

ВАЙШВИЛА

Зигмас Зигмович

ЭЛЛИпсоИДАЛЬНЫЕ ФИГУРЫ РАВНОВЕСИЯ
И КВАДРУПОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ
БЫСТРОВРАЩАЮЩИХСЯ ЯДЕР

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований и в Институте
физики АН Литовской ССР.

Научные руководители:
доктор физико-математических наук
профессор

И.Н. МИХАЙЛОВ

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Е.Б. БАЛЬБУЦЕВ

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

В.М. КОЛОМИЕЦ

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

В.Д. ТОНЕЕВ

Ведущая организация - Институт теоретической физики
АН Украинской ССР

Защита состоится " " _____ 1984 года в
_____ час. на заседании Специализированного совета К 047.01.01
Лаборатории теоретической физики Объединенного института
ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединен-
ного института ядерных исследований

Автореферат разослан " " _____ 1984 года

Ученый секретарь
Специализированного совета

В.И. ЖУРАВЛЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. После открытия ротационных полос в энергетических спектрах изучение вращательного движения в атомных ядрах стало одним из способов исследования их структуры. Анализируя изменения в квазичастичном и вибрационном спектре возбуждений по мере увеличения углового момента (и скорости вращения), можно установить отклонения от адиабатической теории вращения и получить при этом дополнительную информацию о строении ядер. Быстрое развитие экспериментальных возможностей позволяет изучать состояния со все большими спинами. В настоящее время во многих зарубежных и отечественных лабораториях ведется интенсивное исследование высокоспиновых состояний ядер, полученных, например, в реакциях с тяжелыми ионами. Поэтому очень актуальной является задача создания теории и моделей, которые, правильно интерпретируя накопленные спектроскопические данные о высокоспиновых состояниях, имели бы достаточную предсказательную силу для исследований в новых областях.

Как экспериментально, так и в теоретическом плане основной проблемой здесь является описание формы и коллективных возбуждений быстровращающихся ядер и их изменений в зависимости от скорости вращения (углового момента). Большинство теоретических интерпретаций этих вопросов основано на микроскопических моделях, которые подтвердили коллективный характер состояний ирраст-области. Не решенной при этом осталась задача описания изменения формы ядра, которая решается, как правило, отдельно в модели классической жидкой капли с учетом (или без) оболочечной поправки. Микроскопические модели связаны с немалыми вычислительными трудностями и большим числом дополнительных упрощений и предположений, влияние которых на результаты бывает очень трудно контролировать. Естественно поэтому обратиться к более простым моделям для того, чтобы объединить анализ формы и коллективных возбуждений.

Целью работы является описание в рамках единой, физически наглядной макроскопической модели как равновесных эллипсоидальных конфигураций быстровращающихся ядер, так и малых колебаний квадратупольной симметрии относительно этих состояний.

Научная новизна. Трудности описания в рамках единой модели как формы быстровращающихся ядер, так и их состояний в ирраст области ре-

Объединенный институт
ядерных исследований
Библиотека

шени в рамках макроскопической модели, обобщающей модель классической жидкой капли (КЖК) учетом принципа Паули в распределении нуклонов по скоростям и зависимость этого распределения от состояния ядерного вещества (ядерная гидродинамика) и впервые применяемой для вращающегося ядра. Привлечение математических методов, разработанных в теории самогравитирующих масс (вириальный метод Чандрасекара-Лебовица) позволило сравнительно просто и физически наглядно преодолеть трудности решения уравнений ядерной гидродинамики, а также включить в рассмотрение поверхностные и кулоновские силы ядра.

В новом подходе (модель капли ферми-жидкости КФЖ) получен более широкий, чем в модели КЖК, диапазон устойчивых равновесных эллипсоидальных фигур вращающихся ядер. Получаемые в таком подходе уравнения движения, описывающие коллективные движения, впервые приведены к каноническому виду и проквантованы.

Научная и практическая ценность. Физическая наглядность модели и простота расчетов позволяют применять модель в широкой области исследования свойств быстровращающихся ядер, удачно заменяя трудоемкие расчеты в микроскопических подходах. Полученные данные могут быть использованы для прогнозирования и анализа данных по спектрам γ -излучения из быстровращающихся ядер. Методы, разработанные в диссертации, могут быть успешно использованы в более сложных моделях, где учитываются, например, оболочечные эффекты, сжимаемость капли, вихревые движения, более сложная форма ядра, колебания более высокой мультипольности или дипольные колебания и т.д.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на IV Всесоюзной конференции молодых ученых по теоретической физике (Киев, 1980), XXXI Сессии по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Самарканд, 1981), Международном совещании по взаимодействию ядер и ядерным возбуждениям (Дубна, 1982), VI Научной конференции Института физики АН Лит. ССР (Вильнюс, 1983). В ходе работы основные результаты докладывались и обсуждались на семинарах Отдела теории атомного ядра и секторов № 1, № 2 того же отдела Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, на семинарах Отдела теории атомного ядра и объединенном теоретическом семинаре Института физики АН Лит. ССР.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано шесть работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений, списка литературы и содержит 118 страниц машинописного текста, включая 15 рисунков и список литературы из 87 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обсуждаются основные проблемы и трудности описания высокоспиновых состояний атомных ядер, влияние вращения на одночастичные и коллективные движения. Рассматривается состояние теории описания формы быстровращающихся ядер и спектра их коллективных возбуждений (в том числе и гигантских резонансов) в ирраст-области. Обращается внимание на трудности микроскопических моделей описания коллективных движений в быстровращающихся ядрах и на альтернативный развивающийся в последние годы макроскопический подход (ядерная гидродинамика), применяемый для описания коллективных явлений в невращающихся ядрах. Формулируется постановка задачи диссертационной работы и намечаются пути ее решения.

В **первой главе** вводится функция распределения $f(\vec{x}, \vec{v}, t)$, которая удовлетворяет кинетическому уравнению Больцмана и дает вероятность найти нуклон, движущийся со скоростью \vec{v} в точке \vec{x} в момент времени t . Уравнение Больцмана записано в системе координат, вращающейся с постоянной угловой скоростью $\vec{\Omega}$. Применение метода моментов по скоростям нуклонов для решения этого уравнения дает уравнения ядерной гидродинамики. Первый момент - это уравнение непрерывности. Второй момент - уравнение Эйлера:

$$\frac{\partial(nu_i)}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{m} P_{ij} + nu_i u_j \right) + n \left\{ \frac{1}{m} \frac{\partial W}{\partial x_i} + 2 \sum_{k,l=1}^3 \varepsilon_{ikl} \Omega_k u_l + \sum_{k,l=1}^3 \varepsilon_{ikl} \Omega_k \sum_{m=1}^3 \varepsilon_{lmn} \Omega_m x_n \right\} = 0, \quad (I)$$

где $n(\vec{x}, t) = \int f d\vec{v}$ - плотность числа частиц в ядре, $u_i(\vec{x}, t) = \frac{1}{n} \int v_i f d\vec{v}$ - i -ая компонента средней скорости нуклонов, $P_{ij}(\vec{x}, t) = m \int (v_i - u_i)(v_j - u_j) f d\vec{v}$ - тензор давлений (натяжений, напряжений). Третий момент - уравнение потока энергии-массы - определяет тензор P_{ij}^{\cdot} :

$$\frac{dP_{ij}^{\cdot}}{dt} + \sum_{k=1}^3 \left(P_{ij}^{\cdot} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + P_{jk}^{\cdot} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + P_{ik}^{\cdot} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right) + 2 \sum_{k,l=1}^3 \Omega_l (\varepsilon_{lik} P_{ij}^{\cdot} + \varepsilon_{jik} P_{li}^{\cdot}) + m \sum_{k=1}^3 \frac{\partial w_{ijk}}{\partial x_k}, \quad (2)$$

где $\frac{d}{dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + \sum_{k=1}^3 u_k \frac{\partial}{\partial x_k}$, $w_{jk} = \int (v_j - u_j)(v_k - u_k) \rho d\vec{v}$. В случае квадрупольных колебаний w_{jk} вклада не дает. Поэтому искусственно обрывать цепочку не приходится.

Ядро считается каплей несжимаемой жидкости. Тогда из уравнения непрерывности следует, что $\sum_{k=1}^3 \frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0$. Плотность вещества $\rho = m n$ (как и q - плотность заряда в ядре) считается постоянной. Уравнение движения (1) отличается от уравнения движения КЭК наличием тензора P_{ij} вместо феноменологического давления p . P_{ij} определяется уравнением (2). Это обстоятельство позволяет учесть в модели КЭЖ принцип Паули в распределении нуклонов по скоростям и зависимость этого распределения от состояния ядерного вещества (так называемую "деформацию поверхности Ферми").

Для решения системы уравнений (3), (4) применен метод вириальных теорем Чандрасекара - Лебовица, развитый для изучения равновесия и стабильности вращающихся самогравитирующих тел. Это - метод моментов по координатам, примененный к решению гидродинамических задач. Все необходимые условия равновесия точно выводятся из вириальных уравнений второго порядка.

В конце главы доказываются, что формулировка задачи не противоречит известным законам сохранения импульса, момента количества движения и энергии.

Во второй главе на основе полученных вириальных уравнений изучены эллипсоидальные фигуры равновесия вращающихся ядер в случае отсутствия относительных движений во вращающейся системе координат: сплюснутые и вытянутые сфероидальные, а также эллипсоидальные (неаксиальные) конфигурации. В этом случае вириальные уравнения второго порядка дают связь скорости вращения Ω (вокруг оси 3) с полуосями эллипсоида:

$$\Omega^2 J_{11} = 2(\sigma_{11} - \sigma_{33}) - m_{11} + m_{33}, \quad \Omega^2 J_{22} = 2(\sigma_{22} - \sigma_{33}) - m_{22} + m_{33}, \quad (3)$$

где J_{ii} , σ_{ii} , m_{ii} - диагональные компоненты тензоров инерции, поверхностной и кулоновской энергий ядра, выражающиеся через полуоси эллипсоида. Решения вириальных уравнений в моделях КЭЖ и КЭК формально совпали. Рассмотрены как устойчивые относительно деления (параметр делимости ядра $X < 1$), так и делящиеся ядерные системы ($X > 1$). На рис. 1 приведены равновесные аксиальные фигуры (сфероиды).

Изучено также поведение твердотельного момента инерции ядер в зависимости от скорости вращения (углового момента) ядер. Обсуждены явления гигантского обкебдинга, форбеддинга и изометров формы.

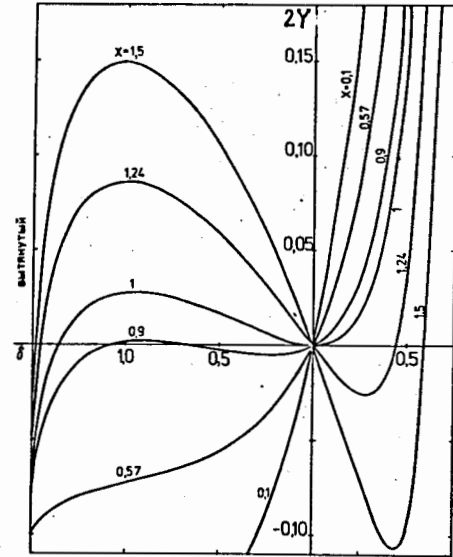


Рис. 1.
Зависимость параметра вращения $Y = \Omega^2 / \Omega_0^2$ от параметра деформации δ сфероидальной КЭЖ для ядер с дорожки КЭ-стабильности с разными параметрами делимости X ; $\hbar \Omega_0 \approx 35, 1A^{-1/2}$ МэВ.

Третья глава посвящена анализу спектра нормальных квадрупольных колебаний и устойчивости быстровращающихся ядер относительно этих возмущений. Начало главы знакомит с вариациями, вызываемыми малыми отклонениями от равновесия жидкости. В предположении малости возмущений линейризуются нелинейные уравнения движения. Система линейризованных вириальных уравнений второго порядка в случае $\vec{u} = 0$ выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial^2 V_{ij}}{\partial t^2} = \delta \Pi_{ij} + \Omega^2 (1 - \delta_{i3}) V_{ij} - 2\Omega \sum_{k=1}^3 \epsilon_{ik} \frac{\partial V_{kj}}{\partial t} - 2\delta \sigma_{ij} + \delta m_{ij} + \delta u_{ij}. \quad (4)$$

Здесь $V_{ij} = \int \rho \tilde{z}_i x_j d\vec{x}$ и $\delta \Pi_{ij} = \int \Delta P_{ij} d\vec{x}$ - коллективные переменные (например, квадрупольный момент является линейной функцией величин V_{ij}); $V_{ij} = V_{i,j} + V_{j,i}$, $\tilde{z} = \Delta \vec{x}$ - бесконечно малое лагранжево смещение. $\delta \sigma_{ij}$, δm_{ij} , δu_{ij} выражаются через V_{ij} . $\delta \Pi_{ij}$ определяется вариацией проинтегрированного по объему ядра уравнения (2).

На рис. 2 приведены спектры нормальных квадрупольных колебаний аксиального и неаксиального вращающегося ядра ^{154}Er в моделях КЭК и КЭЖ. Решения (нормальные или собственные частоты ϵ) ископают

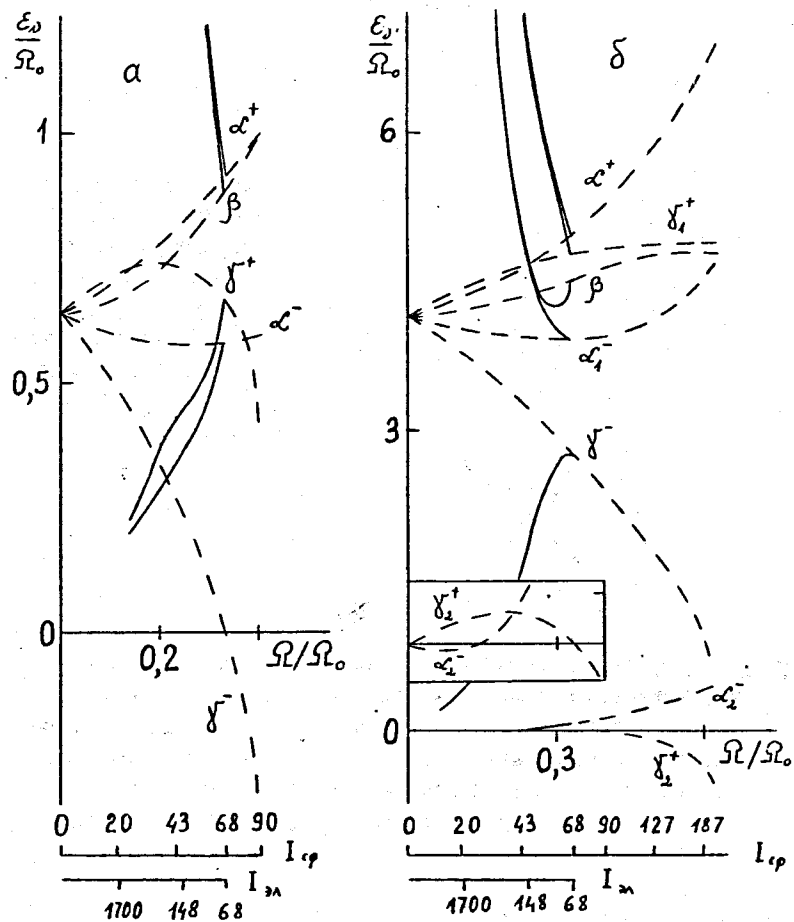


Рис. 2.

Спектр квадрупольных колебаний вращающейся КЖК (а) и КФЖ (б). Пунктирные линии соответствуют описанным сферическим фигурам, сплошные - эллипсоидальным. Угловой момент I - в единицах \hbar . $X = 0,62$ (^{154}Er), $\hbar\Omega_0 = 35, I \cdot \Lambda^{-1/2}$ МэВ.

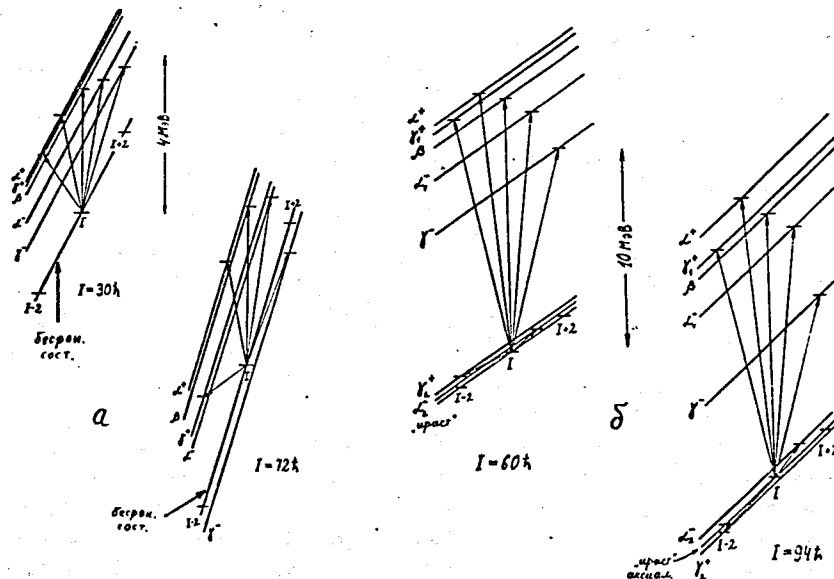


Рис. 3.

Разрешенные электромагнитные переходы между бесфононным и однофононными состояниями при двух характерных значениях скорости вращения для аксиальных КЖК (а) и КФЖ (б). $X = 0,62$ (^{154}Er)

в предположении гармонической зависимости от времени:

$$\vec{r}(\vec{x}, t) = \vec{r}(\vec{x}) e^{i\epsilon t}$$

Угловой момент ядра при возбуждении γ -мод меняется на $\pm 2\hbar$, α -мод - на $\pm 1\hbar$, β -моды - не меняется. В модели КФЖ учет деформации поверхности Ферми увеличил жесткость колебаний (по сравнению с моделью КЖК), что позволило описать

энергию гигантских квадрупольных резонансов (ГКР). Получено расщепление ГКР на пять веток из-за деформации и кориолисовых сил. В спектре КФЖ появились две дополнительные низколежащие моды (в том числе и аналог нутационных колебаний жесткого трехосного ротатора).

В конце главы изучена устойчивость КФЖ и КЖК относительно квадрупольных колебаний. Проанализированы условия положительности давления и энергии связи вращающихся ядер. Показано, что в модели КФЖ диапазон устойчивых равновесных эллипсоидальных фигур вращающихся ядер шире, чем в модели КЖК.

В четвертой главе изучаются электромагнитные характеристики возбуждений квадрупольной симметрии быстровращающихся ядер. Для этой цели линеаризованные вириальные уравнения движения с помощью процедуры Хилла приводятся к канонической форме, что позволяет получить вибронный гамильтониан \mathcal{H} . \mathcal{H} описывает не только рассмотренные в третьей главе энергии квадрупольных колебаний, но и вращение ядра как целого, генерирующее состояния ИЛ. Возбужденные состояния описываются как однофонные, а состояния ИЛ — как бесфонные. На рис. 3 приведены возможные $E2$ -переходы для аксиального ядра ^{154}Er в моделях КЖК и КФЖ при двух характерных значениях углового момента (до и после появления возможных равновесных неаксиальных конфигураций в этом ядре). Изучены также вероятности этих $E2$ -переходов и их зависимость от скорости вращения (углового момента) ядра, оценены времена жизни состояний ИЛ.

В Приложении А даны определения и выражения для индексных символов, с помощью которых большинство тензоров и их вариаций, встречающихся в диссертации, выражаются через полуоси эллипсоида.

В Приложении Б приведены формулы для $B(E2)$ -факторов рассматриваемых коллективных возбуждений.

В Заключении приведены заключительные замечания, делаются выводы о полученных результатах и возможных усовершенствованиях, применениях развитой в работе модели. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту:

1. В рамках единой и физически наглядной макроскопической модели удалось объединить рассмотрение формы и анализ коллективных возбуждений в ядрах-области быстровращающихся ядер.

2. Впервые проведен полный анализ равновесных эллипсоидальных фигур вращающихся ядер в моделях КФЖ и КЖК.

3. Впервые в макроскопическом подходе рассмотрены квадрупольные колебания во вращающихся ядрах, учтен вклад поверхностных и кулоновских сил. Получено расщепление ГКР и сильная зависимость энергии ГКР

от скорости вращения (углового момента) ядра. Учет деформации поверхности Ферми в модели КФЖ привел к увеличению жесткости колебаний и появлению дополнительных по отношению к модели КЖК низколежащих возбуждений. В моделях КЖК и КФЖ последована стабильность ядер относительно квадрупольных колебаний.

4. Впервые уравнения ядерной гидродинамики, описывающие квадрупольные колебания вращающихся ядер, приведены к каноническому виду и получен квантовый гамильтониан, описывающий как вибронные возбуждения, так и вращение ядра как целого, генерирующее состояния ИЛ.

5. Показана сильная зависимость от скорости вращения (углового момента) ядра вероятностей квадрупольных переходов между вибронными состояниями, построенными на равновесных конфигурациях ИЛ, и состояниями ИЛ в быстровращающихся ядрах.

6. В модели КФЖ показана возможность коллективных $E2$ -переходов вдоль последовательности уровней, близких к ИЛ в аксиальных ядрах, вращающихся вокруг оси симметрии.

Основной материал диссертации опубликован в работах

1. Вайшвила З., Михайлов И.Н. Спектр нормальных квадрупольных колебаний вращающейся жидкой капли. — Дубна, 1980. — 15с. (Сообщение ОИЯИ: P4-80-461).

2. Balbutsev E.B., Dymarz R., Mikhailov I.N., Vaishvila Z. Macroscopic description of giant quadrupole resonance in rotating nuclei. — Phys. Lett., 1981, v. 105B, No2,3, p. 84-88. (Макроскопическое описание гигантского квадрупольного резонанса во вращающихся ядрах)

3. Балбуцев Е.Б., Вайшвила З., Михайлов И.Н. — Форма и нормальные моды квадрупольных колебаний вращающихся ядер в рамках макроскопического подхода (сферойды) — ЯФ, 1981, т. 35, вып. 4, с. 836-847. Дубна, 1981. — 16с. (Препринт ОИЯИ: E4-81-281).

4. Балбуцев Е.Б., Вайшвила З., Михайлов И.Н. Форма и нормальные моды квадрупольных колебаний вращающихся ядер в макроскопическом подходе (эллипсоиды). — ЯФ, 1982, т. 36, вып. 5, с. 1109-1120. Дубна, 1981. — 18с. (Препринт ОИЯИ: P4-81-690).

5. Бальбуцев Е.Б., Вайшвила З., Михайлов И.Н. Коллективные E2-переходы в быстровращающихся ядрах.- ЯФ, 1983, т. 38, вып. 3, с. 591-600. Дубна, 1982.- 15с. (Препринт ОИЯИ: Р4-82-635).

6. Вайшвила З. Коллективные E2-переходы в быстровращающихся неаксиальных ядрах.- Вильнюс, 1984, 33с. Рукопись депонирована в Лит НИИГТИ 1984.01.20, № 1187ЛИ-Д84.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 июня 1984 года.