

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

© 2010 А. Т. Рудчик¹, Ю. М. Степаненко¹, А. А. Рудчик¹, О. А. Понкратенко¹, Є. І. Кощій², С. Клічевскі³, К. Русек⁴, А. Будзановскі³, С. Ю. Межевич¹, Вал. М. Пірнак¹, І. Сквірчинська³, Р. Сюдак³, Б. Чех³, А. Щурек³, Я. Хоїньскі⁵, Л. Гловацка⁶

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

² Харківський національний університет, Харків

³ Інститут ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського, Краків, Польща

⁴ Інститут ядерних досліджень ім. А. Солтана, Варшава, Польща

⁵ Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

⁶ Інститут прикладної фізики Військово-технічного університету, Варшава, Польща

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів реакції ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$ для основних станів ядер ${}^8\text{Be}$ й ${}^{17}\text{N}$, а також збуджених станів ядра ${}^{17}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{18}\text{O}) = 114$ МеВ. Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) для одно- і двоступінчастих передач нуклонів і кластерів. У МЗКР-розрахунках для вхідного каналу реакції використано оптичний потенціал, отриманий з аналізу даних пружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$, та спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів, обчислені за оболонковою моделлю. Визначено оптичний потенціал взаємодії нестабільних ядер ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$ за експериментальними даними реакції. Досліджено внески різноманітних одно- та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів у перерізи реакції ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$.

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

Вступ

Вивчення властивостей нестабільних (екзотичних) ядер за допомогою ядерних реакцій з важкими іонами – одна з актуальних тем ядерної фізики. Досліджуються механізми реакцій з виходом нестабільних ядер, їхня взаємодія з іншими ядрами, структура, форма ядер тощо. Використовуються такі реакції і для отримання вторинних пучків радіоактивних іонів, що застосовуються для вивчення їхніх властивостей у прямих експериментах.

У цій роботі представлено результати дослідження реакції ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{18}\text{O}) = 114$ МеВ з виходом нестабільних ядер ${}^8\text{Be}$ і ${}^{17}\text{N}$, дослідити взаємодію яких неможливо в прямих експериментах за допомогою радіоактивних пучків. Відомостей про дослідження цієї реакції іншими авторами в літературі немає.

Вимірювання диференціальних перерізів цієї реакції відбувалось одночасно з вимірюванням пружного й непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ [1], що забезпечило можливість використання цих даних для визначення оптичного потенціалу взаємодії ядер ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$, необхідного для дослідження реакції ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$ за сучасними теоріями ядерних реакцій, зокрема за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР).

Крім уперше отриманих експериментальних даних реакції ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$, у роботі було виконано розрахунки спектроскопічних амплітуд нуклонів і кластерів в ядрах за оболонковою моделлю, необхідних для МЗКР-аналізу цих даних. Для повноти МЗКР-аналізу експериментальних даних залишалось лише визначити параметри

оптичного потенціалу взаємодії ядер вихідного каналу реакції ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$, що було здійснено методом підгонки з використанням отриманих даних. Цей потенціал порівнюється з раніше дослідженими оптичними потенціалами взаємодії ядер ${}^8\text{Be} + {}^{15}\text{N}$ [2], ${}^8\text{Be} + {}^{13}\text{C}$ [3], ${}^8\text{Be} + {}^9\text{Be}$ [4], ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ [5, 6] та ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ [1].

Методика експерименту

Вимірювання диференціальних перерізів реакції ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$ проводилось одночасно з пружним і непружним розсіянням ядер ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ на Варшавському циклотроні С-200Р, використовуючи пучок 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 ~ 900 мкг/см².

Для реєстрації та ідентифікації продуктів реакцій використовувалась ΔE - E -методика. Спектрометри складались з кремнієвих ΔE - і E -детекторів товщинами 67 мкм і 1 мм відповідно. В експерименті використовувалась електроніка стандарту САМАС. Накопичення та сортування експериментальної інформації у вигляді двовимірних $\Delta E(E)$ -спектрів здійснювалось за допомогою комп'ютерної системи SMAN [7]. Детальний опис експериментальної установки міститься в роботі [8].

Типовий двовимірний $\Delta E(E)$ -спектр ізотопів азоту показано на рис. 1. Видно, що експериментальна методика забезпечувала надійну ідентифікацію ізотопів азоту ^{14, 15, 16, 17}N.

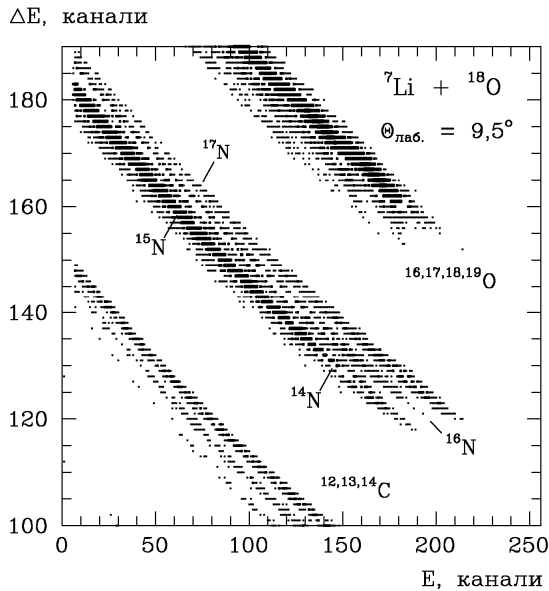


Рис. 1. Типовий $\Delta E(E)$ -спектр ізотопів азоту $^{14,15,16,17}\text{N}$ - продуктів реакцій $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, \text{N})\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114 \text{ MeV}$.

Типовий спектр ядер ^{17}N – продуктів реакції $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^8\text{Be}$ з вилученим неперервним фоном, зумовленим реакціями типу $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})\alpha\alpha$, представлено на рис. 2. Процедура вилучення фону наведена в роботі [10]. Криві - наближення спектра гауссіанами

$$N(E) = \sum_i N_i \exp\left(-0.5 \frac{(E - E_i)^2}{h_i^2}\right), \quad (1)$$

площа яких використовувалась для обчислення диференціальних перерізів реакції $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^8\text{Be}$. При наближенні спектрів підганялись лише параметри N_i . Параметри E_i дорівнювали відповідним кінетичним енергіям ядер ^{17}N , а параметри h_i покладались рівними напівширині ізольованого піка з великим числом відліків та становили 0,4 МеВ. При цьому похибки в обчисленні площ ізольованих гауссіанів не перевищували 20 %, а частково перекритих – 30 - 40 %. Диференціальні перерізи реакції $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^8\text{Be}$ нормувались з використанням множника нормування перерізів пружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$ [1]. Похибка абсолютизації перерізів реакції $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^8\text{Be}$ не перевищувала 20 %.

Експериментальні диференціальні перерізи реакції $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^8\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114 \text{ MeV}$ показано на рис. 3 - 6.

Аналіз експериментальних даних

Методи розрахунків

У МЗКР-аналізі експериментальних даних реакції $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^8\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114 \text{ MeV}$ для вхідного та вихідного

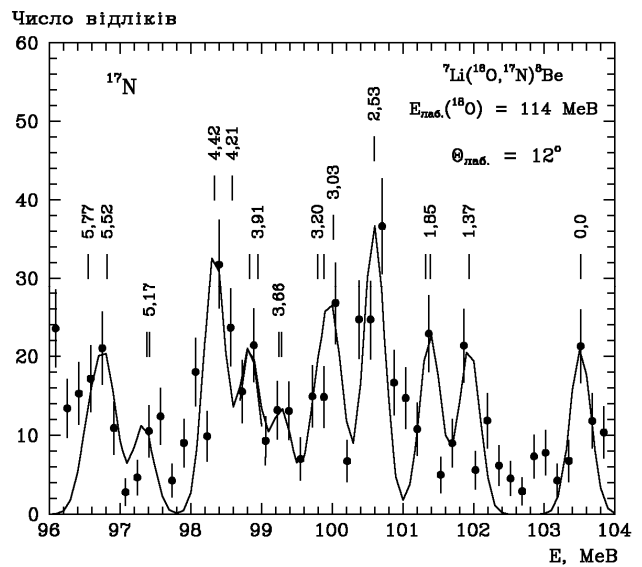


Рис. 2. Типовий енергетичний спектр ядер ^{17}N з реакції $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^8\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114 \text{ MeV}$. Позначення над піками відповідають енергіям основного й збуджених станів ядра ^{17}N . Рівень 3,03 - енергія збудженого ^8Be в ядрі віддачі [9]. Криві – наближення спектра гауссіанами.

каналів реакції використовувався потенціал типу Вудса - Саксона з об'ємним поглинанням

$$U(r) = V_0 \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_V}{a_V}\right) \right]^{-1} + iW_S \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_W}{a_W}\right) \right]^{-1} \quad (2)$$

та кулонівський потенціал рівномірно зарядженої кулі

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

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 й заряди іона ^{18}O (або ядра ^{17}N) та ядра мішені ^7Li (або ядра ^8Be); e - заряд електрона. В усіх розрахунках параметр $r_c = 1,25 \text{ фм}$.

Для вхідного каналу реакції $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^8\text{Be}$ використовувався оптичний потенціал, отриманий з аналізу даних пружного й непружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$ [1]. Параметри цього потенціалу подано в табл. 1.

Параметри $X_i = \{V_0, r_V, a_V, W_S, r_W, a_W\}$ потенціалу $^8\text{Be} + ^{17}\text{N}$ визначались за даними реакції $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^8\text{Be}$ методом підгонки, використовуючи при цьому в МЗКР-розрахунках спектроскопічні амплітуди переданих у реакції нуклонів і кластерів, обчислені за трансляційно-інваріантною моделлю оболонки (ТІМО) [11]. Спектроскопічні амплітуди S_x нуклонів і кластерів в системах $A = C + x$ подано в табл. 2.

Таблиця 1. Параметри оптичних потенціалів

Система ядер	$E_{\text{с.ц.м.}}$, МеВ	V_0 , МеВ	r_V , фм	a_V , фм	W_S , МеВ	r_W , фм	a_W , фм	Літ.
${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$	31,92	174,5	0,806	0,900	13,0	1,47	0,900	[1]
${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$	33,23	174,5	0,800	0,900	7,0	1,25	0,900	
${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$	25,91	183,9	0,802	0,700	5,0	1,20	0,700	[5, 6]
${}^8\text{Be} + {}^{15}\text{N}$	29,20	252,6	0,796	0,400	4,3	1,25	0,400	[2]
${}^8\text{Be} + {}^9\text{Be}$	24,79	192,4	0,788	0,678	9,0	1,60	0,678	[4]
${}^8\text{Be} + {}^{13}\text{C}$	31,14	170,2	0,793	0,760	7,0	1,25	0,760	[3]

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

A	C	x	nL_j	S_x	A	C	x	nL_j	S_x
${}^7\text{Li}$	${}^4\text{He}$	t	$2P_{3/2}$	-1,091	${}^{18}\text{O}^*_{1,982}$	${}^{17}\text{N}^*_{1,907}$	P	$1P_{1/2}$	0,279 ^(a)
${}^7\text{Li}$	${}^5\text{He}$	d	$2S_1$	-0,674 ^(a)				$1P_{3/2}$	-0,149
			$1D_1$	-0,121 ^(a)	${}^{18}\text{O}^*_{3,555}$	${}^{17}\text{N}^*_{1,907}$	P	$1P_{3/2}$	0,976
			$1D_3$	0,676 ^(a)	${}^{18}\text{O}^*_{3,921}$	${}^{17}\text{N}^*_{1,907}$	P	$1P_{1/2}$	0,279 ^(a)
${}^7\text{Li}$	${}^6\text{Li}$	n	$1P_{1/2}$	-0,657				$1P_{3/2}$	-0,149
			$1P_{3/2}$	-0,735 ^(a)	${}^{18}\text{O}^*_{5,260}$	${}^{17}\text{N}^*_{1,907}$	P	$1P_{1/2}$	0,279 ^(a)
${}^8\text{Be}$	${}^5\text{He}$	${}^3\text{He}$	$2P_{3/2}$	-1,102 ^(a)				$1P_{3/2}$	-0,149
${}^8\text{Be}$	${}^4\text{He}$	α	$3S_0$	1,225	${}^{18}\text{O}^*_{4,456}$	${}^{17}\text{N}^*_{2,526}$	P	$1P_{3/2}$	-1,179 ^(a)
${}^8\text{Be}$	${}^6\text{Li}$	d	$2S_1$	1,217	${}^{18}\text{O}^*_{5,098}$	${}^{17}\text{N}^*_{2,526}$	P	$1P_{3/2}$	0,629
${}^8\text{Be}$	${}^7\text{Li}$	p	$1P_{3/2}$	1,234 ^(a)	${}^{18}\text{O}^*_{6,201}$	${}^{17}\text{N}^*_{2,526}$	P	$1P_{3/2}$	-1,179 ^(a)
${}^9\text{Be}$	${}^7\text{Li}$	d	$2S_1$	-0,226 ^(a)	${}^{18}\text{O}^*_{3,555}$	${}^{17}\text{N}^*_{3,129}$	P	$1P_{1/2}$	-0,861
			$1D_1$	0,111 ^(a)				$1P_{3/2}$	-0,727 ^(a)
			$1D_3$	-0,624 ^(a)	${}^{18}\text{O}$	${}^{17}\text{N}^*_{3,204}$	P	$1P_{3/2}$	1,695 ^(a)
${}^9\text{Be}$	${}^8\text{Be}$	n	$1P_{3/2}$	0,866	${}^{18}\text{O}^*_{3,555}$	${}^{17}\text{N}^*_{3,629}$	P	$1P_{1/2}$	-0,861
${}^{10}\text{B}$	${}^7\text{Li}$	${}^3\text{He}$	$2P_{3/2}$	0,419				$1P_{3/2}$	-0,727 ^(a)
			$1F_{5/2}$	-0,104 ^(a)	${}^{18}\text{O}$	${}^{17}\text{N}^*_{3,663}$	P	$1P_{1/2}$	1,198 ^(a)
			$1F_{7/2}$	0,347	${}^{18}\text{O}$	${}^{17}\text{N}^*_{3,906}$	P	$1P_{3/2}$	1,695 ^(a)
${}^{10}\text{B}$	${}^8\text{Be}$	d	$1D_3$	0,811	${}^{18}\text{O}^*_{4,456}$	${}^{17}\text{N}^*_{4,006}$	P	$1P_{1/2}$	-0,439 ^(a)
${}^{11}\text{B}$	${}^7\text{Li}$	α	$3S_0$	-0,638				$1P_{3/2}$	0,196
			$2D_2$	-0,422	${}^{18}\text{O}^*_{4,456}$	${}^{17}\text{N}^*_{4,209}$	P	$1P_{3/2}$	-0,589 ^(a)
${}^{11}\text{B}$	${}^8\text{Be}$	t	$2P_{3/2}$	0,641	${}^{18}\text{O}$	${}^{17}\text{N}^*_{4,415}$	P	$1P_{3/2}$	1,695 ^(a)
${}^{17}\text{N}$	${}^{14}\text{C}$	t	$1P_{1/2}$	0,466	${}^{18}\text{O}$	${}^{17}\text{N}^*_{5,514}$	P	$1P_{3/2}$	1,695 ^(a)
${}^{17}\text{N}$	${}^{15}\text{C}$	d	$1P_1$	0,240 ^(a)	${}^{18}\text{O}^*_{4,456}$	${}^{17}\text{N}^*_{5,772}$	P	$1P_{1/2}$	-0,393
${}^{17}\text{N}$	${}^{16}\text{N}$	n	$1D_{3/2}$	-1,008				$1P_{3/2}$	-0,556 ^(a)
${}^{18}\text{O}$	${}^{14}\text{C}$	α	$4S_0$	-0,802	${}^{19}\text{O}$	${}^{17}\text{N}$	D	$1F_2$	-0,209
${}^{18}\text{O}$	${}^{15}\text{C}$	${}^3\text{He}$	$3S_{1/2}$	-0,903 ^(a)				$1F_3$	-0,056 ^(a)
${}^{18}\text{O}$	${}^{16}\text{N}$	d	$2P_2$	-1,304	${}^{19}\text{O}$	${}^{18}\text{O}$	N	$1D_{5/2}$	-0,882
${}^{18}\text{O}$	${}^{17}\text{N}$	p	$1P_{1/2}$	1,198 ^(a)	${}^{20}\text{F}$	${}^{17}\text{N}$	${}^3\text{He}$	$3P_{3/2}$	-0,103
${}^{18}\text{O}$	${}^{17}\text{N}^*_{1,374}$	p	$1P_{3/2}$	1,695 ^(a)				$2F_{5/2}$	-0,105
${}^{18}\text{O}^*_{4,456}$	${}^{17}\text{N}^*_{1,850}$	p	$1P_{1/2}$	-0,393	${}^{20}\text{F}$	${}^{18}\text{O}$	D	$2D_2$	0,380
			$1P_{3/2}$	-0,556 ^(a)	${}^{21}\text{F}$	${}^{17}\text{N}$	A	$3F_3$	0,059
${}^{18}\text{O}^*_{6,198}$	${}^{17}\text{N}^*_{1,850}$	p	$1P_{1/2}$	-0,393	${}^{21}\text{F}$	${}^{18}\text{O}$	T	$3D_{5/2}$	-0,001
			$1P_{3/2}$	-0,556 ^(a)					

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

У МЗКР-розрахунках у систему зв'язку каналів включались пружне й непружне розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ для переходів ядер ${}^7\text{Li}$ і ${}^{18}\text{O}$ у збуджені стани з параметрами деформації цих ядер, отриманих у роботі [1], та найважливіші реакції передач, діаграми яких показано на рис. 7.

Хвильові функції зв'язаного стану частинок x у системі $A = C + x$ обчислювались стандартним способом – підгонкою глибини V дійсного потенціалу Вудса - Саксона при $a_V = 0,65$ фм та $r_V = 1,25A^{1/3}/(C^{1/3} + x^{1/3})$ фм, використовуючи енергію зв'язку частинки x у цій системі як дані для підгонки.

Для розрахунків спектроскопічних амплітуд використовувалась програма DESNA [12, 13], а МЗКР-розрахунки проводились за допомогою програми FRESCO [14].

Реакція ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$

Експериментальні диференціальні перерізи реакції ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$ МеВ для основних станів ядер ${}^8\text{Be}$ та ${}^{17}\text{N}$ наведено на рис. 3.

Диференціальні перерізи цієї реакції помірно лише для кутів $\theta_{\text{с.ц.м.}} < 90^\circ$. Вимірювання на більші

кути обмежувало поглинання ^{17}N в ΔE -детекторі та неможливість реєстрації нестабільного ядра

^8Be , за вильотом якого на малі кути можна було б визначити розсіяння ^{17}N на великі кути.

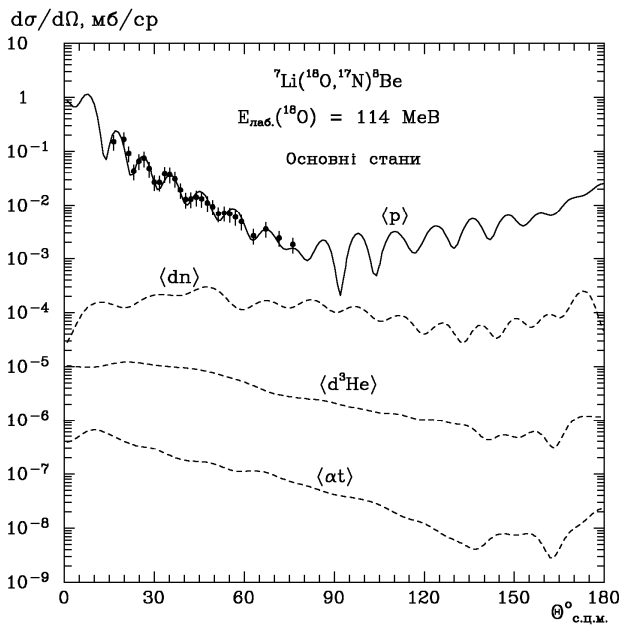


Рис. 3. Диференціальні перерізи реакції $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^8\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114$ MeV для основних станів ядер ^8Be та ^{17}N . Криві – МЗКР-розрахунки.

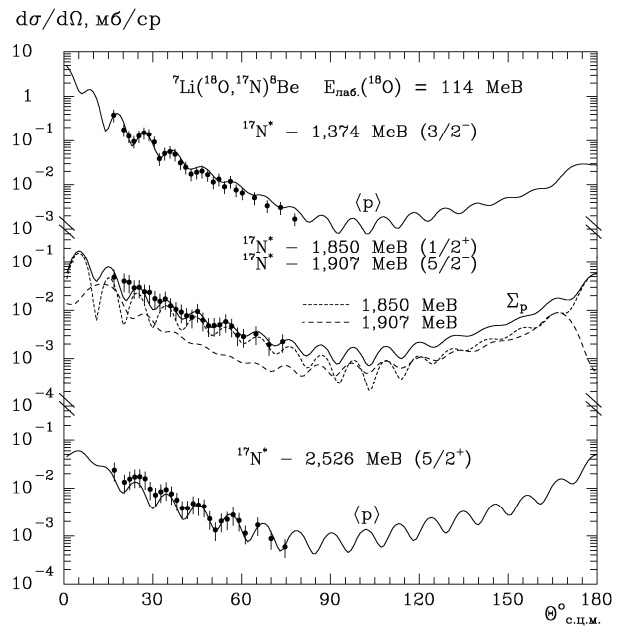


Рис. 4. Диференціальні перерізи реакції $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^8\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114$ MeV для збуджених станів ядра ^{17}N . Криві – МЗКР-розрахунки.

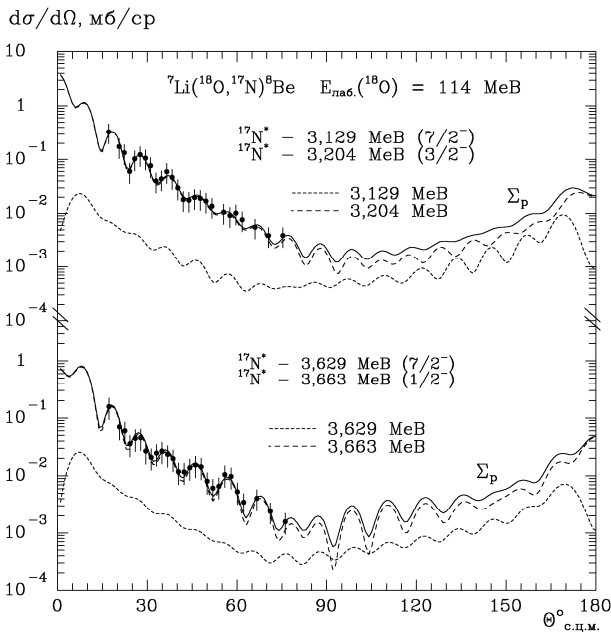


Рис. 5. Те ж саме, як на рис. 4, але для інших збуджених станів ядра ^{17}N .

Кривими на рис. 3 показано МЗКР-розрахунки для передачі протона та послідовних передач $d + n$ і $n + d$, $d + ^3\text{He}$ і $^3\text{He} + d$ та $\alpha + t$ і $t + \alpha$ (криві $\langle dn \rangle$, $\langle d^3\text{He} \rangle$ та $\langle \alpha t \rangle$ відповідно, когерентні суми). Видно, що в реакції $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^8\text{Be}$ домінує передача протона. Внески інших передач нуклонів і кластерів у переріз цієї реакції несуттєві. Це полегшило визначення параметрів потенціалу взаємодії ядер $^8\text{Be} + ^{17}\text{N}$ у вихідному каналі реакції. Ці параметри також подано в табл. 1.

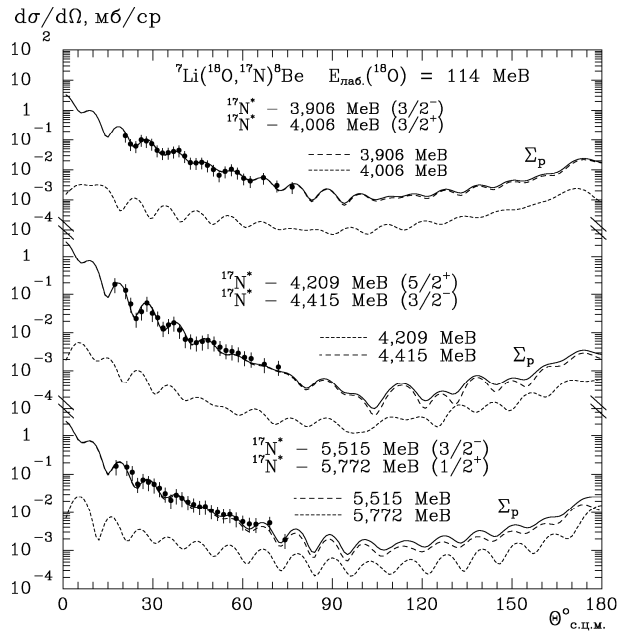


Рис. 6. Те ж саме, як на рис. 4, але для інших збуджених станів ядра ^{17}N .

Диференціальні перерізи реакції $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^8\text{Be}$ для збуджених станів ядра ^{17}N [15] показано на рис. 4, 5 і 6. Як і в попередньому випадку, у цій реакції домінує передача протона. МЗКР-розрахунки для цієї передачі показано на рис. 4, 5 і 6 кривими. Для нерозділених в експерименті станів ядра ^{17}N показано МЗКР-перерізи для окремих рівнів та їхні некогерентні суми Σ_p .

Спектроскопічні амплітуди протонів S_p у системах $^{18}\text{O} = ^{17}\text{N}^* + p$ дорівнюють нулю для збу-

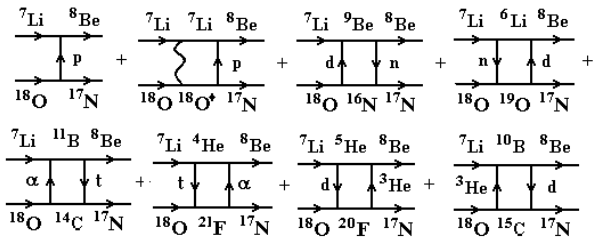


Рис. 7. Діаграми одно- та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів у реакції ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$.

джених станів 1,85 MeV ($1/2^+$), 1,907 MeV ($5/2^-$), 2,526 MeV ($5/2^+$), 3,129 MeV ($7/2^-$), 3,629 MeV ($7/2^+$), 4,006 MeV ($3/2^+$), 4,209 MeV ($5/2^+$) і 5,772 MeV ($1/2^+$) ядра ${}^{17}\text{N}$. Тому для опису диференціальних перерізів реакції ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$ із збудженням станів 1,85 MeV ($1/2^+$) + 1,907 MeV ($5/2^-$) ядра ${}^{17}\text{N}$, нерозділених в експерименті, використовувався двоступінчастий процес з початковим збудженням станів 4,456 MeV (1^-) і 6,198 MeV (1^-) ядра ${}^{18}\text{O}$ (утворення систем ${}^{18}\text{O}^* = {}^{17}\text{N}^* + p$) і наступною передачею протонів для збудження стану 1,85 MeV ($1/2^+$) ядра ${}^{17}\text{N}$ у

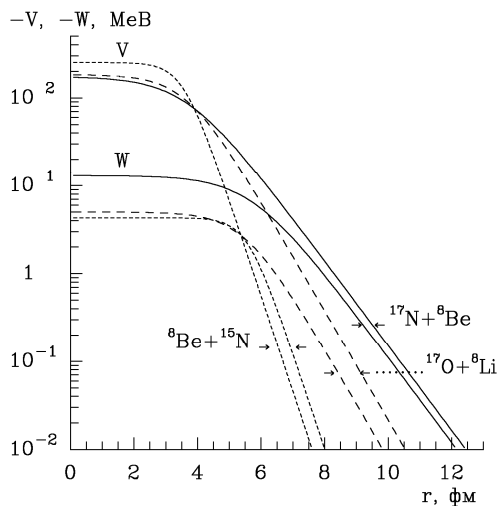


Рис. 8. Оптичні потенціали взаємодії ядер ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$, ${}^8\text{Be} + {}^{15}\text{N}$ [2] та ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ [6].

Для взаємодії ядер ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$ було розраховано фолдінг-потенціал (потенціал згортки) за моделлю подвійної згортки (double folding)

$$V(r) = \int \rho_p(r_p) \rho_T(r_T) v(|\vec{r} + \vec{r}_T - \vec{r}_p|) d^3r_p d^3r_T, \quad (4)$$

де $\rho_p(r_p)$, $\rho_T(r_T)$ - розподіли густин нуклонів у ядрах ${}^{17}\text{O}$ і ${}^8\text{Be}$ 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

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

цій реакції, а також такий же процес із збудженням станів 1,982 MeV (2^+), 3,555 MeV (4^+), 3,921 MeV (2^+) і 5,26 MeV (2^+) ядра ${}^{18}\text{O}$ та наступними передачами протонів для збудження стану 1,907 MeV ($5/2^-$) ядра ${}^{17}\text{N}$. Цей двоступінчастий процес із використанням систем ${}^{18}\text{O}^* = {}^{17}\text{N}^* + p$ застосовувався для опису реакції ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$ і для інших вищезазначених станів ядра ${}^{17}\text{N}$, для яких одноступінчаста передача протона заборонена. Спектроскопічні амплітуди протонів у системах ${}^{18}\text{O}^* = {}^{17}\text{N}^* + p$ подано в табл. 2.

Параметри потенціалу взаємодії ядра ${}^{17}\text{N}$ у збуджених станах з ядром ${}^8\text{Be}$ виявились такими ж, як для основного стану ${}^{17}\text{N}$ (див. табл. 1). Для порівняння в табл. 1 подано також набори параметрів потенціалів взаємодії ядер ${}^8\text{Be} + {}^{15}\text{N}$ [2], ${}^8\text{Be} + {}^{13}\text{C}$ [3], ${}^8\text{Be} + {}^9\text{Be}$ [4] та ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$ [5, 6]. На рис. 8 оптичний потенціал ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$ порівнюється з потенціалами ${}^8\text{Be} + {}^{15}\text{N}$ та ${}^8\text{Li} + {}^{17}\text{O}$. Видно, що серед цих потенціалів найбільшу протяжність має потенціал ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$.

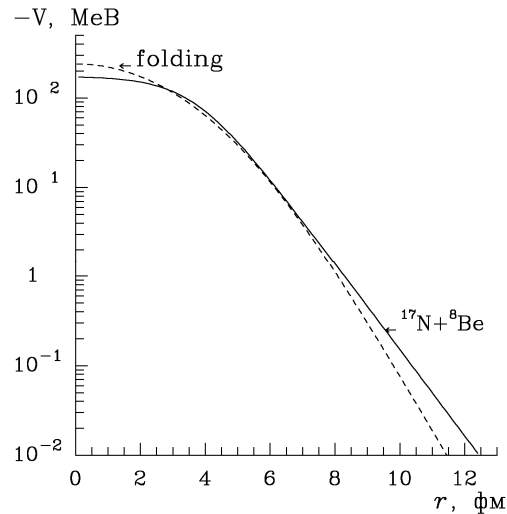


Рис. 9. Порівняння дійсної частини потенціалу взаємодії ядер ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$ (суцільна крива) з фолдінг-потенціалом (штрихова крива).

де $E_{\text{лаб.}}$ і A - кінетична енергія та маса налітаючого іона відповідно.

При обчисленні потенціалу $V(r)$ взаємодії ядер ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$ використовувались розподіл нуклонів в ядрі ${}^8\text{Be}$ [16] та розподіл зарядів в ядрі ${}^{15}\text{N}$ [17]. Фолдінг-потенціал взаємодії ядер ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$ обчислювався за допомогою програми DFROT [18, 19].

Фолдінг-потенціал взаємодії ядер ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$ показано на рис. 9 у порівнянні з дійсною частиною потенціалу взаємодії цих ядер. Видно, що ці потенціали мало відрізняються між собою в інтервалі відстаней від 2 до 7 фм, де в основному відбуваються ядерні процеси. Тому заміна дійсної частини потенціалу взаємодії ядер ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$ на фолдінг-потенціал незначно впливає на МЗКР-перерізи реакції ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$.

Основні результати та висновки

Поміряно диференціальні перерізи реакції ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114 \text{ MeV}$ для переходів ядер ${}^8\text{Be}$ і ${}^{17}\text{N}$ в основні стани та на рівні

- 1,374 MeV (3/2⁻),
- 1,850 MeV (1/2⁺) + 1,907 MeV (5/2⁻),
- 2,526 MeV (5/2⁺),
- 3,129 MeV (7/2⁻) + 3,204 MeV (3/2⁻),
- 3,629 MeV (7/2⁻) + 3,663 MeV (1/2⁻),
- 3,906 MeV (5/2⁻) + 4,006 MeV (3/2⁻),
- 4,209 MeV (5/2⁺) + 4,415 MeV (3/2⁻) і
- 5,515 MeV (3/2⁻) + ,772 MeV (1/2⁺)

ядра ${}^{17}\text{N}$. Реакцію досліджено вперше.

Експериментальні дані реакції ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$ проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій, включаючи у схему зв'язку каналів пружне й непружне розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ та найбільш імовірні реакції передач. Досліджено вне-

ски різних механізмів передач нуклонів і кластерів. Установлено, що в цій реакції домінує передача протона. Внески двоступінчастих передач нуклонів і кластерів у реакцію ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$ незначні.

Визначено параметри оптичного потенціалу взаємодії ядер ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$ за експериментальними даними реакції ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$, використовуючи в МЗКР-розрахунках для вхідного каналу реакції оптичний потенціал взаємодії ядер ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$, отриманий з аналізу експериментальних даних пружного розсіяння цих ядер, та спектроскопічні амплітуди, обчислені за трансляційно-інваріантною моделлю оболонки.

Для взаємодії ядер ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$ розраховано фолдінг-потенціал за моделлю подвійної згортки, з яким добре узгоджується дійсна частина оптичного потенціалу ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$, визначеного за даними реакції ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$.

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. Rudchik A. A., Rudchik A. T., Budzanowski A. et al. Mechanism of ${}^{12}\text{C}({}^{11}\text{B}, {}^{15}\text{N}){}^8\text{Be}$ reaction and ${}^8\text{Be} + {}^{15}\text{N}$ optical-model potential // Eur. Phys. J. A. - 2005. - Vol. 23. - P. 445 - 452.
3. Rudchik A. T., Momotyuk O. A., Budzanowski A. et al. Energy dependence of the ${}^8\text{Be} + {}^{13}\text{C}$ interaction // Nucl. Phys. A. - 1999. - Vol. 660. - P. 267 - 279.
4. Romanushyn V. O., Rudchik A. T., Kemper K. W. et al. ${}^8\text{Be}$ scattering potentials from reaction analyses // Phys. Rev. C. - 2009. - Vol. 79. - P. 054609-1 - 054609-7.
5. Rudchik A. A., Stepanenko Yu.M., Kemper K. W. 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. - 2009. - Vol. 831. - P. 139 - 149.
6. Рудчик А. Т., Степаненко Ю. М., Рудчик А. А. та ін. Реакція ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{O}){}^8\text{Li}$ та потенціал взаємодії ядер ${}^{17}\text{O} + {}^8\text{Li}$ // Ядерна фізика та енергетика. - 2009. - Т. 10, № 2. - С. 138 - 145.
7. Kowalczyk M. SMAN: A Code for Nuclear Experiments. - Warsaw, 1998. - 32 p. (Report/ Warsaw University).
8. 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.
9. Tilley D.R., Kelley J.H., Godwin J.L. et al. Energy Level of Light Nuclei A = 8, 9, 10 // Nucl. Phys. A. - 2004. - Vol. 745, Is. 3-4. - P.155 - 362.
10. Романишин В. О., Рудчик А. Т., Коцкій Є.І. та ін. Механізми реакції ${}^7\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^8\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}({}^7\text{Li}, {}^9\text{Be}){}^8\text{Be}$ та потенціал взаємодії ядер ${}^8\text{Be} + {}^9\text{Be}$ // Ядерна фізика та енергетика. - 2008. - № 2 (24). - С. 24 - 33.
11. Smirnov Yu. F., Tchuvil'sky Yu. M. Cluster spectroscopic factors for the p-shell nuclei // Phys. Rev. C. - 1977. - Vol. 15. - P. 84 - 93.
12. 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 исслед.; КИЯИ-82-12).
13. Рудчик А. Т., Чувильський Ю. М. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1p-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач // УФЖ. - 1985. - Т. 30, № 6. - С. 819 - 825.
14. Thompson I. J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comp. Phys. Rep. - 1988. - Vol. 7. - P. 167 - 212.
15. Tilley D.R., Weller H.R., Cheves C.M. Energy Level of Light Nuclei A = 17 // Nucl. Phys. A. - 1993. - Vol. 564. - P. 1 - 183.
16. Mohr P., Abele H., Kölle V. et al. Properties of ${}^8\text{Be}$ and ${}^{12}\text{C}$ deduced from the folding-potential model // Z. Phys. A. - 1994. - Vol. 349. - P. 339 - 340.
17. 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.
18. Cook J. DFPOOT - a program for the calculation of double folded potentials // Comp. Phys. Com. - 1982. - Vol. 25, Is. 2. - P. 125 - 139.
19. Cook J. DFPOOT - a program for the calculation of double folded potentials // Ibid. - 1984. - Vol. 35. - P. C - 775.

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

А. Т. Рудчик, Ю. М. Степаненко, А. А. Рудчик, О. А. Понкратенко, Е. И. Коший, С. Кличевски, К. Русек, А. Будзановски, С. Ю. Межевич, Вал. Н. Пирнак, И. Сквирчиньска, Р. Сюдак, Б. Чех, А. Щурек, Я. Хойньски, Л. Гловацка

Получены новые экспериментальные данные дифференциальных сечений реакции ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$ для основных состояний ядер ${}^8\text{Be}$ и ${}^{17}\text{N}$, а также возбужденных состояний ядра ${}^{17}\text{N}$ при энергии $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$ МэВ. Экспериментальные данные проанализированы по методу связанных каналов реакций (МЗКР) для одно- и двухступенчатых передач нуклонов и кластеров. В МЗКР-расчетах для входного канала реакции использованы оптический потенциал, полученный из анализа данных упругого рассеяния ядер ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$, и спектроскопические амплитуды нуклонов и кластеров, вычисленные в рамках оболочечной модели. Определен оптический потенциал взаимодействия нестабильных ядер ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$ по экспериментальным данным реакции. Исследованы вклады различных одно- и двухступенчатых передач нуклонов и кластеров в сечения реакции ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$.

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

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

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

Angular distributions of the ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$ reaction were measured for the transitions to the ground states of ${}^8\text{Be}$ and ${}^{17}\text{N}$ and excited states of ${}^{17}\text{N}$ 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. Parameters of the ${}^8\text{Be} + {}^{17}\text{N}$ potential were deduced using the reaction data. Contributions of different one- and two-step transfers in the ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$ reaction cross-section was studied.

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

Надійшла до редакції 02.07.10,
після доопрацювання - 20.12.10.