

А. Т. Рудчик^{1*}, А. А. Рудчик¹, Л. М. Муравинець¹, К. В. Кемпер², К. Русек³, Є. І. Кошій⁴,
 Е. Пясецькі³, А. Трчинська³, Вал. М. Пірнак¹, О. А. Понкратенко¹, В. А. Плюйко⁵, І. Строк⁶,
 А. Столяж³, С. Б. Сакута⁷, А. П. Ільїн¹, Ю. М. Степаненко¹, В. В. Улещенко¹, Ю. О. Ширма¹

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Флоридський державний університет, відділ фізики, Таллахассі, США

³ Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

⁴ Циклотронний інститут Техаського А&М університету, Техас, США

⁵ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

⁶ Національний центр ядерних досліджень, Варшава, Польща

⁷ Національний дослідний центр «Курчатовський інститут», Москва, Росія

*Відповідальний автор: rudchik@kinr.kiev.ua

РЕАКЦІЯ ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ ТА ВЗАЄМОДІЯ ЯДЕР ${}^{13,14}\text{C} + {}^8\text{Be}$

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{15}\text{N}) = 81$ МеВ для основних та збуджених станів ядер ${}^{14}\text{C}$ і ${}^8\text{Be}$ у вихідному каналі реакції. Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) із включенням у схему зв'язків каналів пружного й непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ та найпростіших реакцій одно- і двоступінчастих передач нуклонів і кластерів. У розрахунках перерізів реакції для вхідного каналу використано потенціал взаємодії ядер ${}^7\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ типу Вудса - Саксона, параметри якого визначено з аналізу даних пружного розсіяння іонів ${}^{15}\text{N}$ ядрами ${}^7\text{Li}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{15}\text{N}) = 81$ МеВ. Спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів розраховано в рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки. Досліджено механізми реакції. Установлено, що домінуючим процесом у даній реакції є передача протона. Параметри потенціалу взаємодії ядер ${}^{14}\text{C} + {}^8\text{Be}$ типу Вудса - Саксона визначено методом підгонки МЗКР-перерізів реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ до експериментальних даних. Досліджено ізоотопічні відмінності параметрів потенціалу взаємодії ядер ${}^{14}\text{C} + {}^8\text{Be}$ від параметрів потенціалу взаємодії ядер ${}^{13}\text{C} + {}^8\text{Be}$, раніше отриманого з аналізу реакції ${}^9\text{Be}({}^{12}\text{C}, {}^{13}\text{C}){}^8\text{Be}$.

Ключові слова: реакції з важкими іонами, метод зв'язаних каналів реакцій, спектроскопічні амплітуди, оптичні потенціали, механізми реакцій.

Вступ

Дослідження структури та взаємодії короткоживучих нестабільних ядер, для яких неможливо утворити вторинні пучки іонів, можливе лише за допомогою реакцій передач із виходом нестабільних ядер при взаємодії стабільних ядер. Це стосується досліджуваної в даній роботі реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ з виходом нестабільного ядра ${}^8\text{Be}$, яка використовується для визначення потенціалу взаємодії ядер ${}^{14}\text{C} + {}^8\text{Be}$ типу Вудса - Саксона (WS) та їхньої структури. Така можливість обумовлена тим, що для обчислення перерізів даної реакції в рамках методу зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) для вхідного каналу ${}^7\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ відомо всі необхідні величини, отримані з аналізу пружного й непружного розсіяння іонів ${}^{15}\text{N}$ ядрами ${}^7\text{Li}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{15}\text{N}) = 81$ МеВ [1], а необхідні для МЗКР-розрахунків перерізів спектроскопічні амплітуди переданих у реакції нуклонів і кластерів обчислено в рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки (ТІМО) [2]. Із підгонки МЗКР-перерізів реакції до експериментальних даних отримано параметри потенціалу WS взаємодії ядер ${}^{14}\text{C} + {}^8\text{Be}$. Раніше нами таким методом було визначено параметри потенціалів WS взаємодії

${}^8\text{Be}$ з ядрами ${}^{13}\text{C}$ [3], ${}^{15}\text{N}$ [4], ${}^9\text{Be}$ [5] та ${}^{17}\text{N}$ [6]. Відомо також дослідження реакції ${}^{13}\text{C}({}^9\text{Be}, {}^8\text{Be}){}^{14}\text{C}$ у роботі [7] при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^9\text{Be}) = 28,9$ МеВ ($E_{\text{с.ц.м.}} = 11,8$ МеВ). Визначений у роботі [7] потенціал WS взаємодії ядер ${}^{14}\text{C} + {}^8\text{Be}$ порівнюється з отриманим нами в даній роботі та з потенціалом WS взаємодії ядер ${}^{13}\text{C} + {}^8\text{Be}$ [3], визначеним з аналізу експериментальних даних реакції ${}^9\text{Be}({}^{12}\text{C}, {}^{13}\text{C}){}^8\text{Be}$. Виявлено ізоотопічні відмінності потенціалів WS взаємодії ядер ${}^{14}\text{C} + {}^8\text{Be}$ і ${}^{13}\text{C} + {}^8\text{Be}$.

Методика експерименту

Диференціальні перерізи реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ поміряно на циклотроні U-200P Лабораторії важких іонів Варшавського університету при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{15}\text{N}) = 81$ МеВ разом із пружним та непружним розсіянням іонів ${}^{15}\text{N}$ ядрами ${}^7\text{Li}$ [1] та реакціями типу ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, X)$. Для отримання пучка іонів ${}^{15}\text{N}$ було використано збагачену цим ізотопом кальцієву селітру ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$). Розкид енергії іонів у пучку на мішені не перевищував 0,5 %. В експерименті використовувалась самопідтримна мішень літію природного ізоотопного складу (${}^7\text{Li} - 92,5\%$, ${}^6\text{Li} - 7,5\%$) товщиною $\sim 0,8$ мг/см².

© А. Т. Рудчик, А. А. Рудчик, Л. М. Муравинець, К. В. Кемпер, К. Русек, Є. І. Кошій,
 Е. Пясецькі, А. Трчинська, Вал. М. Пірнак, О. А. Понкратенко, В. А. Плюйко, І. Строк,
 А. Столяж, С. Б. Сакута, А. П. Ільїн, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма, 2017

Експеримент проведено на експериментальній установці ICARE [8]. Для реєстрації продуктів ядерних процесів в експерименті використовувалась ΔE - E -методика з кремнієвими ΔE - та E -детекторами товщинами 42 та 540 мкм відповідно (4 телескопи).

Фрагмент типового двовимірного $\Delta E(E)$ -спектра продуктів реакцій ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, X)$ показано на рис. 1. Видно, що експериментальна методика забезпечувала реєстрацію продуктів реакцій ${}^{12,13,14}\text{C}$ та ідентифікацію їх за масами.

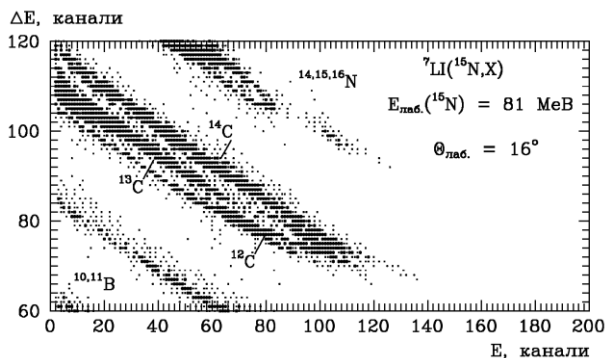


Рис. 1. Типовий $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{15}\text{N}) = 81$ MeV.

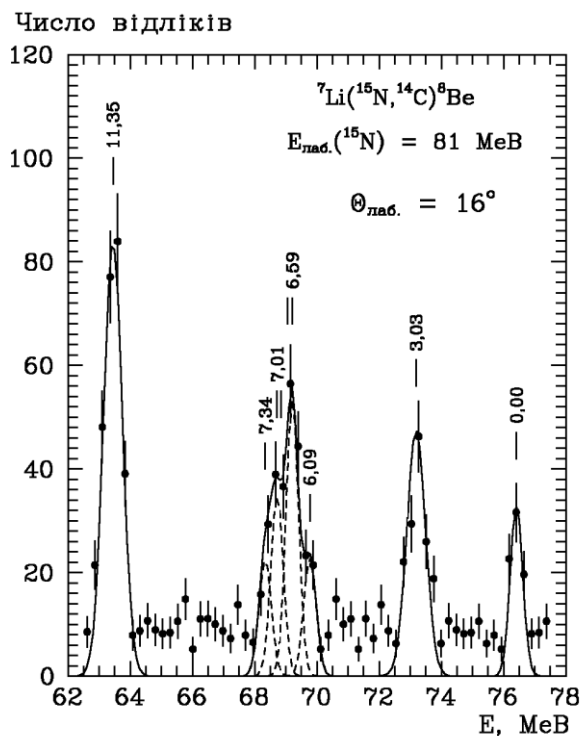


Рис. 2. Типовий енергетичний спектр продуктів реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$. Криві – наближення піків спектра ${}^{14}\text{C}$ симетричними гауссіанами.

Типовий енергетичний спектр ${}^{14}\text{C}$, одержаний проектуванням ${}^{14}\text{C}$ -локусу спектра $\Delta E(E)$ на E -вісь та вилученням неперервного фону від багаточастинкових реакцій, показано на рис. 2. Піки експериментальних спектрів ${}^{14}\text{C}$ наближува-

лись симетричними гауссіанами, площі яких використовувались для обчислення диференціальних перерізів реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$. На рис. 2 видно піки ядер для основних та збуджених станів ядер ${}^{14}\text{C}$ і ${}^8\text{Be}$. Деякі збуджені рівні цих ядер не розділялись в експерименті. Для них поміряно сумарні диференціальні перерізи реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$.

Експериментальні дані реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ отримано для основних станів ядер ${}^{14}\text{C}$ і ${}^8\text{Be}$ та збуджених станів 6,589 і 7,012 MeV ядра ${}^{14}\text{C}$ та станів 3,030 і 11,35 MeV ядра ${}^8\text{Be}$. Ці дані показано на рис. 3.

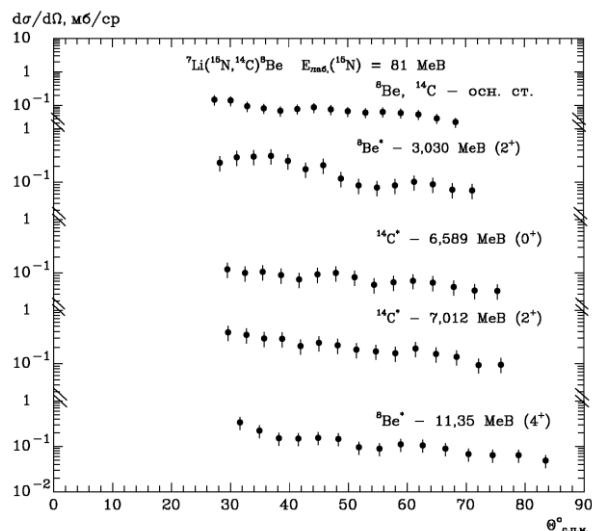


Рис. 3. Диференціальні перерізи реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{15}\text{N}) = 81$ MeV для основних та збуджених станів ядер ${}^{14}\text{C}$ і ${}^8\text{Be}$.

Аналіз експериментальних даних

Диференціальні перерізи реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ аналізувались за МЗКР із включенням у схему зв'язку каналів пружного розсіювання та реакцій одно- і двоступінчастих передач нуклонів і кластерів (рис. 4).

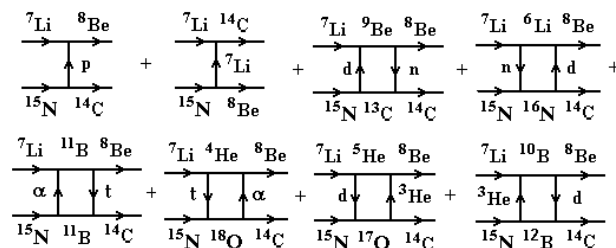


Рис. 4. Схеми передач нуклонів і кластерів у реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$.

У МЗКР-розрахунках реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ для вхідного та вихідних каналів використовувались потенціали типу WS з об'ємним поглинанням

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

та кулонівські потенціали V_C , взаємодії рівномірно заряджених куль

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

де $R_i = r_i (A_P^{1/3} + A_T^{1/3})$, $i = V, W, C, P \rightarrow \{^{15}\text{N}, ^{14}\text{C}\}$, $T \rightarrow \{^7\text{Li}, ^8\text{Be}\}$, $r_c = 1,25$ фм.

Для проведення МЗКР-розрахунків використовувалась програма FRESKO [9].

Для вхідного каналу реакції $^7\text{Li}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^8\text{Be}$ використовувався оптичний потенціал, параметри якого $X_i = \{V_0, r_V, a_V, W_S, r_W, a_W\}$ були отримані з аналізу експериментальних даних пружного розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^7Li при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ [1]. Параметри потенціалу взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^7\text{Li}$ наведено в табл. 1. Там же представлено значення об'ємних інтегралів J_V і J_W на один нуклон взаємодіючих ядер для дійсної та уявної частин потенціалів, а також подано радіуси R_V і R_W цих потенціалів.

Таблиця 1. Параметри потенціалів взаємодії ядер WS

$T + P$	$E_{c.m.},$ 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 ³	$R_V,$ фм	$R_W,$ фм	Література
$^7\text{Li} + ^{15}\text{N}$	25,77	150,0	0,800	0,76	12,0	1,25	0,76	377 / 93	3,92	5,10	[1]
$^8\text{Be} + ^{14}\text{C}$	32,00	140,0	0,800	0,76	6,8	1,25	0,76	336 / 50	3,93	5,12	Дана праця
$^8\text{Be} + ^{13}\text{C}$	31,14	170,2	0,793	0,76	7,0	1,25	0,76	416 / 54	3,89	5,07	[3]
$^{14}\text{C} + \text{Be}$	16,81	60,0	1,186	0,60	32,6	1,186	0,60	363 / 194	4,63	4,63	[7]

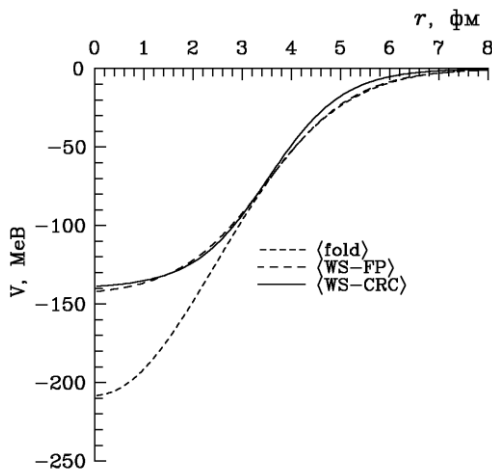


Рис. 5. Порівняння дійсної частини потенціалу взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^8\text{Be}$ (крива <WS-CRC>) із відповідним ФП (крива <fold>).

Початкові значення параметрів V_0, r_V, a_V дійсної частини WS-потенціалу взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^8\text{Be}$ визначались підгонкою параметрів цього потенціалу до відповідного фолдинг-потенціалу (ФП), як показано на рис. 5 (крива <WS-FP>). Потім початкові значення параметрів $V_0, r_V,$

a_V та параметри W_S, r_W, a_W уявної частини ($^{14}\text{C} + ^8\text{Be}$)-потенціалу уточнювались при підгонці МЗКР-перерізів до експериментальних даних реакції $^7\text{Li}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^8\text{Be}$ за χ^2 -критерієм, Дійсну частину отриманого ($^{14}\text{C} + ^8\text{Be}$)-потенціалу показано на рисунку кривою <WS-CRC>. Видно, що на відстанях $r > 4$ фм цей потенціал відрізняється від WS-FP-потенціалу.

Визначені таким чином параметри ($^{14}\text{C} + ^8\text{Be}$)-потенціалу наведено в табл. 1, де для порівняння представлено також параметри взаємодії ядер $^{13}\text{C} + ^8\text{Be}$ [3]. Видно, що потенціали взаємодії ядер $^{13}\text{C} + ^8\text{Be}$ і $^{14}\text{C} + ^8\text{Be}$ відрізняються в основному лише значеннями параметрів V_0 .

Для обчислення ФП взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^8\text{Be}$ використовувалась програма DFPOT [10] і таблиці розподілів нуклонів в ядрах з роботи [11].

Необхідні для МЗКР-розрахунків перерізів реакції $^7\text{Li}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^8\text{Be}$ спектроскопічні амплітуди S_x нуклонів і кластерів x у ядрах $A = C + x$ обчислювались у рамках ТИМО [2] за допомогою програми DESNA [12, 13]. Амплітуди S_x для передач x -кластерів у реакції $^7\text{Li}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^8\text{Be}$ наведено в табл. 2.

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

A	C	x	nL_j	S_x	A	C	x	nL_j	S_x
^7Li	^4He	t	$2P_{3/2}$	-1,091	^{11}B	^8Be	t	$2P_{3/2}$	0,641
^7Li	^5He	d	$2S_1$	-0,674 ^(a)	^{14}C	^7Li	^7Li	$3S_{3/2}$	-0,184 ^(a)
			$1D_1$	-0,121 ^(a)				$2D_{3/2}$	-0,121 ^(a)
			$1D_3$	0,676 ^(a)	^{14}C	^{11}B	t	$2P_{1/2}$	-0,107
^7Li	^6Li	n	$1P_{1/2}$	-0,657				$2P_{3/2}$	-0,096

A	C	x	nL_j	S_x	A	C	x	nL_j	S_x
			$1P_{3/2}$	-0,735 ^(a)				$1F_{5/2}$	-0,293
${}^8\text{Be}$	${}^5\text{He}$	${}^3\text{He}$	$2P_{3/2}$	-1,102 ^(a)	${}^{14}\text{C}$	${}^{12}\text{B}$	d	$1D_1$	-1,010
${}^8\text{Be}$	${}^4\text{He}$	α	$3S_0$	1,225	${}^{14}\text{C}$	${}^{13}\text{C}$	n	$1P_{1/2}$	-1,094 ^(a)
${}^8\text{Be}$	${}^6\text{Li}$	d	$2S_1$	1,217	${}^{15}\text{N}$	${}^8\text{Be}$	${}^7\text{Li}$	$2D_{1/2}$	0,226
${}^8\text{Be}$	${}^7\text{Li}$	p	$1P_{3/2}$	1,234 ^(a)	${}^{15}\text{N}$	${}^{11}\text{B}$	α	$2D_2$	0,435
${}^8\text{Be}_{3,03}$	${}^7\text{Li}$	p	$1P_{1/2}$	-0,730	${}^{15}\text{N}$	${}^{12}\text{B}$	${}^3\text{He}$	$2P_{1/2}$	0,254 ^(a)
			$1P_{3/2}$	-0,730 ^(a)				$2P_{3/2}$	-0,090
${}^8\text{Be}_{11,35}$	${}^7\text{Li}$	p	$1P_{1/2}$	-0,873	${}^{15}\text{N}$	${}^{13}\text{C}$	d	$2S_1$	0,248
			$1P_{3/2}$	-0,738 ^(a)				$1D_1$	0,444
${}^9\text{Be}$	${}^7\text{Li}$	d	$2S_1$	-0,226 ^(a)	${}^{15}\text{N}$	${}^{14}\text{C}$	p	$1P_{1/2}$	-0,598
			$1D_1$	0,111 ^(a)	${}^{15}\text{N}$	${}^{14}\text{C}^*_{6,59}$	p	$1P_{1/2}$	-1,598
			$1D_3$	-0,624 ^(a)	${}^{15}\text{N}$	${}^{14}\text{C}^*_{7,01}$	p	$1P_{3/2}$	-1,336 ^(a)
${}^9\text{Be}$	${}^8\text{Be}$	n	$1P_{3/2}$	0,866	${}^{16}\text{N}$	${}^{14}\text{C}$	d	$2P_2$	0,380
${}^{10}\text{B}$	${}^7\text{Li}$	${}^3\text{He}$	$2P_{3/2}$	0,419	${}^{16}\text{N}$	${}^{15}\text{N}$	n	$1D_{3/2}$	-0,270
			$1F_{5/2}$	-0,104 ^(a)	${}^{17}\text{O}$	${}^{14}\text{C}$	${}^3\text{He}$	$2D_{5/2}$	-0,577
			$1F_{7/2}$	0,347	${}^{17}\text{O}$	${}^{15}\text{N}$	d	$2P_2$	-0,552
${}^{10}\text{B}$	${}^8\text{Be}$	d	$1D_3$	0,811	${}^{18}\text{O}$	${}^{14}\text{C}$	α	$4S_0$	-0,802
${}^{11}\text{B}$	${}^7\text{Li}$	α	$3S_0$	-0,638	${}^{18}\text{O}$	${}^{15}\text{N}$	t	$3P_{1/2}$	0,261 ^(a)
			$2D_2$	-0,422					

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

У розрахунках хвильових функцій зв'язаних станів кластерів x у системах $A = C + x$ використовувався потенціал WC з параметрами $a_V = 0,65$ фм та $r_V = 1,25$ фм. Глибина потенціалу V_0 визначалась методом підгонки визначеної енергії зв'язку E_{3V} кластера x в ядрі A до експериментального значення.

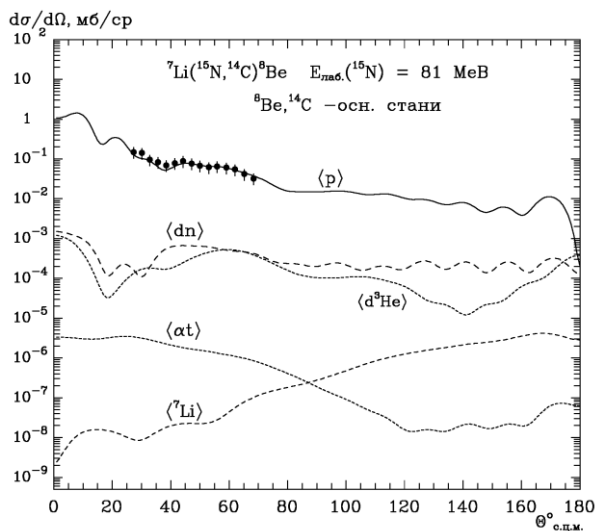


Рис. 6. Диференціальні перерізи реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{15}\text{N}) = 81$ МеВ для основних станів ядер ${}^{14}\text{C}$ та ${}^8\text{Be}$. Кривими показано МЗКР-перерізи реакції для одно- та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів.

Диференціальні перерізи реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ для основних станів вихідних

ядер показано на рис. 6. Кривими показано МЗКР-розрахунки перерізів реакції для передач протонів (крива $\langle p \rangle$), ${}^7\text{Li}$ -кластерів (крива $\langle {}^7\text{Li} \rangle$), послідовних передач $d + n$ і $n + d$ (крива $\langle dn \rangle$, когерентна сума), кластерів $\alpha + t$ і $t + \alpha$ (крива $\langle \alpha t \rangle$) та кластерів $d + {}^3\text{He}$ і ${}^3\text{He} + d$ (крива $\langle d{}^3\text{He} \rangle$). Діаграми цих передач показано на рис. 3. Видно, що в реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ домінує передача протона.

Диференціальні перерізи реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ для збуджених станів 3,03 МеВ (2^+) і 11,35 МеВ (4^+) ядра ${}^8\text{Be}$ показано на рис. 7, а для збуджених станів 6,59 МеВ (0^+) і 7,012 МеВ (2^+) ядра ${}^{14}\text{C}$ - на рис. 8. Як і у випадку з виходом ядер ${}^{14}\text{C}$ і ${}^8\text{Be}$ в основних станах, у реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ з виходом цих ядер у збуджених станах основну роль відіграє передача протона. Внески двоступінчастих передач нуклонів і кластерів та передача ${}^7\text{Li}$ -кластера незначні. Тому на рис. 7 і 8 показано лише МЗКР-розрахунки для передач протонів.

Для порівняння потенціалів взаємодії ядер ${}^{14}\text{C} + {}^8\text{Be}$ і ${}^{13}\text{C} + {}^8\text{Be}$ на рис. 9 показано МЗКР-розрахунки перерізів реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ з параметрами цих потенціалів (див. табл. 1) для основних станів ядер ${}^{14}\text{C}$ і ${}^8\text{Be}$. Видно, що при використанні параметрів потенціалу ${}^{13}\text{C} + {}^8\text{Be}$ у вихідному каналі цієї реакції МЗКР-перерізи значно відрізняються від експериментальних даних. Така ж ситуація спостерігається і при використанні параметрів потенціалу ${}^{14}\text{C} + {}^8\text{Be}$ з роботи [7].

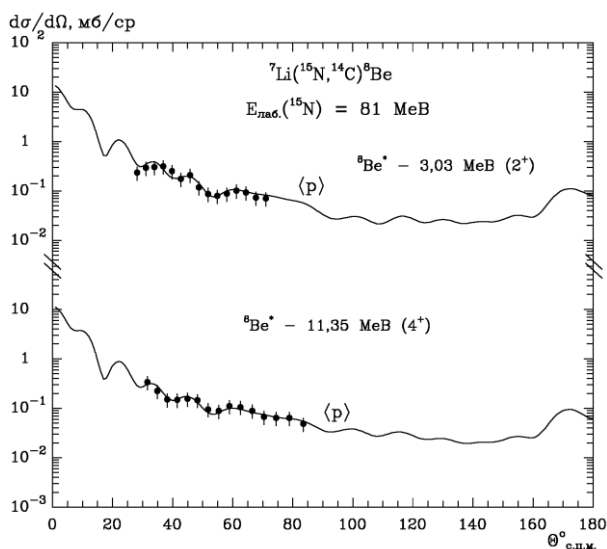


Рис. 7. Диференціальні перерізи реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{15}\text{N}) = 81$ МеВ для збуджених станів ядра ${}^8\text{Be}$. Кривими <p> показано МЗКР-перерізи реакції.

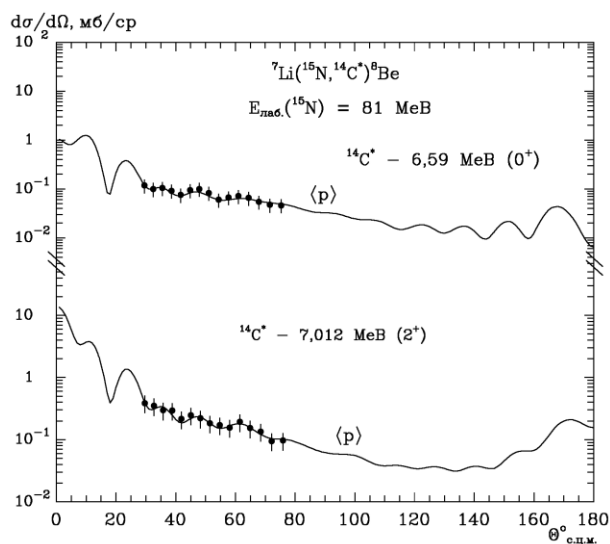


Рис. 8. Диференціальні перерізи реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{15}\text{N}) = 81$ МеВ для збуджених станів ядра ${}^{14}\text{C}$. Кривими <p> показано МЗКР-перерізи реакції.

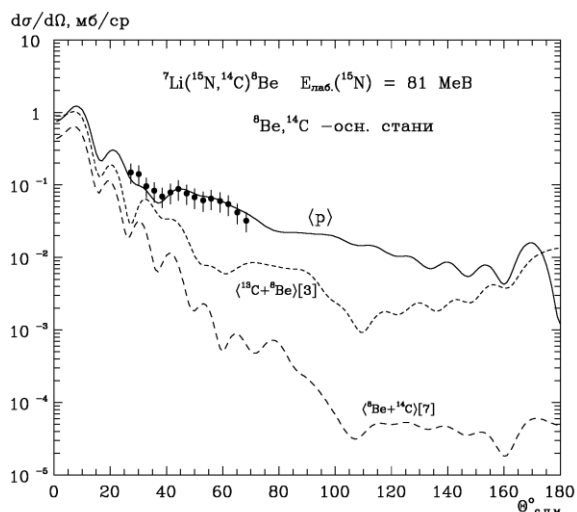


Рис. 9. Порівняння МЗКР-перерізів реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ при використанні різних параметрів потенціалу взаємодії ядер ${}^{14}\text{C} + {}^8\text{Be}$.

Основні результати та висновки

Отримано експериментальні дані диференціальних перерізів реакції ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{15}\text{N}) = 81$ МеВ для основних та збуджених станів ядер ${}^{14}\text{C}$ і ${}^8\text{Be}$.

Експериментальні дані проаналізовано за МЗКР з урахуванням каналів розсіяння іонів ${}^{15}\text{N}$ ядрами ${}^7\text{Li}$ та одно- і двоступінчастих передач нуклонів і кластерів. У МЗКР-розрахунках використано спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів, обчислені в даній роботі в рамках ТІМО.

Отримано параметри потенціалу WS взаємодії ядер ${}^{14}\text{C} + {}^8\text{Be}$, який порівнюється з потенціалом WS взаємодії ядер ${}^{13}\text{C} + {}^8\text{Be}$. Виявлено ізотопічні відмінності цих потенціалів, що можуть бути обумовлені різною структурою ядер.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. A.T. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of ${}^{15}\text{N}$ ions by ${}^7\text{Li}$ at 81 MeV versus that of ${}^{14}\text{N}$ ions by ${}^7\text{Li}$ at 80 and 110 MeV. *Nucl. Phys. A* **958** (2017) 234.
2. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the p-shell nuclei. *Phys. Rev. C* **15**(1) (1977) 84.
3. A.T. Rudchik et al. Energy dependence of the ${}^8\text{Be} + {}^{13}\text{C}$ interaction. *Nucl. Phys. A* **660** (1999) 267.
4. A.A. Rudchik et al. Mechanism of the ${}^{12}\text{C}({}^{11}\text{B}, {}^{15}\text{N}){}^8\text{Be}$ reaction and ${}^8\text{Be} + {}^{15}\text{N}$ optical-model potential. *Eur. Phys. J. A* **23** (2005) 445.
5. V.O. Romanyshyn et al. ${}^8\text{Be}$ scattering potentials from reaction analyses. *Phys. Rev. C* **79** (2009) 054609.
6. A.T. Rudchik et al. Comparison of the ${}^7\text{Li}({}^{18}\text{O}, {}^{17}\text{N}){}^8\text{Be}$ and ${}^{18}\text{O}(d, {}^3\text{He}){}^{17}\text{N}$ reactions. *Phys. Rev. C* **83** (2011) 024606.
7. K. Bodek et al. Nuclear reactions in the ${}^{13}\text{C} + {}^9\text{Be}$ system at CM energies around 11.6 MeV. *J. Phys. G: Nucl. Phys.* **6** (1980) 1017.
8. E. Piasecki et al. *Annual report 2006. Warsaw University, Heavy Ion Laboratory. (Warsaw, 2007) p. 20, 38.*
9. I.J. Thompson, Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comput. Phys. Rep.* **7** (1988) 167.
10. J. Cook. DFPOT – a program for the calculation of double folded potentials. *Comp. Phys. Com.* **25**(2) (1982) 125.
11. 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.

12. А.Т. Рудчик, Ю.М. Чувильский. Вычисление спектроскопических амплитуд для произвольных ассоциаций нуклонов в ядрах 1р-оболочки (программа DESNA). Препр. / АН УССР. Ин-т ядер-

ных исслед.; КИЯИ-82-12) (Киев, 1982) 27 с.

13. А.Т. Рудчик, Ю.М. Чувильский. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1р-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач. УФЖ 30(6) (1985) 819.

А. Т. Рудчик^{1*}, А. А. Рудчик¹, Л. М. Муравинец¹, К. В. Кемпер², К. Русек³, Є. І. Коций⁴,
Э. Пясеcki³, А. Трчиньска³, Вал. Н. Пирнак¹, О. А. Понкратенко¹, В. А. Плюйко⁵, И. Строек⁶,
А. Столяж³, С. Б. Сакута⁷, А. П. Ильин¹, Ю. Н. Степаненко¹, В. В. Улещенко¹, Ю. О. Ширма¹

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Флоридський державний університет, відділ фізики, Таллахассі, США

³ Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

⁴ Циклотронний інститут Техаского А&М університету, Техас, США

⁵ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

⁶ Національний центр ядерних досліджень, Варшава, Польща

⁷ Національний дослідницький центр «Курчатівський інститут», Москва, Росія

*Ответственный автор: rudchik@kinr.kiev.ua

РЕАКЦИЯ ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЯДЕР ${}^{13,14}\text{C} + {}^8\text{Be}$

Получены новые экспериментальные данные дифференциальных сечений реакции ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ при энергии $E_{\text{лаб}}({}^{15}\text{N}) = 81$ МэВ для основных и возбужденных состояний ядер ${}^{14}\text{C}$ и ${}^8\text{Be}$ в выходном канале реакции. Экспериментальные данные проанализированы по методу связанных каналов реакций (МСКР) с включением в схему связи каналов упругого и неупругого рассеяний ядер ${}^7\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ и простейших реакций одно- и двухступенчатых передач нуклонов и кластеров. В расчетах сечений реакции для входного канала использован потенциал взаимодействия ядер ${}^7\text{Li} + {}^{15}\text{N}$, параметры которого определены при анализе данных упругого рассеяния ионов ${}^{15}\text{N}$ ядрами ${}^7\text{Li}$ при энергии $E_{\text{лаб}}({}^{15}\text{N}) = 81$ МэВ. Спектроскопические амплитуды нуклонов и кластеров вычислены по трансляционно-инвариантной модели оболочек. Исследованы механизмы реакции. Установлено, что доминирующим процессом в этой реакции является передача протона. Параметры потенциала взаимодействия ядер ${}^{14}\text{C} + {}^8\text{Be}$ определены методом подгонки МСКР-сечений реакции ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ к экспериментальным данным. Исследованы изотопические отличия потенциала взаимодействия ядер ${}^{14}\text{C} + {}^8\text{Be}$ от потенциала взаимодействия ядер ${}^{13}\text{C} + {}^8\text{Be}$, ранее полученного из анализа реакции ${}^9\text{Be}({}^{12}\text{C}, {}^{13}\text{C}){}^8\text{Be}$.

Ключевые слова: рассеяние тяжелых ионов, метод связанных каналов реакций, спектроскопические амплитуды, оптические потенциалы, механизмы реакций.

А. Т. Rudchik^{1*}, А. А. Rudchik¹, Л. М. Muravynets¹, К. W. Kemper², К. Rusek³, Є. І. Koshchy⁴,
E. Piasecki³, A. Trzcińska³, Val. M. Pirnak¹, O. A. Ponkratenko¹, V. A. Plujko⁵, I. Strojek⁶,
A. Stolarz³, S. B. Sakuta⁷, A. P. Ilyin¹, Yu. M. Stepanenko¹, V. V. Uleshchenko¹, Yu. O. Shyrma¹

¹ Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Physics Department, Florida State University, Tallahassee, USA

³ Heavy Ion Laboratory of Warsaw University, Warsaw, Poland

⁴ Cyclotron Institute Texas A&M University, USA

⁵ Taras Shevchenko National University, Kyiv, Ukraine

⁶ National Institute for Nuclear Research, Warsaw, Poland

⁷ National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

*Corresponding author: rudchik@kinr.kiev.ua

${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ REACTION AND ${}^{13,14}\text{C} + {}^8\text{Be}$ NUCLEI INTERACTIONS

Angular distributions of the ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ reaction were measured at the energy $E_{\text{лаб}}({}^{15}\text{N}) = 81$ MeV. The reaction data were analyzed within coupled-reaction-channels (CRC) method. The ${}^7\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ elastic and inelastic scattering and the more important one-and two-step transfers of this reaction were included in the channels-coupling scheme. Previously the ${}^7\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ optical potential parameters were deduced from the CRC analysis of the ${}^7\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ elastic scattering data at $E_{\text{лаб}}({}^{15}\text{N}) = 81$ MeV. The spectroscopic amplitudes needed for CRC-calculations of the reaction were calculated within the translational invariant shell model (TISM). CRC analysis of the ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^8\text{Be}$ reaction data showed the p-transfer dominants in this reaction. The parameters of the ${}^{14}\text{C} + {}^8\text{Be}$ optical potential were deduced from CRC analysis of the reaction data and were compared with that of the ${}^{13}\text{C} + {}^8\text{Be}$ potential parameters deduced previously from CRC analysis of ${}^9\text{Be}({}^{12}\text{C}, {}^{13}\text{C}){}^8\text{Be}$ reaction data. The isotopic differences are observed.

Keywords: heavy-ion scattering, optical model, coupled-reaction-channels method, spectroscopic amplitudes, optical potentials, reaction mechanisms.

REFERENCES

1. A.T. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of ^{15}N ions by ^7Li at 81 MeV versus that of ^{14}N ions by ^7Li at 80 and 110 MeV. *Nucl. Phys. A* 958 (2017) 234.
2. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the p-shell nuclei. *Phys. Rev. C* 15(1) (1977) 84.
3. A.T. Rudchik et al. Energy dependence of the $^8\text{Be} + ^{13}\text{C}$ interaction. *Nucl. Phys. A* 660 (1999) 267.
4. A.A. Rudchik et al. Mechanism of the $^{12}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{15}\text{N})^8\text{Be}$ reaction and $^8\text{Be} + ^{15}\text{N}$ optical-model potential. *Eur. Phys. J. A* 23 (2005) 445.
5. V.O. Romanyshyn et al. ^8Be scattering potentials from reaction analyses. *Phys. Rev. C* 79 (2009) 054609.
6. A.T. Rudchik et al. Comparison of the $^7\text{Li}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^8\text{Be}$ and $^{18}\text{O}(d, ^3\text{He})^{17}\text{N}$ reactions. *Phys. Rev. C* 83 (2011) 024606.
7. K. Bodek et al. Nuclear reactions in the $^{13}\text{C} + ^9\text{Be}$ system at CM energies around 11.6 MeV. *J. Phys. G: Nucl. Phys.* 6 (1980) 1017.
8. E. Piasecki et al. *Annual report 2006*. Warsaw University, Heavy Ion Laboratory. (Warsaw, 2007) p. 20, 38.
9. I.J. Thompson, Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comput. Phys. Rep.* 7 (1988) 167.
10. J. Cook. DF POT – a program for the calculation of double folded potentials. *Comp. Phys. Com.* 25(2) (1982) 125.
11. 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.
12. A.T. Rudchik, Yu.M. Chuvil'skij. Calculation of spectroscopic amplitudes for arbitrary associations of nucleons in nuclei of the 1p shell (DESNA program). Preprint / Institute for Nuclear Research, AS of USSR; КИЯИ-82-12) (Kyiv, 1982) 27 p. (Rus)
13. A.T. Rudchik, Yu.M. Chuvil'skij. Spectroscopic amplitudes of multinucleon clusters in 1p shell nuclei and analysis of multinucleon transmission reactions. *UFZH* 30(6) (1985) 819. (Rus)

Надійшла 25.05.2017
Received 25.05.2017