

П-222



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4 - 12966

ПАШКЕВИЧ
Виталий Владимирович

СРЕДНЕЕ ПОЛЕ
И ЭФФЕКТЫ ОБОЛОЧЕЧНОЙ СТРУКТУРЫ
АТОМНЫХ ЯДЕР

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1979

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

Ю.Ц.ОГАНЕСЯН

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Н.С.РАБОТНОВ

доктор физико-математических наук
профессор

Я.А.СМОРОДИНСКИЙ

Ведущая организация - Институт ядерных исследований АН УССР,
Киев.

Автореферат разослан "11" апреля 1979 года.

Защита диссертации состоится "6" июня 1980 г.

на заседании Специализированного совета Д.047.01.01 Лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследова-
ний, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

Р.А.АСАНОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В ядерной физике имеется ряд проблем, для решения которых требуется знать полную энергию ядра с беспрецедентной в других областях ядерной физики точностью - порядка 0,01%, что необходимо для теоретического предсказания, например, массы, формы поверхности и величины барьера деления атомных ядер. Точность расчетов энергии связи, в которых исходят из нуклон-нуклонного взаимодействия в пустоте, еще совершенно неудовлетворительна с этой точки зрения. Используя эффективное взаимодействие нуклонов в среде, можно значительно уточнить результаты, но несмотря на то, что приходится преодолевать громадные технические трудности, требуемой точности достичь не удастся. Наибольшая точность в расчетах энергии деформации ядер достигается в методе оболочечной поправки Струтинского (МОПС), в котором полная энергия ядра представляется в виде суммы двух компонент, классической энергии в модели жидкой капли и квантовой (оболочечной) поправки, вычисляемой на основе спектра одночастичных состояний нуклонов в среднем потенциале модели оболочек.

Эффективность и качество расчетов по МОПС зависят от предположений, положенных в основу феноменологического определения потенциала среднего поля, и от эффективности вычисления одночастичного спектра в этом потенциале. Для надежной экстраполяции потенциала на большие деформации и в новые области ядер возникла настоятельная необходимость определить одночастичный потенциал, исходя из физических предпосылок, а не соображений математического удобства. Возросли требования к точности и физической обоснованности расчетов схем одночастичных уровней.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Основной целью работы являются формулировка и разработка подхода, позволяющего эффективно исследовать оболочечную структуру не только хорошо изученных ядер, но и ядер, удаленных от линии бета-стабильности, а также быстровращающихся ядер и ядер в процессе деления. Подход основан на определении одночастичного потенциала при произвольной форме поверхности в соответствии с имеющейся экспериментальной и теоретической информацией о свойствах ядерных сил, плотности распределения нуклонов в ядре, и создании эффективных методов вычисления одночастичного спектра и соответствующих волновых функций.

Научная новизна. В диссертации впервые дано определение реалистического потенциала среднего поля в ядре произвольной формы, предложен метод вычисления одночастичного спектра и соответствующих волновых функций, который сформулирован в виде быстрой процедуры, реализованной на ЭВМ. Исследована форма ядер, удаленных от линии бета-стабильности, и впервые показано, что полученные недавно экспериментальные данные (см. ниже) можно интерпретировать как эффект "сосуществования форм" среди низколежащих возбужденных состояний, который находит свое полное объяснение в рамках сформулированного подхода.

Проведено обобщение МОПС для вычисления полной энергии как медленно, так и быстро вращающихся ядер, что позволило исследовать изменение формы ядер редкоземельных элементов под влиянием быстрого вращения и впервые сделать вывод о том, что вследствие квантовых эффектов ядра более стабильны относительно деления, чем это предсказывается в модели жидкой капли.

В едином подходе проведено исследование разнообразных форм, которые ядро принимает в процессе деления. Впервые сделан вывод о том, что трансураниевые ядра на первом из двух барьеров деления имеют неаксиальную форму. На втором барьере существенную роль

играет деформация, нарушающая зеркальную симметрию ядра. Показано также, что в минимуме между двумя барьерами ядро аксиально- и зеркально-симметрично и устойчиво относительно деформаций, нарушающих аксиальную и зеркальную симметрию.

Научная и практическая ценность работы. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что изучение эффектов оболочечной структуры ядра в подходе, основанном на реалистическом определении потенциала среднего поля, позволяет получить большой объем физически интересной и уникальной информации о свойствах ядер, удаленных от линии бета-стабильности, о быстровращающихся ядрах и о делении ядер. В тех случаях, когда имеется возможность сравнения теоретических результатов с экспериментальными данными, между ними наблюдается хорошее согласие. Проведенные исследования стимулируют постановку дальнейших экспериментов.

Развитый в диссертации подход, основанный на исследовании одночастичного потенциала при произвольной форме поверхности, может использоваться в качестве фундамента при дальнейшем развитии ряда направлений в теоретической ядерной физике, как при изучении низколежащих коллективных возбуждений в атомном ядре, например, в полумикроскопическом подходе, развиваемом В.Г.Соловьевым и его сотрудниками, или в теории конечных ферми-систем А.Б.Мигдала и др., так и при динамическом рассмотрении процессов с перераспределением больших масс ядерного вещества, происходящих, например, при делении ядра или при столкновении тяжелых ионов.

Выводы, сформулированные в диссертации, цитируются во многих обзорах и в монографиях В.Г.Соловьева "Теория сложных ядер" (изд-во "Наука", 1968 г.), Р.Ванденбоша и Дж.Р.Хайзенти "Деление ядра" ("Academic Press", 1973 г) и в учебнике М.А.Престона и Р.К.Бхадрури "Структура ядра" (Addison Wesley, 1975 г.).

Апробация работы. Основные материалы диссертации были представлены на ХУШ, ХХ, ХХІУ-ХХУШ ежегодных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, международном симпозиуме по структуре ядра в Дубне в 1968 году, международной конференции по ядерной физике в Мюнхене в 1973 году, международной конференции по реакциям между сложными ядрами в Нашвилле в 1974 году, на ХІУ Сессии по ядерной спектроскопии и теории ядра в Дубне в 1975 году, Международном симпозиуме по высоковозбужденным состояниям в ядрах в Килхе в 1975 году, Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра в Дубне в 1976 году, Международном симпозиуме по состояниям с высоким спином в Дрездене в 1977 году и международном симпозиуме по ядерным реакциям в Балатонфьуред в 1977 году.

Диссертация содержит 198 страниц текста, включая 3 таблицы, 40 рисунков и список цитируемой литературы из 223 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Полная энергия ядра и методы ее вычисления

Одним из наиболее хорошо установленных фактов в ядерной физике является приблизительное постоянство плотности распределения нуклонов в объеме ядра, что позволяет говорить о четко выраженной поверхности ядра. Понятие поверхности ядра входит составной частью во многие модели ядра. Несжимаемость ядерной материи находит свое выражение в постоянстве ограниченного поверхностью объема ядра. Во многих низкоэнергетических процессах меняется только форма поверхности. Для определения таких статических характеристик ядра, как его масса, равновесная форма или барьер деления достаточно знать полную энергию ядра как функционал формы поверхности.

В первой, вводной, главе диссертации дается схема вычисления полной энергии ядра при произвольной форме поверхности как в моде-

ли жидкой капли (§ I), так и в МОПС, согласно которому к жидкокапельной компоненте энергии добавляется оболочечная поправка, определяемая структурными особенностями ядра (§ 2). Для вычисления оболочечной поправки при произвольной форме поверхности нужно сделать предположение о виде потенциала среднего поля и вычислить спектр одночастичных уровней в этом потенциале. Выбор потенциала и вычисление спектра обсуждаются в последующих главах диссертации. Точность расчетов оболочечной поправки по МОПС в рамках теории Хартри-Фока рассматривается в § 3.

II. Одночастичное поле ядра при произвольной форме поверхности

Исследование квадрупольной деформации известных ядер вблизи линии бета-стабильности естественно проводить, основываясь на простом потенциале Нильссона, параметры которого подобраны из условия хорошего воспроизведения свойств основных и низколежащих возбужденных состояний этих же ядер. Первоначальные расчеты по МОПС действительно проводились с использованием потенциала Нильссона, обобщение которого на случай формы ядра, аппроксимируемой трехосным эллипсоидом, было дано Ньютоном. Некоторые результаты таких расчетов приводятся в дальнейшем.

Однако, при исследовании ядер, удаленных от линии бета-стабильности, встает вопрос о возможном изменении параметров потенциала при далеких экстраполяциях. Аналогично, расчеты энергии деформации в процессе деления, проводимые в рамках модели Нильссона, приходится делать в предположении о независимости параметров потенциала от деформации при значительном изменении формы ядра. При этом физический смысл поправочных членов в потенциале Нильссона при сложной форме ядра остается неясным.

Возникает проблема определения вида потенциала при произвольной форме поверхности в соответствии с имеющейся эксперименталь-

ной и теоретической информацией о свойствах ядерных сил и плотности распределения нуклонов в ядре. Решение этой проблемы дано во второй главе диссертации.

Для вычисления полной энергии ядра в соответствии с МОПС необходимо также сформулировать метод вычисления одночастичных энергий. При переходе от простого потенциала Нильссона к реалистическому потенциалу сложность задачи о вычислении одночастичного спектра заметно возрастает. В связи с тем, что при исследовании процесса деления нужно рассчитывать многомерные поверхности энергии деформации, для чего требуется проводить вычисления одночастичного спектра в большом количестве точек в пространстве параметров деформации, метод вычисления должен быть весьма эффективным. Эта задача также была решена. Эффективный метод вычисления одночастичного спектра и соответствующих волновых функций описан во второй главе.

Феноменологическое определение потенциала среднего поля дано в предположении о том, что одночастичный потенциал зависит только от расстояния до поверхности ядра /1/, что находится в соответствии с короткодействующим характером ядерных сил. В рамках такого предположения можно отдельно рассматривать задание формы ядерной поверхности и зависимости потенциала от расстояния до поверхности ядра. В § I развит приближенный метод определения расстояния до поверхности ядра при произвольной форме поверхности /2-4/. Это расстояние можно также определять численно, минимизируя расстояние от заданной точки до произвольной точки на поверхности.

В рамках МОПС имеются соображения в пользу того, что в качестве потенциала среднего поля следует выбирать статистически самосогласованный потенциал. В § I исследована радиальная зависимость статистически самосогласованного потенциала и показано, что в хорошем приближении она является универсальной функцией,

не зависящей ни от числа нуклонов в ядре, ни от деформации /1/. В практических расчетах радиальная зависимость выбиралась в виде простой фермиевской функции

$$V(\vec{r}) = V_0 / [1 + \exp(\ell(\vec{r})/\alpha)], \quad (1)$$

где V_0 – глубина потенциальной ямы в центре ядра, α – параметр, определяющий размытость края ядра и $\ell(\vec{r})$ – расстояние до поверхности ядра, которое условно считается отрицательным внутри ядра и положительным снаружи. Спин-орбитальное взаимодействие и кулоновский потенциал учитываются обычным способом. Определенный таким способом потенциал переходит в известный потенциал Вудса-Саксона в сферическом ядре. При рассмотрении деления ядра на два осколка в том случае, когда на большом удалении они имеют сферическую форму, потенциал, который хорошо определен в любой момент процесса деления, переходит в потенциал Вудса-Саксона в каждом из осколков.

Как хорошо известно, довольно широкий класс поверхностей, близких к сфере, может быть представлен в виде разложения в ряд по сферическим гармоникам. Однако при исследовании форм ядра в процессе деления такое представление или становится неудобным, или даже вообще не существует. Форма делящегося ядра хорошо аппроксимируется овалоидами Кассини (В.С.Ставинский, Н.С.Работнов и А.А.Серегин, 1968 г.). Во втором параграфе II главы предложена достаточно общая параметризация /5/, в которой форма ядра задается в системе координат с овалами Кассини в качестве одного из семейств координатных линий. В этой параметризации физически важные формы ядер как в основном состоянии, так и в процессе деления с достаточной точностью представляются с помощью небольшого числа параметров. При обращении в нуль расстояния между фокусами овалов Кассини разложение переходит в обычное разложение по сферическим гармоникам. Преимуществом предложенной параметризации по сравне-

нию с некоторыми другими является то, что все формы ядра в процессе деления получают единообразное описание. Метод нахождения энергетических уровней и волновых функций одночастичных состояний в потенциале произвольной формы и произвольной радиальной зависимости /3,4/ описан в § 3. Конечно, имеются в виду достаточно гладкие потенциалы, имеющие физический смысл в ядерной физике. Метод основан на разложении волновой функции в ряд по собственным функциям деформированного гармонического осциллятора. Для эффективности метода важно тщательно выбирать свой базис при каждой форме ядра и проводить вычисление матричных элементов гамильтониана по квадратным формулам наивысшей алгебраической степени точности. Отличительной особенностью метода, важной при дальнейшем использовании одночастичного спектра в расчетах по МОПС, является то, что в результате расчетов получаются уровни с положительной энергией, которые близки квазистационарным уровням в том случае, когда последние имеют малую ширину. В общем же случае можно сказать, что метод дает удобное доопределение уровней с положительной энергией.

Важно отметить, что ни при определении потенциала, ни при вычислении одночастичного спектра не предполагается малости отклонения формы ядра от сферы.

Метод сформулирован в виде весьма быстрой процедуры, реализованной на ЭВМ. Этим методом было проведено исследование большого числа физических задач, в которых, в частности, находился одночастичный спектр при различной форме поверхности и различной радиальной зависимости потенциала, и была продемонстрирована высокая надежность и эффективность метода.

III. Форма ядер в основном состоянии и в одночастичных возбужденных состояниях

Как уже отмечалось выше, при исследовании равновесных деформаций ядер вблизи линии бета-стабильности на первых порах был

использован потенциал Нильссона-Ньютона. В третьей главе изложены результаты исследования формы основных и нижайших возбужденных состояний атомных ядер в редкоземельной и трансурановых областях /6/ и более легких ядер с $50 < Z < 82$ и $50 < N < 82$ /7/. Особое внимание уделялось изучению возможного отклонения от аксиальной симметрии и выбору параметров потенциала. Было показано, что, как и ожидалось, сильно деформированные ядра аксиально-симметричны в основном и возбужденных состояниях. Ядра в переходной области также являются аксиально-симметричными, но, в отличие от сильно деформированных ядер, разность энергий между равновесными состояниями вытянутой и сплюснутой формы мала. Состояние с большей энергией неустойчиво относительно неаксиальной деформации. Разность энергий может иметь разный знак в основном и возбужденном состоянии, что должно проявляться на эксперименте как наличие изомеров формы среди низколежащих возбужденных состояний. На возможность отличия формы нечетных ядер от формы соседних четно-четных ядер и формы возбужденных состояний от формы основного состояния было указано в работе В.Г.Соловьева (1966 г.).

Исследование роли гексадекапольной деформации в ядрах редкоземельной и трансурановой областей было проведено в работе /8/ *). Оказалось, что найденные значения параметров гексадекапольной деформации хорошо согласуются с расчетами, выполненными другими авторами с потенциалом Нильссона, и с экспериментальными значениями, полученными в результате анализа сечения неупругого рассеяния альфа-частиц с возбуждением нижайших уровней ротационной полосы.

Исследование четно-четных ядер, проведенное в работе /8/, было дополнено изучением нечетных ядер при $153 < A < 177$ /9/ и четно-четных и нечетных ядер при $174 < A < 185$ /10/. Основной

*) В работе /8/ использовался одночастичный потенциал и спектр уровней, определенный в работах Ф.А.Гареева и др. (1966-1968 гг.). Автор диссертации был ответствен за расчет равновесных деформаций по МОПС.

вывод этих работ заключается в том, что учет отличия деформации возбужденного состояния от деформации основного состояния улучшает согласие между экспериментальными и теоретическими результатами по положению одночастичных уровней.

Значительно большее различие деформации основного (почти сферического, слабо сплюснутого) и возбужденного (сильно деформированного, вытянутого) состояний было обнаружено теоретически и экспериментально в ^{117}Sb /II/ и в $^{121-125}\text{I}$ /I2, I3/ ж), что дает основание говорить о четко выраженном эффекте "сосуществования форм" в этих ядрах. Следовательно, даже ядра, близкие к магическим, могут быть существенно деформированными в возбужденных состояниях.

IV. Форма вращающихся ядер

Обобщение МОПС на случай вращающихся ядер проведено в четвертой главе. При этом естественно различать медленное /I4/ и быстрое /I5, I6/ вращение. В первом случае применима теория возмущения, и остаточное взаимодействие типа спаривания можно учесть в обычном приближении, во втором – спаривание или не играет заметной роли, так что на первых порах его можно не учитывать, или исчезает совсем.

Первую, грубую ориентацию в величине эффектов, связанных с вращением, может дать рассмотрение в модели жидкой капли, проведенное в § I. Для ядра ^{127}La оценки показывают, что энергия вращения при критическом значении углового момента, при котором ядро теряет стабильность относительно деления, равна 60 МэВ, что составляет не более 6% энергии связи этого ядра. Соответствующая угловая частота вращения в энергетических единицах равна 1,4 МэВ. Таким образом, даже самое быстрое вращение, едва не разрывающее

*) В написанных совместно с экспериментаторами работах /II-I3/ автор диссертации ответствен за расчет формы основного и возбужденных состояний.

ядро на части, лишь слабо меняет условия, в которых находится ядерное вещество. Большой эффект этого слабого возмущения, выражающийся в существенном изменении формы, объясняется тем, что вращение "вмешивается" в тонкий баланс сравнительно больших кулоновских сил и сил поверхностного натяжения. Так как при вращении локальные свойства ядра меняются мало, то можно предположить, что при описании вращающегося ядра понятие среднего поля так же хорошо определено, как и в случае невращающегося ядра. Оценки величины кориолисова взаимодействия показывают, что оно, с одной стороны, сравнимо с расстоянием между оболочками, а с другой – меньше энергии Ферми. На основании приведенных оценок следует ожидать, что оболочечные эффекты, существенно связанные с плотностью уровней у поверхности Ферми, при быстром вращении претерпевают значительные изменения, так что возмущение, вносимое вращением, не мало. Однако численные оценки влияния вращения можно проводить в тех же приближениях, основанных на понятии среднего поля, которые хорошо зарекомендовали себя при расчете энергии деформации невращающихся ядер.

В § 2 главы IV показано, что для энергии ядра во вращающейся системе координат можно провести разбиение на две компоненты, одна из которых в хорошем приближении вычисляется в модели жидкой капли, а другая, оболочечная поправка, вычисляется на основе спектра собственных значений одночастичного оператора Гауса

$$\hat{r} = \hat{t} - \hat{j} \cdot \vec{\omega} + \sqrt{\quad}, \quad (2)$$

где \hat{t} – кинетическая энергия нуклона, \hat{j} – его угловой момент, а $\sqrt{\quad}$ – среднее поле ядерных сил во вращающемся ядре, зависимость которого от угловой частоты $\vec{\omega}$ в практических вычислениях не учитывалась.

В случае медленного вращения задача сводится к вычислению оболочечной компоненты момента инерции. Подробное численное изучение

усредненного момента инерции /14/ показало, что в отсутствие спаривания его значение близко к твердотельному, а оболочечные флуктуации велики, особенно в ядрах почти сферической формы. С деформацией ядра амплитуда оболочечных осцилляций несколько уменьшается, однако после разделения на два осколка снова резко возрастает при приближении формы осколков к сферической. Амплитуда осцилляций уменьшается при увеличении температуры ядра и при температуре порядка 3 МэВ становится пренебрежимо малой.

Близость усредненного момента инерции к твердотельному дает некоторое основание для описания низколежащих вращательных возбуждений в модели, в которых энергия деформации ядра спина I представляется в виде суммы

$$E_I(\alpha) = E_0(\alpha) + \frac{1}{2} I(I+1) / \mathcal{J}(\alpha), \quad (3)$$

где $E_0(\alpha)$ — энергия основного состояния, вычисленная по МОПС, $\mathcal{J}(\alpha)$ — момент инерции в модели принудительного вращения, а параметры, определяющие форму ядра, обозначены через α . При этом не составляет труда учесть остаточное взаимодействие типа спаривания. При минимизации выражения (3) по α учитывается зависимость момента инерции от формы ядра.

В хорошо деформированных ядрах при малых I влияние вращения на форму ядра мало и его трудно заметить на фоне других эффектов. Поэтому естественно начинать изучение влияния вращения на форму ядра в переходных ядрах, которые, во-первых, более "мягкие" относительно деформации, а во-вторых, обладают по крайней мере двумя семействами равновесных форм, близких между собой внутри каждого семейства. Внутри семейства состояния различаются спином. Переходы из одного семейства в другое связаны с заметным изменением формы, что легче как обнаружить экспериментально, так и интерпретировать теоретически.

Богатый экспериментальный материал о переходах с изменением формы был накоплен в последнее время при изучении легких изотопов ртути, и теоретические расчеты /17/, относящиеся как к ртути, так и к соседним элементам, приводятся в § 3.

Интерес к этой области ядер вызван экспериментальным обнаружением резкого увеличения среднеквадратичного радиуса в изотопах ртути при уменьшении числа нейтронов от $I07$ до $I05$ и высокого положения уровня 2^+ в соседнем изотопе с числом нейтронов $I04$, как в более тяжелых, почти сферических изотопах. В теоретических работах, предшествовавших работе /17/, рассматривались только четно-четные ядра и были сделаны выводы о переходе от сферической к деформированной форме в четно-четных изотопах, что не подтвердилось в экспериментах. В работе /17/ в рамках сформулированной выше модели (см. выражение (3)) были рассмотрены как четно-четные, так и нечетные ядра, а также нижайшие вращательные состояния в четно-четных ядрах. Было показано, в полном соответствии с экспериментом, что четно-четные изотопы являются почти сферическими в основном состоянии, тогда как в нечетных изотопах в основном состоянии при уменьшении числа нейтронов происходит переход к сильно вытянутой форме. Однако и в четно-четных ядрах должен наблюдаться переход к сильно вытянутой форме, если ядро находится во вращательном состоянии. Рассчитанные энергии вращательных полос оказались в хорошем согласии с имевшимися в то время экспериментальными данными. Полученные после опубликования работы /17/ дополнительные экспериментальные данные также хорошо согласуются с нашими предсказаниями. Причиной большой разницы между четно-четными и нечетными изотопами является большая разница в плотности нейтронных одночастичных уровней и, следовательно, роли взаимодействия типа спаривания при сплюснутой и вытянутой формах /17/.

В рамках той же простой модели были предприняты поиски анало-

гичного эффекта "сосуществования форм" в ядрах элементов, соседних с ртутью. Были исследованы изотопы платины, свинца, полония /18/, а также астата, радона, франция и радия /19/. Были предсказаны числа нейтронов, при которых должны измениться форма ядра, а также характер возможных переходов среди вращательных состояний. Подробный анализ свойств крайне удаленных от линии бета-стабильности ядер проведен в связи с надеждами экспериментаторов исследовать эти ядра на установке "ИЗОЛЬДА".

Расчеты изменения формы ядра под влиянием быстрого вращения вплоть до предела стабильности относительно деления были проведены в наших работах /15,16/ (§ 4) и в работах большой группы авторов из Лунда и Варшавы, опубликованных почти одновременно с нашими. Во всех этих работах при изучении оболочечных поправок использовался одночастичный потенциал Нильссона-Ньютона и рассматривались только эллипсоидальные формы. Расчеты показывают, что как классическая компонента в полной энергии, так и оболочечная поправка существенны для определения формы ядра. Локальное поведение энергетической поверхности определяется оболочечной поправкой, которая особенно существенна в области плавного изменения классической энергетической поверхности. Кроме состояния с нижней энергией при заданном угловом моменте (так называемые "и-раст-состояния") на энергетической поверхности обычно имеется один или два локальных минимума. Вообще говоря, равновесные состояния не являются аксиально-симметричными. Их форма плавно меняется с изменением углового момента ядра. При некотором критическом значении углового момента ядро теряет устойчивость относительно деления. Расчеты показывают, что это критическое значение при учете оболочечных эффектов повышается на 20-30 единиц по сравнению со значениями, полученными в модели вращающейся жидкой капли. Таким образом, оболочечная структура стабилизирует ядро относительно деле-

ния. Особенно глубокий минимум при сильно вытянутой форме возникает в ядре ^{154}Dy ("деформированная оболочка" в терминологии Струтинского), который при угловом моменте, близком к критическому, становится абсолютным.

Разнообразие форм, которые может принимать вращающееся ядро, приводит к тому, что в процессе снятия возбуждения каскадом гамма-квантов иногда должно происходить заметное изменение формы ядра, которое должно проявляться на эксперименте как запаздывание в заселении полосы основного состояния. Следует отметить, что все обсуждаемые минимумы имеют окружающий их барьер не ниже (1-2) МэВ. Мелкие вариации в полной энергии не принимались во внимание.

Проведенное рассмотрение справедливо только для ядра на и-раст-полосе, когда ядро является "холодным". Внутреннее возбуждение (повышение температуры) сглаживает нерегулярности, связанные с оболочечной структурой, и квазиклассическое описание становится все более точным. Изложенные выше основные выводы наших работ /15,16/ были подтверждены в работе Неергорда и др. (1977), в которой проведены аналогичные расчеты с потенциалом Вудса-Саксона. Результаты оригинальных работ, на которых основана IV глава, изложены систематически в обзоре /20/.

У. Деление ядра

В модели жидкой капли устойчивость ядра относительно деления определяется конкуренцией двух больших классических сил, а именно - кулоновского отталкивания между протонами и ядерного притяжения, моделируемого силой поверхностного натяжения. С ростом заряда ядра относительная роль кулоновских сил растет, и при некотором критическом значении отношения квадрата заряда к числу нуклонов ядро теряет устойчивость относительно деления. При несколько

меньших значениях этого параметра тяжелое ядро в основном состоянии окружено широким и плоским барьером. Форма ядра в седловой точке в модели жидкой капли обладает высокой степенью симметрии, а именно: ядро аксиально-симметрично и симметрично относительно отражения в плоскости, перпендикулярной оси симметрии (зеркальная симметрия). Модель не может объяснить приблизительного постоянства барьеров деления в трансурановых ядрах, и тот факт, что ядро с большой вероятностью делится на два осколка неравной массы. С учетом структурных эффектов описание процесса деления существенно меняется. Основное состояние ядра становится деформированным, как это описано в предыдущих главах, а широкий и плавный жидкокапельный барьер модулируется осциллирующей оболочечной поправкой таким образом, что в трансурановых ядрах вблизи вершины жидкокапельного барьера появляется минимум, соответствующий квазистационарному состоянию (спонтанно-делящийся изомер). Таким образом, в процессе деления ядро должно преодолеть два барьера. Высота наибольшего из двух барьеров в трансурановых ядрах остается приблизительно постоянной величиной, в полном соответствии с экспериментальными данными. Обсуждению формы ядра на обоих барьерах и в локальном минимуме между ними посвящена пятая глава.

В предыдущих главах расчеты формы атомных ядер вблизи линии бета-стабильности в основном и некоторых возбужденных состояниях основывались на феноменологическом определении потенциала среднего поля, причем в ряде случаев предположения о виде потенциала можно было тщательно проверить, используя богатую спектроскопическую информацию. Для расчета карт поверхностей потенциальной энергии деформации ядра при описании процесса деления нужно делать предположения о виде потенциала среднего поля при форме ядра, сильно отличающейся от сферы. В этом случае практически нет никаких спектроскопических данных для проверки сделанных предпо-

ложений. Только понемногу в крайне трудных экспериментах накапливается информация об уровнях во второй потенциальной яме, соответствующей спонтанно-делящемуся изомеру, и об энергии над барьером деления и квантовых числах так называемых "каналов деления". Поэтому крайне важно при рассмотрении процесса деления основываться на приемлемых с физической точки зрения гипотезах о виде потенциала среднего поля при больших деформациях. Тем не менее, и в этом случае техническая сложность расчетов энергии деформации при неаксиальных формах заставляет прибегать к грубым упрощениям и использовать в качестве среднего поля потенциал Нильссона-Ньютона. В таких случаях имеет смысл обсуждать только результаты при умеренных деформациях, при которых отношение размеров ядра вдоль и поперек оси деления не превосходит 2:1 (форма ядра в спонтанно-делящемся изомерном состоянии). При этом на первый план выдвигаются качественные соображения о типах симметрии формы ядра на том или ином этапе процесса деления, хотя в большинстве случаев предсказания о величине барьеров находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными.

Симметрия формы ядра на первом барьере была исследована в работе /21/ (§ I) и было показано, что трансурановые ядра на первом из двух барьеров деления теряют аксиальную симметрию, а во втором минимуме устойчивы относительно неаксиальной деформации. Особенно важно учитывать отклонение от аксиальной симметрии в самых тяжелых ядрах, замыкающих периодическую таблицу элементов, в которых понижение первого барьера достигает 2 МэВ. Было также показано, что важны только малые отклонения от аксиальной формы, так что не исключено, что вычисление одночастичных уровней в более реалистическом потенциале можно проводить в рамках теории возмущения. Результаты работы /21/ были впоследствии подтверждены в работах других авторов. В самое последнее время начинает появ-

ляться экспериментальная информация, свидетельствующая о нарушении аксиальной симметрии на первом барьере.

Большой интерес представляет форма ядра на втором барьере и ее эволюция в процессе спуска со второго барьера на пути к точке разрыва. После разрыва на два осколка появляется возможность независимого описания каждого из осколков в отдельности, и расчеты в так называемой "модели касающихся осколков" проводились давно, см., например, работу Игнатюка (1968), однако описание различных этапов процесса деления в разных подходах, по меньшей мере, оставляет чувство неудовлетворенности. В § 2 описан процесс деления в рамках единого подхода /5/, причем рассматривалась эволюция формы ядра от обычной формы в основном состоянии через все физически важные промежуточные формы, соответствующие первому барьеру, второму минимуму, второму барьеру и точке разрыва. Использовался реалистический потенциал и параметризация формы поверхности, описанные в главе II. Рассматривались только аксиально-симметричные формы. Основным выводом работы является утверждение о потере зеркальной симметрии формы поверхности трансурановых ядер на втором барьере. Степень указанной асимметрии, измеряемая как отношение масс формирующихся осколков, резко нарастает от единичного значения во второй яме (зеркальная симметрия) до максимального на втором барьере и затем слабо уменьшается в процессе спуска с седловой точки. В точке разрыва степень асимметрии приблизительно соответствует экспериментально наблюдаемому наиболее вероятному отношению масс осколков деления. Таким образом, асимметрия в выходе осколков деления определяется не в точке разрыва, а уже в седловой точке. Хотя подобный вывод впервые сделан в работе Меллера и Нильссона (1970), однако в их работе вывод основан на расчетах с потенциалом Нильссона, применимость которого для описания среднего поля при рассматриваемых больших деформациях, как уже отмечалось выше,

вызывает большие сомнения. В последующем выводы работы /5/ были подтверждены в работах других авторов с реалистическими потенциалами. В работе /5/ показано также, что на первом барьере ядро зеркально-симметрично. Согласие между теоретическими и экспериментальными значениями высоты второго барьера улучшается при учете зеркальной асимметрии.

В последнем, третьем параграфе У главы приведены результаты расчетов /22/ барьеров деления гипотетических сверхтяжелых элементов, проведенные с потенциалом Нильссона. Это одна из первых работ на эту тему. В ней предсказана особая стабильность относительно деления ядер в окрестности дважды магического ядра $^{298}\text{114}$. В многочисленных последующих работах был использован широкий класс потенциалов и результаты качественно не отличаются от выводов работы /22/. К настоящему времени проблема сверхтяжелых элементов вызывает большой интерес во многих лабораториях, а вопросы существования и методов получения сверхтяжелых элементов широко обсуждаются как с теоретической, так и с экспериментальной точки зрения (см., например, труды XXVII Нобелевского симпозиума в Роннеби, Швеция, в 1974 г. и конференции в Лаббоке, Техас, 1978 г. специально посвященных этой теме).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты диссертации можно подытожить в виде следующих положений, которые выносятся на защиту:

I. Разработан способ феноменологического задания потенциала среднего поля в ядре произвольной формы в виде функции расстояния до поверхности ядра, позволяющий определить потенциал в соответствии с экспериментальной и теоретической информацией о свойствах ядерных сил и плотности распределения нуклонов в ядре.

2. Радиальная зависимость статистически самосогласованного потенциала в различных ядрах и при различных формах ядра в хорошем приближении описывается универсальной функцией расстояния до поверхности ядра.

3. Описание формы ядра в системе координат с овалами Кассини в качестве координатных линий является удобной и достаточно общей параметризацией, позволяющей при небольшом числе параметров описывать все формы ядра, важные с физической точки зрения (в частности, в процессе деления).

4. Вычисление волновых функций и энергий одночастичных состояний в потенциале произвольной формы посредством разложения волновых функций по собственным функциям деформированного гармонического осциллятора является надежным и эффективным методом, позволяющим, в частности, исследовать формы ядер от сферической до гантелеобразной и далее до разделения ядра на два осколка неравной массы.

5. Форма возбужденных состояний может отличаться от формы основного состояния. Иногда различие форм довольно велико. Различие формы ядер в разных состояниях допускает качественный и количественный анализ в рамках развитой схемы. Эффект "сосуществования форм" среди низколежащих возбужденных состояний наблюдается экспериментально.

6. Проведено обобщение МОПС на случай вращающихся ядер, которое, в частности, позволяет исследовать изменение формы ядер под влиянием вращения.

7. В легких нечетных изотопах ртути с уменьшением числа нейтронов наблюдается переход к вытянутой форме. В соседних четных изотопах в основных состояниях соответствующего перехода нет, но он происходит в возбужденных ротационных состояниях

при увеличении углового момента. Эти теоретические выводы полностью соответствуют экспериментальным данным.

8. Оболочечные эффекты приводят к увеличению стабильности "холодных" вращающихся ядер относительно деления. Исследование эволюции формы ядер под влиянием быстрого вращения позволяет сделать вывод о возможном увеличении в некоторых ядрах времени протекания каскада γ -квантов, испуская которые, ядро переходит из "холодного" состояния с высоким спином в основное состояние.

9. На первом барьере деления трансурановые ядра не являются аксиально-симметричными. Понижение барьера вследствие неаксиальной деформации увеличивается с увеличением атомного номера. Во втором минимуме ядро является аксиально-симметричным.

10. На первом барьере деления и во втором минимуме трансурановые ядра зеркально-симметричны. Степень асимметрии слабо меняется между второй седловой точкой и точкой разрыва и приблизительно соответствует экспериментально наиболее вероятному отношению масс осколков деления. Оболочечная структура ядра ответственна за асимметрию в массовом распределении осколков деления.

Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в работах:

1. Э.Балаж, В.В.Пашкевич, Радиальная зависимость потенциала оболочечной модели. ЯФ 27,649(1978); ОИЯИ, Е4-10588, Дубна, 1977.
2. В.В.Пашкевич, Оболочки в ядрах с $Z > 80$, Сообщение ОИЯИ Р4-4383, Дубна (1969).
3. В.В.Пашкевич, В.М.Струтинский. Одночастичные уровни конечного деформированного потенциала, ЯФ 9, 56 (1969); препринт ОИЯИ Р2-3857, Дубна, 1968.

4. J.Damgaard, H.C.Pauli, V.V.Pashkevich, V.M.Strutinsky, A Method for Solving the Independent-Particle Schrödinger Equation with a Deformed Average Field (Метод решения одночастичного уравнения Шредингера с деформированным средним полем), Nucl.Phys., A135, 432 (1969).
5. V.V.Pashkevich, On the Asymmetric Deformation of Fissioning Nuclei (Об асимметричной деформации делящихся ядер), Nucl.Phys. A169, 275 (1971); препринт ОИЯИ, Р4-5581, Дубна, 1971.
6. Д.А.Арсеньев, Л.А.Малов, В.В.Пашкевич, В.Г.Соловьев, О равновесных деформациях основных и возбужденных состояний сильнодеформированных ядер. Изв. АН СССР, сер.физ., 32, 866 (1968); препринт ОИЯИ Е4-3702, Дубна, 1968.
7. Д.А.Арсеньев, Л.А.Малов, В.В.Пашкевич, А.Собичевский, В.Г.Соловьев. Равновесные деформации ядер в области $50 < Z < 82$, $50 < N < 82$, ЯФ 8, 883 (1968); препринт ОИЯИ, Е4-3816, Дубна, 1968.
8. Ф.А.Гареев, С.П.Иванова, В.В.Пашкевич, Изучение равновесных деформаций β_{20} и β_{40} ядер редкоземельной и трансурановой областей и зависимости одночастичных характеристик от параметров деформации, ЯФ II, 1200 (1970); ОИЯИ, Е4-4704, Дубна, 1969.
9. D.A.Arseniev, S.I.Fedotov, V.V.Pashkevich, V.G.Soloviev, On the Influence of Changes in Equilibrium Deformations of Excited States of Odd-Mass Deformed Nuclei on their Structure and Energy (О влиянии изменения равновесных деформаций возбужденных состояний нечетных деформированных ядер на их энергию и структуру) Phys.Lett. 40B, 305 (1972); препринт ОИЯИ Р4-6345, Дубна, 1972.
10. Д.А.Арсеньев, В.В.Пашкевич, В.Г.Соловьев, У.М.Файнер. Равновесные деформации и структура ряда деформированных ядер. Изв. АН СССР, сер.физ., 37, 906 (1973); препринт ОИЯИ Р4-6583, Дубна, 1972.

- II. W.D.Fromm, H.F.Brinckmann, F.Dönau, C.Heiser, F.R.May, V.V.Pashkevich, H.Rotter, Level Structure in ^{117}Sb Investigated in the Decay of the Isomeric Three-Quasiparticle State (Структура уровней в ^{117}Sb , исследованная при распаде изомерного трехквартичного состояния), Nucl.Phys. A243, 9 (1975).
12. U.Hagemann, H.J.Keller, F.R.May, V.V.Pashkevich, Deformed States in $^{123,125}\text{I}$ Nuclei (Деформированные состояния в ядрах $^{121,123,125}\text{I}$), Аннотации докладов XIV Совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра, ОИЯИ, Д6-8846, Дубна, 1975, стр.94.
13. U.Hagemann, H.J.Keller, F.R.May, V.V.Pashkevich, Deformed States in $^{121,123,125}\text{I}$ Nuclei (Деформированные состояния в ядрах $^{121,123,125}\text{I}$), Труды Международной конф. по избранным вопросам структуры ядра. Краткие сообщения, том I, стр.74, ОИЯИ, Д-9682, Дубна, 1976.
14. В.В.Пашкевич, С.Фраундорф, Влияние оболочечной структуры на момент инерции. Поведение усредненного момента инерции. ЯФ 20, 1122 (1974); препринт ОИЯИ Е4-7804, Дубна, 1974.
15. K.Neergard, V.V.Pashkevich, Shell Corrections to the Deformation Energies of Very High Spin Nuclei ($I < 100$) (Оболочечные поправки к энергии деформации ядер с очень высоким спином), Phys.Lett. 59B, 218 (1975); препринт ОИЯИ Р4-8947, Дубна, 1975.
16. K.Neergard, V.V.Pashkevich, S.Frauentorf, Shell Energies of Rapidly Rotating Nuclei (Оболочечная энергия быстро вращающихся ядер), Nucl.Phys. A262, 61 (1976); препринты ОИЯИ, Р4-9194, Р4-9195, Р4-9196, Дубна, 1975.
17. S.Frauentorf, V.V.Pashkevich, On Oblate-Prolate Transition

- in the Ground State Rotational Band of Light Mercury Isotopes (Переход от сжатой к вытянутой форме в основной ротационной полосе в легких изотопах ртути), Phys.Lett. 55B, 365 (1975); препринт ОИЯИ Е2-8087, Дубна, 1974.
18. F.R.May, V.V.Pashkevich, S.F.Frauentorf, Prediction of Shape Transitions in Very Neutron-Deficient Even-Mass Isotopes in the Lead Region (Предсказание переходов с изменением формы в очень нейтронодефицитных четно-четных изотопах в районе свинца), Phys.Lett. 68B, 113 (1977); препринт ОИЯИ Р4-10173, Дубна, 1976.
19. F.R.May, V.V.Pashkevich, S.Frauentorf, Theoretical Deformation Energy for Very Neutron-Deficient Nuclei with $84 \leq Z \leq 89$ (Теоретические энергии деформации очень нейтронодефицитных ядер с $84 \leq Z \leq 89$), Communication JINR E4-10955, Dubna (1977).
20. И.Н.Михайлов, К.Неергор, В.В.Пашкевич, С.Фрауендорф, Влияние вращения на коллективные свойства атомных ядер, ЭЧАЯ 8, I338 (1977).
21. V.V.Pashkevich, The Energy of Nonaxial Deformation of Heavy Nuclei (Энергия неаксиальной деформации тяжелых ядер), NuclPhys. A133, 400 (1969); препринт ОИЯИ Е4-4384, Дубна, 1969.
22. Ю.А.Музычка, В.В.Пашкевич, В.М.Струтинский, К вопросу о стабильности сверхтяжелых ядер, ЯФ 8, 716 (1969); препринт ОИЯИ Р7-3733, Дубна, 1968.

km

Рукопись поступила в издательский отдел
30 ноября 1979 года.