

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ им. Н. Н. БОГОЛЮБОВА

*На правах рукописи*

Мардыбан Евгений Васильевич

**Исследование эволюции квадрупольной и октупольной  
деформации атомных ядер в рамках коллективной модели**

Специальность - 1.3.15

«Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Дубна – 2022

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова  
Объединенного института ядерных исследований и в Государственном университете  
«Дубна»

**Научные руководители** – *доктор физико-математических наук*  
*Е. А. Колганова,*  
*кандидат физико-математических наук*  
*Т. М. Шнейдман.*

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте  
Объединенного института ядерных исследований в информационно-  
телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru/>. С печатной  
версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ  
(г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета (технический секретарь)  
кандидат физико-математических наук

Ю. М. Быстрицкий

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы исследования

В зависимости от нуклонного состава атомные ядра могут принимать как сферическую, так и деформированную форму. В последние годы, благодаря накопленной экспериментальной информации, также стало ясно, что форма ядра может меняться в зависимости от энергии возбуждения и углового момента. Эволюция формы ядра с массовым числом объясняется явлением существования форм. Это явление связано с квантовыми фазовыми переходами в ядрах. Оказалось, что сосуществование форм достаточно распространено в ядерных системах и может встречаться в разных массовых областях карты нуклидов. Обычно переход между сферическими и деформированными состояниями, т.е. состояниями, локализованными при различных значениях квадрупольной деформации, происходит достаточно плавно. Однако, в цепочке изотопов Zr наблюдается резкое изменение формы с энергией возбуждения с малой степенью смешивания состояний. В диссертации описывается структура нижайших возбуждений этих ядер в рамках коллективной квадрупольной модели.

В структуре редкоземельных ядер, актинидов и сверхтяжелых ядер важную роль играют корреляции, приводящие к зеркально-асимметричной деформации. Ядра в этих массовых областях могут принимать "грушевидную форму". Стабилизация октупольной деформации с угловым моментом в актинидах и редкоземельных ядрах служит еще одним примером квантового фазового перехода. Экспериментально зеркально-асимметричная деформация проявляется появлением низколежащих состояний отрицательной четности, связанных сильными переходами нечётной мультипольности с членами полосы основного состояния. С момента первого наблюдения низкоэнергетичных состояний отрицательной четности был накоплен большой набор экспериментальных данных. Анализ показывает, что зависимость величин расщепления по четности и переходных дипольных моментов от углового момента имеет универсальный характер. Другими словами можно, предложить простое аналитическое описание зависимости этих величин от углового момента, содержащее небольшое число параметров, имеющих ясный физический смысл. Эти параметры могут быть определены экспериментально или рассчитаны микроскопически.

В диссертации, в рамках геометрической коллективной модели и кластерного подхода, получены аналитические выражения для зависимости величин расщепления по четности и пе-

реходных дипольных моментов от углового момента. В кластерной модели двойной ядерной системы произведен расчет расщепления по четности и критических угловых моментов для ядер с  $Z > 96$ .

## Цели и задачи

Целью диссертации являются:

- Исследование свойств низколежащих коллективных состояний и приведенных вероятностей переходов между ними для  $^{92-102}\text{Zr}$  на основе пятимерной геометрической коллективной квадрупольной модели, получение коллективных потенциалов для цепочки изотопов Zr и исследование их эволюции с увеличением числа нуклонов. Изучение влияния неаксиальной деформации на описание свойств низколежащих коллективных состояний цепочки изотопов Zr. Получение распределения волновых функций коллективных состояний в плоскости  $\beta$ - $\gamma$ .
- Анализ расщепления по четности и электрических дипольных переходов в полосах переменной четности тяжелых ядер в зависимости от углового момента. Использование модели октупольных колебаний для получения аналитического выражения для зависимости расщепления по четности и момента электрического дипольного перехода от углового момента. Применение кластерной модели к описанию низколежащих состояний отрицательной четности в изотопах No, Rf, Sg, Hs и Ds. Расчет критических угловых моментов, характеризующих фазовый переход от октупольных колебаний к стабильной октупольной деформации для изотопов начала актинидной (Ra, Th, U и Pu), редкоземельной (Ba, Ce, Nd) областей и сверхтяжелых ядер (No, Rf, Sg, Hs, Ds). Исследование жесткости сверхтяжелых ядер по отношению к зеркально-асимметричной деформации.

Для достижения указанных целей были решены следующие задачи:

- Разработан и программно реализован метод по диагонализации пятимерного гамильтониана Бора;
- Программно реализованы алгоритмы подбора по экспериментальным данным потенциальной энергии, зависящей от  $\beta$ - $\gamma$ , для гамильтониана Бора;

- В рамках пятимерной геометрической коллективной квадрупольной модели для ядер  $^{92-102}\text{Zr}$  построены поверхности потенциальной энергии, рассчитаны энергии нижайших возбуждений и приведенные вероятности квадрупольных переходов между ними;
- Получены распределения волновых функций коллективных состояний в плоскости  $\beta$ - $\gamma$  для ядер  $^{92-102}\text{Zr}$ ;
- В рамках модели октупольных колебаний получены аналитические выражения для зависимости расщепления по четности и переходного дипольного момента от углового момента;
- Рассчитаны расщепления по четности и переходные дипольные моменты для ядер  $^{222-228}\text{Ra}$ ,  $^{224-234}\text{Th}$ ,  $^{230-240}\text{U}$ ,  $^{238-244}\text{Pu}$ ,  $^{142-148}\text{Ba}$ ,  $^{146-148}\text{Ce}$  и  $^{146-148}\text{Nd}$ ;
- Рассчитаны критические угловые моменты  $I_{crit}$ , характеризующие фазовый переход к зеркально-асимметричной форме для ядер  $^{222-228}\text{Ra}$ ,  $^{224-234}\text{Th}$ ,  $^{230-240}\text{U}$ ,  $^{238-244}\text{Pu}$ ,  $^{142-148}\text{Ba}$ ,  $^{146-148}\text{Ce}$ ,  $^{146-148}\text{Nd}$ ,  $^{250-262}\text{No}$ ,  $^{254-266}\text{Rf}$ ,  $^{258-270}\text{Sg}$ ,  $^{264-274}\text{Hs}$  и  $^{268-282}\text{Ds}$ .
- Рассчитаны значения нижайших возбуждений отрицательной четности и значения переходных дипольного, квадрупольного и октупольного моментов ядер  $^{250-262}\text{No}$ ,  $^{254-266}\text{Rf}$ ,  $^{258-270}\text{Sg}$ ,  $^{264-274}\text{Hs}$  и  $^{268-282}\text{Ds}$ ;

## Научная новизна и практическая ценность

Все положения, выносимые на защиту являются оригинальными и основаны на результатах, полученных впервые. Разработанные методы и алгоритмы могут быть применимы к широкому кругу задач, где используется пятимерная геометрическая коллективная квадрупольная модель. Результаты расчетов низколежащих состояний и приведенных вероятностей переходов между ними могут быть использованы для планирования экспериментов по исследованию низколежащих спектров ядер. Полученные в диссертации результаты имеют высокую научную ценность и могут быть использованы для исследований широкого класса задач, связанных с явлением сосуществования форм и фазовыми переходами в ядерной физике.

## Основные результаты, выносимые на защиту

- В рамках коллективной модели, основанной на гамильтониане Бора, исследованы свойства низколежащих коллективных состояний ядра  $^{96}\text{Zr}$ . Показано, что экспериментальные

данные могут быть удовлетворительно описаны, предполагая сосуществование двух минимумов потенциальной энергии, отвечающих сферической и аксиально-деформированной формам ядра. Исследовано влияние неаксиальности деформированного минимума на вероятности квадрупольных переходов. Показано, что с ростом неаксиальности вероятности переходов между состояниями, отвечающим разным деформациям резко падают. В результате достигнуто удовлетворительное описание экспериментальных данных по энергиям низколежащих возбуждений и приведенных вероятностей E2 и M1 переходов.

- Изучена эволюция квадрупольной деформации в ядрах  $^{92-102}\text{Zr}$  с ростом массового числа. Показано, что коллективная потенциальная энергия может быть представлена как суперпозиция сферического и аксиально-деформированного минимумов, относительное расположение которых меняется с ростом массы изотопа. Для ядер  $^{92,94}\text{Zr}$  деформированный минимум расположен значительно выше сферического, и свойства низколежащих возбуждений определяются в основном сферическим минимумом. Для  $^{102}\text{Zr}$  ситуация обратная, ядро обладает стабильной квадрупольной деформацией. Получено удовлетворительное согласие с экспериментальными данными по энергиям возбуждения низколежащих состояний и приведенным вероятностям электрических квадрупольных переходов ядер  $^{92-102}\text{Zr}$ .
- На основе геометрического коллективного подхода предложена модель октупольных колебаний. Получены аналитические выражения для зависимостей расщепления по четности и электрического переходного дипольного момента в полосах переменной четности от углового момента ядра. Показано, что ключевым параметром в этих выражениях является критический угловой момент, определяющий переход от октупольных колебаний к устойчивой зеркально-асимметричной деформации. Описаны спектры полос переменной четности и вероятности E1 переходов в  $^{222-228}\text{Ra}$ ,  $^{224-234}\text{Th}$ ,  $^{230-240}\text{U}$ ,  $^{238-244}\text{Pu}$ ,  $^{142-148}\text{Ba}$ ,  $^{146-148}\text{Ce}$  и  $^{146-148}\text{Nd}$ .
- В рамках кластерной модели двойной ядерной системы рассчитаны характеристики полос переменной четности сверхтяжелых ядер. Предсказаны значения нижайших возбуждений отрицательной четности и значения переходных дипольного, квадрупольного и октупольного моментов для ядер с  $Z > 96$ . Исследована жесткость сверхтяжелых ядер по отношению к зеркально-асимметричной деформации. Показано, что наиболее мягким по отношению к октупольной деформации оказываются ядра  $^{268}\text{Ds}$ ,  $^{270}\text{Ds}$  и  $^{274}\text{Ds}$ . Получено

выражение, позволяющее оценить мягкость ядра по отношению к октупольной деформации по экспериментальным значениям энергий альфа-распада.

## Апробация работы

Диссертация выполнена при поддержке Гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 075-10-2020-117.

Результаты, включенные в диссертацию, докладывались на семинарах в ЛТФ, ОИЯИ. Были представлены в более чем двадцати докладах на международных и всероссийских конференциях и совещаниях, а также международных школах, включая 47th meeting of the PAC for Nuclear Physics, JINR, Dubna, Russia (2018); International scientific conference of students and young scientists "Lomonosov-2018 Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia (2018); 49th meeting of the PAC for Nuclear Physics, JINR, Dubna, Russia (2019); XXIII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists, (AYSS-2019), JINR, Dubna, Russia (2019); LXIX International Conference "Nucleus-2019" on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure "Fundamental Problems of Nuclear Physics, Nuclei at Borders of Nucleon Stability, High Technologies JINR, Dubna, Russia (2019); JINR Young Scientists and Specialists Association Workshop "Alushta - 2020 Alushta, Russia (2020); "NUCLEUS – 2020. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies Saint Petersburg State University, NRC "Kurchatov Institute", Joint Institute for Nuclear Research, Saint Petersburg, Russia (2020); The XXIV International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2020), JINR, Dubna, Russia (2020); International scientific conference of students and young scientists "Lomonosov-2020 Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, Online conference (2020); JINR Young Scientists and Specialists Association Conference "Alushta - 2021 JINR, Alushta, Russia (2021); The XXV International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2021), JINR, Almaty, Kazakhstan (2021); conference "NUCLEUS – 2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies St. Petersburg State University, National Research Center, JINR, St. Petersburg, Russia (2021); The International Workshop on Nuclear and Particles Physics, JINR, INP, Almaty, Kazakhstan (2022); LXXII International conference "Nucleus-2022: Fundamental problems and applications», Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia (2022); The IV International Scientific Forum "Nuclear science and Technologies", Almaty, Kazakhstan (2022); «Природа. Общество. Человек», Государственный Университет «Дубна», Дубна, Россия (2019); Ежегодный всероссийский молодёжный научный фо-

рум “Open Science 2020”, НИЦ «Курчатовский Институт», Гатчина (2020); “Природа. Общество. Человек”, Государственный Университет “Дубна”, Дубна, Россия (2020); Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ-2020), НИЦ “Курчатовский Институт”, Москва, Россия (2020); The V International School on Symmetry in Integrable Systems and Nuclear Physics (SISNP-V), Tsakhkadzor, Armenia (2017); “Stabilizations of octupole deformation: second order phase transition in alternating parity bands” International School & Workshop on Critical Stability of Quantum Few-Body Systems, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Dresden, Germany (2018).

## Публикации

В диссертации представлены результаты, опубликованные в 8 работах, список которых приводится в конце автореферата. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем, автор принимал непосредственное участие в решении задач, поставленных в настоящей диссертации, разработке методов, подготовке и написании статей. Вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации – 108 страниц. Она содержит 9 таблиц, 43 рисунков и список литературы из 188 наименований.

# СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** дается краткий обзор современного состояния исследований низжайших возбуждений атомных ядер, связанных с деформациями четной мультипольности (квадрупольная деформация) и нечетной мультипольности (кластеризация, октупольная деформация), очерчивается круг вопросов, рассматриваемых в диссертации, и обосновывается их актуальность. Заключительная часть Введения содержит сжатое описание структуры работы.

**Глава 1** посвящена описанию и исследованию применимости коллективной модели, описывающей динамику квадрупольных степеней свободы, для анализа экспериментальных данных в



$^{96}\text{Zr}$ , в котором происходит резкий переход от сферической к деформированной структуре с малой амплитудой смешивания состояний. В первом разделе скомпилированы экспериментальные данные по энергиям нижайших состояний ядра  $^{96}\text{Zr}$  и приведенным вероятностям переходов между ними. Второй раздел посвящен описанию формализма пятимерной геометрической коллективной модели. В этом разделе приводятся описание трех известных широко используемых частных случаев коллективного движения, имеющих аналитическое решение. В разделе 1.3, в наиболее общем виде вводится коллективный квадрупольный гамильтониан Бора, описываются и обосновываются основные используемые предположения для коэффициентов инерции:

$$\begin{aligned} B_{\beta\beta} &= B_{\gamma\gamma} = B_0, & B_{\beta\gamma} &= B_{\gamma\beta} = 0, \\ B_1(\beta) &= B_2(\beta) = B_3(\beta) = b_{rot}(\beta)B_0. \end{aligned} \quad (1)$$

С учетом введенных коэффициентов инерции, гамильтон Бора принимает вид:

$$\begin{aligned} H &= -\frac{\hbar^2}{2B_0} \left( \frac{1}{\beta^4} \frac{\partial}{\partial\beta} \beta^4 \frac{\partial}{\partial\beta} + \frac{1}{\beta^2 \sin 3\gamma} \frac{\partial}{\partial\gamma} \sin 3\gamma \frac{\partial}{\partial\gamma} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=1}^3 \frac{\hat{J}_k^2}{4b_{rot}\beta^2 \sin(\gamma - \frac{2\pi k}{3})} \right) + V(\beta, \gamma). \end{aligned} \quad (2)$$

Раздел 1.4 посвящен описанию базисных функций, используемых для диагонализации гамильтониана Бора. Для разложения  $\beta$ -зависимой части волновой функции используются полиномы Лагерра, являющиеся собственными функциями пятимерного гармонического осциллятора. Угловая часть волновой функции раскладывается по  $\text{SO}(5) \supset \text{SO}(3)$  сферическим гармоникам, которые являются собственными функциями оператора Казимира группы  $\text{SO}(5)$ . В разделе 1.5 приводятся выражения, используемые для расчета вероятностей  $E2$ ,  $E0$  и  $M1$  переходов, а также весов и распределений волновых функций. Коллективный квадрупольный оператор, отвечающий за  $E2$ -переходы, принимается в виде

$$Q_{2\mu}^{coll} = \frac{3Ze}{4\pi} R_0^2 \left( \beta \cos \gamma D_{\mu 0}^2(\Omega) + \frac{1}{\sqrt{2}} \beta \sin \gamma (D_{\mu 2}^2(\Omega) + D_{\mu -2}^2(\Omega)) \right). \quad (3)$$

Для оценки величины  $E0$  перехода используется следующее выражение:

$$\rho^2(0_2^+ \rightarrow 0_1^+) = \left( \frac{3Ze}{4\pi} \right)^2 |\langle 0_2^+ | \beta^2 | 0_1^+ \rangle|^2 \leq \frac{\hbar^2}{B_0} \frac{1}{E(0_2^+)} \frac{10B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)}{e^2 R^4}. \quad (4)$$

Оператор перехода  $M1$  определяется выражением:

$$(M1)_\mu = \mu_N \sqrt{\frac{3}{4\pi}} g_R(\beta) I_\mu, \quad (5)$$

с гиромангнитным фактором  $g_R(\beta)$ , зависящим от деформации. Раздел 1.6 посвящен построению и параметризации потенциальной энергии коллективного движения. Потенциальная энергия записывается с использованием низжайших ротационно-инвариантных комбинаций как

$$V(\beta, \gamma) = U(\beta) + C_\gamma \beta^3 (1 - \cos 3\gamma). \quad (6)$$

В разделе 1.7 обсуждаются результаты применения модели к описанию структуры низжайших состояний  $^{96}\text{Zr}$ . Влияния триаксиальности потенциальной энергии на описание низколежащих состояний  $^{96}\text{Zr}$  обсуждается в разделе 1.8. Для этого диагонализируется гамильтониан Бора с полученным для  $^{96}\text{Zr}$  коллективным потенциалом, повернутым на различные углы от  $0^\circ$  до  $60^\circ$ . В последнем разделе сформулированы основные результаты Главы 1.

**Глава 2** посвящена описанию эволюции коллективного потенциала с ростом массового числа  $A$  для цепочки изотопов  $^{92-102}\text{Zr}$ , построению распределений волновых функций коллективных состояний этих ядер в плоскости  $\beta - \gamma$  и детальному анализу описания экспериментальных данных в рамках пятимерной геометрической коллективной модели. Первый раздел посвящен описанию модели и параметризации потенциальной энергии. Используется модель, ранее успешно примененная для описания экспериментальных данных по  $^{96}\text{Zr}$ . Потенциал  $V(\beta)$  в (2) аппроксимируется тремя параболой: двумя для описания сферического и деформированного минимумов и одной перевернутой параболой для описания барьера, разделяющего минимумы. Такой выбор облегчает процедуру подбора потенциала и позволяет выделить минимальный набор параметров, задающих конкретные характеристики потенциала.

Второй раздел посвящен детальному анализу и сравнению расчетных и экспериментальных данных для цепочки изотопов  $\text{Zr}$  и состоит из нескольких подразделов. В подразделах 2.2.1 и 2.2.2 описываются и анализируются данные и распределения волновых функций для ядер  $^{92}\text{Zr}$  и  $^{94}\text{Zr}$ , спектр низжайших состояний которых преимущественно соответствует сферической структуре. В подразделе 2.2.3 приводятся замечания по отличиям в описании данных для  $^{96}\text{Zr}$  по сравнению с результатами Главы 1. Подраздел 2.2.4 посвящен переходному ядру  $^{98}\text{Zr}$ , а в последнем подразделе описываются изотопы  $^{100,102}\text{Zr}$  со структурой низжайших состояний, соответствующих деформированным ядрам. В разделе 2.3 описывается эволюция коллективных потенциальных поверхностей  $^{92-102}\text{Zr}$ , приведенных на Рис. 1.

В последнем разделе сформулированы основные результаты Главы 1.

**Глава 3** посвящена исследованию структуры тяжелых ядер, мягких по отношению к зеркально-асимметричной деформации. Проанализированы расщепления по четности и электрические ди-

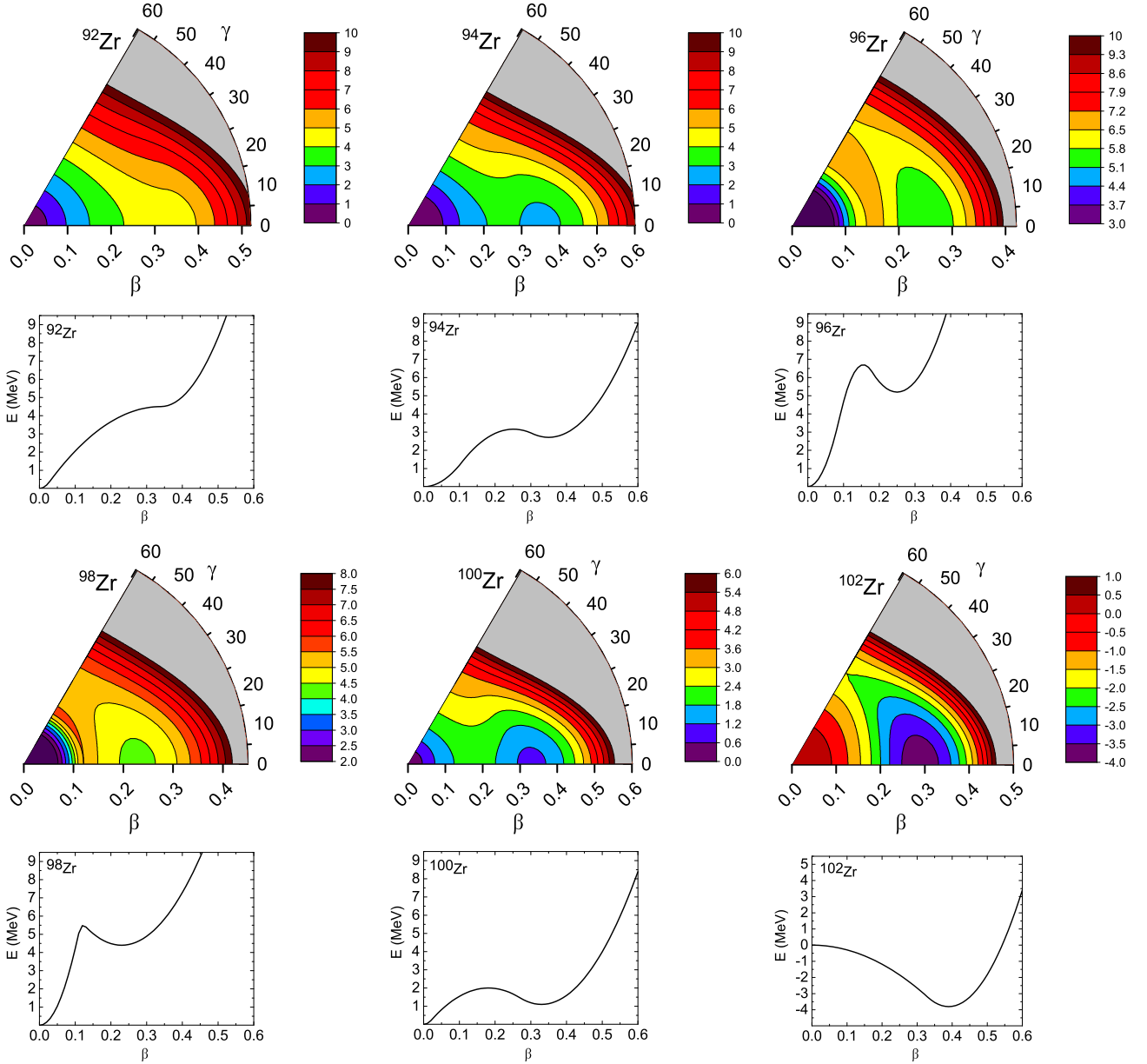


Рис. 1: Коллективный потенциал для четно-четных изотопов Zr, полученный путем подгонки экспериментальных данных для низколежащих коллективных квадрупольных состояний

польные переходы в зависимости углового момента в полосах переменной четности ядер актинидной, редкоземельной и сверхтяжелых областей. Первый раздел посвящен описанию и экспериментальному проявлению стабилизации зеркально-асимметричной деформации в полосах чередующейся четности. Во втором разделе вводится формализм простой модели аксиально-симметричной зеркально-асимметричной моды с гамильтонианом:

$$H_I = -\frac{\hbar^2}{2B} \frac{d^2}{d\beta_{30}^2} + V_I(\langle \beta_{20} \rangle, \beta_{30}). \quad (7)$$

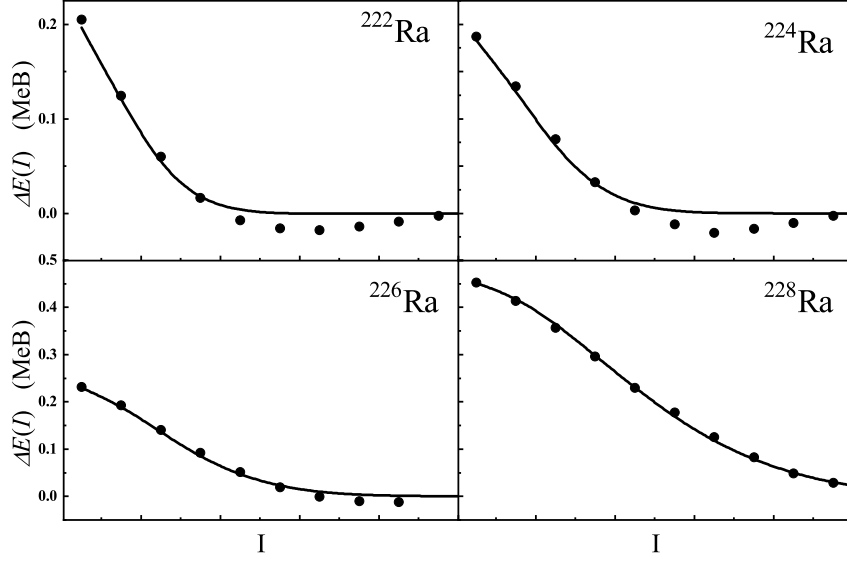


Рис. 2: Расщепление по четности в зависимости от углового момента для различных изотопов Ra. Экспериментальные данные (точки) и рассчитанные по формуле (10) расщепления по четности (линии).

Предполагая, что нижайшее собственное состояние положительной четности с хорошей точностью можно аппроксимировать как суперпозицию двух гауссианов, получаем:

$$\begin{aligned} \Psi_I^{(+)}(\beta_{30}) &= \left[ \frac{\omega(I)}{\pi\hbar} \right]^{1/4} \left( 2 \left\{ 1 + \exp \left[ -\frac{B\omega(I)}{\hbar} \beta_m^2(I) \right] \right\} \right)^{-1/2} \\ &\times \left( \exp \left[ -\frac{B\omega(I)}{2\hbar} (\beta_{30} - \beta_m(I))^2 \right] + \exp \left[ -\frac{B\omega(I)}{2\hbar} (\beta_{30} + \beta_m(I))^2 \right] \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Потенциал аксиально-симметричной октупольной моды может быть записан как

$$V_I(\langle \beta_{20} \rangle, \beta_{30}) = \frac{\hbar^2}{2B} \frac{\Psi_I^{(+)\prime\prime}}{\Psi_I^{(+)}} + E_I^{(+)}(\langle \beta_{20} \rangle). \quad (9)$$

На основе сделанных выше предположений получено универсальное выражение, определяющее расщепления по четности:

$$\Delta E(I) \equiv E_I^{(-)} - E_I^{(+)} = \hbar\omega(I)f(\xi_I) = \hbar\omega(I)\xi_I^2 e^{-\xi_I^2} \coth(\xi_I^2/2), \quad (10)$$

где

$$\xi_I = \sqrt{\frac{B\omega(I)}{\hbar}} \beta_m(I), \quad (11)$$

а  $f(\xi_I)$  определялась из рассмотрения решений для потенциальной энергии в пределе больших и малых значений углового момента. На Рис. 2 выражение (10) применено к описанию расщепления по четности в зависимости от углового момента для изотопов Ra.

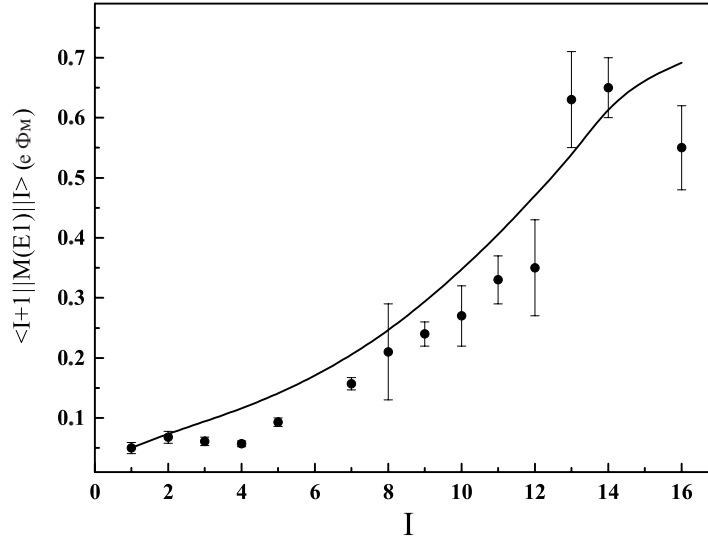


Рис. 3: Расчетные и экспериментальные значения матричного элемента  $E1$  в зависимости от углового момента для  $^{226}\text{Ra}$ .

Раздел 3.3 посвящен анализу поведения дипольных моментов. Дополнив модель выражением волновой функции нижайшего состояния отрицательной четности в виде

$$\begin{aligned} \Psi_I^{(-)}(\beta_{30}) &= \left[ \frac{B\omega(I)}{\pi\hbar} \right]^{1/4} \left( 2 \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{B\omega(I)}{\hbar} \beta_m^2 \right] \right\} \right)^{-1/2} \\ &\times \left( \exp \left[ -\frac{B\omega(I)}{2\hbar} (\beta_{30} - \beta_m)^2 \right] - \exp \left[ -\frac{B\omega(I)}{2\hbar} (\beta_{30} + \beta_m)^2 \right] \right), \end{aligned} \quad (12)$$

получено аналитическое выражение для поведения вероятности дипольного перехода в зависимости от углового момента:

$$B(E1, i \rightarrow f) = B(E1, 0^+ \rightarrow 1^-) \frac{\xi_f^2 e^{2\xi_f^2}}{e^{2\xi_f^2} - 1}, \quad (13)$$

где используется  $\xi = \sqrt{\xi_i \xi_f}$ , а  $\xi_i$  и  $\xi_f$  те же самые, что и при расчете расщепления по четности.

На Рис. 3 выражение (13) применено к описанию экспериментальных значений приведенного матричного элемента  $E1$  в зависимости от углового момента для  $^{226}\text{Ra}$ . В разделе 3.4 показывается, что полученные простые аналитические выражения для поведения расщепления по четности и вероятности дипольного перехода можно связать с критическим угловым моментом, при котором происходит фазовый переход от зеркально-асимметричных колебаний поверхности к стабильной "грушевидной" деформации. Предполагая зависимость  $\hbar\omega_I$  и  $\xi_I$  от углового

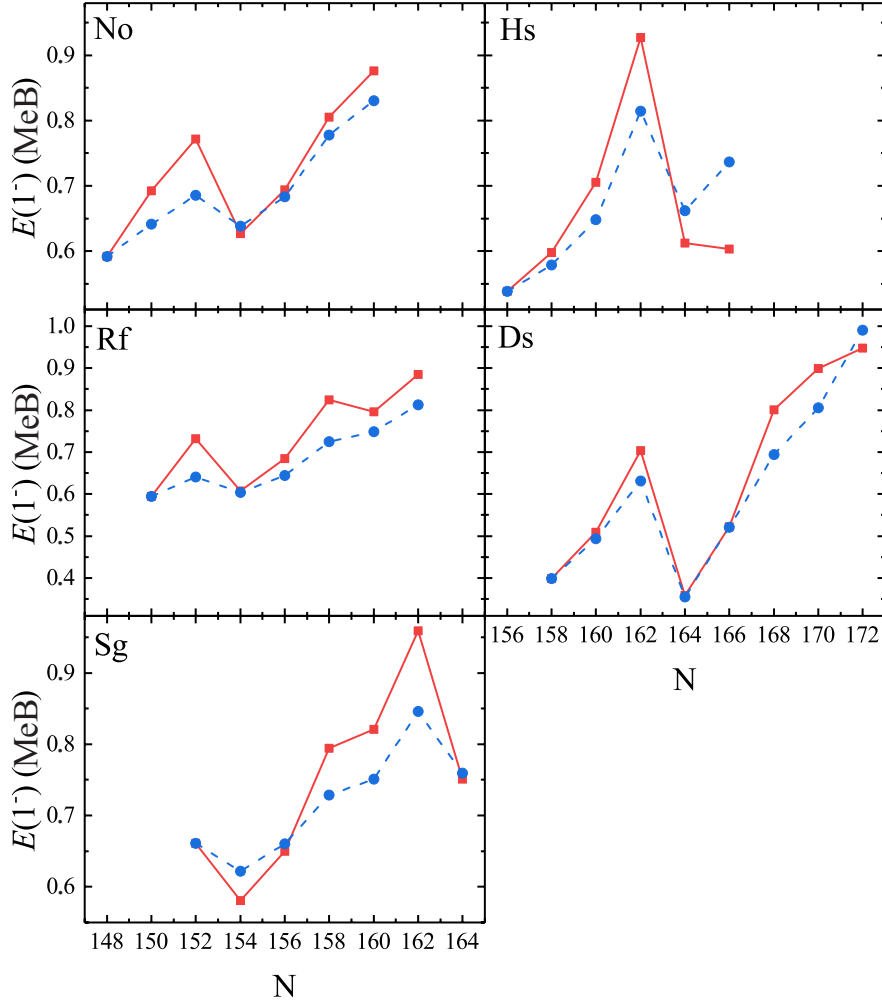


Рис. 4: Сравнение энергий  $E(1^-)$  нижайших состояний отрицательной четности в четно-четных изотопах No, Rf, Sg, Hs и Ds. Сплошными линиями представлены результаты полученные в рамках кластерной модели ДЯС. Оценки полученные с помощью выражения (17) даны штриховыми линиями.

момента в виде

$$\begin{aligned}\hbar\omega_I &= \text{const}, \\ \xi(I) &= cI\end{aligned}\tag{14}$$

и связывая значение константы  $c$  со значением критического момента

$$cI_{crit} = \frac{1}{\sqrt{2}},\tag{15}$$

в конечном итоге, для расщепления по четности получаем:

$$\Delta E(I) = \Delta E(0) f \left[ \frac{I}{\sqrt{2}I_{crit}} \right],\tag{16}$$

где  $\Delta E(0)$  - интервал между основным и первым возбужденным состояниями отрицательной четности. Аналогично для вероятности дипольного перехода. Значение критического углового момента определяется из поведения потенциальной энергии коллективного движения в зависимости от углового момента, когда минимум соответствующий октупольным колебаниям сменяется двумя симметрично расположенными минимумами соответствующими стабильной зеркально-асимметричной деформации.

Раздел 3.5 посвящен анализу и сравнению расчетных значений расщеплений по четности с экспериментальными данными для  $^{222-228}\text{Ra}$ ,  $^{224-234}\text{Th}$ ,  $^{230-240}\text{U}$ ,  $^{238-244}\text{Pu}$ ,  $^{142-148}\text{Ba}$ ,  $^{146-148}\text{Ce}$  и  $^{146-148}\text{Nd}$ .

Также приводятся рассчитанные критические моменты для исследуемых ядер. В разделе 3.6 обсуждаются отклонения между расчетными и экспериментальными данными по расщеплению по четности для некоторых ядер. Расхождения можно поделить на две группы. К первой группе относятся расхождения вызванные тем, что экспериментальное расщепление по четности может принимать отрицательные значения, а рассчитанное стремится к нулю, оставаясь положительным. Для расхождений второй группы характерно то, что вычисленное расщепление по четности для  $I > I_{crit}$  демонстрирует более крутой наклон, по сравнению с экспериментом. Раздел 3.7 посвящен расчету дипольных моментов и вероятностей дипольных переходов для ядер  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{148}\text{Nd}$  с использованием найденных значений критического момента. Полученные значения сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.

В разделе 3.8, величины  $\Delta E(0)$  и  $I_{crit}$  рассчитаны в рамках кластерной модели двойной ядерной системы. Используя эти величины и полученные ранее универсальные выражения, предсказаны характеристики полос переменной четности в трансфермиевых ядрах с  $Z > 96$ . Получено выражение, позволяющее предсказать эволюцию зеркально-асимметричной деформации в изотопных цепочках сверхтяжелых ядер по экспериментальным значениям энергии  $\alpha$ -распада:

$$\epsilon(A, Z) = \epsilon(A_0, Z) \left[ 1 + \frac{Q_\alpha(A, Z) - Q_\alpha(A_0, Z)}{2m(A, Z)\epsilon(A_0, Z)^2} \right]. \quad (17)$$

На Рис. 4 приведены энергии  $E(1^-)$  нижайших состояний отрицательной четности в четно-четных изотопах No, Rf, Sg, Hs и Ds, рассчитанных по этому выражению в сравнении с точным расчетом в рамках кластерной модели.

В последнем разделе сформулированы основные результаты Главы 3.

В **Заключении** приводятся положения выносимые на защиту.

## Результаты, включенные в диссертацию, опубликованы

### в следующих работах:

1. E. V. Mardyban, T. M. Shneidman, E.A. Kolganova, R.V. Jolos, and S.-G. Zhou, “Analytical description of shape transition in nuclear alternating parity bands”, Chin. Phys. C **42**, 124104 (2018).
2. E. V. Mardyban, E. A. Kolganova, T. M. Shneidman, R. V. Jolos, and N. Pietralla “Description of the low-lying collective states of  $^{96}\text{Zr}$  based on the collective Bohr Hamiltonian including the triaxiality degree of freedom” Phys. Rev. C **102**, 034308 (2020)
3. E. V. Mardyban, E. A. Kolganova, T. M. Shneidman and R. V. Jolos “Evolution of the phenomenologically determined collective potential along the chain of Zr isotopes” Phys. Rev. C **105**, 024321 (2022)
4. Е. В. Мардыбан, Т. М. Шнейдман, Е. А. Колганова, и Р. В. Джолос “Описание стабилизации октупольной деформации в полосах переменной четности тяжелых ядер”, Ядерная физика, том **83**, номер 1, 54 (2020).
5. Р. В. Джолос, Е. А. Колганова, Л. А. Малов, Е. В. Мардыбан, Д. А. Сазонов, Т. М. Шнейдман, “Фазовые переходы и сосуществование форм в атомных ядрах” Ядерная физика, том **83**, номер 4, 309 (2020)
6. E.V. Mardyban, E.A. Kolganova, T.M. Shneidman, R.V. Jolos “Influence of triaxiality on the description of low - energy excitation spectrum of  $^{96}\text{Zr}$ ” Physics of Particles and Nuclei Letters Vol. **19**, No. 5, 463 (2022)
7. Е. В. Мардыбан, Т. М. Шнейдман, Е. А. Колганова, и Р. В. Джолос, “Проявление зеркально-асимметричной деформации в структуре сверхтяжелых ядер” Physics of Particles and Nuclei Letters Vol. **22**, No. 6. (2022)
8. Е. В. Мардыбан, Т. М. Шнейдман, Е. А. Колганова, и Р. В. Джолос “Аналитическое описание фазового перехода в полосах переменной четности в тяжелых ядрах”, Ученые записки физического факультета МГУ. № **4**, 1840203 (2018).