

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.207.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ИНСТИТУТА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМ.Л.Д.ЛАНДАУ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 19.02.2016 г. № 1

О присуждении Захарову Брониславу Глебовичу, гражданину РФ, ученой степени доктора физико-математических наук. Диссертация “Радиационные энергетические потери и эффект Ландау-Померанчука-Мигдала в аморфных средах в КЭД и КХД: метод интеграла по путям на световом конусе” по специальности 01.04.02 – теоретическая физика принята к защите 26.06.2015 г., протокол № 6 диссертационным советом Д 002.207.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау Российской академии наук, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, пр-т. Акад. Семенова, д. 1-А, Приказ № 105/нк от 11.04.2012 г. Соискатель, Захаров Бронислав Глебович, 1949 года рождения. Диссертацию на соискание кандидата физико-математических наук «Эффекты абсорбции в адрон-адронных и адрон-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях» защитил в 1992 г. в диссертационном совете, созданном на базе Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, работает старшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау Российской академии наук. Диссертация выполнена в Секторе «Сильных взаимодействий» ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН.

Официальные оппоненты:

1. Кербиков Борис Олегович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения Государственный научный центр Российской Федерации Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова;
2. Леонидов Андрей Владимирович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН;
3. Снигирев Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В.

Скобельцына Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова,  
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение “Государственный научный центр Российской Федерации-Институт физики высоких энергий”, г. Протвино, в своём положительном заключении, подписанном Сергеем Михайловичем Трошиным, д. ф.-м. н., г.н.с Отдела теоретической физики, ГНЦ ИФВЭ, и утвержденном Н.Е. Тюриным, Директором ФГБУ ГНЦ ИФВЭ, указала, что в диссертационной работе 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» автором разработан концептуально новый подход для расчета сечений процессов типа  $a \rightarrow bc$  в среде, основанный на интегрировании по путям на световом конусе применимый 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 первыми высокоточными данными по эффекту Ландау-Померанчука-Мигдала в КЭД для процесса  $e \rightarrow \gamma e$ . 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. Развитый подход широко используется в для моделирования явления охлаждения струй в КХД материи. Результаты работы достоверны, новы и интересны, опубликованы в ведущих научных журналах и многократно докладывались на международных конференциях. Также Ведущая организация отметила, что 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 требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Б.Г. Захаров заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Соискатель имеет 190 опубликованных работ, в том числе 23 работы опубликованные

в рецензируемых научных изданиях, которые вошли в диссертацию:

- [1] Б.Г. Захаров, *О справедливости эйконального приближения для расчета вероятности прохождения ультрарелятивистских позитрониев через вещество*, Ядерная Физика **46**, 148-154 (1987).
- [2] B.G. Zakharov, *Fully quantum treatment of the Landau-Pomeranchuk-Migdal effect in QED and QCD*, JETP Lett. **63**, 952-957 (1996).
- [3] B.G. Zakharov, *Landau-Pomeranchuk-Migdal effect for finite size targets*, JETP Lett. **64**, 781-787 (1996).
- [4] B.G. Zakharov, *Radiative energy loss of high-energy quarks in finite size nuclear matter and quark - gluon plasma*, JETP Lett. **65**, 615-620 (1997).
- [5] B.G. Zakharov, *Light cone path integral approach to the Landau-Pomeranchuk-Migdal effect*, Phys. Atom. Nucl. **61**, 838-854 (1998).
- [6] B.G. Zakharov, *Light cone path integral approach to the Landau-Pomeranchuk-Migdal effect and the SLAC data on bremsstrahlung from high-energy electrons*, Phys. Atom. Nucl. **62**, 1008-1018 (1998).
- [7] B.G. Zakharov, *Transverse spectra of radiation processes in medium*, JETP Lett. **70**, 176-182 (1999).
- [8] R. Baier, D. Schiff, B.G. Zakharov, *Energy loss in perturbative QCD*, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **50**, 37-69 (2000).
- [9] B.G. Zakharov, *On the energy loss of high-energy quarks in a finite size quark - gluon plasma*, JETP Lett. **73**, 49-52 (2001).
- [10] B.G. Zakharov, *Description of the CERN SPS data on the Landau-Pomeranchuk-Migdal effect for photon bremsstrahlung in quantum regime*, JETP Lett. **78**, 759-762 (2003).
- [11] B.G. Zakharov, *Radiative parton energy loss and jet quenching in high-energy heavy-ion collisions*, JETP Lett. **80**, 617-622 (2004).
- [12] B.G. Zakharov, *The Role of finite kinematic bounds in the induced gluon emission from fast quarks in a finite size quark-gluon plasma*, JETP Lett. **80**, 67-72 (2004).
- [13] B.G. Zakharov, *Induced photon emission from quark jets in ultrarelativistic heavy-ion collisions*, JETP Lett. **80**, 1-6 (2004).
- [14] P. Aurenche and B.G. Zakharov, *Collinear Photon Emission from the Quark-Gluon Plasma: The Light-Cone Path Integral Formulation*, JETP Lett. **85**, 149-155 (2007).
- [15] B.G. Zakharov, *Parton energy loss in an expanding quark-gluon plasma: Radiative versus collisional*, JETP Lett. **86**, 444-450 (2007).

- [16] P. Aurenche, B.G. Zakharov, H. Zaraket, *Failure of the collinear expansion in calculation of the induced gluon emission*, JETP Lett. **87**, 605-610 (2008).
- [17] B.G. Zakharov, *Parton energy loss due to synchrotron-like gluon emission*, JETP Lett. **88**, 475-480 (2008).
- [18] B.G. Zakharov, *Jet quenching with running coupling including radiative and collisional energy losses*, JETP Lett. **88**, 781-786 (2008).
- [19] P. Aurenche and B.G. Zakharov, *Anomalous mass dependence of radiative quark energy loss in a finite-size quark-gluon plasma*, JETP Lett. **90**, 237-243 (2009).
- [20] B.G. Zakharov, *Variation of jet quenching from RHIC to LHC and thermal suppression of QCD coupling constant*, JETP Lett. **93**, 683-687 (2011).
- [21] B.G. Zakharov, *Nuclear suppression of light hadrons and single electrons at the RHIC and LHC*, J. Phys. G**40**, 085003 (2013).
- [22] B.G. Zakharov, *Nuclear modification factor for light and heavy flavors within pQCD and recent data from the LHC*, JETP Lett. **96**, 616-620 (2013).
- [23] P. Aurenche and B.G. Zakharov, *Parton energy loss in glasma*, Phys. Lett. B**718**, 937-942 (2013).

Основная часть результатов получена лично соискателем. На диссертацию и авто-реферат поступили только положительные отзывы. В них отмечается актуальность работы, важность полученных научных результатов и их новизна. В отзывах оппонентов и ведущей организации отмечаются следующие критические замечания:

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. D**27**, 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. B**78**, 615 (1978)].

4. 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.
5. 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)].
6. При анализе эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в КЭД в главе 2 и явления охлаждения струй в главе 7 было бы уместно обсудить детали процедуры численного решения уравнения Шредингера при вычислении фотонного/глюонного спектра.
7. При анализе индуцированного излучения глюонов кварками в кварк-глюонной плазме автор не учитывает переходы с изменением спиральности кварка, которые дают вклад в сечение пропорциональный массе кварка в квадрате. Возникает вопрос, насколько это приближение, которое представляется разумным для легких кварков, является хорошим в случае тяжелых кварков.
8. В пятой главе автор аналитически показывает, что для режима большой, по сравнению с размером среды, длины формирования спектр глюонов растет с массой 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.
9. 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.
10. В работе не указано, каким методом решалось численно уравнение Шредингера, при численных расчетах спектров фотонов и глюонов.
11. 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 реалистичской представляется модель с плавным ростом плотности среды со временем. В работе не обсуждается вопрос о том насколько это могло бы изменить предсказания для фактора  $R_{AA}$ .
12. 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 событи-

ях струя-фотон.

На все поступившие замечания соискателем даны исчерпывающие ответы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются высококвалифицированными специалистами в данной области, а ведущая организация - признанным научным центром в данной области.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как высококвалифицированную научную работу фундаментального значения для теории взаимодействия частиц высоких энергиях с материей, разработаны новые научные идеи, обогащающие теорию радиационных энергетических потерь быстрых частиц в аморфных средах в КЭД и КХД; для КХД развитый соискателем формализм фактически явился первым последовательным подходом к энергетическим потерям быстрых партонов в КХД материи и неабелевому эффекту Ландау-Померанчука-Мигдала; в развитом методе получены новые закономерности для энергетических потерь легких и тяжелых кварков в кварк-глюонной плазме; предложена оригинальная модель охлаждения струй в соударениях ядер от эффектов взаимодействия в конечном состоянии с рождающейся КХД материей, объясняющая многие экспериментальные данные полученные в экспериментах по соударениям ядер на коллайдерах RHIC и LHC; впервые проведено детальное сравнение предсказаний теории с аккуратной трактовкой кулоновских эффектов с высокоточными данными по эффекту Ландау-Померанчука-Мигдала в КЭД для процесса  $e \rightarrow \gamma e$ , показавшее согласие теории с экспериментом на уровне радиационных поправок.

Теоретическая значимость исследования обоснована следующими основными результатами, полученными в диссертации:

1. В рамках пертурбативной КХД построена теория радиационных энергетических потерь быстрых партонов в КХД материи и неабелевого эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала. Развитая теория основана на концептуально новом методе интеграла по путям на световом конусе. Подход применим для произвольных процессов расщепления быстрых частиц типа  $a \rightarrow bc$  в аморфной среде индуцированных многократными перерасеяниями быстрых частиц в среде. Спектр перехода  $a \rightarrow bc$  по фейнмановской переменной  $x$  выражен через решение двумерного уравнения Шредингера с мнимым потенциалом, который пропорционален полному сечению рассеяния фиктивной системы  $b\bar{c}a$  на отдельном конституенте среды,  $\sigma_{b\bar{c}a}$ . Метод одинаково применим для быстрых партонов в КХД материи и в КЭД для быстрых частиц в обычных аморфных средах.
2. В рамках развитого формализма показано, что для быстрых партонов рождающихся в КХД материи конечного размера с постоянной плотностью радиационные энергетические потери  $\Delta E$  как в режиме сильного, так и слабого

эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала имеют зависимость от длины пути в среде  $\Delta E \propto L^2$  для достаточно малых  $L$ .

3. Разработан эффективный метод для расчетов вероятности индуцированного перехода  $a \rightarrow bc$  через решение уравнения Шредингера для волновой функции системы  $bc\bar{a}$  в среде с плавными граничными условиями и с бегущим зарядом, который делает возможным аккуратное численное моделирование радиационных потерь в кварк-глюонной плазме для реалистических моделей эволюции кварк-глюонной плазмы в условиях соударения тяжелых ядер.
4. Показано, что для условий АА соударений на RHIC и LHC радиационные потери энергии быстрых партонов в расширяющейся кварк-глюонной плазме больше столкновительных потерь на фактор  $\sim 3 - 5$ .
5. Впервые проведено прямое вычисление вклада однократного рассеяния  $N = 1$  в спектр индуцированного излучения глюонов вне рамок приближения мягких глюонов для произвольных фейнмановских  $x$  в импульсном представлении теории возмущений КХД. Было показано, что, вопреки ранее сделанным в литературе утверждениям о сильном подавлении энергетических потерь при учете кинематических пределов, эффект кинематических пределов мал уже для партонов с энергией  $\sim 5$  ГэВ. Этот факт оправдывает применимость развитого подхода, который сформулирован в координатном представлении и пренебрегает кинематическими ограничениями по импульсам, для вычисления энергетических потерь струй в АА соударениях для условий RHIC и LHC.
6. Показано, что для партонов в конечной кварк-глюонной плазме вычисление индуцированного спектра глюонов в главном логарифмическом приближении, которое соответствует коллинеарному разложению жесткого блока диаграмм описывающих рождение глюона по поперечному импульсу  $t$ -канальных глюонов, для безмассовых партонов дает нулевой спектр при учете только однократного рассеяния. Показано, что ненулевой результат для спектра глюонов от вклада  $N = 1$  рассеяния, полученный в этом приближении в подходе высших твистов связан с ошибками при выполнении коллинеарного разложения.
7. Путем аналитических расчетов вклада  $N = 1$  рассеяния для процесса  $q \rightarrow gq$  в импульсном представлении показано, что в режиме когда длина формирования превышает размер среды, индуцированный спектр глюонов растет с ростом массы кварка. Численные расчеты при учете всех перерассеяний подтверждают это. Вклад глюонов с длиной формирования  $L_f$  больше размера среды  $L$  для условий кварк-глюонной плазмы для RHIC и LHC приводит к тому, что при энергиях  $E \gtrsim 150 - 200$  ГэВ имеет место неравенство для энергетических потерь кварков

$$\Delta E_b > \Delta E_c > \Delta E_{u,d}.$$

Обнаруженная массовая зависимость спектра в режиме  $L_f \gtrsim L$  находится в противоречии с предсказанием модели мертвого конуса Докшицера-Харзеева, которая предсказывает убывание спектра глюонов с массой кварка.

8. Показано, что для индуцированного (тормозного) излучения фотонов быстрыми легкими кварками в кварк-глюонной плазме в  $AA$  соударениях эффект конечного размера среды радикально меняет спектр фотонов. Он трансформирует спектр Бете-Гайтлера  $\propto 1/x$  в спектр примерно  $\propto 1/(1-x)$ .
9. Построена модель для вычисления модификации спектров частиц с большими  $p_T$  в  $AA$  соударениях от взаимодействия струй с кварк-глюонной плазмой с использованием индуцированного спектра глюонов вычисляемого с бегущей  $\alpha_s$  с учетом флуктуаций длин путей партонов в среде. Модель учитывает также столкновительные потери, вычисляемые с аккуратной трактовкой кинематики процессов  $2 \rightarrow 2$  и статистических факторов партонов в кварк-глюонной плазме. Показано, что развитая схема дает разумное согласие с данными RHIC и LHC по ядерному фактору модификации  $R_{AA}$ . Установлено, что данные RHIC и LHC по  $R_{AA}$  требуют уменьшения  $\alpha_s$  в кварк-глюонной плазме при переходе от RHIC к LHC, что может свидетельствовать о более сильном термическом подавлении заряда в более горячей кварк-глюонной плазме при энергиях LHC. Вопреки имеющимся в литературе утверждениям о невозможности одновременного описания фактора  $R_{AA}$  для легких и тяжелых флейворов, вычисления автора дают вполне разумное описание флейворной зависимости  $R_{AA}$ , измеряемой по  $R_{AA}$  для легких адронов, электронов от распадов тяжелых мезонов, и  $D$ -мезонов.
10. Впервые построен квазиклассический формализм для расчета неабелевого аналога синхротронного излучения в коллективных цветных полях. Показано, что более ранний анализ синхротронного излучения в КХД Шурыка и Захеда в методе собственного времени Швингера ведет к физически абсурдным предсказаниям. В рамках развитого формализма выполнены оценки энергетических потерь в коллективных цветных полях, которые могут генерироваться в кварк-глюонной плазме плазменными неустойчивостями. Показано, что даже в сценарии с существенным ( $\sim 30\%$ ) вкладом коллективных полей в полную энергию кварк-глюонной плазмы синхротронные потери должны быть не очень велики (порядка вклада столкновительных потерь).
11. Впервые проведен расчет вклада в энергетические потери партонов от взаимодействия с трубками сильных цветных коллективных полей в фазе глазмы, которая может предшествовать фазе кварк-глюонной плазмы. Показано, что глазма может приводить к излучению мягких глюонов в широком интервале углов. Однако вклад глазмы в энергетические потери быстрых партонов существенно меньше радиационных энергетических потерь в кварк-глюонной плазме.
12. Получена в формула для спектра процессов  $e \rightarrow \gamma e$ ,  $\gamma \rightarrow e^+ e^-$  на конечной мишени в форме суммы спектра Бете-Гайтлера и абсорбционной поправки (аналогичной глауберовской поправке для сечения взаимодействия адронов с ядрами), которая описывает эффект Ландау-Померанчука-Мигдала. Полученная форма использовалась для численных расчетов с аккуратной трактовкой кулоновских



эффектов при сравнении с данными по эффекту ЛПМ для процесса  $e \rightarrow \gamma e$  полученными в SLAC и CERN SPS. Для сравнения с этими данными, которые дают спектр по полной излученной энергии, были получены простые формулы для  $K$ -фактора учитывающего эффект от многофотонных процессов. Проведенное сравнение показало согласие теории с экспериментом с отклонениями на уровне радиационных поправок.

**Значение** полученных соискателем результатов исследования для практики заключается в том, что полученные соискателем результаты впервые дали твердую теоретическую базу для расчета радиационных энергетических потерь быстрых партонов в КХД материи в соударениях ядер на современных коллайдерах RHIC и LHC. Полученные соискателем теоретические результаты уже активно используются в литературе для описания явления охлаждения струй в соударениях ядер.

**Оценка достоверности результатов исследования** подтверждается исследованием точности приближения малых углов, которое используется автором при расчете переходов  $a \rightarrow bc$  в среде. В рамках этого приближения вывод формул для спектра, фактически, является строгим. Основные результаты диссертации получены с использованием строгих математических методов и имеют понятную физико-математическую интерпретацию.

**Личный вклад соискателя** состоит в постановке задач и проведении большей части теоретических расчетов и исследований, описанных в диссертации. 18 из 23 статей, вошедших в диссертацию, опубликованы соискателем без соавторов. На заседании 19.02.2016 диссертационный совет принял решение присудить Захарову Б.Г. ученую степень доктора физико-математических наук. При проведении тайного голосования диссертационный совет, в количестве 20 человек, из них 8 докторов наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика, участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 20, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета \_\_\_\_\_ В. В. Лебедев

Ученый секретарь диссертационного совета \_\_\_\_\_ П. Г. Гриневич

19 февраля 2016 г.