

Л В Э

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

И-325

На правах рукописи

СЕРЕГИН АРТУР АЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 539.142

**Исследование свойств
возбужденных состояний атомных ядер,
процесса деления и взаимодействия нейтронов
с веществом в феноменологических
квантовых моделях**

Специальность 01.04.16 —
физика ядра и элементарных частиц

*Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук*

Дубна — 1990

Работа выполнена в ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Физико-энергетическом институте.

Официальные
оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
И. Н. МИХАЙЛОВ
доктор физико-математических наук
И. М. ПАВЛИЧЕНКОВ
доктор физико-математических наук
А. И. СТЕШЕНКО

Ведущая организация: Институт ядерных исследований АН УССР.

Защита диссертации состоится «...» 1990 г.

в час. на заседании специализированного совета Д 047.01.01 при
Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных
исследований (г. Дубна, Московской обл.).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан «...» 1990 г.

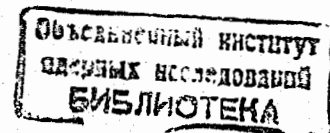
Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат физико-математических наук

В. И. ЖУРАВЛЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Из-за конечного числа нуклонов в ядре, сложности нуклон-нуклонного взаимодействия и близости релятивистских эффектов теоретическое изучение атомного ядра развивается по линии создания моделей ядра. В настоящее время в ядерной физике широко используются три класса моделей; микроскопические, полумикроскопические и феноменологические. В микроскопических моделях ядро рассматривается как система взаимодействующих друг с другом нуклонов, и для конкретного выбора нуклон-нуклонного взаимодействия приближенно решается многочастичное уравнение Шредингера. В полумикроскопических моделях, основанных на оболочечной модели ядра, исследуются различного рода корреляции между нуклонами, вызванные остаточными взаимодействиями.

В феноменологических моделях система сильновзаимодействующих нуклонов заменяется некоторым модельным объектом, физические свойства которого совпадают с определенными свойствами ядра. Создание феноменологической модели, по существу, означает окончание периода накопления экспериментальных фактов и переход к систематическому изучению, к осознанной постановке новых экспериментальных исследований и к предсказанию новых закономерностей. С построением феноменологических моделей, базирующихся, как правило, на классических моделях, в ядерную физику вносятся новые понятия и новые переменные, в рамках которых удобно и наглядно рассматривать определенную совокупность свойств ядра. Во всех случаях введенные феноменологические модели правильно качественно описывают наблюдаемые свойства, а во многих случаях удается получить неплохое количественное спи-



сание при небольшом количестве параметров. К недостаткам феноменологических моделей следует отнести их ограниченность, малое теоретическое обоснование и плохую связь с микроскопическими и полумикроскопическими моделями. Поэтому устранения отмеченных недостатков в феноменологических моделях, а также их расширение с целью улучшения количественного описания экспериментальных данных, осознанная постановка новых экспериментов и предсказание новых закономерностей являются актуальными задачами в современной ядерной физике. В данной работе представлены результаты исследований в трех феноменологических моделях: в коллективной модели, описывающей возбужденные состояния в четно-четных ядрах, в одномерной модели деления атомного ядра и в оптической модели взаимодействия нейтронов с веществом. Несмотря на внешнее различие указанных моделей, у них много общего, так как, по существу, в них решается задача о движении "частицы" в сложном эффективном поле разной размерности.

Цель работы. В соответствии со сказанным выше, цель работы состояла в создании пятимерной коллективной модели ядра для описания возбужденных состояний в четно-четных атомных ядрах и в улучшении на ее основе количественного описания экспериментальных данных, в создании одномерной модели деления атомного ядра и в развитии оптической модели взаимодействия нейтронов с веществом для описания новых явлений.

Научная новизна. В работе получен ряд новых результатов, основными из которых являются следующие:

1. Сформулирована, обоснована и применена для анализа и классификации основных характеристик возбужденных состояний

атомных ядер пятимерная трехпараметрическая феноменологическая модель ядра. В рамках этой модели для четно-четных атомных ядер в широкой области массовых чисел можно рассчитывать энергетический спектр возбужденных состояний положительной четности в интервале до 3 МэВ с любым моментом количества движения, кроме единицы, приведенные вероятности $E2$ - и $E0$ - переходов между этими состояниями и средние значения электрических квадрупольных моментов этих состояний.

2. В рамках созданной модели удалось показать как эволюционируют свойства возбужденных состояний сферического ядра с возникновением и последующим ростом аксиально-симметричной деформации.

3. Данную коллективную модель удалось обобщить на случай разных массовых коэффициентов для β - и γ - колебаний и показать, что изменения в положении энергетических уровней β - и γ - полос в зависимости от отношения массовых параметров в 6-8 раз больше, чем изменения в положении уровней основной полосы.

4. Показано, что в рамках коллективной модели можно описать зависимость момента инерции от квадрата угловой скорости (*back - bending*), но для этого необходимо знать более детально потенциальную энергию коллективных движений.

5. Для описания формы делящегося ядра на всех стадиях процесса деления, начиная от исходной сферы до двух сферических осколков половинного объема, разделенных бесконечно большим расстоянием, предложен однопараметрический класс поверхностей. С данной параметризацией формы делящегося ядра выполнены расчеты барьеров деления и формы ядра в седловой точке, которые хорошо согласуются с результатами многопараметрических расче-

тов и точного решения основного уравнения капельной модели. Проведены гидродинамические и в приближении Уилера расчеты эффективной массы делящегося ядра, что позволило оценить точность приближения Уилера и рекомендовать его для широкого использования.

6. В квазиклассическом приближении с использованием метода Цваана получены аналитические формулы как для подбарьерной, так и надбарьерной проницаемости одномерных двугорбых и трехгорбых барьеров деления, удобные для анализа экспериментальных данных. Сравнение квазиклассических расчетов с точными расчетами показало их хорошую точность.

7. В квазиклассическом приближении методом Цваана получены и проанализированы уравнения для определения энергии и ширины одномерных подбарьерных и надбарьерных квазистационарных состояний, распадающихся через двугорбый барьер. Показано, что ширины квазистационарных состояний существенно зависят от энергии состояний в первой и второй ямах.

8. Показано, что при решении одномерного уравнения Шредингера для частицы с "массой", зависящей от координаты, можно эффективно использовать квазиклассическое приближение. Решена задача о прохождении частицы с переменной "массой" через двугорбый барьер.

9. Рассмотрена простейшая двумерная модель деления и показано, что, по сравнению с одномерной моделью, в ней можно объяснить замедление выхода надбарьерной проницаемости на свою асимптотику и появление особенностей в зависимости средней кинетической энергии осколков деления от энергии возбуждения.

10. Для обнаружения нового явления в ядерной физике был предложен эксперимент с ультрахолодными нейтронами, который

позволил обнаружить связанные состояния нейтрона в веществе.

11. Указано на возможность создания новых приборов для исследования ультрахолодных нейтронов - нейтронного интерферометра Фабри-Перо и многослойного монохроматора.

12. Введено понятие поверхностного смещения нейтрона при отражении его от поверхности вещества при углах падения больших критического и получена аналитическая формула для его расчета.

Практическая ценность работы. Выполненные исследования по изучению свойств возбужденных состояний, процессу деления и нейтронной физике являлись составной частью научных исследований, предусмотренных научной программой Физико-энергетического института, что, в первую очередь, определило практическую ценность диссертации. Во-вторых, работы с использованием квазиклассического приближения способствовали обогащению и расширению возможностей этого метода, что представляет интерес для теоретической физики. И, наконец, открытие связанных нейтронов в веществе вошло в учебник по ядерной физике и позволило на основе этих состояний создать нейтронный интерферометр и монохроматор для нейтронных исследований.

Апробация работы. Все полученные результаты обсуждались на семинаре лаборатории теоретической ядерной физики ФЭИ. Отдельные результаты докладывались и обсуждались на семинарах НИИЯФ ИГУ, ЛТФ ОИЯИ и ИЯИ АН УССР. Представлялись и обсуждались доклады на Совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Рига 1968 г.; Ереван 1969г; Ленинград 1970 г.; Киев 1972 г.; Самарканд 1981 г.), на рабочих Совещаниях по физике деления (1977 и 1979 г.г.), на Всесоюзных Совещаниях по нейтронной физике (Киев 1977 и 1980 г.г.), на Всесоюзном симпозиуме "Физика деления ядер" (Обнинск 1987 г.), на Международной кон -

ференции по избранным вопросам структуры ядра (Дубна 1976 г.) и на Международной школе-семинаре по физике тяжелых ионов (Дубна 1989 г.).

Публикации. По результатам выполненных в диссертации исследований опубликовано 30 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Содержит 279 страниц машинописного текста, 69 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 188 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цели, приведены новые методические и научные результаты, полученные автором, и представлены основные положения, вынесенные на защиту.

Первая глава диссертации посвящена изучению свойств возбужденных состояний четно-четных ядер в феноменологической коллективной модели ядра. Глава начинается с краткого обзора работ, посвященных описанию свойств возбужденных состояний в рамках феноменологической коллективной модели, начиная от основополагающих работ Бора и Моттельсона. Отмечается, что существенной чертой всех выполненных до сих пор работ является использование упрощающих предположений при решении основного уравнения коллективной модели: специальный выбор потенциальной энергии коллективных движений, малость амплитуд β - и γ -колебаний, адиабатическое отделение вращения от колебаний - что ограничивает область применения полученных результатов. Поэтому ставится задача создания феноменологической коллективной модели, в которой не использовались бы подобные предположения.

С этой целью в полученном Бором гамильтониане коллективной модели, который зависит от деформационных переменных β , γ и трех углов Эйлера θ_i , обосновывается выбор потенциальной энергии коллективных движений $V(\beta, \gamma)$ и показывается, что для рассмотрения наиболее интересной переходной по деформации области ее удобно взять в следующем виде:

$$V(\beta, \gamma) = a + b\beta + c\beta^2 + d\beta \cos 3\gamma,$$

О выбором потенциальной энергии полностью определяется гамильтониан коллективной модели и, следовательно, можно в явном виде выписать пятимерное уравнение Шредингера коллективной модели в безразмерных переменных

$$\left\{ \frac{1}{2} \frac{\Delta^2}{y^2} + \frac{\Delta + 2}{2y^2} + \frac{(y - y_0)^2}{2} + d y_0 y (1 - \cos 3\gamma) - \frac{E_1}{\hbar \omega} \right\} y^2 \Psi_i^{JM}(y, \gamma, \theta_i) = 0,$$

где Δ - угловая часть пятимерного оператора Лапласа, $y_0, \hbar \omega$ и d - феноменологические параметры. Так как переменные в этом уравнении не разделяются, то его решение ищется в виде двойного ряда

$$\Psi_i^{JM}(y, \gamma, \theta_i) = y^2 \sum_{n_\beta=0}^{\infty} \sum_{n_\gamma=0}^{\infty} a_{n_\beta n_\gamma}^i f_{n_\beta n_\gamma}(y) \varphi_{n_\gamma}^{JM}(\gamma, \theta_i),$$

где базисные функции $f_{n_\beta n_\gamma}(y)$ и $\varphi_{n_\gamma}^{JM}(\gamma, \theta_i)$ являются решениями этого же уравнения при $y_0 = 0$ (сферическое ядро). Подлежащая диагонализации матрица полного гамильтониана представляет собой сумму прямых произведений матриц операторов, действующих лишь на радиальные или угловые переменные. Матричные элементы от y считались по известным формулам, а для матричных элементов от $\cos 3\gamma$ по угловым частям волновых функций сферического ядра

в диссертации были получены формулы или найдены численные значения для полного момента количества движения равного 0, 2, 3, 4, 5, 6. Для более высоких значений J матричные элементы считались на ЭВМ по рекуррентным формулам, полученными Гаем.

Численная процедура диагонализации позволила получить собственные значения E_i в единицах $\hbar\omega$ и собственные вектора в виде нормированного набора коэффициентов $a_{n_p h_r}^i$. Необходимость обрывать ряд и использовать при расчете матрицы конечного ранга ограничивает область изменения параметров, при котором имеет смысл этим методом пользоваться. В выполненных расчетах максимальный ранг диагонализируемых матриц был равен 64, что оказалось достаточным, чтобы перекрыть промежуточную по деформации область и дойти до таких значений параметров деформации и жесткости, где применимо приближение Давыдова-Чабана.

При выполнении расчетов одна из основных задач состояла в том, чтобы проследить за эволюцией основных характеристик сферического ядра по мере увеличения деформации. В первую очередь интересно было проследить за превращением эквидистантного спектра сферического ядра ($\gamma_0 = 0$) в вибрационно-ротационный спектр сильнодеформированного ядра ($\gamma_0 > 1$ и $\alpha\gamma_0^2 \sim 1$). Для этого детально была исследована эволюция возбужденных состояний сферического ядра, содержащих не более трех фононов. Из выполненных расчетов можно сделать следующие выводы. Во-первых, для рассмотренной потенциальной энергии относительные значения энергии $\epsilon_1(0)$, $\epsilon_2(2)$ и $\epsilon_4(4)$ всегда больше двух, где $\epsilon_i(J) \equiv E_i(J)/E_1(2)$. Во-вторых, снятие вырождения в двухфтонном триplete происходит по-разному для гамма-нестабильных ($\alpha = 0$) и гамма-жестких ядер ($\alpha = 1$), чем можно объяснить отсутствие в триplete квазисферического ядра одного из воз-

бужденных состояний с моментом 0 или 2. В-третьих, вибрационное состояние 2^+ с $N = 2$ в зависимости от параметров переходит в нижнее состояние "аномальной ротационной полосы" либо в первый возбужденный уровень бета-вибрационной полосы. И, наконец, уровни сферического ядра, соответствующие самому высокому для заданного значения энергии моменту количества движения с появлением и ростом деформации переходят в уровни ротационной полосы с $E(J) \sim J(J+1)$. Сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными для всех немагических ядер с $A > 16$ показало, что наилучшее согласие наблюдается для возбужденных состояний с $J = 6, 8, 10$ и 12 .

Кроме эволюции энергетического спектра изучалась эволюция приведенных вероятностей электрических квадрупольных переходов из состояний с моментом $J+2$ в состояния с моментом J и между состояниями с моментами 2. Из всех этих переходов во многих ядрах наиболее хорошо измерено отношение приведенных вероятностей $B(E2; 2_2^+ \rightarrow 0_2^+)/B(E2; 2_2^+ \rightarrow 2_1^+)$. Для этого отношения, в отличие от результатов Давыдова и Филиппова, которые предсказывают его монотонное увеличение в зависимости от $\epsilon_2(2)$, в наших результатах появляется немонотонность, причем минимум расположен вблизи "квазипересечения" второго и третьего возбужденных состояний 2^+ . Около этой точки структура волновой функции сильно меняется, поэтому результаты наших расчетов отличаются от результатов, полученных адиабатическими приближенными методами. В область минимума попадает ядро ^{50}Cr . У него рассматриваемое отношение примерно в 20 раз меньше, чем можно ожидать из монотонной зависимости и, действительно, рядом со вторым возбужденным состоянием 2^+ ($\epsilon_2(2) = 3,72$) у этого ядра находится третье возбужденное состояние 2^+ ($\epsilon_3(2) = 4,05$).

Большой интерес представляли расчеты теоретически доступных областей отношений вероятностей $B(E2; J_1 \rightarrow J_2; 2) / B(E2; 2 \rightarrow 0_2)$ в зависимости от $\epsilon_1(4)$. Появившиеся за последние годы экспериментальные данные по переходам $4_1^+ \rightarrow 2_1^+$, $6_1^+ \rightarrow 4_1^+$, $8_1^+ \rightarrow 6_1^+$, $10_1^+ \rightarrow 8_1^+$ и $12_1^+ \rightarrow 10_1^+$ хорошо согласуются с предсказанными значениями.

И, наконец, рассматривается эволюция отношений средних значений электрических квадрупольных моментов возбужденных состояний $\langle Q_2 \rangle_{J,1}$ и электрическому квадрупольному моменту ядра в системе координат, жестко связанному с ядром, Q_0 . В первом возбужденном состоянии 2^+ это отношение резко возрастает при небольшом отклонении от сферичности, что соответствует сильному растяжению. С увеличением жесткости эффективное растяжение уменьшается, и отношение $\langle Q_2 \rangle_{2,1} / Q_0$ стремится к известному ротационному пределу. Появившиеся экспериментальные данные по средним значениям электрических квадрупольных моментов в возбужденном состоянии 2^+ хорошо согласуются с предсказанными значениями. Зависимости отношений $\langle Q_2 \rangle_{J,1} / Q_0$ от $\epsilon_1(4)$ для состояний квазиротационной полосы подобны $\langle Q_2 \rangle_{2,1} / Q_0$, но теоретически доступные области несколько расширяются с увеличением J .

Особого внимания заслуживает зависимость $\langle Q_2 \rangle_{2,2} / Q_0$ от $\epsilon_1(4)$ для второго возбужденного состояния 2^+ . Из-за квазипересечения состояний 2_2^+ и 2_3^+ теоретически доступная область этого отношения имеет сложный вид и заключена в пределах от $2/7$ до $-2/7$. Появившиеся экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с расчетом.

Для того чтобы показать реальную возможность развиваемой коллективной модели по описанию свойств возбужденных состояний, были выполнены расчеты энергетического спектра, многочисленных отношений приведенных вероятностей $E2$ - и $E0$ - переходов и средних значений электрических квадрупольных моментов многих возбужденных состояний для ядра ^{150}Sm . Выбор этого ядра не случаен, так как для этого ядра имеется наиболее полный экспериментальный материал и необходимые феноменологические параметры, найденные в рамках полумикроскопической модели "спаривание плюс квадруполь" Кумаром и Баранджером. Из сравнения с экспериментальными данными можно утверждать, что ядро ^{150}Sm является квазиrotатором, а наилучшее согласие наблюдается для состояний "основной полосы". Сравнение рассчитанных значений с результатами расчетов более сложной феноменологической коллективной модели Кумара-Баранджера показало конкурентноспособность развиваемой модели.

Появление данных о возбужденных состояниях из реакций (α, n, γ) и (n, α, γ) дало информацию о состояниях с высокими моментами количества движения, которая в основном относилась к ядрам с $\epsilon_1(4) > 3$. Однако в развиваемой коллективной модели из-за используемого метода решения пятимерного уравнения Шредингера можно было рассматривать только те ядра, у которых $\epsilon_1(4) \leq 2,9$. Поэтому был развит другой метод решения пятимерного уравнения Шредингера коллективной модели, в которой искомая волновая функция $\Psi_i^{JM}(\rho, \gamma, \theta_i)$ раскладывалась в ряд по решениям пятимерного уравнения Шредингера с потенциальной энергией $V(\rho) = \frac{c}{2} (\frac{x}{\rho} - \beta)^2$, где x - константа, которую можно использовать для улучшения сходимости ряда. Новый метод решения позволил практически полностью перекрыть всю область по дефор-

матри и производить расчеты свойства ядер, у которых $2 \leq \epsilon_1(4) \leq 3,3$.

С новым методом расчета удалось обобщить традиционную коллективную модель Бора-Моттельсона, рассматриваемую выше, на случай разных массовых параметров для β - и γ -колебаний, так как из полумикроскопических расчетов Кумара и Баранджера следует, что массовые параметры β - и γ -колебаний близки, но не равны друг другу. Выполненные расчеты энергетических спектров показали, что небольшое различие в массовых параметрах мало меняет положения уровней основной полосы, но существенно изменяет положения уровней всех других полос.

И, наконец, были выполнены расчеты энергетических уровней основных полос вплоть до состояний с моментом количества движения $J = 20$ для ядер ^{158}Er , ^{160}Er и ^{164}Yb . Оказалось, что с потенциальной энергией, используемой в данной коллективной модели с точностью лучше процента описываются энергии состояний с J меньше 14, а затем согласие в 5-10 раз ухудшается. Таким образом, в рамках рассматриваемой коллективной модели невозможно описать экспериментально наблюдаемую зависимость момента инерции от квадрата угловой скорости (*back-bending*). Проведенный анализ с использованием различных видов потенциальных энергий коллективных движений показал, что в рамках феноменологических коллективных моделей можно описать эффект "*back-bending*", но для этого надо использовать потенциальную энергию коллективного движения более сложного вида, чем в рассмотренной выше коллективной модели. Таким образом, найден предел применимости феноменологических коллективных моделей, основанных на параметризации потенциальной энергии коллективных движений положением ее минимума и коэффициентами жесткости в нём.

Глава заканчивается параграфом, в котором суммируются и обобщаются результаты по применению данной модели к описанию экспериментальных данных и по сравнению с результатами расчетов других теоретических работ.

Вторая глава диссертации посвящена созданию и развитию одномерной модели деления. Она начинается с краткого обзора основных работ по статическим и динамическим расчетам процесса деления, выполненных в рамках модели жидкой капли. Существенным моментом во всех этих работах является задание формы ядра на всех стадиях процесса деления, так как использование в расчетах многопараметрической формы ядра приводит к значительным осложнениям особенно при динамических расчетах. Поэтому для уменьшения количества параметров в описании формы ядра на всех стадиях симметричного процесса деления было предложено использовать поверхность вращения, образующей которой служит простейшая двифокусная лемниската (линия Кассини). В декартовых координатах уравнение этой поверхности имеет следующий вид:

$$(x^2 + y^2 + z^2)^2 - 2a^2 s^2 (z^2 - x^2 - y^2) = a^4 (1 - s^4),$$

где a и s - параметры. Условие сохранения объема позволяет исключить один параметр, а параметр s связать с расстоянием между центрами тяжести двух половин ядра - будущих осколков. С новой параметризацией формы ядра были выполнены расчеты барьеров деления и формы ядра в седловой точке для различных значений параметра делимости. Было показано, что величины барьеров и форма ядра в седловой точке хорошо согласуются с результатами многопараметрических расчетов и с результатами численных расчетов фигур равновесия, выполненных Струтинским.

С предложенной параметризацией рассматривается простейшая динамическая задача по нахождению эффективной массы делящегося ядра в предположении о потенциальном течении несжимаемой невязкой жидкости. В двух предельных случаях, как показали оценки, эффективная масса отличается более чем в два раза. Значения эффективной массы в промежуточных точках находились из решения уравнения Лапласа и из модельной задачи, основанной на приближении Уилера, что дало возможность оценить точность этого приближения. Вычислить эффективную массу, используя численное решение уравнения Лапласа, удалось только до появления "шейки" у делящегося ядра, а далее используемый метод решения начинает расходиться. Расчеты эффективной массы в приближении Уилера значительно проще, и результаты с высокой точностью совпадают с результатами гидродинамических расчетов до появления шейки и плавно переходят к асимптотическому пределу. Отсюда можно заключить, что приближение Уилера хорошо моделирует потенциальное течение несжимаемой жидкости и его можно рекомендовать для широкого использования.

Рассчитанная эффективная масса по физическому смыслу совпадает с приведенной массой двух жидких тел, которая в отличие от приведенной массы двух твердых тел не является постоянной величиной, а зависит от расстояния между центрами тяжести двух осколков. Так как при моделировании деления одномерным процессом проницаемость барьера зависит от приведенной массы проницающей частицы, то было оценено насколько изменится проницаемость барьера жидкими осколками по сравнению с твердыми. Оказалось, что зависимость эффективной массы от деформации желательнее учитывать при расчете периодов спонтанного деления, но на энергетическую зависимость этот эффект не влияет, так

как он приводит к небольшому изменению феноменологических констант.

В рассмотренной выше жидкокапельной модели деления полностью игнорируется структура ядра. Однако, как показал Струтинский, учет оболочечной структуры ядра в делении приводит к качественным изменениям формы барьеров деления и эффективной массы делящегося ядра. Оказалось, что барьер деления у многих ядер является двугорбым, а у некоторых изотопов тория — даже трехгорбым. Подобную структуру имеет и эффективная масса. Поэтому возникла задача о нахождении простых формул для проницаемости одномерных сложных барьеров, удобных для анализа экспериментальных данных по барьерам деления. С использованием квазиклассического приближения методом Цаана в диссертации получена формула для расчета проницаемости двугорбого барьера, важным достоинством которой является ее простота, независимость от вида аппроксимации барьера и возможность на ее основе рассматривать единым образом как подбарьерное, так и надбарьерное деление. Сравнение результатов расчета проницаемости барьера, аппроксимированного тремя сопряженными параболой по квазиклассической формуле с точным численным расчетом Грамера и Никса, показало хорошее согласие.

Также методом Цаана была получена формула для проницаемости одномерного трехгорбого барьера деления и на конкретных расчетах было показано, что в проницаемости трехгорбого барьера по сравнению с проницаемостью двугорбого барьера нарушается периодичность появления резонансов.

В полученных выше формулах для проницаемости сложных барьеров эффективная масса делящегося ядра считалась постоянной.

Для того чтобы можно было учесть изменение эффективной массы в процессе деления, рассмотрена задача о решении одномерного уравнения Шредингера для частицы с массой, зависящей от координаты и предложен метод его решения в рамках квазиклассического приближения. В качестве примера рассмотрена задача о проницаемости двугорбого барьера частицей с массой, состоящей из жидкокапельной и оболочечной составляющих. Проницаемость двугорбого барьера в этом случае существенно зависит как от структуры эффективной массы, так и от соотношения между структурами барьера и массы.

Процесс деления атомного ядра обычно моделируют процессом прохождения частицы через барьер, однако более точно его следует рассматривать как распад квазистационарных состояний через одnogорбый или двугорбый одномерные барьеры. Поэтому в квазиклассическом приближении методом Цваана для указанных выше барьеров были получены уравнения для нахождения положения и ширины как подбарьерных, так и надбарьерных квазистационарных состояний. В виде примера рассмотрено как меняется ширина квазистационарных состояний в зависимости от энергии и показано, что ширина квазистационарного состояния, распадающегося через двугорбый барьер, зависит от соотношения состояний в первой и во второй ямах и из анализа ширины появляется принципиальная возможность сделать вывод об относительной высоте первого и второго барьеров.

До сих пор развивалась одномерная модель деления, но возникает следующий вопрос. Какие новые черты процесса деления можно описать при переходе к многомерной или даже к двумерной модели деления? С этой целью была рассмотрена простейшая двумерная модель деления, в которой кроме делительной степени свободы

была еще одна степень свободы, условно названная "поперечной". В предположении, что между делительной и поперечной степенями свободы нет никакой связи, удается разделить переменные в уравнении Шредингера и в квазиклассическом приближении найти вероятность и среднюю кинетическую энергию осколков деления. В случае, если поперечная степень свободы имеет дискретный энергетический спектр, удается качественно объяснить несколько наблюдаемых фактов, которые не находят объяснения в одномерной модели: существенно затягивается выход проницаемости двугорбого барьера на асимптотику, равную единице, особенности в кинетической энергии осколков имеют форму минимумов и, наконец, положения этих особенностей совпадают с резонансами в проницаемости двугорбого барьера. Если поперечная степень свободы имеет непрерывный энергетический спектр, то резонансы в проницаемости снижаются и уширяются, а нерегулярности в средней кинетической энергии осколков и вероятности деления можно будет получить дополнительную информацию не только о барьере деления, но и о седле.

В заключении главы подводятся основные итоги исследований, выполненных в рамках одномерной и простейшей двумерной моделях деления.

Третья глава диссертации посвящена изучению взаимодействия нейтрона с веществом в рамках оптической модели. Дается краткий обзор литературы и тех результатов, которые были уже получены при изучении взаимодействия нейтронов с веществом. Интерес к этому вопросу значительно поднялся в связи с бурным развитием физики ультрахолодных нейтронов. В частности, впервые

в работе Кагана было указано, что в кристалле с отрицательной и в нерегулярном кристалле с положительной длинами когерентного рассеяния могут существовать связанные состояния нейтронов в веществе. До этой работы считалось, что связанные состояния нейтрона существуют только в атомных ядрах. Для обнаружения связанных состояний нейтрона в веществе в диссертации предложен эксперимент, основанный на пропускании ультрахолодных нейтронов через трехслойную мишень. Первый и третий слои этой мишени должны быть изготовлены из вещества с положительной длиной когерентного рассеяния b_1 , а второй слой - из вещества с длиной когерентного рассеяния b_2 , причем $b_2 < b_1$. Для ультрахолодных нейтронов, падающих на такую трехслойную мишень, потенциальная энергия взаимодействия нейтронов с веществом мишени имеет вид двугорбого барьера, проницаемость которого резонансным образом зависит от энергии нейтронов. Максимум резонанса проницаемости совпадает с положением квазистационарного состояния нейтрона в веществе. Таким образом, пропуская ультрахолодные нейтроны через подобную трехслойную мишень, можно получить прямую информацию о существовании связанных состояний нейтрона в веществе. Трехслойная мишень была изготовлена группой Штайерла и им же был выполнен описанный выше эксперимент. Результаты эксперимента однозначно указали на существование связанных состояний нейтрона в веществе, а сравнение результатов расчета с наблюдаемыми данными показало, что оптическая модель взаимодействия нейтронов с веществом, в основе которой лежит псевдопотенциал Ферми, прекрасно описывает процесс взаимодействия нейтронов с веществом.

Выполненный Штайерлом эксперимент с трехслойной мишенью практически доказал на указанную в диссертации принципиальную

возможность создания нейтронного спектрометра для ультрахолодных нейтронов с высоким разрешением, принцип работы которого аналогичен принципу работы хорошо известного оптического интерферометра Фабри-Перо.

Наряду с трехслойными мишенями для ультрахолодных нейтронов в диссертации рассматриваются и многослойные, состоящие из чередующихся между собой двух слоев из веществ с разными длинами когерентного рассеяния. Потенциальная энергия взаимодействия ультрахолодных нейтронов с такой мишенью представляет периодический потенциальный барьер, проницаемость которого, как показывается, сильно зависит от энергии падающих нейтронов. Следовательно, такую многослойную мишень можно использовать в виде монохроматора, ширина линии пропускания которого пропорциональна $\sqrt{\rho}$, где ρ - проницаемость одного барьера.

При рассмотрении прохождения ультрахолодных нейтронов через вещество возникает вопрос об их взаимодействии с поверхностью, что крайне важно в связи с накоплением ультрахолодных нейтронов в замкнутых сосудах. Если рассматривать нейтрон как волновой пакет, размер которого много больше длины волны, то, проводя аналогию с электромагнитной волной, можно утверждать, что при отражении нейтрона от поверхности при углах падения больших критического должно существовать поверхностное смещение, то есть не совпадают место падения и место отражения нейтрона. Таким образом, при отражении нейтрон как бы "скользит" вдоль поверхности. Для расчета поверхностного смещения получена формула, справедливая при любых углах падения больших критического, сделаны оценки и для обнаружения этого эффекта предложен эксперимент, основанный на суммировании поверхностных

смещений при многократных отражениях. Но уже и сейчас можно сказать, что на основе результатов работы группы Абова по деполаризации нейтронов при их отражении от намагниченных зеркал можно сделать косвенный вывод о существовании такого эффекта.

В настоящее время оптическая модель взаимодействия нейтронов с веществом обобщена на рассмотрение взаимодействия разных частиц с веществом. Примером может служить взаимодействие электронов с энергией около 1 эВ с жидким и твердым гелием. Электрон, внедренный в жидкий гелий, образует в нем сложный комплекс (локализованное состояние электрона), который имеет при нулевом давлении радиус около 17 \AA и массу, равную почти 250 массам атомов гелия. Свойства таких комплексов можно рассматривать в рамках модели Феррелла, основанной на псевдопотенциале Ферми. Согласно этой модели замедляющемуся в жидком гелии электрону энергетически выгодно перейти из состояния непрерывного спектра в локализованное состояние. Интерес к изучению электронных комплексов вызван тем, что подобные комплексы, как показали Курилкин и Ходель, могут образовывать и К-мезоны в тяжелых ядрах. В диссертации обращается внимание на электронные комплексы в жидком гелии как на новый квантовый объект с необычными свойствами. Например, спектр возбужденных состояний электронного комплекса совпадает со спектром электрона в прямоугольной яме глубиной в 1 эВ, а масса комплекса зависит от энергии возбуждения. Далее, основываясь на модели Феррелла, показывается, что в определенной области давления в жидком гелии могут существовать и двухэлектронные комплексы. Однако эти комплексы неустойчивы, так как энергия двухэлектронного комплекса больше энергии двух одноэлектронных комплексов, удаленных далеко друг от друга. Следовательно, двухэлектронные комплексы

будут распадаться или симметрично делиться. Однако деление двухэлектронного комплекса отличается от деления атомного ядра, поскольку в процессе деления двухэлектронных комплексов объем не сохраняется.

Глава заканчивается параграфом, в котором суммируются основные результаты, полученные в данной главе.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты и выводы работы.

1. На основе модели Бора-Моттельсона сформулирована, обоснована и применена для исследования основных характеристик возбужденных состояний атомных ядер пятимерная трехпараметрическая феноменологическая коллективная модель ядра. В рамках этой модели можно рассчитывать энергетический спектр возбужденных состояний, приведенные вероятности $E2 \rightarrow E0$ и $E0 \rightarrow E0$ переходов и средние электрические квадрупольные моменты четно четных атомных ядер в широкой области массовых чисел.

2. В рамках созданной модели удалось показать, как эволюционируют свойства возбужденных состояний сферического ядра в свойства возбужденных состояний сильнодеформированного ядра с возникновением и последующим ростом аксиально-симметричной деформации.

3. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало, что созданная модель может быть применена как при анализе и классификации возбужденных состояний атомных ядер, так и в предсказании свойств возбужденных состояний с энергией возбуждения вплоть до 3 МэВ. Причем необходимые параметры могут быть взяты из имеющихся экспериментальных данных или рассчитаны в рамках полумикроскопической модели.

4. Рассматриваемую коллективную модель удалось распространить на изучение коллективных движений с разными массовыми пара-

метрами u , β - и γ - колебаний. Было показано, что изменения положений энергетических уровней β - и γ - полос в зависимости от отношения массовых параметров в 6-8 раз больше, чем изменения положения уровней основной полосы.

5. Показано, что в рамках коллективной модели можно описать зависимость момента инерции от квадрата угловой скорости ("back-bending"), но для этого необходимо знать более детально потенциальную энергию коллективных движений, чем в рассмотренной выше коллективной модели.

6. Сравнение результатов расчетов, выполненных в рамках данной коллективной модели, для ядра ^{160}Sm с результатами расчетов для этого же ядра в более сложной коллективной модели Кумара - Баранджера показало, что она вполне конкурентноспособна не только при расчете зависимостей основных характеристик ядер от деформации и отношения массовых параметров, но и при расчете свойств конкретных ядер.

7. В рамках рассматриваемой модели удалось оценить точность трехмерной модели Давыдова-Филиппова и четырехмерной модели Давыдова-Чабана, наиболее широко используемых в анализе экспериментальных данных. Было показано, что в этих моделях из-за приближенного разделения переменных нельзя описать наблюдаемые квазипересечения уровней, а следовательно, и резкое изменение приведенных вероятностей некоторых E2-переходов.

8. Предложен однопараметрический класс кривых - двухфокусные лемнискаты - для описания формы делящегося ядра на всех стадиях процесса деления, начиная от исходной сферы до двух сферических осколков половинного объема, разделенных бесконечно большим расстоянием. С данной параметризацией выполнены расчеты барьеров деления и формы ядра в седловой точке, которые хорошо согласуются с результатами многопараметрических расчетов и точного

решения основного уравнения капельной модели.

9. Для новой параметризации формы делящегося ядра выполнены гидродинамические и в модели Уилера расчеты эффективной массы делящегося ядра. Из сравнения этих двух результатов удалось оценить точность модели Уилера и рекомендовать ее для широкого применения.

10. В квазиклассическом приближении с использованием метода Цваана получены аналитические формулы как для подбарьерной, так и надбарьерной проницаемости одномерных двугорбых и трехгорбых барьеров деления, удобные для анализа экспериментальных данных. Сравнение с точными расчетами показало, что квазиклассические формулы имеют хорошую точность.

11. В квазиклассическом приближении методом Цваана получены и проанализированы уравнения для определения энергии и ширины одномерных подбарьерных и надбарьерных квазистационарных состояний, распадающихся через двугорбый потенциальный барьер. Показано, что ширина квазистационарных состояний существенным образом зависит от энергии состояний в первой и второй ямах.

12. Показано, что при решении одномерного уравнения Шредингера для частицы с "массой", зависящей от координаты, можно использовать квазиклассическое приближение. Рассмотрена задача о прохождении частицы с переменной "массой" через двугорбый барьер. Проницаемость двугорбого барьера в этом случае определяется как положениями особенностей барьера и "массы", так и соотношениями между ними.

13. Рассмотрена простейшая двумерная модель деления, и показано, что по сравнению с одномерной моделью в ней можно объяснить несколько фактов: существенно замедленный выход надбарьерной проницаемости на свою асимптотику, особенности в зависимости средней кинетической энергии осколков деления от энергии возбуждения имеют

вид минимумов, и особенности в зависимости средней кинетической энергии осколков совпадают с резонансами в проницаемости.

14. Для обнаружения нового явления существования связанных состояний нейтрона в веществе был предложен эксперимент с ультрахолодными нейтронами, который позволил обнаружить известные состояния нейтрона в веществе.

15. Указано на возможность создания новых приборов для исследования ультрахолодных нейтронов - нейтронного интерферометра Фабри - Перо и многослойного нейтронного монохроматора.

16. Введено понятие поверхностного смещения нейтрона при отражении его от поверхности вещества при углах падения $\theta > \theta_{кр}$ и получена аналитическая формула для его расчета, справедливая при всех углах падения.

17. В рамках оптической модели взаимодействия частиц с веществом указано на существование новой квантовой системы "баблон", аналогичной, в какой-то степени, атомному ядру. Определен его энергетический спектр и рассмотрены некоторые его свойства.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Работнов Н.С., Серегин А.А. О коллективных состояниях слабдеформированных ядер. - Ядерная физика, 1967, т.5, № 5, с. 996-1000.

2. Ставинский В.С., Работнов Н.С., Серегин А.А. Геометрическая модель симметричного деления. - Ядерная физика, 1968, т.7, № 5, с. 1051 - 1055.

3. Ставинский В.С., Работнов Н.С., Серегин А.А. Расчет эффективной массы делящегося ядра. - Ядерная физика, 1969, т.9, № 4, с. 779 - 782.

4. Rabotnov N.S., Seragin A.A. On the phenomenological theory of the collective nuclear excitations. - Phys. Letters, 1969, v.29B, N3, p. 162-164.

5. Работнов Н.С., Серегин А.А. К феноменологической теории коллективных возбуждений. - Ядерная физика, 1969, т.10, № 2, 286-295.

6. Работнов Н.С., Серегин А.А. Вероятности электромагнитных переходов в феноменологической теории ядра. - Обнинск, 1970. - 8с. (Препринт ФБИ-202).

7. Будник А.П., Работнов Н.С., Серегин А.А. Вероятности электрических квадрупольных переходов и средние значения электрических квадрупольных моментов в феноменологической коллективной теории. - Ядерная физика, 1970, т. 12, № 3, с. 477-483.

8. Будник А.П., Работнов Н.С., Серегин А.А. Уровни четно-четных ядер с высокими моментами в феноменологической коллективной модели. - Ядерная физика, 1972, т.15, № 3, с.470-473.
9. Будник А.П., Работнов Н.С., Серегин А.А. Вероятности E2-переходов и средние значения квадрупольных моментов состояний с высокими спином в феноменологической коллективной модели ядра. - Ядерная физика, 1972, т.16, № 1, с.43-46.
10. Будник А.П., Серегин А.А. Состояния 3^+ в феноменологической модели ядра. - Обнинск, 1972. - 18 с. (Препринт ФЭИ-352);
11. Будник А.П., Серегин А.А. Свойства ядра ^{150}Sm в феноменологической коллективной модели. - Ядерная физика, 1973, т.18, № 3, с.495-500.
12. Будник А.П., Серегин А.А. Состояния деформированных ядер с высокими моментами в коллективной модели. - Ядерная физика, 1974, т.19, № 5, с.979-986.
13. Серегин А.А. Рассмотрение зависимости момента инерции от квадрата угловой скорости в феноменологической коллективной теории ядра. - Ядерная физика, 1976, т.23, № 3, с.548-556.
14. Работнов Н.С., Серегин А.А. Проницаемость N -горбого барьера в квазиклассическом приближении. - Обнинск, 1975. - 12 с. (Препринт ФЭИ-618).
15. Серегин А.А. К вопросу о связанном нейтроне в веществе. - ЖЭТФ, 1977, т.73, № 5, с.1634-1638.
16. Мастеров В.С., Серегин А.А. Энергетический спектр обобщенного осциллятора. - Обнинск, 1977. - 10 с. (Препринт ФЭИ-749).
17. Мастеров В.С., Серегин А.А. Энергетический спектр ангармонического осциллятора. - Обнинск, 1977. - 10 с. (Препринт ФЭИ-772).

18. Мастеров В.С., Серегин А.А. Проницаемость двугорбого барьера в квазиклассическом приближении. - Ядерная физика, 1978, т.27, № 6, с.1467-1474.
19. Мастеров В.С., Серегин А.А. Проницаемость трехгорбого барьера в квазиклассическом приближении. - Ядерная физика, 1978, т.28, № 5, с.1195-1204.
20. Мастеров В.С., Серегин А.А. Проницаемость двугорбого барьера, аппроксимированного тремя сопряженными параболой. - Вопросы атомной науки и техники. Сер.: "Ядерные константы", 1978, т.30, № 3, с.33-36.
21. Мастеров В.С., Серегин А.А. Распад квазистационарных состояний в квазиклассическом приближении. - Обнинск, 1979. - 10 с. (Препринт ФЭИ-944).
22. Мастеров В.С., Серегин А.А. Распад квазистационарных состояний через двугорбый потенциальный барьер в квазиклассическом приближении. - Ядерная физика, 1980, т.31, № 1, с.280-288.
23. Серегин А.А. К вопросу о движении частицы с переменной массой в квантовой механике. - Обнинск, 1979. - 10 с. (Препринт ФЭИ-998).
24. Серегин А.А. Проницаемость двугорбого барьера частицей с переменной массой. - Ядерная физика, 1980, т.32, № 5, с.1296-1301.
25. Серегин А.А. Поверхностное смещение нейтрона при отражении. - Ядерная физика, 1981, т.33, № 5, с.1173-1176.
26. Серегин А.А. Резонансное рассеяние частиц в квазиклассическом приближении. - Обнинск, 1982. - 12 с. (Препринт ФЭИ-1273).

27. Серегин А.А. Квантовая структура и свойства комплекса, образованного электроном в жидком гелии, - Обнинск, 1983, II с, (Препринт ФЭИ-1449),
28. Серегин А.А. Двухэлектронные комплексы в жидком гелии, - Обнинск, 1984, - II с, (Препринт ФЭИ-1540),
29. Работнов Н.С., Серегин А.А. Вероятность и средняя кинетическая энергия осколков деления в простейшей двумерной модели, - Ядерная физика, 1988, т.47, № 3, с.643-647,
30. Серегин А.А. Вероятности E2-переходов и средние значения электрических квадрупольных моментов возбужденных состояний с высокими спинами в феноменологической коллективной модели ядра - Обнинск, 1990. - 8с, (Препринт ФЭИ - 2062),

Подписано к печати 14.05.1990 г. ТБ-03302 Бумага писчая № 1
Формат 60x90 1/16 Усл.п.л. 1,75 Уч.-изд.л. 1,2 Тираж 100 экз.
Заказ № 513

Отпечатано на ротапринте ФЭИ, г. Обнинск Калужской обл.