

“УТВЕРЖДАЮ”

Директор Института теоретической
физики им. Л.Д. Ландау РАН
профессор член-корр. РАН

В.В. Лебедев

08.05.15



Из протокола заседания сектора Сильных взаимодействий Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН от 8 мая 2015 г.

(заключение о диссертации 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” по месту ее выполнения)

СЛУШАЛИ: доклад Б.Г. Захарова о диссертации “Радиационные энергетические потери и эффект Ландау-Померанчука-Мигдала в аморфных средах в КЭД и КХД; метод интеграла по путям на световом конусе”, представляемой на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02–теоретическая физика.

ПОСТАНОВИЛИ: принять следующее заключение о диссертации Б.Г. Захарова.

Диссертационная работа Б.Г. Захарова посвящена исследованию радиационных энергетических потерь быстрых частиц и эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в аморфных средах в КЭД и КХД. Диссертация основана на развитом автором методе интеграла по путям на световом конусе. Данный подход позволил впервые дать последовательную трактовку энергетических потерь быстрых партонов в КХД материи с учетом эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала. Пионерские работы автора [2, 4], в которых был разработан этот метод и рассмотрены энергетические партонов в конечной кварк-глюонной плазме (КГП) стали классическими в физике взаимодействия быстрых партонов с КХД материей. 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 проведено впервые детальное сравнение предсказаний теории с аккуратной трактовкой кулоновских эффектов для эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в процессе $e \rightarrow e\gamma$ в КЭД с появившимися первыми высокоточными данными. Теоретические результаты оказались в превосходном согласии с экспериментальными данными.

В главе 1 обсуждаются основные положения подхода LСРІ на примере процесса $a \rightarrow bc$ в среде для скалярных частиц в КЭД. Для того чтобы сделать анализ максимально близким к случаю КХД автор рассматривает случай когда все частицы могут иметь заряд и взаимодействуют с атомами материи. Для этой модели получен ряд представлений для спектра, которые затем используются для расчетов в реальных КЭД и КХД после учета спина и цвета.

В главе 2 дается обобщение формул главы 1 на случай реальной КЭД с учетом спиновых факторов. Проводится сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по процессу $e \rightarrow \gamma e$ с учетом многофотонных процессов. Для учета многофотонных процессов автор выводит простые формулы, позволяющие вычислить спектр по суммарной излученной энергии через однофотонный спектр.

В главе 3 дается обобщение формул на случай КХД. Выводится спектр глюонов для осцилляторного приближения и даются формулы для аккуратного вычисления спектра глюонов излучаемых партонами рожденными в КГП конечного размера, что соответствует ситуации КГП рожденной в АА соударениях. Обсуждается также связь подхода автора с подходами других авторов.

В главе 4 проводится расчет спектра глюонов для однократного перерассеяния 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 $\gtrsim 5$ ГэВ эти погрешности малы.

В главе 5 исследуются основные характеристики радиационных потерь партонов в конечной КХД материи постоянной плотности. Детально обсуждается механизм появления квадратичной зависимости энергетических потерь $\Delta E \propto L^2$ от размера длины пути для партона рожденного в среде. Показано, что для безмассовых партонов рожденных в среде осцилляторное приближение, пренебрегающее кулоновскими эффектами, приводит к занулению вклада однократного рассеяния. Автор детально исследует зависимость энергетических потерь кварков от их массы. Показано, что, вопреки предсказаниям модели мертвого конуса Докшицера-Харзеева, при высоких энергиях энергетические потери растут с увеличением массы кварка.

В главе 6 строится формализм для расчета неабелевого аналога синхротронного излучения в коллективных цветных полях, которые могут генерироваться в КГП плазменными неустойчивостями и на начальной фазе соударения ядер в фазе глазмы. В рамках этого формализма даются оценки вклада потерь синхротронного типа для быстрых партонов для условий соударения ядер. Эти оценки показывают, что вклад синхротронных потерь должен быть сравнительно мал.

В главе 7 автор применяет развитый им подход для анализа явления охлаждения струй в КГП в соударениях ядер. Наряду с радиационными потерями, он включает

вклад столкновительных потерь, который оказывается относительно мал и трактуется как малое возмущение. Автор строит формализм для расчета модификации в среде функций фрагментации быстрых партонов и расчета с их помощью ядерного фактора модификации R_{AA} спектров частиц с большими p_T . 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. Модель дает разумное согласие с данными как для легких адронов, так и для процессов с участием тяжелых кварков.

Основные результаты, представленные в диссертации, получены впервые. 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 перерасеяний 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. Автором был также впервые построен квазиклассический формализм для радиационных энергетических потерь за счет неабелевого аналога синхротронного излучения в коллективных цветных полях. В рамках этого формализма им впервые получены оценки для потерь энергии синхротронного типа для соударения ядер в коллективных цветных полях генерируемых плазменными неустойчивостями в КГП и трубках цветных полей в фазе глазмы, которая предшествует образованию КГП в соударениях ядер. Работы автора по теме диссертации широко известны среди специалистов занимающихся КХД при высоких энергиях и физикой соударения ядер. Общий индекс цитирования этих работ согласно inSPIRE составляет около 2100.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [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).

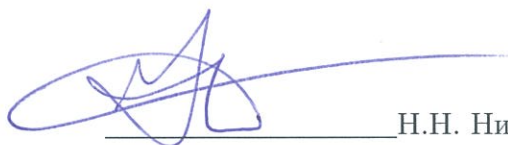
- [4] B.G. Zakharov, *Radiative energy loss of high-energy quarks in finite size nuclear matter and quark - gluon plasma*, JETP Lett. **65**, 615-620 (1997).
- [5] B.G. Zakharov, *Light cone path integral approach to the Landau-Pomeranchuk-Migdal effect*, Phys. Atom. Nucl. **61**, 838-854 (1998).
- [6] 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. **B718**, 937-942 (2013).

Опубликованные по теме диссертации работы в достаточной мере отражают ее содержание. Уровень и объем проведенного исследования, актуальность и новизна полученных результатов свидетельствуют о том, что диссертация 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” удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК России к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

На основании вышеизложенного сектор Сильных взаимодействий Института теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН рекомендует диссертацию 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” к публичной защите по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Заведующий сектором
Сильных взаимодействий
ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН
д.ф.-м.н.


Н.Н. Николаев

8 мая 2015 г.