ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

4-90-469

ПЕДРОСА МАРТИНЕС РАФАЕЛЬ

УДК 539.142

МЕТОД БОЗОННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФЕРМИОННЫХ ОПЕРАТОРОВ И МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ БОЗОННОГО ГАМИЛЬТОНИАНА ЯДРА

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Дубна 1990

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:

доктор физико- математических наук — Джолос Р.В.

кандидат физико- математических наук, доцент — Иванова С.П.

Официальные оппоненты:

доктор физико- математических наук — Смирнов Ю.Ф.

доктор физико- математических наук — Воронов В.В.

Ведущее научно- исследовательское учреждение:

Институт Атомной Энергии им. И.В. Курчатова

Автореферат разослан " " ____________ 1990 года.

Защита диссертации состоится " " ____________ 1990 года. на заседании специализированного Ученого совета К047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета — Дорохов А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы: В последние годы в результате весьма успешного описания свойств коллективных состояний средних и тяжелых ядер очень популярной стала Модель Взаимодействующих Бозонов (МВБ). Исходная физическая концепция МВБ- та же, что и в коллективной модели Бора и Моттельсона: выделяется только квадрупольная степень свободы. Первый вариант модели (МВБ-1) был введен чисто феноменологически: постулировалось, что гамильтониан- это самый общий инвариант, построенный из генераторов SU(6)-алгебры. Гамильтониан модели строится с помощью операторов скалярного s- бозона и квадрупольного d- бозона.

Популярность МВБ в значительной степени объясняется двумя причинами: во- первых, возможностью описания на единой основе имеющих место существенных изменений структуры коллективных состояний ядер в зависимости от числа нуклонов путем плавного изменения параметров модели, и, во- вторых, простотой применения.

В рамках МВБ проведены расчеты для многих ядер в широкой области массовых чисел и продемонстрированы возможности феноменологического подхода для описания коллективных состояний.

Вместе с тем выполненные расчеты позволили обнаружить расхождения с результатами экспериментов. В некоторых случаях это связано с исходными ограничениями модели. Стало ясно, что необходимо учитывать другие коллективные степени свободы (октупольные и гексадекапольные). Оказываются важными также неколлективные (двухквазичастичные) степени свободы.

В то же время включение в рассмотрение этих дополнительных степеней свободы на феноменологическом уровне ведет к резкому увеличению числа свободных параметров, что значительно обесценивает модель. Поэтому такая задача должна решаться в рамках микроскопического подхода.

Для микроскопического обоснования МВБ и других феноменологических моделей широко используется метод бозонных представлений фермионных операторов. Этот метод представляет собой общую формулировку задачи многих тел для систем, состоящих из четного числа фермионов. В этом методе билинейные комбинации фермионных операторов выражаются через идеальные операторы бозонов. Вектора состояний, построенные из идеальных бозонов, образуют пространство идеальных бозонных состояний, а вектора, которые ставятся в соответствие фермионным состояниям, образуют физическое подпространство в полном бозонном пространстве.

Методы бозонных разложений не давали бы преимуществ, если бы все введенные операторы бозонов были важны при описании низколежащих состояний. Основная идея всех бозонных разложений состоит в ограничении несколькими коллективными бозонами в физическом бозонном подпространстве.

Следовательно, важной задачей при работе с бозонными представлениями является идентификация и устранение нефизических компонент в полном бозонном пространстве. Поэтому оператор проектирования полного бозонного пространства на физическое подпространство играет важную роль в бозонных разложениях.

Основные цели работы: Исследование микроскопического подхода к построению бозонного гамильтониана ядра при помощи метода бозонного представления фермионных операторов. Исследование общих свойств оператора проектирования полного фермионного пространства на физическое подпространство. Исследование возможности включения других степеней свободы в МВБ на микроскопическом уровне. Исследование сдвига двухфононных состояний в деформированных ядрах, обусловленного влиянием принципа Паули.

Научная новизна и практическая ценность: В диссертации исследуются общие свойства оператора проектирования на физическое подпространство полного бозонного пространства. На основе этих свойств предложен экспоненциальный вид

оператора проектирования, который может быть использован в приближенных расчетах, и новая форма бозонных представлений фермионных операторов, объединяющая и обобщающая существующие бозонные представления.

Получен бозонный гамильтониан ядра, обобщающий гамильтониан МВБ-1 двумя разными способами. Первый- с использованием приближенной трактовки обобщенного бозонного представления Холстейна- Примакова и второй- с использованием экспоненциального вида оператора проектирования. Найден способ включения других степеней свободы (коллективных и двухквазичастичных) в гамильтониане МВБ-1 на микроскопическом уровне.

На основе метода бозонных разложений в деформированном базисе найдено выражение для сдвига энергии двухфононного полюса. С точностью до главных членов оно совпадает со сдвигом, рассчитанным с RPA фононами при строгом учете принципа Паули.

Апробация работы: Результаты, представляемые в диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, на XXXVIII (Баку, 1988), XXXIX (Ташкент, 1989) и XL (Ленинград, 1990) Всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, на совещании по методам симметрии (Обнинск, 1989), на международной конференции по избранным вопросам структуры ядра (Дубна, 1989), в школе по ядерной физике (Варна, 1989).

Публикации: По материалам диссертации опубликованно 7 работ.

Объем работы: Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Она содержит 113 страниц машинописного текста, 7 рисунков, 3 таблицы и библиографический список из 112 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Введение содержит краткое изложение постановки физической задачи и дает обоснование актуальности и важности исследуемых проблем.

В первой главе исследуется приближенное применение обобщенного представления Холстейна- Примакова для микроскопического обоснования МВБ. Первые два параграфа являются вводными.

В §1 сформулированы основные положения метода бозонных представлений фермионных операторов Холстейна- Примакова и Дайсона.

В §2 сформулированы основные положения приближения Тамма- Данкова, которые используются в диссертации.

В §3 предложена процедура приближенного расчета матричных элементов оператора $\sqrt{1-\hat{\rho}}$, который присутствует в бозонном представлении фермионных операторов Холстейна- Примакова. Она состоит в том, что в операторе

$$\hat{\rho}_{st}=\sum_{u} b^{+}_{tu} b_{su}$$

сохраняется только монопольная часть, которая диагональна как по одночастичным индексам, так и в SU(5)- базисе. В этом приближении разложение оператора $\sqrt{1-\hat{\rho}}$ в бесконечный ряд по степеням оператора $\hat{\rho}$ легко суммируется и зависит только от числа бозонов "n". Сравнение значений матричных элементов полученного оператора и оператора $\sqrt{1-\hat{n}/N_{max}}$ в МВБ-1 для ^{110}Pd и ^{114}Cd показывает, что при соответствующем выборе N_{max} они близки друг к другу. Получен квадрупольный коллективный гамильтониан, имеющий структуру гамильтониана МВБ-1.

В §4 исследуется обоснованность процедуры, предложенной в §3. Диагональные в SU(5)- базисе и по одночастичным индексам части оператора $\hat{\rho}^{n}$ $(n \geq 2)$ не сводятся к соответствующим степеням монопольной части оператора $\hat{\rho}$. В

работе учитывается точно монопольная часть оператора $\hat{\rho}^{2}$. Тем самым принята во внимание зависимость матричных элементов $\hat{\rho}^{2}$ не только от числа бозонов, но и от углового момента и сеньорити. Сравнение численных значений матричных элементов для оператора $\sqrt{1-\hat{\rho}}$ в данном приближении со значениями, полученными в §3, показывает, что при значениях числа бозонов n, меньших максимально возможного, можно говорить о сходимости результатов. Показано, как можно учитывать точно монопольную часть $\hat{\rho}^{n}$ $(n = 1, 2, 3, 4)$.

Все результаты получены в приближении, когда оператор проектирования на физическое подпространство полного бозонного пространства заменяется единицей.

В §5 показано, как можно, используя результаты предыдущих параграфов, включить в рассмотрение другие коллективные и неколлективные степени свободы.

Во второй главе исследуется оператор проектирования полного бозонного пространства на физическое подпространство в бозонных разложениях.

В §1 вводится оператор $\hat{A}$, удовлетворяющий следующему соотношению

$$\exp(-\hat{A})\ b^{+}_{st} = \left\{b^{+}_{st} - [\hat{F}, b^{+}_{st}]\right\} \exp(-\hat{A}),$$

где $$\hat{F} = \frac{1}{4} \sum_{stpq} b^{+}_{st}\ b^{+}_{pq}\ b_{sp}\ b_{tq}.$$

Показано, что оператор проектирования в этом случае может быть представлен следующим образом

$$\hat{P} = \frac{1}{(\hat{N}-1)!!} \exp(-\hat{A}).$$

В результате показано, что оператор проектирования $\hat{P}_{n}$, действующий на бозонное подпространство с определенным числом бозонов "n" содержит члены в виде произведения 2n и 2(n-1) операторов бозонов. В таком виде его очень трудно использовать. Однако получено рекуррентное соотношение для вычисления матричных элементов оператора проектирования. Это рекуррентное соотношение может быть использовано в приближенном рассмотрении, ограничивающимся коллективным подпространством.

В §2 показано, как может быть построен оператор $\hat{A}$ в виде ряда по операторам G_n, удовлетворяющим следующим коммутационным соотношениям:

$$[\hat{G}_n , b^+_{st}] = (b^+ \hat{\rho}^n)_{st} .$$

Получены выражения для G_1, G_2, G_3 и G_4.

В §3 на основе свойств оператора проектирования получена новая форма бозонных представлений фермионных операторов. С практической точки зрения эта новая форма не приводит к существенным упрощениям. Однако, она интересна тем, что объединяет и обобщает предыдущие бозонные представления.

В третьей главе на основе формализма изложенного во второй главе, исследуется бозонное представление фермионного гамильтониана в коллективном квадрупольном бозонном подпространстве.

В §1 устанавливается соответствие матрицы нормы фермионных состояний с матричными элементами оператора $\exp(-\hat{A})$ в бозонном квадрупольном коллективном пространстве:

$${}_F\langle n'v'x'JIM|nvxIM\rangle_F = {}_B(n'v'x'IM|\exp(-\hat{A})|nvxIM)_B .$$

В этом случае бозонный образ оператора Тамма- Данкова записывается в следующем виде:

$$Q^+_\mu \longrightarrow \exp(-\tfrac{1}{2}\hat{A})\ d^+_\mu\ \exp(\tfrac{1}{2}\hat{A}).$$

Получено рекуррентное соотношение для вычисления матрицы нормы. Матричные элементы оператора $\exp(-\hat{A})$ в общем случае зависят от всех квантовых чисел SU(5)- базиса. В частном случае, когда $C_0=C_2=C_4$, где

$$C_L = 50 \sum_{rstu} \begin{Bmatrix} j_t & j_u & 2 \\ j_r & j_s & 2 \\ 2 & 2 & L \end{Bmatrix} \Psi_{sr} \Psi_{rt} \Psi_{su} \Psi_{ut} ,$$

полученное бозонное представление квадрупольного коллективного оператора Тамма- Данкова приводит фермионный гамильтониан к тому виду, который мы имеем в МВБ-1 с SU(6) симметрией.

В §2 получено бозонное представление частично-дырочного оператора.

В §3 на основе бозонного представления квадрупольных коллективных фермионных состояний найден бозонный образ фермионного гамильтониана. Полученный гамильтониан содержит члены более общего вида, чем в МВБ-1. В них присутствуют операторы $\exp(-\frac{1}{2}\hat{A})$ и $\exp(\frac{1}{2}\hat{A})$, которые учитывают многочастичные эффекты. Гамильтониан МВБ-1 получается в предельном случае. Исследуются отличия между полученным бозонным гамильтонианом, который содержит члены, обобщающие обычную SU(6)- симметрию и гамильтонианом МВБ. Результаты расчета энергий низколежащих состояний показывают, что отклонения от результатов МВБ несущественны и могут быть воспроизведены при малых изменениях феноменологических параметров.

В четвертой главе предложен метод, с помощью которого в коллективный квадрупольный гамильтониан можно включать новые степени свободы, как коллективные, так и неколлективные, описывающие двухквазичастичные возбуждения. Метод в своей основе является микроскопическим и поэтому позволяет рассчитывать значения тех новых констант в гамильтониане, которые характеризуют включенные в него дополнительные степени свободы и их связь с коллективными квадрупольными переменными. В качестве примера рассмотрено смешивание состояний основной квазиротационной полосы и полосы, построенной на двухквазичастичном состоянии четно- четных изотопов Kr, в которых пересечение полос происходит при сравнительно небольших спинах.

В §1 определяется пространство состояний, включающее состояния SU(5)- базиса |nvxIM) и двухквазичастичные состояния:

$$|nvxJ,l:IM) = \sum_{M'm} (JM'lm|IM)\ b^{+}_{lm}(jj)\,|nvxJM').$$

В этом пространстве состояний получено рекуррентное соотношение для вычисления матрицы нормы в предположении, что она зависит только от числа квадрупольных и двухквазичастичных бозонов.

В §2 построен бозонный гамильтониан ядра в следующем виде:

$$\hat{H} = \hat{H}_B + \hat{H}_F + \hat{H}_{BF} ,$$

где $\hat{H}_B$- квадрупольный коллективный бозонный гамильтониан МВБ-1, $\hat{H}_F$-гамильтониан, включающий только двухквазичастичные переменные и $\hat{H}_{BF}$- гамильтониан описывающий связь коллективных и двухквазичастичных степеней свободы. Параметры квадрупольного коллективного гамильтониана МВБ-1 определяются феноменологически, а все остальные константы рассчитываются микроскопически.

В §3 приведены результаты расчета спектра изотопов Kr с использованием полученного гамильтониана. На рис. 1 приведены спектры низколежащих состояний четно-четных изотопов $^{78-84}$Kr, рассчитанные с учетом и без учета двухквазичастичных возбуждений. Для сравнения показаны экспериментальные спектры. Из рисунка видно, что учет двухквазичастичных конфигураций сказывается в основном на энергиях состояний с большими спинами: 6^+_2, 8^+_1 и 8^+_2. В изотопах $^{82-84}$Kr учет двухквазичастичных конфигураций позволяет существенно улучшить описание экспериментальных данных. Без такого учета невозможно объяснить нарушение регулярного хода энергий состояний основной квазиротационной полосы в этих ядрах.

В пятой главе на основе метода бозонных разложений в деформированном базисе найдено выражение гамильтониана фермионной системы через операторы идеальных фононов с точностью до членов четвертого порядка.

В §1 приведены фермионный гамильтониан модели, двухквазичастичные и частично- дырочные операторы с определенным знаком проекции углового момента.

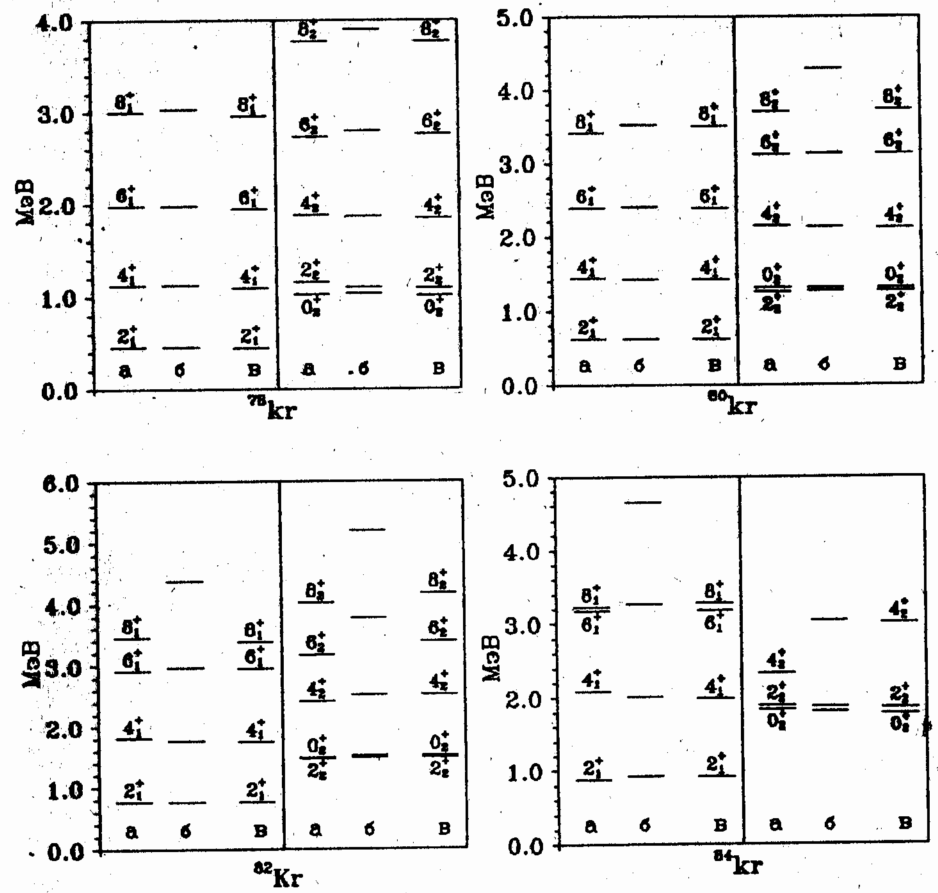

Рис. 1.- Спектры низколежащих состояний четно- четных ядер ^{78}Kr, ^{80}Kr, ^{82}Kr и ^{84}Kr. а.-Эксперимент, б.-рассчитанные по МВБ-1, в.-рассчитанные с учетом двухквазичастичных возбуждений.

В §2 получено приближенное бозонное выражение для билинейной комбинации фермионных операторов, содержащее линейные и кубические члены по операторам идеальных бозонов. Коэффициенты при кубических членах определялись так, чтобы эти выражения удовлетворяли соответствующим коммутационным соотношениям для бифермионных операторов. Показано, как можно получить эти приближенные выражения из обобщенного представления Холстейна- Примакова.

В §3 осуществляется переход к операторам идеальных фононов RPA. Получен бозонный гамильтониан модели. Получено выражение для сдвига энергии двухфононного полюса. С точностью до главных членов оно совпадает со сдвигом, рассчитанным с RPA фононами при строгом учете принципа Паули.

В заключении суммируются основные полученные результаты и формулируются основные выводы данных исследований.

Основные результаты диссертации, выдвигаемые для защиты:

1.- На основе приближенной трактовки обобщенного бозонного представления бифермионных операторов Холстейна- Примакова построен коллективный квадрупольный гамильтониан, имеющий структуру гамильтониана МВБ-1. Однако показано, что факторы, учитывающие влияния принципа Паули в этом гамильтониане, зависят не только от числа бозонов, но и от углового момента и сеньорити. Найден способ включения в рассмотрение неколлективных степеней свободы.

2.- Исследованы некоторые общие свойства оператора проектирования $\hat{P}$ на физическое бозонное подпространство полного бозонного пространства. Получен экспоненциальный вид оператора проектирования и рекуррентное соотношение для вычисления его матричных элементов. Это рекуррентное соотношение может быть использовано в приближенном рассмотрении, ограничивающемся коллективным квадрупольным подпространством. Получена новая форма бозонного представления, интересная тем, что она объединяет и обобщает известные бозонные представления.

3.- На основе формализма изложенного в главе 2, получен бозонный образ фермионного гамильтониана. В этом представлении оператор, который воспроизводит фермионную матрицу нормы, играет очень важную роль. Найдено рекуррентное соотношение для вычисления его матричных элементов в коллективном квадрупольном бозонном подпространстве. Полученный гамильтониан содержит члены более общего вида, чем в МВБ-1. Гамильтониан МВБ-1 получается из него в предельном случае. Результаты расчета энергий низколежащих состояний показывают, что отклонения от результатов МВБ-1 не являются принципальными и могут быть воспроизведены при малых изменениях феноменологических параметров гамильтониана, взятого в форме МВБ-1.

4.- Для описания низколежащих состояний четно- четных ядер исследована возможность построения на микроскопической основе гамильтониана ядра, включающего как коллективные квадрупольные, так и неколлективные степени свободы. Метод сформулирован так, что параметры коллективной части гамильтониана определяются феноменологически, тогда как все остальные константы рассчитываются микроскопически. В качестве примера применения предложенного метода рассчитанны спектры низколежащих состояний четно- четных изотопов $^{78-84}$Kr. Достигнуто вполне удовлетворительное согласие с экспериментом.

5.- В деформированном базисе получено приближенное бозонное представление для билинейной комбинации фермионных операторов, содержащее линейные и кубические члены по операторам идеальных бозонов. Коэффициенты при кубических членах определены так, чтобы эти выражения удовлетворяли соответствующим коммутационным соотношениям для бифермионных операторов. Показано, как можно получить эти приближенные выражения из обобщенного представления Холстейна- Примакова. Получен бозонный гамильтониан в терминах идеальных коллективных фононов в приближении хаотичных фаз вплоть до членов четвертого порядка. Получено выражение для сдвига энергии двухфононного полюса. С точностью до главных членов оно совпадает со сдвигом, рассчитанным с RPA фононами при строгом учете принципа Паули.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. -Джолос Р.В., Иванова С.П., Педроса Р. Исследование структуры 0_2^+ состояний четно- четных изотопов Ge и Se.- Дубна, 1985, сообщения ОИЯИ: Р4-85-452, 9с.
2. -Джолос Р.В., Иванова С.П., Педроса Р., Соловьев В.Г. Изучение сдвига двухфононных полюсов в деформированных ядрах методом бозонных разложений.- ТМФ, 1987, т.70, N.1, с.154-160.
3. -Ivanova S.P., Jolos R.V., Pedrosa R. Approximate treatment of the Holstein- Primakoff- type boson mapping.- J.Phys.G: Nucl.Part.Phys., 1989, v.15, N.1, p.55-64.
4. -Dobes J., Ivanova S.P., Jolos R.V., Pedrosa R. Boson representation of the microscopic nuclear Hamiltonian.- Proceedings of the International Conference on Selected Topics in Nuclear Structure, Dubna, 1989, v.2, p.320-327.
5. -Dobes J., Ivanova S.P., Jolos R.V., Pedrosa R. Projection operator in the boson expansion techniques. Phys. Rev., 1990, v.C41, N4, p.1840-1844.
6. -Dobes J., Ivanova S.P., Jolos R.V., Pedrosa R. Boson mapping and the microscopic collective nuclear Hamiltonian. Dubna, 1990, preprint JINR: E4-90-319, 16p. В печате в J.Phys.G: Nucl.Part.Phys.
7. -Джолос Р.В., Иванова С.П., Педроса Р. Исследование квазиротационных полос, построенных на двухквазичастичных состояниях в ядрах с $A \approx 80$.- Тезисы докладов XL Всесоюзного совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра. Ленинград, 1990, Наука, ленинградское отделение, с.150. В печате в Я.Ф.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 октября 1990 года.