

А. Т. Рудчик^{1,*}, А. А. Рудчик¹, В. В. Хейло¹, К. Русек², К. В. Кемпер³,
Е. П'ясецькі², А. Столяж², А. Тщінська², Вал. М. Пірнак¹, О. А. Понкратенко¹, Є. І. Коший⁴,
О. Е Куцик¹, А. П. Ільїн¹, С. Ю. Межевич¹, Ю. М. Степаненко¹, В. В. Улещенко¹, Ю. О. Ширма¹

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

³ Факультет фізики Флоридського державного університету, Таллахасі, США

⁴ Циклотронний інститут Техаського А&М університету, Техас, США

*Відповідальний автор: rudchik@kinr.kiev.ua

РЕАКЦІЯ $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ 81 МеВ, СПЕКТРОСКОПІЧНІ ФАКТОРИ РЕАКЦІЇ ТА ВЗАЄМОДІЯ ЯДЕР $^{14}\text{C} + ^{11}\text{C}$

Отримано нові експериментальні дані кутових розподілів диференціальних перерізів реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ при енергії іонів ^{15}N $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ для основних станів ядер ^{14}C і ^{11}C та збуджених станів 2,00 МеВ ($1/2^-$), 4,31 МеВ ($5/2^-$), 4,80 МеВ ($3/2^-$) ядра ^{11}C . Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). У розрахунках використано оптичний потенціал Вудса - Саксона (WS) взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$, параметри якого одержано при аналізі експериментальних даних пружного розсіяння цих ядер, а параметри WS-потенціалу взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{11}\text{C}$ отримано з аналізу експериментальних даних реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$. Необхідні для МЗКР-розрахунків спектроскопічні амплітуди передач у реакції нуклонів і кластерів було розраховано в рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки.

Ключові слова: ядерна реакція $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$, $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ, $\sigma(\theta)$, спектри ^{11}C і ^{14}C , оптичний потенціал Вудса - Саксона взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{11}\text{C}$.

1. Вступ

Ядерні реакції з виходом рідкісних стабільних і нестабільних ядер є одним з важливих засобів для отримання відомостей про їхню ядро-ядерну взаємодію та структуру. У даній роботі досліджено реакцію $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ для отримання параметрів оптичного потенціалу Вудса - Саксона (WS) взаємодії рідкісних ядер $^{14}\text{C} + ^{11}\text{C}$ та спектроскопічних факторів (амплітуд) їхньої оболонкової та кластерної структур. Важливо також отримати відомості про механізми даної реакції. Необхідний для дослідження цієї реакції оптичний потенціал WS-взаємодії ядер $^{10}\text{B} + ^{15}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ був отриманий нами при дослідженні пружного та непружного розсіяння цих ядер у роботі [1].

2. Методика експерименту та експериментальні дані

Вимірювання диференціальних перерізів реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ проведено на циклотроні U-200P Лабораторії важких іонів Варшавського університету. Для отримання пучка іонів ^{15}N було використано збагачену цим ізотопом кальцієву селітру ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$). Розкид енергії іонів на мішені не перевищував 0,5 %. В експерименті використовувалася самопідтримна збагачена ізотопом ^{10}B

мішень. Експеримент проводився на експериментальній установці ICARE [2]. У вимірюваннях використовувалась ΔE - E -методика з кремнієвими ΔE - та E -детекторами товщиною 40 мкм та 300 мкм відповідно.

Типовий двовимірний $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, X)$ показано на рис. 1.

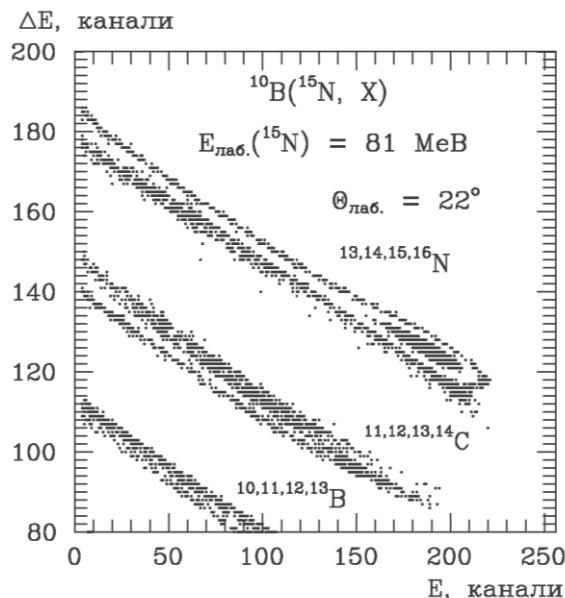


Рис. 1. Типовий $\Delta E(E)$ -спектр ядер N, C, B – продуктів реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ.

© А. Т. Рудчик, А. А. Рудчик, В. В. Хейло, К. Русек, К. В. Кемпер, Е. П'ясецькі, А. Столяж, А. Тщінська, Вал. М. Пірнак, О. А. Понкратенко, Є. І. Коший, О. Е Куцик, А. П. Ільїн, С. Ю. Межевич, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма, 2023

Видно, що експериментальна методика забезпечувала добре розділення продуктів реакцій за зарядами (зарядові локуси $\Delta E(E)$ -спектрів) та частково за масами (ізотопні локуси). Ширини ізотопних локусів ядер визначалися поділом ширин зарядових локусів ядер на відповідне число ізотопів цих ядер. Ізотопні локуси проектувалися на енергетичну вісь двовимірного спектра для отримання одновимірних енергетичних спектрів ізотопів ядер.

У масових спектрах ізотопів ядер присутні неперервні спектри продуктів багаточастинкових реакцій (неперервні фони), які потребували обов'язкового видалення для отримання спектрів двовимірних реакцій. Для цього використовувалася відома програма РЕАКФІТ. Приклад отриманих таким чином одновимірних спектрів ядер ^{14}C та ^{11}C показано на рис. 2.

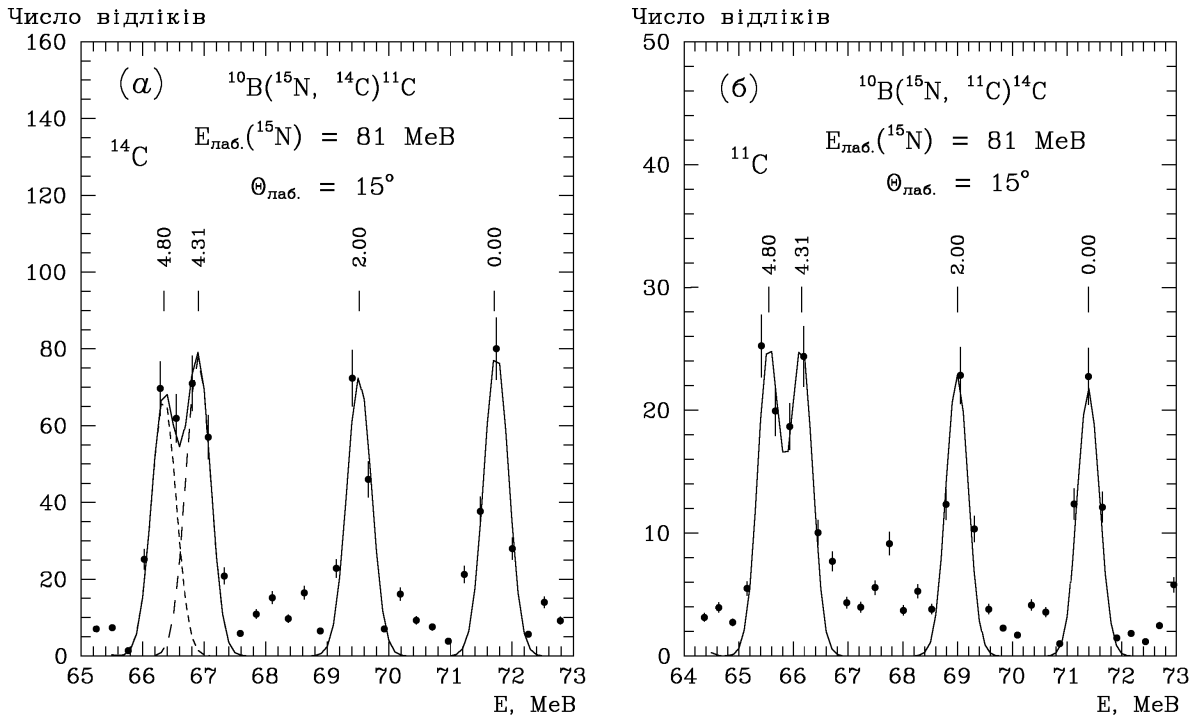


Рис. 2. Типові енергетичні спектри ядер ^{14}C і ^{11}C – продуктів реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 81 \text{ MeV}$. Кривими показано наближення експериментальних піків симетричними гауссіанами.

Площі піків спектрів ядер ^{14}C та ^{11}C використовувалися для обчислення диференціальних перерізів реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ на кутах $\theta_{\text{с.ц.м.}}^0$ реєстрації ^{14}C та на великих кутах $\theta_{\text{с.ц.м.}}(^{14}\text{C}) = 180^\circ - \theta_{\text{с.ц.м.}}(^{11}\text{C})$ на основі спектрів ^{11}C . Таким методом було отримано кутові розподіли перерізів реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ у повному кутовому діапазоні. Похибки в обчисленні площ частково перекритих піків не перевищували 20 %.

Диференціальні перерізи: реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 81 \text{ MeV}$ показано на рис. 3 для основних станів ядер ^{14}C та ^{11}C , а для основного стану ядра ^{14}C та збуджених станів 2,00 MeV ($1/2^-$), 4,31 MeV ($5/2^-$) і 4,80 MeV ($3/2^-$) ядра ^{11}C – на рис. 4.

3. Аналіз експериментальних даних

Експериментальні дані реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 81 \text{ MeV}$ проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) із включенням у схему зв'язку каналу пружного

розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^{15}\text{N}$ та реакцій передач нуклонів і кластерів. Для виконання МЗКР-розрахунків реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ використано програму FRESKO [3].

У МЗКР-розрахунках реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ використано оптичний потенціал WS для взаємодії ядер $^{10}\text{B} + ^{15}\text{N}$, параметри якого одержано з аналізу пружного розсіяння цих ядер [4], а параметри потенціалу WS для взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{11}\text{C}$ визначено методом підгонки параметрів цього потенціалу для задовільного опису експериментальних даних реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ відповідними МЗКР-розрахунками. Параметри цих оптичних потенціалів подано в табл. 1.

Необхідні для МЗКР-розрахунків спектроскопічні амплітуди систем $^{15}\text{N} = ^{14}\text{C} + p$ та $^{11}\text{C} = ^{10}\text{B} + p$ обчислювалися у рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки (ТІМО) [5] із виконанням програми DESNA [6, 7]. Спектроскопічні амплітуди подано в табл. 2. Енергію збудження ядра ^{11}C вказано в мегаелектронвольтах.

Таблиця 1. Параметри потенціалів взаємодії ядер

| Ядра | V_0 , MeB | r_V , фм | a_V , фм | W_S , MeB | r_W , фм | a_W , фм | Література |
|---------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|
| $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$ | 190,0 | 0,791 | 0,750 | 12,0 | 1,250 | 0,750 | [1] |
| $^{14}\text{C} + ^{11}\text{C}$ | 256,2 | 0,994 | 0,590 | 5,0 | 1,250 | 0,590 | Дана робота |
| $^{14}\text{C} + ^{11}\text{B}$ | 266,6 | 0,750 | 0,740 | 7,5 | 1,345 | 0,740 | [4] |

Таблиця 2. Спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів x в ядрах $A = C + x$

| A^*_E , MeB | C | x | nL_J | E_x |
|--------------------------|-----------------|-----|------------|-----------------------|
| ^{11}C | ^{10}B | p | $1P_{3/2}$ | -1,247 ^(a) |
| $^{11}\text{C}^*_{2,00}$ | ^{10}B | p | $1P_{1/2}$ | -1,073 ^(a) |
| | | | $1P_{3/2}$ | 0,386 ^(a) |
| $^{11}\text{C}^*_{4,31}$ | ^{10}B | p | $1P_{1/2}$ | 0,152 ^(a) |
| | | | $1P_{3/2}$ | 0,271 ^(a) |
| $^{11}\text{C}^*_{4,80}$ | ^{10}B | p | $1P_{3/2}$ | -1,347 ^(a) |
| ^{15}N | ^{14}C | p | $1P_{1/2}$ | 0,597 ^(a) |

$$^{(a)}S_{FRESCO} = (-1)^{J_C + j - J_A} S_x = -S_x.$$

Експериментальні дані кутових розподілів диференціальних перерізів реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeB для основних станів ядер ^{14}C і ^{11}C показано на рис. 3. Суцільною кривою показано МЗКР-розрахунки з використанням потенціалів WS для взаємодії ядер $^{10}\text{B} + ^{15}\text{N}$ і $^{11}\text{C} + ^{14}\text{C}$, параметри яких подано в табл. 1 (перші два набори), а штриховою кривою – МЗКР-розрахунки з використанням для $(^{11}\text{C} + ^{14}\text{C})$ -потенціалу параметрів взаємодії ядер

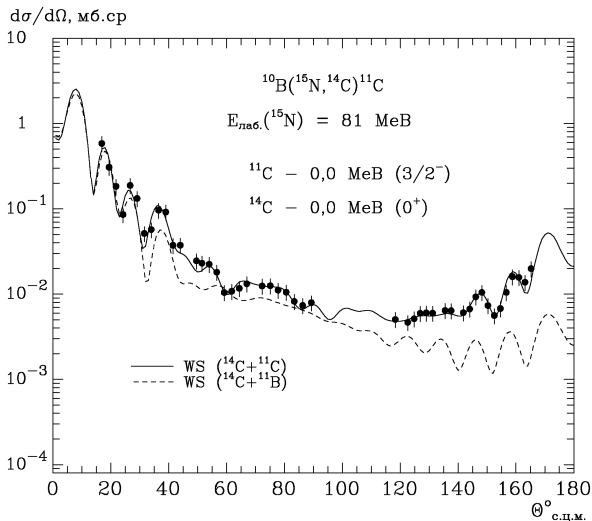


Рис. 3. Диференціальні перерізи реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeB для основних станів ядер ^{14}C і ^{11}C .

4. Основні результати та висновки

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeB для основних станів ядер ^{14}C і ^{11}C та збуджених станів 2,00 MeB

$^{14}\text{C} + ^{11}\text{B}$, отриманого з аналізу експериментальних даних пружного розсіяння цих ядер [4] (третьій набір параметрів у табл. 1). Видно, що МЗКР-розрахунки реакції з використанням цього набору параметрів потенціалу WS у вихідному каналі реакції описують експериментальні дані тільки у вузькому інтервалі малих кутів. Найбільші відмінності МЗКР-розрахунків реакції з потенціалами взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{11}\text{C}$ і $^{14}\text{C} + ^{11}\text{B}$ спостерігаються на великих кутах, де значну роль відіграють уявні частини потенціалів WS, які значно залежать від оболонкових та кластерних структур ядер ^{11}B і ^{11}C .

Диференціальні перерізи реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ для збуджених станів 2,00 MeB ($1/2^-$), 4,31 MeB ($5/2^-$), 4,80 MeB ($3/2^-$) ядра ^{11}C показано на рис. 4. Кривими зображено відповідні МЗКР-розрахунки для цих збуджень, отримані при використанні також оптичного потенціалу взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{11}\text{C}$ як і для основних станів цих ядер (див. табл. 1). Видно задовільний опис експериментальних даних реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ для збуджених станів в усіх кутових діапазонах цих збуджень.

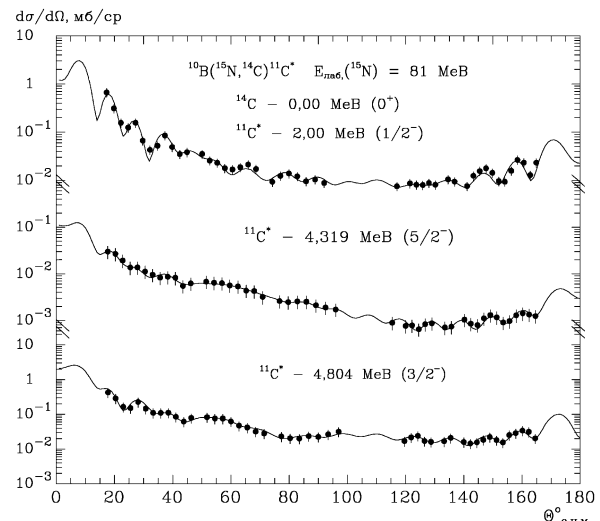


Рис. 4. Диференціальні перерізи реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeB для основного стану ядра ^{14}C та збуджених станів 2,00 MeB ($1/2^-$), 4,31 MeB ($5/2^-$), 4,80 MeB ($3/2^-$) ядра ^{11}C .

($1/2^-$), 4,31 MeB ($5/2^-$) і 4,80 MeB ($3/2^-$) ядра ^{11}C .

Експериментальні дані проаналізовано за МЗКР із включенням у схему зв'язку каналів пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$ та реакцій передачі протонів. У МЗКР-розрахунках для вхідного каналу реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ викорис-

тано потенціал WS взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$, параметри якого визначено із МЗКР-аналізу експериментальних даних пружного розсіяння цих ядер у роботі [1], а параметри потенціалу WS взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{11}\text{C}$ визначено в даній роботі з МЗКР-аналізу експериментальних даних реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$.

Установлено, що передача протона у даній реакції відіграє основну роль серед можливих ядерних процесів. У розрахунках диференціальних перерізів реакції $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ для систем $^{15}\text{N} = ^{14}\text{C} + p$ та $^{11}\text{C} = ^{10}\text{B} + p$ використано спект-

роскопічні амплітуди, обчислені в рамках ТІМО [5] за допомогою програми DESNA [6, 7].

Дана робота була профінансована за рахунок коштів наукового проекту «Ядерна взаємодія за участі короткоіснуючих і слабкозв'язаних ядер 1р-оболонки», що виконується відповідно до Цільової програми наукових досліджень НАН України «Участь у новітніх міжнародних проєктах з фізики високих енергій та ядерної фізики» на 2021 - 2023 рр.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. А.Т. Рудчик та ін. Пружне та непружне розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^{10}B при енергії 81 МеВ. Ізотопічні ефекти в розсіянні ядер $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$, $^{15}\text{N} + ^{11}\text{B}$, $^{14}\text{N} + ^{10}\text{B}$. *Ядерна фізика та енергетика* 23(3) (2022) 153.
2. E. Piasecki et al. *Project ICARE at HIL* (Warsaw: Heavy Ion Laboratory, 2007) 38 p.
3. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* 7 (1988) 167.
4. С.Ю. Межевич та ін. Пружне й непружне розсіяння іонів ^{11}B ядрами ^{14}C при енергії 45 МеВ. *Ядерна фізика та енергетика* 13 (2012) 123.
5. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the p -shell nuclei. *Phys. Rev. C* 15 (1977) 84.
6. А.Т. Рудчик, Ю. М. Чувильский. Вычисление спектроскопических амплитуд для произвольных ассоциаций нуклонов в ядрах 1р-оболочки (программа DESNA). Препринт ИЯД АН УССР. КИЯИ-82-12 (Киев, 1982) 27 с.
7. А.Т. Рудчик, Ю. М. Чувильский. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1р-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач. *УФЖ* 30 (1985) 819.

A. T. Rudchik^{1*}, A. A. Rudchik¹, V. V. Khejlo¹, K. Rusek², K. W. Kemper³, E. Piasecki², A. Stolarz², A. Trzcińska², Val. M. Pirnak¹, O. A. Ponkratenko¹, E. I. Koshchy⁴, O. E. Kutsyk¹, A. P. Ilyin¹, Yu. M. Stepanenko¹, V. V. Uleshchenko¹, Yu. O. Shyrma¹

¹ Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Heavy Ion Laboratory, University of Warsaw, Warsaw, Poland

³ Physics Department, Florida State University, Tallahassee, USA

⁴ Cyclotron Institute, Texas A&M University, College Station, USA

*Corresponding author: rudchik@kinr.kiev.ua

REACTION $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ AT ENERGY 81 MeV, SPECTROSCOPIC FACTORS AND INTERACTION OF $^{14}\text{C} + ^{11}\text{C}$ NUCLEI

New experimental data of angular distribution cross-sections for the $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ reaction at the energy $E_{\text{lab}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeV were obtained for the ground states of ^{14}C , ^{11}C nuclei and 2.00 MeV ($1/2^-$), 4.31 MeV ($5/2^-$), 4.31 MeV ($3/2^-$) excited states of ^{11}C nucleus. The experimental data were analyzed within the coupled-reaction-channels (CRC) method. In the CRC calculations, the $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$ Wood - Saxon (WS) optical potential obtained from the CRC analysis of the experimental elastic and inelastic data of these nuclei was used and parameters of the $^{14}\text{C} + ^{11}\text{C}$ WS optical potential were deduced from the analysis of the $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$ reaction experimental data. Spectroscopic amplitudes of nucleons and cluster transfers were calculated within the translation-invariant shell model.

Keywords: nuclear reaction $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{11}\text{C}$, $E_{\text{lab}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeV, $\sigma(\theta)$, particle spectra of ^{11}C and ^{14}C , the Woods - Saxon optical potential of $^{14}\text{C} + ^{11}\text{C}$ nuclei interaction.

REFERENCES

1. А.Т. Рудчик et al. Elastic and inelastic scattering of ^{15}N ions by ^{10}B at energy 81 MeV. Isotopic effects in scattering of $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$, $^{15}\text{N} + ^{11}\text{B}$, $^{14}\text{N} + ^{10}\text{B}$ nuclei. *Yaderna Fyzyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 23(3) (2022) 153. (Ukr)
2. E. Piasecki et al. *Project ICARE at HIL* (Warsaw: Heavy Ion Laboratory, 2007) 38 p.
3. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* 7 (1988) 167.

4. S.Yu. Mezhevych et al. Elastic and inelastic scattering of ^{11}B ions by ^{14}C at 45 MeV. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 13 (2012) 123. (Ukr)
5. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the p -shell nuclei. *Phys. Rev. C* 15 (1977) 84.
6. A.T. Rudchik, Yu.M. Tchuvil'sky. Calculation of spectroscopic amplitudes for arbitrary associations of nucleons in $1p$ -shell nuclei (program DESNA). Prepr. of the Institute for Nucl. Res., AS UkrSSR. KINR-82-12 (Kyiv, 1982) 27 p. (Rus)
7. A.T. Rudchik, Yu.M. Tchuvil'sky. Spectroscopic amplitudes of multinucleon clusters in $1p$ -shell nuclei and analysis of multinucleon transfer reactions. *Ukrainian Journal of Physics* 30(6) (1985) 819. (Rus)

Надійшла/Received 01.12.2022