

Федеральное Государственное Унитарное Предприятие
Государственный Научный Центр Российской Федерации
Институт Теоретической и Экспериментальной Физики
имени А.И. Алиханова

На правах рукописи

Лущевская Елена Викторовна

**НЕПЕРТУРБАТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ В
КВАНТОВОЙ ХРОМОДИНАМИКЕ ПРИ
КОНЕЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

– Специальность: 01.04.02 - теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2009

Работа выполнена в ГНЦ РФ “Институт Теоретической
и Экспериментальной Физики” им. А. И. Алиханова г. Москва.

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук
Кербиков Б. О.

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук,
профессор
Захаров В. И.
доктор физ.-мат. наук
Боголюбский И. Л.

Ведущая организация: Институт Физики Высоких
Энергий г. Протвино

Защита состоится «_____» _____ 2009 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета _____ при ГНЦ РФ ИТЭФ, расположенном
по адресу: г. Москва, ул. Б. Черёмушкинская, д. 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТЭФ.

Автореферат разослан «_____» _____ 2009 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах,
заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на
имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук

Васильев В. В.

1. Общая характеристика работы

В диссертации изучаются непертурбативные эффекты в $SU(2)$ глюодинамике и Квантовой Хромодинамике при конечной температуре на решётке, как в фазе конфайнмента, так и в фазе деконфайнмента. В случае $SU(2)$ глюодинамики с помощью кирально-инвариантного оператора Нойбергера вычисляется спектр безмассового оператора Дирака, соответствующего пробному кварку, помещённому в фоновое калибровочное поле.

Исследуется зависимость кирального конденсата от температуры и внешнего абелевого магнитного поля. Знание спектра точных нулевых и около-нулевых мод оператора Дирака позволяет изучать локализационные свойства собственных мод оператора Дирака и топологические характеристики вакуума неабелевой калибровочной $SU(2)$ теории при различных значениях внешнего магнитного поля и температуры.

В данной диссертации на решётке приводятся доказательства существования кирального магнитного эффекта в $SU(2)$ глюодинамике. Изучаются флуктуации киральности, электрического заряда и тока в различных пространственных направлениях в зависимости от температуры и магнитного поля.

В Квантовой Хромодинамике с двумя лёгкими кварками вычисляется пространственное натяжение струны в фазах конфайнмента и деконфайнмента. Полученные результаты сравниваются с различными теоретическими предсказаниями.

В отдельной главе исследуется переход из ядерной материи в кварковую при значении кваркового химического потенциала 0.4 ГэВ и низкой температуре, оцениваются различные параметры,

характеризующих данный переход. Обсуждается применимость функционала Гинзбурга-Ландау для описания поведения материи в рассматриваемой области параметров.

1.1. Актуальность работы

Структура фазовой диаграммы в последнее время вызывает огромный интерес научной общественности, поскольку в настоящее время существует возможность экспериментальной проверки существующих теоретических и решёточных предсказаний относительно рода фазового перехода, положения трикритической точки и линии фазового перехода из фазы конфайнмента в фазу деконфайнмента. Предполагается, что установка LHC предоставит необходимую информацию об устройстве фазовой диаграммы при нулевом химическом потенциале и высокой температуре. Эксперименты по столкновению тяжёлых ионов RHIC и FAIR в GSI позволят исследовать структуру фазовой диаграммы при промежуточных значениях химического потенциала и температуры. Кроме того, в ближайшее время в г. Дубна планируется строительство установки NICA для исследования материи при более низких температурах и конечных значениях химического потенциала. Актуально изучать поведение различных физических величин во внешних магнитных полях адронного масштаба, поскольку такие магнитные поля могут быть получены в нецентральных тяжёло-ионных столкновениях на установках RHIC, FAIR и в будущем эксперименте NICA. Изучение поведения сильно-взаимодействующей материи в очень сильных магнитных полях также актуально для понимания физики нейтронных звёзд.

Значительная часть диссертации посвящена изучению различных наблюдаемых в $SU(2)$ глюодинамике на решётке в фазах конфайнмента и деконфайнмента. Считается, что $SU(3)$ глюодинамика является достаточно хорошим приближением Квантовой Хромодинамики для расстояний меньших 1.3 фм. Мы изучаем $SU(2)$ калибровочную теорию, так как она более простая и легко обобщается до группы $SU(3)$. На качественном уровне $SU(2)$ глюодинамика ничем не отличается от $SU(3)$ теории и позволяет быстро получить качественное представление о существующих явлениях.

Изучение зависимости кирального конденсата от температуры и магнитного поля представляет интерес, поскольку киральный конденсат связан с голой массой кварка и обе величины представляют интерес для модельных предсказаний. Исследование топологических свойств вакуума важно, поскольку предполагается, что за нарушение киральной симметрии ответственны топологически нетривиальные объекты. Нарушение киральной симметрии объясняет малость масс пионов и каонов. Знание спектра оператора Дирака даёт нам информацию о поведении кирального конденсата, которое можно сопоставить с поведением топологической восприимчивости. Исследование локализационных свойств вакуума также весьма актуально, так как позволяет понять, какие объекты в вакууме ответственны за явление конфайнмента, объяснение которого является чрезвычайно важным.

Изучение кирального магнитного эффекта на решётке в $SU(2)$ глюодинамике - очень актуальная задача, так как совсем недавно в эксперименте на установке RHIC коллаборацией STAR были получены указания на существование этого эффекта в нецентральных

ионных столкновениях. Важно также найти теоретическое объяснение наблюдаемому эффекту.

Исследование пространственного натяжения струны с двумя кварками в полной КХД является важной задачей, так как позволяет понять, при каких температурах теория размерной редукции начинает хорошо описывать физику кварк-глюонной плазмы. Кварк-глюонная плазма является высокотемпературным состоянием, в котором кварки не образуют бесцветные состояния, а физика такой системы является пертурбативной. Пространственное натяжение струны является одной из фундаментальных величин, характеризующих, как пертурбативные, так и непертурбативные свойства горячей КХД среды. Предполагается, что при температурах намного больших псевдо-критической T_{pc} температуры перехода основной вклад в непертурбативные наблюдаемые вносят только магнитные моды, а число сортов кварков определяет только бегущую константу связи и не влияет на величину наблюдаемых. Однако, неизвестно верно ли это непосредственно рядом с T_{pc} . Данные вычисления также позволяют проверить, насколько хорошо описывают физику в фазах конфайнмента и деконфайнмента различные теоретические модели.

Понимание механизма перехода из ядерной материи в кварковую имеет большое значение для физики нейтронных звёзд. Предполагается, что данная область фазовой диаграммы, соответствующая низким значениям температуры и промежуточным значениям кваркового химического потенциала, может быть достигнута в экспериментах по тяжёло-ионным столкновениям GSI и ELI. Определение рода фазового перехода из ядерной материи в кварковую также представляет интерес.

1.2. Цели диссертационной работы

С помощью вычислений на решётке мы решаем следующие задачи:

1. изучение топологических свойств вакуума $SU(2)$ глюодинамики, поведения спектра собственных мод оператора Дирака и их локализационных свойств при конечной температуре;
2. исследование поведения спектра низко-лежащих собственных мод оператора Дирака и кирального конденсата, как в фазе конфайнмента, так и в фазе деконфайнмента;
3. вычисление спектра оператора Дирака и кирального конденсата в зависимости от внешнего абелевого магнитного поля;
4. изучение кирального магнитного эффекта на решётке в $SU(2)$ глюодинамике;
5. вычисление пространственного натяжения струны в зависимости от температуры в КХД с двумя лёгкими кварками.

Интерес представляет феноменологическое исследование переходной области из ядерной материи в кварковую, проверка применимости формализма Бардина-Купера-Шриффера и функционала Гинзбурга-Ландау для описания перехода, который происходит при низких температурах и промежуточных значениях кваркового химического потенциала.

1.3. Научная новизна и практическая ценность

Все представленные к защите результаты являются оригинальными и (на момент опубликования) новыми разработками автора диссертации.

Результаты опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, доклады давались на международных конференциях и представлены в виде тезисов в трудах этих конференций. Работы известны в научном сообществе и цитируются в работах других авторов. Среди новых результатов следует отметить следующие:

1. Впервые изучено поведение спектральной плотности, щели в энергетическом спектре и локализационных свойств собственных мод оператора Дирака с помощью кирально инвариантного оператора перекрытия и улучшенного действия Симанчика, как в фазе конфайнмента, так и в фазе деконфайнмента в $SU(2)$ глюодинамике .
2. Впервые изучено поведение спектра низко-лежащих собственных мод оператора Дирака и кирального конденсата в широком интервале температур от $0.91T_c \leq T \leq 2T_c$ в $SU(2)$ калибровочной модели. Найдено, что поведение спектра согласуется с теорией случайных матриц в области конфайнмента и не описывается ни одной из известных теорий в фазе деконфайнмента.
3. С помощью вычислений на решётке впервые показано, что внешнее магнитное поле приводит к увеличению плотности низко-лежащих собственных мод оператора Дирака и росту кирального конденсата. Найдено, что локализационные свойства около-нулевых мод существенны для нарушения киральной симметрии во внешнем абелевом поле.
4. Впервые найдены доказательства существования кирального магнитного эффекта на решётке в $SU(2)$ калибровочной теории. Было обнаружено усиление флуктуаций зарядовой плотности и

продольного тока в направлении внешнего абелевого магнитного поля.

5. В вычислениях с двумя динамическими кварками впервые на решётке было показано, что пространственное натяжение струны остаётся постоянным в фазе конфайнмента, а при нулевой температуре оно совпадает с физическим натяжением струны.
6. Была исследована область перехода из ядерной материи в кварковую с помощью формализма Бардина-Купера-Шриффера и функционала Гинзбурга-Ландау, впервые было показано, что для описания данного перехода функционал Гинзбурга-Ландау слабо применим. В рассматриваемой переходной области была обнаружена взаимосвязь между физикой кварковой материи и локализацией Андерсона в сильно разупорядоченной среде.

Научная и практическая ценность представляемой диссертации заключается в возможности применения полученных результатов в дальнейших исследованиях физики сильных взаимодействий.

1.4. Апробация работы

Основные результаты, представленные в диссертации, обсуждались на внутренних семинарах решёточной группы ИТЭФ, докладывались на теоретических семинарах ИТЭФ (Москва), Университета Гумбольдта (Берлин), на крупнейших международных конференциях Lattice 2007 (г. Регенсбург, Германия), Lattice 2009 (г. Пекин, Китай), на конференции, посвящённой 100-летию Н. Н. Боголюбова в г. Дубна в 2009 году. В основу диссертации легли результаты исследований, опубликованные в рецензируемых журналах.

1.5. Структура и объем диссертации

Диссертация включает в себя Введение, 6 глав основного текста и Заключение. Объем диссертации - 178 страниц, включая 47 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 222 ссылки.

1.6. Благодарности

В первую очередь я хочу выразить благодарность тем людям, под руководством которых я работала, а именно Юрию Антоновичу Симонову, Борису Олеговичу Кербикову и Михаилу Игоревичу Поликарпову. Огромное спасибо Виталию Геннадьевичу Борнякову и Михаилу Игоревичу Поликарпову за то, что за моральную и финансовую поддержку, за проявленный профессионализм в работе со мной. Спасибо Максиму Чернодубу и Павлу Буйвидовичу за активную работу и многочисленные обсуждения наших совместных результатов. Также хочу выразить благодарность людям, с которыми мы обсуждали наши работы, а именно, С.М. Морозову, В.И. Захарову, В.И. Шевченко и Ф.В. Губареву. Большое спасибо И.Л. Боголюбскому и В.И. Захарову, взявшим на себя труд быть официальными оппонентами этой работы.

2. Содержание работы

Во Введении описывается актуальность проблемы, формулируется тема исследования и вводятся основные понятия.

В первой главе диссертации вычисляется спектр точных нулевых и около-нулевых мод оператора Дирака на решётке с помощью кирально-инвариантного оператора Нойбергера с улучшенным действием Симанчика в интервале температур от $0.91 T_c$ до $2 T_c$. Знание

спектра точных нулевых мод позволяет вычислить топологическую восприимчивость вакуума $SU(2)$ глюодинамики. Вычислив спектральную плотность около-нулевых мод, нетрудно оценить величину кирального конденсата с помощью соотношения Банка-Кашера. Исследуются локализационные свойства собственных мод оператора Дирака. Проверяется зависимость полученных результатов от типа граничных временных условий, т.е. от знака петли Полякова для данной калибровочно-полевой конфигурации. Вычисляется также спектральная щель для различных температур и секторов петли Полякова. Найдено, что топологическая восприимчивость в фазе конфайнмента является почти постоянной величиной, в фазе деконфайнмента она начинает медленно уменьшаться, и её поведение не зависит от знака среднего значения петли Полякова в отличие от всех остальных рассматриваемых величин.

Плотность собственных значений ρ и, следовательно, киральный конденсат сильно отличается в секторах Поляковской петли с $L > 0$ и $L < 0$. В секторе с положительной петлёй Полякова при некоторой температуре, выше критической, происходит восстановление киральной симметрии, спектральная щель становится существенно отличной от нуля. В секторе с $L < 0$ спектральная щель остаётся близка к нулю, а киральная симметрия нарушенной для всех температур $T > T_c$, как и предсказывает модель Стефанова.

Таким образом, наблюдается влияние типа граничных условий в операторе Дирака, или, что эквивалентно, знака петли Полякова, на спектр собственных мод ρ и, как следствие, восстановление киральной симметрии.

Во второй главе мы представили результаты по измерению

спектра низко-лежащих собственных значений λ оператора Дирака в $SU(2)$ глюодинамике на решётке, как в фазе конфайнмента, так и в фазе деконфайнмента. При всех температурах выше T_c мы используем калибровочно-полевые конфигурации с положительным значением петли Полякова.

Сопоставив наши данные при конечной температуре с результатами теории случайных матриц при нулевой температуре, мы обнаружили, что в фазе конфайнмента при $T \leq T_c$ киральные ортогональные ансамбли случайных матриц замечательно описывают распределения низко-лежащих собственных значений оператора Дирака. При температурах $T > T_c$, т.е. в фазе деконфайнмента, спектр не описывается универсальными распределениями теории случайных матриц, необходимо использовать другую модель.

Распределения собственных значений с различными топологическими зарядами и разным числом собственных мод мы фитировали функциями из теории случайных матриц и из фитов определили киральный конденсат. Значения кирального конденсата, полученные из распределений с различными топологическими зарядами и числом собственных мод, согласуются друг с другом. Значения кирального конденсата, найденные с помощью экстраполяции к нулевому λ по Банксу-Кашеру, при тех же температурах оказались немного завышенными по сравнению со значениями конденсата, полученные из теории случайных матриц.

Изучив поведение кирального конденсата во всём доступном интервале температур $0.91 T_c < T \approx 1.5 T_c \approx 480$ МэВ с помощью соотношения Банкса-Кашера, мы обнаружили два интересных эффекта. Первый - это то, что киральный конденсат быстро меняется вблизи

фазового перехода в деконфайнмент, но не обращается в нуль. Второй - это ещё одно быстрое уменьшение конденсата при $T \approx 1.5 T_c \approx 480$ МэВ.

Наши результаты подтверждают, что в зависимости от температуры теория может находиться в трёх режимах. Первый режим - это общепринятая фаза конфайнмента при $0 < T < T_c \approx 320$ МэВ, для которой среднее значение петли Полякова равно нулю и киральный конденсат не равен нулю. Вторая область - это фаза при $T > 1.5 T_c \approx 480$ МэВ, для которой линия Полякова не равна нулю и киральный конденсат либо очень маленький, либо равен нулю, и которая, следовательно, очень похожа на фазу деконфайнмента. И третья - что-то типа переходной области при $T_c < T < 1.5 T_c$, где линия Полякова не равна нулю и киральный конденсат всё ещё сравним с типичным адронным масштабом. Однако, при температурах выше примерно $1.5 T_c$ плотность маленьких собственных значений быстро убывает до величины, которая очень близка к нулю. Из-за ограниченной статистики очень трудно измерить эту плотность и установить, равно ли нулю или нет её точное значение.

В третьей главе исследуется влияние внешнего абелевого магнитного поля на около-нулевые моды оператора Дирака и на их локализационные свойства, вычисляется зависимость кирального конденсата от внешнего магнитного поля. Полученные результаты сравниваются с теоретическими предсказаниями.

Мы обнаружили, что фоновое абелево магнитное поле приводит к усилению спонтанного нарушения киральной симметрии в неабелевой калибровочной теории. Киральный конденсат растёт линейно с величиной магнитного поля, что находится в количественном согласии с предсказаниями киральной теории возмущений.

Также найдено, что локализационные свойства около-нулевых мод существенны для усиления нарушения киральной симметрии во внешнем постоянном магнитном поле. Делокализация около-нулевых собственных мод и центральных вихрей увеличивается с ростом магнитного поля, таким образом, увеличивая вырождение около-нулевых мод.

В четвёртой главе мы получили доказательства в пользу существования кирального магнитного эффекта в $SU(2)$ глюодинамике на решётке с кирально-инвариантным оператором Дирака.

Была вычислена электрическая зарядовая плотность при нулевой температуре и различных значениях магнитного поля. Найдено, что внешнее магнитное поле усиливает локальное разделение электрического заряда, а в фазе деконфайнмента в достаточно сильном магнитном поле флуктуации электрической зарядовой плотности оказываются значительно подавленными по сравнению с флуктуациями при нулевой температуре.

Исследовано поведение локальных флуктуаций киральной плотности кварков в зависимости от внешнего магнитного поля при нулевой температуре, а также при ненулевой температуре в фазах конфайнмента и деконфайнмента. Мы обнаружили, что при нулевой температуре киральные флуктуации значительно (на два порядка величины) усилены во внешнем магнитном поле. По мере того, как температура растёт, киральные флуктуации увеличиваются и становятся менее чувствительными к силе магнитного поля. В фазе деконфайнмента локальные флуктуации киральности намного сильнее по сравнению с флуктуациями при нулевой температуре, хотя сами флуктуации практически не зависят от силы магнитного поля.

Изучены зависимости всех компонент электрического тока от

внешнего магнитного поля, как при нулевой, так и при конечной температурах. При нулевой температуре продольные, направленные вдоль магнитного поля, токи растут с увеличением силы магнитного поля. При этом усиление поперечных токов оказывается намного более слабым по сравнению с продольными. Объяснение эффекта заключается в сжатии уровней Ландау.

При ненулевой температуре, но ещё ниже фазового перехода, $T = 0.82T_c$, наклон, как продольного, так и поперечного тока, становится меньше. Однако, продольный ток увеличивается заметно сильнее по сравнению с увеличением поперечного тока. В фазе деконфайнмента при $T = 1.12T_c$ флуктуации продольных токов почти не зависят от магнитного поля. Более того, поперечные компоненты электрического тока слегка уменьшаются, в то время как магнитное поле становится сильнее.

Были изучены флуктуации электрического тока в зависимости от внешнего поля в фоновом поле инстантоно-подобной конфигурации. Исследовалась зависимость продольного тока от величины топологического заряда.

Как и в случае равновесной (“реальной”) глюонной конфигурации, так и в поле инстантоно-подобной конфигурации с ненулевым топологическим зарядом глюонного поля продольный ток в направлении магнитного поля усиливался. Наличие ненулевого *глобального* топологического заряда в реальных глюонных конфигурациях слабо влияет на продольные токи.

В пятой главе в полной КХД с двумя лёгкими кварками вычисляются пространственное натяжение струны $\sigma_s(T)$ и пространственный потенциал в интервале температур от $0.78 T_{pc}$

до $1.36 T_{pc}$. Для вычислений используется действие Вильсона для калибровочных полей и непертурбативно улучшенное действие Вильсона для фермионов. Пространственный статический потенциал исследуется в зависимости от расстояния между карками для различных температур. В фазе конфайнмента потенциалы для различных температур согласуются друг с другом очень хорошо и нет ярко выраженной зависимости от температуры. Это утверждение верно и для пространственного натяжения струны.

Найдено, что пространственное натяжение струны при нулевой температуре совпадает с физическим натяжением струны. При ненулевой температуре в фазе конфайнмента пространственное натяжение струны постоянно в пределах ошибок, совпадает с предыдущими расчётами на решётке, а также с теоретическими предсказаниями, полученным из различных моделей, а именно с помощью метода полевых корреляторов и подхода АДС/КХД. При температурах в фазе деконфайнмента наши результаты согласуются с предсказаниями метода полевых корреляторов и расходятся с предсказаниями АДС/КХД, пространственное натяжение струны начинает плавно возрастать при $T > T_{pc}$. Соотношение, полученное из трёхмерной теории $\sqrt{\sigma_s(T)} = cg^2(T)T$, где $g(T)$ - константа связи в зависимости от температуры T , также находится в хорошем согласии с нашими результатами.

В шестой главе рассматривается переход из ядерной материи в кварковую при малых температурах и значениях кваркового химического потенциала 0.4 ГэВ, оцениваются параметры кроссовера и Гинзбурга-Леванюка. Показывается, что система находится не в состоянии цветовой сверхпроводимости, а в переходной области, и, что

переход из ядерной материи в кварковую сопровождается сильными флуктуациями.

С помощью функционала Гинзбурга-Ландау для случая дополнительной цветовой симметричной группы выводится выражение для свободной энергии кварков в рамках трёхмерной эффективной теории среднего поля. Далее мы переходим к рассмотрению флуктуаций калибровочного поля. Рассматривается производящая функция флуктуирующей системы дикварков с учётом флуктуаций калибровочного поля. Вычисляется свободная энергия системы, оценивается сдвиг критической температуры перехода первого рода из фазы конфайнмента в фазу деконфайнмента. Также приводится оценка на верхнюю границу для средней величины глюонного конденсата в этой области параметров. В результате оказывается, что подход Гинзбурга - Ландау слабо применим к этой области. Маленькая корреляционная длина глюонного поля приводит к тому, что локальное приближение становится неприменимым, флуктуационные поправки оказываются большими, а влияние антикварков пренебрежимо малым. Следовательно, исследование физики нейтронных звёзд с помощью подхода Гинзбурга - Ландау не является правильным. Также в рассматриваемой переходной области была обнаружена взаимосвязь между физикой кварковой материи и локализацией Андерсона в сильно разупорядоченной среде.

В Заключение ещё раз кратко сформулированы основные результаты работы.

1. Была исследована $SU(2)$ глюодинамика при конечной температуре на решётке с помощью кирально-инвариантного оператора перекрытия. В интервале температур от $0.91 T_c$

до $2T_c$ были вычислены: топологическая восприимчивость, спектральная плотность, локализационные свойства фермионной системы собственных векторов. Найдено, что топологическая восприимчивость в фазе конфайнмента остаётся приблизительно постоянной, а в фазе конфайнмента она медленно уменьшается. Поведение топологической восприимчивости не зависит от знака среднего значения петли Полякова. Плотность собственных значений ρ , следовательно, киральный конденсат сильно отличается в секторах Поляковской петли с $L > 0$ и $L < 0$. В секторе с положительной петлёй Полякова при некоторой температуре, выше критической, происходит восстановление киральной симметрии, спектральная щель становится существенно отличной от нуля. В секторе с $L < 0$ спектральная щель остаётся близка к нулю, а киральная симметрия нарушенной для всех температур $T > T_c$, как и предсказывает модель Стефанова. Таким образом, наблюдается влияние типа граничных условий в операторе Дирака, или, что эквивалентно, знака петли Полякова, на спектр собственных мод ρ , как следствие, восстановление киральной симметрии.

2. Найдено, что при температурах $T < T_c$ спектр низколежащих собственных значений оператора Дирака в $SU(2)$ глюодинамике прекрасно описывается теорией случайных матриц, а при $T > T_c$ согласия между результатами численных вычислений и предсказаниями теории случайных матриц не наблюдается, необходимо использовать другую модель. Значения кирального конденсата, найденные с помощью экстраполяции к нулевым λ по Банксу-Кашеру, при тех же температурах оказываются

немного завышенными по сравнению со значениями конденсата, полученные из теории случайных матриц. Изучив поведение кирального конденсата во всём доступном интервале температур $0.91 T_c < T \approx 1.5 T_c \approx 480 \text{ МэВ}$ с помощью соотношения Банка-Кашпера, мы обнаружили два интересных эффекта. Первый - это то, что киральный конденсат быстро меняется вблизи фазового перехода в деконфайнмент, но не обращается в нуль. Второй - это ещё одно быстрое уменьшение конденсата при $T \approx 1.5 T_c \approx 480 \text{ МэВ}$.

3. Установлено, что фоновое абелево магнитное поле приводит к усилению спонтанного нарушения киральной симметрии в неабелевой калибровочной теории. Наши решёточные результаты подтверждают линейный рост кирального конденсата с величиной магнитного поля, что находится в количественном согласии с предсказаниями киральной теории возмущений. Обнаружено, что локализационные свойства около-нулевых мод существенны для усиления нарушения киральной симметрии во внешнем постоянном магнитном поле. Наши результаты подтверждают, что микроскопический механизм состоит в усилении делокализации около-нулевых собственных мод и центральных вихрей, который увеличивает вырождение около-нулевых мод.
4. Получены возможные доказательства в пользу существования кирального магнитного эффекта в $SU(2)$ глюодинамике на решётке с кирально-инвариантным оператором Дирака. С ростом температуры киральные флуктуации увеличиваются и, одновременно, становятся менее чувствительными к силе магнитного поля. В фазе деконфайнмента локальные флуктуации

киральности намного сильнее по сравнению с флуктуациями при нулевой температуре, хотя сами флуктуации практически не зависят от силы магнитного поля. При нулевой температуре продольные (т.е., направленные вдоль магнитного поля) токи растут с увеличением силы магнитного поля. Эффект сопровождается более слабым усилением поперечных токов, которое мы приписываем поперечному сжатию уровней Ландау. При ненулевой температуре, но ещё ниже фазового перехода, $T = 0.82T_c$, рост как продольного так и поперечного токов становятся меньше. Однако, продольный ток растёт сильнее по сравнению с увеличением поперечного тока. В фазе деконфайнмента при $T = 1.12T_c$ флуктуации продольных токов почти не зависят от магнитного поля. Более того, поперечные компоненты электрического тока слегка уменьшаются, в то время как магнитное поле становится сильнее. Флуктуации электрической зарядовой плотности оказываются значительно подавленными в фазе деконфайнмента в достаточно сильном магнитном поле. Мы также обнаружили, что наличие ненулевого *глобального* топологического заряда в реальных глюонных конфигурациях слабо влияет на продольные токи. Таким образом, КМЭ возникает в областях локальных концентраций топологического заряда в глюонной конфигурации.

5. В полной КХД с двумя лёгкими кварками исследован на решётке пространственный статический потенциал в зависимости от расстояния между кварками для различных температур. В фазе конфайнмента потенциалы для различных температур согласуются друг с другом очень хорошо. Найдено, что пространственное

натяжение струны при нулевой температуре равно физическому натяжению струны. При ненулевой температуре в фазе конфинмента пространственное натяжение струны постоянно и в пределах ошибок совпадает с предыдущими расчётами на решётке, а также с теоретическими предсказаниями, полученным из различных моделей. При температурах в фазе деконфинмента наши результаты согласуются с предсказаниями метода полевых корреляторов и расходятся с предсказаниями АДС/КХД, пространственное натяжение струны начинает плавно возрастать при $T > T_{pc}$. Наблюдается согласие с предсказаниями трёхмерной теории для поведения $\sigma_s(T)$ в зависимости от температуры и константы связи.

6. В области перехода из ядерной материи в кварковую даны оценки параметрам кроссовера и Гинзбурга-Леванюка, показано, что система находится не в состоянии цветовой сверхпроводимости, а в переходной области, а переход из ядерной материи в кварковую сопровождается сильными флуктуациями. Обнаружено, что подход Гинзбурга - Ландау слабо применим к рассматриваемой области. Также в рассматриваемой переходной области была обнаружена взаимосвязь между физикой кварковой материи и локализацией Андерсона в сильно разупорядоченной среде.

3. Список публикаций

- [1] B. Kerbikov, E.V. Lushevskaya, "Toward the Understanding of Quark Matter Formation", Phys. Atom. Nucl. 71, 2008, pp.364-373
- [2] V.G. Bornyakov, E.V. Lushchevskaya, "Spatial string tension in $N(f) =$

2 lattice QCD at finite temperature”, Phys. Atom. Nucl. 72, 2009, pp.257-260

[3] V.G. Bornyakov, E.V. Luschevskaya, S.M. Morozov, M.I. Polikarpov, E.-M. Ilgenfritz, M. Muller-Preussker, “The Topological structure of SU(2) gluodynamics at $T > 0$: An Analysis using the Symanzik action and Neuberger overlap fermions”, Phys. Rev. D79, 2009, 054505

[4] P.V. Buividovich, E.V. Luschevskaya, M.I. Polikarpov, “Finite-temperature chiral condensate and low-lying Dirac eigenvalues in quenched SU(2) lattice gauge theory”, Phys. Rev. D78, 2008, 074505

[5] П.В.Буйвидович, Е.В.Лущевская, М.И.Поликарпов, М.Н.Чернодуб, “Киральный магнитный эффект в решеточной SU(2) глюодинамике при нулевой температуре” письма в ЖЭТФ, том 90, стр.456-461

[6] P.V. Buividovich, M.N. Chernodub, E.V. Luschevskaya, M.I. Polikarpov, “Numerical evidence of chiral magnetic effect in lattice gauge theory”, Phys. Rev. D, 2009, 10665