

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.

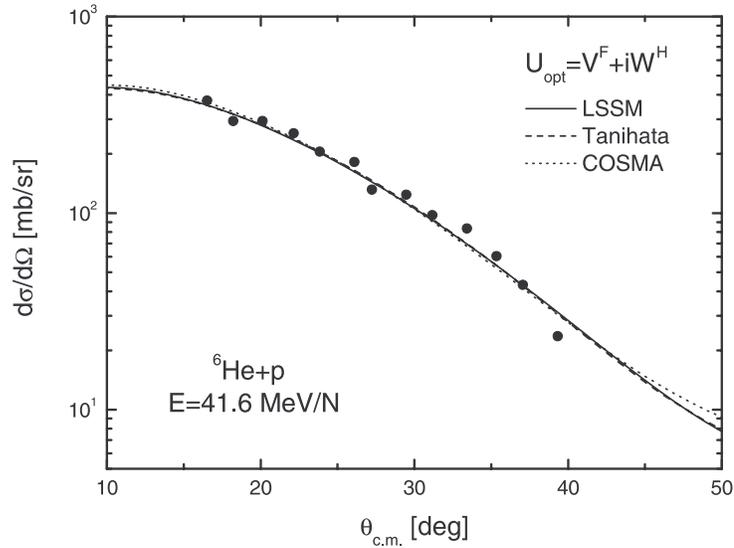


Рис. 1: Микроскопический расчет сечений упругого рассеяния ${}^6\text{He}+p$ при энергии $E=41.6$ МэВ/нуклон для трех моделей плотности ядра ${}^6\text{He}$ в сравнении с экспериментальными данными из [18, 19]

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.

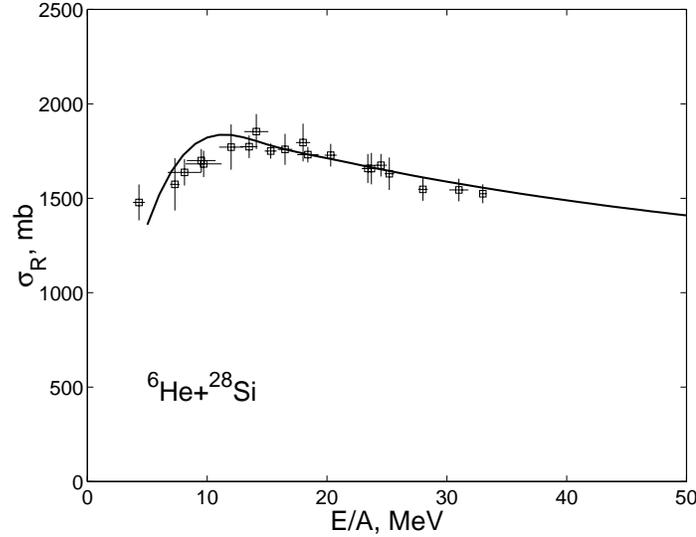


Рис. 2: Расчет полных сечений реакции ${}^6\text{He}+{}^{28}\text{Si}$ при энергиях 5–50 МэВ/нуклон с использованием ядро-ядерного оптического потенциала U_{opt} в форме (1) с параметрами $N_r=0.7$, $N_r^{(1)}=0.4$, $N_{im}=0.5$, $N_{im}^{(1)}=0.03$ в сравнении с экспериментальными данными из [22]

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.