

M-754

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

4-92-467

МОЛОДЦОВА
Ирина Владимировна

УДК 539.142/143

**ОПИСАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ
АТОМНЫХ ЯДЕР МЕТОДОМ МОМЕНТОВ
ФУНКЦИИ ВИГНЕРА**

Специальность: 01.04.16 - физика ядра и элементар-
ных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1992

ван для изучения атомных ядер, имеющих статическую деформацию.

- Определено положение двух центроидов (в высоко- и низкоэнергетических областях спектра) магнитных 4^- -состояний сферических ядер.
- Определены две области локализации силы коллективных изоскалярных $E5$ -переходов в сферических ядрах.
- Вычислено расщепление магнитного 2^- -резонанса на две энергетически близкие компоненты – изоскалярную и изовекторную. Продемонстрирована существенная роль орбитального движения для возбуждения $M2$ -резонанса.
- Показано, что зависящая от скорости часть взаимодействия приводит к возрастанию роли квантовых поправок к уравнению Власова при описании низколежащих изоскалярных 3^- -состояний.

Результаты, полученные в диссертации, служат стимулом поиска резонансов высших мультипольностей и дальнейшего исследования состояний, относительно которых существует скудная экспериментальная информация.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на Международной конференции "Избранные вопросы структуры ядра" (Дубна, 1989), 40 и 41 Сессиях по ядерной спектроскопии и структуре ядра (Ленинград, 1990; Минск, 1991), Международной конференции "Механизмы ядерных реакций" (Варенна, 1991). Они также неоднократно докладывались на семинарах ЛТФ ОИЯИ.

Публикации и объем работы.

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 печатных работах. Диссертация состоит из введения, четырех глав, трех приложений и заключения. Содержит 107 страниц текста, включая 11 рисунков и 4 таблицы; в список литературы включено 97 наименований.

Основные результаты, выносимые на защиту.

1. Метод моментов распространен на тензоры пятого ранга. В приближении несжимаемого ядра с резким краем выведены уравнения движения для соответствующих коллективных переменных. Получены уравнения метода моментов для тензоров третьего ранга с силами Скирма и с учетом диффузности ядерной поверхности.
2. Показано, что учет изоспиновых степеней свободы и зависящая от скорости часть взаимодействия приводят к расщеплению магнитного квадрупольного резонанса на две энергетически близкие компоненты – изоскалярную и изовекторную. Продемонстрирована существенная роль орбитального движения для возбуждения $M2$ -резонанса.
3. Получено два центроида энергий изоскалярных $E3$ -переходов: один – гигантский октупольный резонанс, второй – центроид всех 3^- -состояний, локализованных в области первой осцилляторной оболочки. Расчет дает также две изовекторные 3^- -моды: изовекторный гигантский октупольный резонанс и центроид низколежащих 3^- -состояний.
4. Дана теоретическая оценка энергетических областей концентрации силы изоскалярных $M4$ -переходов в сферических ядрах.

5. Рассчитаны центры энергии и вероятности возбуждения изоскалярных коллективных 5^- -состояний сферических ядер. Найдены две возможные области локализации соответствующей мультипольной силы и оценен вклад каждого из уровней в правило сумм.
6. Показано, что решающая роль в возникновении статической деформации атомных ядер принадлежит оператору кинетической энергии. Вычислены энергетический спектр и приведенные вероятности $E2$ -переходов в зависимости от значения параметра деформации ядра для вытянутых и сплюснутых эллипсоидов.

Содержание диссертации.

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

В первой главе, которая носит вводный характер, излагаются основные положения метода моментов.

В первом разделе, начиная с уравнения Хартри-Фока для одночастичной матрицы плотности $\rho(\vec{r}_1, \vec{r}_2, t)$ и используя преобразование Вигнера, получено уравнение для квантовой функции распределения в фазовом пространстве $\{\vec{r}, \vec{p}\}$ (функции Вигнера $f(\vec{r}, \vec{p}, t)$):

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{2}{\hbar} \sin \left\{ \frac{\hbar}{2} \left(\vec{\nabla}_r^H \vec{\nabla}_p^f - \vec{\nabla}_p^H \vec{\nabla}_r^f \right) \right\} H_W f, \quad (1)$$

где H_W – Вигнер-образ гамильтониана. Если оставить только первый член разложения \sin в ряд, то уравнение (1) в таком приближении сводится к кинетическому уравнению Власова. Последующие члены разложения – квантовые поправки к уравнению Власова.

Интегрированием квантового кинетического уравнения (1) в импульсном пространстве с различными весами получается

бесконечная система уравнений "гидродинамического" типа для плотности $\rho(\vec{r}, t)$, коллективной скорости $\vec{u}(\vec{r}, t)$, компонент тензора давлений (внутренних напряжений) $P_{ij}(\vec{r}, t)$ и тензоров более высокого ранга $P_{ij\dots k}(\vec{r}, t)$. Таким образом осуществляется переход к макроскопическому описанию коллективной ядерной динамики. При этом динамические переменные ρ , \vec{u} , P_{ij} и т.д. и уравнения их эволюции определяются в терминах импульсных моментов одночастичной квантовой функции распределения.

В разделе 1.2, интегрированием полученной в 1.1 системы в координатном пространстве с различными весами получается бесконечная система вириальных уравнений для моментов функции Вигнера в фазовом пространстве

$$J_{i_1 \dots i_k}^{i_{k+1} \dots i_n} = \int d\vec{r} \int d\vec{p} f(\vec{r}, \vec{p}, t) p_{i_1} p_{i_2} \dots p_{i_k} x_{i_{k+1}} x_{i_{k+2}} \dots x_{i_n}. \quad (2)$$

Бесконечная система вириальных уравнений распадается на конечные подсистемы, описывающие динамику тензоров $J_{i_1 \dots i_k}^{i_{k+1} \dots i_n}$ определенного ранга n (k меняется от 0 до n), характеризующих распределение нуклонов не только в координатном (мультипольные моменты), но и в импульсном пространстве. При таком подходе становится ясно, что для корректного описания эволюции момента ядра мультипольности λ нужно учесть деформацию поверхности Ферми (ДПФ) всех мультипольностей вплоть до λ .

Вириальные теоремы оказываются хорошей основой для изучения малых возмущений равновесного состояния ядра. С этой целью вириальные уравнения варьируются и линеаризуются по амплитудам (раздел 1.9). В результате получаются уравнения движения, описывающие вибрационные возбуждения ядра различной мультипольности λ . Динамическими переменными в них служат вариации тензоров $J_{i_1 \dots i_k}^{i_{k+1} \dots i_n}$ ($n \leq \lambda$).

В последнем разделе продемонстрирован способ расчета вероятностей в рамках метода моментов с использованием теории линейного отклика, в форме, предложенной Лейном.

Во второй главе с помощью вириальных уравнений для тензоров третьего ранга исследуются возбуждения отрицательной четности мультипольности $\lambda \leq 3$ в сферических ядрах с реалистическим нуклон-нуклонным взаимодействием Скирма (вариант SKM*).

В первом разделе выведены уравнения метода моментов в случае реалистического потенциала с учетом диффузности ядерной поверхности. Для равновесного значения тензора давлений используется приближение Томаса-Ферми. Полученные уравнения могут служить основой для изучения коллективных 3^- -, 2^- - и 1^- -состояний. Реалистичность взаимодействия позволяет наряду с изоскалярными включить в рассмотрение и изовекторные моды.

Показано, что зависящая от скорости часть взаимодействия приводит к появлению квантовых поправок во всех динамических уравнениях для импульсных моментов функции Вигнера, за исключением уравнения непрерывности (если взаимодействие носит локальный характер, то квантовые поправки впервые появляются лишь в уравнении для тензора третьего ранга P_{ijk}).

В разделе 2.2 получено выражение для вариации (δ) октупольного момента ядра $Q_{3\mu}$ в терминах коллективных переменных задачи. Найдены периодические ($\sim e^{i\omega t}$) решения системы уравнений, описывающей динамику $\delta Q_{3\mu}$ (совместно с переменными, содержащими информацию о ДПФ). Характеристическое уравнение системы является полиномом четвертого порядка относительно ω^2 и дает четыре семикратно вырожденных уровня. Анализ вероятностей возбуждения и вкладов в правила сумм показывает, что найденные решения хорошо разделены по изоспину – два из них практически полностью исчерпывают изоскалярное, а два других – изовекторное правила сумм.

Один из изоскалярных уровней является гигантским октупольным резонансом (GOR). Проведены расчеты энергии это-

го состояния в зависимости от массового числа (рис. 1). Результат согласуется с экспериментом; отличие наблюдается лишь в деформированных ядрах. Получена оценка вклада GOR

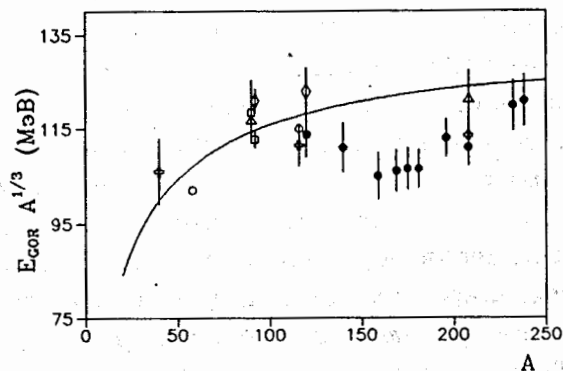


Рис. 1: Изоскалярный GOR (центроид энергий).

в изоскалярное (IS) энергетически взвешенное правило сумм (EWSR). Он практически не зависит от A и составляет $\sim 54\%$, что согласуется с экспериментом для средних и тяжелых ядер.

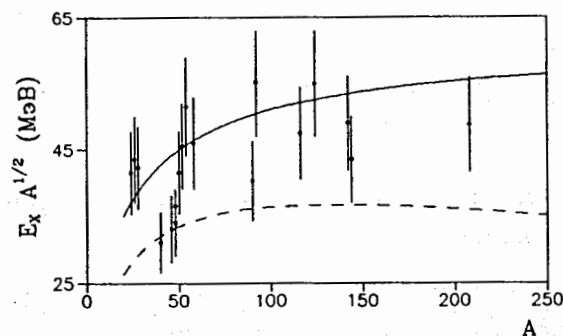


Рис. 2: Центроиды энергий изоскалярных 3^- -состояний, лежащих ниже GOR. Пунктирная линия – расчет без квантовой поправки.

Второй изоскалярный уровень интерпретируется как центр оид всех 3^- -состояний, лежащих ниже GOR (рис.2). Во многих ядрах наблюдается фрагментация силы $1\hbar\omega$ $E3$ -перехода по нескольким состояниям. Экспериментальные оценки показывают, что в общей сложности в области первой осцилляционной оболочки в тяжелых ядрах локализовано $\sim 35\%$ ISEWSR, что находится в согласии с результатами расчетов.

При локальном взаимодействии квантовые поправки практически не влияют на энергии и вероятности возбуждения изоскалярных 3^- -состояний. Показано, что нелокальность взаимодействия приводит к усилению зависимости энергии низколежащей изоскалярной моды от квантовых поправок: энергия этого состояния при учете квантовых поправок увеличивается почти на 50% в тяжелых ядрах и на треть в легких.

Вычисленное положение изовекторного GOR согласуется

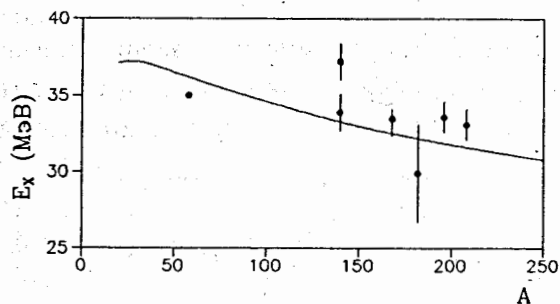


Рис. 3: Изовекторный GOR (центр оид энергий).

с экспериментом (рис. 3). Расчет дает также центр оид низколежащих изовекторных 3^- -состояний в районе 11-14 МэВ, на долю которого приходится около 13% изовекторного (IV) EWSR в легких ядрах (^{40}Ca), и эта доля уменьшается с ростом A , доходя до 6% в ^{208}Pb .

Оба изовекторных 3^- -состояния исчерпывают 105,4% IVEWSR, а изоскалярные 3^- -возбуждения – 94% ISEWSR. Это

происходит вследствие того, что рассматриваемые четыре моды не разделяются строго на изоскалярные и изовекторные.

В разделе 2.3 приведены результаты расчета энергии и вероятности возбуждения магнитного квадрупольного резонанса 2^- . Учет изоспиновых степеней свободы, а также зависящая от скорости часть взаимодействия приводят к расщеплению этого резонанса на два уровня: изоскалярный и изовекторный. Заметим, что при расчетах не учитывались спиновые степени свободы (описываемые 2^- -возбуждения имеют чисто орбитальный характер). Вычисленные электромагнитные $B(M2)$ -факторы в среднем составляют около 20% от экспериментальных значений, что согласуется с оценками вклада орбитального движения, полученными другими авторами в рамках RPA.

В разделе 2.4 на основе уравнений движения для декартовых тензоров 1-го ранга вычислены энергии и вероятности возбуждения гигантского дипольного резонанса (GDR) для

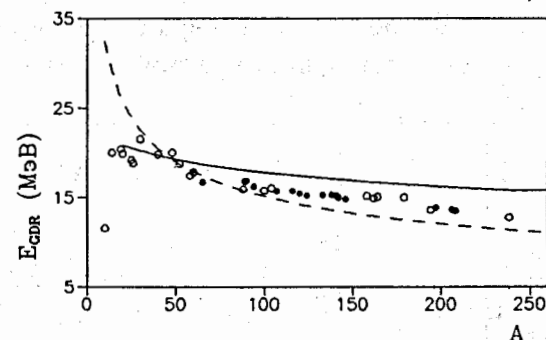


Рис. 4: Центр оид GDR. Сплошная линия – метод моментов; пунктирная – модель жидкой капли, $E \approx 70A^{-1/3}$ МэВ.

ядер с дорожки β -стабильности. Получено аналитическое выражение для дипольного правила сумм, которое отличается

от классического множителем (так называемый фактор усиления), возникающим из-за нелокальности взаимодействия. Рассчитанный центриод GDR исчерпывает полностью правило сумм. Фактор усиления меняется от 1,25 при $A = 20$ до 1,42 при $A = 240$ и заметно улучшает согласие теории с экспериментом.

В третьей главе рассматриваются изоскалярные 4^- - и 5^- -коллективные состояния сферических ядер.

В первом разделе выведены вириальные уравнения до пятого порядка включительно в приближении несжимаемого ядра с резким краем. При этом не учитывалось остаточное нуклон-нуклонное взаимодействие. Равновесные значения тензора давлений и тензора четвертого ранга были вычислены в приближении ферми-газа. Полученные уравнения могут быть использованы для изучения коллективных изоскалярных возбуждений 1^- , 2^- , 3^- , 4^- , 5^- .

В разделе 3.2 получена система уравнений, описывающая временную эволюцию вариации магнитного гексадекапольного момента ядра. Решение соответствующего характеристического уравнения дает два девятикратно вырожденных уровня

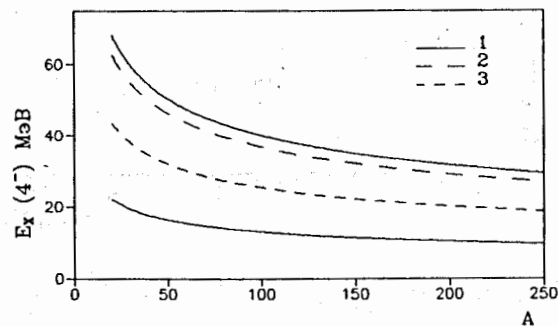


Рис. 5: Гексадекапольные магнитные возбуждения. Линии 1 – точный расчет, 2 – учтены квадрупольная и октупольная ДПФ, 3 – учтена только квадрупольная ДПФ.

с энергиями $E(4_1^-) = 60 A^{-1/3}$ МэВ и $E(4_2^-) = 185 A^{-1/3}$ МэВ. Оценено влияние высших мультиполей ДПФ на рассматриваемые состояния. Рис. 5 демонстрирует различие в оценках энергий 4^- -возбуждений, получаемых с учетом разных порядков ДПФ. В настоящее время экспериментальная информация относительно коллективных состояний 4^- отсутствует. Расчеты показывают, что например в ^{208}Pb концентрацию силы $M4$ -переходов можно ожидать в области энергий ~ 10 МэВ. Вычислены также $B(M4)$ -факторы предсказанных состояний.

В разделе 3.3 выведены динамические уравнения для вариации 2^5 -польного электрического момента. Получено соответствующее характеристическое уравнение. Оно имеет два решения: $E(5_1^-) = 136,5 A^{-1/3}$ МэВ и $E(5_2^-) = 293 A^{-1/3}$ МэВ. Как видно из рис. 6, и в этом случае результат количественно

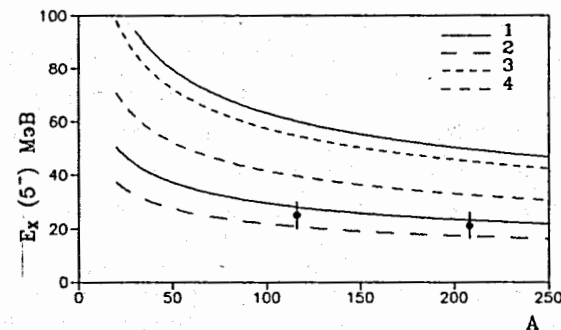


Рис. 6: Электрические 5^- -возбуждения. Линии 1 – точный расчет, 2 – учтены ДПФ мультипольности $\lambda = 4, 3, 2$ (в масштабе этого рисунка вторая кривая совпадает с верхней сплошной); линия 3 – учтены ДПФ с $\lambda = 3, 2$; линия 4 – учтена только квадрупольная ДПФ.

и качественно зависит от учитываемого порядка ДПФ. В частности показано, что если ограничиться только квадрупольной ДПФ (как делается в большинстве работ при анализе кол-

лективного ядерного движения в локальных переменных), то остается только один уровень с энергией $E(5^-) = 192A^{-1/3}$ МэВ.

Экспериментальная информация о возбуждениях этого типа исчерпывается единственным указанием на локализацию 5^- -силы в ^{116}Sn и ^{208}Pb при энергиях соответственно $20 \leq E_x \leq 30$ МэВ и $16 \leq E_x \leq 26$ МэВ. Вычисленное положение центроида низколежащих 5^- -состояний хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными (рис. 6) и с микроскопическими оценками, полученными другими авторами.

В этом разделе также приведены результаты расчета вероятностей возбуждения полученных центроидов и их вклады в ISEWSR. Показано, что эти уровни исчерпывают правило сумм, давая в него вклад 57,5% (высоколежащий) и 42,5% (низколежащий).

Содержание четвертой главы составляют результаты, полученные с помощью вириальных уравнений для тензоров второго ранга. Здесь изучаются равновесная форма и квадрупольные колебания ядер, имеющих статическую деформацию. Расчет также проведен в приближении несжимаемого ядра с резким краем. Равновесная форма ядер аппроксимируется эллипсоидами.

В разделе 4.1 исследуются вириальные уравнения в стационарном случае. Они описывают баланс давления, кулоновских и ядерных сил. Тензор ядерных сил разделяется на объемную и поверхностную части, причем последняя параметризуется поверхностным натяжением. Анализ стационарных уравнений показывает, что определяющая роль в возникновении статической деформации принадлежит тензору давлений, причем деформация возможна только при анизотропном тензоре давлений.

В разделе 4.2 получены уравнения движения, описывающие квадрупольные колебания ядра. Гигантский квадрупольный резонанс (GQR) расщепляется за счет деформации на

три ветви, соответствующие трем проекциям углового момента на ось симметрии ядра. Вычисленная величина расщепления согласуется с экспериментально наблюдаемым уширением GQR в деформированных ядрах. Рассчитана также зависимость спектра GQR в ^{168}Er от деформации ядра для вытянутых и сплюснутых сфероидов.

В разделе 4.3 выведены аналитические формулы для вероятностей возбуждения всех трех квадрупольных мод и рассчитана зависимость $B(E2)$ -факторов от деформации. Показано, что рассчитанный резонанс исчерпывает 100% EWSR.

В заключении перечислены основные результаты работы.

В приложения вынесены некоторые громоздкие математические соотношения и формулы справочного характера.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Бальбуцев Е. Б., Молодцова И. В. Статическая деформация атомных ядер и гигантский квадрупольный резонанс. ЯФ., 1989, т. 50, вып. 8, с. 338 – 343.
2. Balbutsev E. B., Mikhailov I. N., Molodtsova I. V., Piperova J., Shekhter L. Sh., Sinichkin V. P. Nuclear collective motion described by the moments of the Wigner distribution function. Proc. of the Int. Conf. on Selected Topics in Nuclear Structure. Dubna, 1989, Д4,6,15-89-638, с. 223 – 237.
3. Бальбуцев Е. Б., Молодцова И. В., Пиперова И. Коллективные 3^- - и 2^- -возбуждения с силами Скирма. ЯФ., 1991, т. 53, вып. 3, с. 670 – 679.
4. Бастрюков С. И., Бальбуцев Е. Б., Молодцова И. В., Бобрышев М. Л., Папыкин А. В. Изоскалярные 4^- - и 5^- -гигантские резонансы в сферических ядрах. ЯФ., 1991, т. 54, вып. 4[10], с. 927 – 934.

5. Balbutsev E. B., Mikhailov I.N., Molodtsova I. V., Piperova J., Bastrukov S. I., Shekhter L. Sh., Sinichkin V. P. *Nuclear collective motion described by the moments of the Wigner distribution function*. Proc. of the 6th Int. Conf. on Nucl. Reaction Mechanisms. Varenna, 1991, p. 550 – 567.
6. Бальбуцев Е. Б., Молодцова И. В., Унжакова А. В. *Влияние квантовых эффектов и нелокальности взаимодействия на коллективные 3^- , 2^- и 1^- -возбуждения*. Препринт ОИЯИ Р4-92-253, Дубна, 1992, 14 с.; принято к публикации ЯФ., 1993, т. 56, вып. 1, с. 72 – 81.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 ноября 1992 года.