

**С. Ю. Межевич<sup>1</sup>, А. Т. Рудчик<sup>1,\*</sup>, К. Русек<sup>2</sup>, К. В. Кемпер<sup>3</sup>,  
А. А. Рудчик<sup>1</sup>, О. А. Понкратенко<sup>1</sup>, С. Б. Сакута<sup>4</sup>**

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

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

<sup>3</sup> Фізичний факультет, Національний університет Флориди, Таллахассі, США

<sup>4</sup> Національний дослідницький центр «Курчатовський інститут», Москва, Росія

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

## МЕХАНІЗМИ РЕАКЦІЇ $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ ІОНІВ $^{11}\text{B}$ 45 МеВ

Досліджено реакцію  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  МеВ для основних і збуджених станів ядер  $^7\text{Li}$  і  $^{17}\text{O}$ . Експериментальні дані реакції проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). У схему зв'язку включалися канали пружного розсіяння ядер  $^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$  та одно- і двоступінчасті реакції передач нуклонів і кластерів з виходом ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$ . Необхідні для МЗКР-розрахунків спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів обчислено за трансляційно-інваріантною моделлю оболонки (ТІМО). Для вхідного каналу реакції використовувався потенціал Вудса - Саксона (WS), параметри якого було отримано з МЗКР-аналізу експериментальних даних пружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$ , а для вихідного каналу  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  потенціал WS та фолдінг-потенціал (DF) взаємодії ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  з уявною складовою, параметри якої отримано з підгонки МЗКР-перерізів реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  до експериментальних даних. Таким же методом визначено також параметри уявної частини і потенціалу WS. Параметри дійсної частини цього потенціалу отримано з підгонки до периферійної області потенціалу DF. Виявлено ізотопічні відмінності перерізів реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при використанні потенціалів взаємодії ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$ ,  $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$  та  $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$  у вихідному каналі реакції.

*Ключові слова:* ядерні реакції, оптична модель, метод зв'язаних каналів реакцій, фолдінг-модель, 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, спектроскопію збуджень ядер тощо.

У даній роботі досліджено реакцію  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  МеВ. Отримані нові експериментальні дані диференціальних перерізів цієї реакції в повному кутовому діапазоні для основних станів ядер  $^7\text{Li}$  і  $^{17}\text{O}$ , збудженого стану  $0,478$  МеВ ( $1/2^-$ ) ядра  $^7\text{Li}$  та збуджених станів  $0,871 - 6,356$  МеВ ядра  $^{17}\text{O}$  досліджено в рамках МЗКР для багатьох типів одно- та двонуклонних передач нуклонів і кластерів.

У роботі [1] було подано експериментальні дані реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  МеВ без опису методики вимірювань та представлено результати МЗКР-аналізу даних реакції з використанням передач лише  $\alpha$ -кластера (потенціал для каналу  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  було використано з роботи [2]) і  $^6\text{Li}$ -кластера та статистичної моделі. Експериментальні дані було задовільно описано МЗКР-перерізами  $\alpha$ -передачі лише на малих кутах. Тому в даній роботі подано опис методики вимірювань та результати аналізу експериментальних даних реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  за МЗКР із

використанням значного числа як одноступінчастих передач важких кластерів, так і двоступінчастих передач нуклонів і легких кластерів.

### 2. Методика експерименту

Диференціальні перерізи пружного і непружного розсіяння іонів  $^{11}\text{B}$  ядрами  $^{13}\text{C}$  та реакцій  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, X)$  вимірювалися з використанням пучка іонів  $^{11}\text{B}$  Варшавського циклотрона U-200P [3] при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  МеВ. Мішенню служила самопідтримна фольга вуглицю товщиною  $500$  мкг/см<sup>2</sup> із 90%-ним збагаченням  $^{13}\text{C}$ . Розкид енергії пучка  $^{11}\text{B}$  на мішені не перевищував  $0,5$  %.

Продукти реакцій реєструвалися за допомогою ( $\Delta E$ - $E$ )-спектрометрів,  $\Delta E$ -детекторами яких була іонізаційна камера з трьома вхідними вікнами та трьома кремнієвими  $E$ -детекторами товщиною  $1,0$  мм на виході камери. Робочим газом в іонізаційній камері використовувався аргон при тиску, при якому втрати енергії  $\Delta E$  продуктами реакцій у камері дорівнювали втратам енергії у кремнієвому детекторі товщиною  $15$  мкм.

В експерименті використовувалися електроніка типу САМАС та комп'ютерна система SMAN [4] для реєстрації та сортування спектрометричної інформації у вигляді двовимірних  $\Delta E(E)$ -спектрів. Більше відомостей про методики

вимірювань подано в роботі [3], де опубліковано результати дослідження пружного і непружного розсіяння ядер  $^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45 \text{ MeV}$ .

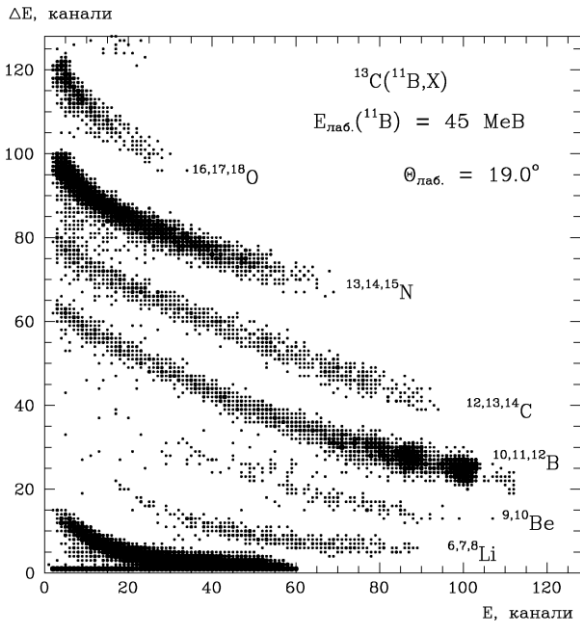


Рис. 1. Типовий  $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, X)$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45 \text{ MeV}$ .

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

Типові енергетичні спектри ядер  $^7\text{Li}$  і  $^{17}\text{O}$  з реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  показано на рис. 2 і 3 з неперервним фоном від багаточастинкових реакцій (а) та з вилученим фоном (б). Кривими на рисунках показано фони, отримані наближенням мінімумів експериментальних спектрів параметризованими функціями сигмоїдального типу за допомогою програми REAKFIT (а), та наближення експериментальних піків симетричними гауссіанами (б).

Площі гауссіанів використовувалися для обчислення диференціальних перерізів реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  для кутів  $\theta_{\text{с.ц.м.}}(^7\text{Li})$  спектрів  $^7\text{Li}$  та для кутів  $\theta_{\text{с.ц.м.}}(^{17}\text{O}) = 180^\circ - \theta_{\text{с.ц.м.}}(^7\text{Li})$  спектрів  $^{17}\text{O}$ . Для абсолютизації перерізів реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  використовувався нормувальний множник пружного і непружного розсіяння  $^{11}\text{B}$  на ядрах  $^{13}\text{C}$  [3], яке вимірювалося разом із цією реакцією. Похибка абсолютизації диференціальних перерізів реакції не перевищувала 20 %.

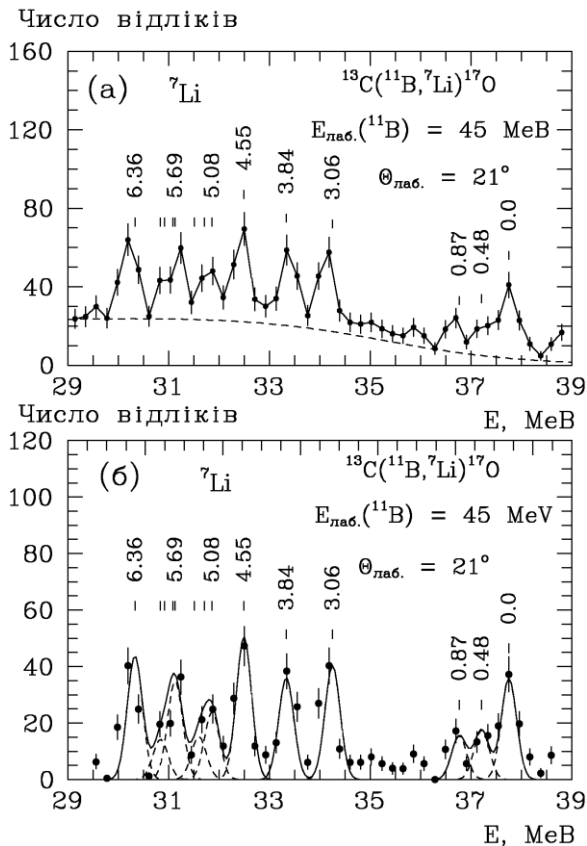


Рис. 2. Типові енергетичні спектри  $^7\text{Li}$  з реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45 \text{ MeV}$  з неперервним фоном від багаточастинкових реакцій (а) та з вилученим фоном (б). Криві – неперервні фони (а) та симетричні гауссіани (б).

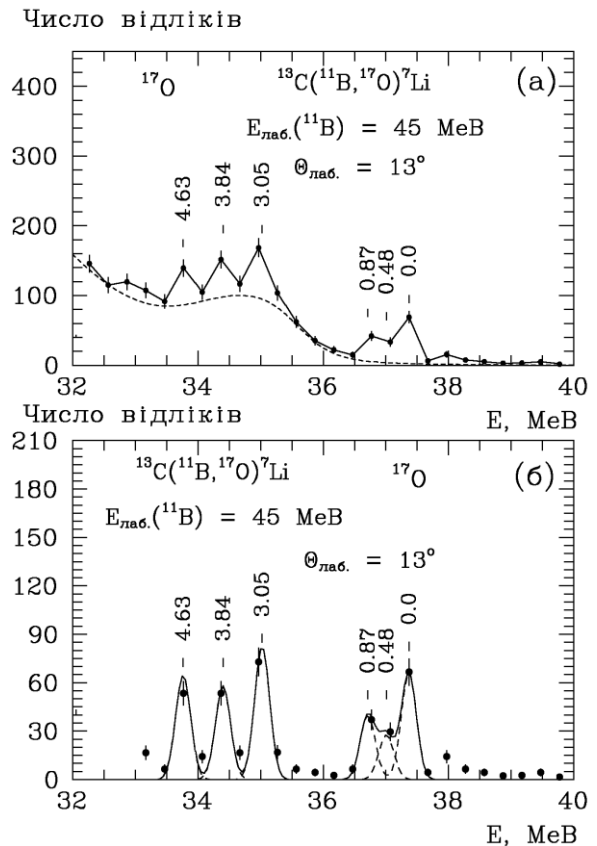


Рис. 3. Типові енергетичні спектри  $^{17}\text{O}$  з реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{17}\text{O})^7\text{Li}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45 \text{ MeV}$  з неперервним фоном від багаточастинкових реакцій (а) та з вилученим фоном (б). Криві – неперервні фони (а) та симетричні гауссіани (б).

### 3. Аналіз експериментальних даних

Експериментальні дані реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  аналізувалися за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). У схему зв'язку включалися пружне і непружне розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$  (основний і збуджений стани 2,124 МеВ (1/2)<sup>-</sup> ядра  $^{11}\text{B}$ ) та реакції передач, діаграми яких показано на рис. 4.

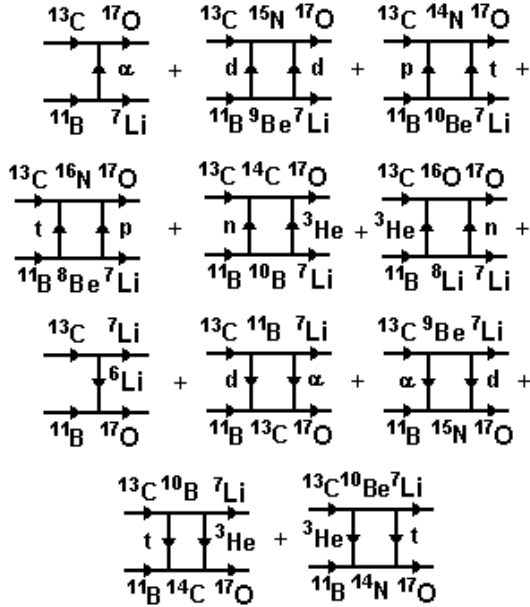


Рис. 4. Діаграми механізмів реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$ .

У МЗКР-розрахунках для вхідного та вихідного каналів реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  використовувалися потенціали Вудса - Саксона (WS)

$$U(r) = V_0 \left[ 1 + \exp\left(\frac{r - R_v}{a_v}\right) \right]^{-1} + iW_s \left[ 1 + \exp\left(\frac{r - R_w}{a_w}\right) \right]^{-1} \quad (1)$$

та кулонівські потенціали 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 та заряди ядер вхідного і вихідного каналів реакції. У розрахунках потенціалів кулонівської взаємодії ядер використовувався параметр  $r_c = 1,25$  фм.

Хвильові функції зв'язаних станів нуклонів і кластерів  $x$  у системах  $A = C + x$ , що передалися в реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$ , обчислювалися 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 цих системах.

МЗКР-розрахунки реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  проводилися за допомогою програми FRESKO [15]. У цих розрахунках для вхідного каналу  $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$  використовувався потенціал WS, параметри якого отримано при МЗКР-аналізі експериментальних даних пружного і непружного розсіяння цих ядер [3].

Для вихідного каналу  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  використовувалися потенціал WS та фолдінг-потенціал ( $DF$ )

$$U_{DF}(r) = V_{DF}(r) + iW_{DF}(r) = V_{DF}(r) + ikV_{DF}(r),$$

обчислений за методом подвійної згортки за допомогою програми DFPOТ [9], використовуючи розподіли густин зарядів в ядрах  $^7\text{Li}$  і  $^{17}\text{O}$  з роботи [10] та потенціал нуклон-нуклонної взаємодії МЗУ Рейда (Reid).

Параметри потенціалів WS, використані в розрахунках перерізів реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$ , подано в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри потенціалів взаємодії ядер

Ядра	$E_{с.м.}$ , МеВ	$V_0$ , МеВ	$r_v$ , фм	$a_v$ , фм	$W_s$ , МеВ	$r_w$ , фм	$a_w$ , фм	$J_v/J_w$ , МеВ фм <sup>3</sup>	$R_v/R_w$ , фм	Літ.
$^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$	24,38	256,7	0,788	0,740	7,0	1,250	0,740	499/45	3,9/5,2	[3]
$^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$	27,08	242,0	0,788	0,740	7,0	1,250	0,740	470/45	3,9/5,2	
$^{17}\text{O} + ^7\text{Li}$	22,07	154,0	0,804	0,740	14,0	1,000	0,600	360/52	3,9/4,1	
$^{17}\text{O}_{0,87} + ^7\text{Li}$	21,59	154,0	0,804	0,740	8,0	1,000	0,600	360/30	3,9/4,1	
$^{17}\text{O}_{3,05} + ^7\text{Li}$	18,23	154,0	0,804	0,740	6,0	1,000	0,600	360/22	3,9/4,1	
$^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$	27,71	183,0	0,800	0,740	6,0	1,450	0,740	422/65	3,9/5,7	[2]
$^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$	31,92	174,5	0,806	0,900	13,0	1,470	0,900	453/151	4,4/6,2	[6]
$^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$	29,22	175,1	0,802	0,700	16,0	1,200	0,700	407/105	3,8/4,9	[7]
$^8\text{Li} + ^{17}\text{O}$	25,91	174,5	0,800	0,900	5,0	1,250	0,900	420/38	4,4/5,5	[8]

Спектроскопічні амплітуди  $S_x$  нуклонів і кластерів  $x$  у системах  $A = C + x$  обчислювалися в рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки (ТІМО) [11] за допомогою програми DESNA [12, 13] із використанням таблиць хвильових функцій ядер 1р-оболонки [14]. Значення амплітуд  $S_x$  подано в табл. 2.

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

$A$	$C$	$x$	$nL_j$	$S_x$	$A$	$C$	$x$	$nL_j$	$S_x$
$^8\text{Li}$	$^7\text{Li}$	n	$1P_{1/2}$	0,478	$^{17}\text{O}_{0,87}$	$^{13}\text{C}$	$\alpha$	$3P_1$	-0,810 <sup>(a)</sup>
$^8\text{Li}$	$^7\text{Li}_{0,47}$	n	$1P_{3/2}$	0,478	$^{17}\text{O}_{3,05}$	$^{13}\text{C}$	$\alpha$	$4S_0$	-0,810
$^8\text{Be}$	$^7\text{Li}$	p	$1P_{3/2}$	1,234 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{3,84}$	$^{13}\text{C}$	$\alpha$	$3D_2$	-0,468
$^8\text{Be}$	$^7\text{Li}_{0,47}$	p	$1P_{1/2}$	0,873 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{4,55}$	$^{13}\text{C}$	$\alpha$	$3D_2$	-0,536
$^9\text{Be}$	$^7\text{Li}$	d	$2S_1$	-0,226 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{6,35}$	$^{13}\text{C}$	$\alpha$	$4P_1$	-0,810 <sup>(a)</sup>
			$1D_1$	0,111 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}$	$^{14}\text{C}$	$^3\text{He}$	$2D_{5/2}$	-0,577
			$1D_3$	-0,624 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{0,87}$	$^{14}\text{C}$	$^3\text{He}$	$3S_{1/2}$	-0,236
$^9\text{Be}$	$^7\text{Li}_{0,47}$	d	$2S_1$	0,202	$^{17}\text{O}_{3,05}$	$^{14}\text{C}$	$^3\text{He}$	$3P_{1/2}$	-0,236
			$1D_1$	0,124	$^{17}\text{O}_{3,84}$	$^{14}\text{C}$	$^3\text{He}$	$2F_{5/2}$	-0,577
			$1D_2$	-0,373 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{4,55}$	$^{14}\text{C}$	$^3\text{He}$	$3P_{3/2}$	-0,236
$^{10}\text{Be}$	$^7\text{Li}$	t	$2P_{3/2}$	0,392 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{6,35}$	$^{14}\text{C}$	$^3\text{He}$	$4S_{1/2}$	-0,236
$^{10}\text{Be}$	$^7\text{Li}_{0,47}$	t	$2P_{1/2}$	0,277 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}$	$^{14}\text{N}$	t	$2D_{3/2}$	-0,432
$^{10}\text{B}$	$^7\text{Li}$	$^3\text{He}$	$2P_{3/2}$	0,420				$1G_{7/2}$	-0,052 <sup>(a)</sup>
			$1F_{5/2}$	0,104 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{0,87}$	$^{14}\text{N}$	t	$3S_{1/2}$	-0,473 <sup>(a)</sup>
			$1F_{7/2}$	0,347				$2D_{3/2}$	0,167
$^{10}\text{B}$	$^7\text{Li}_{0,47}$	$^3\text{He}$	$1F_{5/2}$	0,104 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{3,05}$	$^{14}\text{N}$	t	$3P_{1/2}$	-0,473 <sup>(a)</sup>
			$1F_{7/2}$	0,347				$3P_{3/2}$	0,167
$^{11}\text{B}$	$^{10}\text{Be}$	p	$1F_{5/2}$	-0,058	$^{17}\text{O}_{3,84}$	$^{14}\text{N}$	t	$3P_{3/2}$	-0,432
			$1F_{7/2}$	0,400 <sup>(a)</sup>				$2F_{5/2}$	0,093 <sup>(a)</sup>
			$1P_{3/2}$	0,699				$2F_{7/2}$	-0,052
$^{11}\text{B}$	$^7\text{Li}$	$\alpha$	$3S_0$	-0,638	$^{17}\text{O}_{4,55}$	$^{14}\text{N}$	t	$3P_{1/2}$	-0,118
			$2D_2$	-0,422				$3P_{3/2}$	0,106 <sup>(a)</sup>
$^{11}\text{B}$	$^7\text{Li}_{0,47}$	$\alpha$	$2D_2$	-0,422 <sup>(a)</sup>				$2F_{5/2}$	-0,324
$^{11}\text{B}$	$^8\text{Li}$	$^3\text{He}$	$2P_{1/2}$	0,160 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{6,35}$	$^{14}\text{N}$	t	$3S_{1/2}$	-0,473 <sup>(a)</sup>
			$1F_{5/2}$	0,218 <sup>(a)</sup>				$2D_{3/2}$	0,167
			$1F_{7/2}$	0,214	$^{17}\text{O}$	$^{15}\text{N}$	d	$2P_2$	-0,552
$^{11}\text{B}$	$^8\text{Be}$	t	$2P_{3/2}$	0,641	$^{17}\text{O}_{0,87}$	$^{15}\text{N}$	d	$2P_0$	-0,497
$^{11}\text{B}$	$^9\text{Be}$	d	$2S_1$	-0,607 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{3,05}$	$^{15}\text{N}$	d	$3S_1$	0,101 <sup>(a)</sup>
			$1D_1$	-0,109 <sup>(a)</sup>				$2D_1$	-0,497 <sup>(a)</sup>
			$1D_3$	0,610 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{3,84}$	$^{15}\text{N}$	d	$2D_2$	-0,276
$^{11}\text{B}$	$^{10}\text{B}$	n	$1P_{3/2}$	-1,347 <sup>(a)</sup>				$2D_3$	-0,074 <sup>(a)</sup>
$^{13}\text{C}$	$^{10}\text{Be}$	$^3\text{He}$	$2P_{1/2}$	0,170	$^{17}\text{O}_{4,55}$	$^{15}\text{N}$	d	$3S_1$	0,202
$^{13}\text{C}$	$^{10}\text{B}$	t	$1F_{5/2}$	0,108 <sup>(a)</sup>				$2D_1$	0,124 <sup>(a)</sup>
			$1F_{7/2}$	0,747				$2D_2$	-0,373 <sup>(a)</sup>
$^{14}\text{C}$	$^{11}\text{B}$	t	$2P_{3/2}$	-0,368 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{6,35}$	$^{15}\text{N}$	d	$2P_0$	0,101
$^{14}\text{C}$	$^{13}\text{C}$	n	$1P_{1/2}$	-1,094 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}$	$^{16}\text{N}$	p	$1P_{1/2}$	-0,512
$^{14}\text{N}$	$^{11}\text{B}$	$^3\text{He}$	$2P_{1/2}$	-0,107 <sup>(a)</sup>				$1P_{3/2}$	0,137
			$2P_{3/2}$	-0,096	$^{17}\text{O}_{0,87}$	$^{16}\text{N}$	p	$1P_{3/2}$	-0,530 <sup>(a)</sup>
			$1F_{5/2}$	-0,292 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{3,05}$	$^{16}\text{N}$	p	$1D_{3/2}$	0,500
$^{14}\text{N}$	$^{13}\text{C}$	p	$1P_{1/2}$	0,461	$^{17}\text{O}_{3,84}$	$^{16}\text{N}$	p	$2S_{1/2}$	0,509
			$1P_{3/2}$	0,163 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{4,55}$	$^{16}\text{N}$	p	$2S_{1/2}$	-0,375 <sup>(a)</sup>
$^{15}\text{N}$	$^{13}\text{C}$	d	$2S_1$	0,248 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{6,35}$	$^{16}\text{N}$	p	$1P_{3/2}$	-1,060
			$1D_1$	0,444 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}$	$^{16}\text{O}$	n	$1D_{5/2}$	0,500
$^{16}\text{N}$	$^{13}\text{C}$	t	$2D_{3/2}$	-0,348	$^{17}\text{O}_{0,87}$	$^{16}\text{O}$	n	$2S_{1/2}$	0,866
$^{16}\text{O}$	$^{13}\text{C}$	$^3\text{He}$	$2P_{1/2}$	0,910 <sup>(a)</sup>	$^{17}\text{O}_{3,05}$	$^{16}\text{O}$	n	$2P_{1/2}$	-1,118
$^{17}\text{O}$	$^{13}\text{C}$	$\alpha$	$2F_3$	-0,468 <sup>(a)</sup>					

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

Параметри дійсної частини потенціалу WS для вихідного каналу  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  було отримано методом підгонки до потенціалу DF взаємодії ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$ . Дійсні та уявні частини потенціалів WS та DF показано на рис. 5. Параметри уявних частин цих потенціалів отримано з підгонки МЗКР-перерізів реакції

$^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  до експериментальних даних реакції.

Кутові розподіли експериментальних даних реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  для основних станів ядер  $^7\text{Li}$  і  $^{17}\text{O}$  та відповідні МЗКР-розрахунки для реакцій передач, діаграми яких показано на рис. 4, представлено на рис. 6 і 7 для МЗКР-розрахунків

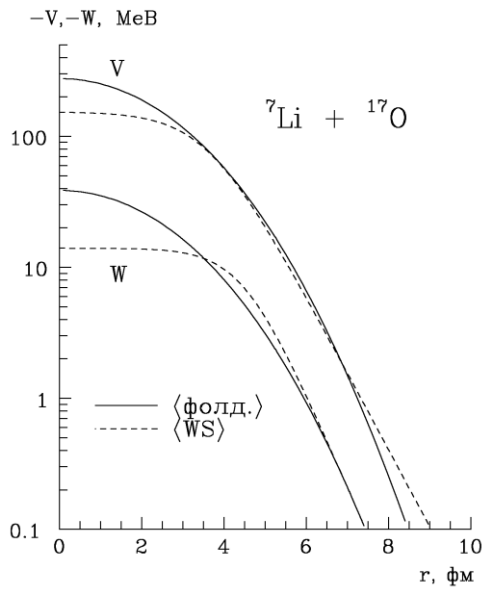


Рис. 5. Дійсні та уявні частини потенціалів WS (штрихові криві) та DF (суцільні криві) взаємодії ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$ .

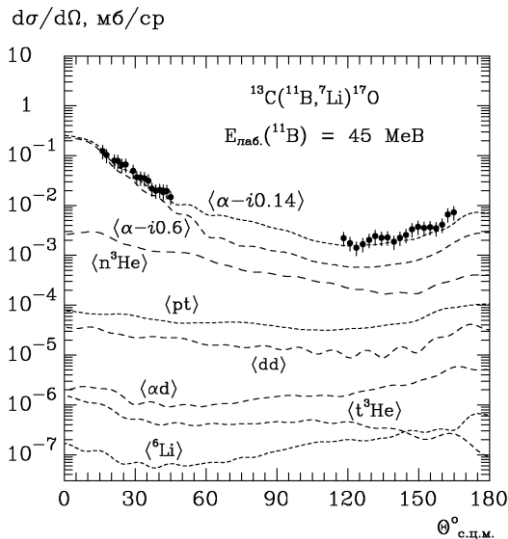


Рис. 6. Диференціальні перерізи реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  MeV для основних станів ядер  $^7\text{Li}$  і  $^{17}\text{O}$ . Криві – МЗКР-розрахунки з потенціалом DF з  $W_{\text{DF}} = 0,14V_{\text{DF}}$  для різних механізмів реакції.

На рис. 8 і 9 показано диференціальні перерізи реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  MeV для збуджених станів 0,478 MeV ( $1/2^-$ ) ядра  $^7\text{Li}$  та 0,871 MeV ( $1/2^+$ ), 3,055 MeV ( $1/2^-$ ) та 3,841 MeV ( $5/2^-$ ) ядра  $^{17}\text{O}$ , а для збуджених станів 4,553 MeV ( $3/2^-$ ) та 6,356 MeV ( $1/2^+$ ) ядра  $^{17}\text{O}$  - на рис. 10. Кривими показано МЗКР-розрахунки для передачі  $\alpha$ -кластерів із використанням потенціалів WS (штрихові криві) та DF ( $k = 0,14$ , суцільні криві).

На рис. 11 показано порівняння МЗКР-перерізів для основного процесу – передачі  $\alpha$ -частинки з використанням різних параметрів потенціалу

із використанням потенціалів

$$U_{\text{DF}}(r) = V_{\text{DF}}(r) + iW_{\text{DF}}(r) = V_{\text{DF}}(r) + i0,14V_{\text{DF}}(r)$$

та WS, параметри якого подано в табл. 1.

На рис. 6 і 7 видно, що передача  $\alpha$ -кластера (криві  $\langle \alpha - i0,14 \rangle$  і  $\langle \alpha \rangle$ ) домінує в реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$ . Внески двоступінчастих передач  $n + ^3\text{He}$  і  $^3\text{He} + n$  (криві  $\langle n^3\text{He} \rangle$ , когерентні суми),  $d + d$  (криві  $\langle dd \rangle$ ),  $p + t$  і  $t + p$  (криві  $\langle pt \rangle$ ),  $\alpha + d$  і  $d + \alpha$  (криві  $\langle \alpha d \rangle$ ),  $t + ^3\text{He}$  і  $^3\text{He} + t$  (криві  $\langle t^3\text{He} \rangle$ ) та передача кластера  $^6\text{Li}$  (криві  $\langle ^6\text{Li} \rangle$ ) у перерізи даної реакції незначні. На рис. 6 показано також МЗКР-розрахунки передачі  $\alpha$ -кластера при використанні потенціалу DF з уявною частиною  $W_{\text{DF}} = 0,6V_{\text{DF}}$ , яка використовується в роботі [16] для взаємодії ядер. Видно, що при коефіцієнті  $k = 0,6$  уявної частини потенціалу DF взаємодії ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  МЗКР-перерізи передачі  $\alpha$ -кластера значно відрізняються від експериментальних даних реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$ .

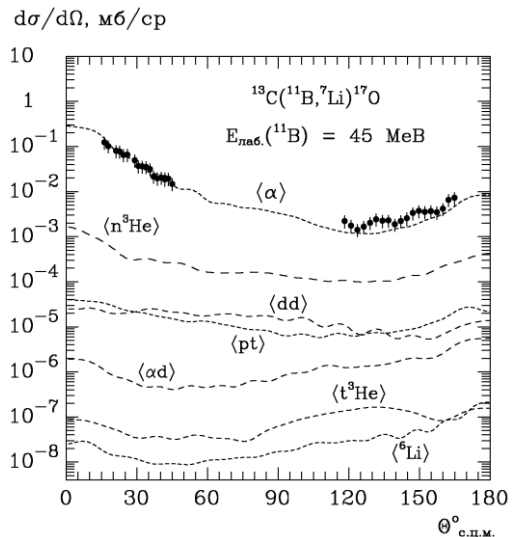


Рис. 7. Диференціальні перерізи реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  MeV для основних станів ядер  $^7\text{Li}$  і  $^{17}\text{O}$ . Криві – МЗКР-розрахунки з потенціалом WS (див. табл. 1) для різних механізмів реакції.

лу для вихідного каналу  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  в реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  MeV для переходів в основні стани ядер  $^7\text{Li}$  і  $^{17}\text{O}$ : відповідними штриховими кривими показано розрахунки з параметрами потенціалів для систем  $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$  [6],  $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$  [7] та  $^8\text{Li} + ^{17}\text{O}$  [8]. Як видно, суцільна крива  $\langle \alpha \rangle$ , що відповідає розрахункам із параметрами потенціалу  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  з цієї роботи, найкращим чином описує експериментальні дані в повному кутовому діапазоні, що вказує на чутливість розрахунків до вибору параметрів потенціалу для вихідного каналу в реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  (ізотопічні ефекти).

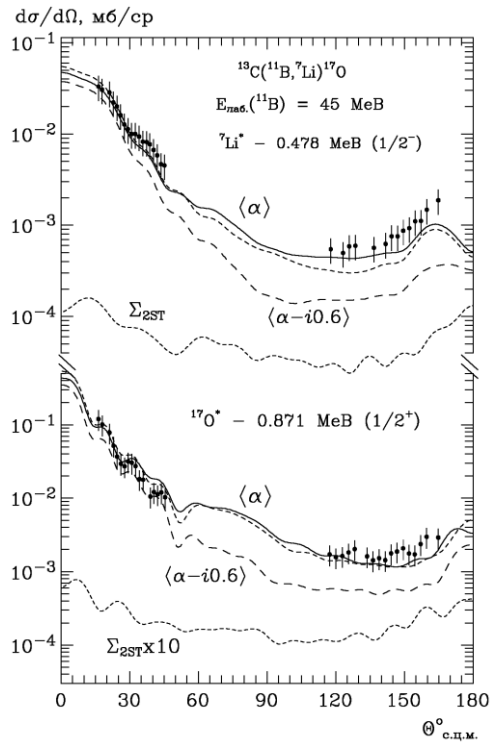


Рис. 8. Диференціальні перерізи реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  MeB для збуджених станів 0,478 MeB ( $1/2^-$ ) ядра  $^{17}\text{Li}^*$  та 0,871 MeB ( $1/2^+$ ) ядра  $^{17}\text{O}$ . Криві  $\langle \alpha - i0.6 \rangle$ ,  $\langle \alpha \rangle$  та  $\Sigma_{2ST}$  – ті самі, що на рис. 6 та 7 відповідно.

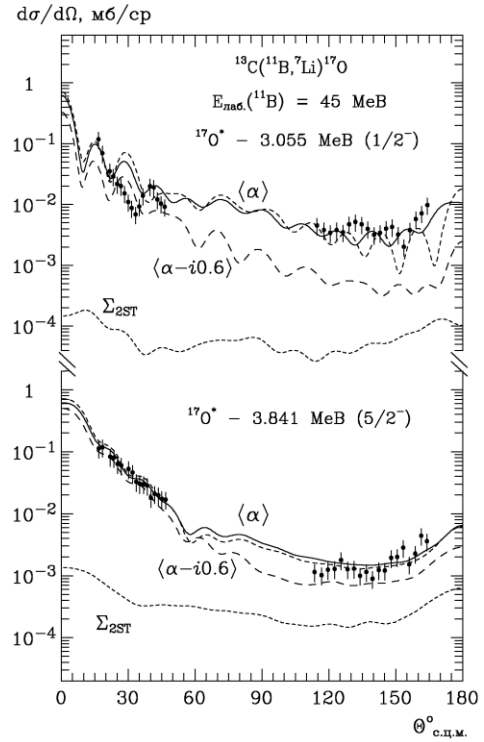


Рис. 9. Диференціальні перерізи реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  MeB для збуджених станів 3,055 MeB ( $1/2^-$ ) та 3,841 MeB ( $5/2^-$ ) ядра  $^{17}\text{O}$ . Криві – ті самі процеси, що і на рис. 8.

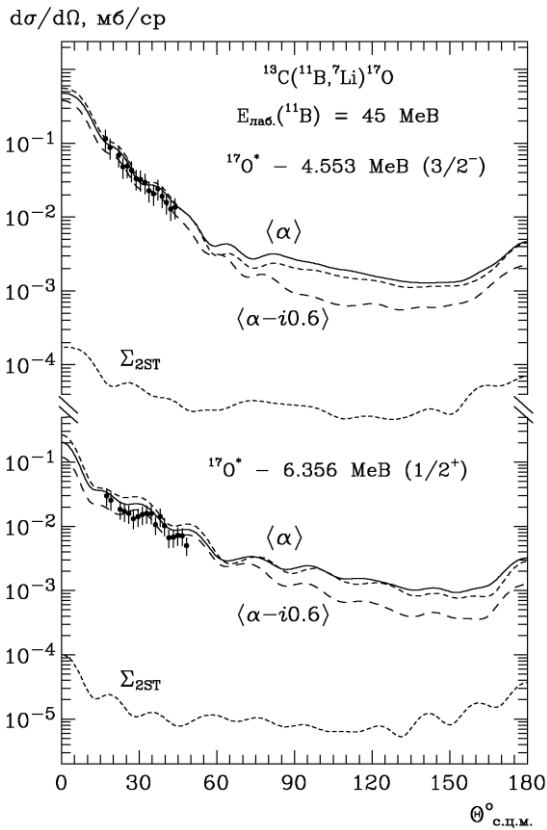


Рис. 10. Диференціальні перерізи реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  MeB для збуджених станів 4,554 MeB ( $3/2^-$ ) та 6,356 MeB ( $1/2^+$ ) ядра  $^{17}\text{O}$ . Криві – ті самі процеси, що й на рис. 8.

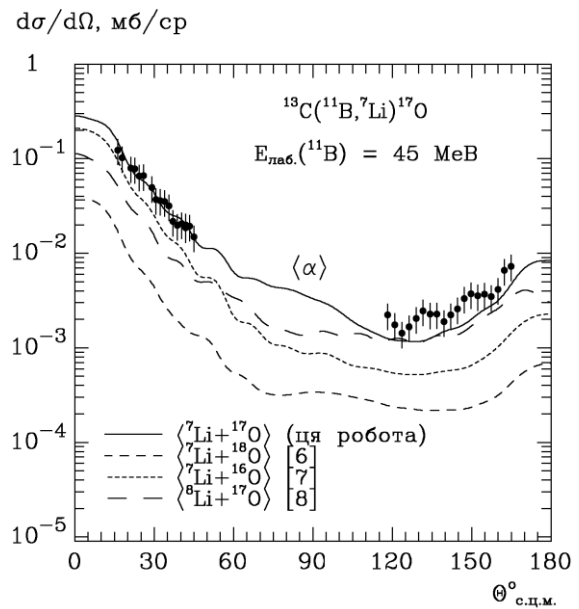


Рис. 11. Диференціальні перерізи реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  MeB для переходів в основні стани ядер  $^7\text{Li}$  та  $^{17}\text{O}$ . Криві – розрахунки для передачі  $\alpha$ -частинки з різними потенціалами для каналу  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  (див. текст).

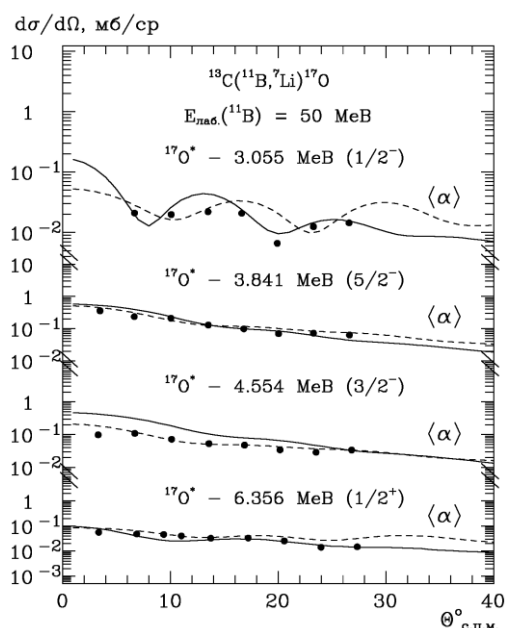


Рис. 12. Диференціальні перерізи реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 50$  MeV [5] для збуджених станів 3,055 MeV ( $1/2^-$ ), 3,841 MeV ( $5/2^-$ ), 4,554 MeV ( $3/2^-$ ) та 6,356 MeV ( $1/2^+$ ) ядра  $^{17}\text{O}$ . Криві – розрахунки з потенціалами WS при енергії 45 MeV (суцільна крива) та 50 MeV [5] (штрихова крива).

Для перевірки того, наскільки добре було підібрано потенціал для системи  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  в даній роботі, нами було проаналізовано експериментальні дані з реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при близькій енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 50$  MeV, опубліковані в роботі [5] для збуджених станів 3,055 MeV ( $1/2^-$ ), 3,841 MeV ( $5/2^-$ ), 4,553 MeV ( $3/2^-$ ) та 6,356 MeV ( $1/2^+$ ) ядра  $^{17}\text{O}$ : на рис. 12 штриховими кривими показано розрахунки для передачі  $\alpha$ -кластера, зроблені авторами роботи [5], суцільними кривими – наші розрахунки з параметрами потенціалів WS для вхідного і вихідного каналів, поданих у табл. 1, а також значеннями розрахованих у ТІМО спектроскопічних амплітуд згідно з табл. 2 (для стану 6,356 MeV ( $1/2^+$ ) ядра  $^{17}\text{O}$  було використано

радіус потенціалу зв'язку для системи  $^{13}\text{C} + \alpha$ , як у роботі [5]). Видно задовільне узгодження МЗКР-розрахунків з експериментальними даними.

#### 4. Основні результати та висновки

Експериментальні дані диференціальних перерізів реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  MeV для основних станів ядер  $^7\text{Li}$  і  $^{17}\text{O}$  та збуджень станів 0,478 MeV ядра  $^7\text{Li}$  і 0,871 - 6,356 MeV ядра  $^{17}\text{O}$  [1] проаналізовано за МЗКР. У схему зв'язку включалися канали пружного і непружного розсіювання ядер  $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$  та одно- і двоступінчасті реакції передач, частина яких не досліджувалася в роботі [1]. У МЗКР-розрахунках використано потенціали WS для вхідного каналу реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$ , а для вихідного каналу  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  – потенціали WS і DF. Визначено набори параметрів цих потенціалів. Обчислено спектроскопічні амплітуди переданих у реакції нуклонів і кластерів у рамках ТІМО.

Установлено, що двоступінчасті процеси, як і передача кластера  $^6\text{Li}$  [1], не дають вагомого внеску в диференціальні перерізи реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  MeV. Основним процесом є передача  $\alpha$ -частинки.

Проаналізовано також експериментальні дані реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 50$  MeV. Порівнюються МЗКР-розрахунки перерізів даної реакції при наборах параметрів потенціалів WS даної роботи та з роботи [5].

Порівнюються МЗКР-перерізи реакції  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при використанні у вихідному каналі параметрів потенціалів взаємодії ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$ ,  $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$  [6],  $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$  [7] та  $^8\text{Li} + ^{17}\text{O}$  [8], які в основному відрізняються значеннями параметрів  $a_V$ ,  $a_W$  та  $r_W$ , що може бути пов'язано з відмінністю нейтронного «галю» в цих ядрах. Виявлено помітні відмінності (*ізотопічні ефекти*) МЗКР-перерізів даної реакції.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. S.Yu. Mezhevych et al. Cluster structure of  $^{17}\text{O}$ . *Phys. Rev. C* 95 (2017) 034607.
2. A.T. Rudchik et al.  $^6\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{O})^7\text{Li}$  reaction and comparison of  $^6, ^7\text{Li} + ^{16, 17, 18}\text{O}$  potentials. *Nucl. Phys. A* 927 (2014) 209.
3. 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.
4. M. Kowalczyk. SMAN: a Code for Nuclear Experiments. Warsaw University report (1998).
5. B. Guo et al. New determination of the  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  reaction rate and its influence on the s-process nucleosynthesis in AGB stars. *The Astrophysical J.* 756(2) (2012) 193.
6. A.A. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of  $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$  versus  $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$ . *Nucl. Phys. A* 785 (2007) 293.
7. A.T. Rudchik et al. Tensor analyzing powers and energy dependence of the  $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$  interaction. *Phys. Rev. C* 75 (2007) 024612.
8. A.T. Rudchik et al.  $^8\text{Li}$  optical potential from  $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{O})^8\text{Li}$  reaction analysis. *Nucl. Phys. A* 831 (2009) 139.
9. J. Cook. DFPOT: A program for the calculation of double folded potentials. *Comp. Phys. Com.* 25 (1982) 125.
10. 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.



11. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the  $p$ -shell nuclei. *Phys. Rev. C* **15** (1977) 84.
12. А.Н. Бояркина. *Структура ядер 1р-оболочки* (М.: Изд-во Москов. ун-та, 1973) 62 с.
13. А.Т. Рудчик, Ю.М. Чувильский. Вычисление спектроскопических амплитуд для произвольных ассоциаций нуклонов в ядрах 1р-оболочки (программа DESNA). Препринт Ин-та ядерных исслед. АН УССР. КИЯИ-82-12 (Киев, 1982) 27 с.
14. А.Т. Рудчик, Ю.М. Чувильский. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1р-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач. УФЖ 30(6) (1985) 819.
15. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* **7** (1988) 167.
16. D. Pereira et al. An imaginary potential with universal normalization for dissipative processes in heavy-ion reactions. *Phys. Lett. B* **670**(4-5) (2009) 330.

**С. Ю. Межевич<sup>1</sup>, А. Т. Рудчик<sup>1,\*</sup>, К. Русек<sup>2</sup>, К. В. Кемпер<sup>3</sup>,  
А. А. Рудчик<sup>1</sup>, О. А. Понкратенко<sup>1</sup>, С. Б. Сакута<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина*

<sup>2</sup> *Лаборатория тяжелых ионов Варшавского университета, Варшава, Польша*

<sup>3</sup> *Физический факультет, Национальный университет Флориды, Таллахасси, США*

<sup>4</sup> *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

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

### МЕХАНИЗМЫ РЕАКЦИИ $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$ ПРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ $^{11}\text{B}$ 45 МэВ

Исследована реакция  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при энергии  $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$  МэВ для основных и возбужденных состояний ядер  $^7\text{Li}$  и  $^{17}\text{O}$ . Анализ экспериментальных данных проведен по методу связанных каналов реакций (МСКР). В схему связи включались каналы упругого и неупругого рассеяния ядер  $^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$  и одно- и двухступенчатые передачи нуклонов и кластеров с выходом ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$ . Необходимые для МСКР-расчетов спектроскопические амплитуды нуклонов и кластеров рассчитаны в рамках трансляционно-инвариантной модели оболочек (ТИМО). Для входящего канала реакции использовался потенциал Вудса - Саксона (WS), параметры которого были получены из МСКР-анализа экспериментальных данных упругого рассеяния ядер  $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$ , а для исходящего канала  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  потенциал WS и фолдинг-потенциал (DF) взаимодействия ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  с мнимой частью, параметры которой получены из подгонки МСКР-сечений реакции  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  к экспериментальным данным. Таким же методом определены также параметры мнимой части и потенциала WS. Параметры действительной части этого потенциала получены путем подгонки к периферийной области потенциала DF. Обнаружены изотопические отличия сечений реакции  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  при использовании потенциалов взаимодействия ядер  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$ ,  $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$  и  $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$  в исходящем канале реакции.

*Ключевые слова:* ядерные реакции, оптическая модель, метод связанных каналов реакций, фолдинг-модель, спектроскопические амплитуды, оптические потенциалы, механизмы реакций.

**S. Yu. Mezhevych<sup>1</sup>, A. T. Rudchik<sup>1,\*</sup>, K. Rusek<sup>2</sup>, K. W. Kemper<sup>3</sup>,  
A. A. Rudchik<sup>1</sup>, O. A. Ponkratenko<sup>1</sup>, S. B. Sakuta<sup>4</sup>**

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

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

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

<sup>4</sup> *National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

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

### MECHANISMS OF $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$ REACTION AT THE $^{11}\text{B}$ ION ENERGY 45 MeV

Reaction  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  at the energy  $E_{\text{lab}}(^{11}\text{B}) = 45$  MeV for the ground and excited states of the  $^7\text{Li}$  and  $^{17}\text{O}$  nuclei was studied. The reaction experimental data were analyzed within the coupled-reaction-channels method (CRC). The  $^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$  elastic scattering channel and one- and two-step reactions transferring nucleons and clusters were included in the coupling scheme. The spectroscopic amplitudes of nucleons and clusters needed for the CRC-calculations were computed within the translationally invariant shell model (TISM). The Woods-Saxon (WS) potential was used for the entrance reaction channel with the parameters deduced from the CRC-analysis of the  $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$  elastic scattering experimental data when the potential WS and the folding-potential (DF) with imaginary part, parameters of which were deduced from the fitting of the CRC cross sections to the  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  reaction experimental data, were used for the exit  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$  reaction channel. The parameters of the imaginary WS-potential were deduced in the same way. The parameters of the real part of this potential were obtained by fitting it to the peripheral region of the DF-potential. Isotopic differences of the  $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}$  reaction cross sections using the parameters of  $^7\text{Li} + ^{17}\text{O}$ ,  $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$  and  $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$  interaction for the exit reaction channel were observed.

*Keywords:* nuclear reactions, optical model, coupled-reaction-channels method, folding-model, spectroscopic amplitudes, optical potentials, reaction mechanisms.



## REFERENCES

1. S.Yu. Mezhevych et al. Cluster structure of  $^{17}\text{O}$ . *Phys. Rev. C* **95** (2017) 034607.
2. A.T. Rudchik et al.  $^6\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{O})^7\text{Li}$  reaction and comparison of  $^6,^7\text{Li} + ^{16,17,18}\text{O}$  potentials. *Nucl. Phys. A* **927** (2014) 209.
3. 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.
4. M. Kowalczyk. SMAN: a Code for Nuclear Experiments. Warsaw University report (1998).
5. B. Guo et al. New determination of the  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  reaction rate and its influence on the s-process nucleosynthesis in AGB stars. *The Astrophysical J.* **756(2)** (2012) 193.
6. A.A. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of  $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$  versus  $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$ . *Nucl. Phys. A* **785** (2007) 293.
7. A.T. Rudchik et al. Tensor analyzing powers and energy dependence of the  $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$  interaction. *Phys. Rev. C* **75** (2007) 024612.
8. A.T. Rudchik et al.  $^8\text{Li}$  optical potential from  $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{O})^8\text{Li}$  reaction analysis. *Nucl. Phys. A* **831** (2009) 139.
9. J. Cook. DFPOT: A program for the calculation of double folded potentials. *Comp. Phys. Com.* **25** (1982) 125.
10. 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.
11. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'skiy. Cluster spectroscopic factors for the p-shell nuclei. *Phys. Rev. C* **15** (1977) 84.
12. N. Boyarkina. *The Structure of the 1p-Shell Nuclei* (Moskva: Moscow University, 1973) 62 p. (Rus)
13. A.T. Rudchik, Yu.M. Chuvil'skiy. Calculation of spectroscopic amplitudes for arbitrary associations of nucleons in nuclei 1p-shell (program DESNA). Preprint Institute for Nucl. Res. AS USSR. KINR-82-12 (Kyiv, 1982) 27 p. (Rus)
14. A.T. Rudchik, Yu.M. Chuvil'skiy. Spectroscopic amplitudes of multi-nucleon clusters in 1p-shell nuclei and analysis of reactions of multi-nucleon transmissions. *Ukr. Fiz. Zhurnal* **30(6)** (1985) 819. (Rus)
15. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* **7** (1988) 167.
16. D. Pereira et al. An imaginary potential with universal normalization for dissipative processes in heavy-ion reactions. *Phys. Lett. B* **670(4-5)** (2009) 330.

Надійшла 24.09.2018

Received 24.09.2018