

А. Т. Рудчик^{1*}, А. А. Рудчик¹, О. О. Чепурнов¹, К. Русек², К. В. Кемпер³, Є. І. Коций⁴,
С. Ю. Межевич¹, Вал. М. Пірнак¹, О. А. Понкратенко¹, А. Столяж², Р. Сюдак⁵,
А. П. Ільїн¹, Ю. М. Степаненко¹, В. В. Улещенко¹, Ю. О. Ширма¹

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

² Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

³ Відділ фізики, Флоридський державний університет, Таллахасі, США

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

⁵ Інститут ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського, Краків, Польща

*Відповідальний автор: rudchik@kinr.kiev.ua

МЕХАНІЗМИ РЕАКЦІЇ ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ 51 MeV. СТРУКТУРА ТА ВЗАЄМОДІЯ ЯДЕР ${}^9\text{Be} + {}^7\text{Be}$

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ при енергії 51 MeV пучка іонів ${}^{10}\text{B}$ для основних станів ядер ${}^9\text{Be}$ і ${}^7\text{Be}$ та збуджень 0,429 - 7,2 MeV ядра ${}^7\text{Be}$. Експериментальні дані реакції проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) для багатьох типів передач нуклонів і кластерів, спектроскопічні амплітуди (фактори) яких в ядрах ${}^9\text{Be}$ і ${}^7\text{Be}$ обчислювались з використанням трасляційно-інваріантної моделі оболонки. У МЗКР-розрахунках реакції використано потенціали Вудса - Саксона. Для вхідного каналу реакції використано параметри потенціалу, одержані раніше з аналізу експериментальних даних пружного розсіяння іонів ${}^{10}\text{B}$ ядрами ${}^6\text{Li}$ при енергії 51 MeV, а параметри потенціалу взаємодії ядер ${}^9\text{Be} + {}^7\text{Be}$ вихідного каналу реакції визначалися із підгонки МЗКР-розрахунків до експериментальних даних реакції. Таким чином, у даній роботі отримано відомості про оптичний потенціал взаємодії ядер ${}^9\text{Be} + {}^7\text{Be}$, основні механізми реакції та структуру ядер ${}^9\text{Be}$ і ${}^7\text{Be}$.

Ключові слова: експериментальні дані реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$, $E = 51$ MeV; $\sigma(\theta)$; механізми реакції, параметри потенціалу взаємодії ядер ${}^9\text{Be} + {}^7\text{Be}$, спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів ядер ${}^9\text{Be}$ і ${}^7\text{Be}$.

1. Вступ

Ядерні реакції передач частинок є важливим засобом дослідження структури та взаємодії нестабільних і рідкісних стабільних ядер. У даній роботі вперше досліджено реакцію ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{10}\text{B}) = 51$ MeV з виходом рідкісного ядра ${}^7\text{Be}$, використовуючи спектрометричні дані двомірних спектрів з раніших вимірювань реакцій ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, X)$ з виходом ядер із $Z = 3 - 8$ для отримання експериментальних даних диференціальних перерізів реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$, показаних на рисунках у даній роботі. Взаємодію ядер ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$ вихідного каналу даної реакції раніше досліджено в роботах [1, 2] у пружному розсіянні іонів ${}^7\text{Be}$ ядрами ${}^9\text{Be}$ при енергіях $E_{\text{лаб}}({}^7\text{Be}) = 17, 19, 21$ MeV. У роботі [2] ці експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) і визначено параметри потенціалу Вудса - Саксона для взаємодії ядер ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$, які порівняно з відповідними параметрами потенціалу Вудса - Саксона взаємодії ядер ${}^7\text{Li} + {}^9\text{Be}$, отриманими в роботі [2] з МЗКР-аналізу експериментальних даних пружного розсіяння іонів ${}^7\text{Li}$ при енергіях $E_{\text{лаб}}({}^7\text{Li}) =$

$= 15,75, 24, 30$ MeV [1], 24 MeV [3], 34 MeV [4], 63 і 130 MeV [5]. У роботі [2] для параметрів потенціалу взаємодії ядер ${}^7\text{Li} + {}^9\text{Be}$ отримано енергетичну залежність, з якою узгоджуються параметри потенціалу взаємодії ядер ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$ при енергіях $E_{\text{лаб}}({}^7\text{Be}) = 17, 19, 21$ MeV.

Механізми утворення ядерної системи ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$ при взаємодії ядер ${}^{10}\text{B}$ і ${}^6\text{Li}$ та визначення потенціалу взаємодії ядер ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$ є однією з цілей даної роботи, що потребує дослідження структури ядер реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ та обчислення спектроскопічних факторів (амплітуд) нуклонів і кластерів в ядрах. Це реалізовано в даній роботі.

2. Методика експерименту

Кутові диференціальні перерізи реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ поміряно разом із пружним розсіянням іонів ${}^{10}\text{B}$ ядрами ${}^6\text{Li}$ на варшавському циклотроні U-200P (Лабораторія важких іонів Варшавського університету) при енергії пучка іонів ${}^{10}\text{B}$ $E_{\text{лаб}}({}^{10}\text{B}) = 51$ MeV з використанням самопідтримної мішені літію товщиною ~ 900 мкг/см² із збагаченням ізотопом ${}^6\text{Li} \sim 85$ %. Розкид енергії пучка іонів ${}^{10}\text{B}$ на мішені становив $\sim 0,5$ %.

© А. Т. Рудчик, А. А. Рудчик, О. О. Чепурнов, К. Русек, К. В. Кемпер,
Є. І. Коций, С. Ю. Межевич, Вал. М. Пірнак, О. А. Понкратенко, А. Столяж,
Р. Сюдак, А. П. Ільїн, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма, 2021

Продукти реакції реєструвались двома ΔE - E -спектрометрами, в одному з яких ΔE -детектором була іонізаційна камера, а в другому – кремнієвий детектор товщиною 67 мкм. Основні відомості про електронні засоби вимірювання двомірних $\Delta E(E)$ -спектрів вихідних продуктів взаємодії ядер ${}^6\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ та отримання з них одномірних спектрів вихідних ядер описано в роботі [6].

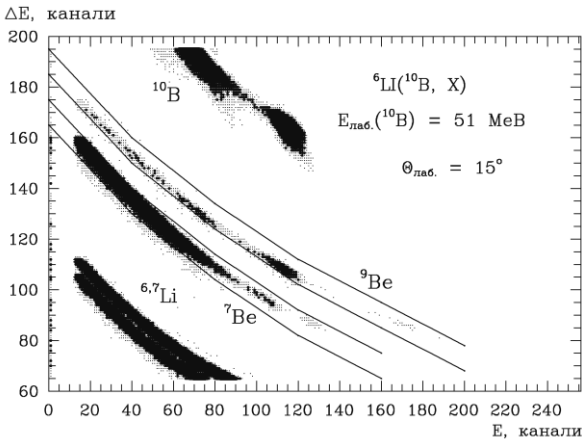


Рис. 1. Типовий $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{10}\text{B}) = 51$ МеВ.

Типовий двомірний спектр (ΔE - E -спектрометра з обома кремнієвими детекторами для взаємодії ядер ${}^6\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ з локусами ізотопів ${}^{7,8,9}\text{Be}$ показано на рис. 1.

Видно, що цей спектрометр забезпечував надійну ідентифікацію продуктів реакцій за зарядами, а для визначення локусів ізотопів ядер необхідно було розділити загальну ширину локуса ядра на смуги однакової ширини за числом ізотопів ядра. Такі розділені лініями смуги (локуси) показано на рисунку для ізотопів ${}^{7,8,9}\text{Be}$. Проектуванням цих локусів на енергетичні осі двомірних спектрів отримувалися одномірні енергетичні спектри ядер ${}^7\text{Be}$ і ${}^9\text{Be}$ з неперервними фонами від багаточастинкових реакцій, що вилучались із спектрів програмними засобами пікфітування. Для кута реєстрації $\theta_{\text{лаб}} = 15^\circ$ енергетичні спектри ізотопів ${}^7\text{Be}$ і ${}^9\text{Be}$ з вилученими неперервними фонами показано на рис. 2. Кривими на рисунку показано наближення експериментальних піків симетричними гауссіанами з ширинами 0,2 МеВ. Площі гауссіанів використовувалися в обчисленнях диференціальних перерізів реакції.

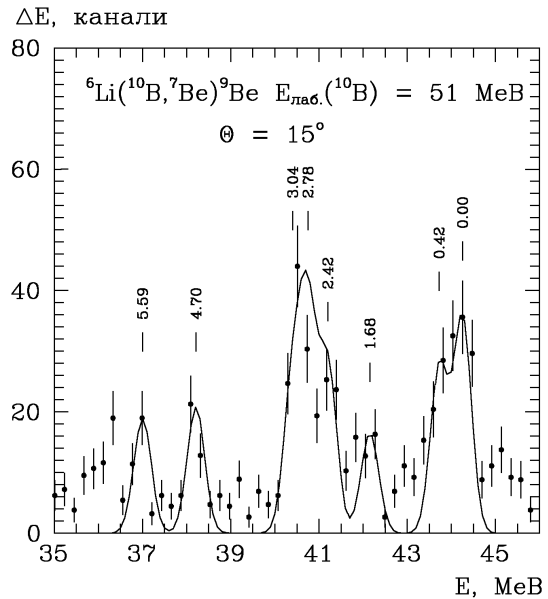
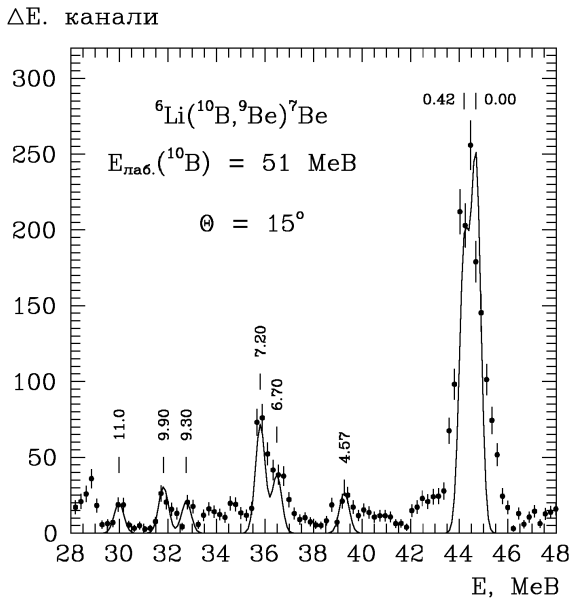


Рис. 2. Типові спектри ядер ${}^9\text{Be}$ і ${}^7\text{Be}$ з реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{10}\text{B}) = 51$ МеВ.

3. Аналіз експериментальних даних

Експериментальні дані реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ було проаналізовано за МЗКР із використанням потенціалу Вудса – Саксона

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

та кулонівського потенціалу рівномірно заряджених куль ${}^6\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ і ${}^9\text{Be} + {}^7\text{Be}$ радіусом R_C .

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

У формулах (1) і (2)

$$R_i = r_i (A_P^{1/3} + A_T^{1/3}), \quad i = V, W, C,$$

де A_P, Z_P – маси і заряди ядер ${}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}$, а A_T, Z_T – маси і заряди ядер ${}^6\text{Li}, {}^7\text{Be}$. У всіх МЗКР-розрахунках використовувався параметр $r_C = 1,25$ фм.

У МЗКР-розрахунках для вхідного каналу реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ використовувалися значення параметрів оптичної взаємодії ядер ${}^6\text{Li} + {}^{10}\text{B}$, отримані в результаті підгонки МЗКР-розрахунків пружного розсіяння ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^{10}\text{B}){}^6\text{Li}$ при енергії 51 MeV [6] до експериментальних даних

цього розсіяння. Параметри оптичного потенціалу взаємодії ядер ${}^9\text{Be} + {}^7\text{Be}$ вихідного каналу реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ визначалися методом підгонки МЗКР розрахунків до експериментальних даних цієї реакції. Визначені таким чином значення цього потенціалу подано в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри потенціалів взаємодії ядер

$P + T$	V_0 , MeV	r_V , фм	a_V , фм	W_S , MeV	r_{W_S} , фм	a_{W_S} , фм	r_C , фм	Літ.
${}^{10}\text{B} + {}^6\text{Li}$	100,0	0,820	0,800	15,0	1,250	0,800	1,250	[6]
${}^9\text{Be} + {}^7\text{Be}$	140,0	0,700	0,800	11,0	1,000	0,800	1,250	
${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$	30	1,11	0,730	17,54	1,22	0,750	1,250	[1]
${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$	174,6	0,901	0,732	10,1	1,391	0,732	1,250	[2]
${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$	152	0,72	0,750	6,72	1,310	0,760	1,250	[3]

У систему зв'язку каналів включались пружне розсіяння ядер ${}^{10}\text{B} + {}^6\text{Li}$ та реакції передачі нуклонів і кластерів, діаграми яких показано на рис. 3.

Необхідні для МЗКР-розрахунків реакцій передачі спектроскопічні амплітуди S_x кластерів та нуклонів x у системах $A = C + x$ обчислено в рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки (ТИМО) [7] за допомогою програми DESNA [8, 9], з використанням таблиці хвильових функцій 1p-оболонки з роботи [10]. Спектроскопічні амплітуди S_x наведено в табл. 2.

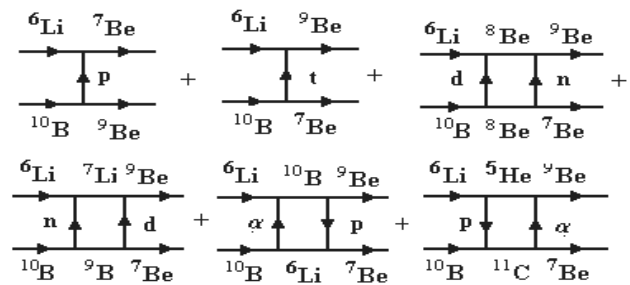


Рис. 3. Діаграми передачі нуклонів і кластерів у реакціях ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ і ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^7\text{Be}){}^9\text{Be}$.

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

A	C	X	nL_j	S_x	A	C	X	nL_j	S_x
${}^6\text{Li}$	${}^5\text{He}$	P	$1P_{1/2}$	$-0,596^{(a)}$	${}^9\text{Be}$	${}^7\text{Li}$	d	$2S_1$	$-0,226$
			$1P_{3/2}$	$0,667$				$1D_1$	$0,111$
${}^7\text{Li}$	${}^6\text{Li}$	N	$1P_{1/2}$	$-0,657$				$1D_3$	$-0,624$
			$1P_{3/2}$	$0,735^{(a)}$	${}^9\text{Be}$	${}^8\text{Be}$	n	$1P_{3/2}$	$0,866$
${}^7\text{Be}$	${}^6\text{Li}$	P	$1P_{1/2}$	$-0,657$	${}^9\text{B}$	${}^7\text{Be}$	d	$2S_1$	$-0,226$
			$1P_{3/2}$	$0,735^{(a)}$				$1D_1$	$0,111$
${}^7\text{Be}^*_{0.42}$	${}^6\text{Li}$	P	$1P_{1/2}$	$0,329^{(a)}$				$1D_3$	$-0,624$
			$1P_{3/2}$	$0,930$	${}^{10}\text{B}$	${}^6\text{Li}$	α	$2D_2$	$-0,125$
${}^7\text{Be}^*_{4.57}$	${}^6\text{Li}$	P	$1P_{3/2}$	$0,324$	${}^{10}\text{B}$	${}^7\text{Be}$	t	$2P_{3/2}$	$-0,419$
${}^7\text{Be}^*_{6.70}$	${}^6\text{Li}$	P	$1P_{1/2}$	$-0,550$				$1F_{5/2}$	$-0,104^{(a)}$
			$1P_{3/2}$	$-0,735^{(a)}$				$1F_{7/2}$	$0,347$
${}^7\text{Be}^*_{7.20}$	${}^6\text{Li}$	P	$1P_{1/2}$	$-0,550$	${}^{10}\text{B}$	${}^7\text{Be}^*_{0.42}$	t	$1F_{5/2}$	$0,058^{(a)}$
			$1P_{3/2}$	$-0,735^{(a)}$				$1F_{7/2}$	$-0,401$
${}^8\text{Be}$	${}^6\text{Li}$	D	$2S_1$	$1,217$	${}^{10}\text{B}$	${}^8\text{Be}$	d	$1D_3$	$0,811$
${}^8\text{Be}$	${}^7\text{Be}$	N	$1P_{3/2}$	$-1,223$	${}^{10}\text{B}$	${}^9\text{Be}$	p	$1P_{3/2}$	$1,185$
${}^9\text{Be}$	${}^5\text{He}$	A	$3S_0$	$-0,810$	${}^{10}\text{B}$	${}^9\text{B}$	n	$1P_{3/2}$	$-1,185$
			$2D_2$	$-0,536$	${}^{11}\text{C}$	${}^7\text{Be}$	α	$3S_0$	$-0,638$
${}^9\text{Be}$	${}^6\text{Li}$	T	$2P_{1/2}$	$-0,192$				$2D_2$	$-0,422$
			$2P_{3/2}$	$-0,215^{(a)}$	${}^{11}\text{C}$	${}^{10}\text{B}$	p	$1P_{3/2}$	$-1,347^{(a)}$

^(a) $S_{\text{FRESKO}} = (-1)^{j_c + j - JA} S_x = S_x$.

Експериментальні дані диференціальних перерізів реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{10}\text{B}) = 51$ MeV та МЗКР-розрахунки процесів,

діаграми яких подано на рис. 3, з використанням потенціалу WS з параметрами, поданими в табл. 1, показано на рис. 4.

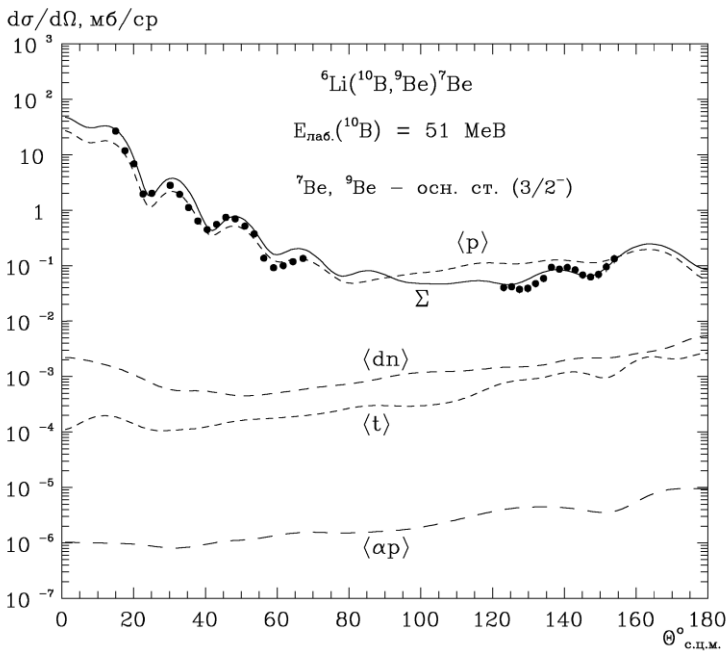


Рис. 4. Диференціальні перерізи реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{10}\text{B}) = 51$ MeB. Точками показано експериментальні перерізи реакції, отримані в даній роботі. Пунктирні криві – МЗКР-перерізи різних процесів (див. текст). Суцільною кривою Σ показано когерентну суму МЗКР-перерізів найбільш важливих процесів.

Експериментальні дані на великих кутах отримано із спектрів ${}^7\text{Be}$ реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ використовуючи зв'язок $\theta({}^9\text{Be}) = 180^\circ - \theta({}^7\text{Be})$ кутів вильоту при одночасному утворенні цих ядер у реакції.

На рис. 4 показано експериментальні кутові розподіли перерізів реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ даної роботи та відповідні МЗКР-розрахунки. Видно, що основну роль у цій реакції відіграє передача протона (крива $\langle p \rangle$), а роль передач тритона ($\langle t \rangle$), дейтрона і нейтрона $d + n$ і $n + d$ ($\langle dn \rangle$) та α -частинки і протона $\alpha + p$ і $p + \alpha$ ($\langle \alpha p \rangle$) мі-

зерна. Суцільною кривою Σ на рисунку показано когерентну суму всіх зазначених передач нуклонів і кластерів.

На рис. 5 показано кутовий розподіл диференціальних перерізів реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}^*$ для збудженого стану $0,429$ MeB ($1/2^-$) ядра ${}^7\text{Be}^*$. Передача протона і в цій реакції відіграє основну роль, а роль інших передач мізерна. Тому на рисунку показано лише МЗКР-перерізи цієї реакції для передачі протонів (крива $\langle p \rangle$), що задовільно описують експериментальні дані реакції.

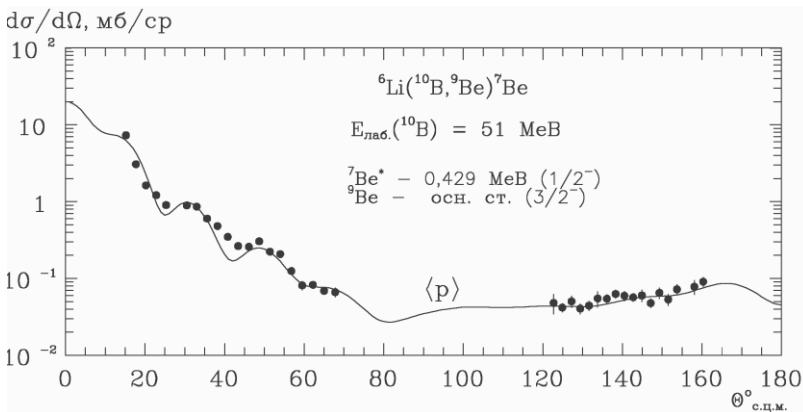


Рис. 5. Диференціальні перерізи реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}^*$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{10}\text{B}) = 51$ MeB для основного стану ядра ${}^9\text{Be}$ та збудженого стану $0,429$ MeB ядра ${}^7\text{Be}$. Суцільною кривою $\langle p \rangle$ показано МЗКР-перерізи реакції для передачі протонів.

Поміряні кутові розподіли диференціальних перерізів реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}^*$ для збуджень ядра ${}^7\text{Be}$ $4,57$ MeB ($7/2^-$), $6,7$ MeB ($5/2^-$) та $7,2$ MeB ($5/2^-$) показано на рис. 6. Основну роль для цих збуджень ядра ${}^7\text{Be}$ також відіграє передача протона цієї реакції, про що свідчать задовільні узгодження МЗКР-розрахунків з експериментальними даними, показаними на рисунку суцільними кривими.

На завершення аналізу експериментальних даних реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{10}\text{B}) =$

51 MeB на рис. 7 показано потенціали Вудса - Саксона $U_i(r) = V_i(r) + W_i(r)$ взаємодії ядер ${}^9\text{Be} + {}^7\text{Be}$, відомі з робіт [1 - 3] ($i = 1, 2, 3$), та отриманий у даній роботі потенціал $U(r) = V(r) + W(r)$ у порівнянні з фолдінг-потенціалом V_{DF} взаємодії цих ядер, обчислених за допомогою програми DFROT [11]. Параметри потенціалів $U_i(r)$ взаємодії ядер ${}^9\text{Be} + {}^7\text{Be}$ подано в табл. 1, а на рис. 7 видно, що потенціали V і V_3 добре узгоджуються з потенціалом V_{DF} .

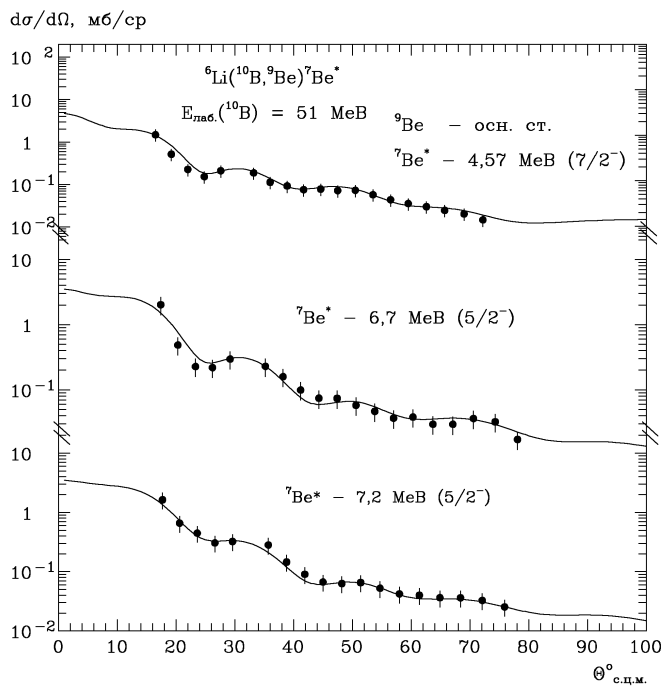


Рис. 6. Диференціальні перерізи реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}^*$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{10}\text{B}) = 51$ МеВ для збуджених станів 4,57 МеВ ($7/2^-$), 6,7 МеВ ($5/2^-$) та 7,2 МеВ ($5/2^-$) ядра ${}^7\text{Be}$. Криві – МЗКР-перерізи передачі протона.

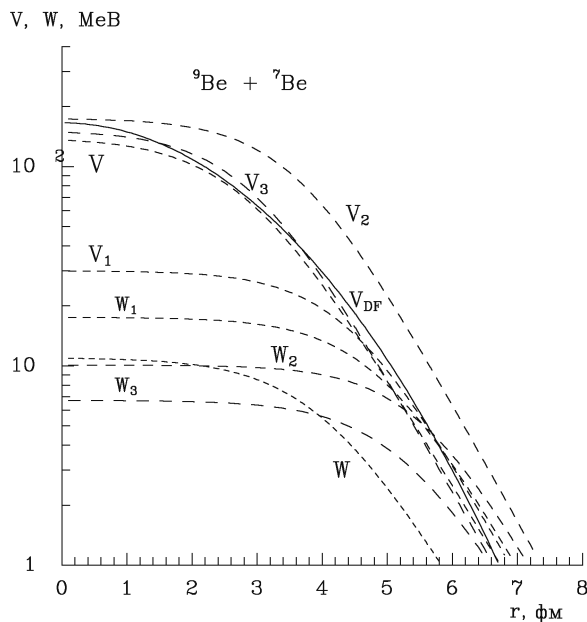


Рис. 7. Фолдінг-потенціал V_{DF} взаємодії ядер ${}^9\text{Be} + {}^7\text{Be}$ (суцільна крива) та оптичні потенціали Вудса - Саксона взаємодії цих ядер $U_i(r) = V_i(r) + W_i(r)$ (пунктирні криві V_i та W_i , $i = 1 - 3$), параметри яких подано в табл. 1. Криві V та W – дійсна та уявна частини потенціалу $U(r) = V(r) + W(r)$, отриманого в даній роботі.

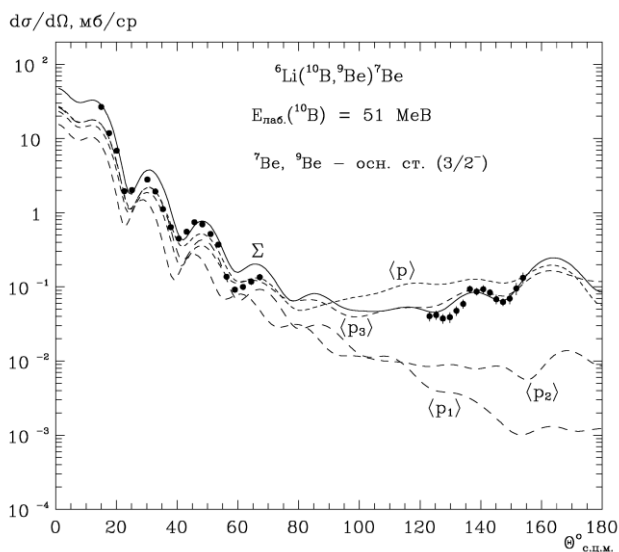


Рис. 8. Диференціальні перерізи реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{10}\text{B}) = 51$ МеВ. Пунктирні криві – МЗКР-перерізи передачі протонів при використанні потенціалів $U_i(r)$ і $U(r)$ (див. рис. 7).

На рис. 8 показано МЗКР-розрахунки перерізів реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ з потенціалами $U_i(r)$ і $U(r)$ (див. рис. 7). Кривою Σ показано МЗКР-розрахунки з потенціалом $U(r)$ передачі протона з урахуванням інших передач (див. рис. 3). Видно, що МЗКР-розрахунки перерізів реакції з використанням потенціалів, які добре узгоджуються з фолдінг-потенціалом, краще описують експериментальні реакції.

4. Основні результати та висновки

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{10}\text{B}) = 51$ MeB для основних станів ядер ${}^9\text{Be}$ і ${}^7\text{Be}$ та збуджених станів 0,429 MeB ($1/2^-$), 4,57 MeB ($7/2^-$), 6,7 MeB ($5/2^-$) та 7,2 MeB ($5/2^-$) ядра ${}^7\text{Be}$.

Експериментальні дані реакції проаналізовано за МЗКР для багатьох типів передач нуклонів і кластерів, спектроскопічні амплітуди яких в ядрах ${}^9\text{Be}$ і ${}^7\text{Be}$ обчислено в рамках ТІМО. Для вхідного каналу реакції використано потенціали Вудса - Саксона, параметри якого отримано раніше з аналізу експериментальних даних пружного розсіяння іонів ${}^{10}\text{B}$ ядрами ${}^6\text{Li}$ при енергії 51 MeB, а параметри потенціалу ${}^9\text{Be} + {}^7\text{Be}$ вихідного каналу визначено методом підгонки МЗКР-розрахунків до експериментальних даних реакції. Таким чином у даній роботі отримано оптичний потенціал Вудса - Саксона взаємодії ядер ${}^9\text{Be} + {}^7\text{Be}$, який порівняно з відомими з літератури відповідними потенціалами, отриманими з аналізу експериментальних даних пружного розсіяння іонів ${}^7\text{Be}$ ядрами ${}^9\text{Be}$ при різних енергіях. Установлено, що основним механізмом реакції ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ є передача протона.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. S. Verma et al. Measurements of elastic scattering for ${}^7\text{Be}$, ${}^7\text{Li} + {}^9\text{Be}$ systems and fusion cross sections for ${}^7\text{Li} + {}^9\text{Be}$ system. *Eur. Phys. J. Special Topics* **150** (2007) 75.
2. A.T. Rudchik et al. Comparison of ${}^7\text{Li}$, ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$ elastic scattering in the coupled-reaction-channels approach. *Eur. Phys. J. A* **41** (2009) 31.
3. K.A. Weber et al. Elastic scattering of ${}^7\text{Li}$ from light target nuclei. *Nucl. Phys. A* **186** (1972) 145.
4. K.W. Kemper et al. Spectroscopic information from the ${}^9\text{Be}({}^7\text{Li}, {}^6\text{He}){}^{10}\text{B}$ and ${}^9\text{Be}({}^7\text{Li}, {}^6\text{Li}){}^{10}\text{Be}$ reaction. *Phys. Rev. C* **15**(5) (1977) 1726.
5. F. Carstoin et al. Refractive effects in the scattering of loosely bound nuclei. *Phys. Rev. C* **70** (2004) 054610.
6. A.T. Рудчик та ін. Пружне й непружне розсіяння іонів ${}^{10}\text{B}$ ядрами ${}^6\text{Li}$ при енергії 51 MeB. *Ядерна фізика та енергетика* **21**(1) (2020) 29.
7. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the p-shell nuclei. *Phys. Rev. C* **15** (1977) 84.
8. А.Т. Рудчик., Ю.М. Чувильский. *Вычисление спектроскопических амплитуд для произвольных ассоциаций нуклонов в ядрах 1p-оболочки (программа DESNA)*. Препринт КИЯИ-82-12 (К., 1982) 27 с.
9. А.Т. Рудчик., Ю.М. Чувильский. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1p-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач. *УФЖ* **30** (1985) 819.
10. А.Н. Бояркина. *Структура ядер 1p-оболочки* (Москва: Моск. ун-т, 1973) 62 с.
11. J. Cook. DFPOT: a program for the calculation of double folded potentials. *Comp. Phys. Com.* **25** (1982) 125.

A. T. Rudchik^{1*}, A. A. Rudchik¹, O. O. Chepurnov¹, K. Rusek², K. W. Kemper³,
E. I. Koshchy⁴, S. Yu. Mezhevych¹, Val. M. Pirnak¹, O. A. Ponkratenko¹, A. Stolarz²,
R. Siudak⁵, A. P. Pyin¹, Yu. M. Stepanenko¹, V. V. Uleshchenko¹, Yu. O. Shyrma¹

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

² Heavy Ion Laboratory of Warsaw University, Warsaw, Poland

³ Physics Department, Florida State University, Tallahassee, USA

⁴ Cyclotron Institute, Texas A&M University, College Station, USA

⁵ H. Niewodniczański Institute of Nuclear Physics, Cracow, Poland

*Corresponding author: rudchik@kinr.kiev.ua

${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ REACTION MECHANISMS. STRUCTURE AND INTERACTION OF ${}^9\text{Be} + {}^7\text{Be}$ NUCLEI

New experimental data of angular distributions for the ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^9\text{Be}){}^7\text{Be}$ reaction were measured at the energy $E_{\text{лаб}}({}^{10}\text{B}) = 51$ MeV for the ground states of nuclei and excited 0.429 - 7.2 MeV states of ${}^7\text{Be}$. The reaction experimental data were analyzed within coupled-reaction-channels method (CRC) for many types of the nucleon and cluster transfers which spectroscopic amplitudes (factors) in the ${}^9\text{Be}$ and ${}^7\text{Be}$ nuclei were calculated using translation invariant shell model. The Woods - Saxon potential was used for CRC-calculations. The ${}^6\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ potential parameters were deduced

before from the analysis of experimental data of ^{10}B ions scattering by ^6Li nuclei at the energy $E_{\text{lab}}(^{10}\text{B}) = 51$ MeV and the $^9\text{Be} + ^7\text{Be}$ potential parameters for exit reaction channel were deduced from the CRC-calculations fitting to the reaction experimental data. Thus, the information about the $^9\text{Be} + ^7\text{Be}$ optical potential, the basic reaction mechanisms and the ^9Be and ^7Be nuclei structures were deduced.

Keywords: nuclear reactions $^6\text{Li}(^{10}\text{B}, ^9\text{Be})^7\text{Be}$ data at $E = 51$ MeV, $\sigma(\theta)$, reaction mechanisms, parameters of $^9\text{Be} + ^7\text{Be}$ potential, spectroscopic amplitudes of nucleons and clusters in the ^9Be and ^7Be nuclei.

REFERENCES

1. S. Verma et al. Measurements of elastic scattering for ^7Be , $^7\text{Li} + ^9\text{Be}$ systems and fusion cross sections for $^7\text{Li} + ^9\text{Be}$ system. *Eur. Phys. J. Special Topics* **150** (2007) 75.
2. A.T. Rudchik et al. Comparison of ^7Li , $^7\text{Be} + ^9\text{Be}$ elastic scattering in the coupled-reaction-channels approach. *Eur. Phys. J. A* **41** (2009) 31.
3. K.A. Weber et al. Elastic scattering of ^7Li from light target nuclei. *Nucl. Phys. A* **186** (1972) 145.
4. K.W. Kemper et al. Spectroscopic information from the $^9\text{Be}(^7\text{Li}, ^6\text{He})^{10}\text{B}$ and $^9\text{Be}(^7\text{Li}, ^6\text{Li})^{10}\text{Be}$ reaction. *Phys. Rev. C* **15**(5) (1977) 1726.
5. F. Carstoin et al. Refractive effects in the scattering of loosely bound nuclei. *Phys. Rev. C* **70** (2004) 054610.
6. A.T. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of ^{10}B ions by ^6Li nuclei at energy 51 MeV. *Yaderna Fyzyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* **21**(1) (2020) 29. (Ukr)
7. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvilsky. Cluster spectroscopic factors for the p-shell nuclei. *Phys. Rev. C* **15** (1977) 84.
8. A.T. Rudchik, Yu.M. Tchuvilsky. Spectroscopic amplitude calculations for different clusters in the 1p-shell nuclei (code DESNA). Preprint of the Institute for Nuclear Research AS UkrSSR (Kyiv, 1982) 27 p. (Rus)
9. A.T. Rudchik, Yu.M. Tchuvilsky. Spectroscopic amplitudes of multinuclear clusters in the 1p-shell nuclei and multinuclear transfer reaction analysis. *Ukr. J. Phys.* **30** (1985) 819. (Rus)
10. A.N. Boyarkina. *Structure of the Nuclei of the 1p Shell* (Moskva: Moskovskiy Universitet, 1973) 62 p.
11. J. Cook. DF POT: a program for the calculation of double folded potentials. *Comp. Phys. Com.* **25** (1982) 125.

Надійшла/Received 23.09.2021