

Л-844

81648

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

11-2007-57

На правах рукописи
УДК 519.6, 517.9

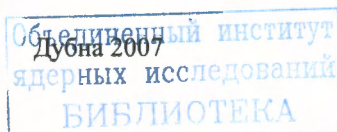
ЛУКЬЯНОВ
Константин Валерьевич



ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСКОПИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ЯДРО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
ПРИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЯХ

Специальность: 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории информационных технологий
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук Поляньски Александр

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Севастьянов Леонид Антонович

доктор физико-математических наук Гончаров Сергей Анатольевич


Ведущая организация: Научно-исследовательский институт физики им. В.А. Фока СПбГУ, г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «25» мая 2007г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д720.001.04 в Лаборатории информационных технологий Объединенного института ядерных исследований по адресу: г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан «19» апреля 2007г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

 З.М.Иванченко

Актуальность проблемы

Моделирование ядро-ядерных взаимодействий является актуальной задачей, связанной как с решением фундаментальных проблем современной физики, так и с прикладными исследованиями в области ядерной энергетики. К таковым можно отнести изучение механизмов взаимодействия ядер в области низких энергий столкновения порядка десятков МэВ на нуклон падающего ядра, знание которых может помочь выбрать оптимальные условия по энергии и составу сталкивающихся ядер для получения цепочек сверхтяжелых нуклидов на границе области их стабильности и поиска “островов стабильности” за пределами этих границ [1]. При промежуточных энергиях порядка сотен МэВ/нуклон важным является создание вычислительных программ моделирования механизма взаимодействия ядер (каскадно-испарительная модель [2], ядерная модель квази-молекулярной динамики и др.), расчета сечений рассеяния, полных сечений реакций и фрагментации ядер, что в свою очередь необходимо для разработки ряда систем ядерной энергетики, включая электро-ядерные установки и установки для преобразования радиоактивных материалов в радиационно безопасные продукты. При высоких и сверхвысоких энергиях столкновения ядер ставятся задачи изучения свойств ядерного вещества в условиях сильного сжатия и высокой температуры, включая поиски фазовых переходов нуклон-мезонной составляющей в состоянии кварк-глюонной материи и фазы с восстановленной киральной симметрией (см., например, [3]).

Тема предлагаемой диссертации относится к моделированию процессов взаимодействия ядер при промежуточных энергиях столкновения. Здесь в качестве основы изучения механизма столкновения ставится задача исследования упругого и неупругого рассеяния ядер, процессов, наиболее чувствительных к геометрическим размерам ядер и потенциалу их взаимодействия. И что более существенно, эти процессы весьма чувствительны к внутренней структуре ядер (например, плотности распределения нуклонов в ядрах) и к характерным свойствам нуклон-нуклонных взаимодействий в ядерном веществе, когда в области перекрытия ядер достигается плотность вплоть до удвоенной плотности ядерного вещества. Так, одним из фундаментальных достижений последнего времени в этой области

является открытие протяженных “хвостов” (гало) в распределениях нейтронной и протонной плотности легких радиоактивных ядер, которые далеко выступают за пределы их характерных радиусов $R \sim A^{1/3}$ [4]). А детальное изучение дифференциальных сечений упругого рассеяния альфа-частиц и ядер p -оболочки с ядрами привело к необходимости вводить эффективные нуклон-нуклонные силы, зависящие от плотности ядерной среды и энергии столкновения ядер [5, 6].

Для получения такого рода информации о структуре ядер и ядерной материи требуется детальное знание механизма их взаимодействия и, в первую очередь, построение ядро-ядерных оптических потенциалов, а также математическое моделирование на этой основе наблюдаемых характеристик взаимодействия. Надо отметить, что традиционная оптическая модель рассеяния нуклонов и альфа-частиц ядрами, которая вводит макроскопический многопараметрический комплексный потенциал взаимодействия $U_{opt}(r) = V(r) + iW(r)$, не справляется с такой задачей. Более того, при ее обобщении на случай ядро-ядерного взаимодействия она сталкивается с серьезной трудностью неоднозначности параметров потенциала. Дело в том, что сама проблема поиска оптимального ряда значений параметров задачи на основе χ^2 -подгонки к ограниченному набору экспериментальных данных относится к классу некорректно поставленных задач и требует для своего решения введения, вообще говоря, внешних (физически обоснованных) ограничений на пределы возможных изменений искомых функций [7]. В условиях постановки, когда необходима подгонка феноменологических потенциалов с явно не определенными ограничениями их формы и области изменения самих параметров, получается ряд разных наборов параметров, которые равноэквивалентны в смысле полученных значений χ^2 [8]. Выход из положения естественно искать в построении микроскопических моделей взаимодействия ядер, построенных на основе уже полученных из независимых экспериментов данных, таких как функции распределения плотности ядер и потенциалы нуклон-нуклонного взаимодействия.

В настоящее время имеется достаточно хорошо разработанная полумикроскопическая модель оптического потенциала. В ней вещественная часть рассчитывается на основе микроскопической модели двойного фолдинга (МДФ) [9, 10], а мнимая часть $W(r)$ остается феноменологической и выбирается обычно в типичной форме вуд-

саксоновского потенциала с тремя или более параметрами. Таким образом, та часть задачи, которая связана с необходимостью подгонки параметров мнимого потенциала, остается до конца нерешенной.

Естественно попытаться построить на микроскопической основе также и мнимую часть потенциала. Здесь весьма глубокие исследования были проведены в работах [11] (там же другие ссылки). Однако их практическая реализация упирается в значительные трудности, связанные с необходимостью учитывать в расчетах информацию о всех других каналах реакций, например, о реакциях передачи нуклонов ядрами, о реакциях фрагментации ядер и других. С другой стороны, здесь можно использовать как основу микроскопическую теорию многократного дифракционного рассеяния (МДР) Глаубера и Ситенко [12, 13], которая опирается на высокоэнергетическое (эйкональное) приближение теории рассеяния (ВЭП), и которая в так называемом оптическом пределе приводит к явным выражениям для фазы, амплитуды и сечения рассеяния. В этом плане остается сделать необходимый шаг и попытаться построить в рамках ВЭП не только фазу, но и потенциал ядро-ядерного рассеяния. А поскольку для ВЭП-фазы известно как ее определение через потенциал, так и выражение на микроскопической основе МДР, то адекватный микроскопический оптический потенциал должен содержать и вещественную и мнимую часть одновременно.

Решению этой актуальной задачи – построению модели микроскопического оптического потенциала ядро-ядерного взаимодействия, разработке программного обеспечения для его расчета, а также численному анализу на этой основе имеющегося экспериментального материала, – посвящена данная диссертация.

Цели работы:

1. В рамках микроскопической модели ВЭП получить выражения для вещественной и мнимой части оптического ядро-ядерного потенциала. Разработать аналитическую базу для расчета ВЭП- и МДФ-потенциалов.
2. Разработать комплекс программ для вычисления микроскопического ядро-ядерного потенциала с учетом современных представлений об эффективных нуклон-нуклонных

потенциалах взаимодействия. Провести тестовые расчеты с целью проверки достоверности, оценки точности, выбора вычислительных параметров.

3. На основе разработанного метода и комплекса программ рассчитать микроскопические потенциалы взаимодействий стабильных ядер и экзотических нейтронно-избыточных ядер со стабильными ядрами. Выполнить численное исследование микроскопической модели ядро-ядерных взаимодействий, объединяющей ВЭП- и МДФ-потенциалы в применении к упругому и неупругому рассеянию ядер.
4. Путем сопоставления рассчитанных наблюдаемых характеристик с имеющимися экспериментальными данными и расчетами в рамках других подходов оценить применимость указанной модели для описания ядро-ядерных взаимодействий при энергиях в диапазоне 10-100 МэВ на нуклон налетающего ядра.

Новизна работы

Разработан новый метод построения микроскопических оптических потенциалов на основе подхода, объединяющего ВЭП и МДФ. Сделано обобщение микроскопической модели в рамках ВЭП на случай неупругого рассеяния ядер. С использованием разработанных методов и комплекса программ впервые проведено численное исследование микроскопической модели оптического потенциала, объединяющей МДФ и ВЭП: рассчитаны микроскопические потенциалы двойного фолдинга; рассчитаны наблюдаемые характеристики ядро-ядерных взаимодействий при промежуточных энергиях; проведено сравнение с данными экспериментов и расчетами в рамках других подходов.

Практическая ценность работы

В результате численного исследования продемонстрирована применимость моделей микроскопического оптического потенциала для описания основных характеристик ядро-ядерных взаимодействий. Показано, что рассчитанные потенциалы обеспечивают согласие с имеющимися экспериментальными данными. Разработанный метод и комплекс программ для расчета потенциала двойного фолдинга, может быть использован для решения других задач. Модель применима также

и для нуклон-ядерных взаимодействий, например, для моделирования упругого рассеяния протонов на нейтронно-избыточных изотопах гелия.

Апробация работы и публикации

Основные положения работы докладывались на конференциях: 56-я Межд. конф. по проблемам ядерной спектроскопии и структуре ядра (4-9 сентября 2006г., Саров); Межд. симпозиум по экзотическим ядрам EXON-2006 (Ханты-Мансийск, 17-22 июля 2006г.); 25th Int. Workshop on Nuclear Theory (June 26 - July 1, 2006, Rila Mountains, Bulgaria); X Научная конференция молодых ученых и специалистов (Дубна, 6-11 февраля 2006г.); 17 Межд. Балдинский семинар по проблемам физики высоких энергий (7 сентября - 1 октября, Дубна, 2004); на семинарах в ЛИТ и ЛЯР ОИЯИ. Основные результаты исследований, лежащих в основе диссертации, опубликованы в сборниках указанных конференций, в препринтах ОИЯИ и в журналах: "Письма в ЭЧАЯ", "Ядерная физика", "Известия РАН". По материалам диссертации опубликовано 10 работ.

Личный вклад автора

Автор диссертации в сотрудничестве с коллегами и соавторами из ОИЯИ и других (российских и зарубежных) научных центров участвовал в математической постановке рассмотренных в диссертации задач, в разработке методов численного исследования, в анализе точности и достоверности получаемых численных результатов, в их физической интерпретации.

Комплекс программ для расчета микроскопического ядро-ядерного потенциала МДФ создан автором. Все представленные в диссертации численные результаты получены с определяющим вкладом автора в разработку методов и программ и в проведение численного анализа.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из Введения, 4 глав и Заключения, содержит 98 страниц машинописного текста, включая 25 рисунков, 11 таблиц и библиографию из 72 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении обосновывается актуальность использования микроскопических моделей ядро-ядерного взаимодействия. Показана перспективность создания математических моделей построения ядро-ядерных потенциалов, не использующих феноменологические параметры. Определен круг задач, к которым может быть применена модель. На этой основе формулируются цели работы и указывается, в чем заключается новизна и научно-практическая значимость диссертации.

В первой главе излагается микроскопическая модель для расчета оптического ядро-ядерного потенциала, объединяющая подходы ВЭП и МДФ. Движение налетающего ядра с кинетической энергией E в поле потенциала U описывается уравнением Шредингера

$$\frac{\hbar^2}{2\mu}\Delta\Psi + (E - U(\Psi))\Psi = 0, \quad (1)$$

где U есть комплексный (оптический) потенциал $U = V + iW$, $\mu = m\frac{A_1A_2}{A_1+A_2}$ – приведенная масса, m – масса нуклона, A_1, A_2 – атомные веса сталкивающихся ядер, \hbar – постоянная Планка. Это уравнение нелинейное, поскольку потенциал зависит от Ψ . Обычно задачу упрощают и сводят проблему к построению микроскопического потенциала с учетом линейных членов по нуклон-нуклонному NN-потенциалу v_{NN} , с последующим численным решением уравнения (1) на базе полученного таким образом потенциала $U(r)$.

Для вещественной части искомого потенциала используется модель двойного фолдинга (МДФ) [9],[10]. Мнимую часть потенциала, а также (как вариант) и вещественную часть, можно получить [A1] в микроскопической ВЭП теории рассеяния: $U_{opt} = V^H + iW^H$, который адекватно воспроизводит фазу микроскопической теории рассеяния в её оптическом пределе [12,13].

Сочетание моделей МДФ для вещественной части V^F и ВЭП для мнимой части W^H позволяет исключить феноменологические параметры формы потенциала, а также получить его явную зависимость от E, Z и A взаимодействующих ядер. Для ВЭП-потенциала имеем [A1]:

$$V^H(r) = -\frac{\hbar v}{(2\pi)^2}\bar{\sigma}_{NN}\bar{\alpha}_{NN}\int_0^\infty\rho_1(q)\rho_2(q)f_N(q)j_0(qr)q^2dq \quad (2)$$

$$W^H(r) = -\frac{\hbar v}{(2\pi)^2}\bar{\sigma}_{NN}\int_0^\infty\rho_1(q)\rho_2(q)f_N(q)j_0(qr)q^2dq. \quad (3)$$

Здесь $\rho(q)$ – формфакторы (фурье-образы) плотности точечных нуклонов ядер, а $f_N(q)$ – амплитуда NN-рассеяния. Величины $\bar{\sigma}_{NN}$ и $\bar{\alpha}_{NN}$ есть усредненные по изоспинам ядер полное сечение NN-рассеяния и отношение действительной к мнимой части амплитуды NN-рассеяния вперед. Значения этих величин известны из независимых экспериментов.

В рамках МДФ вещественный потенциал $V^F(r)$ строится как интеграл перекрытия (фолдинга) эффективного нуклон-нуклонного взаимодействия v_{NN} (с учетом фактора $F(\rho) = C(1 + \alpha e^{-\beta\rho} + \gamma\rho)$ влияния ядерной среды) и распределения плотности точечных нуклонов в ядре 1 и 2 $\rho_{1,2}$ вида:

$$V(\mathbf{r}) = \int\rho_1(\mathbf{r}_1)v_{NN}(s)\rho_2(\mathbf{r}_2)d^3r_1d^3r_2, \quad \mathbf{s} = \mathbf{r} + \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1. \quad (4)$$

и состоит из нескольких слагаемых

$$V^F = V^D + V^{EX} = (V_{IS}^D + V_{IV}^D) + (V_{IS}^{EX} + V_{IV}^{EX}). \quad (5)$$

Здесь V^D потенциал прямого фолдинга, как он задан выражением (4), а V^{EX} – потенциал с учетом нуклонного обмена. Каждый из них разбивается на изоскалярную (IS) и изовекторную (IV) части.

В главе даны математические выкладки, приводящие потенциал V^F к аналитическому виду, пригодному для дальнейшего численного исследования. Так, изоскалярный потенциал V_{IS}^D принимает вид:

$$V_{IS}^D(r) = \frac{Cg(E)}{2\pi^2}\int_0^\infty\left\{\rho_1(q)\rho_2(q) + \alpha\bar{\rho}_1(q)\bar{\rho}_2(q) - \gamma\left[\bar{\rho}_1(q)\rho_2(q) + \rho_1(q)\bar{\rho}_2(q)\right]\right\}v_{00}^D(q)j_0(qr)q^2dq, \quad (6)$$

куда входят фурье-образы (формфакторы) соответствующих подынтегральных функций $\rho_{1,(2)}, \rho_{1,(2)}e^{-\beta\rho_{1,2}}$ и $\rho_{1,(2)}\rho_{1,2}$.

Изоскалярная часть обменного потенциала определяется выражением

$$V_{IS}^{EX}(\mathbf{r}) = \int\rho_1(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1 + \mathbf{s})\rho_2(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_2 - \mathbf{s}) \times g(E)F(\rho)v_{00}^{EX}(s)j_0(K(r)s/M)d^3r_1d^3r_2. \quad (7)$$

Здесь $\rho(\mathbf{r}_a, \mathbf{r}_b)$ – смешанная одночастичная матрица плотности точечных нуклонов, которую аппроксимируют как

$$\rho(\mathbf{r}, \mathbf{r} \pm \mathbf{s}) \simeq \rho(\mathbf{r} \pm \frac{\mathbf{s}}{2}) \hat{j}_1(k_F(|\mathbf{r} \pm \frac{\mathbf{s}}{2}|) \cdot \mathbf{s}), \quad (8)$$

где $\hat{j}_1(x) = \frac{3}{x} j_1(x) = \frac{3}{x^3}(\sin x - x \cos x)$. Искажение нуклонных волновых функций в ядерном поле приближенно учитывается с помощью замены импульса свободного движения на локальный импульс

$$K(r) = [(2mM/\hbar^2)(E_{c.m.} - V(r) - V_C(r))]^{1/2}, \quad (9)$$

где $V(r)$ – потенциал, который включает прямую V^D и обменную часть V^{EX} , а $M = A_1 A_2 / (A_1 + A_2)$. Как видно, импульс $K(r)$ сам зависит от потенциала, т.е. задача (7) является нелинейной.

После ряда преобразований для изоскалярной части обменного потенциала получаем нелинейное интегральное уравнение:

$$V_{IS}^{EX}(r) = 4\pi C g(E) \int_0^\infty G(r, s) v_{00}^{EX}(s) j_0(K(r)s/M) s^2 ds, \quad (10)$$

где

$$G(r, s) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty \left\{ h_1(q, s) h_2(q, s) + \alpha y_1(q, s) y_2(q, s) - \right. \\ \left. - \gamma [h_1(q, s) z_2(q, s) + z_1(q, s) h_2(q, s)] \right\} j_0(qr) q^2 dq, \quad (11)$$

а выражения для h, y, z даны в [A2], и $K(r)$ определяется (9).

Приводятся все необходимые выражения для вещественной V^F части МДФ-потенциала наряду с V^H и W^H ВЭП-потенциалами, а также эффективные NN -потенциалы в виде суммы потенциалов Юкавы.

Рассмотрено обобщение потенциалов на случай неупругого взаимодействия, где вычисляются переходные потенциалы фолдинга, для чего вместо плотности ядра ρ под интегралы фолдинга вводятся переходные плотности $rd\rho/dr$. Приведены аналитические выражения для известных параметризаций функций плотности.

Вторая глава посвящена методу расчета микроскопических потенциалов. Излагается итерационный метод вычисления МДФ потенциала на основе формул главы 1, дано описание программы DFM-POT, представлены результаты тестовых расчетов [A2].

Предварительный анализ показывает, что $V(r) \rightarrow 0$ при $r \gg 2\tilde{R}$, где $\tilde{R} \sim A_1^{1/3} + A_2^{1/3}$. Это обеспечивает возможность перехода от полубесконечных интервалов интегрирования к численному интегрированию на конечном отрезке $[R_{min}, R_{max}]$, $R_{min} \rightarrow 0$, что подтверждается тестовыми расчетами на последовательности расширяющихся интервалов интегрирования.

Расчет прямого потенциала МДФ, а также потенциалов ВЭП сводится к вычислению соответственно интегралов (6) и (2),(3). В расчетах использована равномерная дискретная сетка с шагом h ; численное интегрирование проводилось с помощью квадратурной формулы Симпсона [14].

Основную трудность представляет численное решение нелинейного интегрального уравнения (9)-(11) для вычисления обменного потенциала. В наших расчетах для решения этого уравнения используется метод последовательных приближений [14].

На первом итерационном шаге в качестве начального приближения $V_0(R_{min})$ в формуле (9) будем использовать прямой потенциал $V^D(R_{min})$. После первой итерации получаем приближенное значение $V_1^{EX}(R_{min})$. Далее, это значение уточняется путем подстановки на каждой k -й итерации в формулу (9) значения

$$V_k(R_{min}) = V^D(R_{min}) + V_{k-1}^{EX}(R_{min}) \quad (12)$$

до тех пор, пока не будет выполнено неравенство

$$V_k^{EX}(R_{min}) - V_{k-1}^{EX}(R_{min}) \leq \varepsilon, \quad \varepsilon > 0. \quad (13)$$

Таким образом, получаем значение $V^{EX}(R_{min})$. Теперь, учитывая, что $V^{EX}(r)$ является гладкой функцией, т.е.

$$V^{EX}(r_n) - V^{EX}(r_{n-1}) \leq \varepsilon, \quad r_n - r_{n-1} \leq \delta, \quad (14)$$

при достаточно малом шаге равномерной дискретной сетки по r значения $V^{EX}(r)$ в двух соседних точках r_{n-1} и r_n являются близкими. Это позволяет в формуле (9) для каждого следующего узла сетки r_n использовать в качестве начального приближения

$$V_0(r_n) = V^D(r_n) + V^{EX}(r_{n-1}). \quad (15)$$

Уточняя это значение с помощью уже описанной для R_{min} итерационной процедуры, получаем для каждого узла с номером n

$$V_k(r_n) = V^D(r_n) + V_{k-1}^{EX}(r_n) \quad (16)$$

и, в конечном итоге, значение $V^{EX}(r_n)$ для каждого узла r_n дискретной сетки.

Итерации продолжается до выполнения соотношения, аналогичного (13). При малых значениях радиуса $r \ll R$ для выполнения соотношения (13) с $\epsilon = 0.001$, как правило, требуется $k \simeq 20$ итераций. Для $r \simeq R$ сходимость достигается при $k \simeq 5$. Для вычисления производных в формулах для локального импульса Ферми $k_F(r)$ используются трехточечные конечно-разностные формулы из [15].

Программа DFM-POT, реализующая построение ядро-ядерного потенциала на основе МДФ, написана на языке C++. Для проверки правильности ее работы проводилось сравнение рассчитанных потенциалов с численными результатами других авторов, а также тестовые расчеты на последовательностях сгущающихся сеток и расширяющихся интервалов интегрирования [A2].

В программе предусмотрена возможность работы с функцией распределения плотности ядерной материи, заданной как в аналитическом виде, так и в виде таблицы, которая вводится с внешнего носителя. Реализована возможность расчетов с использованием NN-потенциалов двух типов, наиболее применяемых в литературе.

Время расчета ядро-ядерного потенциала МДФ составляет, в зависимости от энергии, атомной массы сталкивающихся ядер и выбранных параметров вычислительной схемы, от нескольких минут для столкновений легких ядер при низких энергиях порядка 100 МэВ до нескольких часов при больших атомных числах сталкивающихся ядер и энергиях столкновения порядка 1000-1500 МэВ на ПЭВМ класса *Pentium - IV*.

В третьей главе приводятся результаты моделирования упругого и неупругого рассеяния ядер ядрами при энергиях порядка 100 МэВ на нуклон налетающего ядра с использованием изложенной модели построения потенциалов.

Расчет дифференциальных сечений упругого рассеяния ^{16}O на ядре кальция при энергии 94 МэВ/нуклон проводился с использованием потенциала, рассчитанного с помощью программы DFM-POT на основе модели двойного фолдинга. Использовался эффективный парижский NN-потенциал CDM3Y6 из [10], в качестве плотности распределения ядерной материи в ядрах использована симметризованная ферми-функция.

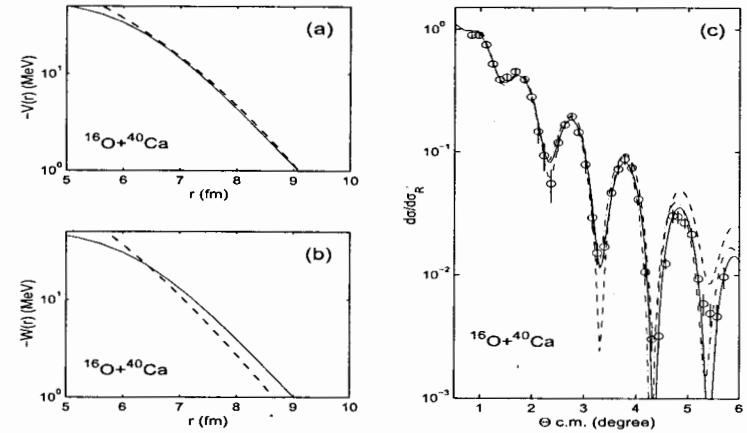


Рис. 1: (а) и (б) – потенциалы МДФ и ВЭП (штрихи) в сравнении феноменологическим потенциалом Вудса-Саксона, параметры которого подогнаны под эксперимент в [16] (сплошные). (с) Дифференциальные сечения упругого рассеяния $^{16}\text{O}+^{40}\text{Ca}$, $E_{lab} = 1503$ МэВ в отношении к резерфордским, рассчитанные с потенциалом Вудса – Саксона (сплошные), микропотенциалом $U = V^F + iW^H$ (штрихи), а также с перенормированным потенциалом $U = V^F + i0.88V^F$ (штрихпунктир).

На рис. 1 (а) и (б) штриховыми кривыми показаны соответственно потенциал МДФ V^F и потенциал ВЭП W^H . Видно, что в области экспоненциального спада микроскопические потенциалы согласуются с шестипараметрическим потенциалом Вудса-Саксона (сплошные кривые) с подогнанными под эксперимент параметрами [16].

На рисунке 1 (с) представлены отношения дифференциальных сечений упругого рассеяния к резерфордскому, рассчитанные для микроскопического потенциала $U = V^F + iW^H$ (штрихи). Расчет сечений проведен с использованием программы ECIS, реализующей метод связанных каналов [17]. При расчете амплитуды и дифференциальных сечений использовалась релятивистская кинематика. Согласие с экспериментом в рамках микроскопического подхода можно улучшить путем включения факторов, перенормирующих глубину вещественной и/или мнимой части микропотенциала. На рис. 1 (с) штрихпунктирной кривой показаны расчеты с потенциалом в форме $U = V^F + iN_iV^F$. Значение фактора N_i для ^{40}Ca оказалось равным 0.88. Значения χ^2 на точку при использовании шестипараметрического потенциала

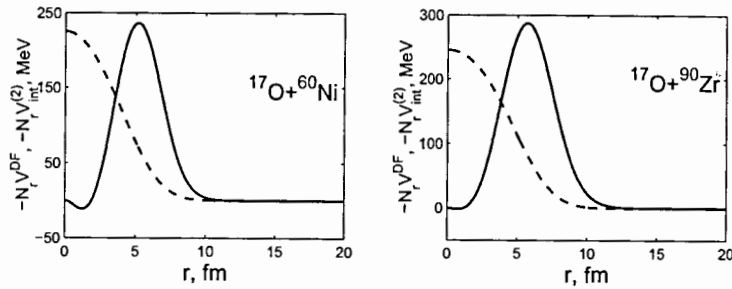


Рис. 2: Вещественная часть потенциалов $N_r V^F(r)$ упругого (штриховые кривые) и $N_r V_{int}^{(2)}(r)$ неупругого (сплошные) ядро-ядерного взаимодействия, рассчитанная для рассеяния тяжелых ионов ^{17}O на ядрах-мишенях никеля и циркония при $E_{lab} = 1435$ МэВ. $N_r = 0.6$.

Вудса-Саксона составляет 1.28; в случае микроскопического потенциала $U = V^F + iW^H$ без свободных параметров получаем $\chi^2 = 2.02$; для перенормированного потенциала $U = V^F + i0.88V^F$ имеем $\chi^2 = 1.48$.

Проведены аналогичные расчеты МДФ- и ВЭП-потенциалов и дифференциальных сечений упругого рассеяния ^{16}O на ядрах циркония и свинца, а также для рассеяния ^{17}O на ядрах никеля, циркония, олова и свинца [A1],[A3]-[A6]. Показано, что микроскопический подход обеспечивает согласие с экспериментальными данными без использования свободных параметров. Это согласие улучшается, если вводить один или два параметра, перенормирующих глубины вещественной и мнимой части рассчитанных микроскопических потенциалов.

Обобщение метода построения потенциалов МДФ на случай неупругого рассеяния [A7],[A8] позволило рассчитать дифференциальные сечения неупругого рассеяния ^{17}O на различных ядрах-мишенях при энергии 84 МэВ на нуклон с возбуждением в них низколежащего вращательного 2^+ -уровня. Некоторые из численных результатов представлены на рис. 2 и 3. На рис. 2 для ядер-мишеней никеля и свинца штриховыми кривыми показаны потенциалы МДФ, полученные в [A3]-[A5] для упругого рассеяния в форме $N_r V^F + iN_i V^F$. Коэффициенты перенормировки N_r и N_i подогнаны под экспериментальные данные [18] по упругому рассеянию. $N_r = N_i = 0.6$ для ^{60}Ni ; $N_r = 0.6$ $N_i = 0.5$ для ^{90}Zr . Сплошными

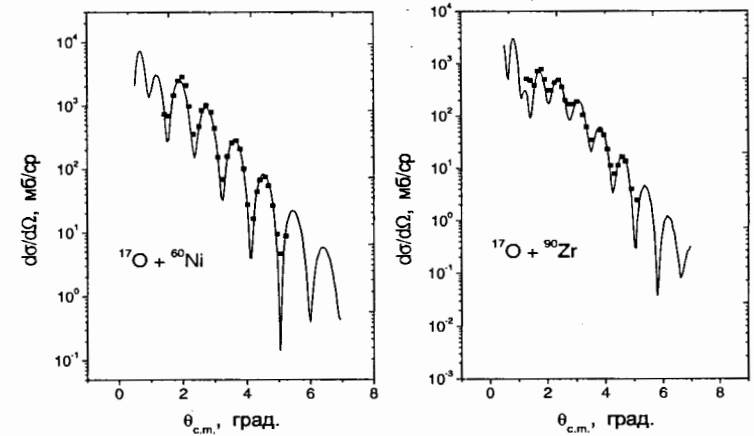


Рис. 3: Дифференциальные сечения неупругого рассеяния ^{17}O на ядрах никеля и циркония при $E_{lab} = 1435$ МэВ с потенциалом МДФ. Параметр деформации β_2 равен 0.4 и 0.14 соответственно для ^{60}Ni и ^{90}Zr .

кривыми показаны переходные потенциалы, рассчитанные по формулам главы 1 с помощью программы DFM-POT, описанной в главе 2. Рис. 3 демонстрирует соответствующие дифференциальные сечения неупругого рассеяния ^{17}O на ядрах ^{60}Ni и ^{90}Zr . Представленный здесь расчет сделан в рамках ВЭП [A7],[A8] с параметром деформации β_2 0.4 и 0.14 соответственно для ^{60}Ni и ^{90}Zr . Экспериментальные данные взяты из [18].

Четвертая глава посвящена микроскопическому анализу полных сечений реакций изотопов ядер ^6He и ^6Li с ядром ^{28}Si при энергии 5-50 МэВ нуклон. Цель исследования состояла в сравнительном численном анализе, на основе представленного в первой главе подхода, различных моделей плотности распределения ядерной материи в налетающем ядре для оценки их применимости и выбора плотности, позволяющей адекватно воспроизводить имеющиеся экспериментальные данные.

На рис. 4 представлена рассчитанная в [A9],[A10] зависимость полных сечений реакции $^6\text{Li} + ^{28}\text{Si}$ от энергии в сравнении с экспериментальными данными. Для расчета вещественной части потенциала МДФ V^F использовалась программа DFM-POT с парижским NN -потенциалом CDM3Y6. Мнимая часть оптического потенциала рассчитывалась в рамках ВЭП. Расчеты полных сечений проводились на основе численного

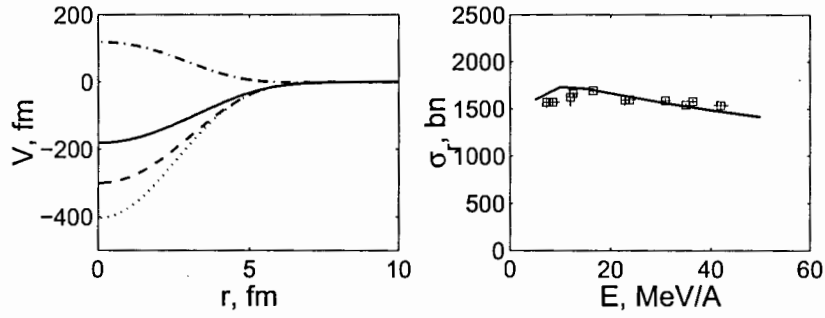


Рис. 4: Полные сечения реакции ${}^6\text{Li}$ с ядром ${}^{28}\text{Si}$ в сравнении с экспериментальными данными (справа). Расчеты сечений проведены с помощью программы DWUCK4 [19]. Используется потенциал $U = V^F + iW^H$. Слева представлены потенциалы V^F (штрих-пунктир: прямая часть V^D , штрихи: обменная часть V^{EX} , сплошная: $V^F = V^D + V^{EX}$) и потенциал ВЭП W^H (пунктир) для энергии $E=30$ МэВ/А.

решения уравнения Шредингера с помощью программы DWUCK4 [19]. Видно, что здесь получается хорошее согласие с экспериментом без введения перенормирующих множителей, т.е. $N_r = N_{im} = 1$.

Расчеты показали, что для случая ${}^6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ согласие с экспериментом обеспечивается не только перенормировкой глубины потенциала, но и включением поверхностного потенциала. Из теории неупругого рассеяния известно, что сечение возбуждения коллективных состояний ядра можно описать введением переходных потенциалов в форме производных от потенциалов упругого рассеяния. Таким образом, в расчеты были включены "поверхностные" потенциалы в виде производных ($-rdV/dr$) от наших микроскопических потенциалов, так что теперь оптические потенциалы приняли вид:

$$U_{opt}(r) = \left[N_r V^F - N_r^{(1)} r \frac{dV^F}{dr} \right] + i \left[N_{im} W^H - N_{im}^{(1)} r \frac{dW^H}{dr} \right], \quad (17)$$

$$U_{opt}(r) = \left[N_r V^F - N_r^{(1)} r \frac{dV^F}{dr} \right] + i \left[N_{im} V^F - N_{im}^{(1)} r \frac{dV^F}{dr} \right], \quad (18)$$

На Рис. 5 демонстрируются результаты вычислений, выполненных для двух типов ядро-ядерных потенциалов. Первый из них (слева) получен для Парижского эффективного NN-потенциала CDM3Y6 с плотностью LSSM [20] ядра ${}^6\text{He}$ и U_{opt} в форме (17). Другой расчет (справа)

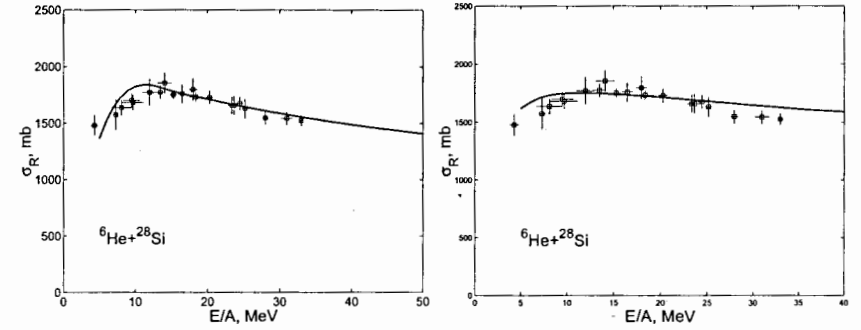


Рис. 5: Результат подгонки четырехпараметрических полумикроскопических потенциалов с "поверхностными" членами к экспериментальным данным по полным сечениям с использованием двух различных микроскопических моделей эффективных NN-сил

выполнен для потенциала U_{opt} в форме (18) с Рейдовским BDM3Y2 [10] NN-потенциалом и с плотностью FDM (метод функционала плотности) [21] для ядра ${}^6\text{He}$. Значения свободных параметров для случая CDM3Y6: $N_r=0.7$, $N_r^{(1)}=0.4$, $N_{im}=0.5$, $N_{im}^{(1)}=0.03$; для случая BDM3Y2 $N_r=1$, $N_r^{(1)}=0.212$, $N_{im}=0.3$, $N_{im}^{(1)}=0.038$. Видно, что путем введения производных удается добиться хорошего согласия с экспериментом в первом случае и качественно описать экспериментальные данные во втором. Микроскопические оптические потенциалы с поверхностными членами вида (17),(18) требуют дальнейшего совершенствования, в частности, увязки $N^{(1)}$ -параметров с вероятностями возбуждения коллективных состояний ядер.

В заключении перечислены основные результаты и выводы, полученные в диссертации, дано их краткое обсуждение.

Результаты, полученные в диссертации

- Представлена микроскопическая модель ядро-ядерного взаимодействия, объединяющая модели двойного фолдинга и высокоэнергетического приближения.
- Создана современная программа для расчета потенциала двойного фолдинга, не содержащая феноменологических параметров, проведены тестовые расчеты для проверки её достоверности и оценки точности.

- На основе вычисленных микроскопических оптических потенциалов вида МДФ и ВЭП проведено численное исследование упругого и неупругого ядро-ядерного рассеяния, сделаны выводы о применимости модели к данному типу задач.
- На основе разработанного подхода проведен численный анализ полных сечений реакций с участием экзотических ядер, сделаны выводы о возможности применения предложенной модели для тестирования вида функций распределения плотностей ядер, предлагаемых различными теориями ядерной структуры.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Оганесян Ю.Ц.* // ЯФ, 2006. Т. 69. С.961.
- [2] *Барашенков В.С., Тонеев В.Д.* Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами М.: Атомиздат, 1972.
- [3] *Sissakian A.N., Sorin A.S., Toneev V.D.* // arXiv:nucl-th/060832
- [4] *Tanihata I. et al.* // Phys. Rev. Lett., 1985. V.55, P.2676.
- [5] *Khoa D.T.* // Phys. Rev. C, 2001. V.63, P.034007.
- [6] *Оглоблин А.А., Гончаров С.А., Чулков Ю.А. и др.* // ЯФ, 2003. Т.66, С.1523.
- [7] *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач М.: Наука, ФМЛ, 1986.
- [8] *Satchler G.R.* Direct Nuclear Reactions (Oxford Univ. Press, Oxford) 1983.
- [9] *Князьков О.М.* // ЭЧАЯ, 1986. Т.17, С.318; *Дао Тьен Кхоа, О.М.Князьков* // ЭЧАЯ, 1990. Т.21, С.1456.
- [10] *Khoa D.T., Satchler G.R.* // Nucl. Phys. A, 2000. V.668, P.3.
- [11] *Sørensen J.H. and Winther A.* // Nucl. Phys. A, 1992. V.550, P.329.
- [12] *Glauber R.J.* Lectures in Theoretical Physics (New York, Interscience, 1959), P.315.
- [13] *Ситенко А.Г.* // Укр. Физ. Журн., 1959. 4, 152.
- [14] *Калиткин Н.Н.* Численные методы. М.: Наука, 1978.
- [15] *Березин И.С., Жидков Н.П.* Методы вычислений, Т.1, М.: Физматгиз, 1959, с.232-233.

- [16] *Roussel-Chomaz P. et al.* // Nucl. Phys. A, 1988. V.477. P.345.
- [17] *Raynal J.* // Phys. Rev. C, 1981. V.23. P.2571.
- [18] *Liguori R. Neto et al.* // Nucl. Phys. A, 1993. V. 560. P.733.
- [19] *Kunz P.D., Rost E.* // Computational Nuclear Physics (Eds: Langanke K. et al.) Springer Verlag, 1993. V.2. P.88
- [20] *Karataglidis S. et al.* // Phys. Rev. C, 2000. V.61. P.024319
- [21] *Князьков О.М., Кухтина И.Н., Фаянс С.А.* // ЯФ, 1998. Т.61. С.287.

АВТОРСКИЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [A1] *Лукьянов В.К., Земляная Е.В., Лукьянов К.В.* Ядро-ядерное рассеяние и оптический потенциал фолдинга. ОИЯИ, Р4-2004-115, Дубна, 2004; ЯФ. 2006. Т.69. С. 262-275.
- [A2] *Лукьянов К.В.* Модель ядро-ядерного потенциала двойного фолдинга: основные формулы, итерационный метод и программа вычисления. ОИЯИ, Р11-2007-38, Дубна, 2007.
- [A3] *Земляная Е.В., Лукьянов В.К., Лукьянов К.В., Словинский Б., Ханна К.* Восстановление оптического потенциала рассеяния при промежуточных энергиях. Изв. РАН сер. физ., 2005. Т. 69, вып. 11. С. 1649-1654.
- [A4] *Hanna K.M., Lukyanov K.V., Lukyanov V.K., Slowinski B., Zemlyanaya E.V.* Restoration of Heavy-Ion Potentials at Intermediate Energies. nucl-th/0410015; Proceedings of the NUPPAC'03 (Egypt, Cairo, October 2003), ENPA, ed. by M.N.H.Comsan, K.M.Hanna. Cairo, 2004, p.26-31
- [A5] *Hanna K.M., Lukyanov K.V., Lukyanov V.K., Slowinski B., Zemlyanaya E.V.* Model for Restoration of Heavy-Ion Potentials at Intermediate Energies. arXiv: nucl-th/0412026; In: "Relativistic nuclear physics and quantum chromodynamics" (Proc. XVII Int. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic Nuclear Physics & Quantum Chromodynamics", September 27 - October 2, 2004, Dubna, Russia) Eds: A.N.Sissakian, V.V.Burov and A.I.Malakhov, Dubna: JINR, 2005, Vol.1, pp.269-279.
- [A6] *Zemlyanaya E.V., Lukyanov K.V., Lukyanov V.K., Kukhtina I.N., Antonov A.N., Hanna K.M., Slowinski B.* Calculations of nucleus-

nucleus microscopic optical potentials and the respective elastic differential and total reaction cross sections. "Nuclear Theory'25" (Proceedings of 25th International Workshop on Nuclear Theory (June 26 - July 1, 2006, Rila Mountains, Bulgaria) ed. S. Dimitrova, Sofia: "Diomira", 2006, pp.301-312.)

- [A7] *Hanna K.M., Lukyanov K.V., Lukyanov V.K., Metawei Z., Slowinski B., Zemlyanaya E.V.* Excitation of Nuclear Collective States by Heavy Ions within the Model of Semi-Microscopic Optical Potential. ArXiv: nucl-th/0511037; Письма в ЭЧАЯ, 2006. Т. 135. N. 6. P.105-112.
- [A8] *Лукьянов К.В., Земляная Е.В., Кухтина И.Н., Лукьянов В.К., Метавей З., Ханна К.М.* Микроскопический подход в неупругом рассеянии тяжелых ионов с возбуждением коллективных состояний ядер. ОИЯИ, Р4-2007-6, Дубна, 2007.
- [A9] *Лукьянов К.В., Кухтина И.Н., Лукьянов В.К., Пенюонжкевич Ю.Э., Соболев Ю.Г., Земляная Е.В.* Микроскопический анализ энергетической зависимости полных сечений реакций ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ в диапазоне $E=5-50$ А МэВ. ОИЯИ, Р4-2006-154, Дубна, 2006.
- [A10] *Lukyanov K.V., Kukhtina I.N., Lukyanov V.K., Penionzhkevich Yu.E., Sobolev Yu.G., Zemlyanaya E.V.* Microscopic model analysis of the ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ total reaction cross sections at the energy range 5-50 A MeV. arXiv: nucl-th/0610119, 2006, 8 pgs; Proceedings of the International Symposium on Exotic Nuclei "EXON-2006" (Khanty-Mansiysk, Russia, 17-22 July 2006), AIP, 2007.

Получено 16 апреля 2007 г.