

**ЯДЕРНА ФІЗИКА**  
**NUCLEAR PHYSICS**

УДК 539.171/539.172

<https://doi.org/10.15407/jnpae2020.04.295>

**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. Тшінська<sup>2</sup>, Вал. М. Пірнак<sup>1</sup>, О. А. Понкратенко<sup>1</sup>, І. Строек<sup>4</sup>, Є. І. Кошій<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>, В. В. Хейло<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 $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ 81 МеВ

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ для основних та збуджених станів ядер  $^{14}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$ . Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) із включенням у схему зв'язку каналів реакцій одно- та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів та використанням у МЗКР-розрахунках потенціалів Вудса - Саксона (WS) для вхідного і вихідних каналів реакції. Параметри потенціалу WS взаємодії ядер  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$  взято з результатів раніше дослідженого пружного й непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{12}\text{C}$  при енергії 81 МеВ, а параметри потенціалу WS для вихідного каналу  $^{14}\text{N} + ^{13}\text{C}$  отримано в даній роботі при підгонці МЗКР-розрахунків перерізів реакції до експериментальних даних реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$ . Необхідні для МЗКР-розрахунків реакції спектроскопічні фактори (амплітуди) передаваних у реакції нуклонів і кластерів було розраховано в рамках трансляційно-інваріантної моделі 1р-оболонки. Установлено, що в даній реакції основну роль відіграють передачі нейтронів (n) та дейтронів (d). Внески в реакцію двоступінчастих передач нуклонів і кластерів незначні.

*Ключові слова:* експериментальні дані реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$ , одно- та двоступінчасті механізми реакції, метод зв'язаних каналів реакцій, спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів.

#### 1. Вступ

Реакції передач при взаємодії важких іонів з ядрами широко використовуються для отримання відомостей про потенціали взаємодії ядер, механізми реакцій, оболонкову та кластерну структуру ядер в основних і збуджених станах.

У даній роботі такі можливості використано при дослідженні реакцій  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  і  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{13}\text{C})^{14}\text{N}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ. Відомостей про експериментальні та теоретичні дослідження цих реакцій не виявлено в науковій літературі. Аналіз кутових розподілів диференціальних перерізів цих реакцій за сучасними моделями структури легких ядер та ядерних реакцій дає змогу отримати відомості про оболонкову та кластерну структуру ядер  $^{15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$  та механізми одно- та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів. Вимірювання кутових розподілів диференціальних перерізів реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  та отримання вищезазначених відомостей про взаємодію ядер вихідного каналу реакції та механізми реакції і було метою даної роботи.

Як зазначено в роботах [1, 2], раніше на пучку іонів  $^{15}\text{N}$  Варшавського циклотрона U-200P при

енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ було поміряно кутові розподіли пружного й непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$ ,  $^{12}\text{C}$  та реакції передач  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, X)Y$  з виходом ядер  $X, Y$  із  $Z = 3 - 8$ , у тому числі і продуктів реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$ .

Пружне й непружне розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{12}\text{C}$  було досліджено в роботах [1, 2]. З аналізу даних цього розсіяння за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) було отримано параметри потенціалу Вудса - Саксона (WS) взаємодії ядер  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ , які використано в даній роботі при МЗКР-аналізі експериментальних даних реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  для вхідного каналу реакції.

Значну увагу в даній роботі приділено різноманітним одно- та двоступінчастим передачам нуклонів і кластерів, спектроскопічні амплітуди яких обчислено за трансляційно-інваріантною моделлю оболонок (ТІМО) [3]. Параметри потенціалу WS взаємодії ядер  $^{14}\text{N} + ^{13}\text{C}$  вихідного каналу реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  отримано з МЗКР-аналізу експериментальних даних цієї реакції для основних та збуджених станів ядер  $^{14}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$  з використанням фолдінг-потенціалу (DF) взаємодії цих ядер.

© А. Т. Рудчик, А. А. Рудчик, О. Е. Куцик, К. Русек, К. В. Кемпер, Е. П'ясецькі, А. Столяж, А. Тшінська, Вал. М. Пірнак, О. А. Понкратенко, І. Строек, Є. І. Кошій, Р. Сюдак, С. Б. Сакута, В. А. Плюйко, А. П. Ільїн, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма, В. В. Хейло, 2020

## 2. Методика експерименту

Експеримент з дослідження реакцій  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, X)Y$  з виходом стабільних і нестабільних ядер було проведено на циклотроні U-200P Лабораторії важких іонів Варшавського університету на експериментальній установці ICARE [4] при енергії 81 MeV пучка іонів  $^{15}\text{N}$  з використанням трьох  $\Delta E$ - $E$ -спектрометрів з кремнієвими  $\Delta E$ - і  $E$ -детекторами та одного з газовим  $\Delta E$ - і кремнієвим  $E$ -детекторами. У газовому детекторі використовувався стиснутий аргон. Розкид енергії іонів  $^{15}\text{N}$  на мішені не перевищував 0,5 %. В експерименті використовувалась самопідтримна мішень  $^{12}\text{C}$  товщиною  $\sim 0,5$  мг/см<sup>2</sup>.

Для накопичення та збереження спектрометричної інформації у вигляді двовимірних  $\Delta E(E)$ -спектрів використовувались електронно-комп'ютерні методи ICARE та SMAN [5]. Експериментальна методика забезпечувала надійну ідентифікацію продуктів реакцій  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, X)Y$  із зарядами  $Z = 3 - 8$  (рис. 1 у роботах [1, 2]) та за масами (рис. 1).

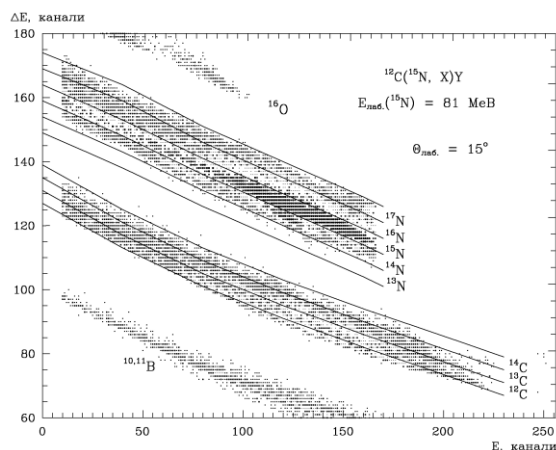


Рис. 1. Типовий  $\Delta E(E)$ -спектр локусів азоту та вуглецю – продуктів реакцій  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  MeV.

Для одержання енергетичних спектрів ізотопів продуктів реакцій відповідний зарядовий локус  $\Delta E(E)$ -спектра розділявся на ізотопні підлокуси, які проектувались на вісь  $E$ . Отримані таким способом типові енергетичні спектри ядер  $^{14}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$ , продуктів реакцій  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  та  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{13}\text{C})^{14}\text{N}$ , показано на рис. 2.

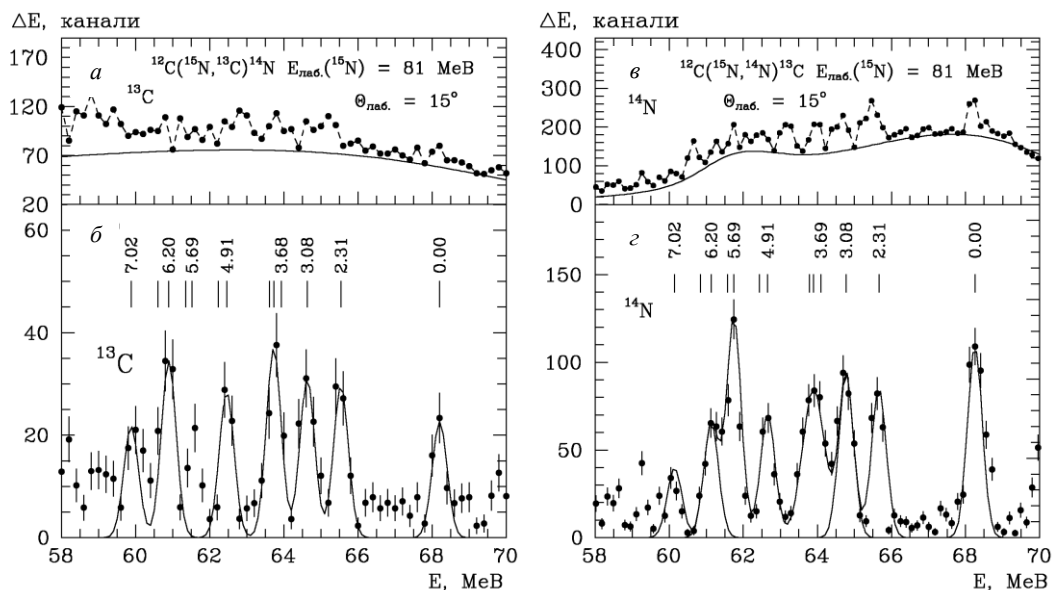


Рис. 2. Енергетичні спектри ядер  $^{13}\text{C}$  (а, б) і  $^{14}\text{N}$  (в, з) – продуктів реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  MeV для кута реєстрації  $\theta_{\text{лаб}} = 15^\circ$ . Суцільними кривими на (а) і (в) показано неперервні фони експериментальних спектрів від багаточастинкових реакцій, а на (б) і (з) – наближення експериментальних піків симетричними гауссіанами.

Площі гауссіанів використовувались для обчислення диференціальних перерізів реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$ . Для кутів  $\theta_{\text{с.ц.м.}}(^{14}\text{N}) < 90^\circ$  використовувались енергетичні спектри  $^{14}\text{N}$ , а спектри  $^{13}\text{C}$  – для кутів  $\theta_{\text{с.ц.м.}}(^{14}\text{N}) = 180^\circ - \theta_{\text{с.ц.м.}}(^{13}\text{C})$ . Таким методом було отримано кутові розподіли перерізів реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  у повному кутовому діапазоні для основних та збуджених станів ядер  $^{14}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$ . Для нерозділених в експерименті станів цих ядер поміряно сумарні диференціальні перерізи реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$ .

Диференціальні перерізи реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  MeV поміряно для основних станів ядер  $^{14}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$  та збуджених станів 2,31 - 7,03 MeV ядра  $^{14}\text{N}$  і збуджених станів 3,088 - 3,853 MeV ядра  $^{13}\text{C}$ . На рис. 3 показано кутові розподіли експериментальних даних реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  для основних станів ядер  $^{14}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$  та збуджених станів 7,028 MeV ядра  $^{14}\text{N}$  і 3,088 MeV ядра  $^{13}\text{C}$ .

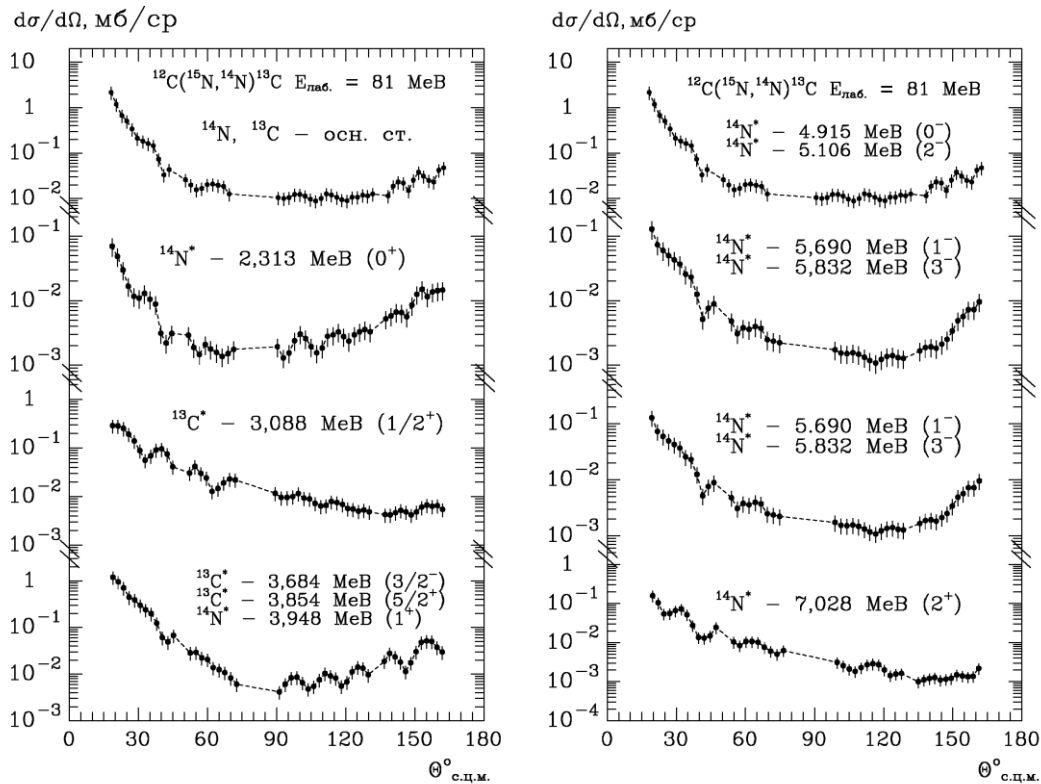


Рис. 3. Експериментальні дані диференціальних перерізів реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  MeB для основних та збуджених станів ядер  $^{14}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$ .

### 3. Аналіз експериментальних даних

Експериментальні дані реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  проаналізовано за МЗКР із включенням у схему зв'язку каналів пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$  та одно- і двоступінчастих реакцій передач нуклонів і кластерів (рис. 4).

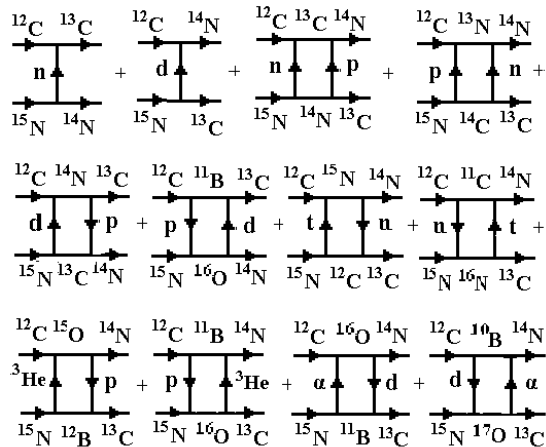


Рис. 4. Діаграми передач нуклонів і кластерів у реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$ .

Необхідні для МЗКР-розрахунків реакцій передач спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів  $x$  в ядрах  $A = C + x$  обчислювалися за ТІМО [3], використовуючи програму DESNA [5, 6]. Спектроскопічні амплітуди  $S_x$  для реакцій передач, діаграми яких показано на рис. 4, подано в табл. 1.

У МЗКР-розрахунках використовувалися потенціали Вудса - Саксона (WS)

$$U(r) = -V_0 \left[ 1 + \exp\left(\frac{r-R_V}{a_V}\right) \right]^{-1} - iW_s \left[ 1 + \exp\left(\frac{r-R_W}{a_W}\right) \right]^{-1} \quad (1)$$

для вхідного та вихідного каналів реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$ . Для обчислення радіусів  $R_V$  і  $R_W$  ядер  $P$  ( $^{14}\text{N}$ ) і  $T$  ( $^{13}\text{C}$ ) використовувалось співвідношення

$$R_i = r_i (A_P^{1/3} + A_T^{1/3}), \quad i = V, W,$$

де  $A_P$  і  $A_T$  – масові числа ядер  $P$  і  $T$ .

Для вхідного каналу  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$  реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  було використано параметри потенціалу WS, визначені при МЗКР-аналізі експериментальних даних пружного й непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{12}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  MeB [1].

Параметри потенціалу WS взаємодії ядер  $^{14}\text{N} + ^{13}\text{C}$  у вихідному каналі реакції визначено методом підгонки МЗКР-перерізів реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  до експериментальних даних цієї реакції. При цьому початкові значення параметрів потенціалу  $^{14}\text{N} + ^{13}\text{C}$  визначено методом під-

гонки цього потенціалу до потенціалу DF взаємодії ядер  $^{14}\text{N} + ^{13}\text{C}$ , при розрахунках якого використано дані розподілів зарядів в ядрах  $^{13}\text{C}$  і  $^{14}\text{N}$  з роботи [7]. Потенціал DF взаємодії ядер  $^{14}\text{N} + ^{13}\text{C}$  обчислено за допомогою програми

DFPOT [8]. Отримані значення параметрів потенціалу WS взаємодії ядер  $^{14}\text{N} + ^{13}\text{C}$  подано в табл. 2. Потенціали WS та DF взаємодії ядер  $^{14}\text{N} + ^{13}\text{C}$  показано на рис. 5.

Таблиця 1. Спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів  $x$  в ядрах  $A = C + x$

| A                      | C                     | x        | $nL_J$     | $S_x$                 | A      | C                      | x             | $nL_J$     | $S_x$                 |
|------------------------|-----------------------|----------|------------|-----------------------|--------|------------------------|---------------|------------|-----------------------|
| $^{12}\text{C}$        | $^{10}\text{B}$       | d        | $1D_3$     | 1,780                 | 25,187 | $^{12}\text{B}$        | $^3\text{He}$ | $1P_{1/2}$ | 0,254 <sup>(a)</sup>  |
| $^{12}\text{C}$        | $^{11}\text{B}$       | p        | $1P_{3/2}$ | -1,706 <sup>(a)</sup> | 15,957 |                        |               | $1P_{3/2}$ | -0,090                |
| $^{12}\text{C}$        | $^{11}\text{C}$       | n        | $1P_{3/2}$ | -1,706 <sup>(a)</sup> | 18,722 | $^{12}\text{C}$        | t             | $2P_{1/2}$ | 0,380                 |
| $^{13}\text{C}$        | $^{12}\text{C}$       | n        | $1P_{1/2}$ | 0,601                 | 4,946  | $^{11}\text{B}$        | $\alpha$      | $2D_2$     | 0,435                 |
| $^{13}\text{C}_{3,08}$ | $^{12}\text{C}$       | n        | $2S_1$     | 0,601                 | 1,858  | $^{13}\text{C}$        | d             | $2S_1$     | 0,248 <sup>(a)</sup>  |
| $^{13}\text{C}_{3,68}$ | $^{12}\text{C}$       | n        | $1P_{3/2}$ | 0,601                 | 1,262  |                        |               | $1D_1$     | 0,444 <sup>(a)</sup>  |
| $^{13}\text{C}_{3,85}$ | $^{12}\text{C}$       | n        | $1D_{5/2}$ | 0,652                 | 1,093  | $^{13}\text{C}_{3,1}$  | d             | $2S_1$     | -0,157 <sup>(a)</sup> |
| $^{13}\text{C}$        | $^{11}\text{B}$       | d        | $2S_1$     | -0,263                | 18,679 |                        |               | $1D_1$     | 0,435 <sup>(a)</sup>  |
|                        |                       |          | $1D_1$     | -0,162                |        | $^{14}\text{C}$        | p             | $1P_{1/2}$ | -0,598                |
|                        |                       |          | $1D_2$     | -0,485 <sup>(a)</sup> |        |                        |               | $1F_{5/2}$ | 0,296                 |
| $^{13}\text{C}$        | $^{12}\text{B}$       | p        | $1P_{1/2}$ | 0,283                 | 17,534 | $^{14}\text{N}$        | n             | $1P_{1/2}$ | -1,091 <sup>(a)</sup> |
|                        |                       |          | $1P_{3/2}$ | 0,801                 |        |                        |               | $1P_{3/2}$ | 0,386                 |
| $^{14}\text{C}$        | $^{13}\text{C}$       | n        | $1P_{1/2}$ | -1,094 <sup>(a)</sup> | 8,177  | $^{14}\text{N}_{2,31}$ | n             | $1P_{1/2}$ | 0,423                 |
| $^{13}\text{N}$        | $^{12}\text{C}$       | p        | $1P_{1/2}$ | 0,601                 | 1,944  | $^{14}\text{N}_{3,9}$  | n             | $1P_{1/2}$ | -0,244 <sup>(a)</sup> |
|                        |                       |          | $2P_{3/2}$ | -0,096                |        |                        |               | $1P_{3/2}$ | -0,690                |
|                        |                       |          | $1F_{5/2}$ | -0,293 <sup>(a)</sup> |        | $^{14}\text{N}_{4,9}$  | n             | $1P_{1/2}$ | 0,423                 |
| $^{14}\text{N}$        | $^{11}\text{C}$       | t        | $2P_{1/2}$ | -0,107 <sup>(a)</sup> | 22,737 | $^{14}\text{N}_{5,1}$  | n             | $1P_{3/2}$ | -1,157 <sup>(a)</sup> |
|                        |                       |          | $2P_{3/2}$ | -0,096                |        | $^{14}\text{N}_{5,6}$  | n             | $1P_{1/2}$ | -0,244 <sup>(a)</sup> |
|                        |                       |          | $1F_{5/2}$ | -0,293 <sup>(a)</sup> |        |                        |               | $1P_{3/2}$ | -0,690                |
| $^{14}\text{N}$        | $^{12}\text{C}$       | d        | $2S_1$     | 0,615                 | 10,272 | $^{14}\text{N}_{6,2}$  | n             | $1P_{1/2}$ | -0,244 <sup>(a)</sup> |
| $^{14}\text{N}_{2,31}$ | $^{12}\text{C}_{4,4}$ | d        | $1D_2$     | -1,304                | 7,9595 |                        |               | $1P_{3/2}$ | -0,690                |
| $^{14}\text{N}_{3,94}$ | $^{12}\text{C}$       | d        | $1D_1$     | 0,246                 | 6,325  | $^{14}\text{N}_{7,0}$  | n             | $1P_{3/2}$ | -1,157 <sup>(a)</sup> |
| $^{14}\text{N}_{4,91}$ | $^{12}\text{C}_{4,4}$ | d        | $1D_2$     | -1,304                | 5,357  | $^{13}\text{C}$        | t             | $2P_{3/2}$ | -0,194                |
| $^{14}\text{N}_{5,10}$ | $^{12}\text{C}$       | d        | $1D_2$     | 0,246                 | 5,167  |                        |               | $1F_{5/2}$ | 0,296 <sup>(a)</sup>  |
| $^{14}\text{N}_{5,69}$ | $^{12}\text{C}$       | d        | $1D_1$     | 0,246                 | 4,582  | $^{15}\text{N}$        | n             | $1D_{3/2}$ | -0,270                |
| $^{14}\text{N}_{5,83}$ | $^{12}\text{C}$       | d        | $1D_3$     | 0,246                 | 4,440  | $^{12}\text{C}$        | $^3\text{He}$ | $2P_{1/2}$ | 0,380                 |
| $^{14}\text{N}_{6,20}$ | $^{12}\text{C}$       | d        | $2S_1$     | 0,615                 | 4,068  | $^{14}\text{N}$        | p             | $1P_{1/2}$ | -1,091                |
| $^{14}\text{N}_{6,44}$ | $^{12}\text{C}$       | d        | $1D_3$     | 0,246                 | 3,828  |                        |               | $1P_{3/2}$ | 0,386                 |
| $^{14}\text{N}_{7,02}$ | $^{12}\text{C}$       | d        | $1D_2$     | 0,246                 | 3,244  | $^{12}\text{C}$        | $\alpha$      | $3S_0$     | 0,544                 |
| $^{14}\text{N}$        | $^{13}\text{C}$       | p        | $1P_{1/2}$ | -0,461                | 7,551  | $^{13}\text{C}$        | $^3\text{He}$ | $2P_{1/2}$ | 0,910                 |
|                        |                       |          | $1P_{3/2}$ | -0,163 <sup>(a)</sup> |        | $^{14}\text{N}$        | d             | $1D_1$     | 1,400                 |
| $^{14}\text{N}$        | $^{13}\text{N}$       | n        | $1P_{1/2}$ | -0,461                | 10,553 | $^{15}\text{N}$        | p             | $1P_{1/2}$ | -1,461 <sup>(a)</sup> |
|                        |                       |          | $1P_{3/2}$ | -0,163 <sup>(a)</sup> |        | $^{13}\text{C}$        | $\alpha$      | $2F_3$     | -0,468 <sup>(a)</sup> |
| $^{15}\text{N}$        | $^{11}\text{B}$       | $\alpha$ | $2D_2$     | 0,435 <sup>(a)</sup>  | 10,991 | $^{15}\text{N}$        | d             | $1D_2$     | -0,276                |
|                        |                       |          |            |                       |        |                        |               | $1D_3$     | -0,074 <sup>(a)</sup> |

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

Таблиця 2. Параметри потенціалів взаємодії ядер

| Ядра                            | $E_{\text{с.п.м.}}$ ,<br>MeB | $V_0$ ,<br>MeB | $r_V$ ,<br>фм | $a_V$ ,<br>фм | $W_S$ ,<br>MeB | $r_W$ ,<br>фм | $a_W$ ,<br>фм | Літ. |
|---------------------------------|------------------------------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|------|
| $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ | 36,0                         | 195            | 0,790         | 0,750         | 8,0            | 1,250         | 0,750         | [1]  |
| $^{14}\text{N} + ^{13}\text{C}$ | 37,8                         | 190            | 0,790         | 0,700         | 10,0           | 1,250         | 0,300         |      |

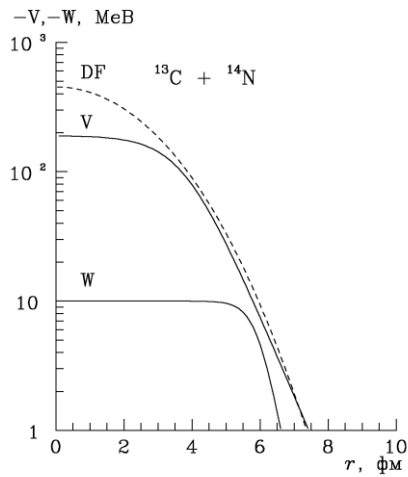


Рис. 5. Порівняння потенціалів WS і DF взаємодії ядер  $^{14}\text{N} + ^{13}\text{C}$ .

МЗКР-розрахунки перерізів реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$  проводилися за допомогою програми FRESKO [9].

Експериментальні дані реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ для основних станів ядер  $^{14}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$  та відповідні МЗКР-перерізи показано на рис. 6 для передач (див. рис. 4) протонів (крива  $\langle p \rangle$ ), d-кластерів (крива  $\langle d \rangle$ ), двоступінчастих передач,  $t+n$  і  $n+t$  (крива  $\langle tn \rangle$ , когерентна сума) та  $d+p$  і  $p+d$  (крива  $\langle dp \rangle$ , когерентна сума) тощо.

Видно, що на кутах  $\theta_{\text{с.п.м.}}(^{14}\text{N}) < 120^\circ$  у реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  домінує передача нейтронів, а на кутах  $\theta_{\text{с.п.м.}}(^{14}\text{N}) > 120^\circ$  – передача d-кластерів. Внески двоступінчастих передач нуклонів і кластерів у перерізи цієї реакції незначні.

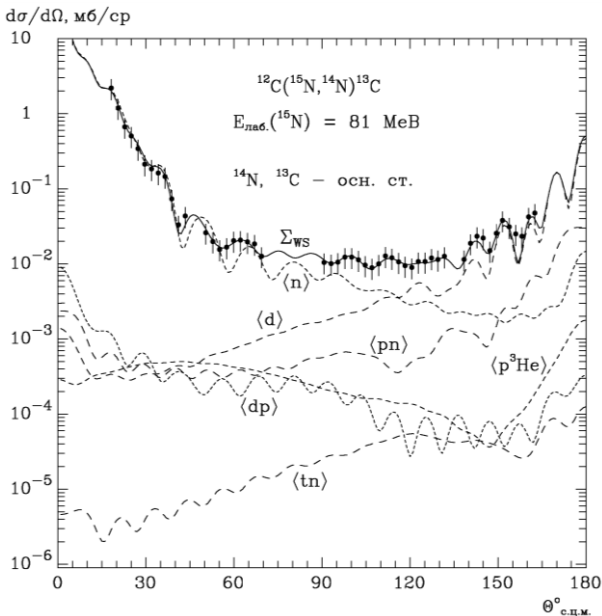


Рис. 6. Диференціальні перерізи реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ для основних станів ядер  $^{14}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$ . Криві – МЗКР-розрахунки для передач нуклонів і кластерів.

Кутові розподіли диференціальних перерізів реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  збуджених станів 2,313 МеВ ядра  $^{14}\text{N}$  і 3,088 та 3,684 МеВ ядра  $^{13}\text{C}$  показано на рис. 7. Штриховими кривими  $\langle n \rangle$  показано МЗКР-розрахунки цих перерізів для передач нейтронів ( $^{15}\text{N} = ^{14}\text{N} + n$ , див. рис. 4), кривими  $\langle d \rangle$  – для передач дейтронів ( $^{15}\text{N} = ^{13}\text{C} + d$ , див. рис. 4). Суцільними кривими  $\Sigma$  показано когерентні суми цих двох передач, які задовільно описують експериментальні дані. Видно, що в реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  основну роль відіграють передачі нейтронів.

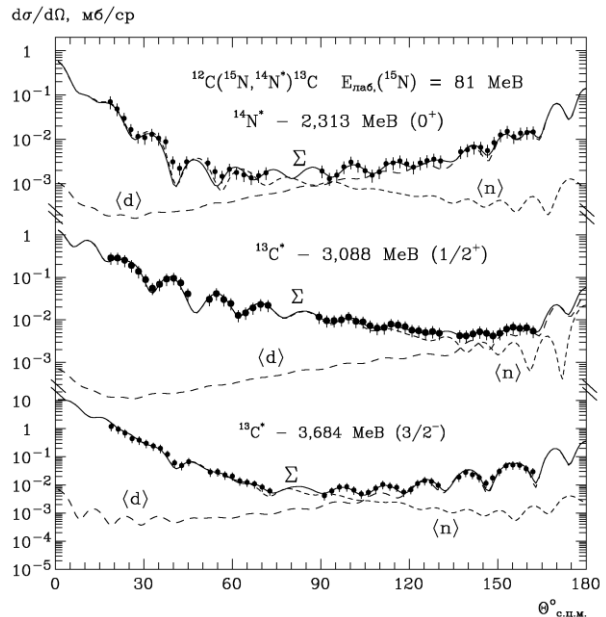


Рис. 7. Диференціальні перерізи реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ для збуджених станів ядер  $^{14}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$ . Криві – МЗКР-розрахунки для передач нуклонів і кластерів.

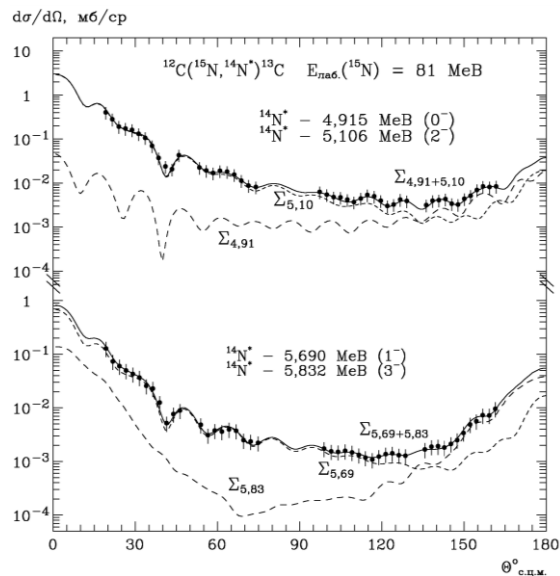


Рис. 8. Диференціальні перерізи реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ для збуджених станів ядер  $^{14}\text{N}$ . Криві – МЗКР-розрахунки для передач нуклонів і кластерів.

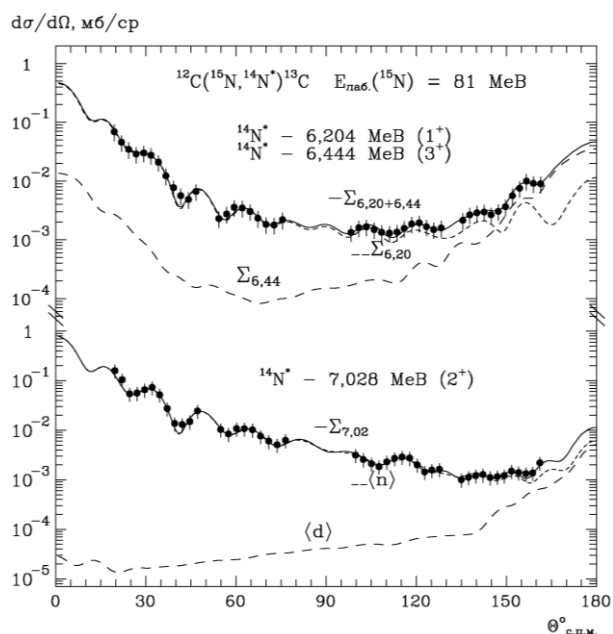


Рис. 9. Диференціальні перерізи реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ для збуджених станів ядер  $^{14}\text{N}$ . Криві – МЗКР-розрахунки для передач нуклонів і кластерів.

Кутові розподіли диференціальних перерізів реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  для збуджених станів 4,915 - 7,028 МеВ ядра  $^{14}\text{N}$  показано на рис. 8 і 9.

#### 4. Основні результати та висновки

У даній роботі отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ для основних та збуджених станів ядер  $^{14}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$ . Експериментальні дані проаналізовано за МЗКР із включенням у схему зв'язку каналів реакцій одно- та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів.

З аналізу експериментальних даних реакції отримано параметри потенціалу WS взаємодії ядер  $^{14}\text{N} + ^{13}\text{C}$  в основних і збуджених станах та інформацію про механізми цієї реакції. Установлено, що в реакції  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  основну роль відіграють передачі нейтронів.

Отримано відомості про оболонкову та кластерну структуру ядер  $^{14,15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$ . Обчислено спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів у цих ядрах.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. А.Т. Рудчик, А.А. Рудчик, О.Е. Куцик та ін. Пружне і непружне розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{12}\text{C}$  при енергії 81 МеВ. *Ядерна фізика та енергетика* 19(3) (2018) 210. / А.Т. Rudchik, А.А. Rudchik, О.Е. Kutsyk. Elastic and inelastic scattering of  $^{15}\text{N}$  ions by  $^{12}\text{C}$  nuclei at energy 81 MeV. *Yaderna Fyzyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 19(3) (2018) 210. (Ukr)
2. А.Т. Рудчик, А.А. Рудчик, О.Е. Kutsyk 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) 753.
3. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the  $p$ -shell nuclei. *Phys. Rev. C* 15 (1977) 84.
4. E. Piasecki et al. *Project ICARE at HIL* (Warsaw: Heavy Ion Laboratory, 2007) 38 p.
5. А.Т. Рудчик, Ю.М. Чуви́льський. Вычисление спектроскопических амплитуд для произвольных ассоциаций нуклонов в ядрах 1p-оболочки (программа DESNA). Препр. Ин-та ядерных исслед. АН УССР. КИЯИ-82-12 (Киев, 1982) 27 с. / А.Т. 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)
6. А.Т. Рудчик, Ю.М. Чуви́льський. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1p-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач. УФЖ 30(6) (1985) 819. / А.Т. 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)
7. 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.
8. J. Cook. DF POT: a program for the calculation of double folded potentials. *Comp. Phys. Com.* 25 (1982) 125.
9. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* 7 (1988) 167.

А. Т. Rudchik<sup>1,\*</sup>, А. А. Rudchik<sup>1</sup>, О. Е. Kutsyk<sup>1</sup>, К. Rusek<sup>2</sup>, К. W. Kemper<sup>3</sup>, Е. Piasecki<sup>2</sup>, А. Stolarz<sup>2</sup>, А. Trzcíńska<sup>2</sup>, Val. M. Pirnak<sup>1</sup>, О. А. Ponkratenko<sup>1</sup>, I. Strojek<sup>4</sup>, Е. I. Koshchiy<sup>5</sup>, R. Siudak<sup>6</sup>, S. B. Sakuta<sup>7</sup>, V. A. Plujko<sup>8</sup>, А. Р. Пуйн<sup>1</sup>, Yu. M. Stepanenko<sup>1</sup>, V. V. Uleshchenko<sup>1</sup>, Yu. O. Shyrma<sup>1</sup>, V. V. Kheilo<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

 **$^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  REACTION MECHANISMS AT ENERGY 81 MeV**

The new experimental data of the  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  reaction cross-sections at the energy  $E_{\text{lab}}(^{15}\text{N}) = 81$  MeV were measured for the ground and excited states of  $^{14}\text{N}$  and  $^{13}\text{C}$  nuclei. The experimental data were analyzed within the coupled-reaction-channels method (CRC) using channels-coupling scheme with the  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$  elastic scattering and one- as well as two-step transfers of nucleons and clusters performing CRC-calculations with the Woods - Saxon potentials (WS) for the entrance and exit reaction channels. The WS potential parameters for the  $^{12}\text{C} + ^{15}\text{N}$  nuclear interaction were taken from the previously studied elastic and inelastic scattering of  $^{15}\text{N}$  ions by  $^{12}\text{C}$  nuclei at the energy 81 MeV, when as deduced previously from CRC-analysis of the  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$  elastic and inelastic scattering data, when as the WS potential parameters for the  $^{14}\text{N} + ^{13}\text{C}$  reaction exit channel were deduced from fitting of the  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  reaction data. The spectroscopic factors (amplitudes) of transferred in the reaction nucleons and clusters, used in the CRC-calculations, were computed within translational invariant shell model of 1p-shell. It was found, that transfers of neutrons (n) and deuterons (d) dominate in this reaction. Multi-step transfers of nucleons and clusters give small contributions to the reaction data.

*Keywords:* nuclear reaction  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{13}\text{C}$  data, one- and two-step mechanisms of the reaction, coupled-reaction channels method, spectroscopic amplitudes of nucleons and clusters.

Надійшла/Received 10.08.2020