

На правах рукописи

Тарасов Олег Владимирович



**МОДЕЛИ НЕПЕРТУРБАТИВНЫХ ЭФФЕКТОВ В
КВАНТОВОЙ ХРОМОДИНАМИКЕ С УЧАСТИЕМ КВАРКОВ**

01 04 02 - теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва 2005

Работа выполнена на кафедре теоретической физики
физического факультета МГУ имени М В Ломоносова

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор В Ч Жуковский

Официальные оппоненты:


доктор физико-математических наук,
с н.с. К Г Клименко,
кандидат физико-математических наук,
доцент Б В Магницкий

Ведущая организация: Московский Государственный институт электроники и математики (технический Университет)

Защита состоится « 12 » мая 2005 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета К 501 001 17 в МГУ имени М В Ломоносова по адресу 119992, Москва, Ленинские горы, физический факультет, аудитория СФА

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан « 11 » апреля 2005 года

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук  Поляков П А

Актуальность темы

Одной из важнейших задач в современной квантовой хромодинамике (КХД) является исследование эффектов, относящихся к низкоэнергетической области теории. Примерами являются конфайнмент кварков, спонтанное нарушение киральной симметрии (НКС), возникновение цветовой сверхпроводимости и т.д. Как правило, теория возмущений над тривиальным (пертурбативным) вакуумом не в состоянии дать удовлетворительное объяснение этим явлениям. Помимо исследования окрестности тривиального вакуума, осуществляемого при помощи теории возмущений, необходим также учет вклада конфигураций глюонного поля, далеких от вакуумной. В связи с этим активно развиваются непертурбативные методы изучения физического вакуума, позволяющие учесть также некоторые коллективные эффекты, лежащие за рамками теории возмущений. Одним из методов их исследования является моделирование истинного поля глюонного конденсата при помощи внешнего неабелева поля достаточно простой конфигурации с дальнейшим изучением различных величин на его фоне.

В настоящее время вопрос об истинной структуре вакуума КХД остается открытым. В последние годы данной теме посвящено множество работ. Аналитически рассчитываются различные величины и исследуются возможные эффекты на фоне постоянного хромагнитного поля, суперпозиции инстангонов, магнитных монополей, дионов, центральных вихрей, меронов, фермионов. Проводятся симуляции в КХД на решетке, позволяющие выявить роль тех или иных калибровочных конфигураций в формировании различных непертурбативных величин. Строятся различные модели вакуума КХД основанные на тех или иных конфигурациях калибровочного поля. Такой подход может оказаться весьма плодотворным для выяснения природы соответствующих непертурбативных эффектов.

Весьма актуальным является учет роли кварков в возникающих моделях. С момента открытия в 2000 году кварк-глюонной плазмы адронная материя в состоянии деконфайнмента привлекает особое внимание. В некоторых моделях наличие кварков является необходимым и с чисто теоретической точки зрения. В диссертационной работе основное внимание уделено изучению фер-

мионного сектора некоторых моделей непертурбативных эффектов

Целью работы

является

- 1 Построение модели вакуума КХД основанной на калибровочных конфигурациях, в поле которых реализуется одномерное движение фермионов (фермионов) и описание явления НКС на основе этой модели
- 2 Изучение спектра и собственных функций оператора Дирака на фоне многих пересекающихся центральных вихрей
- 3 Рассмотрение возможности цветового ферромагнетизма в КХД (кварками и изучение фазового перехода между этим состоянием и фазой цветовой сверхпроводимости

Научная новизна работы.

В диссертации был исследован спектр оператора Дирака во внешнем поле многих фермионов и центральных вихрей с целью выяснения роли этих калибровочных конфигураций в объяснении эффекта, НКС В явном виде получены нулевые моды оператора Дирака в поле ортогонально пересекающихся вихрей Были построены явные примеры фермионов, явно реализующие важную для НКС идею одномерного движения кварков Спектр оператора Дирака в их поле обладающий свойством сгущения в окрестности нулевых собственных значений демонстрирует возможную роль фермионов в создании конечной плотности нулевых мод оператора Дирака Построенная модель вакуума с разреженным газом фермионов предсказывает возникновение конечного кварк-антикваркового конденсата Было также произведено исследование глюонного и фермионного сектора модели основанной на постоянном хромомангнитном поле и описывающей цветовой ферромагнетизм кварков в состоянии деконфайнмента Показано что хромомангнитное поле может быть стабилизировано путем образования заряженного глюонного конденсата При

этом продемонстрировано что условие стабильности поля накладывает также ограничение на его протяженность, те предсказывает доменную структуру в фазе цветового ферромагнетизма На основе рассмотрения кваркового сектора одного домена фиксированных размеров построен термодинамический потенциал системы и исследован переход первого рода между фазой цветового ферромагнетизма и предсказываемой теоретически фазой цветовой сверхпроводимости

Научная и практическая ценность работы.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при дальнейших исследованиях квантовых процессов во внешних полях, в различных астрофизических условиях, а также при планировании новых экспериментальных исследований как в лабораториях, так и в решеточных симуляциях квантовой теории поля Большинство полученных результатов могут представлять интерес в квантовой теории непертурбативных эффектов

Результаты могут быть использованы в НИИЯФ МГУ им М В Ломоносова, ИЯИ, ЛТФ ОИЯИ, ФИРАН им П Н Лебедева, ИТЭФ, МИРАН им В А Стклова МГПУ им В И Ленина, МИЭМ, МИРЭА и др

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях

- 1 Конференция "Ломоносовские чтения", секция физики МГУ апрель, 2005
- 2 Конференция секции ЯФ ОФН РФН "Физика фундаментальных взаимодействий", посвященная 100-летию академика А И Алиханова ИТЭФ, апрель, 2004, а также неоднократно докладывалась на следующих семинарах
- 3 Семинар кафедры теории поля и элементарных частиц Гумбольдтского университета (Берлин)

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 работ [1–6], список которых приводится в конце автореферата

Структура и объем работы

Работа содержит введение, четыре главы, заключение и список литературы из 109 наименований. В состав работы входят 10 иллюстраций. Объем работы составляет 117 страниц.

Краткий обзор работы

В главе 1 дается обзор ряда известных методов исследования эффектов НКС конфайнмента и цветовой сверхпроводимости, а также дается описание структуры диссертации.

Глава 2 диссертации посвящена изучению возможности описания НКС при помощи фермионов.

В параграфе 1 даются основные сведения о фермионах, а также кратко излагается структура главы.

Параграф 2 посвящен мотивации интереса к фермионам, основанное на том, что эффективное понижение размерности пространства до 1 привело бы, на основании соотношения Бэнкса-Кэшера, к образованию конечного кварк-антикваркового конденсата и в отсутствие внешнего калибровочного поля.

Затем, основываясь на результатах предшествующих работ, в параграфе 3 построен явный пример прямолинейного фермиона и отвечающей ему фермионной нулевой моды. На этом примере показана возможность механизма НКС во внешнем поле фермиона, возникающая благодаря свойству спектра оператора Дирака сгущаться в окрестности нулевых собственных значений. Демонстрируются некоторые возможные свойства фермионов: взаимосвязь

с конфигурациями калибровочного поля в поле которых есть трехмерно-нормируемые фермионные моды, возможная связь с абелевой проекцией неабелева поля, являющегося чистой калибровкой, нетривиальность трехмерной топологии. В конце приводится упрощающее предположение о спектре оператора Дирака, важное для дальнейшего вычисления плотности его нулевых мод.

В параграфе 4 изучается структура матрицы перекрытий нулевых мод в поле многих фермионов. Применяя метод, уже использованный ранее для исследования инстантонного вакуума, строится спектр оператора Дирака вблизи нуля.

Параграф 5 посвящен модели вакуума основанной на стохастическом распределении прямолинейных фермионов с разреженной плотностью (газ фермионов). На основе замены континуального интегрирования конечномерным интегрированием по коллективным степеням свободы, вычисляется среднее значение для плотности нулевых мод, показывается наличие ненулевого кварк-антикваркового конденсата, а также наличие для него конечной гермодинамической предела. Данный результат является центральным результатом главы 2.

С целью проверки корректности некоторых из сделанных ранее предположений был проведен компьютерный эксперимент, описанный в параграфе 6. Он аналогичен предложенному ранее моделированию инстантонного вакуума. Выяснилось, что область применимости компьютерной симуляции включает в себя плотности фермионов, ожидаемые в физическом вакууме. Результаты компьютерного эксперимента приведенные в графической форме, согласуются с предсказанными в предыдущем параграфе аналитическими результатами.

Глава 3 посвящена изучению спектра оператора Дирака во внешнем поле пересекающихся центральных вихрей.

В параграфе 1 приводится мотивация интереса к данной проблеме. Связан он в первую очередь с недавними достижениями в области решеточных симуляций КХД. Как известно, благодаря разработанным методам централь-

ной проекции была выявлена ключевая роль центральных вихрей в эффектах НКС и конфайнмента. Однако в непрерывной теории механизм НКС на основе вихрей на данный момент не разработан. Исследование спектра оператора Дирака в поле центральных вихрей может выявить их роль в создании кварк-антикваркового конденсата.

В параграфе 2 приводятся двумерные фермионные моды в поле толстого и тонкого вихря.

В параграфе 3 рассматривается уравнение Дирака в поле пары пересекающихся вихрей в абелевой теории. Показано, что при ортогональных вихрях уравнение Дирака для нулевых мод распадается на независимые уравнения для плоскости каждого из вихрей.

В параграфе 4 рассматривается уравнение Дирака в поле неабелевых пересекающихся центральных вихрей. Как выяснено, в поле двух вихрей нулевые фермионные моды отсутствуют, однако в поле многих пересекающихся прямолинейных вихрей они могут существовать. Показано, что теорему Атьи-Зингера о связи между числом нулевых фермионных мод и топологическими характеристиками калибровочного поля можно расширить таким образом, чтобы она выполнялась для случая центральных вихрей.

Параграф 5 посвящен исследованию спектра оператора Дирака в поле многих ортогонально пересекающихся вихрей и антивихрей. Показывается, что в отличие от случая с инстантонами области локализации нулевых фермионных мод оказываются более широкими, чем области локализации топологического заряда.

Глава 4 посвящена изучению возможности фазы цветового ферромагнетизма кварков в фазе деконфайнмента в КХД.

Параграф 1 содержит общие сведения о постоянном хромагнитном поле, о вакууме Саввиди, о его нестабильных модах и методах их стабилизации.

Один из недавно предложенных методов стабилизации развивается в параграфе 2. Он заключается в выделении нестабильной моды и описании ее скалярным заряженным полем. Для него составляется эффективный лагранжиан, включающий хиггсово самодействие и взаимодействие моды с элект-

тромагнитным полем моделирующим абелеву часть хромагнитного поля Благодаря наличию выделенного пространственного направления удается эффективное понижение размерности К получившейся $(2+1)$ -мерной задаче применяется метод, аналогичный использованному при описании квантового эффекта Холла, основанный на введении Черн-Саймоновского поля В результате скалярное поле конденсируется в пространственно-однородное состояние, соответствующее однородному заряженному глюонному конденсату в физической модели Показывается, что данный метод корректен при ограничении максимально возможной протяженности хромагнитного поля те предсказывается доменная структура цветового ферромагнетизма

Параграф 3 обосновывает необходимость учета фермионов Делаются основные предположения, необходимые для расчета термодинамического потенциала фермионов

В параграфе 4 производится расчет полной энергии системы при нулевой температуре Показывается что ее минимальное значение может достигаться при ненулевом хромагнитном поле На основании сравнения термодинамических потенциалов исследуются фазовый переход между состояниями цветового ферромагнетизма и цветовой сверхпроводимости системы

В параграфе 5 аналогичный расчет производится при ненулевой температуре Компьютерный расчет, проведенный в параграфах 5 и 6, иллюстрируется шестью графиками

Заключение содержит основные результаты диссертации

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

- 1 Построены явные примеры фермионов доказывающие их существование и демонстрирующие некоторые возможные их свойства нетривиальную трехмерную топологию связь с трехмерными калибровочными конфигурациями допускающими нормируемые нулевые моды оператора Дирака
- 2 Построена модель нарушения киральной симметрии, основанная на стохастическом распределении многих фермионов Показано, что в рамках

данной модели возникает конечный кварк-антикварковый конденсат

- 3 Исследовано возникновение нулевых фермионных мод во внешнем поле, образованном многими пересекающимися центральными вихрями и антивихрями Установлена связь их числа с топологическими характеристиками калибровочного поля
- 4 Изучено пространственное распределение в поле центральных вихрей волновых функции возникающих нулевых фермионных мод Выявлено отличие от случая с инстантонами, заключающееся в том что распределение нулевых мод не сконцентрировано в области максимумов плотности топологического заряда,
- 5 Показано, что постоянное хромагнитное поле может быть стабилизировано путем образования постоянного конденсата хромагнитного поля при условии конечности его протяженности, те предсказана его доменная структура
- 6 На основании рассмотрения фермионного сектора одною домена системы изучен фазовый переход между ферромагнитной и сверхпроводящей фазами системы кварков и глюонов при нулевой и конечной температуре

Список публикаций

- [1] *В Ч Жуковский, О В Тарасов* Фермионы в случайных калибровочных полях и нарушение киральной симметрии // Яд Физ 2004 Т 67 С 2285-2296
- [2] *В Ч Жуковский, О В Тарасов* Нулевые моды оператора Дирака в калибровочных полях вихревого типа// Теоретическая и математическая физика 2004 Т 140 С 410 423

- [3] *В Ч Жуковский, О В Тарасов* Модель нарушения киральной симметрии (газом фермионов // Вестник Московского Университета Серия 3 Физика Астрономия 2003 № 6 С 60-65
- [4] *В Ч Жуковский, О В Тарасов* Ферромагнитное состояние $SU(2)$ -вакуума // Вестник Московского Университета Серия 3 Физика Астрономия 2004 № 4 С 60-62
- [5] *В Ч Жуковский, О В Тарасов* Ферромагнитное состояние $SU(2)$ -калибровочной модели теории поля // Вестник Московского Университета 2004 Серия 3 Физика Астрономия 2004 № 6 С 57-60
- [6] *В Ч Жуковский, О В Тарасов, Д Эберт* Цветовой ферромагнетизм $SU(2)$ -калибровочной модели теории поля при конечной температуре// Вестник Московского Университета. Серия 3 Физика Астрономия 2005 № 2 С 60-68

01.04

Подписано в печать 07.04.2005
Объем 0,75 печ.л.
Тираж 100 экз. Заказ № 55
Отпечатано в ООО «Соцветие красок»
119992, г.Москва, Ленинские горы, д.1
Главное здание МГУ, к.102

890