

4-2001-56

На правах рукописи
УДК 539.142

С- 28

СЕВЕРЮХИН
Алексей Павлович

**КОРРЕЛЯЦИИ В ОСНОВНОМ СОСТОЯНИИ
И ВИБРАЦИОННЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В ЯДРАХ**

Специальность: 01.04.16 — физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
им. Н.Н.Боголюбова Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Воронов В.В.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Пашкевич В.В.
доктор физико-математических наук
Шубин Ю.Н.

Ведущая организация: Московский государственный
инженерно-физический институт (технический университет)

Защита состоится *16 мая* 2001 г. в *16⁰⁰* часов на заседании
диссертационного совета К 720.001.01 в Лаборатории теоретической
физики им. Н.Н.Боголюбова Объединенного института ядерных
исследований, г. Дубна, Московской области

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Автореферат разослан *12 апреля* 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

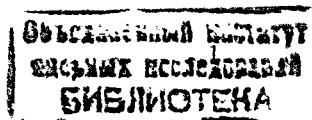


Федотов С.И.

Общая характеристика работы.

Актуальность темы. Хорошо известны успехи микроскопических подходов в изучении вибрационных возбуждений в атомных ядрах, трактующие ядро как конечную систему взаимодействующих нуклонов и широко использующие методы теории многих тел. Одним из основных подходов при описании вибрационных возбуждений является приближение случайных фаз (ПСФ). В этом подходе волновые функции однофононных состояний являются суперпозицией двухквaziчастичных конфигураций. Рассматривая только однофононные возбуждения, удается получить достаточно точное и физически ясное описание низжайших и высоколежащих, типа гигантских резонансов, коллективных вибрационных состояний в четно-четных ядрах. Однако, ангармоничность спектра низколежащих вибрационных состояний и проблема описания ядерных характеристик, связанных с фрагментацией однофононных состояний, таких, как вероятности электромагнитных переходов между низколежащими вибрационными состояниями, сечения фотопоглощения, ширины гигантских резонансов, стимулировали развитие теоретических подходов в 70-80 годы. Например, в различных реализациях метода бозонных разложений, квазичастично-фононной модели (КФМ) и теории ядерных полей эта проблема была решена путем учета части остаточных взаимодействий, отброшенных при нахождении однофононных состояний. Отметим также основанные на теории конечных ферми-систем подходы: модель учета конфигураций $1p1h \otimes$ фонон и многофононный вариант метода связанных каналов.

В последние годы новые экспериментальные данные о двойных гигантских резонансах, гигантском дипольном резонансе в нагретых ядрах, супердеформации в ядрах и изучение нуклидов, удаленных от зоны β -стабильности, способствовали дальнейшему развитию как теоретиче-



ских, так и экспериментальных исследований. Низколежащие вибрационные состояния и двойные гигантские дипольные резонансы, наблюдаемые при столкновениях релятивистских тяжелых ионов, обеспечивают хороший тест для изучения отклонений от гармонической картины спектра возбужденных состояний в атомных ядрах. Появление нового поколения германиевых детекторов позволило расширить знание о спектре вибрационных состояний. При этом ряд вибрационных состояний интерпретируется в экспериментальных работах как двух- и даже как трехфононные состояния. Несмотря на то, что в рамках ПСФ удается описать энергии и вероятности электромагнитных переходов вибрационных состояний, в этом приближении нельзя воспроизвести некоторые дифференциальные характеристики, например, поведение зарядовой переходной плотности внутри ядра. С другой стороны, использование пучков радиоактивных ядер позволяет получать и исследовать нейтроноизбыточные и протоноизбыточные ядра, удаленные от зоны β - стабильности. Большинство этих ядер относится к переходной области (от сферической формы к деформированной), где ПСФ не применимо.

Таким образом, возникла необходимость в развитии теоретических методов, позволяющих выйти за рамки применимости ПСФ. При этом хотелось бы использовать опыт, накопленный в КФМ. В КФМ, например, хорошо описываются характеристики, связанные с фрагментацией однофононных состояний. Причиной фрагментации является связь простых конфигураций со сложными. В качестве базиса используются однофононные состояния, найденные в ПСФ. Принимаются во внимание поправки из-за учета принципа Паули в сложных конфигурациях, которые приводят к ангармоническим сдвигам энергий и изменению структуры возбужденных состояний. При исследовании четно-четных ядер вполне естественно обобщить основные уравнения КФМ на случай, ко-

гда можно выйти за пределы применимости ПСФ.

Цель работы состоит в обобщении квазичастично-фононной модели для изучения вибрационных возбуждений в четно-четных ядрах, когда необходимо выйти за рамки применимости приближения случайных фаз, а также учесть ангармоничность ядерных вибраций.

Научная новизна и практическая ценность

На основе квазичастично-фононной модели представлен подход, позволяющий исследовать фрагментацию однофононных состояний четно-четных сферических ядер для случая, когда необходимо учесть корреляции в основном состоянии вне приближения случайных фаз. Учет этих корреляций позволяет лучше описать энергии, приведенные вероятности электромагнитных переходов и зарядовые переходные плотности низколежащих вибрационных состояний. В качестве примера были исследованы изотопы Zn . Установлено, что корреляции в основном состоянии наиболее важны при изучении физических величин, для вычисления которых существенными являются матричные элементы между одночастичными состояниями около поверхности Ферми.

Представленные теоретические исследования расширяют область применимости КФМ и в дальнейшем могут быть использованы при изучении низколежащих вибрационных состояний в ядрах, где ПСФ не может служить основой для их описания.

На защиту выдвигаются следующие результаты

1. Основные уравнения квазичастично-фононной модели для четно-четных сферических ядер обобщены на случай, позволяющий трактовать корреляции в основном состоянии за рамками применимости приближения случайных фаз. Рассмотрено влияние этих корреляций

на спаривание и связь между одно- и двухфононными конфигурациями. При этом в остаточном взаимодействии учтены каналы частица-дырка и частица-частица. При получении уравнений были приняты во внимание поправки, возникающие из-за учета принципа Паули и приводящие к ангармоническим сдвигам энергий двухфононных конфигураций. Показано, что выведенная система уравнений содержит как частный случай уравнения модели, полученные ранее. Найдено соответствие между ангармоническими сдвигами энергий двухфононных конфигураций в КФМ и теории ядерных полей.

2. Установлено, что энергии, приведенные вероятности электрических переходов и зарядовые переходные плотности нижайших вибрационных состояний в изотопах Zn описываются лучше в обобщенной КФМ, если учесть двухфононные компоненты в волновых функциях.

3. Исследование роли трехфононных компонент волновых функций низколежащих неротационных состояний в четно-четных деформированных ядрах области редких земель показало, что трехфононные конфигурации лежат выше 5 МэВ, а вклад трехфононных компонент в нормировку мал.

Апробация работы. Результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, а также на 46 (Москва, 18-21 июня 1996г.) и 49 (Дубна, 21-24 апреля 1999г.) Международных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре ядра, 6 International Spring Seminar on Nuclear Physics "Highlights of modern nuclear structure" (Италия, 18-22 мая 1998г.), 8 Международном семинаре по взаимодействию нейтронов с ядрами "Нейтронная спектроскопия, структура ядра и другие вопросы по данной тематике" (Дубна, 17-20 мая 2000г.), Научной сессии МИФИ-2001 (Москва, 22-26 января 2001г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано шесть работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, четырех приложений и заключения. Общий объем диссертации - 96 страниц текста, включая 13 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 97 наименований.

Содержание работы

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

Первая глава, в основном, является вводной. Хорошо известно, что в стандартном ПСФ определенным образом учитываются корреляции в основном состоянии. При этом основным условием применимости этого приближения является то, что среднее число квазичастиц в основном состоянии пренебрежимо мало. ПСФ нарушает принцип Паули и начиная с работы (К. Нага, 1964) было сделано много попыток его улучшения. В этой главе изложена одна из таких попыток - расширенное ПСФ. Часть корреляций в основном состоянии, пренебрегаемая в ПСФ, учитывается в этом подходе. Волновые функции однофононных состояний являются суперпозицией двухквазичастичных конфигураций, также как в стандартном ПСФ. Развитие подхода идет по пути более последовательного учета принципа Паули в однофононных состояниях. В расширенном ПСФ числом квазичастиц в основном состоянии не пренебрегают, что приводит к появлению системы нелинейных уравнений. Эту систему уравнений можно получить в различных подходах, например, используя метод уравнений движения (D.J.Rowe, 1968) или вариационный принцип (Р.В.Джолос, В.Навроцка, 1971). В первом параграфе представлена общая схема расчетов характеристик

однофоновных состояний, использующая метод уравнений движения. Гамильтониан КФМ приведен во втором параграфе. Необходимо отметить, что в остаточном взаимодействии модельного гамильтониана одновременно учтены каналы частица-дырка и частица-частица. В третьем параграфе продемонстрировано, что в рамках КФМ система нелинейных уравнений для нахождения однофоновных состояний существенно упрощается. При этом было использовано то, что в модельном гамильтониане взаимодействие, приводящее к спариванию, имеет постоянный матричный элемент, а остаточные силы представлены в сепарабельном виде. Таким образом, гамильтониан модели диагонализирован в пространстве однофоновных состояний. В четвертом параграфе на примере простой модели продемонстрировано, что учет канала частица-частица приводит к небольшому ослаблению роли корреляций в основном состоянии.

Во второй главе исследованы эффекты ангармоничности вибраций в четно-четных ядрах. В первом параграфе основные уравнения КФМ для сферических ядер обобщены на случай, когда в качестве базиса использованы однофоновные состояния расширенного ПСФ. Волновые функции возбужденных состояний представлены в виде суперпозиции одно- и двухфоновных конфигураций. Путем диагонализации модельного гамильтониана получена система линейных уравнений для нахождения коэффициентов волновых функций и энергий возбужденных состояний. Часть остаточных взаимодействий, отброшенных при определении структуры и энергий однофоновных состояний, ответственна за появление связи между одно- и двухфоновными компонентами волновых функций. При вычислении матричных элементов этой системы уравнений учтены поправки, обусловленные фермионной структурой фононных операторов. Заметим, что эти поправки найдены для случая, когда необходимо выйти за рамки ПСФ. Учет принципа Паули

и связь между одно- и двухфоновными компонентами приводят к появлению ангармонических сдвигов энергий двухфоновных конфигураций, которые изменяют энергии и структуру возбужденных состояний. Таким образом, выведена система уравнений для описания фрагментации однофоновных состояний, полученных за рамками применимости ПСФ. Эта система содержит как частный случай уравнения обычной КФМ. Во втором параграфе найдено соответствие между ангармоническими сдвигами энергий двухфоновных конфигураций в КФМ и теории ядерных полей. Учет трехфоновных компонент в волновых функциях также влияет на сдвиги энергий двухфоновных конфигураций. Решению этой проблемы при описании низколежащих (до энергий 4 МэВ) неротационных состояний в деформированных ядрах области редких земель посвящен третий параграф. Связь между двух- и трехфоновными компонентами приводит к уменьшению энергий двухфоновных состояний. Показано, что трехфоновные конфигурации лежат выше 5 МэВ, а вклад трехфоновных компонент волновой функции в нормировку мал. Однако, в ^{168}Er их учет оказывается весьма существенным при расчете вероятностей электрических переходов и заметно улучшает согласие с экспериментальными данными.

В третьей главе обобщенная КФМ применена для описания низколежащих вибрационных состояний в изотопах Zn . Исследовано, как влияет учет корреляций в основном состоянии вне рамок применимости ПСФ на спаривание и матричные элементы взаимодействия между одно- и двухфоновными компонентами волновой функции. Учет корреляций в основном состоянии при нахождении одноквазичастичных энергий и коэффициентов канонического преобразования Боголюбова гарантирует сохранение числа частиц в среднем по основному состоянию, а при пренебрежении этими корреляциями отклонение от точного числа частиц составляет более 3%. Отметим еще одну особенность рас-

четов. Канал частица-частица слабо изменяет результаты. Основной вклад дает изоскалярное остаточное взаимодействие в канале частица-дырка. Константы этих сил для различных мультипольностей фиксировались так, чтобы с разумной точностью описать величину приведенной вероятности электрического перехода из основного в первое возбужденное состояние данной мультипольности. В результате, при расчетах в рамках расширенного ПСФ квадрупольная константа имеет значение большее, чем в критической точке в ПСФ, где энергия возбужденного состояния равна нулю. Заметим, что в расширенном ПСФ критической точки нет.

Показано, что энергии и приведенные вероятности электрических переходов описываются лучше в обобщенной КФМ, если учесть двухфононные компоненты в волновых функциях. Также были исследованы зарядовые переходные плотности низколежащих состояний. Сравнение рассчитанных зарядовых переходных плотностей с экспериментальными данными обеспечивает очень чувствительный тест для моделей ядра. Отметим, что теоретические расчеты в подходе Хартри-Фока и в рамках ПСФ воспроизводят только качественно поведение зарядовых переходных плотностей внутри ядра. В частности, теория не дает правильного описания внутреннего пика зарядовой переходной плотности из основного состояния в состояние 2_1^+ в ^{68}Zn . Показано, что в рамках расширенного ПСФ блокирование протонной двухквартичной конфигурации $(2p_{3/2}, 2p_{3/2})$, а также учет двухфононных конфигураций приводят к частичному подавлению этого пика. Уменьшение этого внутреннего пика нельзя воспроизвести простым изменением параметров остаточного взаимодействия модели при правильном описании энергий и вероятностей переходов.

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

В приложении А приведены коэффициенты гамильтониана КФМ, записанного в терминах операторов квазичастиц и фононов.

В приложении Б представлен явный вид коэффициентов, возникающих при вычислении двойных коммутаторов операторов фононов.

В приложение В вынесены функции, входящие в выражение для матричных элементов взаимодействия между одно- и двухфононными конфигурациями.

В приложении Г собраны громоздкие формулы, необходимые при описании неротационных состояний с учетом трехфононных компонент волновой функции в четно-четных деформированных ядрах.

Результаты диссертации опубликованы в работах

1. Северюхин А.П., Сушков А.В.,
О трехфононных компонентах волновой функции четно-четного деформированного ядра
Известия РАН, сер.физ., т.61, N4 (1997), с.728-733.
2. Karadjov D., Grinberg M., Voronov V.V., Severyukhin A.P.,
Catara F.,
Effects of the ground state correlations on the properties of vibrational states
Proceedings of the 6th Intern. Spring Seminar on Nuclear Physics
"Highlights of modern nuclear structure" (S. Agata sui due Golfi, Italy, 18-22 May 1998) edited by A. Covello, p.311-318.
3. Karadjov D., Voronov V.V., Catara F., Grinberg M.,
Severyukhin A.P.,
Effects of the ground state correlations on the structure of vibrational states
Nucl. Phys., v.A643 (1998), p.259-271.

4. Voronov V.V., Karadjov D., Catara F., Severyukhin A.P.,
Ground state correlations beyond Random Phase Approximation and
collective excitations
ЭЧАЯ, т.31, N4 (2000), с.905–939
5. Северюхин А.П., Воронов В.В., Караджов Д.,
Влияние канала частица-частица на корреляции в основном состо-
янии сферических ядер
Известия РАН, сер.физ., т.64, N11 (2000), с.2240–2248
6. Severyukhin A.P., Voronov V.V., Karadjov D.,
Ground state correlations and anharmonicity of vibrations
Сообщение ОИЯИ, Е4-2000-257, Дубна (2000)

Рукопись поступила в издательский отдел
4 апреля 2001 года.