

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Арсеньев Николай Николаевич

ОПИСАНИЕ КОЛЛЕКТИВНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ
СФЕРИЧЕСКИХ ЯДЕР С ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ СКРМА

Специальность: 01.04.16 – физика атомного ядра и
элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико–математических наук

Дубна – 2013

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

Научные руководители:

Воронов Виктор Васильевич доктор физико-математических наук
(директор ЛТФ ОИЯИ)

Северюхин Алексей Павлович кандидат физико-математических наук
(старший научный сотрудник ЛТФ ОИЯИ)

Официальные оппоненты:

Игашов Сергей Юрьевич кандидат физико-математических наук
(старший научный сотрудник ФГУП “ВНИИА им. Н.Л. Духова”)

Чувильский Юрий Михайлович доктор физико-математических наук
(ведущий научный сотрудник НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ,
профессор)

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие “Государственный научный центр РФ – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского”, г. Обнинск Калужской области.

Защита диссертации состоится “__” _____ 2013 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 720.001.01 при Объединённом институте ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединённого института ядерных исследований.

Автореферат разослан “__” _____ 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Арбузов Андрей Борисович

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы.

Новые экспериментальные установки (DRIBs в JINR, SPIRAL в GANIL, FAIR в GSI и RIBF в RIKEN) существенно расширяют возможности синтеза ядер, удалённых от долины бета-стабильности и способствуют изучению короткоживущих ядер в лабораторных условиях. Физика ядер с сильной нейтронно-протонной асимметрией оказывается связанной с широким кругом интересных задач, среди которых предсказание эволюции структуры ядра при изменении соотношения между числом протонов и нейтронов, что особенно важно для астрофизических приложений, в частности, для изучения связи ядерных процессов с нуклеосинтезом элементов, сопровождающим коллапс массивных звёзд. Для современной экспериментальной и теоретической ядерной физики свойства ядерных возбуждений вблизи бета-нестабильных дважды магических ядер (^{78}Ni и ^{132}Sn) исключительно важны для решения проблемы описания r -процесса, ответственного за образование более половины тяжёлых ядер известных в природе. С другой стороны, свойства нейтронно-дефицитных дважды магических ядер (^{48}Ni и ^{100}Sn) связаны с астрофизическими условиями быстрого p -процесса в сверхновых II типа. Фундаментальный аспект проблемы связан с изучением эволюции структуры ядра с изменением квантового числа изоспина, что требует развития самосогласованных подходов с использованием реалистического эффективного взаимодействия нуклонов.

Хорошо известны успехи микроскопических методов в изучении нижайших и высоколежащих, типа гигантских резонансов, коллективных вибрационных состояний в атомных ядрах вблизи линии бета-стабильности. Одним из основных подходов при описании коллективных возбуждений является приближение случайных фаз (ПСФ). В рамках ПСФ волновые функции однофононных состояний являются суперпозицией двухквазичастичных конфигураций. Рассматривая только однофононные возбуждения, удаётся получить достаточно точное и физически ясное описание возбуждений при низких, промежуточных и высоких энергиях в чётно-чётных ядрах. Однако ангармоничность спектра низколежащих вибрационных состояний и проблема описания ядерных характеристик, связанных с фрагментацией однофононных состояний, таких как вероятности электромагнитных переходов между низколежащими вибрационными состояниями, сечения фотопоглощения, ширины гигантских резонансов, приводят к необходимости учесть связь простых частично-дырочных конфигураций ($1p1h$) с более сложными, прежде всего двухфононными или $2p2h$ -конфигурациями. Например, в различных реализациях метода бозонных разложений, квазичастично-фононной модели (КФМ) и теории ядерных полей эта проблема была решена путём учёта части остаточных взаимодействий, отброшенных при вычислении однофононных состояний. Следует также отметить основанные на теории конечных ферми-систем подходы: модель учёта $2p2h$ -конфигураций и многофононный вариант метода связанных каналов.

Очень популярным в последнее время стало использование квазичастичного ПСФ с нерелятивистскими эффективными двухчастичными силами или силами, полученными из релятивистских лагранжианов. Такие расчёты не требуют введения новых параметров, так как остаточное взаимодействие получено самосогласованным образом с тем же самым функционалом плотности энергии как и среднее поле. Учёт связи между простыми и сложными конфигурациями приводит к быстрому увеличению размеров конфигурационного пространства, с которым приходится иметь дело в реалистических вычислениях. С другой стороны, использование сепарабельной формы остаточного взаимодействия позволяет обойти эту трудность и проводить вычисления независимо от размера конфигурационного пространства. Например, КФМ позволяет делать доскональные предсказания низкоэнергетического спектра состояний в ядрах с развитым спариванием, но при этом трудно экстраполировать параметры модельного гамильтониана в экспериментально недоступные области ядер. Эта трудность была преодолена с помощью процедуры сепарабелизации остаточного взаимодействия, полученного из эффективных сил Скирма. В рамках этого подхода остаточное взаимодействие представляется в виде сил Ландау–Мигдала, где параметры Ландау выражаются через параметры сил Скирма. Используя квадратурную формулу Гауссова типа для N точек, можно остаточное взаимодействие свести к сумме из N сепарабельных членов. В дальнейшем этот подход был обобщен на случай включения парных корреляций и эффектов связи со сложными конфигурациями. Активно используются и альтернативные пути факторизации взаимодействия Скирма, развитые в модели вибрирующего потенциала или в теории энергетического функционала плотности. Отметим, что результаты, полученные с сепарабельным приближением для сил Скирма, очень близки к результатам расчётов с полным взаимодействием Скирма.

Целью работы: является применение функционала плотности энергии к исследованию влияния взаимодействия простых и сложных конфигураций на многообразие свойств возбуждённых состояний средних и тяжёлых сферических ядер с большим нейтронным избытком в широком интервале энергий возбуждений.

Научная новизна работы.

С помощью подхода на основе квазичастичного приближения случайных фаз с нуклон-нуклонными силами Скирма исследована фрагментация однофазонных состояний средних и тяжёлых сферических ядер в широком интервале энергий возбуждений.

- Показано, что учёт сложных конфигураций по-разному влияет на описание характеристики гигантских резонансов разной мультипольности. Учёт ангармонических эффектов слабо влияет на ширину гигантского дипольного резонанса, в то время как при описании ширины изоскалярного гигантского квадрупольного резонанса этот эффект является определяющим.

- Установлено, что определяющая роль двухфоонных компонент в распределении силы $E1$ -переходов в низкоэнергетической области и существенном увеличении ширины пикми-дипольного резонанса в нейтронно-избыточных изотопах Sn.
- Впервые с силами Скирма рассчитаны вероятности $E2$ - и $M1$ -переходов между вибрационными квадрупольными состояниями. На примере $^{90,92}\text{Zr}$ и $^{92,94}\text{Mo}$ показано, что учёт вклада двухфоонных конфигураций приводит к правильному описанию свойств низкоэнергетического спектра квадрупольных возбуждений.

Практическая ценность работы.

Результаты диссертации, базирующиеся на самосогласованном подходе с использованием эффективного взаимодействия Скирма, могут применяться при исследовании свойств коллективных возбуждений в ядрах, удалённых от долины бета-стабильности.

Основные результаты, выдвигаемые для защиты:

1. В рамках самосогласованного подхода с использованием сил Скирма, учитывая взаимодействие одно- и двухфоонных конфигураций, исследованы гигантские резонансы электрического типа (гигантский $E1$ -резонанс, пикми $E1$ -резонанс и изоскалярный $E2$ -резонанс), а также низколежащие 2^+ -состояния в сферических ядрах.
2. Показано, что взаимодействие с двухфоонными состояниями играет определяющую роль в формировании распределения $E1$ -силы при энергиях возбуждения $E_x < 11$ МэВ и существенно увеличивает ширину пикми $E1$ -резонанса. В то же время, оно слабо влияет на ширину гигантского $E1$ -резонанса, которая в основном воспроизводится уже в однофоонном (ПСФ) приближении. Результаты расчётов для ядер $^{124,130,132}\text{Sn}$ хорошо согласуются с экспериментальными данными.
3. Ширина изоскалярного $E2$ -резонанса в основном определяется взаимодействием одно- и двухфоонных состояний.
4. Впервые в самосогласованном подходе с силами Скирма и учётом связи одно- и двухфоонных состояний исследована низколежащая часть спектра 2^+ -уровней, в том числе состояния смешанной симметрии. В согласии с экспериментом теория указывает на существование 2^+ -уровней смешанной симметрии в ^{92}Zr и ^{94}Mo и их отсутствие в ^{90}Zr и ^{92}Mo . Теория удовлетворительно описывает экспериментальные данные об энергиях уровней и вероятностях $E2$ - и $M1$ -переходов. Без учёта ангармонических эффектов адекватно описать низкоэнергетическую часть спектра квадрупольных возбуждений невозможно.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, были представлены на международных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Чебоксары 2009, Санкт-Петербург 2010, Воронеж 2012), на Научной сессии НИЯУ МИФИ в 2010, 2011 и 2013, III национальной конференции по теоретической физике (Буштени, Румыния, 10-13 июня 2008 г.), Гельмгольцовой международной летней школе “Теория ядра и астрофизические приложения” (Дубна, 24 июля – 2 августа 2011 г.), XVIII Европейской школе по ядерной физике на пучках экзотических ядер (Юваскюля, Финляндия, 20-26 августа 2011 г.), международной конференции “Структура ядра и смежные проблемы” (Дубна, 2 июля – 7 июля 2012 г.), международном семинаре по ядерной физике ЛТФ–KLFTR (Пекин, Китай) и на семинаре в Институте ядерной физики Технического университета г. Дармштадта (Германия).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано семь работ. Из них четыре входит в список ВАК и две — систему цитирования Web of Science.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, формируется предмет и цель диссертации, а также даётся краткое описание содержания диссертации.

Первая глава является вводной и посвящена краткому описанию подхода, основанного на квазичастичном приближении случайных фаз с сепарабельными силами Скирма. Эта схема расчёта применяется для исследований свойств возбуждённых состояний сферических ядер в последующих главах. Среднее поле определяется путём решения уравнения Хартри–Фока с силами Скирма. Спаривание трактуется в приближении Бардина–Купера–Шриффера. Спектр одночастичных состояний с учётом континуума определяется диагонализацией гамильтониана Хартри–Фока на базе собственных функций гармонического осциллятора. Остаточные взаимодействия в канале частица–дырка и частица–частица могут быть получены как вторые производные функционала плотности энергии по нормальной и парной плотности нуклонов, соответственно. Остаточное взаимодействие представляется в виде суммы N сепарабельных членов. В этом случае гамильтониан по форме совпадает с гамильтонианом квазичастично-фононной модели ядра, но одноквазичастичный спектр и параметры остаточного взаимодействия вычисляются с силами Скирма. Для учёта сложных конфигураций волновые функции возбуждённых состояний могут быть записаны в виде суперпозиции членов с различным числом фононных операторов. Таким образом, волновая функция возбуждённого состояния записывается в виде:

$$\Psi_{\nu}(\lambda\mu) = \left[\sum_i R_i(\lambda\nu) Q_{\lambda\mu i}^+ + \sum_{\lambda_1 i_1 \lambda_2 i_2} P_{\lambda_2 i_2}^{\lambda_1 i_1}(\lambda\nu) \sum_{\mu_1 \mu_2} C_{\lambda_1 \mu_1 \lambda_2 \mu_2}^{\lambda\mu} Q_{\lambda_1 \mu_1 i_1}^+ Q_{\lambda_2 \mu_2 i_2}^+ \right] |0\rangle,$$

где $Q_{\lambda\mu i}^+$ — оператор рождения фонона мультипольность λ . Учёт этой связи не требует введения новых параметров. Здесь также получены уравнения для нахождения спектров возбуждённых состояний, описываемых этими волновыми функциями, а также самих волновых функций.

Во второй главе анализируются результаты расчётов электрических гигантских мультипольных резонансов в сферических ядрах. Показано, что учёт сложных конфигураций по-разному влияет на описание характеристик гигантских резонансов. Параграф 2.1 посвящён определению различного типа правил сумм, которые позволяют оценить степень коллективизации гигантских мультипольных резонансов и определить область их локализации. В разделе 2.2 исследована точность процедуры исключения духового состояния в распределении силы $E1$ -переходов в приближении случайных фаз с сепарабельным взаимодействием Скирма. На примере дважды магических ядер $^{100,132}\text{Sn}$ и ^{208}Pb продемонстрировано, что исключение духового состояния важно для

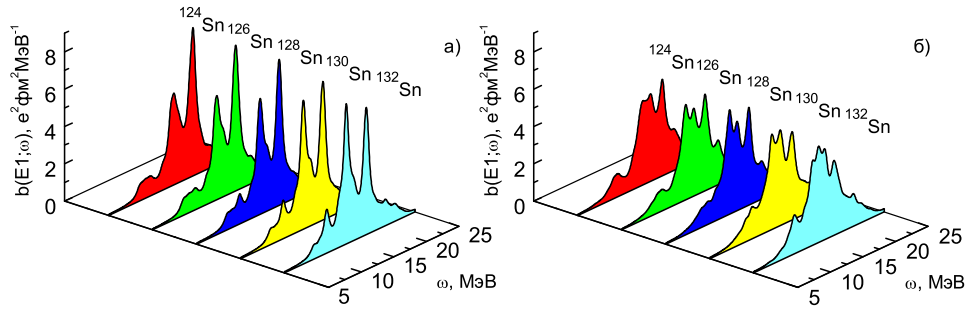


Рис. 1: $E1$ -силовая функция для $^{124-132}\text{Sn}$. Левая часть (а) — расчёт в квази-частичном ПСФ; правая часть (б) — расчёт с учётом связи с двухфононными состояниями. Весовая функция — лоренцевская функция с параметром усреднения $\Delta = 1$ МэВ.

корректного описания дипольных возбуждений в низкоэнергетической области. Расчёты выполнены в однофононном приближении. В разделе 2.3 изучается влияние $2p2h$ -конфигураций на интегральные характеристики гигантских дипольных резонансов (ГДР) в нейтронно-избыточных изотопах $^{124-132}\text{Sn}$. Расчёты выполнены с силами Скирма в канале частица-дырка и зависящем от плотности контактным взаимодействием в канале частица-частица. Показано, что учёт взаимодействия квазичастиц с фононами приводит к значительному перераспределению силы $E1$ -переходов (рис. 1). При этом рассчитанные интегральные характеристики ГДР хорошо согласуются с экспериментальными данными. Показано, что смешивание простых и сложных конфигураций слабо влияет на ширину ГДР, где максимальное уширение составило 7% в ^{124}Sn . В разделе 2.4 анализируются интегральные характеристики изоскалярных гигантских квадрупольных резонансов (ГКР) в нейтронно-избыточных ^{132}Sn и ^{208}Pb . Для этих ядер предсказана значительная фрагментация силы изоскалярного ГКР. Уширение ГКР составляет 230% в ^{132}Sn и 430% в ^{208}Pb . При этом получено хорошее описание экспериментальных данных для ^{208}Pb . Показано, что рассчитанная энергия изоскалярного ГКР для бета-нестабильного ядра ^{132}Sn близка к эмпирической систематике $63A^{-1/3}$ МэВ. Результаты данного раздела указывают на то, что смешивание одно- и двухфононных конфигураций приводит к кардинальному перераспределению силы $E2$ -переходов и существенному увеличению ширины изоскалярного $E2$ -резонанса.

Целью третьей главы является определение роли $2p2h$ -конфигураций в описании характеристик пигми-дипольного резонанса (ПДР). Большой объём новых экспериментальных данных о свойствах низкоэнергетического спектра

1^- -возбуждений в нейтронно-избыточных изотопах олова $^{124,130,132}\text{Sn}$ стимулировал выбор этой области ядер для исследований. Раздел 3.1 носит вводный характер и раскрывает актуальность темы. В разделе 3.2 рассматривается распределение силы $E1$ -переходов для цепочки изотопов олова до энергии возбуждения порядка $10\div 11$ МэВ. Рассчитанные характеристики сравниваются с экспериментальными данными, извлеченными из различных реакций. В частности, проанализированы экспериментальные данные по неупругому рассеянию фотонов на ^{124}Sn , позволяющие обнаружить тонкую структуру ПДР. Сравнение с экспериментом показывает, что расчёты с волновой функцией возбуждённых состояний, содержащей одно- и двухфононные компоненты, позволяют качественно описывать экспериментальный спектр (рис. 2). В разделе 3.3 определен интервал энергий возбуждений, где локализован ПДР. Этот интервал можно идентифицировать по различному поведению нейтронных и протонных переходных плотностей, так как пик $E1$ -резонанс отличает ярко выраженный максимум нейтронной переходной плотности вне ядра. Такая картина соответствует колебанию нейтронного избытка относительно остова, состоящего из равного числа нейтронов и протонов. Нейтронные и протонные переходные плотности для состояний формирующих ГДР находятся в противофазе. В разделе 3.4 показано, что основной вклад в вероятность возбуждения 1^- -состояний в области ПДР дают однофононные компоненты волновой функции, однако для количественного описания фрагментации силы $E1$ -переходов, обнаруженной в эксперименте, необходимо учитывать взаимодействие квазичастиц с фононами. Продемонстрировано, что взаимодействие одно- и двухфононных конфигураций ответственно за формирование ширины ПДР.

Четвертая глава посвящена изучению свойств низкоэнергетического спектра квадрупольных возбуждений с энергией до 4 МэВ. В частности, с силами Скирма рассчитываются вероятности $E2$ - и $M1$ -переходов между вибрационными квадрупольными состояниями. Вероятности $M1$ -переходов чувствительны к отношению вкладов нейтронных и протонных конфигураций, что позволяет определить изоскалярную или изовекторную природу состояний. Существование изовекторных состояний, обладающих смешанной протон-нейтронной симметрии, предсказано в модели взаимодействующих бозонов, в которой эти состояния обязаны своим происхождением движению нуклонов только в валентных подболочках. Наиболее хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально свойства состояний смешанной протон-нейтронной симметрии в ^{92}Zr и ^{94}Mo . Используя единый набор параметров, произведены расчёты для ядер $^{90,92}\text{Zr}$ и $^{92,94}\text{Mo}$. Результаты расчётов демонстрируют появление низколежащих изовекторных коллективных состояний в ^{92}Zr , ^{94}Mo и отсутствие их в ^{90}Zr , ^{92}Mo . Показано, что для правильного описания спектра необходимо учесть взаимодействие между одно- и двухфононными конфигурациями волновой функции. Представленный анализ структуры нижайших квадрупольных возбуждений в ^{92}Zr и ^{94}Mo показал, что она близка к структуре, полученной ранее в КФМ. При этом достигнуто хорошее согласие с экспериментальными данными. Заметим,

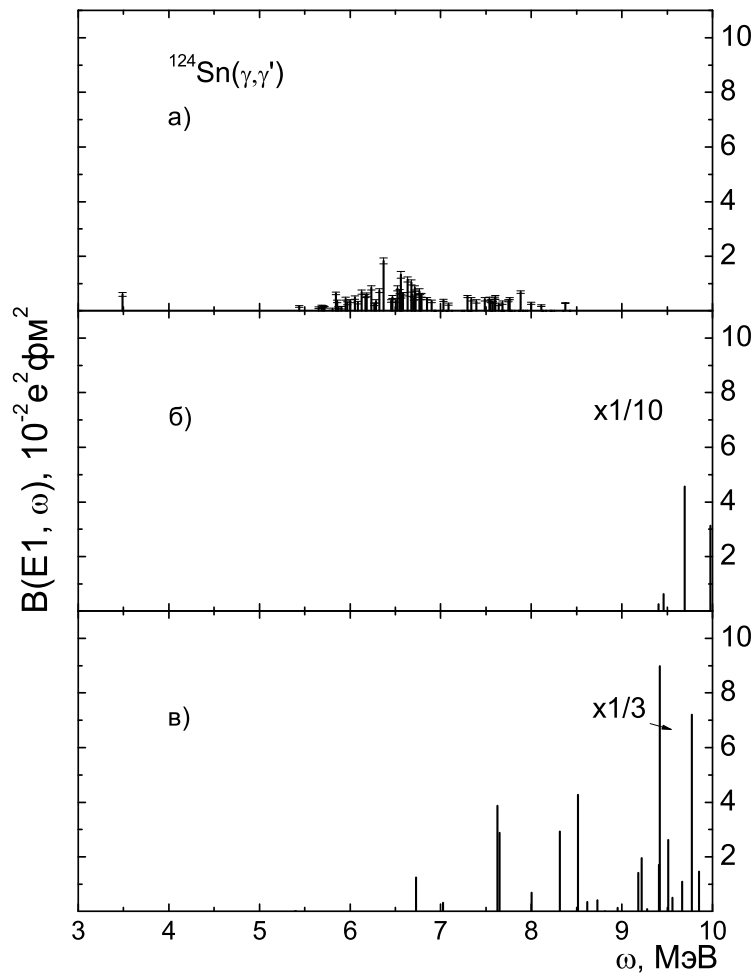


Рис. 2: Распределение силы $E1$ -переходов в ^{124}Sn : извлеченное из (γ, γ') -реакции — (а); распределение силы в однофононном приближении — (б); результаты расчёта с волновой функцией, содержащей одно- и двухфононные конфигурации — (в).

что результаты расчётов для ядер из другой области, в частности ^{134}Xe , также продемонстрировали появление квадрупольных состояний смешанной протон-нейтронной симметрии. Однако получено только качественное согласие с экспериментальными данными.

В заключении приведены основные результаты диссертации, выдвигаемые для защиты.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Arseniev N.N., Severyukhin A.P., Voronov V.V., Nguyen Van Giai *Nuclear structure calculations with Skyrme forces* // **Romanian Journal of Physics** -2008. -v. 53. -pp. 1001–1006.
2. Северюхин А.П., Арсеньев Н.Н., Воронов В.В., Нгуен Ван Джай *Исследование структуры ядра с сепарабельным взаимодействием Скирма* // **Ядерная физика** -2009. -т. 72. -с. 1195–1199.
3. Арсеньев Н.Н., Северюхин А.П. *Сепарабельное взаимодействие Скирма и характеристики гигантского дипольного резонанса* // **Письма в журнал “Физика элементарных частиц и атомного ядра”** -2010. -т. 7. -с. 193–199.
4. Severyukhin A.P., Arsenyev N.N., Voronov V.V., Pietralla N., Nguyen Van Giai *Description of proton-neutron mixed-symmetry states with Skyrme interaction* // **Ядерная физика** -2011. -т. 74. -с. 1202–1206.
5. Арсеньев Н.Н., Северюхин А.П., Воронов В.В., Нгуен Ван Джай *Структура низколежащих квадрупольных состояний в ядре ^{134}Xe* // **Известия Российской академии наук. Серия физическая** -2011. -т. 75. -с. 1602–1605.
6. Severyukhin A.P., Arsenyev N.N., Pietralla N. *Proton-neutron symmetry in ^{92}Zr , ^{94}Mo with Skyrme interactions in a separable approximation* // **Physical Review C** -2012. -v. 86. -p. 024311 (8 pages).
7. Arsenyev N.N., Severyukhin A.P., Voronov V.V., Nguyen Van Giai *Effects of phonon-phonon coupling on properties of pygmy resonance in $^{124-132}\text{Sn}$* // **European Physical Journal Web of Conferences** -2012. -v. 38. -p.17002 (4 pages).