

А. Т. Рудчик<sup>1,\*</sup>, А. А. Рудчик<sup>1</sup>, О. Е. Куцик<sup>1</sup>, К. Русек<sup>2</sup>, К. В. Кемпер<sup>3</sup>, Е. П'ясецькі<sup>2</sup>, А. Столяж<sup>2</sup>,  
А. Тщінська<sup>2</sup>, Вал. М. Пірнак<sup>1</sup>, О. А. Понкратенко<sup>1</sup>, І. Строк<sup>4</sup>, Є. І. Коций<sup>5</sup>, Р. Сюдак<sup>6</sup>, С. Б. Сакута<sup>7</sup>,  
В. А. Плюйко<sup>8</sup>, А. П. Ільїн<sup>1</sup>, Ю. М. Степаненко<sup>1</sup>, В. В. Улещенко<sup>1</sup>, Ю. О. Ширма<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

<sup>3</sup> Відділ фізики, Флоридський державний університет, Таллахасі, США

<sup>4</sup> Національний центр ядерних досліджень, Варшава, Польща

<sup>5</sup> Циклотронний інститут Техаського А&М університету, Техас, США

<sup>6</sup> Інститут ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського, Краків, Польща

<sup>7</sup> Національний дослідницький центр «Інститут Курчатова», Москва, Росія

<sup>8</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

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

## МЕХАНІЗМИ РЕАКЦІЇ $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ 81 MeV ТА ВЗАЄМОДІЯ ЯДЕР $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$

Досліджено реакцію  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  MeV для основних та збуджених станів ядер  $^{14}\text{C}$  і  $^{13}\text{N}$ . Отримано нові дані диференціальних перерізів реакції. Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). Пружне розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$  та найбільш імовірні реакції передач нуклонів і кластерів було включено в схему зв'язку каналів. У МЗКР-розрахунках використовувались потенціали Вудса - Саксона (WS) взаємодії ядер  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$  для вхідного каналу реакції та взаємодії ядер  $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$  для вихідних каналів реакції. Для вхідного каналу реакції використано WS потенціал, отриманий при аналізі експериментальних даних пружного ядер  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ , а потенціал WS для вихідного каналу  $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$  реакції отримано методом підгонки МЗКР-перерізів реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$  до експериментальних даних цієї реакції. У МЗКР-розрахунках перерізів цієї реакції використовувались спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів в ядрах, які обчислювались за трансляційно-інваріантною моделлю Ір-оболонки. У результаті МЗКР-аналізу реакції отримано відомості про потенціал WS взаємодії ядер  $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$  та механізми передач нуклонів і кластерів. Установлено, що в даній реакції основну роль відіграють передачі протонів та 2n-кластерів. Досліджено відмінності МЗКР-перерізів реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$  при використанні в її вихідному каналі потенціалів взаємодії ядер  $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$  і  $^{14}\text{C} + ^{14}\text{N}$  (ізотопічні ефекти).

*Ключові слова:* ядерна реакція  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$  при 81 MeV, аналіз за методом зв'язаних каналів реакцій, спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів, механізми реакції.

А. Т. Рудчик<sup>1,\*</sup>, А. А. Рудчик<sup>1</sup>, А. Е. Куцьк<sup>1</sup>, К. Русек<sup>2</sup>, К. В. Кемпер<sup>3</sup>, Е. П'ясецькі<sup>2</sup>, А. Столяж<sup>2</sup>,  
А. Тщінська<sup>2</sup>, Вал. М. Пірнак<sup>1</sup>, О. А. Понкратенко<sup>1</sup>, І. Строк<sup>4</sup>, Є. І. Коций<sup>5</sup>, Р. Сюдак<sup>6</sup>, С. Б. Сакута<sup>7</sup>,  
В. А. Плюйко<sup>8</sup>, А. П. Ільїн<sup>1</sup>, Ю. Н. Степаненко<sup>1</sup>, В. В. Улещенко<sup>1</sup>, Ю. О. Ширма<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

<sup>3</sup> Відділ фізики, Флоридський державний університет, Таллахасі, США

<sup>4</sup> Національний центр ядерних досліджень, Варшава, Польща

<sup>5</sup> Циклотронний інститут Техаського А&М університету, Техас, США

<sup>6</sup> Інститут ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського, Краків, Польща

<sup>7</sup> Національний дослідницький центр «Інститут Курчатова», Москва, Росія

<sup>8</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

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

## МЕХАНІЗМИ РЕАКЦІЇ $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ 81 МэВ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЯДЕР $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$

Исследована реакция  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$  при энергии  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МэВ для основных и возбужденных состояний ядер  $^{14}\text{C}$  и  $^{13}\text{N}$ . Получены новые данные дифференциальных сечений реакции. Экспериментальные данные проанализированы по методу связанных каналов реакций (МСКР). Упругое рассеяние ядер  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$  и наиболее вероятные реакции передач нуклонов и кластеров были включены в схему связи каналов. В МСКР-расчетах использовались потенциалы Вудса - Саксона (WS) взаимодействия ядер  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$  для входного канала реакции и взаимодействия ядер  $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$  для выходных каналов реакции. Параметры потенциала WS для входного канала реакции раньше были получены при МСКР-анализе экспериментальных данных упругого и неупругого рассеяния ядер  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ , а параметры потенциала WS для выходного канала  $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$  реакции получены в данной работе методом подгонки МСКР-сечений реакции  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$  к ее экспериментальным данным. В МСКР-расчетах сечений этой реакции использовались спектроскопические амплитуды нуклонов и кластеров в ядрах, которые вычислялись по трансляционно-инвариантной модели Ір-оболочки. В результате

МСКР-анализа реакции получены сведения о потенциале WS взаимодействия ядер  $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$  и механизмы передач нуклонов и кластеров. Было установлено, что в данной реакции главную роль играют передачи протонов и 2n-кластеров. Были исследованы отличия МСКР-сечений реакции  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$  при использовании в ее выходном канале потенциалов взаимодействия ядер  $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$  и  $^{14}\text{C} + ^{14}\text{N}$  (изотопические эффекты).

*Ключевые слова:* ядерная реакция  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$  при 81 МэВ, анализ по методу связанных каналов реакций, спектроскопические амплитуды нуклонов и кластеров, механизмы реакции.

A. T. Rudchik<sup>1\*</sup>, A. A. Rudchik<sup>1</sup>, O. E. Kutsyk<sup>1</sup>, K. Rusek<sup>2</sup>, K. W. Kemper<sup>3</sup>, E. Piasecki<sup>2</sup>, A. Stolarz<sup>2</sup>,  
A. Trzcńska<sup>2</sup>, Val. M. Pirnak<sup>1</sup>, O. A. Ponkratenko<sup>1</sup>, I. Strojek<sup>4</sup>, E. I. Koshchiv<sup>5</sup>, R. Siudak<sup>6</sup>, S. B. Sakuta<sup>7</sup>,  
V. A. Plujko<sup>8</sup>, A. P. Ilyin<sup>1</sup>, Yu. M. Stepanenko<sup>1</sup>, V. V. Uleshchenko<sup>1</sup>, Yu. O. Shyrma<sup>1</sup>

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

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

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

<sup>4</sup> National Institute for Nuclear Research, Warsaw, Poland

<sup>5</sup> Cyclotron Institute, Texas A&M University, College Station, USA

<sup>6</sup> H. Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Krakow, Poland

<sup>7</sup> Russian Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>8</sup> Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv, Ukraine

\*Corresponding author: rudchik@kinr.kiev.ua

## $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ REACTION MECHANISMS AT ENERGY 81 MeV AND $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ NUCLEI INTERACTION

The  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$  reaction at the energy  $E_{\text{lab}}(^{15}\text{N}) = 81$  MeV for ground and excited states of  $^{14}\text{C}$  and  $^{13}\text{N}$  nuclei was investigated. New experimental data of the reaction cross-sections were obtained. The data were analyzed within the coupled reaction channels method (CRC). The  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$  elastic scattering as well as the more important reactions of nucleon and cluster transfers were included in the channels-coupling scheme. In the CRC-calculations, the Woods - Saxon potentials (WS) were used for the interactions of  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$  and  $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$  nuclei in the entrance and exit reaction channels. WS potential parameters for the reaction entrance channel were deduced previously from CRC-analysis of the  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$  elastic and inelastic scattering data, then the WS potential parameters for the reaction exit channel were deduced from the fitting of  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$  reaction data. The spectroscopic amplitudes of nucleons and clusters, used in the CRC-calculations, were computed within translational invariant shell model. As the results of the reaction CRC-analysis, the information about WS potential of  $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$  nuclei interaction as well as about mechanisms of nucleons and clusters transfer was deduced. It was found, that transfers of protons and 2n-clusters dominate in this reaction. It was also studied the differences of the reaction CRC cross-sections calculated using the  $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$  i  $^{14}\text{C} + ^{14}\text{N}$  potentials in the reaction exit channel (isotopic effects).

*Keywords:* nuclear reaction  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$  at 81 MeV, coupled reaction channels method, spectroscopic amplitudes of nucleons and clusters, reaction mechanisms.

## REFERENCES

1. A.T. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of  $^{15}\text{N}$  ions by  $^{12}\text{C}$  at 81 MeV. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 19 (2018) 210. (Ukr).
2. A.T. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of  $^{15}\text{N}$  ions by  $^{12}\text{C}$  at 81 MeV and the effect of transfer channels. *Acta Phys. Polon. B* 50 (2019) 733.
3. E. Piasecki et al. *Project ICARE at HIL* (Warsaw: Heavy Ion Laboratory, 2007) 38 p.
4. M. Kowalczyk. SMAN: a Code for Nuclear Experiments. Warsaw University report (1998).
5. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* 7 (1988) 167.
6. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the  $p$ -shell nuclei. *Phys. Rev. C* 15 (1977) 84.
7. A.T. Rudchik, Yu.M. Tchuvil'sky. Calculation of spectroscopic amplitudes for arbitrary associations of nucleons in 1p-shell nuclei (program DESNA). Preprint of the Institute for Nucl. Res. AS UkrSSR. KINR-82-12 (Kyiv, 1982) 27 p. (Rus)
8. A.T. Rudchik, Yu.M. Tchuvil'sky. Calculation of spectroscopic amplitudes of multi-nucleon clusters in 1p-shell nuclei and analysis of reactions of multi-nucleon transmissions. *Ukr. J. Phys.* 30(6) (1985) 819 (Rus).
9. A.T. Rudchik et al. Scattering, one-nucleon transfers and charge-exchange reactions in the  $^{14}\text{C} + ^{14}\text{N}$  interaction at  $E(^{14}\text{N}) = 116$  MeV. *Nucl. Phys. A* 589 (1995) 535.
10. J. Cook. DFPOT: a program for the calculation of double folded potentials. *Comp. Phys. Com.* 25 (1982) 125.
11. 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.

Надійшла 24.06.2019  
Received 24.06.2019s