



Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

профессор

доктор физико-математических наук

В. Г. СОЛОВЬЕВ

Официальные оппоненты:

профессор

доктор физико-математических наук

С. Г. КАДМЕНСКИЙ

кандидат физико-математических наук

старший научный сотрудник

В. М. МИХАЙЛОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт ядерной физики

Московского государственного университета (Москва).

Защита диссертации состоится "15" сентября 1987 г.

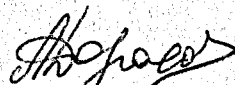
на заседании специализированного совета КО47.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "5" ноября 1987 г.

Ученый секретарь совета

кандидат физико-математических наук

  
А. Е. ДУРОВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

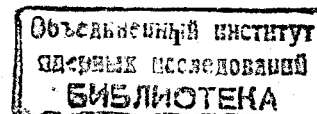
Актуальность проблемы. Зарядово-обменными называются ядерные процессы, в которых заряд ядра меняется на единицу, а массовое число остается неизменным. К ним относятся ядерный бета-распад и реакции перезарядки, такие как  $(p, n)$ ,  $(^3\text{He}, t)$ ,  $(^6\text{Li}, ^6\text{He})$ . В отличие от бета-распада реакции перезарядки позволяют исследовать свойства зарядово-обменных возбуждений в широком интервале энергий возбуждения. В начале восьмидесятых годов в этих реакциях было установлено существование зарядово-обменных резонансов с переворотом спина (гамов-теллеровский (ГТ) и спин-дипольный резонансы). Коллективные состояния такого типа были обнаружены во многих легких, средних и тяжелых ядрах, в том числе и в нескольких деформированных ( $^{163}\text{Dy}$ ,  $^{169}\text{Tm}$ ,  $^{238}\text{U}$ ). Из эксперимента известно положение максимумов ГТ и спин-дипольного резонансов для деформированных ядер. Такая информация позволяет фиксировать константу остаточных взаимодействий, с помощью которых генерируются зарядово-обменные состояния, и в рамках квазичастично-фононной модели ядра (КФМЯ) рассчитать характеристики зарядово-обменных резонансов для широкой области деформированных ядер  $A > 150$ .

Другой областью экспериментальной ядерной физики, которая интенсивно развивается, остается исследование низколежащих неротационных состояний в деформированных ядрах в зарядово-нейтральном канале. В КФМЯ правильно описываются квадрупольные и октупольные коллективные и двухквазичастичные состояния. В то же время имеются многочисленные экспериментальные данные по низколежащим гексадекапольным состояниям с  $1^{\pi}K=4^{+3}$  и  $4^{+4}$  ( $1$  - спин,  $K$  - проекция момента на ось симметрии ядра,  $\pi$  - четность) в ядрах редкоземельной области. В последнее время появились экспериментальные указания на существенную роль гексадекапольных сил в правильном описании приведенных вероятностей  $E2$ - и  $E4$ -переходов на состояния  $\gamma$ -вибрационной полосы. Изучение гексадекапольных возбуждений необходимо также для решения проблемы существования низколежащих двухфононных состояний в деформированных ядрах.

### Цель работы

1. Создать в рамках КФМЯ аппарат для описания зарядово-обменных возбуждений в приближении хаотических фаз (ПХФ).

2. Исследовать на его основе свойства зарядово-обменных возбуждений и  $T_2$ -состояний (т.е. состояний, изоспин которых на единицу больше изоспина основного состояния ядра) в четно-четных деформированных ядрах.



3. Развить аппарат КФМЯ, позволяющий описывать низколежащие неротационные состояния в деформированных ядрах в случае, когда волновая функция таких состояний наряду с однофононными содержит двухфононные компоненты, в которых учтена двухквазичастичная структура фонона (принцип Паули). С помощью этого формализма описать основные свойства гексадекапольных состояний для ядер редкоземельной области и исследовать влияние гексадекапольных сил на характеристики  $\gamma$ -вибрационных состояний.

#### Научная новизна и практическая ценность

В диссертации в рамках КФМЯ построен аппарат для изучения зарядово-обменных возбуждений в деформированных ядрах в приближении хаотических фаз. Гамильтониан остаточного взаимодействия строится из центральных сепарабельных мультипольных и спин-мультипольных сил. Уравнения ПХФ получены для случаев, когда остаточное взаимодействие содержит силы одной и двух мультипольностей с определенным значением  $K^\pi$ . На основе построенного аппарата вычислены спектры гамов-теллеровских, спин-дипольных и дипольных зарядово-обменных состояний для большого числа четно-четных ядер редкоземельной области и актинидов с использованием уравнений ПХФ для случая одного и двух типов остаточных сил. Показано, что учет высших мультипольностей практически не влияет на интегральные характеристики спектров этих состояний. Проведено описание  $T_2$ -состояний гигантского изовекторного дипольного резонанса.

Описание неротационных возбуждений в зарядово-нейтральном канале проводится с помощью волновой функции, содержащей однофононные и двухфононные компоненты, в которых точно учитывается принцип Паули. Впервые получены выражения для энергий этих состояний, структуры волновой функции и вероятностей электрических переходов между такими состояниями для случая фононов любой мультипольности. С помощью этого аппарата качественно правильно описаны низколежащие неротационные состояния с  $K^\pi=3^+, 4^+$  для редкоземельных ядер. Исследовано влияние гексадекапольных сил на характеристики квадрупольных состояний. Показано, что учет этих сил позволяет согласованно описать имеющиеся экспериментальные данные по изоскалярным приведенным вероятностям для  $\gamma$ -вибрационных состояний ядер редкоземельной области.

Апробация работ. Результаты докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, на XXXVII Советании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Юрмала, 1987 г.) и на конференции в Гейдельберге (июнь, 1986 г.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано шесть статей и два тезиса докладов XXXIV и XXXVII Советаний по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Алма-Ата, 1984 г. и Юрмала, 1987 г.).

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Объем диссертации: 89 страниц машинописного текста, 8 рисунков и 9 таблиц. Библиографический список литературы насчитывает 106 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность проблем, связанных с изучением зарядово-обменных и гексадекапольных состояний в деформированных ядрах. Сделан обзор литературы по этим вопросам.

В главе I приведен гамильтониан КФМЯ. Получены уравнения ПХФ для описания зарядово-обменных возбуждений, которые генерируются остаточными мультипольными и спин-мультипольными силами. Выведены уравнения с учетом принципа Паули для описания неротационных возбужденных состояний в нейтральном канале для волновой функции, содержащей однофононные и двухфононные компоненты.

В § I из гамильтониана КФМЯ выделена зарядово-обменная часть, сделан переход от операторов рождения и уничтожения нуклонов к операторам квазичастиц сверхпроводящего типа и определены операторы зарядово-обменных фононов. Зарядово-обменные состояния рассматриваются как однофононные, удовлетворяющие уравнениям ПХФ. Получены уравнения для определения энергий таких состояний. Вычислены приведенные вероятности переходов из основного состояния четно-четного ядра на состояния, которые возбуждаются в  $(p,n)$ - и  $(n,p)$ - реакциях (силы  $(p,n)$ - и  $(n,p)$ - переходов). Приведены интегральные правила сумм для зарядово-обменных переходов. Получены уравнения метода силовой функции, позволяющего избежать непосредственной диагонализации гамильтониана и получить усредненную зависимость силы перехода от энергии возбуждения.

В деформированных ядрах состояний с определенным значением  $K^\pi$  могут генерироваться различными остаточными мультипольными или спин-мультипольными силами  $\lambda_\mu$  с  $\mu=K$  и  $\pi=(-1)^\lambda$ . В § 2 впервые получены уравнения ПХФ для описания зарядово-обменных возбуждений в случае одновременного учета двух мультипольностей в гамильтониане остаточного взаимодействия.

В § 3 рассмотрены возбуждения в зарядово-нейтральном канале. Волновая функция неротационного состояния содержит однофононные и двухфононные компоненты, в которых учитывается принцип Паули. Впервые вычислены энергия и волновые функции возбужденных состояний и матричные

элементы электромагнитных переходов для случая фононов любой мультипольности. В данном параграфе также получены уравнения ПХФ в случае учета двух типов остаточных сил для зарядово-нейтрального канала.

Глава II содержит результаты численных расчетов характеристик зарядово-обменных ГТ, спин-дипольного и дипольного резонансов для ряда четных деформированных ядер, а также  $T_>$  - части гигантского дипольного резонанса.

В § I приведены результаты расчетов спектров гамов-теллеровских состояний в ПХФ на деформированных четно-четных ядрах. При этом использовались центральные сепарабельные остаточные силы. Показано, что результаты расчетов правильно воспроизводят положение пика ГТ резонанса, известного из экспериментальных данных для  $(p,n)$ - реакции. Сила  $(p,n)$ - переходов распределена в интервале 5-40 МэВ. В области гигантского резонанса сконцентрировано от 60% до 70% всей силы переходов, определяемой модельно-независимым правилом сумм. Одновременный учет ГТ и спин-квадрупольного взаимодействий практически не влияет на характеристики ГТ-резонанса. В данном параграфе рассчитан матричный элемент ГТ бета-перехода  $n523\downarrow \rightarrow p523\uparrow$ , который наблюдается экспериментально во многих ядрах редкоземельной области. Учет остаточного ГТ-взаимодействия уменьшает квадрат матричного элемента в 3-5 раз по сравнению с одноквазичастичными оценками. Однако рассчитанные значения остаются в 2-6 раз больше экспериментальных.

В § 2 приведены результаты расчетов зарядово-обменных спин-дипольных и дипольных однофононных состояний на четно-четных деформированных ядрах. Исследовано распределение силы переходов по большому (шириной не менее 5 МэВ) интервалам энергий возбуждения, вычисленное в ПХФ для состояний со спином и четностью  $\lambda^\pi = 0^-, 1^-$  и  $2^-$  и проекцией момента  $K=0$  и  $1$ . Расчеты показали, что сила спин-дипольных  $(p,n)$ - переходов распределена в области 2-40 МэВ с широким максимумом при 14-33 МэВ, в котором сосредоточено около 90% силы переходов. Распределение силы дипольных  $(p,n)$ - переходов имеет ярко выраженный максимум при энергии 25-29 МэВ, в котором сосредоточено 75% силы  $(p,n)$ - переходов. Рассчитанные характеристики дипольного и спин-дипольного с  $\lambda^\pi = 1^-$  резонансов не изменяются при одновременном учете дипольных и спин-дипольных сил в уравнениях ПХФ.

§ 3 посвящен описанию  $T_>$ -гигантских дипольных резонансов в ПХФ. Волновая функция  $T_>$ -состояний определяется действием понижающего изоспинового оператора  $\tau^{(-)}$  на однофононное состояние типа нейтронная частица - протонная дырка. Вычислены энергии возбуждения  $1^-$  и  $0^- T_>$ - состояний и приведенные вероятности электрических дипольных переходов для четно-четных деформированных ядер редкоземельной области и актини-

дов. Величина изовекторной дипольной константы остаточных сил определяется по положению пика обычного гигантского дипольного резонанса. Рассчитанные отношения приведенных вероятностей Е1-возбуждения  $T_>$  - и  $T_<$  - состояний достаточно хорошо совпадают с феноменологическими оценками. ( $T_<$ -состояния - это состояния изовекторного гигантского дипольного резонанса с изоспином, равным изоспину основного состояния ядра). Показано, что с помощью одной и той же эффективной константы возможно описание интегральных характеристик  $T_>$ - и  $T_<$ - ветвей гигантского изовекторного дипольного резонанса.

В главе III представлены результаты расчетов низколежащих гексадекапольных состояний со спином, проекцией момента на ось симметрии ядра и четностью  $1^{\pi K}=4^+3$  и  $4^+4$  для четно-четных ядер редкоземельной области. Проведено сравнение с экспериментальными данными. Впервые исследовано влияние гексадекапольных сил на характеристики  $\gamma$ -вибрационных состояний.

В § I в приближении, когда волновая функция возбужденных состояний содержит однофононные и двухфононные компоненты, вычислены значения энергий низколежащих  $3^+$ - и  $4^+$ - состояний и приведенные вероятности  $B(E4)$ -электромагнитных переходов на  $4^+3$ - и  $4^+4$ -состояния. Показано, что расчеты качественно правильно воспроизводят экспериментальные данные. Учет принципа Паули в волновой функции приводит к тому, что вклад двух фононных компонент в нормировку волновой функции мал.

В § 2 исследуется вопрос о влиянии гексадекапольных сил на состояния с  $1^{\pi K}=4^+2$   $\gamma$ -вибрационной полосы. Расчеты энергий, структуры состояний и приведенных вероятностей Е4-переходов выполнены на основе уравнений ПХФ с одновременным учетом квадрупольных и гексадекапольных сил для различных значений констант эффективного взаимодействия. Включение гексадекапольных сил приводит к уменьшению изоскалярной приведенной вероятности  $B(1S_2)$  на 10-30% и увеличению  $B(1S_4)$  в два-три раза.

Показано, что введение гексадекапольного взаимодействия позволяет качественно правильно описать энергии и приведенные вероятности Е4-переходов в редкоземельных ядрах.

В заключении диссертации перечислены основные выводы.

В приложении приведены необходимые расчетные формулы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ, ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ НА ЗАЩИТУ:

I. В рамках КФМЯ развит математический аппарат для описания неротационных состояний четно-четных деформированных ядер. Волновая функция таких состояний содержит однофононные и двухфононные компоненты,



в которых учтен принцип Паули. Впервые получены выражения для энергии, структуры состояний и для матричных элементов электромагнитных переходов между возбужденными состояниями и между основным и возбужденным состояниями для случая фононов любой мультипольности.

2. Впервые разработан формализм КФМЯ для описания зарядово-обменных возбуждений в приближении хаотических фаз с учетом одного и двух типов остаточных сепарабельных взаимодействий.

3. Впервые для большого количества деформированных ядер редкоземельной области актинидов рассчитаны характеристики ГТ (p,n)- и (n,p)-переходов. Показано, что во всех рассмотренных ядрах при 18-20 МэВ расположен ГТ-резонанс с областью локализации 5-6 МэВ, в которой сосредоточено 60%-70% силы ГТ (p,n)-переходов. Сила (n,p)-переходов распределена в области 2-35 МэВ. Отношение интегральной силы (p,n)-переходов к интегральной силе (n,p)-переходов составляет 0,01-0,03 и уменьшается с ростом A. Расщепление ГТ-резонанса на компоненты  $K^\pi=0^+$  и  $1^+$  отсутствует. Одновременный учет ГТ и спин-квадрупольных сил не изменяет вычисленных характеристик ГТ-резонанса.

4. Показано, что сила спин-дипольных (p,n)-переходов распределена в области 2-40 МэВ с широким максимумом при 14-33 МэВ, в котором сосредоточено 90% силы (p,n)-переходов, ниже 14 МэВ находятся состояния с  $K^\pi=2^-$ . Сила (n,p)-переходов распределена в области 2-25 МэВ. Отношение интегральных сил (n,p)- и (p,n)-переходов составляет 0,06-0,14 и уменьшается с ростом A.

5. Впервые вычислены характеристики дипольных (p,n)-переходов, сила которых распределена в области 14-40 МэВ с двумя максимумами при 25-27 МэВ и 29 МэВ, соответствующими состояниям  $K^\pi=0^-$  и  $1^-$ , в которых сосредоточено 75% силы. Установлено, что одновременный учет дипольных и спин-дипольных сил практически не влияет на характеристики дипольного и спин-дипольного (с  $K^\pi=1^-$ ) резонансов.

6. Впервые рассчитаны характеристики  $T_>$ -части гигантского дипольного изовекторного резонанса в рамках КФМЯ. Проведено их сравнение с характеристиками  $T_<$  части гигантского дипольного резонанса. Центроид энергии  $\bar{E}_{T_>}$  лежит выше  $\bar{E}_{T_<}$  на 8-14 МэВ. Отношение сечений фотопоглощения  $\sigma_{-1}(T_>)/\sigma_{-1}(T_<) = 0,001-0,02$ .

7. Учет остаточного ГТ-взаимодействия уменьшает вычисленное значение квадрата матричного элемента ГТ  $\beta$ -перехода  $p_{523+7/2} \rightarrow n_{523+5/2}$  между четно-четными и нечетно-нечетными ядрами редкоземельной области в 3-5 раз по сравнению с одноквазичастичными оценками. Рассчитанное значение остается в среднем в 2-6 раз больше экспериментального, известного из бета-распада.

8. Впервые получено качественно правильное описание низколежащих неротационных состояний с  $K^\pi=3^+$  и  $4^+$  для ядер редкоземельной области в рамках КФМЯ. Согласно расчетам в изотопах Ga и Dy имеются  $4^+_{1-}$ -состояния с доминирующими двухквазичастичными компонентами при энергиях возбуждения 1,1-1,9 МэВ. В изотопах Er, Yb и Hf имеются коллективные  $3^+_{1-}$ -состояния с энергиями 1,1-1,3 МэВ. В изотопах Os имеются коллективные  $4^+_{1-}$ -состояния при энергиях 1,0-1,4 МэВ. Вычисленные характеристики гексадекапольных состояний хорошо согласуются с существующими экспериментальными данными. Для всех рассчитанных  $4^+_{1-}$  и  $4^+_{2-}$  состояний двухфононные компоненты малы.

9. Исследовано влияние гексадекапольных сил на  $\gamma$ -вибрационные состояния. Показано, что учет этих сил для ядер редкоземельной области приводит к уменьшению величины  $B(E2)$  и  $B(1S2)$  на 10-30% и увеличению  $B(1S4)$  в два-три раза, что позволяет качественно правильно описать энергии и приведенные вероятности для состояний  $4^+_{2-}$   $\gamma$ -вибрационной полосы.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Соловьев В.Г., Сушков А.В., Ширикова Н.Ю. Описание гамов-теллеровских резонансов в деформированных ядрах. Письма в ЖЭТФ, 1983, т. 38, с. 151-153.

Soloviev V.G., Sushkov A.V., Shirikova N.Yu. Description of charge-exchange resonances in deformed nuclei. Z. Phys., 1984, A316, p. 65-74.

(Описание зарядово-обменных резонансов в деформированных ядрах.)

Соловьев В.Г., Сушков А.В. Описание  $T_>$ -гигантских дипольных резонансов в деформированных ядрах. Изв. АН СССР, сер. физ., 1984, т. 48, стр. 1798-1800.

Malov L.A., Soloviev V.G., Sushkov A.V. Charge-exchange resonances in deformed nuclei. In: Weak and Electromagnetic Interaction in Nuclei, ed. Kladder H.V., Springer, Berlin, 1986, p. 291-294. (Зарядово-обменные резонансы в деформированных ядрах.)

Нестеренко В.О., Соловьев В.Г., Сушков А.В., Ширикова Н.Ю. Гексадекапольные состояния в деформированных ядрах, 1986, т. 44, стр. 1443-1450.

Нестеренко В.О., Соловьев В.Г., Сушков А.В. Основные уравнения квази-частично-фононной модели ядра для четно-четных деформированных ядер. Сообщение ОИЯИ Р4-86-II5, 1986, Дубна.

Соловьев В.Г., Сушков А.В., Ширикова Н.Ю. Тезисы докладов XXXIV Сессии по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Алма-Ата). Л.: Наука, 1984, с. 163.

Соловьев В.Г., Сушков А.В., Нестеренко В.О. Тезисы докладов XXXV Сессии по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Юрмала). Л.: Наука, 1987, с. 153.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 сентября 1987 года.