

А. Т. Рудчик¹, О. В. Геращенко², А. А. Рудчик¹, Є. І. Коший³, С. Клічевські⁴, К. Русек^{5,6},
С. Ю. Межевич¹, В. А. Плюйко², О. А. Понкратенко¹, Вал. М. Пірнак¹, А. П. Ільїн¹,
В. В. Улещенко¹, Р. Сюдак⁴, Я. Хоїньські⁶, Б. Чех⁴, А. Щурек⁴

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

³ Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків

⁴ Інститут ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського, Краків, Польща

⁵ Національний інститут ядерних досліджень, Варшава, Польща

⁶ Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

ПРУЖНЕ ТА НЕПРУЖНЕ РОЗСІЯННЯ ІОНІВ ^{14}N ЯДРАМИ ^7Li ПРИ ЕНЕРГІЇ 80 МеВ

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного та непружного розсіяння іонів ^{14}N ядрами ^7Li при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 80$ МеВ в експерименті з одночасним вимірюванням диференціальних перерізів реакцій $^7\text{Li}(^{14}\text{N}, X)$ з виходом ядер $^{13, 15, 16}\text{N} + ^{8, 6, 5}\text{Li}$, $^{11, 12, 13, 14}\text{C} + ^{10, 9, 8, 7}\text{Be}$, $^{10, 11, 12}\text{B} + ^{11, 10, 9}\text{B}$ тощо. Експериментальні дані проаналізовано за оптичною моделлю та методом зв'язаних каналів реакцій. Пружне та непружне розсіяння, процеси реорієнтації спінів ядер ^7Li і ^{14}N в основних та збуджених станах, а також найбільш важливі реакції передачі включались у схему зв'язку каналів. Визначено параметри оптичного потенціалу взаємодії ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$ в основних та збуджених станах, а також параметри деформації цих ядер. Оцінено внески реакцій одно- та двоступінчастих передач у диференціальні перерізи пружного й непружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$.

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

Вступ

Дані пружного й непружного розсіяння ядер є експериментальною основою для дослідження різноманітних ядерних процесів у рамках сучасних моделей ядерних реакцій, оскільки визначені на їхній основі потенціали ядро-ядерної взаємодії використовуються у вхідних каналах різних реакцій. Зважаючи на енергетичну залежність таких потенціалів, існує потреба в експериментальних базах даних розсіяння ядер у широкому діапазоні енергій.

Для розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$ були відомі експериментальні дані лише при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^7\text{Li}) = 36$ МеВ ($E_{\text{с.ц.м}} = 24$ МеВ) [1] та $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 110$ МеВ ($E_{\text{с.ц.м}} = 36,67$ МеВ) [2], яких недостатньо для оцінки енергетичної залежності параметрів потенціалу взаємодії цих ядер. Тому отримання нових експериментальних даних пружного й непружного розсіяння цих ядер при різних енергіях є актуальною задачею майбутніх експериментів. Зауважимо, що для оцінки енергетичної залежності параметрів потенціалу взаємодії ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$ у роботі [2] було використано також експериментальні дані диференціальних перерізів пружного розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{14}\text{N}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^6\text{Li}) = 32$ МеВ [3] та $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 19,5$ МеВ [4]. Проте, як установлено в деяких

попередніх наших роботах з пружного розсіяння важких іонів на різних ізотопах (див., наприклад, [5 - 8]), існують ізотопічні відмінності в параметрах потенціалів взаємодії ядер. Тому для визначення енергетичної залежності параметрів цих потенціалів потрібна багата база експериментальних даних пружного розсіяння кожного типу іонів ядрами в широкому діапазоні енергій.

Отримані в цій роботі нові експериментальні дані пружного й непружного розсіяння іонів ^{14}N ядрами ^7Li при енергії 80 МеВ можуть успішно використовуватись для дослідження широкого кола проблем ядро-ядерної взаємодії та структури ядер. Зокрема, $(^7\text{Li} + ^{14}\text{N})$ -потенціал, визначений з аналізу цих даних, необхідний для вивчення реакцій типу $^7\text{Li}(^{14}\text{N}, X)$ з виходом ядер $^{513, 15, 16}\text{N} + ^{8, 6, 5}\text{Li}$, $^{11, 12, 13, 14}\text{C} + ^{10, 9, 8, 7}\text{Be}$, $^{10, 11, 12}\text{B} + ^{11, 10, 9}\text{B}$ тощо, кутові розподіли яких вимірювались одночасно з розсіянням іонів ^{14}N .

Методика експерименту

Диференціальні перерізи пружного й непружного розсіяння іонів ^{14}N ядрами ^7Li вимірювались на циклотроні С-200Р Лабораторії важких іонів Варшавського університету при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 80$ МеВ. Розкид енергії іонів у пучку на мішені не перевищував 0,5 %. В експерименті

© А. Т. Рудчик, О. В. Геращенко, А. А. Рудчик, Є. І. Коший, С. Клічевські, К. Русек, С. Ю. Межевич, В. А. Плюйко, О. А. Понкратенко, Вал. М. Пірнак, А. П. Ільїн, В. В. Улещенко, Р. Сюдак, Я. Хоїньські, Б. Чех, А. Щурек, 2012

використовувалась самопідтримна мішень літію природного ізотопного складу (^7Li - 92,5 %, ^6Li - 7,5 %) товщиною $\sim 0,8$ мг/см 2 .

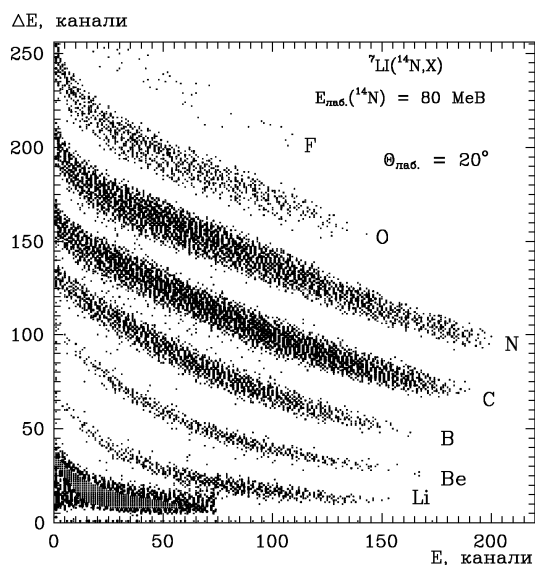


Рис. 1. Типовий $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій $^7\text{Li}(^{14}\text{N}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 80$ MeV для кута $\theta_{\text{лаб.}} = 20^\circ$.

Для реєстрації продуктів ядерних процесів в експерименті використовувалась ΔE -методика з кремнієвими E -детекторами товщиною 1 мм та іонізаційною камерою [9] як ΔE -детектором, наповненою аргоном при тиску ~ 200 мм рт. ст. Втрати енергії іонами в іонізаційній камері дорівнювали відповідним втратам у кремнієвому ΔE -детекторі товщиною ~ 15 мкм.

В експерименті використовувалась електроніка стандарту САМАС та програмна система SMAN [10] для накопичення спектрометричної інформації й отримання двовимірних $\Delta E(E)$ -спектрів. Типовий двовимірний $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій $^7\text{Li}(^{14}\text{N}, X)$ показано на рис. 1. Видно, що експериментальна методика забезпечувала ідентифікацію продуктів реакцій лише за зарядами.

Типові одновимірні енергетичні спектри ізотопів азоту та літію, отримані проектуванням їхніх локусів на E -вісь двовимірного спектра, показано на рис. 2, а і 3, а.

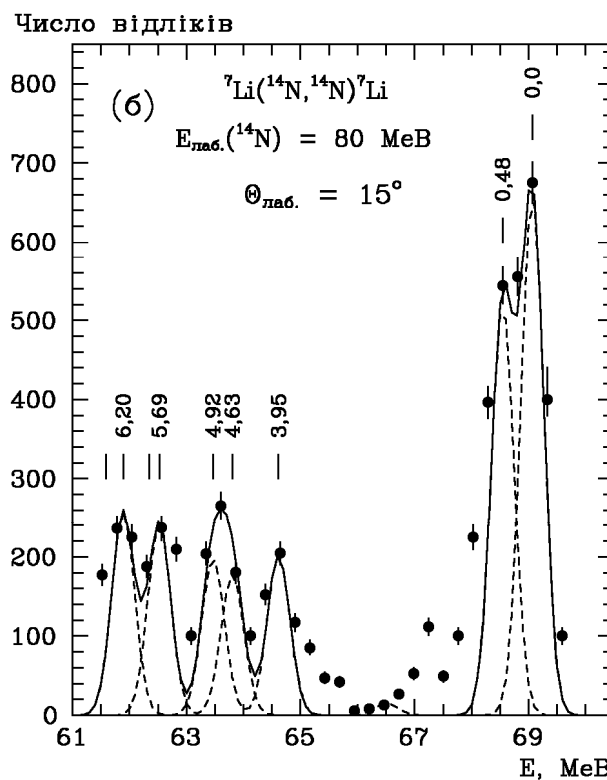
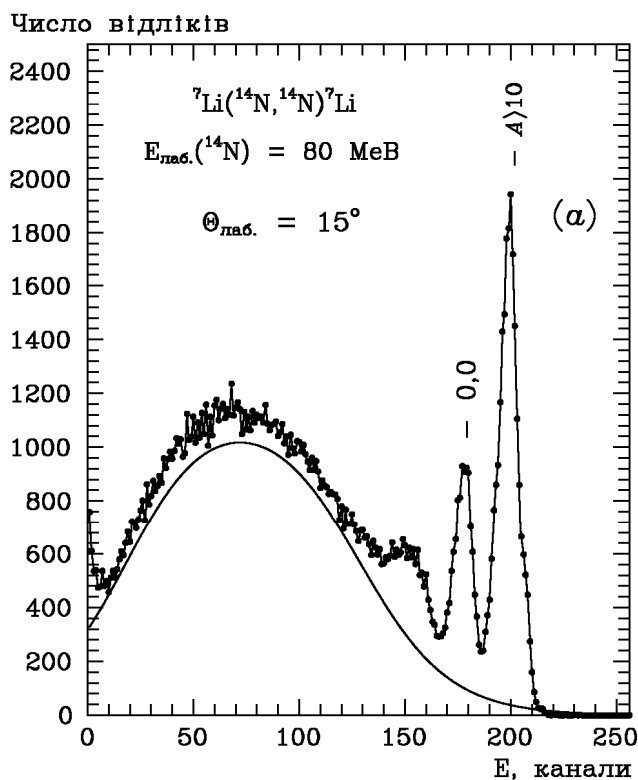


Рис. 2. Типові енергетичні спектри ^{14}N з розсіяння $^7\text{Li}(^{14}\text{N}, ^{14}\text{N})^7\text{Li}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 80$ MeV з неперервним фоном від багаточастинкових реакцій (а) та з вилученим фоном (б). Криві – симетричні функції Гаусса. Вертикальні лінії з числовим позначенням указують на енергетичне положення піків, що відповідають основним та збудженим станам ядер ^7Li та ^{14}N . Пік з позначенням „ $A > 10$ ” відповідає пружному розсіянню іонів ^{14}N ядрами домішок з $A > 10$.

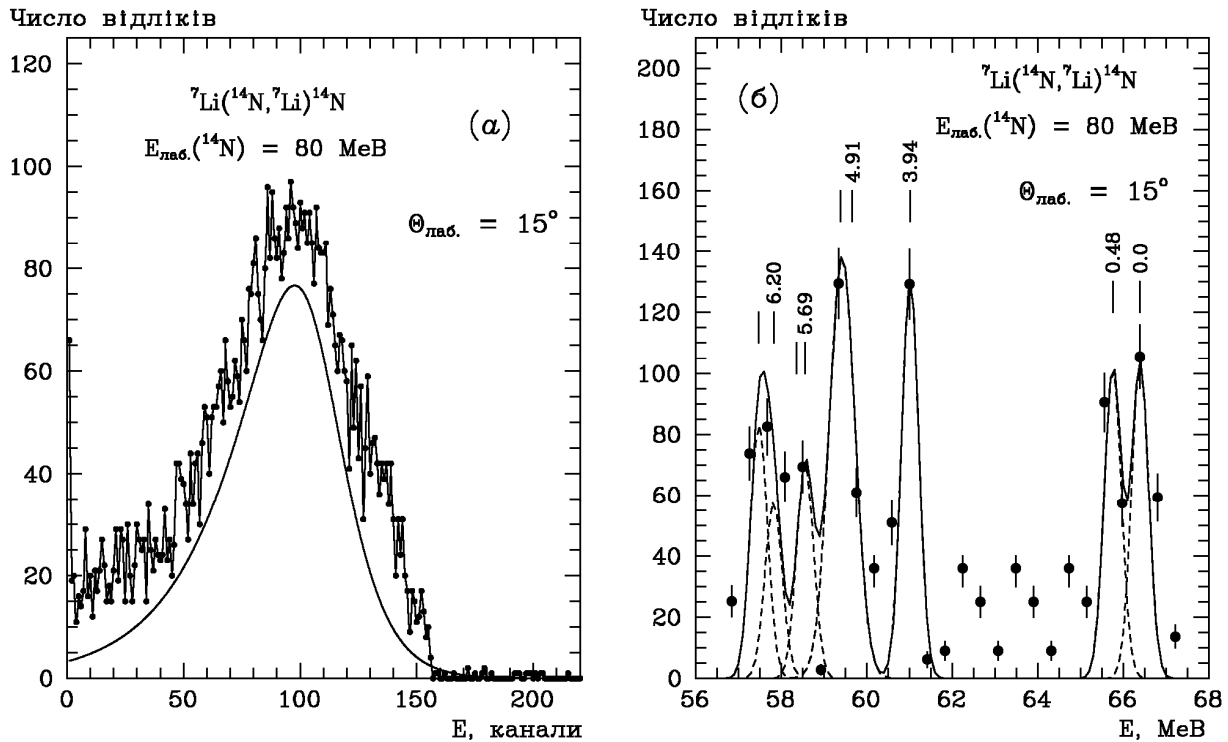


Рис. 3. Типові енергетичні спектри ${}^7\text{Li}$ з реакції ${}^7\text{Li}({}^{14}\text{N}, {}^7\text{Li}){}^{14}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{14}\text{N}) = 80$ МеВ з неперервним фоном від багаточастинкових реакцій (а) та з вилученим фоном (б). Криві – симетричні функції Гаусса. Позначення на рисунках такі ж, як на рис. 2.

У спектрах спостерігаються неперервні фони, обумовлені багаточастинковими реакціями та іншими процесами з неперервним розподілом

енергії ізотопів азоту та літію. Ці неперервні фони наближувалися параметризованими асиметричними сігмоїдальними функціями

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

методом підгонки параметрів E_{1i} , E_{2i} , H_{1i} , H_{2i} до мінімальних значень зареєстрованих подій (суцільні криві на рис. 2, а і 3, а) та віднімалися з експериментальних спектрів. Отримані залишкові енергетичні спектри показано на рис. 2, б і 3, б, на яких видно піки для основних та збуджених станів ядер ${}^{14}\text{N}$ і ${}^7\text{Li}$. Піки цих спектрів наближувалися симетричними гауссіанами

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

де N_{0i} , E_{0i} та h_i – максимальне число відліків, кінетична енергія розсіяного іона в i -му стані та півширина i -го піка відповідно. Кінетична енергія іонів отримувалася з кінематичних розрахунків двочастинкових реакцій. Для параметрів h_i використовувалось середнє значення ізольованих піків або природна півширина відповідного рівня ядра. Максимальні значення піків N_{0i} підганя-

лись, використовуючи відому програму PEAKFIT.

Площі гауссіанів використовувались для обчислення диференціальних перерізів розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{14}\text{N}$. Похибки в обчисленні площ частково перекритих піків не перевищували 20%. Для повністю перекритих піків ці похибки становили 30 - 40%. Отримані у відносних одиницях перерізи пружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{14}\text{N}$ нормувались до обчислених за оптичною моделлю (ОМ) на малих кутах ($\theta_{\text{с.ц.м.}} < 30^\circ$), де домінує кулонівське розсіяння та ОМ-перерізи слабо залежать від невизначеності параметрів оптичного потенціалу. Отриманий множник абсолютизації перерізів пружного розсіяння цих ядер використовувався також для нормування диференціальних перерізів їхнього непружного розсіяння. Похибка абсолютизації диференціальних перерізів пружного та непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{14}\text{N}$ не перевищувала ~20%.

Отримані диференціальні перерізи пружного

розсіяння іонів ^{14}N ядрами ^7Li при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 80 \text{ MeV}$ порівнюються на рис. 4 з відповідними даними при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 110 \text{ MeV}$ [2] та $E_{\text{лаб.}}(^7\text{Li}) = 36 \text{ MeV}$ [1] залежно від переданого імпульсу q_t . Видно, що експериментальні дані при енергії 80 MeV добре узгоджуються з відомими даними при інших енергіях за абсолютною величиною для малих значень переданих імпульсів. Відмінності спостерігаються при великих переданих імпульсах, що може бути обумовлено різними внесками в канал пружного розсіяння інших ядерних процесів та залежністю потенціального розсіяння від енергії.

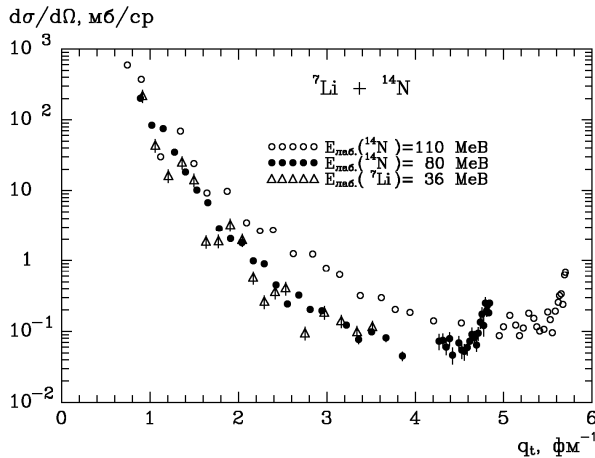


Рис. 4. Диференціальні перерізи пружного розсіяння $^7\text{Li}(^{14}\text{N}, ^{14}\text{N})^7\text{Li}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 110 \text{ MeV}$ [2] і 80 MeV та $^{14}\text{N}(^7\text{Li}, ^7\text{Li})^{14}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^7\text{Li}) = 36 \text{ MeV}$ [1] залежно від переданого імпульсу q_t .

Аналіз експериментальних даних

Методи теоретичних розрахунків

Експериментальні дані пружного й непружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$ проаналізовано за ОМ та методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР), використовуючи для вхідних та вихідних каналів потенціал Вудса - Саксона з об'ємним поглинанням

$$V(r) = V_0 \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_V}{a_V}\right) \right]^{-1} + iW_S \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_W}{a_W}\right) \right]^{-1} \quad (3)$$

та кулонівський потенціал 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 $R_i = r_i (A_p^{1/3} + A_t^{1/3})$ ($i = V, W, C$) та A_P, Z_P і A_T, Z_T

– масові й зарядові числа налітаючого іона P та мішені T відповідно. Для потенціалу кулонівської взаємодії ядер в усіх розрахунках використовувався параметр $r_C = 1,25 \text{ фм}$.

У МЗКР-розрахунках у схему зв'язку каналів включались пружне й непружне розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$, процеси реорієнтації спінів ^7Li і ^{14}N в основних і збуджених станах для переходів ядер у збуджені стани, а також найпростіші реакції одно- та двоступінчастих передач. Схеми переходів ядер ^7Li і ^{14}N у збуджені стани показано на рис. 5, а діаграми реакцій передач – на рис. 6. Дугами на рис. 5 показано переходи реорієнтації спінів ядер. При цьому вважалось, що низькоенергетичні збудження ядер мають колективну природу (ротаційну або вібраційну).

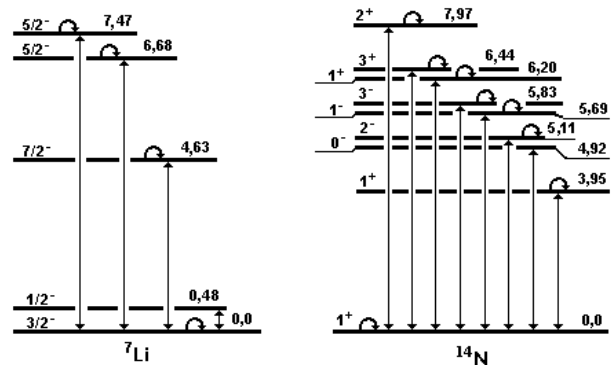


Рис. 5. Схеми переходів ядер ^7Li та ^{14}N на збуджені рівні.

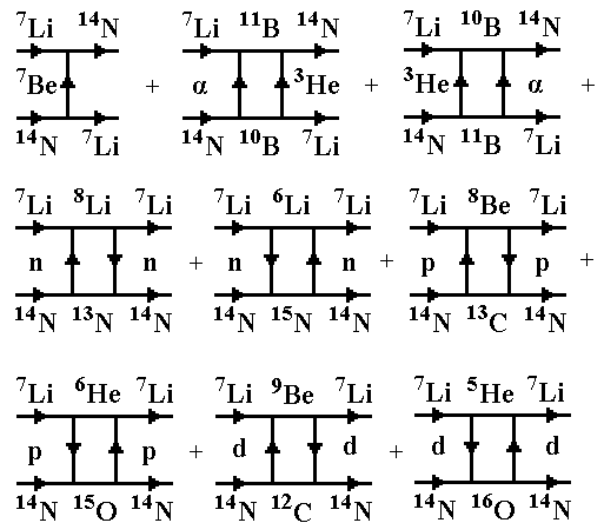


Рис. 6. Діаграми одно- та двоступінчастих передач при розсіянні ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$.

При обчисленні матричних елементів $J_i^\pi \rightarrow J_f^\pi$ -переходів

$$\langle E_f, J_f^\pi | V_\lambda(r) | E_i, J_i^\pi \rangle \quad (5)$$

використовувались форм-фактори

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

де δ_λ - параметр деформації ядра λ -мультиспольності.

Матричний елемент реорієнтації ядер обчислювався як квадрупольний $J_i^\pi \rightarrow J_i^\pi$ -перехід з передачею орбітального моменту $\lambda = 2$

$$\langle E_i, J_i^\pi | V_2(r) | E_i, J_i^\pi \rangle. \quad (7)$$

Параметри деформації δ_λ ядер ${}^7\text{Li}$ і ${}^{14}\text{N}$ та передавані орбітальні моменти λ подано в табл. 1.

Необхідні для МЗКР-розрахунків спектроскопічні амплітуди S_x нуклонів і кластерів x в ядерних системах $A = C + x$ обчислювались методом Смірнова – Чувільського в рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки (ТІМО) [11] за допомогою програми DESNA [12, 13] з використанням таблиць хвильових функцій ядер 1р-оболонки А. Н. Бояркіної [14]. Спектроскопічні амплітуди S_x подано в табл. 2.

Таблиця 1. Параметри деформації δ_λ і β_λ ядер ${}^7\text{Li}$ та ${}^{14}\text{N}$

Ядра	E_{36}, MeV	J^π	λ	$\delta_\lambda, \text{фм}$	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
${}^{14}\text{N}$	0,0	1^+	2	0,1	0,04
	3,948	1^+	2	1,0	0,41
	4,915	0^-	1	0,4	0,17
	5,106	2^-	1	0,4	0,17
			3	1,0	0,41
	5,690	1^-	1	0,4	0,17
	5,832	3^-	3	1,0	0,41
	6,204	1^+	2	0,1	0,04
	6,444	3^+	2	0,1	0,04
			4	1,0	0,41
	7,028	2^+	2	0,1	0,04

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

Таблиця 2. Спектроскопічні амплітуди S_x нуклонів і кластерів x в системах $A = C + x$

A	C	x	nL_j	S_x	A	C	x	nL_j	S_x			
${}^7\text{Li}$	${}^5\text{He}$	d	$2S_1$	-0,674 ^(a)	${}^{14}\text{N}$	${}^7\text{Li}$	${}^7\text{Be}$	$3S_{3/2}$	-0,048			
			$1D_1$	-0,121 ^(a)				$2D_{1/2}$	-0,050 ^(a)			
			$1D_3$	0,676 ^(a)				$2D_{3/2}$	0,097			
${}^7\text{Li}$	${}^6\text{He}$	p	$1P_{3/2}$	0,805	${}^{14}\text{N}$	${}^7\text{Li}$	${}^7\text{Be}$	$2D_{5/2}$	0,062 ^(a)			
			$1P_{1/2}$	0,805				$1G_{5/2}$	-0,072 ^(a)			
${}^7\text{Li}^*_{0,478}$	${}^6\text{He}$	p	$1P_{1/2}$	-0,657	${}^{14}\text{N}$	${}^{10}\text{B}$	${}^4\text{He}$	$2D_2$	0,111			
			$1P_{3/2}$	-0,735 ^(a)				$1G_4$	0,740			
${}^8\text{Li}$	${}^7\text{Li}$	n	$1P_{1/2}$	0,478	${}^{14}\text{N}$	${}^{11}\text{B}$	${}^3\text{He}$	$2P_{1/2}$	-0,107 ^(a)			
			$1P_{3/2}$	0,478				$2P_{3/2}$	-0,096			
${}^8\text{Li}$	${}^7\text{Li}^*_{0,478}$	n	$1P_{3/2}$	1,234 ^(a)	${}^{14}\text{N}$	${}^{11}\text{B}$	${}^3\text{He}$	$1F_{5/2}$	-0,292 ^(a)			
			$1P_{1/2}$	0,873 ^(a)				$1D_1$	0,246			
${}^8\text{Be}$	${}^7\text{Li}$	p	$1P_{3/2}$	0,873 ^(a)	${}^{14}\text{N}$	${}^{12}\text{C}$	d	$1D_1$	0,246			
			$1P_{1/2}$	-0,226 ^(a)				${}^{14}\text{N}$	${}^{13}\text{C}$	p	$1P_{1/2}$	0,461
${}^9\text{Be}$	${}^7\text{Li}$	d	$2S_1$	-0,226 ^(a)	${}^{14}\text{N}$	${}^{13}\text{C}$	p				$1P_{3/2}$	0,163 ^(a)
			$1D_1$	0,111 ^(a)				${}^{14}\text{N}$	${}^{13}\text{N}$	n	$1P_{1/2}$	-0,461
			$1D_3$	-0,624 ^(a)							$1P_{3/2}$	-0,163 ^(a)
${}^{10}\text{B}$	${}^7\text{Li}$	${}^3\text{He}$	$1P_{3/2}$	0,419	${}^{15}\text{N}$	${}^{14}\text{N}$	n	$1P_{1/2}$	-1,091 ^(a)			
			$1F_{5/2}$	0,104 ^(aa)				$1P_{3/2}$	0,386			
			$1F_{7/2}$	0,347				$1P_{1/2}$	-1,091 ^(a)			
${}^{11}\text{B}$	${}^7\text{Li}$	α	$3S_0$	-0,638	${}^{15}\text{O}$	${}^{14}\text{N}$	p	$1P_{1/2}$	-1,091 ^(a)			
			$2D_2$	-0,422				$1P_{3/2}$	0,386			
					${}^{16}\text{O}$	${}^{14}\text{N}$	d	$1D_1$	1,400			

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

Хвильові функції відносного руху нуклонів і кластерів x у системах $A = C + x$ обчислювались

стандартним способом підгонки глибини V_0 дійсного $(C + x)$ -потенціалу типу Вудса - Саксона

до експериментального значення енергії зв'язку ε_x частинки x в ядрі A . При цьому використовувались параметри $a_V = 0,65$ фм і $r_V = 1,25 \cdot A^{1/3} / (C^{1/3} + x^{1/3})$.

ОМ-розрахунки та підгонка параметрів потенціалу взаємодії ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$ проводилась за допомогою програми SPI-GENOA [15], а МЗКР-

розрахунки - за програмою FRESKO [16].

Пружне розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$

Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 80$ МеВ показано на рис. 7 в абсолютних одиницях (а) та як відношення до кулонівського розсіяння (б).

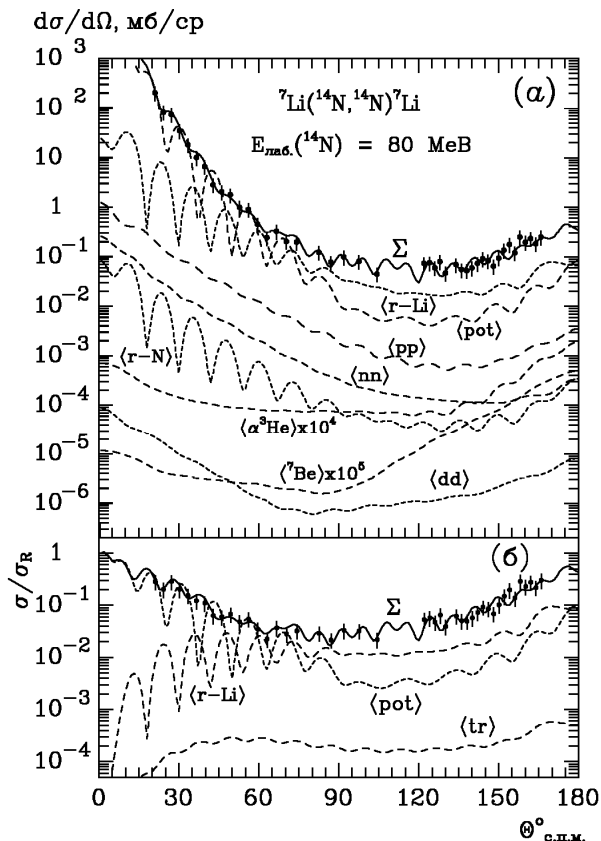


Рис. 7. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^7\text{Li}(^{14}\text{N}, ^{14}\text{N})^7\text{Li}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 80$ МеВ. Штрихові криві – МЗКР-перерізи для різних процесів. Суцільні криві Σ – когерентні суми МЗКР-перерізів усіх ядерних процесів.

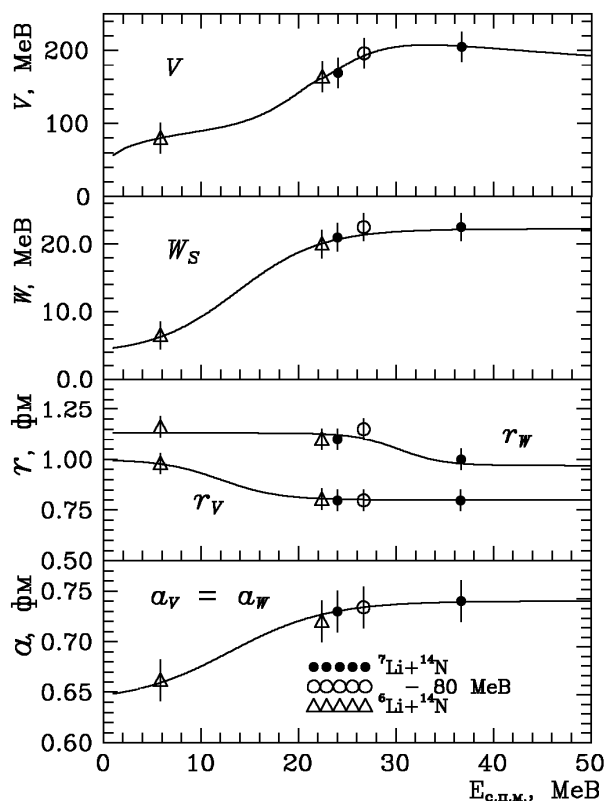


Рис. 8. Енергетичні залежності параметрів потенціалів взаємодії ядер $^{6,7}\text{Li} + ^{14}\text{N}$.

Таблиця 3. Параметри оптичних потенціалів

Система ядер	Іон	$E_{\text{лаб.}}$, МеВ	$E_{\text{с.ц.м.}}$, МеВ	V_0 , МеВ	r_V , фм	a_V , фм	W_S , МеВ	r_W , фм	a_W , фм	Літ.
$^6\text{Li} + ^{14}\text{N}$	^{14}N	19,5	5,85	80,0	0,980	0,662	6,5	1,161	0,662	[2]
	^6Li	32,0	22,40	164,0	0,803	0,720	20,0	1,100	0,720	[2]
$^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$	^7Li	36,0	24,00	169,0	0,798	0,730	21,0	1,100	0,730	[2]
	^{14}N	80,0	26,67	196,0	0,798	0,734	22,5	1,150	0,734	Дана робота
	^{14}N	110,0	36,67	205,0	0,798	0,740	22,5	1,100	0,740	[2]

Спочатку визначався оптичний потенціал взаємодії ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$ за ОМ методом підгонки ОМ-розрахунків до експериментальних даних пружного розсіяння цих ядер. Отриманий з підгонки набір ОМ-параметрів $\{X_i\} = \{V_0, r_V, a_V, W_S, r_W, a_W\}$ потім уточнювався в МЗКР-розрахунках. Визначені таким чином параметри потенціалу взаємодії ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$

при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 80$ МеВ подано в табл. 3. Для порівняння там же представлено також параметри цього потенціалу при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 110$ МеВ та $E_{\text{лаб.}}(^7\text{Li}) = 36$ МеВ [2], а на рис. 8 ці параметри показано точками на кривих енергетичної залежності ($^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$)-потенціалу з роботи [2]. Видно, що отримані набори параметрів при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 80$ МеВ добре

узгоджуються з відомими енергетичними залежностями параметрів (${}^7\text{Li} + {}^{14}\text{N}$)-потенціалу. В табл. 3 подано також параметри потенціалу взаємодії ядер ${}^6\text{Li} + {}^{14}\text{N}$, які було використано для прогнозування енергетичної залежності параметрів (${}^7\text{Li} + {}^{14}\text{N}$)-потенціалу при малих енергіях в роботі [2].

На рис. 7 штриховими кривими показано МЗКР-розрахунки для потенціального розсіяння (крива $\langle \text{pot} \rangle$), реорієнтацій спінів ${}^7\text{Li}$ і ${}^{14}\text{N}$ (криві $\langle \text{r-Li} \rangle$ і $\langle \text{r-N} \rangle$ відповідно), передачі нейтронів і протонів (криві $\langle \text{np} \rangle$ і $\langle \text{pp} \rangle$ відповідно), передачі кластерів $\alpha + {}^3\text{He}$ і ${}^3\text{He} + \alpha$ (крива $\langle \alpha {}^3\text{He} \rangle$, когерентна сума), передачі ${}^7\text{Be}$ (крива $\langle {}^7\text{Be} \rangle$) та обміну дейтронами (крива $\langle \text{dd} \rangle$). Кривими Σ та $\langle \text{tr} \rangle$ показано МЗКР-перерізи когерентних сум усіх процесів. Видно, що потенціальне розсіяння

домінує на малих кутах. У розсіянні іонів ${}^{14}\text{N}$ на середні та великі кути важливу роль відіграє реорієнтація спіну ${}^7\text{Li}$. Реорієнтація спіну ${}^{14}\text{N}$ та реакції передачі не відіграють суттєвої ролі в пружному розсіянні ядер ${}^7\text{Li} + {}^{14}\text{N}$.

Непружне розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{14}\text{N}$

Диференціальні перерізи непружного розсіяння іонів ${}^{14}\text{N}$ ядрами ${}^7\text{Li}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{14}\text{N}) = 80 \text{ MeV}$ показано на рис. 9 і 10 для переходів ${}^7\text{Li}$ у збуджені стани $0,478 \text{ MeV}$ ($1/2^-$) і $4,63 \text{ MeV}$ ($7/2^-$) та ядра ${}^{14}\text{N}$ у стани $3,947 \text{ MeV}$ (1^+), $4,915 \text{ MeV}$ (0^-) + $5,105 \text{ MeV}$ (2^-), $5,69 \text{ MeV}$ (1^-) + $5,832 \text{ MeV}$ (3^-) і $6,204 \text{ MeV}$ (1^+) + $6,444 \text{ MeV}$ (3^+). Для нерозділених в експерименті рівнів ${}^{14}\text{N}$ поміряно сумарні диференціальні перерізи (див. рис. 10).

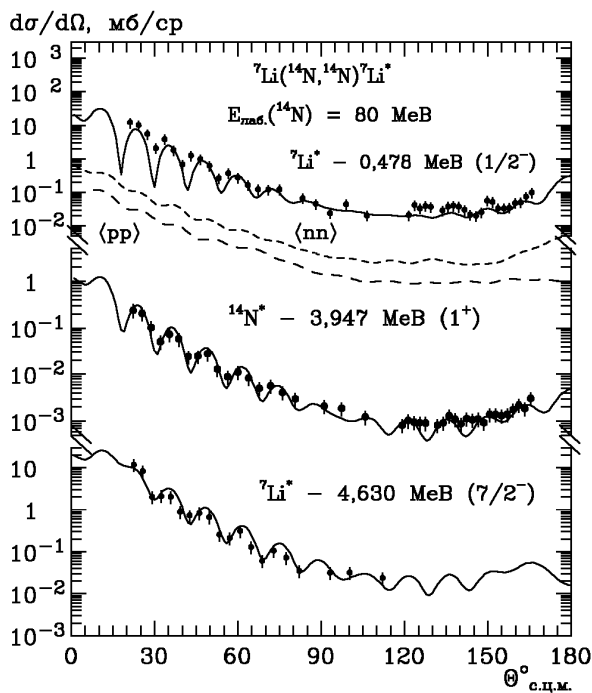


Рис. 9. Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li}({}^{14}\text{N}, {}^{14}\text{N}){}^7\text{Li}^*$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{14}\text{N}) = 80 \text{ MeV}$ для переходів ядер ${}^7\text{Li}$ та ${}^{14}\text{N}$ на збуджені рівні. Криві – МЗКР-розрахунки.

Кривими на рис. 9 і 10 показано МЗКР-розрахунки для переходів ядер ${}^7\text{Li}$ і ${}^{14}\text{N}$ у збуджені стани колективної природи та найважливіших реакцій передачі. Видно, що реакції обміну нуклонами (криві $\langle \text{np} \rangle$ і $\langle \text{pp} \rangle$ на рис. 9) неважливі для переходу ядра ${}^7\text{Li}$ у збуджений стан $0,478 \text{ MeV}$. Така ж ситуація спостерігається і для переходів ядер ${}^7\text{Li}$ і ${}^{14}\text{N}$ в інші збуджені стани. Щоб не ускладнювати рисунків, відповідні криві на них не показано.

У МЗКР-розрахунках матричних елементів колективних переходів використовувались співвідношення (5) і (6), параметри деформації δ_λ

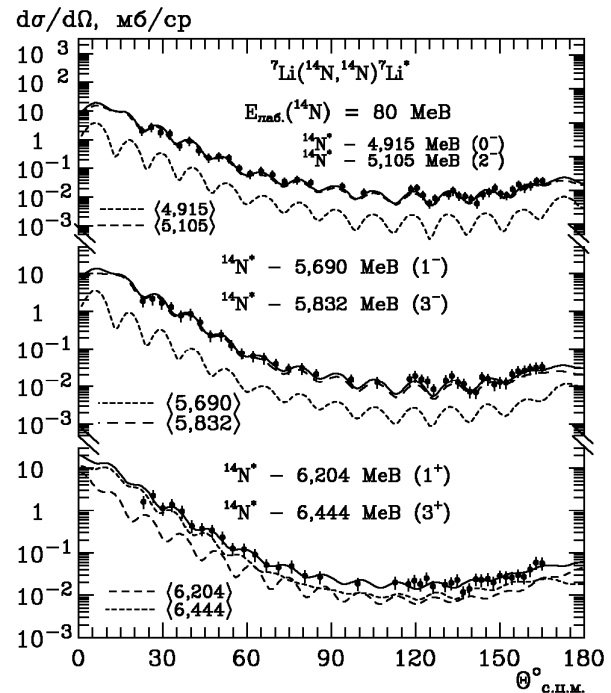


Рис. 10. Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li}({}^{14}\text{N}, {}^{14}\text{N}){}^7\text{Li}^*$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{14}\text{N}) = 80 \text{ MeV}$ для переходів на збуджені рівні ${}^{14}\text{N}$. Криві – МЗКР-розрахунки.

ядер ${}^7\text{Li}$ і ${}^{14}\text{N}$ та параметри (${}^7\text{Li} + {}^{14}\text{N}$)-потенціалу, поданих у табл. 1 і 3 відповідно. Суцільними кривими на рис. 10 показано некогерентні суми МЗКР-перерізів для нерозділених в експерименті станів ${}^{14}\text{N}$. МЗКР-розрахунки для окремих переходів показано штриховими кривими.

На рис. 9 і 10 видно, що МЗКР-перерізи для переходів ядер ${}^7\text{Li}$ і ${}^{14}\text{N}$ у збуджені стани колективної природи задовільно описують експериментальні дані в усьому діапазоні кутів непружного розсіяння іонів ${}^{14}\text{N}$ ядрами ${}^7\text{Li}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{14}\text{N}) = 80 \text{ MeV}$.

Основні результати та висновки

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння іонів ^{14}N ядрами ^7Li при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 80$ МеВ для переходів на основні та збуджені рівні 0,478 і 4,63 МеВ ядра ^7Li та 3,947 МеВ, 4,915 МеВ (0^-) + 5,105 МеВ (2^-), 5,69 МеВ (1^-) + 5,832 МеВ (3^-) і 6,204 МеВ (1^+) + 6,444 МеВ (3^+). Для нерозділених в експерименті рівнів ^{14}N поміряно сумарні диференціальні перерізи.

Експериментальні дані проаналізовано за ОМ та МЗКР із включенням у схему зв'язку каналів пружного й непружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$, процесів реорієнтації спінів цих ядер в основних та збуджених станах, а також найпростіших реакцій передач. Визначено параметри потенціалу взаємодії ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 80$ МеВ, які добре узгоджуються з відповідною енергетичною залежністю параметрів цього по-

тенціалу, отриманою в роботі [2]. Одержаний у цій роботі ($^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$)-потенціал буде використано в наступних роботах для МЗКР-аналізу експериментальних даних реакцій $^7\text{Li}(^{14}\text{N}, X)$ з виходом ядер $^{13, 15, 16}\text{N} + ^{8, 6, 5}\text{Li}$, $^{11, 12, 13, 14}\text{C} + ^{10, 9, 8, 7}\text{Be}$, $^{10, 11, 12}\text{B} + ^{11, 10, 9}\text{B}$ тощо, кутові розподіли яких вимірювались одночасно з розсіянням іонів ^{14}N .

Установлено, що в пружному розсіянні ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$ домінує потенціальне розсіяння на малих кутах. Процес реорієнтації спіну ядра ^7Li важливий у пружному розсіянні іонів ^{14}N на середні та великі кути. Внесок реорієнтації ^{14}N у канал пружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$ незначний. Серед реакцій передач найбільш важливими є реакції передач нуклонів, але їхні внески в канали ($^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$)-розсіяння при даній енергії незначні. Експериментальні дані непружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$ задовільно описуються МЗКР-перерізами для переходів ядер у збуджені стани колективної природи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Cobern M.E., Pisano D.J., Parker P.D. Alpha-transfer reactions in light nuclei. III. (^7Li , t) stripping reaction // Phys. Rev. C. - 1976. - Vol. 14. - P. 491 - 505.
2. Rudchik A.T., Pirnak Val. M., Budzanowski A. et al. Direct versus exchange processes in the reactions $^7\text{Li}(^{14}\text{N}, ^{14, 15}\text{N})$ at 110 MeV // Nucl. Phys. A. - 2002. - Vol. 700. - P. 25 - 41.
3. Groeneveld K.O., Richter A., Strohmusch U., Zeidman B. Li-induced nucleon-transfer reactions between $1p$ -shell nuclei: isospin and fractional-parentage studies // Phys. Rev. Lett. - 1971. - Vol. 27. - P. 1806 - 1810.
4. Кумлф Г., Мезнер Ю., Нойберт В., Шмидт Г. Упругое рассеяние ионов ^{14}N на ^6Li и расщепление ^6Li при энергии 19,5 МеВ // Яд. физ. (J. Nucl. Phys.). - 1977. - Т. 25, вып. 3. - С. 481 - 489.
5. Rudchik A.A., Rudchik A.T., Kliczewski S. et al. Elastic and inelastic scattering of $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$ versus $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$ // Nucl. Phys. A. - 2007. - Vol. 785. - P. 293 - 306.
6. Rudchik A.T., Shyrma Yu.O., Kemper K.W. et al. Isotopic effects in elastic and inelastic $^{12}\text{C} + ^{16, 18}\text{O}$ scattering // Eur. Phys. J. A. - 2010. - Vol. 44. - P. 221 - 231.
7. Rudchik A.T., Shyrma Yu.O., Kemper K.W. et al. Elastic and inelastic scattering of $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ versus $^{12, 13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ and $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$ // Eur. Phys. J. A. - 2011. - Vol. 47. - P. 50.
8. Rudchik A.T., Shyrma Yu.O., Kemper K.W. et al. Elastic and inelastic scattering of $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ versus $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ and $^{13}\text{C} + ^{16}\text{O}$ // Nucl. Phys. A. - 2011. - Vol. 852. - P. 1 - 14.
9. Чернівський В.К., Русек К., Будзановський 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.
10. Kowalczyk M. SMAN: Oprogramowanie zbierania danych dla pomiarów wieloparametrycznych w standardzie CAMAC (a Code for Nuclear Experiments) / Uniwersytet Warszawski. - Warszawa, 1997. - P. 1 - 32.
11. Smirnov Yu.F., Tchuvil'sky Yu.M. Cluster spectroscopic factors for the p -shell nuclei // Phys. Rev. C. - 1977. - Vol. 15. - P. 84 - 93.
12. 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).
13. 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.
14. Бояркина А.Н. Структура ядер $1p$ -оболочки. - М.: Изд-во Москов. ун-та, 1973. - 62 с.
15. Nilsson B.S. SPI-GENOA: an Optical Model Search Code. - 1976 // (Report / A Niels Bohr Institute).
16. Thompson I.J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comp. Phys. Rep. - 1988. - Vol. 7. - P. 167 - 212.

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

УПРУГОЕ И НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ИОНОВ ^{14}N ЯДРАМИ ^7Li
ПРИ ЭНЕРГИИ 80 МэВ

Получены новые экспериментальные данные дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния ионов ^{14}N ядрами ^7Li при энергии $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 80$ МэВ в эксперименте с одновременным измерением дифференциальных сечений реакций $^7\text{Li}(^{14}\text{N}, X)$ с выходом ядер $^{13, 15, 16}\text{N} + ^{8, 6, 5}\text{Li}$, $^{11, 12, 13, 14}\text{C} + ^{10, 9, 8, 7}\text{Be}$, $^{10, 11, 12}\text{B} + ^{11, 10, 9}\text{B}$ и др. Экспериментальные данные проанализированы по оптической модели и методу связанных каналов реакций. Упругое и неупругое рассеяние, процессы реориентации спинов ядер ^7Li и ^{14}N в основных и возбужденных состояниях, а также наиболее важные реакции передач были включены в схему связи каналов. Определены параметры оптического потенциала взаимодействия ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$ в основных и возбужденных состояниях, а также параметры деформации этих ядер. Оценены вклады реакций одно- и двухступенчатых передач в дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния ядер $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$.

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

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

ELASTIC AND INELASTIC SCATTERING OF ^{14}N IONS BY ^7Li AT 80 MeV

Angular distributions of the $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$ elastic and inelastic scattering as well as the $^7\text{Li}(^{14}\text{N}, X)$ reactions with production of $^{13, 15, 16}\text{N} + ^{8, 6, 5}\text{Li}$, $^{11, 12, 13, 14}\text{C} + ^{10, 9, 8, 7}\text{Be}$, $^{10, 11, 12}\text{B} + ^{11, 10, 9}\text{B}$ nuclei and others were measured at $E_{\text{lab}}(^{14}\text{N}) = 80$ MeV. The data were analyzed within the optical model and coupled-reaction-channels method. The elastic and inelastic scattering, reorientations of ^7Li and ^{14}N in ground and excited states as well as the prominent one- and two-step transfers were included in a channels-coupling-scheme. The $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$ optical potential parameters for ground and excited states of ^7Li and ^{14}N as well as deformation parameters of these nuclei were deduced. The contributions of one- and two-step transfers in the $^7\text{Li} + ^{14}\text{N}$ elastic and inelastic scattering channels were estimated.

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

Надійшла 03.07.2012

Received 03.07.2012