

H 62

4-89-406

УДК 539.142/143

НИКОЛАЕВА  
Румяна Маринова

ИЗОСПИНОВАЯ СТРУКТУРА  
НИЗКОЛЕЖАЩИХ СОСТОЯНИЙ  
СФЕРИЧЕСКИХ ЯДЕР

Специальность: 01.04.16 -  
физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. За последние годы накоплен значительный объем данных, указывающих на существование в четно-четных сферических ядрах при энергиях возбуждения  $E_x \sim 2-3$  МэВ квадрупольных состояний, изотопическая структура которых заметно отличается от изотопической структуры хорошо изученных квадрупольных вибраций. Для этих состояний характерен относительно большой MI-переход (порядка  $0,3 \mu_0^2$ ) на первые возбужденные  $2^+$ -уровни. Такие состояния по-разному возбуждаются в реакциях неупругого рассеяния частиц с разными изотопическими спинами на ядрах. Они имеют, в основном, неколлективную природу. Упрощенное представление о таких состояниях дает картина противфазных квадрупольных колебаний нейтронной и протонной систем.

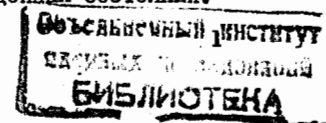
Для анализа свойств таких состояний используются различные, в большей части феноменологические ядерные модели, основанные на геометрических (теоретико-групповых) представлениях. Возбужденные состояния в таких моделях связываются только с коллективными степенями свободы. Такое рассмотрение низколежащих состояний четно-четных сферических ядер в рамках коллективных моделей действительно оправдано тем, что в области малых энергий возбуждения ядер в большинстве своем не сводятся к однонуклонным. Однако среди них встречаются состояния разной степени коллективности, что и требует рассмотрения наряду с коллективными также и неколлективных степеней свободы.

Кроме того, взаимодействие коллективных и неколлективных возбуждений играет решающую роль в определении структуры низколежащих состояний ядер.

Вышесказанное объясняет актуальность использования при описании структуры таких состояний сложных ядер и ядерных характеристик некоторого микроскопического подхода, общего в широком диапазоне ядер и их возбуждений. Идеи такого подхода, высказанные в 70-х годах в работах В.Г. Соловьева, привели к созданию квазичастично-фононной модели ядра (КФМ), в которой ядерные возбуждения генерируются квазичастичными и фононными операторами.

Такая микроскопическая модель дает возможность на основе фононного базиса описать состояния разной степени коллективности и раскрыть определяющую роль взаимодействия фононов в изоспиновой структуре наблюдаемых ядерных состояний.

Так как фононные операторы модели строятся из квазичастичных фермионных операторов, они не являются идеальными бозонными операторами. Последнее обстоятельство обуславливает возникновение проблемы учета требований, возникающих из принципа Паули, в вычислениях структуры возбужденных состояний.



Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук  
профессор

Ч. СТОЯНОВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
профессор

Э. НАДЖАКОВ

кандидат физико-математических наук  
доцент

С. П. ИВАНОВА

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Ленинградский государственный университет.

Автореферат рецензия " " " 1989 г.

Защита диссертации состоится на заседании специализированного совета К047.01.01 в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований " " " 1989 г. по адресу г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь совета  
кандидат физико-математических наук

А. Е. ДОРОХОВ

Цель работы состоит в теоретическом изучении в рамках КФМ изоспиновой структуры низколежащих состояний сферических ядер, в проверке влияния точного учета фермионной структуры фононных операторов на свойства двухфононных состояний сферических ядер, в исследовании возможности наблюдения изовекторных состояний в реакциях неупругого рассеяния частиц на ядрах.

Научная новизна и практическая ценность. Впервые в микроскопической модели теоретически проанализирована широкая область четно-четных сферических ядер с целью обнаружения низколежащих квадрупольных состояний изовекторного типа. Показана зависимость возникновения изовекторных состояний от распределения квазичастиц по орбиталям.

Проведенное исследование влияния взаимодействия фононов на изоспиновую структуру низколежащих квадрупольных состояний обнаруживает определяющую роль этого взаимодействия в структуре наблюдаемых состояний.

Исследовано проявление динамических свойств ядра в реакциях неупругого рассеяния частиц с разными изотопическими спинами. Показано, что наличие значительной изовекторной компоненты в структуре квадрупольного состояния приводит к существенному различию в сечениях его возбуждения частицами, различающимися изотопспином. Исследовано влияние корректного учета фермионной структуры фононных операторов на двухфононные возбуждения сферических ядер. Впервые на примере ряда сферических ядер численно показано, что переход от коммутационных соотношений приближения случайных фаз к точным практически не сказывается на состояниях с большой двухфононной компонентой. Отсюда следует вывод, что в некоторых сферических ядрах могут быть измерены достаточно чистые двухфононные состояния.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на семинарах ЛФ ОИЯИ, в Центральном институте ядерных исследований (Дрезден, ГДР), на 33-м и 35-м Всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре ядра в Ленинграде и Юрмале, на Международной конференции Европейского физического общества (Болгария, 1986 г.), на семинаре "Одночастичные и коллективные состояния атомных ядер" (Дубна, 1987 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 работ.

Структура и объем диссертаций. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Она содержит 95 страниц машинописного текста, 2 рисунка и 15 таблиц, расположенных в тексте. Список литературы включает 75 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность проблемы обнаружения низколежащих изовекторных состояний в ядрах и коротко излагается содержание диссертации по главам. Приводится обзор литературы по рассматриваемым в работе вопросам.

Первая глава посвящена изучению изоспиновой структуры однофононных состояний четно-четных сферических ядер. В первых двух параграфах излагается формализм квазичастично-фононной модели ядра.

В § 1.1 дана формулировка гамильтониана модели применительно к описанию однофононных электрических состояний. Гамильтониан КФМ включает средние поля для нейтронов и протонов, задающиеся в виде потенциала Вудса-Саксона, спаривательные взаимодействия в нейтронной и протонной системе и мультиполь-мультипольные силы изоскалярного и изовекторного типа. Обсуждается выбор параметров модели и вида сепарабельных взаимодействий.

В § 1.2 приведен вывод уравнений квазичастично-фононной модели ядра. От гамильтониана, записанного в переменных частичных операторов, посредством преобразований Боголюбова делается переход к переменным операторам квазичастиц, после чего таким образом записанный гамильтониан диагонализуется в пространстве фононных возбуждений. Энергии и волновые функции фононных возбуждений вычисляются в приближении случайных фаз.

В § 1.3 исследуется изоспиновая структура однофононных квадрупольных состояний электрического типа. Для квазичастично-фононной модели ядра хорошей качественной характеристикой изоспиновой структуры состояний является отношение приведенных вероятностей изовекторных  $V(IV, E_2)$  и изоскалярных  $V(IS, E_2)$  квадрупольных переходов:

$$V(IV, E_2) = \left| \langle \mathcal{R}_i^+ \left\| \sum_k^p \gamma_k^2 Y_{2\mu}(\Omega_k) - \sum_n^p \gamma_n^2 Y_{2\mu}(\Omega_n) \right\| \psi_0 \right|^2,$$

$$V(IS, E_2) = \left| \langle \mathcal{R}_i^+ \left\| \sum_k^p \gamma_k^2 Y_{2\mu}(\Omega_k) + \sum_n^p \gamma_n^2 Y_{2\mu}(\Omega_n) \right\| \psi_0 \right|^2.$$

Теоретические расчеты для большой группы сферических четно-четных ядер ( $80 \leq A \leq 140$ ) показали, что при энергии возбуждения  $E_x \sim 2-3$  МэВ во многих ядрах обнаруживаются  $2^+$ -состояния, для которых отношение  $V=V(IV, E_2)/V(IS, E_2)$  гораздо больше единицы. Результаты, приведенные в таблице I, указывают на то, что состояния эти неколлективны. Они проявляются в ядрах, где нейтронные и протонные двухквазичастичные полосы расположены близко. Расчеты не обнаруживают изовекторные  $2^+$ -состояния в полумагических ядрах (в изотопах Sn и изотопах с числом нейтронов  $N=50, 82$ ). Также не обнаружены они в изотопах

Sr, Zr, Mo, Ru и Pd с числом нейтронов  $N \approx 50$ . В структуре изовекторных квадрупольных состояний Sr с числом нейтронов  $52 \leq N \leq 58$  и изотопов Zr с числом нейтронов  $52 \leq N \leq 56$  преобладают недиагональные двухквazi-частичные компоненты, тогда как структура этих состояний в изотопах Mo, Xe, Ba и  $^{56}\text{Fe}$  определяется исключительно диагональными компонентами. В изотопах Ru и Pd встречаются изовекторные квадрупольные состояния обоих типов.

Таблица 1. Энергии, структурные амплитуды  $\psi_n$  и  $\psi_p$  и отношение в для  $2_{IV}^+$ -фононов, двухквaziчастичные нейтронные  $P_N$ , протонные  $P_Z$  полюсы

Изотоп	$Z_1$	$E$ МэВ	$\nu$	$\psi_n$	%	$\psi_p$	%	$P_N$ МэВ	$P_Z$ МэВ
$^{94}\text{Sr}$	$2_2^+$	2,707	3	$2d_{5/2}2d_{5/2}$	2	$2p_{3/2}2p_{5/2}$	60	2,75	2,65
	$2_3^+$	2,828	5	$2d_{5/2}2d_{5/2}$	80	$2f_{5/2}2p_{1/2}$	11	3,35	3,39
$^{98}\text{Ru}$	$2_2$	2,810	4	$2d_{5/2}2d_{5/2}$	82	$1g_{9/2}1g_{9/2}$	14	2,70	2,74
	$2_3$	3,157	5	$2d_{5/2}1g_{7/2}$	95	$1g_{9/2}1g_{9/2}$	4	3,14	2,74
$^{130}\text{Xe}$	$2_2$	2,066	7	$1h_{11/2}1h_{11/2}$	2	$1g_{7/2}1g_{7/2}$	50	2,06	2,02
	$2_4$	2,247	9.5	$1h_{11/2}1h_{11/2}$	36	$1d_{5/2}1d_{5/2}$	45		

С изовекторных квадрупольных состояний идут значительные, порядка  $0.4 \mu_2^2$ , M1-переходы на изоскалярное  $2_1^+$ -состояние. Показано, что сила M1-перехода задается как орбитальным, так и спиновым членами магнитного оператора, хотя следует подчеркнуть преобладающую роль орбитального вклада.

В четвертом параграфе приводятся основные результаты первой главы.

Вторая глава диссертации в основном посвящена исследованию влияния паулиевских корреляций на структуру двухфононных возбуждений. В § 2.1 приведены уравнения для энергий и структурных коэффициентов волновых функций возбужденных состояний четно-четных сферических ядер, учитывающие взаимодействие одно- и двухфононных состояний. Принцип Паули требует использования коммутационных соотношений для операторов фононных возбуждений, следующих из фермионного представления для их структуры. Это приводит к появлению дополнительных множителей  $k^J$  в секулярном уравнении и к сдвигу двухфононных полюсов  $\Delta \omega$ .

В § 2.2 на примере ряда изотопов Sn, Sm,  $^{146}\text{Gd}$  и  $^{208}\text{Pb}$  показано, что фактор  $k^J$  и сдвиг полюсов для низколежащих состояний сферических ядер невелики. На этом основании можно предполагать, что в сферических ядрах в низкоэнергетической части спектра могут быть обнаружены состояния со значительной двухфононной компонентой в их структуре.

В параграфе § 2.3 суммированы основные результаты второй главы.

В третьей главе диссертации исследуется влияние взаимодействия фононов на изоспиновую структуру низколежащих квадрупольных состояний. Известно, что при энергиях возбуждения  $E_x \sim 2-3$  МэВ важную роль играет взаимодействие однофононных и двухфононных компонент.

В § 3.1 показано, что в результате смешивания  $2^+$ -фононов меняется изоспиновая структура квадрупольных состояний. Существенно меняется положение изовекторных состояний в спектрах возбуждений ядер. Из таблицы 2 видно, что, например, для  $^{56}\text{Fe}$  изовекторным теперь оказалось  $2_3^+$ -состояние, а не  $2_2^+$ , как это было в приближении случайных фаз.

Таблица 2. Энергии, приведенные вероятности электрических E2-переходов и отношение вероятностей изовекторных  $B(IV)$  и изоскалярных  $B(IS)$  квадрупольных переходов для некоторых  $2^+$ -состояний  $^{56}\text{Fe}$

$J$ $\lambda_1$	$E_x$ , МэВ эксп.	$B=B(IV)/B(IS)$		$B(E2, 0^+_{gr. s.} 2_1^+) e^2 \text{fm}^4$				
		теор.	теор.	эксп.	теор.			
		ПСФ $q^+ + q^+ q^+$	ПСФ $q^+ + q^+ q^+$		ПСФ $q^+ + q^+ q^+$			
$2_1^+$	0,847	0,860	0,701	0,004	0,008	$970 \pm 20$	1362	678
$2_2^+$	2,650	2,790	2,520	14,50	0,73	$12 \pm 1$	3,0	10,4
$2_3^+$	2,960	3,802	2,995	0,028	9,15	$10 \pm 4$	16,9	1,2
$2_4^+$	3,370	4,079	3,330	0,007	0,15	$40 \pm 3$	15,9	5,0

Наблюдается также фрагментация силы M1-перехода по состояниям, что существенно приближает теоретические расчеты к экспериментальным данным (таблица 3).

Далее показано, что для некоторых ядер, например  $^{140}\text{Ba}$  и  $^{144}\text{Nd}$ , при включении взаимодействия между фононами изовекторный характер низколежащих квадрупольных колебаний исчезает.

Таблица 3. Вероятности E2-, M1-переходов и коэффициенты смешивания между некоторыми 2<sup>+</sup>-состояниями ядра <sup>56</sup>Fe

	B(M1) $\mu_0^2$		B(E2) $e^2 fm^4$		(E2/M1)			
	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.		
	ПСФ		q <sup>+</sup> +q <sup>+</sup> q <sup>+</sup>		q <sup>+</sup> q <sup>+</sup> q <sup>+</sup>		q <sup>+</sup> +q <sup>+</sup> q <sup>+</sup>	
2 <sub>1</sub> <sup>+</sup> → 2 <sub>2</sub> <sup>+</sup>	0,22(7)	1,30	0,16	34 <sup>±11</sup>	4,7	-0,17	-0,18	-0,45
2 <sub>1</sub> <sup>+</sup> → 2 <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0,14(4)	0,16	0,95	36 <sup>+14</sup> <sub>-9</sub>	36,4	-0,27	+0,19	-0,65
2 <sub>1</sub> <sup>+</sup> → 2 <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,12(5)	0,19	0,38	6 <sup>±2</sup>	6,6	-0,25	-	-0,36

В § 3.2 обсуждаются возможные экспериментальные свидетельства в пользу обнаружения низколежащих изовекторных квадрупольных состояний в реакциях неупругого рассеяния частиц с различным изоспином на ядрах. Показано, что наличие значительной изовекторной компоненты в структуре возбужденных состояний приводит к тому, что они по-разному возбуждаются в таких реакциях. Рассчитанные в диссертации в рамках КФМ нейтронные и протонные матричные элементы перехода, определяющие сечения  $\sigma(p,p')$  и  $\sigma(d,d')$ , показывают, что в <sup>56</sup>Fe и <sup>142</sup>Ce могут быть обнаружены изовекторные 2<sup>+</sup>-состояния в этих реакциях.

В параграф 3.3 вынесены основные результаты главы 3.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В квазичастично-фононной модели ядра микроскопически рассчитана изоспиновая структура низколежащих квадрупольных состояний в большой области четно-четных сферических ядер. Показано, что в приближении случайных фаз во многих ядрах при энергии возбуждения 2-3 МэВ обнаруживаются однофононные состояния с четко выраженным изовекторным характером. Эти состояния в основном неколлективны.

2. Изоспиновая структура квадрупольных состояний весьма чувствительна к константам спаривательного взаимодействия, определяющего распределение квазичастиц по уровням. Изовекторные квадрупольные состояния появляются в ядрах, где существуют близко расположенные нейтронные и протонные двухквазичастичные полюсы. Квадрупольные состояния с изовекторной структурой не обнаружены в расчетах для полумангнетических ядер.

3. Показано, что учет взаимодействия фононов меняет теоретическую изоспиновую структуру 2<sup>+</sup>-состояний, что существенно изменяет расположение изовекторных состояний в спектре возбуждений ядер. Для

ядер <sup>140</sup>Ba и <sup>144</sup>Nd показано, что изовекторный характер квадрупольных низколежащих колебаний вообще исчезает.

4. Включение в волновую функцию возбужденного состояния ядра двухфононных компонент ставит вопрос о корректном учете фермионной структуры фононных операторов. На примере конкретных сферических ядер показано, что переход от коммутационных соотношений приближения случайных фаз к точным (учитывающим паулиевские корреляции) практически не сказывается на состояниях с большой двухфононной компонентой в сферических ядрах.

5. Исследовано проявление динамических свойств ядра в реакциях неупругого рассеяния частиц с разными изотопическими спинами. Наличие значительной изовекторной компоненты в структуре возбужденного состояния приводит к тому, что оно по-разному возбуждается в реакциях неупругого рассеяния протонов и дейтронов. Рассчитанные в рамках КФМ нейтронные и протонные матричные элементы перехода, определяющие сечения  $\sigma(p,p')$  и  $\sigma(d,d')$ , показывают, что в <sup>56</sup>Fe и <sup>142</sup>Ce могут быть обнаружены низколежащие изовекторные квадрупольные состояния в таких реакциях.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Соловьев В.Г., Стоянов Ч., Николаева Р. Влияние учета принципа Паули на двухфононные состояния сферических ядер. Изв. АН СССР, сер. физ., 1983, т. 47, № II, с. 2082-2088.
2. Николаева Р.М. Описание возбужденных коллективных состояний ядра <sup>146</sup>Gd. Изв. АН СССР, сер. физ., 1985, т. 49, № II, с. 2192-2194.
3. Николаева Р.М. Двухфононные состояния в ядре <sup>208</sup>Pb. Препринт ОИЯИ Р4-86-102, 1986.
4. Вдовин А.И., Николаева Р., Стоянов Ч. Низколежащие изовекторные состояния в сферических ядрах. Тезисы докладов XXXVII Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, 14-17 апреля 1987, Юрмала. Л.: Наука, с.175.
5. R.Nikolaeva, A.Vdovin. Low-lying Noncollective Isovector Quadrupole states. Proceedings of the International Conference on Selected topics in Nuclear Structure. Д4-89-327, 1989, JINR, Dubna.
6. R.Nikolaeva, A.Vdovin, Ch.Stoyanov. Microscopic Description of Low-lying Isovector Quadrupole states in <sup>56</sup>Fe. Europhys. Lett, 1989, v. 8(2), p. 117-121.
7. R.Nikolaeva. Microscopic description of Neutron and Proton Transition moments in Spherical Nuclei. JINR Rapid Communications, 1989, v. 2(35), p. 17-21.

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 июня 1989 года.