

ПРУЖНЕ ТА НЕПРУЖНЕ РОЗСІЯННЯ ЯДЕР $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$

© 2010 А. Т. Рудчик¹, Ю. О. Ширма¹, Є. І. Коший², С. Клічевські³, Б. Г. Новацкий⁴,
 О. А. Понкратенко¹, Е. Пясецькі^{5,6}, Г. П. Романишина¹, К. Русек⁵, Ю. М. Степаненко¹,
 І. Строек⁵, С. Б. Сакута⁴, А. Будзановські³, Л. Гловацка⁷, І. Сквірчинська³, Р. Сюдак³,
 Я. Хоїньські⁶, Б. Чех³, А. Щурек³

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

² Харківський національний університет, Харків

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

⁴ Російський дослідницький центр "Інститут Курчатова", Москва, Росія

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

⁶ Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

⁷ Інститут прикладної фізики Військово-технічного університету, Варшава, Польща

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного та непружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$. Експериментальне дослідження цього розсіяння виконано вперше. Експериментальні дані проаналізовано за оптичною моделлю та методом зв'язаних каналів реакцій із врахуванням внесків найпростіших реакцій передач. Визначено параметри $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -потенціалу та параметри деформації ядра ^{14}C . Досліджено ізотопічні відмінності потенціалів взаємодії ядер $^{12,13,14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$.

Ключові слова: ядерні реакції, оптична модель, метод зв'язаних каналів реакцій, спектроскопічні амплітуди, оптичні потенціали, механізми реакцій.

Вступ

Ядерні процеси при взаємодії ядер з надлишком нейтронів є ефективним засобом для дослідження властивостей вихідних нестабільних збагачених нейтронами ядер. Для багатьох короткоживучих ядер ядерні реакції – це єдина можливість отримання відомостей про їхню структуру та взаємодію з іншими ядрами. Для реалізації цього в рамках сучасних теоретичних засобів важливу роль відіграють експериментальні дані пружного та непружного розсіяння ядер вхідних каналів реакцій, які необхідні для отримання параметрів потенціалів ядро-ядерної взаємодії. Тому експериментальне дослідження розсіяння ядер продовжує бути актуальним, особливо при повній відсутності експериментальних даних при жодній енергії. Зокрема, це стосується розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$, результати дослідження якого викладено в цій роботі.

Пружне та непружне розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ експериментально досліджувалось нами при енергії $E(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$ одночасно з реакціями $^{14}\text{C}(^{18}\text{O}, X)$ з виходом нестабільних ядер $^{16,17}\text{N}$, ^{19}O тощо. Тому результати дослідження $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -розсіяння є важливим елементом для дослідження цих реакцій передач за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). Крім того, результати аналізу експериментальних даних розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ за оптичною моделлю (ОМ) та МЗКР є важливими для продовження систематичного дослідження ізотопічних відмінностей у розсіянні ядер $^{12,13,14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та потенціалів їхньої взаємодії, розпочатих у роботах [1, 2]. Результати вивчення цих відмінностей важливі

для встановлення залежності потенціалів ядро-ядерної взаємодії та механізмів ядерних процесів від структури ядер.

Методика експерименту

Диференціальні перерізи пружного й непружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та реакцій передач $^{14}\text{C}(^{18}\text{O}, X)$ вимірювались на Варшавському циклотроні С-200Р, використовуючи пучок іонів ^{18}O з енергією $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$. Мішенню служила самопідтримна плівка вуглецю товщиною 280 мкг/см^2 з 86 %-ним збагаченням ізотопом ^{14}C . Розкид енергії пучка іонів на мішені не перевищував 0,5 %.

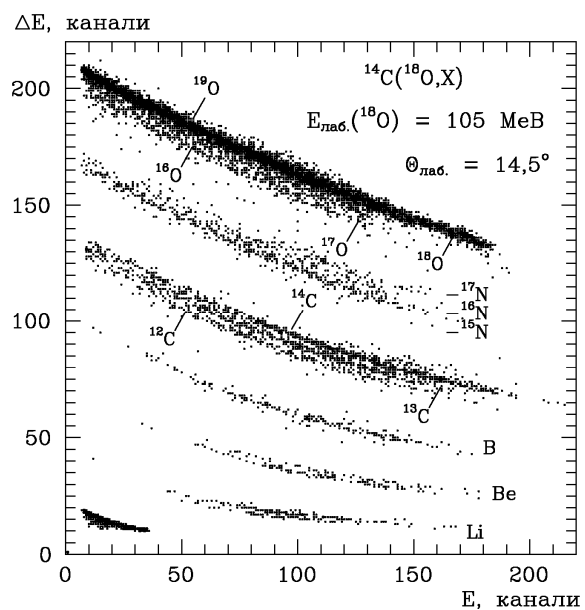


Рис. 1. Типовий $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій $^{14}\text{C}(^{18}\text{O}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$.

Продукти реакцій реєструвались трьома ΔE - E -спектрометрами з кремнієвими детекторами, товщини ΔE -детекторів яких становили 30, 50 і 67 мкм. В експерименті використовувалась електроніка стандарту САМАС та комп'ютерна реєстраційно-накопичувальна система SMAN [3], що забезпечувала візуалізацію та накопичення дво-вимірних $\Delta E(E)$ -спектрів у процесі вимірювань. Детальний опис експериментальної уста-

новки та її реєстраційних систем міститься в роботі [4].

Типовий двовимірний $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій $^{14}\text{C}(^{18}\text{O}, X)$ для спектрометра з ΔE -детектором товщиною 67 мкм показано на рис. 1. Видно, що експериментальна методика забезпечувала надійну ідентифікацію продуктів реакцій як за зарядами, так і за масами.

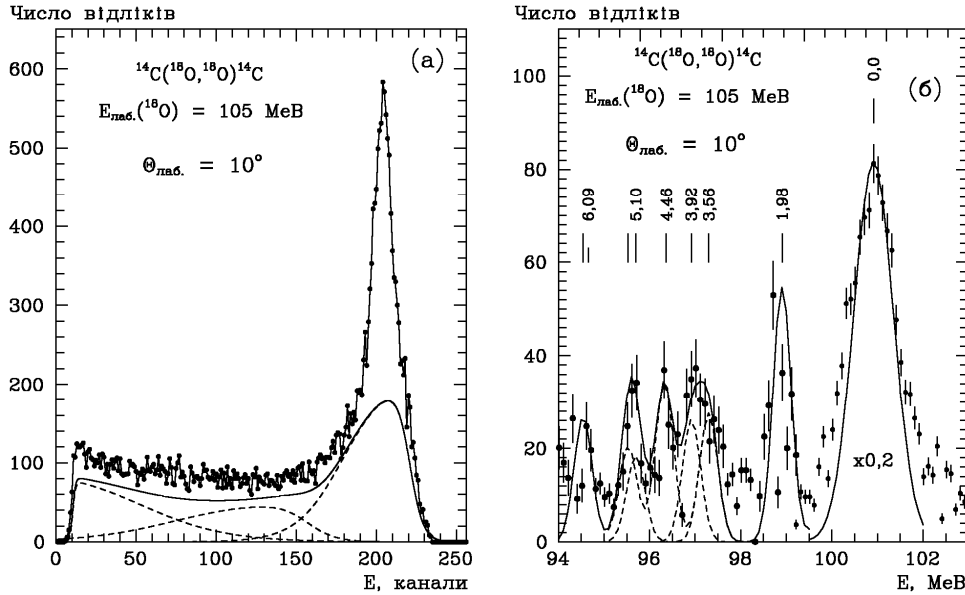


Рис. 2. Типові енергетичні спектри ^{18}O з неперервним фоном (криві – наближення фону) (а) та без фону (криві – гауссіани) (б).

На рис. 2 показано типові енергетичні спектри ^{18}O з реакції $^{14}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{18}\text{O})^{14}\text{C}$: а) з неперервною компонентою (фоном) та б) з вилученим фоном –

залишковий спектр. Фон, що визначався мінімальними значеннями спектра, описувався параметризованими 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} . Штриховими кривими на рис. 2, а показано окремі компоненти функції фону $N_i(E)$, а суцільною кривою – їхню суму. Залишковий спектр (рис. 2, б) апроксимувався сумою симетричних функцій Гаусса (штрихові криві)

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

методом підгонки параметрів N_i при фіксованих значеннях положень максимумів гауссіанів E_i , які прирівнювались до кінетичних енергій розсіяних іонів ^{18}O , та при однакових значеннях параметрів h_i , рівних середній ширині ізольованих піків.

Типові енергетичні спектри ^{14}C показано на рис. 3: а) з фоном та б) без фону. Криві –

наближення фону (а) та піків спектра гауссіанами (б), як і в попередньому випадку.

Площі гауссіанів ^{18}O - і ^{14}C -спектрів використовувалась для обчислення диференціальних перерізів пружного та непружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ для кутів $\theta_{\text{с.ц.м.}}(^{18}\text{O})$ і $\theta_{\text{с.ц.м.}}^*(^{18}\text{O}) = 180^\circ - \theta_{\text{с.ц.м.}}(^{14}\text{C})$ (розсіяння ^{18}O на великі кути) відповідно. Абсолютизація диференціальних перерізів пружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ здійснювалась нормуванням їх до кулонівського розсіяння на малих кутах. Похибка абсолютизації не перевищувала 15 %.

Поміряні диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$ залежно від переданого імпульсу q_t показано на рис. 4, де вони порівнюються а) з пружним розсіянням ядер $^{12,13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ [1, 2] при

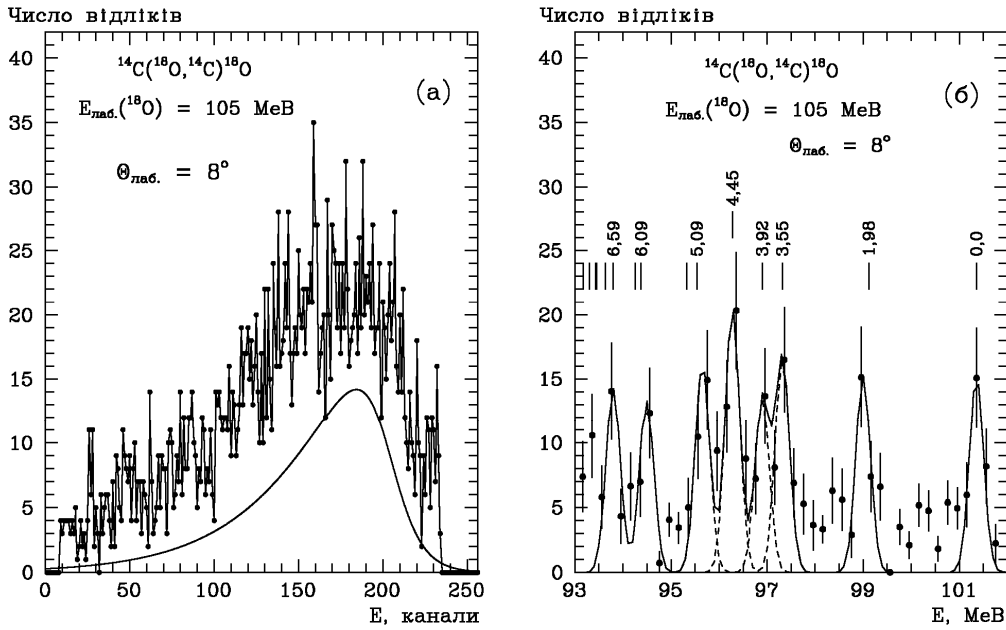


Рис. 3. Типові енергетичні спектри ядер ^{14}C з неперервним фоном (криві – наближення фону) (а) та без фону (криві – гаусіани) (б).

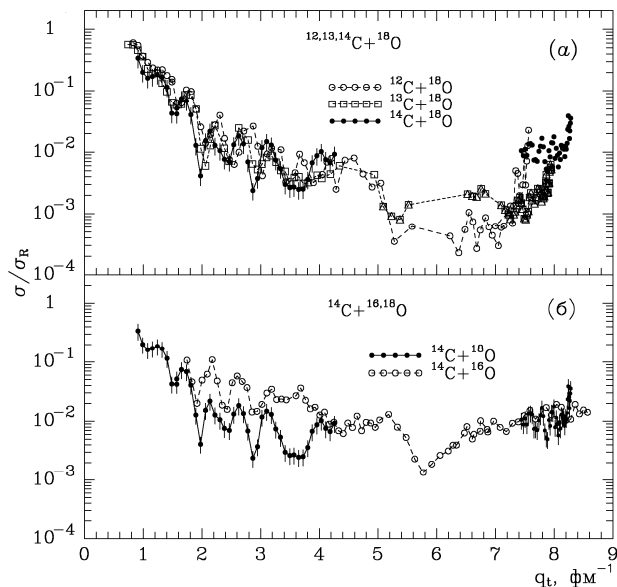


Рис. 4. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ МеВ залежно від переданого імпульсу q_t , у порівнянні з відповідними перерізами розсіянь ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ [1] і $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ [2] при тій же енергії (а) та з розсіянням ядер $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 132$ МеВ [5] (б).

цій же енергії та б) з пружним розсіянням ядер $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 132$ МеВ [5]. Видно, що диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{12,13,14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ близькі між собою за величиною, а перерізи пружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при $2 < q_t < 4$ фм^{-1} менші за перерізи відповідного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$. Це свідчить про те, що непружні процеси при взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ ймовірніші, ніж при взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$.

Аналіз експериментальних даних

Методи розрахунків

Експериментальні дані пружного та непружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ аналізувались за МЗКР з використанням ядерного потенціалу типу Вудса - Саксона з об'ємним і поверхневим поглинаннями

$$\begin{aligned}
 U(r) = & V_0 \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_V}{a_V}\right) \right]^{-1} + \\
 & + iW_S \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_W}{a_W}\right) \right]^{-1} + \\
 & + i4W_D \exp\left(\frac{r - R_{W_D}}{a_{W_D}}\right) \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_{W_D}}{a_{W_D}}\right) \right]^{-2} \quad (3)
 \end{aligned}$$

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. Ці потенціали використовувалися

лись також при аналізі даних пружного розсіяння за ОМ. В усіх розрахунках параметр $r_c = 1,25$ фм.

Спочатку аналізувались експериментальні дані пружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ за ОМ. Визначені в результаті підгонки параметри $X_i = \{V_0, W_S, W_D, r_V, a_V, r_{W_S}, a_{W_S}, r_{W_D}, a_{W_D}\}$ оптичного потенціалу $U(r)$ потім уточнювались у МЗКР-розрахунках.

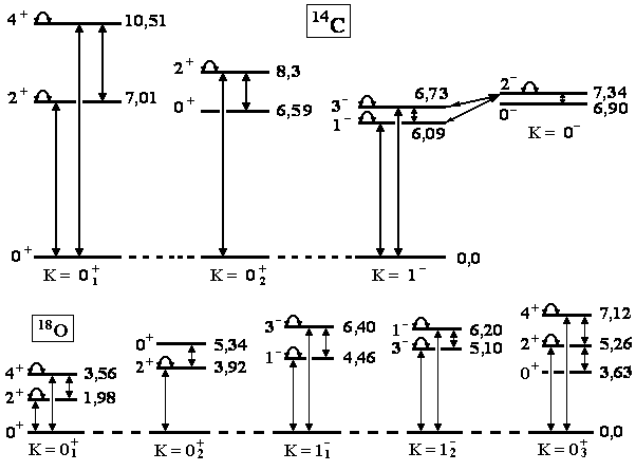


Рис. 5. Схеми переходів ядер ^{14}C і ^{18}O у збуджені стани. Дугами позначено переходи реорієнтації спінів ядер.

У МЗКР-аналізі даних непружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ вважалось, що низькоенергетичні стани цих деформованих ядер мають переважно колективну природу (ротаційну або вібраційну). Для обчислення колективних переходів λ -мультипольності використовувались оператори (форм-фактори)

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

де δ_λ - довжина (параметр) деформації ядра λ -мультипольності. Параметри деформації ядер ^{14}C і ^{18}O та характеристики переходів їх у збуджені стани подано в табл. 1.

Необхідні для МЗКР-розрахунків реакцій передач спектроскопічні амплітуди S_x кластерів (нуклонів) x у системах $A = C + x$ обчислювались за трансляційно-інваріантною моделлю оболонки (ТІМО) методом Смірнова-Чувільського [8] за допомогою програми DESNA [9, 10]. Спектроскопічні амплітуди S_x подано в табл. 2.

Хвильові функції зв'язаних станів кластерів (нуклонів) x у системах $A = C + x$ обчислювались

У МЗКР-розрахунках у схему зв'язку каналів включались пружне й непружне розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та найважливіші реакції передач, схеми переходів і діаграми реакцій яких показано на рис. 5 і 6 відповідно.

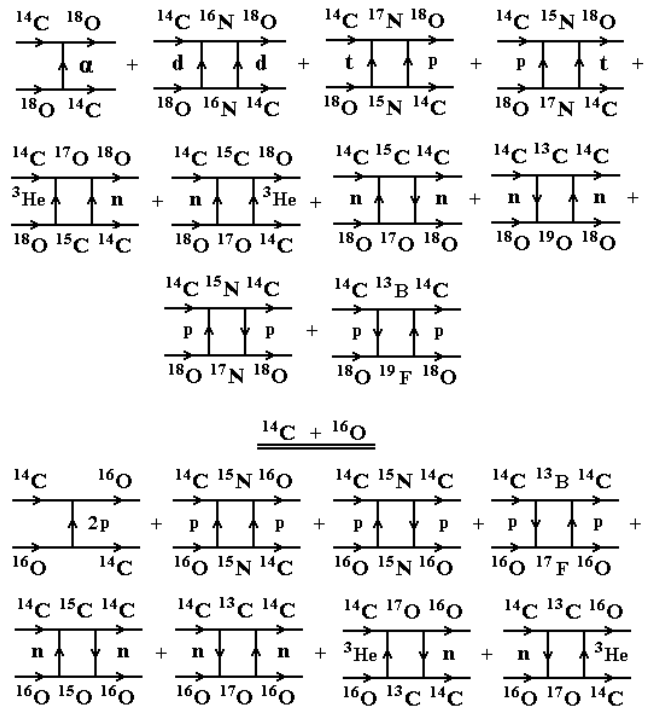


Рис. 6. Діаграми найпростіших реакцій $^{14}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{18}\text{O})^{14}\text{C}$ та $^{14}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{14}\text{C})^{18}\text{O}$.

Таблиця 1. Параметри деформації ядер ^{14}C і ^{18}O

Ядро	$E_{3\alpha}$, MeV	J^π	λ	δ_λ , фм	$\beta_\lambda^{(a)}$	Літ.
^{14}C	6,094	1^-	1	0,4	0,13	[6]
^{18}O	1,982	2_1^+	2	1,0	0,30	[7]
	3,555	4^+	4	1,0	0,30	[7]
	3,920	2_2^+	2	1,0	0,30	[7]
	4,456	1^-	1	1,0	0,30	[7]
	5,098	3^-	3	1,0	0,30	[7]
	5,255	2_3^+	2	1,0	0,30	[7]

^(a) $\beta_\lambda = \delta_\lambda / R$, $R = 1,25 A^{1/3}$ (у цій роботі).

стандартним методом підгонки глибини V дійсного потенціалу Вудса - Саксона до експериментальних значень енергій зв'язку кластерів x у цих системах. При цьому використовувались значення параметрів $a_V = 0,65$ фм і $r_V = 1,25A^{1/3}/(C^{1/3} + x^{1/3})$ фм.

В ОМ-розрахунках та підгонці параметрів потенціалу розсіяння $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ використовувалась програма SPI-GENOA [11], а в МЗКР-розрахунках - програма FRESCO [12].

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

A	C	x	nL_j	S_x
^{13}C	^{12}B	p	$1P_{1/2}$	0,283 ^(a)
^{13}C	^{12}C	n	$1P_{3/2}$	0,801
^{14}C	^{13}B	p	$1P_{3/2}$	1,695 ^(a)
^{14}C	^{13}C	n	$1P_{1/2}$	-1,094 ^(a)
^{15}C	^{13}C	2n	$1P_1$	0,802 ^(a)
^{15}C	^{14}C	n	$2S_{1/2}$	-0,882
^{14}N	^{13}C	p	$1P_{1/2}$	0,461
			$1P_{3/2}$	0,163 ^(a)
^{15}N	^{13}C	d	$2S_1$	0,248 ^(a)
			$1D_1$	0,444 ^(a)
^{15}N	^{14}C	p	$1P_{1/2}$	-0,598
$^{16}\text{N}^*_{3,519}$	^{14}C	d	$2D_2$	0,110
^{17}N	^{14}C	t	$1P_{1/2}$	0,466
^{16}O	^{12}C	α	$3S_0$	0,544
^{16}O	^{13}C	^3He	$2P_{1/2}$	0,910 ^(a)
^{16}O	^{14}C	2p	$2S_0$	0,910 ^(a)
^{16}O	^{14}N	d	$1D_1$	1,400 ^(a)
^{16}O	^{15}N	p	$1P_{1/2}$	-1,461 ^(a)
^{16}O	^{15}O	n	$1P_{1/2}$	1,461 ^(a)
^{17}O	^{13}C	α	$2D_2$	0,191 ^(a)
^{17}O	^{14}C	^3He	$2D_{5/2}$	-0,577
^{17}O	^{16}O	n	$1D_{5/2}$	0,500
^{18}O	^{14}C	α	$4S_0$	-0,802
$^{18}\text{O}^*_{1,98}$	^{14}C	α	$3D_2$	0,237
^{18}O	^{15}C	^3He	$3S_{1/2}$	-0,903 ^(a)
^{18}O	^{15}N	t	$2P_{1/2}$	0,277 ^(a)
^{18}O	$^{16}\text{N}^*_{3,519}$	d	$2D_2$	-0,753
^{18}O	^{17}N	p	$1P_{1/2}$	1,198 ^(a)
$^{18}\text{O}^*_{1,98}$	^{17}N	p	$1P_{3/2}$	-1,198 ^(a)
^{18}O	^{17}O	n	$1D_{5/2}$	1,265 ^(a)
$^{18}\text{O}^*_{1,98}$	^{17}O	n	$2S_{1/2}$	0,876 ^(a)
^{19}O	^{18}O	n	$1D_{5/2}$	-0,882
^{19}O	$^{18}\text{O}^*_{1,98}$	n	$2S_{1/2}$	0,889
^{17}F	^{16}O	p	$1D_{5/2}$	-0,500
^{19}F	^{18}O	p	$2S_{1/2}$	-0,707
^{19}F	$^{18}\text{O}^*_{1,98}$	p	$1D_{5/2}$	1,315

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

Пружне розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$

Експериментальні диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$ ($E_{\text{с.ц.м.}} = 45,94 \text{ MeV}$) та відповідні МЗКР-розрахунки показано на рис. 7. У розрахунках використовувались параметри оптичного потенціалу $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$, визначені методом підгонки за ОМ та уточнені в МЗКР-розрахунках. Три набори A_1, A_2 і A_3 цих параметрів подано в табл. 3. Усі вони забезпечують практично однаковий опис експериментальних даних. На рис. 7 показано МЗКР-розрахунки з A_3 -набором параметрів для потенціального розсіяння (криві <pot>) та реакцій передач α -кластера (крива < α >), послідовного обміну ней-

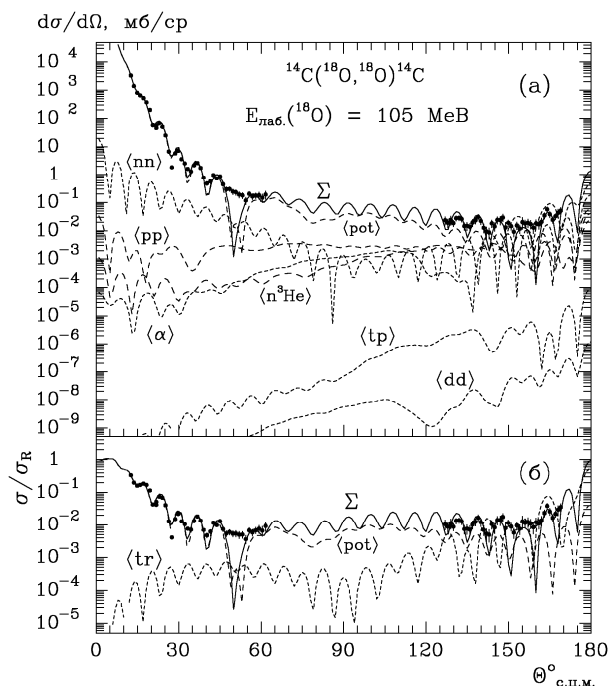


Рис. 7. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$. Криві – МЗКР-розрахунки.

тронами і протонами (криві <nn> і <pp> відповідно), передач $t + p$ і $p + t$ (крива <tp>), $d + d$ (крива <dd>) та $n + ^3\text{He}$ і $^3\text{He} + n$ (крива < $n^3\text{He}$ >). Послідовна передача $d + d$ розрахована для проміжного стану $3,519 \text{ MeV}$ (1^+) ядра ^{16}N , оскільки для станів цього ядра з від'ємною парністю спектроскопічна амплітуда S_d кластера d в системі $^{18}\text{O} = ^{16}\text{N} + d$ рівна нулю. На рис. 7, б кривою <tr> показано когерентну суму перерізів усіх реакцій передач, а суцільними кривими Σ на рис. 7, а і 7, б – когерентні суми всіх процесів. Видно, що потенціальне розсіяння домінує для розсіяння на кути $\theta_{\text{с.ц.м.}} < 125^\circ$, а серед реакцій передач найбільші внески в пружне розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ мають послідовні передачі $n + n$, $p + p$, $n + ^3\text{He}$ і $^3\text{He} + n$ та передача α -кластера.

У табл. 3 подано також набори параметрів V і C для потенціалів розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ і $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$ [1, 2]. Цими наборами параметрів було виконано МЗКР-розрахунки кутових розподілів перерізів $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -розсіяння, показані на рис. 8 штриховими кривими <V> і <C> відповідно, у порівнянні з МЗКР-перерізами, отриманими з набором параметрів A_3 (суцільна крива < A_3 >). Видно, що основні відмінності МЗКР-розрахунків спостерігаються в області середніх кутів. Установлено, що при даній енергії ці розбіжності обумовлені, в основному, різницею глибин потенціалів об'ємного поглинання та відмінністю їхніх дифузностей, залежних від структури ядер.

Таблиця 3. Параметри потенціалів розсіяння ядер $^{12,13,14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$

Системи ядер	$E_{\text{с.ц.м.}}$, MeB	V_0 , MeB	r_V , ФМ	a_V , ФМ	W_S , MeB	r_{W_S} , фМ	a_{W_S} , фМ	W_D , MeB	r_{W_D} , фМ	a_{W_D} , фМ	Літ., $(X_i)^{(a)}$
$^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$	42,00	259,3	0,820	0,680	14,9	1,200	0,450	1,00	1,400	0,350	[1], (B)
$^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$	44,03	309,0	0,790	0,729	16,1	1,126	0,729	0,13	1,227	0,233	[2], (C)
$^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$	45,94	264,1	0,789	0,747	6,1	1,225	0,284	4,47	1,188	0,724	(A ₁)
		264,1	0,789	0,747	8,0	1,312	0,756	2,75	1,082	0,290	(A ₂)
		264,1	0,789	0,747	9,7	1,243	0,747				(A ₃)
$^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$	61,60	290,0	0,780	0,800	12,0	1,250	0,478	2,50	1,222	0,489	
	131,13	290,0	0,780	0,800	20,0	1,250	0,678	2,50	1,222	0,489	

(a) Набори параметрів $X_i = A_1, A_2, A_3, B, C$.

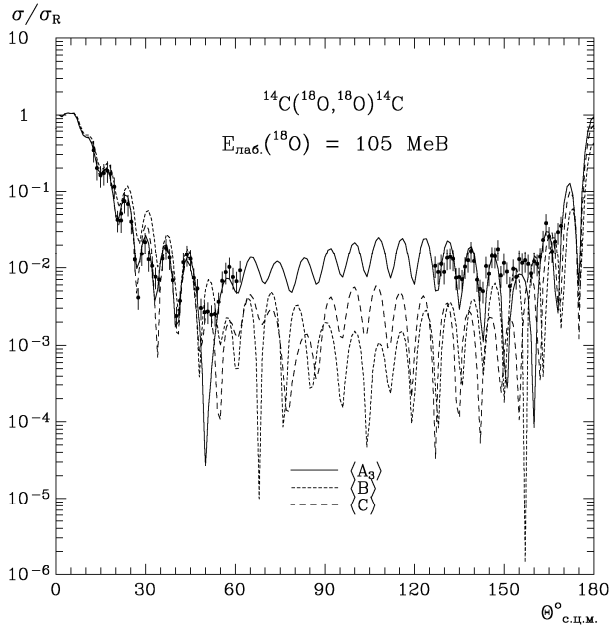


Рис. 8. Порівняння МЗКР-розрахунків диференціальних перерізів пружного розсіяння $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ MeB з наборами параметрів A_3, B і C .

Для порівняння потенціалів взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ і $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$ було проведено МЗКР-аналіз експериментальних даних диференціальних перерізів пружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 132$ і 281 MeB [5]. У схему зв'язку каналів включались пружне й непружне розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$ та реакції передач, діаграми яких показано на рис. 6. Необхідні в МЗКР-розрахунках спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів подано в табл. 2. Експериментальні дані пружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 132$ і 281 MeB ($E_{\text{с.ц.м.}} = 61,6$ і $131,13$ MeB) [5] та відповідні МЗКР-розрахунки показано на рис. 9, а отримані в результаті підгонки параметри $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$ -потенціалу подано в табл. 3. Позначення кривих на рис. 9 аналогічні до позначень на рис. 7. Видно, що в розсіянні іонів ^{16}O на великі кути домінує передача двопротонного $2p$ -кластера (криві $\langle 2p \rangle$), а послідовна передача протонів $p + p$ важлива в області

середніх кутів розсіяння. На відміну від розсіяння іонів ^{18}O послідовна передача нейтронів $n + n$ не має суттєвого значення в усьому діапазоні кутів розсіяння ^{16}O .

Крім потенціалу Вудса - Саксона, отриманого з підгонки параметрів X_i до даних пружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$, було розраховано також фолдінг-потенціал взаємодії цих ядер, обчислений за моделлю подвійної згортки

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

де $\rho_P(r_P)$, $\rho_T(r_T)$ - розподіли густин нуклонів в іоні P (^{18}O) та ядрі мішені T (^{14}C) відповідно; $v(|\vec{r} + \vec{r}_T - \vec{r}_P|) = v(s)$ - нуклон-нуклонний потенціал; \vec{r} - відстань між центрами ядер. У розрахунках потенціалу $V_f(r)$ використовувався потенціал нуклон-нуклонної взаємодії МЗУ Рейда (Reid)

$$v(s) = 7999 \frac{e^{-4s}}{4s} - 2134 \frac{e^{-2,5s}}{2,5s} - 276 (1 - 0,005 \frac{E_P}{A_P}) \frac{\delta(s)}{s^2}, \quad (8)$$

де A_P і E_P - маса й енергія іона P в лабораторній системі, та розподіли нуклонів $\rho_T(r_T)$ і $\rho_P(r_P)$, обчислені за розподілами зарядів (протонів) в ядрах ^{14}C і ^{18}O [13]. Для обчислення фолдінг-потенціалу використовувалась програма DFROT [14, 15].

Порівняння дійсної частини $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -потенціалу Вудса - Саксона, отриманого з аналізу даних розсіяння цих ядер, з фолдінг-потенціалом показано на рис. 10, а суцільною та штриховою кривими відповідно. Видно добре узгодження цих потенціалів у периферійній області взаємодії ядер на відстанях $r > 3,5$ фМ, де, в основному, і відбуваються ядерні процеси при низьких та середніх енергіях. На рис. 10, б порівнюються уявні частини $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -потенціалу для наборів параметрів A_1, A_2 і A_3 (див. табл. 3). Видно, що ці частини відрізняються у внутрішній області взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$, проте ці відмінності, як значалося вище, незначно впливають на МЗКР-

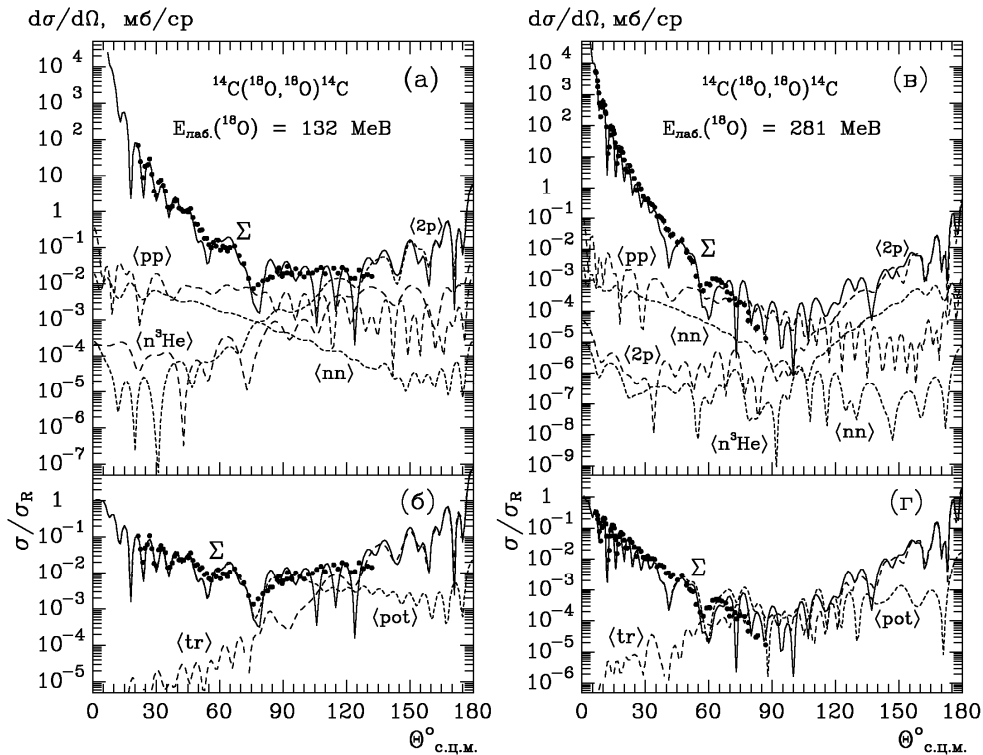


Рис. 9. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 132$ MeV (а, б) і 281 MeV (в, г) [13]. Криві – МЗКР-розрахунки.

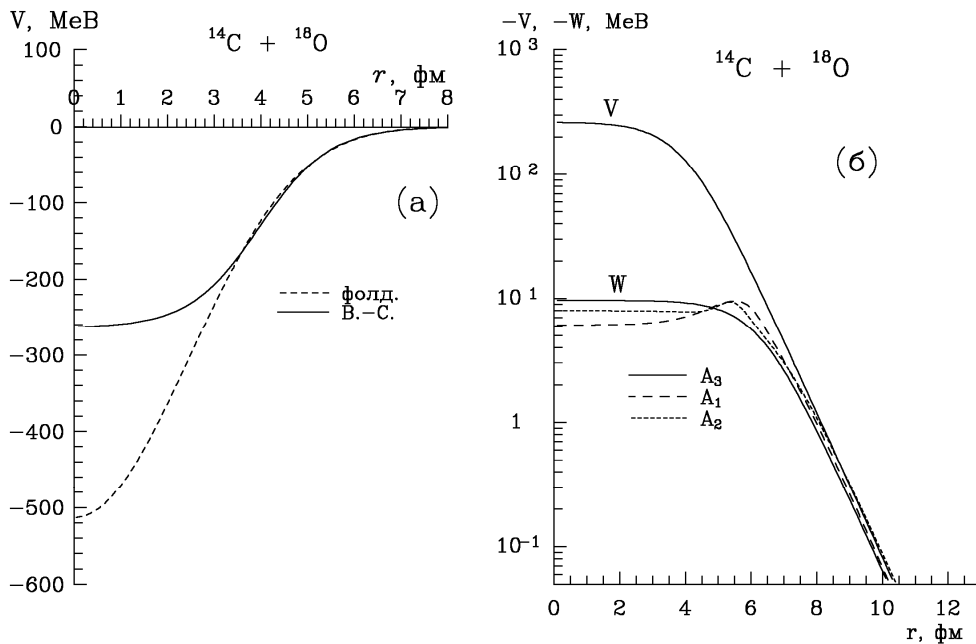


Рис. 10. Порівняння дійсної частини $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -потенціалу Вудса - Саксона з а) фолдінг-потенціалом та б) уявних частин цього потенціалу для наборів параметрів A_1 , A_2 і A_3 (див. табл. 3).

перерізи пружного розсіяння ядер. Це ще раз указує на периферійну природу ядро-ядерної взаємодії.

На рис. 11 порівнюються а) потенціали розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ [1], $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ [2] і $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ MeV та б) ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ MeV і $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$ при $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 132$ MeV. Видно деякі відмінності потенціалів поглинання як у центральній, так і в

периферійній областях, що й приводить до відповідної ізотопічної залежності диференціальних перерізів розсіяння цих ядер.

Непружне розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$

Непружне розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ було поміряно одночасно з пружним розсіянням цих ядер при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ MeV для переходів ядра ^{18}O у збуджені стани 1,982 MeV (2^+),

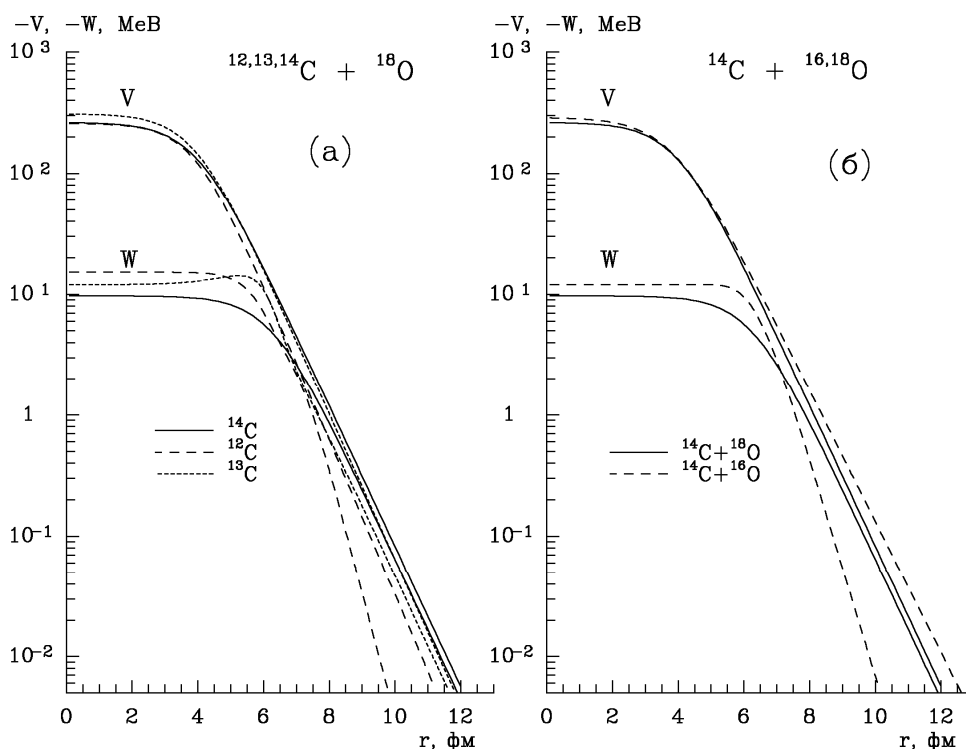


Рис. 11. Порівняння потенціалів розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ [1], $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ [2] і $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$ (а) та ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ і $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$ при $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$ і $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 132 \text{ MeV}$ відповідно (б).

3,555 MeV (4^+), 3,921 MeV (2^+), 4,456 MeV (1^-), 5,098 MeV (3^-), 5,260 MeV (2^+) та переходів ядер ^{14}C і ^{18}O у нерозділені в експерименті збуджені стани 6,094 MeV (1^-) (^{14}C) + 6,198 MeV (1^-) (^{18}O).

Уперше отримані експериментальні дані диференціальних перерізів непружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та вперше проведені відповідні МЗКР-розрахунки для цього розсіяння показано на рис. 12 - 14. Слід зауважити, що експериментальні дані непружного розсіяння ядер є поряд з даними їхнього пружного розсіяння суттєвою додатковою експериментальною базою для визначення параметрів потенціалів ядро-ядерної взаємодії, яка має індивідуальний характер, залежний від структури взаємодіючих ядер. І хоча зазначені вище збуджені стани ядра ^{18}O уже досліджувались у непружному розсіянні ядер $^{12,13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ у попередніх наших роботах [1, 2], де було встановлено їхню переважно колективну природу, у цій роботі дані непружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ використовуються як база даних для визначення параметрів потенціалу цих ядер, так і для дослідження внесків реакцій передач у це розсіяння. Ці внески можуть значно відрізнятися від внесків відповідних передач нуклонів і кластерів у непружне розсіяння ядер $^{12,13}\text{C} + ^{18}\text{O}$, оскільки для непружних розсіянь ядер $^{12,13,14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ у реакціях передач беруть участь різні ядра.

Як і в роботах [1, 2], вважалось, що низькозбуджені стани деформованих ядер ^{14}C і ^{18}O

мають колективну природу. Тип колективних рухів (ротаційний чи вібраційний) у цій роботі спеціально не досліджувався. І традиційно, як і в багатьох роботах інших авторів, у МЗКР-розрахунках для обох типів колективного руху застосовувався оператор переходу (форм-фактор) $V_{\lambda}(r)$ згідно з формулою (6). При цьому використовувались параметри деформації ядер і переходи збудження ядер λ -мультипольності, подані в табл. 1 і показані на рис. 5, а також реакції передач, діаграми яких показано на рис. 6.

Необхідні для МЗКР-розрахунків спектроскопічні амплітуди подано в табл. 2 (лише для стану 1,982 MeV ядра ^{18}O).

Найбільш зручною формою $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -потенціалу для МЗКР-розрахунків непружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ за допомогою програми FRESKO виявився потенціал з набором параметрів A_3 (див. табл. 3). Тому цей потенціал використовувався в МЗКР-розрахунках для всіх процесів.

На рис. 12 показано диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$ для переходу ядра ^{18}O у збуджений стан 1,982 MeV (2^+). Криві – МЗКР-розрахунки для ротаційного переходу (крива $\langle \text{rot} \rangle$), послідовних передач нейтронів $n + n$ і протонів $p + p$ (криві $\langle nn \rangle$ і $\langle pp \rangle$ відповідно), передачі α -частинки (крива $\langle \alpha \rangle$) та передачі $n + ^3\text{He}$ (крива $\langle n^3\text{He} \rangle$). Суцільною кривою Σ показано когерентну суму всіх процесів. Видно, що в цьому випадку домінує ротаційне збудження ядра ^{18}O , а ре-

акції передач несуттєві. Така ж ситуація має місце і для інших збуджених станів ядра ^{18}O , диференціальні перерізи переходів до яких показано

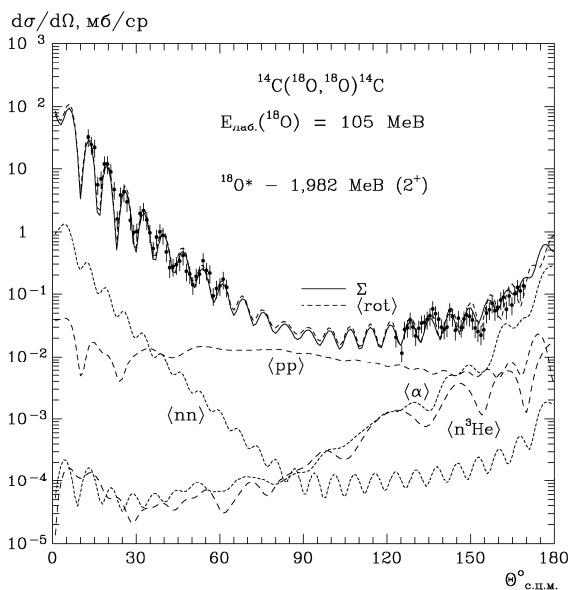


Рис. 12. Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ MeV для переходу ядра ^{18}O у збуджений стан 1,982 MeV (2^+). Криві – розрахунки за МЗКР.

на рис. 13 і 14. Кривими на цих рисунках показано МЗКР-перерізи лише для ротатійних і вібраційних переходів ядер ^{14}C і ^{18}O у збуджені стани.

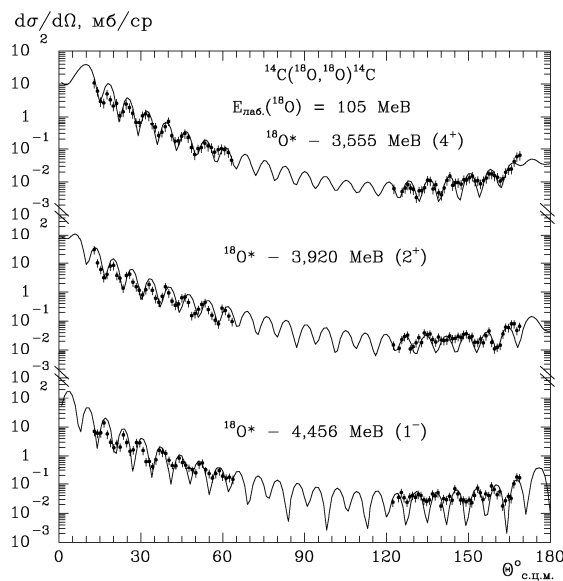


Рис. 13. Те ж саме, що на рис. 12, але для інших збуджень ядра ^{18}O .

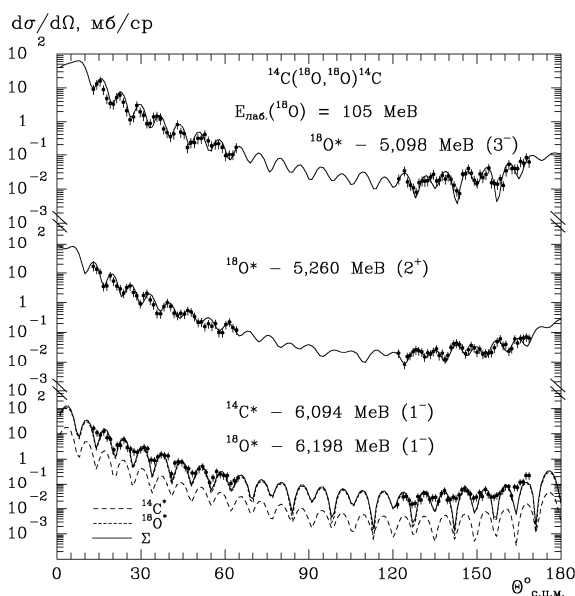


Рис. 14. Те ж саме, що на рис. 12, але для інших збуджень ядра ^{18}O .

Зауважимо, що МЗКР-перерізи для переходів у колективні стани ядер дуже чутливі до форми як дійсної, так і уявної частин потенціалу взаємодії ядер, що суттєво зменшує неоднозначність у виборі параметрів оптичного потенціалу за даними непружного розсіяння ядер.

Основні результати та висновки

Поміряно диференціальні перерізи пружного й непружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ MeV для переходів в основні

стани ядер ^{14}C і ^{18}O та в збуджені стани 6,094 MeV (1^-) ядра ^{14}C та 1,982 MeV (2^+), 3,555 MeV (4^+), 3,921 MeV (2^+), 4,456 MeV (1^-), 5,098 MeV (3^-), 5,260 MeV (2^+) і 6,198 MeV (1^-) ядра ^{18}O .

Отримані експериментальні дані пружного й непружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та відомі з літератури дані пружного розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 132$ і 281 MeV [5] проаналізовано за ОМ та МЗКР із включенням у схему зв'язку каналів пружного й непружного розсіяння та найпростіших реакцій передач нуклонів і кластерів. У розрахунках використовувався оптичний потенціал типу Вудса - Саксона з об'ємним та поверхневим поглинаннями.

Визначено параметри оптичних потенціалів взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ і $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$.

Досліджено механізми пружного й непружного $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -розсіяння. Установлено, що в пружному розсіянні ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ домінує потенціальне розсіяння в діапазоні кутів $\theta_{\text{с.п.м.}} < 125^\circ$. Реакції передач важливі лише для великих кутів. МЗКР-аналіз показав, що збуджені низькоенергетичні стани ядер ^{14}C і ^{18}O мають, в основному, колективну природу.

Розраховано фолдінг-потенціал взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$, який порівнюється з отриманим методом підгонки МЗКР-перерізів до експериментальних даних розсіяння ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$.

Досліджено ізотопічні відмінності (ефекти) в розсіянні ядер $^{12, 13, 14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ і $^{14}\text{C} + ^{16, 18}\text{O}$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. Рудчик А. Т., Ширма Ю. О., Кощій Є. І. та ін. Ізотопічні ефекти в пружному і непружному розсіянні іонів $^{16, 18}\text{O}$ ядрами ^{12}C і ^{13}C // Ядерна фізика та енергетика. - 2010. - Т. 11, № 3. - С. 251 - 260.
3. Kowalczyk M. SMAN: A Code for Nuclear Experiments, Warsaw University report (1998).
4. Чернієвський 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 дослід. - 2002. - № 2 (8). - С. 216 - 224.
5. Dem'yanova A. S., Glukhov Yu. A., Trzaska W. et al. Elastic scattering of $^{16}\text{O} + ^{14}\text{C}$ Nuclei // Bull. Rus. Acad. Sci. Phys. - 2003. - Vol. 67. - P. 83.
6. Mezhevych S. Yu., Rudchik A. T., Rusek K. et al. Excitation of ^{14}C by 45 MeV ^{11}B ions // Nucl. Phys. A. - 2005. - Vol. 753. - P. 13 - 28.
7. 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.
8. 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.
9. Рудчик А. Т., Чувильський Ю. М. Вычисление спектроскопических амплитуд для произвольных ассоциаций нуклонов в ядрах 1р-оболочки (программа DESNA). - Киев, 1982. - 27 с. - (Препр. АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-82-12).
10. Рудчик А. Т., Чувильський Ю. М. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1р-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач // УФЖ. - 1985. - Т. 30, № 6. - С. 819 - 825.
11. Nilsson B. S. SPI-GENOA: an Optical Model Search Code. - 1976 (Report / A Niels Bohr Institute).
12. Thompson I. J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comp. Phys. Rep. - 1988. - Vol. 7. - P. 167 - 212.
13. 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.
14. Cook J. DFPOТ - a program for the calculation of double folded potentials // Comp. Phys. Com. - 1982. - Vol. 25, Is. 2. - P. 125 - 139.
15. Cook J. DFPOТ - a program for the calculation of double folded potentials // Ibid. - 1984. - Vol. 35. - P. C - 775.

УПРУГОЕ И НЕПРУГОЕ РАССЕЙНИЕ ЯДЕР $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$

А. Т. Рудчик, Ю. О. Ширма, Е. І. Кощій, С. Кличевски, Б. Г. Новацкий, О. А. Понкратенко, Е. Пясецки, А. П. Романишина, К. Русек, Ю. М. Степаненко, И. Строек, С. Б. Сакута, А. Будзановски, Л. Гловацка, И. Сквирчиньска, Р. Сюдак, Я. Хойньски, Б. Чех, А. Щурек

Получены новые экспериментальные данные дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния ядер $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при энергии $E_{\text{лаб}}(^{18}\text{O}) = 105$ МэВ. Экспериментальное исследование этого рассеяния выполнено впервые. Экспериментальные данные проанализированы по оптической модели и методу связанных каналов реакций с учетом вкладов наиболее простых реакций передач. Определены параметры $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -потенциала. Исследованы изотопические отличия потенциалов взаимодействия ядер $^{12, 13, 14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ и $^{14}\text{C} + ^{16, 18}\text{O}$.

Ключевые слова: ядерные реакции, оптическая модель, метод связанных каналов реакций, фолдинг-модель, спектроскопические амплитуды, оптические потенциалы, механизмы реакций.

ELASTIC AND INELASTIC SCATTERING OF THE $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ NUCLEI

A. T. Rudchik, Yu. O. Shyrma, E. I. Koshchy, S. Kliczewski, B. G. Novatsky, O. A. Ponkratenko, E. Piasecki, G. P. Romanyszyna, K. Rusek, Yu. M. Stepanenko, I. Strojek, S. B. Sakuta, A. Budzanowski, L. Głowacka, I. Skwirczyńska, R. Siudak, J. Choiński, B. Czech, A. Szczurek

New angular-distribution data of $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ elastic and inelastic scattering at the energy $E_{\text{lab}}(^{18}\text{O}) = 105$ MeV were obtained firstly. The data were analysed within the optical model and coupled-reaction-channels methods including contributions from most simple transfer reactions. The $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ potential parameters were deduced. Isotopic differences of the $^{12, 13, 14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ and $^{14}\text{C} + ^{16, 18}\text{O}$ potentials were investigated.

Keywords: nuclear reactions, optical model, coupled-reaction-channels method, folding-model, spectroscopic amplitudes, optical potentials, reaction mechanisms.

Надійшла до редакції 04.10.10,
після доопрацювання - 01.11.10.