

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.

Диссертационная работа Б.Г. Захарова посвящена теоретическому исследованию радиационных процессов типа $a \rightarrow bc$ при высоких энергиях частиц в среде в КЭД и КХД. Автор развивает принципиально новый подход к таким процессам, основанный на интегрирование по путям на световом конусе. Метод автора одинаково применим как для КЭД, так и для КХД. Для случая КХД подход автора впервые позволил проводить последовательные расчеты радиационных энергетических потерь и эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала для быстрых кварков и глюонов в КХД материи.

Актуальность темы диссертации. Радиационные потери энергии частиц в среде и эффект Ландау-Померанчука-Мигдала привлекают внимание теоретиков на протяжении нескольких десятилетий. Эта тема представляет большой фундаментальный интерес и важна также с практической точки зрения. Для случая КХД этот вопрос стал особенно актуален в связи с экспериментами по соударениям релятивистских ядер на коллайдерах RHIC и LHC. В ядерных соударениях энергетические потери партонов в горячей КХД материи, рождающейся в начальной стадии соударения ядер, приводят к модификации структуры струй, которая может использоваться для получения информации о плотности КХД материи. Реализация этой программы, часто называемой струйной томографией, требует построения теории радиационных энергетических потерь и эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала для КХД. Формализм, развитый в диссертации, представляет интерес и для анализа эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в КЭД, так как впервые выполненные в середине 90х в SLAC высокоточные измерения эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала для процесса $e \rightarrow \gamma e$ потребовали для сравнения теории и эксперимента выполнения расчетов с аккуратной трактовкой кулоновских эффектов.

Новизна результатов диссертации. Разработанный автором подход к радиационным процессам и эффекту Ландау-Померанчука-Мигдала является новым. Для КХД анализ проведенный автором вообще является первым последовательным вычислением радиационных энергетических потерь партонов в КХД материи. Используя развитый формализм, автор получил целый ряд других новых результатов в физике жестких процессов в соударениях ядер.

Достоверность результатов диссертации. Достоверность полученных в работе результатов гарантируется надежностью применявшихся методов и приближений. Достоверность вычислений индуцированного спектра глюонов в КХД материи подтверждается также результатами более поздних вычислений других авторов для специальных режимов, в которых общие формулы автора должны быть применимы (таких как сильный эффект Ландау-Померанчука-Мигдала [R. Baier, Y.L. Dokshitzer, A.H. Mueller, D. Schiff, Nucl. Phys. B531, 033 (1998)], излучение глюонов в бесконечной од-

нородной среде [P.V. Arnold, G.D. Moore, L.G. Yaffe, JHEP 0206, 030 (2002)], спектр глюонов от вкладов нескольких первых перерассеяний [M. Gyulassy, P. Levai, I. Vitev, Nucl. Phys. B571, 197 (2000)].

Общая характеристика диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и шести приложений, и списка литературы из 251 наименований. Объем диссертации 200 страниц. В диссертации имеется 50 рисунков.

В **Введении** автор обосновывает актуальность темы исследования и дает обзор истории развития теории радиационных энергетических потерь и эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в КЭД и КХД. Дается план изложения оригинальных результатов автора по главам диссертации.

Глава 1 посвящена подробному изложению подхода интеграла по путям на световом конусе для радиационных процессов перехода одной частицы в две в среде. Для упрощения формул автор рассматривает процесс $a \rightarrow bc$ для скалярных заряженных частиц. Матричный элемент для перехода $a \rightarrow bc$ в поле среды записывается стандартным образом через волновые функции частиц, являющиеся решениями уравнения Клейна-Гордона во внешнем поле. Автор выделяет в этих волновых функциях медленно меняющиеся поперечные волновые функции, которые аккумулируют все отклонения исходных волновых функций от плоских волн для нулевых масс частиц. Для этих поперечных волновых функций из уравнения Клейна-Гордона автор получает уравнения типа уравнения Шредингера, которые описывают эволюцию поперечных волновых функций по продольной координате, которая играет роль времени. Поперечные волновые функции записываются через функции Грина уравнений Шредингера и их значения на больших расстояниях от мишени. Для каждой из функций Грина используется представление в виде функционального интеграла по путям в поперечной плоскости. Это позволяет записать вероятность перехода $a \rightarrow bc$ в виде многократного функционального интеграла по траекториям частиц для амплитуды и комплексно сопряженной амплитуды. Ключевым моментом для вывода спектра является замена порядка выполнения усреднения по состояниям среды и интегрирования по траекториям частиц. После усреднения подынтегрального выражения большая часть функциональных интегрирований выполняется аналитически, а один оставшийся функциональный интеграл, который, в общем случае, не может быть вычислен аналитически, определяет функцию Грина уравнения Шредингера для системы $bc\bar{a}$, в которой относительное поперечное расстояние между центром масс пары bc и частицей \bar{a} есть линейная функция продольной координаты z . Потенциал в гамильтониане этого уравнения Шредингера является чисто мнимым и пропорционален сечению взаимодействия системы $bc\bar{a}$ с конститuentом среды. Раскладывая функцию Грина полученного уравнения Шредингера по потенциалу, автор получает для спектра представление типа Бете-Солпитера, в котором спектр выражается через решение уравнения Шредингера с плавными начальными условиями.

В **Главе 2** обсуждается случай реальной КЭД. Автор дает обобщение формул главы 1 для процессов $e \rightarrow \gamma e$ и $\gamma e^+ e^-$. Показано, что, как и для скалярных частиц, можно записать матричный элемент через медленно меняющиеся на световом конусе $t = z$ поперечные волновые функции. Формулы для вероятности переходов $e \rightarrow \gamma e$, $\gamma \rightarrow e^+ e^-$ отличаются от формул для случая скалярных частиц только по-

явлением операторов поперечного импульса в вершинном факторе. Автор приводит формулы для спектра фотонов в процессе $e \rightarrow \gamma e$ по фейнмановской переменной x для аппроксимации потенциала в уравнении Шредингера осцилляторным. Показано, что это приближение соответствует приближению Фоккера-Планка в теории Мигдала использующей импульсное представление. Однако для сравнения теоретических предсказаний с высокоточными экспериментальными данными SLAC и CERN SPS автор выполняет расчеты вне рамок осцилляторного приближения. Для этого автор записывает сечение процесса $e \rightarrow \gamma e$ в виде суммы спектра Бете-Гайтлера и поправки от вкладов высших перерасеяний, которые описывают эффект Ландау-Померанчука-Мигдала. В этом представлении поправка от высших перерасеяний выражается через решение уравнения Шредингера с плавными начальными условиями, что делает его удобным для численных расчетов с аккуратной трактовкой кулоновских эффектов. Результаты расчетов в этом подходе согласуются экспериментальными данными SLAC и CERN SPS с точностью на уровне радиационных поправок, как по форме спектра так и по его величине.

В **Главе 3** автор рассматривает обобщение формализма, развитого в главе 1 на случай радиационных переходов партонов в КХД материи. Анализ проводится в рамках двухглюонного приближения для взаимодействия быстрых партонов с конститuentами среды. Для среды автор использует модель статических цветных дебаевских центров. Для квадратичной параметризации дипольного сечения взаимодействия $q\bar{q}$ пары с цветным центром, аналогично случаю КЭД, автор получает аналитические формулы для индуцированного спектра глюонов в бесконечной среде. Полученный спектр в пределе $x \ll 1$ отличается от спектра полученного в анализе группы BDMPS [R. Baier, Y.L. Dokshitzer, A.H. Mueller, S. Peigné, D. Schiff, Nucl. Phys. B483, 291 (1997)]. Автор указывает на ошибки в этом анализе BDMPS, которые являются причиной расхождения с результатом автора. Для вычисления спектра глюонов вне рамок осцилляторного приближения автор получает аккуратные формулы, выражающие спектр глюонов через решение радиального уравнения Шредингера с начальным условием записанным через произведение трехпартонового сечения и волновой функции gq пары на световом конусе. Автор формулирует метод для введения в это уравнение бегущей α_s , в котором виртуальность в вершине испускания глюона выражена через продольный размер. Автор показывает, что для вычисления спектра глюонов при описании кварк-глюонной плазмы в теории возмущений КХД достаточно сделать замену мнимого потенциала в гамильтониане для уравнения Шредингера, который в этом случае может быть записан через глюонный поляризационный оператор. Обсуждается связь подхода интеграла по путям на световом конусе с другими имеющимися в литературе подходами: BDMPS [R. Baier, Y.L. Dokshitzer, A.H. Mueller, S. Peigné, D. Schiff, Nucl. Phys. B483, 291 (1997)], AMY [P.V. Arnold, G.D. Moore, L.G. Yaffe, JHEP 0206, 030 (2002)], GLV [M. Gyulassy, P. Levai, I. Vitev, Nucl. Phys. B571, 197 (2000)].

В **Главе 4** рассматривается индуцированное излучения глюонов быстрым кварком в среде конечного размера в приближении однократного рассеяния в импульсном представлении теории возмущений. Автор проводит этот анализ с целью оценки возможного эффекта кинематических ограничений на вероятность излучения глюона. Это важно для понимания возможных ошибок малоуглового приближения при

вычислениях в координатном представлении в развитом автором методе интеграла по путям на световом конусе. Автор также использует полученные формулы для фиксации виртуальности для бегущего цветного заряда при ее записи через продольное расстояние от точки излучения глюона до взаимодействия с рассеивающим центром, что необходимо для включения бегущего заряда в формулы, полученные в координатном представлении. Выполненные автором численные расчеты показали, что кинематические ограничения дают малый эффект уже для кварков с энергией порядка 5 ГэВ. Этот результат резко расходится с вычислениями М. Gyulassy, Р. Levai, I. Vitev [Nucl. Phys. B594, 371 (2001)], которые предсказывали большое кинематическое подавление спектра глюонов даже для энергий ~ 500 ГэВ. К сожалению причина этого различия осталась неясной.

В **Главе 5** автор рассматривает индуцированное излучение глюонов в конечной КХД материи с постоянной плотностью. Используя осцилляторное приближение, показано, что радиационные потери энергии для партона рожденного в среде имеют квадратичную зависимость $\propto L^2$ от размера среды. Для режима сильного эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в безмассовом пределе в приближении мягких глюонов этот результат (с неправильной нормировкой сечения) был впервые получен R. Baier, Y.L. Dokshitzer, A.H. Mueller, S. Peigné, D. Schiff [Nucl. Phys. B483, 291 (1997)]. Автором показано, что зависимость потерь энергии $\Delta E \propto L^2$ имеет место как для режима сильного, так и слабого эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала. Автор показывает, что осцилляторное приближение имеет ограниченную область применимости по энергии излучаемого глюона. Показано, что для глюонов с длиной формирования превышающей размер среды осцилляторное приближение приводит к ошибочной структуре ряда по кратности перерасеяний. Этот ряд в безмассовом пределе начинается с перерасеяний кратности 2 и вообще не содержит нечетных перерасеяний. Показано, что при учете кулоновских эффектов вклад однократного рассеяния становится отличным от нуля даже для нулевых масс партонов. При этом L^2 -зависимость энергетических потерь сохраняется и вне рамок осцилляторного приближения. Автор аналитически исследует зависимость спектра глюонов от массы кварка для доминирующего в режиме большой длины формирования вклада однократного рассеяния. Показано, что вероятность индуцированного излучения глюона растет с массой кварка. Это показывает неприменимость модели мертвого конуса [Y.L. Dokshitzer, D.E. Kharzeev, Phys. Lett. B519, 199 (2001)] для ситуации когда длина формирования превышает размер среды. Численные расчеты с учетом всех перерасеяний подтверждают этот вывод. Автор заканчивает главу 4 обсуждением подхода высших твистов [X.N. Wang, X. Guo, Nucl. Phys. A696, 788 (2001)], в котором в безмассовом пределе был получен отличный от нуля вклад однократного рассеяния в спектр глюонов. Показано, что это связано с ошибками в коллинеарном разложении диаграмм испускания глюона по импульсам t -канальных глюонов.

В **Главе 6** автор развивает квазиклассический подход к неабелевому аналогу синхротронного излучения. Синхротронное излучение глюонов быстрыми партонами в соударениях ядер может быть связано с коллективными полями, которые могут генерироваться плазменными неустойчивостями, а также с трубками цветных полей в фазе глазмы. Автор дает очень простой вывод формулы для синхротронного спектра. Полученный спектр в пределе мягких глюонов не сводится к спектру полученному

ранее Шурыком и Захедом [E. V. Shuryak, I. Zahed, Phys. Rev. D67, 054025 (2003)] с использованием метода Швингера. Показано, что вычисления Шурыка и Захеда приводят к некоторым явно неправильным предсказаниям. Выполненные автором оценки вклада синхротронных энергетических потерь быстрых партонов в кварк-глюонной плазме в соударениях ядер для весьма оптимистичного (по величине коллективных полей) показали, что эффект синхротронных потерь сравнительно мал. Автор проводит также расчет синхротронных потерь энергии для фазы глазмы, которые для условий RHIC и LHC оказываются очень малы. Этот результат представляется очень важным с точки зрения возможности использования на практике экспериментальных данных по подавлению спектров частиц для диагностики кварк-глюонной плазмы в соударениях ядер.

Глава 7 посвящена практическому применению формализма интеграла по путям на световом конусе к физике жестких процессов в соударениях ядер при энергиях RHIC и LHC. Автор описывает расширение кварк-глюонной плазмы в модели Бьеркена, пренебрегающей поперечным движением плазмы. Показано, что для условий RHIC-LHC столкновительные потери на фактор 3 – 5 меньше радиационных энергетических потерь. Поэтому, при вычислении ядерного фактора модификации R_{AA} автор трактует столкновительные потери как возмущение к радиационному механизму, и учитывает их эффект перенормировкой начальной температуры кварк-глюонной плазмы. Эффект радиационных потерь на фактор R_{AA} записывается через модифицированные функции фрагментации партон → партон в среде, с последующей фрагментацией конечных партонов в наблюдаемые частицы в вакууме. Автор проводит вычисление фактора R_{AA} для легких адронов, электронов от распадов тяжелых мезонов и D мезонов. Результаты расчетов сравниваются с данными для соударений Au+Au при $\sqrt{s}0$ ГэВ на RHIC и Pb+Pb при $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ на LHC. Автор получает разумное описание данных для легких и тяжелых флейворов. Сравнение с данными для энергий RHIC и LHC показывает, что данные LHC требуют несколько меньших значений α_s . Это может рассматриваться как свидетельство более сильного термического подавления цветового заряда при более высоких температурах плазмы для LHC.

В **Заключении** автор суммирует результаты диссертационной работы.

В шести **Приложениях** автор приводит некоторые вспомогательные вычисления.

Некоторые замечания, которые можно сделать по диссертационной работе:

1. В главе 7 при анализе охлаждения струй автор учитывает вклад радиационных потерь энергии. Однако ничего не говорится о возможном эффекте от поглощения термических глюонов из кварк-глюонной плазмы быстрыми партонами. Было бы интересно провести хотя бы качественные оценки от этого эффекта, который не уменьшает, а наоборот увеличивает энергию струи.
2. В главе 7 было бы полезно более подробно изложить технологию численного моделирования охлаждения струй. Это позволило бы понять есть ли возможность выполнения расчетов модификации струй в соударениях ядер в рамках метода автора с учетом поперечного расширения КХД материи, которым пренебрегается в модели Бьеркена, использованной автором.

3. В главе 7 при анализе ядерных факторов модификации для тяжелых флейворов автор использует для функций фрагментации c , b кварков в D , B мезоны известную параметризацию Петерсона [C. Peterson *et al.*, Phys. Rev. D27, 105 (1983)]. Было бы разумно исследовать чувствительность предсказаний к параметризации функций фрагментации тяжелых кварков, например, провести расчеты и для широко используемой в литературе модели Картвелишвили-Лиходеда-Петрова [V.G. Kartverishvili, A.K. Lihoded, V.A. Petrov, Phys. Lett. B78, 615 (1978)].

Эти замечания, однако, можно рассматривать скорее как пожелания для улучшения текста, который мог бы составить монографию. Они, естественно, несколько не умаляют общей высокой оценки диссертации. Диссертация, несомненно, вносит большой вклад в теорию радиационных потерь энергии и эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в КЭД и КХД. Автору удалось решить важную научную проблему, на решение которой в 90е годы были направлены значительные усилия теоретиков. 23 статьи, на которых основана диссертация, опубликованы в ведущих рецензируемых физических журналах. Автореферат диссертации правильно и в полной мере отражает содержание диссертации.

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”, несомненно, полностью соответствует всем требованиям, 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
ФГБУ ГНЦ РФ ИТЭФ
доктор физико-математических наук

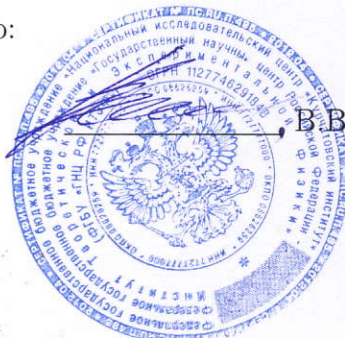


Кербиков Борис Олегович

Адрес: 117218, Москва, ул. Большая Черемуш-
кинская, д. 25, Федеральное государственное
бюджетное учреждение Научный Центр Рос-
сийской Федерации Институт Теоретической и
Экспериментальной Физики»
e-mail: borisk@itep.ru

Подпись Керби́кова Бориса Олеговича заверяю:

Ученый секретарь ФГБУ ГНЦ РФ ИТЭФ
кандидат физико-математических наук



В.В. Васильев