

УДК 539.171, 519.684

*М. Б. Какенов, Е. В. Земляная*

## Расчет сечений упругого рассеяния $^{11}\text{Li} + p$ с использованием оптического фолдинг-потенциала

Разработана MPI-реализация расчета микроскопического оптического нуклон-ядерного потенциала фолдинга. На гетерогенном кластере "HybriLIT" Многофункционального информационно-вычислительного комплекса (МИВК) Лаборатории информационных технологий ОИЯИ проведены расчеты фолдинг-потенциала и соответствующих дифференциальных сечений упругого рассеяния  $^{11}\text{Li} + p$  при энергии 62 МэВ/нуклон. Демонстрируется согласие экспериментальных данных и результатов расчетов для различных распределений плотности ядра  $^{11}\text{Li}$ , используемых при построении фолдинг-потенциала.

**Ключевые слова:** нуклон-ядерное рассеяние, изотопы лития, микроскопический оптический потенциал, модель фолдинга, параллельные вычисления

### Об авторах

**Какенов Мейржан Бейбутханович** – магистрант кафедры ядерной физики государственного университета «Дубна», инженер Лаборатории информационных технологий Объединенного института ядерных исследований. *E-mail:* meirzhankakenov@gmail.com. 141981 Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, 19.

**Земляная Елена Валериевна** – ведущий научный сотрудник Объединенного института ядерных исследований.

Одной из актуальных задач современной ядерной физики является исследование проблемы взаимодействия нуклонов с ядрами при низких энергиях. Метод рассеяния бесструктурных частиц (протонов и нейтронов) на ядрах позволяет получить информацию о механизмах ядерных реакций и свойствах ядерной материи. Экспериментальные данные по рассеянию экзотических ядер на протонах позволили лучше понять, как происходит взаимодействие между нуклонами ядра, и изучить свойства ядер в экстремальных состояниях.

Для анализа экспериментальных данных в теории ядерных реакций хорошо себя зарекомендовали микроскопические методы, в которых отсутствуют недостатки, имеющиеся у макроскопических (феноменологических) подходов. Микроскопические и полумикроскопические модели широко применяются для изучения механизмов ядерных реакций. Одной из наиболее популярных микро-

скопических моделей построения оптического потенциала является метод фолдинга. Изучение рассеяния экзотических ядер на протонах в рамках фолдинг-модели позволяет понять не только, как взаимодействуют нуклоны в такой системе, но и проверить существующие модели структуры атомного ядра на основе информации о том, как распределена ядерная материя.

Очень важным является то, что на основе фолдинг-модели и формализма матрицы плотности можно развить микроскопический метод, который учитывает оптические потенциалы и форм-факторы неупругих процессов с учетом обменных нуклон-нуклонных (NN) корреляций.

### Теоретическая модель

Основная задача работы — выполнить расчеты микроскопического оптического потенциала (ОП), с его использованием рассчитать дифференциальные сечения упругого столкновения экзотического ядра  $^{11}\text{Li}$  с протоном при энергии до 100 МэВ/нуклон,

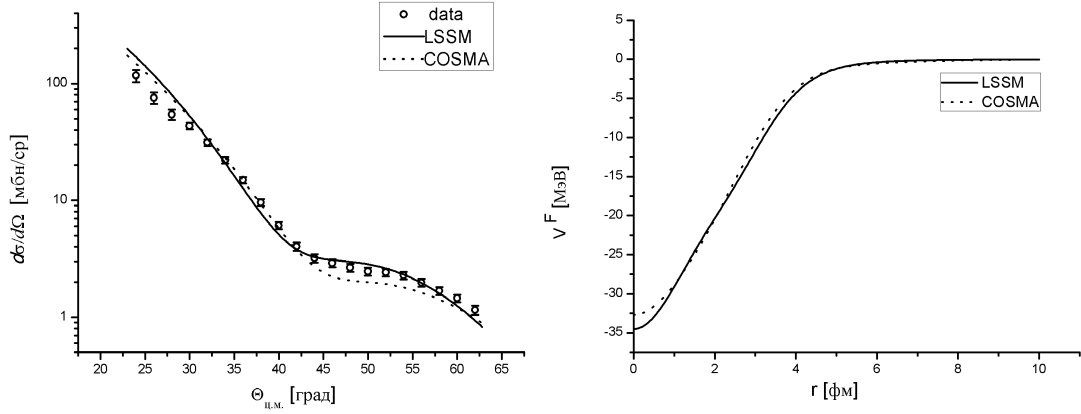


Рис. 1. Графики дифференциальных сечений (слева) упругого рассеяния  $^{11}\text{Li}+p$  при энергии 62 МэВ/нуклон и соответствующих вещественных фолдинг-потенциалов (справа). Сплошной и пунктирной линией показаны расчеты для моделей плотности ядра  $^{11}\text{Li}$  *LSSM* и *COSMA* соответственно

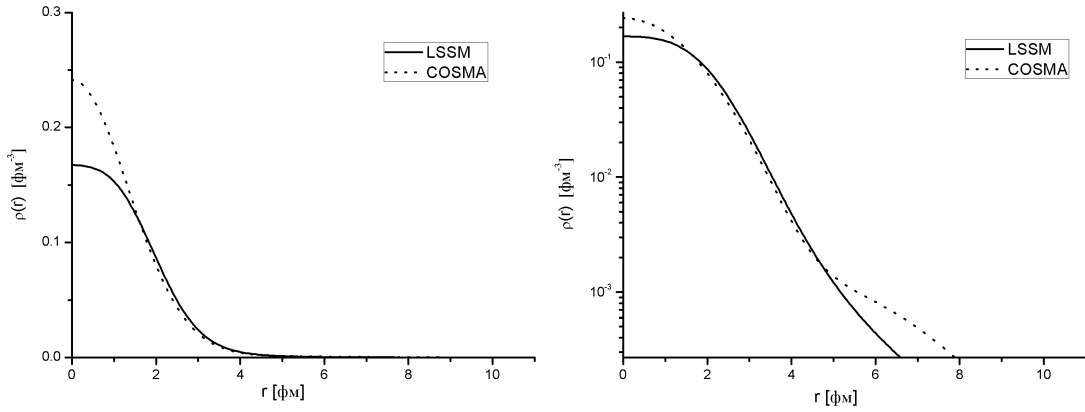


Рис. 2. Графики распределения ядерной материи в линейном (слева) и логарифмическом (справа) масштабах. Сплошной и пунктирной линией показаны распределения ядерной материи для моделей плотности ядра  $^{11}\text{Li}$  *LSSM* и *COSMA* соответственно

сравнить с имеющимися экспериментальными данными. Для расчета оптического потенциала упругого рассеяния был использован микроскопический потенциал фолдинга (свертки) с учетом вклада обменной части [1]. Такой потенциал формально не имеет свободных параметров, а зависит от плотностных распределений нуклонов, составляющих ядро. В данной работе использованы две модели структуры распределений плотности ядра  $^{11}\text{Li}$ : модель *LSSM* (*large-scale shell model*) [2] и полужемпирическая модель *COSMA* [3]. Расчеты дифференциальных сечений упругого рассеяния проводились с помощью про-

граммы *DWUCK4* [4]. Оптический потенциал в программе *DWUCK4* использовался в форме  $V_{opt} = N_R V^F + N_I V^F$ , где  $V^F$  — вещественный потенциал свертки, рассчитанный для прямого и обменного потенциалов;  $N_R$  и  $N_I$  — коэффициенты, варьирующие вклад действительной и мнимой части потенциала. Эти два параметра подгоняются под экспериментальные данные.

На рис. 1 слева представлены графики рассчитанных дифференциальных сечений упругого рассеяния  $^{11}\text{Li}+p$  при энергии 62 МэВ/нуклон в сравнении с экспериментальными данными из [5], а также вещественная

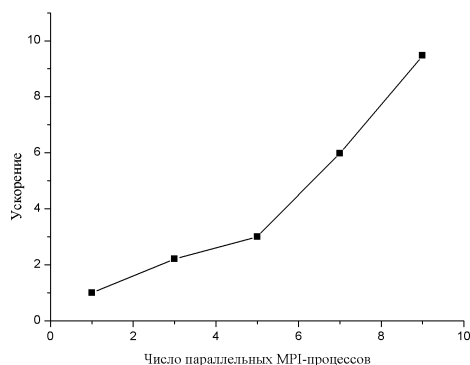


Рис. 3. График ускорения расчета фолдинг-потенциала для  $^{11}\text{Li}+p$  при энергии 62 МэВ/нуклон при увеличении числа параллельных *MPI*-процессов

часть потенциала, рассчитанная с двумя разными моделями плотности ядра  $^{11}\text{Li}$ . Во всех расчетах для данной реакции полагали  $N_R = 0.95$  и  $N_I = 0.45$ . На рис. 2 представлены в линейном и логарифмическом масштабах плотности распределений ядерной материи для моделей *LSSM* и *COSMA*, использовавшихся в расчетах. Из представленных моделей только модель *LSSM* имеет близкое к экспоненциальному реалистическое поведение на асимптотике.

Для повышения производительности вычислений расчет микроскопического фолдинг-потенциала реализован в параллельном режиме с использованием технологии *MPI*. Все расчеты были проведены на гетерогенном кластере HUBRIIT Многофункционального информационного вычислительного комплекса Лаборатории информационных технологий Объединенного института ядерных исследований (ЛИТ ОИЯИ), г. Дубна. Полученное ускорение вычислений в зависимости от количества задействованных параллельных *MPI*-процессов представлено в таблице и на рис. 3. Расчет выполнен для плотности *LSSM* с

**Ускорение вычисления  
фолдинг-потенциала для  $^{11}\text{Li}+p$  при  
энергии 62 МэВ/нуклон при увеличении  
числа параллельных *MPI*-процессов**

| Число <i>MPI</i> -процессов | Время счета (сек) | Ускорение расчета (раз) |
|-----------------------------|-------------------|-------------------------|
| 1                           | 11.685            | 1                       |
| 3                           | 5.293             | 2.208                   |
| 5                           | 3.886             | 3.007                   |
| 7                           | 1.953             | 5.983                   |
| 9                           | 1.233             | 9.477                   |

числом узлов дискретной сетки по пространственной координате 201. Представленные численные результаты подтверждают эффективность разработанной *MPI*-версии фолдинг-метода построения микроскопического оптического потенциала, который обеспечивает возможность реалистичного воспроизведения экспериментально наблюдаемых характеристик упругого протон-ядерного рассеяния.

**Библиографический список**

1. Lukyanov K.V. Double Folding Model of Nucleus-Nucleus Potential: Formulae, Iteration Method and Computer Code // JINR Communication P11-2007-38.
2. Karataglidis S. Alternative evaluations of halos in nuclei // Physical Review C. 2000. V. 61. P. 61–66.
3. Korshennikov A.A. et al. Scattering of radioactive nuclei  $^6\text{He}$  and  $^3\text{H}$  by protons: Effects of neutron skin and halo in  $^6\text{He}$ ,  $^8\text{He}$ , and  $^{11}\text{Li}$  // Nuclear Physics A. 1997. V. 617. P. 45–56.
4. Kunz P.D., Rost E. The distorted-wave born approximation // Computational Nuclear Physics 2 / ed. by K. Langanke et al. 1993. P. 88–107.
5. Moon C.B. Measurements of  $^{11}\text{Li}+p$  and  $^9\text{Li}+p$  elastic scatterings at 60 MeV // Physics Letters B. 1992. V. 297. P. 39–43.

*Поступила в редакцию  
26.12.2019*