

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

И.Н.МИХАЙЛОВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
член-корреспондент АН ЛитССР

В.В.ВАНАГАС

доктор физико-математических наук
доцент

Ю.Ф.СМИРНОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Физико-энергетический институт,
г. Обнинск

Защита диссертации состоится "___" _____ 197__ года
на заседании Специализированного ученого совета К 047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

Автореферат разослан "___" _____ 197__ года

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В.И.ЖУРАВЛЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одним из наиболее простых видов коллективного движения является вращение. Теоретические основы вращательного движения в атомных ядрах были заложены Бором и Моттelsonом^{1/}. Сформулированная ими модель, в которой форма ядра предполагалась аксиально-симметричной, помогла понять многие закономерности в поведении атомных ядер при небольших значениях углового момента. Важную роль в изучении вращения ядра сыграл учет парных корреляций^{2,3/}. В настоящее время во многих зарубежных и отечественных лабораториях ведется интенсивное исследование высокоспиновых состояний атомных ядер, получаемых в результате реакций с тяжелыми ионами. Поэтому очень актуальной является задача создания теории или моделей, которые, правильно интерпретируя накопленные спектроскопические данные о высокоспиновых состояниях, имели достаточную предсказательную силу для исследований в новых областях. Одним из важных вопросов, на которые должна ответить теория, является вопрос о возникновении неаксиальной деформации и эволюции формы ядра при вращении. При этом необходимо изучить возможные эффекты, обусловленные трехосностью ядра, в широком диапазоне значений углового момента и энергии возбуждения.

Основные цели работы. 1) Сформулировать модель для изучения поведения параметра неаксиальной деформации при низких и умеренных спинах в условиях конкуренции сверхтекучего и нормального (бесщелевого) режимов вращения. Исследовать в рамках такой модели эффекты, связанные с изменением χ -деформации в ядрах редкоземельной области. 2) Разработать метод численного анализа, включающий в себя а) решение уравнений модели принудительного вращения в приближении Хартри-Фока-Боголюбова для реалистического потенциала с учетом спаривания; б) решение секулярного уравнения для низколежащих коллективных возбуждений вращающихся ядер в микроскопической модели^{4/}. Используя метод, исследовать равновесную форму в состояниях иррадиации конкретной ядра и проанализировать природу низколежащих коллективных возбуждений. 3) Построить модель для изучения формы быстро вращающихся нагретых ядер. Исследовать влияние оболочечных эффектов на форму ядер при различных энергиях возбуждения в широком диапазоне значений углового момента.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации впервые в рамках метода генераторной координаты сформулирована модель, в которой ядро представляется как трехосный ротатор, имеющий две фазы: сверхпроводящую и нормальную, - связанные между собой. Получено выражение для матричного элемента произвольного неприводимого тензорного оператора $T_{\lambda\mu}$. На основе данного выражения проанализированы E2-переходы в двухфазной модели. Показано, что при изменении структуры волновой функции в случае перехода от сверхпроводящего режима вращения, характерного для низких спинов, в нормальный или твердотельный, характерного для высоких спинов, появляется фактор задержки E2-переходов. Модель может быть использована для количественного и качественного анализа различных характеристик вращающихся атомных ядер при низких и умеренных спинах.

Разработан метод численного анализа коллективных возбуждений вращающихся атомных ядер прецессионной природы, который включает процедуру диагонализации вращающегося гамильтониана Нильссона + монополярное спаривание, а также решение секулярного уравнения для собственных мод прецессионного движения. Метод позволяет анализировать природу низколежащих коллективных возбуждений вращающихся ядер.

Сформулирована модель для описания формы быстровращающихся нагретых атомных ядер. В диссертации впервые представлены результаты расчета для формы ряда ядер из области $110 < A < 210$ в широком диапазоне значений углового момента и энергии возбуждения. Впервые на основе реалистического потенциала получены оценки характеристической температуры и энергии возбуждения, при которых оболочечная поправка перестает играть существенную роль в определении формы ядра. Модель может быть использована для описания плотности уровней различных каналов дивозбуждения нагретого ядра, а также изучения коллективных эффектов, возможных при быстром вращении нагретых ядер. Результаты расчета показывают, что критический к делению угловой момент и барьер деления в компаунд-состояниях, полученных в реакции с тяжелыми ионами и имеющих энергию возбуждения порядка 20-30 МэВ, может быть оценен в рамках модели жидкой капли /5/.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, от-

дела теоретической физики ИЯФ АН УзССР, на Международном симпозиуме по высокоспиновым состояниям и структуре ядра (Дрезден, 1977) на приглашенных семинарах по ядерной структуре (ФРГ, 1978), XU Совецении по ядерной спектроскопии и теории ядра (Дубна, 1978) а также на XXIII (Алма-Ата, 1978) и XXIX (Рига, 1979) Всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре ядра.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано семь работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения, содержит 108 страниц машинописного текста, 17 рисунков, 3 таблицы и библиографический список литературы из 90 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится краткое рассмотрение вопроса об адекватности описания спектра и вероятности электромагнитных переходов в деформированных ядрах при помощи моделей аксиального и трехосного ротаторов. Рассматриваются эффекты, возможные при вращении ядер как при небольших и умеренных спинах в состояниях ираст-полосы, так и при высоких спинах и ненулевой энергии возбуждения. Формулируется постановка задачи об исследовании поведения параметра неаксиальной деформации во вращающихся ядрах. Кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе в рамках метода генераторной координаты формулируется модель трехосного ротатора, имеющего две фазы: сверхтекучую и нормальную, в которой щель (Δ) равна нулю, - связанные между собой. Для моментов инерции сверхтекучей фазы используется параметризация, соответствующая коллективной модели Бора-Моттельсона. Моменты инерции нормальной фазы параметризуются как для жесткого трехосного ротатора. Матричное уравнение для гамильтониана модели приводит к аналитическому выражению для энергии состояния с данным I и выражению для вероятности нахождения ядра в сверхтекучей фазе. Оба эти выражения зависят от матричных элементов различных комбинаций компонент оператора углового момента.

В § 2 проводится вычисление матричных элементов, зависящих от углового момента, в когерентных состояниях, среднее значение по которым, например, для линейных компонент оператора

углового момента L_i ($i = x, y, z$) имеет вид

$$\frac{\langle U_{IM} | L_x | U_{IM} \rangle}{\langle U_{IM} | U_{IM} \rangle} = -I \cos \varphi \sin \theta$$

$$\frac{\langle U_{IM} | L_y | U_{IM} \rangle}{\langle U_{IM} | U_{IM} \rangle} = -I \sin \varphi \sin \theta$$

$$\frac{\langle U_{IM} | L_z | U_{IM} \rangle}{\langle U_{IM} | U_{IM} \rangle} = -I \cos \theta. \quad (I)$$

Таким образом, когерентные состояния позволяют определить положение вектора L углового момента во внутренней системе координат.

В § 3 в рамках метода генераторной координаты получено выражение для матричного элемента произвольного неприводимого тензорного оператора $M_{\lambda\mu}$ мультипольности λ . На основе этого получено выражение для вероятности E2-переходов в двухфазной модели. В случае, когда структуры состояний, между которыми происходит E2-переход, сильно различаются, интеграл перекрытия между ними приводит к дополнительному фактору задержки электрических переходов.

В § 4 дается краткое изложение метода Струтинского для вычисления энергии деформации невращающегося ядра. Приводятся результаты расчетов энергии деформации по методу Струтинского для ^{156}Er и ^{166}Er . Отмечается заметное различие в энергии деформации для этих ядер как в параметрах деформации потенциала, так и в глубине потенциальной энергии.

В § 5 представлены результаты расчетов энергии состояний, равновесных параметров деформации, вероятности нахождения ядра в сверхтекучей фазе для ^{156}Er и ^{166}Er . Выявлено появление большой неаксиальной деформации в переходном ядре ^{156}Er , которая уменьшается при переходе в нормальную фазу. В ^{166}Er величина параметра неаксиальной деформации остается небольшой до $I < 20 \hbar$. Проводится вычисление относительной вероятности E2-переходов для ^{156}Er по формулам § 3. Расчеты показали существование задержки перехода $10^+ \rightarrow 12^+$ в ^{156}Er .

В § 6 проводится обсуждение полученных результатов. Отмечается, что в условиях конкуренции между сверхпроводящей и нормаль-

ной фазой возможны существенные изменения в ориентации углового момента во внутренней системе. Отмечается также качественное согласие результатов расчета относительной вероятности E2-переходов с предварительными экспериментальными данными^{/6/} в описании задержки E2-перехода $10^+ \rightarrow 12^+$ для ^{156}Er . Проводится сравнение экспериментальных и рассчитанных энергий состояний с различными I для ^{156}Er .

Вторая глава диссертации посвящена расчету и анализу собственных частот низколежащих коллективных возбуждений прецессионной природы в четно-четных ядрах на базе микроскопической модели вращающегося ядра^{/4/}, комбинирующей идеи модели принудительного вращения в описании вращения и приближения метода случайных фаз для анализа внутренних возбуждений.

В § 1 кратко излагается модель Михайлова-Янссена^{/4/}, а также формализм, используемый в модели. Подробно рассматривается вывод секулярного уравнения для собственных частот низколежащих коллективных возбуждений, которые в пределе, когда частота вращения $\Omega \rightarrow 0$, переходят в последовательность состояний χ -вибрационной полосы с нечетными спинами; а в случае, когда двухквантовые энергии $E_{K\bar{K}} \gg \Omega$ и $E_{K\bar{K}} \gg \omega$ (ω - собственная частота низколежащих коллективных возбуждений) - дают энергии возбуждения однофононных возбуждений прецессионного типа.

В § 2 обсуждается метод численного решения вариационных уравнений модели в рамках ХФБ, а также приближения, используемые для решения этих уравнений. Излагается математический метод численного решения уравнений модели. Представлены результаты расчета равновесных параметров формы ядра ^{168}Yb при различных значениях спина вплоть до $I = 86 \hbar$, полученных из условия минимума функционала

$$E_I(\varepsilon, \chi) = E_{LD}(\varepsilon, \chi) + \delta E_{Strut}, \quad (2)$$

где $E_{LD}(\varepsilon, \chi)$ - энергия вращающейся жидкой капли, а $\delta E_{Strut} = E_{ХФБ} - \bar{E}_{Strut}$ (\bar{E}_{Strut} - сглаженная часть энергии по Струтинскому) - оболочечная поправка Струтинского. Как показали результаты расчета, параметр неаксиальности χ для ядра ^{168}Yb при небольших значениях углового момента ведет себя согласно предсказаниям гидродинамической модели, а при увеличении углового момента происходит переход к твердотельному пределу. Об-

суждается поведение рассчитанных минимальных двухквaziчастичных энергий для нейтронов и протонов, проводится сравнение рассчитанных и экспериментальных значений энергий состояний ирест-полосы ядра ^{168}Yb .

В § 3 представлены результаты расчета секулярного уравнения для собственных частот низколежащих коллективных возбуждений на базе равновесных параметров формы, полученных в § 2, ядра ^{168}Yb . Проводится сравнение трех типов оценок частот такого вида возбуждений: микроскопической, твердотельной и полутвердотельной (см. рис. 1).

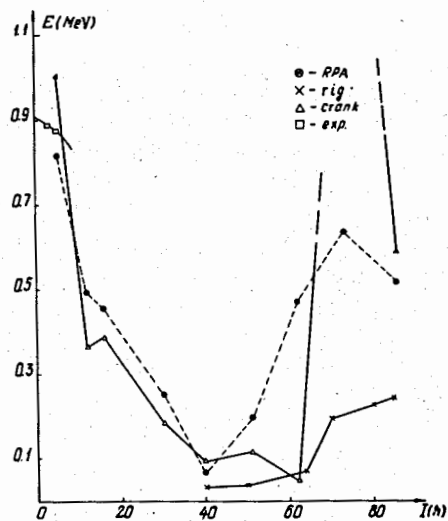


Рис. 1. Оценки энергии возбуждения нижайших состояний с нечетными спилями I в ядре ^{168}Yb

Отмечается значительное расхождение твердотельной и микроскопической оценок. Расчеты подтверждают качественный анализ в отношении природы таких возбуждений, данный в работе [7] и отмеченный в § 1.

Третья глава диссертации посвящена изучению формы быстровращающихся нагретых ядер.

В § 1 формулируется модель для изучения формы быстровращающихся нагретых ядер. С этой целью анализируются основные положения модели, в рамках которой сходные вопросы изучаются для холодных быстровращающихся ядер. Это позволяет сформулировать теоретический подход при $t \neq 0$ в близкой аналогии с моделью для холодных вращающихся ядер. Вводятся термодинамические потенциалы, экстремум которых при данных I и t , или I и S , или ω и t в зависимости от виде потенциала, определяет равновесную конфигурацию возбужденного ядра. Показано также, что функция Раусса-Гиббса F_R при $t=0$ переходит в выражение для функции Раусса R холодного ядра, используемого в работе [9].

В § 2 проводится сравнение полученных результатов при малой энергии возбуждения над ирест-полосой ($t = 0,2$ МэВ) с результатами предыдущих исследований относительно равновесной формы быстровращающихся холодных ядер. Сравнение показывает хорошее согласие и позволяет указать те характеристики, которые зависят от параметризации модели и принятой процедуры расчета. Подробно обсуждаются результаты расчета термодинамических потенциалов F_R (функция Раусса-Гиббса), F (свободная энергия) и E (энергия) для ядра ^{160}Yb . Отмечен деструктивный характер конкуренции оболочечного (микроскопического) и жидкокапельного (макроскопического) режимов деформации в деформированных и сферических ядрах. При этом выявлена характеристическая температура $t_n = 1-1,2$ МэВ и энергия возбуждений $U_n = 14-17$ МэВ, при которых оболочечная поправка перестает играть существенную роль в определении формы ядер. Результаты расчета позволяют предложить простую интерполяционную формулу, связывающую угловой момент и значение энергии возбуждения U , при которых имеет место переход от деформации, типичной для модели оболочек, к жидкокапельной

$$\left(\frac{I}{I_n}\right)^2 + (U/U_n) \sim 1. \quad (3)$$

В случае ^{160}Yb $I_n \approx 40$, $U_n \approx 15$ МэВ.

В § 3 обсуждаются результаты расчета. Одним из важных выводов является установление характеристической температуры t_n и энергии возбуждения U_n . Далее отмечается, что энергии возбуждения компаунд-систем, полученных в результате столкновения тяжелого иона с ядром, выше характеристических температур, и равно-

весные параметры формы таких систем можно оценивать в модели жидкой капли^{/5/}.

В Приложении дан вывод формул для моментов инерции, используемых в двухфазной модели.

В Заключении приведены основные результаты диссертации, которые представляются на защиту:

1. На основе метода генераторной координаты сформулирована модель, в которой ядро представляется как трехосный ротатор, имеющий нормальную и сверхпроводящую фазы, связанные между собой. Минимизация гамильтониана модели при помощи когерентных состояний дает энергетический спектр ядра. Получено выражение для вероятности электрических переходов с $\Delta I = 2$.

Конкуренция сверхтекучей и нормальной фаз, в которых инерционные свойства по-разному зависят от параметров деформации, может вызвать появление значительной неаксиальности, сложно зависящей от спина. Показано на основании полученных выражений для вероятности электрических переходов, что переход из одного режима вращения в другой может вызвать задержки электрических переходов.

2. Модель была использована для вычисления энергий состояний ирраст-полосы изотопов ^{156}Er и ^{166}Er , а также вычисления вероятности электрических переходов между состояниями ирраст-полосы в ^{156}Er . Выявлено появление большой неаксиальности в мягком относительно γ -деформации ядре ^{156}Er в состояниях с угловым моментом $0 < I < I_{кр}$, где $I_{кр} \approx 10-12 \hbar$ - угловой момент, при котором исчезает сверхпроводящая фаза. Расчет по вероятности E2-переходов для ^{156}Er дал качественное согласие с предварительными экспериментальными данными в описании задержки перехода $10^+ \rightarrow 12^+$ /6/. В сильнодеформированном ядре ^{166}Er динамическая неаксиальность не появляется вплоть до спинов $I < 20$. Какие-либо аномалии в спектре этого ядра и в вероятности электрических переходов не ожидаются при спинах в этом интервале.

3. Разработан метод численного анализа коллективных возбуждений отрицательной сигнатуры^{/1,7/} в модели Михайлова-Янссена^{/4/}. Этот метод включает процедуру самосогласования для вращающегося гамильтониана Нильссона + монополюсное спаривание в приближении ХФБ, а также решение секулярного уравнения, полученного ранее в работе^{/4/}.

4. На основе процедуры (п. 3) рассчитаны равновесные параметры формы ядра ^{168}Yb вплоть до спина $I = 86$. Расчеты подтвердили качественные выводы работы^{/7/} о характере поведения низлежащих коллективных возбуждений отрицательной сигнатуры: в пределе $\Omega \rightarrow 0$ собственные частоты таких возбуждений переходят в последовательность состояний γ -вибрационной полосы с нечетными спинами, а при больших значениях углового момента - в однофононные возбуждения прецессионного типа. В области спинов $30 < I < 60$ получаются аномально низкие оценки для энергии возбуждения прецессионной природы. Качественное объяснение этому можно найти, обращаясь к двухфазной модели. Как раз при этих спинах происходит изменение режима вращения от сверхтекучего к бесцелевому и изменение знака γ -деформации, то есть изменение ориентации углового момента относительно осей тензора квадрупольного момента во внутренней системе координат.

5. Результаты для частот возбуждения прецессионного движения в рамках микроскопической модели^{/4/} в 2-3 раза отличаются от подобных оценок, полученных О.Бором и Б.Моттельсоном в модели трехосного жесткого ротатора.

6. Сформулирована модель для изучения формы быстро вращающихся нагретых ядер. Модель довольно экономна в выборе предположений, она фактически основана на предположениях, сформулированных для изучения холодных быстро вращающихся ядер^{/8,9/}. Учет оболочечной поправки и энергии жидкой капли делается стандартным образом. Отличие заключается в обработке инерционных свойств ядер при помощи специального подбора параметров потенциала Нильссона.

Построена процедура вычисления термодинамических величин (свободная энергия F , энтропия S и другие). Проведен систематический расчет в области массовых чисел $110 < A < 210$.

7. Выявлена характеристическая температура $t_n \approx 1,0+1,2$ МэВ и энергия возбуждений $U_n \approx 14+17$ МэВ, при которых оболочечные эффекты перестают играть существенную роль в определении формы вращающихся нагретых ядер. При температурах или энергиях возбуждения выше указанных происходит переход к жидкокапельному режиму деформации.

8. Энергии возбуждения, при которых оболочечная поправка перестает существенно влиять на форму ядра, заметно ниже типичных энергий возбуждения композитных состояний, заселяемых в (π, χ_n)

реакциях. Соответственно, критический к делению угловой момент и барьер деления в компаунд-состояниях, образующихся в таких реакциях, может быть оценен из расчетов, сделанных в модели жидкой капли^{15/}.

9. При малых энергиях возбуждения и небольших угловых моментах ядерные свойства определяет оболочечная поправка. Ядра проявляют индивидуальность в этой области в значениях параметров деформации. Неаксиальная деформируемость ядер может достигать существенных значений. В области энергий возбуждения и спинов, ограниченных приближенным соотношением (3), возможны значительные флуктуации ядерной формы, что может отразиться на вероятности коллективных квадрупольных переходов. При достижении характеристических температур или энергий возбуждения вращение вызывает сплюснутую аксиальную деформацию. При энергиях возбуждения более высоких, чем следует из соотношения (3), индивидуальные свойства ядер стираются все больше и больше, и форма ядер определяется жидкокапельным характером деформации.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Май Ф.Р., Михайлов И.Н., Назмитдинов Р.Г., Янссен Д. ЯФ, 1978, 27, с. 916; ОИЯИ, Р4-10508, Дубна, 1977.
2. Janssen D., May F.R., Mikhailov I.N., Nazmitdinov R.G., Phys. Lett., 1978, 73B, 271; Proc. Dresden Conf. on High Spin, ZfK-336, Dresden, DDR, 1977, 64; ОИЯИ, Е4-10959, Дубна, 1977.
3. Janssen D., Mikhailov I.N., Nazmitdinov R.G., Nerlo-Pomorska B., Pomorski K., Safarov R.Kh. Phys.Lett., 1978, 79B, 347; ОИЯИ, Е4-11371, Дубна, 1978.
4. Михайлов И.Н., Назмитдинов Р.Г., Нерло-Поморска Б., Поморски К. Сб: XV Собрание по ядерной спектроскопии и теории ядра, Дубна, ОИЯИ, Д6-11574, 1978, с. II.
5. Ignatiuk A.V., Mikhailov I.N., Nazmitdinov R.G., Nerlo-Pomorska B., Pomorski K. Phys.Lett., 1978, 76B, 543; ОИЯИ, Р4-11597, Дубна, 1978.
6. Игнатюк А.В., Михайлов И.Н., Молина Х.Л. Назмитдинов Р.Г., Поморски К. ОИЯИ, Р4-12398, Дубна, 1979.
7. Игнатюк А.В., Михайлов И.Н., Молина Х.Л., Назмитдинов Р.Г., Поморски К. ОИЯИ, Р4-12399, Дубна, 1979.

Л и т е р а т у р а

1. Бор О., Моттельсон Б. Структура атомного ядра, т. 2. "Мир", М., 1977.
2. Соловьев В.Г. Теория сложных ядер. "Наука", М., 1971.
3. Belyaev S.T., Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk., 1959, 31, N 11.
4. Михайлов И.Н., Янссен Д. Изв. АН СССР, 1977, сер. физ., 41, с. 1576.
5. Cohen S., Plasil F., Swiatecki W.J., Ann. Phys., 1974, 82, 552.
6. Bochev B., et al. ОИЯИ, Е7-10675, Дубна, 1977.
7. Mikhailov I.N., Janssen D. Phys. Lett., 1978, 72B, 303.
8. Neergard K., Pashkevich V.V., Frauendorf S. Nucl. Phys., 1976, A262, 61.
9. Andersson G. et al., Nucl. Phys., 1976, A268, 205.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 июня 1979 года.