

**РЕАКЦІЯ  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$   
ТА ПОТЕНЦІАЛ ВЗАЄМОДІЇ ЯДЕР  ${}^{17}\text{O} + {}^8\text{Li}$**

А. Т. Рудчик<sup>1</sup>, Ю. М. Степаненко<sup>1</sup>, А. А. Рудчик<sup>1</sup>, О. А. Понкратенко<sup>1</sup>, Є. І. Коший<sup>2</sup>,  
С. Клічевські<sup>3</sup>, К. Русек<sup>4</sup>, А. Будзановські<sup>3</sup>, В. М. Кир'янчук<sup>1</sup>, С. Ю. Межевич<sup>1</sup>,  
І. Сквірчинська<sup>3</sup>, Р. Сюдак<sup>3</sup>, Б. Чех<sup>3</sup>, А. Щурек<sup>3</sup>, В. В. Улещенко<sup>1</sup>, Я. Хоїньські<sup>5</sup>, Л. Гловацка<sup>6</sup>

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

<sup>2</sup>Харківський національний університет, Харків

<sup>3</sup>Інститут ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського, Краків, Польща

<sup>4</sup>Інститут ядерних досліджень ім. А. Солтана, Варшава, Польща

<sup>5</sup>Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

<sup>6</sup>Інститут прикладної фізики Військово-технічного університету, Варшава, Польща

Поміряно диференціальні перерізи реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$  МеВ для основних та збуджених станів ядер  ${}^8\text{Li}$  і  ${}^{17}\text{O}$ . Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій для одно- і двоступінчастих передач нуклонів і кластерів. У розрахунках використано  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ -потенціал, раніше отриманий з аналізу даних пружного розсіяння цих ядер, та спектроскопічні амплітуди переданих у реакції нуклонів і кластерів, обчислені в рамках оболонкової моделі. Досліджено механізми реакції та визначено параметри оптичного  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалу. Аналізуються їх відмінності від параметрів  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ -потенціалу. Розраховано  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ - та  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -фолдінг-потенціали, які співставляються з отриманими з аналізу експериментальних даних пружного розсіяння ядер  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$  та реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$ .

*Ключові слова:* ядерні реакції, оптична модель, метод зв'язаних каналів реакцій, фолдінг-модель, спектроскопічні амплітуди, оптичні потенціали, механізми реакцій.

### Вступ

Ядерні реакції з важкими іонами є одним з ефективних методів дослідження властивостей та взаємодії нестабільних короткоживучих ядер, що в більшості випадків неможливо здійснити за допомогою безпосередніх (прямих) експериментів пружного розсіяння нестабільних (радіоактивних) іонів. До таких реакцій належить і досліджувана в даній роботі реакція  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$ , відомості про експериментальне вивчення якої відсутні в загальнодоступній літературі.

Диференціальні перерізи цієї реакції при енергії  $E({}^{18}\text{O}) = 114$  МеВ вимірювались одночасно з перерізами пружного та непружного розсіяння ядер  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ , дані якого було використано для визначення параметрів оптичного  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ -потенціалу та його енергетичної залежності [1]. Експериментальні дані реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) для одно- і двоступінчастих передач нуклонів і кластерів, спектроскопічні амплітуди яких обчислено за оболонковою моделлю [2]. Для вхідного каналу реакції використовувався оптичний  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ -потенціал, отриманий у роботі [1]. Параметри оптичного  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалу визначались методом підгонки до експериментальних даних реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$ .

У роботі аналізуються відмінності оптичних  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ - і  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ -потенціалів та проводиться порівняння їх дійсних частин із відповідними фолдінг-потенціалами.

### Методика експерименту

Диференціальні перерізи реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  поміряно разом з пружним і непружним розсіянням ядер  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$  на Варшавському циклотроні С-200Р за допомогою пучка іонів  ${}^{18}\text{O}$  з енергією  $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$  МеВ [1]. Розкид енергії пучка іонів на мішені не перевищував 0,5 %. В експерименті використовувалась самопідтримна (без підкладки) мішень природного літію ( ${}^7\text{Li}$  - 92,5 %) товщиною  $\sim 900$  мкг/см<sup>2</sup>.

Продукти реакцій реєструвались  $\Delta E$ - $E$ -спектрометрами з кремнієвими  $\Delta E$ - і  $E$ -детекторами з товщинами 67 мкм і 1 мм відповідно. В експерименті використовувалась електроніка стандарту САМАС та комп'ютерна система SMAN [3] для отримання й накопичення двовимірних  $\Delta E(E)$ -спектрів продуктів реакцій. Детальний опис експериментальної установки міститься в роботі [4].

Типові двовимірні  $\Delta E(E)$ -спектри кисню та літію - продуктів реакцій  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, X)$  - показано на рис. 1. Видно, що експериментальна методика забезпечувала надійну ідентифікацію  ${}^{17}\text{O}$  та  ${}^8\text{Li}$ .

Типовий енергетичний спектр  ${}^{17}\text{O}$ , отриманий безпосереднім проектуванням  ${}^{17}\text{O}$ -локуса  $\Delta E(E)$ -спектра на  $E$ -вісь, показано на рис. 2, а. У ньому спостерігається неперервний фон  ${}^{17}\text{O}$  - продуктів багаточастинкових реакцій типу  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O})\{n{}^7\text{Li}, \alpha n, \alpha dn \dots\}$ . Цей фон наближувався сумою функцій

$$N(E) = \sum N_i(E) = \sum_i N_{oi} \left[ 1 + \exp\left(-\frac{E - E_{li} + E_{2i}/2}{H_{li}}\right) \right]^{-1} \left\{ 1 - \left[ 1 + \exp\left(-\frac{E - E_{li} - E_{2i}/2}{H_{2i}}\right) \right]^{-1} \right\} \quad (1)$$

з підгонкою параметрів  $E_{li}$ ,  $E_{2i}$ ,  $H_{li}$ ,  $H_{2i}$  за методом найменших квадратів (МНК) для досягнення задовільного опису мінімумів експериментального спектра. Штрихові криві на рис. 2, *a* показують окремі функції  $N_i(E)$ , а суцільна крива – їх суму. Наближений фон віднімався з експеримен-

тального спектра, і отриманий залишковий спектр (рис. 2, *b*) служив основою для обчислення диференціальних перерізів реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$ . На рис. 2, *b* показано шкалу рівнів  ${}^8\text{Li}$  – 0,87, 2,26, 3,21 і 5,4 MeV [5] та рівні  ${}^{17}\text{O}$  – 0,98, 3,06 і 3,84 MeV.

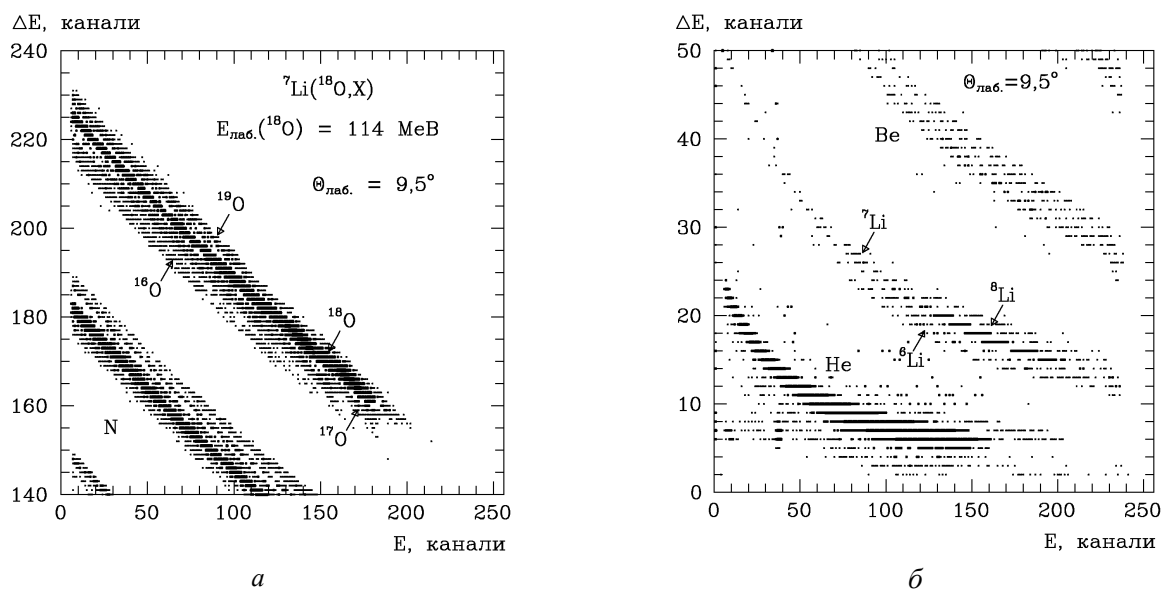


Рис. 1. Типові  $\Delta E(E)$ -спектри ізотопів кисню (*a*) та літію (*b*) - продуктів реакцій  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, X)$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$  MeV.

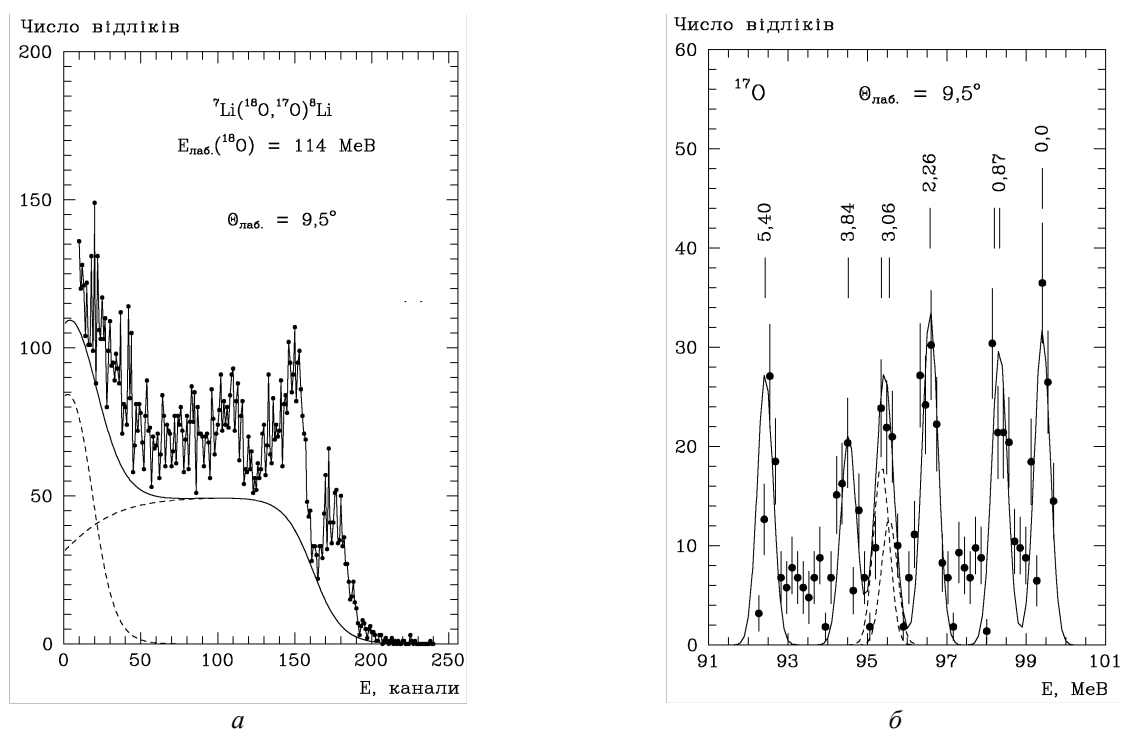


Рис. 2. Типові енергетичні спектри ядер  ${}^{17}\text{O}$  з реакцій  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O})X$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$  MeV з неперервним енергетичним розподілом (фоном) виходу  ${}^{17}\text{O}$  з реакцій типу  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O})\text{atn}$  (*a*) та з вилученим фоном для ядер  ${}^{17}\text{O}$  – продуктів реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  (*b*). Криві – наближення фону та піків спектрів функціями (1) та (2) відповідно. На спектрі (*b*) показано рівні  ${}^8\text{Li}$  – 0,87, 2,26, 3,21 і 5,4 MeV та рівні  ${}^{17}\text{O}$  – 0,98, 3,06 і 3,84 MeV.

При цьому залишковий спектр наближувався сумою гауссіанів

$$N(E) = \sum_i N_i \exp\left(-0.5 \frac{(E - E_i)^2}{h_i^2}\right), \quad (2)$$

параметри  $E_i$  яких дорівнювали кінетичним енергіям ядер  ${}^8\text{Li}$  і  ${}^{17}\text{O}$ , що відповідають утворенню основних та збуджених станів цих ядер, а параметри  $h_i$  – середній напівширині ізольованих піків пружного і непружного розсіяння ядер  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ . Ці параметри фіксувались, а параметри  $N_i$  підганялись за МНК. Розраховані таким чином окремі гауссіани та їх сума показані на рис. 2, б кривими.

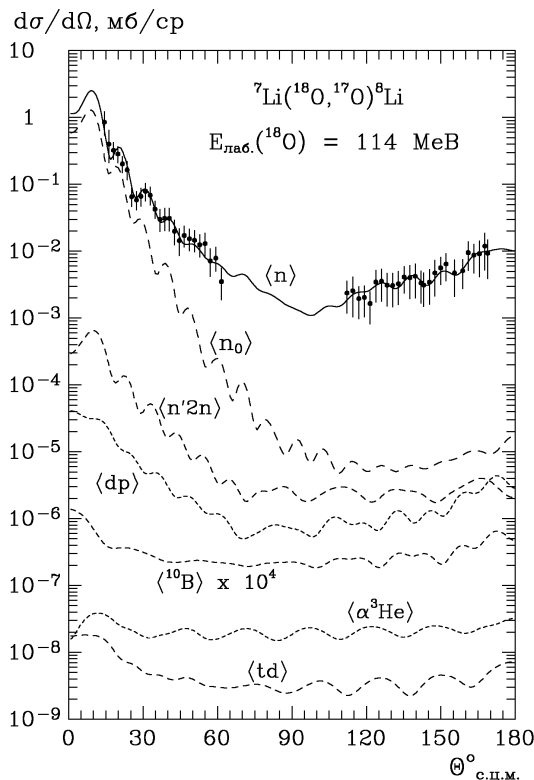


Рис. 3. Диференціальні перерізи реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$  MeV для основних станів ядер  ${}^8\text{Li}$  та  ${}^{17}\text{O}$ . Криві – МЗКР-розрахунки.

Отримані з підгонки експериментальних спектрів функціями (2) площі гауссіанів використовувались для обчислення перерізів реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$ . Похибки обчислення площ ізольованих гауссіанів не перевищували 20 %, а частково перекритих – 30 – 40 %. Для нормування перерізів реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  використовувався такий же множник нормування, як і для пружного розсіяння ядер  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$  [1].

Отримані експериментальні диференціальні перерізи реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$  MeV для різних станів ядер  ${}^8\text{Li}$  та  ${}^{17}\text{O}$  та відповідні теоретичні розрахунки показано на рис. 3 - 5.

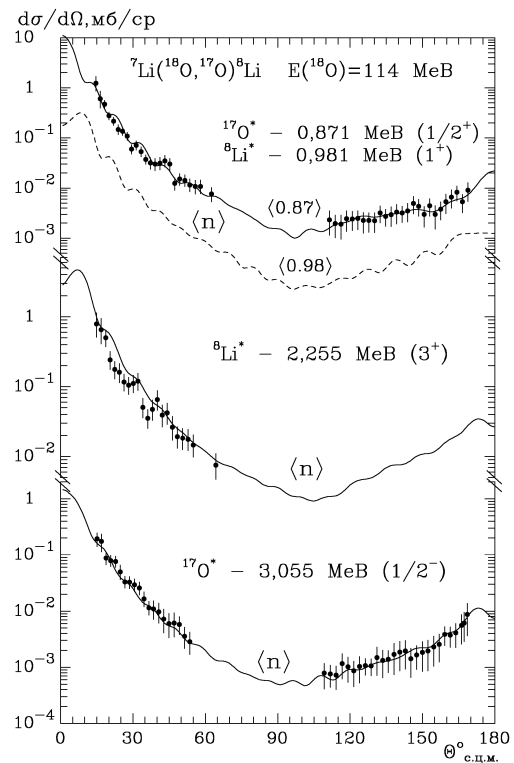


Рис. 4. Те ж саме, що на рис. 3, але для збуджених станів ядер  ${}^8\text{Li}$  (0,981 і 2,255 MeV) та  ${}^{17}\text{O}$  (0,871 і 3,055 MeV).

### Аналіз експериментальних даних Процедура розрахунків

Експериментальні дані реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$  MeV аналізувались за МЗКР з використанням для вхідного та вихідного каналів реакції потенціалу типу Вудса-Саксона з об'ємним поглинанням

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

$$+ iW_S \left[ 1 + \exp\left(\frac{r - R_W}{a_W}\right) \right]^{-1} \quad (3)$$

та кулонівського потенціалу рівномірно зарядженої кулі

$$V_c(r) = \begin{cases} Z_P Z_T e^2 (3 - r^2 / R_c^2) / 2R_c, & r \leq R_c, \\ Z_P Z_T e^2 / r, & r > R_c, \end{cases} \quad (4)$$

де  $R_i = r_i(A_P^{1/3} + A_T^{1/3})$  ( $i = V, W, C$ );  $A_P, Z_P$  і  $A_T, Z_T$  – маси і заряди іона  ${}^{18}\text{O}$  (або ядра  ${}^{17}\text{O}$ ) та ядра мі-

шені  ${}^7\text{Li}$  (або ядра  ${}^8\text{Li}$ );  $e$  – заряд електрона. У всіх розрахунках параметр  $r_c = 1,25$  фм.

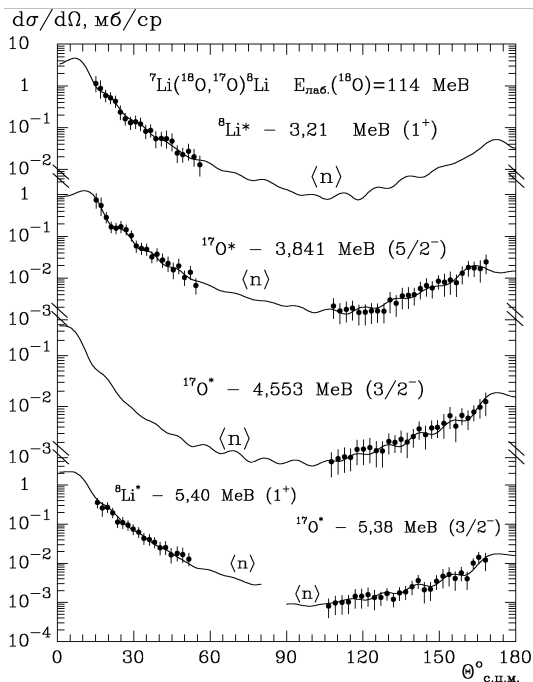


Рис. 5. Те ж саме, що на рис. 3, але для збуджених станів ядер  ${}^8\text{Li}$  (3,21 і 5,40 MeB) та  ${}^{17}\text{O}$  (3,841, 4,553 і 5,38 MeB).

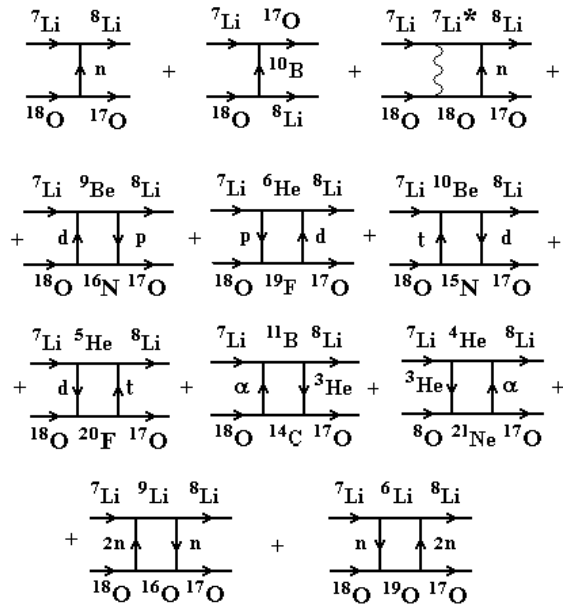


Рис. 6. Діаграми одно- та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів у реакціях  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  і  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^8\text{Li}){}^{17}\text{O}$ .

Таблиця 1. Параметри потенціалів взаємодії ядер  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$  та  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$

Системи ядер	$E_{с.п.м.}$ , MeB	$V_0$ , MeB	$r_V$ , фм	$a_V$ , фм	$W_S$ , MeB	$r_W$ , фм	$a_W$ , фм	Літ.
${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$	31,92	174,5	0,806	0,900	13,0	1,470	0,900	[1]
${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}^*_{0-3,84}$	22,07 - 25,91	174,5	0,800	0,900	5,0	1,250	0,900	
${}^8\text{Li}^*_{0-3,21} + {}^{17}\text{O}$	22,70 - 25,91	174,5	0,800	0,900	5,0	1,250	0,900	
${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}^*_{4,56}$	21,36	174,5	0,800	0,900	3,0	1,250	0,900	
${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}^*_{5,38}$	20,53	174,5	0,800	0,900	2,5	1,250	0,900	

У розрахунках для вхідного каналу реакції використовувався оптичний потенціал, отриманий з аналізу даних пружного і непружного розсіяння ядер  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$  [1]. Параметри цього потенціалу наведено в табл. 1.

Параметри

$$X_i = \{V_0, r_V, a_V, W_S, r_W, a_W\} \quad (5)$$

${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалу визначались за даними реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  методом підгонки. Цей метод визначення параметрів  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалу в рамках МЗКР можна використовувати лише у випадках, коли, крім оптичного потенціалу вхідного каналу, відомо ще й значення спектроскопічних амплітуд переданих у реакції нуклонів і кластерів. Ця умова в даній роботі була забезпечена нашими розрахунками спектроскопічних амплітуд  $S_x$  нуклонів чи кластерів  $x$  у ядерних системах  $A = C + x$

$$S_x = \begin{pmatrix} A \\ x \end{pmatrix}^{1/2} \langle \Psi_A | \Psi_C \Psi_x; \varphi_{xc} \rangle \quad (6)$$

за трансляційно-інваріантною моделлю оболонок (ТІМО) [2] за допомогою програми DESNA [6, 7] з використанням таблиць хвильових функцій роботи [8]. У виразі (6)  $\Psi_A, \Psi_C, \Psi_x$  – хвильові функції внутрішніх станів ядер  $A, C, x$  відповідно, а  $\varphi_{xc}$  – хвильова функція руху кластера  $x$  відносно серцевини (кора)  $C$  ядра  $A$ . Спектроскопічні амплітуди  $S_x$  подано в табл. 2.

У МЗКР-розрахунках у систему зв'язку каналів включались пружне і непружне розсіяння ядер  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$  з переходами цих ядер у збуджені стани (див. [1]) та найбільш важливі реакції передач, діаграми яких показано на рис. 6. МЗКР-розрахунки проводились за програмою FRESKO [9].

При підгонці параметрів  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалу за початкові значення брались параметри  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ -потенціалу [1], зважаючи на відсутність

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

$A$	$C$	$x$	$nL_j$	$S_x$	$A$	$C$	$x$	$nL_j$	$S_x$
${}^7\text{Li}$	${}^4\text{H}$	${}^3\text{He}$	$2S_{1/2}$	0,397	${}^{11}\text{B}$	${}^7\text{Li}$	$\alpha$	$3S_0$	-0,638
			$1D_{3/2}$	-0,100				$2D_2$	-0,422
			$1D_{5/2}$	-0,230	${}^{11}\text{B}$	${}^8\text{Li}$	${}^3\text{He}$	$2P_{1/2}$	0,160 <sup>a</sup>
${}^7\text{Li}$	${}^4\text{He}$	t	$2P_{3/2}$	-1,091				$1F_{5/2}$	0,218 <sup>a</sup>
${}^7\text{Li}$	${}^5\text{He}$	d	$2S_1$	-0,674 <sup>a</sup>				$1F_{7/2}$	0,214
			$1D_1$	-0,121 <sup>a</sup>	${}^{17}\text{O}$	${}^7\text{Li}$	${}^{10}\text{B}$	$3P_2$	0,182
			$1D_3$	0,676 <sup>a</sup>	${}^{17}\text{O}$	${}^{14}\text{C}$	${}^3\text{He}$	$2D_{5/2}$	-0,557
${}^7\text{Li}$	${}^6\text{He}$	p	$1P_{3/2}$	0,805	${}^{17}\text{O}$	${}^{15}\text{N}$	d	$2P_2$	-0,552
${}^7\text{Li}$	${}^6\text{Li}$	n	$1P_{1/2}$	-0,657	${}^{17}\text{O}$	${}^{16}\text{N}$	p	$1P_{1/2}$	-0,512
			$1P_{3/2}$	-0,735 <sup>a</sup>				$1P_{3/2}$	0,136 <sup>a</sup>
${}^8\text{Li}$	${}^4\text{H}$	$\alpha$	$2P_1$	-0,274	${}^{17}\text{O}$	${}^{16}\text{O}$	n	$1D_{5/2}$	0,500
			$1F_3$	-0,683	${}^{18}\text{O}$	${}^8\text{Li}$	${}^{10}\text{B}$	$2D_2$	-0,356
${}^8\text{Li}$	${}^5\text{He}$	t	$2P_{1/2}$	-0,427				$1G_2$	-0,190
			$1F_{5/2}$	-0,581	${}^{18}\text{O}$	${}^{14}\text{C}$	$\alpha$	$4S_0$	-0,802
			$1F_{7/2}$	0,569 <sup>a</sup>	${}^{18}\text{O}$	${}^{15}\text{N}$	t	$3P_{1/2}$	0,277 <sup>a</sup>
${}^8\text{Li}$	${}^6\text{He}$	d	$1D_2$	-0,667	${}^{18}\text{O}$	${}^{16}\text{N}$	d	$2P_2$	0,884
${}^8\text{Li}$	${}^6\text{Li}$	2n	$1D_2$	-0,667 <sup>a</sup>	${}^{18}\text{O}$	${}^{16}\text{O}$	2n	$2S_0$	1,061
${}^8\text{Li}$	${}^7\text{Li}$	n	$1P_{1/2}$	0,478	${}^{18}\text{O}$	${}^{17}\text{O}$	n	$1D_{5/2}$	1,406 <sup>a</sup>
			$1P_{3/2}$	-0,478 <sup>a</sup>	${}^{18}\text{O}$	${}^{17}\text{O}^*$	n	$2S_{1/2}$	0,994 <sup>a</sup>
${}^8\text{Li}^*_{0,981}$	${}^7\text{Li}$	n	$1P_{1/2}$	-0,206 <sup>a</sup>	${}^{18}\text{O}$	${}^{17}\text{O}^*_{0,871}$	n	$2S_{1/2}$	0,994 <sup>a</sup>
			$1P_{3/2}$	-0,184	${}^{18}\text{O}$	${}^{17}\text{O}^*_{3,055}$	n	$1P_{1/2}$	0,994 <sup>a</sup>
${}^8\text{Li}^*_{2,255}$	${}^7\text{Li}^*_{4,63}$	n	$1P_{1/2}$	-0,762 <sup>a</sup>	${}^{18}\text{O}$	${}^{17}\text{O}^*_{3,841}$	n	$1F_{5/2}$	-1,800 <sup>a</sup>
			$1P_{3/2}$	0,660	${}^{18}\text{O}$	${}^{17}\text{O}^*_{4,553}$	n	$1P_{3/2}$	0,703 <sup>a</sup>
${}^8\text{Li}^*_{3,21}$	${}^7\text{Li}^*_{6,68}$	n	$1P_{3/2}$	1,033 <sup>a</sup>	${}^{18}\text{O}$	${}^{17}\text{O}^*_{5,38}$	n	$1P_{3/2}$	0,703 <sup>a</sup>
${}^8\text{Li}^*_{5,40}$	${}^7\text{Li}^*_{6,68}$	n	$1P_{3/2}$	1,033 <sup>a</sup>	${}^{19}\text{O}$	${}^{17}\text{O}$	2n	$3S_0$	-0,576
${}^9\text{Li}$	${}^7\text{Li}$	2n	$2S_0$	0,857				$2D_2$	-0,731
			$1D_2$	0,271	${}^{19}\text{O}$	${}^{18}\text{O}$	n	$1D_{5/2}$	0,527
${}^9\text{Li}$	${}^8\text{Li}$	n	$1P_{1/2}$	-0,650 <sup>a</sup>	${}^{19}\text{F}$	${}^{17}\text{O}$	d	$2D_2$	0,482
${}^9\text{Be}$	${}^7\text{Li}$	d	$2S_1$	-0,226 <sup>a</sup>				$2D_3$	-0,129 <sup>a</sup>
			$1D_1$	0,111 <sup>a</sup>	${}^{19}\text{F}$	${}^{18}\text{O}$	p	$2S_{1/2}$	0,699
			$1D_3$	-0,624 <sup>a</sup>	${}^{20}\text{F}$	${}^{17}\text{O}$	t	$4S_{1/2}$	0,099 <sup>a</sup>
${}^9\text{Be}$	${}^8\text{Li}$	p	$1P_{1/2}$	-0,375 <sup>a</sup>				$4S_{3/2}$	-0,132
${}^{10}\text{Be}$	${}^7\text{Li}$	t	$2P_{3/2}$	0,392 <sup>a</sup>				$3D_{5/2}$	-0,272 <sup>a</sup>
${}^{10}\text{Be}$	${}^8\text{Li}$	d	$1D_2$	0,646	${}^{20}\text{F}$	${}^{18}\text{O}$	d	$2D_2$	0,110
					${}^{21}\text{Ne}$	${}^{17}\text{O}$	$\alpha$	$4D_2$	0,051 <sup>a</sup>
					${}^{21}\text{Ne}$	${}^{18}\text{O}$	${}^3\text{He}$	$3D_{3/2}$	0,269

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

вагомих причин у значній різниці між дійсними частинами цих потенціалів, оскільки розподіли нуклонів, якими визначаються глибини цих потенціалів, у даних материнських і дочірніх ядер можуть відрізнятися хіба що в периферійних областях. Отже, при підгонці параметрів  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалу особлива увага зверталась на значення параметрів дифузності потенціалу  $a_V$ ,  $a_W$  та параметрів уявної частини цього потенціалу. Параметри оптичного  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалу, отримані з аналізу експериментальних даних реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  за МЗКР, наведено в табл. 1.

Хвильова функція зв'язаного стану частинки  $x$  у системі  $A = C + x$  обчислювалась стандартним способом – підгонкою параметра  $V$  дійсного потенціалу Вудса - Саксона при значеннях параметрів  $a_V = 0,65$  фм та  $r_V = 1,25A^{1/3}/(C^{1/3} + x^{1/3})$  фм для отримання енергії зв'язку частинки

$x$  у цій системі, рівної експериментальному значенню.

#### Аналіз експериментальних даних

Диференціальні перерізи реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$  МеВ для основних станів ядер  ${}^8\text{Li}$  і  ${}^{17}\text{O}$  показано на рис. 3. Криві представляють МЗКР-розрахунки перерізів реакції для одно- і двоступінчастих передач нуклонів і кластерів, діаграми яких показано на рис. 6. У позначеннях кривих  $\langle x \rangle$  і  $\langle xy \rangle$  вказуються передані в реакції частинки  $x$  та  $x + y$  відповідно. Символом 2n позначено кластер ді-нейтрона.

Видно, що в цій реакції домінує передача нейтрона в усьому кутовому діапазоні (криві  $\langle n \rangle$  і  $\langle n_0 \rangle$ ). Крива  $\langle n_0 \rangle$  показує МЗКР-розрахунки з  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалом, параметри якого такі ж, як

і параметри  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ -потенціалу вхідного каналу реакції (див. табл. 1). Видно, що у даному випадку МЗКР-перерізи не описують експериментальні дані. Тому було проведено підгонку параметрів  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалу. При цьому вважалось, що оскільки розподіли нуклонів в ядрах систем  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$  та  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$  згідно з оболонковою моделлю відрізняються незначно, то значення параметрів дійсних частин оптичних потенціалів взаємодії ядер у цих системах повинні бути близькими. Тому основну увагу було зосереджено на підгонці параметрів уявної частини  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалу. Виявилось, що глибина (параметр  $W_S$ )  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалу поглинання значно менша відповідної глибини  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ -потенціалу (див. табл. 1). Меншим виявився також параметр  $r_w$  для  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалу. Крива  $\langle n \rangle$ , що показує МЗКР-розрахунки з отриманим у результаті підгонки  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалом, задовільно описує експериментальні дані реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  для основних станів ядер  ${}^8\text{Li}$  й  ${}^{17}\text{O}$  в усьому кутовому діапазоні.

На рис. 3 показано також МЗКР-розрахунки з отриманим  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалом для інших можливих передач нуклонів і кластерів. Видно, що внески двоступінчастих  $n + 2n$ ,  $d + p$ ,  $\alpha + {}^3\text{He}$ ,  $t + d$  передач (криві  $\langle n, 2n \rangle$ ,  $\langle dp \rangle$ ,  $\langle \alpha, {}^3\text{He} \rangle$ ,  $\langle td \rangle$  відповідно) та передачі важкого  ${}^{10}\text{B}$ -кластера (крива  $\langle {}^{10}\text{B} \rangle$ ) в цю реакцію незначні. Це ж виявлено також у МЗКР-розрахунках і для збуджених станів ядер  ${}^8\text{Li}$  та  ${}^{17}\text{O}$ .

Диференціальні перерізи реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  для збуджених станів  $0,871 \text{ MeV} (1/2^+) + 0,981 \text{ MeV} (1^+)$  ядер  ${}^{17}\text{O}$  і  ${}^8\text{Li}$  відповідно та  $2,255 \text{ MeV} (3^+)$  ядра  ${}^8\text{Li}$  і  $3,055 \text{ MeV} (1/2^-)$  ядра  ${}^{17}\text{O}$  показано на рис. 4. Кривими тут представлено МЗКР-розрахунки лише для передачі нейтрона (криві  $\langle n \rangle$ ), оскільки внески інших передач у розрахункові перерізи незначні.

Видно, що в сумарних диференціальних перерізах реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  для перших збуджених станів ядер  ${}^{17}\text{O}$  і  ${}^8\text{Li}$  домінує, згідно з МЗКР-розрахунками, передача нейтрона для збудженого стану ядра  ${}^{17}\text{O}$  (крива  $\langle 0,87 \rangle$ ) і значно менший внесок передачі нейтрона з переходом ядра  ${}^8\text{Li}$  у  $0,981 \text{ MeV} (1^+)$ -стан (крива  $\langle 0,98 \rangle$ ).

Диференціальні перерізи реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  з переходом ядра  ${}^8\text{Li}$  у  $2,255 \text{ MeV} (3^+)$ -стан було поміряно лише за реєстрацією іонів  ${}^{17}\text{O}$ , оскільки цей стан ядра  ${}^8\text{Li}_{2,26} = {}^7\text{Li} + n$  незв'язаний (енергія зв'язку  $E_{\text{зв.}} = +0,222 \text{ MeV}$ ). А тому за кінематичних умов та параметрів реєструючої апаратури вимірювання диференціальних перерізів даної реакції в цьому випадку було можливим лише для кутів  $\theta_{\text{с.л.м.}} < 90^\circ$ . У даному випадку передача нейтрона все

ж таки можлива двоступінчастим способом через проміжний збуджений стан  ${}^7\text{Li}_{4,63}^*$  (див. третю діаграму на рис. 6), бо система  ${}^8\text{Li}_{2,26}^* (3^+) = {}^7\text{Li}_{4,63}^* (7/2^-) + n$  зв'язана ( $E_{\text{зв.}} = -4,408 \text{ MeV}$ ). Крива  $\langle n \rangle$  на рис. 4 для  $2,255 \text{ MeV} (3^+)$ -стану ядра  ${}^8\text{Li}$  показує МЗКР-розрахунки для такого двоступінчастого процесу передачі нейтрона і демонструє задовільний опис експериментальних даних.

На рис. 4 показано також диференціальні перерізи реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  для переходу ядра  ${}^{17}\text{O}$  у збуджений  $3,055 \text{ MeV} (1/2^-)$ -стан. Видно, що МЗКР-перерізи передачі нейтрона (крива  $\langle n \rangle$ ) задовільно описують експериментальні дані реакції.

Нами також поміряно диференціальні перерізи реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114 \text{ MeV}$  для переходів ядра  ${}^8\text{Li}$  у збуджені стани  $3,21 \text{ MeV} (1^+)$  і  $5,4 \text{ MeV} (1^+)$  та ядра  ${}^{17}\text{O}$  у збуджені стани  $3,841 \text{ MeV} (5/2^-)$ ,  $4,553 \text{ MeV} (3/2^-)$  і  $5,38 \text{ MeV} (3/2^-)$ . Ці експериментальні дані разом з МЗКР-перерізами для передач нейтронів показано на рис. 5. У МЗКР-розрахунках ядро  ${}^8\text{Li}$  у вищезазначених збуджених станах розглядалось як зв'язані системи  ${}^8\text{Li}_{3,21}^* (1^+) = {}^7\text{Li}_{6,68}^* (5/2^-) + n$  і  ${}^8\text{Li}_{5,4}^* (1^+) = {}^7\text{Li}_{6,68}^* (5/2^-) + n$ , що утворювались у двоступінчастих процесах  ${}^7\text{Li}(3/2^-) \rightarrow {}^7\text{Li}_{6,68}^* (5/2^-) \rightarrow {}^8\text{Li}_{3,21}^* (1^+) = {}^7\text{Li}_{6,68}^* (5/2^-) + n$  ( $E_{\text{зв.}} = -5,503 \text{ MeV}$ ) і  ${}^7\text{Li}(3/2^-) \rightarrow {}^7\text{Li}_{6,68}^* (5/2^-) \rightarrow {}^8\text{Li}_{5,4}^* (1^+) = {}^7\text{Li}_{6,68}^* (5/2^-) + n$  ( $E_{\text{зв.}} = -3,313 \text{ MeV}$ ). Для системи  ${}^8\text{Li}_{3,21}^* (1^+) = {}^7\text{Li}_{4,63}^* (7/2^-) + n$  ( $E_{\text{зв.}} = -3,453 \text{ MeV}$ ) спектроскопічна амплітуда  $S_n = 0$ . Видно, що показані на рис. 5 експериментальні дані реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  також задовільно описуються МЗКР-перерізами передач нейтронів. Інші передачі нуклонів і кластерів не відіграють суттєвої ролі.

### Фолдінг-потенціали взаємодії ядер ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ та ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$

На завершення розгляду результатів аналізу даних реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  з визначенням параметрів оптичного  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалу важливо порівняти між собою фолдінг-потенціали взаємодії ядер  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$  і  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ . Ці потенціали обчислювались за моделлю подвійної згортки (double folding), згідно з якою дійсний потенціал ядро-ядерної взаємодії

$$V(r) = \int \rho_P(r_P) \rho_T(r_T) v(|\vec{r} + \vec{r}_T - \vec{r}_P|) d^3 r_P d^3 r_T, \quad (7)$$

де  $\rho_P(r_P)$ ,  $\rho_T(r_T)$  - розподіли густин нуклонів у налітаючому іоні  $P$  ( ${}^{17,18}\text{O}$ ) та ядрі мішені  $T$  ( ${}^7,8\text{Li}$ ) відповідно;  $v(|\vec{r} + \vec{r}_T - \vec{r}_P|) = v(s)$  - нуклон-нуклонний потенціал;  $\vec{r}$  - відстань між центрами

ядер. У розрахунках використовувався потенціал нуклон-нуклонної взаємодії МЗУ Рейда (Reid) з обмінним псевдопотенціалом

$$v(s) = 7999 \frac{e^{-4s}}{4s} - 2134 \frac{e^{-2,5s}}{2,5s} - 276 (1 - 0,005 \frac{E}{A}) \delta(s), \quad (8)$$

де  $E$  – енергія налітаючого іона в лабораторній системі;  $A$  – маса налітаючого іона;  $\delta(r)$  – дельта-функція.

При обчисленні потенціалу  $V(r)$  взаємодії ядер  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$  і  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$  використовувались розподіли нуклонів, отримані на основі розподілів зарядів (протонів) в ядрах  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^{18}\text{O}$  і  ${}^{17}\text{O}$ , визначених за даними розсіяння електронів цими ядрами [10]. У розрахунку розподілу нуклонів в ядрі  ${}^8\text{Li}$  використовувався такий же розподіл протонів, як і в ядрі  ${}^7\text{Li}$ . Фолдінг-потенціали обчислювались за допомогою програми DFROT [11, 12].

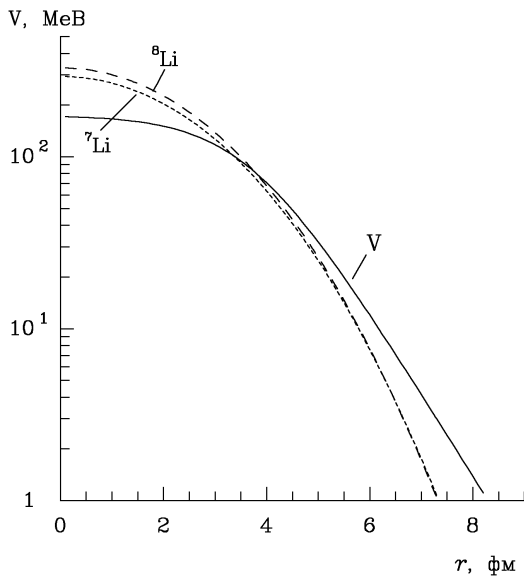


Рис. 7. Фолдінг-потенціали взаємодії ядер  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$  і  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$  (штрихові криві  ${}^7\text{Li}$  і  ${}^8\text{Li}$ ) у порівнянні з дійсною частиною  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ -потенціалу (крива V), отриманого з аналізу пружного розсіяння цих ядер.

На рис. 7 фолдінг-потенціали взаємодії ядер  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$  і  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$  (штрихові криві  ${}^7\text{Li}$  і  ${}^8\text{Li}$ ) порівнюється з дійсною частиною  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ -потенціалу (суцільна крива V), визначеного в аналізі експериментальних даних пружного розсіяння ядер цих ядер [1]. Видно, що  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ - і  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -фолдінг-потенціали відрізняються незначно, а їх глибини перевищують в  $\sim 1,7$  раз глибину дійсного феноменологічного  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ -потенціалу. Проте на радіусі  $\sim 3,7$  фм найбільш інтенсивної взаємодії цих ядер величини феноменологічних і фолдінг-потенціалів відрізняються незначно, що забезпечує невеликі відмінності між МЗКР-перерізами ядерних процесів, розрахованими з використанням цих потенціалів.

### Основні результати та висновки

Поміряно диференціальні перерізи реакції  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$  МеВ для основних станів ядер  ${}^8\text{Li}$  і  ${}^{17}\text{O}$  та їх збуджених станів 0,871 МеВ ( $1/2^+$ ) ( ${}^{17}\text{O}$ ) + 0,981 МеВ ( $1^+$ ) ( ${}^8\text{Li}$ ); 2,255 МеВ ( $3^+$ ); 3,21 МеВ ( $1^+$ ) і 5,4 МеВ ( $1^+$ ) ( ${}^8\text{Li}$ ) та 3,055 МеВ ( $1/2^-$ ); 3,841 МеВ ( $5/2^-$ ); 4,553 МеВ ( $3/2^-$ ) і 5,38 МеВ ( $3/2^-$ ) ( ${}^{17}\text{O}$ ). Експериментальні дані цієї реакції поміряно вперше.

Експериментальні дані реакції проаналізовано за методом зв'язаних реакцій. Досліджено внески різних механізмів передачі нуклонів і кластерів. Установлено, що в даній реакції домінує передача нейтрона.

Визначено параметри оптичного потенціалу взаємодії ядер  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$  та розраховано  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ - і  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -фолдінг-потенціали, величини яких задовільно узгоджуються із значеннями дійсних частин феноменологічних  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ - і  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенціалів на радіусі найбільш інтенсивної взаємодії ядер.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rudchik A. A., Rudchik A. T., Kliczewski S. et al. Elastic and inelastic scattering of  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$  versus  ${}^7\text{Li} + {}^{16}\text{O}$  // Nucl. Phys. A. - 2007. - Vol. 785. - P. 293 - 306.
2. Smirnov Yu. F., Tchuvil'sky Yu. M. Cluster spectroscopic factors for the p-shell nuclei // Phys. Rev. C. - 1977. - Vol. 15. - P. 84 - 93.
3. Kowalczyk M. SMAN: A Code for Nuclear Experiments. - Warsaw, 1998. - 32 p. (Report/ Warsaw University).
4. Чернівецький В. К., Русек К., Будзановські А. та ін. Експериментальна установка для дослідження ядерних реакцій на Варшавському циклотроні U-200P // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2002. - № 2 (8). - С. 216 - 224.
5. Tilley D. R., Kelley J. H., Godwin J. L. et al. Energy levels of light nuclei  $A = 8, 9, 10$  // Nucl. Phys. A. - Vol. 745, No. 3-4. - P. 155 - 362.
6. Рудчик А. Т., Чувильський Ю. М. Вычисление спектроскопических амплитуд для произвольных ассоциаций нуклонов в ядрах 1p-оболочки (программа DESNA). - Киев, 1982. - 27 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исследований; КИЯИ-82-12).
7. Рудчик А. Т., Чувильський Ю. М. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1p-оболочки и анализ реакций многонуклон-

- ных передач // УФЖ. - 1985. - Т. 30, № 6. - С. 819 - 825.
8. Бояркина А. Н. Структура ядер  $1p$ -оболочки. - М.: Изд-во Москов. ун-та, 1973.- 62 с.
9. Thompson I. J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comp. Phys. Rep. - 1988. - Vol. 7. - P. 167 - 212.
10. De Vries H., De Jager C. W., De Vries C. Nuclear charge-density-distribution parameters from elastic electron scattering // Atomic data and nuclear data tables. - 1987. - Vol. 36. - P. 495 - 536.
11. Cook J. DFPOТ - a program for the calculation of double folded potentials // Comp. Phys. Com. - 1982. - Vol. 25, Is. 2. - P. 125 - 139.
12. Cook J. DFPOТ - a program for the calculation of double folded potentials // Ibid. - 1984. - Vol. 35. - P. C775.

### РЕАКЦІЯ ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$ И ПОТЕНЦИАЛ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯДЕР ${}^{17}\text{O} + {}^8\text{Li}$

А. Т. Рудчик, Ю. М. Степаненко, А. А. Рудчик, О. А. Понкратенко, Е. И. Коший, С. Кличевски, К. Русек, А. Будзановски, В. М. Кирьянчук, С. Ю. Межевич, И. Сквирчиньска, Р. Сюдак, Б. Чех, А. Щурек, В. В. Улещенко, Я. Хоиньски, Л. Гловацка

Измерены дифференциальные сечения реакции  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  при энергии  $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$  МэВ для основных и возбужденных состояний ядер  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^{17}\text{O}$ . Экспериментальные данные проанализированы по методу связанных каналов реакций для одно- и двухступенчатых передач нуклонов и кластеров. В расчетах использован  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ -потенциал, полученный ранее из анализа данных упругого рассеяния этих ядер, и спектроскопические амплитуды передаваемых в реакции нуклонов и кластеров, вычисленные в рамках оболочечной модели. Исследованы механизмы реакции и определены параметры оптического  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -потенциала. Анализируются их отличия от параметров  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ -потенциала. Вычислен  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ -фолдинг-потенциал, который сравнивается с полученным из анализа экспериментальных данных реакции.

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

### THE ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$ REACTION AND THE ${}^{17}\text{O} + {}^8\text{Li}$ POTENTIAL

A. T. Rudchik, Yu. M. Stepanenko, A. A. Rudchik, O. A. Ponkratenko, E. I. Koshchy, S. Kliczewski, K. Rusek, A. Budzanowski, V. M. Kyryanchuk, S. Yu. Mezhevych, I. Skwirczyńska, R. Siudak, B. Czech, A. Szczurek, V. V. Uleshchenko, J. Choiński, L. Głowacka

The angular distributions of the  ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$  reaction were measured for the transitions to the ground and excited states of  ${}^8\text{Li}$  and  ${}^{17}\text{O}$  at the energy  $E_{\text{lab}}({}^{18}\text{O}) = 114$  MeV. The data were analyzed with coupled-reaction-channels method for one- and two-step transfers of nucleons and clusters. In the analysis, the  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$  potential deduced in the analysis of the elastic  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ -scattering data as well as shell-model spectroscopic amplitudes of transferred nucleons and clusters were used. The reaction mechanism was studied. The parameters of the  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$  potential were deduced and were compared with these of the  ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$  potential. The  ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$  folding-potential was calculated and compared with the deduced in the reaction data analysis.

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

Надійшла до редакції 14.04.09,  
після доопрацювання - 19.06.09.