



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б21

4-90-87

**БАЛЬБУЦЕВ
Евгений Борисович**

УДК 539.142/143

**ОПИСАНИЕ КОЛЛЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ
АТОМНЫХ ЯДЕР
МЕТОДОМ МОМЕНТОВ**

**Специальность: 01.04.16 - физика ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук**

Дубна 1990

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Л.Д.Блохинцев

доктор физико-математических наук

В.М.Струтинский

доктор физико-математических наук

В.А.Ходель

Ведущая организация - Институт теоретической физики, Киев.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1990 г. в ___ час.
на заседании Специализированного совета Д047.01.01 при Лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследований,
г. Дубна Московской области.

Автореферат разослан "___" _____ 1990 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Специализированного совета
кандидат физико-математических наук

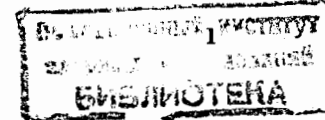
В.И.Журавлев

Актуальность темы. Исследование коллективных возбуждений атомных ядер на основе многочастичного уравнения Шредингера представляет собой важную задачу теоретической ядерной физики. В силу известных трудностей, возникающих при строгом рассмотрении названной проблемы (не достаточно хорошо определены силы, действующие между нуклонами в ядерном веществе; математическая сложность задачи многих тел) большое значение приобретают последовательные приближенные методы решения, т.е. методы, которые, во-первых, исходят из первых принципов для данной задачи, во-вторых, являются практически реализуемыми и эффективными и, в-третьих, могут быть, в принципе, расширены до точных.

К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал по структуре как тяжелых, так и достаточно легких ядер. Этому способствовало прежде всего то обстоятельство, что во многих странах мира начали работать ускорители тяжелых ионов и были получены новые данные, относящиеся к той области ядерной физики, которая ранее казалась недоступной для исследователей: большие спины, высокие энергии. Появление ускорителей с высоким качеством пучков и постоянное совершенствование техники эксперимента позволило измерить энергии гигантских изоскалярных резонансов до мультипольности $\lambda=4$ и изовекторных - до $\lambda=3$, магнитных резонансов с $\lambda \leq 2$, позволило измерить энергии и вероятности возбуждения множества отдельных уровней, которые ранее не удавалось разрешить.

Никакая теоретическая модель не в состоянии воспроизвести все это разнообразие резонансов и уровней с их электромагнитными и прочими свойствами. Да в этом вообще-то и нет особого смысла. Более полезными в такой ситуации должны быть подходы, позволяющие, исходя из первых принципов, описывать динамику различных интегральных характеристик ядра и, как следствие, воспроизводить положение центроидов больших групп уровней и суммарную вероятность их возбуждения. Являясь своего рода правилами сумм, такие подходы дают практическую возможность расчета многих экспериментально измеряемых ядерных характеристик, и тем самым могут стать надежным инструментом для проверки наших представлений о физике атомного ядра.

Таким образом, поиск новых подходов, способных сформулировать приближения, оперирующие со всевозможными интегральными характеристиками ядер, и указывающих путь, каким может быть осуществлен постепенный переход от этих приближений к еще более точному описанию, представляет собой актуальную и важную проблему.



Целью работы является разработка нового метода теоретического описания динамики интегральных характеристик многочастичных систем и изучения с его помощью равновесной формы и коллективного движения в атомных ядрах: энергий и вероятностей возбуждения гигантских резонансов (изоскалярных и изовекторных, электрических и магнитных) и низколежащих мод различной мультипольности во вращающихся и невращающихся ядрах, предсказание и исследование новых мод возбуждения.

Научная новизна и практическая ценность.

Впервые решена проблема замыкания бесконечной цепочки уравнений "гидродинамического" типа, получаемых из динамического уравнения для функции Вигнера (матрицы плотности).

Соответственно, впервые моменты функции Вигнера в фазовом пространстве, полученные путем решения полученных здесь систем уравнений, применяются для изучения динамики интегральных характеристик атомного ядра. Разработан оригинальный метод описания формы и коллективных возбуждений атомных ядер с помощью этих моментов.

Впервые продемонстрирована важность учета деформации поверхности ферми мультипольности $\lambda > 2$ при изучении коллективных возбуждений.

Впервые обнаружены и исследованы низколежащие (существенно ниже ГР) изоскалярные и изовекторные вибрационные возбуждения во вращающихся ядрах.

Впервые продемонстрировано, что определяющую роль в возникновении статической деформации атомных ядер играет оператор кинетической энергии.

Впервые определено положение центроидов низколежащих (ниже соответствующих ГР) 3^- и 2^+ состояний.

Полученные в диссертации результаты заметно углубили существующие представления о структуре ядра. Разработанный здесь подход позволяет совершенно по-новому взглянуть на коллективную динамику ядер. Являясь своеобразным правилом сумм, он обладает немалыми предсказательными возможностями и позволяет довольно скромными вычислительными средствами получать практически точную информацию об усредненных, интегральных характеристиках атомных ядер, что немаловажно для систематизации экспериментальных данных.

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации:

I. Построена бесконечная система динамических интегральных соотношений, которым должна удовлетворять функция Вигнера (матрица плотности). Обнаружено, что она разбивается на независимые конечные подсистемы.

2. Удалось показать, что каждая из этих подсистем описывает динамику определенного мультипольного момента ядра (многочастичной системы).

3. Разработан оригинальный метод описания коллективных возбуждений атомных ядер с помощью этих подсистем.

4. Показано, что динамику тензора инерции ранга n необходимо описывать совместно с динамикой тензоров давлений всех рангов от 2 до n .

5. Проведены расчеты равновесной формы вращающихся ядер, а также энергий и вероятностей возбуждения $0^+, 1^+, 2^+, 3^+, 4^+$ и $1^-, 2^-, 3^-$ уровней как с поверхностным натяжением в приближении несжимаемого ядра, так и с взаимодействием Скирма; показано, что в рамках развитого подхода возможно описание спредовых ширин вибрационных возбуждений.

6. Предсказано расщепление ГР во вращающихся ядрах; обнаружены низколежащие моды с помощью которых можно объяснить наблюдаемые экспериментально γ -переходы "вдоль" *yrast* линии с $\Delta I = 2$ и $\Delta I = 1$; обнаружены и исследованы невибрационные моды быстровращающихся ядер.

7. Уравнения движения, описывающие квадрупольные колебания вращающихся ядер, приведены к каноническому виду и проквантованы.

8. Доказано, что определяющую роль в возникновении статической деформации атомных ядер играет оператор кинетической энергии. Вычисленное расщепление ГР из-за деформации близко к экспериментальному.

9. Рассчитаны (с силами Скирма) энергии и вероятности возбуждения изоскалярных и изовекторных монопольных и квадрупольных гигантских резонансов, энергии и $B(M1)$ -факторы низколежащей $M1$ -моды (гигантского углового резонанса) - результаты неплохо согласуются с экспериментальными данными. Объяснено наблюдаемое экспериментально "расщепление" монопольного резонанса в деформированных ядрах.

10. Рассчитаны энергии и вероятности возбуждения октупольных и гексадекапольных изоскалярных ГР, энергии и $B(M2)$ -факторы магнитных квадрупольных резонансов. В целом результаты расчетов неплохо согласуются с экспериментом. Предсказано положение магнитного октупольного резонанса.

11. Определено положение центроидов низколежащих (ниже соответствующих ГР) 3^- и 2^+ состояний. Предсказано, что их вклад в ЭВПС должен составлять около 30% и 20% соответственно. Современные экспериментальные данные не противоречат этим предсказаниям.

12. Предсказаны изоскалярные дипольная и квадрупольная моды тороидного типа, высоколежащее 1^+ состояние вихревой природы; два изовекторных октупольных резонанса, на одно из которых имеются экспериментальные указания.

Апробация диссертации

Основные материалы диссертации неоднократно докладывались на семинарах ЛТФ ОИЯИ, ИТФ (Киев), НИИЯФ МГУ, ИАЭ им. Курчатова, ИИИ (Киев), ИАН им. Хлопина, СГУ (Саратов), ИИЯЭ БАН (София), ИРМ (Орсе), ISN (Гренобль), ТУ (Мюнхен) CERN (Страсбург). Они были также представлены и докладывались на 36, 38 и 39 Сессиях по ядерной спектроскопии и структуре ядра, Всесоюзных тематических семинарах (Дубна, 1981, 1982, 1988; Одесса, 1985, 1987; Наманган, 1986; Саратов, 1988). Международной школе по коллективной ядерной динамике (Poiana Brasov, Румыния, 1982), Всесоюзной школе-семинаре по физике тяжелых ионов (Ужгород, 1984), Международной школе по структуре ядра (Алушта, 1985), Международной школе по актуальным проблемам ядерных наук (Куба, 1986), Международном симпозиуме "Новейшие достижения в ядерной физике" (Новосибирск, 1987), Международной конференции "Избранные вопросы структуры ядра" (Дубна, 1989), Международной школе по физике ядра (L'ausois, 1989), секции по теоретической физике Ученого Совета ОИЯИ (1983)

Публикации

По результатам диссертации опубликовано 19 работ.

Объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и 13 приложений. Она содержит 247 страниц машинописного текста, включая 3 таблицы, 42 рисунка и библиографический список литературы из 202 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко изложена постановка физической задачи и обоснована актуальность и важность исследуемых проблем.

В первой главе излагаются основные положения метода моментов (вириальных теорем). В разделе I.1 уравнение для матрицы плотности $\hat{\rho} =$

$$= \rho(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \quad i\hbar \frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = [\hat{H}, \hat{\rho}] \quad (1)$$

с помощью преобразования Вигнера

$$f(\vec{r}, \vec{p}, t) = \frac{1}{(2\pi\hbar)^3} \int e^{-i\vec{p}\vec{\sigma}/\hbar} \rho(\vec{r} + \frac{\vec{\sigma}}{2}, \vec{r} - \frac{\vec{\sigma}}{2}, t) d\vec{\sigma} \quad (2)$$

превращается в уравнение для функции Вигнера $f(\vec{r}, \vec{p}, t)$:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{2}{\hbar} \sin\left\{\frac{\hbar}{2}(\vec{v}_z^H \vec{v}_p^f - \vec{v}_p^H \vec{v}_z^f)\right\} H_W f, \quad (3)$$

где H_W - Вигнер-образ гамильтониана \hat{H} . Внешнее сходство этого уравнения с кинетическим уравнением Больцмана-Власова (которое получается из (3), если оставить только первый член разложения \sin в ряд) наводит на мысль воспользоваться известным в статистической физике приемом. Выписываются различные моменты уравнения (3) по импульсам (раздел I.2), в результате чего получается бесконечная система зацепляющихся уравнений "гидродинамического" типа для плотности $\rho(\vec{r})$, скорости $\vec{u}(\vec{r})$, тензора давлений $P_{ij}(\vec{r})$ и тензоров $P_{ij\dots k}(\vec{r})$ более высокого ранга.

Формулируется проблема расцепления этих уравнений. Предлагается способ ее решения с помощью вириальных теорем Чандрасекхара-Лебовица. Именно: если уравнения "гидродинамического" типа интегрировать по координатам с различными весами (раздел I.3), то получается бесконечная система вириальных уравнений, обладающая замечательной особенностью - она распадается на конечные подсистемы уравнений для тензоров определенного ранга.

Написаны пять конечных независимых систем вириальных уравнений (пять вириалов). Выведены все известные интегралы движения, содержащиеся в них: число частиц, импульс, угловой момент, полная энергия ядра. Обсуждаются свойства вириалов (раздел I.4). Обращается внимание на возможность двоякого их толкования. С одной стороны - это просто набор динамических интегральных соотношений, которым должна удовлетворять функция Вигнера. С другой стороны, можно считать, что каждый вириал описывает динамику тензоров $\int d\vec{r} \int d\vec{p} f(\vec{r}, \vec{p}, t) p_i p_j \dots p_k x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_n}$ определенного ранга n (k пробегает значения от 0 до n), характеризующих распределение нуклонов не только в координатном (мультипольные моменты ядра), но и в импульсном пространстве. Однако в этом случае все вириалы уже нельзя считать независимыми, так как взаимодействие (кроме осцилляторного потенциала) в принципе может связать тензоры всех рангов. Но такого рода связи вполне поддаются приближенной трактовке, причем очевидна процедура последовательного уточнения приближений. При таком подходе становится также очевидным важный факт: для корректного описания эволюции момента ядра мультипольности λ нужно учесть деформацию поверхности Ферми всех мультипольностей вплоть до λ .

В статическом случае, когда ничего не зависит от времени, все вириалы превращаются в бесконечное число условий равновесия, которые могут быть использованы, в частности, для фиксации параметров формы ядра.

В разделе I.5 показано, что вариации вириалов являются удобным инструментом для изучения движений малой амплитуды конечных систем

(ядер). Сформулированы правила вариации интегральных величин. Дан анализ корректности используемых приближений; показано, что для их справедливости важную роль играют конечные размеры ядра.

В разделе 1.6 продемонстрирована принципиальная возможность описания краевых столкновений ядер с помощью вириальных уравнений.

Во второй главе посредством вириальных уравнений для тензоров второго ранга изучаются фигуры равновесия и квадрупольные колебания вращающихся ядер в приближении несжимаемого ядра с резким краем. В разделе 2.1 исследуются вириальные уравнения для стационарного случая. Они представляют собой баланс давления, кулоновских, ядерных и центробежных сил (точнее, их моментов) и дают связь параметров формы ядра (фигур равновесия) со скоростью вращения. Форма ядра аппроксимируется сфероидом и эллипсоидом. Тензор ядерных сил естественным образом разделяется на объемную и поверхностную части, причем последняя параметризуется поверхностным натяжением. Рассматриваются только сферические в основном состоянии ядра — деформация возникает в них из-за вращения. Показано, что тензор давлений и объемная часть тензора ядерных сил не входят в окончательную формулу, связывающую параметры деформации и неаксиальности со скоростью вращения Ω , так что она оказывается тождественной формуле гидродинамической модели. Проведены расчеты сфероидальных и эллипсоидальных фигур равновесия для различных значений параметра делимости X , дан их подробный анализ. Предсказаны явления гигантских бэк-бендинга, и фор-бендинга, изомеры формы. Иллюстрацией полученных результатов может служить рис. 1, на ко-

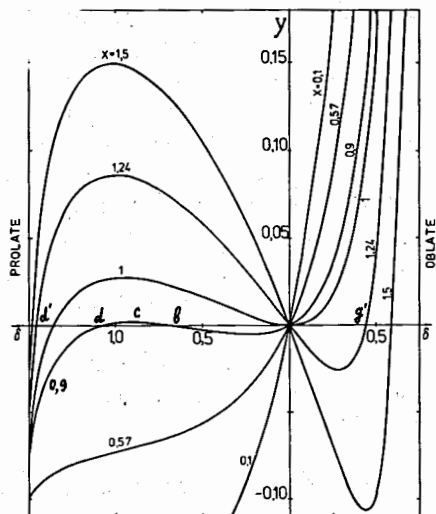


Рис. 1. Зависимость известного в теории деления параметра вращения Y ядра сфероидальной формы от параметра деформации δ при различных значениях параметра делимости X .

тором показана зависимость параметра Y (отношение вращательной энергии ядра к поверхностной) от деформации δ . В разделе 2.2 путем варьирования вириальных уравнений для тензоров 2-го ранга получены уравнения движения, описывающие квадрупольные колебания ядра. Динамическими переменными в них служат вариации тензора инерции V_{ij} и тензора давлений δP_{ij} . Уравнения разделяются на две группы: положительной и отрицательной сигнатуры. Из них выделяются интегралы движения, связанные с сохранением углового момента и вихревого движения, а также интегралы, отражающие жесткую связь между деформациями поверхности Ферми и поверхности ядра. Выведены аналитические формулы для собственных частот. Проведены расчеты для различных ядер с дорожки β -стабильности. Рассчитанная энергия гигантского квадрупольного резонанса (ГКР) совпадает с экспериментальной. Показано, что она определяется, главным образом, величиной импульса Ферми. При $\Omega \neq 0$ ГКР расщепляется на 5 ветвей из-за возникновения деформации и кориолисовых сил (рис. 2). В сфероидах каждой ветви можно сопоставить определенное

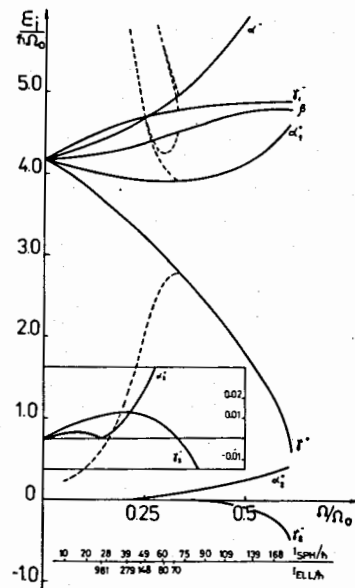


Рис. 2. Зависимость спектра квадрупольных колебаний от скорости вращения Ω . Сплошные кривые — сфероиды, пунктирные — эллипсоиды. $X=0,62$ (^{154}Er), $\hbar\Omega_0=2,83$ Мэв. $\beta, \alpha^{\pm}, \gamma^{\pm}$ соответствуют $\mu=0, \pm 1, \pm 2$.

значение проекции мультипольного момента возбуждения на ось вращения: $\mu=0, \pm 1, \pm 2$. В точке бифуркации (для ^{154}Er , например, она соответствует угловому моменту $I=70\hbar$) от спектра сфероидов "ответвляется" спектр

эллипсоидов. При $\mathcal{L} \neq 0$ появляются две низколежащие моды. Одна из них родственна прецессионной и интересна тем, что при определенном I ($\approx 25\hbar$ для ^{154}Er) меняет знак μ , т.е. после этой точки γ -переходы на это состояние идут уже не с уменьшением I на 1, а с увеличением. Другая интересна тем, что в точке бифуркации ее энергия становится отрицательной, так как после точки бифуркации эллипсоидальная форма становится более выгодной энергетически. Дан анализ спектров различных групп ядер. Проводится сравнение со спектром классической жидкой капли. Показано, что эллипсоидальные конфигурации устойчивы относительно квадрупольных колебаний при любых \mathcal{L} . В разделе 2.3 предложен метод вывода формулы для колебательной энергии ядра в терминах динамических переменных. Найдено выражение для нее в терминах V_{ij} и \mathcal{P}_{ij} в случае квадрупольных колебаний. С помощью алгоритма обратной задачи классической механики уравнения движения приведены к каноническому виду и проквантованы. В разделе 2.4 тремя способами выведены формулы для вероятностей возбуждения квадрупольных нормальных мод. В первом способе используются квантовые уравнения движения и вычисляется матричный элемент оператора квадрупольного момента между однофотонным и бесфотонным состояниями. Во втором способе используется классическая формула для интенсивности квадрупольного излучения, причем амплитуда соответствующих колебаний находится из условия равенства энергии колебательного движения (в терминах V_{ij} , \mathcal{P}_{ij}) нормальной частоте ω , умноженной на \hbar . Третий способ заключается в применении теории линейного отклика; ввиду его универсальности в дальнейшем только он и используется. Проведены расчеты вероятностей возбуждения всех ветвей ГКР и низколежащих (мягких) мод в зависимости от \mathcal{L} . Коллективность низколежащих мод возрастает с увеличением \mathcal{L} и сравнивается с коллективностью остальных мод в окрестности точки бифуркации. Расчеты показывают, что при всех значениях углового момента I оказываются возможными переходы, ведущие к возбуждению мягкой моды с уменьшением углового момента на 2. При всех представляющих интерес значениях I энергия таких переходов $E_{\gamma} \approx 2\hbar\mathcal{L}$, т.е. очень близка к энергии переходов вдоль ираст-линии. Имеются экспериментальные указания в пользу такого эффекта. На основе анализа энергетически взвешенного правила сумм (ЭВПС) установлено существование двух невибрационных мод в эллипсоидальных конфигурациях. В разделе 2.5 проведено детальное исследование этих мод, получены соответствующие им спектры и массовые параметры. В разделе 2.6 демонстрируется, как в рамках метода моментов можно исследовать средовые ширины резонансов. С этой целью к исходному уравнению (3) для функции Вигнера добавлен "корреляционный член", отвечающий модифицированному \mathcal{T} -приближению, сохраняющему плотность, импульс

и кинетическую энергию вещества в каждой точке ядра. Рассчитана зависимость ширины всех ветвей ГКР и мягких мод от скорости вращения. Время свободного пролета \mathcal{T} бралось таким, чтобы воспроизводилась экспериментальная ширина ГКР при $\mathcal{L}=0$. Ширины мягких мод значительно (\sim в 25-30 раз) меньше ширины ГКР. Все они слабо зависят от \mathcal{L} . Следует отметить, что неустойчивость сфероидальных конфигураций относительно квадрупольных колебаний наступает уже в точке бифуркации ($I \approx 70\hbar$ для ^{154}Er), т.е. значительно раньше, чем это было без диссипации ($I \approx 180\hbar$). Эллипсоидальные конфигурации по-прежнему устойчивы при всех угловых моментах, дозволенных условиями векового равновесия. В разделе 2.7 рассмотрены невращающиеся ядра, имеющие статическую деформацию. Продемонстрировано, что определяющую роль в ее возникновении играет тензор давлений — при этом доказано, что деформация возможна только при анизотропном тензоре давлений. Наличие деформации приводит к расщеплению ГКР на три ветви ($|M| = 0, 1, 2$), причем рассчитанная величина расщепления согласуется с экспериментально наблюдаемым уширением ГКР в деформированных ядрах.

В третьей главе продолжено изучение формы и квадрупольных колебаний вращающихся ядер, но уже с реалистическим нуклон-нуклонным взаимодействием (силы Скирма, вариант SKM^*). В разделе 3.1 получены новые вириальные уравнения и решен ряд проблем, связанных с нелокальностью этих сил. В разделе 3.2 исследуется форма ядра в состоянии векового равновесия. Для равновесного значения тензора давлений используется приближение Томаса-Ферми. Рассматриваются только сфероиды. Показано, что зависимость деформации от скорости вращения очень близка к таковой, рассчитанной с поверхностным натяжением. В разделе 3.3 получены новые выражения для вариаций плотности, квадрупольного момента, углового момента и среднеквадратичного радиуса ядра, содержащие члены, ответственные за обменные эффекты. Выведены уравнения движения, должностные описывать как изоскалярные (IS), так и изовекторные (IV) квадрупольные, дипольные и монополярные колебания ядра. В разделе 3.4 получены характеристические уравнения для соответствующих собственных частот, получены формулы для вероятностей возбуждения перечисленных мод. В разделе 3.5 обсуждаются результаты расчетов при $\mathcal{L}=0$. Энергии изоскалярных и изовекторных ГКР и гигантского монополярного резонанса (ГМР) хорошо согласуются с экспериментом. Показано, что широко используемое приближение, когда считается, что нейтроны и протоны движутся в фазе или противофазе с равными по величине амплитудами, оказывается практически точным для изоскалярных возбуждений и приводит к $\sim 10\%$ ошибкам для изовекторных возбуждений. Найдено также, что нелокальная часть сил Скирма дает заметный вклад в ЭВПС — около 25%. В разделе

3.6 приведены результаты расчетов энергий и вероятностей возбуждения 2^+ , 1^+ и 0^+ уровней во вращающемся ядре. Показано, что при $\mathcal{L} \neq 0$ оба (IS и IV) ГКР расщепляются на 5 ветвей и появляются пять низколежащих мод (рис. 3). Моды I3 и II, отвечающие относительному движению

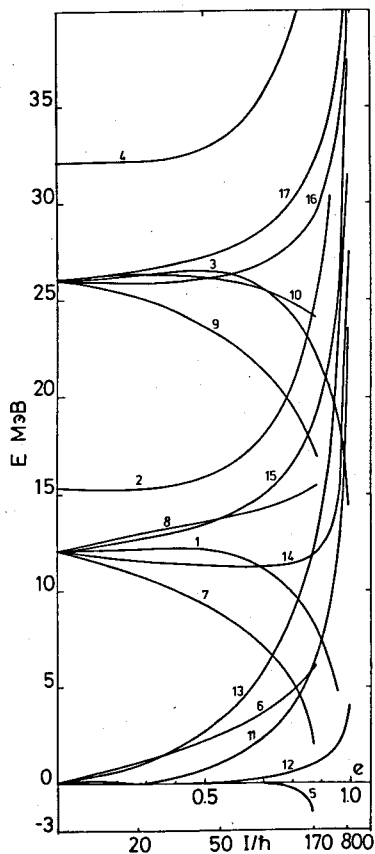


Рис. 3
Энергии 0^+ , 1^+ и 2^+ возбуждений в зависимости от эксцентриситета e и углового момента I . Уровни пронумерованы следующим образом: изоскалярные - I(0), 2(0), 5(-2), 7(+2), 8(-2), I2(+1), I3(-1), I4(+1), I5(-1); изовекторные - 3(0), 4(0), 6(-2), 9(+2), I0(-2), II(+1), I6(+1), I7(-1) (в скобках указано значение проекции мультипольного момента M).

протонного и нейтронного угловых моментов, можно идентифицировать, как гигантский угловой резонанс. Их энергии и $B(M1)$ -факторы (при соответствующей деформации) близки к экспериментальным значениям, полученным недавно в деформированных ядрах. Объяснено наблюдаемое экспериментально "расщепление" на две ветви монопольного резонанса, как следствие сильного смешивания монопольного резонанса и β -моды квадрупольного резонанса.

В четвертой главе с помощью вириальных уравнений для тензоров третьего ранга исследуются возбуждения отрицательной четности. В разделе 4.1 в приближении несжимаемого ядра с резким краем получены уравнения, описывающие электрические октупольные, магнитные квадрупольные возбуждения и изоскалярную 1^- моду тороидного типа. В разделе 4.2 анализируются результаты расчета энергий и вероятностей возбуждения 3^- состояний. Теория дает два 3^- уровня. Первый - это гигантский октупольный резонанс (ГОР). При учете размытости края ядра его положение хорошо согласуется с экспериментом. Второй уровень интерпретируется, как центроид всех 3^- уровней, лежащих ниже ГОР. Согласно расчетам ГОР исчерпывает $\sim 70\%$ ЭВПС, а остальные $\sim 30\%$ приходятся на долю более низких 3^- уровней, что не противоречит экспериментальным данным. Продемонстрирована важная роль октупольной деформации поверхности Ферми. Проанализировано влияние на октупольные колебания квантовой поправки к уравнению Больцмана-Власова. Показано, что ее роль сильно зависит от степени самосогласованности среднего поля, что может даже привести к искаженной интерпретации результатов. В разделе 4.3 приведены результаты расчета энергии и $B(M2)$ -фактора магнитного квадрупольного резонанса. Они неплохо согласуются с экспериментом, если принять во внимание, что теория пока не учитывает спиновые степени свободы. Материал раздела 4.4 носит предсказательный характер. Рассчитана энергия изоскалярного дипольного 1^- возбуждения тороидного типа: $E_1 \approx 66 A^{-1/3}$ МэВ. Обсуждаются возможные экспериментальные указания на него. В разделе 4.5 посчитаны средовые ширины 3^- , 2^- и 1^- резонансов в \mathcal{Z} -приближении. Параметр \mathcal{Z} взят тот же, что в главе 2. Результаты расчета для 3^- и 2^- неплохо согласуются с экспериментом. В разделе 4.6 написаны уравнения движения для возбуждений отрицательной четности в случае реалистического нелокального взаимодействия (SKM^*). Рассчитаны энергии изоскалярных и изовекторных 3^- и 2^- резонансов. На рис. 4 сравниваются результаты расчетов с поверхностным натяжением и с SKM^* . Положение изовекторного ГОР согласуется с экспериментом. Предсказано также изовекторное 3^- возбуждение примерно посередине между изоскалярными ГОР и низколежащим 3^- возбуждением.

В пятой главе с помощью вириальных уравнений для тензоров второго и четвертого ранга изучаются коллективные 1^+ , 2^+ , 3^+ и 4^+ возбуждения в приближении несжимаемого ядра с резким краем. В разделе 5.1 выведены соответствующие уравнения движения. В разделе 5.2 представлены результаты расчета энергий перечисленных мод. Теория дает два 4^+ уровня (рис. 5). Один из них (нижний) хорошо воспроизводит экспериментальные данные по гигантскому гексадекапольному резонансу (ГГР). На второй (более высокий) имеется одно экспериментальное указание. Продемонстри-

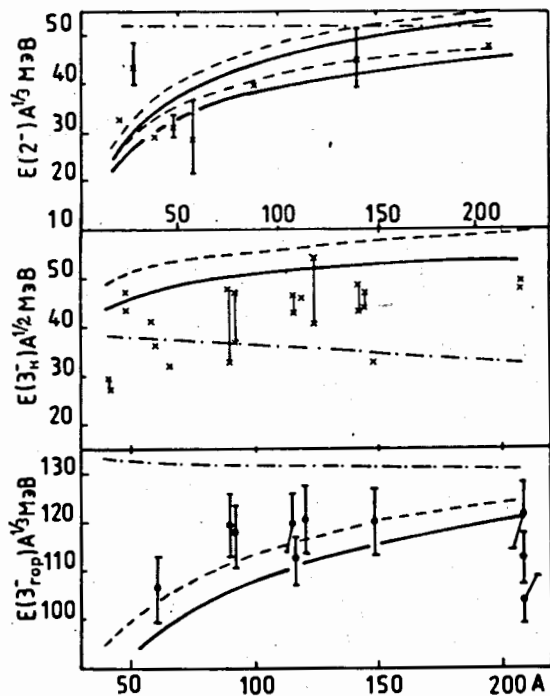


Рис. 4
 Центроиды энергий изоскалярного ГОР (внизу), изоскалярных низколежащих 3^- состояний (посредине) и магнитного квадрупольного резонанса (расцепленного) (вверху). Штрих-пунктирные кривые - расчет с поверхностным натяжением, пунктирные и сплошные кривые - расчет с силами Скимма для двух различных наборов параметров равновесной плотности.

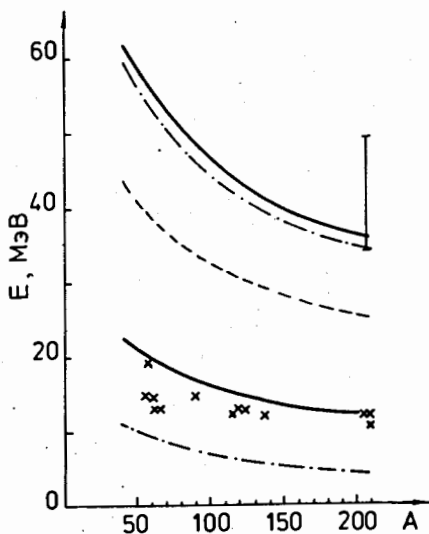


Рис. 5
 Гексадекапольные возбуждения. Сплошные кривые - точный расчет, штрих-пунктир - учтены только квадрупольная и октупольная деформации поверхности Ферми (ДПФ), пунктир - учтена только квадрупольная ДПФ. Крестики и "усы" - экспериментальные данные.

рована исключительная важность учета деформации поверхности Ферми (ДПФ) высших мультипольностей. Предсказаны положение магнитного октупольного резонанса ($E_{3^+} \approx 116 A^{-1/3}$ МэВ) и высоколежащего дипольного изоскалярного резонанса вихревой природы ($E_{1^+} \approx 133 A^{-1/3}$ МэВ). Из уравнений метода получается четыре 2^+ уровня. Один из них - ГКР, другой интерпретируется как центроид всех низколежащих (ниже ГКР) 2^+ уровней. Два 2^+ резонанса, лежащих выше ГКР, должны иметь в основном вихревую природу; положение одного из них ($\sim 87 A^{-1/3}$ МэВ) практически совпадает с предсказаниями других теоретиков. В разделе 5.3 рассчитаны вероятности возбуждения 2^+ и 4^+ резонансов и их вклады в ЭВПС. Показано, что оба 4^+ уровня дают примерно одинаковый вклад в правило сумм и полностью его исчерпывают. Что касается 2^+ состояний, то здесь нижайший уровень и ГКР исчерпывают $\sim 20\%$ и 79% ЭВПС соответственно, оставляя на долю двух более высоких уровней около 1% .

В заключении перечислены основные результаты диссертации, а также обсуждаются перспективы развития метода и его возможных приложений.

В приложения вынесены некоторые математические вопросы, а также ряд полезных соотношений и формул справочного характера.

Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в работах:

1. Balbutsev E.B., Dymarz R., Mikhailov I.N., Vaishvila Z. Macroscopic description of the giant quadrupole resonance in rotating nuclei. Phys. Lett., 1981, vol. B105, N2,3, p. 84-88.
2. Бальбуцев Е.Б., Вайшвила З., Михайлов И.Н. Форма и нормальные моды квадрупольных колебаний вращающихся ядер в макроскопическом подходе (сфероиды). ЯФ, 1982, т. 35, вып. 4, с. 836-847.
3. Бальбуцев 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(II), с. 1109-1120.
4. Mikhailov I.N., Balbutsev E.B., Briancon Ch. Effects of angular momentum alignment on the properties of collective bands in atomic nuclei. In: Nuclear collective dynamics. Lectures of the 1982 Int. summer school of nuclear physics. Poiana Brasov, Romania, 1982, D.Bucurescu a.o. ed-s, p. 263-308.
5. Бальбуцев Е.Б., Вайшвила З., Михайлов И.Н. Коллективные $E2$ -переходы в быстровращающихся ядрах. ЯФ, 1983, т.38, вып.3(9), с.591-600.
6. Бальбуцев Е.Б., Михайлов И.Н. Макроскопическое описание коллективного движения в быстровращающихся ядрах. Труды международной школы по структуре ядра, (Алушта, 1985), Д-85-85I, Дубна, 1985, с. 237-244.
7. Balbutsev E.B., Mikhailov I.N., Vaishvila Z. Macroscopic description of collective motion in fast-rotating nuclei. Nucl. Phys., 1986, vol. A457, p. 222-260.

8. Balbutsev E.B., Mikhailov I.N., Vaishvila Z. Closure of the chain of the kinetic equation moments and description of the negative-parity collective excitations. J.Phys.G, 1986, vol. 12, p. L185-L189.
9. Бальбуцев Е.Б., Михайлов И.Н., Пиперова Й. Спиновая зависимость спредовых ширин коллективных квадрупольных возбуждений. Изв. АН СССР (сер.физ.) 1987, т. 51, № 5, с. 890-897.
10. Balbutsev E.B., Mikhailov I.N., Dynamics of nuclear integral characteristics. Proceedings of the int. symposium on modern developments in nuclear Physics. Novosibirsk, 1987, p. 359-372.
11. Balbutsev E.B., Mikhailov I.N. Dynamics of nuclear integral characteristics. J.Phys.G, 1988, vol. 14, p. 545-567.
12. Бальбуцев Е.Б., Пиперова Й. Динамика интегральных характеристик атомных ядер. Изв. АН СССР (сер.физ.) 1988, т. 52, №II, с. 2132-2137.
13. Balbutsev E.B., Mikhailov I.N., Di Toro M. Quantum effects in a phase space description of nuclear collective motions. Europhysics Letters, 1988, vol. 6, p. 317-321.
14. Бальбуцев Е.Б., Михайлов И.Н., Стоицов М.В. Влияние размытости поверхностного слоя ядра на коллективные состояния отрицательной четности. ЯФ, 1989, т. 50, вып. I(7), с. 35-39.
15. Бальбуцев Е.Б., Молодцова И.В. Статическая деформация атомных ядер и гигантский квадрупольный резонанс. ЯФ, 1989, т. 50, №8, с. 338-343.
16. Бальбуцев Е.Б., Михайлов И.Н., Молодцова И.В., Пиперова Й., Шехтер Л.Ш., Синичкин В.П., Ядерное коллективное движение, описываемое посредством моментов вигнеровской функции распределения. Труды международной конференции по избранным вопросам структуры ядра. Дубна, 1989, Д4,6,15-89-638, с. 223-237.
17. Бальбуцев Е.Б., Пиперова Й. Коллективные 0^+ , 1^+ и 2^+ возбуждения во вращающихся ядрах. ЯФ, 1989, т. 50, вып. 4(10), с. 961-973.
18. Бальбуцев Е.Б., Бэструков С.И., Михайлов И.Н., Синичкин В.П., Шехтер Л.Ш. Вибрационные 1^+ , 2^+ , 3^+ и 4^+ возбуждения в сферических ядрах. ЯФ, 1989, т. 50, вып. 5(11), с. 1264-1276.
19. Бальбуцев Е.Б., Михайлов И.Н. Описание коллективного движения атомных ядер методом моментов. В кн.: Коллективная ядерная динамика. Л.: Наука, 1990, с. 3-66.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 февраля 1990 года.