

**С. Ю. Межевич<sup>1</sup>, А. Т. Рудчик<sup>1,\*</sup>, К. Русек<sup>2</sup>, К. В. Кемпер<sup>3</sup>,  
А. А. Рудчик<sup>1</sup>, О. А. Понкратенко<sup>1</sup>, С. Б. Сакута<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина*

<sup>2</sup> *Лаборатория тяжелых ионов Варшавского университета, Варшава, Польша*

<sup>3</sup> *Физический факультет, Национальный университет Флориды, Таллахасси, США*

<sup>4</sup> *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

\*Відповідальний автор: rudchik@kinr.kiev.ua

### **МЕХАНИЗМИ РЕАКЦІЇ $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ ІОНІВ $^{11}\text{B}$ 45 MeV**

Досліджено реакцію  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  MeV для основних і збуджених станів ядер  $^7\text{Li}$  і  $^{17}\text{O}$ . Експериментальні дані реакції проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). У схему зв'язку включалися канали пружного розсіяння ядер  $^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$  та одно- і двоступінчасті реакції передачі нуклонів і кластерів з виходом ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$ . Необхідні для МЗКР-розрахунків спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів обчислено за трансляційно-інваріантною моделлю оболонки (ТИМО). Для вхідного каналу реакції використовувався потенціал Вудса - Саксона (WS), параметри якого було отримано з МЗКР-аналізу експериментальних даних пружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$ , а для вихідного каналу  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  потенціал WS та фолдінг-потенціал (DF) взаємодії ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  з уявною складовою, параметри якої отримано з підгонки МЗКР-перерізів реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  до експериментальних даних. Таким же методом визначено також параметри уявної частини і потенціалу WS. Параметри дійсної частини цього потенціалу отримано з підгонки до периферійної області потенціалу DF. Виявлено ізотопічні відмінності перерізів реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при використанні потенціалів взаємодії ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$ ,  $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$  та  $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$  у вихідному каналі реакції.

*Ключові слова:* ядерні реакції, оптична модель, метод зв'язаних каналів реакцій, фолдінг-модель, спектроскопічні амплітуди, оптичні потенціали, механізми реакцій.

**С. Ю. Межевич<sup>1</sup>, А. Т. Рудчик<sup>1,\*</sup>, К. Русек<sup>2</sup>, К. В. Кемпер<sup>3</sup>,  
А. А. Рудчик<sup>1</sup>, О. А. Понкратенко<sup>1</sup>, С. Б. Сакута<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина*

<sup>2</sup> *Лаборатория тяжелых ионов Варшавского университета, Варшава, Польша*

<sup>3</sup> *Физический факультет, Национальный университет Флориды, Таллахасси, США*

<sup>4</sup> *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

\*Ответственный автор: rudchik@kinr.kiev.ua

### **МЕХАНИЗМИ РЕАКЦІЇ $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ ІОНІВ $^{11}\text{B}$ 45 MeV**

Исследована реакция  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при энергии  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  MeV для основных и возбужденных состояний ядер  $^7\text{Li}$  и  $^{17}\text{O}$ . Анализ экспериментальных данных проведен по методу связанных каналов реакций (МСКР). В схему связи включались каналы упругого и неупругого рассеяния ядер  $^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$  и одно- и двухступенчатые передачи нуклонов и кластеров с выходом ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$ . Необходимые для МСКР-расчетов спектроскопические амплитуды нуклонов и кластеров рассчитаны в рамках трансляционно-инвариантной модели оболочек (ТИМО). Для входящего канала реакции использовался потенциал Вудса - Саксона (WS), параметры которого были получены из МСКР-анализа экспериментальных данных упругого рассеяния ядер  $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$ , а для исходящего канала  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  потенциал WS и фолдинг-потенциал (DF) взаимодействия ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  с мнимой частью, параметры которой получены из подгонки МСКР-сечений реакции  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  к экспериментальным данным. Таким же методом определены также параметры мнимой части и потенциала WS. Параметры действительной части этого потенциала получены путем подгонки к периферийной области потенциала DF. Обнаружены изотопические отличия сечений реакции  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при использовании потенциалов взаимодействия ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$ ,  $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$  и  $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$  в исходящем канале реакции.

*Ключевые слова:* ядерные реакции, оптическая модель, метод связанных каналов реакций, фолдинг-модель, спектроскопические амплитуды, оптические потенциалы, механизмы реакций.

**S. Yu. Mezhevych<sup>1</sup>, A. T. Rudchik<sup>1,\*</sup>, K. Rusek<sup>2</sup>, K. W. Kemper<sup>3</sup>,  
A. A. Rudchik<sup>1</sup>, O. A. Ponkratenko<sup>1</sup>, S. B. Sakuta<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

<sup>2</sup> *Heavy Ion Laboratory, University of Warsaw, Warsaw, Poland*

<sup>3</sup> *Physics Department, Florida State University, Tallahassee, USA*

<sup>4</sup> *National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

## MECHANISMS OF $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$ REACTION AT THE $^{11}\text{B}$ ION ENERGY 45 MeV

Reaction  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  at the energy  $E_{\text{lab}}(^{11}\text{B}) = 45$  MeV for the ground and excited states of the  $^7\text{Li}$  and  $^{17}\text{O}$  nuclei was studied. The reaction experimental data were analyzed within the coupled-reaction-channels method (CRC). The  $^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$  elastic scattering channel and one- and two-step reactions transferring nucleons and clusters were included in the coupling scheme. The spectroscopic amplitudes of nucleons and clusters needed for the CRC-calculations were computed within the translationally invariant shell model (TISM). The Woods-Saxon (WS) potential was used for the entrance reaction channel with the parameters deduced from the CRC-analysis of the  $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$  elastic scattering experimental data when the potential WS and the folding-potential (DF) with imaginary part, parameters of which were deduced from the fitting of the CRC cross sections to the  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  reaction experimental data, were used for the exit  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  reaction channel. The parameters of the imaginary WS-potential were deduced in the same way. The parameters of the real part of this potential were obtained by fitting it to the peripheral region of the DF-potential. Isotopic differences of the  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  reaction cross sections using the parameters of  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$ ,  $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$  and  $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$  interaction for the exit reaction channel were observed.

*Keywords:* nuclear reactions, optical model, coupled-reaction-channels method, folding-model, spectroscopic amplitudes, optical potentials, reaction mechanisms.

### REFERENCES

1. S.Yu. Mezhevych et al. Cluster structure of  $^{17}\text{O}$ . *Phys. Rev. C* **95** (2017) 034607.
2. A.T. Rudchik et al.  $^6\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{O})^7\text{Li}$  reaction and comparison of  $^6,^7\text{Li} + ^{16,17,18}\text{O}$  potentials. *Nucl. Phys. A* **927** (2014) 209.
3. S.Yu. Mezhevych et al. The  $^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$  elastic and inelastic scattering and isotopic effects in the  $^{12,13}\text{C} + ^{11}\text{B}$  scattering. *Nucl. Phys. A* **724** (2003) 29.
4. M. Kowalczyk. SMAN: a Code for Nuclear Experiments. Warsaw University report (1998).
5. B. Guo et al. New determination of the  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  reaction rate and its influence on the s-process nucleosynthesis in AGB stars. *The Astrophysical J.* **756**(2) (2012) 193.
6. A.A. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of  $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$  versus  $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$ . *Nucl. Phys. A* **785** (2007) 293.
7. A.T. Rudchik et al. Tensor analyzing powers and energy dependence of the  $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$  interaction. *Phys. Rev. C* **75** (2007) 024612.
8. A.T. Rudchik et al.  $^8\text{Li}$  optical potential from  $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{O})^8\text{Li}$  reaction analysis. *Nucl. Phys. A* **831** (2009) 139.
9. J. Cook. DFPOT: A program for the calculation of double folded potentials. *Comp. Phys. Com.* **25** (1982) 125.
10. H. De Vries, C. W. De Jager, C. De Vries. Nuclear charge-density-distribution parameters from elastic electron scattering. *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **36** (1987) 495.
11. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'skiy. Cluster spectroscopic factors for the  $p$ -shell nuclei. *Phys. Rev. C* **15** (1977) 84.
12. N. Boyarkina. *The Structure of the 1p-Shell Nuclei* (Moskva: Moscow University, 1973) 62 p. (Rus)
13. A.T. Rudchik, Yu.M. Chuvil'skiy. Calculation of spectroscopic amplitudes for arbitrary associations of nucleons in nuclei 1p-shell (program DESNA). Preprint Institute for Nucl. Res. AS USSR. KINR-82-12 (Kyiv, 1982) 27 p. (Rus)
14. A.T. Rudchik, Yu.M. Chuvil'skiy. Spectroscopic amplitudes of multi-nucleon clusters in 1p-shell nuclei and analysis of reactions of multi-nucleon transmissions. *Ukr. Fiz. Zhurnal* **30**(6) (1985) 819. (Rus)
15. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* **7** (1988) 167.
16. D. Pereira et al. An imaginary potential with universal normalization for dissipative processes in heavy-ion reactions. *Phys. Lett. B* **670**(4-5) (2009) 330.

Надійшла 24.09.2018

Received 24.09.2018