

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,
Б. В. Міщенко¹, Ю. М. Степаненко¹, В. В. Улещенко¹, Ю. О. Ширма¹

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

³ Відділ фізики Флоридського державного університету, 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

ПРУЖНЕ Й НЕПРУЖНЕ РОЗСІЯННЯ ІОНІВ ¹⁰V ЯДРАМИ ⁶Li ПРИ ЕНЕРГІЇ 51 MeV

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння іонів ¹⁰V ядрами ⁶Li при енергії $E_{\text{лаб}}(^{10}\text{V}) = 51$ MeV для основних і збуджених станів 2,18 – 5,7 MeV ядра ⁶Li та 0,7 – 6,56 MeV ядра ¹⁰V. Отримані експериментальні дані та відомі з літератури дані пружного розсіяння іонів ⁶Li ядрами ¹⁰V при енергії $E_{\text{лаб}}(^{6}\text{Li}) = 30$ MeV проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій. У схему зв'язку каналів включалися пружне й непружне розсіяння ядер ⁶Li + ¹⁰V, процеси переорієнтації спінів ядер ⁶Li і ¹⁰V та найбільш важливі реакції передач. Визначено параметри потенціалу взаємодії ядер ⁶Li + ¹⁰V типу Вудса – Саксона та параметри деформації ядер ⁶Li і ¹⁰V. Досліджено механізми непружного розсіяння ядер ⁶Li + ¹⁰V у рамках моделі колективних збуджень ядер, а також відмінності пружного розсіяння ядер ⁶Li + ¹⁰V при використанні потенціалів взаємодії ядер ⁶Li + ¹⁰V, ⁷Li + ¹⁰V і ⁶Li + ¹¹B, визначено внески в пружне розсіяння ядер ⁶Li + ¹⁰V реакцій одно- та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів, обчислених за трансляційно-інваріантною моделлю оболонки.

Ключові слова: ядерні реакції ⁶Li(¹⁰V, ¹⁰V), $E = 51$ MeV, ядерні спектри, $\sigma(\theta)$, механізми розсіяння ядер, параметри деформації ядер.

1. Вступ

Дослідження ядерних процесів при взаємодії легких ядер мають важливе значення для отримання відомостей про потенціали ядро-ядерної взаємодії, оболонкову та кластерну структуру стабільних і нестабільних ядер, про механізми ядерних процесів тощо.

У даній роботі подано результати дослідження пружного й непружного розсіяння іонів ¹⁰V ядрами ⁶Li при енергії $E_{\text{лаб}}(^{10}\text{V}) = 51$ MeV, експериментальні дані якого було отримано в експерименті з одночасним вимірюванням реакцій ⁶Li(¹⁰V, X) з виходом стабільних і нестабільних продуктів із зарядами $Z = 3 - 5$. У літературі відомо лише експериментальні дані пружного розсіяння ядер ⁶Li + ¹⁰V при енергії $E_{\text{лаб}}(^{6}\text{Li}) = 30$ MeV [1]. Метою досліджень пружного й непружного розсіяння іонів ¹⁰V ядрами ⁶Li у даній роботі було отримання експериментальних даних для основних станів ядер ⁶Li і ¹⁰V та збуджених станів 2,185 – 5,7 MeV ядра ⁶Li і станів 0,718 – 5,18 MeV ядра ¹⁰V, аналіз цих даних за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР), оптичною моделлю (ОМ) та моделлю

колективних збуджень ядер ротаційної й вібраційної природи з використанням потенціалів Вудса - Саксона (WS) та подвійного фолдінг-потенціалу (DF) з уявною частиною $U_{\text{DF}} = V_{\text{DF}} + ikW_{\text{DF}}$. При аналізі даних за МЗКР у схему зв'язку включались канали пружного й непружного розсіяння та найбільш важливі реакції передач нуклонів і кластерів x , спектроскопічні амплітуди S_x яких в ядрах $A = C + x$ обчислювались у рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки (ТІМО). Визначено внески реакцій передач та процесів переорієнтації спінів ядер ¹⁰V і ⁶Li у пружне розсіяння ядер ¹⁰V + ⁶Li. У даній роботі проаналізовано за МЗКР також експериментальні дані пружного розсіяння іонів ⁶Li ядрами ¹⁰V з роботи [1].

2. Методика експерименту

Диференціальні перерізи реакцій ⁶Li(¹⁰V, X) вимірювались на Варшавському циклотроні U-200P (Лабораторія важких іонів Варшавського університету) при енергії пучка іонів ¹⁰V $E_{\text{лаб}}(^{10}\text{V}) = 51$ MeV з використанням самопідтрим-

ної мішені літію товщиною ~ 900 мкг/см² із $\sim 85\%$ -ним збагаченням ізотопом ${}^6\text{Li}$. Розкид енергії пучка іонів ${}^{10}\text{B}$ на мішені становив $\sim 0,5\%$.

Продукти реакції реєструвались двома ΔE - E -спектрометрами, в одному з яких ΔE -детектором була іонізаційна камера, а в другому – кремнієвий детектор товщиною 67 мкм. В обох спектрометрах використовувались кремнієві E -детектори товщиною ~ 1 мм. Робочим газом в іонізаційній камері використовувався аргон при тиску ~ 200 мм рт. ст., при якому енергетичні втрати продуктів реакції в іонізаційній камері були еквівалентними відповідним втратам у кремнієвому детекторі товщиною 15 мкм. Спектрометр з іоні-

заційною камерою застосовувався для реєстрації продуктів реакцій із зарядами $Z = 3 - 7$, а з кремнієвим ΔE -детектором для ядер із $Z = 3 - 5$.

В експерименті використовувалась електроніка стандарту SAMAC та комп'ютерна інформаційна система SMAN [2]. Спектрометричні дані накопичувались у вигляді двовимірних $\Delta E(E)$ -спектрів розміром 256×256 каналів.

Типові $\Delta E(E)$ -спектри для обох типів спектрометрів показано на рис. 1. Видно, що спектрометр з іонізаційною камерою забезпечував надійну ідентифікацію продуктів реакцій лише за зарядами, а з кремнієвим ΔE -детектором за зарядами та масами.

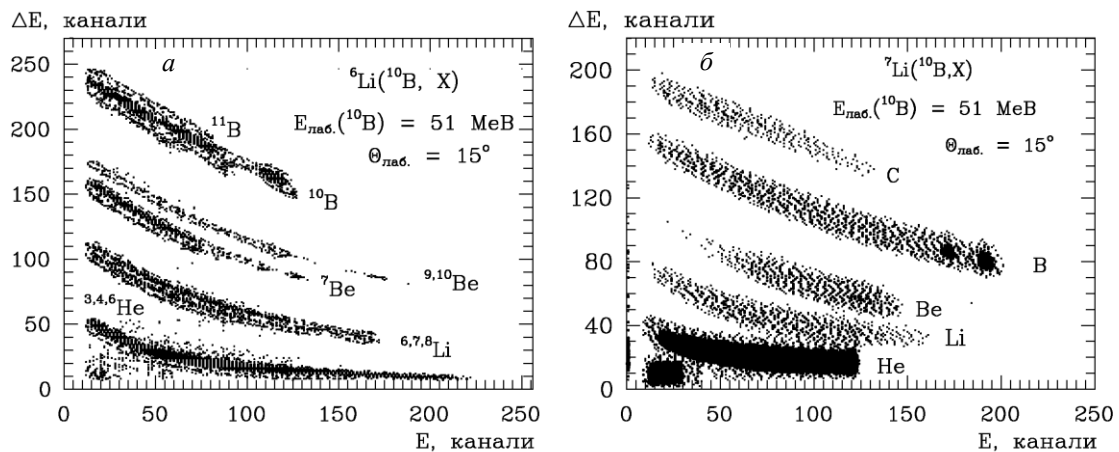


Рис. 1. Типові $\Delta E(E)$ -спектри продуктів реакцій ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{10}\text{B}) = 51$ МеВ спектрометрів з іонізаційною камерою (а) та з кремнієвим ΔE -детектором (б).

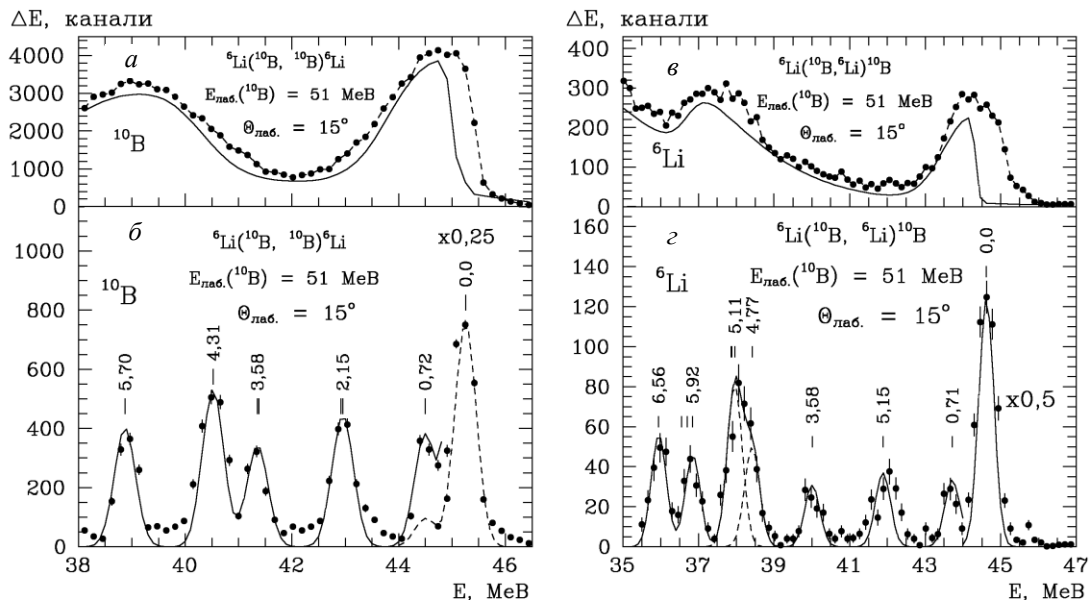


Рис. 2. Типові енергетичні спектри ядер ${}^{10}\text{B}$ і ${}^6\text{Li}$ з пружного й непружного розсіяння іонів ${}^{10}\text{B}$ ядрами ${}^6\text{Li}$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{10}\text{B}) = 51$ МеВ: а, в – з неперервними фонами від багаточастинкових реакцій; б, г – після видалення фонів.

Типові експериментальні спектри продуктів реакцій ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^{10}\text{B}){}^6\text{Li}$ та ${}^6\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^6\text{Li}){}^{10}\text{B}$ показано на рис. 2, а, в з неперервними фонами від багаточастинкових реакцій і домішок у мішені та

спектри з вилученими фонами (б, г). Кривими на рисунку показано фони (а, в), та наближення експериментальних піків симетричними гауссіанами (б, г).

Площі гауссіанів використовувались для обчислення диференціальних перерізів розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ з похибками 30 - 40 %. Експериментальні дані перерізів пружного розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ на малих кутах $\theta_{\text{лаб}} < 15^\circ$ нормувалися до обчислених за ОМ перерізів цього розсіяння, де переважає кулонівська взаємодія ядер та ОМ-перерізи незначно залежать від неоднозначності параметрів потенціалів WS. Помилка такої абсолютизації диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ не перевищує 30 %. Отриманий таким чином нормувальний множник $N_{\text{норм}}$ використовувався також для нормування експериментальних перерізів непружного розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ та реакцій передачі $^6\text{Li}(^{10}\text{B}, X)$.

Кутові розподіли диференціальних перерізів пружного розсіяння іонів ^{10}B ядрами ^6Li при енергії $E_{\text{лаб}}(^{10}\text{B}) = 51 \text{ MeV}$ показано на рис. 3 залежно від переданого імпульсу q_t . Для порівняння там же показано також відомі з літератури експериментальні дані (без помилок для кращого показу різниці даних) пружного розсіяння іонів ^{10}B ядрами ^7Li при енергії 51 MeV [3] та пружного розсіяння іонів ^6Li ядрами ^{10}B при енергії $E_{\text{лаб}}(^6\text{Li}) = 30 \text{ MeV}$ [1]. Видно, що отримані в даній роботі експериментальні дані пружного розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ найбільше відрізняються від пружних розсіювань ядер $^{10}\text{B} + ^7\text{Li}$ та $^6\text{Li} + ^{10}\text{B}$ (30 MeV) при переданих імпульсах $q_t > 2 \text{ fm}^{-1}$.

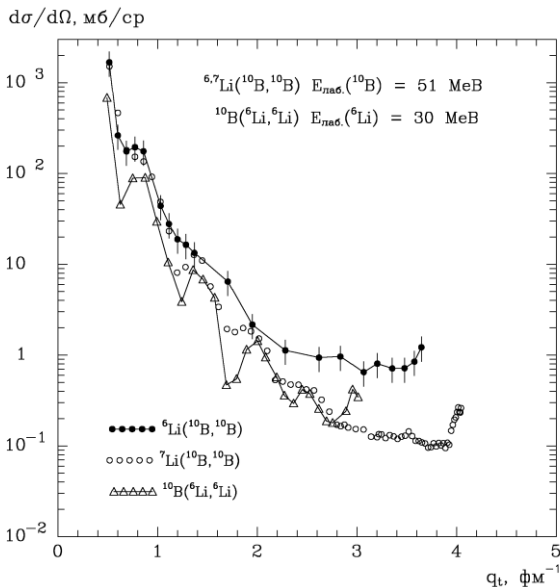


Рис. 3. Порівняння експериментальних диференціальних перерізів пружного розсіяння іонів ^{10}B ядрами ^6Li при енергії $E_{\text{лаб}}(^{10}\text{B}) = 51 \text{ MeV}$ з пружним розсіянням іонів ^{10}B ядрами ^7Li [3] та іонів ^6Li ядрами ^{10}B при енергії $E_{\text{лаб}}(^6\text{Li}) = 30 \text{ MeV}$ [1].

3. Аналіз експериментальних даних

Експериментальні дані пружного й непружного розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ аналізувались за

МЗКР із використанням потенціалу WS

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

та кулонівського потенціалу рівномірно зарядженої кулі

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

де $R_i = r_i (A_P^{1/3} + A_T^{1/3})$, $i = V, W, C$; A_P, A_T та Z_P, Z_T – маси і заряди іона P та мішені T відповідно. У всіх розрахунках використовувався параметр $r_C = 1,25 \text{ fm}$.

Параметри $\{V_0, r_V, a_V\}$ дійсної частини $V(r)$ потенціалу WS визначалися методом підгонки $V(r)$ до дійсної частини $V_{\text{DF}}(r)$ оптичного потенціалу подвійної згортки (фолдінг-потенціалу) DF взаємодії ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$

$$U_{\text{DF}}(r) = V_{\text{DF}}(r) + iW_{\text{DF}}(r) = V_{\text{DF}}(r) + inV_{\text{DF}}(r) \quad (3)$$

з уявною частиною, пропорційною дійсному фолдінг-потенціалу $W_{\text{DF}}(r) = nV_{\text{DF}}(r)$. Такого типу оптичний фолдінг-потенціал використано в багатьох відомих з літератури роботах. Коефіцієнт n визначався методом підгонки МЗКР-перерізів, обчислених з потенціалом $U_{\text{DF}}(r)$, до експериментальних даних пружного розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ до відповідних експериментальних даних.

В обчисленні потенціалу $V_{\text{DF}}(r)$ використовувався потенціал нуклон-нуклонної взаємодії МЗУ Рейда (Reid) [5, 6] та розподіли нуклонів в ядрах ^{10}B і ^6Li [7], отримані з аналізу відповідних експериментальних даних розсіяння електронів цими ядрами.

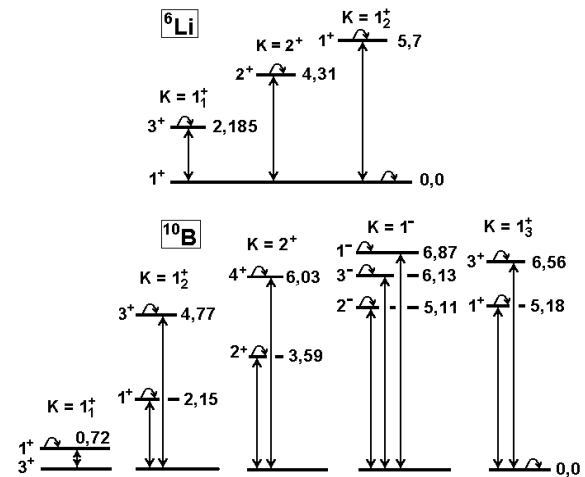


Рис. 4. Схеми переходів ядер ^6Li і ^{10}B у збуджені стани.

Для обчислення фолдінг-потенціалу $V_{DF}(r)$ використано програму DFROT [4], а МЗКР-розрахунки пружного й непружного розсіювання ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ проводились за допомогою програми FRESKO [8].

У систему зв'язку каналів включались пружне

й непружне розсіювання ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$, схеми яких показано на рис. 4, процеси переорієнтації спінів цих ядер, зображених на рисунку дугами, та найбільш важливі реакції передач нуклонів і кластерів x у процесі розсіювання цих ядер. Схеми реакцій передач показано на рис. 5.

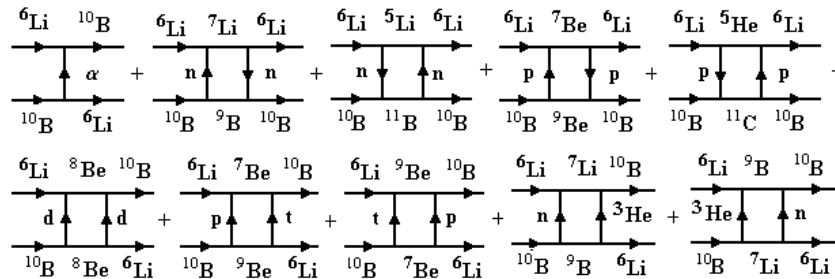


Рис. 5. Діаграми реакцій передач для пружного й непружного розсіювання ядер $^6\text{Li} + ^{10}\text{B}$.

Вважалось, що низькоенергетичні збуджені стани деформованих ядер ^6Li та ^{10}B мають переважно колективну природу – ротаційну або вібраційну. Перерізи переходів ядер у ці стани обчислювалися за моделлю колективних збуджень ядер, використовуючи форм-фактор

$$V_\lambda(r) = -\frac{\delta_\lambda}{\sqrt{4\pi}} \frac{dU(r)}{dr},$$

де δ_λ – параметр деформації ядер λ -мультипольності, значення якого визначалось методом підгонки теоретичних перерізів непружного розсіювання ядер до експериментальних даних. Значення параметрів δ_λ деформації ядер ^{10}B і ^6Li та величин $\beta_\lambda = \delta_\lambda/R$ при $R = 1,25A^{1/3}$, які було використано при МЗКР-аналізі експериментальних даних непружного розсіювання ядер ^{10}B і ^6Li , подано в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри деформації ядер

Ядра	$E_{зб.}, \text{MeV}$	J^π	λ	$\delta_\lambda, \text{фм}$	β_λ	Літ.
^6Li	0,000	1^+	2	-1,54	-0,68	[9]
	2,185	3^+	2	-1,54	-0,68	[9]
			4	1,00	0,44	[10]
	4,310	2^+	2	-1,54	-0,68	[9]
	5,700	1^+	2	-1,54	0,68	[9]
^{10}B	0,000	3^+	2	1,8	0,67	[3]
	0,718	1^+	2	1,8	0,67	[3]
	2,154	1^+	2	1,8	0,67	[3]
			4	1,0	0,37	[3]
	3,587	2^+	2	1,8	0,67	[3]
			4	1,0	0,37	[3]
	4,774	3^+	2	1,8	0,67	[3]
			4	1,0	0,37	[3]
	5,110	2^-	1	1,0	0,37	[3]
			3	1,0	0,37	[3]
	5,180	1^+	2	1,8	0,67	[3]
			4	1,0	0,37	[3]

Необхідні для МЗКР-розрахунків реакцій передач спектроскопічні амплітуди S_x кластерів та нуклонів x у системах $A = C + x$ обчислено в рамках ТМО [11] за допомогою програми DESNA [12, 13], використовуючи таблиці хвильових функцій 1р-оболонки з роботи [14]. Спектроскопічні амплітуди S_x подано в табл. 2.

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

A	C	x	nL_j	S_x
^6Li	^5He	p	$1P_{1/2}$	$-0,596^{(a)}$
			$1P_{3/2}$	0,667
^6Li	^5Li	n	$1P_{1/2}$	$0,596^{(a)}$
			$1P_{3/2}$	$-0,667$
^7Li	^6Li	n	$1P_{1/2}$	$-0,657$
			$1P_{3/2}$	$-0,735^{(a)}$
^7Be	^6Li	p	$1P_{1/2}$	$-0,657$
			$1P_{3/2}$	$-0,735^{(a)}$
^8Be	^6Li	d	$2S_1$	1,217
^9Be	^6Li	t	$2P_{1/2}$	$-0,192$
			$2P_{3/2}$	$-0,215^{(a)}$
^9B	^6Li	^3He	$2P_{1/2}$	$-0,192$
			$2P_{3/2}$	$-0,215^{(a)}$
^{10}B	^6Li	α	$2D_2$	$-0,125$
			$2P_{3/2}$	0,419
^{10}B	^7Li	^3He	$1F_{5/2}$	$-0,104^{(a)}$
			$1F_{7/2}$	$-0,347$
			$2P_{3/2}$	$-0,419$
^{10}B	^7Be	t	$1F_{5/2}$	$-0,104^{(a)}$
			$1F_{7/2}$	0,347
^{10}B	^8Be	d	$1D_3$	0,811
^{10}B	^9Be	p	$1P_{3/2}$	1,185
^{10}B	^9B	n	$1P_{3/2}$	$-1,185$
^{11}B	^{10}B	n	$1P_{3/2}$	$-1,347^{(a)}$
^{11}C	^{10}B	p	$1P_{3/2}$	$-1,347^{(a)}$

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

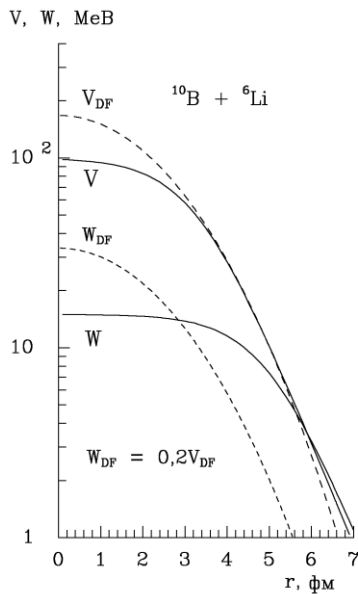


Рис. 6. Порівняння потенціалів WS та DF взаємодії ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$.

Таблиця 3. Параметри потенціалів взаємодії ядер

$P + T$	$E_{\text{лаб}}$, MeB	$E_{\text{с.п.м.}}$, MeB	V_0 , MeB	r_V , фМ	a_V , фМ	W_S , MeB	r_{W_S} , фМ	a_{W_S} , фМ	r_C , фМ	Літ.
$^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$	51	19,13	100,0	0,820	0,800	15,0	1,250	0,800	1,250	
$^{10}\text{B} + ^7\text{Li}$	50	21,00	189,9	0,790	0,660	14,5	1,250	0,660	1,250	[3]
$^6\text{Li} + ^{10}\text{B}$	30	18,75	100,0	0,820	0,800	14,0	1,250	0,800	1,250	
$^6\text{Li} + ^{10}\text{B}$	30	18,75	173,0	1,210	0,802	8,9	2,170	0,947	1,780	[1]

Експериментальні дані диференціальних перерізів пружного розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{10}\text{B}) = 51$ MeB та МЗКР-розрахунки різних процесів з використанням потенціалу WS з параметрами (див. табл. 3) показано на рис. 7.

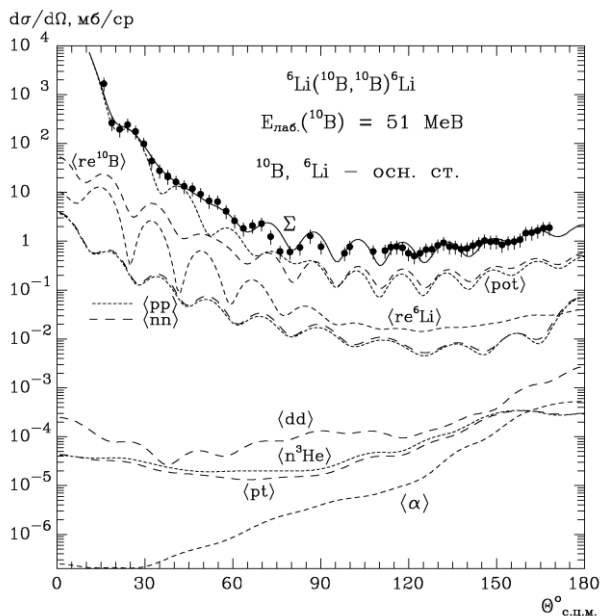


Рис. 7. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{10}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{10}\text{B}) = 51$ MeB. Пунктирні криві – МЗКР-перерізи різних процесів (див. текст). Суцільною кривою Σ показано когерентну суму МЗКР-перерізів найбільш важливих процесів.

У МЗКР-розрахунках за допомогою програми FRESKO хвильові функції зв'язаних станів нуклонів та кластерів обчислювалися стандартним способом методом підгонки параметра V дійсної частини потенціалу WS до енергій зв'язку кластерів (нуклонів) x у системах $A = C + x$ при значеннях параметрів $a_V = 0,65$ фМ та $r_V = 1,25(C^{1/3} + x^{1/3})$ фМ.

При виконанні МЗКР-розрахунків використовувались потенціали взаємодії ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ типу WS та DF (рис. 6).

Параметри $\{V_0, r_V, a_V\}$ дійсної частини $V(r)$ потенціалу WS визначено методом підгонки $V(r)$ до дійсної частини $V_{DF}(r)$ фолдінг-потенціалу DF. Ці параметри подано в табл. 3 разом з параметрами $\{W_S, r_W, a_W\}$ уявної частини $W(r)$ потенціалу WS, визначені методом підгонки МЗКР-перерізів пружного розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ до експериментальних даних цього розсіяння.

Штриховою кривою $\langle \text{pot} \rangle$ на рис. 7 показано потенціальне розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$; кривими $\langle \text{re}^6\text{Li} \rangle$ і $\langle \text{re}^{10}\text{B} \rangle$ – процеси переорієнтації спінів (реорієнтації) ядер ^6Li і ^{10}B при розсіянні ^{10}B (див. рис. 4); кривою $\langle \alpha \rangle$ – реакція передачі α -кластера; кривими $\langle \text{pp} \rangle$, $\langle \text{nn} \rangle$, $\langle \text{pt} \rangle$, $\langle \text{dd} \rangle$, $\langle \text{n}^3\text{He} \rangle$ – реакції послідовних передач протонів $p + p$, нейтронів $n + n$ та $p + t$, $d + d$, $n + ^3\text{He}$ відповідно. Діаграми цих передач показано на рис. 5.

Видно, що потенціальне розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ домінує на кутах $\theta_{\text{с.п.м.}} < 60^\circ$. У розсіянні іонів ^{10}B на кути $\theta_{\text{с.п.м.}} > 60^\circ$ значну роль відіграє також процес реорієнтації ядра ^{10}B . Роль інших процесів у пружному розсіянні ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$, як видно на рис. 7, незначна. Когерентна сума потенціального розсіяння та реорієнтації спінів ядер ^{10}B і ^6Li (крива Σ) задовільно описує експериментальні дані.

Опис експериментальних даних пружного розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ МЗКР-перерізами при використанні $(^{10}\text{B} + ^6\text{Li})$ -потенціалів DF і WS із параметрами, поданими в табл. 3 для взаємодії ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ (дана робота) та $^{10}\text{B} + ^7\text{Li}$ (потенціал WS) [3], показано на рис. 8. Видно суттєві відмінності МЗКР-перерізів пружного розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ при використанні параметрів потенціалів WS взаємодії ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ та $^{10}\text{B} + ^7\text{Li}$ в області середніх кутів (ізотопічний ефект).

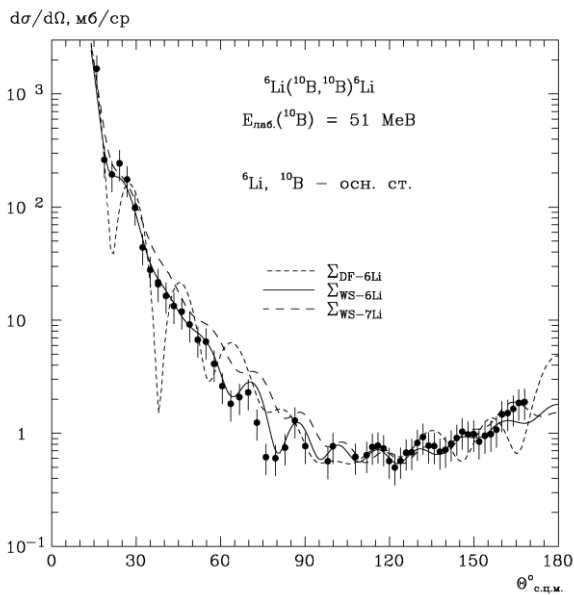


Рис. 8. Порівняння МЗКР-розрахунків пружного розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{10}\text{B}) = 51 \text{ MeV}$ при використанні параметрів потенціалів WS та оптичного потенціалу DF взаємодії ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$.

Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{10}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{10}\text{B}) = 51 \text{ MeV}$ для збуджених станів ядер ^6Li та ^{10}B показано на рис. 9 - 11.

На рис. 9 показано експериментальні дані та МЗКР-розрахунки для збуджених станів 0,710 MeV (1^+), 2,154 MeV (1^+), 3,587 MeV (2^+) ядра ^{10}B та збудженого стану 2,185 MeV (3^+) ядра ^6Li . Збуджені стани 2,154 MeV (1^+) ядра ^{10}B та 2,185 MeV (3^+) ядра ^6Li в експерименті не розділялись. Для них поміряно сумарні диференціальні перерізи. Кривими на рисунку показано відповідні МЗКР-розрахунки перерізів розсіяння за моделями колективних збуджень ядер (*ротаційних* та *вібраційних*). Сумарні МЗКР-перерізи для нерозділених в експерименті станів ядер ^{10}B та ^6Li показано кривою Σ .

Кутові розподіли диференціальних перерізів непружного розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ для збуджених станів 4,774 MeV (3^+) і нерозділених в експерименті станів 5,11 MeV (2^-) + 5,18 MeV (1^+) та 5,920 MeV (2^+) + 6,025 MeV (4^+) + 6,129 MeV (3^-) ядра ^{10}B показано на рис. 10. Для нерозділених в експерименті збуджених станів ядра ^{10}B поміряно сумарні диференціальні перерізи. Штриховими кривими показано МЗКР-розрахунки для окремих збуджених станів, а кривими Σ – сумарні МЗКР перерізи для нерозділених станів та стану 4,774 MeV ядра ^{10}B .

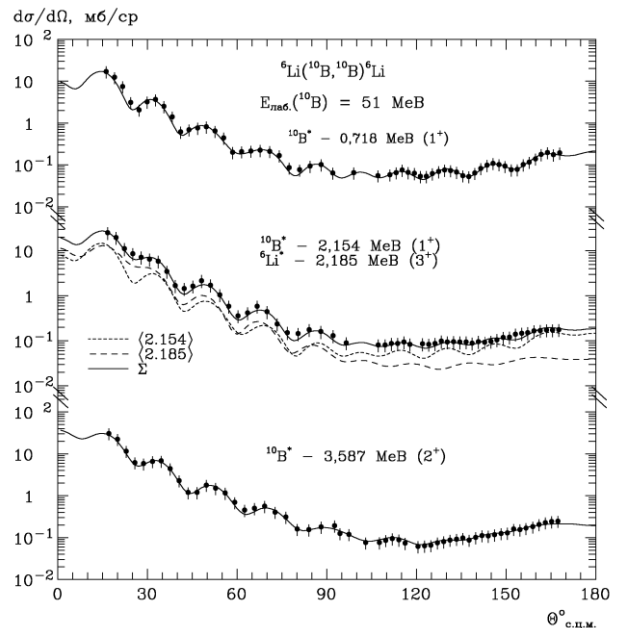


Рис. 9. Диференціальні перерізи непружного розсіяння $^6\text{Li}(^{10}\text{B}, ^{10}\text{B})^6\text{Li}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{10}\text{B}) = 51 \text{ MeV}$ для збуджених станів 0,710 MeV (1^+), 2,154 MeV (1^+), 3,587 MeV (2^+) ядра ^{10}B та збудженого стану 2,185 MeV (3^+) ядра ^6Li . Криві – МЗКР-перерізи розсіяння іонів ^{10}B ядрами ^6Li для колективних збуджень ядер ^{10}B і ^6Li .

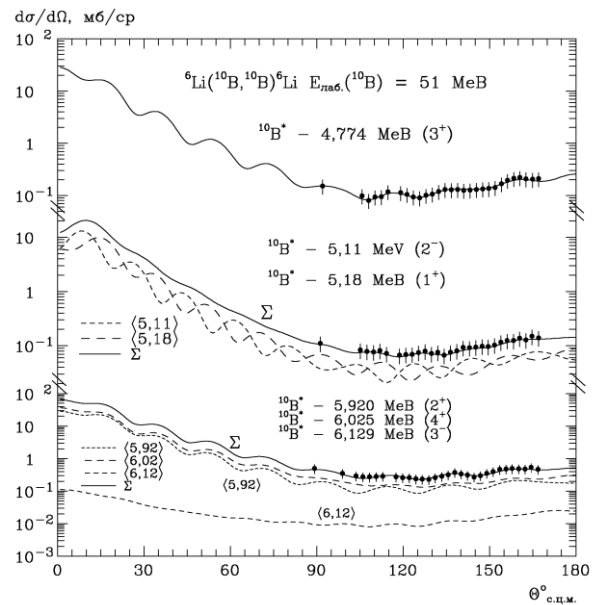


Рис. 10. Диференціальні перерізи непружного розсіяння $^6\text{Li}(^{10}\text{B}, ^{10}\text{B})^6\text{Li}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{10}\text{B}) = 51 \text{ MeV}$ для збуджених станів 4,774 MeV - 6,129 MeV ядра ^{10}B . Криві – МЗКР-розрахунки непружного розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ за моделями колективних збуджень ядра ^{10}B .

Кутові розподіли диференціальних перерізів непружного розсіяння ядер $^{10}\text{B} + ^6\text{Li}$ для збуджених станів 4,31 MeV (2^+) і 5,70 MeV (1^+) ядра ^6Li та відповідні МЗКР-розрахунки показано на рис. 11. Видно задовільний опис МЗКР-перерізами експериментальних даних при використанні в МЗКР-розрахунках параметрів деформації ядра ^6Li , поданих у табл. 1.

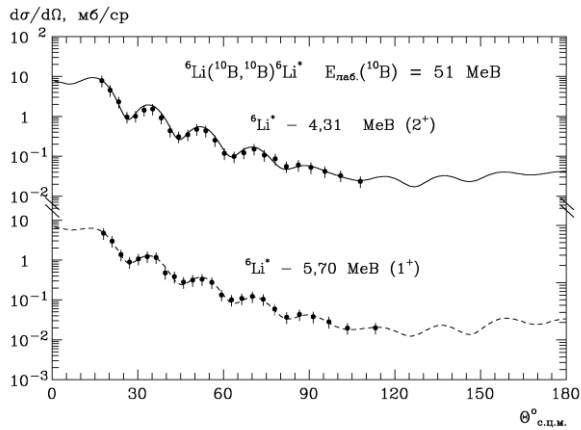


Рис. 11. Диференціальні перерізи непружного розсіяння $^6\text{Li}(^{10}\text{B}, ^{10}\text{B})^6\text{Li}^*$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{10}\text{B}) = 51$ МеВ для збуджених станів 4,31 МеВ (2^+) та 5,70 МеВ (1^+) ядра ^6Li . Криві – МЗКР-розрахунки за моделями колективних збуджень ядер.

Експериментальні дані пружного розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{10}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^6\text{Li}) = 30$ МеВ [1] також було проаналізовано за МЗКР. Ці дані разом з МЗКР-перерізами показано на рис. 12. У МЗКР-розрахунках використовувався потенціал WS взаємодії ядер $^6\text{Li} + ^{10}\text{B}$ з наборами параметрів, поданими в табл. 3.

4. Основні результати та висновки

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння іонів ^{10}B ядрами ^6Li при енергії $E_{\text{лаб}}(^{10}\text{B}) = 51$ МеВ. Експериментальні дані розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{10}\text{B}$ при енергіях $E_{\text{лаб}}(^{10}\text{B}) = 51$ МеВ та $E_{\text{лаб}}(^6\text{Li}) = 30$ МеВ [1] проаналізовано за МЗКР. У

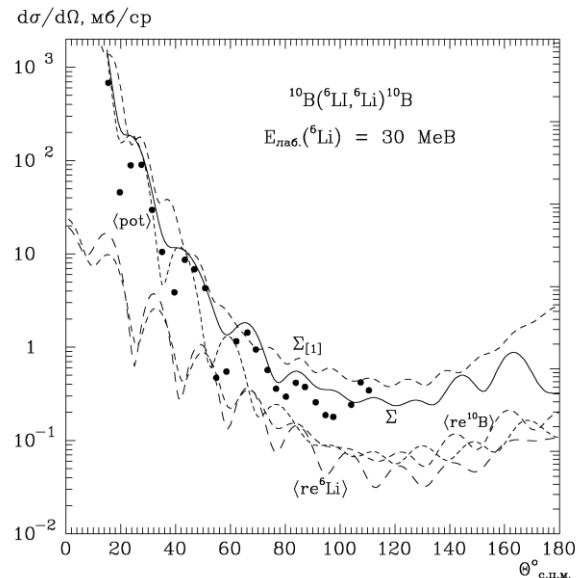


Рис. 12. Диференціальні перерізи пружного розсіяння $^{10}\text{B}(^6\text{Li}, ^6\text{Li})^{10}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^6\text{Li}) = 30$ МеВ [1]. Криві – МЗКР-розрахунки з параметрами потенціалу WS даної роботи (сумарна крива Σ) та з роботи [1] (сумарна крива $\Sigma_{[1]}$).

схему зв'язку включались пружне й непружне розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{10}\text{B}$, процеси реорієнтації спінів ядер ^6Li і ^{10}B та найбільш важливі реакції передачі. Визначено параметри потенціалу взаємодії ядер $^6\text{Li} + ^{10}\text{B}$ типу WS та параметри деформації ядер ^6Li і ^{10}B . Досліджено механізми розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{10}\text{B}$. Визначено внески в експериментальні дані потенціального розсіяння, процесів реорієнтації спінів ядер ^6Li і ^{10}B та одно- й двоступінчастих передач нуклонів і кластерів. Досліджено відмінності (*ефекти*) кутових розподілів пружного розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{10}\text{B}$ при використанні в МЗКР-розрахунках потенціалів взаємодії ядер $^6\text{Li} + ^{10}\text{B}$ і $^7\text{Li} + ^{10}\text{B}$ та фолдінг-потенціалу DF взаємодії ядер $^6\text{Li} + ^{10}\text{B}$ з уявною частиною (*ізотопічні ефекти* взаємодії ядер).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. K.W. Kemper et al. Spectroscopic information from the $^9\text{Be}(^7\text{Li}, ^6\text{He})^{10}\text{B}$ and $^9\text{Be}(^7\text{Li}, ^6\text{Li})^{10}\text{Be}$ reactions. *Phys. Rev. C* 15 (1977) 1726.
2. M. Kowalczyk. SMAN: A Code for Nuclear Experiments. Warsaw University Report, 1998.
3. A.T. Rudchik et al. Isotopic effects in the $^7\text{Li} + ^{10,11}\text{B}$ elastic and inelastic scattering. *Eur. Phys. J. A* 33 (2007) 317.
4. J. Cook. DFPOT – a program for the calculation of double folded potentials. *Comp. Phys. Com.* 25(2) (1982) 125.
5. R.V. Reid. Local phenomenological nucleon-nucleon potentials. *An. Phys.* 50 (1968) 411.
6. R.V. Bertsch et al. Interactions for inelastic scattering derived from realistic interactions. *Nucl. Phys. A* 284 (1977) 399.
7. 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.
8. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* 7 (1988) 167.
9. M.F. Vineyard, K.W. Kemper, J. Cook. Excitation of ^6Li by ^{16}O at $E_{\text{c.m.}} = 18.7$ MeV. *Phys. Lett. B* 142 (1984) 249.
10. A.T. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ versus $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$ and $^6\text{Li} + ^{16}\text{O}$. *Nucl. Phys. A* 922 (2014) 71.
11. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the p-shell nuclei. *Phys. Rev. C* 15 (1977) 84.
12. А.Т. Рудчик, Ю.М. Чувильский. Вычисление спектроскопических амплитуд для произвольных ассоциаций нуклонов в ядрах 1p-оболочки (про-

- грамма DESNA). Препринт Ин-та ядерных исслед. АН УССР. КИЯИ-82-12 (К., 1982) 27 с.
13. А.Т. Рудчик, Ю.М. Чувильский. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1p-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач. УФЖ 30 (1985) 819.
14. А.Н. Бояркина. *Структура ядер 1p-оболочки* (Москва: Московский университет, 1973) 62 с.

А. Т. Рудчик^{1,*}, А. А. Рудчик¹, О. О. Чепурнов¹, К. Русек², К. В. Кемпер³, Е. И. Кошый⁴, С. Ю. Межевич¹, Вал. М. Пирнак¹, О. А. Понкратенко¹, А. Столяж², Р. Сюдак⁵, А. П. Ильин¹, Б. В. Мищенко¹, Ю. М. Степаненко¹, В. В. Улешенко¹, Ю. О. Ширма¹

¹ *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина*

² *Лаборатория тяжелых ионов Варшавского университета, Варшава, Польша*

³ *Отдел физики Флоридского государственного университета, Таллахаси, США*

⁴ *Циклотронный институт Техасского А&М университета, Техас, США*

⁵ *Институт ядерной физики им. Г. Неводинчаньского, Краков, Польша*

*Ответственный автор: rudchik@kinr.kiev.ua

УПРУГОЕ И НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ИОНОВ ¹⁰B ЯДРАМИ ⁶Li ПРИ ЭНЕРГИИ 51 МэВ

Получены новые экспериментальные данные дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния ионов ¹⁰B ядрами ⁶Li при энергии $E_{\text{лаб}}(^{10}\text{B}) = 51$ МэВ для основных и возбужденных состояний 2,18 – 5,7 МэВ ядра ⁶Li и 0,7 – 6,56 МэВ ядра ¹⁰B. Измеренные экспериментальные данные и известные из литературы данные упругого рассеяния ионов ⁶Li ядрами ¹⁰B при энергии $E_{\text{лаб}}(^{6}\text{Li}) = 30$ МэВ проанализированы по методу связанных каналов реакций. В схему связи каналов были включены упругое и неупругое рассеяние ядер ⁶Li + ¹⁰B, процессы переориентации спинов ядер ⁶Li и ¹⁰B и самые важные реакции передач. Определены параметры потенциала взаимодействия ядер ⁶Li + ¹⁰B типа Вудса - Саксона и параметры деформации ядер ⁶Li и ¹⁰B. Исследованы механизмы неупругого рассеяния ядер ⁶Li + ¹⁰B в рамках модели коллективных возбуждений ядер, исследованы отличия упругого рассеяния ядер ⁶Li + ¹⁰B при использовании параметров потенциалов взаимодействия ядер ⁶Li + ¹⁰B, ⁷Li + ¹⁰B и ⁶Li + ¹¹B, определены вклады в упругое рассеяние ядер ⁶Li + ¹⁰B реакций одно- и двухступенчатых передач нуклонов и кластеров, рассчитанных по трансляционно-инвариантной модели оболочек.

Ключевые слова: ядерные реакции ⁶Li(¹⁰B, ¹⁰B), $E = 51$ МэВ, ядерные спектры, $\sigma(\theta)$, механизмы рассеяния ядер, параметры деформации ядер.

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. Ilyin¹, B. V. Mishchenko¹, 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

ELASTIC AND INELASTIC SCATTERING OF ¹⁰B IONS BY ⁶Li NUCLEI AT ENERGY 51 MeV

New experimental data of angular distributions for the elastic and inelastic scattering of ¹⁰B ions by ⁶Li nuclei were obtained at the energy $E_{\text{lab}}(^{10}\text{B}) = 51$ MeV for the ground and excited 2.18 – 5.7 MeV states of ⁶Li and 0.7 – 6.56 MeV states of ¹⁰B. These elastic and inelastic scattering data and known from literature data of elastic scattering of ⁶Li ions by ¹⁰B nuclei at energy $E_{\text{lab}}(^{6}\text{Li}) = 30$ MeV were analyzed within coupled-reaction-channels method. The ⁶Li + ¹⁰B elastic and inelastic scattering data, spin reorientation of ⁶Li and ¹⁰B, as well as more important transfer reactions, were included in the channels-coupling scheme. The Woods - Saxon potential parameters, as well as ⁶Li and ¹⁰B deformation parameters, were deduced. The mechanisms of the ⁶Li + ¹⁰B inelastic scattering were studied within the model of collective nuclei excitations, the differences of the ⁶Li + ¹⁰B elastic scattering from using ⁶Li + ¹⁰B, ⁷Li + ¹⁰B and ⁶Li + ¹¹B potentials were observed, the contributions of one- and two-step transfers were deduced using spectroscopic amplitudes for transfer particles calculated within the translation invariant shell model.

Keywords: nuclear reactions ⁶Li(¹⁰B, ¹⁰B), $E = 51$ MeV, particle spectra, $\sigma(\theta)$, nuclear scattering mechanisms, nuclear deformation parameters.

REFERENCES

1. K.W. Kemper et al. Spectroscopic information from the $^9\text{Be}(^7\text{Li}, ^6\text{He})^{10}\text{B}$ and $^9\text{Be}(^7\text{Li}, ^6\text{Li})^{10}\text{Be}$ reactions. *Phys. Rev. C* **15** (1977) 1726.
2. M. Kowalczyk. SMAN: A Code for Nuclear Experiments. Warsaw University Report, 1998.
3. A.T. Rudchik et al. Isotopic effects in the $^7\text{Li} + ^{10,11}\text{B}$ elastic and inelastic scattering. *Eur. Phys. J. A* **33** (2007) 317.
4. J. Cook. DFPOT – a program for the calculation of double folded potentials. *Comp. Phys. Com.* **25**(2) (1982) 125.
5. R.V. Reid. Local phenomenological nucleon-nucleon potentials. *An. Phys.* **50** (1968) 411.
6. R.V. Bertsch et al. Interactions for inelastic scattering derived from realistic interactions. *Nucl. Phys. A* **284** (1977) 399.
7. 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.
8. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* **7** (1988) 167.
9. M.F. Vineyard, K.W. Kemper, J. Cook. Excitation of ^6Li by ^{16}O at $E_{\text{c.m.}} = 18.7$ MeV. *Phys. Lett. B* **142** (1984) 249.
10. A.T. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ versus $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$ and $^6\text{Li} + ^{16}\text{O}$. *Nucl. Phys. A* **922** (2014) 71.
11. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the p-shell nuclei. *Phys. Rev. C* **15** (1977) 84.
12. A.T. Rudchik, Yu.M. Tchuvil'sky. Spectroscopic amplitude calculations for different clusters in the 1p-shell nuclei (code DESNA). The preprint of the Institute for Nuclear Research AS of Ukraine. КИЯИ-82-12 (Kyiv, 1982) 27 p. (Rus)
13. A.T. Rudchik, Yu.M. Tchuvil'sky. Spectroscopic amplitudes of multinucleon clusters in the 1p-shell nuclei and multinucleon transfer reaction analysis. *Ukrainian Journal of Physics* **30** (1985) 819. (Rus)
14. A.N. Boyarkina. *Structure of Nuclei of 1p-shell* (Moskva: Moscow University, 1973) 62 p. (Rus)

Надійшла / Received 22.10.2019