

Национальная Академия Наук Украины
Институт Ядерных Исследований
Специализированный Совет Д.016.03.01

УДК: 539.14, 539.17

На правах рукописи

ДЕНИСОВ Виталий Юрьевич
КОЛЛЕКТИВНЫЕ СТЕПЕНИ
СВОБОДЫ В ДИНАМИКЕ
ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико - математических наук

Киев - 1994



Дисертацією являється рукопис.

Робота виконана в Інституті ядерних досліджень НАН України

Офіційні опоненти: доктор фізико-математических наук
БАЛЬБУЦЕВ Євгеній Борисович
ЛТФ, ОІЯІ, г. Дубна, Росія
доктор фізико-математических наук
ОЛЬХОВСКИЙ Владислав Сергеевич
ІЯІ НАН України, г. Київ, Україна
доктор фізико-математических наук
професор
ТАРТАКОВСКИЙ Віктор
Константинович
фіз. фак. Київського університета
г. Київ, Україна

Ведущая організація: НІІЯФ МГУ, г. Москва, Росія

Защита состоится "30" марта 1995 г.

в 14¹⁵ на засіданні Спеціалізованого Ради Д.016.03.01 при Інституті ядерних досліджень НАН України по адресу: Київ, проспект Науки 47.

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ІЯІ НАН України.

Автореферат розослав "6" января 1995 г.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

Учений секретар
Спеціалізованого Ради

В.Д. Чеснокова

В. Д. Чеснокова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований

Исследование коллективных возбуждений ядра в ядерных реакциях является одной из основных задач ядерной физики. Последнее время произошел огромный скачок в развитии экспериментальной техники, который позволил исследовать многие тонкие эффекты в коллективной динамике ядер. Появилась возможность изучать свойства радиоактивных, быстро распадающихся, высоко возбужденных, нагретых и экзотических ядер, которые не существуют в основном состоянии ядерного вещества.

Актуальность исследований, выполненных в диссертации, следует также из того, что экспериментальное изучение ядер с квадрупольной и октупольной деформациями, подбарьерного слияния тяжелых ионов и температурной зависимости гигантских резонансов началось сравнительно недавно в 80-х годах. Исследование ядер с нейтронным гало всего несколько лет назад, эксперимент по обнаружению гипердеформированных ядер выполнен в 1992 году, а первые теоретические работы выполнены в конце 80-х годов. В настоящее время все эти исследования не закончены и активно продолжаются как экспериментаторами, так и теоретиками.

Структура ядер с квадрупольной и октупольной деформациями детально изучается в последнее время. Эти ядра отличаются от ядер с квадрупольной деформацией тем, что в них обнаружены две ротационные полосы с противоположными значениями четности и одинаковым значением K (K - проекция полного углового момента на ось симметрии ядра). Ротационные уровни этих полос связаны между собой интенсивными внутриполосными квадрупольными и межполосными дипольными переходами. Дипольные переходы обусловлены наличием в этих ядрах поляризационного электрического дипольного момента (ПЭДМ). Отметим, что ротационные полосы в ядрах рассматривались в рамках различных феноменологических моделей, таких как Бора-Моттельсона, Давыдова-Филиппова, Давыдов-Чабана, взаимодействующих бозонов, а также в различных микроскопических моделях, например, квазичастично-фононная модель (В.Г. Соловьев и др.), кренкинг-модель. Мягкость ядра по отношению к аксиальной деформации

была учтена для ядер только с квадрупольной деформацией в модели Давыдова-Чабана, а для ядер только с октупольной деформацией была учтена Дэвидсоном и Вильямсом. Представляется актуальным в связи с накопленными экспериментальными данными для ядер с квадрупольной и октупольной деформациями описать в макроскопическом приближении положение уровней в четной и нечетной полосах и электрические переходы, учитывая изменение формы ядра при вращении.

Различные колебательные коллективные возбуждения в ядрах и ядерной материи всегда привлекали повышенное внимание как экспериментаторов, так и теоретиков. В последнее время особенно интенсивно исследуются свойства гигантских резонансов в сильно возбужденных ядрах. Также происходит углубленное изучение недавно обнаруженных и поиск новых мод возбуждений. К таким модам возбуждений можно отнести гигантские резонансы в ядрах с нейтронным гало и колебательно-вращательные резонансы "ножничного" типа в ядрах с большой квадрупольной деформацией. Построение моделей для описания этих возбуждений и выяснение свойств гигантских резонансов в нагретых ядрах стимулируется экспериментальными исследованиями.

Особый интерес вызывают реакции слияния тяжелых ионов, в которых существенную роль играют коллективные степени свободы. В последнее время слияние ядер при энергиях, близких к барьеру, является одним из самых перспективных направлений исследований в области ядерных реакций с тяжелыми ионами. Реакция слияния связана с подбарьерным туннелированием при энергиях ниже или около барьера. Такое внимание к ядерным реакциям подбарьерного слияния связано с обнаружением существенного (на несколько порядков) превышения экспериментального сечения этих реакций над теоретическим значением, рассчитанным в рамках одномерного ВКБ приближения. Для устранения отмеченного различия между теоретическими и экспериментальными значениями сечения слияния было предложено много моделей, которые с разной степенью успеха описывали результаты экспериментов. В этих моделях усиление сечения подбарьерного слияния при среднем углового момента связывалось с виртуальными коллективными возбуждениями системы, с каналами малонуклонных

передач, с изменением вида l параметров ядерных ион-ионных потенциалов, с учетом различных деформационных степеней свободы у сталкивающихся ядер (мультипольная деформация поверхности, образование шейки). Отметим, что модели, учитывающие связь канала слияния с каналами неупругого возбуждения низколежащих вибрационных уровней ионов и малонуклонных передач, удовлетворительно описывают сечение слияния и средний угловой момент испарительного остатка как для легких, так и для сильно асимметричных систем сталкивающихся ионов. Однако для тяжелых и почти симметричных систем сталкивающихся ионов эти механизмы оказались недостаточны (А.М. Stefanini 1992)).

Основные задачи и цели работы

Основными задачами работы являются:

1. Развитие макроскопической модели для описания энергий ротационных уровней и вероятностей электрических внутривибросных и межвибросных переходов в четно-четных и нечетных ядрах с квадрупольной и октапольной деформациями с учетом изменения формы ядра при вращении.

2. Проведение согласованного расчета ПЭДМ в ядрах с мультипольными деформациями β_l с $l \leq 8$ по методу оболочечных поправок и исследование вклада, связанного с распределением нейтронов на поверхности ядра, в ПЭДМ.

3. Описание вибрационно-вращательных гигантских резонансов в деформированных ядрах и гигантских изоскалярных резонансов в ядрах с нейтронным гало в рамках гидродинамического приближения.

4. Исследование макроскопических и микроскопических аспектов подбарьерного слияния ядер в рамках предложенной многомерной модели, учитывающей деформацию ионов в процессе прохождения барьера.

Основная цель работы состоит в том, чтобы разработать макроскопические и полумикроскопические подходы для описания коллективных возбуждений и реакций слияния систем многих сильно-взаимодействующих ферми-частиц.

Теоретическая и практическая ценность исследований и их научная новизна

Впервые построена модель для описания ротационных уровней и переходов в мягких аксиально-симметричных четно-четных и нечетных ядрах с квадрупольной и октупольной деформациями, что позволило описать экспериментальные уровни и переходы в нейтронно-дефицитных актинидах.

Впервые вычислен макроскопический ПЭДМ в случае, когда радиусы протонной и нейтронной поверхностей пропорциональны друг другу с учетом перераспределения протонов и нейтронов как в объеме, так и на поверхности ядра. Это позволило провести корректный расчет величины ПЭДМ в рамках метода оболочечных поправок и проанализировать экспериментальные данные.

Впервые оценена температура перехода (4,5 МэВ) от нулевого звука к первому в ядрах.

Впервые развита полумикроскопическая многомерная модель подбарьерного слияния ядер, учитывающая большие деформации ионов в процессе туннелирования под барьером, что позволило описать величины сечения слияния и среднего углового момента для достаточно тяжелых систем сталкивающихся ионов.

Характеристика метода исследований

Для описания возбужденных состояний ядер в литературе предложено большое количество моделей, которые можно разделить на детальные микроскопические модели и на более простые и наглядные макроскопические и полумикроскопические модели.

При описании коллективных состояний, в которых принимает участие большое количество нуклонов, можно ввести макроскопические коллективные переменные. При этом модели, построенные в макроскопическом и полумикроскопическом приближениях, дают лучшее описание экспериментальных данных и их предсказания согласуются с предсказаниями микроскопических моделей. Однако, расчеты в микроскопических моделях достаточно сложны и поэтому практически трудно осуществимы в настоящее время. Это приводит к необходимости использовать намного более простые и наглядные макроскопические и полумикроскопические мо-

дели, а их развитие является актуальной задачей. Именно поэтому в настоящей работе используется полумикроскопический и макроскопический подходы для описания коллективного движения в ядрах.

Апробация работы, публикации по теме диссертации и личный вклад автора

Основные результаты работ, вошедших в диссертацию, обсуждались и докладывались на 39, 40 и 42 международных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (1989, 1990, 1992), на 1-4 международных школах по ядерной физике, г. Киев (1990 - 1992, 1994), на зимней международной школе по физике, г. Закопане (Польша) (1988), на всесоюзных семинарах по коллективной ядерной динамике, г. Саратов (1988), г. Новороссийск (1989), г. Дубна (1991), на международных семинарах по электромагнитным взаимодействиям в ядрах, г. Москва (1988), г. Харьков (1989), на международном семинаре по коллективным низкоэнергетическим состояниям в ядрах, г. Дубна (1991), на 8 международном симпозиуме по захватной гамма спектроскопии, г. Фрибурге, Швейцария (1993), на международном семинаре по слиянию тяжелых ионов в г. Падуа, Италия (1994), на 5 международной конференции по ядерно-ядерным столкновениям, г. Тормина, Италия (1994), а также на семинарах в Лаборатории теоретической физики, г. Дубна (1988), в НИИЯФ МГУ, г. Москва (1988), в Институте ядерных исследований и ядерной энергетики, г. София, Болгария (1989), в Южной Национальной Лаборатории, г. Катания, Италия (1992), в университете им. Галилео Галилея, г. Падуа, Италия (1993), в университете им. Людвига - Максимилиана, г. Мюнхен, ФРГ (1993), в университете г. Флоренции, Италия (1993), в лаборатории ядерной физики, г. Гант, Франция (1993), в Центре ядерной физики, г. Бордо, Франция (1993), в ИТФ НАН Украины, г. Киев (1993), в ИЯИ НАН Украины, г. Киев (1993), г. Киевском университете, г. Киев (1994).

Основные результаты диссертации содержатся в 24 публикациях (список см. в конце автореферата), из которых 15 выпол-

нены самостоятельно. В работах, выполненных в соавторстве автор, принимал непосредственное участие во всех этапах работы, причем некоторые из них являются дальнейшим развитием самостоятельных работ автора.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и трех приложений, изложенных на 317 страницах, включая 28 рисунков и 11 таблиц. В конце приведен список использованной литературы из 249 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении содержится обоснование актуальности исследований, выполненных в диссертации, постановка проводимых задач, сформулирована их цель. Кратко изложены рассматриваемые в диссертации вопросы и основные положения, выносимые на защиту, отмечается их новизна. Поясняется структура диссертации.

Глава 1. Коллективные состояния и переходы в ядрах с октупольной деформацией

Первая глава состоит из введения, 4 параграфов и заключения.

Во введении дан детальный обзор литературы, связанной с экспериментальными и теоретическими исследованиями ядер с октупольной деформацией. Как отмечалось ранее, в четно-четных ядрах с квадрупольной и октупольной деформациями кроме основной вращательной полосы $0^+, 2^+, 4^+, 6^+, \dots$, наблюдалась также полоса $1^-, 3^-, 5^-, \dots$, с проекцией спина на ось симметрии ядра $K = 0$ и электрические дипольные, квадрупольные, а в некоторых ядрах и октупольные переходы. В нечетных ядрах также наблюдались четные и нечетные ротационные полосы и внутриволосные и межволосные переходы. Описанию этих полос и переходов посвящена эта глава.

В первом параграфе сформулирована и разработана модель для описания энергий ротационных уровней в аксиально-симметричных четно-четных мягких ядрах с квадрупольной и октупольной деформациями. Эта модель основывается на уравнении Шредингера, которое является обобщением уравнения модели Давыдова-Чабана, учитывающем как квадрупольную, так и октупольную деформации ядра. Затем, используя предположения о форме потенциала в пространстве деформаций, после ряда математических преобразований получено следующее простое выражение для энергий возбужденных уровней ядра

$$\begin{aligned}
 E_{n\nu}^{\pm*} &= E_{n\nu}^{\pm} - E_{000}^+ = \\
 &= \hbar\omega_{\sigma} \left\{ 2n + \frac{1}{2} \left[1 + 4(\Delta_{\nu}^{\pm} + \frac{I(I+1)}{3}) \right]^{\frac{1}{2}} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{2} [1 + 4\Delta_0^{\pm}]^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Параметры Δ_{ν}^{\pm} для данного ν зависят как от мягкости ядра μ , так и от величины расщепления осцилляторных уровней $2\delta_{\nu}$, обусловленном туннельными переходами между зеркально-симметричными формами ядра. Параметр μ определяет мягкость ядра по отношению к деформационным колебаниям. Значение $\mu = 0$ соответствует жесткому ротатору. Если $\mu \geq 0,3$ то ядро является мягким и при вращении заметно растягивается под действием центростремительных сил. Соответствующее увеличение момента инерции ядра приводит к понижению энергий по сравнению с энергиями жесткого ротатора.

Предсказания нашей модели хорошо согласуются с экспериментальными данными для рассмотренных большого числа нейтронно-дефицитных изотопов Ra и Th , обладающих квадрупольной и октупольной деформациями. В качестве примера, на рисунке 1 приведены экспериментальные и рассчитанные нами энергии уровней для ^{218}Ra для полосы с $n = \nu = 0$. Значения параметров $\hbar\omega_{\sigma}$ и Δ_0^{\pm} для исследуемых ядер определялись по методу наименьших квадратов таким образом, чтобы воспроизвести положение всех известных уровней. Отметим также, что на рисунке 1 представлено сравнение значений энергий уровней, рассчитанных в нашей модели и модели взаимодействующих бозонов (МВБ), с экс-

экспериментальными данными для изотопа ^{218}Ra . Из рисунка видно, что предложенная нами модель несколько хуже описывает экспериментальные данные, чем модель взаимодействующих бозонов. Однако в модели взаимодействующих бозонов использовалось четыре варьируемых параметра, в то время как в нашей модели — только три.

		^{218}Ra			
	МВВ	Эксп.	Эксп.	МВВ	
			<u>21-4260</u>		<u>4216</u>
			<u>19-3797</u>		<u>3811</u>
		<u>3286</u>	<u>17-3391</u>	<u>3379</u>	<u>3407</u>
16+	<u>3176</u>		<u>15-2968</u>	<u>2948</u>	<u>3003</u>
14+	<u>2769</u>	<u>2833</u>	<u>13-2528</u>	<u>2529</u>	<u>2600</u>
12+	<u>2362</u>	<u>2387</u>	<u>11-2110</u>	<u>2125</u>	<u>2199</u>
10+	<u>1955</u>	<u>1955</u>	<u>9-1695</u>	<u>1734</u>	<u>1801</u>
8+	<u>1548</u>	<u>1537</u>	<u>7-1342</u>	<u>1557</u>	<u>1408</u>
6+	<u>1143</u>	<u>1133</u>	<u>5-1039</u>	<u>993</u>	<u>1024</u>
4+	<u>770</u>	<u>741</u>	<u>3-793</u>		<u>662</u>
2+	<u>343</u>	<u>364</u>			<u>1-368</u>
0	<u>G.S.</u>				

Рисунок 1.

Экспериментальные и рассчитанные в модели взаимодействующих бозонов (МВВ) и в нашей модели уровни ядра ^{218}Ra .

В §1.2 модель, детально рассмотренная в первом параграфе, обобщена на случай нечетных аксиально-симметричных ядер с квадруольной и октупольной деформациями. По отношению к предыдущему нашему рассмотрению четно-четных ядер, здесь мы учитываем кориолисово взаимодействие, описывающее взаимодействие неспаренного нуклона с деформированным четно-четным остовом, которое играет важную роль в нечетных ядрах. В этом параграфе получено следующее выражение для энергии возбужденных состояний нечетного аксиально-симметричного ядра с квадруольной и октупольной деформациями

$$E_{nI^{\pm}K\nu}^{\pm} = E_{nI^{\pi^0}K\nu}^{\pm} - E_{0I_0^{\pi^0}K_00}^{\pi^0} = \hbar\omega_{\sigma} \left\{ 2n + \frac{1}{2} \left[1 + 4 \left(\Delta_{\nu}^{\pm} + \frac{f(I, K, \pm)}{3} \right) \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} \left[1 + 4 \left(\Delta_0^{\pi^0} + \frac{f(I_0, K, \pi^0)}{3} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad (2)$$

где π^0 - четность основного состояния, K - проекция полного углового момента на ось симметрии ядра,

$$f(I, K, \pm) = I(I+1) - K^2 \pm \delta_{K, 1/2} a (-1)^{I+\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

$a = -\langle \chi_K | \hat{J}_z^{\pm} | \chi_{-K} \rangle$ - параметр развязывания $\delta_{K, \frac{1}{2}} = 1$ для $K = \frac{1}{2}$ и $\delta_{K, \frac{1}{2}} = 0$ для $K \neq \frac{1}{2}$.

Отметим, что выражение (1), определяющее возбуждения в четно-четных ядрах, отличается от соответствующего выражения (2), определяющего возбуждения в нечетных ядрах, заменой $I(I+1)$ на функцию $f(I, K, \pm)$.

В качестве примера, в таблице 1 приведено сравнение между экспериментальными и теоретическими величинами энергии уровней ядра ^{225}Th .

ПЭДМ в ядрах с квадруольной и октупольной деформациями связан с электростатическим перераспределением протонов относительно нейтронов в объеме и на поверхности ядра, а также вглядом, связанным с распределением нейтронов на поверхности ядра (нейтронной кожей) (С. Dorsø, W. Myers, W. Swiatecki (1986)). Впервые ПЭДМ был исследован в капельной модели В.М. Струтинским (1956), который учел вклад в ПЭДМ от электростати-

ческого перераспределения протонов относительно нейтронов в объеме ядра.

Таблица 1.

Экспериментальные и теоретические энергии уровней ядра ^{225}Th .

Основное состояние: $\frac{3}{2}^+$

(Значения энергий приведены в кэВ.)

Ядро	^{225}Th [14]			
	чстн		исчтн	
I	$E_i^{\text{эксп}}$	$E_i^{\text{теор}}$	$E_i^{\text{эксп}}$	$E_i^{\text{теор}}$
3/2	0	0		8
5/2	31	35		43
7/2	68	83		91
9/2	135	144		152
11/2	187	219	254	227
13/2	303	307	326	315
15/2	370	408	433	416
17/2	530	521	520	529
19/2	615	647	668	655
21/2	807	784	769	792
23/2	911	933	957	941
25/2	1127	1093	1072	1101
27/2	1250	1264	1291	1272
29/2	1485	1445	1426	1452
31/2	1631	1637	1658	1644
33/2	1870	1838	1824	1845
35/2	2047	2048	2057	2056
37/2		2268	2259	2275
39/2	2454	2495		

Нами получено выражение для ПЭДМ, учитывающее перераспределение протонов относительно нейтронов как в объеме, так и на поверхности ядра в случае нейтронной кожи переменной толщины, которая возникает при предположении о подобии форм нейтронной и протонной поверхностей

$$D_{\text{macro}} = D_{\text{macro}}^{\text{v}} + D_{\text{macro}}^{\text{surf}} =$$

$$= \frac{AZe^3}{32\pi} \left(\frac{1}{J} + \frac{15}{8QA^{1/3}} \right) \quad (4)$$

$$\sum_{\ell=2}^{\infty} \frac{12(\ell-1)(\ell+1)(8\ell+9)}{5(2\ell+1)^{3/2}(2\ell+3)^{3/2}} \beta_{\ell}^0 \beta_{\ell}^0.$$

Здесь A - число нуклонов, а Z - число протонов в ядре, e - заряд протона, J - энергия симметрии ядра (изовекторная объемная жесткость), а Q - эффективная жесткость нейтронной кожи в МэВ. Слагаемое с J в ПЭДМ связано с протонно-нейтронным перераспределением в объеме ядра D_{macro}^{vol} , а слагаемое с Q - с протонно-нейтронным перераспределением плотности на поверхности ядра и обусловлено изменением толщины нейтронной кожи D_{macro}^{surf} .

В рамках капельной модели существуют два выражения для ПЭДМ (4) и полученное С. Dorso, W. Myers, W. Swiatecki (1986), которые учитывают вклады от объемной и поверхностной областей ядра. Эти выражения были получены для различных предположений о распределении нейтронов на поверхности ядра. Отметим, что величины ПЭДМ, рассчитанные с помощью соотношения (4) и соответствующего выражения из работы С. Dorso et al, различаются в несколько раз при одних и тех же значениях параметров. В §1.3 проанализированы существующие расчеты ПЭДМ, выполненные в рамках капельной модели и по методу оболочечных поправок (P. Butler, W. Nazarewicz, 1991). Сформулированы условия согласования форм протонной и нейтронной плотностей с формами протонного и нейтронного потенциалов соответственно, необходимые для корректного расчета ПЭДМ по методу оболочечной поправки. Показано, что расчет ПЭДМ по методу оболочечной поправки, сделанный P. Butler, W. Nazarewicz (1991), не удовлетворяет условию согласования формы распределения плотности и потенциала. В §1.3 выполнен корректный расчет ПЭДМ по методу оболочечной поправки, результаты которого удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для изотопов Ra , Th и Ba .

В §1.4 исследуются приведенные вероятностей электрических дипольных, квадрупольных и октупольных переходов, связанных с ПЭДМ, квадрупольным и октупольным электрическими моментами соответственно, с учетом изменения квадрупольной и окту-

польной деформаций ядра при вращении. Показано, что также как и в модели Давыдова-Пабана, в нашей модели, изложенной в §1.1-1.2, приведенные вероятности электрических переходов связаны с приведенной вероятностью переходов в жестком ядре $B_a(E\ell, I \rightarrow I + \ell)$ и фактором $S_{I, I+\ell}^{\ell}(E\ell)$, усиливающим переходы вследствие деформации ядра при вращении

$$B(E\ell, I \rightarrow I + \ell) = B_a(E\ell, I \rightarrow I + \ell) S_{I, I+\ell}^{\ell}(E\ell). \quad (5)$$

Найдено аналитическое выражение для фактора $S_{I, I+\ell}^{\ell}(E\ell)$ и проведено сравнение с экспериментальными данными.

В заключении перечислены основные результаты этой главы и их следствия.

Глава 2. Коллективные колебательные возбуждения плотности я ядрах в экстремальных условиях и ядерной материи

Вторая глава состоит из введения, 4 параграфов и заключения.

Во введении дан детальный обзор литературы, связанной с изучением коллективных колебательных возбуждений плотности в ядрах.

В §2.1 исследуются гигантские изовекторные и изоскалярные резонансы с помощью кинетических уравнений, полученных в рамках нерелятивистской теории ферми-жидкости. В этом параграфе продолжены предыдущие исследования свойств гигантских резонансов в рамках газовой-капельной модели ядра, начатые в работах В.М. Струтинского, А.Г. Магнера и В.Ю. Денисова (1984-1986).

Здесь изучается зависимость ширины гигантских дипольных резонансов от температуры. Показано, что в "холодных" и "теплых" $T < T_{cr}$ ядрах гигантский дипольный резонанс (ГДР) является возбуждением 0-звуковой природы, а в "горячих" $T > T_{cr}$ ядрах ГДР имеет обычную гидродинамическую природу (1-звук). При $T \approx T_{cr} \approx 4.5$ МэВ в ядре возможны звуковые возбуждения, природа которых является промежуточной между нулевым и первым звуками. Эти возбуждения являются сильно затухающими, так как частота звука порядка частоты столкновения квазичастиц, что приводит к потере когерентности в движении нуклонов в ядре, а следовательно, и к резкому уменьшению силы ГДР.

Отметим, что величина предельной температуры ГДР 4.5 МэВ, связанная с уменьшением силы ГДР, недавно была привлечена на экспериментальных данных (J. Kasaga, K. Yoshida, (1994)).

В этом параграфе изучаются также формфакторы гигантских резонансов для неупругого рассеяния электронов и ширины прямого радиационного распада гигантских резонансов в холодных ядрах. В газовой-капельной модели объемный и поверхностный компоненты плотности связаны с помощью граничных условий на поверхности ядра. Формфакторы для неупругого рассеяния электронов в боруэвском приближении также имеют объемный и поверхностный вклад и имеют вид

$$(F_{in}^{\pm}(q))^2 = (\alpha_{in}^{\pm})^2 \frac{9\pi(2\ell+1)}{16\pi} \left(\frac{A}{Z}\right)^2 \left[j_{\ell}(qR) \frac{j'_{\ell}(x_{in}^{\pm})}{x_{in}^{\pm}} + \frac{j_{\ell}(qR)(\ell j_{\ell}(x_{in}^{\pm}) - x_{in}^{\pm} j'_{\ell}(x_{in}^{\pm})) - (\ell j_{\ell}(qR) - (qR) j'_{\ell}(qR)) j_{\ell}(x_{in}^{\pm})}{(x_{in}^{\pm})^2 - (qR)^2} \right]^2, \quad (6)$$

где α_{in}^{\pm} - амплитуда колебаний, A - число нуклонов в ядре, $j_{\ell}(x)$ - сферическая функция Бесселя, штрихами обозначены ее производные, x_{in}^{\pm} - корень характеристического уравнения, определяющего энергии возбуждения гигантских резонансов. Учет объемного и поверхностного вкладов в формфактор приводит к удовлетворительному описанию экспериментальных данных.

Для ширины прямого радиационного распада изовекторных гигантских резонансов получены простые аналитические выражения. Рассчитанные величины ширины прямого радиационного распада также удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями.

В §2.2 построена гидродинамическая модель для описания вибрационно-вращательных гигантских резонансов в деформированных ядрах. Эти резонансы связаны с вращательными осцилляциями протонного эллипсоида относительно нейтронного, которые впервые были рассмотрены (N. Lo Iudice, F. Palumbo (1979)). В отличие от предыдущих моделей (N. Lo Iudice, F. Palumbo (1979), A. Faessler, et al (1986)) вибрационно-вращательных гигантских резонансов в деформированных ядрах наша модель является последовательно гидродинамической. В §2.2 получены простые аналитические соотношения для определения частоты колебаний и приведенной вероятности электрических квадрупольных переходов

для рассматриваемых возбуждений. Показано, что в нашей модели ни энергия, ни приведенная вероятность перехода не зависят от параметра квадрупольной деформации ядра. Заметим, что при одном и том же значении параметра эффективной жесткости нейтронной кожи энергия трансляционных (обычных) квадрупольных возбуждений в $\sqrt{2}$ раз меньше энергии вибрационно-вращательных.

Коллективные возбуждения плотности в тяжелых нейтронно-избыточных сферических ядрах с нейтронным гало в гидродинамической модели детально рассматриваются в §2.3. Здесь предполагается, что в сильно нейтронно-избыточном ядре в результате сильного взаимодействия возможно образование нейтронного гало. При этом плотность ядерной материи испытывает резкое изменение при величине радиуса, соответствующего радиусу стабильного ядра R_1 (радиус кора) и на внешней поверхности нейтронного гало, то есть при R_2 . В этом случае радиальное распределение плотности в приближении резких поверхностей имеет вид двух ступенек. Модуль сжатия ядерной материи во внутренней области равен K_1 , а в области гало - K_2 ($K_1 \gg K_2$). С помощью динамических граничных условий при колебаниях плотности в ядре вариации плотности в области кора связаны с вариациями плотности в области гало. Найдены энергии возбуждения, переходные плотности, приведенные вероятности и другие характеристики возбужденных состояний ядер с нейтронным гало. Показано, что с уменьшением толщины гало T увеличивается энергия возбуждения первого состояния, которое связано с возбуждением нейтронной плотности в гало. Наоборот, при увеличении толщины гало энергия этих состояний уменьшается. При увеличении толщины гало растет число состояний, энергия которых будет меньше энергии состояния связанного с возбуждением кора. Уменьшение модуля сжатия нейтронной материи в гало K_2 приводит к такому же эффекту, как и увеличение толщины нейтронной кожи.

В §2.4 изучаются функции отклика в асимметричной ($\rho_N \neq \rho_Z$, $\rho_{N,Z}$ - протонные и нейтронные плотности) ядерной материи в релятивистском приближении с помощью кинетических уравнений с учетом π , σ , ρ мезонов и обменного взаимодействия. Такое исследование является актуальным в последнее время в связи с попытками

развить релятивистскую теорию ядра, учитывая связь ядерных сил с обменом мезонами между нуклонами, а также, используя релятивистский подход к описанию динамики ферми-жидкости (B.D. Serot, J.D. Walecka (1986)).

Целью нашего рассмотрения являлось полуклассическое описание ядерной динамики, так что нуклонные плотности (скалярная, векторная, тензорная, псевдовекторная и псевдоскалярная) предполагаются гладкими функциями пространственно-временных координат. Наше описание основывается на полевых уравнениях движения нуклонов, взаимодействующих с нейтральным скалярным σ , нейтральным векторным ω и заряженным векторным ρ - мезонными полями. В представлении Вигнера эти уравнения были сведены к уравнениям для ковариантной одночастичной функции Вигнера, которые решались в полуклассическом приближении с учетом обменных сил. В §2.4 вычислены силы, скорости волны коллективных θ -звуковых возбуждений и функции отклика различной природы в асимметричной ядерной материи. Показано, что осцилляции спиновой плотности возможны благодаря учету обменного члена. Получено, что скорость волны и сила незатухающих θ -звуковых коллективных возбуждений плотности различной природы уменьшается с ростом параметра асимметрии $\alpha = \frac{pN - pZ}{pN + pZ}$ материи, а полная сила, состоящая из суммы затухающего и незатухающего вкладов, при этом остается практически без изменений.

В заключении кратко перечислены основные результаты этой главы.

Глава 3. Деформации поверхности и плотности ионов в ядерных реакциях

Третья глава состоит из введения, 7 параграфов и заключения. Во введении дан детальный обзор литературы, связанной с исследованием физических явлений, рассматриваемых в этой главе.

В §3.1 в адиабатическом приближении находится потенциал взаимодействия тяжелых ионов на больших расстояниях с учетом изменения формы ионов и перераспределения протонов относительно нейтронов в объеме и на поверхности ядра. Затем в траекторном приближении рассчитывается зависимость потенциала

и деформации ионов от энергии столкновения. Показано, что при больших расстояниях и энергиях близких и ниже барьера величины деформаций ионов, вычисленные в траекторном приближении, близки к найденным в адиабатическом подходе.

Следующие два параграфа (§3.2-3.3) этой главы посвящены исследованию реакций подбарьерного слияния тяжелых ионов. Как уже отмечалось ранее, внимание к ядерным реакциям подбарьерного слияния связано с обнаруженным существенным (на несколько порядков) превышением экспериментального сечения этих реакций над теоретическим, рассчитанным в рамках одномерного ВКБ приближения. Для устранения различия между теоретическими и экспериментальными значениями сечения слияния было предложено большое количество моделей, которые можно разбить на ряд групп. Первый тип моделей связан с учетом возбуждения низколежащих вибрационных состояний ионов и канала малонуклонных передач. Обычно эти модели основываются на методе связанных каналов, например CCFUS (C. Dasso, S. Landowne, (1986)). Следующий класс моделей связан с изменением вида и значений параметров нон-ионного потенциала (M. Inui, S. Koonin (1984)). В третьей группе моделей предлагается учесть деформационные степени свободы сталкивающихся ядер, такие как мультипольная деформация поверхности ядер, образование шейки (H.J. Krappe, et al (1983), C. Aguiar, et al (1989)), деформацию основного состояния сталкивающихся ионов (N. Rowley (1992)).

Одним из наиболее последовательных и перспективных подходов к решению задачи описания сечения подбарьерного слияния достаточно тяжелых и близких по массе систем ионов является третий тип моделей. Метод связанных каналов является достаточно сложным и в реальных расчетах не учитываются все возможные каналы реакций, то есть происходит ограничение числа рассматриваемых каналов. Отметим также, что в процессе слияния ионы сильно деформируются и величины их деформаций при преодолении барьера больше деформаций, связанных с низколежащими вибрационными степенями свободы. Реакции передачи нуклонов между достаточно тяжелыми и близкими по массе системами ионов приводят, как правило, к незначительному увеличению сечения подбарьерного слияния.

Сечение слияния $\sigma_{fus}(E)$ тяжелых ионов с числом нуклонов A_1 и A_2 в многомерной модели состоит из суммы парциальных сечений $\sigma_{fus}(E, \ell)$, которые связаны с проницаемостью $P_\ell(E)$ потенциального барьера:

$$\sigma_{fus}(E) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sigma_{fus}(E, \ell) = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2M_N A_{12} E} \sum_{\ell=0}^{\infty} (2\ell + 1) P_\ell(E), \quad (7)$$

где M_N - масса нуклона, а $A_{12} = A_1 A_2 / (A_1 + A_2)$. В случае, когда энергия столкновения ионов меньше барьера, проницаемость $P_\ell(E)$ связана с действием системы $\mathcal{A}_\ell(E)$ соотношением

$$P_\ell(E) = [1 + \exp(2\mathcal{A}_\ell(E)/\hbar)]^{-1}. \quad (8)$$

Действие системы для случая трех коллективных переменных D, x_1, x_2 , имеет вид

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_\ell(E) = \int_{\mathcal{L}} dD [2(U_\ell(D, x_1, x_2) - E) \\ (M_{DD} + M_{Dx_1} \dot{x}_1 + M_{Dx_2} \dot{x}_2 \\ + M_{x_1x_1} \dot{x}_1^2 + M_{x_2x_2} \dot{x}_2^2 + M_{x_1x_2} \dot{x}_1 \dot{x}_2)]^{1/2}, \end{aligned} \quad (9)$$

где точка означает производную по D , а $M_{DD}, M_{Dx_i}, M_{x_i x_j}$ - массовые параметры. Интеграл действия берется вдоль траектории \mathcal{L} , которая имеет минимальное действие для данной энергии E и углового момента ℓ и соединяет внешнюю и внутреннюю точки поворота. Внешняя точка поворота определяется при сближении ядер до барьера, а внутренняя - после преодоления барьера. Для определения сечения слияния необходимо знать траекторию, которая будет обеспечивать минимальность действия и массовые параметры $M_{DD}, M_{Dx_i}, M_{x_i x_j}$.

Потенциальная энергия взаимодействия между ионами на расстоянии D между центрами тяжести правой и левой форм при фиксированном значении параметров x_1 и x_2 , описывающих деформацию правой и левой форм, для слиявшихся и разделенных форм в рамках капельной модели можно представить в виде

$$\begin{aligned} U(D, x_1, x_2) = E_{\text{пов}}(D, x_1, x_2) + E_{\text{кул}}(D, x_1, x_2) \\ + E_{\text{прот}}(D, x_1, x_2) + E_{\text{рот}}(D, x_1, x_2) \\ - (E_{\text{пов}}^0 + E_{\text{кул}}^0). \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь первые два слагаемые - поверхностная и кулоновская энергии, $E_{prox}(D, x_1, x_2)$ - энергия контактного взаимодействия между поверхностями (J. Blocki, et al (1976)), $E_{rot}(D, x_1, x_2)$ - вращательная энергия, а индексом "0" обозначены соответствующие энергии на бесконечном расстоянии между ионами.

Отметим, что при деформации ионов меняется расстояние между их поверхностями, что приводит к резкому изменению сильного короткодействующего ядерного взаимодействия между ионами. Резкое изменение ядерного потенциала $E_{prox}(D, x_1, x_2)$ приводит также и к резкому изменению потенциала двух взаимодействующих ионов $U(D, x_1, x_2)$. Величина действия (9) существенным образом зависит от потенциала, поэтому от деформации ядер сильно зависит траектория слияния ядер, а следовательно, вероятность туннелирования через барьер.

Учитывая малую толщину шеек, можно считать приближение о слабой связи между параметрами D и x_i . Заметим, что только для очень низких энергий внутренняя точка поворота для рассматриваемых ядер имеет место для однотельных форм. Для более высоких энергий внутренняя точка поворота имеет место для разделенных форм ионов. Поэтому можно положить массовые параметры M_{Dx_i} и $M_{x_i x_j}$ ($i \neq j$) равными нулю, а $M_{DD} = M_N A_{12}$ и $M_{x_i x_i} = k_0 M_{pot}$, где M_{pot} - величина массового параметра для безвихревой несжимаемой ядерной жидкости при эллипсоидальных деформациях около положения равновесия, k_0 - коэффициент. В наших расчетах мы полагаем величину коэффициента $k_0 \geq 1$.

На рисунке 2 проводится сравнение сечений слияния, рассчитанных в развитой нами многомерной модели, модели связанных каналов и простой одномерной модели туннелирования для реакций $^{64}\text{Ni} + ^{92,96}\text{Zr}$ и $^{64}\text{Ni} + ^{100}\text{Mo}$ с экспериментальными данными. Результаты расчета в модели связанных каналов получены с помощью программы CCFUS, с оригинальными значениями параметров. Характеристики прилежащих вибрационных уровней уровней ^{64}Ni , ^{100}Mo и $^{92,96}\text{Zr}$ взяты из экспериментальных данных.

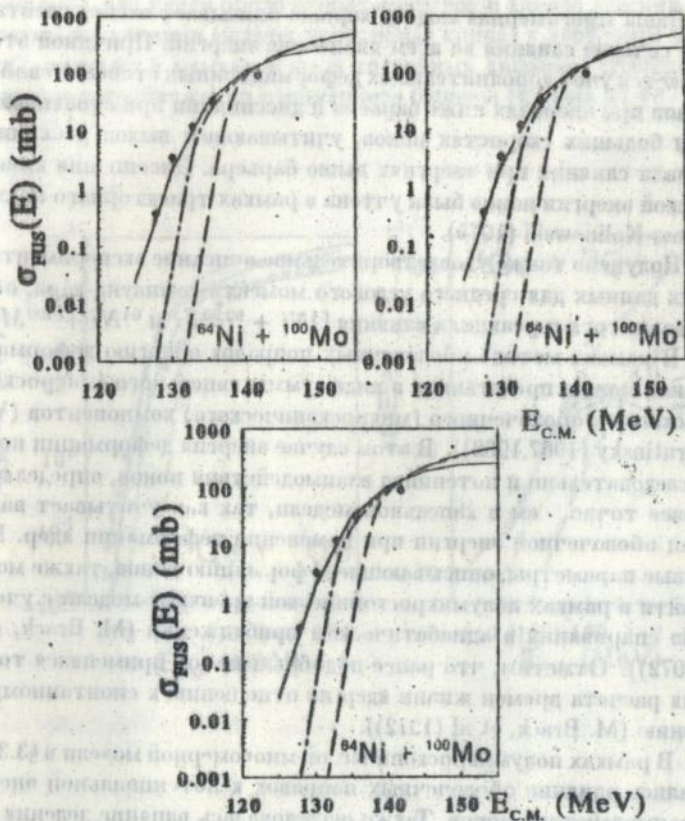


Рисунок 2. Энергетическая зависимость сечений слияния для реакций $^{64}\text{Ni} + ^{92,96}\text{Zr}$ и $^{64}\text{Ni} + ^{100}\text{Mo}$. Сплошные кривые - расчет в многомерной модели, штрих пунктирные - в приближении связанных каналов, штриховые - в простой одномерной модели. Точки - экспериментальные данные.

Наша многомерная модель хорошо описывает экспериментальное сечение слияния во всем диапазоне энергий. Причиной этому является учет дополнительных деформационных степеней свободы ионов при энергиях выше барьера и диссипации при столкновении при больших скоростях ионов, учитывающей выход реакции из канала слияния при энергиях выше барьера. Диссипация кинетической энергии ионов была учтена в рамках траекторного подхода Gross-Kalinowski (1975).

Получено также удовлетворительное описание экспериментальных данных для среднего углового момента компаунд-ядра, образовавшегося в реакциях слияния $^{64}\text{Ni} + ^{92,96}\text{Zr}$ и $^{64}\text{Ni} + ^{100}\text{Mo}$.

В рамках метода оболочечных поправок энергию деформации ионов можно представить в виде суммы капельного (макроскопического) и оболочечного (микроскопического) компонентов (V.M. Strutinsky (1967,1968)). В этом случае энергия деформации ионов, а следовательно и потенциал взаимодействия ионов, определяется более точно, чем в капельной модели, так как учитывает вариации оболочечной энергии при изменении деформации ядер. Массовые параметры, описывающие деформацию ионов, также можно найти в рамках полумикроскопической краунинг-модели с учетом сил спаривания в адиабатическом приближении (M. Brack, et al (1972)). Отметим, что ранее подобный метод применялся только для расчета времен жизни ядер по отношению к спонтанному делению (M. Brack, et al (1972)).

В рамках полумикроскопической многомерной модели в §3.3 изучались влияние оболочечных поправок к потенциальной энергии взаимодействия ионов. Также исследовалась влияние деления компаунд-ядра на величину сечения образования испарительного остатка и на средний угловой момент испарительного остатка в реакции слияния $^{74}\text{Ge} + ^{74}\text{Ge}$. Наши расчеты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, см. рис. 3. На рис. 3 приведены результаты расчетов в рамках многомерной модели с учетом оболочечных поправок, диссипации и канала деления (сплошная кривая), без учета оболочечных поправок, но с учетом диссипации и канала деления (штрих пунктирная кривая с длинными штрихами), без учета диссипации и оболочечных поправок, но с учетом канала деления (штрих пунктирная кривая с короткими

штрихами), без учета оболочечных поправок и канала деления, но с учетом диссипации (штрих пунктирная кривая с двойными точками), а также в рамках модели связанных каналов (штриховая кривая) и в приближении одномерного барьера (кривая из точек)

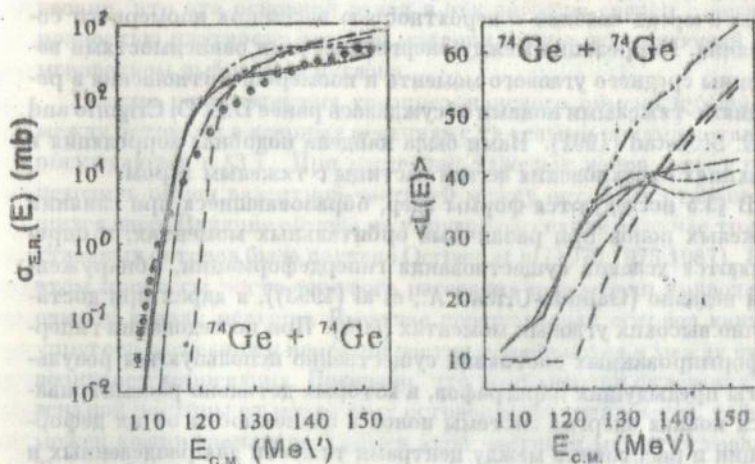


Рисунок 3. Энергетическая зависимость сечения образования и среднего углового момента испарительного остатка, образовавшегося в реакции $^{74}\text{Ge} + ^{74}\text{Ge}$. Точки - экспериментальные данные, линии - расчеты, выполненные в различных моделях и приближениях (см. текст).

Корреляция между поведением среднего углового момента и выходом изомерных отношений в около пороговой области в реакциях $^{187}\text{Ta}(\alpha, n)^{184m,g}\text{Re}$, $^{197}\text{Au}(d, p)^{198m,g}\text{Au}$, $^{193}\text{Ir}(\alpha, n)^{196m,g}\text{Au}$, $^{198}\text{Pt}(d, 2n)^{198m,g}\text{Au}$, $^{184}\text{W}(p, n)^{184m,g}\text{Re}$, измеренных на У-120 ЦИИ НАНУ, обсуждается в §3.4.

В случае, когда спины основного и изомерного состояния сильно различаются, а вносимая энергия слабо меняется, изомерное отношение чувствительно к среднему угловому моменту. Эта зависимость особенно сильно проявляется, когда величина среднего углового момента она заметно меньше спина изомерного состояния. В этом случае величина среднего углового момента определяет начальную стадию каскадного процесса деэзообуждения ядра, что в свою очередь связано с вероятностью заселения изомерного состояния. Корреляция между энергетическими зависимостями величины среднего углового момента и изомерного отношения в реакциях с тяжелыми ионами обсуждалась ранее D.E. Di Crigorio and R.G. Stokstad (1991). Нами была найдена подобная корреляция в реакциях столкновения легкой частицы с тяжелым ядром.

В §3.5 исследуются формы ядер, образовавшиеся при слиянии тяжелых ионов при различных орбитальных моментах, и определяются условия существования гипердеформации, обнаруженной недавно (Galindo-Uribarí A., et al (1993)), в ядрах при достаточно высоких угловых моментах ($90\hbar$). При исследовании гипердеформированных состояний существенно используются результаты предыдущих параграфов, в которых детально рассматривается полная энергия системы ионов в зависимости от их деформации и расстояния между центрами тяжести для разделенных и слившихся форм.

Затем обсуждаются нуклонные степени свободы в ядерных реакциях.

Энергия возбуждения ядер при мгновенном удалении из него нуклона изучалась в §3.6. Примером такой реакции может быть реакция $A(x; x', y)(A-1)^*$, где x - частица, которая выбивает нуклон y из ядра с A нуклонами. Энергию возбуждения остаточного ядра $(A-1)^*$, образовавшегося при быстром удалении нуклона y можно измерить, изучая распад ядра $(A-1)^*$. При мгновенном удалении нуклона из ядра волновые функции нуклонов в остаточном ядре $(A-1)^*$, а следовательно и распределение плотности ядерного вещества, связанное с ними, практически не изменилось. Волновые функции нуклонов в остаточном ядре $(A-1)^*$ отличаются от волновых функций основного состояния этого ядра $(A-1)$. Поэтому в распределении плотности ядерной материи в ядре $(A-1)^*$

ость область, где плотность существенно отличается от равновесных значений, которые характерны для основного состояния ядра ($A-1$). Эта область связана с теми точками пространства, в которых локализована волновая функция удаленного нуклона в основном состоянии ядра с A нуклонами.

В рамках капельной модели вычислены аналитически энергии возбуждения ядер при мгновенном удалении из него нуклона. Показано, что этот основной вклад в эту энергию связан с неоднородностью плотности ядерной материи в ядре, возникающей при мгновенном выбивании нуклона.

Условия возникновения квазирезонансного обмена нуклонами между остовами в ядерных реакциях с тяжелыми ионами детально обсуждаются в §3.7. При рассеянии тяжелых ионов может происходить обмен валентной частицей между остовами сталкивающихся ядер. Влияние обмена на упругое рассеяние в случае тождественных остовов было изучено Oertzen et al (1970,1975,1987). При этом процессы чисто упругого рассеяния и передачи приводят к одному каналу реакции. В случае неодинаковых остовов каналы упругого рассеяния и передачи частиц различаются и между ними возникает корреляция. Показано, что если энергии отделения валентной частицы от различных остовов мало отличаются, то возможен квазирезонансный обмен этой частицей между остовами. Такой обмен повлияет на сечение передачи валентной частицы от одного остова к другому и на упругое рассеяние ядер.

В заключении перечислены результаты этой главы и их следствия.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации, которые кратко можно сформулировать следующим образом:

1. Построена модель для описания энергии уровней и вероятностей дипольных, квадрупольных и октупольных переходов в ядрах с квадрупольной и октупольной деформациями с учетом изменения формы ядра при вращении. Получены аналитические выражения для энергий, волновых функций ядра и приведенных вероятностей переходов, зависящие от трех параметров в случае четно-четных ядер и от четырех - в случае нечетных ядер, которые

хорошо описывают экспериментальные данные для нейтронно-дефицитных изотопов тория, радия и актиния.

2. Показана зависимость величины ПЭДМ от положения центра масс ядра с формой S (с деформациями $\beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \dots$) или с формой S' (с деформациями $\beta_2, -\beta_3, \beta_4, -\beta_5, \dots$) относительно начала координат, (начало координат лежит в плоскости зеркальной симметрии форм S и S').

3. Сформулировано условие согласования между макроскопическими и микроскопическими формами распределения как протонов, так и нейтронов при расчете ПЭДМ по методу оболочечной поправки.

4. Получено простое аналитическое выражение для макроскопического ПЭДМ в случае, когда радиусы протонной и нейтронной поверхностей пропорциональны друг другу и выполнен корректный расчет ПЭДМ по методу оболочечной поправки.

5. Показано, что гигантские мультипольные резонансы в ядрах при низких температурах являются возбуждениями нулевого звука, а при больших - возбуждениями первого звука. Вычислена температура перехода от режима нулевого звука к режиму первого звука для гигантского дипольного изовекторного резонанса, которая приблизительно равна 4,5 МаВ. Найдено, что при переходе от нулевого к первому звуку средняя ширина резонанса резко уменьшается.

6. Вычислены радиационные ширины прямого гамма-радиации гигантских изовекторных резонансов в основном состоянии и формфакторы для (e, e') -рассеяния в рамках газовой-капельной модели. Рассчитанные величины удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Показано, что учет колебаний в объеме ядра, динамически связанных с помощью граничных условий с колебаниями поверхности, приводит к улучшению описания экспериментальных данных для формфакторов (e, e') -рассеяния, по сравнению с моделями гигантских резонансов, учитывающими либо объемные либо поверхностные возбуждения.

7. Предложена модель для описания вибрационно-вращательных и изовекторных гигантских резонансов в ядрах с большой квадрупольной деформацией в гидродинамическом приближении. Определены энергии возбуждения и приведенные вероятности E2-пере-

ходов. Показано, что рассматриваемые резонансы имеют энергию возбуждения в $\sqrt{2}$ больше, чем обычные квадрупольные изовекторные резонансы, связанные с деформацией плотности, и заметную величину приведенной вероятности, что позволяет надеяться на экспериментальное обнаружение этих резонансов.

8. В рамках гидродинамического приближения построена модель для описания гигантских изоскалярных монопольных и дипольных резонансов в ядрах с нейтронным гало. Детально изучены низкоэнергетические состояния, связанные с возбуждением плотности в гало. Исследована динамическая связь между колебаниями плотности в области кора и гало. Получены выражения для энергий возбуждения, переходных плотностей, вероятностей переходов, массовых параметров, коэффициентов жесткости и величин истощивания энергетически взвешенных сумм. Показано, что при увеличении толщины нейтронного гало или уменьшении модуля сжатия ядерной материи в гало энергия низколежащих возбуждений, связанных, в основном, с колебаниями гало, уменьшается, а энергия колебаний, связанных, в основном, с колебаниями кора ядра, практически остается без изменений. Вариации коэффициента поверхностного натяжения слабо влияют на характеристики резонансов.

9. В релятивистской модели квантовой адродинамики в полуклассическом приближении с учетом обменных сил вычислены силы, скорости волны коллективных 0 -звуковых возбуждений и функции отклика различной природы в асимметричной ядерной материи. При этом было сделано обобщение на случай несимметричной ядерной материи полуклассического подхода, связанного с релятивистскими кинетическими уравнениями для полевых уравнений, описывающих движение нуклонов, взаимодействующих с σ -, ω - и ρ -мезонными полями. Найдено, что учет обменных сил приводит к снятию вырождения между протонной и нейтронной эффективными массами, а учет ρ -мезона усиливает этот эффект. Показано, что осцилляции спиновой плотности возможны благодаря учету обменного члена. Обнаружено, что скорость волны и сила затухающего 0 -звуковых коллективных возбуждений плотности различной природы уменьшается с ростом параметра асимметрии α материи, при этом полная сила, состоящая из затухающего и не-

затухающего вклада, практически остается без изменений.

10. Построены макроскопическая и полумикроскопическая модели для описания подбарьерного слияния тяжелых ионов, учитывающие деформацию ионов в процессе прохождения барьера и передачу энергии другим степеням свободы при движении ионов до внешней точки поворота. Показано, что в процессе слияния деформация ионов меняется от слегка сплюснутой, в области внешней точки поворота, к сильно вытянутой, в окрестности внутренней точки поворота, а расстояние между центрами масс при этом меняется незначительно. Предложенные модели удовлетворительно описывают экспериментальные данные для энергетической зависимости сечений слияния, средних угловых моментов и парциальных сечений тяжелых ионов.

11. Показано, что величина среднего углового момента компаунд-ядра, образованного после слияния тяжелых ядер и испарения частиц и гамма-квантов, уменьшается при учете канала деления компаунд-ядра и выходит на насыщение при энергиях выше барьера.

12. Предложена новая параметризация сталкивающихся ионов, которая описывает разделенные ионы в виде как сплюснутых, так и вытянутых эллипсоидов вращения, которые плавно переходят в слившуюся конфигурацию.

13. Определен потенциал взаимодействия тяжелых ионов на больших расстояниях, учитывающий деформации формы ионов и распределения протонов относительно нейтронов как в объеме, так и на поверхности ядра. Показано, что основной вклад связан с деформацией ионов. Замечено, что с увеличением мультипольности деформации поверхности ионов или изовекторной плотности вклады в потенциал резко уменьшаются.

14. В траекторном приближении вычислены деформации ионов, которые обусловлены зависимостью энергий ионов и их кулоновского взаимодействия от деформации поверхности ионов. Найдено, что при приближении энергии столкновения к энергии барьера траектории движения ионов, зависящие от расстояния между центрами тяжести ионов и от деформаций поверхности ионов, приближаются к адиабатическим, а в при энергиях близких к барьеру или ниже барьера практически не отличаются от адиабатических.

тических.

15. В реакциях с легкими заряженными частицами при энергиях ниже кулоновского барьера найдена корреляция между энергетической зависимостью изомерного отношения и величиной среднего углового момента. Для энергий значительно ниже кулоновского барьера получена слабая зависимость от энергии столкновения как изомерного отношения, так и среднего углового момента.

16. Найден минимум в энергии деформации тяжелых ядер, состоящей из энергии кулоновского взаимодействия, поверхностной и вращательной энергий и энергии контактного взаимодействия поверхностей, при больших деформациях и угловых моментах, который можно связать с гипердеформационными состояниями ядер. Результаты расчетов параметров деформаций и моментов инерции удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными для гипердеформированного состояния ^{162}Dy .

17. Вычислена энергия возбуждения остаточных ядер при быстром удалении нуклона из ядра. Показано, что эта энергия связана с неоднородностью в распределении плотности в ядре, возникающей при мгновенном выбивании нуклона, и основной вклад связан с модулем сжатия.

18. В адиабатическом приближении построена теория для описания многократного обмена валентной частицей между остовом ядер и определены условия возникновения квазирезонансного обмена валентной частицей между донами. Получено, что квазирезонансный обмен валентной частицей возможен при близких энергиях отделения валентной частицы от остовов ядер.

В приложении 1 приведены полезные математические соотношения, которые используются при анализе коллективных возбуждений в релятивистской ядерной материи.

В приложении 2 найдены параметры потенциала взаимодействия α -частицы с некоторыми тяжелыми ядрами, используя найденные ранее параметры потенциалов для ядер с близким числом нуклонов.

В приложении 3 оценивается вклад, связанный с оболочечными поправками, в энергию возбуждения ядра при мгновен-

ном удалении от него нуклона.

Основные результаты диссертации содержатся в следующих работах:

1. Денисов В.Ю., Квазирезонансный обмен нуклонами при рассеянии тяжелых ионов // ЯФ, 1984, т. 39, с. 825-830.
2. Денисов В.Ю., Вибрационно-вращательные изовекторные гигантские резонансы в деформированных ядрах в гааово-капельной модели // ЯФ, 1988, т. 47, с. 52-57.
3. Denisov V.Yu., Polarized electric dipole moment and octupole deformation of the nucleus // Proc. 23 Zakopane school on Physics, Poland, 1988, p. 277-279.
4. Денисов В.Ю., Гигантские резонансы - нулевой звук в холодных и первый звук в горячих ядрах // ЯФ, 1989, т. 49, с. 59-62.
5. Денисов В.Ю., Октупольная деформация и электрические дипольные переходы в ядрах // ЯФ, 1989, т. 49, с. 644-654.
6. Денисов В.Ю., Формфакторы и радиационные ширины гигантских мультипольных резонансов // ЯФ, 1990, т. 51, с. 345-352.
7. Денисов В.Ю., Потенциал взаимодействия тяжелых ионов на больших расстояниях // ЯФ, 1990, т. 51, с. 1263-1272.
8. Денисов В.Ю., Формфакторы и радиационные ширины гигантских мультипольных резонансов // ВАНТ, Серия: ядерно-физические константы (теория и эксперимент). 1990, вып. 1(9), с. 30-32.
9. Denisov V.Yu., Giant resonances: zero sound in cold nuclei and first sound in hot nuclei // Proc. 1 Kiev Int. School on Nuclear Physics, Kiev, May 28 - June 8, 1990, Ed. O.F.Nemets, A.T.Rudchik, Kiev, Naukova Dumka, 1991, с. 390-396.
10. Денисов В.Ю., Подбарьерное слияние тяжелых ядер. Симметричный случай // ЯФ, 1991, т. 54, с. 1556-1571.
11. Denisov V.Yu., Consistent shell correction calculation of polarized electric dipole moment // Proc. 2 Kiev Int. School on Nuclear Physics, Kiev, June 22 - July 1, 1991, Ed. A.T.Rudchik, Kiev, с. 140-145.
12. Денисов В.Ю., Согласованный расчет поляризованного электрического дипольного момента по методу оболочечной поправки // ЯФ, 1992, т. 55, с. 2647-2656.
13. Дзюблук А.Я., Денисов В.Ю., Энергии и возбужденные состо-

яния четно-четных ядер с квадрупольной и октупольной деформациями // УФЖ, 1992, т. 37, с. 1770-1777.

14. Денисов В.Ю., Желтоножский В.А., Рэшитко С.В., Изучение изомерных отношений в околопороговой области в реакциях с легкими частицами // ЯФ, 1993, т. 56, вып. 1, с. 99-104.

15. Дзюблик А.Я., Денисов В.Ю., Коллективные состояния четно-четных ядер с квадрупольной и октупольной деформациями // ЯФ, 1993, т. 56, вып. 3, с. 30-39.

16. Денисов В.Ю., Дзюблик А.Я., Коллективные состояния нечетных ядер с квадрупольной и октупольной деформациями // ЯФ, 1993, т. 56, вып. 4, с. 96-104.

17. Денисов В.Ю., Энергия возбуждения остаточных ядер при мгновенном удалении нуклона // УФЖ., 1993, т. 33, с. 824-830.

18. Денисов В.Ю., Изоскалярные коллективные возбуждения в тяжелых ядрах с нейтронным гало // ЯФ, 1993, т. 56, вып. 8, с. 44-61.

19. Royer G., Haddad F., Denisov V.Yu., Hyperdeformation of rotating nuclei within the generalized liquid-drop model. // Proc. of the 8 Int. Symp. on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, September 1993, World Scientific, с. 448-450.

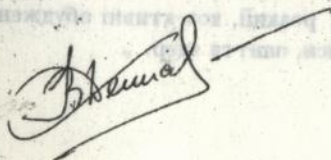
20. Denisov V.Yu., Royer G., Sub-barrier fusion of $^{64}\text{Ni} + ^{100}\text{Mo}$ // J. Phys. G., 1994, v. G20, p. L43-L47.

21. Matera F., Denisov V.Yu., Collective modes and response functions of relativistic asymmetric nuclear matter // Phys. Rev., 1994, v. C49, p. 2816-2819.

22. Denisov V.Yu., Royer G., Multi-dimensional model of sub-barrier heavy-ion fusion // Preprint LPN-Nantes-93-05, 1993, 1993; ЯФ, 1995, в печати.

23. Denisov V.Yu., Energy levels and reduced probabilities of electric dipole, quadrupole and octupole transitions of ^{226}Ra // Preprint LPN-Nantes-93-06.

24. Denisov V.Yu., S.V. Reshitko, Royer G., Multi-dimensional semi-microscopic model of sub-barrier heavy-ion fusion // Preprint LPN-Nantes-94-08, 1994.



Денисов В.Ю. Колективні ступені свободи в динаміці важких ядер.

Дисертація (рукопис) на одбуття вченого ступеня доктора фізико-математичних наук по спеціальності 01.04.16 - фізика атомного ядра та елементарних частинок, Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, 1994.

Захищаються 24 наукові праці, які містять теоретичні дослідження колективних ротаційних станів у м'яких ядрах з октупольною та квадрупольною деформаціями, колективних збуджень ізоскалярної та ізовекторної густини у ядрах та ядерній матерії, колективного руху форми іонів при підбар'єрному злитті. Найдено, що досить важкі іони деформуються в процесі проходження крізь бар'єр від злегка сплюснутих до сильно витягнутих. Показано, що врахування м'якості ядер з квадрупольною та октупольною деформаціями призводить до задовільного опису ротаційних смуг.

Denisov V.Yu. Collective degrees of freedom in dynamics of heavy nuclei.

Thesis (manuscript) is presented for scientific degree of a doctor of physical and mathematical sciences on speciality 01.04.16 - physics of atomic nuclei and elementary particles, Institute for Nuclear Research Ukrainian National Academy of Science, Kiev, 1994.

24 scientific works, contained theoretical studies of collective rotational states of soft nuclei with quadrupole and octupole deformations, of collective density excitations in nuclei and in nuclear matter, of collective motion of ions shapes at subbarrier fusion, are advocated. It is founded that sufficiently heavy ions is deformed from slightly oblate to strongly prolate during the process of barrier penetration. It is shown that the account of softness of nuclei with quadrupole and octupole deformations leads to satisfactory description of rotational bands.

Ключові слова:

структура ядра, ядерні реакції, колективні збудження, ротаційні рівні, гігантські резонанси, злиття ядер.

ДЕНИСОВ Виталий Юрьевич

КОЛЛЕКТИВНЫЕ СТЕПЕНИ СВОБОДЫ В ДИНАМИКЕ
ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

(Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук)

Подписано в печать: 27.12.94. Формат 60 x90/16 Бум. офс. Офс. печ.
Усл. печ. л. 2 Тираж 100 экз. Заказ 61

СКТБ с ЭП Института ядерных исследований
Национальной АН Украины
252028, Кисв-28, проспект Науки, 47

1576693

456643

AB 31.726