

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

К 833

УДК 539.14

4-87-226

КУЗЬМИН

Владимир Александрович

ЗАРЯДОВО-ОБМЕННЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ  
В СФЕРИЧЕСКИХ АТОМНЫХ ЯДРАХ

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:  
профессор, доктор физико-математических  
наук

В.Г. Соловьев

Официальные оппоненты:  
доктор физико-математических  
наук, ведущий научный сотрудник

Ю.В. Гапонов

доктор физико-математических  
наук, ведущий научный сотрудник

А.В. Игнатик

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Научно-иссле-  
довательский институт ядерной физики Московского государствен-  
ного университета (Москва).

Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1987 г.  
на заседании специализированного совета К047.01.01 Лаборатории  
теоретической физики Объединенного института ядерных исследо-  
ваний, Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета  
кандидат физико-математических наук

А.Е. Дорохов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Под зарядово-обменными процессами понимают ядерные процессы, в которых меняется заряд ядра, а полное число нуклонов в ядре остается постоянным. Первым зарядово-обменным процессом, интенсивно исследовавшимся в ядерной физике, был  $\beta$ -распад. Изучение  $\beta$ -распада потребовало учета взаимодействия одночастичных и коллективных возбуждений в ядре, а также влияния ненуклонных степеней свободы. Ещё более остро эти вопросы встали после экспериментального открытия эффекта подавления силы гамов-теллеровских переходов, обнаруженного в  $(p, n)$ -реакциях. Наиболее важную роль в подавлении силы переходов играет, по-видимому, взаимодействие частично-дырочных и более сложных состояний, сдвигающее часть силы в область высоких энергий возбуждения. Однако вопрос о количестве сдвигаемой силы остается открытым.

Зарядово-обменные процессы в ядрах можно рассматривать как одну из ветвей изовекторных возбуждений. Поэтому описание в рамках одного подхода и зарядово-обменных и зарядово-нейтральных процессов позволяет, с одной стороны, использовать при описании зарядово-обменных процессов информацию, полученную при изучении зарядово-нейтральных изовекторных процессов, и, с другой стороны, проверить на новом классе процессов правильность основных предположений и численные значения параметров, используемых в данном подходе. В качестве основы такого подхода можно выбрать квазичастично-фононную модель ядра, разрабатываемую в ИТФ ОИЯИ. В рамках квазичастично-фононной модели ядра создан аппарат для описания зарядово-нейтральных возбуждений как в ядрах с одной и двумя замкнутыми оболочками, так и в ядрах с обеими незамкнутыми оболочками, позволяющий изучать взаимодействие простых и более сложных состояний.

Цель работы. 1. Создание в рамках квазичастично-фононной модели ядра (КМЯ) аппарата для описания зарядово-обменных возбуждений в приближении хаотических фаз (ПХФ) и с учетом взаимодействия квазичастиц с фононами. 2. Исследование на его основе свойств зарядово-обменных возбуждений в сферических атомных ядрах. 3. Выяснение, в какой мере взаимодействие квазичастиц с фононами может быть ответственно за подавление силы гамов-теллеровских и спин-дипольных зарядово-обменных резонансов. При этом, чтобы иметь возможность выделить

общие закономерности, расчеты следует проводить для большого числа ядер, включая и ядра с незамкнутыми оболочками.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации в рамках КЭМЯ построен аппарат для изучения свойств зарядово-обменных возбуждений в сферических атомных ядрах в ПХФ и с учетом взаимодействия квазичастиц с фононами, смешивающего состояния с различным числом фононов. С помощью этого аппарата возможно описание зарядово-обменных возбуждений и в ядрах с одной или с двумя замкнутыми оболочками, и в ядрах с обеими незамкнутыми оболочками. На его основе с использованием центральных остаточных сепарабельных сил:

– проведено описание  $J^{\pi} T_z$ - состояний, т.е. дипольных состояний, изоспин которых на единицу превышает изоспин основного состояния, и получено хорошее описание интегральных характеристик этих состояний;

– вычислены спектры гамма-теллеровских и спин-дипольных зарядово-обменных состояний в ряде сферических ядер, в том числе впервые проведены расчеты для ядра с незамкнутыми оболочками;

– исследовано влияние двухфононных примесей в волновых функциях гамма-теллеровских и зарядово-обменных спин-дипольных состояний. Показано, что взаимодействие квазичастиц с фононами приводит к заметному перераспределению силы зарядово-обменных переходов, формированию ширины зарядово-обменных резонансов, но не вызывает смещения значительной части силы в область высоких энергий возбуждения.

Для непосредственного изучения интегральных характеристик распределения силы переходов по энергиям возбуждений впервые развит строгий метод вычисления энергетически-взвешенных моментов в задачах фрагментации, основанный на спектральном разложении симметричной вещественной матрицы. С его помощью доказано, что в задачах фрагментации полная сила переходов и энергетический центроид равны полной силе и центроиду состояний, входящих в однофононные части волновых функций возбужденных состояний, и что второй и третий моменты определяются только теми сложными состояниями, которые непосредственно взаимодействуют с однофононными. Эти утверждения основаны только на предположении о структуре основного и возбужденных состояний, сделанном в приближении фрагментации.

На основе спектрального разложения вещественной симметричной матрицы впервые получены явные выражения для энергетически-взвешенных моментов распределения силы переходов, вызванных произвольным оператором перехода, по энергии возбуждения в ПХФ. Показано, что определенные линейные комбинации моментов можно выразить через произведения матриц, входящих в уравнение ПХФ.

Показано, что энергетически-взвешенные моменты можно использовать для определения погрешностей, возникающих при уменьшении числа учитываемых двухфононных состояний в задачах фрагментации и двухквазичастичных – в ПХФ. Уменьшение числа учитываемых состояний существенно при проведении численных расчетов на ЭВМ.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, на XXXV Сессии по ядерной спектроскопии и структуре ядра (Ленинград, 1985 г.).

Публикации. По результатам диссертации опубликованы пять статей и два тезиса на XXXIV и XXXV Сессии по ядерной спектроскопии и структуре ядра (Алма-Ата, 1984 г. и Ленинград, 1985 г.).

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и трех приложений. Объем диссертации: 89 страниц машинописного текста, 13 рисунков и 10 таблиц. Библиографический список литературы насчитывает 86 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность вопросов, рассмотренных в диссертации; особое внимание обращается на важность изучения взаимодействия одночастичных и более сложных возбуждений в ядрах. Приводится обзор литературы, связанной с изучением зарядово-обменных процессов. Перечисляются основные черты квазичастично-фононной модели ядра.

В главе I приводится гамильтониан КЭМЯ и подробно разбираются основные этапы построения приближенных волновых функций зарядово-обменных возбуждений в приближении хаотических фаз и с учетом взаимодействия квазичастиц с фононами.

В § I обсуждаются гамильтониан КЭМЯ, разделение гамильтониана остаточных взаимодействий на зарядово-нейтральную и зарядово-обменную части, перечисляются основные последовательные этапы диагонализации гамильтониана. Отмечается, что в четных ядрах распределение силы переходов по достаточно широким интервалам энергий возбуждений определяется спектром однофононных состояний и их взаимодействием с двухфононными.

В § 2 делается переход от операторов рождения и уничтожения нуклонов к операторам квазичастиц сверхпроводящего типа и определяются операторы рождения зарядово-обменных фононов

$$\Omega_{\lambda\mu}^+ = \sum_{j_1 j_2} \left\{ \psi_{j_1 j_2}^{\lambda\mu} A_{(j_1 j_2; \lambda\mu)}^+ - (-)^{\lambda-\mu} \varphi_{j_1 j_2}^{\lambda\mu} A_{(j_1 j_2; \lambda-\mu)} \right\},$$

где  $A_{(j_1 j_2; \lambda\mu)}^+$  — оператор рождения двухквартичного зарядово-обменного состояния с определенными полным моментом и его третьей проекцией. Выводятся уравнения ПХФ и показывается, что вибронный гамильтониан, квадратичный по операторам рождения и уничтожения двухквартичных состояний, диагонализуется в ПХФ. Вычисляются в ПХФ амплитуды зарядово-обменных переходов из основного состояния четно-четного ядра в возбужденные состояния соседних нечетно-нечетных ядер.

В § 3 рассматривается диагонализация гамильтониана, состоящего из суммы вибронного гамильтониана и гамильтониана взаимодействия квартиц с фононами, в пространстве волновых функций, включающем в себя одно- и двухфононные состояния:

$$|JM\rangle = \left\{ \sum_i R_i^{J\nu} \Omega_{JM_i}^+ + \sum_{\lambda_1 i_1, \lambda_2 i_2} P_{\lambda_1 i_1, \lambda_2 i_2}^{J\nu} [Q_{\lambda_1 i_1}^+, \Omega_{\lambda_2 i_2}^+] |JM\rangle \right\},$$

где  $Q_{\lambda_1 i_1}^+$  — оператор рождения фонона в зарядово-нейтральном канале. Вычисляются энергии возбуждения состояния  $|JM\rangle$  над основным состоянием четно-четного ядра, коэффициенты  $R_i^{J\nu}$  и амплитуды переходов из основного состояния в состояние  $|JM\rangle$ . При вычислении амплитуды переходов учитываются только переходы в однофононные компоненты состояния  $|JM\rangle$  (приближение фрагментации), так как переходы в двухфононные составляющие обычно малы. Приводятся уравнения метода силовой функции, позволяющего избежать непосредственной диагонализации гамильтониана и получить усредненную зависимость вероятности перехода от энергии возбуждения.

Глава II содержит результаты численных расчетов характеристик гигантских дипольных резонансов, фрагментации гамов-теллеровских и спин-дипольных зарядово-обменных возбуждений.

§ I посвящен описанию  $T_2$ -гигантских дипольных резонансов в ПХФ. Волновая функция  $T_2$ -состояний определяется действием понижающего изоспинового оператора  $T^{(-)}$  на однофононное состояние типа нейтронная частица — протонная дырка. Вычислены энергии возбуждения  $T_2$ -состояний и приведенные вероятности электрических дипольных переходов для полумагических ядер с  $N = 50$  ( $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{92}\text{Mo}$ ) и с  $Z = 50$  ( $^{116}\text{Sn}$ ,  $^{120}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sn}$ ). Величина изовекторной дипольной константы остаточных сил определялась по положению пика

обычного гигантского дипольного резонанса. Показано, что вычисленные величины энергетических центроидов  $T_2$ -состояний согласуются с экспериментально определенными из реакции  $(\gamma, p)$ . Рассчитанные отношения приведенных вероятностей возбуждения  $T_2$ - и  $T_1$ -состояний практически совпадают с экспериментальными значениями этих отношений для ядер с  $N = 50$  и в 3-4 раза превосходят их для изотопов олова. Показано, что с помощью одной и той же эффективной константы получено достаточно хорошее описание интегральных характеристик  $T_2$ - и  $T_1$ -ветвей гигантского дипольного резонанса.

В § 2 приведены результаты расчетов спектров гамов-теллеровских состояний в ПХФ и силовые функции фрагментации однофононных гамов-теллеровских состояний на сферических четных ядрах  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{120}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Te}$ ,  $^{140}\text{Ce}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ . При этом использовались центральные сепарабельные остаточные силы. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, определенными из  $(p, n)$ -реакций, и результатами расчетов, имеющимися в литературе. Показано, что в ПХФ правильно воспроизводятся энергии низколежащих гамов-теллеровских состояний и положение гигантского гамов-теллеровского резонанса. В области гигантского резонанса собрано от 60 до 80 % всей силы переходов, определяемой модельно-независимым правилом сумм. Взаимодействие квартиц с фононами приводит к значительному ослаблению силы переходов, сосредоточенной в этой области (до 30 - 60 % от правила сумм). При этом практически вся сила перераспределяется внутри интервала энергий возбуждения от 0 до 30 МэВ (энергии возбуждений отсчитываются от основного состояния четно-четного ядра). При использованных остаточных силах взаимодействие квартиц с фононами приводит к формированию ширины гамов-теллеровских резонансов, но объяснить эффект подавления гамов-теллеровской силы не может.

В § 3 содержатся результаты расчетов зарядово-обменных спин-дипольных состояний в ПХФ и силовых функций фрагментации зарядово-обменных спин-дипольных однофононных состояний на ядрах  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{120}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Te}$  и  $^{208}\text{Pb}$ . Исследовались распределения сил переходов по большим интервалам энергий возбуждения (ширина интервалов не менее 5 МэВ), вычисленные в ПХФ для состояний со спином и четностью  $J^\pi = 0^-, 1^-, 2^-$ , и изменения в этих распределениях, вызванные взаимодействием квартиц с фононами. На основании расчетов показано, что взаимодействие квартиц с фононами приводит к образованию ширины спин-дипольных зарядово-обменных резонансов в сферических ядрах, что большая часть силы переходов (от 60 до 75 %) расположена в интервале энергий возбуждения от 15 до 25 МэВ (до 30 МэВ в  $^{90}\text{Zr}$ ) и что только от 10 до 25 % полной силы попадает в область энергий возбуждения, больших 30 МэВ. Распределение силы переходов в ядрах с незамкнутыми

оболочками подобно распределению силы переходов в магических и дважды магических ядрах.

Глава III посвящена вычислению энергетически-взвешенных моментов распределения силы переходов по энергиям возбуждений в задачах фрагментации и для ПХФ:

$$S_K = \sum_{\nu} E_{\nu}^K |\langle 0 | B | \psi_{\nu} \rangle|^2,$$

где  $E_{\nu}$  - энергия возбуждения состояния,  $\psi_{\nu}$ ,  $B$  - оператор перехода,  $K$  - целое неотрицательное число.

В § I показано, что задача фрагментации эквивалентна задаче на собственные значения вещественной симметричной матрицы, и предложен метод вычисления энергетически-взвешенных моментов в задаче фрагментации, основанный на спектральном разложении вещественной симметричной матрицы. Доказано, что в задаче фрагментации полная сила переходов и энергетический центр масс равны полной силе переходов и центр масс учитываемых однофононных состояний. Доказано, что второй и третий моменты определяются только теми сложными состояниями, которые непосредственно взаимодействуют с однофононными. Обсуждены следствия доказанных утверждений для задачи описания подавления силы спин-изоспиновых переходов. Показана эффективность использования второго и третьего моментов для контроля за погрешностями, вносимыми уменьшением числа рассматриваемых двухфононных состояний.

В § 2 предложен метод вычисления энергетически-взвешенных моментов в ПХФ, основанный на спектральном разложении вещественной симметричной матрицы. Показано, что определенные линейные комбинации моментов можно выразить через произведение матриц, входящих в уравнение ПХФ. Показано, что по вкладу двухквазичастичных состояний в эти линейные комбинации можно выделить наиболее важные для данной задачи двухквазичастичные состояния и тем самым значительно уменьшить размерность матриц, входящих в уравнение ПХФ.

В заключении диссертации перечислены основные выводы.

В приложении А выведено секулярное уравнение ПХФ и получены аналитические выражения для суммы и разности фононных амплитуд.

В приложении В приведен матричный элемент оператора взаимодействия квазичастиц с фононами между одно- и двухфононными состояниями, который использовался в расчетах фрагментации гамма-теллеровских и спин-дипольных зарядово-обменных состояний.

В приложении С собраны сведения о спектральных свойствах вещественных симметричных матриц.

## Основные результаты диссертации, представленные на защиту:

1. В рамках квазичастично-фононной модели ядра построен аппарат для описания зарядово-обменных возбуждений в четных сферических атомных ядрах в приближении хаотических фаз и с учетом взаимодействия квазичастиц с фононами. При этом не потребовалось введения дополнительных эффективных констант взаимодействия.

2. В приближении хаотических фаз построено микроскопическое описание  $T_2$ -гигантских дипольных резонансов в сферических четных атомных ядрах. Показано, что с помощью одного и того же набора эффективных констант удается описать спектры и отношения приведенных вероятностей возбуждения  $T_2$ - и  $T_4$ -ветвей гигантского дипольного резонанса.

3. С использованием сепарабельных центральных остаточных сил вычислены структура и энергия однофононных гамма-теллеровских состояний с незаполненными оболочками. Показано, что взаимодействие квазичастиц с фононами приводит к формированию ширины гамма-теллеровских состояний и к заметному перераспределению их силы и что значительного выноса гамма-теллеровской силы в область энергий возбуждения, больших 30 МэВ, нет. Таким образом, учет взаимодействия квазичастиц с фононами в случае центральных остаточных сил не может объяснить подавления гамма-теллеровской силы, обнаруженного в (p,n)-реакциях.

4. Проведены расчеты фрагментации спин-дипольных зарядово-обменных состояний в ряде ядер, в том числе и в ядрах с незаполненными оболочками. Показано, что взаимодействие квазичастиц с фононами приводит к значительной фрагментации этих состояний, особенно  $0^-$ . При этом практически вся сила спин-дипольных переходов остается в области энергий возбуждения от 5 до 30 МэВ.

5. Для исследования интегральных характеристик распределений силы переходов в задачах фрагментации развит основанный на спектральном разложении симметричной вещественной матрицы метод вычисления энергетически-взвешенных моментов силовой функции. Доказано, что в задачах фрагментации центр масс силовой функции определяется только распределением силы простых состояний и не зависит от взаимодействия простых и более сложных состояний и что ширина силовой функции определяется только теми сложными состояниями, которые непосредственно взаимодействуют с простыми.

6. Получены явные выражения для энергетически-взвешенных моментов в приближении хаотических фаз. Указан способ вычисления определенных линейных комбинаций этих моментов.

7. Показана высокая эффективность использования энергетически-взвешенных моментов для ограничения подпространства двухфононных состояний в задачах фрагментации и двухквaziчастичного - в приближении хаотических фаз.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Кузьмин В.А., Соловьев В.Г., Описание  $T_2$  гигантских резонансов в сферических ядрах.- ЯФ, 1982, т. 35, с. 620-627.

Kuzmin V.A. and Soloviev V.G. Fragmentation of the Gamow-Teller resonance in spherical nuclei.- J. Phys. G: Nucl. Phys., 1984, v. 10, p. 1507-1522.

(Фрагментация гамов-теллеровских резонансов в сферических ядрах).

Кузьмин В.А. и Соловьев В.Г. Описания фрагментации зарядово-обменных резонансов в сферических ядрах.- Изв. АН СССР, сер. физ., 1984, т. 48, с. 1801-1808.

Kuzmin V.A. and Soloviev V.G. Fragmentation of spin dipole charge-exchange states in spherical nuclei.- J. Phys. G: Nucl. Phys., 1985, II, p. 603-612.

(Фрагментация спин-дипольных зарядово-обменных состояний в сферических ядрах).

Кузьмин В.А. Энергетически-взвешенные моменты в задачах фрагментации.- ТМФ, 1987, т. 70, с. 315-319.

Кузьмин В.А., Соловьев В.Г. Тезисы докладов XXXIV Совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра (Алма-Ата). Л.: Наука, 1984, с. 162.

Кузьмин В.А., Соловьев В.Г. Тезисы докладов XXXV Совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра. Л.: Наука, 1985, с. 147.

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 апреля 1987 года.