

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе 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”, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

Изучение радиационных энергетических потерь быстрых партонов и эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в КХД материи было начато теоретиками более двадцати лет назад. Эта проблема, несомненно, представляет значительный интерес как с общетеоретической, так и с практической точки зрения. Ее практическая актуальность связана с изучением горячей КХД материи в экспериментах по соударениям релятивистских тяжелых ионов на коллайдерах RHIC и LHC. Рождение горячей КХД материи в форме кварк-глюонной плазмы в начальной фазе соударения тяжелых ядер должно приводить к модификации струй из-за их взаимодействия с родившейся плотной материей. Очевидно, что энергетические потери быстрых партонов в кварк-глюонной плазме должны делать функции фрагментации более мягкими. Одним из проявлений этого эффекта должно быть подавление спектров частиц с большими p_T в соударениях ядер по сравнению с предсказаниями теории возмущений КХД без учета взаимодействия струй с КХД материей в конечном состоянии, которое действительно было обнаружено в экспериментах на RHIC и LHC. Это подавление может использоваться для получения информации о плотности КХД материи, рождающейся в процессе соударения ядер. Для практической реализации этой программы необходимо развитие методов для расчета энергетических потерь быстрых партонов в КХД материи и построение моделей эволюции струй в AA соударениях. Решение этих актуальных задач является основной целью диссертационной работы Б.Г. Захарова.

Формализм интеграла по путям на световом конусе, развитый в диссертационной работе, применим также для расчета радиационных потерь заряженных частиц и эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в КЭД. В КЭД эффект Ландау-Померанчука-Мигдала привлекал значительное внимание теоретиков с момента его теоретического предсказания более полувека назад. Однако первое аккуратное измерение этого эффекта для излучения фотонов электронами было выполнено только в 1995 г. в SLAC в эксперименте E-146. Данные этого эксперимента были получены для области малых значений фейнмановской переменной по энергии фотонов $x \ll 1$. В 2003 г. в CERN SPS были выполнены измерения и для кинематической области включающей излучение жестких фотонов с $x \sim 1$. Появление первых высокоточных данных по эффекту Ландау-Померанчука-Мигдала в КЭД сделало актуальным проведение теоретических расчетов с аккуратной трактовкой кулоновских эффектов в многократном рассеянии электронов в среде. В диссертационной работе Б.Г. Захарова впервые было получено представление для сечения процесса $e \rightarrow \gamma e$ в виде суммы вклада Бете-Гайтлера от однократного рассеяния и поправки от вкладов многократного рассеяния, описывающей эффект Ландау-Померанчука-Мигдала. Это представление делает возможным проводить численные расчеты с аккуратной трактовкой перерассея-

ний электронов в среде. Используя развитый формализм, в диссертации проведено сравнение с данными SLAC и CERN SPS по эффекту Ландау-Померанчука-Мигдала для процесса $e \rightarrow \gamma e$, которое показало превосходное согласие теории с экспериментом.

Диссертационная работа Б.Г. Захарова состоит из введения, семи глав с изложением оригинальных результатов автора и заключения, в котором приведены основные результаты работы. В шести приложениях приведены детали вспомогательных вычислений, использованных в основном тексте. Список литературы включает 251 наименование. Объем диссертации 200 страниц, диссертация содержит 50 рисунков.

Введении содержит краткое обсуждение развития теории радиационных энергетических потерь и эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в КЭД и КХД. Представлен план диссертации.

В первой главе автор дает вывод спектра для перехода типа $a \rightarrow bc$ в среде для модели скалярных заряженных частиц взаимодействующих с электромагнитным полем среды. Волновая функция каждой из частиц a , b , c , участвующих в процессе, записывается в форме произведения быстро осциллирующей плоской волны и медленно меняющейся в пространстве-времени функции, которую автор называет поперечной волновой функцией. Поперечные волновые функции описывают зависимость исходных волновых функций по поперечным координатам на световом конусе при $t - z = \text{const}$, связанную с взаимодействием с внешним полем и конечными массами частиц. Используя уравнения Клейна-Гордона для исходных волновых функций частиц, автор получает для поперечных волновых функций уравнения Шредингера, в которых роль времени играет продольная координата z вдоль импульса начальной частицы. Записывая поперечные волновые функции через функции Грина уравнений Шредингера, автор выражает вероятность перехода $a \rightarrow bc$ через функции Грина уравнений Шредингера и матрицы плотности начальной и конечных частиц. Основная идея метода автора состоит в записи всех функций Грина в формуле для вероятности перехода в форме фейнмановских интегралов по путям и выполнении усреднения по состояниям среды на уровне подынтегрального выражения. После этого автору удается выполнить основную часть функциональных интегрирований аналитически, а оставшийся однократный функциональный интеграл по разности поперечных координат частиц b и c в системе $bc\bar{a}$ дает функцию Грина для уравнения Шредингера с мнимым потенциалом пропорциональным сечению взаимодействие системы $bc\bar{a}$ с атомом среды. Для спектра по одной продольной фейнмановской переменной x частица \bar{a} находится в центре масс пары bc . Для спектра по x автор получает простое выражение через функцию Грина описывающую переход в среде точечной системы $bc\bar{a}$ в точечную. Исходя из этого представления автор, используя разложение функции Грина в ряд по потенциалу, получает представление для спектра в форме суммы спектра для однократного рассеяния и многократных перерассеяний, описывающих эффекты конечного размера и подавление Ландау-Померанчука-Мигдала. Автор выводит также представление спектра в форме эффективного сечения Бете-Гайтлера, выражающегося через волновую функцию системы bc на световом конусе в вакууме и в среде, которое удобно для вычисления сечения перехода $a \rightarrow bc$ для начальной частицы рожденной в среде конечного размера. Оба эти представления

не требуют вычисления сингулярных функций Грина, что делает их более удобными для численных расчетов.

Вторая глава посвящена обобщению формализма, развитого в первой главе, на случай процессов $e \rightarrow \gamma e$ и $\gamma e^+ e^-$ в реальной КЭД. Автор описывает спиновые состояния в терминах спиральностей в системе бесконечного импульса. Из уравнения Дирака, в лидирующем по энергии приближении, автор получает для скалярных поперечных волновых функций уравнение Шредингера аналогичное полученному в главе 1 для скалярных частиц. На примере процесса $e \rightarrow \gamma e$, показано, что формула для спектра фотонов по фейнмановской переменной x отличается от формулы первой главы для спектра для скалярных частиц только появлением дифференциального вершинного оператора. Автор подробно обсуждает вычисление спектра излучения фотонов в бесконечной среде в рамках осцилляторного приближения, в котором дипольное сечение взаимодействия $e^+ e^-$ пары с атомом квадратично зависит от размера пары. Для сравнения с высокоточными экспериментальными данными SLAC и CERN SPS по эффекту Ландау-Померанчука-Мигдала в процессе $e \rightarrow \gamma e$ автор использует представление спектра в форме суммы спектра Бете-Гайтлера и абсорбционной поправки, учитывающей вклады всех высших перерасеяний. Численные расчеты с помощью этого представления выполнены с аккуратной трактовкой кулоновских эффектов. При сравнении с экспериментальными данными, полученными в виде спектра по полной излученной энергии, автор учитывает и эффекты от многофотонных процессов. Показано, что для данных SLAC и CERN SPS с хорошей точностью учет многофотонных процессов может быть выполнен в вероятностном подходе, ограничиваясь излучением только одного и двух фотонов. В этом приближении автор получил простую наглядную аналитическую формулу для K -фактора, связывающего спектр по полной излученной энергии с однофотонным спектром. Сравнение с экспериментальными данными, выполненное автором, показало удивительно хорошее согласие теории и эксперимента.

Третья глава посвящена обобщению формул главы 1 на случай КХД. Автор обсуждает индуцированные переходы партонов типа $a \rightarrow bc$ в КХД материи, учитывая для каждого конstituента среды, взаимодействующего с быстрыми партонами, обмена в t -канале не более чем двумя глюонами. Сначала анализ проводится для модели кварк-глюонной плазмы в виде системы статических дебаевски экранированных цветных центров. Затем автор приводит и формулы для случая описания кварк-глюонной плазмы в полевом пертурбативном подходе. Автор подробно обсуждает индуцированное излучение глюонов быстрыми партонами в бесконечной среде в рамках осцилляторного приближения, соответствующего, как и в случае КЭД, квадратичной параметризации сечения взаимодействия трехпартонной системы с конституентом среды. Автор также приводит формулы и для аккуратных расчетов спектра глюонов, вне рамок осцилляторного приближения, с реалистической параметризацией трехпартонного сечения. Для этого случая формулируется способ введения в формализм бегущего заряда. Автор заканчивает третью главу обсуждением связи подхода интеграла по путям на световом конусе с подходами других авторов.

В четвертой главе диссертации автор проводит анализ индуцированного излучения глюонов быстрым кварком рожденным в среде конечного размера в рамках приближения однократного рассеяния. Для вычисления спектра используется тео-

рия возмущений в импульсном представлении. Проводя эти вычисления, автор преследует две цели. Одна из них это оценка погрешностей вычислений связанных с влиянием кинематических ограничений, которыми пренебрегается при вычислениях в координатном представлении в малоугловом приближении, использованным автором при выводе формул в методе интеграла по путям на световом конусе. Вторая цель этих вычислений связана с фиксацией свободного параметра в формуле, связывающей виртуальность для цветового заряда в распадной вершине для партонного перехода $a \rightarrow bc$ с продольной шкалой расстояний, что необходимо для введения бегущего заряда в формулы автора в формулировке в координатном представлении. Автор впервые получает формулы для спектра глюонов в конечной среде для вклада однократного рассеяния верные для всего интервала фейнмановской переменной x . Результаты проведенных численных расчетов показывают, что, вопреки имеющимся в литературе утверждениям группы GLV [M. Gyulassy, P. Levai, I. Vitev, Nucl. Phys. B594, 371 (2001)] о большом кинематическом подавлении спектра глюонов, погрешности от кинематических ограничений малы уже для партонов с энергией $\gtrsim 5$ ГэВ.

В пятой главе автор проводит детальный анализ индуцированного излучения глюонов в конечной КХД материи для случая постоянной плотности. Автор начинает анализ со случая осцилляторного приближения. Показано, что потеря энергии партона за счет индуцированного излучения глюонов для партона рожденного в среде имеют квадратичную зависимость от пути партона в среде. Продемонстрировано, что это имеет место как для режима сильного, так и слабого эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала. Показано, что в осцилляторном приближении для безмассовых партонов вклады однократного и всех высших нечетных перерасеяний точно обращаются в ноль. Продемонстрировано, что, при учете отклонения от квадратичной зависимости дипольного сечения из-за кулоновских эффектов, вклад нечетных перерасеяний становится ненулевым. Используя формулы главы 4 для вклада однократного рассеяния в импульсном представлении, автор показывает, что в режиме когда длина формирования превышает размер среды вероятность излучения глюона растет с массой кварка. Этот эффект находится в противоречии с предсказанием модели мертвого конуса Докшицера-Харзеева [Y.L. Dorshitzer, D.E. Kharzeev, Phys. Lett. B519, 199 (2001)], пренебрегающей квантовыми эффектами конечного размера среды. В заключение автор показывает, что в подходе высших твистов, основанном на коллинеарном разложении жесткого блока диаграмм испускания глюона вклад однократного рассеяния должен зануляться.

В шестой главе рассматривается излучение глюонов синхротронного типа при взаимодействии партонов высоких энергий с коллективными цветными полями. Для быстрых партонов в соударениях ядер неабелевое синхротронное излучение может происходить в коллективных полях возникающих при развитии плазменных неустойчивостей, связанных с существенной асимметрией начального распределения частиц в кварк-глюонной плазме, и в коллективных полях в фазе глазмы. Для расчета неабелевого синхротронного излучения автор развивает квазиклассический формализм. Полученные автором формулы расходятся с более ранними вычислениями Шурыка и Захеда [E.V. Shuryak, I. Zahed, Phys. Rev. D67, 054025 (2003)] в рамках обобщения метода Швингера на случай неабелевых полей. Автор показывает, что формулы Шу-

ряка и Захеда ведут к ряду явно абсурдных предсказаний. Используя полученные формулы, автор получает оценки для возможного вклада синхротронных энергетических потерь быстрых партонов в кварк-глюонной плазме в соударениях ядер. Эти потери оказываются сравнительно малы даже для сценария с существенным вкладом магнитных полей в полную энергию кварк-глюонной плазмы. В завершение автор проводит анализ потерь энергии синхротронного типа в трубках цветных полей в фазе плазмы, предшествующей образованию термализованной кварк-глюонной плазмы. Показано, что для условий соударения ядер при энергиях RHIC и LHC эти потери много меньше радиационных потерь в плазменной стадии.

В седьмой главе автор применяет формализм интеграла по путям на световом конусе для анализа радиационных потерь в расширяющейся кварк-глюонной плазме и модификации спектров частиц в соударениях ядер для условий RHIC и LHC. Автор начинает с сравнения вклада радиационных энергетических потерь с вкладом столкновительных потерь. Столкновительные потери вычисляются в рамках подхода Бьеркена. Однако, в отличие от вычислений Бьеркена, автор проводит вычисления с аккуратной трактовкой кинематики процессов упругого рассеяния партонов и статистических факторов. Проведенные численные расчеты показывают, что вклад столкновительных потерь в 3–5 раз меньше радиационных потерь. Показано, что при энергиях порядка 100 ГэВ радиационные энергетические потери тяжелых кварков становятся больше потерь легких кварков. Основная часть седьмой главы посвящена анализу охлаждения струй в AA соударениях при энергиях RHIC-LHC. Автор вычисляет ядерный фактор модификации спектров частиц R_{AA} для легких адронов, электронов от распадов тяжелых кварков и D мезонов. Фактор R_{AA} , по аналогии со стандартной теорией возмущений КХД, записывается через функции фрагментации модифицированные энергетическими потерями партонов в среде. Автор рассматривает столкновительные потери как возмущение, и учитывает их вклад простой перенормировкой температуры плазмы. Сравнение с экспериментальными данными для ядерных соударений Au+Au при $\sqrt{s} = 200$ ГэВ на RHIC и Pb+Pb при $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ на LHC показывает разумное согласие с данными при условии, что константа связи несколько уменьшается при переходе от энергий RHIC к LHC. Это выглядит разумно, так как подавление заряда термическими эффектами должно быть сильнее в более горячей кварк-глюонной плазме для условий LHC. Модель дает разумное согласие с наблюдаемой зависимостью R_{AA} от флейвора начального партона.

В Заключение автор суммирует результаты диссертационной работы.

В Приложении даются некоторые вспомогательные вычисления.

Достоверность основных результатов диссертационной работы не вызывает сомнений. Полученные в диссертации формулы для индуцированного спектра глюонов в кварк-глюонной плазме позднее были подтверждены вычислениями Baier, Dokshitzer, Mueller, Schiff [Nucl. Phys. B531, 403 (1998)] в режиме сильного эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала. Автор выполнил детальную проверку применимости малоуглового приближения, использованного в его методе интегрирования по путям на световом конусе, прямыми вычислениями в импульсном представлении для доминирующего вклада от однократного рассеяния. Достоверность результатов автора

в КЭД подтверждаются превосходным согласием теоретических расчетов с высокоточными данными по эффекту Ландау-Померанчука-Мигдала для процесса $e \rightarrow \gamma e$.

Новизна и практическая значимость результатов диссертационной работы несомненна. Автор разработал совершенно новый подход к радиационным энергетическим потерям быстрых частиц в среде не использующий технику фейнмановских диаграмм. В случае КХД метод автора явился фактически первым последовательным анализом проблемы. В рамках развитого формализма автор получил целый ряд новых результатов связанных с физикой жестких процессов в соударениях ядер при высоких энергиях. Развитый автором формализм широко используется в работах других авторов при исследовании взаимодействия струй с кварк-глюонной плазмой в соударениях релятивистских ядер.

По диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1. В седьмой главе при анализе охлаждения струй автор приводит результаты для ядерного фактора модификации. Представляется, что было бы уместным представить и результаты непосредственно для спектра глюонов, а также предсказания для модифицированных функций фрагментации.
2. В пятой главе автор приводит результаты для энергетических потерь кварков при соударении адронов с ядрами. Было бы интересно привести результаты и для случая рождения быстрого кварка в ядре в процессе глубоконеупруго рассеяния лептонов на ядрах, который изучался в эксперименте HERMES [HERMES Collaboration (Airapetian, A. et al.) Eur. Phys. J. C20, 479 (2001)].
3. При анализе эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в КЭД в главе 2 и явления охлаждения струй в главе 7 было бы уместо обсудить детали процедуры численного решения уравнения Шредингера при вычислении фотонного/глюонного спектра.

Эти замечания, однако, ни в коей мере не снижают общей высокой оценки представленной диссертации. В целом, диссертация, несомненно, вносит большой вклад в актуальное научное направление – физики взаимодействия быстрых кварков и глюонов с КХД материей. Разработанный в диссертации формализм впервые дал возможность производить расчет радиационных переходов партонов типа $a \rightarrow bc$ в среде. Попытки решения этой важной проблемы были предприняты рядом известных экспертов по теории возмущений КХД. Однако прорыв в этом направлении связан именно с работами Б.Г. Захарова. Следует сказать, что и на сегодняшний день подход интеграла по путям остается наиболее общим и мощным формализмом для расчета радиационных энергетических потерь в КХД материи из имеющихся в литературе. Результаты диссертации опубликованы в 23 статьях в престижных научных журналах. Работы автора по теме диссертации хорошо известны специалистам в области КХД при высоких энергиях и физики соударений релятивистских ядер. Согласно inSPIRE цитируемость этих работ превышает 2000. Следует отметить, что вне рамок диссертации остался целый ряд высокоцитируемых работ автора тесно связанных с темой диссертации, к которым, например, можно отнести уже ставшие классическими в КХД при высоких энергиях работы по дипольному подходу к

глубоконеупругим процессам на нуклонах и ядрах. Высокая научная квалификация автора подтверждается большой общей цитируемостью его работ, которая составляет более 6800. Вопрос о личном вкладе автора для данной диссертационной работы не возникает, так как все основные результаты получены в работах без соавторов. Материал диссертации не отклоняется от основной темы. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Оценивая в целом диссертационную работу 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”, можно заключить, что она 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.

Официальный оппонент:
ведущий научный сотрудник,
доктор физико-математических наук
e-mail: leonidov@td.lpi.ru

Леонидов Андрей Владимирович

21 декабря 2015 года

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.
119991, ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53. Тел.: 8(499)135-42-64, Факс: 8(499)135-78-80, e-mail: postmaster@lebedev.ru

Подпись А.В. Леонидова удостоверяю

Ученый секретарь ФИАН
кандидат физико-математических наук



М.М. Цвентух