

ПРУЖНЕ ТА НЕПРУЖНЕ РОЗСІЯННЯ ЯДЕР ${}^7\text{Li} + {}^{10,11}\text{B}$

А. Т. Рудчик¹, В. О. Романишин¹, Є. І. Кошій², А. Будзановскі³, К. В. Кемпер⁴, К. Русек⁵,
Л. Гловацка⁶, В. М. Кир'янчук¹, С. Клічевскі³, С. Ю. Межевич¹, О. А. Мохнач¹,
О. А. Момотюк¹, О. А. Понкратенко¹, І. Сквірчинська³, В. Р. Сюдак³, Т. Хоїньскі⁷,
В. Д. Чеснокова¹, Б. Чех³, **Г. Чосника**⁷, А. Щурек^{3,8}

¹Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

²Харківський національний університет, Харків

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

⁴Флоридський державний університет, Таллахассі, Флорида, США

⁵Інститут ядерних досліджень ім. А. Солтана, Варшава, Польща

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

⁷Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

⁸Університет Жешува, Жешув, Польща

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного та непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{10}\text{B}) = 51 \text{ MeV}$ (21 MeV в с.ц.м.) для переходів в основні та збуджені стани ядер. Ці та відомі з літературних джерел дані пружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}({}^7\text{Li}) = 24 \text{ MeV}$ (14,12 MeV в с.ц.м.) і 39 MeV (22,94 MeV в с.ц.м.) проаналізовано за оптичною моделлю та методом зв'язаних каналів реакцій. У схему зв'язку включались пружне та непружне розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$, процеси переорієнтації ядер в основних і збуджених станах, а також найбільш важливі реакції передачі. Отримано значення параметрів потенціалу взаємодії ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ в основних і збуджених станах, їх енергетичну залежність, а також параметри деформації ядер ${}^7\text{Li}$ і ${}^{10}\text{B}$. Установлено механізми розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$. Виявлено відмінності в розсіянні ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ та ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ (ізотопічний ефект розсіяння).

Вступ

Інформація про глобальні та індивідуальні характеристики ядро-ядерної взаємодії дуже важлива при вивченні ядерних процесів під дією важких (багатонуклонних) іонів. Такі відомості отримуються із досліджень (A, Z)-залежностей (зокрема ізотопічних та ізобаричних) потенціалів ядро-ядерної взаємодії на основі експериментальних даних розсіяння та реакцій передачі. Хоча такі дослідження ведуться протягом тривалого часу, проте своєї актуальності вони не втрачають і великий інтерес викликають у даний час при вивченні взаємодії ядер з аномальною різницею чисел протонів і нейтронів (екзотичних ядер).

У цій роботі представлено результати дослідження ізотопічних ефектів у пружному та непружному розсіянні ядер ${}^7\text{Li} + \{{}^{10}\text{B}, {}^{11}\text{B}\}$. За основу було взято результати дослідження розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ [1] та дані ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ -розсіяння, отримані в даній роботі при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{10}\text{B}) = 51 \text{ MeV}$ (21 MeV в с.ц.м.), разом з відомими даними цього розсіяння при енергіях $E_{\text{лаб.}}({}^7\text{Li}) = 24 \text{ MeV}$ (14,1 MeV в с.ц.м.) [2] і 39 MeV (22,94 MeV в с.ц.м.) [3]. Дані аналізувались за оптичною моделлю (ОМ) та методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). Отримана у цій роботі енергетична залежність параметрів потенціалу взаємодії ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ порівнюється з аналогічною залежністю ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ -потенціалу та аналізуються відмінності цих потенціалів (ізотопічні

ефекти розсіяння). Потенціали ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ -розсіяння, отримані у даній роботі є основою для вивчення реакцій передачі ${}^7\text{Li}({}^{10}\text{B}, X)$ з виходом нестабільних ядер ${}^5,6\text{He}$, ${}^{5,8,9}\text{Li}$, ${}^{7,8,10}\text{Be}$, ${}^{8,9,12}\text{B}$, ${}^{11}\text{C}$ тощо, які в нашому експерименті досліджувались одночасно з пружним та непружним розсіянням взаємодіючих ядер.

Методика експерименту та експериментальні дані

Диференціальні перерізи реакцій ${}^7\text{Li}({}^{10}\text{B}, X)$ вимірювались на Варшавському циклотроні С-200Р при енергії пучка іонів $E_{\text{лаб.}}({}^{10}\text{B}) = 51 \text{ MeV}$ з використанням мішені літію природного ізотопного складу (вміст ${}^7\text{Li}$ - 92,5%) товщиною 600 мкг/см². Розкид енергії пучка іонів ${}^{10}\text{B}$ на мішені становив ~ 0,5 %.

Продукти реакції реєструвались ΔE -Е-спектрометрами, в одному з яких ΔE -детектором служила іонізаційна камера [4], а в другому – кремнієвий детектор товщиною 67 мкм. В обох спектрометрах використовувались кремнієві Е-детектори товщиною ~ 1 мм. Робочим газом в іонізаційній камері використовувався протічний аргон при тиску ~ 200 мм рт. ст., при якому енергетичні втрати продуктів реакції в іонізаційній камері були еквівалентними відповідним втратам у 15 мкм кремнієвому детекторі. Спектрометр з іонізаційною камерою застосовується 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 САМАС та комп'ютерна інформаційна система SMAN [5]. Спектрометричні дані накопичувались у персональному комп'ютері у вигляді двовимірних $\Delta E(E)$ -спектрів розмірністю 256×256 каналів.

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

ΔE , канали

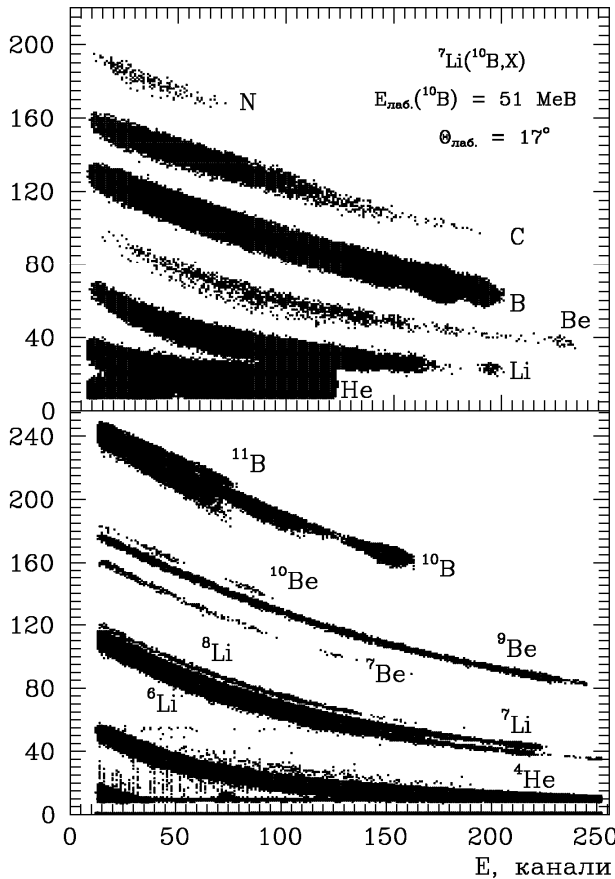


Рис. 1. Типові $\Delta E(E)$ -спектри продуктів реакцій ${}^7\text{Li}({}^{10}\text{B}, X)$, зареєстровані на куті $\theta_{\text{лаб.}} = 17^\circ$ спектрометрами з іонізаційною камерою (зверху) та із кремнієвим ΔE -детектором (знизу).

Типові енергетичні (E) спектри реакцій ${}^7\text{Li}({}^{10}\text{B}, \text{B})\text{Li}$ та ${}^7\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^7\text{Li}){}^{10}\text{B}$ для $\theta_{\text{лаб.}} = 17^\circ$ показано на рис. 2: зверху – зареєстрований спектр ізотопів бору, на якому штриховою лінією показано наявний неперервний фон від багаточастинкових реакцій типу ${}^7\text{Li}({}^{10}\text{B}, \text{B})\{\alpha t, n{}^6\text{Li}, nd\alpha$ тощо}; посередині – залишковий спектр ізотопів бору після віднімання неперервного фону; звнизу – спектр ядер ${}^7\text{Li}$ від спектрометра з кремнієвим ΔE -детектором.

Залишкові спектри апроксимувались сумою симетричних функцій Гаусса

$$N(E) = \sum_{i=1}^n N_{oi} \exp \left[-0,5 \frac{(E - E_{oi})^2}{h_i^2} \right], \quad (1)$$

де E_{oi} – кінетична енергія зареєстрованого продукту реакції (в основному або збудженому стані), якому у спектрі відповідає i -пік, h_i – експериментальна напівширина i -піка. Кінетичні енергії обчислювались на основі кінематики бінарних реакцій і при наближенні експериментальних спектрів були фіксованими параметрами. Фіксувались також напівширини h_i . Для всіх напівширин h_i використовувалось, в основному, однакові значення, за винятком рівнів із значними власними ширинами та у випадках нероздільності рівнів в експерименті. В останніх випадках значення параметрів h_i відповідним чином корегувались. Амплітуди піків N_{oi} визначались шляхом підгонки функцій (1) до експериментальних спектрів методом найменших квадратів, використовуючи програму РЕАКФІТ. При цьому похибки площ ізольованих піків (суми відліків – число зареєстрованих продуктів реакцій) становили $\sim 10\%$. Для піків із значним перекриттям ця похибка дорівнювала 30 - 40 %.

Відліки

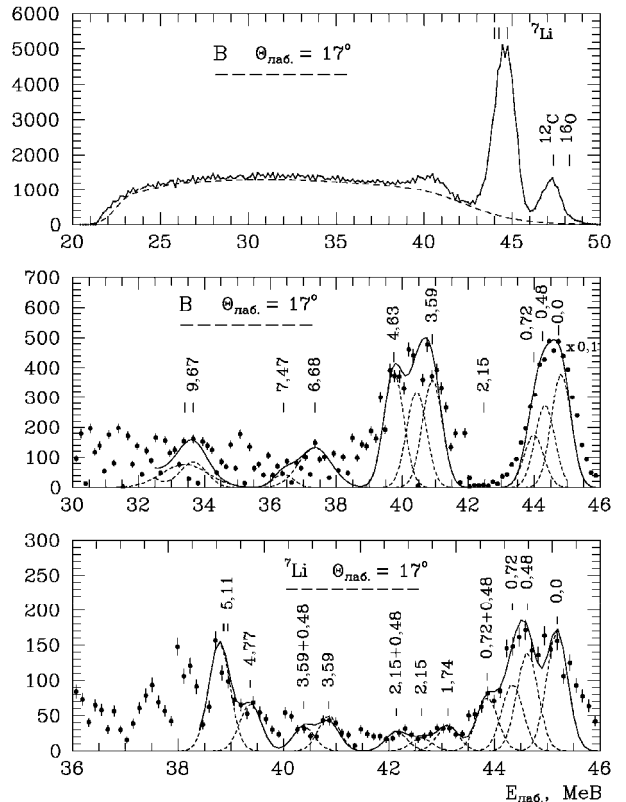


Рис. 2. Типові енергетичні спектри ізотопів бору з реакцій ${}^7\text{Li}({}^{10}\text{B}, \text{B})\text{Li}$ (верхня та середня панелі) та ${}^7\text{Li}$ з реакції ${}^7\text{Li}({}^{10}\text{B}, {}^7\text{Li}){}^{10}\text{B}$ (нижня панель) при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{10}\text{B}) = 51$ MeV для кута $\theta_{\text{лаб.}} = 17^\circ$. Цифрами позначено енергії збудження ядер.

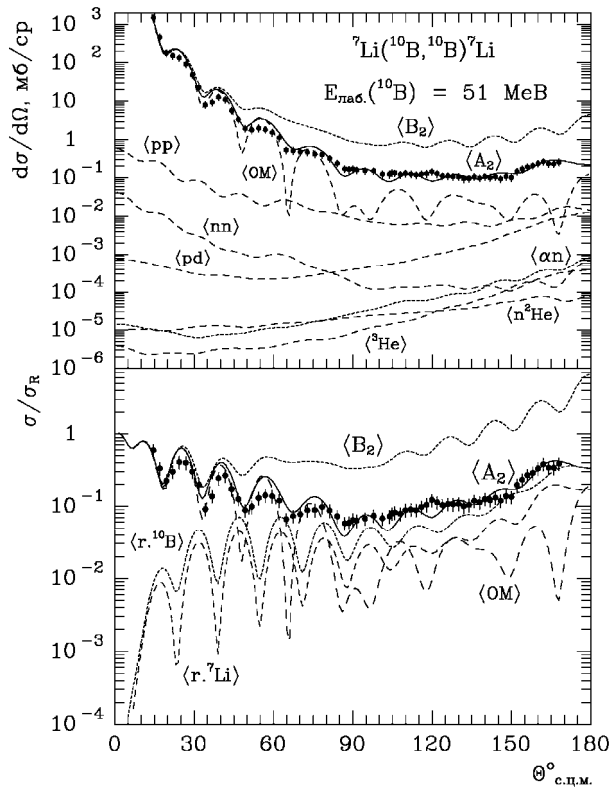


Рис. 3. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$. Криві – розрахунки за ОМ і МЗКР. Пояснення в тексті.

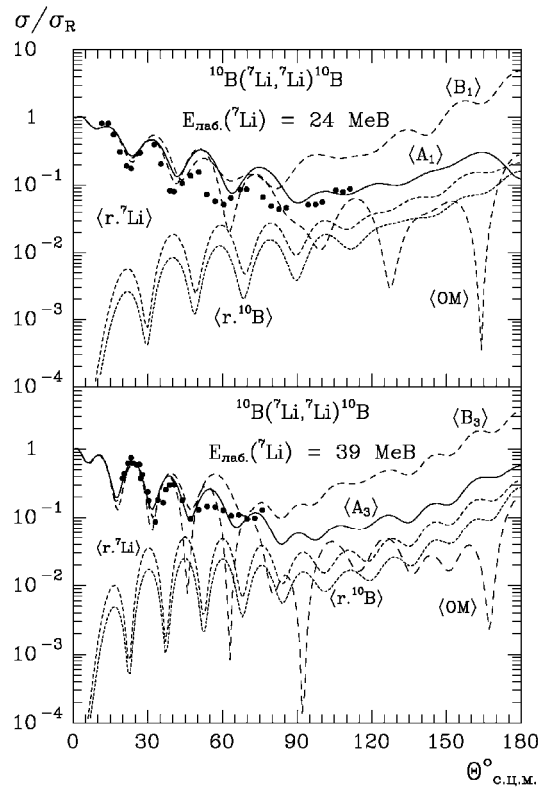


Рис. 4. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}({}^7\text{Li}) = 24$ МеВ [2] та 39 МеВ [3]. Криві означають те ж саме, що на рис. 3.

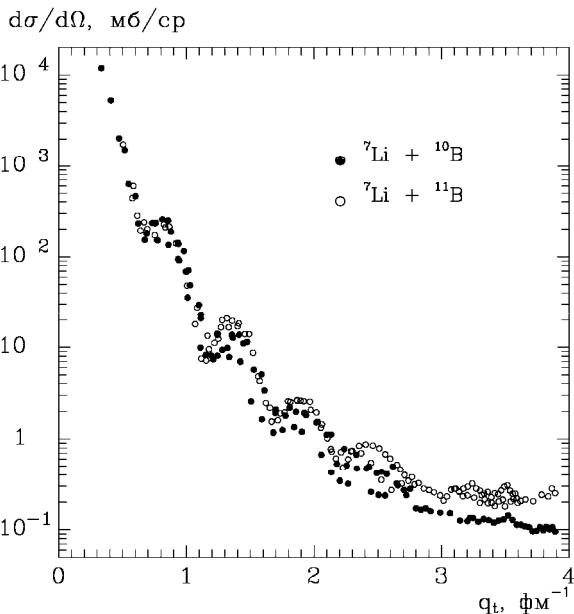


Рис. 5. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ (темні точки) при енергіях $E_{\text{лаб.}}({}^7\text{Li}) = 24$ МеВ [2], 39 МеВ [3] та $E_{\text{лаб.}}({}^{10}\text{B}) = 51$ МеВ та ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ (світлі точки) при енергіях $E_{\text{лаб.}}({}^7\text{Li}) = 34$ МеВ [17] і $E_{\text{лаб.}}({}^{11}\text{B}) = 44$ МеВ [1] залежно від переданого імпульсу q_t .

Отримані у даній роботі диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{10}\text{B}) = 51$ МеВ показано на рис. 3, а відомі з літератури дані при енергіях $E_{\text{лаб.}}({}^7\text{Li}) = 24$ МеВ [2] та 39 МеВ [3] – на рис. 4.

Залежність диференціальних перерізів пружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ та ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ для різних енергій від переданого імпульсу q_t представлено на рис. 5. Видно, що при переданих імпульсах $q_t > 3$ фм⁻¹ диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ менші за відповідні перерізи розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$, що свідчить про більше ядерне поглинання (більшу роль непружних процесів) [6, 7] у першому випадку.

Отримані у даній роботі диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{10}\text{B}) = 51$ МеВ показано на рис. 6 і 7. Для збуджень 9,67 МеВ ($7/2^-$) і 9,85 МеВ ($3/2^-$) ядра ${}^7\text{Li}$ та 5,11 МеВ (2^-) і 5,18 МеВ (1^+) ядра ${}^{10}\text{B}$ поміряно сумарні диференціальні перерізи, оскільки енергетично їх було неможливо розділити у даному експерименті.

Аналіз експериментальних даних

Методи модельно-теоретичних розрахунків

Експериментальні дані аналізувались за ОМ та МЗКР із використанням оптичного потенціалу Вудса - Саксона

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

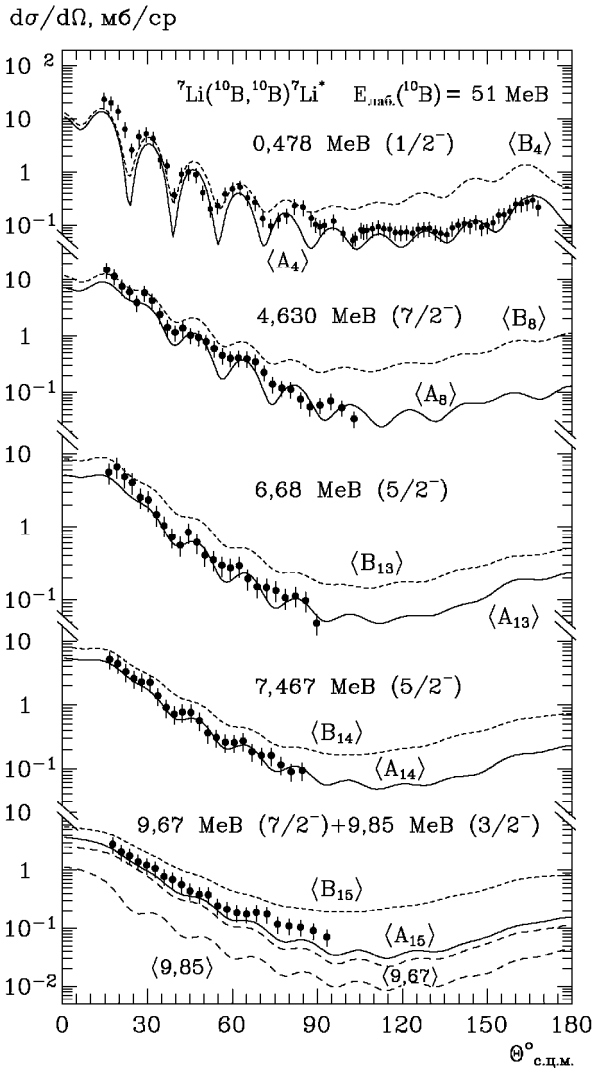


Рис. 6. Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ для переходів у збуджені стани ядра ${}^7\text{Li}$. Криві $\langle A_i \rangle$ і $\langle B_i \rangle$ ($i = 4, 8, 13 - 15$) – розрахунки за МЗКР з наборами параметрів A_i і B_i відповідно (див. табл. 3).

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

та кулонівського потенціалу рівномірно зарядженої кулі

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

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 – масові та зарядові числа налітаючого іона та мішені відповідно.

У розрахунках використовувалось значення параметра $r_C = 1,25$ фм. Параметри $X_i = \{V_0, r_V,$

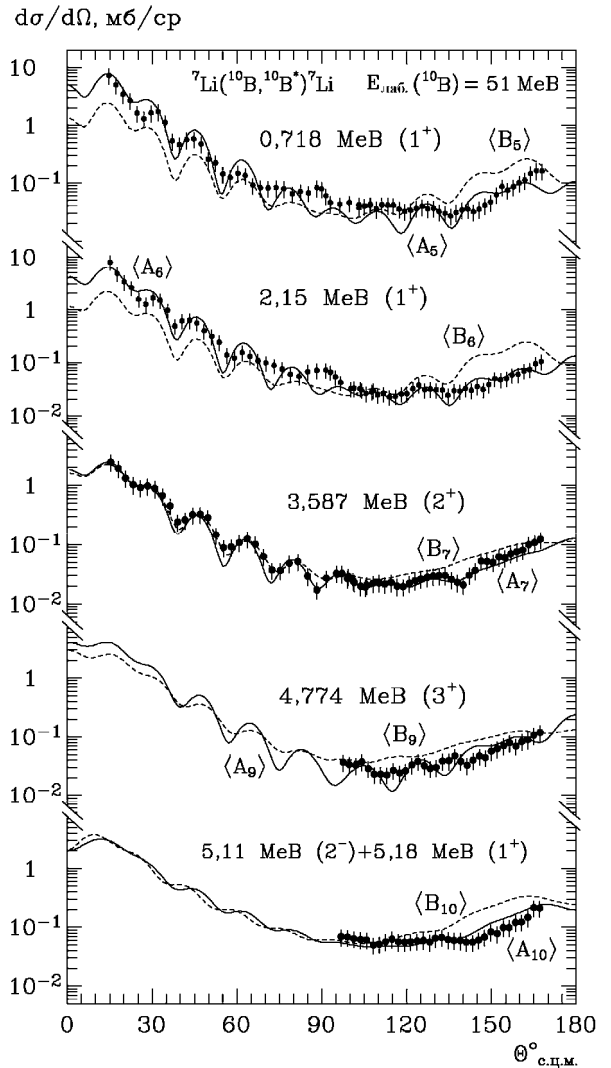


Рис. 7. Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ для збуджень ядра ${}^{10}\text{B}$. Криві означають те ж саме, що на рис. 6, але для збуджених станів ядра ${}^{10}\text{B}$ та інших наборів потенціалів.

a_V, W_S, r_W, a_W потенціалу (2) підганялись за χ^2 -критерієм до експериментальних даних спочатку в ОМ для кутів $\theta_{c.m.} < 90^\circ$, а потім уточнювались у МЗКР-розрахунках для досягнення задовільного опису всієї сукупності даних пружного та непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$. При цьому для врахування принципу Паулі при зіткненні ядер значення параметра r_V обмежувалось згідно з нерівністю

$$R_{comp} \approx 1,25 \cdot (A_p + A_t)^{1/3} \leq R_V = r_V (A_p^{1/3} + A_t^{1/3}), \quad (4)$$

де R_{comp} – радіус компаунд-ядра масою $A = A_p + A_t$. Із нерівності (4) для параметра r_V отримуємо нижню межу

$$r_V \geq 1,25 \cdot (A_p + A_t)^{1/3} / (A_p^{1/3} + A_t^{1/3}). \quad (5)$$

Таблиця 1. Параметри деформації ядра ^{10}B

$E_{зб.}, \text{MeV}$	J^π	λ	$\delta_\lambda, \text{фм}$	β_λ	Літ.
0,000 0,718	3^+	2	1,8	0,67	Дана робота (р, р') [11] (d, d') [9] ($^3\text{He}, ^3\text{He}'$) [8] $\overline{\beta}_2$ [8, 9, 11]
		2		0,67	
		2		0,62	
		2		0,37	
		2		0,55	
2,154	1^+	2	1,8	0,67	Дана робота (n, n') [10] (р, р') [11] (d, d') [9] ($^3\text{He}, ^3\text{He}'$) [8] $\overline{\beta}_2$ [8-11]
		2		0,69	
		2		0,49	
		2		0,61	
		2		0,36	
		2		0,54	
		2		0,67	
3,587	2^+	2	1,8	0,67	Дана робота (р, р') [11] ($^3\text{He}, ^3\text{He}'$) [8] $\overline{\beta}_2$ [8, 11]
		4		0,37	
		2		0,45	
		2		0,36	
		2		0,41	
4,774	3^+	2	1,8	0,67	Дана робота Дана робота Дана робота
		4		0,37	
		4		0,37	
		4		0,37	
5,110	2^-	3	1,0	0,45	Дана робота (р, р') [11] Дана робота
		1		0,37	
		3		0,37	
5,180	1^+	2	1,8	0,67	Дана робота Дана робота
		4		0,37	

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

A	C	x	nL_j	S_x
^7Li	^6He		$1P_{3/2}$	0,805
^7Li	^6Li	n	$1P_{1/2}$	-0,657
		p	$1P_{3/2}$	-0,735 ^(a)
^8Li	^7Li	n	$1P_{1/2}$	0,478
^8Be	^7Li	p	$1P_{3/2}$	1,234 ^(a)
^9Be	^7Li	d	$2S_1$	-0,226 ^(a)
			$1D_1$	0,111 ^(a)
			$1D_3$	-0,624 ^(a)
^9B	^7Li	^2He	$2S_0$	-0,247
			$1D_2$	-0,430
^{10}B	^6Li	α	$2D_2$	-0,125
^{10}B	^7Li	^3He	$1P_{3/2}$	0,419
			$1F_{5/2}$	-0,104 ^(a)
			$1F_{7/2}$	0,347
^{10}B	^8Li	^2He	$1D_2$	0,307
^{10}B	^8Be	d	$1D_3$	0,811
^{10}B	^9Be	n	$1P_{3/2}$	1,406
^{10}B	^9B	n	$1P_{3/2}$	-1,185
^{11}B	^7Li	α	$3S_0$	-0,638
			$2D_2$	-0,422
^{11}B	^{10}B	n	$1P_{3/2}$	-1,347 ^(a)
^{11}C	^{10}B	p	$1P_{3/2}$	1,347 ^(a)

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

Для розрахунків за ОМ використовувалась програма SPI-GENOA [16], а за МЗКР - програма FRESKO [17].

Пружне розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{10}\text{B}$

Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{10}\text{B}$ представлено на рис. 3. Криві – розрахунки за ОМ (криві <ОМ>) та МЗКР для реорієнтації ядер ^7Li і ^{10}B (криві <r. ^7Li > і <r. ^{10}B > відповідно), передачі ^3He -кластера (крива < ^3He >), послідовних передач протонів p + p, нейтронів n + n, а також p + d, α + d, n + ^3He (криві <pp>, <nn>, <pd>, < α d>, <n ^3He > відповідно) згідно з діаграмами, показаними на рис. 9. Усі вищезазначені розрахунки проведено з використанням набору параметрів A_2 (табл. 3), отриманого з підгонки параметрів $^7\text{Li} + ^{10}\text{B}$ -потенціалу (2) за ОМ та уточнених у МЗКР-розрахунках. Диференціальні перерізи потенціального розсіяння, обчислені за обома моделями, виявились близькими між собою і добре презентуються на рис. 3 кривими <ОМ>. Видно, що потенціальне розсіяння домінує на кутах $\theta_{\text{с.п.м.}} < 90^\circ$. Внесок його в розсіяння на великі кути незначний. Розсіяння в цей діапазон кутів відбувається завдяки процесам реорієнтації ядер ^7Li і ^{10}B . Реакції передач відіграють другорядну роль у пружному розсіянні цих ядер.

Кривими < A_2 > на рис. 3 показано когерентну суму перерізів потенціального розсіяння, реорієнтації ядер ^7Li і ^{10}B та найбільш важливих реакцій передач. Видно, що сумарні розрахункові перерізи задовільно описують експериментальні дані.

Для виявлення відмінностей між потенціалами розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{10}\text{B}$ і $^7\text{Li} + ^{11}\text{B}$ (ізотопічних ефектів розсіяння) нами був розрахований $^7\text{Li} + ^{11}\text{B}$ -потенціал для енергії $E_{\text{с.п.м.}} = 21 \text{ MeV}$ на основі енергетичної залежності параметрів цього потенціалу, отриманого у праці [1]. Розраховані параметри цього потенціалу містяться у табл. 3 під назвою набору B_2 . З цими наборами параметрів було проведено МЗКР-розрахунки $^7\text{Li} + ^{10}\text{B}$ -розсіяння і в результаті отримано сумарні диференціальні перерізи, показані на рис. 3 кривими < B_2 >. Видно, що за винятком малих кутів $\theta_{\text{с.п.м.}} < 40^\circ$ ($q_t < 1,4 \text{ фм}^{-1}$) B_2 -перерізи значно відрізняються від експериментальних даних. Основною причиною цієї розбіжності є значна різниця значень параметрів W_S у потенціалах $^7\text{Li} + ^{10}\text{B}$ - і $^7\text{Li} + ^{11}\text{B}$ -розсіяння ($\Delta W_S = 3,4 \text{ MeV}$). Дійсно, як видно з рис. 5, при $q_t > 3 \text{ фм}^{-1}$ диференціальні перерізи $^7\text{Li} + ^{10}\text{B}$ -розсіяння менші, ніж у $^7\text{Li} + ^{11}\text{B}$ -розсіянні, що вказує на більшу роль непружних процесів (поглинання, параметра W_S) в $^7\text{Li} + ^{10}\text{B}$ -розсіянні.

Таблиця 3. Параметри потенціалу взаємодії ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ ($r_c = 1,25$ фм)

Взаємодія ядер	$E_{\text{с.ц.м.}}$ МеВ	Набір параметрів	V_0 МеВ	r_V фм	a_V фм	W_S МеВ	r_W фм	a_W фм	c_V	c_W
${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$	14,12	A ₁	150,0	0,790	0,660	11,0	1,250	0,660	9,88	10,10
		B ₁	176,1	0,795	0,646	9,2	1,257	0,611	10,26	10,73
	21,00	A ₂	189,9	0,790	0,660	14,5	1,250	0,660	10,11	10,38
		B ₂	189,1	0,792	0,676	10,9	1,250	0,645	10,09	10,41
	22,94	A ₃	191,8	0,790	0,660	14,8	1,250	0,660	10,12	10,40
${}^7\text{Li}^*_{0,478} + {}^{10}\text{B}$	20,52	B ₃	187,2	0,792	0,678	10,9	1,250	0,647	10,06	10,38
		A ₄	191,8	0,790	0,660	11,0	1,250	0,660	10,12	10,10
${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}^*_{0,718}$	20,28	B ₄	189,3	0,792	0,675	10,8	1,250	0,644	10,10	10,41
		A ₅	187,0	0,790	0,650	12,3	1,230	0,650	10,17	10,21
${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}^*_{2,154}$	18,84	B ₅	189,4	0,792	0,674	10,8	1,250	0,643	10,11	10,42
		A ₆	185,5	0,790	0,649	13,0	1,250	0,649	10,17	10,40
${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}^*_{3,587}$	17,41	B ₆	189,4	0,792	0,671	10,8	1,250	0,640	10,13	10,46
		A ₇	182,5	0,790	0,645	8,8	1,250	0,645	10,19	10,06
${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}^*_{4,630}$	16,37	B ₇	188,7	0,792	0,666	10,6	1,251	0,634	10,16	10,52
		A ₈	184,4	0,790	0,640	11,9	1,252	0,640	10,24	10,43
${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}^*_{4,774}$	16,22	B ₈	190,2	0,793	0,661	10,3	1,252	0,629	10,21	10,57
		A ₉	173,1	0,790	0,639	8,8	1,256	0,639	10,18	10,17
${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}^*_{5,110}$	15,89	B ₉	189,9	0,793	0,661	10,3	1,252	0,628	10,21	10,58
		A ₁₀	168,3	0,791	0,636	7,5	1,251	0,636	10,18	10,01
${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}^*_{5,920}$	15,08	B ₁₀	188,8	0,793	0,659	10,1	1,252	0,625	10,22	10,60
		A ₁₁	176,2	0,792	0,643	11,0	1,251	0,643	10,10	10,61
${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}^*_{6,127}$	14,87	B ₁₁	184,4	0,794	0,653	9,8	1,254	0,619	10,25	10,66
		A ₁₂	174,5	0,792	0,642	10,8	1,252	0,642	10,10	10,59
${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}^*_{6,680}$	14,32	B ₁₂	182,8	0,794	0,652	9,7	1,254	0,618	10,25	10,67
		A ₁₃	170,7	0,793	0,648	9,9	1,256	0,648	10,12	10,18
${}^7\text{Li}^*_{7,467} + {}^{10}\text{B}$	13,53	B ₁₃	178,2	0,795	0,648	9,4	1,256	0,613	10,26	10,72
		A ₁₄	164,2	0,795	0,641	9,2	1,259	0,641	10,14	10,21
${}^7\text{Li}^*_{9,670} + {}^{10}\text{B}$	11,33	B ₁₄	170,2	0,797	0,641	8,9	1,259	0,605	10,28	10,80
		A ₁₅	144,2	0,809	0,619	7,7	1,281	0,619	10,29	11,46
		B ₁₅	142,0	0,811	0,619	7,7	1,281	0,579	10,38	11,19

Схожа ситуація спостерігаються для ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ -розсіяння і при енергіях $E_{\text{лаб.}}({}^7\text{Li}) = 24$ МеВ (14,1 МеВ в с.ц.м.) [2] та 39 МеВ (22,94 МеВ в с.ц.м.) [3] (див. рис. 4): потенціальне розсіяння домінує на кутах фронтальної напівсфери (криві $\langle \text{OM} \rangle$), процеси реорієнтації ядер ${}^7\text{Li}$ і ${}^{10}\text{B}$ – на великих кутах (криві $\langle r. {}^7\text{Li} \rangle$ і $\langle r. {}^{10}\text{B} \rangle$ відповідно), роль реакцій передач мізерна, МЗКР-перерізи, обчислені з A₁, A₃ та B₁, B₃ наборами параметрів (криві $\langle A_1 \rangle$, $\langle A_3 \rangle$ та $\langle B_1 \rangle$, $\langle B_3 \rangle$ відповідно), значно відрізняються на великих кутах. Параметри B₁, B₃ розраховані на основі енергетичної залежності потенціалів ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ -розсіяння [1]. Добре узгоджуються B₁- та B₃-перерізи з експериментальними даними тільки на кутах $\theta_{\text{с.ц.м.}} < 60^\circ$ ($q_t < 1,7$ фм⁻¹), тобто при взаємодії ядер на великих прицільних відстанях.

Непружне розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$

Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ при енергії для збуджених станів ядер ${}^7\text{Li}$ і ${}^{10}\text{B}$ показано на рис. 6 і 7 відповідно. Як зазначалось вище, у МЗКР-розрахунках

для ядра ${}^7\text{Li}$ використовувались параметри деформації δ_λ із праці [1], а для ядра ${}^{10}\text{B}$ ці параметри отримувались у результаті підгонки МЗКР-перерізів до експериментальних даних. Оптимальні значення довжин деформації δ_λ для ядра ${}^{10}\text{B}$ та обчислені на основі їх значення параметрів $\beta_\lambda = \delta_\lambda/R$ при $R = 1,25A^{1/3} = 1,25 \cdot 10^{1/3} = 2,69$ фм подано у табл. 1 із поміткою „Дана робота”. Видно, що параметри деформації β_λ ядра ${}^{10}\text{B}$, отримані у даній роботі, у багатьох випадках добре узгоджуються із середніми значеннями, одержаними із непружного розсіяння нуклонів, дейтронів і ${}^3\text{He}$. Представлені в табл. 1 параметри деформації δ_λ отримано при використанні у МЗКР-розрахунках для вихідних каналів наборів параметрів A_i (i = 4 – 10, 13 – 15), наведених у табл. 3. Відповідні МЗКР-перерізи представлено на рис. 6 і 7 кривими $\langle A_i \rangle$. Видно, що при цих наборах параметрів досягається задовільний опис експериментальних даних.

Крім МЗКР-розрахунків з A_i-параметрами, було проведено розрахунки з B_i-параметрами

(див. табл. 3), обчисленими на основі енергетичної залежності потенціалу ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ -розсіяння [1] при відповідних кінетичних енергіях вихідних каналів непружного ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ -розсіяння. На рис. 6 і 7 V_i -перерізи представлено кривими $\langle V_i \rangle$ ($i = 4 - 10, 13 - 15$). Видно, що, як і у випадку пружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$, V_i -перерізи у більшості випадків значно відрізняються від експериментальних даних.

Енергетична залежність розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$

На основі отриманих A_i -наборів параметрів $X_i = \{V_0, r_V, a_V, W_S, r_W, a_W\}$ потенціалу розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ (див. табл. 3) можна встановити енергетичну залежність цих параметрів в аналітичному вигляді та порівняти її із відповідною залежністю потенціалу ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ -розсіяння. Для цього наближено отримані A_i -параметри функціями [19]

$$X_i(E) = \begin{cases} X_i^{\max} - (X_i^{\max} - X_i^{\min}) \cdot g(E, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}) & \text{для } X_i = V_0, W_S, a_V, a_W, \\ X_i^{\min} - (X_i^{\max} - X_i^{\min}) \cdot g(E, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}) & \text{для } X_i = r_V, r_W, \end{cases} \quad (8)$$

де

$$g(E, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}) = \left[1 + \exp\left(\frac{E - E_{X_i}}{\Delta E_{X_i}}\right) \right]^{-1}, \quad (9)$$

$H_{X_i} = \{X_i^{\min}, X_i^{\max}, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}\}$ - параметри підгонки енергетичної залежності.

При цьому врахуємо дисперсійне співвідношення між дійсною $V(r, E)$ та уявною $W(r, E)$ частинами потенціалу розсіяння [20]

$$V(r, E) = V_0(r, E) + \Delta V_W(r, E), \quad (10)$$

де

$$\Delta V_W(r, E) = \frac{P}{\pi} \int_0^\infty \frac{W(r, E')}{E' - E} dE' \quad (11)$$

(P указує на головне значення інтеграла). При $r = 0$ ці співвідношення виражають зв'язок між параметрами глибин дійсної та уявної частин потенціалу розсіяння.

Параметри ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ -потенціалу (див. табл. 3) з можливими похибками $\sim 10\%$ представлено на рис. 10. Суцільними кривими показано наближення їх функціями (8) - (11) шляхом підгонки параметрів енергетичної залежності $H_{X_i} = \{X_i^{\min}, X_i^{\max}, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}\}$. Отримані в результаті підгонки значення цих параметрів подано у табл. 4.

На рис. 10 для порівняння показано також енергетичну залежність параметрів потенціалу взаємодії ядер ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ (штрихові криві) [1]. Видно, що найбільша різниця спостерігається між енергетичними залежностями параметра W_S .

Як відомо, між параметрами потенціалу Вудса - Саксона існують зв'язки типу

$$C_V = V \exp\left(\frac{R_V}{a_V}\right), \quad C_W = W_S \exp\left(\frac{R_W}{a_W}\right), \quad (12)$$

де R_V і R_W - ефективні радіуси дійсної та уявної частин потенціалу; C_V і C_W - константи, якими

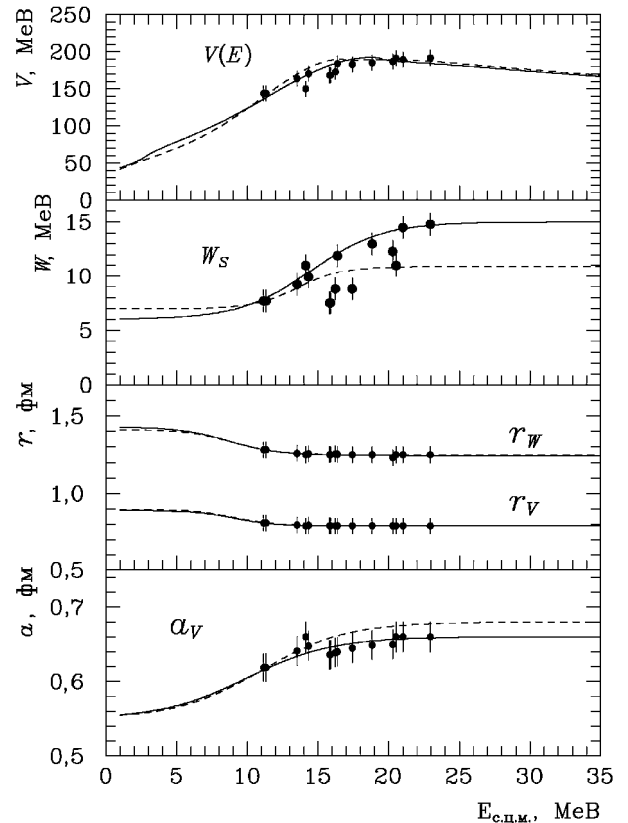


Рис. 10. Енергетичні залежності параметрів потенціалів розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ (точки та суцільні криві) і ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ (штрихові криві).

характеризується дискретна невизначеність параметрів потенціалу розсіяння. Логарифми $c_V = \ln(C_V)$ і $c_W = \ln(C_W)$ цих констант для ефективних радіусів R_V і R_W ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ -потенціалу наведено у табл. 3 та показано на рис. 11: темними точками - для A_i -параметрів і світлими точками -

для V_i -параметрів. Видно, що константи c_V і c_W енергозалежні. Їх енергетична залежність задовільно описується такими поліномами:

$$c_V = 10,33 - 0,0204E + 0,0005E^2, \quad (13)$$

$$c_W = 12,16 - 0,2368E + 0,0070E^2 \quad (14)$$

для A_i -параметрів (суцільні криві) та

$$c_V = 10,99 - 0,0686E + 0,0012E^2, \quad (15)$$

$$c_W = 13,87 - 0,3307E + 0,0079E^2 \quad (16)$$

для V_i -параметрів (${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ -розсіяння) (штрихові криві). Видно, що величини c_V та c_W для параметрів ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ - і ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ -потенціалів мають різну енергетичну залежність у дослідженому інтервалі енергій.

Таблиця 4. Параметри енергетичної залежності потенціалу взаємодії ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$

Y_i	X_i					
	V_0 , MeB	W_S , MeB	r_V , фм	r_W , фм	a_V , фм	a_W , фм
X_i^{\min}	110,0	6,0	0,790	1,246	0,550	0,550
X_i^{\max}	270,0	15,0	0,890	1,430	0,660	0,660
E_{Xb} , MeB	12,5	14,5	9,100	8,700	10,000	10,000
ΔX_b , MeB	3,5	2,5	1,400	1,800	3,000	3,000

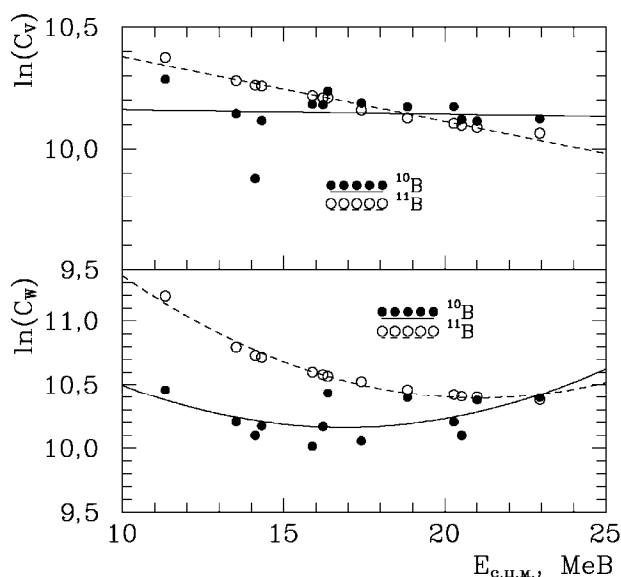


Рис. 11. Енергетичні залежності величин $\ln(C_V)$ та $\ln(C_W)$ потенціалів розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ (темні точки і суцільні криві) та ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ (світлі точки і штрихові криві).

На рис. 12 показано радіальні залежності дійсних $V(r)$ та уявних $W_S(r)$ частин потенціалів розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ -потенціалу з параметрами A_i (суцільні криві) та B_i (штрихові криві). Видно, що при $r > 6$ фм

${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ -потенціал з A_i - та B_i -наборами параметрів мало відрізняється. Взаємодія ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ на таких відстанях відбувається з передачею малого значення імпульсу q , що призводить до розсіяння на малі кути, де теоретичні перерізи слабо залежать від наборів параметрів потенціалу розсіяння (у нашому випадку на кути $\theta_{с.п.м.} < 40^\circ$).

$V, W, \text{ MeB}$

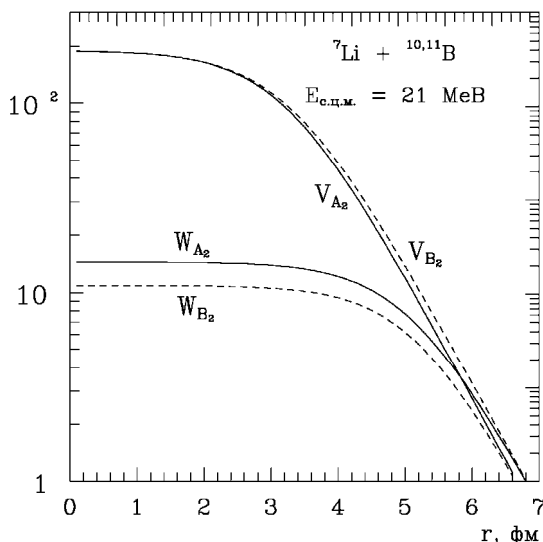


Рис. 12. Радіальні залежності дійсних $V(r)$ та уявних $W_S(r)$ частин потенціалів розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ (суцільні криві) і ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ (штрихові криві).

Основні результати та висновки

Поміряно диференціальні перерізи пружного та непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{10}\text{B}) = 51 \text{ MeB}$ (21 MeB у с.п.м.) для виходу ядер в основних і збуджених станах $E_{зб.}({}^7\text{Li}) = 0,478 - 9,85 \text{ MeB}$ та $E_{зб.}({}^{10}\text{B}) = 0,718 - 5,18 \text{ MeB}$.

Отримані у даній роботі експериментальні дані ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ -розсіяння та відомі при енергіях $E_{\text{лаб.}}({}^7\text{Li}) = 24 \text{ MeB}$ (14,12 MeB у с.п.м.) [2] і 34 MeB (22,94 у с.п.м.) [3] проаналізовано за ОМ та МЗКР. Установлено, що у пружному розсіянні ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ на кути $\theta_{с.п.м.} < 90^\circ$ домінує потенціальне розсіяння, а на великі кути - реорієнтація ядер ${}^7\text{Li}$ і ${}^{10}\text{B}$. Одно- і двоступінчасті реакції передач відіграють другорядну роль.

З аналізу експериментальних даних отримано значення параметрів потенціалу розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ для основних і збуджених станів, а також параметри деформації δ_λ ядра ${}^{10}\text{B}$.

На основі отриманих наборів параметрів ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ -потенціалу встановлено їх енергетичну залежність в аналітичній формі. Виявлено відмінності параметрів ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ - і ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ -потенціалів (ізотопічний ефект розсіяння). Відрізняються ці потенціали, в основному, своїми уявними частинами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rudchik A. A., Rudchik A. T., Kozeratska G. M. et al. ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ elastic and inelastic scattering in a coupled-channels approach // Phys. Rev. C. - 2005. - Vol. 72. - P. 034608-1/9.
2. Weber K. A., Meier-Ewert K., Schmidt-Böcking H. et al. elastic scattering of ${}^7\text{Li}$ from light target nuclei // Nucl. Phys. A. - 1972. - Vol. 186. - P. 145 - 151.
3. Etchegoyen A., Etchegoyen M. C., Izquierdo E. D. et al. ${}^{10}\text{B}({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be}){}^{10}\text{Be}$ charge-exchange reaction // Phys. Rev. C. - 1988. - Vol. 38. - P. 2124 - 2133.
4. Chernievsky V. K., Rusek K., Budzanowski A. et al. Експериментальна установка для дослідження ядерних реакцій на Варшавському циклотроні U-200P // 36. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2002. - №2 (8). - С. 216.
5. Kowalczyk M., SMAN: A Code for Nuclear Experiments, 1998 Warsaw University report.
6. Khoa Dao T., Von Oertzen W., Bohlen H. G., Nuoffer F. // Nucl. Phys. A. - 2000. - Vol. 672. - P. 387.
7. Momotyuk O. A., Keeley N., Kemper K. W. et al. Target structure independent ${}^7\overline{\text{Li}}$ elastic scattering at low momentum transfer // Phys. Lett. B. - 2006. - Vol. 640. - P. 13.
8. Squier G. T. A., McClatchie E. A., Johnston A. R. et al. elastic and inelastic scattering of ${}^3\text{He}$ particles from ${}^{10}\text{B}$ at 32 MeV // Nucl. Phys. A. - 1968. - Vol. 119. - P. 369 - 378.
9. Stocker H., Browne C. P. isobaric-spin violation in the reaction ${}^{10}\text{B}(d,d'){}^{10}\text{B}$ // Phys. Rev. C. - 1974. - Vol. 9. - P. 102 - 115.
10. Vaucher B., Alder J. C., Joseph C. Scattering of 14.1 MeV Neutrons by ${}^{10}\text{B}$ // Helv. Phys. Acta - 1970. - Vol. 43. - P. 237.
11. De Swiniarski R., Resmini F.G., Glashausser C., Bacher A.D. // Helv. Phys. Acta. - 1976. - Vol. 49. - P. 227.
12. Smirnov Yu.F., Tchuvil'sky Yu.M. Cluster spectroscopic factors for the p-shell nuclei // Phys. Rev. C. 1977. - Vol. 15, No. 1. - P. 84 - 93.
13. Рудчик А. Т., Чувильский 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).
14. Рудчик А. Т., Чувильский Ю. М. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1p-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач // УФЖ. - 1985. - Т. 30, № 6. - С. 819 - 825.
15. Бояркина А. Н. Структура ядер 1p-оболочки. - М.: Изд-во Москов. ун-та, 1973.- 62 с.
16. Nilsson B. S. SPI-GENOA: an Optical Model SearchCode. 1976 (Report/A Niels Bohr Institute).
17. Thompson I. J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comp. Phys. Rep. - 1988. Vol. 7. - P. 167.
18. Cook J., Abdallah A. K., Stephens M. N. et al. Target and projectile excitation of ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ // Phys. Rev. C. - 1987. - Vol. 35. - P. 126 - 136.
19. Rudchik A. T., Budzanowski A., Chernievsky V. K. et al. The ${}^{11}\text{B} + {}^{12}\text{C}$ elastic and inelastic scattering at $E_{\text{lab}}({}^{11}\text{B}) = 49$ MeV and energy dependence of the ${}^{11}\text{B} + {}^{12}\text{C}$ interaction // Nucl. Phys. A. - 2001. - Vol. 695. - P. 51 - 68.
20. Mahaux C., Ngö H., Satchler G. R., Casuality and the threshold anomaly of the nucleus-nucleus potential // Nucl. Phys. A. - 1986. - 449. P. 354 - 394.

УПРУГОЕ И НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ЯДЕР ${}^7\text{Li} + {}^{10,11}\text{B}$

А. Т. Рудчик, В. О. Романишин, Е. И. Кошый, А. Будзановски, К. В. Кемпер, К. Русек, Л. Гловацка, В. М. Кирьянчук, С. Кличевски, С. Ю. Межевич, А. В. Мохнач, О. А. Момотюк, О. А. Понкратенко, И. Сквирчиньска, В. Р. Сюдак, Т. Хоиньски, В. Д. Чеснокова, Б. Чех, Т. Чосныка, А. Щурек

Получены новые экспериментальные данные дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ при энергии $E_{\text{лаб}}({}^{10}\text{B}) = 51$ МэВ (21 МэВ в с.ц.м.) для переходов в основные и возбужденные состояния ядер. Эти, а также известные из литературных источников данные упругого рассеяния ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ при энергиях $E_{\text{лаб}}({}^7\text{Li}) = 24$ МэВ (14,12 МэВ в с.ц.м.) и 39 МэВ (22,94 МэВ в с.ц.м.) проанализированы по оптической модели и методу связанных каналов реакций. В схему связи включались упругое и неупругое рассеяние ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$, процессы реориентации ядер в основных и возбужденных состояниях, а также наиболее важные реакции передач. Получены значения параметров потенциала взаимодействия ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ в основных и возбужденных состояниях, их энергетическая зависимость, а также параметры деформации ядер ${}^7\text{Li}$ и ${}^{10}\text{B}$. Определены механизмы рассеяния ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$. Обнаружены отличия в рассеянии ядер ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ и ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ (изотопический эффект рассеяния).

${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ ELASTIC AND INELASTIC SCATTERING

**A. T. Rudchik, V. O. Romanyshyn, E. I. Koshchy, A. Budzanowski, K. W. Kemper, K. Rusek,
V. D. Glowacka, V. M. Kyryanchuk, L. S. Kliczewski, S. Yu. Mezhevych, A. V. Mokhnach,
O. A. Momotyuk, O. A. Ponkratenko, I. Skwirczyńska, R. Siudak, T. Choiński,
V. D. Chesnokova, B. Czech, T. Czosnyka, A. Szczurek**

Angular distributions of the ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ elastic and inelastic scattering were measured at the energy $E_{\text{lab}}({}^{10}\text{B}) = 51 \text{ MeV}$ (21 MeV c.m.). These and previously measured ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ elastic scattering data known at the ${}^7\text{Li}$ -beam energies 24 MeV (14.1 MeV c.m.) and 39 MeV (22.94 MeV c.m.), were analyzed within the optical model and coupled-reaction-channels method. Elastic and inelastic scattering of ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$, reorientation of ${}^7\text{Li}$ and ${}^{10}\text{B}$ in ground and excited states as well as more important transfers were included in the coupling-channels scheme. The ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ potential parameters for the interaction of these nuclei in ground and excited states, parameter energy dependence as well as deformation parameters of ${}^7\text{Li}$ and ${}^{10}\text{B}$ were deduced. Mechanism of the ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ scattering was obtained. Difference between scattering of ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$ and ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ (scattering isotopic effects) was found.

Надійшла до редакції 09.01.07,
після доопрацювання – 05.04.07.