



Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель -

кандидат физико-математических наук О. М. Князьков

Официальные оппоненты:

профессор

доктор физико-математических наук Л. Н. Савушкин

кандидат физико-математических наук А. Ф. Лукьянцев

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Физико-энергетический институт, Обнинск.

*Автореферат рассмотрен 9 декабря 1990*

Защита диссертации состоится "14" *марта* 1990 года в 12 часов на заседании Специализированного ученого совета Д047.01.04 при Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета  
кандидат физико-математических наук

З. М. Иванченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации представлены математические схемы и комплекс программ для полумикроскопического метода связанных каналов в прямых ядерных реакциях.

Созданный комплекс программ, алгоритмы которых разработаны на основе теории прямых ядерных реакций, используются для проведения методических исследований и анализа экспериментальных данных.

Актуальность проблемы.

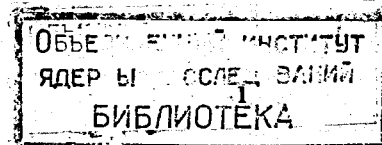
Прямые ядерные реакции являются важным источником информации для изучения атомного ядра. Они дают возможность получать точную спектроскопическую информацию о структуре ядра, поэтому для качественного анализа важно иметь хорошую теоретическую и вычислительную базу.

Упругое и неупругое рассеяние частиц низких энергий - одна из таких задач. Связь между упругим и неупругим каналами реакции описывается методом связанных каналов (МСК). Этот метод позволяет рассчитывать дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния одновременно.

Традиционно в теории прямых ядерных реакций в качестве потенциала использовался макроскопический феноменологический потенциал в форме Вудса-Сахсона. Однако, расчетам, проводимым в рамках стандартной версии МСК с макроскопическим потенциалом, присущ ряд недостатков, в частности, наличие большого числа свободных параметров (параметры оптического потенциала (ОП), параметры деформации и др.), отсутствие связи с полумикроскопическими ядерными моделями.

В последнее время получены экспериментальные данные, в которых угловые распределения неупруго рассеянных частиц измерены в широком угловом диапазоне. Использование полумикроскопического подхода к анализу этих данных позволяет получать новую информацию о структуре ядра.

Полумикроскопическая модель (ПММ), в которой учитываются многочастичные и обменные нуклон-нуклонные корреляции, позволяет явно рассматривать эффекты, связанные с плотностной зависимостью эффективного нуклон-нуклонного взаимодействия и действием принципа Паули. Роль принципа Паули особенно существенна при описании взаимодействия нуклонов низких энергий с ядрами. Кроме этого, иссле-



дование взаимодействия нуклонов низких энергий с ядрами представляет большой интерес в связи с тем, что при низких энергиях более существенна связь каналов и, как следствие этого, с большой вероятностью возбуждаются состояния ядра-мишени сложной структуры.

Изучение неупругого рассеяния нуклонов и  $\alpha$ -частиц низких энергий на ядрах служит важным источником информации о параметрах деформации, распределения вещества в ядре и переходных плотностях. Экспериментальные исследования с протонами высоких энергий, а также с другими частицами, привели к представлению о том, что деформации нейтронного и протонного распределений в ядрах могут иметь значительные различия. Эти различия, в свою очередь, приводят к различиям в параметрах изоскалярной и изовекторной деформаций ОП. С этой точки зрения представляет интерес анализ изоспиновой структуры неупругих переходов в ядрах, проявляющейся при неупругом рассеянии нуклонов низких энергий на ядрах, в рамках ПММ, поскольку в этом подходе формфакторы неупругих переходов непосредственно связаны с протонными и нейтронными переходными плотностями.

Также актуальным представляется исследование неупругого рассеяния  $\alpha$ -частиц на ядрах, из анализа экспериментальных данных можно непосредственно извлечь информацию о силе изоскалярных переходов.

#### Основные цели работы:

1. Разработка математических схем и алгоритмов для создания комплекса программ, реализующих вычисление сечений упругого и неупругого рассеяния нуклонов и  $\alpha$ -частиц низких энергий на ядрах методом связанных каналов в полумикроскопическом подходе и сравнение результатов с экспериментальными данными.
2. Создание комплекса программ для расчетов полумикроскопических потенциалов и формфакторов неупругих переходов.
3. Разработка вычислительной схемы и алгоритмов программы для расчета интегральных характеристик распределения вещества и потенциала в ядрах.
4. Исследование сходимости разложений для полумикроскопического потенциала и формфакторов неупругих переходов и проведение других методических расчетов.
5. Использование созданного комплекса программ для расчетов теоретических сечений упругого и неупругого рассеяния частиц низких энергий на ядрах и анализ экспериментальных данных.

#### Научная новизна.

В диссертации разработаны оригинальные вычислительные схемы и описан созданный на их основе комплекс программ, где реализован

полумикроскопический метод связанных каналов, в котором учитываются эффективные силы и нуклон-нуклонные корреляции. Проведен цикл исследований, связанных с применением созданного комплекса программ к анализу рассеяния протонов, нейтронов и  $\alpha$ -частиц на ядрах. Для нескольких ядер проведено сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными для получения физических результатов.

Помимо вычисления угловых распределений дифференциальных сечений рассеяния в программе реализованы расчеты интегральных характеристик распределения вещества и потенциала в ядрах. Впервые исследовано влияние нуклон-нуклонных корреляций обоих типов (обменных и многочастичных) на соотношение между интегральными характеристиками распределения вещества и потенциала в ядрах.

#### Практическая ценность.

Численный анализ экспериментальных данных по упругому и неупругому рассеянию частиц низких энергий на ядрах позволил получить новые физические результаты.

Реализация математического и программного обеспечения полумикроскопического метода связанных каналов позволила решать следующие физические задачи:

- а) анализ влияния учета принципа Паули на сечения упругого и неупругого рассеяния при учете сильной связи каналов реакции (основного и нескольких возбужденных состояний);
- б) анализ влияния плотностной зависимости нуклон-нуклонных эффективных сил на сечения упругого и неупругого рассеяния;
- в) апробация нейтронных компонент переходных плотностей, построенных в рамках полумикроскопических структурных ядерных моделей, для анализа экспериментальных данных по рассеянию протонов, нейтронов и  $\alpha$ -частиц на ядрах;
- г) извлечение информации об изоспиновой структуре неупругих переходов в рассеянии протонов и нейтронов одинаковой энергии на одних и тех же ядрах, а также протонов и  $\alpha$ -частиц;
- д) единое описание упругого и неупругого рассеяния протонов и  $\alpha$ -частиц низких энергий на ядрах.

Разработанные математические схемы могут получить дальнейшее развитие в теории прямых ядерных реакций.

#### Апробация работы

Работы, положенные в основу диссертации, докладывались на 35, 36 и 37 Сессиях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра в 1985, 1986 и 1987 годах соответственно, на Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра (Дубна,

1989 год), на научных семинарах ЛФ и ЛВТА в ОИЯИ, в НИИФ ЛГУ.

#### Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 10 работах, в том числе в журналах Nucl. Phys., ЯФ, Изв. АН СССР, Укр. ФЖ, в препринтах и сообщении ОИЯИ.

#### Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 112 страницы машинописного текста, 15 рисунков, 3 таблицы и приложение.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дается постановка физической задачи, заключающейся в изучении структуры ядра на основе данных, получаемых с помощью прямых ядерных реакций. Новую информацию о структуре ядра и механизме реакций можно получить с помощью анализа экспериментальных данных для дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния частиц низких энергий на ядрах в полумикроскопическом подходе.

Формулируется ряд физических задач, которые можно решать только в рамках полумикроскопического метода связанных каналов.

Дается краткое изложение основных целей работы, описание структуры диссертации по главам.

Первая глава посвящена обзору математических схем, которые используются для вычисления дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния частиц низких энергий на ядрах.

В § 1.1 приводится математическое описание метода искаженных волн (МИВ). В этом методе относительно движение частицы до и после взаимодействия описывается искаженными волнами, которые являются решениями уравнения Шредингера с оптическим потенциалом. МИВ совместно с оптической моделью применим при вычислении упругого и неупругого рассеяния частиц на сферических ядрах при условии слабых связей между основным и возбужденными состояниями. Основная задача МИВ - возможность предсказывать абсолютное сечение прямых ядерных процессов и описывать структуру угловых распределений продуктов ядерных реакций.

В § 1.2 приводится математическое описание метода связанных каналов (МСК) в общем случае. Основная вычислительная задача заключается в решении бесконечной системы линейных дифференциальных уравнений второго порядка для расчетов сечений прямых

ядерных реакций рассеяния частиц на сферических вибрационных и деформированных ядрах:

$$\left[ \frac{\hbar^2}{2\mu} \left( \frac{d^2}{dr^2} - \frac{l_n(l_n+1)}{r^2} \right) + E - \epsilon_n - U(r) \right] f_{n'l_n}^J(r) =$$

$$= \sum_{n',l',j'} \langle \Phi_{I_n j_n}^{JM} | \ddot{U} | \Phi_{I_n' j_n'}^{JM} \rangle f_{n'l_n'}^J(r) \quad (1)$$

где  $U(r)$  - центральный оптический потенциал,  $\ddot{U}(\vec{r}, \zeta)$  - взаимодействие, ответственное за неупругие переходы ( $\vec{r}$  - радиус-вектор налетающей частицы относительно центра ядра,  $\zeta$  - внутренние координаты ядра),  $E$  - полная энергия системы частица-ядро,  $\epsilon_n$  - энергии основного и возбужденных состояний ядра, характеризующихся квантовым числом спина  $I_n, j_n$  и  $l_n$  - квантовые числа полного и орбитального моментов частицы,  $f_{n'l_n}^J(r)$  - искомые радиальные волновые функции, являющиеся коэффициентами разложения полной волновой функции системы частица-ядро по собственным функциям  $\Phi_{I_n j_n}^{JM}$  полного углового момента системы  $J$  и его проекции  $M$ ,  $\mu$  - приведенная масса.

В § 1.3 приводится полная математическая схема расчетов дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния частиц низких энергий на деформированных ядрах с возбуждением ротационных состояний в адиабатическом приближении. В этом случае бесконечная система линейных дифференциальных уравнений представляется в более простом виде. Приводится вывод формулы для дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния.

В § 1.4 дается описание математических схем дифференциального итерационного метода для решения системы уравнений (1). Этот метод выгодно использовать для ядер с параметрами деформации  $\beta_2 < 0.25$ , в основном, для вибрационных возбужденных состояний ядра, где он дает значительную экономию памяти и времени, требуемого для счета.

Вторая глава посвящена описанию математических схем для вычисления потенциалов и исследованию сходимости разложений для полумикроскопического потенциала (ПМП) и формфакторов неупругих переходов (ФНП).

В § 2.1 приводится вывод формул для потенциала взаимодействия в макроскопическом подходе.

Предполагается, что взаимодействие, которое испытывает налетающая частица, описывается деформированным потенциалом. Этот потенциал комплексный и включает в себя центральное, спин-орбиталь-

ное и кулоновское взаимодействие. Радиальная зависимость потенциала предполагается в форме Вудса-Саксона и ее производной.

В § 2.2 даются подробные математические схемы для ПМП и ФНП.

В 2.2.1 представлены общие принципы построения полумикроскопического потенциала. Вследствие учета принципа Паули ПМП является нелокальным. При этом (1) превращается в систему интегро-дифференциальных уравнений, что значительно усложняет решение задачи. Поэтому в соответствии с процедурой, изложенной в <sup>\*</sup>, осуществлен переход от нелокального потенциала к локальному:

$$U(\vec{r}) = \int V_D(|\vec{r}-\vec{r}'|) \rho(\vec{r}') d\vec{r}' + \int V_E(|\vec{r}-\vec{r}'|) \rho(\vec{r}, \vec{r}') j_0(k(\vec{r}) \cdot \vec{s}) d\vec{s}; \quad (2)$$

$$\vec{s} = \vec{r}' - \vec{r}$$

$$k^2(\vec{r}) = \frac{2m}{\hbar^2} [E - U(\vec{r}) - V_C(\vec{r})] \quad (3)$$

где  $V_D$  и  $V_E$  - вклады соответственно прямой и обменной частей эффективных нуклон-нуклонных сил в нуклон-нуклонное взаимодействие,  $\rho(\vec{r})$  - плотность распределения вещества в ядре,  $\rho(\vec{r}, \vec{r}')$  - ядерная матрица плотности,  $k(\vec{r})$  - волновой вектор,  $m$  - масса налетающей частицы,  $j_0(k(\vec{r})s)$  - сферическая функция Бесселя, появляющаяся в процедуре локализации;  $V_C(\vec{r})$  - кулоновский потенциал.

Формулы (2), (3) составляют формализм, используя который, можно на основе информации об эффективных нуклон-нуклонных силах, центральной и переходной плотностях построить полумикроскопические ОП и формфакторы неупругих переходов для деформированных ядер.

В 2.2.2 приводятся математические схемы для вычисления полумикроскопических ОП и ФНП для протонов.

В случае взаимодействия протона со сферическим ядром гамильтониан всей системы может быть записан в виде

$$H = T + H_t + V_{diag} + V_{coupl} \quad (4)$$

Здесь  $T$  - оператор кинетической энергии протона,  $H_t$  - гамильтониан ядра-мишени,  $V_{diag}$  - диагональная часть, не вызывающая неупругих переходов оператора взаимодействия протона с ядром-мишенью,  $V_{coupl}$  - часть оператора взаимодействия, обуславливающая связь каналов.

Согласно ПММ, диагональная часть потенциала представляется в виде:

$$V_{diag}(r) = U_d(r) + U_e(r) + U_\rho(r) \quad (5)$$

$$U_d(r) = V^D \int_0^\infty P_0(r') f_{00}(r, r') (r')^2 dr', \quad (6)$$

<sup>\*</sup> Perey F.G., Saxon D.S. - Phys. Lett., 1964, v10B, p. 107-109.

$$U_1(r) = I_{00}(r) \frac{1 + I_{00}(r) \kappa^2(r) I_{01}(r)}{1 - I_{01}(r) \kappa(r)}, \quad (7)$$

$$U_\rho(r) = d \rho_0^2(r), \quad (8)$$

$$I_{\lambda 0}(r) = \frac{1}{n!} V^E \int_0^E f(s) \rho_{\lambda 00}(r, s) j_n(k_0(r)s) s^{n+2} ds, \quad (9)$$

$$k_0(r) = ((2\mu/\hbar^2) [E - U_d(r) - V_C(r)])^{1/2}, \quad (10)$$

$$\rho_{\lambda 00}(r, s) = (4\pi)^{-1/2} \int \rho(\vec{r}, \vec{r}+\vec{s}) Y_{\lambda 0}(\omega_{\vec{r}}) d\omega_{\vec{r}} d\omega_{\vec{s}}, \quad (11)$$

$$\kappa(r) = \frac{\mu}{k_0(r) \hbar^2}. \quad (12)$$

В этих формулах  $U_d(r)$  - обычный фолдинг-потенциал,  $U_e(r)$  - вклад в потенциал от обменных нуклон-нуклонных корреляций (из-за учета принципа Паули),  $U_\rho(r)$  - вклад в потенциал члена, зависящего от плотности распределения вещества в ядре. Константы  $V^D$ ,  $V^E$  и  $d$  характеризуют, соответственно, вклад в эффективное взаимодействие прямого, обменного и зависящего от плотности членов,  $\lambda$ -компонента матрицы плотности обозначена через  $\rho_{\lambda 00}(r, s)$ .

Для взаимодействия нуклонов с вибрационными ядрами на основе ПММ приведено также выражение для  $V_{coupl}(r)$ .

В 2.2.3 приведены математические схемы для вычисления ПМП и ФНП в изоспиновом представлении. Они используются для того, чтобы в явном виде учесть различия в протонных и нейтронных переходных плотностях.

В 2.2.4 даются математические схемы для вычисления полумикроскопического  $\alpha$ -частичного потенциала.

Изучение рассеяния  $\alpha$ -частиц на ядрах - важный источник информации о свойствах ядерной структуры. В то время как при построении нуклонных ОП и ФНП уже давно в явном виде учитываются обменные нуклон-нуклонные корреляции, обусловленные действием принципа Паули, для  $\alpha$ -частиц, взаимодействующих со средними и тяжелыми ядрами, явный учет эффекта однонуклонного обмена в формализме матрицы плотности ограничивался лишь случаями упругого рассеяния. Для построения математической схемы вычисления  $\alpha$ -частичных потенциалов и формфакторов неупругих переходов используется полумикроскопический подход, развитый для решения задач нуклон-ядерного рассеяния.

В § 2.3 приводятся формулы для интегральных характеристик

распределения потенциала и вещества в ядрах: объемные интегралы, среднеквадратичные радиусы и моменты.

Анализ интегральных характеристик дает возможность сравнивать феноменологические потенциалы с микроскопическими, а также сравнивать различные микроскопические модели.

В § 2.4 численно исследуется сходимость разложений для ПМП и ФНП. Приводятся таблицы численных результатов, характеризующих сходимость этих разложений.

Третья глава посвящена описанию общей структуры пакета программ и используемых математических методов для проведения теоретических расчетов и анализа экспериментальных данных по угловым распределениям упруго и неупруго рассеянных частиц низких энергий на ядрах.

В § 3.1 излагаются общие принципы построения созданного автором пакета программ ECIS-SMA. Все расчеты проводились на ЭВМ CDC-6500. Основные проблемы, связанные с реализацией расчетов по ECIS-SMA на этой ЭВМ, сводятся к тому, что оперативная память ЭВМ CDC-6500 во многих случаях бывает недостаточной для численных расчетов, но надежность этой машины значительно выше по сравнению с ЭВМ серии ЕС. Оптимальное решение проблемы нехватки памяти было найдено в разбиении пакета ECIS-SMA на два последовательно загружаемых в ЭВМ программных модуля.

В § 3.2 дается общая структура программного пакета ECIS-SMA, позволяющего помимо расчетов дифференциальных сечений рассеяния как в полумикроскопическом, так и макроскопическом подходах, проводить подгонку некоторых параметров реакции, минимизируя  $\chi^2$  для экспериментальных угловых распределений, а также вычислять интегральные характеристики.

Описано функциональное назначение основных программ, входящих в пакет программ ECIS-SMA.

В § 3.3 приводятся математические методы и алгоритмы численных расчетов уравнения Шредингера (1), которое является краевой задачей Коши для бесконечной линейной системы дифференциальных уравнений второго порядка. В действительности решается конечная система уравнений, ранг которой определяется задаваемой точностью.

Для системы (1) проводится численное интегрирование до некоторой точки  $R_{\max}$ , в которой ядерная часть потенциала пренебрежимо мала, и находится решение с точностью до константы. В точке  $R_{\max}$  производится сшивание решений уравнения (1) с кулоновскими функциями, значения которых находятся путем интегрирования системы линейных дифференциальных уравнений без ядерной части потенциала, исходя из

условия, что при  $r \rightarrow \infty$  кулоновские функции обращаются в нуль.

В § 3.4 описываются алгоритмы метода наискорейшего спуска, используемого для подгонки теоретических угловых распределений дифференциальных сечений к экспериментальным.

В § 3.5 приводятся вычислительные схемы для расчетов протонных полумикроскопических оптических потенциалов и формфакторов неупругих переходов, протонных и нейтронных ПМП и ФНП, а также представлена единая схема вычисления протонных и  $\alpha$ -частичных ПМП и ФНП.

В § 3.6 дается вычислительная схема расчетов интегральных характеристик распределения вещества и потенциала в ядрах. Выбраны две формы представления плотностей распределения вещества в ядрах  $\rho_0(r)$  и переходных плотностей  $\rho_\lambda(r)$ . Для вычисления интегральных характеристик используются значения ПМП и ФНП, рассчитанные по формулам из § 2.1.

Четвертая глава включает в себя результаты методических исследований и анализ экспериментальных данных для угловых распределений сечений упругого и неупругого рассеяния частиц низких энергий на ядрах в полумикроскопическом подходе, а также расчеты интегральных характеристик распределения потенциала и вещества в ядрах.

В § 4.1 на некоторых примерах исследуется поведение полумикроскопических оптического потенциала и формфакторов неупругих переходов в зависимости от энергии налетающих частиц и параметра плотностной зависимости.

Анализируется также форма угловых распределений сечений упруго и неупруго рассеянных налетающих частиц в зависимости от энергии и параметра плотностной зависимости.

В § 4.2 приводятся расчеты и анализ упругого и неупругого рассеяния протонов с энергией 25.6 МэВ на ядрах  $^{94,96,100}\text{Mo}$  в рамках полумикроскопического подхода.

Проведенный анализ показал, что сечения упругого и неупругого рассеяния с возбуждением состояний  $2_1^+$  для всех ядер хорошо описывается одним и тем же значением параметра плотностной зависимости  $d$  эффективного взаимодействия (8).

Проведены также полумикроскопические вычисления во втором порядке ангармонической вибрационной модели. Учет ангармонизма улучшает описание неупругого рассеяния для исследуемых изотопов. Сечения упругого рассеяния мало чувствительны к учету ангармонизма.

В § 4.3 дается единое полумикроскопическое описание рассеяния протонов и нейтронов с энергией 24 МэВ на ядре  $^{116}\text{Sn}$  с учетом различия в распределении протонной и нейтронной плотностей в

изоспиновом представлении. Проведенный нами полумикроскопический анализ дает отношение деформаций  $\beta_n/\beta_p > 1$ . Этот результат согласуется с выводами, полученными в других работах.

В § 4.4 приводится единое полумикроскопическое описание рассеяния протонов и  $\alpha$ -частиц на ядрах.

Изучается рассеяние протонов с энергией 25.05 МэВ и  $\alpha$ -частиц с энергией 104 МэВ на ядре  $^{90}\text{Zr}$ . При данном выборе энергий одни и те же нуклонные ОП и ФНП можно использовать для описания рассеяния протонов и  $\alpha$ -частиц. Анализ результатов показал, что с одним и тем же оптимальным значением параметра  $d$  получено хорошее описание угловых распределений упругорассеянных протонов и  $\alpha$ -частиц.

Для проверки качества построенных полумикроскопических потенциалов рассчитаны сечения упругого рассеяния  $\alpha$ -частиц с различной энергией для ядра  $^{90}\text{Zr}$  и проведено сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными в достаточно широком угловом диапазоне.

Проведенный анализ подтверждает вывод об определяющей роли явного учета обменных корреляций при объяснении эффектов радужного рассеяния.

В § 4.5 проведен анализ интегральных характеристик распределения потенциала и вещества в ядрах.

Приведены таблицы, в которых представлены объемные интегралы, моменты и среднеквадратичные радиусы потенциалов, вычисленные для ядра  $^{58}\text{Ni}$  в интервале энергий нуклона от 10 МэВ до 40 МэВ, а также отношения нормированных квадрупольных и гексадекапольных моментов распределения потенциала и вещества. Показано, что "нарушение" теоремы Сэчлера невелико.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Впервые разработаны математические схемы и алгоритмы для полумикроскопических нейтронных, протонных и  $\alpha$ -частичных потенциалов и формфакторов неупругих переходов в теории реакций упругого и неупругого рассеяния частиц низких энергий на ядрах с учетом обменных и многочастичных нуклон-нуклонных корреляций.

2. Создан комплекс программ, реализующих расчеты трех типов полумикроскопических потенциалов и формфакторов неупругих переходов: а) для анализа рассеяния протонов низких энергий на ядрах; б) для совместного анализа в изоспиновом представлении рассеяния нейтронов и протонов низких энергий на ядрах; в) для совместного анализа рассеяния протонов и  $\alpha$ -частиц низких энергий на ядрах.

3. Проведено исследование сходимости разложений, используемых

в математических выражениях для полумикроскопических потенциалов и формфакторов неупругих переходов.

4. В рамках созданной теории полумикроскопического подхода впервые разработано программное вложение для пакета ECIS-SMA, позволившее решать широкий круг новых физических задач.

5. Выполнены численные методические расчеты для изучения полумикроскопических оптических потенциалов и формфакторов неупругих переходов, а также дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния частиц на ядрах в рамках полумикроскопического подхода.

6. На основе созданных программ проведен анализ экспериментальных данных по упругому и неупругому рассеянию протонов с энергией 25.7 МэВ на ядрах  $^{96,100}\text{Mo}$ , нейтронов и протонов с энергией 25 МэВ на ядре  $^{116}\text{Sn}$ , протонов с энергией 25.05 МэВ и  $\alpha$ -частиц с энергией 104 МэВ на ядре  $^{90}\text{Zr}$ . К рассеянию протонов и  $\alpha$ -частиц на ядре  $^{90}\text{Zr}$  применена единая модель. Показано, что во всех случаях хорошее описание угловых распределений рассеянных частиц получается с одним и тем же эффективным нуклон-нуклонным взаимодействием.

7. По программе ECIS-SMA проведен расчет для изотопов  $^{96}\text{Mo}$  и  $^{100}\text{Mo}$ , проанализирована фоновая структура нижних возбужденных состояний. Получена информация о различиях в деформации протонного и нейтронного распределений в ядрах  $^{90}\text{Zr}$  и  $^{116}\text{Sn}$ . Эти выводы согласуются с выводами других ядерных моделей. В расчетах сечений неупругого рассеяния протонов и  $\alpha$ -частиц на ядре  $^{90}\text{Zr}$  использованы переходные плотности, построенные в полумикроскопической ядерно-структурной фоновой модели, что позволило провести апробацию их нейтронных компонент.

8. Для рассеяния  $\alpha$ -частиц с энергией 59 МэВ на ядре  $^{90}\text{Zr}$  приведены результаты анализа влияния учета принципа Паули и многочастичных нуклон-нуклонных корреляций, моделируемых плотностной зависимостью эффективных сил, на сечения упругого и неупругого рассеяния. Показано, что без их учета ухудшается согласие с экспериментом.

9. Вычислены интегральные характеристики распределения вещества и потенциала в ядре: объемные интегралы, среднеквадратичные радиусы и моменты. Проанализировано отклонение отношения нормированных мультипольных моментов распределения вещества и потенциала от значения, предсказываемого теоремой Сэчлера, и показано, что отклонение невелико.

10. Анализ, проведенный для сечения упругого рассеяния  $^{90}\text{Zr}$ , подтверждает определяющую роль явного учета обменных корреляций в объяснении эффектов радужного рассеяния, ранее показанную в других работах.

В приложении дается "Руководство пользователя пакета про-

грамм ECIS-SMA", в котором подробно излагается, каким образом нужно готовить пакеты входной информации для ECIS-SMA, описывается функциональное назначение вводимых параметров.

Работы, положенные в основу диссертации

1. О. М. Князьков, И. Н. Кухтина, П. П. Зарубин, Э. Фретвурст, Г. Линдштрем, К. Ф. фон Реден, В. Рих. Эффекты сильной связи каналов при рассеянии протонов с энергией 25.6 МэВ на изотопах  $^{94,96,100}\text{Mo}$  в полумикроскопическом описании. Изв. АН СССР, сер. физ., 1986, т. 50, с. 157-159.
2. О. М. Князьков, И. Н. Кухтина, Г. А. Феофилов. Тезисы докл. 36 Совещ. по структ. ат. яд. и ядерн. спектроск. Л., 1986, с. 284.
3. О. М. Князьков, И. Н. Кухтина. Применение полумикроскопического метода связанных каналов к описанию рассеяния протонов низких энергий на ядрах. Препринт ОИЯИ Р4-84-520, 1984/яФ, 1985, т. 42, с. 615-621.
4. О. М. Князьков, И. Н. Кухтина. Единое полумикроскопическое описание протонов и нейтронов с энергией 24 МэВ на ядре  $^{116}\text{Sn}$ . Препринт ОИЯИ Р4286-369, Дубна, 1986 / яФ, 1987, т. 45, с. 1604-1609.
5. Э. Фретвурст, Г. Линдштрем, К. Ф. фон Реден, В. Рих, О. М. Князьков, И. Н. Кухтина, П. П. Зарубин. Анализ упругого и неупругого рассеяния протонов на ядрах  $^{94,96,100}\text{Mo}$  в макроскопическом и полумикроскопическом подходах. Укр. ФЖ, 1987, т. 32, с. 815-821.
6. О. М. Князьков, И. Н. Кухтина. О сходимости разложений для полумикроскопических потенциалов и формфакторов неупругих переходов. Сообщение ОИЯИ Р4-88-306, Дубна, 1988.
7. Дао Тиен Кхоа, О. М. Князьков, И. Н. Кухтина, Г. А. Феофилов. Единое полумикроскопическое описание рассеяния протонов и  $\alpha$ -частиц низких энергий на ядрах. ЯФ, 1989, т. 50, с. 80-90.
8. О. М. Knyazkov, I. N. Kuchtina. The Nucleon-nucleon Correlations and Integral Characteristics of the Potential Distributions in Nuclei. Preprint JINR E4-89-267, Dubna, 1989.
9. Dao Tien Khoa, I. N. Kuchtina, O. M. Knyazkov, G. A. Feofilov. Proc. Intern. Conf. on Selected Problems in Nucl. Structure, Dubna, 20-24 June 1989, p. 73.
10. E. Fretwurst, G. Lindstrem, R. P. von Reden, V. Riech, S. I. Vasiljev, P. P. Zarubin, O. M. Knyazkov, I. N. Kuchtina. Scattering of 25.6 MeV Protons on  $^{94}\text{Mo}$ ,  $^{96}\text{Mo}$  and  $^{100}\text{Mo}$ . Nucl. Phys., 1987, v. A468, p. 247-284.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 января 1990 года.