

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4-2003-82

На правах рукописи
УДК 539.12.01

ШНЕЙДМАН
Тимур Маркович

**МОДЕЛЬ
ДВОЙНОЙ ЯДЕРНОЙ СИСТЕМЫ
В ИЗУЧЕНИИ СТРУКТУРЫ ЯДЕР
И ДЕЛЕНИЯ**

Специальность: 01.04.16 — физика ядра
и элементарных частиц

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2003

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им.
Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент С. П. Иванова
кандидат физико-математических наук,
Н. В. Антоненко

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Л. А. Малов
доктор физико-математических наук
Ю. М. Чувильский

Ведущая организация: Московский инженерно-физический
институт
(Государственный Университет)

Защита диссертации состоится “_____” июня 2003 г. в 15⁰⁰ на заседа-
нии диссертационного совета К 720.001.01 при Лаборатории теоре-
тической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института
ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного
института ядерных исследований.

Автореферат разослан “_____” _____ 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



С. И. Федотов

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы. Диссертация нацелена на разработку единого кластерного подхода к описанию близких к ираст полосе коллективных возбуждений тяжелых ядер. Исследование возбуждений кластерного типа несомненно актуально, поскольку на его основе возможно описать разнообразные ядерные явления и понять некоторые общие закономерности свойств ядер. Кластерные степени свободы, о которых идет речь в диссертации, связаны с относительным движением фрагментов кластерной системы и с изменением масс и зарядов кластеров путем передачи нуклонов.

Кластерные степени свободы несомненно важны при изучении долгоживущих сильнодеформированных изомеров деления и высокоспиновых супер- (СД) и гипердеформированных (ГД) ядерных состояний. В диссертации исследуется подобие между такими состояниями и двойными ядерными системами (два ядра в контакте). Этот вопрос широко обсуждается в литературе. Кроме фундаментальной важности для понимания природы долгоживущих сильнодеформированных состояний, следует отметить также практическую ценность таких исследований. В рамках кластерного подхода оказывается возможным найти новые изомерные состояния и предсказать их характеристики – моменты инерции, мультипольные моменты, параметры деформации, а также ответить на вопрос могут ли СД и ГД состояния заселяться непосредственно в реакциях с тяжелыми ионами, минуя стадию формирования составного ядра. Надо отметить, что в настоящее время прилагаются большие экспериментальные усилия для получения первого высокоспинового ГД состояния.

Интерес к кластерной интерпретации форм ядер в основном состоянии связан с появлением новой спектроскопической информации для актинидов с $A \sim 220$ и лантанидов с $A \sim 150$, в которых были обнаружены низколежащие возбуждения отрицательной четности. Проблема существования кластерной структуры в основных состояниях тяжелых ядер привлекает внимание, благодаря наблюдаемому экзотическому распаду с испусканием легких кластеров. Движение по координате массовой асимметрии приводит к изменению деформаций разных мультипольностей в ядерной системе. Поэтому интересно найти связь между кластерными характеристиками и мультипольными (дипольными, квадрупольными, октупольными) статическими моментами ядер. Для обосно-

вания кластерной интерпретации низколежащих состояний ядер, имеющих статическую или динамическую октупольную деформацию, необходимо рассчитать основные спектроскопические характеристики этих состояний – расщепление по четности, переходы нечетных и четных мультипольностей, статические мультипольные моменты, спектроскопические факторы, ширины α -распада.

Кластерные степени свободы играют существенную роль и в процессе деления. Делящееся ядро перед разрывом может быть приближенно рассмотрено как двойная ядерная система. Исследование кластерных степеней свободы в двойной ядерной системе (ДЯС) важно для понимания массовых, угловых и энергетических распределений продуктов деления. Так, например, угловые колебания в ДЯС вокруг равновесной конфигурации приводят к генерации углового момента фрагментов деления и вносят существенный вклад в формирование угловых распределений. Востребованность в исследовании этих степеней свободы связана с появлением новой, более детальной экспериментальной информации о процессе деления, получаемой с помощью современных 4 π -детекторов.

Цель работы состоит в изучении в рамках модели двойной ядерной системы роли кластерных степеней свободы в образовании низколежащих ядерных возбуждений, в формировании высокоспиновых супер- и гипердеформированных состояний ядер и долгоживущих кластерных состояний в делении и в генерации угловых моментов фрагментов деления.

Научная новизна и практическая ценность. Найдены долгоживущие кластерные конфигурации, которые соответствуют СД и ГД состояниям ядер и изомерам деления. Пользуясь предложенным в диссертации подходом, представляется возможным предсказать новые изомерные состояния и их характеристики и определить оптимальные экспериментальные условия для заселения высокоспиновых СД и ГД состояний в реакциях с тяжелыми ионами. Некоторые предсказания, полученные в диссертации, были подтверждены в последующих экспериментах и цитировались в литературе.

Впервые предложен кластерный подход к описанию низколежащих состояний отрицательной четности. Хорошее согласие с экспериментом и отсутствие

свободных параметров позволяют надеяться, что данная модель может служить хорошим базисом для развития более общего подхода с дополнительными, например, одночастичными степенями свободы. На базе предложенной модели может быть изучено появление дублетов по четности в спектрах нечетных ядер. Также могут быть описаны возбужденные состояния с ненулевой проекцией полного спина на ось симметрии ($K \neq 0$). Рассматривая коллективное движение по координате массовой асимметрии при больших угловых моментах, можем изучить физическую природу внезапного исчезновения $E2$ -ротационных переходов в СД полосе с уменьшением спина ядра.

В рамках модели ДЯС исследованы угловые колебания изгиба. Показано, что эти колебания, происходящие в делящейся системе перед развалом, являются основным механизмом генерации углового момента фрагментов деления. Впервые описана зависимость величины углового момента фрагментов деления от числа испущенных из них нейтронов. Результаты этого исследования важны для последующего изучения роли угловых колебаний в формировании угловых распределений и сверхтонкой структуры масс-энергетического распределения фрагментов деления.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, а также представлялись и докладывались на следующих международных конференциях:

1. Workshop "Collective Excitations in Nuclei and Other Finite Fermi Systems", Dubna (Russia) 1999.
2. Symposium "Exotic Nuclei", Baikal Lake (Russia) 2001.
3. International Conference "Frontiers of nuclear structure", Göttingen (Germany) 2001.
4. Symposium "Nuclear Clusters: From light exotic to superheavy nuclei", Rauschenholzhausen (Germany) 2002.
5. XXXVII Zakopane School of Nuclear Physics (Poland) 2002.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация, общим объемом 117 страниц, состоит из введения, 3-х основных глав, заключения и двух приложений, содержит 9 таблиц, 24 рисунка и список цитированной литературы из 119 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется предмет и цель диссертации, а также приводится краткое содержание диссертации.

Первая глава диссертации посвящена описанию СД и ГД состояний ядер в рамках модели ДЯС. В зависимости от полной массы, заряда и углового момента потенциальная энергия ДЯС, как функция массовой асимметрии, имеет несколько глобальных минимумов, соответствующих различным кластеризациям системы. Большинство кластерных состояний имеет энергию выше, чем энергия составного ядра. Характеристики (мультипольные моменты, моменты инерции, параметры деформации) этих состояний близки к характеристикам, известным для СД и ГД состояний. Производится выбор таких кластерных состояний для ядер в различных массовых областях, рассчитываются их характеристики и сравниваются с известными экспериментально характеристиками сильнодеформированных состояний соответствующих ядер и изомеров деления.

В первом параграфе производится расчет мультипольных (дипольного, квадрупольного и октупольного) моментов ДЯС. Предполагается, что ядра ДЯС имеют лишь квадрупольную деформацию. Дипольный момент для ДЯС отличен от нуля из-за разных N/Z -отношений во фрагментах ДЯС. По величинам мультипольных моментов рассчитываются соответствующие им параметры деформации.

Во втором параграфе исследуется потенциальная энергия ДЯС как функция массовой асимметрии. Предполагается, что система находится в минимуме потенциальной энергии по координате относительного расстояния R между центрами ядер, что соответствует касательной конфигурации. Оболочечные эф-

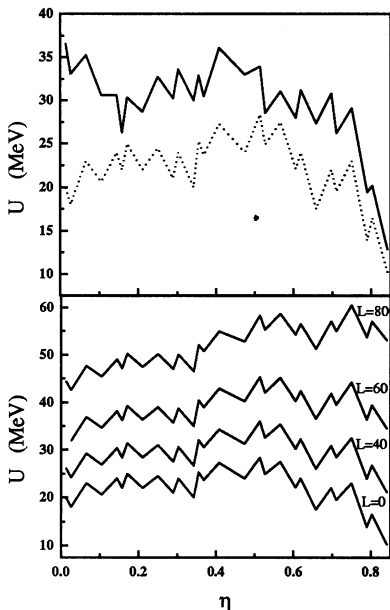


Рис. 1: Сверху: Потенциальная энергия двойной ядерной системы как функция массовой асимметрии для ядра ^{152}Dy при нулевом угловом моменте. Сплошная линия соответствует случаю сферических фрагментов; штриховая линия – случаю деформированных фрагментов ДЯС. Снизу: Потенциальная энергия ДЯС как функция массовой асимметрии для ядра ^{152}Dy при различных угловых моментах. Расчет произведен с учетом деформаций фрагментов ДЯС.

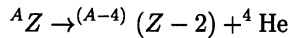
факты учитываются в расчетах через экспериментальные энергии связи фрагментов.

В третьем параграфе рассчитываются моменты инерции ДЯС. Момент инерции является одной из основных спектроскопических характеристик СД вращательных полос. Поскольку перекрытие фрагментов ДЯС в касательной конфигурации составляет несколько процентов от полного объема ДЯС и индивидуальность ядер сохраняется, то можно выразить величины ДЯС через соответствующие характеристики ядер-фрагментов. Моменты инерции фрагментов ДЯС были рассчитаны в твердотельном приближении и из энергий $E_{2+ \rightarrow 0+}$ переходов. Значения твердотельных моментов инерции, как правило, в два-три раза больше значений, вычисленных из $E_{2+ \rightarrow 0+}$. Было обнаружено, что моменты инерции, извлеченные из энергий уровней СД полос составляют приблизительно 85% от значения, полученного в твердотельном пределе.

В четвертом параграфе приведен расчет потенциальных энергий ДЯС как функций массовой асимметрии для ядер ^{152}Dy , ^{232}Th , ^{234}U , ^{240}Pu , ^{76}Kr , ^{148}Nd и ^{236}Ra . Для кластерных систем, отвечающих минимумам потенциала, про-

изводится расчет глубин минимумов, мультипольных моментов, параметров деформации и моментов инерции. Полученные характеристики сравниваются с известными экспериментальными значениями для СД состояний. Результаты сравнения позволяют утверждать, что СД и ГД состояния могут быть рассмотрены как асимметричные ($|\eta| \approx 1$) и почти симметричные ($|\eta| \approx 0$) ДЯС соответственно.

Вторая глава посвящена исследованию низколежащих состояний отрицательной четности в изотопах актинидов ($N \sim 134$) и лантанидов ($N \sim 88$). Появление таких состояний в спектрах ядер связано с нарушением симметрии по отношению к пространственной инверсии. При малых спинах энергии уровней отрицательной четности оказываются сдвинутыми вверх по отношению к положениям, ожидаемым из вращательного правила. Это явление называется расщеплением по четности и исследуется в диссертации. Потенциальные энергии кластерных конфигураций вида



порядка и даже меньше энергии составного ядра. Следовательно, можно ожидать, что такие асимметричные кластерные конфигурации участвуют в формировании коллективной волновой функции ядра и приводят к появлению коллективных низколежащих состояний отрицательной четности. Для проверки этого утверждения в диссертации исследуется динамика коллективного движения ДЯС по координате $\eta = (A_1 - A_2)/(A_1 + A_2)$ ($A_{1,2}$ – массы кластеров ДЯС). Масс-асимметричная мода создает одновременно деформации как четной, так и нечетной мультипольности. Величины моментов нечетной мультипольности (дипольного и октупольного) целиком связаны с колебаниями ядра по переменной массовой асимметрии.

В первом параграфе формулируется модель для описания коллективного движения ДЯС по η . Гамильтониан движения по η состоит из кинетической и потенциальной энергии, взятой при определенном значении полного спина ДЯС. Поскольку характерная частота колебаний по R больше частоты колебаний по η , при рассмотрении динамики движения по η , предполагается, что система находится в минимуме по R . Энергии кластерных конфигураций быстро растут

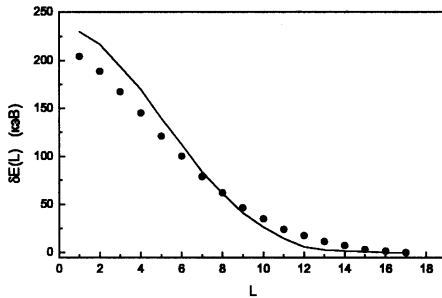


Рис. 2: Зависимость расщепления по четности $\delta E(L)$, вычисленная с использованием экспериментального (точки) и расчетного (сплошная линия) спектра ядра ^{228}Th .

с уменьшением η от α -кластерной конфигурации. Для рассмотренных ядер потенциальная энергия конфигураций с легким фрагментом Li уже на 10-15 МэВ выше энергии основного состояния ядра. Таким образом, движение происходит в очень узком интервале по η около $|\eta| = 1$ и массовый параметр B_η берется постоянным. B_η является гладкой функцией массового числа A . Вследствие этого, для большинства изотопов актинидов было выбрано одинаковое значение $B_\eta = 20 \times 10^4 m_0 \text{ фм}^2$, а для изотопов ядер Ba, Ce и Nd $B_\eta = 4.5 \times 10^4 m_0 \text{ фм}^2$. Решая уравнение Шредингера, выбираем нижайшее четное и нижайшее нечетное решения соответственно для четного и нечетного значений углового момента ДЯС.

Во втором параграфе рассчитываются энергии основной полосы и полосы отрицательной четности для различных изотопов актинидов и ядер Ba, Ce, Nd. Результаты расчета сравниваются с имеющимися экспериментальными данными. Получена простая аналитическая формула (приложение А), позволяющая с одинаковым набором параметров получить удовлетворительное описание расщепления по четности для всех изотопов актинидов.

Третий параграф посвящен выводу выражений, необходимых для расчета вероятностей дипольных, квадрупольных и октупольных переходов. В нашей модели величины моментов нечетных мультипольностей (дипольного и октупольного) связаны с деформацией ядра по переменной массовой асимметрии. Величина квадрупольного момента связана также с квадрупольными деформациями кластеров. При расчете дипольного и октупольного переходов вводятся эффективные заряды. Перенормировка заряда в операторе дипольного перехода учитывает связь масс-асимметричной моды с гигантским дипольным резонан-

сом в ДЯС. Эффективный заряд в операторе октупольного перехода необходим для учета вклада высокочастотных октупольных мод.

В четвертом параграфе на основании полученных выражений рассчитываются приведенные матричные элементы мультипольных переходов между уровнями полосы отрицательной четности и основной полосы. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Третья глава диссертации посвящена расчету угловых моментов спонтанного деления на примере ядра ^{252}Cf . Делящаяся система в точке разрыва может быть приближенно рассмотрена как ДЯС, внутренние степени свободы которой находятся в тепловом равновесии. Равновесная конфигурация соответствует случаю аксиально-симметричной ДЯС.

В первом параграфе анализируются различные нормальные моды угловых колебаний, возможных в предразрывной конфигурации. Зависимость потенциальной энергии ДЯС от углов ориентации фрагментов анализируется в приложении В. Нормальные моды соответствуют угловым колебаниям изгиба, извива, кручения и наклона. Показывается, что угловые колебания изгиба являются наиболее важными при формировании углового момента фрагментов деления.

Во втором параграфе производится оценка энергии возбуждения предразрывной конфигурации. Деформация фрагментов ДЯС может быть получена либо в рамках двухцентровой оболочечной модели, либо из экспериментальной величины полной кинетической энергии фрагментов $\langle \text{TKE} \rangle$. Оба метода дают близкие значения деформаций фрагментов. В стандартной моде деления ядра $^{252}\text{Cf} \rightarrow \text{Mo} + \text{Ba}$, $\text{Zr} + \text{Ce}$, соответствующей испусканию $\nu < 5$ нейтронов, энергия деформации фрагментов составляет несколько МэВ и ДЯС оказывается нагретой перед распадом. В нестандартной делительной моде ядра, соответствующей испусканию $5 < \nu < 7$ нейтронов, энергия деформации фрагментов уже значительна и система перед разрывом практически не нагрета. Малая величина $\langle \text{TKE} \rangle$ этой делительной моды для фрагментов Mo и Ba интерпретирована как формирование цепочки α -частиц между ядрами Zr и Xe в предразрывной системе ($^{102}\text{Zr} + ^4\text{He} + ^4\text{He} + ^{142}\text{Xe}$).

В третьем параграфе рассчитываются зависимости угловых моментов пер-

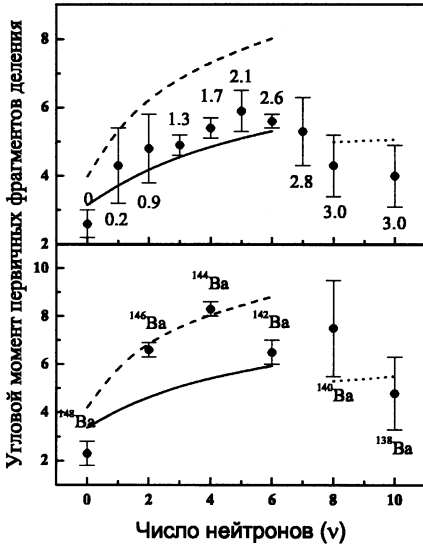


Рис. 3: Расчетные и экспериментальные (точки) угловые моменты (в \hbar) первичных фрагментов деления в зависимости от полного числа испущенных нейтронов ν для фрагментации $^{252}\text{Cf} \rightarrow \text{Mo} + \text{Ba}$. Для стандартной моды деления ($\langle TKE \rangle = 189 \pm 1 \text{ МэВ}$, $\nu \leq 5$) расчет произведен с твердотельным (сплошная линия) и экспериментальным (пунктирная линия) моментом инерции. Расчет для нестандартной моды деления ($\langle TKE \rangle = 153 \pm 3 \text{ МэВ}$, $\nu \geq 5$) выполнен с экспериментальным моментом инерции (точечная линия).

вичных фрагментов деления ^{252}Cf для фрагментаций $\text{Mo} + \text{Ba}$ и $\text{Ce} + \text{Nd}$. Полученные зависимости хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В четвертом параграфе рассчитывается изменение углового момента фрагментов за счет кулоновского возбуждения после развала ДЯС.

В заключении приведены основные результаты диссертации.

На защиту выдвигаются следующие результаты.

1. Показано, что супер- и гипердеформированные ядерные состояния и изомеры деления являются кластерными состояниями. Супердеформированные состояния связаны с асимметричными, в то время как гипердеформированные состояния – с почти симметричными двойными ядерными системами. Рассчитаны моменты инерции, квадрупольные и октупольные моменты, параметры деформации сильнодеформированных состояний для ядер в различных массовых областях. Результаты расчета находятся в хорошем согласии с существующими экспериментальными данными, некоторые из которых были получены после наших теоретических предсказаний.

2. Предложена новая кластерная модель для описания спектров низколежащих коллективных возбуждений отрицательной четности. Данные возбуждения соответствуют коллективному движению системы по координате массовой асимметрии. Показано, что появление устойчивой октупольной деформации в актинидах и лантанидах связано с тем, что с ростом углового момента уменьшается потенциальная энергия α -кластерной конфигурации по отношению к энергии соответствующего составного ядра.
3. Для изотопов Pu, U, Th, Ra и Ba, Ce, Nd произведен расчет расщепления по четности и момента инерции в полосах альтернативной четности в зависимости от углового момента. Также рассчитаны вероятности электрических мультипольных (дипольных, квадрупольных, октупольных) переходов внутри полос альтернативной четности. Результаты расчета находятся в хорошем согласии с экспериментом.
4. В рамках кластерной модели двойной ядерной системы предложен метод расчета угловых моментов фрагментов спонтанного деления. Получена зависимость потенциальной энергии двойной ядерной системы от углов ориентации фрагментов и изучены угловые колебания изгиба. Показано, что мода колебаний изгиба ответственна за формирование угловых моментов фрагментов деления. Впервые описана зависимость углового момента фрагментов спонтанного деления ^{252}Cf от числа испарённых нейтронов.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. T.M. Shneidman, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, S.P. Ivanova, W. Scheid, Nucl. Phys. **A671** (2000) 119–135.
2. T.M. Shneidman, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, S.P. Ivanova, W. Scheid, Russian J. Physics of Atomic Nuclei **63** (2000) 1716–1723.
3. T.M. Shneidman, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, R.V. Jolos, W. Scheid, Phys. Lett. **B526** (2002) 322–328.
4. T.M. Shneidman, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, S.P. Ivanova, R.V. Jolos, W. Scheid, Phys. Rev. **C65**, (2002) 064302.

5. T.M. Shneidman, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, R.V. Jolos, W. Scheid, Phys. Rev. **C67** (2003) 014313.
6. T.M. Shneidman, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, S.P. Ivanova, R.V. Jolos, W. Scheid, Physics of Atomic Nuclei **66** (2003) 230–241.
7. G.G. Adamian, N.V. Antonenko, R.V. Jolos, W. Scheid, T.M. Shneidman, Acta Phys. Pol. **B34** (2003) 1729-1741.
8. G.G. Adamian, N.V. Antonenko, R.V. Jolos, W. Scheid, T.M. Shneidman, Acta Phys. Pol. **B** (2003) в печати.

Получено 24 апреля 2003 г.

Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 24.04.2003.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,68. Уч.-изд. л. 0,84. Тираж 100 экз. Заказ № 53870.

**Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.**

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/