

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4-2001-234

На правах рукописи
УДК 539.12.01

ПАЛЬЧИКОВ
Юрий Владимирович

**ПАРНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ, КВАДРУПОЛЬНЫЕ
ВОЗБУЖДЕНИЯ И КЛАСТЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ
В СТРУКТУРЕ ЯДЕР**

Специальность: 01.04.16 — физика ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2001

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Р. В. Джолос

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Л. А. Малов
доктор физико-математических наук
Ю. М. Чувильский

Ведущая организация: РИЦ "Курчатовский институт"

Защита диссертации состоится "____" _____ 2001 г. в _____ на заседании диссертационного совета К 720.001.01 при Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

Автореферат разослан "____" _____ 2001 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь
диссертационного совета



С. И. Федотов

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы. Диссертация посвящена исследованию ряда аспектов коллективной и кластерной моделей ядер средней массы и тяжелых ядер. Важность и актуальность таких исследований понятна, поскольку концепция среднего поля и его коллективных колебаний и концепция кластеризации являются базисными для ядерной физики.

Полное число внутренних степеней свободы ядра достаточно велико, но при небольших энергиях возбуждения существенными для рассмотрения являются лишь некоторые из них. К ним принято относить коллективные степени свободы, связанные с изменением формы ядра, парными корреляциями и одночастичные степени свободы, описывающие движение нуклонов в состояниях, близких к поверхности Ферми. При рассмотрении легких ядер важную роль играют кластерные степени свободы, которые также можно отнести к коллективным степеням свободы, связанным с изменением формы ядра.

В диссертации исследуются возбуждения ядра, связанные с такими степенями свободы, как кластерные, описывающие относительное движение двух кластеров, формирующих рассматриваемое ядро, коллективные квадрупольные, описывающие низколежащие коллективные возбуждения ядер, и связанные с парными корреляциями нуклонов в ядрах.

Известно, что в таких ядрах, как Ra, Th, а также в тяжелых изотопах Ba, Ce наблюдаются низколежащие коллективные возбуждения отрицательной четности. Их интерпретируют как проявление октупольных колебаний формы ядра. В то же время высказывалась и гипотеза о кластерной природе этих состояний.

Одна из возможностей проверить справедливость последней гипотезы – попробовать найти корреляции между появлением мягкой кластерной моды, с одной стороны, и уменьшением энергии низколежащих состояний отрицательной четности, с другой. Чтобы осуществить такую проверку, необходимо найти простой способ оценки частоты колебаний кластерной моды. Движение нуклона или группы нуклонов относительно ядра остатка на оболочечном языке описывается появле-

нием, например, дополнительных осцилляторных квантов вдоль соответствующего направления. В общем случае мы должны говорить, как минимум, об n -частичном – n -дырочном возбуждении ядра, где n – число нуклонов в легком кластере. Получить оценку энергии такого возбуждения можно основываясь на экспериментальных данных об энергиях связи ядер. Такой подход использовался, в частности, при оценке энергии парных вибраций (А. Bohr, 1968) и альфа-частичных возбуждений ядер (К. Heyde, 1988).

Другая коллективная мода, играющая основную роль при описании низколежащих возбуждений ядер – это коллективная квадрупольная мода. В случае ядер с относительно небольшим числом валентных нуклонов она описывает квадрупольные колебания формы ядра. В тяжелых ядрах с большим количеством валентных нуклонов с этой модой связано описание перехода от сферических ядер к деформированным и описание ротационных возбуждений ядер.

Цель работы состоит в исследовании взаимосвязи кластерных и коллективных октупольных степеней свободы в случае ядер средней и большой массы, структуры низколежащих коллективных квадрупольных возбуждений ядер и свойств четно-четных ядер с $Z = N$. В последнем случае рассматривается и вопрос проявления эффектов изоскалярных парных корреляций в ядрах.

Научная новизна и практическая ценность:

Показано, что степени свободы ядра, связанные с относительным движением кластеров, могут проявляться в тяжелых ядрах и при небольших энергиях возбуждения.

В рамках Модели взаимодействующих бозонов получено аналитическое выражение для волнового вектора 0_2^+ состояния в терминах оператора квадрупольных возбуждений. Полученное выражение является хорошим приближением и вне пределов динамических симметрий. Использование этого и известных ранее простых выражений для волновых функций коллективных состояний, содержащих один свободный параметр или вообще не содержащих свободных параметров, позволяет получить ряд соотношений между вероятностями $E2$ -переходов,

содержащих только экспериментальные данные.

Показано, что в случае как алгебраической модели $SO(8)$ так и модели изолированного j -уровня с поверхностным дельта-взаимодействием, волновая функция основного состояния четно-четного ядра с $Z = N$ представляется с хорошей точностью простым выражением, полученным с использованием оператора рождения четырех-частичной коррелированной структуры с $T = 0$ и $J = 0$. Таким образом, открывается возможность сформулировать приближенный подход, сходный с Приближением разрушенных пар для ядер с парными корреляциями нуклонов одного типа, но применимый для описания ядер, в которых важны парные корреляции как одинаковых нуклонов, так и нейтрон-протонные.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, а также представлялись и докладывались на следующих международных конференциях:

1. Russian-German Workshop, "Collective Modes in Fission: Regular and Chaotic Aspects", Dubna, 1996
2. International Conference, "Nuclear Structure and Related Topics", Dubna, 1997
3. International Conference, "New Ideas on Clustering in Nuclear and Atomic Physics", Rauischenholzhausen, 1997
4. Workshop, "Collective Excitations in Nuclei and Other Finite Fermi Systems", Dubna, 1999
5. International Conference, "Frontiers of nuclear structure", Göttingen, 2001

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация, общим объемом 81 страница, состоит из введения, 3-х основных глав, заключения и содержит 2 таблицы, 18 рисунков и список цитированной литературы из 66 наименований.

Содержание работы

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

Первая глава посвящена описанию кластеризации в средних и тяжелых ядрах. Связь оболочечной структуры и деформации с кластеризацией в ядрах обсуждалась многими авторами в основном для описания свойств легких ядер. Классическим примером такой связи может служить гипердеформированное состояние 0_2^+ в ядре ^{12}C , которое интерпретируется как конфигурация из трех альфа-частиц, выстроенных в линию. Расчеты предсказывают также существование деформированных состояний с нарушенной зеркальной симметрией, например, в ^{24}Mg (G. A. Leander, S. E. Larsson, 1975), где такое состояние может быть ассоциировано с кластерной конфигурацией $^{16}\text{O} + \alpha + \alpha$ или $^{16}\text{O} + ^8\text{Be}$.

В случае тяжелых ядер возможность появления среди низколежащих состояний таких, которые связаны с кластерными степенями свободы, обсуждалась в связи с обнаружением у ядер изотопов Ra и Th низколежащих 1^- -состояний.

В подходе, предложенном в (F. Iachello, A. D. Jackson, 1982 и H. J. Daley, B. R. Barrett, 1986), появление низколежащих 1^- -состояний объясняется существованием мягкой дипольной моды, описывающей движение альфа-частичного кластера относительно ядра-остатка.

В (S. Ćwiok, W. Nazarewicz, J. X. Saladin, W. Płóciennik, A. Johnson, 1994) проявления кластерных свойств тяжелых ядер рассматривались в связи с возможным существованием у этих ядер гипердеформированных возбужденных состояний. В этой работе были выполнены систематические расчеты потенциальной энергии деформации четных четных изотопов Rn, Ra, Th и U.

Наиболее интересным результатом работы оказалось то, что гипердеформированный минимум соответствует двойной ядерной конфигурации, состоящей из тяжелого фрагмента, подобного ^{132}Sn , и более легкого, подобного ^{100}Zr . Например, одночастичный спектр ^{232}Th при де-

формации, соответствующей гипердеформированному минимуму, выглядит как суперпозиция сферического одночастичного спектра ^{132}Sn и деформированного нильссоновского спектра ^{100}Zr . Таким образом, кластеризация тяжелых ядер при больших продольных деформациях оказалась связанной с проявлениями оболочечной структуры. Оболочечная же структура проявилась и в том, что по крайней мере один из тяжелых кластеров является ядром с замкнутыми оболочками.

Возникает вопрос, проявляются ли кластерные степени свободы, ассоциируемые с кластерами более тяжелыми, чем альфа-частица, при обычных деформациях? Приводят ли они в ядрах, которые можно представить состоящими из двух кластеров, каждый из которых является ядром с большой энергией связи, например, дважды магическим ядром, к тому, что состояния, связанные с возбуждением кластерных степеней свободы, будут появляться при относительно низких энергиях возбуждения? Вовсе не значит, что соответствующие кластеры должны наблюдаться в кластерном распаде, так как процесс распада зависит не только от вероятности формирования кластеров, но так же от проницаемости барьера.

Если два кластера существенно различаются по массе, то существование соответствующей кластерной моды приведет к нарушению зеркальной симметрии во внутренней системе координат. При низких энергиях возбуждения нарушение зеркальной симметрии среднего поля обычно ассоциируется с сильными октупольными корреляциями. Следовательно, эта кластерная мода может быть связана с октупольными корреляциями, т.е. с появлением низколежащих коллективных состояний отрицательной четности и ротационных полос с $\Delta I = 1$ и чередующейся четностью уровней.

В первом параграфе оценивается энергия возбуждения np - nh частично-дырочных состояний кластерного типа (n – число нуклонов в кластере) в ядрах, принадлежащих различным областям карты нуклидов (с использованием информации об энергиях связи). Это позволяет исследовать корреляции между энергиями таких состояний и энергиями наблюдаемых низколежащих 1^- -возбуждений в ядрах, имеющих

основные ротационные полосы с $\Delta I = 1$ и чередующейся четностью состояний.

Во втором параграфе исследуется важная для понимания корреляций между кластеризацией и появлением полос с чередующейся четностью уровней характеристика – предпочтительное направление нулевых колебаний в плоскости α_2 - α_3 . Так как дипольную переменную можно записать в следующем виде: $\alpha_{1m} = [\alpha_2 \times \alpha_3]_{1m}$, мы предполагаем, что в противоположность чистым октупольными вибрациям при постоянном α_2 кластерная мода соответствует одновременному изменению α_3 (преформирование кластера) и α_2 (относительное движение кластеров). Таким образом, вблизи основного состояния можно ожидать появление долины, характеризующейся наклоном по отношению к оси α_2 .

Существование долины на поверхности потенциальной энергии важно для объяснения большой величины отношения $\mathcal{J}_{\min}/\mathcal{J}_{\text{barrier}}$ моментов инерции, взятых в минимуме (\mathcal{J}_{\min}), и на барьере ($\mathcal{J}_{\text{barrier}}$), разделяющем два симметричных октупольных минимума. Относительно большое значение отношения необходимо для описания расщепления по четности в полосах с чередующейся четностью состояний и $\Delta I = 1$.

Вторая глава посвящена описанию низколежащих коллективных состояний четно-четных ядер в терминах Q -фононных возбуждений основного состояния. Описание основного состояния ядра является сложной проблемой для ядерных спектроскопических расчетов. Это утверждение справедливо как для феноменологических моделей типа Модели взаимодействующих бозонов, так и для оболочечных расчетов. Причиной тому является ограниченность конфигурационного пространства различных моделей. То, что фигурирует в модельных расчетах как волновая функция основного состояния, в действительности может составлять лишь небольшую часть ее нормы (Н. Feshbach, 1994).

В то же время из эксперимента известно, что ряд одночастичных операторов, например, оператор квадрупольного момента, или оператор магнитного дипольного момента, действуя на основное состояние ядра, генерирует с вероятностью, близкой к единице, пер-

вое 2^+ -состояние или коллективное 1^+ -состояние, соответственно. Это означает, что, основываясь на волновой функции основного состояния, можно с хорошей точностью воспроизвести волновые функции коллективных возбужденных состояний, действуя на основное состояние соответственно подобранным одночастичным оператором. Такой подход положен в основу схемы “квадрупольных возбуждений” или “ Q -фононов”, разработанной в рамках Модели взаимодействующих бозонов для описания коллективных квадрупольных возбуждений ядер и дающей простое представление возбужденных ядерных состояний.

Понятие фонона как кванта возбуждения, подчиняющегося бозонной статистике, и, следовательно, допускающее существование многофононных состояний, успешно использовалось для описания ядерных вибрационных спектров. В методе “ Q -фононов” предполагается, что возбужденные состояния можно получить многократным действием квадрупольного оператора на волновую функцию основного состояния, в следствие чего появляется сходство квадрупольного оператора Q и понятия фонона. Однако квадрупольный оператор не удовлетворяет бозонным коммутационным соотношениям, что делает это сходство ограниченным.

В первом параграфе вводятся основные понятия, используемые в методе “ Q -фононов”.

Во втором параграфе строится универсальное выражение для волнового вектора 0_2^+ состояния в терминах Q -конфигураций. Вместе с результатами работы (N. Pietralla, T. Mizusaki, V. Werner, P. von Brentano, R. V. Jolos, T. Otsuka, Y. Werner, 1998) получены выражения для волновых векторов оснований двух главных возбужденных квази-ротационных полос в четно-четных ядрах.

В третьем параграфе исследованы корреляции отношений вероятностей $E2$ -переходов R' и $R_{4/2}$, где

$$R' \equiv \frac{B(E2; 0_2^+ \rightarrow 2_2^+)}{B(E2; 0_2^+ \rightarrow 2_1^+)} \quad \text{и} \quad R_{4/2} \equiv \frac{B(E2; 4_1^+ \rightarrow 2_1^+)}{B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)}.$$

В четвертом параграфе исследованы флуктуации формы ядра вблизи предела динамической симметрии $O(6)$ Модели взаимодейству-

ющих бозонов, что позволило продемонстрировать возможности формализма квадрупольных возбуждений в извлечении из экспериментальных данных информации не только о средних значениях физических величин, но так же о их флуктуациях.

В пятом параграфе получено соотношение для вероятностей $E2$ -переходов из возбужденного 0_2^+ -состояния ядер, “мягких по β ”. В этих ядрах 0_2^+ -состояния представляют особый интерес, так как характеризуются относительно небольшими энергиями возбуждения. Сравнение с экспериментальными данными показывает, что полученное соотношение является весьма чувствительным индикатором ядер, мягких по β , но достаточно жестких по γ .

Третья глава посвящена исследованию парных корреляций с $T = 1$ и $T = 0$. Изучение парных корреляций с $T = 1$ в тяжелых ядрах было значительно упрощено благодаря простому приближенному выражению для волновой функции основного состояния четно-четных ядер, волновой функции БКШ (V. G. Soloviev, 1992). Волновая функция БКШ не является собственной функцией оператора числа частиц. Однако возможно восстановить соответствующую симметрию с помощью проектирования на подпространство состояний с данным числом частиц. Волновая функция, полученная в результате проецирования, выражается через последовательное действие оператора рождения двух частиц на волновую функцию, например, магического остова, до получения соответствующего числа частиц. Структура этого оператора определяется матричными элементами спаривательного взаимодействия и одночастичными энергиями. Такое описание формирует базис для обобщенной схемы сеньорити (I. Talmi, 1993) или Приближения разрушенных пар (Y. K. Gambhir, A. Rimini, T. Weber, 1969 и K. Allaart, E. Boeker, G. Bonsignori, M. Savoia, Y. K. Gambhir, 1988). Наша задача – найти аналогичное простое приближенное выражение для волновой функции основного состояния четно-четных ядер и в том случае, когда важны парные корреляции как одинаковых нуклонов, так и нейтрон-протонные.

Обобщение u - v преобразования Боголюбова на случай нейтрон -

протонных парных корреляций обсуждалось многократно (A. L. Goodman, 1999 и J. Engel, S. Pittel, M. Stoitsov, P. Vogel, J. Dukelsky, 1997). Так как число частиц и изоспин в этом подходе не сохраняются, то в случае легких ядер с $N = Z$ необходимо действовать с особой осторожностью, в особенности когда присутствуют оба типа парных корреляций с $T = 1$ и $T = 0$ (J. Dobeš, S. Pittel, 1998).

Представление о роли нейтрон-протонных парных корреляций можно получить в рамках модели, построенной на основе группы $SO(8)$, включающей в себя только фермионные пары с угловыми моментами $J = 0$ и $J = 1$, а также модели изолированного одночастичного j -уровня с поверхностным δ -взаимодействием, включающей фермионные пары с $J > 1$. В этих случаях можно показать, что волновая функция основного состояния записывается таким образом, чтобы максимально возможное число фермионов образовывало коррелированные четырех-частичные структуры с $T = 0$ и $S = 0$. Эти структуры характеризуются такими же квантовыми числами, как и альфа-частицы, что находится в соответствии с альфа-кластерной моделью, применяемой к легким и средним по массам ядрам. Следует заметить, что это не реальные альфа-частицы и правильнее будет называть их альфа-подобными структурами.

В первом параграфе исследована алгебраическая модель $SO(8)$, включающая парные корреляции с $T = 1$ и $T = 0$, и показано, что альфа-подобные двух-бозонные структуры (аналог четырех-фермионных коррелированных структур с $T = 0$ и $S = 0$) являются важными структурными элементами, и с их помощью значительно упрощается представление собственных состояний гамильтониана модели $SO(8)$. Это, в свою очередь, подчеркивает важную роль четырех-нуклонных альфа-подобных корреляций, когда присутствуют нейтрон-нейтронные, протон-протонные и нейтрон-протонные парные корреляции.

Во втором параграфе на примере модели изолированного одночастичного j -уровня с поверхностными δ -силами исследовано влияние фермионных пар с $J > 1$ на возможность приближения точных

волновых функций посредством четырех-частичных коррелированных структур и показано, что модель SDI демонстрирует сходную с моделью SO(8) картину поведения.

В третьем параграфе обсуждается влияние np -парных корреляций на квадрупольное правило сумм, рассчитанное для основного состояния четно-четного ядра с $Z = N$, и магнитный момент основного состояния нечетного ядра с $Z = N \pm 1$. Первая величина в основном характеризует вероятность $E2$ -перехода из основного состояния в первое 2^+ состояние. Обе величины зависят от углового момента нейтронной и протонной подсистем.

В заключении приведены основные результаты диссертации.

На защиту выдвигаются следующие результаты:

1. Приближенные расчеты энергий np - nh частично-дырочных возбужденных состояний кластерного типа с числами частиц и дырок n , равными числу нуклонов в легком кластере, например, ^{12}C или ^{16}O , показали, что наименьшие значения эта энергия принимает именно в тех ядрах, для которых известны основные ротационные полосы с $\Delta I = 1$ и чередующейся четностью уровней или просто имеются низколежащие состояния с $I^\pi = 1^-, 3^-$. Это указывает на то, что степени свободы ядра, связанные с относительным движением кластеров, могут проявляться в тяжелых ядрах и при небольших энергиях возбуждения.
2. Анализ зависимости потенциальной энергии ядра от параметров деформации указывает на присутствие корреляций между значением углового момента, при котором исчезает расщепление по четности, и разницей между квадрупольной деформацией в минимуме и на барьере, разделяющем два симметрично расположенных октупольных минимума.
3. В рамках Модели взаимодействующих бозонов получено аналитическое выражение для волнового вектора 0_2^+ состояния в терминах квадрупольных возбуждений. Полученное выражение является хорошим приближением и вне пределов динамических

симметрий. Совместно с результатами работы (N. Pietralla, T. Mizusaki, V. Werner, P. von Brentano, R. V. Jolos, T. Otsuka, Y. Werner, 1998) это решает задачу приближенного описания волновых векторов трех главных квазиротационных полос четно-четных ядер: основной, (“quasi”-) β - и (“quasi”-) γ -полос в терминах Q-конфигураций.

4. В рамках формализма квадрупольных возбуждений получено выражение, позволяющее извлечь из данных о вероятностях $E2$ -переходов информацию о флуктуациях γ для ядер, близких к пределу динамической симметрии $O(6)$ Модели взаимодействующих бозонов.
5. Получено соотношение между вероятностями $E2$ -переходов в коллективных четно-четных ядрах, характеризующими свойства распада 0_2^+ - и 2_1^+ -состояний. Соотношение применимо к описанию ядер, мягких относительно β -колебаний. Сравнение с экспериментальными данными показывает, что полученное соотношение является весьма чувствительным индикатором ядер, мягких по β , но достаточно жестких по γ .
6. Показано, что в случае как алгебраической модели $SO(8)$, так и модели изолированного j -уровня с поверхностным дельта-взаимодействием, волновая функция основного состояния представляется простым выражением, полученным с использованием оператора рождения четырех-частичной коррелированной структуры с $T = 0$ и $J = 0$. В рассмотренных случаях перекрытие точной и приближенной волновой функции составляло более 93%. Таким образом, открывается возможность сформулировать приближенный подход, сходный с Приближением разрушенных пар для ядер с парными корреляциями нуклонов одного типа, но применимый для описания ядер, в которых важны парные корреляции как одинаковых нуклонов, так и нейтрон-протонные.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Р.В. Джолос, Ю.В. Пальчиков,
“Кластерные свойства и сильные октупольные корреляции в средних и тяжелых ядрах”,
Ядерная физика, том. 60, № 7, 1997, с. 1202–1205.
2. R.V. Jolos, Yu.V. Palchikov, V.V. Pashkevich and A.V. Unzhakova,
“Reflection asymmetric deformation and clustering in heavy nuclei”,
Nuovo Cimento 110 A(1998) 941–948.
3. Yu.V. Palchikov, P. von Brentano and R.V. Jolos
“Universal description of the 0_2^+ state in collective even-A nuclei”,
Phys. Rev. C 57, 3026 (1998).
4. Р.В. Джолос, Ю.В. Пальчиков,
“Соотношение между вероятностями $E2$ -переходов в ядрах, “мягких” относительно β -колебаний”,
Ядерная физика, том. 63, № 4, 2000, с. 633–637.
5. Yu.V. Palchikov, J. Dobes and R.V. Jolos,
“ $T = 0$ and $T = 1$ pairing and formation of four-particle correlated structures in the ground states of $Z = N$ nuclei”,
Phys. Rev. C 63, 034320 (2001)

Рукопись поступила в издательский отдел
2 ноября 2001 года.

Макет Н.А. Киселевой

Подписано в печать 02.11.2001
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 0,83
Тираж 100. Заказ 52939.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области