

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-96-405

На правах рукописи
УДК 539.12; 539.145

A-196

АВЕРЧЕНКОВА
Лилия Александровна

ДИСКРЕТНЫЕ СИММЕТРИИ
В КАЛИБРОВОЧНЫХ ТЕОРИЯХ НА РЕШЕТКЕ
ПРИ КОНЕЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1996

Работа выполнена в Институте теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Национальной академии наук Украины

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор
доктор физико-математических наук

Г. М. Зяновьев
В. К. Петров

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
доктор физико-математических наук, профессор

В. Б. Приезжев
Р. Н. Фаустов

Ведущее научно-исследовательское учреждение:


Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета

Защита диссертации состоится "25" декабря 1996 года в часов на заседании Специализированного совета К047.01.01 Лабора-
тории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного ин-
ститута ядерных исследований.

Автореферат разослан "4" января 1996 года.

Ученый секретарь
Специализированного совета
доктор физико-математических наук

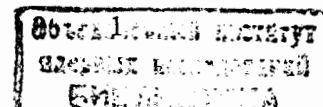

А.Е. Дорохов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Последние годы в физике высоких энергий отмечены значительной активностью в проведении экспериментов по столкновениям релятивистских тяжёлых ионов (CERN, Brookhaven, Berkeley). Общетеоретической целью этих экспериментов является изучение термодинамики сильных взаимодействий. В настоящее время квантовая хромодинамика (КХД), будучи основным претендентом на роль теории сильных взаимодействий, допускает образование кварк-глюонной плазмы в результате соответствующего(их) фазового(ых) перехода(ов). Решающие теоретические успехи в изучении этого явления и оценке характеризующих его параметров (критическая температура и барионная плотность, длина экранировки) связаны, в основном, с использованием решёточной версии КХД, поскольку этот подход, во-первых, даёт уникальную возможность систематического анализа непертурбативных вкладов в теории поля, а, во-вторых, позволяя перейти от бесконечнократных функциональных интегралов полевых теорий к конечнократным, открывает широкую возможность использования компьютерных методов исследования КХД-термодинамики.

Результаты компьютерных вычислений дают хорошее понимание критического поведения сильновзаимодействующей материи. Однако количественная надёжность полученных результатов ограничена техническими возможностями современных компьютеров, даже со специализированными для решёточных расчётов процессорами. Кроме того, понять природу фазовых переходов, выяснить, со спонтанным нарушением какой из симметрий они связаны, трудно на языке набора чисел. В такой ситуации часто оказываются плодотворными аналитические методы исследования КХД. И хотя аналитический подход является ограниченным, поскольку не позволяет избежать использования различных приближений, в качестве его оправдания можно привести следующие аргументы: эти приближения, как правило, хорошо контролируются, а сами методы во многом опираются на достижения в теории спиновых систем.

Детальная картина, построенная в течение последних лет на основе Монте-Карловских симуляций и аналитических вычислений в теории среднего поля, указывает на существование как фазового перехода деконфайнмента, так и перехода, связанного с нарушением киральной симметрии. Однако вопрос о возможной связи между



этими переходами, а также фазовой структуре в плоскости $m_q - T$ (m_q – кварковая масса), всё ещё ждёт своего решения, которое усложнено ещё и тем фактом, что временная компонента калибровочного поля A_0 может проявлять себя как хиггсовское поле в результате компактификации пространства в направлении евклидоваго времени. Более того, генерация хиггсовского конденсата в фазе высоких температур, по всей вероятности, может приводить к редукции калибровочной симметрии $SU(3) \rightarrow U(1) \times U(1)$, а также сопровождаться нарушением зарядовой симметрии.

Цель работы:

- аналитическое исследование некоторых аспектов фазовой структуры решёточной конечнотемпературной КХД;
- развитие методов построения эффективного действия для систем, допускающих спонтанное нарушение глобальных симметрий;
- непerturbативный анализ взаимосвязи различных фазовых переходов в КХД на решётке при конечных температурах;
- поиск оригинальных сигналов образования плазмы деконфайнированных кварков и глюонов.

Научная новизна и практическая ценность. Важнейшими физическими результатами диссертации являются:

- предсказание возможного динамического нарушения зарядовой симметрии в фазе деконфайнмента
- существование в ней хиггсовского конденсата калибровочного поля A_0 .

Эти результаты получены на основе аналитического исследования КХД на решётке в рамках оригинальных модификаций ряда методов статистической физики и теории критических явлений.

По современным представлениям некоторые явления, проявляющиеся при очень высоких плотностях энергии, могут быть обнаружены в лабораторных экспериментах по столкновениям ультрарелятивистских тяжёлых ионов. На предсказание нарушения C -чётности, сделанное в диссертации, могут опираться экспериментальные программы на планируемых *LHC* и *RHIC*.

Фазовый переход от адронной материи к кварк-глюонной плазме, по всей видимости, имел место на ранней стадии образования Вселенной в первые 10^{-5} с после Большого Взрыва. Считается, что в настоящее время он может играть заметную роль в сердцевине коллапсирующих нейтронных звёзд. Можно надеяться, что эффекты, связанные с нарушением зарядовой симметрии, могут оказаться весьма важными и в решении многих задач современной космологии.

Новыми теоретическими результатами диссертации являются также нахождение параметра порядка для фазового перехода, связанного с нарушением зарядовой симметрии, выяснение роли параметра асимметрии решётки в описании фазовой структуры калибровочных теорий с дискретными группами.

Кроме того, развитие уже известных моделей и методов - высокотемпературного разложения, метода квазисредних Боголюбова, метода среднего поля и других, а также построение эффективных действий для конечнотемпературной КХД на решётке и решеточных $Z(N)$ калибровочных теорий, может оказаться ценным для дальнейшего исследования свойств адронной и кварк-глюонной материи при высоких температурах и барионных плотностях.

Апробация работы: Результаты диссертации неоднократно обсуждались на семинарах Института теоретической физики НАН Украины, докладывались на Международных конференциях: "Hadron Structure" (Стара Лесна, ЧСФР - 1991 г.), "Quark Matter-91" (Гатлинберг, США - 1991 г.) "Physics of High Energy Heavy-Ion Collisions" (Буоссари, Финляндия - 1994 г.), школе "Development in Nuclear Theory and Particle Physics" (Дубна, Россия - 1995 г.), симпозиуме "Critical Phenomena in Strongly Interacting Matter" (Карпач, Польша - 1995 г.), а также на научных семинарах в различных университетах США, ФРГ и Японии.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 работ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объём диссертации – 129 страниц машинописного текста, 14 рисунков и 1 таблица. Библиография содержит 87 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются задачи диссертации, цель и кратко излагается её содержание.

В первой главе диссертации проводится аналитическое исследование фазовой структуры эффективного действия решёточной КХД при конечных температурах в рамках метода квазисредних Боголюбова.

Наиболее полно фазовый переход деконфайнмента изучен в чистой глюодинамике. От конечнотемпературной $SU(N)$ квантовой хромодинамики на решётке с размерами $N_\tau \times N_\sigma^3$ можно перейти к эффективной трёхмерной теории взаимодействия поляковских петель $\Omega_{\vec{x}} = \text{Tr} \prod_{\tau=1}^{N_\tau} U_0(\vec{x}, \tau)$, обладающей явной $Z(N)$ инвариантностью. Нетривиальность преобразования поляковских петель на подгруппе центра калибровочной группы $SU(N)$ легла в основу изучения фазового перехода деконфайнмента в чисто калибровочном секторе. Среднее петли Полякова может служить параметром порядка фазового перехода из $Z(N)$ инвариантного состояния в фазу, где $Z(N)$ симметрия спонтанно нарушена. Это среднее связано со свободной энергией изолированного статического кварка $F_q = -\ln(\Omega)$. В отсутствие динамических кварков ненулевое значение этого среднего свидетельствует о нарушении симметрии центра и наличии деконфайнированных цветовых зарядов, поскольку при этом свободная энергия конечна. В случае восстановления $Z(N)$ симметрии $\langle \Omega \rangle = 0$. В присутствии динамических фермионов $Z(N)$ симметрия оказывается нарушенной явно и $\langle \Omega \rangle$ уже не является хорошо определённым параметром порядка.

В данной главе представлено одно из возможных решений проблемы исследования фазового перехода деконфайнмента в полной теории с полями материи. Это решение основывается на предположении, что при фазовом переходе кроме $Z(N)$ симметрии возможно спонтанное нарушение других глобальных симметрий, которые бы не нарушались явным образом с введением кварков. В этом случае такая дополнительная симметрия могла бы рассматриваться в качестве симметрии, спонтанное нарушение которой в полной теории ведёт к деконфайнменту. Показано, что этой дополнительной симметрией теории может быть зарядовая C симметрия.

В §1 данной главы анализируется построение эффективного действия решёточной конечнотемпературной КХД и исследуются его

симметрии.

В §2 главы предложена модификация метода квазисредних Боголюбова на случай произвольной калибровочной группы. Приведено детальное описание этого модифицированного метода и представлена его апробация на примере простых модельных решёточных систем: $Z(3)$ калибровочной теории и модели Гейзенберга.

В §3 на основе предложенного модифицированного метода квазисредних построено высокотемпературное разложение для эффективного действия КХД в терминах среднего спина. Исследовано поведение свободной энергии системы как в чистой глюодинамике, так и при включении в рассмотрение кварков. Свободная энергия глюодинамической системы имеет следующий вид:

$$\Phi(R, \phi) = \sum_k f_{3k}(R, \beta') R^{3k} \cos 3k\phi \quad (1)$$

где $R = \sqrt{\bar{\chi}_1^2 + \bar{\chi}_2^2}$; $\phi = \text{arg} \frac{\bar{\chi}_2}{\bar{\chi}_1}$, $\bar{\chi}_1, \bar{\chi}_2$ квазисреднее от действительной и мнимой частей петли Полякова, соответственно, и $f_{3k}(R, \beta')$ — некоторые функции R и β' . Анализ поведения свободной энергии системы позволяет показать, что при $\beta' < \beta'_c$ система находится в состоянии, отвечающем центральному минимуму свободной энергии системы, при $\beta' \geq \beta'_c$ система переходит в одно из трёхкратно вырожденных состояний, связанных между собой $Z(3)$ преобразованиями.

Во второй главе диссертации рассмотрен механизм динамического нарушения глобальной $SU(N)$ цветовой инвариантности до её абелевых подгрупп. Современные пертурбативные вычисления в континуальных $SU(2)$, $SU(3)$ калибровочных теориях обнаруживают нетривиальный минимум "хиггсовского эффективного потенциала", что говорит о возможности появления ненулевого вакуумного среднего для калибровочного поля A_0^c . В фазе деконфайнмента это среднее $\langle A_0^c \rangle$ становится функцией температуры, $A_0^c = \langle A_0^c \rangle + \delta A_0^c$ ($c = 3, 8$) и вакуум остаётся симметричным лишь относительно однопараметрических $U(1)$ преобразований, что является свидетельством редукции калибровочной симметрии $SU(3) \rightarrow U(1) \times U(1)$. Проблема исследования механизма нарушения глобальной калибровочной инвариантности решается с помощью построения эффективного потенциала взаимодействия калибровочного поля U_n с "хиггсовскими полями" A_0^c и, фактически, сводится к изучению среднего для полей

ϕ_j , где

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \mathcal{A}_0^3 + \mathcal{A}_0^8/\sqrt{3} \\ \phi_2 &= -\mathcal{A}_0^3 + \mathcal{A}_0^8/\sqrt{3} \\ \sum_{l=1}^3 \phi_l &= 0\end{aligned}$$

Этот эффективный потенциал, построенный в гамильтоновой формулировке решёточной КХД с фермионами Сасскинда в приближении сильной связи и среднего поля, записывается в виде

$$-\beta V_{eff}^{SU(3)} = \ln \frac{\xi^d}{\mu_1^{d-1}} + \ln \left(1 + \sum_{\alpha=1}^3 \cos \phi_\alpha \right) - \frac{d\beta^2}{16} \frac{(\sum_{\alpha=1}^3 \sin \phi_\alpha)^2}{(1 + \sum_{\alpha=1}^3 \cos \phi_\alpha)^2}$$

Первое слагаемое происходит от чисто глюонной теории, второе и третье представляют вклад кварков

$$\begin{aligned}\mu_1(\phi) &= \sin^2\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) \sin^2\left(\frac{2\phi_1 + \phi_2}{2}\right) \sin^2\left(\frac{2\phi_2 + \phi_1}{2}\right) \\ \xi(\phi) &= e^\gamma \sum_{\alpha=1}^3 \left[-\frac{1}{3} \theta_3\left(\frac{\gamma}{3} \mid 0\right) \theta_3(\gamma \mid 2\Phi_\alpha) - \frac{2}{3} \theta_3\left(\frac{\gamma}{3} \mid \Phi_\alpha\right) \theta_3(\gamma \mid \Phi_\alpha) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3} \theta_3\left(\frac{\gamma}{3} \mid \Phi_\alpha\right) \sum_{\beta>\sigma} \theta_3\left(\frac{\gamma}{3} \mid \Phi_\beta - \Phi_\sigma\right) \right] + e^\gamma \theta_3\left(\frac{\gamma}{3} \mid 0\right) \theta_3(\gamma \mid 0) \\ &\quad + \{\theta_3 \rightarrow \theta_2\}\end{aligned}$$

где $\theta_i(\gamma \mid \phi)$ – функции Якоби, а $\Phi_\alpha = \phi_\beta - \phi_\sigma$; $\sum_\alpha \Phi_\alpha = 0$. d – пространственная размерность. Анализ поведения данного потенциала в критической области позволил показать, что хромозлектрический сектор теории (как без полей материи, так и при их включении) порождает хиггсовский конденсат $\langle \mathcal{A}_0^c \rangle$, появляющийся в фазе деконфайнмента, что указывает на возможное нарушение глобальной калибровочной симметрии $SU(N)$, а также выяснить, что нарушение последней происходит при температуре, близкой к температуре освобождения кварков.

В §1 главы строится гамильтониан для $SU(3)$ цветовой группы, исходя из лагранжевой формулировки калибровочной теории на решётке.

В §2 исследуется механизм образования хиггсовского конденсата калибровочного поля \mathcal{A}_0^c . Этот механизм отличается от хиггсовского, так как в теории изначально отсутствуют хиггсовские поля. Переход к конечнотемпературному рассмотрению, приводящему к компактификации пространства в направлении мнимого времени, или, иными словами, к топологии цилиндра благодаря периодическим граничным условиям на калибровочные поля

$$U_\mu(\vec{x}, \tau) = U_\mu(\vec{x}, \tau + \beta)$$

с периодом $\beta = 1/T$, имеет своим важным следствием тот факт, что при $T = 0$ поле \mathcal{A}_0 может быть удалено соответствующими калибровочными преобразованиями, в то время как при конечных температурах оно не устраняется никакими поворотами в групповом пространстве без нарушения граничных условий. Это говорит о том, что граничные условия генерируют новые степени свободы, являющиеся собственными значениями поляковских петель, которые и выступают в роли хиггсовских полей. Кроме того, в параграфе даётся объяснение механизма деконфайнмента с точки зрения образования хиггсовского конденсата в фазе высоких температур.

В §3 вычисляется вакуумный конденсат калибровочного поля \mathcal{A}_0^c и исследуется связь между нарушением зарядовой C – симметрии и возникновением хиггсовского конденсата $\langle \mathcal{A}_0^c \rangle$.

В §4 главы проведено сравнение и изложены причины различия в описании $Z(N)$ фаз в рамках теории возмущений и решёточной аппроксимации. Приводятся аргументы в пользу того, что фазовый переход, связанный с нарушением C – симметрии, по всей видимости, явление существенно непертурбативное.

В третьей главе диссертации аналитически изучается фазовая структура $SU(2)$ глюодинамики на асимметричной решётке в приближении $SU(2) \simeq Z(2)$. По общепринятому мнению, это приближение позволяет получить достаточно хорошее описание критических явлений в решёточной КХД при конечных температурах и, более того, принято считать, что именно $Z(N)$ степени свободы определяют многие аспекты фазовой структуры $SU(N)$ калибровочных теорий.

В §1 обосновывается выбранное приближение для $SU(2)$ глюодинамики на решётке, вводится параметр асимметрии решётки и представляется способ его обобщения. Исследуется фазовая струк-

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

тура $Z(2)$ калибровочной системы в плоскости приведенных констант взаимодействия κ_τ для времени-подобных плакет и κ_σ для пространственно-подобных. В предельных случаях $\kappa_\tau \rightarrow 0(\infty)$, $\kappa_\sigma \rightarrow 0(\infty)$ критические значения этих приведенных констант могут быть найдены с любой точностью, поскольку система в каждом из них редуцируется к модели Изинга. Для нахождения этих критических значений применялись два метода: метод дуальных преобразований и альтернативный ему метод - построение эффективного действия для каждого предельного случая с использованием оригинальных, предложенных нами калибровок.

В §2 главы с помощью разработанного нами метода теории возмущений строится эффективное действие поляковских петель для $Z(2)$ калибровочной теории на решётке при конечных температурах, учитывающее помимо хромоэлектрической части хромомагнитную как возмущение. Был вычислен первый нетривиальный по κ_σ вклад в статистическую сумму

$$J_2 = \frac{(\text{th}\kappa_\sigma)^2}{2} \sum_{\vec{x},n} (\zeta_0 + \zeta_1 W'_{\vec{x},n} + \zeta_2 W''_{\vec{x},n})$$

где

$$\begin{aligned} W'_{\vec{x},n} &= \Omega_{\vec{x}} \Omega_{\vec{x}+n}^* + \Omega_{\vec{x}+n} \Omega_{\vec{x}+n+m}^* + \Omega_{\vec{x}+n+m} \Omega_{\vec{x}+m}^* + \Omega_{\vec{x}+m} \Omega_{\vec{x}}^* \\ W''_{\vec{x},n} &= \Omega_{\vec{x}} \Omega_{\vec{x}+n+m}^* + \Omega_{\vec{x}} \Omega_{\vec{x}+n}^* \Omega_{\vec{x}+n+m} \Omega_{\vec{x}+m}^* + \Omega_{\vec{x}+n} \Omega_{\vec{x}+m}^* \end{aligned}$$

и $\zeta_0, \zeta_1, \zeta_2$ - некоторые функции $\text{th}\kappa_\tau$. Разработанная процедура позволяет вычислять и последующие члены разложения. Найденное эффективное действие позволяет оценить фазовую структуру изучаемой теории во всей плоскости параметров.

В §3 вычисляется потенциал взаимодействия двух пробных источников в теории с различными приведенными константами взаимодействия в разных направлениях; изучается поведение среднего петель Вильсона $\langle W \rangle$ и т'Хуфта $\langle t'H \rangle$ в различных областях приведенных констант и анализируется роль параметра асимметрии решётки в описании фазовой структуры изучаемой теории.

В заключении приведены основные результаты диссертации, выносимые на защиту.

- Предложена модификация метода квазисредних Боголюбова для произвольной калибровочной группы, что дало возможность построить высокотемпературное разложение для предложенного эффективного действия КХД в терминах среднего спина. Этим модифицированным методом подтверждён вывод о том, что фазовый переход деконфайнмента связан со спонтанным нарушением симметрии центра соответствующей калибровочной группы и действительная часть петли Полякова играет роль соответствующего параметра порядка.
- Впервые показано, что в $SU(3)$ калибровочной теории возможно спонтанное нарушение C -симметрии. Показано, что среднее от мнимой части петли Полякова может служить параметром порядка соответствующего фазового перехода из зарядовсимметричной фазы в фазу с нарушенной C -симметрией.
- Для конечнотемпературной решёточной $SU(3)$ калибровочной теории исследован вакуумный конденсат калибровочного поля $\langle \mathcal{A}_0^c \rangle$ ($c = 3, 8$ - индекс диагональной матрицы λ^c). При высоких температурах это среднее становится функцией g и T , что указывает на возможность нарушения глобальной цветовой $SU(3)$ симметрии.
- Показано, что хромоэлектрический сектор теории (как без полей материи, так и при их включении) генерирует хиггсовский конденсат $\langle \mathcal{A}_0^c \rangle$ в деконфайнированной фазе. Фаза деконфайнмента может быть описана в терминах новых коллективных переменных - хиггсовских полей, переносящих заряды центра калибровочной группы.
- Показано, что образование конденсата $\langle \mathcal{A}_0^c \rangle$ сопровождается нарушением зарядовой симметрии.
- Впервые построено эффективное действие конечнотемпературной $Z(2)$ решёточной калибровочной теории, учитывающее, помимо хромоэлектрической части, первый нетривиальный вклад по константе взаимодействия пространственно-подобных плакет

κ_σ .

- Исследована зависимость термодинамических величин от параметра решёточной асимметрии ξ . Указано, что ренормгрупповые соотношения, позволяющие исключить зависимость термодинамических величин от параметра асимметрии решётки ξ в "наивном" пределе, не дают возможность устранить её в приближении $SU(N) \simeq Z(N)$, не разрушая при этом результаты "наивного" предела. Поэтому конечнотемпературные калибровочные теории на асимметричной решётке нуждаются в дополнительном условии, фиксирующем ξ .

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Л. А. Аверченкова, О. А. Борисенко, Г. М. Зиновьев, В. К. Петров. Хиггсовская фаза в решёточной КХД-термодинамике. - ЯФ, 54, 1991, с. 241-249.
2. L. A. Averchenkona, O. A. Borisenko, V. K. Petrov and G. M. Zinovjev. Tuning in phase structure analysis of lattice QCD at finite temperature. - Preprint ITP, 91-64E, 1991, p. 1-13.
3. Л. А. Аверченкова, О. А. Борисенко, Г. М. Зиновьев, В. К. Петров. Детальный анализ фазовой структуры решёточной КХД при конечных температурах. - ЯФ, 55, 1992, с. 506-512.
4. L. A. Averchenkona, K. V. Petrov, V. K. Petrov and G. M. Zinovjev. Lattice asymmetry in finite temperature gluodynamics. - Preprint ITP, 96-37E, 1996, p. 1-22, (accepted for publication in Phys. Rev. D).
5. L.A.Averchenkona, K.V.Petrov and V.K.Petrov. Gazing into lattice asymmetry in finite temperature gluodynamics. published in Proceeding of X International Conference "Problems of Quantum Field Theory", JINR E2-96-369, Dubna, 1996, p.32-36.
6. L. A. Averchenkona, K. V. Petrov, V. K. Petrov and G. M. Zinovjev. Asymmetry parameter role in description of phase structure of lattice gluodynamics at finite temperature. - Preprint ITP, 96-38E, 1996, p. 1-27, (hep-lat 9610002), (направлено в ЯФ).

Рукопись поступила в издательский отдел
25 октября 1996 года.