсуждаются индуцированные переходы партонов в КХД-

материи типа $a \rightarrow bc$. Автор проводит анализ на примере излучения глюонов быстрыми партонами. Получены аналитические формулы для спектра глюонов по фейнмановской переменной x в осцилляторном приближении, в котором трехпартонное сечение пропорционально квадрату поперечного размера трехпартонной системы. Выведены формулы для аккуратного вычисления спектра глюонов для реалистической параметризации трехпартонного сечения. Формулируется метод для включения в формализм бегущей константы взаимодействия α_s . В заключение главы автор обсуждает связь своего подхода с подходами других авторов.

Четвертая глава посвящена расчету спектра глюонов при учете только однократного перерассеяния в среде конечных размеров. Анализ проводится в рамках импульсного представления. Эти расчеты позволяют получить оценку погрешностей вычислений в координатном представлении в подходе автора, в котором игнорируются кинематические ограничения. Оказывается, что возможные погрешности подхода автора в результате пренебрежения кинематическими ограничениями при вычислениях в координатном представлении малы уже для партонов с энергией ≥ 5 ГэВ.

В **пятой главе** проводится анализ радиационных потерь партонов в КХД-материи конечных размеров с постоянной плотностью. Показано, что полные радиационные потери энергии ΔE для партона, рожденного в среде, имеют зависимость $\Delta E \propto L^2$ при достаточно малой толщине среды L . Показано также, что при высоких энергиях энергетические потери растут с увеличением массы кварка. Это противоречит предсказаниям модели “мертвого конуса” Докшицера-Харзеева (Y.L. Dokshitzer, D.E. Kharzeev, Phys. Lett. B519, 199 (2001)). Этот факт связан с эффектами конечного размера среды, которые становятся важны для излучения глюонов с длиной формирования, превышающей размер среды. Автор показывает, что для безмассовых партонов, рожденных в среде, осцилляторное приближение приводит к нулевому вкладу однократного рассеяния. Демонстрируется, что отличный от нуля вклад члена с $N = 1$ в подходе высших твистов, развитом Wang, Guo, Zhang (X.N. Wang, X. Guo, Nucl. Phys. A696, 788 (2001); B.W. Zhang, X.N. Wang, Nucl. Phys. A720, 429 (2003)), связан с неправильно выполненным коллинеарным разложением.

Шестая глава посвящена анализу неабелевого синхротронного излучения при движении быстрых партонов в коллективных цветных полях. Такие поля могут генерироваться в кварк-глюонной плазме плазменными неустойчивостями, а также на начальной фазе соударения ядер в предплазменной фазе, называемой глазмой. Автор использует развитый формализм для оценки вклада потерь синхротронного типа быстрых партонов при условиях, соответствующих соударениям ядер на RHIC и LHC. Показано, что вклад синхротронных потерь должен быть относительно мал как для коллективных цветных полей, генерируемых в плазме, так и для коллективных полей в фазе глазмы.

В **седьмой главе** проводится расчет энергетических потерь для расширяющейся

кварк-глюонной плазмы при условиях, соответствующих соударениям ядер при энергиях RHIC-LHC. Автор проводит сравнение вкладов в энергетические потери радиационного и столкновительного механизмов. Показано, что вклад столкновительных потерь относительно мал. Во второй части седьмой главы автор применяет формализм, развитый в главе 3, для анализа охлаждения струй в соударениях ядер. Фактор ядерной модификации R_{AA} спектров частиц с большими p_T выражен через модифицированные функции фрагментации быстрых партонов. При вычислении модифицированных функций фрагментации вклад столкновительных потерь рассматривается как возмущение к радиационному механизму.

В построенной модели автор проводит анализ экспериментальных данных для ядерных соударений Au+Au при $\sqrt{s} = 200$ ГэВ на RHIC и Pb+Pb при $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ на LHC. Сравнение с экспериментальными данными показывает, что модель разумно описывает фактор R_{AA} как для легких адронов, так и для процессов с участием тяжелых кварков.

В Заключение суммируются основные результаты диссертационной работы.

В Приложение вынесена часть вспомогательных вычислений.

Замечания к диссертационной работе:

1. При анализе индуцированного излучения глюонов кварками в кварк-глюонной плазме автор не учитывает переходы с изменением спиральности кварка, которые дают вклад в сечение, пропорциональный квадрату массы кварка. Возникает вопрос: насколько это приближение, которое представляется разумным для легких кварков, хорошо в случае тяжелых кварков?
2. В пятой главе автор аналитически показывает, что для режима большой (по сравнению с размером среды) длины формирования спектр глюонов растет с увеличением массы кварка. Данный результат получен в результате формального разложения спектра по массе кварка. Однако этот анализ оставляет неясным физический механизм эффекта. Было бы интересно прояснить физический механизм обнаруженного эффекта.
3. В седьмой главе при обсуждении явления охлаждения струй автор проводит сравнение с данными по коэффициенту азимутальной асимметрии для нефотонных электронов от распада тяжелых мезонов. Было бы разумно провести такое сравнение и для случая легких адронов.

Сделанные замечания ни в коей мере не снижают общей высокой оценки диссертационной работы, которая несомненно вносит большой вклад в актуальное научное

направление. Диссертационная работа Б.Г.Захарова выполнена на самом высоком научном уровне. Разработанный автором формализм для радиационных энергетических потерь является концептуально новым. Актуальность и практическая значимость диссертационной работы не вызывают сомнений. Следует отметить, что все основные результаты получены в работах, выполненных без соавторов.

Результаты диссертационной работы хорошо известны специалистам в области КХД при высоких энергиях и физики соударений релятивистских ядер. Основные результаты неоднократно докладывались на международных конференциях и опубликованы в 23 статьях в престижных научных журналах, входящих в список ВАК. Изложение диссертационной работы логически последовательно. Автореферат диссертации в полной мере и правильно отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа Б.Г.Захарова "Радиационные энергетические потери и эффект Ландау-Померанчука-Мигдала в аморфных средах в КЭД и КХД: метод интеграла по путям на световом конусе" полностью соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор Бронислав Глебович Захаров безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Ведущий научный сотрудник
Отдела экспериментальной физики
высоких энергий НИИЯФ МГУ,
доктор физико-математических наук
E-mail: snigirev@lav01.sinp.msu.ru

Снигирев Александр Михайлович
27 октября 2015

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (сокращенное название: НИИЯФ МГУ).

119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2. Тел.: +7(495)939-18-18
Факс: +7(495)939-08-96, Электронный адрес администрации института:
info@sinp.msu.ru

Подпись А.М.Снигирева удостоверяю:

Директор НИИЯФ МГУ
профессор, доктор физико-математических наук



М.А. Панасюк