

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б - 277

4-84-797

УДК 539.142

БАСТРУКОВ
Сергей Иванович

**НИЗКОЛЕЖАЩИЕ НЕРОТАЦИОННЫЕ СОСТОЯНИЯ
В ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЯДРАХ**

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1984

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:

доктор физико-математических наук
профессор

В.Г.СОЛОВЬЕВ

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

В.О.НЕСТЕРЕНКО

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

С.И.ДРОЗДОВ

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Н.А.МОРОЗОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва

Автореферат разослан "___" _____ 1984 года

Защита диссертации состоится "___" _____ 1985 года на заседании Специализированного совета КО.47.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических наук

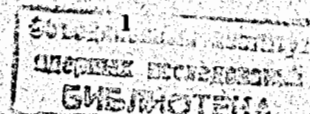
В.И.ДУРАВЛЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Микроскопические методы описания структуры состояний сложных ядер к настоящему моменту представляют одно из наиболее актуальных направлений современной теоретической ядерной физики. Значительным достижением в данной области исследований явилось утверждение микроскопических моделей, описывающих на единой физической основе различные характеристики ядра в широком диапазоне энергий возбуждения. Одной из таких моделей является квазичастично-фононная модель ядра. Эта модель успешно применялась для изучения свойств низколежащих состояний ядер, нейтронных и радиационных силовых функций, электрических магнитных и зарядово-обменных гигантских резонансов в сферических и деформированных ядрах. В рамках этой модели установлены общие закономерности фрагментации одноквазичастичных и однофононных состояний, выяснена важная роль взаимодействия квазичастиц с фононами в усложнении структуры ядерных состояний по мере возрастания энергии возбуждения. Эта модель выгодно отличается простотой своего практического применения, позволяющей проводить численные расчеты как для анализа уже имеющихся экспериментальных данных, так и для предсказания новых эффектов.

Большое внимание в проводимых в настоящее время ядерно-структурных исследованиях уделяется изучению деформированных ядер. Вновь возникший интерес к изучению низкоэнергетической, так называемой спектроскопической, области возбуждений этих ядер стимулирован получением новых экспериментальных данных, точность и надежность которых требует дальнейшего развития теории. Наиболее существенным результатом последних экспериментов является то, что они позволяют с большей достоверностью судить о справедливости тех или иных теоретических приближений. В частности, при описании структуры нижестоящих неротационных возбуждений представляется возможным выяснить границы применимости квазифононного приближения. В этой связи интересно исследовать влияние квазичастичных корреляций в основных состояниях четно-четных ядер на свойства низколежащих коллективных возбуждений.

В А-нечетных деформированных ядрах, уже при энергиях возбуждения более 0,5 МэВ, структура состояний значительно усложняется. Их описание на основе квазифононного приближения не всегда может быть достаточно корректным, поскольку в состояниях "квазичастица ⊗ фонон" из-за тождественности квантовых чисел нечетных квазичастиц и квазичастиц, формирующих фонон, может возникнуть нарушение принципа Паули. По этой причине возникает необходимость микроскопического анализа усложнения структуры состояний, обусловленного связью одноквазичастичных и коллективных мод с учетом квазичастичной структуры последних.



Цель работы - изучение структуры низколежащих неротационных возбуждений в деформированных ядрах редкоземельных элементов и актинидов: 1. Исследование влияния корреляций квазичастиц в основных состояниях четно-четных ядер на структуру однофононных состояний. 2. Изучение роли принципа Паули при описании вибрационных состояний и вероятностей ЕЛ-переходов в нечетных ядрах. 3. Сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными, а также некоторые теоретические предсказания.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации предложено дальнейшее развитие квазичастично-фононной модели для описания низколежащих неротационных состояний деформированных ядер.

Исследование корреляций в основных состояниях четно-четных ядер с учетом изоскалярного и изовекторного остаточного взаимодействий позволило сделать вывод о несущественности данного эффекта при описании низколежащих состояний.

Новым вкладом является формулировка последовательной процедуры учета принципа Паули при описании нечетных ядер. Получены основные уравнения, позволяющие корректнее описывать энергии, структуру вибрационных состояний и вероятности ЕЛ-переходов, принимая во внимание квазичастичную структуру фононов. На основании этих уравнений проведены численные расчеты характеристик низколежащих состояний нечетных ядер, которые дают возможность судить, в каких случаях можно ограничиться квазибозонным приближением и когда необходимо выходить за его рамки, учитывая принцип Паули.

Исследованы Е2 ($\Delta K=2$)-переходы, дающие важную информацию о вибрационных компонентах состояний. Показано, что учет поправок, обусловленных принципом Паули, может приводить к заметному изменению величины В(Е2). Продемонстрирована важная роль малых χ -вибрационных компонент при описании Е2 ($\Delta K=2$)-переходов.

Апробация диссертации. Результаты, представленные в диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, 32 и 34 Сессиях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Киев, 1982; Алма-Ата, 1984), 15 семинаре по ядерной физике "Россендорф-Краков-Ржеж-Киев" (Либлице, Чехословакия, 1983), Международном симпозиуме по ядерной спектроскопии в пучке (Дебрецен, Венгрия, 1984).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано шесть работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав основного содержания и заключения, содержит 88 страниц машинописного текста, 13 таблиц и библиографический список литературы из 117 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит краткую характеристику микроскопического подхода, в рамках которого сформулирована квазичастично-фононная модель ядра. Перечислены основные достижения модели. Кратко освещены некоторые современные проблемы, связанные с изучением низколежащих состояний в деформированных ядрах. Обоснована необходимость дальнейшего развития модели с целью получения более достоверной информации о структуре нижайших возбуждений.

В главе I §§ 1 и 2 носят преимущественно вводный характер. В них кратко сформулированы основные положения квазичастично-фононной модели применительно к деформированным ядрам.

В § 1 строится гамильтониан квазичастично-фононной модели. Гамильтониан включает среднее поле (потенциал Сексона-Вудса), короткодействующую часть остаточного взаимодействия, приводящую к парным корреляциям сверхпроводящего типа, дальнедействующую часть остаточного взаимодействия в виде мультипольных сил. В § 2 приведены основные уравнения модели для описания однофононных возбуждений в четно-четных деформированных ядрах.

В § 3 с целью оценки точности расчетов, проводимых в рамках квазибозонного приближения, рассмотрено влияние корреляций квазичастиц в основных состояниях четно-четных ядер на структуру однофононных состояний. Показано, что изовекторная часть взаимодействия уменьшает роль корреляций. На основании расчетов сделан вывод о несущественности данного эффекта при описании жестких деформированных ядер. Об этом свидетельствуют представленные в таблице I данные о структуре состояний для случаев приближения хаотических фаз - ПХФ, и приближения хаотических фаз с учетом корреляций - ПХФ(К) как с учетом только изоскалярных ($\chi_1^{\text{is}} = 0$), так и при одновременном учете изоскалярных и изовекторных ($\chi_1^{\text{is}} \neq 0$) остаточных мультипольных сил.

Главе II диссертации посвящено построению варианта квазичастично-фононной модели, предназначенного для описания низколежащих неротационных состояний в нечетных деформированных ядрах с учетом принципа Паули.

В § I формулируется процедура последовательного учета принципа Паули, которая заключается в использовании точных перестановочных соотношений между квазичастичными и фононными операторами с учетом квазичастичной структуры последних. При этом использован следующий вид волновой функции А-нечетного ядра:

$$\Psi_n(K_0, \pi, \sigma_0) = \left\{ \sum_{q_0} C_{q_0}^n L_{q_0}^+ + \sum_{q_1} \sum_{\sigma_1} D_{q_1}^n \delta_{K_0 \sigma_1 \pi_1; K_0 \sigma_0} L_{q_1}^+ Q_{q_1}^+ \right\} \Psi_n(I)$$

ψ_0 - фононный вакуум, $L_{q\sigma}^+$, $Q_{q\sigma}^+$ - операторы рождения квази-частицы на уровне среднего поля q (асимптотические квантовые числа) и фонона мультипольности λ с проекцией μ ; $q = \lambda \mu i$, i - номер однофононного состояния с данными $\lambda \mu$. $C_{q\sigma}^n$, D_{qq}^n - весовые коэффициенты квазичастичной компоненты и компоненты "квазичастицы \otimes фонон", определяющие структуру состояния K_0^π . σ - знак проекции полного углового момента на ось симметрии ядра ($\sigma = \pm 1$). Символ Кронекера $\delta_{k_1 k_2 \mu_1 \mu_2; k_0 \sigma_0}$ указывает на то, что квазичастица и фонон могут быть связаны только в соответствии с заданными правилами отбора.

Далее с помощью вариационного принципа получены уравнения для описания нечетных ядер, в которых принцип Паули учитывается явно. В случае, когда в первом члене волновой функции (I) ограничиваемся только одной одноквазичастичной компонентой, секулярное уравнение, определяющее энергии состояний η_n нечетного ядра, записывается следующим образом:

$$E_{q_0} - \eta_n - \frac{1}{2} \sum_{qq} \frac{1}{Y_q} \frac{(v_{q\sigma}^{-1} f_{q\sigma}^{\lambda \mu})^2 (1 + S^{K_0}(qq|qq))}{E_q + \omega_q + \Delta^{K_0}(qq) - \eta_n} = 0. \quad (2)$$

Таблица I

Структура однофононных состояний $\lambda \mu i = 221$ в ^{168}Er и $\lambda \mu i = 301$ в ^{228}Th для случаев ПХФ и ПХФ(К)

Ядро	Двухквазичастичные компоненты фонона	Вклад в нормир. фонона, %			
		$x_1^{\lambda \mu} = 0$		$x_1^{\lambda \mu} = -1,5 x_0^{\lambda \mu}$	
		ПХФ	ПХФ(К)	ПХФ	ПХФ(К)
^{168}Er	523 \downarrow 521 \downarrow	34	32	27	26
	411 \uparrow 411 \downarrow	15	15	24	24
	521 \uparrow 521 \downarrow	16	15	13	12
	413 \downarrow 411 \uparrow	5	5	8	8
^{228}Th	752 \uparrow 633 \downarrow	47	35	39	29
	530 \uparrow 660 \uparrow	6	7	10	11
	521 \uparrow 651 \uparrow	5	6	8	9
	761 \uparrow 631 \uparrow	6	7	5	6

Здесь E_q - одноквазичастичная энергия, ω_q - энергия фонона, $f_{q\sigma}^{\lambda \mu}$ - одночастичный матричный элемент, Y_q - коллективная характеристика фонона, $v_{q\sigma}^{-1} = u_q u_q - v_q v_q$, где u_q и v_q - коэффициенты линейного канонического преобразования Боголюбова.

Условие нормировки для функции (I) имеет вид

$$(C_{q\sigma}^n)^2 + \sum (D_{qq}^n)^2 (1 + S^{K_0}(qq|qq)) = 1. \quad (3)$$

Из (2) и (3) видно, что учет принципа Паули приводит к появлению множителя $(1 + S^{K_0}(qq|qq))$, подавляющего компоненту "квазичастица \otimes фонон" в той степени, в какой в ней нарушен принцип Паули ($-1 \leq S^{K_0}(qq|qq) \leq 0$). Кроме того, происходит сдвиг полюса секулярного уравнения на величину

$$\Delta^{K_0}(qq) = \frac{1}{4x_0^{\lambda \mu}} \sum_i \frac{S^{K_0}(\lambda \mu i | q_1 q_2 \lambda \mu i)}{\sqrt{Y_{\lambda \mu i} Y_{\lambda \mu i}}}, \quad (4)$$

что приводит к сдвигу корня в сторону больших энергий. Если для состояния с данными K_0^π нарушения принципа Паули в компоненте "квазичастица \otimes фонон" не происходит, то (2) и (3) переходят в известные уравнения квазибозонного приближения, так как в этом случае

$$S^{K_0}(qq|qq) = 0.$$

В § 2 изучается влияние принципа Паули на свойства состояний "квазичастица \otimes фонон". В таблице 2 даны значения $S^{K_0}(qq|qq)$ и $\Delta^{K_0}(qq)$ для 2 состояний ядра ^{159}Gd , демонстрирующие влияние принципа Паули. Состояния с $K_0^\pi = 7/2^-$ и $1/2^-$ образованы квазичастицей $521 \uparrow$ и гамма-вибрационным фононом $\lambda \mu i = 221$. Квазичастица $521 \uparrow$ также входит в компоненту $111 \uparrow 521 \downarrow$ фонона $\lambda \mu i = 221$. Для этих состояний имеем

$$K = K_{521 \uparrow} + 2 = K_{521 \uparrow} + (K_{521 \uparrow} + K_{521 \uparrow}) = 7/2,$$

$$K = |K_{521 \uparrow} - 2| = |K_{521 \uparrow} - (K_{521 \uparrow} + K_{521 \uparrow})| = 1/2.$$

Видно, что в первом случае проекции $K_{521 \uparrow}$ нечетной квазичастицы и квазичастицы из компоненты фонона имеют одинаковые знаки, что запрещено принципом Паули, а во втором случае - разные знаки, т.е. без нарушения принципа Паули. В результате, как следует из таблицы 2, функциям $S^{K_0}(qq|qq)$ и сдвиги $\Delta^{K_0}(qq)$ велики в случае $K_0^\pi = 7/2^-$ и малы для $K_0^\pi = 1/2^-$.

В § 3 проведен анализ имеющихся экспериментальных данных по гамма-и октапольно-вибрационным состояниям в нечетных деформированных ядрах. В таблице 3 для некоторых ядер приведены сдвиги центроидов энергий вибрационных состояний $\Delta \eta$. Из таблицы 3 видно, что все состояния можно приближенно разбить на три группы. В первую группу включены состояния, для которых принцип Паули не нарушен или нарушен слабо (см., например, $3/2^-$, $11/2^-$ в ^{165}Ho , $3/2^+$ в ^{167}Er). Для этих состояний верны результаты расчетов в рамках квазибозонного приближения. Ко второй группе отнесены состояния, характеристики которых несколько изменятся при учете принципа Паули ($5/2^+$ в ^{165}Ho , $11/2^+$ в ^{167}Er ,

$1/2^-$ в ^{239}U). Третью группу составляют состояния, структура и энергия которых кардинально меняется при учете принципа Паули ($3/2^-$ в ^{169}Yb , $3/2^+$ в ^{233}Th).

Изучение низколежащих вибрационных состояний в А-нечетных деформированных ядрах позволяет заключить, что теория в целом удовлетворя-

Таблица 2. Функции $S^{K_0}(g_1g_2)$ и сдвиги полюсов секулярного уравнения $\Delta^{K_0}(g_1)$ в ^{159}Gd .

K_0^π	Компонента $[\text{Nhz}\Lambda] \otimes \lambda \mu \nu$	$S^{K_0}(g_1g_2)$	$\Delta^{K_0}(g_1)$ МэВ
$7/2^-$	$521 \uparrow \otimes 221$	-0,34	1,8
$1/2^-$	$521 \uparrow \otimes 221$	-0,01	0,07

Таблица 3. Сдвиги центроидов энергии $\Delta \epsilon$ вибрационных состояний в нечетных ядрах

Ядро	K^π	Компонента $[\text{Nhz}\Lambda] \otimes \lambda \mu \nu$	Эксперим. энергия, мэВ	$\Delta \epsilon$, МэВ	Влияние принципа Паули
^{155}Sm	$3/2^+$	$521 \uparrow \otimes 301$	1,107	2	Сильное
^{161}Tb	$1/2^+$	$411 \uparrow \otimes 221$	0,517	0,02	Очень слабое
^{165}Ho	$3/2^-$	$523 \uparrow \otimes 221$	0,514	0,001	Очень слабое
	$11/2^-$	$523 \uparrow \otimes 221$	0,689	0,01	Очень слабое
	$5/2^+$	$411 \downarrow \otimes 221$	0,995	0,2	Небольшое
^{167}Er	$3/2^+$	$633 \uparrow \otimes 221$	0,532	0,01	Очень слабое
	$11/2^+$	$633 \uparrow \otimes 221$	0,711	0,4	Небольшое
^{169}Yb	$3/2^+$	$633 \uparrow \otimes 221$	0,720	0,01	Очень слабое
	$3/2^-$	$521 \downarrow \otimes 222$	0,660	1,5	Сильное
^{233}Th	$3/2^-$	$743 \uparrow \otimes 221$	0,573	0,01	Очень слабое
	$3/2^+$	$631 \downarrow \otimes 221$	0,815	1,0	Сильное
	$1/2^-$	$631 \downarrow \otimes 301$	0,682	0,6	Небольшое
^{233}U	$5/2^-$	$633 \downarrow \otimes 301$	0,748	2	Сильное
^{237}Np	$5/2^-$	$642 \uparrow \otimes 301$	0,721	0,001	Очень слабое
^{239}U	$1/2^+$	$622 \uparrow \otimes 221$	0,687	0,001	Очень слабое
	$1/2^-$	$631 \downarrow \otimes 301$	0,814	0,2	Небольшое
	$3/2^+$	$631 \downarrow \otimes 221$	0,965	0,4	Небольшое
^{239}Pu	$1/2^-$	$631 \downarrow \otimes 301$	0,470	0,5	Небольшое

тельно описывает данные эксперимента. Было бы интересно провести дополнительные экспериментальные исследования с целью окончательной проверки сделанных теоретических предсказаний.

Глава III диссертации посвящена изучению приведенных вероятностей электрических переходов в нечетных деформированных ядрах с учетом принципа Паули.

В § I подучены и детально проанализированы формулы для приведенных вероятностей E λ -переходов в нечетных деформированных ядрах.

Таблица 4

Структура состояний $I_i^{\pi_i} K_i = 1/2^- 1/2$ и $I_f^{\pi_f} K_f = 5/2^- 5/2$ в ^{165}Er и приведенная вероятность $E2(\Delta K=2)$ -перехода между ними с эффективными зарядами $e_{eff}^n = 0,1$ и $e_{eff}^p = 1,1$

Структура i	Структура f	$B(E2, \Delta K=2), e^2 b^2 \cdot 10^{-2}$		
		$S \neq 0$	$S = 0$	Эксп.
$521 \downarrow$ 87%	$523 \downarrow \otimes 221$ 6%	1,1	1,4	1,1
$510 \uparrow$ 2%	$521 \uparrow \otimes 221$ 3%			
	$521 \uparrow \otimes 221$ 0,5%			
	$523 \downarrow$ 97%			
	$411 \downarrow \otimes 221$ 0,4%			
	$521 \downarrow \otimes 221$ 0,3%			

В § 2 представлены расчеты приведенных вероятностей E2($\Delta K=2$)-переходов. Из таблицы 4 видно, что учет поправок, обусловленных принципом Паули, может приводить к заметному изменению величины B(E2). В отдельных случаях величины B(E2) изменялись в 1,5-2 раза, что говорит о важности его учета.

Показано, что в случае коллективного 2_1^+ состояния в четно-четном остове, даже малые гамма-вибрационные примеси состояний (порядка 1%) нечетного ядра могут дать определяющий вклад в E2($\Delta K=2$)-переход.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Основные результаты, выдвигаемые для защиты:

1. В рамках квазичастично-фононной модели ядра исследовано влияние корреляций квазичастиц в фононном вакууме на свойства нижайших коллективных возбуждений. Показано, что даже в случае сильно коллективизированных состояний эффект является небольшим. Поэтому, при описании низколежащих возбуждений деформированных ядер его можно не учитывать.

2. Развита процедура последовательного учета принципа Паули, которая заключается в использовании точных перестановочных соотношений между операторами квазичастиц и фононов. Получена система уравнений

для определения основных характеристик низколежащих неротационных возбуждений нечетных деформированных ядер с учетом принципа Паули.

3. На основе полученных уравнений проведен численный анализ обширного экспериментального материала по гамма- и октупольно-вибрационным состояниям в нечетных ядрах, позволяющий рассмотреть вопрос о том, в каких случаях в нечетных ядрах могут существовать вибрационные уровни.

4. Исследованы $E2$ ($K=2$) переходы, дающие важную информацию о вибрационных компонентах состояний. Показано, что учет поправок, обусловленных принципом Паули, может приводить к заметному изменению величины $B(E2)$. Продемонстрирована важная роль малых гамма-вибрационных компонент при описании $E2$ ($K=2$)-переходов.

5. Представленные в диссертации результаты расчетов удовлетворительно воспроизводят экспериментальные данные и служат дальнейшему развитию квазичастично-фононной модели ядра.

Л и т е р а т у р а

1. Соловьев В.Г., Нестеренко В.О., Баструков С.И. Учет принципа Паули при описании состояний нечетных деформированных ядер. Тезисы докладов XXXII Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Киев, 1982, с. 141.
2. Баструков С.И., Нестеренко В.О., Соловьев В.Г. Роль принципа Паули при описании неротационных состояний нечетных деформированных ядер. Изв. АН СССР (сер. физ.), 1982, т. 46, № II, с. 2144-2149.
3. Soloviev V.G., Nesterenko V.O., Bastrukov S.I. On vibrational states in deformed odd-A nuclei. (О вибрационных состояниях в А-нечетных деформированных ядрах). Z. Phys. A.- Atoms and Nuclei, 1983, vol. 309, N 2, p. 353-362.
4. Баструков С.И., Нестеренко В.О. Корреляции квазичастиц в основных состояниях деформированных ядер. Дубна, 1984, Сообщение ОИЯИ: Р4-84-151.
5. Баструков С.И., Нестеренко В.О. Учет фононных компонент в волновых функциях нечетных деформированных ядер при описании $E1$ -переходов. Дубна, 1984, Сообщение ОИЯИ: Р4-84-135.
6. Bastrukov S.I., Nesterenko V.O. Description of the low-lying states in deformed nuclei within the quasiparticle-phonon nuclear model. (Описание низколежащих состояний деформированных ядер в рамках квазичастично-фононной модели ядра). In: Abstr. of Contr. International Symposium on In-Beam Nuclear Spectroscopy. Hungary, 1984, p. 90.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 декабря 1984 года.