

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

---

M-751

4-80-252

МОЛИНА АВИЛА  
Хорхе Луйс

ВЛИЯНИЕ ПРИНЦИПА ПАУЛИ  
И ВРАЩЕНИЯ  
НА ВОЗБУЖДЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ АТОМНЫХ ЯДЕР

Специальность: 01.04.16 -

физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1980

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики  
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель -  
доктор физико-математических наук  
профессор

В.Г.Соловьев

Официальные оппоненты -  
доктор физико-математических наук

С.И.Дроздов

Кандидат физико-математических наук

В.И.Фурман

Ведущее научно-исследовательское учреждение -  
Научно-исследовательский институт ядерной физики  
Московского государственного университета.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1980 г.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1980 г.  
на заседании специализированного Ученого совета КО47.01.01  
Лаборатории теоретической физики Объединенного института  
ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

В.И.Журавлев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одним из наиболее важных достижений теории ядра за последние годы является возможность единого описания структуры ядерных состояний при низких, промежуточных и высоких энергиях возбуждений, полученная в рамках квазичастично-фононной модели ядра<sup>/1,2/</sup>. Математические методы приближенного решения проблемы многих тел, разработанные Н.Н.Боголюбовым<sup>/3,4/</sup>, Дж.Бардином, Л.Купером и Дж.Шриффером<sup>/5/</sup>, В.Г.Соловьевым<sup>/6/</sup> и С.Т.Беляевым<sup>/7/</sup> и позволяющие выделить из полного гамильтониана парные корреляции сверхпроводящего типа, а также идея о едином описании двухквазичастичных и коллективных состояний как однофононных, являются тем фундаментом, на котором построена квазичастично-фононная модель ядра. Большинство расчетов в рамках этой модели проделаны в квазибозонном приближении с учетом ангармоничности разного вида. При рассмотрении двухфононных состояний происходит некоторое нарушение принципа Паули, которое во многих случаях нельзя игнорировать. Поэтому актуальным является вопрос о дальнейшем развитии квазичастично-фононной модели с учетом принципа Паули, выяснение вопроса, - в каких случаях нужно его учесть и в каких - можно им пренебречь.

Фононы четно-четных деформированных ядер строятся над основным состоянием с угловым моментом  $I=0$ . Эволюция этих состояний по мере увеличения угловой скорости вращения  $\Omega$  фактически остается очень мало исследованным вопросом. Уравнения, описывающие малые колебания среднего поля вокруг его равновесного значения при  $I \neq 0$ , получены в работах<sup>/8,9/</sup>. Однако их решение связано с большими трудностями вычислительного характера из-за ряда эффектов, вызываемых вращением: изменение равновесных характеристик среднего поля (потеря аксиальной симметрии, уменьшение спаривания), смешивание состояний с разными проекциями  $K$  углового момента на ось  $Z$ , увеличение плотности двухквазичастичных состояний в окрестности ирраст-полосы. Поэтому интересным и актуальным представляется, с одной стороны, применять к этой задаче метод силовых функций, с которым связаны большие успехи квазичастично-фононной модели

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

при описании сложных состояний с высокой энергией возбуждения, с другой стороны – развивать достаточно простые, но точно решаемые модели для описания состояний быстровращающихся ядер /10/.

Основные цели работы. Исследовать влияние принципа Паули (включая корреляции в основном состоянии) на одно- и двухфононные состояния четно-четных деформированных ядер в рамках квазичастично-фононной модели ядра. Применить метод силовых функций в микроскопической теории вращения, чтобы следить за эволюцией однофононных состояний по мере увеличения угловой скорости вращения в реалистических случаях. Развить простую точно решаемую модель быстровращающегося ядра, и на ее основании изучать влияние вращения на свойства возбужденных состояний ядер. Исследовать фолдинг-потенциал взаимодействия при столкновении тяжелых ионов в методе гиперсферических функций и вопрос о возможном проявлении монополярного резонанса в этих процессах.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации впервые получены секулярные уравнения для энергии двухфононных состояний четно-четных деформированных ядер в рамках квазичастично-фононной модели ядра с учетом принципа Паули. На примере нескольких ядер редкоземельной области проделано систематическое изучение величин:

$$K(s_1, s_2, s_3, s_4) = \langle Q_{s_1} Q_{s_2} Q_{s_3}^* Q_{s_4}^* \rangle - \delta_{s_1, s_2} \delta_{s_3, s_4} - \delta_{s_1, s_3} \delta_{s_2, s_4}, \quad (I)$$

характеризующих влияние принципа Паули на свойства двухфононных состояний ( $g$  – квантовые числа фонона), а также сдвигов двухфононных полосов, возникающих в секулярном уравнении при точном учете коммутационных соотношений между операторами квазичастиц.

В рамках квазичастично-фононной модели ядра изучено влияние корреляций в основном состоянии на свойства одно- и двухфононных состояний. Найдено приближенное интегральное выражение для расчета встречающихся сумм по однофононному пространству, которое может оказаться полезным при расчете числа квазичастиц в основном состоянии. Новым вкладом является разработанный алгоритм для получения секулярного уравнения и силовой функции в приближении случайных фаз для системы с достаточно обильным гамильтонианом. Показана возможность применения метода силовой функции в стационар-

ной задаче Шредингера с дискретным невырожденным спектром. Построена теоретическая схема для отыскания равновесных характеристик среднего поля при увеличении скорости вращения.

Впервые применен метод силовой функции в микроскопической теории вращения. Рассчитана силовая функция приведенной вероятности электрических квадрупольных переходов с ирраст-полосы на однофононные состояния в широкой области углового момента, что позволило следить за эволюцией  $\gamma$ - и  $\beta$ -колебаний по мере увеличения спина.

На основании простой, но точно решаемой модели быстро вращающегося ядра рассмотрено влияние вращения на однофононные состояния ядер. Показано, что при очень больших угловых моментах одна из ветвей гигантского квадрупольного резонанса имеет аномально низкую энергию возбуждения, что соответствует возникновению неустойчивости в системе относительно отклонения формы от определенной из условия самосогласования.

В рамках метода гиперсферических функций впервые проведен расчет фолдинг-потенциала взаимодействия тяжелых ионов с участием основного состояния и монополярного резонанса.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, Центрального института ядерных исследований (Россендорф, ГДР), на ХУШ Международной зимней школе по ядерной физике, (Биельско Биала, Польша, 1980) на XXX Всесоюзном совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Ленинград, 1980).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 9 работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Она содержит 127 страниц машинописного текста, 13 рисунков, 9 таблиц и библиографический список из 80 названий.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится краткая характеристика квазичастично-фононной модели ядра, как основы для единого теоретического описания структуры ядерных состояний при низких, промежуточных и высоких энергиях возбуждений. Поставлен вопрос о дальнейшем развитии модели путем корректного учета коммутационных соотноше-



ний между операторами квазичастиц, а также усложнением остаточного взаимодействия. Коротко изложены основные трудности микроскопической теории при изучении влияния вращения на свойства деформированных ядер. Ставится вопрос о применении метода силовых функций в теории вращения. Кратко затронут вопрос о проявлении структуры ядра при столкновениях тяжелых ионов и в связи с этим подчеркнута важность расчета фольдинг-потенциалов в методе  $K$  - гармоник.

Первая глава посвящена дальнейшему развитию квазичастично-фононной модели ядра.

В § 1 получено секулярное уравнение для энергий двухфононных состояний четно-четных деформированных ядер с учетом принципа Паули. При этом в гамильтониане включены как изоскалярные, так и изовекторные силы. Показано, что в приближении, в котором оставлены лишь диагональные матричные элементы по двухфононным компонентам волновой функции, происходят сдвиги двухфононных полюсов, которые могут быть велики (порядка 1 МэВ) для пары низколежащих коллективных фононов. Для пары неколлективных фононов сдвиги незначительны. Если имеем один низколежащий коллективный фонон и другой фонон с высокой энергией, то сдвиг может достигать нескольких сот кэВ, в зависимости от структуры состояния. Проведено исследование величин  $K$  (см. формулу I) в широкой области энергии возбуждения, показывающее, в каких случаях важно учитывать принцип Паули.

В § 2, в рамках квазичастично-фононной модели изучается влияние корреляции в основном состоянии на свойства низколежащих состояний. Предложено приближенное интегральное представление для расчета числа квазичастиц в основном состоянии. Рассчитана величина  $K(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4)$  с учетом корреляции в основном состоянии и показано, что для чисто двухквазичастичных состояний она может быть меньше, чем -1.

В § 3 рассмотрена задача приближения случайных фаз для достаточно обделого гамильтониана. Построен алгоритм для получения секулярного уравнения, определяющего энергии возбужденных состояний системы. Показано, что в стационарной задаче с дискретным невырожденным спектром из волновой функции можно выделить нормировочный коэффициент, имеющий вид  $(\partial F(E)/\partial E)^{-1/2}$ , где  $F(E) = 0$

определяет энергии  $E$  стационарных состояний системы. Этот факт имеет важное значение для применения метода силовой функции. Полученные результаты оказались полезными в случае микроскопической теории вращения, гамильтониан которой<sup>8,9</sup> выступает как частный случай рассмотренного здесь.

Во второй главе рассмотрено влияние вращения на возбужденные состояния четно-четных деформированных ядер.

В § 1 описана теоретическая схема для отыскания равновесных характеристик среднего поля, включая параметры квадрупольной деформации, параметр щели и момент инерции, по мере увеличения угловой скорости вращения.

В § 2 дано практическое применение формализма, развитого в § 3 первой главы, в теории вращения. Рассчитана силовая функция приведенной вероятности электрических квадрупольных переходов с ираст-полосы на однофононные состояния ядра  $^{168}\text{Yb}$ , в широкой области углового момента (до  $I = 50 \hbar$ ). Рис. 1 иллюстрирует случай переходов на состояния положительной сигнатуры, рис. 2 - отрицательной сигнатуры. В этих рисунках отчетливо видна эволюция наиболее коллективных состояний ( $\gamma$  и  $\beta$  - колебаний) при увеличении спина, которая близка к экспериментальной ситуации (известной до спина  $I = 6 \hbar$  /II/).

В § 3 рассмотрена простая, но точно решаемая в приближении случайных фаз модель вращающихся ядер, гамильтониан которой включает потенциал сферического гармонического осциллятора и изоскалярные квадруполь-квадрупольные силы. В приближении случайных фаз дан анализ спектра возбуждений положительной четности в широкой области угловых моментов. Модель воспроизводит известные эмпирические данные о положении гигантского квадрупольного резонанса при небольших спинах. При увеличении спина энергия возбуждения одной из мод гигантского квадрупольного резонанса уменьшается до нуля, причем состояние остается сильно коллективизированным. Это соответствует возникновению неустойчивости в системе относительно отклонения формы от определенной из условия самосогласования.

Найдено, что устранение духового состояния может налагать важные условия на средние поля, дополняющие условия самосогласования. Даны аналитические выражения для энергий однофононных состояний как функции угловой скорости вращения. Для прецессион-

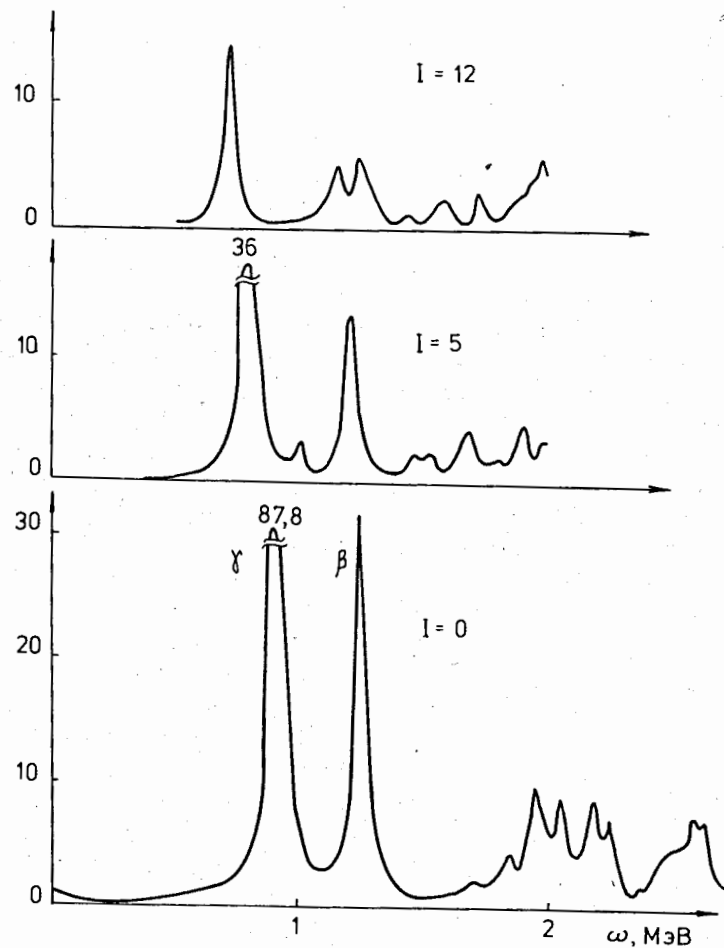


Рис. 1. Силовая функция приведенной вероятности электрических квадрупольных переходов  $(\sum_{\tau} B(\epsilon_2, I \rightarrow I+\tau)_{sp\mu})$  на однофононные состояния положительной сигнатуры в зависимости от углового момента  $I$ .

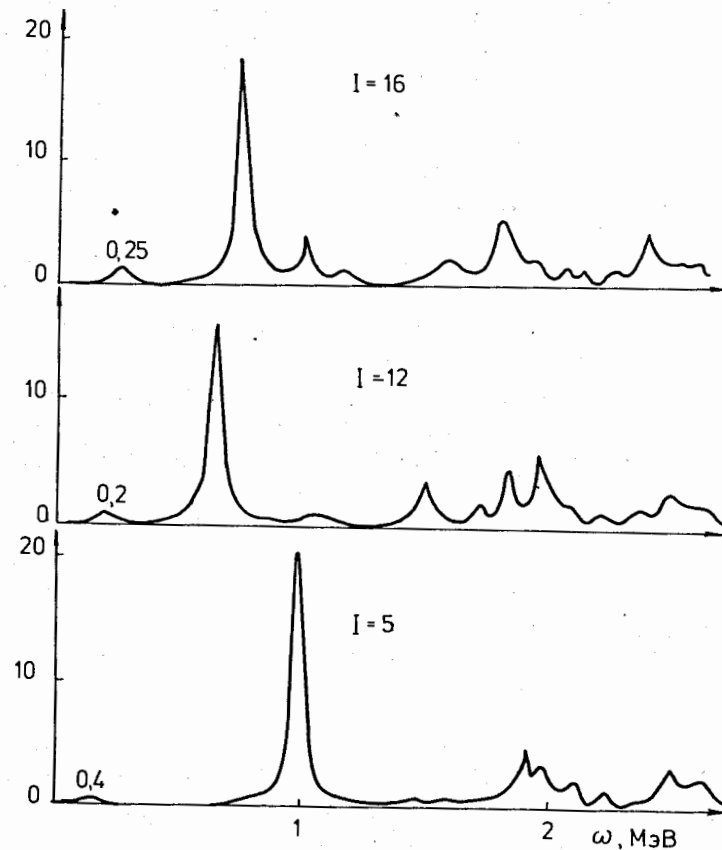


Рис. 2. Силовая функция приведенной вероятности электрических квадрупольных переходов  $(\sum_{\tau} B(\epsilon_2, I \rightarrow I+\tau)_{sp\mu})$  на однофононные состояния отрицательной сигнатуры в зависимости от углового момента  $I$ .

ной моды возбуждений результаты существенно отличаются от получаемых в модели жесткого ротатора.

Третья глава посвящена вопросу проявления структуры ядерных состояний в задаче рассеяния. В рамках метода гиперсферических функций рассчитывается плотность ядерного вещества в ядрах и с ее помощью считается фолдинг-потенциал взаимодействия, описывающий рассеяние двух тяжелых ионов.

В § 1 представлены основные положения метода гиперсферических функций. Даны выражения для плотности ядерного вещества в ядрах с массовыми числами  $A = 4-16$ .

В § 2 волновые функции основного состояния и монополярного резонанса, полученные в методе К-гармоник, использованы для расчета фолдинг-потенциала взаимодействия между двумя ионами. Расчеты проведены для разных комбинаций ядер  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{16}\text{O}$  с двухчастичными силами Скирма. Показана малость вклада в фолдинг-потенциал от плотностного члена в силах Скирма. Зависимость глубины потенциала от числа частиц сталкивающихся ионов  $A_1$ ,  $A_2$  оказалась  $A_1 A_2 / (A_1 + A_2)$ , так что потенциал взаимодействия  ${}^{16}\text{O} - {}^4\text{He}$  оказался мельче, чем потенциал  ${}^{12}\text{C} - {}^6\text{Li}$ .

В заключении диссертации перечисляются основные выводы из полученных результатов.

#### Основные результаты диссертации, выдвигаемые для защиты

1. В рамках квазичастично-фононной модели ядра получено секюлярное уравнение для энергий двухфононных состояний четно-четных деформированных ядер с учетом принципа Паули в случае изоскалярных и изовекторных сил. Проведено широкое численное исследование возникающих поправок к квазибозонному приближению при низких, промежуточных и высоких энергиях возбуждения.

2. Проведен анализ влияния корреляций в основном состоянии на свойства возбужденных состояний четно-четных деформированных ядер. Предложено приближение для расчета числа квазичастиц, позволяющее избежать суммирование по полному однофононному пространству.

3. Построена теоретическая схема применения метода силовой функции в приближении случайных фаз для достаточно общего гамильтониана, частным случаем которого является гамильтониан микроскопической теории вращения.

4. Показана принципиальная возможность применения метода силовых функций в стационарных задачах с дискретным невырожденным спектром.

5. Построен алгоритм для отыскания равновесных характеристик среднего поля, в том числе параметры квадрупольной деформации, параметр цели и момент инерции, по мере увеличения угловой скорости вращения.

6. Рассчитана силовая функция приведенной вероятности электрических квадрупольных переходов с ираст-полосы на однофононные состояния ядра  ${}^{168}\text{Yb}$ , в широкой области углового момента, позволяющая проследить за эволюцией наиболее коллективных состояний при увеличении спина.

7. Влияние вращения на свойства однофононных состояний деформированных ядер изучено в простой, но точно решаемой модели вращающихся ядер, гамильтониан которой включает потенциал сферического гармонического осциллятора и изоскалярных квадруполь-квадрупольных сил. Показано, что при увеличении спина энергия одной из мод гигантского квадрупольного резонанса зануляется. Найдено, что устранение духовых состояний может налагать важные условия на среднее поле, дополняющие условия самосогласования.

8. В рамках метода гиперсферических функций рассчитан фолдинг-потенциал взаимодействия тяжелых ионов массовых чисел  $A = 4, 6, 12, 16$  с двухчастичными силами Скирма. Расчет проведен для основного и монополярно-возбужденного состояний, включая недиагональные матричные элементы, описывающие взаимодействие между ними. Из численных результатов вытекает возможность проявления монополярных гигантских резонансов в столкновениях тяжелых ионов.

#### Результаты диссертации опубликованы в работах:

Джолос Р.В., Молина Х.Л., Соловьев В.Г. Влияние принципа Паули на свойства двухфононных состояний. ТМФ, 1979, т. 40, с. 245-255. Дубна, ОИЯИ, 1979, В4-12250.

Джолос Р.В., Молина Х.Л., Соловьев В.Г. Влияние принципа Паули на возбужденные состояния четно-четных деформированных ядер. Дубна, ОИЯИ, 1979, Р4-12603.

Молина Х.Л. Учет принципа Паули в квазичастично-фононной модели ядра. Дубна, ОИЯИ, 1980, P4-80-22. Тезисы докладов на XXX Собрании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, "Наука", Л., 1980, с. 160.

Молина Х.Л., Михайлов И.Н., Назмитдинов Р.Г. Алгоритм для силовой функции в стационарной задаче. ТМФ, 1980, т. 42, с. 253. Дубна, ОИЯИ, 1978, P4-12034.

Михайлов И.Н., Молина Х.Л., Назмитдинов Р.Г. К расчету параметров равновесной деформации и момента инерции во вращающихся ядрах. Дубна, ОИЯИ, 1979, P4-12773.

Акбаров А., Игнатюк А.В., Михайлов И.Н., Молина Х.Л., Назмитдинов Р.Г., Янссен Д. Коллективные возбуждения быстровращающихся ядер в простой модели. Дубна, ОИЯИ, 1979, P4-12772.

Акбаров А., Игнатюк А.В., Михайлов И.Н., Молина Х.Л., Назмитдинов Р.Г., Янссен Д. Анализ спектра коллективных возбуждений быстровращающихся ядер в осцилляционном потенциале. Дубна, ОИЯИ, 1980, P4-80-187.

Молина Х.Л., Шитикова К.В. О ядерном потенциале взаимодействия в реакциях с тяжелыми ионами. Дубна, ОИЯИ, 1980, P7-80-60.

Молина Х.Л. Описание коллективных возбуждений вращающихся ядер в реалистической модели. Дубна, ОИЯИ, 1980, P4-80-173.

#### Л и т е р а т у р а :

1. Соловьев В.Г. Теория сложных ядер. М., Наука, 1971.
2. Соловьев В.Г. Квазичастично-фононная модель ядра. ЭЧАЯ, 1978, т. 9, с. 580-622.
3. Боголюбов Н.Н. О новом методе в теории сверхпроводимости. Ш. ЖЭТФ, 1958, т. 34, с. 73-79.
4. Боголюбов Н.Н. Лекции по квантовой статистике. Киев. Изд. "Радянська школа", 1947.

5. Bardeen J., Cooper L.N., Schrieffer J.R. Theory of Superconductivity. Phys. Rev., v. 108, 1957, p. 1175-1204.
6. Соловьев В.Г. О взаимодействиях нуклонов, приводящих к появлению сверхтекучего состояния атомного ядра. ЖЭТФ, т. 35, 1958, с. 823-825.  
Исследование сверхтекучего состояния атомного ядра. ЖЭТФ, т. 36, 1959, с. 1869-1874.
7. Belyaev S.T., Effect of pairing correlations on nuclear properties. Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 1959, v. 31, No 11, p. 1-55.
8. Marshalek E.R., Self-consistent cranking plus RPA method for high-spin states (I). Theory. Nucl. Phys. 1976, A266, p. 317-336.
9. Janssen D., Mikhailov I.N. Microscopical structure of the states of deformed nuclei in the neighborhood of the yrast line. Nucl. Phys. 1979, A318, p. 390-412.
10. Зелевинский В.Г. Простая модель быстро вращающегося ядра. ЯФ. 1975, т. 22, с. 1085-1095.
11. Григорьев Е.П., Соловьев В.Г. Структура четных деформированных ядер. М.: Наука, 1974, с. 194-202.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 марта 1980 года.