

## ОТЗЫВ

**Жохова Романа Николаевича**

на автореферат диссертации **Лукашова Михаила Сергеевича**  
**«Непертурбативная кварк-глюонная термодинамика  
при конечной температуре»**, представленную на соискание  
учёной степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.3. -- Теоретическая физика.

Существующие и планируемые эксперименты по столкновению тяжелых ионов (такие, как например проект NICA в Дубне), а также астрофизические наблюдения нейтронных звезд ставят важные вопросы о свойствах плотной адронной материи при различных значениях температур и барионных плотностей. С теоретической точки зрения исследования фазовой диаграммы квантовой хромодинамики (КХД) в рамках пертурбативного подхода затруднены, так как при интересных нам температурах и плотностях сильное взаимодействие находится в режиме сильной связи. Поэтому используются различные непертурбативные методы такие, например, как эффективные модели и решеточные вычисления в КХД.

Диссертация посвящена явлению конфайнмента, одному из важнейших явлений как в КХД, так и в принципе в современной теоретической физике. Решеточные вычисления в КХД являются мощным инструментом для численного моделирования сильных взаимодействий в квантовой теории поля. Однако, несмотря на их успехи в предсказании наблюдаемых величин, таких как массы адронов или свойства фазовых переходов, решеточные вычисления не дают глубокого понимания фундаментальных механизмов, лежащих в основе конфайнмента. Данная диссертационная работа базируется на использовании так называемого метода вакуумных полевых корреляторов основанном на кумулянтном разложении корреляционных функций и подтвержденного многочисленными решеточными расчетами и сравнением с экспериментом. Данный метод позволяет лучше понять механизмы, стоящие за явлением конфайнмента и описать фазовый переход в кварк глюонную материю.

В первой главе диссертации приводится обоснование актуальности исследования, связанного с изучением непертурбативных эффектов в КХД при конечных температурах. Рассматриваются основные теоретические подходы к описанию фазового перехода «конфайнмент-деконфайнмент», включая решеточную КХД и эффективные модели. Автор акцентирует внимание на недостатках существующих методов и предлагает использовать метод вакуумных полевых корреляторов, который позволяет аналитически учитывать непертурбативные свойства глюонного вакуума. В этой главе формулируются цели и задачи работы, среди которых -- построение аналитического описания фазового перехода в КХД, исследование роли

«цветомагнитного конфайнмента» и вычисление термодинамических характеристик кварк-глюонной материи.

Во второй главе проводится исследование  $SU(3)$  глюодинамики с применением метода вакуумных полевых корреляторов. Рассматривается формализм петли Вильсона, позволяющий количественно описывать конфайнмент. Подробно изучается фазовый переход газа глюоболов в глюонную плазму. Показано, что это переход 1-го рода, происходящий при температуре 260 МэВ, а сама температура перехода вычислена из условия термодинамической устойчивости.

В этой главе вычисляются основные термодинамические функции такие как давление, энтропия и аномалия следа тензора энергии-импульса. Автор детально анализирует их температурную зависимость. Сравнение с результатами, полученными в рамках решеточных вычислений, показывает, что метод вакуумных полевых корреляторов воспроизводит известные результаты, но при этом даёт дополнительную физическую интерпретацию механизмов фазового перехода. Также в этой главе сделан краткий обзор формализма вакуумных полевых корреляторов в приложении к термодинамике.

В третьей главе впервые получены выражения для основных термодинамических потенциалов через цветоэлектрическое взаимодействие (линию Полякова) и цветомагнитное натяжение струны для случая чистой глюодинамики. Все полученные таким образом результаты показали хорошее согласие с данными решеточных вычислений.

В четвёртой главе результаты (в рамках формализма полевых корреляторов) полученные ранее для глюодинамики успешно обобщаются на случай описания термодинамических свойств КХД с кварками  $N_f > 0$ . Рассматривается роль цветомагнитного конфайнмента и его учет по всему диапазону температур вплоть до 1 ГэВ. Получены выражения для давления  $p(T)$  и аномалии следа  $I(T)$ . Приведено сравнение полученных результатов с результатами, полученными в рамках решеточных вычислений с физическими значениями масс кварков. Показано, что имеется неплохое совпадение. Обсуждается, что использованный формализм может быть успешно применен в том числе и в случае ненулевого барионного химического потенциала, что представляет несомненный интерес. Это уже исследовалось в дальнейших работах автора, которые не включены в рамки диссертации.

Пятая глава посвящена исследованию трубок тока (флакс-тубов), полевых «трубок» возникающим между тяжёлыми кварками и антикварками, и являющимися важным источником информации о структуре самого конфайнмента. Также в данной главе на примере флакс-тубов обсуждаются преимущества корреляторного подхода по сравнению с другими моделями конфайнмента.

В качестве замечаний к тексту диссертации можно отметить следующее.

На странице 15 употребляется аббревиатура ЦМК (цветомагнитный конфайнмент), которая не расшифровывается. Ранее в работе встречается аббревиатура ЦМ (цветомагнитный), но читатель легко может запутаться.

После формулы (16) для глюонного давления нигде в тексте автореферата не указано, что такое  $M_0$ . Это есть в тексте диссертации, но нет в автореферате, хотя приведена формула и даже рассматривается предельный случай.

В подписи к рис. 6 вместо «зависимость поперечного радиуса от цветомагнитного тока» лучше бы написать «зависимость цветомагнитного тока от поперечного радиуса». Как и для зависимости цветоэлектрического поля от поперечного радиуса на рис. 7. Графики 6 и 7 упоминаются вскользь в тексте автореферата даже без ссылок на них, хотя они являются одними из ключевых.

На рис. 4 для зависимости аномалия следа  $I(T)/T^4$  в правом верхнем углу приведен дополнительно график для  $(I(T)/T^4)(T/T_c)^2$  и не понятно почему на втором графике согласие с результатами, полученными в рамках решеточных вычислений, на вид сильно хуже чем для первого. Хорошо бы иметь какое-то пояснение в тексте.

Однако это ни в коей мере не снижает достоинств данной диссертационной работы.

Стоит отметить, что основные результаты диссертационного исследования были получены в рамках выполнения проекта РНФ и опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Также стоит отметить, что у соискателя имеются и другие публикации, развивающие данное направление.

На основе вышесказанного могу заключить, что диссертация М.С. Лукашова «Непертурбативная кварк-глюонная термодинамика при конечной температуре» является законченным самостоятельным научным исследованием, выполненным на высоком уровне, безусловно удовлетворяющим требованиям ВАК и «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 (№ 842, в текущей редакции), которые предъявляются к кандидатским диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. -- Теоретическая физика.

Кандидат физико-математических наук (01.04.02 -- Теоретическая физика),  
Старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки "Институт Земного магнетизма, ионосферы, распространения радиоволн им. Н.В.  
Пушкова Российской Академии наук" (ИЗМИРАН),

**Жохов Роман Николаевич**

*RL*  
3 февраля 2025г.

Адрес: 108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН  
e-mail: zhokhovr@gmail.com

Подпись Р.Н. Жохова заверяю Ученый секретарь ИЗМИРАН А. И. Рез



*A. Rey*

Дата: «3» 02 2025 г.