

“УТВЕРЖДАЮ”

Директор Института теоретической  
физики им. Л.Д.Ландау РАН  
член-корреспондент РАН В.В. Лебедев



“ 3 ” августа 2015 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации – Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН на диссертационную работу Киракосяна Мартина Раджевича “Коллективные эффекты в столкновениях ультрарелятивистских ядер”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

**Актуальность темы.** В настоящее время экспериментально установлено, что множественное рождение частиц в соударениях ядер при энергиях современных коллайдеров RHIC (The Relativistic Heavy Ion Collider) и LHC (Large Hadron Collider) идет через стадию образования горячей КХД материи с температурой выше деконфайнмента на фактор  $\sim 2 - 3$ , при которой КХД материя должна находиться в фазе кварк-глюонной плазмы (КГП). Экспериментальное обнаружение КГП и было основной целью программы по изучению АА соударений на коллайдерах RHIC и LHC. Одним из основных экспериментальных свидетельств в пользу образования горячей КХД материи в соударениях ядер на RHIC и LHC является наблюдение явления гашения струй, которое проявляется значительным подавлением спектров частиц с большими поперечными импульсами (на фактор  $\sim 5 - 10$  при  $p_T \sim 10$  ГэВ), по сравнению с тем, что можно было бы ожидать при полном отсутствии взаимодействия струй в конечном состоянии в КХД материи. Гашение струй является следствием потерь энергии быстрыми партонами в КХД материи, которые могут быть связаны с радиационными и столкновительными потерями. В пользу образования коллективной среды в соударениях ядер при энергиях RHIC и LHC говорит и успешное описание спектров адронов с небольшими поперечными импульсами в гидродинамических моделях. Гидродинамические модели, предсказывающие наблюдаемое на эксперименте значение эллиптического потока для нецентральных соударений ядер, указывают на то, что рождающаяся КХД материя имеет очень малую вязкость и

ведет себя почти как идеальная жидкость. Широко распространена точка зрения, что образование КГП идет через фазу трубок сильных классических продольных цветных полей, образующихся непосредственно после соударения ядер (называемую глазмой (glasma)). Предполагается, что термализация классических полей глазмы приводит к образованию КГП на временах  $\sim 0.5 - 1$  фм.

Диссертационная работа М.Р. Киракосяна посвящена анализу ряда эффектов в КГП рождающейся в соударениях ядер. Один из них это обнаруженная в экспериментах на RHIC двугорбая структура в распределениях адронов. Было установлено, что после вычета эллиптического потока в распределении двухчастичных корреляций адронов по азимутальным углам наблюдается максимум с двух сторон от угла в 180 градусов при некоторых значениях поперечных импульсов триггерного и ассоциированного адрона. Указанный эффект не наблюдается в столкновениях протонов и столкновениях ядер дейтерия. На сегодняшний день наиболее популярными кандидатами на механизм приводящий к наблюдаемой на эксперименте двугорбой структуры в распределениях адронов являются акустический механизм с образованием конуса Маха при распространении струи в КГП и механизм черенковского глюонного излучения быстрым партоном. В диссертационной работе М.Р. Киракосяна рассматривается модель этого явления основанная на механизме черенковского излучения глюонов быстрым партоном.

Основная часть диссертационной работы М.Р. Киракосяна посвящена исследованию возможной роли хаотических цветных полей в поляризационных свойствах КГП для цветных полей на масштабах превышающих характерный масштаб турбулентных корреляций. Актуальность этого вопроса связана с возможной важной ролью турбулентных цветных полей в динамике КГП рождающейся в соударениях ядер. Вследствие присутствия плазменных неустойчивостей в КГП для соударения ядер, связанных с существенной асимметрией начального импульсного распределения кварков и глюонов, по всей видимости, образование турбулентного состояния КГП неизбежно. Обнаруженная аномально малая величина вязкости КХД материи, при гидродинамическом моделировании процесса множественного рождения адронов в соударениях ядер при энергиях RHIC и LHC не согласуется результатами пертурбативных вычислений в рамках обычного кинетического уравнения с партонными столкновениями  $2 \rightarrow 2$  в КГП. Однако при наличии хаотических коллективных полей в КГП эффективная вязкость среды может уменьшаться по сравнению с предсказаниями обычного кинетического подхода. Взаимодействие кварков и глюонов с хаотическими цветными полями должно приводить к уменьшению их длины пробега, что и приводит к уменьшению эффективной наблюдаемой вязкости КГП. Было показано (M. Asakawa, S. Bass, B. Müller, Phys. Rev. Lett., **96**, 252301 (2006)), что в сценарии с хаотическими полями можно получить эффективную вязкость КГП разумно согласующуюся с извлекаемой из данных в гидродинамических моделях. В этом сценарии, естественно, турбулентные флуктуации цветных полей могут изменять и поляризационные свойства КГП для длинноволновых коллективных цветных полей. В связи с этим представляется важным детально исследовать и поляризационные свойства турбулентной КГП. Исследование влияния хаотических полей на поляризационные свойства турбулентной КГП на больших пространственно-временных масштабах является одной из основных целей диссертационной работы М.Р. Киракосяна.

булентной ультрарелятивистской КГП в длинноволновом пределе. Во введении к этой главе дан краткий обзор работ, посвященных турбулентности в КГП, приведен обзор основных положений кинетической теории КГП, представлена схема вычислений в турбулентной плазме с помощью усреднения по статистическим турбулентным полям, а также кратко рассмотрены эффекты нулевого порядка по турбулентному полю, в частности, вычисление сдвиговой вязкости. Вычисления проводятся в приближении кинетической теории неабелевой плазмы. В основной части главы вводится удобная диаграммная техника для проведения вычислений в турбулентной плазме (как электромагнитной, так и кварк-глюонной) и рассчитываются поправки к поляризации в длинноволновом пределе. Помимо этого, получены турбулентные поправки к дисперсионным соотношениям для плазмонов. Подробно рассмотрены условия применимости развитого формализма. Проведенный анализ показал, что наличие хаотических полей приводит к затуханию волн во времениподобной области волновых векторов, которое отсутствует для равновесной бесстолкновительной КГП. Для пространственноподобных волновых векторов турбулентная поправка приводит к уменьшению затухания Ландау для поперечных волн и усилению для продольных волн. Результаты полученные в этой главе для поляризационного тензора КГП при наличии хаотических коллективных полей являются новыми.

В **третьей главе** вычисляются поправки к черенковским потерям и потери энергии в кварк-глюонной плазме за счет переходного излучения на случайных неоднородностях. Во введении к главе рассмотрены источники неоднородностей в сильно-взаимодействующем веществе, образующемся в результате соударения ядер. В основной части приведены вычисления потерь. Показано, что потерями на стохастическое переходное излучение можно пренебречь, как в пертурбативной КГП, в которой отсутствует черенковское излучение, так и в модельной среде, в которой излучаются черенковские глюоны. Полученные результаты являются новыми и важны с точки зрения понимания возможных погрешностей струйной томографии КХД материи в АА соударениях.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в том, что разработанный в процессе работы над диссертацией аппарат может быть применен в дальнейших исследованиях коллективных эффектов в физике соударений релятивистских тяжелых ядер при энергиях коллайдеров RHIC-LHC.

**В качестве замечаний** следует отметить:

1. Как, впрочем, и отмечено в диссертации, существуют другие модели объясняющие двугорбую структуру обнаруженную на эксперименте.
2. Кроме того, представленная Монте-Карло модель для черенковского механизма образования двугорбой структуры в спектре адронов, конечно, может дать только лишь оценку параметров среды, необходимых для описания экспериментальных данных.
3. В вычислении потерь на стохастическое переходное излучение недостаточно

внимания уделено исследованию условий применимости приближения.

4. Материал первого приложения к главе 3 было бы уместно дать в основном тексте. Это сделало бы ее более удобной для читателя.
5. К сожалению, в тексте имеется изрядное количество опечаток.

Указанные недостатки никоим образом не снижают общую высокую оценку диссертационной работы. В целом, диссертационная работа М.Р. Киракосяна выполнена на высоком научном уровне. В работе получен ряд новых результатов. Результаты диссертации имеют несомненную научную и практическую ценность. Диссертация написана ясным языком, четко структурирована. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Основные результаты опубликованы в открытой печати в известных отечественных и зарубежных журналах.

Диссертационная работа "Коллективные эффекты в столкновениях ультрарелятивистских ядер" удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Киракосян Мартин Раджевич, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – "Теоретическая физика".

Отзыв обсужден и утвержден на заседании ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН 26 июня 2015 г.

Отзыв составил старший научный сотрудник  
Института теоретической  
физики им. Л.Д. Ландау РАН  
кандидат физико-математических наук



Б.Г. Захаров

Подпись Б.Г. Захарова заверяю  
Ученый секретарь  
Института теоретической  
физики им. Л.Д. Ландау РАН  
кандидат химических наук



С.А. Крашаков