

**С. Ю. Межевич¹, А. Т. Рудчик^{1*}, 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 «Курчатовський інститут», Москва, Росія

*Відповідальний автор: rudchik@kinr.kiev.ua

МЕХАНІЗМИ РЕАКЦІЇ $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ 45 МеВ ТА ВЗАЄМОДІЇ ЯДЕР $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$, $^{12}\text{C} + ^{10,11}\text{B}$

Досліджено реакцію $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ для основних станів ядер ^{12}C і ^{12}B та збуджених станів ядра ^{12}B . Отримано нові експериментальні дані кутових розподілів диференціальних перерізів реакції. Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). У схему зв'язку включався канал пружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$ та канали одно- й двоступінчастих передач нуклонів і кластерів у цій реакції. 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 $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$, а для вихідного каналу $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$ - потенціал WS, параметри якого було отримано з підгонки МЗКР-перерізів реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ 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 прямі механізми передач нуклонів і кластерів у реакції. Отримано параметри потенціалу взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$ та проведено порівняння МЗКР-перерізів реакції при використанні у вихідному каналі реакції параметрів потенціалів взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$ і $^{12}\text{C} + ^{10,11}\text{B}$. Виявлено відмінності цих МЗКР-розрахунків реакції, тобто спостерігається прояв «ізотопічного ефекту» потенціалів взаємодії ядра ^{12}C з ізотопами бору $^{10,11,12}\text{B}$.

Ключові слова: ядерна реакція $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$, 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 збуджень станів ядер тощо. Метою даної роботи було експериментальне дослідження реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при 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 взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$ у формі Вудса - Саксона (WS), отримання відомостей про оболонкову й кластерну структуру ядер реакції та про механізми передач нуклонів і кластерів у даній реакції. Особлива увага приділялась дослідженню структурних особливостей нестабільного ядра ^{12}B та взаємодії ізобаричних ядер $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$.

2. Методика експерименту

Диференціальні перерізи пружного й непружного розсіяння іонів ^{11}B ядрами ^{13}C при енергії

$E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ та реакцій передач $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, X)$ вимірювались на Варшавському циклотроні U-200P [1]. Мішенню була самопідтримна фольга вуглецю товщиною ~ 500 мкг/см² із 90 %-ним збагаченням ізотопом ^{13}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 з трьома вхідними вікнами. На виході з камери встановлювались три кремнієві E-детектори товщиною 1,0 мм. Робочим газом в іонізаційній камері був аргон при 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 $^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ.

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

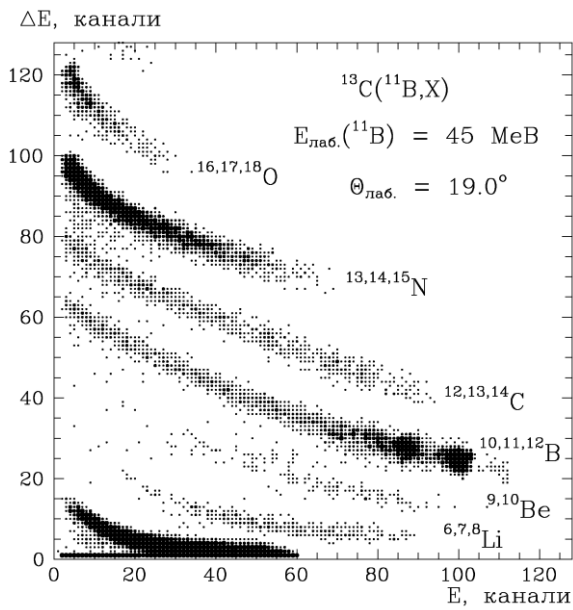


Рис. 1. Типовий $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ MeV.

Типовий $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, X)$ показано на рис. 1. Видно, що експериментальна методика забезпечувала реєстрацію й ідентифікацію продуктів реакцій із зарядами $Z = 3 - 8$.

Типові енергетичні спектри для ядер ^{12}C і ^{12}B з реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ показано на рис. 2 і 3. Фон наближувався параметризованими функціями сігмоїдального типу за допомогою програми РЕАКФІТ, а піки експериментальних спектрів - симетричними гауссіанами.

Площі гауссіанів використовувались для обчислення диференціальних перерізів реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ для кутів $\theta_{\text{с.п.м.}}(^{12}\text{C})$ із спектрів ^{12}C та кутів $\theta_{\text{с.п.м.}}(^{12}\text{C}) = 180^\circ - \theta_{\text{с.п.м.}}(^{12}\text{B})$ із спектрів ^{12}B . Для абсолютизації перерізів реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ використовувався нормувальний множник пружного й непружного розсіяння іонів ^{11}B ядрами ^{13}C [1], що вимірювалось разом із цією реакцією. Похибка абсолютизації диференціальних перерізів реакції не перевищує 20 %.

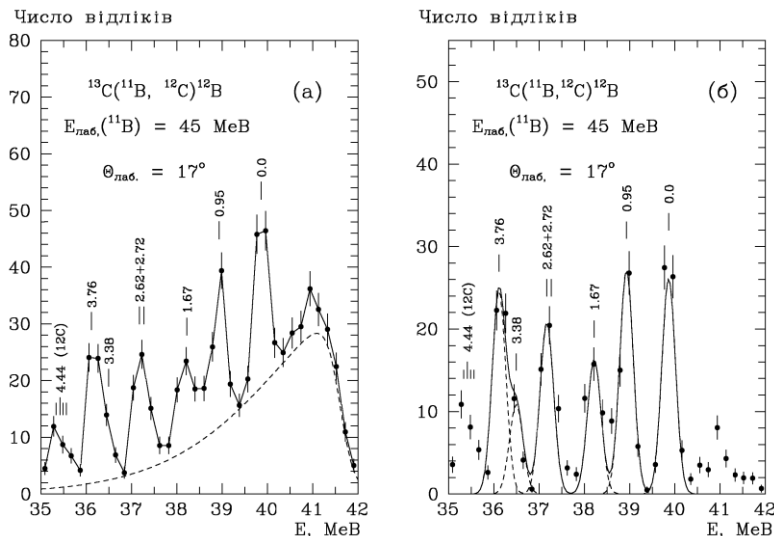


Рис. 2. Типові енергетичні спектри ^{12}C з реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ MeV з неперервним фоном від багаточастинкових реакцій (а) та з вилученим фоном (б). Криві - симетричні функції Гаусса.

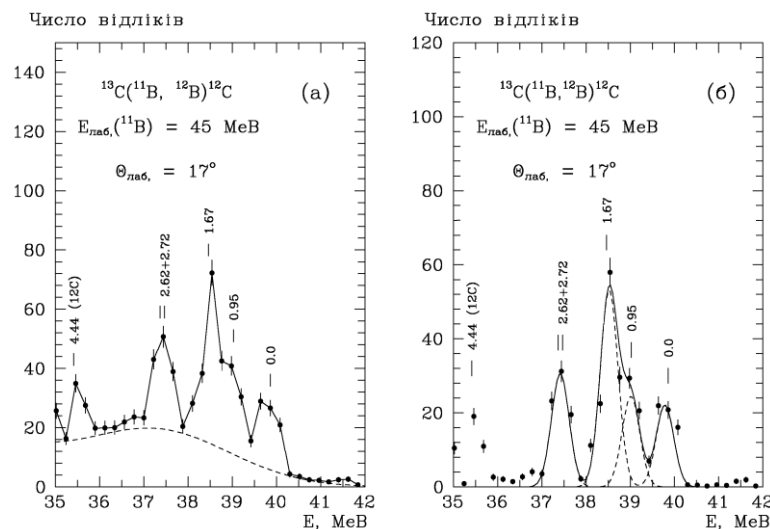


Рис. 3. Типові енергетичні спектри ^{12}B з реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ MeV з неперервним фоном від багаточастинкових реакцій (а) та з вилученим фоном (б). Криві - симетричні функції Гаусса.

3. Аналіз експериментальних даних

Експериментальні дані реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ аналізувались за МЗКР. У схему зв'язку включались пружне й непружне розсіяння $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$ та реакції передачі, діаграми яких показано на рис. 4.

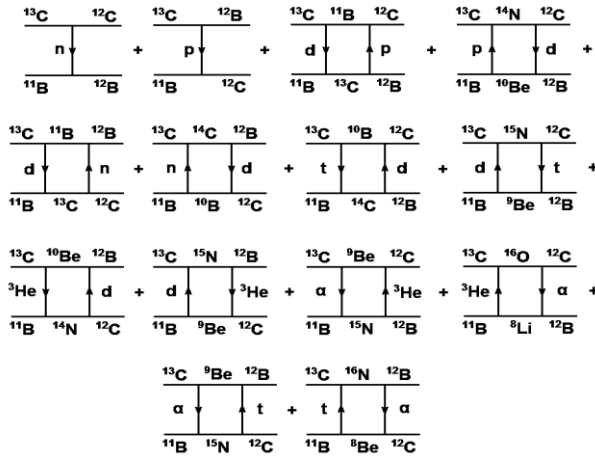


Рис. 4. Діаграми механізмів реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$.

У МЗКР-розрахунках для вхідного та вихідного каналів реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ використовувалися потенціали WS

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

Таблиця 1. Параметри потенціалів WS взаємодії ядер

Ядра	$E_{с.ц.м.}, \text{MeB}$	V_0, MeB	$r_V, \text{фм}$	$a_V, \text{фм}$	W_S, MeB	$r_W, \text{фм}$	$a_W, \text{фм}$	Літ.
$^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$	24,38	256,7	0,788	0,740	7,0	1,250	0,740	[1]
$^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$	22,80	177,0	0,788	0,740	9,0	1,000	0,600	
$^{12}\text{C} + ^{11}\text{B}$	22,17	251,0	0,788	0,670	8,0	1,250	0,670	[8]
$^{12}\text{C} + ^{10}\text{B}$	22,53	100,0	1,150	0,428	15,0	1,300	0,248	[9]

Необхідні для МЗКР-розрахунків реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ спектроскопічні амплітуди S_x нуклонів і кластерів x у системах $A = C + x$ обчислювались у рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки (ТМО) [4] за допомогою програми DESNA [5, 6] з використанням таблиць хвильових функцій ядер 1р-оболонки [7]. Значення амплітуд S_x подано в табл. 2.

Кутові розподіли експериментальних даних реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ для основних станів ядер ^{12}C і ^{12}B та відповідні МЗКР-розрахунки цієї реакції показано на рис. 5. Видно, що в реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ домінує передача протона (крива $\langle p \rangle$), а передача нейтрона (крива $\langle n \rangle$) дає незначний внесок у перерізи реакції на великих кутах. Внески двоступінчастих передач $d + n$ і $n + d$ (крива $\langle dn \rangle$, когерентна сума), $d + t$ і $t + d$ (кри-

та кулонівський потенціал взаємодії рівномірно заряджених куль

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

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 й вихідного каналів реакції. У розрахунках потенціалу кулонівської взаємодії ядер використовувався параметр $r_C = 1,25$ фм.

Хвильові функції зв'язаних станів нуклонів і кластерів x у ядрах $A = C + x$ обчислювались стандартним способом підгонки глибини V_0 потенціалу WS з параметрами $a_V = 0,65$ фм і $r_V = 1,25 \cdot A^{1/3} / (C^{1/3} + x^{1/3})$ до їхньої енергії зв'язку в ядрах A .

Розрахунки реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ проводились за допомогою програми FRESKO [3] з використанням для вхідного каналу $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$ потенціалу WS, параметри якого отримано в роботі [1] при дослідженні пружного й непружного розсіяння іонів ^{11}B ядрами ^{13}C при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ. Параметри потенціалу WS для вихідного каналу $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$ реакції отримано з підгонки МЗКР-перерізів реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ до експериментальних даних цієї реакції (табл. 1).

ва $\langle dt \rangle$), $d + p$ і $p + d$ (крива $\langle dp \rangle$), $\alpha + t$ і $t + \alpha$ (крива $\langle at \rangle$), $\alpha + ^3\text{He}$ і $^3\text{He} + \alpha$ (крива $\langle \alpha^3\text{He} \rangle$), $d + ^3\text{He}$ і $^3\text{He} + d$ (крива $\langle d^3\text{He} \rangle$) у перерізи цієї реакції незначні. Суцільною кривою $\langle \Sigma \rangle$ показано когерентну суму всіх реакцій передач.

На рис. 6 показано порівняння сумарних ($\langle \Sigma \rangle$) МЗКР-перерізів реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$, обчислених при використанні для потенціалу взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$ параметрів, отриманих у цій роботі, та параметрів взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{11}\text{B}$ [8] і $^{12}\text{C} + ^{10}\text{B}$ [9] (див. табл. 1). Видно помітну різницю МЗКР-перерізів реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ в області середніх кутів при використанні параметрів потенціалів взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$, $^{12}\text{C} + ^{11}\text{B}$ [8] та $^{12}\text{C} + ^{10}\text{B}$ [9]. Це є «ізотопічний ефект» як прояв відмінності потенціалів взаємодії ядра ^{12}C з ізотопами $^{10, 11, 12}\text{B}$.

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
^{11}B	^8Li	^3He	$2P_{1/2}$	0,160 ^(a)	^{13}C	^{10}B	t	$1F_{5/2}$	0,109 ^(a)
			$1F_{5/2}$	0,218 ^(a)				$1F_{7/2}$	0,747
			$1F_{7/2}$	0,214	^{13}C	^{11}B	d	$2S_1$	-0,263
^{11}B	^8Be	t	$2P_{3/2}$	0,641				$1D_1$	-0,162
^{11}B	^9Be	d	$2S_1$	-0,607 ^(a)				$1D_2$	-0,485 ^(a)
			$1D_1$	-0,109 ^(a)	^{13}C	^{12}B	p	$1P_{1/2}$	-0,694 ^(a)
			$1D_3$	0,610 ^(a)				$1P_{3/2}$	0,245
^{11}B	^{10}Be	p	$1P_{3/2}$	0,699	^{13}C	$^{12}\text{B}_{0,95}$	p	$1P_{3/2}$	-0,736 ^(a)
^{11}B	^{10}B	n	$1P_{3/2}$	-1,347 ^(a)	^{13}C	$^{12}\text{B}_{1,67}$	p	$1D_{3/2}$	-0,736 ^(a)
^{12}B	^8Li	α	$2D_2$	0,496 ^(a)	^{13}C	$^{12}\text{B}_{2,62}$	p	$1S_{1/2}$	-0,694 ^(a)
$^{12}\text{B}_{0,95}$	^8Li	α	$3S_0$	-0,411				$1D_{3/2}$	0,245
			$2D_2$	-0,325	^{13}C	$^{12}\text{B}_{2,72}$	p	$1P_{1/2}$	-0,375
			$1G_4$	0,205	^{13}C	$^{12}\text{B}_{3,39}$	p	$1D_{5/2}$	-0,628
$^{12}\text{B}_{1,67}$	^8Li	α	$3P_1$	-0,411 ^(a)	^{13}C	$^{12}\text{B}_{3,76}$		$1P_{3/2}$	-0,601 ^(a)
			$2F_3$	-0,325 ^(a)	^{13}C	^{12}C	n	$1P_{1/2}$	0,601
^{12}B	^9Be	t	$2P_{1/2}$	0,102 ^(a)	^{14}C	^{11}B	t	$2P_{3/2}$	-0,368 ^(a)
			$2P_{3/2}$	0,091	^{14}C	^{12}B	d	$1D_1$	-1,010
			$1F_{5/2}$	0,512 ^(a)	^{14}C	$^{12}\text{B}_{0,95}$	d	$1D_2$	-1,304
$^{12}\text{B}_{0,95}$	^9Be	t	$2P_{1/2}$	-0,237	^{14}C	$^{12}\text{B}_{1,67}$	d	$1P_2$	-1,304
			$1F_{5/2}$	-0,323	^{14}C	^{13}C	n	$1P_{1/2}$	-1,094 ^(a)
			$1F_{7/2}$	0,316 ^(a)	^{14}N	^{11}B	^3He	$2P_{1/2}$	-0,107 ^(a)
$^{12}\text{B}_{1,67}$	^9Be	t	$3S_{1/2}$	-0,237				$2P_{3/2}$	-0,096
			$1G_{5/2}$	-0,323				$1F_{5/2}$	-0,292 ^(a)
			$1G_{7/2}$	0,316 ^(a)	^{14}N	^{12}C	d	$1D_1$	0,246
^{12}B	^{10}Be	d	$1D_1$	0,380	^{14}N	^{13}C	p	$1P_{1/2}$	0,461
$^{12}\text{B}_{0,95}$	^{10}Be	d	$1D_2$	0,380				$1P_{3/2}$	0,163 ^(a)
$^{12}\text{B}_{1,67}$	^{10}Be	d	$1P_2$	0,380	^{15}N	^{11}B	α	$2D_2$	0,435 ^(a)
^{12}B	^{11}B	n	$1P_{1/2}$	-0,142	^{15}N	^{12}B	^3He	$2P_{1/2}$	0,254 ^(a)
			$1P_{3/2}$	-0,127 ^(a)				$2P_{3/2}$	-0,090
$^{12}\text{B}_{0,95}$	^{11}B	n	$1P_{1/2}$	0,270	^{15}N	$^{12}\text{B}_{0,95}$	^3He	$2P_{3/2}$	0,269 ^(a)
			$1P_{3/2}$	0,270 ^(a)				$1F_{5/2}$	-0,274
$^{12}\text{B}_{1,67}$	^{11}B	n	$2S_{1/2}$	0,330	^{15}N	$^{12}\text{B}_{1,67}$	^3He	$2D_{3/2}$	0,269 ^(a)
$^{12}\text{B}_{1,67}$	^{11}B	n	$2S_{1/2}$	0,330	^{15}N	^{12}C	t	$2P_{1/2}$	0,380
$^{12}\text{B}_{2,62}$	^{11}B	n	$2S_{1/2}$	-0,142 ^(a)	^{15}N	^{13}C	d	$2S_1$	0,248 ^(a)
			$1D_{3/2}$	-0,127				$1D_1$	0,444 ^(a)
$^{12}\text{B}_{2,72}$	^{11}B	n	$1P_{3/2}$	0,478	^{16}N	^{12}B	α	$4P_1$	-0,384
^{12}C	^8Be	α	$3S_0$	0,822	^{16}N	$^{12}\text{B}_{0,95}$	α	$3P_1$	-0,411 ^(a)
^{12}C	^9Be	^3He	$2P_{3/2}$	1,224 ^(a)				$2F_3$	-0,325 ^(a)
^{12}C	^{10}B	d	$1D_3$	1,780	^{16}N	$^{12}\text{B}_{1,67}$	α	$3S_0$	-0,411
^{12}C	^{11}B	p	$1P_{3/2}$	-1,706 ^(a)	^{16}N	^{13}C	t	$2D_{3/2}$	-0,194
^{13}C	^9Be	α	$2D_2$	0,504 ^(a)	^{16}O	^{12}C	α	$3S_0$	0,544
^{13}C	^{10}Be	^3He	$2P_{1/2}$	0,170	^{16}O	^{13}C	^3He	$2P_{1/2}$	0,910 ^(a)

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

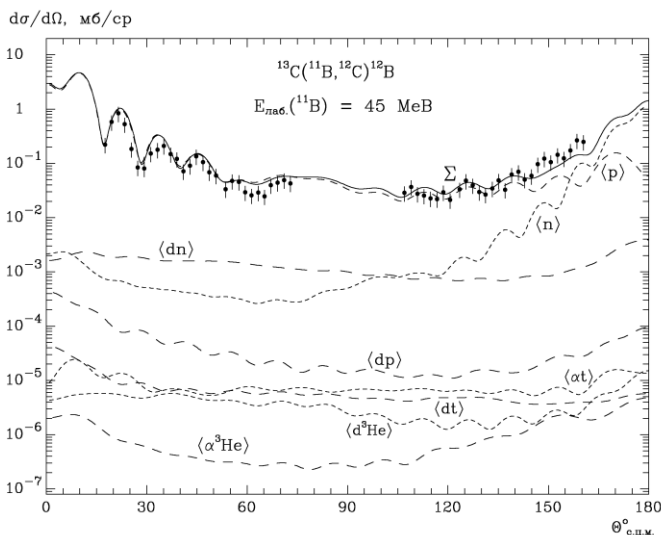


Рис. 5. Диференціальні перерізи реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45 \text{ MeV}$ для основних станів ядер ^{12}C і ^{12}B . Криві – МЗКР-розрахунки з потенціалом WS (див. табл. 1) для різних механізмів реакції.

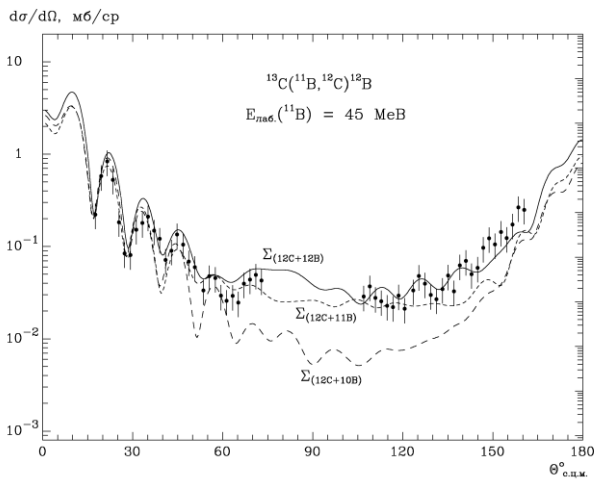


Рис. 6. Диференціальні перерізи реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ для основних станів ядер ^{12}C і ^{12}B . Криві – МЗКР розрахунки з різними параметрами потенціалу взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$ (див. табл. 1).

На рис. 7 показано експериментальні дані та МЗКР-розрахунки для реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ для збуджених станів 0,953 МеВ (2^+) та 1,674 МеВ (2^-) ядра ^{12}B . Кривими $\langle p \rangle$ та $\langle n \rangle$ показано МЗКР-перерізи для передач протонів та нейтронів відповідно, а кривими Σ_{2st} - когерентні суми двоступінчастих процесів. Суцільними кривими Σ показано когерентні суми одно- та двоступінчастих процесів. Видно, що й для цих збуджених станів ядра ^{12}B внесок двоступінчастих процесів є незначним, а домінують передачі протонів і нейтронів.

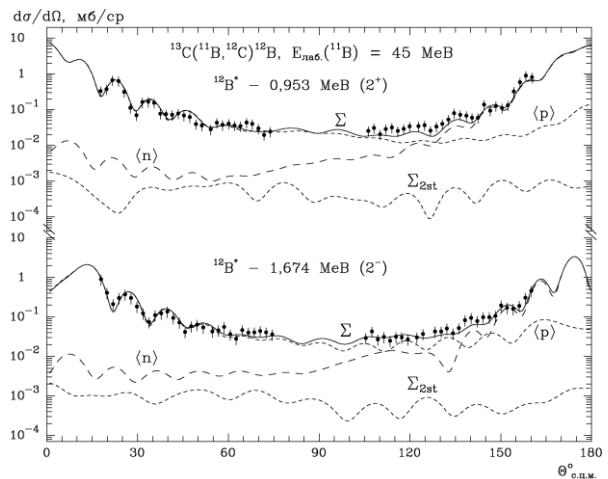


Рис. 7. Диференціальні перерізи реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ для збуджених станів 0,953 МеВ (2^+) та 1,674 МеВ (2^-) ядра ^{12}B . Криві – МЗКР-розрахунки для різних реакцій передач (див. текст).

На рис. 8 показано експериментальні дані та МЗКР-розрахунки для реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ для збуджених станів 2,62 МеВ (1^-) та 2,72 МеВ (0^+) ядра ^{12}B (не розділені в експерименті). Штриховими кривими $\Sigma_{2,62}$ та $\Sigma_{2,72}$ показано когерентні суми МЗКР-перерізів передач протонів і нейтрона для збуджених станів 2,62 МеВ (1^-) та 2,72 МеВ (0^+) ядра ^{12}B , а суцільною кривою Σ - некогерентну суму МЗКР-перерізів реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ для цих станів ядра ^{12}B . Видно, що домінуючий внесок у цю некогерентну суму перерізів реакції вносить перехід ядра ^{12}B у збуджений стан 2,62 МеВ (1^-).

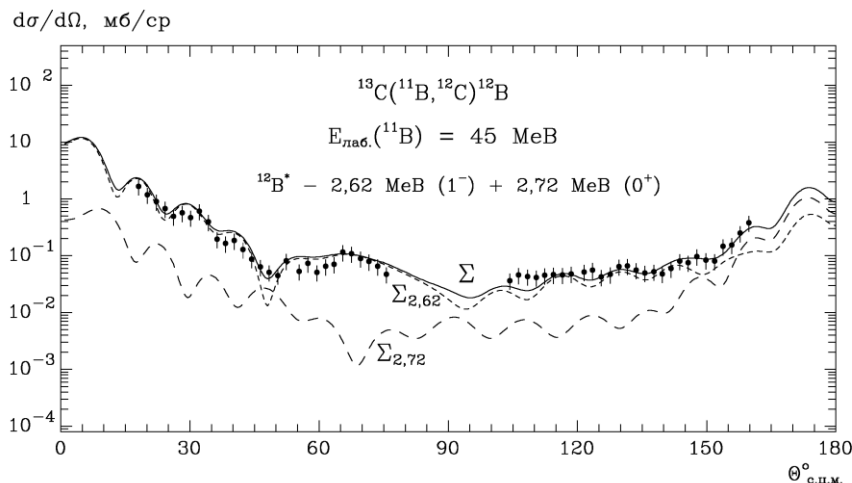


Рис. 8. Диференціальні перерізи реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ для збуджених станів 2,62 МеВ (1^-) та 2,72 МеВ (0^+) ядра ^{12}B (не розділені в експерименті). Криві – МЗКР-перерізи для різних процесів (див. текст).

На рис. 9 показано експериментальні дані та МЗКР-розрахунки для реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ для переходів у збу-

джені стани 3,388 МеВ (3^-) та 3,76 МеВ (2^+) ядра ^{12}B . Кривими $\langle p \rangle$ показано МЗКР-перерізи для передач протонів.

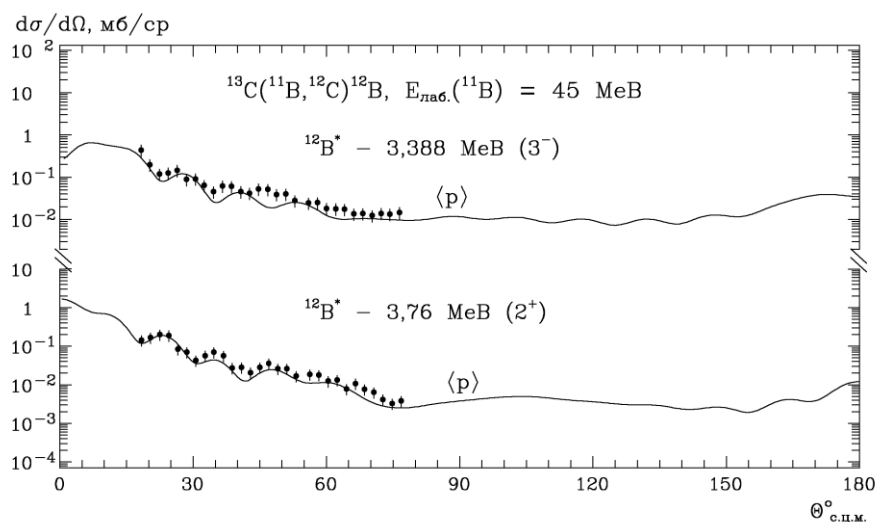


Рис. 9. Диференціальні перерізи реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ MeV для збуджених станів 3,388 MeV (3^-) та 3,76 MeV (2^+) ядра ^{12}B . Криві – МЗКР-перерізи для передач протонів.

Основні результати та висновки

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ MeV для основних станів ядер ^{12}C і ^{12}B та збуджених станів 0,953 – 3,76 MeV ядра ^{12}B . Експериментальні дані реакції проаналізовано за МЗКР. У схему зв'язку включались канали пружного розсіяння ядер $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$ і реакцій одно- та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів.

У МЗКР-розрахунках для вхідного каналу реакції використовувався потенціал WS, одержаний з МЗКР-аналізу експериментальних даних пружного розсіяння ядер $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ MeV [1]. Необхідні для МЗКР-розрахунків перерізи реакції спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів в ядрах було обчислено в рамках ТІМО [4] за допомогою про-

грами DESNA [6]. Квадратами цих амплітуд визначаються спектроскопічні «фактори» нуклонів і кластерів в ядрах.

У результаті МЗКР-аналізу експериментальних даних реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ отримано відомості про механізми реакції та параметри потенціалу WS взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$. Установлено, що в даній реакції основну роль відіграють передачі нейтронів і протонів. Внески двоступінчастих передач нуклонів і кластерів у перерізи реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ незначні.

Проведено порівняння параметрів потенціалів WS взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$, $^{12}\text{C} + ^{11}\text{B}$ [8] і $^{12}\text{C} + ^{10}\text{B}$ [9] та МЗКР-перерізів реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при використанні їх у вихідному каналі реакції. Виявлено відмінності цих перерізів в основному в інтервалі середніх кутів («ізотопічні ефекти»).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. M. Kowalczyk. SMAN: a Code for Nuclear Experiments. Report (Warsaw University, 1998).
3. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* **7** (1988) 167.
4. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the p -shell nuclei. *Phys. Rev. C* **15** (1977) 84.
5. А.Н. Бояркина. *Структура ядер 1p-оболочки* (Москва: Изд-во Москов. ун-та, 1973) 62 с.
6. А.Т. Рудчик, Ю.М. Чувильский. Вычисление спектроскопических амплитуд для произвольных ассоциаций нуклонов в ядрах 1p-оболочки (программа DESNA). Препринт Ин-та ядерных исслед. АН УССР. КИЯИ-82-12 (Киев, 1982) 27 с.
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.
8. А.Т. Rudchik et al. The $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$ elastic and inelastic scattering at $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 49$ MeV and energy dependence of the $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$ interaction. *Nucl. Phys. A* **695** (2001) 51.
9. 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.

С. Ю. Межевич¹, А. Т. Рудчик^{1,*}, 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 Фізический факультет Флоридського державного університету, Таллахассі, США

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

*Відповідальний автор: rudchik@kinr.kiev.ua

МЕХАНІЗМИ РЕАКЦІЇ $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ 45 МєВ І ВЗАМОДЕЙСТВИЯ ЯДЕР $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$, $^{12}\text{C} + ^{10,11}\text{B}$

Исследована реакція $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ МєВ для основних состояний ядер ^{12}C і ^{12}B і возбужденных состояний ядра ^{12}B . Получены новые экспериментальные данные угловых распределений дифференциальных сечений реакции. Экспериментальные данные проанализированы по методу связанных каналов реакций (МСКР). В схему связи включался канал упругого рассеяния ядер $^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$ и каналы одно- и двухступенчатых передач нуклонов и кластеров в этой реакции. В МСКР-расчетах для входного канала реакции использовался потенциал Вудса - Саксона (WS), параметры которого были ранее получены из анализа экспериментальных данных упругого и неупругого рассеяния ядер $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$, а для выходного канала $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$ реакции – потенциал WS, параметры которого были получены из подгонки МСКР-сечений реакции $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ к экспериментальным данным этой реакции. Нужные для МСКР-расчетов спектроскопические амплитуды (факторы) переданных в реакции нуклонов и кластеров были рассчитаны по трансляционно-инвариантной модели оболочек. Исследованы прямые механизмы передач нуклонов и кластеров в реакции. Получены параметры потенциала взаимодействия ядер $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$ и проведено сравнение МСКР-сечений реакции при использовании в выходном канале реакции параметров потенциалов взаимодействия ядер $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$ и $^{12}\text{C} + ^{10,11}\text{B}$. Обнаружены отличия этих МСКР-сечений реакции, т.е. наблюдается проявление «изотопического эффекта» потенциалов взаимодействия ядра ^{12}C с изотопами бора $^{10, 11, 12}\text{B}$.

Ключевые слова: ядерная реакция $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$, метод связанных каналов реакций, спектроскопические амплитуды, оптические потенциалы, механизмы реакций.

S. Yu. Mezhevych¹, A. T. Rudchik^{1,*}, 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 National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

*Corresponding author: rudchik@kinr.kiev.ua

$^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ REACTION MECHANISMS AT 45 MeV AND INTERACTION OF $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$, $^{12}\text{C} + ^{10,11}\text{B}$ NUCLEI

The reaction $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ at $E_{\text{lab}}(^{11}\text{B}) = 45$ MeV was investigated for the ground states of ^{12}C and ^{12}B nuclei and excited states of ^{12}B nucleus. New experimental data for the angular distributions of the reaction cross-sections were obtained. The experimental data were analyzed within the coupled-reaction-channels method (CRC). The $^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$ 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 parameters deduced previously from the analysis of the experimental data of $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$ elastic and inelastic scattering, whereas the WS potential for the exit $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$ reaction channel was deduced from the fitting of CRC cross-sections to the $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ 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 direct mechanisms of the transfers of nucleons and clusters were investigated in this reaction. The $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$ potential parameters were deduced and comparisons of the CRC reaction cross-sections calculated with the $^{12}\text{C} + ^{12}\text{B}$ and $^{12}\text{C} + ^{10,11}\text{B}$ potential parameters were performed. The differences between these CRC calculations were observed. The “isotopic effects” were observed for the potentials of ^{12}C interactions with boron isotopes $^{10, 11, 12}\text{B}$.

Keywords: nuclear reaction $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$, coupled-reaction-channels method, spectroscopic amplitudes, optical potentials, reaction mechanisms.

REFERENCES

1. 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.
2. M. Kowalczyk. SMAN: a Code for Nuclear Experiments. Report (Warsaw University, 1998).
3. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* 7 (1988) 167.
4. Yu.F. Smirnov, Yu. M. Tchuvil'skiy. Cluster spectroscopic factors for the p -shell nuclei. *Phys. Rev. C* 15 (1977) 84.
5. A.N. Boyarkina. *The structure of the 1p-shell nuclei* (Moskva: Moscow University, 1973) 62 p. (Rus)
6. A.T. Rudchik, Yu.M. Chuvil'skiy. Calculation of spectroscopic amplitudes for arbitrary associations of the nucleus in 1p-shell nuclei (program DESNA). Preprint of the Institute for Nucl. Res. AS UkrSSR. KINR-82-12 (Kyiv, 1982) 27 p. (Rus)
7. A.T. Rudchik, Yu.M. Chuvil'skiy. 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. A.T. Rudchik et al. The $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$ elastic and inelastic scattering at $E_{lab}(^{11}\text{B}) = 49$ MeV and energy dependence of the $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$ interaction. *Nucl. Phys. A* 695 (2001) 51.
9. 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.

Надійшла / Received 25.09.2019