



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**



Федеральное государственное бюджетное  
учреждение «Государственный научный центр  
Российской Федерации –  
Институт физики высоких энергий»  
(НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ ГНЦ ИФВЭ)

Россия, 142281, Московская область, г. Протвино,  
пл. Науки, д.1. Факс: (4967) 74-28-24, e-mail: fgbu@ihep.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУ ГНЦ ИФВЭ  
НИЦ "Курчатовский институт"



Н. Е. Тюрин

октября 2015 г.

№ \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_

от \_\_\_\_\_

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Бронислава Глебовича Захарова «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.

Диссертационная работа Б.Г. Захарова посвящена исследованию радиационных энергетических потерь быстрых частиц и эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в КЭД и КХД. Автором разработан концептуально новый подход для расчета сечений процессов типа  $a \rightarrow bc$  в среде, основанный на интегрировании по путям на световом конусе. Автор называет развитый подход LCPI (от английского light-cone path integral) методом. Важной особенностью подхода автора является то, что он применим как для абелевой, так и для неабелевой квантовой теории поля. Полученные автором результаты вносят большой вклад в теорию радиационных энергетических потерь быстрых частиц в аморфных средах в КЭД и КХД. Для случая КХД развитый формализм фактически явился первым последовательным подходом к энергетическим потерям быстрых партонов в КХД материи и неабелевому эффекту Ландау-Померанчука-Мигдала. В диссертации автор применяет развитый им метод для анализа эффектов взаимодействия струй в соударениях ядер в конечном состоянии с рождающейся КХД материей. Используя развитый формализм, автором было также впервые проведено детальное сравнение предсказаний теории с аккуратной трактовкой кулоновских эффектов с появившимися первыми



высокоточными данными по эффекту Ландау-Померанчука-Мигдала в КЭД для процесса  $e \rightarrow \gamma e$ .

**Актуальность темы.** Анализ радиационных энергетических потерь быстрых партонов в КХД материи представляет большой интерес в связи с программой экспериментов по соударениям тяжелых ядер на коллайдерах RHIC и LHC. Главной целью этих экспериментов является обнаружение и изучение горячей кварк-глюонной плазмы, которая может рождаться в АА соударениях. Модификация струй, рожденных в соударениях ядер, из-за взаимодействия быстрых партонов с КХД материей может дать важную информацию о ее параметрах. Для реализации этой программы, естественно, необходимо понимание механизмов радиационных энергетических потерь в КХД материи. Поэтому результаты диссертационной работы по радиационным энергетическим потерям быстрых партонов в КХД материи являются актуальными и своевременными. До работ автора было сделано несколько попыток построения теории радиационных потерь и эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в КХД. Однако они не привели к построению последовательной теории. Эта сложная задача впервые была решена в работах автора, на которых основана диссертационная работа. Проведенный в диссертационной работе анализ первых высокоточных данных по эффекту Ландау-Померанчука-Мигдала для процесса  $e \rightarrow \gamma e$  в КЭД также актуален, так как позволил впервые четко подтвердить наличие эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала.

Диссертационная работа Б.Г. Захарова включает в себя введение, семь глав с оригинальными результатами автора, заключение, список литературы из 251 наименований и шесть приложений. Объем диссертации составляет 200 страниц, диссертация содержит 50 рисунков.

Во **введении** автор обосновывает актуальность темы диссертации и дает краткий обзор развития теории энергетических потерь и эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в КЭД и КХД. Дан план диссертации по главам.

В **первой** главе обсуждаются основные положения подхода LCPI. Для упрощения изложения автор формулирует основные моменты на примере процесса  $a \rightarrow bc$  в среде для скалярных частиц в КЭД. Чтобы сделать анализ максимально близким к случаю КХД автор рассматривает случай когда все частицы могут иметь заряд и взаимодействуют с случайным электромагнитным полем среды. Для этой модели автор записывает сечение процесса в терминах волновых функций частиц во внешнем поле среды. Автор выделяет в волновых функциях плавно меняющиеся поперечные волновые функции, которые описывают отклонение волновых функций от быстро осциллирующих плоских волн на световом конусе  $t - z = 0$  за счет взаимодействия с внешним потенциалом среды. Для поперечных функций автор получает уравнение Шредингера, в котором продольная координата  $z$  играет роль времени. Записывая решения уравнений Шредингера для каждой из частиц через запаздывающие функции Грина в форме фейнмановских интегралов по путям, автор получает



сечение перехода  $a \rightarrow bc$  в форме функционального интеграла по путям на световом конусе. Автор выполняет усреднение по состояниям среды в подынтегральном выражении полученного функционального интеграла. После этого удается выполнить часть функциональных интегрирований аналитически. Остающийся однократный функциональный интеграл выражается через функцию Грина уравнения Шредингера для фиктивной системы  $b\bar{c}\bar{a}$  с мнимым потенциалом пропорциональным сечению взаимодействия системы  $b\bar{c}\bar{a}$  с отдельным атомом. Затем автор получает из этого представления два других представления для спектра по фейнмановской переменной  $x$ , в которых спектр выражен через решение уравнения Шредингера с плавными начальными условиями, которые более удобны для численных расчетов для реальных КЭД и КХД после учета спина и цвета.

Во **второй** главе дается обобщение формул главы 1 на случай реальной КЭД с учетом спиновых факторов. Автор описывает состояния электронов в базисе спиральных состояний в системе бесконечного импульса. Показано, что учет спина сводится к замене в формулах полученных для скалярных полей вершинного фактора на дифференциальный оператор по поперечным координатам. Для случая чисто квадратичной зависимости дипольного сечения для взаимодействия  $e^+e^-$  пары с атомом спектр перехода  $e \rightarrow \gamma e$  выражается через функцию Грина осцилляторного гамильтониана. Полученные формулы совпадают с формулами в теории Мигдала, основанной на приближении Фоккера-Планка. Для проведения аккуратных расчетов, вне рамок осцилляторного приближения, автор представляет спектр излученных фотонов в форме суммы члена Бете-Гайтлера и абсорбционной поправки от вкладов перерасеяний порядка  $N > 1$ , которые описывают эффект Ландау-Померанчука-Мигдала и краевые эффекты. Используя это представление, автор проводит сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по процессу  $e \rightarrow \gamma e$ , полученными в SLAC и CERN SPS. Сравнение с экспериментальными данными проводится с учетом многофотонных процессов. Для учета многофотонных процессов автор выводит простые формулы, позволяющие вычислить спектр по суммарной излученной энергии через однофотонный спектр.

В **третьей** главе дается обобщение формул на случай КХД. Автор начинает анализ для модели кварк-глюонной плазмы в виде системы статических дебаевски экранированных цветных центров. При этом взаимодействие быстрых партонов с каждым цветным центром описывается в двухглюонном приближении. Показано, что для обобщения на случай КХД достаточно сделать простую замену трехчастичного сечения и вершинного фактора. Вычисление общего цветового фактора в LCP1 подходе оказывается тривиальной задачей. Автор дает формулы для спектра глюонов для осцилляторного приближения в бесконечной и конечной КХД материи. Затем приводятся формулы для аккуратного вычисления спектра глюонов вне рамок осцилляторного приближения. В этой форме спектр выражен через эффективное сечение Бете-Гайтлера, которое учитывает как эффект Ландау-Померанчука-Мигдала, так и эффекты конечного размера среды. Полученные формулы могут быть использованы для кварк-глюонной плазмы конечного размера, что соответствует



ситуации плазмы рожденной в АА соударениях. Предложен способ введения бегущего заряда при вычислении индуцированного спектра глюонов. Затем автор дает обобщение формул, полученных в статической модели кварк-глюонной плазмы, на случай теоретико-полевого описания горячей кварк-глюонной плазмы в пертурбативной КХД. Показано, что это обобщение сводится к простой замене дипольного сечения на функцию выражающуюся через глюонный поляризационный оператор. В завершение главы 3 автор обсуждает связь своего подхода с подходами других авторов.

В **четвертой** главе проводится расчет спектра глюонов для однократного перерасеяния в конечной среде в рамках импульсного представления. Используя эти вычисления, исследуются возможные погрешности его подхода от пренебрежения кинематическими ограничениями при вычислениях в координатном представлении. Показано, что для партонов с энергией  $\geq 5$  ГэВ эти погрешности малы.

В **пятой** главе исследуются основные характеристики радиационных потерь партонов в конечной КХД материи постоянной плотности. Автор начинает со случая осцилляторного приближения. Показано, что для достаточно малого размера среды полная потеря энергии  $\Delta E$  быстрого партона зависит от длины пути в среде как  $\Delta E \propto L^2$ . Линейная зависимость устанавливается только когда для излучения глюонов при всех энергиях длина формирования становится мала по сравнению с размером среды. Показано, что для безмассовых партонов рожденных в среде осцилляторное приближение, пренебрегающее кулоновскими эффектами, приводит к занулению вклада однократного рассеяния и вообще всех нечетных перерасеяний. Автор детально исследует зависимость энергетических потерь кварков от их массы. Аналитически показано, что, вопреки предсказаниям модели мертвого конуса Докшицера-Харзеева, в режиме когда длина формирования превышает размер среды для вклада однократного рассеяния вероятность излучения глюона растет с массой кварка. Автор приводит результаты численных расчетов при учете перерасеяний произвольной кратности, которые подтверждают этот факт.

В **шестой** главе обсуждаются радиационные потери быстрых партонов синхротронного типа в коллективных цветных полях, которые могут генерироваться в кварк-глюонной плазме плазменными неустойчивостями и на начальной фазе соударения ядер в фазе глазмы. Автор развивает квазиклассический формализм для расчета неабелевого аналога синхротронного излучения в коллективных цветных полях. В рамках этого формализма даются оценки вклада потерь синхротронного типа для быстрых партонов для цветных полей, которые могут генерироваться плазменными неустойчивостями в кварк-глюонной плазме для условий соударения ядер. Эти оценки показывают, что вклад синхротронных потерь должен быть сравнительно мал. В завершение шестой главы автор рассматривает потери синхротронного типа при взаимодействии быстрых партонов с трубками цветных полей глазмы в предплазменной стадии. Показано, что излучение глюонов от взаимодействия с глазмой может иметь широкое распределение по углам. Однако полные радиационные потери в глазме оказываются много меньше радиационных



энергетических потерь в плазменной стадии.

В **седьмой** главе автор применяет развитый им подход для анализа явления охлаждения струй в кварк-глюонной плазме в соударениях ядер. В дополнение к радиационным потерям он включает вклад столкновительных потерь. Вклад столкновительных потерь от процессов упругого рассеяния быстрых партонов на кварках и глюонах плазмы вычисляется в духе модели Бьеркена. Однако, в отличие от вычислений Бьеркена, автор проводит вычисления с аккуратной трактовкой кинематики процессов  $2 \rightarrow 2$  и с учетом статистических факторов. Автор проводит сравнение радиационных и столкновительных потерь для расширяющейся кварк-глюонной плазмы. Показано, что для условий столкновения ядер при энергиях RHIC и LHC вклад столкновительных потерь на фактор  $\sim 3-5$  меньше вклада радиационного механизма. Автор выражает ядерный фактор модификации спектров частиц в соударениях ядер через модифицированные функции фрагментации, которые учитывают энергетические потери быстрых партонов в рожденной КХД материи. Автор записывает модифицированные функции фрагментации быстрых партонов как свертку вакуумных функции фрагментации и функций фрагментации в среде. В построенной модели проводится 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 для легких адронов, для электронов от распадов тяжелых кварков и D-мезонов. Модель дает разумное согласие с данными как для легких адронов, так и для процессов с участием тяжелых кварков.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертации. В шести приложениях дается часть вычислений вспомогательного характера.

**Научная новизна** диссертационной работы в основном состоит в разработке принципиально нового формализма для описания процессов типа  $a \rightarrow bc$  в среде, индуцированных многократными перерасеяниями частиц на конstituентах среды. Подход автора основан на представлении амплитуды процесса в виде интеграла по траекториям на световом конусе. Ключевым моментом при выводе формулы для сечения перехода  $a \rightarrow bc$  является замена порядка функционального интегрирования и усреднения по состояниям среды. Удивительным образом после этой замены, основная часть функциональных интегрирований выполняется аналитически, а оставшийся функциональный интеграл может быть представлен через функцию Грина уравнения Шредингера для систем  $bc\bar{a}$ . Этот оригинальный подход позволил впервые провести последовательный расчет радиационных энергетических потерь быстрых партонов в КХД материи и расчет неабелевого эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала. Автор также впервые разработал квазиклассический формализм для неабелевых синхротронных радиационных потерь в коллективных цветных полях. Используя полученные формулы для индуцированного излучения глюонов в среде и излучения глюонов синхротронного типа в коллективных полях, автор получил ряд новых важных результатов, связанных с радиационными энергетическими потерями быстрых партонов в кварк-глюонной плазме:



1. Показано, что квадратичная зависимость радиационных энергетических потерь от длины пути  $\Delta E \propto L^2$  имеет место как для сильного, так и слабого эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала.

2. Было показано, что при высоких энергиях радиационные потери энергии растут с массой кварков. Это предсказание противоречит модели мертвого конуса Докшицера-Харзеева, которая предсказывает обратную массовую зависимость.

3. Показано, что для условий соударений ядер при энергиях RHIC и LHC энергетические потери синхротронного типа от взаимодействия быстрых партонов с трубками цветных полей в стадии глазмы малы по сравнению с энергетическими потерями в плазменной фазе.

4. Впервые даны оценки вклада в энергетические потери партонов в кварк-глюонной плазме за счет взаимодействия с коллективными полями, которые могут генерироваться плазменными неустойчивостями. Показано, что для условий соударений ядер при энергиях RHIC и LHC эти потери сравнительно малы.

5. Показано, что данные по ядерному фактору модификации полученные на RHIC и LHC свидетельствуют об уменьшении  $\alpha_s$  в кварк-глюонной плазме при переходе от энергий RHIC к энергиям LHC.

6. Показано, что теоретические предсказания для эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала для процесса  $e \rightarrow \gamma e$  согласуются с высокоточными экспериментальными данными, полученными в SLAC и CERN SPS с точностью на уровне радиационных поправок.

**Практическая значимость.** Диссертация имеет существенную теоретическую и практическую ценность. Развитые в работе методы могут быть использованы для описания различных явлений, в которых существенны процессы типа  $a \rightarrow bc$  при высоких энергиях в материи как в КЭД, так и в КХД. Разработанный автором метод расчета сечений процессов типа  $a \rightarrow bc$  за счет многократных перерассеяний в КХД материи в настоящее время является наиболее мощным из всех предложенных в литературе подходов. Метод автора впервые дал твердую теоретическую базу для расчета радиационных энергетических потерь быстрых партонов в КХД материи. Метод основан на концептуально новой трактовке процессов типа  $a \rightarrow bc$  в квантовой теории поля без использования фейнмановской диаграммной техники. Автор не только предложил концептуально новый подход для расчета энергетических потерь, но и развил схему удобную для численного моделирования энергетических потерь в среде с произвольным профилем плотности. Этот метод впервые позволил проводить моделирование явления охлаждения струй в соударениях релятивистских ядер, изучаемых на современных коллайдерах RHIC и LHC, при реалистическом описании рассеяния на конstituентах среды вне приближения мягких глюонов для произвольных масс партонов. Предложенный автором подход используется в известной схеме ASW (Armesto, Salgado, Wiedemann) [N. Armesto, C.A. Salgado, U.A. Wiedemann, Phys. Rev. D69, 114003 (2004)] для моделирования явления охлаждения струй. Диаграммная техника развитая автором оказалась удобным инструментом при исследовании эволюции струй с



учетом излучения многих глюонов.

**Апробация результатов.** Результаты, полученные в диссертационной работе, многократно докладывались на международных конференциях. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 23 статьях в отечественных и зарубежных реферируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК. Результаты диссертации полностью отражены в публикациях. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

**Достоверность** основных результатов диссертационной работы не вызывает сомнений. Метод автора для переходов  $a \rightarrow bc$  в среде основан на использовании приближения малых углов. В рамках этого приближения вывод формул для спектра, фактически, является строгим. Хорошая точность малоуглового приближения подтверждена автором путем сравнения результатов, полученных в его формализме в координатном представлении, с прямыми расчетами вклада однократного рассеяния, вычисленного в импульсном представлении с наложением кинематических ограничений. Формула, полученная автором для индуцированного спектра глюонов, была подтверждена в более поздних вычислениях выполненных R. Baier, Y.L. Dokshitzer, A.H. Mueller, D. Schiff для безмассовых партонов в режиме сильного эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала [Nucl. Phys. B531, 033 (1998)].

**В качестве замечаний** следует отметить:

1. В работе не указано каким методом решалось численно уравнение Шредингера при численных расчетах спектров фотонов и глюонов.

2. В седьмой главе при вычислении ядерного фактора модификации спектров частиц  $R_{AA}$  автор использует модель кварк-глюонной плазмы, которая возникает мгновенно при собственном времени 0.5 фм. Более реалистической представляется модель с плавным ростом плотности среды со временем. В работе не обсуждается вопрос о том насколько это могло бы изменить предсказания для фактора  $R_{AA}$ .

3. В седьмой главе было бы целесообразно привести численные результаты не только для ядерного фактора модификации, но и для модифицированной функции фрагментации, которая может быть экспериментально измерена в событиях струя-фотон.

Сделанные замечания ни в коей мере не снижают высокой оценки диссертационной работы. Диссертационная работа Б.Г. Захарова выполнена на самом высоком научном уровне и вносит большой вклад в теорию взаимодействия частиц высоких энергий со средой в КЭД и КХД. Результаты автора особенно важны для исследований в актуальной области изучения горячей КХД материи в соударениях релятивистских ядер при энергиях современных коллайдеров RHIC и LHC. Автореферат правильно отражает содержание диссертационной работы.



Диссертационная работа доложена и обсуждена на научном семинаре Отдела теоретической физики Государственного научного центра Российской Федерации – Института физики высоких энергий 12 мая 2015г. 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» соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.), а ее автор Бронислав Глебович Захаров, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02-теоретическая физика.

Отзыв составил главный научный сотрудник  
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ "Курчатовский институт"  
доктор физико-математических наук

С.М. Трошин

Подпись С.М. Трошина удостоверяю  
Ученый секретарь  
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ "Курчатовский институт"



Н.Н. Прокопенко