

А. Т. Рудчик¹, В. Ю. Канищев¹, А. А. Рудчик¹, О. А. Понкратенко¹, Є. І. Кошій², С. Клічевскі³,
К. Русек^{4,5}, В. А. Плюйко⁶, С. Ю. Межевич¹, Вал. М. Пірнак¹, А. П. Ільїн¹, В. В. Улещенко¹,
Р. Сюдак³, Я. Хоїньскі³, Б. Чех³, А. Щурек³

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

² Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків

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

⁴ Національний інститут ядерних досліджень, Варшава, Польща

⁵ Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

⁶ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

ПРУЖНЕ Й НЕПРУЖНЕ РОЗСІЯННЯ ІОНІВ ^{12}C ЯДРАМИ ^7Li ПРИ ЕНЕРГІЇ 115 МеВ

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{12}\text{C}) = 115$ МеВ у комплексному експерименті з одночасним вимірюванням перерізів реакцій передач з виходом ядер із $Z = 3 - 7$. Експериментальні дані проаналізовано за оптичною моделлю та методом зв'язаних каналів реакцій. Пружне й непружне розсіяння, процеси реорієнтації спіну ^7Li в основних та збуджених станах, а також найбільш важливі реакції передач включались у схему зв'язку каналів. Визначено параметри оптичного потенціалу взаємодії ядер $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$ в основних та збуджених станах, а також параметри деформації ядер ^7Li і ^{12}C . Оцінено внески реакцій одно- та двоступінчастих передач у диференціальні перерізи пружного й непружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$.

Ключові слова: розсіяння важких іонів, оптична модель, метод зв'язаних каналів реакцій, спектроскопічні амплітуди, оптичні потенціали, механізми реакцій.

Вступ

Одним з актуальних напрямків фізики важких іонів є дослідження властивостей нестабільних ядер за допомогою реакцій передач з використанням даних комплексних експериментів з одночасним вимірюванням розсіяних іонів та вихідних стабільних і нестабільних ядер. При цьому експериментальні дані пружного й непружного розсіяння іонів необхідні для визначення параметрів взаємодії ядер у вхідних каналах реакцій.

У даній роботі представлено результати першого етапу комплексного дослідження ядерних процесів $^7\text{Li}(^{12}\text{C}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{12}\text{C}) = 115$ МеВ з виходом ядер із $Z = 3 - 7$. На цьому етапі досліджено пружне й непружне розсіяння $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$ даного комплексного експерименту.

Варто відзначити, що в літературі відомі експериментальні дані пружного розсіяння ядер $^{12}\text{C}(^7\text{Li}, ^7\text{Li})^{12}\text{C}$ у широкому діапазоні енергій $E_{\text{лаб.}}(^7\text{Li}) = 4,5 - 350$ МеВ, що може бути предметом окремого дослідження енергетичної залежності розсіяння цих ядер та параметрів потенціалів їхньої взаємодії.

Методика експерименту

Диференціальні перерізи ядерних процесів $^7\text{Li}(^{12}\text{C}, X)$ з виходом ядер із $Z = 3 - 7$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{12}\text{C}) = 115$ МеВ вимірювались на Варшав-

ському циклотроні U-200P. В експерименті використовувалась самопідтримна мішень літію природного ізотопного складу ($^7\text{Li} - 92,5\%$, $^6\text{Li} - 7,5\%$) товщиною ~ 900 мкг/см². Розкид енергії пучка іонів на мішені не перевищував 0,5 %.

Продукти реакцій реєструвались трьома ΔE -E-спектрометрами з кремнієвими E-детекторами товщиною ~ 1 мм. У двох спектрометрах ΔE -детекторами служила іонізаційна камера з аргоном як робочим газом, при проходженні якого продукти реакцій втрачали таку ж енергію, як у кремнієвому ΔE -детекторі товщиною ~ 15 мкм. У третьому детекторі використовувався кремнієвий ΔE -детектор товщиною 67 мкм.

В експерименті застосовувались електроніка стандарту САМАС та програмна система SMAN [1] для накопичення та отримання $\Delta E(E)$ -спектрів на базі персонального комп'ютера. Детальний опис експериментальної установки міститься в роботі [2].

Типові двовимірні $\Delta E(E)$ -спектри продуктів ядерних процесів $^7\text{Li}(^{12}\text{C}, X)$ від ΔE -E-спектрометрів з кремнієвим ΔE -детектором та з іонізаційною камерою показано на рис. 1. Видно, що експериментальна методика з двома кремнієвими детекторами забезпечувала ідентифікацію продуктів реакцій як за зарядами, так і за масами, а спектрометри з іонізаційною камерою – тільки за зарядами.

© А. Т. Рудчик, В. Ю. Канищев, А. А. Рудчик, О. А. Понкратенко, Є. І. Кошій, С. Клічевскі, К. Русек, В. А. Плюйко, С. Ю. Межевич, Вал. М. Пірнак, А. П. Ільїн, В. В. Улещенко, Р. Сюдак, Я. Хоїньскі, Б. Чех, А. Щурек, 2013

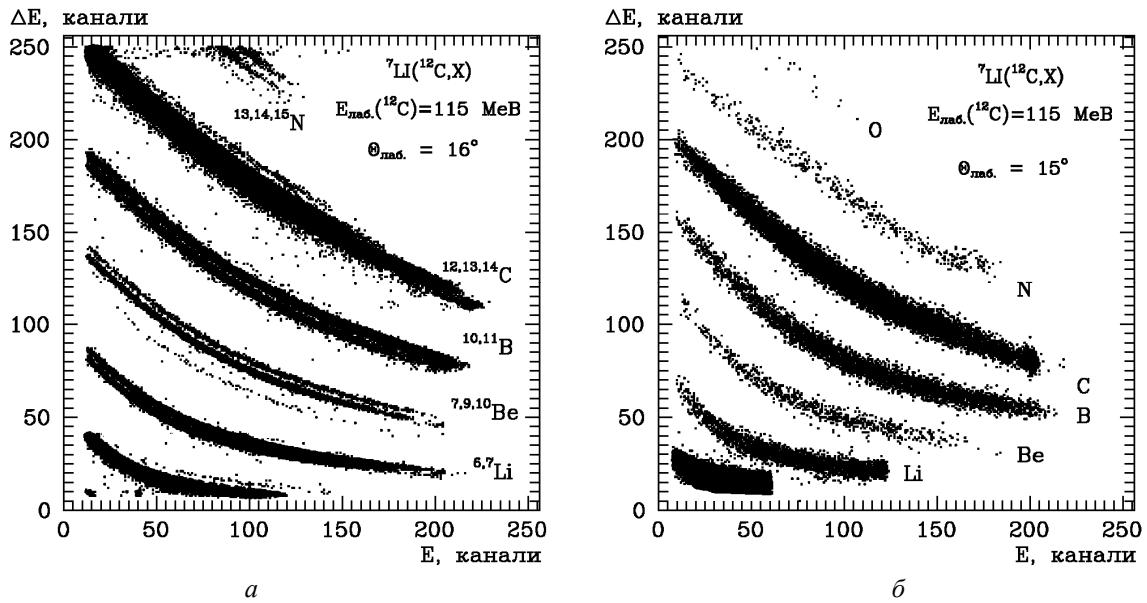


Рис. 1. Типові $\Delta E(E)$ -спектри продуктів реакцій ${}^7\text{Li}({}^{12}\text{C}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{12}\text{C}) = 115$ МеВ, зареєстровані ΔE - E -спектрометрами а) з кремнієвим ΔE -детектором та б) з іонізаційною камерою.

Типові енергетичні спектри ${}^{12}\text{C}$ і ${}^7\text{Li}$, отримані проектуванням відповідних локусів двовимірного $\Delta E(E)$ -спектра на E -вісь, показано на рис. 2 і 3: а) експериментальні спектри з неперервним фо-

ном від багаточастинкових реакцій та інших процесів, б) спектри після вилучення фону. Неперервні фони експериментальних спектрів наближувались параметризованими функціями

$$N(E) = \sum_i N_{0i} \left[1 + \exp\left(-\frac{E - E_{1i} + E_{2i}/2}{H_{1i}}\right) \right]^{-1} \left\{ 1 - \left[1 + \exp\left(-\frac{E - E_{1i} - E_{2i}/2}{H_{2i}}\right) \right]^{-1} \right\} \quad (1)$$

підгонкою параметрів E_{1i} , E_{2i} , H_{1i} , H_{2i} , до мінімальних значень спектрів. Ці наближення на рис. 2, а і 3, а показано суцільними кривими.

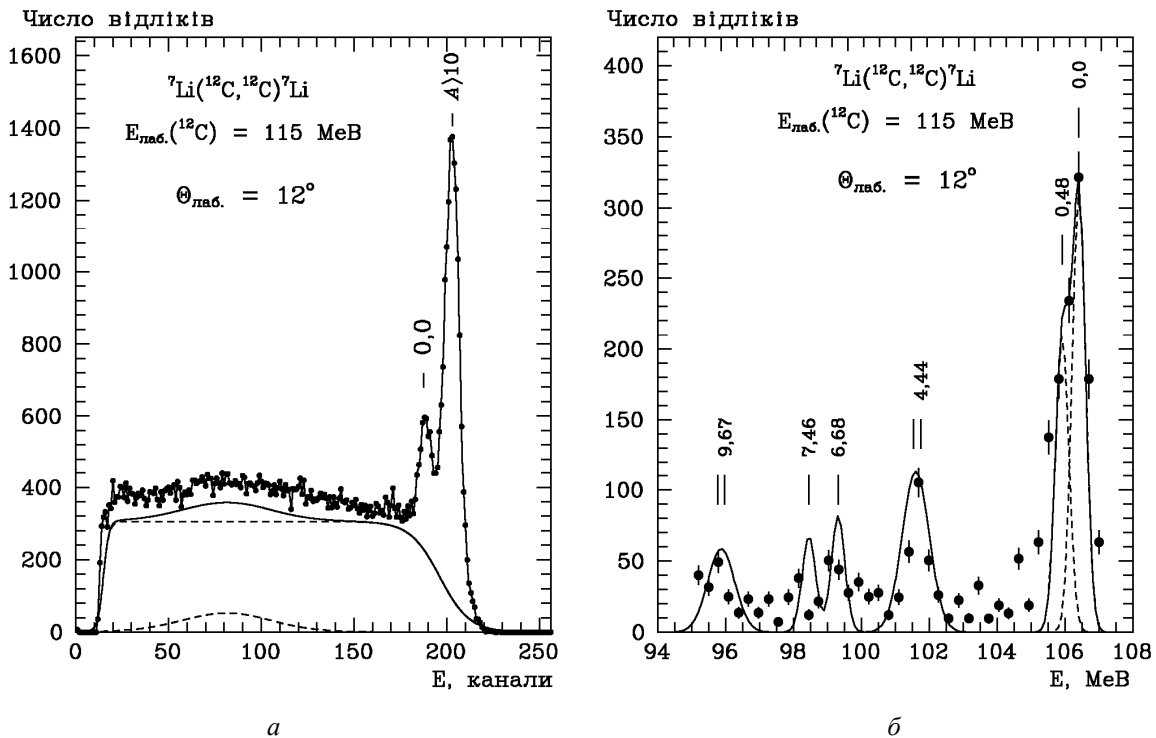


Рис. 2. Типові енергетичні спектри ядер ${}^{12}\text{C}$ із розсіяння ${}^7\text{Li}({}^{12}\text{C}, {}^{12}\text{C})$ а) з неперервним фоном (криві – наближення фону) та б) без фону (криві - гаусіани).

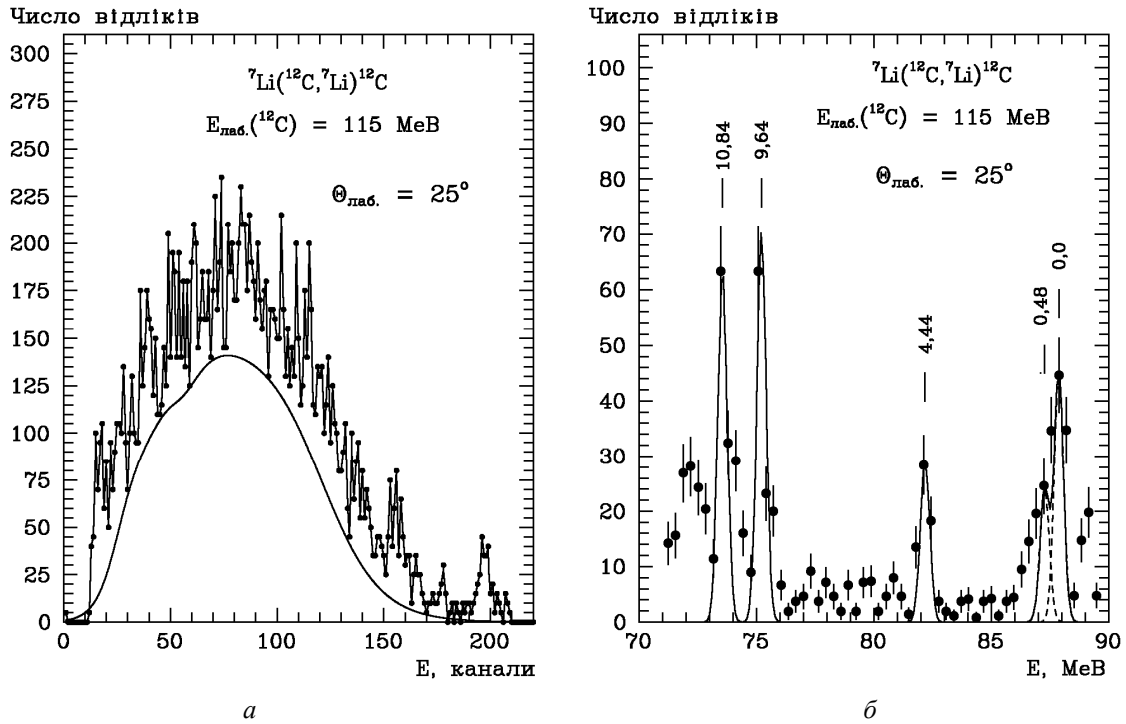


Рис. 3. Типові енергетичні спектри ядер ^7Li з реакції $^7\text{Li}(^{12}\text{C}, ^7\text{Li})^{12}\text{C}$ а) з неперервним фоном (криві – наближення фону) та б) без фону (криві - гаусіани).

Піки в енергетичних безфонових спектрах (див. рис. 2, б і 3, б), що відповідають основним та збудженим станам ядер ^{12}C і ^7Li , наближувались симетричними гаусіанами

$$N(E) = \sum_i N_i \exp\left(-0,5 \frac{(E - E_i)^2}{h_i^2}\right) \quad (2)$$

з використанням кінетичних енергій E_i для відповідних рівнів ядер та усередненого значення h_i ширин ізольованих піків. Підганялись лише максимальні значення N_i гаусіанів. На рисунках над піками показано енергії відповідних рівнів ядер ^{12}C і ^7Li . Енергетична роздільна здатність методики була обумовлена, в основному, розкидом енергії іонів в пучку на мішені ($\sim 0,5\%$) та неоднорідними втратами ними енергії в мішені. Як видно на рис. 2, б і 3, б, роздільно спостерігались лише стани ядер з різницею енергій рівнів $E > 0,5$ MeV.

Площі гаусіанів використовувались для визначення диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння іонів ^{12}C ядрами ^7Li . При цьому для розсіяння іонів ^{12}C на великі кути використовувались площі піків спектрів ^7Li , враховуючи співвідношення $\theta_{\text{с.ц.м.}}(^{12}\text{C}) = 180^\circ - \theta_{\text{с.ц.м.}}(^7\text{Li})$. Для отримання перерізів в абсолютних одиницях проводилось нормування їх до

розрахованих за оптичною моделлю (ОМ) диференціальних перерізів пружного розсіяння іонів ^{12}C на малі кути, де в основному переважає кулонівське розсіяння й теоретичні розрахунки незначно залежать від неоднозначності параметрів оптичного потенціалу. Похибка такої нормалізації перерізів не перевищує 20%. Отриманий нормувальний множник використовувався також для абсолютизації перерізів непружного розсіяння іонів ^{12}C .

У даному експерименті при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{12}\text{C}) = 115$ MeV поміряно диференціальні перерізи пружного розсіяння іонів ^{12}C ядрами ^7Li та непружного розсіяння цих іонів із збудженням станів $0,478$ MeV ($1/2^-$), $4,63$ MeV ($7/2^-$), $6,68$ MeV ($5/2^-$), $7,46$ MeV ($5/2^-$) і $9,67$ MeV ($7/2^-$) + $9,85$ MeV ($3/2^-$) ядра ^7Li та збудженого стану $4,439$ MeV (2^+) ядра ^{12}C . Ці експериментальні дані та відповідні теоретичні розрахунки показано на рис. 4 - 7.

Аналіз експериментальних даних

Методи теоретичних розрахунків

Експериментальні дані пружного й непружного розсіяння ядер ^7Li + ^{12}C аналізувались за ОМ та методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) з використанням ядерного потенціалу типу Вудса - Саксона з об'ємним і поверхневим поглинаннями

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

$$+ i4W_D \exp\left(\frac{r - R_{W_D}}{a_{W_D}}\right) \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_{W_D}}{a_{W_D}}\right) \right]^{-2} \quad (3)$$

та кулонівського потенціалу рівномірно зарядженої кулі

$$V_C(r) = \begin{cases} Z_P Z_T e^2 (3 - r^2 / R_C^2) / 2R_C, & r \leq R_C, \\ Z_P Z_T e^2 / r, & r > R_C, \end{cases} \quad (4)$$

де

$$R_i = r_i (A_p^{1/3} + A_T^{1/3}), \quad (i = V, W, C); \quad (5)$$

A_P, Z_P та A_T, Z_T – маси та заряди ядер іонів і мішені відповідно. В усіх розрахунках параметр $r_C = 1,25$ фм.

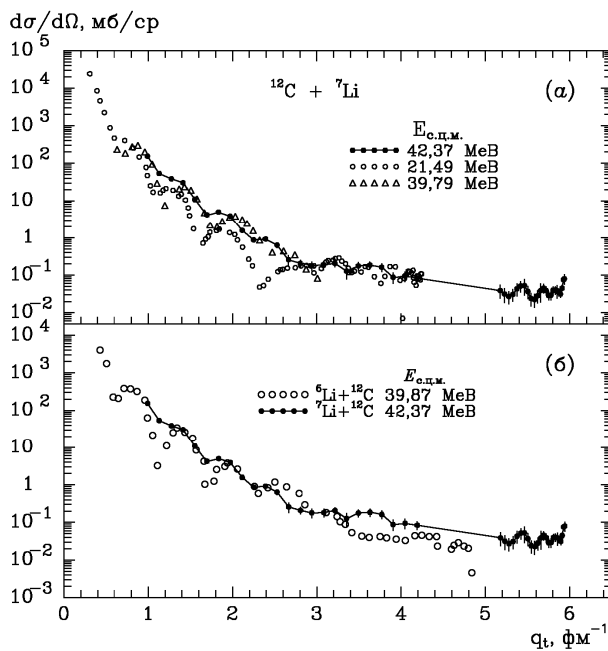


Рис. 4. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ залежно від переданого імпульсу при енергіях $E_{\text{лаб.}}({}^{12}\text{C}) = 115$ MeB ($E_{\text{с.ц.м.}} = 42,37$ MeB), $E_{\text{лаб.}}({}^7\text{Li}) = 34$ MeB (21,49 MeB) [12], 63 MeB (39,79 MeB) [13] та розсіяння ядер ${}^6\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^6\text{Li}) = 59,8$ MeB (39,87 MeB) [14].

Аналіз експериментальних даних розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ проводився двоетапно. Спочатку аналізувались дані пружного розсіяння цих ядер за ОМ. Визначались параметри потенціалу взаємодії ядер ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ методом підгонки ОМ-перерізів до експериментальних даних цього розсіяння за χ^2 -критерієм. При цьому особлива увага зверталась на задовільний опис даних для кутів $\theta_{\text{с.ц.м.}} < 90^\circ$. Отриманий ОМ-набір параметрів (${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$)-потенціалу використовувався як початковий при наступному етапі аналізу даних за МЗКР.

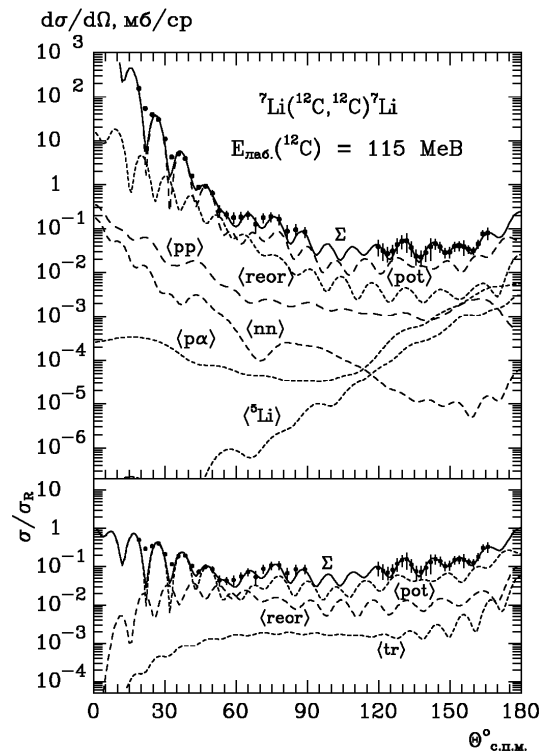


Рис. 5. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li}({}^{12}\text{C}, {}^{12}\text{C}){}^7\text{Li}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{12}\text{C}) = 115$ MeB. Штрихові криві – МЗКР-перерізи для різних процесів (пояснення в тексті). Суцільні криві Σ – когерентні суми МЗКР-перерізів усіх ядерних процесів.

При виконанні МЗКР-розрахунків у схему зв'язку каналів включались пружне та непружне розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$, процеси реорієнтації спінів ядер та наймовірніші реакції передач нуклонів і кластерів.

При аналізі непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ за МЗКР вважалось, що досліджувані збуджені стани ядер ${}^7\text{Li}$ і ${}^{12}\text{C}$ мають колективну природу (ротаційні або вібраційні). У розрахунках матричних елементів переходів ядер у збуджені стани використовувався оператор

$$V_\lambda(r) = -\frac{\delta_\lambda}{\sqrt{4\pi}} \frac{dU(r)}{dr}, \quad (6)$$

де δ_λ - параметр деформації ядра λ -мультимольності.

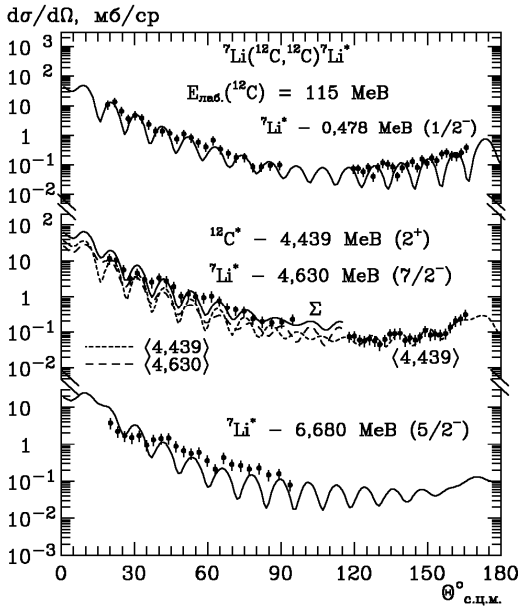


Рис. 6. Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li}({}^{12}\text{C}, {}^{12}\text{C}){}^7\text{Li}^+$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{12}\text{C}) = 115$ MeB для збуджених станів 0,478 MeB ($1/2^-$), 4,630 MeB ($7/2^-$) і 6,680 MeB ($5/2^-$) ядра ${}^7\text{Li}$ та стану 4,439 MeB (2^+) ядра ${}^{12}\text{C}$. Криві – МЗКР-розрахунки. Кривою Σ показано некогерентну суму МЗКР-перерізів нерозділених в експерименті станів ядер.

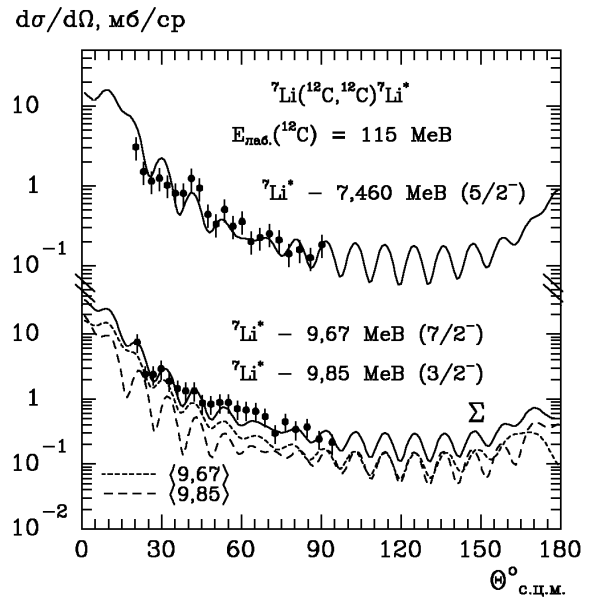


Рис. 7. Те ж саме, що на рис. 6, але для збуджених станів 7,460 MeB ($5/2^-$) і 9,67 MeB ($7/2^-$) + 9,85 MeB ($3/2^-$) ядра ${}^7\text{Li}$.

Схеми переходів ядер ${}^7\text{Li}$ і ${}^{12}\text{C}$ у збуджені стани показано на рис. 8. Дугами на рисунку показано процеси реорієнтації спінів ядер. Матричні елементи реорієнтації спінів ядер обчислювалися як квадрупольні колективні переходи. Параметри деформації δ_λ ядер ${}^7\text{Li}$ і ${}^{12}\text{C}$ та передавані орбітальні моменти λ подано в табл. 1.

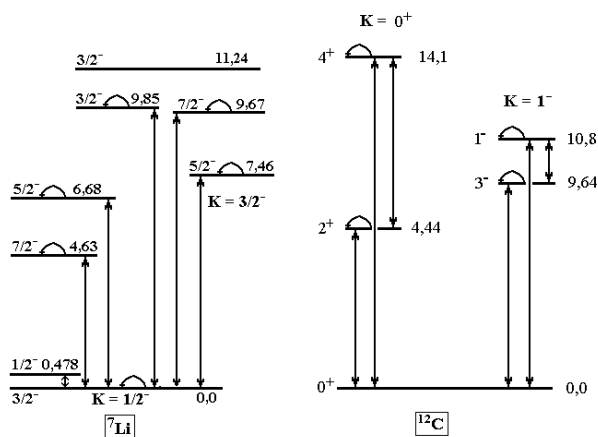


Рис. 8. Схеми переходів ядер ${}^7\text{Li}$ і ${}^{12}\text{C}$ у збуджені стани. Дугами позначено переходи реорієнтації спінів ядер

Діаграми реакцій передач, що включались у схему зв'язку каналів при проведенні МЗКР-розрахунків, показано на рис. 9. Необхідні для

МЗКР-розрахунків спектроскопічні амплітуди S_x нуклонів і кластерів x в ядерних системах $A = C + x$ обчислювалися методом Смірнова - Чувільського в рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки (ТІМО) [3] за допомогою програми DESNA [4, 5] з використанням таблиць хвильових функцій ядер 1р-оболонки А. Н. Бояркіної [6]. Спектроскопічні амплітуди S_x подано в табл. 2.

ОМ- та МЗКР-розрахунки проводилися за допомогою програм SPI-GENOA [7] та FRESKO [8] відповідно.

Для взаємодії ядер ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ було обчислено фолдінг-потенціал за моделлю подвійної згортки:

$$V_f(r) = \int \rho_P(r_P) \rho_T(r_T) \nu(|\vec{r} + \vec{r}_T - \vec{r}_P|) d^3r_P d^3r_T, \quad (7)$$

де $\rho_P(r_P)$, $\rho_T(r_T)$ - розподіли густин нуклонів в ядрах ${}^{12}\text{C}$ (P) і ${}^7\text{Li}$ (T) відповідно; $\nu(|\vec{r} + \vec{r}_T - \vec{r}_P|) = \nu(s)$ - нуклон-нуклонний потенціал; \vec{r} - відстань між центрами ядер. У розрахунках потенціалу $V_f(r)$ використовувався потенціал нуклон-нуклонної взаємодії МЗУ Рейда (Reid). Розподіли нуклонів $\rho_T(r_T)$ і $\rho_P(r_P)$ обчислювалися за розподілами зарядів (протонів) в ядрах ${}^7\text{Li}$ і ${}^{12}\text{C}$ [9]. Розрахунок фолдінг-потенціалу проводився за допомогою програми DFPOT [10, 11].

Таблиця 1. Параметри деформації ядер

Ядро	E_{36} , МеВ	J^π	λ	$\delta_{\lambda 2}$, фМ	β_{λ}^*
${}^7\text{Li}$	0,0	$3/2^-$	2	2,0	0,84
	0,478	$1/2^-$	2	2,0	0,84
	4,630	$7/2^-$	2	2,0	0,84
			4	1,0	0,42
	6,680	$5/2^-$	2	2,0	0,84
			4	1,0	0,42
	7,467	$5/2^-$	2	2,0	0,84
			4	1,0	0,42
	9,670	$7/2^-$	2	2,0	0,84
${}^{12}\text{C}$	9,850	$3/2^-$	2	2,0	0,84
	4,439	2^+	2	-1,0	-0,35

* $\beta_{\lambda} = \delta_{\lambda}/R$, $R = 1,25A^{1/3}$ фМ.

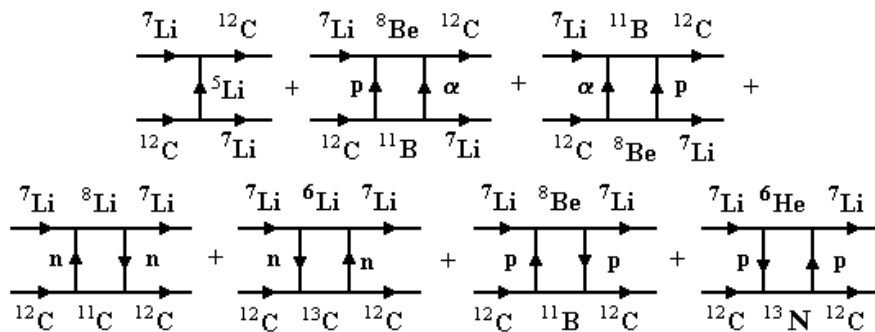


Рис. 9. Діаграми найпростіших реакцій передач ${}^7\text{Li}({}^{12}\text{C}, X)$ з виходом ядер ${}^7\text{Li}$ та ${}^{12}\text{C}$.

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

A	C	x	nL_j	S_x
${}^7\text{Li}$	${}^6\text{He}$	p	$1P_{3/2}$	0,805
${}^7\text{Li}$	${}^6\text{Li}$	n	$1P_{1/2}$	-0,657
			$1P_{3/2}$	-0,735 ^(a)
${}^8\text{Li}$	${}^7\text{Li}$	n	$1P_{1/2}$	0,478
${}^8\text{Be}$	${}^7\text{Li}$	p	$1P_{3/2}$	1,234 ^(a)
${}^{11}\text{B}$	${}^7\text{Li}$	α	$3S_0$	-0,638
${}^{12}\text{C}$	${}^7\text{Li}$	${}^5\text{Li}$	$3S_{3/2}$	-0,793 ^(a)
			$2D_{3/2}$	-0,525 ^(a)
			$2D_2$	-0,422
${}^{12}\text{C}$	${}^8\text{Be}$	α	$3S_0$	0,822
${}^{12}\text{C}$	${}^{11}\text{B}$	p	$1P_{3/2}$	-1,706 ^(a)
${}^{12}\text{C}$	${}^{11}\text{C}$	n	$1P_{3/2}$	1,706 ^(a)
${}^{13}\text{C}$	${}^{12}\text{C}$	n	$1P_{1/2}$	0,601
${}^{13}\text{N}$	${}^{12}\text{C}$	p	$1P_{1/2}$	0,601

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

Пружне розсіювання ядер ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$

Диференціальні перерізи пружного розсіювання ядер ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{12}\text{C}) = 115$ МеВ ($E_{\text{с.ц.м.}} = 42,37$ МеВ) залежно від переданого імпульсу q_t представлено на рис. 4 у порівнянні а) з даними цього розсіювання при енергіях $E_{\text{лаб.}}({}^7\text{Li}) = 34$ МеВ ($E_{\text{с.ц.м.}} = 21,49$ МеВ) [12] і $E_{\text{лаб.}}({}^7\text{Li}) = 63$ МеВ ($E_{\text{с.ц.м.}} = 39,79$ МеВ) [13] та б) з даними пружного розсіювання ядер ${}^6\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^6\text{Li}) = 59,8$ МеВ ($E_{\text{с.ц.м.}} = 39,87$ МеВ)

[14]. Видно, що поміряні нами диференціальні перерізи пружного розсіювання ядер ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ добре узгоджуються з даними цього розсіювання при інших енергіях (а) та незначно відрізняються від даних пружного розсіювання ядер ${}^6\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ при енергії $E_{\text{с.ц.м.}} = 39,87$ МеВ (б).

На рис. 5 кривими показано МЗКР-розрахунки для пружного розсіювання ядер ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{12}\text{C}) = 115$ МеВ для потенціального розсіювання (крива <pot>), процесу реорієнтації спіну ${}^7\text{Li}$ (крива <reor>), реакції передачі

^5Li -кластера (крива $\langle ^5\text{Li} \rangle$), послідовних передач протонів і нейтронів (криві $\langle pp \rangle$ і $\langle nn \rangle$ відповідно) та протона і α -кластера $-p + \alpha$ і $\alpha + p$ (крива $\langle p\alpha \rangle$, когерентна сума). Видно, що в цьому пружному розсіянні основну роль відіграють потенціальне розсіяння та процес реорієнтації спіну ядра ^7Li . Внески реакцій передач (крива $\langle tr \rangle$, когерентна сума всіх реакцій передач) у цей канал незначні.

Непружне розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$

Експериментальні дані непружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{12}\text{C}) = 115 \text{ MeV}$ показано на рис. 6 і 7. Кривими на рисунках пред-

ставлено МЗКР-перерізи для переходів ядра ^7Li у стани колективного збудження $0,478 \text{ MeV} (1/2^-)$, $4,630 \text{ MeV} (7/2^-)$, $6,680 \text{ MeV} (5/2^-)$ (див. рис. 6) та $7,460 \text{ MeV} (5/2^-)$ і $9,67 \text{ MeV} (7/2^-) + 9,85 \text{ MeV} (3/2^-)$ (див. рис. 7). Кривими Σ показано некогерентні суми МЗКР-перерізів для нерозділених в експерименті рівнів ядер. Як зазначалось вище, у МЗКР-розрахунках використовувались параметри деформації ядер δ_i , подані в табл. 1, та параметри потенціалу взаємодії ядер, представлені в табл. 3. Видно, що обчислені при цих значеннях параметрів МЗКР-перерізи задовільно описують експериментальні дані непружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{12}\text{C}) = 115 \text{ MeV}$.

Таблиця 3. Параметри потенціалу взаємодії ядер $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$

V_0, MeV	$r_{V_s}, \text{фм}$	$a_{V_s}, \text{фм}$	W_{S_s}, MeV	$r_{W_{S_s}}, \text{фм}$	$a_{W_{S_s}}, \text{фм}$	W_{D_s}, MeV	$r_{W_{D_s}}, \text{фм}$	$a_{W_{D_s}}, \text{фм}$
165,0	0,800	0,700	14,5	1,150	0,250	6,5	1,150	0,650

Потенціал взаємодії ядер $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$ та фолдінг-потенціал

Порівняння дійсної частини потенціалу взаємодії ядер $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$, параметри якого було визначено з аналізу даних пружного розсіяння цих ядер, з фолдінг-потенціалом моделі подвійної згортки (7) показано на рис. 10.

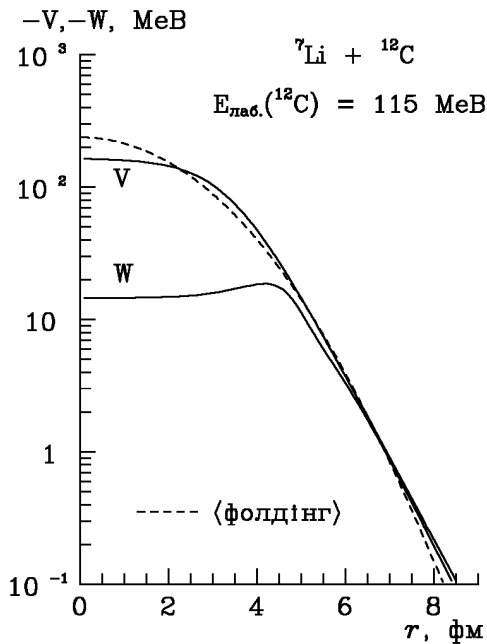


Рис. 10. Порівняння потенціалу взаємодії ядер $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$ з фолдінг-потенціалом.

Видна добра узгодженість поверхонь обох потенціалів. На рисунку показано також уявну час-

тину ($^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$)-потенціалу. У ній спостерігається незначний максимум у приповерхневій області, положення якого вказує на основну область взаємодії ядер при даній енергії, де відбуваються непружні процеси (збудження ядер та реакції передач).

Основні результати та висновки

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^7\text{Li}) = 115 \text{ MeV}$ для основних станів ядер ^7Li і ^{12}C та збуджених станів $0,478 \text{ MeV} (1/2^-)$, $4,630 \text{ MeV} (7/2^-)$, $6,680 \text{ MeV} (5/2^-)$, $7,460 \text{ MeV} (5/2^-)$ і $9,67 \text{ MeV} (7/2^-) + 9,85 \text{ MeV} (3/2^-)$ ядра ^7Li і збудженого стану $4,439 \text{ MeV} (2^+)$ ядра ^{12}C .

Експериментальні дані проаналізовано за ОМ та МЗКР із включенням у схему зв'язку каналів пружного й непружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$, процесу реорієнтації спіну ядра ^7Li та найпростіших реакцій передач нуклонів і кластерів, що можуть робити певні внески у вихідні канали розсіяння цих ядер. Установлено, що основну роль у пружному розсіянні ядер $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$ при даній енергії відіграє потенціальне розсіяння ядер, а також помітно впливає процес реорієнтації спіну ядра ^7Li . Внески реакцій передач у канали розсіяння даних ядер незначні. Експериментальні дані непружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$ задовільно описуються МЗКР-перерізами для процесів колективного збудження цих ядер.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kowalczyk M., SMAN: A Code for Nuclear Experiments, Warsaw University report (1998).
2. Чернівецький В.К., Русек К., Будзановські А. та ін. Експериментальна установка для дослідження ядерних реакцій на Варшавському циклотроні U-200P // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2002. - № 2 (8). - С. 216 - 224.
3. Smirnov Yu.F., Tchuvil'sky Yu.M. Cluster spectro-

- scopic factors for the p -shell nuclei // Phys. Rev. C. - 1977. - Vol. 15, No. 1. - P. 84 - 93.
4. Рудчик А.Т., Чувильский Ю.М., Вычисление спектроскопических амплитуд для произвольных ассоциаций нуклонов в ядрах 1р-оболочки (программа DESNA). - К., 1982. - 27 с. - (Препр. АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-82-12).
 5. Рудчик А.Т., Чувильский Ю.М. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1р-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач // УФЖ. - 1985. - Т. 30, № 6. - С. 819 - 825.
 6. Бояркина А.Н. Структура ядер 1р-оболочки. - М.: Изд-во Москов. ун-та, 1973. - 62 с.
 7. Nilsson B.S., SPI-GENOA: an Optical Model Search Code. - 1976 (Report / A Niels Bohr Institute).
 8. Thompson I.J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comp. Phys. Rep. - 1988. - Vol. 7. - P. 167 - 212.
 9. De Vries H., De Jager C. W., De Vries C. Nuclear charge-density-distribution parameters from elastic electron scattering // Atomic data and nuclear data tables. - 1987. - Vol. 36. - P. 495 - 536.
 10. Cook J. DFPOТ - a program for the calculation of double folded potentials // Comp. Phys. Com. - 1982. - Vol. 25, Iss. 2. - P. 125 - 139.
 11. Cook J. DFPOТ - a program for the calculation of double folded potentials // Ibid. - 1984. - Vol. 35. - P. C - 775.
 12. Vineyard M.F., Cook J., Kemper K.W., Stephens M.N. Optical potentials for the elastic scattering of ${}^6\text{Li} + {}^{12}\text{C}$, ${}^6\text{Li} + {}^{16}\text{O}$, and ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ // Phys. Rev. C. - 1984. - Vol. 30. - P. 916 - 924.
 13. Zeller A.F., Lui Y.W., Tribble R.E., Tanner D.M. Optical potential parameters for the ${}^{12}\text{C}({}^7\text{Li}, {}^7\text{Li}){}^{12}\text{C}$ reaction at 63 and 78.7 MeV // Ibid. - 1980. - Vol. 22. - P. 1534 - 1538.
 14. Bingham H.G., Halbert M.L., Hensley D.C. et al. Mirror states in $A = 15$ from 60 MeV ${}^6\text{Li}$ -induced reactions on ${}^{12}\text{C}$ // Ibid. - 1975. - Vol. 11. - P. 1913 - 1924.

А. Т. Рудчик, В. Ю. Канищев, А. А. Рудчик, О. А. Понкратенко, Е. И. Коший, С. Кличевски, К. Русек, В. А. Плюйко, С. Ю. Межевич, Вал. М. Пирнак, А. П. Ильин, В. В. Улещенко, Р. Сюдак, Я. Хоиньски, Б. Чех, А. Щурек

УПРУГОЕ И НЕПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ИОНОВ ${}^{12}\text{C}$ ЯДРАМИ ${}^7\text{Li}$ ПРИ ЭНЕРГИИ 115 МэВ

Получены новые экспериментальные данные дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния ядер ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ при энергии $E_{\text{лаб.}}({}^{12}\text{C}) = 115$ МэВ в эксперименте с одновременным измерением реакций ${}^7\text{Li}({}^{12}\text{C}, X)$ с выходом стабильных и нестабильных ядер с $Z = 3 - 6$. Экспериментальные данные проанализированы по оптической модели и методу связанных каналов реакций. Упругое и неупругое рассеяние, процессы реориентации спина ${}^7\text{Li}$ в основных и возбужденных состояниях, а также наиболее важные реакции передач включались в схему связи каналов. Получены значения параметров оптического потенциала взаимодействия ядер ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ в основных и возбужденных состояниях, а также параметры деформации ядер ${}^7\text{Li}$ и ${}^{12}\text{C}$. Оценены вклады реакций одно- и двухступенчатых передач в дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния ядер ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$.

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

A. T. Rudchik, V. Yu. Kanishchev, A. A. Rudchik, O. A. Ponkratenko, E. I. Koshchy, S. Kliczewski, K. Rusek, V. A. Plujko, S. Yu. Mezhevych, Val. M. Pirnak, A. P. Ilyin, V. V. Uleshchenko, R. Siudak, J. Choiński, B. Czech, A. Szczurek

ELASTIC AND INELASTIC SCATTERING OF ${}^{12}\text{C}$ IONS BY ${}^7\text{Li}$ AT 115 MeV

Angular distributions of the ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ elastic and inelastic scattering as well as the ${}^7\text{Li}({}^{12}\text{C}, X)$ reactions with excited stable and unstable nuclei with $Z = 3-6$ were measured at $E_{\text{lab}}({}^{12}\text{C}) = 115$ MeV. The data were analyzed within the optical model and coupled-reaction-channels method. The elastic and inelastic scattering, reorientations of ${}^7\text{Li}$ in ground and excited states as well as more important transfer reactions were included in the channels-coupling-scheme. ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ optical potential parameters for ground and excited states of ${}^7\text{Li}$ and ${}^{12}\text{C}$ as well as deformation parameters of these nuclei were deduced. The contributions of one- and two-step transfers in the ${}^7\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ elastic and inelastic scattering channels were estimated.

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

Надійшла 14.01.2013
Received 14.01.2013