

# Расчет сечений упругого рассеяния ${}^6\text{He}+p$ и полных сечений реакции ${}^6\text{He}+{}^{28}\text{Si}$ с использованием потенциалов Фолдинга и высокоэнергетического приближения

Е.В. Земляная, К.В. Лукьянов, И.Н. Кухтина  
*Лаборатория информационных технологий, ОИЯИ*

**В.К. Лукьянов**

*Лаборатория теоретической физики им. Н.Н.Боголюбова, ОИЯИ*

**Ю.Э. Пенионжкевич, Ю.Г. Соболев**

*Лаборатория ядерных реакций, ОИЯИ*

**А.Н. Антонов, М.К. Гайдаров**

*Институт ядерных исследований и ядерной энергетики БАН, Болгария*

## Abstract

Calculations of microscopic optical potentials (OP's) (their real and imaginary parts) are performed to analyze the  ${}^6\text{He}+p$  elastic scattering data and the  ${}^6\text{He}+{}^{28}\text{Si}$  total reaction data at a few tens of MeV/nucleon (MeV/N). The OP's are calculated with a help of the double-folding procedure, using three model densities of  ${}^6\text{He}$ . Effects of the regularization of the NN forces and their dependence on nuclear density are investigated. The role of collective motion effects, the spin-orbital terms and of the non-linearity in the calculations of the OP's, as well as effects of their renormalization are studied. Comparisons between the cross sections calculated within the microscopic double-folding Coulomb potential and those when one applies the Coulomb potential of the uniform charge distribution are made. The sensitivity of the cross sections to the  ${}^6\text{He}$  nuclear densities was tested.

Основные характеристики экзотического ядра  ${}^6\text{He}$  с двумя нейтронами на далекой периферии (“гало”) изучаются на основе анализа имеющихся экспериментальных данных рассеяния и реакций. Широкие возможности для таких исследований представляют микроскопические модели оптического потенциала (ОП), которые строятся на основе физических характеристик, определяющих структуру взаимодействующих ядер и эффективных нуклон-нуклонных сил в ядерной среде. Такие модели не содержат свободных параметров, но зависят от вводимых в расчет функций распределения плотности ядра  ${}^6\text{He}$ . Это позволяют проводить сравнительный численный анализ современных теоретических моделей его структуры.

В работах [1] и [2, 3] на основе микроскопических расчетов вещественной и мнимой частей ОП проведен анализ данных соответственно по сечениям упругого рассеяния  ${}^6\text{He}+p$  и полным сечениям реакции  ${}^6\text{He}+{}^{28}\text{Si}$  при энергиях в десятки МэВ/нуклон.

В работе [1] для расчета вещественной части оптического потенциала  $U_{opt}$  используется модель фолдинга [4, 5], в которой потенциал  $V^F(r)$  вычисляется как сумма прямого  $V^D(r)$  и обменного  $V^{EX}(r)$  потенциалов, каждый из которых есть интеграл свертки функции распределения плотности ядра  ${}^6\text{He}$  с эффективным нуклон-нуклонным потенциалом. Вид прямого и обменного потенциала, все необходимые формулы, пояснения и значения параметров, а также описание вычислительной схемы, можно найти в работе [6]. Мнимая часть потенциала  $W^H(r)$  рассчитывается на основе микроскопической теории Глаубера – Ситенко [7, 8] многократного рассеяния падающей частицы на нуклонах ядра, которая в оптическом пределе приводит к микроскопической форме эйкональной фазы рассеяния в виде свертки формфакторов так называемых профильных функций ядерной плотности и NN-амплитуды.

В работах [2, 3] для расчета вещественной части микроскопического оптического ядерного потенциала двойного фолдинга (см., например, [4, 5, 9]) используется программа [6]. Мнимая часть потенциала вычислена в форме, полученной в [10] на основе высокоэнергетического приближения теории рассеяния [7, 8].

Общая задача работ [1, 2, 3] – исследовать возможности микроскопического ОП (в том числе нижний предел его применимости по энергии столкновения) для объяснения имеющихся экспериментальных данных о дифференциальных сечениях упругого рассеяния  ${}^6\text{He}+p$  и о полных сечениях реакции  ${}^6\text{He}+{}^{28}\text{Si}$  при энергиях до 100 МэВ/нуклон, а также протестировать известные в литературе модели распределения плотности ядерного вещества в ядре  ${}^6\text{He}$ . В расчетах использовалась полуэмпирическая модель Танихаты [11], кластерно-орбитальная оболочечная модель COSMA (cluster-orbital shell model) [12] и модель LSSM (large-scale shell model), в которой учтен вклад большого числа оболочек [13].

Для расчета дифференциальных сечений упругого рассеяния на основе полученных потенциалов использовалась программа DWUCK4 [14]. Исследовались три формы ОП, построенные на основе его микроскопически рассчитанных вещественных и мнимых частей. В ряде случаев мы варьировали силу этих составляющих, вводя соответствующие коэффициенты подгонки, при этом форма потенциала не изменялась.

В работе [1] на основе микроскопических расчетов вещественной и мнимой части оптического потенциала проведен анализ экспериментальных данных по сечениям упругого рассеяния  ${}^6\text{He}+p$  при энергиях 25.2 МэВ/нуклон [15, 16, 17], 41.6 МэВ/нуклон [18, 19] и 71 МэВ/нуклон [20, 21]. Изучено влияние на конечные результаты расчета зависимости нуклон-нуклонного потенциала от плотности ядерного вещества, роль спин-орбитального взаимодействия, нелинейности микроскопического оптического потенциала, а также роль его перенормировки.

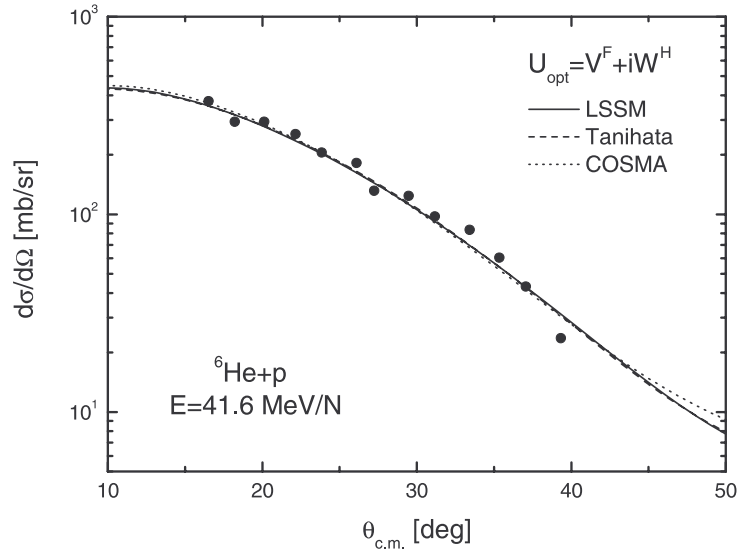


Рис. 1: Микроскопический расчет сечений упругого рассеяния  ${}^6\text{He}+p$  при энергии  $E=41.6$  МэВ/нуклон для трех моделей плотности ядра  ${}^6\text{He}$  в сравнении с экспериментальными данными из [18, 19]

На рис. 1 представлены выполненные в [1] расчеты сечений упругого рассеяния  ${}^6\text{He}+p$  при энергии  $E=41.6$  МэВ/нуклон для трех упомянутых моделей плотности ядра  ${}^6\text{He}$ . Во всех случаях для этого значения энергии наблюдается хорошее согласие с экспериментальными данными из [18, 19].

В работах [2, 3] представлены рассчитанные с указанными выше микроскопическими потенциалами полные сечения  ${}^6\text{He}, \text{Li}+{}^{28}\text{Si}$  в диапазоне энергий от 5 до 50 МэВ на нуклон налетающего ядра. Исследована роль кулоновского потенциала путем сравнения сечений, рассчитанных с традиционным кулоновским потенциалом на основе однородного распределения плотности ядерного заряда, и микроскопическим кулоновским потенциалом, полученным в модели двойного фолдинга с реалистичным распределением заряда ядер.

Показано, что небольшая перенормировка глубины потенциалов позволяет объяснить данные экспериментов при относительно больших энергиях  $E \geq 15$  МэВ/нуклон. В этой области энергий сечения, вычисленные на основе нескольких известных моделей налетающего ядра, оказываются близкими между собой, но предпочтительной оказывается модель LSSM.

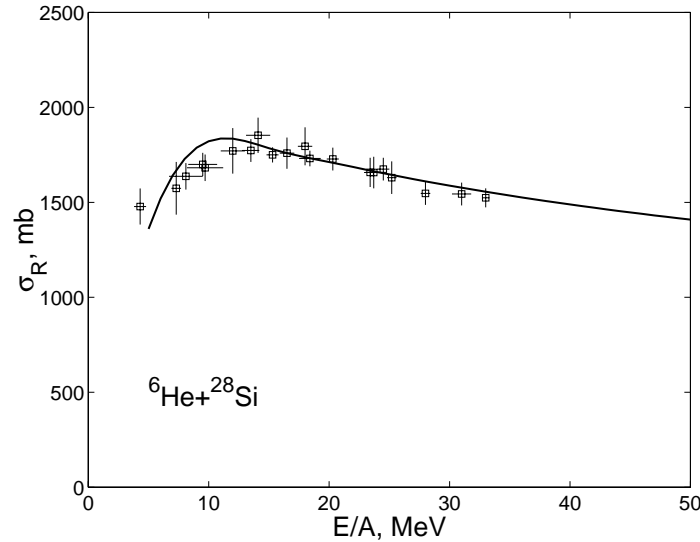


Рис. 2: Расчет полных сечений реакции  ${}^6\text{He}+{}^{28}\text{Si}$  при энергиях 5–50 МэВ/нуклон с использованием ядро-ядерного оптического потенциала  $U_{opt}$  в форме (1) с параметрами  $N_r=0.7$ ,  $N_r^{(1)}=0.4$ ,  $N_{im}=0.5$ ,  $N_{im}^{(1)}=0.03$  в сравнении с экспериментальными данными из [22]

Для описания экспериментальных данных в области низких энергий необходимо учитывать вклады других каналов, связанные с коллективными ядерными возбуждениями и реакциями передачи нуклонов. Эти эффекты были приближенно учтены путем добавления к базовому “объемному” потенциалу производных  $(-rdV/dr)$  от микроскопических потенциалов фолдинга. На рис. 2 представлены результаты вычислений, выполненных с использованием оптического ядро-ядерного потенциала  $U_{opt}$  в форме

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

полученного для Парижского эффективного нуклон-нуклонного потенциала CDM3Y6 и плотности LSSM ядра  ${}^6\text{He}$ . Параметры перенормировки  $N_r = 0.7$  и  $N_{im} = 0.5$  регулируют глубину вещественной  $V^{DF}$  и мнимой  $W^H$  частей потенциала, а параметры  $N_r^{(1)} = 0.4$  и  $N_{im}^{(1)} = 0.03$  “отвечают” за вклад коллективных эффектов. На рис. 2 видно, что путем введения переходных потенциалов в форме производных от микроскопических потенциалов упругого рассеяния для учета возбуждения коллективных состояний ядра удалось добиться довольно хорошего согласия с экспериментом при низких энергиях.

## Список литературы

- [1] K.V.Lukyanov, V.K.Lukyanov, E.V.Zemlyanaya, A.N.Antonov, M.K.Gaidarov. Arxiv: 0708.3586[nucl-th]; European Physical Journal A, vol. 33, p.389, 2007.
- [2] K.V.Lukyanov, I.N.Kukhtina, V.K.Lukyanov, Yu.E.Penionzhkevich, Yu.G.Sobolev, E.V.Zemlyanaya. ArXiv: nucl-th/0610119; Intern. Symp. on Exotic Nuclei “EXON-2006”

- (Khanty-Mansiysk, Russia, 17-22 July 2006), N.Y.: AIP Conf., Vol.917, 2007, p.170, eds. Yu.E.Peyionzhkevich and E.A.Cherepanov, ISBN 978-0-7354-0420-5.
- [3] К.В.Лукьянов, Е.В.Земляная, В.К.Лукьянов, И.Н.Кухтина, Ю.Э.Пенионжкевич, Ю.Г.Соболев. Препринт ОИЯИ Р4-2006-154, Дубна, 2006; Изв. РАН сер. физ., Т.71, вып. 3, 2008 (в печати).
- [4] G.R.Satchler, W.G.Love, Phys. Rep., V. 55, p. 183, 1979.
- [5] О.М.Князьков, ЭЧАЯ, Т.17, с.318, 1986.
- [6] К.В.Лукьянов, Сообщение ОИЯИ Р11-2007-38, Дубна, 2007.
- [7] R.J.Glauber, Lectures in Theoretical Physics. N.Y.: Interscience, p.315, 1959.
- [8] А.Г.Ситенко, Укр. Физ. Журн. Т.4, с.152, 1959.
- [9] D.T.Khoa, G.R.Satchler, Nucl. Phys. A, Vol.668, p.3, 2000.
- [10] В.К.Лукьянов, Е.В.Земляная, К.В.Лукьянов, ЯФ, Т.69. вып.2, с.262, 2006.
- [11] I.Tanihata, Phys. Lett. B, Vol. 289, p.261, 1992.
- [12] M.V.Zhukov, B.V.Danilin, D.V.Fedorov, J.M.Bang, I.J.Thompson, J.S.Vaagen, Phys. Rep., Vol.231, p.151, 1993.
- [13] S.Karataglidis, P.J.Dortmans, K.Amos, C.Bennhold, Phys. Rev. C, Vol.61, p.024319, 2000.
- [14] S. P.D.Kunz, E.Rost, Computational Nuclear Physics, Vol.2 (Eds: Langanke K. et al.), Springer Verlag, P.88, 1993.
- [15] G.M.Ter-Akopian *et al.*, Phys. Lett. B, Vol.426, p.251, 1999.
- [16] R. Wolski *et al.*, JINR Preprint E15-98-284, 1998; Phys. Lett. B, Vol.467, p.8, 1999; S. Stepantsov *et al.*, Phys. Lett. B, Vol.542, p.35, 2002.
- [17] L. Giot *et al.*, Nucl. Phys. A, Vol.738, p.426, 2004.
- [18] M.D.Cortina-Gil *et al.*, Nucl. Phys. A, Vol.616, p.215c, 1997.
- [19] M.D.Cortina-Gil *et al.*, Phys. Lett. B, Vol.371, p.14, 1996.
- [20] A.A.Korshennikov *et al.*, Nucl. Phys. A, Vol.616, p.189c, 1997.
- [21] A.A.Korshennikov *et al.*, Nucl. Phys. A, Vol.617, p.45, 1999).
- [22] Ю.Г.Соболев и др., Изв. РАН сер. физ., Т.69. вып.11. с.1603, 2005.