

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-96-426

На правах рукописи  
УДК 539.12.01

Г- 94

ГУЛАМОВ  
Тимур Ильярович

СВОЙСТВА НЕЙТРАЛЬНЫХ ВЕКТОРНЫХ  
МЕЗОНОВ В АДРОННОЙ СРЕДЕ  
ПРИ КОНЕЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ПЛОТНОСТЯХ

Специальность: 01.04.16 — физика ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1996

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова  
Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

проф. А. И. Титов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

проф. В. А. Андрианов  
СПГУ (г. Санкт-Петербург)

кандидат физико-математических наук

Ю. Л. Калиновский  
ЛТФ ОИЯИ (г. Дубна)

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Ташкентский Государственный Университет (г. Ташкент)

Защита диссертации состоится на заседании специализированного Совета К  
047.01.01 Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединен-  
ного института ядерных исследований "25" декабря 1996г. по адресу:  
141980 г. Дубна, Московская область, ЛТФ ОИЯИ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "23" ноября 1996 г.

Ученый секретарь специализированного Совета:

доктор физико-математических наук

А. Е. Дорохов

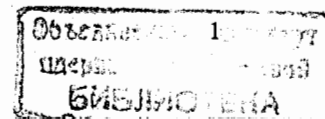
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации: Свойства адронов в условиях нагретого и плотного ядерного вещества являются в настоящее время объектом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований. Вопрос о том, как модифицируются в среде эффективные адронные параметры (массы, ширины распадов) можно отнести к одному из наиболее актуальных вопросов современной ядерной физики. Это связано также с возможностью экспериментального воспроизведения критических условий для адронной материи. Предполагается, что условия для возникновения нагретого и сжатого ядерного вещества могут быть реализованы в центральных столкновениях релятивистских тяжелых ионов. Возможные сигналы модификации эффективных адронных параметров – масс, ширины распада, констант связи – могли бы проявиться в спектрах лептонных пар, излучаемых из этих состояний. В силу принципа векторной доминантности, распределения лептонных пар по их инвариантным массам должны быть чувствительны к зависимости свойств нейтральных векторных мезонов от температуры и плотности окружающего их ядерного вещества. Поэтому важной и актуальной проблемой на пути исследования адронного спектра в критических условиях является изучение динамики и свойств векторных мезонов при конечных температурах и плотностях.

Для решения этой задачи используются различные методы, среди которых можно выделить три основных подхода:

1. Модели, которые оперируют только с адронными степенями свободы (пионами; нуклонами, дельта-изобарами и т.д.).
2. Модели, основанные на эффективных киральных кварковых лагранжианах типа модели Намбу – Иона-Лазинио при конечной температуре и плотности.
3. Правила сумм КХД при конечной температуре и плотности.

В рамках первого подхода основную роль в модификации свойств  $\rho$ -мезона играет его взаимодействие с частицами среды. Взаимодействие со средой дает дополнительный вклад в собственную энергию  $\rho$ -мезона, что эффективно изменяет его массу и ширину распада.



Эффективные киральные модели типа модели Намбу – Иона-Лазинио (НИЛ) включают в себя кварковые степени свободы. Здесь модификация свойств векторного мезона определяется не только его взаимодействием со средой но и зависимостью от температуры и плотности динамической кварковой массы.

В подходе, использующем правила сумм КХД при конечной температуре и плотности, модификация массы  $\rho$  - мезона происходит за счет модификации функций распространения кварков и глюонов на сравнимых с радиусом конфайнмента расстояниях. Вакуумные конденсаты кварковых и глюонных полей  $(\langle 0|\bar{q}q|0\rangle, \langle 0|G^2|0\rangle)$  заменяются на статистические средние значения от этих операторов, вклад в которые дает не только вакуумное состояние, но и состояния физической среды.

Существуют приближения, в которых различные подходы комбинируются с целью провести учет эффектов среды более полно. Например, в методе правил сумм КХД используется феноменологическая спектральная функция, модифицированная взаимодействием с частицами среды. Можно рассмотреть также и обратную ситуацию, взяв за основу эффективную адронную модель, но с массами, модифицированными влиянием среды на фундаментальном уровне.

Эффективные киральные модели типа модели НИЛ имеют определенную связь с методом правил сумм КХД: и в том, и в другом подходе основную роль играет киральный кварковый конденсат (при вычислении массы  $\rho$  - мезона в среде методом правил сумм КХД вклад кваркового конденсата  $\simeq 80\%$ ). Однако модельная зависимость расчета массы  $\rho$  - мезона на основе модели НИЛ приводит к качественно отличному поведению. Заметим, однако, что результат модели НИЛ зависит от конкретного определения эффективной массы, что само по себе является отдельным вопросом.

Из рассмотренных выше примеров видно, что существуют различные механизмы модификации адронных параметров в сильновзаимодействующей среде. До настоящего времени не ясно, какой механизм и при каких условиях является доминирующим. Кроме того, предсказания различных моделей качественно различаются.

Поэтому для более глубокого понимания и конечного решения вопроса о том, как воздействует нагретая и плотная адронная среда на свойства нейтральных векторных частиц и каким образом это может проявиться в наблюдаемых величинах, необходим всесторонний анализ в рамках различных подходов и моделей.

**Основные цели работы:** Исследование свойств векторных состояний в адронной среде при конечной температуре и плотности.

1. Применение модели НИЛ для исследования мезонной динамики, вычисление эффективных масс, адронных констант связи и ширин распадов в среде. Исследование возможности применения модели НИЛ для описания мезонного спектра при конечной температуре и плотности.
2. Исследование свойств нейтральных векторных мезонов в эффективной адронной модели с векторной доминантностью при конечной температуре. Изучение эффектов связанных с ненулевым значением изоспина в среде. Вычисление дилептонных спектров, исследование поляризационных эффектов в среде при конечных значениях температуры и изоспина.
3. Исследование кваркового конденсата в адронной среде с учетом взаимодействия между частицами среды. Изучение влияния термализованной пионной фазы и ее взаимодействия с коррелированными нуклонными источниками на величину кваркового конденсата. Рассмотрение возможности самосогласованного определения величины конденсата в среде и связь величины конденсата с эффективной массой векторного мезона. Исследование массы векторного мезона в нуклонном газе и сравнение эффекта изменения конденсата и эффекта взаимодействия векторного мезона со средой.

#### Научная новизна и ценность работы:

1. Исследована динамика и свойства мезонов (скалярных, псевдоскалярных, векторных и аксиально - векторных) в рамках модели НИЛ при конечной

температуре и плотности. Новым моментом является то, что принят во внимание резонансный характер коллективных возбуждений с квантовыми числами мезонов. Показано, что модель позволяет обойтись без введения регулирующего параметра обрезания  $\Lambda$ . Анализ свойств псевдоскалярных мезонов показал, что при значениях температуры и химического потенциала, близким к критическим, псевдоскалярные мезоны становятся нестабильными. Впервые на основе модели НИЛ исследован закон дисперсии, т.е. зависимость энергии  $\pi$ -мезона от пространственного импульса  $p$  при конечной температуре и зависимость эффективной массы от температуры при различных значениях  $p$ . Также впервые был проведен методический анализ эффективной константы взаимодействия  $g_{\rho\pi\pi}$  и ширины распада  $W(\rho \rightarrow \pi\pi)$  в среде. Рассмотрена возможность интерпретации векторных коллективных возбуждений в модели НИЛ как реальных  $\rho$  и  $a_1$  мезонов.

2. Вычислена собственная энергия и пропагатор  $\rho$ -мезона в изотопически несимметричном пионном газе. Впервые проведен учет дополнительной степени свободы – ненулевого значения зарядового химического потенциала  $\mu_Q$ . Исследованы эффективная масса, константа распада и закон дисперсии  $\rho$ -мезона для обоих поляризационных состояний. Получена оценка эффекта "неравновесности" при наличии одинакового для всех зарядовых состояний пионного химического потенциала  $\mu_{\pi^0}$ , а также влияния ненулевого значения  $\mu_Q$  на ослабление "неравновесного" выхода дилептонов. Рассчитаны дифференциальное и интегральное распределения дилептонов, исследовано влияние изоспинового химического потенциала на форму распределений. Исследован нетривиальный эффект угловой асимметрии дифференциального распределения и влияние температуры и химического потенциала на величину этой асимметрии.

3. Впервые на основе эффективного кирального лагранжиана исследовано поведение кваркового конденсата во взаимодействующей пион-нуклонной системе

при конечной температуре и рассмотрен эффект от взаимодействия термализованной пионной фазы с коррелированными нуклонами. Также впервые рассмотрено влияние скейлингового уменьшения нуклонной массы на величину конденсата и выполнен расчет отклонения от скейлингового поведения эффективной массы векторного мезона при конечной плотности. Рассмотрен возможный механизм этого отклонения.

Апробация работы: Результаты, представленные в диссертации, неоднократно докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ и Физико-Технического Института Академии Наук Узбекистана, а также на Международной школе-семинаре по релятивистской ядерной динамике (Владивосток - Саппоро, 1991), на Международном рабочем совещании по программе Гейзенберг - Ландау (Дубна, 1991), на Международном семинаре по проблемам физики промежуточных и высоких энергий (Дубна, 1995), на Международном семинаре по проблемам физики высоких энергий (Дубна, 1996).

Публикации: Результаты диссертации опубликованы в 6 печатных работах.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения общим объемом 108 страниц, включая 23 рисунка и список цитированной литературы из 91 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проведено краткое описание проблем, исследованных в диссертации, дано обоснование их важности, а также актуальности темы диссертации. Определена цель работы и приведено краткое изложение содержания.

В первой главе изложены основные положения теории поля при конечной температуре и определены температурные функции Грина. Описаны способы вычисления петлевых диаграмм в используемом в диссертации формализме мнимого времени ITF (imaginary time formulation).

Во второй главе исследуется динамика мезонов при конечной температуре и плотности в рамках модели Намбу – Йона-Лазинио. Рассмотрена  $SU(2) \times SU(2)$



версия модели с использованием формализма бозонизации на основе функционального интеграла. Получаемый при этом эффективный Лагранжиан содержит квадратичные по мезонным полям члены, представляющие собой обратные мезонные пропагаторы. При определении мезонной массы, как полюса мезонного пропагатора, приняты во внимание резонансный характер мезонных возбуждений, фигурирующих в модели. Это связано с тем, что среда в модели НИЛ представлена массивными составляющими кварками, и коллективные мезонные возбуждения являются, как полюса в амплитудах  $\bar{q}q$  - рассеяния. Отсюда возникает вопрос о том, для какой физической ситуации модель может быть применима. Ответом на этот вопрос может быть предположение о возможности существования смешанной кварк-мезонной фазы. Следовательно, представляется последовательным также учитывать реакции распада и образования коллективных кварк-антикварковых состояний в среде. Целью работы, изложенной во второй главе, является исследование энергетического спектра мезонов ( $\sigma$ ,  $\pi$ ,  $\rho$  и  $a_1$ ) путем нахождения полюса мезонных пропагаторов с учетом мнимой части полюса. Для псевдоскалярных мезонов также получен закон дисперсии, то есть зависимость энергии от пространственного импульса, при фиксированной температуре и барионном химическом потенциале. Показано, что при определенных значениях температуры и плотности, весьма близких к критическим, у пиона появляется отличная от нуля ширина распада  $\pi \rightarrow \bar{q}q$ , то есть пион становится нестабильным. Исследовано поведение в среде эффективной константы взаимодействия и ширины распада  $\rho \rightarrow \pi\pi$ . В конце главы обсуждается возможность интерпретации векторных и аксиально-векторных возбуждений, исследованных в модели как реальных  $\rho$  и  $a_1$  мезонов.

Третья глава диссертации посвящена исследованию эффектов среды, имеющей изоспиновую асимметрию. Рассмотрены свойства  $\rho$  - мезона в пионном газе с отличным от нуля средним значением изоспина. Среднее значение изоспина определяется разностью между средними числами пионов, находящихся в разных зарядовых состояниях. В свою очередь, эта разность контролируется зарядовым (изоспиновым) химическим потенциалом  $\mu_Q$ , имеющим одинаковое абсолютное зна-

чение, но разным знаком для  $\pi^+$  и  $\pi^-$  мезонов. В третьей главе использован функциональный метод вычисления собственно - энергетической функции и пропагатора в пионной среде с отличным от нуля значением  $\mu_Q$ . Этот метод нахождения собственной энергии не включает температурные функции Грина для пионов (в обзорной литературе обычно приводятся функции Грина для нейтральных Бозе - частиц). Вместо этого, построено функционально - интегральное представление для статистической суммы. Далее, собственно - энергетическая функция получена путем функционального дифференцирования. Исследован закон дисперсии и эффективная масса  $\rho$  - мезона как функции температуры и зарядового химического потенциала  $\mu_Q$ . На примере эффективной ширины распада  $\gamma_{\rho\pi\pi}^*$  получена численная оценка эффектов отклонения системы от положения химического равновесия. Рассчитаны дифференциальный и интегральный спектр выхода лептонных пар. Рассмотрена специфическая угловая асимметрия выхода дилептонов и её зависимость от значения пионного химического потенциала.

В четвертой главе исследован кварковый (киральный) конденсат во взаимодействующей адронной среде при конечной температуре и плотности, а также качественная связь между конденсатом и массой векторного мезона. Кварковый конденсат является важной составной частью метода правил сумм КХД. Имеется тесная связь между свойствами адронов, состоящих из  $u$  и  $d$  кварков и поведением кирального конденсата  $\langle \bar{q}q \rangle^* = \langle \bar{u}u + \bar{d}d \rangle^*$  в среде. плотности.

В четвертой главе рассмотрены два аспекта проблемы: 1) влияние взаимодействия при конечной температуре на величину  $\langle \bar{q}q \rangle^*$ ; 2) возможность самосогласованного определения  $\langle \bar{q}q \rangle^*$  в приближении ядерного Ферми - газа и связь этой величины с наблюдаемыми адронными параметрами ( $f_\pi^*$ ,  $M_N^*$ ,  $m_V^*$ ).

В первом параграфе четвертой главы на основе нелинейного кирального Лагранжиана обсуждается влияние термализованной пионной фазы и ее взаимодействия с адронными источниками при конечной температуре и плотности барионного заряда. В данной работе рассмотрена взаимодействующая пион-нуклонная среда. Основным вопросом рассмотрения является исследование вклада термали-

зованных пионов, взаимодействующих с нуклонами. Известно, что учет нуклон - нуклонных корреляций за счет пионного обмена даёт положительный вклад в значение конденсата, что приводит к более слабому убыванию величины  $\langle \bar{q}q \rangle^*$  с увеличением плотности. С другой стороны, вклад от свободных пионов (среднее число которых определяется температурой) имеет противоположный знак, так что значение конденсата в нагретом пионном газе уменьшается по сравнению со значением в свободном пространстве (аналогичная ситуация имеет место в случае ферми - газа нуклонов). Поэтому представляет интерес вопрос о вкладе взаимодействия пионного газа с коррелированными нуклонами. В работе показано, что в рамках киральной динамики этот вклад компенсирует эффект увеличения конденсата обменными пионами. Во втором параграфе четвертой главы, где рассмотрено ограничено предельным случаем нулевой температуры и низкой барионной плотности, получены оценки  $\langle \bar{q}q \rangle^*$  в рамках самосогласованного метода и рассмотрена приближенная связь конденсата с массой векторного мезона при конечной плотности. Рассмотрено также влияние взаимодействия на адронном уровне, учет которого приводит к отклонению от скейлингового поведения для адронной массы. Обсуждается зависимость от параметра скейлинга.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. При исследовании динамики и свойств мезонов (скалярных, псевдоскалярных, векторных и аксиально - векторных) в рамках модели НИЛ при конечной температуре и плотности выяснено:
  - при значениях температуры и химического потенциала, близким к критическим, псевдоскалярные мезоны становятся нестабильными по отношению к распаду на  $\bar{q}q$  - пару, при этом эффективная масса псевдоскалярного мезона испытывает скачкообразное увеличение с последующим резким уменьшением.
  - с увеличением пространственного импульса эффективная масса псевдоскалярного мезона уменьшается.
  - несмотря на качественно реалистичное описание мезонного спектра в свободном пространстве, модель предсказывает большую нефизическую ширину распада  $\rho(a_1) \rightarrow \bar{q}q$ , что является серьезным препятствием для использования модели НИЛ при описании векторных и аксиально - векторных возбуждений в адронной среде.
2. Выполнен методический анализ эффективной константы взаимодействия  $g_{\rho\pi\pi}$  и ширины распада  $W(\rho \rightarrow \pi\pi)$  в среде, показано, что обе эти величины имеют убывающее поведение с повышением температуры и плотности.
3. Исследованы эффекты изоспиновой асимметрии среды, выяснено:
  - при реалистичных значениях изоспинового химического потенциала  $\mu_Q$  эффекты изменения массы, дисперсии и эффективной ширины распада  $\rho$ -мезона слишком слабые для достоверного экспериментального наблюдения.
  - при реалистичных значениях  $\mu_Q$  предсказанное в предыдущих работах сильное увеличение "неравновесного" выхода дилептонов должно быть заметно слабее.

4. Исследован нетривиальный эффект угловой асимметрии дифференциального распределения и влияние температуры и химического потенциала на величину этой асимметрии. Показано, что при реалистичных значениях этих параметров эффект угловой асимметрии достаточно велик и может наблюдаться на эксперименте.
5. Исследовано поведение кваркового конденсата во взаимодействующей пион-нуклонной системе. На основе эффективного кирального Лагранжиана показано, что эффекты взаимодействия термализованной пионной фазы с нуклонами и нуклон-нуклонных корреляций частично компенсируют друг друга, так что основной вклад в изменение значения конденсата при реалистичных температурах и плотностях дает невзаимодействующий пион-нуклонный газ.
6. Рассмотрено влияние скейлингового уменьшения нуклонной массы на величину конденсата. Показано, что учет скейлинга приводит к значительному изменению величины конденсата.
7. Выполнен расчет для отклонения от скейлингового поведения эффективной массы векторного мезона при конечной плотности, рассмотрен возможный механизм этого отклонения. Показано, что отклонение незначительно по сравнению со скейлинговым изменением и сильно зависит от параметра скейлинга.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Т.И. Гуламов, А.И. Титов. *О свойствах мезонов при конечной температуре и плотности в модели Намбу - Йона-Лазинио*. Ядерная Физика **58** (1995) 337-347.
2. T.I. Gulamov, A.I. Titov, and B. Kämpfer. *Neutral  $\rho$  - Meson Properties in an Isospin - Asymmetric Pion Medium*. Ядерная Физика **59** (1996) 727-734.
3. A.I. Titov, T.I. Gulamov, and B. Kämpfer.  *$\rho$  - Meson Self - Energy and Dielectron Emissivity in an Isospin - Asymmetric Pion Medium*. Phys. Rev. D **53** (1996) 3770-3778.
4. T.I. Gulamov, A.I. Titov and B. Kämpfer. *Asymmetry of the Dielectron Production Rate in an Isospin - Asymmetric Pion Medium*. Phys. Lett. B **372** 187 (1996);
5. T.I. Gulamov. *Quark Condensate in the Interacting Pion - Nucleon Medium at Finite Temperature and Baryon Number Density*. JINR Rapid Communication (Краткие сообщения ОИЯИ) **76** (1996) 11-16.
6. Т.И. Гуламов. *Кварковый конденсат и масса нейтрального векторного мезона при конечной барионной плотности*. Препринт ОИЯИ P2-96-399 (Напр. в ж. Ядерная Физика).

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 ноября 1996 года.