

**С. Ю. Межевич^{1,*}, А. Т. Рудчик¹, К. Русек², К. В. Кемпер³,
А. А. Рудчик¹, О. А. Понкратенко¹, С. Б. Сакута⁴**

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

³ Відділ фізики Флоридського державного університету, Таллахассі, США

⁴ Національний дослідницький центр «Курчатівський інститут», Москва, Росія

*Відповідальний автор: sermezhev@gmail.com

МЕХАНІЗМИ РЕАКЦІЇ $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ ЗА ЕНЕРГІЇ 45 МеВ ДЛЯ ОСНОВНИХ І ЗБУДЖЕНИХ СТАНІВ ЯДЕР ^{10}B І ^{15}C

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ за енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ для основних та збуджених станів ядер вихідного каналу реакції. Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). У схему зв'язку включались канал пружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{11}\text{B}$ та канали одно- та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів. У МЗКР-розрахунках для вхідного каналу реакції використовувався потенціал Вудса - Саксона (WS), параметри якого було отримано раніше з аналізу експериментальних даних пружного й непружного розсіяння ядер $^{11}\text{B} + ^{14}\text{C}$, а для вихідного каналу $^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}$ – потенціал WS, параметри якого було отримано з підгонки МЗКР-перерізів реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ до експериментальних даних цієї реакції. Необхідні для МЗКР-розрахунків спектроскопічні амплітуди (фактори) для переданих у реакції нуклонів і кластерів було обчислено за трансляційно-інваріантною моделлю оболонки. Досліджено механізми одно та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів у даній реакції. Отримано параметри потенціалу взаємодії ядер $^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}$ та проведено порівняння МЗКР-перерізів реакції при використанні у вихідному каналі реакції параметрів потенціалів взаємодії ядер $^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}$ і $^{12,13}\text{C} + ^{10}\text{B}$. Виявлено відмінності цих МЗКР-розрахунків реакції, тобто спостерігається прояв «ізоотопічного ефекту» потенціалів взаємодії ядра ^{10}B з ізотопами вуглецю $^{12,13,15}\text{C}$.

Ключові слова: ядерна реакція $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$, метод зв'язаних каналів реакцій, спектроскопічні амплітуди, оптичні потенціали, механізми реакцій.

1. Вступ

Реакції важких іонів з ядрами важливі для отримання інформації про структуру ядер, механізми ядерних процесів, потенціали взаємодії стабільних і нестабільних ядер, спектроскопічні дані збуджених станів ядер тощо.

Метою даної роботи було дослідження реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ за енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ, вимірювання диференціальних перерізів реакції у повному кутовому діапазоні, аналіз отриманих експериментальних даних реакції за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР), визначення параметрів потенціалу Вудса - Саксона (WS) взаємодії ядер $^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}$, отримання відомостей про оболонкову та кластерну структуру ядер реакції, а також про механізми передач нуклонів і кластерів у даній реакції.

2. Методика експерименту

Пружне й непружне розсіяння іонів ^{11}B ядрами ^{14}C та реакції передач $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, X)Y$ за енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ вимірювались на Варшавському циклотроні U-200P [1]. Мішенню була самопідтримна фольга вуглецю товщиною ~ 280 мкг/см² із 86 %-ним збагаченням ізотопом

^{14}C . Розкид енергії пучка ^{11}B на мішені не перевищував 0,5 %.

Для реєстрації продуктів реакцій використовувався (ΔE - E)-телескоп з іонізаційною камерою як ΔE -детектором із трьома вхідними вікнами. На виході з камери встановлювались три кремнієві E -детектори товщиною 1,0 мм. Робочим газом в іонізаційній камері був аргон за тиску, втрати енергії продуктами реакцій в якому були еквівалентними втратам у кремнієвому детекторі товщиною 15 мкм.

В експерименті використовувались електроніка типу САМАС та комп'ютерна система SMAN [2] для реєстрації та сортування спектретричної інформації телескопів у вигляді двовимірних $\Delta E(E)$ -спектрів. Більше відомостей про методики вимірювань подано в роботі [1], де опубліковано результати дослідження пружного й непружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{11}\text{B}$ за енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ.

Типовий $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, X)Y$ показано в роботі [1] на рис. 1, з якого видно, що експериментальна методика забезпечувала реєстрацію й ідентифікацію продуктів реакцій із зарядами $Z = 3 - 8$.

© С. Ю. Межевич, А. Т. Рудчик, К. Русек, К. В. Кемпер, А. А. Рудчик, О. А. Понкратенко, С. Б. Сакута, 2020

Для аналізу дво- та одновимірних експериментальних спектрів у даній роботі використано таку саму методику, як і в роботі [3]. Типові енергетичні спектри для ядер ^{10}B і ^{15}C з реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ показано на рис. 1 і 2. Фон, ін-

формація про структуру якого міститься в роботі [3], наближувався параметризованими функціями сігмоїдального типу за допомогою програми РЕАКФІТ, а піки експериментальних спектрів - симетричними гауссіанами.

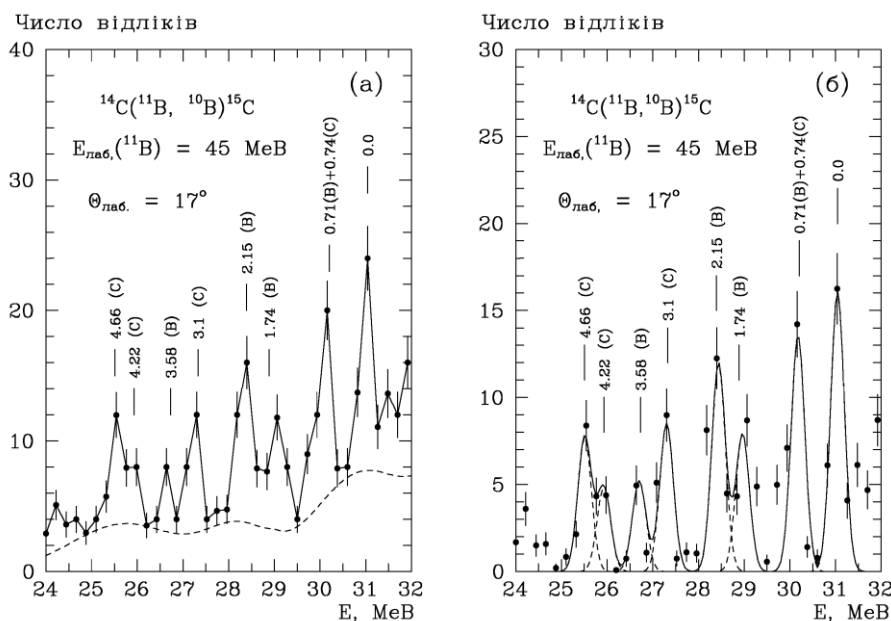


Рис. 1. Типові енергетичні спектри ^{10}B – продуктів реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ за енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45 \text{ MeV}$ з фоном (а) та з вилученим фоном (б). Криві – симетричні функції Гаусса.

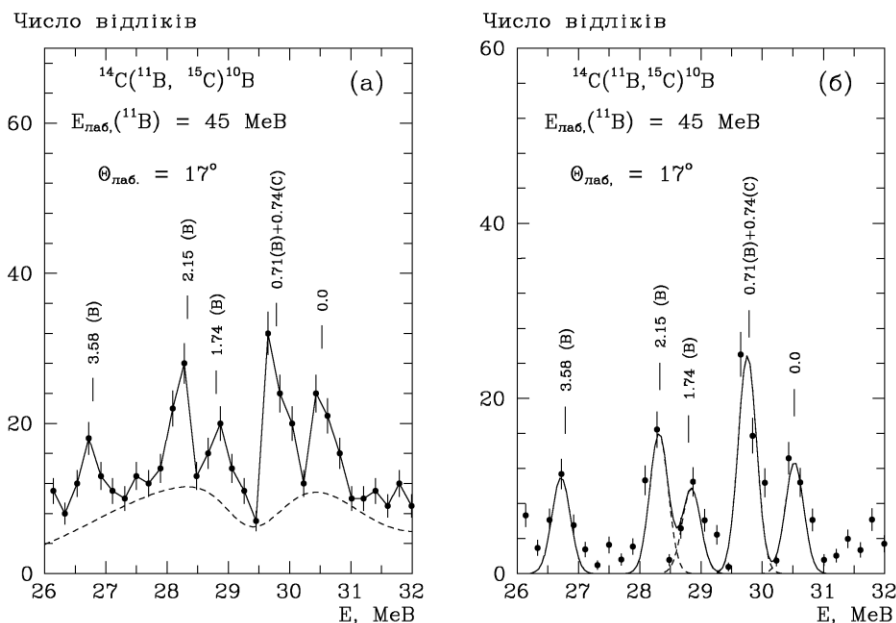


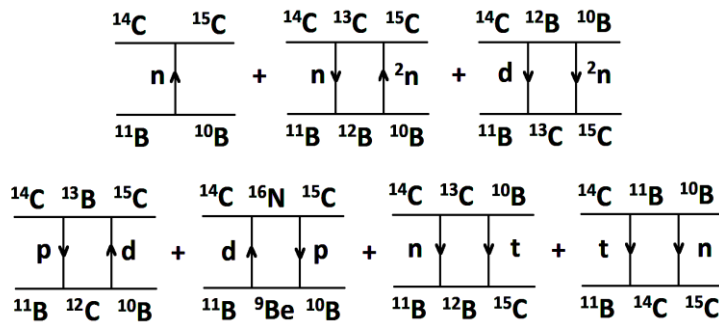
Рис. 2. Типові енергетичні спектри ^{15}C – продуктів реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ за енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45 \text{ MeV}$ з фоном (а) та з вилученим фоном (б). Криві – симетричні функції Гаусса.

Площі гауссіанів використовувались для обчислення диференціальних перерізів реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ для кутів $\theta_{\text{с.п.м.}}(^{10}\text{B})$ із спектрів ^{10}B та кутів $\theta_{\text{с.п.м.}}(^{15}\text{C}) = 180^\circ - \theta_{\text{с.п.м.}}(^{10}\text{B})$ із спектрів ^{15}C . Для абсолютизації перерізів реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ використовувався нормувальний множник пружного й непружного розсіяння іонів ^{11}B ядрами ^{14}C [1], що вимірювалось разом із цією реакцією. Похибка абсолютизації диференці-

альних перерізів реакції не перевищує 20 %, а похибка площ апроксимації піків – 30 %.

3. Аналіз експериментальних даних

Експериментальні дані реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ аналізувались за МЗКР. У схему зв'язку включались пружне й непружне розсіяння $^{11}\text{B} + ^{14}\text{C}$ та реакції передач (рис. 3).


 Рис. 3. Діаграми механізмів реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$.

У МЗКР-розрахунках для вхідного та вихідного каналів реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ використовувалися потенціали WS

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

та кулонівський потенціал взаємодії рівномірно заряджених куль

$$V_C(r) = \begin{cases} Z_p Z_T e^2 (3 - r^2 / R_C^2) / 2R_C, & r \leq R_C, \\ Z_p Z_T e^2 / r, & r > R_C. \end{cases} \quad (2)$$

Таблиця 1. Параметри потенціалів WS взаємодії ядер

| Ядра | $E_{с.ц.м.}$, МеВ | V_0 , МеВ | r_V , фм | a_V , фм | W_S , МеВ | r_W , фм | a_W , фм | Літ. |
|--|--------------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------|
| $^{14}\text{C} + ^{11}\text{B}$ | 25,2 | 266,6 | 0,750 | 0,740 | 7,5 | 1,345 | 0,740 | [1] |
| $^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}$ | 14,96 | 174,0 | 0,791 | 0,780 | 9,0 | 0,970 | 0,650 | |
| $^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}_{1,74}$ | 13,22 | 174,0 | 0,791 | 0,780 | 6,5 | 0,970 | 0,650 | |
| $^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}_{3,58}$ | 11,38 | 174,0 | 0,791 | 0,780 | 7,0 | 0,970 | 0,650 | |
| $^{13}\text{C} + ^{10}\text{B}$ | 10,17 - 26,0 | 66,85 | 1,094 | 0,609 | 10,0 | 1,200 | 0,700 | [9] |
| $^{12}\text{C} + ^{10}\text{B}$ | 22,53 | 100,0 | 1,150 | 0,428 | 15,0 | 1,300 | 0,248 | [10] |

Необхідні для МЗКР-розрахунків реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ спектроскопічні амплітуди S_x нуклонів і кластерів x у системах $A = C + x$ обчислювались у рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки (ТІМО) [5] за допомогою програми DESNA [6, 7] з використанням таблиць хвильових функцій ядер 1р-оболонки [8]. Для зв'язаних станів нуклонів і кластерів x в ядрах $A = C + x$ хвильові функції обчислювались стандартним способом підгонки глибини V_0 потенціалу WS з параметрами $a = 0,65$ фм і $r_V = 1,25 \cdot A^{1/3} / (C^{1/3} + x^{1/3})$ до їхньої енергії зв'язку в ядрах A . Значення обчислених за даною моделлю амплітуд S_x наведено в табл. 2.

Тут

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

де A_P , A_T і Z_P , Z_T – маси й заряди ядер вхідного каналу ^{11}B і ^{14}C та вихідного каналу ^{10}B і ^{15}C реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$. У розрахунках потенціалу кулонівської взаємодії ядер використовувався параметр $r_c = 1,25$ фм.

Розрахунки реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ проводились за допомогою програми FRESKO [4] з використанням для вхідного каналу $^{11}\text{B} + ^{14}\text{C}$ потенціалу WS, параметри якого отримано в роботі [1] при дослідженні пружного й непружного розсіяння іонів ^{11}B ядрами ^{14}C за енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ. Параметри потенціалу WS для вихідного каналу $^{10}\text{B} + ^{15}\text{C}$ реакції отримано з підгонки МЗКР-перерізів реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ до експериментальних даних цієї реакції (табл. 1).

Кутові розподіли експериментальних даних реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ для основних станів ядер ^{10}B і ^{15}C та відповідні МЗКР-розрахунки цієї реакції показано на рис. 4. Експериментальні дані на цьому та на всіх наступних рисунках показано з максимальними похибками (30 %). Видно, що в реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ домінує передача нейтрона (крива $\langle n \rangle$). Внески двоступінчастих передач $p + d$ і $d + p$ (крива $\langle pd \rangle$, когерентна сума), $n + t$ і $t + n$ (крива $\langle nt \rangle$), $n + ^2n$ (крива $\langle n^2n \rangle$), $d + ^2n$ (крива $\langle d^2n \rangle$) у перерізі цієї реакції незначні. Суцільною кривою Σ показано когерентну суму всіх реакцій передач.

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

| (A) | C | x | nL _J | S _x | (A) | C | x | nL _J | S _x |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|-------------------|-----------------------|
| ¹⁰ B | ⁹ Be | p | 1P _{3/2} | 1,185 | ¹³ C | ¹⁰ B | t | 1F _{3/2} | 0,108 ^(a) |
| ¹⁰ B* _{0,72} | ⁹ Be | p | 1P _{1/2} | -0,361 ^(a) | | | | 1F _{7/2} | 0,747 |
| | | | 1P _{3/2} | -0,323 | ¹³ C | ¹⁰ B* _{0,72} | t | 2P _{1/2} | -0,655 ^(a) |
| ¹⁰ B* _{1,74} | ⁹ Be | p | 1P _{3/2} | 0,994 ^(a) | | | | 2P _{3/2} | 0,231 |
| ¹⁰ B* _{2,15} | ⁹ Be | p | 1P _{1/2} | -0,663 ^(a) | ¹³ C | ¹⁰ B* _{1,74} | t | 2P _{1/2} | -0,120 |
| | | | 1P _{3/2} | 0,741 | ¹³ C | ¹⁰ B* _{2,15} | t | 2P _{1/2} | -0,069 ^(a) |
| ¹⁰ B* _{3,59} | ⁹ Be | p | 1P _{1/2} | 0,838 | | | | 2P _{3/2} | -0,196 |
| ¹¹ B | ⁹ Be | d | 2S ₁ | -0,607 ^(a) | ¹³ C | ¹⁰ B* _{3,59} | t | 2P _{3/2} | -0,694 ^(a) |
| | | | 1D ₁ | -0,109 ^(a) | | | | 1F _{3/2} | 0,404 |
| | | | 1D ₃ | 0,610 ^(a) | ¹³ C | ¹¹ B | d | 2S ₁ | -0,263 |
| ¹¹ B | ¹⁰ B | n | 1P _{3/2} | -1,347 ^(a) | | | | 1D ₁ | -0,162 |
| ¹¹ B | ¹⁰ B* _{0,72} | n | 1P _{1/2} | -0,268 | | | | 1D ₂ | -0,485 ^(a) |
| | | | 1P _{3/2} | 0,240 ^(a) | ¹⁴ C | ¹¹ B | t | 2P _{3/2} | -0,368 ^(a) |
| ¹¹ B | ¹⁰ B* _{1,74} | n | 1P _{3/2} | -0,494 | ¹⁴ C | ¹² B | d | 1D ₁ | -1,010 |
| ¹¹ B | ¹⁰ B* _{2,15} | n | 1P _{1/2} | -0,571 | ¹⁴ C | ¹³ B | p | 1P _{3/2} | 1,695 ^(a) |
| | | | 1P _{3/2} | -0,638 ^(a) | ¹⁴ C | ¹³ C | n | 1P _{1/2} | -1,094 ^(a) |
| ¹¹ B | ¹⁰ B* _{3,59} | n | 1P _{1/2} | -0,805 ^(a) | ¹⁵ C | ¹² B | t | 3S _{1/2} | -0,160 ^(a) |
| ¹² B | ¹⁰ B | ² n | 1D ₂ | -0,152 | | | | 2D _{3/2} | 0,057 |
| ¹² B | ¹⁰ B* _{0,72} | ² n | 2S ₀ | -0,746 | ¹⁵ C | ¹³ B | d | 2P ₁ | -0,144 |
| | | | 1D ₂ | -0,046 | | | | 1F ₂ | -0,338 ^(a) |
| ¹² B | ¹⁰ B* _{2,15} | ² n | 1D ₂ | -0,380 | ¹⁵ C* _{0,74} | ¹³ B | d | 2P ₁ | 0,343 |
| ¹² B | ¹⁰ B* _{3,59} | ² n | 1D ₂ | 0,060 ^(a) | | | | 2P ₂ | 0,279 ^(a) |
| ¹² B | ¹¹ B | n | 1P _{1/2} | -0,142 | | | | 1F ₃ | 0,100 |
| | | | 1P _{3/2} | -0,127 ^(a) | ¹⁵ C | ¹⁴ C | n | 2S _{1/2} | -0,882 |
| ¹² C | ¹⁰ B | d | 1D ₃ | 1,780 | ¹⁵ C* _{0,74} | ¹⁴ C | n | 1D _{5/2} | -0,882 |
| ¹² C | ¹⁰ B* _{0,72} | d | 1D ₁ | 1,165 | ¹⁶ N | ¹⁴ C | d | 2P ₂ | 0,380 |
| ¹² C | ¹⁰ B* _{2,15} | d | 2S ₁ | -1,386 | ¹⁶ N | ¹⁵ C | p | 1P _{3/2} | 0,500 |
| ¹² C | ¹⁰ B* _{3,59} | d | 1D ₂ | 1,504 | ¹⁶ N | ¹⁵ C* _{0,74} | p | 1P _{1/2} | 0,238 ^(a) |
| ¹² C | ¹¹ B | p | 1P _{3/2} | -1,706 ^(a) | | | | 1P _{3/2} | -0,318 |

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

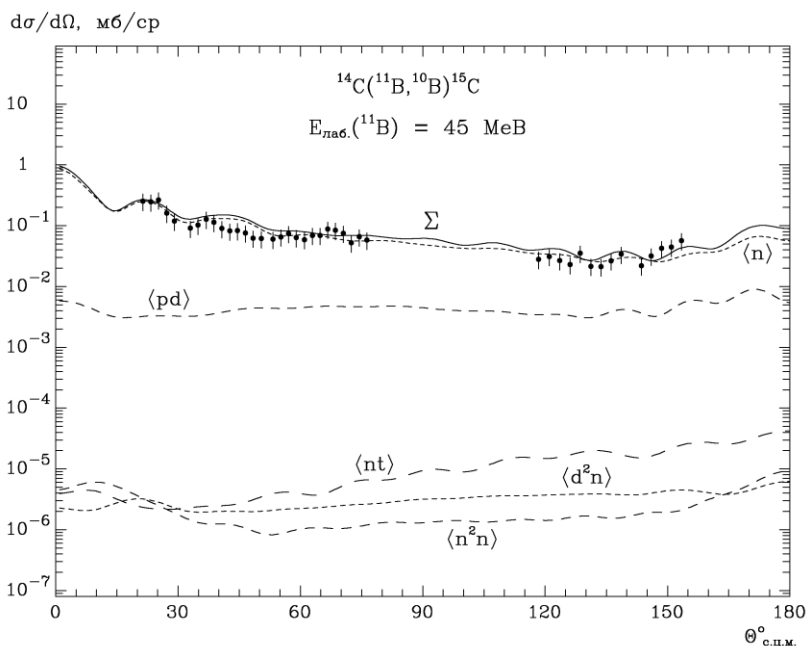


Рис. 4. Диференціальні перерізи реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ за енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ для основних станів ядер ^{10}B і ^{15}C . Криві – МЗКР-розрахунки для різних механізмів реакції, обчислені з потенціалами WS для вхідного ($^{14}\text{C} + ^{11}\text{B}$) та вихідного ($^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}$) каналів згідно з табл. 1.

На рис. 5 показано порівняння сумарних (Σ) МЗКР-перерізів реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$, обчислених при використанні для потенціалу взаємодії ядер $^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}$ параметрів, отриманих у цій роботі, та параметрів взаємодії ядер $^{13}\text{C} + ^{10}\text{B}$ [9] і $^{12}\text{C} + ^{10}\text{B}$ [10] (див. табл. 1). Видно помітну різницю МЗКР-перерізів реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ при використанні параметрів потенціалів взаємодії ядер $^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}$, $^{13}\text{C} + ^{10}\text{B}$ [9] та $^{12}\text{C} + ^{10}\text{B}$ [10]. Це є

так званий ізотопічний ефект як прояв відмінності потенціалів взаємодії ядра ^{10}B з ізотопами $^{12}, ^{13}, ^{15}\text{C}$, які, у свою чергу, мають різну структуру: для ядра ^{12}C загальноприйнято вважається від'ємна квадрупольна деформація, а для ядра ^{13}C вона є додатною [11, 12], слабо зв'язане ядро ^{15}C ($S_n = 1,218$ МеВ) є ядром типу нейтронного «галю» [13].

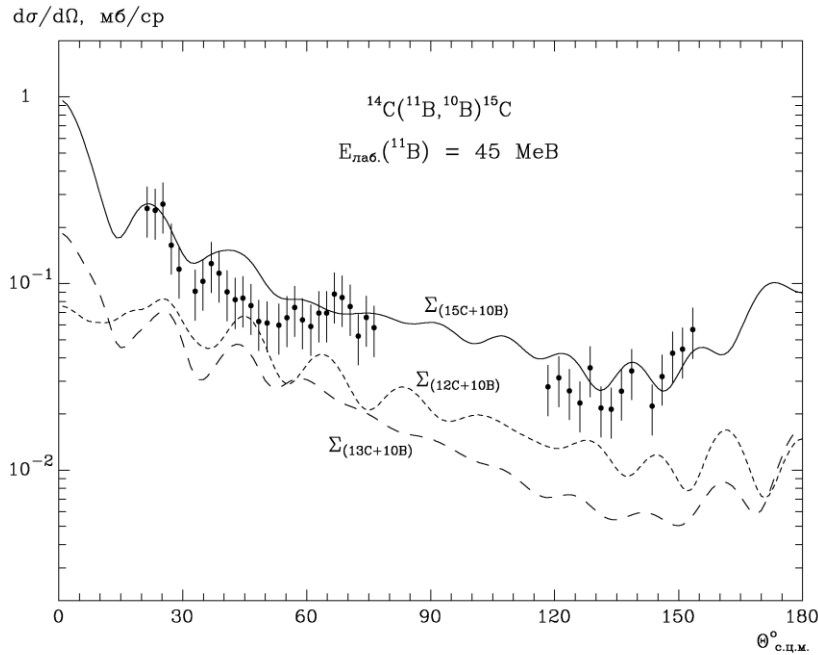


Рис. 5. Диференціальні перерізи реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ за енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ для основних станів ядер ^{10}B і ^{15}C . Криві – МЗКР-розрахунки з різними параметрами потенціалу взаємодії ядер $^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}$ (див. табл. 1).

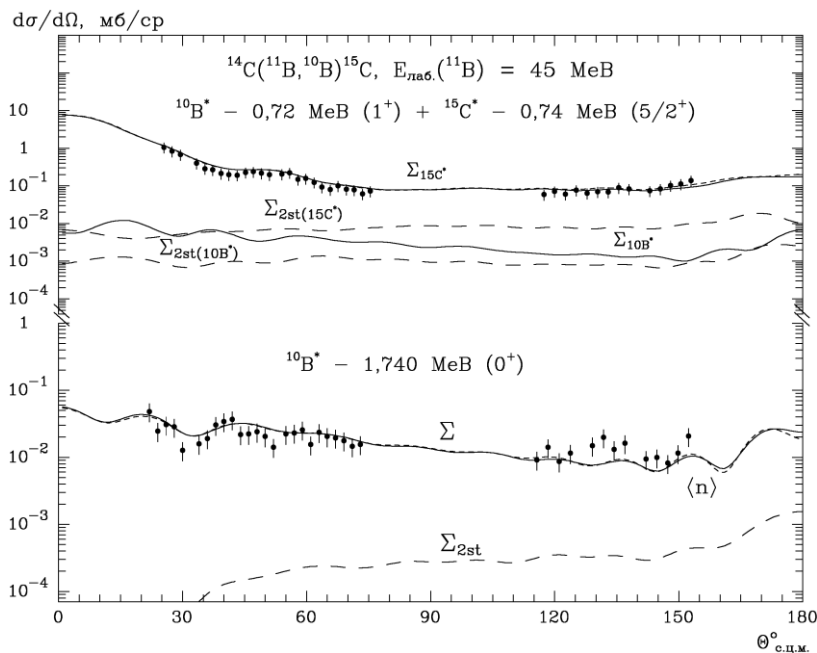


Рис. 6. Диференціальні перерізи реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ за енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ для збуджених станів 0,72 МеВ (1^+) ядра ^{10}B та 0,74 МеВ ($5/2^+$) ядра ^{15}C (нерозділені в експерименті) – верхня частина, та збудженого стану 1,740 МеВ (0^+) ядра ^{10}B – нижня частина. Криві – МЗКР-перерізи для різних процесів.

На верхній частині рис. 6 показано експериментальні дані та МЗКР-розрахунки для реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ за енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ MeV для збуджених станів 0,72 MeV (1^+) ядра ^{10}B та 0,74 MeV ($5/2^+$) ядра ^{15}C (нерозділені в експерименті). Штриховими кривими $\Sigma_{2\text{st}(^{15}\text{C}^*)}$ та $\Sigma_{2\text{st}(^{10}\text{B}^*)}$ показано когерентні суми диференціальних перерізів двоступінчастих реакцій передач для збуджених станів 0,74 MeV ($5/2^+$) ядра ^{15}C та 0,72 MeV (1^+) ядра ^{10}B відповідно, а суцільними кривими $\Sigma_{^{15}\text{C}^*}$ та $\Sigma_{^{10}\text{B}^*}$ – когерентні суми диференціальних перерізів передач нейтронів та вищезазначених двоступінчастих процесів для цих станів. Видно, що домінуючий внесок у перерізи вносить пряма передача нейтрона для збудженого стану 0,74 MeV ($5/2^+$) ядра ^{15}C , пунктирна

крива для цього процесу збігається із суцільною кривою $\Sigma_{^{15}\text{C}^*}$. На нижній частині рисунка показано експериментальні дані для збудженого стану 1,740 MeV (0^+) ядра ^{10}B . Кривими $\langle n \rangle$, $\Sigma_{2\text{st}}$ і Σ показано диференціальні перерізи для передачі нейтрона, когерентної суми двоступінчастих реакцій передач та когерентної суми передачі нейтрона та двоступінчастих процесів відповідно. Як видно, і для стану 1,740 MeV (0^+) ядра ^{10}B домінуючим процесом є передача нейтрона в реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$. Для задовільного опису експериментальних даних на задніх кутах для цього збудженого стану 1,740 MeV (0^+) ядра ^{10}B використано потенціал взаємодії ядер вихідного каналу із зменшеною глибиною уявної частини (див. табл. 1).

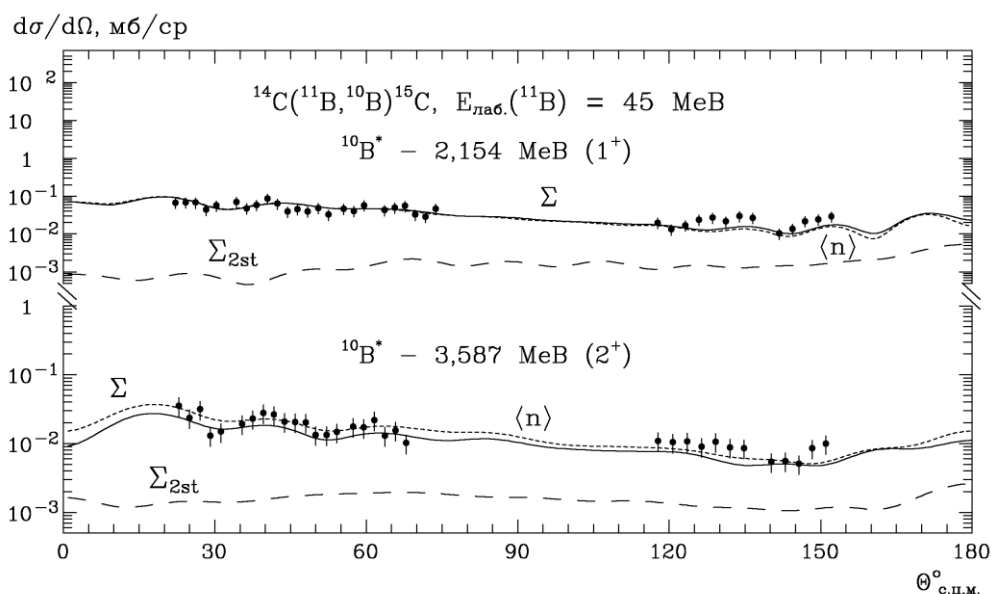


Рис. 7. Диференціальні перерізи реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ за енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ MeV для збуджених станів 2,154 MeV (1^+) (верхня частина) та 3,587 MeV (2^+) (нижня частина) ядра ^{10}B . Криві – МЗКР-перерізи для різних процесів.

На рис. 7 показано експериментальні дані та МЗКР-розрахунки для реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ за енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ MeV для збуджених станів ядра ^{10}B : 2,154 MeV (1^+) та 3,587 MeV (2^+), що містяться на верхній та нижній частинах рисунку відповідно. Кривими $\langle n \rangle$ і $\Sigma_{2\text{st}}$ показано внески передачі нейтронів та когерентної суми двоступінчастих процесів відповідно в диференціальні перерізи реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ для цих збуджених станів ядра ^{10}B . Як видно, для цих двох станів ядра ^{10}B внески двоступінчастих реакцій передач незначні, а домінує передача нейтрона. Суцільними кривими Σ на рисунку показано когерентну суму передачі нейтрона та двоступінчастих процесів для станів 2,154 MeV (1^+) та 3,587 MeV (2^+) ядра ^{10}B відповідно. У розрахунках для стану 3,587 MeV (2^+) ядра ^{10}B використано потенціал взаємодії ядер вихідного каналу з

глибиною уявної частини трохи меншої, ніж для основних станів ядер $^{10}\text{B} + ^{15}\text{C}$ (див. табл. 1).

4. Основні результати та висновки

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ за енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ MeV для основних станів ядер ^{10}B і ^{15}C , збуджених станів 0,72 MeV (1^+) ядра $^{10}\text{B} + 0,74$ MeV ($5/2^+$) ядра ^{15}C (нерозділені в експерименті), станів 1,740 MeV (0^+), 2,154 MeV (1^+) та 3,587 MeV (2^+) ядра ^{10}B . Експериментальні дані реакції проаналізовано за МЗКР. У схему зв'язку включались канали пружного й непружного розсіяння ядер $^{11}\text{B} + ^{14}\text{C}$ та реакцій одно- та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів.

У МЗКР-розрахунках для вхідного каналу реакції використовувався потенціал WS, одержа-

ний з попереднього МЗКР-аналізу експериментальних даних пружного розсіяння ядер $^{11}\text{B} + ^{14}\text{C}$ за енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ MeV [1]. Необхідні для МЗКР-розрахунків перерізів реакції спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів в ядрах було обчислено в рамках ТІМО [5] за допомогою програми DESNA [6]. Квадратами цих амплітуд визначаються спектроскопічні фактори нуклонів і кластерів в ядрах.

У результаті МЗКР-аналізу експериментальних даних реакції $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ отримано відомості про механізми реакції та параметри потенціалу WS взаємодії ядер $^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}$. Установлено, що в даній реакції для основних станів ядер ^{10}B та ^{15}C та збуджених станів ядра ^{10}B МЗКР-розрахунки для передачі нейтрона задовільно

описують експериментальні дані в повному кутовому діапазоні, а внески двоступінчастих передач нуклонів і кластерів виявились незначними. Експериментальні дані для нерозділених станів 0,72 MeV (1^+) ядра $^{10}\text{B} + 0,74$ MeV ($5/2^+$) ядра ^{15}C задовільно описуються МЗКР-кривою для передачі нейтрона у збуджений стан 0,74 MeV ($5/2^+$) ядра ^{15}C .

Проведено порівняння параметрів потенціалів WS взаємодії ядер $^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}$, $^{13}\text{C} + ^{10}\text{B}$ [9] і $^{12}\text{C} + ^{10}\text{B}$ [10] та МЗКР-перерізів реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ при використанні їх у вихідному каналі реакції. Виявлено відмінності цих перерізів (*ізотопічні ефекти*), що може вказувати на відмінність внутрішньої структури цих ізотопів вуглецю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. S. Yu. Mezhevych et al. Elastic and inelastic scattering of $^{14}\text{C} + ^{11}\text{B}$ versus $^{12,13}\text{C} + ^{11}\text{B}$. *Eur. Phys. J. A* **50** (2014) 4.
2. M. Kowalczyk. SMAN: a Code for Nuclear Experiments. Warsaw University Report, 1998.
3. S. Yu. Mezhevych et al. $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ reaction at 45 MeV, $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$ interaction versus that of $^{12}\text{C} + ^{10,11}\text{B}$. *Acta Phys. Pol. B* **51** (2020) 1949.
4. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* **7** (1988) 167.
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 $1p$ -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)
7. А.Т. Рудчик, Ю.М. Чувильский. 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)
8. А.Н. Бояркина. Структура ядер $1p$ -оболочки (Москва: Изд-во Москов. ун-та, 1973) 62 с. / А.Н. Boyarkina. *The Structure of the $1p$ -shell Nuclei* (Moskva: Moscow University, 1973) 62 p. (Rus)
9. J.F. Mateja et al. $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$ and $^{10}\text{B} + ^{13}\text{C}$ fusion cross sections. *Phys. Rev. C* **25** (1982) 2963.
10. N. Burtebayev et al. Measurement and analysis of $^{10}\text{B} + ^{12}\text{C}$ elastic scattering at energy of 41.3 MeV. *Int. J. Mod. Phys. E* **28** (2019) 1950028.
11. 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.
12. М. N. El-Hammamy et al. Study of ^3He inelastic scattering on ^{13}C and ^{14}C at 37.9 MeV. *Chin. Phys. C* **38** (2014) 034102.
13. Ahmed N. Abdullah. Investigation of halo structure of neutron rich ^{14}B , ^{15}C , ^{19}C and ^{22}N nuclei in the two-body model. *Int. J. Mod. Phys. E* **29** (2020) 2050015.

S. Yu. Mezhevych^{1,*}, A. T. Rudchik¹, K. Rusek², K. W. Kemper³,
A. A. Rudchik¹, O. A. Ponkratenko¹, S. B. Sakuta⁴

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 Russian Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

*Corresponding author: sermezhev@gmail.com

**MECHANISMS OF $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ REACTION AT ENERGY 45 MeV
FOR GROUND AND EXCITED STATES OF ^{10}B AND ^{15}C NUCLEI**

New experimental data for differential cross-sections of the reaction $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ at $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ MeV were obtained for transitions to the ground and excited states of the exit reaction channel nuclei. The experimental data were analyzed within the coupled-reaction-channels method (CRC). The $^{14}\text{C} + ^{11}\text{B}$ elastic scattering channel

as well as channels for one- and two-step transfers of nucleons and clusters were included in the coupling scheme. The Woods - Saxon (WS) potential was used in the CRC-calculations for the entrance reaction channel with the parameters deduced previously from the analysis of the experimental data of $^{11}\text{B} + ^{14}\text{C}$ elastic and inelastic scattering, whereas the WS potential for the exit $^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}$ reaction channel was deduced from the fit of CRC cross-sections to the $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$ reaction experimental data. Needed for CRC-calculations spectroscopic amplitudes (factors) of the nucleons and clusters transferred in the reaction were calculated within the translational-invariant shell model. The mechanisms for one- and two-step transfers of nucleons and clusters were investigated in this reaction. The $^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}$ potential parameters were deduced, and comparisons of the CRC reaction cross-sections calculated with the $^{15}\text{C} + ^{10}\text{B}$ and $^{12,13}\text{C} + ^{10}\text{B}$ potential parameters were performed. The differences between these CRC calculations were observed, e.g. "isotopic effects" were observed for the potentials of ^{10}B interaction with $^{12,13,15}\text{C}$ carbon isotopes.

Keywords: nuclear reaction $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{B})^{15}\text{C}$, coupled-reaction-channels method, spectroscopic amplitudes, optical potentials, reaction mechanisms.

Надійшла/Received 20.08.2020