

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4-96-30

K-715

На правах рукописи
УДК 539.142

КОСОВ

Даниил Святославович

ТЕРМОПОЛЕВОЙ ПОДХОД
В ТЕОРИИ НАГРЕТЫХ ЯДЕР

Специальность: 01.04.16 — физика атомного 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.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник

А.И. Вдовин

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник

Р.Г. Назмитдинов

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

В.И. Целяев

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета, г. Москва.

Защита диссертации состоится 20 марта 1996 г. на заседании специализированного совета К047.01.01 при Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований по адресу: г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан 14 февраля 1996 г.

Ученый секретарь Совета

доктор физико-математических наук

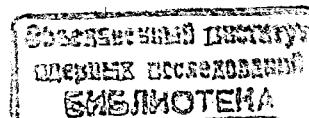
 ДОРОХОВ А.Е.

Общая характеристика работы

Актуальность темы Богатая информация о свойствах атомных ядер при высоких энергиях возбуждения и угловых моментах была получена в последнее время в связи с появлением новых высокоразрешающих детекторов. Серия интересных открытий (гигантский дипольный резонанс в нагретых ядрах, фазовые переходы, супердеформация и многое другое) стимулировала как появление новых теоретических исследований, так и работы по созданию детекторов типа "crystal ball".

Основное препятствие на пути теоретических исследований сильно возбужденных ядерных систем — высокая плотность уровней, которая наблюдается в ядрах уже при энергиях несколько Мэв над ираст-линией. "Квазиконтинуум" уровней делает невозможным проведение реалистических расчётов свойств высоковозбужденных ядер в микроканоническом ансамбле и вынуждает прибегать к статистическому описанию, которое в той или иной мере опирается на методы квантовой теории поля при конечных температурах.

Введение температуры T в квантовую теорию поля исторически произошло в рамках методов функций Грина. Этот подход был инициирован работой Мацубары 1955 года. Основываясь на представлении взаимодействия, Мацубара показал, что вычисление статистической суммы можно проводить теми же самыми методами, что и вычисление S -матрицы в квантовой теории поля, если вместо времени рассматривать некоторую фиктивную мнимую переменную, изменяющуюся в интервале от 0 до i/T . Хотя формализм Мацубары является достаточно мощным для решения ряда задач теории многих тел при конечных температурах, он сильно проигрывает от того, что время не вводится явно как параметр в мацубаровскую функцию Грина. Методы теории многих тел не исчерпываются только функциями Грина. Например, часто случается, что задача сильно упрощается при использовании подходящим образом



подобранного канонического преобразования. Но подобные преобразования трудно включить даже в обычные Гриновские функции при $T = 0$, и ещё более сложно адаптировать канонические преобразования на случай метода статистических функций Грина.

С другой стороны в аксиоматической теории поля показано, что температура может быть введена в теорию невзаимодействующих полей посредством удвоения числа степеней свободы системы. Аксиоматика этого подхода была построена при помощи C^* -алгебр и затем с использованием условия Кубо-Мартини-Швингера как дополнительной аксиомы была распространена на случай взаимодействующих полей. Данный подход из-за своей сложной математической структуры не привлекается, как правило, для решения практических задач и не приводит к той квантовой теории поля при конечных температурах, которая была бы столь же удобной и полезной для решения практических задач, как и обычная теория поля при $T = 0$.

Таким образом, возникла настоятельная необходимость в квантовой теории поля при $T \neq 0$, которая будучи проста в практическом применении, в то же время позволяла бы использовать все методы теории поля для описания погружённых в термостат систем многих частиц. Теория такого типа сформулирована и носит название термополевой динамики (ТПД). ТПД как квантовая теория поля при конечных температурах развивалась и продолжает развиваться усилиями многих авторов. Например, исследование структуры двухточечных функций Грина и введение так называемых тепловых дублетов позволило разработать на систематической основе технику диаграмм Фейнмана при конечной температуре. Завершающим звеном в обосновании ТПД было доказательство эквивалентности аксиоматического подхода, связанного с использованием C^* -алгебры, и термополевой динамики.

Окончательный вариант ТПД имеет ряд важных преимуществ по сравнению с предыдущими подходами, а именно, ТПД как рабочие методы

использует не только технику гриновских функций и диаграмм Фейнмана, но также ещё операторные преобразования и концепцию зависящего от температуры вакуума. В последнее время ТПД успешно применялась для решения ряда задач в теории конденсированных сред и в физике высоких энергий. На этом фоне выглядит естественным желание использовать методы ТПД для построения теории сильновозбуждённых атомных ядер.

Цель работы состоит в разработке основанного на термополевой динамике последовательного теоретического подхода для описания коллективного движения в нагретых ядрах.

Научная новизна и практическая ценность

- Методы ТПД использованы для последовательного построения теории нагретых атомных ядер. Впервые явным образом построен тепловой гамильтониан квазичастично-фононной модели (КФМ) ядра, в котором выделена гармоническая часть и фонон-фононное взаимодействие. Данное разделение позволило впервые непосредственно вычислить матричный элемент взаимодействия между тепловыми фононами и получить уравнения, описывающие фрагментацию однофононных состояний по более сложным конфигурациям в нагретом ядре.
- Возможность записать явным образом волновую функцию компунд-состояния ядра позволила сформулировать перенормированное приближение случайных фаз (ПСФ), которое учитывает фермионную структуру ядерных бозонных операторов.
- Методы ТПД впервые использованы для изучения свойств нагретых ядер в проектированных по определённому квантовому числу статистических ансамблях. Используя соответствующим образом построенный проекционный оператор, получено выражение для среднего значения любого оператора в каноническом ансамбле. Разра-

ботан приближённый метод проектирования по числу частиц, использующий представление теплового вакуума в виде разложения в ряд по собственным волновым функциям оператора числа частиц.

На защиту выдвигаются следующие результаты

1. При помощи методов ТПД построен тепловой ядерный гамильтониан, в котором явно выделена гармоническая часть и члены, ответственные за фонон-фононное взаимодействие. Такое представление теплового гамильтониана позволило нам
 - (a) Получить уравнения ПСФ для нагретых ядер в модели с сепарабельным остаточным взаимодействием в каналах частица – дырка и частица – частица.
 - (b) Вычислить матричный элемент взаимодействия между одно- и двухфононными конфигурациями в нагретых ядрах.
 - (c) Получить уравнение, описывающее фрагментацию однофононых состояний по более сложным конфигурациям.
2. Показано, как методы ТПД можно использовать для изучения свойств ядер в проектированных по определённому квантовому числу статистических ансамблях. С использованием идеи метода Липкина-Ногами разработан метод приближённого проектирования по числу частиц.
3. Сформулировано температурное перенормированное приближение случайной фазы. Решение системы уравнений перенормированного ПСФ при $T \neq 0$ для $SU(2)$ модели показало, что в перенормированном температурном ПСФ нет коллапса нижайшего коллективного состояния при сколь угодно сильном остаточном взаимодействии.

Апробация работы. Результаты диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ и Миланского университета, а также

представлялись и докладывались на Международном совещании "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра" (Петергоф, 17-20 мая, 1994), IV KINR International School on Nuclear Physics, (Ukraine, Kiev, August 29 - September 7, 1994), IV International Conference on Selected Topics in Nuclear Structure (Dubna, July 5-9, 1994), International Workshop on Nuclear Structure at High Temperature (Italy, Trento, February 20 - March 1, 1995), Международном совещании "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра" (Санкт-Петербург, 27-30 июня, 1995), Groningen Conference on Giant Resonances (Netherlands, Groningen, June 28 - July 1, 1995).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано девять работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, трех приложений и заключения. Общий объем диссертации 73 страницы текста, включая рисунок, таблицу и список литературы из 71 наименования.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется предмет и цель диссертации, а также дается краткое описание содержания диссертации.

Первая глава диссертации имеет вводный характер. В ней излагаются приёмы и методы ТПД в свете их применения к задачам ядерной физики. В ТПД влияние термостата на систему учитывается введением нового зависящего от температуры гильбертова пространства состояний системы в два раза большей размерности, чем исходное пространство. Удвоение числа степеней свободы производится при помощи правил так называемой операции "тильда", связывающих операторы в исходном и во вновь введённом ("тильда") пространствах. Темпера-

тура вводится в рассматриваемый формализм с помощью условия теплового состояния как некоторая дополнительная переменная. На примере одноуровневого фермионного осциллятора представлено достаточно общее правило построения при помощи теплового преобразования Боголюбова температурного пространства Фока системы. Этот простой пример проясняет смысл операторов в тильдованном пространстве (например, уничтожение обычной частицы в тепловом вакууме эквивалентно рождению "тильдованной" частицы), и, что более важно, даёт возможность сформулировать приближение среднего поля в ТПД. Метод среднего поля в ТПД основан на проведении двух последовательных унитарных преобразований. Первое преобразование переводит исходный сложный ядерный гамильтониан в гамильтониан некоррелированных квазичастиц, второе преобразование является тепловым преобразованием Боголюбова, смешивающим квазичастицы в обычном и тильдованном пространстве. Явный вид коэффициентов этих двух унитарных преобразований подбирается из условия термодинамического равновесия.

Вторая глава посвящена парным корреляциям сверхпроводящего типа при $T \neq 0$. Для того чтобы показать, как методы ТПД работают при решении реальных ядерных задач получены хорошо известные уравнения теории Бардина-Купера-Шриффера (БКШ) при конечных температурах. Для описания в рамках ТПД сверхтекучего нагретого ядра, вслед за стандартным каноническим преобразованием Боголюбова проведено ещё и тепловое каноническое преобразование от операторов боголюбовских квазичастиц к операторам тепловых квазичастиц. Коэффициенты этих двух последовательных преобразований определены из условия термодинамического равновесия системы при постоянной T , т.е. из условия обращения в 0 вариации большого термодинамического потенциала. В результате получена известная система уравнений теории БКШ.

Различные температурные приближения среднего поля (к которым относится температурное приближение БКШ) очень удобны для изу-

чения статистических свойств нагретых систем. Они представляют собой начальное приближение, и, как правило, являются первым шагом при разработке более сложных и последовательных моделей. Но вычисления в приближении среднего поля проводятся в большом каноническом ансамбле, использование которого, собственно говоря, и позволяет нам определить тепловой вакуум при помощи теплового преобразования Боголюбова. Соответственно, флуктуации числа частиц являются неотъемлемой чертой всех температурных приближений среднего поля, а в теории температурного БКШ, кроме тепловых, велико ещё значение и квантовых флуктуаций числа частиц. Будучи конечными квантовыми системами атомные ядра должны описываться функцией распределения канонического ансамбля. На языке ТПД изучение свойств системы в рамках такого ансамбля означает, что вместо усреднения по волновым функциям из всего гильбертова пространства мы должны работать только с состояниями, которые характеризуются определённым собственным значением n оператора числа частиц N . Для выделения нужных состояний сконструирован проекционный оператор, который "вырезает" из всего гильбертова пространства состояния с заданным числом частиц n :

$$P_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(i\phi(N - n)) d\phi \otimes \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(i\phi(\tilde{N} - n)) d\phi$$

С помощью этого проекционного оператора можно получать средние значения по каноническому ансамблю для любых операторов:

$$\langle Q \rangle_n = \frac{\langle 0(T) | P_n Q P_n | 0(T) \rangle}{\langle 0(T) | P_n | 0(T) \rangle}$$

Однако точное проектирование по числу частиц трудоёмкая задача даже в холодных ядрах, поэтому был развит приближённый метод проектирования. С использованием идеи метода Липкина-Ногами среднее по каноническому ансамблю от некоторого оператора Q представлено в

следующем виде:

$$\langle Q \rangle_n = \langle 0(T) | Q - \sum_{k=1}^{\infty} q_k N^k | 0(T) \rangle + \sum_{k=1}^{\infty} q_k n^k$$

Достоинство этого выражения в том, что, вычислив коэффициенты q_k при помощи предложенного в данной главе способа, мы с любой степенью точности можем найти его правую часть вместо расчёта матричного элемента по неизвестным нам собственным функциям оператора числа частиц. Предложенный способ использован для вычисления проектированной по числу частиц энергии основного состояния в модели одного вырожденного j -уровня. Оказалось, что при небольших T проектирование заметно улучшает результаты приближения температурного БКШ. Однако вследствие того, что наш проекционный метод является по-существу методом проектирования после варьирования, гладкое поведение энергии основного состояния в зависимости от T не воспроизводится.

В третьей главе построен тепловой гамильтониан квазичастично-фононной модели ядра и в рамках температурного приближения случайных фаз исследованы коллективные возбуждения в нагретых ядрах.

В используемой нами версии КФМ гамильтониан модели включает феноменологические средние поля для нейтронов и протонов и взаимодействия в каналах частица – частица и частица – дырка. Первое состоит из протон – протонного и нейтрон – нейтронного монополярного спаривания с постоянным матричным элементом и сепарабельных мультипольных сил (также протон – протонных и нейтрон – нейтронных); второе — из изоскалярных и изовекторных сепарабельных мультипольных сил.

Первый этап на пути построения теплового гамильтониана КФМ состоит в переходе от операторов рождения и уничтожения нуклонов к операторам тепловых квазичастиц, причём энергии и внутренняя структура тепловых квазичастиц определяются при решении уравнений тем-

пературного приближения БКШ. Вид теплового гамильтониана подсказывает структуру операторов, которые могут использоваться как "строительные" блоки для конструирования волновой функции однофононных возбуждённых состояний:

$$Q_{\lambda\mu}^{\pm} = \frac{1}{2} \sum_{jj'} \left(\psi_{jj'}^{\lambda_i} [\beta_{jm}^{\pm} \beta_{j'm'}^{\pm}]_{\lambda\mu} + \tilde{\psi}_{jj'}^{\lambda_i} [\tilde{\beta}_{jm}^{\pm} \tilde{\beta}_{j'm'}^{\pm}]_{\lambda\mu} + 2\eta_{jj'}^{\lambda_i} [\beta_{jm}^{\pm} \tilde{\beta}_{j'm'}^{\pm}]_{\lambda\mu} + (-)^{\lambda-\mu} \phi_{jj'}^{\lambda_i} [\beta_{jm} \beta_{j'm'}]_{\lambda-\mu} + (-)^{\lambda-\mu} \tilde{\phi}_{jj'}^{\lambda_i} [\tilde{\beta}_{jm} \tilde{\beta}_{j'm'}]_{\lambda-\mu} + 2(-)^{\lambda-\mu} \zeta_{jj'}^{\lambda_i} [\beta_{jm} \tilde{\beta}_{j'm'}]_{\lambda-\mu} \right)$$

В квазибозонном приближении решены уравнения движения для фононных операторов и получены секулярное уравнение для энергий однофононных состояний ω и выражения для фононных амплитуд. В данной главе показано также, как в рамках термополевого подхода вычислять вероятности переходов в нагретых ядрах и получена формула, позволяющая рассчитать вероятность возбуждения однофононного состояния, построенного на компаунд-состоянии (вакууме для тепловых фононов).

В четвёртой главе рассмотрены пути выхода за рамки стандартного ПСФ. Проведённое в предыдущих главах обобщение на случай $T \neq 0$ уравнений БКШ и ПСФ продемонстрировало в достаточной мере эффективность методов ТПД, и, что самое главное, дало нам в руки последовательный способ построения теплового гамильтониана КФМ в следующем приближении, уже учитывающем взаимодействие элементарных мод возбуждений, т.е. в приближении выходящем за рамки ПСФ. Диагонализовав тепловой гамильтониан на пространстве волновых функций, содержащих одно- и двухфононные компоненты, мы получили явное выражение для матричного элемента фонон-фононного взаимодействия и уравнение для спектра нагретого ядра в этом приближении. Т.е. была получена система уравнений для расчёта затухания гигантского резонанса в нагретом ядре за счёт фрагментации однофононных конфигураций по более сложным состояниям.

Учёт ангармонических членов далеко не единственный эффект, связанный с выходом за рамки стандартного ПСФ. Так, одно из основных предположений приближения случайной фазы состоит в том, что число частично-дырочных (или квазичастичных) возбуждений в ПСФ вакууме пренебрежимо мало, и это позволяет считать бифермионные операторы бозонными. Довольно давно для холодных ядер был предложен подход, выходящий за рамки указанного приближения и названный перенормированным ПСФ. Перенормированное ПСФ до известной степени исправляет нарушение принципа Паули в волновой функции ПСФ-вакуума, вносимое квазибозонным приближением.

Корреляции в основном состоянии ядра, возникающие в перенормированном ПСФ, могут оказать сильное влияние на ядерные возбуждения. На первый взгляд они должны быть ещё существеннее для коллективных возбуждений в горячих ядрах, где основным состоянием ядра является компаунд-состояние. С целью проверить применимость ПСФ для описания нагретых ядер и нарушение принципа Паули в конечных нагретых системах построено перенормированное ПСФ для случая $T \neq 0$. Полученная система уравнений перенормированного температурного ПСФ решена для двухуровневой $SU(2)$ модели. В этой модели система уравнений температурного перенормированного ПСФ сводится к алгебраическому уравнению четвертого порядка для абсолютной величины энергии однофононных состояний ω :

$$\omega^4 + \{[V(n_- - n_+)(N + 1)]^2 - \varepsilon^2\} \omega^2 - 2[V(n_- - n_+)]^2 (N + 1) \varepsilon \omega + [V(n_- - n_+) \varepsilon]^2 = 0$$

Решение этого уравнения показало, что в перенормированном температурном ПСФ при возрастании константы остаточного взаимодействия не происходит коллапс нижайшего коллективного состояния.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации, которые представляются к защите.

В Приложения А, Б и В вынесены громоздкие формулы, связанные с расчетом однофононных возбуждений в нагретых ядрах, а также приведены сложные функции, входящие в выражение для матричного элемента взаимодействия одно- и двух-фононных конфигураций.

Результаты диссертации опубликованы в работах

1. Kosov D.S., A.I.Vdovin,
The TFD treatment of the quasiparticle - phonon interaction at finite temperature
Modern Physics Letters, A9 (1994), p.1735-1743.
2. Вдовин А.И., Косов Д.С.,
Термополевое преобразование в квазичастично - фононной модели ядра
Известия РАН (сер. физическая), т.58, N.11 (1994), с.41-47.
3. Vdovin A.I., Kosov D.S.,
Extension of the QPM to $T \neq 0$ based on the formalism of the thermo field dynamics
Proceedings of IV KINR International School on Nuclear Physics (Kiev, Ukraine, August 29- September 7, 1994) ed. by F.A. Ivanyuk, p.211-220.
4. Вдовин А.И., Косов Д.С.,
Однофононные состояния в нагретых ядрах
ЯФ, т.58 (1995), с.829-836.
5. Косов Д.С., А.И. Вдовин,
Приближенное проектирование по числу частиц в нагретых ядрах
Изв. РАН (сер. физическая), т.60, N.1 (1996), с.94-100.
6. Вдовин А.И., Косов Д.С.,
Квазичастично-фононная модель для нагретых ядер
В сб. "Современные проблемы ядерной физики", Д4-95-308, Дубна (1995), с.253-264.

7. Kosov D.S., A.I.Vdovin,
Approximate number projection at finite temperature
Preprint JINR E4-95-394 (1995), Dubna (Z.Phys.A in press).
8. Avdeenkov A.V., Kosov D.S., A.I.Vdovin,
Renormalized RPA at finite temperature
Preprint JINR E4-95-539 (1995), Dubna (Subm. to Mod.Phys.Lett.A).
9. Kosov D.S., Nawrocka W.,
Self-consistent RPA in hot finite fermion system
Preprint JINR E4-96-7 (1996), Dubna (Subm. to Phys.Rev.E).

Рукопись поступила в издательский отдел
5 декабря 1995 года