

ІЗОТОПЧНІ ЕФЕКТИ В ПРУЖНОМУ І НЕПРУЖНОМУ РОЗСІЯННІ ІОНІВ
^{16,18}O ЯДРАМИ ¹²C І ¹³C

© 2010 А. Т. Рудчик¹, Ю. О. Ширма¹, Є. І. Коций², 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, 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 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 й непружного розсіяння ядер ¹³C + ¹⁸O при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ MeV для переходів ядер ¹³C і ¹⁸O в основні стани та збуджені низькоенергетичні стани. Ці та відомі з літератури дані пружного розсіяння ядер ¹³C + ¹⁸O при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 15, 20, 24, 31$ MeV і $E_{\text{лаб.}}(^{13}\text{C}) = 24$ MeV досліджено за оптичною моделлю та методом зв'язаних каналів реакцій. Визначено набори параметрів потенціалу взаємодії ядер ¹³C + ¹⁸O та їхню енергетичну залежність. Отримано відомості про внески потенціального розсіяння та реакцій передач у канали пружного й непружного розсіяння ядер ¹³C + ¹⁸O. Досліджено ізотопчні відмінності (ефекти) в розсіянні ядер ^{12,13}C + ^{16,18}O. Установлено, що при взаємодії ядер ¹³C + ¹⁸O поглинання дещо більше, ніж при зіткненні ядер ¹²C + ¹⁸O та ¹³C + ¹⁶O.

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

Вступ

Розсіяння важких іонів ядрами-ізотопами можна ефективно використовувати для дослідження особливостей структури поверхонь ізотопів, оскільки ядерні процеси при взаємодії ядер в основному відбуваються в периферійних областях ядер. Форма ядро-ядерних потенціалів тісно зв'язана з макроструктурою поверхонь взаємодіючих ядер, а величини оптичних потенціалів поглинання відображають залежність непружних ядерних процесів від оболонкової структури ізотопів. Зокрема, для пружного розсіяння ядер ¹²C + ^{16,18}O в роботі [1] (рис. 10, а) було показано, що форми потенціалів поглинання для взаємодії цих двох пар ядер помітно відрізняються в периферійній області: потенціал поглинання взаємодії ядер ¹²C + ¹⁶O має форму квазімолекулярного типу при енергіях $E_{\text{с.ц.м.}} < 90$ MeV, тоді як в аналогічного потенціалу розсіяння ядер ¹²C + ¹⁸O така форма відсутня.

У цій роботі представлено результати дослідження пружного й непружного розсіяння іонів ¹⁸O ядрами ¹³C при енергії $E(^{18}\text{O}) = 105$ MeV. Отримані експериментальні дані та результати їхнього аналізу за оптичною моделлю (ОМ) та методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) порівнюються з розсіянням ядер ¹²C + ¹⁸O [1] і ¹³C + ¹⁶O [2]. Для визначення енергетичної зале-

жності параметрів оптичного потенціалу взаємодії ядер ¹³C + ¹⁸O виконано також аналіз відповідних експериментальних даних, відомих з літературних джерел при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 15, 20, 24$ MeV [3], 31 MeV [4] і $E_{\text{лаб.}}(^{13}\text{C}) = 24$ MeV [5]. Енергетична залежність параметрів оптичного потенціалу взаємодії ядер ¹³C + ¹⁸O може бути ефективно використана для дослідження ядерних реакцій ¹³C(¹⁸O, X) з виходом нестабільних (екзотичних) ядер за МЗКР, зокрема, для визначення потенціалу взаємодії цих ядер з іншими стабільними і нестабільними ядрами. Для багатьох короткоживучих нестабільних ядер, з яких неможливо утворити вторинні радіоактивні пучки іонів, цей метод є єдино можливим. Оскільки в нашому експерименті одночасно з пружним та непружним розсіянням іонів ¹⁸O ядрами ¹³C реєструвались нестабільні продукти реакцій ¹³C(¹⁸O, X), то визначення оптичних потенціалів взаємодії ядер ¹³C + ¹⁸O в основних і збуджених станах є першим етапом у дослідженні цих реакцій з виходом нестабільних ядер.

У цій роботі представлено також результати дослідження непружного розсіяння ядер ¹³C + ¹⁸O із переходом ядра ¹³C у збуджені стани 3,088 MeV (1/2⁺), 3,555 MeV (1/2⁻) і 3,854 MeV (5/2⁺) та ядра ¹⁸O у стани 1,982 MeV (2⁺), 3,555 MeV (4⁺), 3,921 MeV (2⁺), 4,456 MeV (1⁻), 5,098 MeV (3⁻) і 5,260 MeV (2⁺).

Методика експерименту

Диференціальні перерізи пружного й непружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та реакцій $^{13}\text{C}(^{18}\text{O}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$ вимірювались на Варшавському циклотроні С-200Р. Розкид енергії пучка іонів на мішені не перевищував 0,5 %. В експерименті використовувалась самопідтримна мішень вуглицю товщиною 500 мкг/см^2 з 90 %-ним збагаченням ^{13}C .

Продукти реакцій реєструвались двома ΔE - E -спектрометрами з кремнієвими ΔE -детекторами товщиною 20 і 67 мкм та двома кремнієвими E -детекторами товщиною 1 мм. В експерименті використовувалась типова електронна система відбору імпульсів з детекторів за швидкоповільними збігами на базі електроніки стандарту САМАС та комп'ютерна система накопичення експериментальної інформації SMAN [6], яка забезпечувала отримання двовимірних $\Delta E(E)$ -спектрів. Детальний опис експериментальної установки та її реєстраційних систем міститься в роботі [7].

Типовий двовимірний $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій $^{13}\text{C}(^{18}\text{O}, X)$ показано на рис. 1. Видно, що

експериментальна методика забезпечувала ідентифікацію продуктів реакцій як за зарядами, так і за масами.

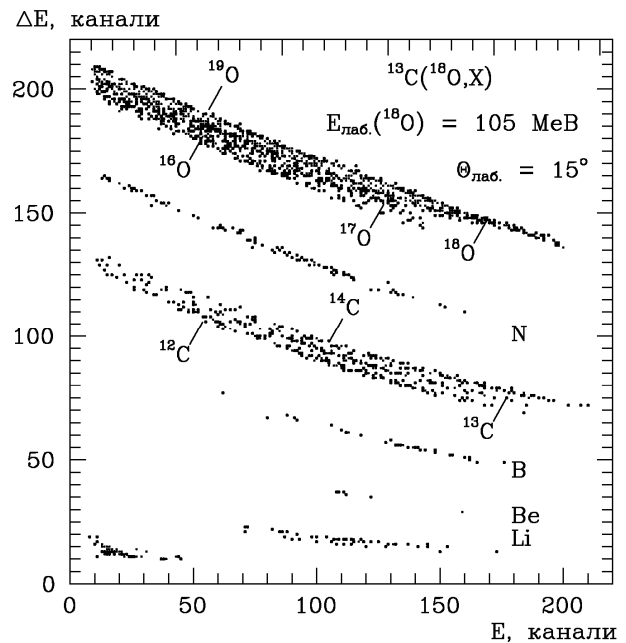


Рис. 1. Типовий $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій $^{13}\text{C}(^{18}\text{O}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$.

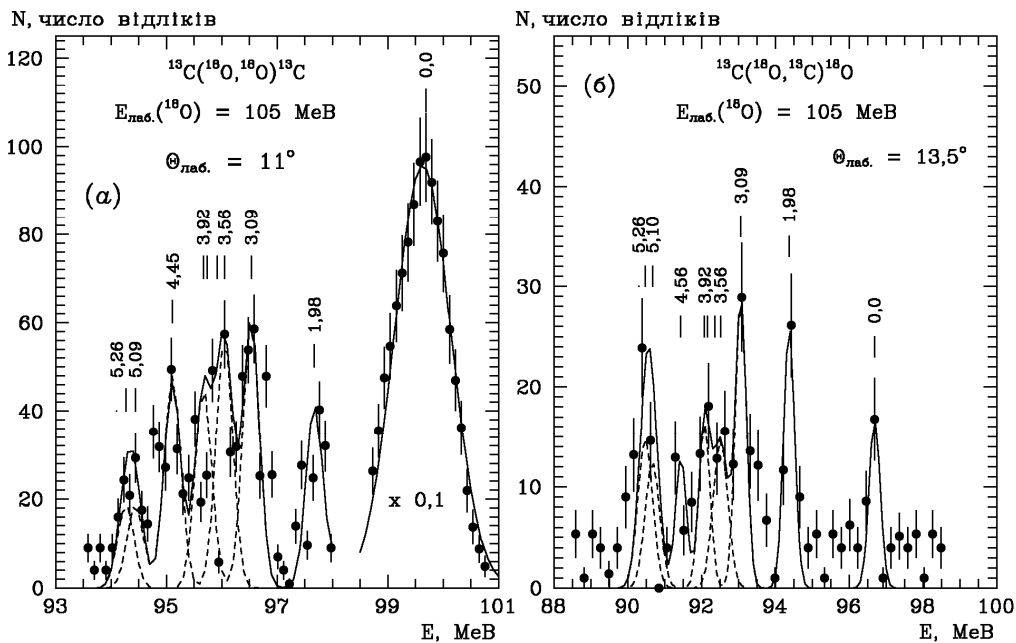


Рис. 2. Типові енергетичні спектри ^{18}O (а) і ^{13}C (б) – продуктів реакцій $^{13}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{18}\text{O})^{18}\text{O}$ та $^{13}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{13}\text{C})^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$. Криві – наближення спектрів гауссіанами.

Типові енергетичні спектри числа зареєстрованих ядер ^{18}O і ^{13}C (числа відліків $N(E)$), отримані з $\Delta E(E)$ -спектрів з вилученням неперервних компонент (фонів), показано на рис. 2. Про наближення та вилучення неперервних фонів з експериментальних спектрів детально описано в роботі [1]. Піки експериментальних спектрів наближувались гауссіанами

$$N(E) = \sum_i N_i \exp\left(-0,5 \frac{(E - E_i)^2}{h_i^2}\right), \quad (1)$$

положення максимумів E_i яких дорівнювало кінетичним енергіям продуктів реакцій, а параметри ширин h_i – експериментальній ширині h_e ізольованого піка спектра або ширині h_l рівня збудженого стану ядра. При наближенні експериме-

нтальних спектрів гауссіанами підганялись лише параметри N_i . Кривими на рис. 2 показано підганяні за методом найменших квадратів гауссіани. Такий метод наближення експериментальних спектрів гауссіанами забезпечував отримання площ гауссіанів для ізольованих піків з похибками до 20 %, а для неізольованих піків з похибками 30 - 40 %. Площі гауссіанів, якими наближувались спектри ^{18}O та ^{13}C , використовувалась для обчислення диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$.

Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ нормувались до кулонівського розсіяння на малих кутах. Похибка абсолютизації перерізів не перевищувала 20 %.

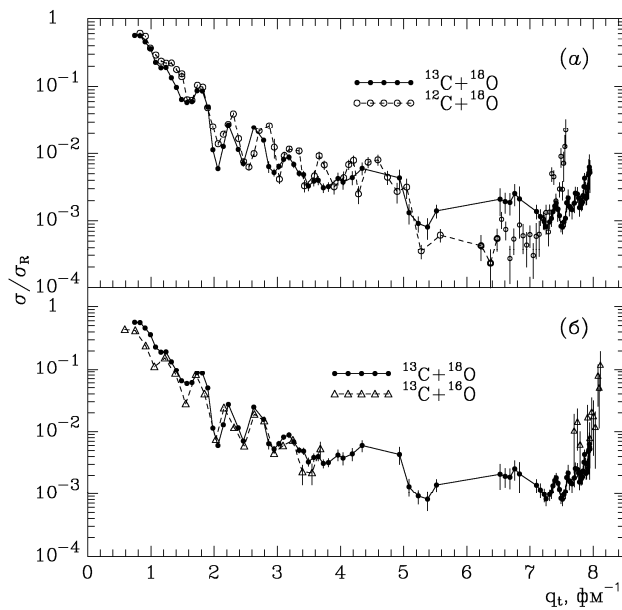


Рис. 3. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ [1] і $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ (а) та $^{13}\text{C} + ^{16}\text{O}$ [2] і $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ (б) при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$ і $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 108,15 \text{ MeV}$ залежно від переданих імпульсів q_t .

На рис. 3 порівнюються диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ [1] і $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ (а) та $^{13}\text{C} + ^{16}\text{O}$ [2] і $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ (б) залежно від переданого імпульсу q_t при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$ і $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 108,15 \text{ MeV}$ [2]. Видно, що експериментальні диференціальні перерізи пружного розсіяння цих пар ядер помітно відрізняються при $q_t > 5 \text{ fm}^{-1}$, що може бути обумовленим різною структурою ядер $^{12,13}\text{C}$ і $^{16,18}\text{O}$ (ізотопічна залежність розсіяння ядер).

Аналіз експериментальних даних

Методи розрахунків

Експериментальні дані пружного й непружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ аналізувались за ОМ та МЗКР з використанням ядерного потенціалу

типу Вудса - Саксона з об'ємним і поверхневим поглинаннями

$$U(r) = V_0 \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_V}{a_V}\right) \right]^{-1} + iW_S \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_{W_S}}{a_{W_S}}\right) \right]^{-1} + i4W_D \exp\left(\frac{r - R_{W_D}}{a_{W_D}}\right) \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_{W_D}}{a_{W_D}}\right) \right]^{-2} \quad (2)$$

та кулонівського потенціалу рівномірно зарядженої кулі

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

де

$$R_i = r_i (A_p^{1/3} + A_T^{1/3}) \quad (i = V, W, C); \quad (4)$$

A_p, Z_p та A_T, Z_T - маси і заряди ядер іонів P та мішені T відповідно. 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 $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та найбільш важливі реакції передач. Схеми переходів ядер ^{13}C і ^{18}O у збуджені стани показано на рис. 4, а діаграми найбільш імовірних реакцій передач - на рис. 5.

При аналізі даних непружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ за МЗКР вважалося, що низькоенергетичні стани деформованих ядер ^{12}C і ^{18}O мають переважно колективну природу (ротаційну або вібраційну). Колективні переходи обчислювались з використанням операторів (форм-факторів)

$$V_\lambda(r) = -\frac{\delta_\lambda}{\sqrt{4\pi}} \frac{dU(r)}{dr}, \quad (5)$$

де δ_λ - довжина (параметр) деформації ядра мультіпольності λ . Параметри деформації ядер ^{13}C і ^{18}O та характеристики переходів їх у збуджені стани подано в табл. 1. Параметри деформації δ_λ ядер ^{13}C і ^{18}O було отримано методом підгонки МЗКР-перерізів непружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ до експериментальних даних на малих кутах. Для ядра ^{18}O ці параметри виявились такими ж самими, як у роботі [8].

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 [9]. Для розрахунків спектроскопічних амплітуд S_x використовувалась програма DESNA [10, 11] з відповідними корекціями хвильових функцій віднос-

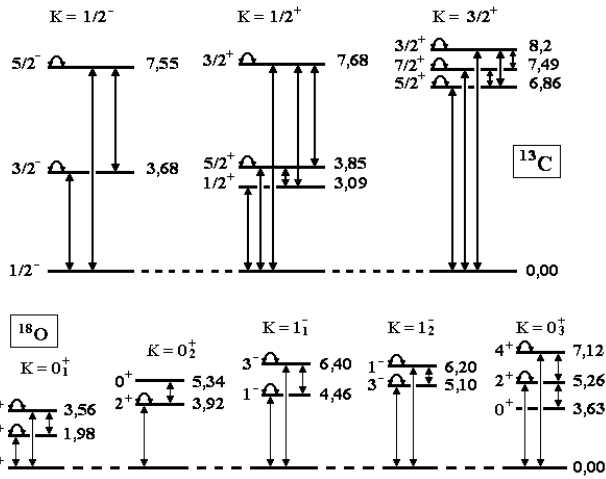


Рис. 4. Схеми переходів ядер ^{13}C і ^{18}O у збуджені стани. Дугами позначено переходи реорієнтації спінів ядер.

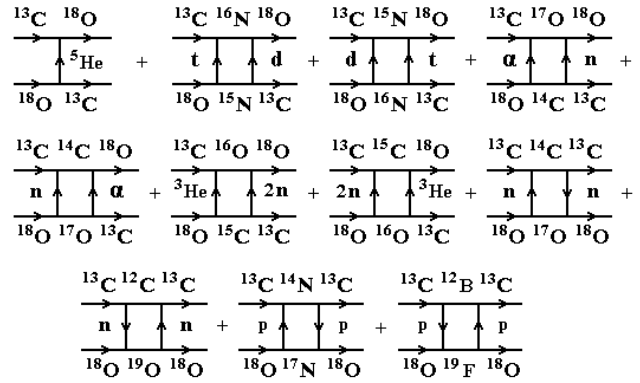


Рис. 5. Діаграми найпростіших реакцій передач $^{13}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{18}\text{O})^{13}\text{C}$ та $^{13}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{13}\text{C})^{18}\text{O}$.

Таблиця 1. Параметри деформації ядер ^{13}C і ^{18}O

Ядро	$E_{3\beta_2}$, MeV	J^π	λ	δ_λ , фм	$\beta_\lambda^{(a)}$
^{13}C	3,088	$1/2^+$	1	1,0	0,34
	3,684	$3/2^-$	2	1,0	0,34
			4	1,0	0,34
			4	1,0	0,34
^{18}O	3,854	$5/2^+$	3	1,0	0,34
	1,982	2_1^+	2	1,0	0,30
	3,555	4^+	4	1,0	0,30
	3,920	2_2^+	2	1,0	0,30
	4,456	1^-	1	1,0	0,30
	5,098	3^-	3	1,0	0,30
	5,255	2_3^+	2	1,0	0,30

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

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

A	C	x	nL_j	S_x	A	C	x	nL_j	S_x
^{13}C	^{12}B	p	$1P_{1/2}$	0,283 ^(a)	$^{18}\text{O}^*_{1,98}$	^{13}C	^5He	$1G_{5/2}$	0,285 ^(a)
			$1P_{3/2}$	0,801	^{18}O	^{14}C	α	$4S_0$	-0,802
^{13}C	^{12}C	n	$1P_{1/2}$	0,601	^{18}O	^{15}N	t	$2P_{1/2}$	0,277 ^(a)
^{14}C	^{13}C	n	$1P_{1/2}$	1,094 ^(a)	^{18}O	^{16}N	d	$2P_2$	0,884
^{14}N	^{13}C	p	$1P_{1/2}$	0,461	^{18}O	^{16}O	2n	$2S_0$	1,061
			$1P_{3/2}$	0,163 ^(a)	^{18}O	^{17}N	p	$1P_{1/2}$	1,198 ^(a)
^{15}N	^{13}C	d	$2S_1$	0,248 ^(a)	$^{18}\text{O}^*_{1,98}$	^{17}N	p	$1P_{3/2}$	-1,198 ^(a)
			$1D_1$	0,444 ^(a)	^{18}O	^{17}O	n	$1D_{5/2}$	1,265 ^(a)
^{16}O	^{13}C	^3He	$2P_{1/2}$	0,910 ^(a)	$^{18}\text{O}^*_{1,98}$	^{17}O	n	$2S_{1/2}$	0,876 ^(a)
^{17}O	^{13}C	α	$2D_2$	0,191	^{19}O	^{18}O	n	$1D_{5/2}$	-0,882
^{18}O	^{13}C	^5He	$3D_{1/2}$	-0,394 ^(a)	^{19}O	$^{18}\text{O}^*_{1,98}$	n	$2S_{1/2}$	-0,889
$^{18}\text{O}^*_{1,98}$	^{13}C	^5He	$4S_{3/2}$	-0,169	^{19}F	^{18}O	p	$2S_{1/2}$	0,699
			$3D_{3/2}$	-0,112	^{19}F	$^{18}\text{O}^*_{1,98}$		$1D_{3/2}$	1,315 ^(a)
			$3D_{5/2}$	0,073 ^(a)					

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

Аналіз експериментальних даних пружного й непружного розсіяння ядер здійснювався таким чином. Спочатку експериментальні дані пружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 15, 20, 24$ МеВ [3], 31 МеВ [4],

105 МеВ і $E_{\text{лаб.}}(^{13}\text{C}) = 24$ МеВ [5] аналізувались за ОМ. При цьому в підгонці параметрів $X_i = \{V_0, r_V, a_V, W_S, r_{WS}, a_{WS}, W_D, r_{WD}, a_{WD}\}$ потенціалу $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ за початкові значення брались параметри оптичного потенціалу розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$

[2], отримані з енергетичної залежності останніх. Потім ОМ-параметри уточнювались в МЗКР-розрахунках одночасно з підгонкою параметрів деформації δ_λ ядер ^{13}C і ^{18}O за експериментальними даними непружного розсіяння $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$. При цьому враховувались внести в пружне й непружне розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ реакцій передач. Закінчувалась процедура визначення параметрів оптичного потенціалу $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ знаходженням їхньої енергетичної залежності.

Для підгонки ОМ-параметрів оптичного потенціалу розсіяння використовувалась програма SPI-GENOA [12], а для МЗКР-розрахунків - програма FRESKO [13].

Пружне розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$

Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$ представлено на рис. 6 в абсолютних одиницях (а) та відносно кулонівського розсіяння (б). Кривими показано розрахунки за МЗКР для потенціального розсіяння (крива $\langle \text{pot} \rangle$) та реакцій передач кластерів x і $x + y$ (криві $\langle x \rangle$ і $\langle xy \rangle$) з параметрами потенціалу $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$, поданими в табл. 3 (набір параметрів А). Видно, що основну роль у пружному розсіянні $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при даній енергії відіграє потенціальне розсіяння. Серед реакцій передач найважливішими є послідовні передачі

нуклонів $n + n$ і $p + p$ (криві $\langle nn \rangle$ і $\langle pp \rangle$) та послідовні передачі кластерів $^3\text{He} + 2n$ і $2n + ^3\text{He}$ (крива $\langle ^3\text{He}^2n \rangle$). Проте когерентна сума перерізів усіх реакцій передач (крива $\langle \text{tr} \rangle$ на рис. 6, б) є незначною в порівнянні з потенціальним розсіянням. Кривими Σ на рис. 6 показано МЗКР-переріз усіх процесів, що дають внески в пружне розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$.

Для пружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$ в табл. 3, крім набору параметрів А, знайденого шляхом підгонки МЗКР-розрахунків до експериментальних даних, подано також набори параметрів В і С для цієї ж енергії в с.ц.м., отримані з енергетичних залежностей параметрів потенціалів розсіяння $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ і $^{13}\text{C} + ^{16}\text{O}$ відповідно. МЗКР-розрахунки пружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$ з наборами параметрів А, В і С показано на рис. 7 (криві $\langle \text{A} \rangle$, $\langle \text{B} \rangle$ і $\langle \text{C} \rangle$ відповідно). Видно, що експериментальні дані розсіяння $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ погано описуються МЗКР-перерізами, обчисленими з наборами параметрів В і С, особливо в області середніх кутів (набір В) та на великих кутах (набір С). Це свідчить про ізотопічну залежність (ефект) оптичних потенціалів взаємодії ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$, $^{13}\text{C} + ^{16}\text{O}$ і $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ від структури ядер.

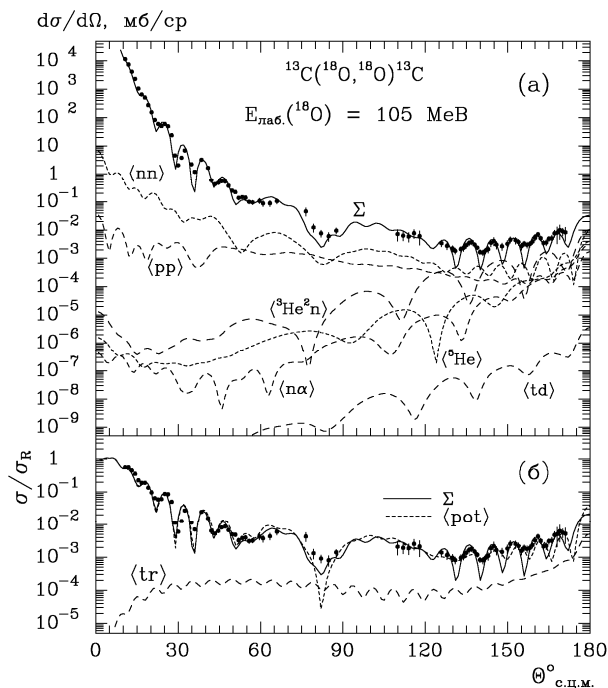


Рис. 6. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$. Криві – розрахунки за МЗКР для потенціального розсіяння (крива $\langle \text{pot} \rangle$), для всіх реакцій передач (крива $\langle \text{tr} \rangle$) та для окремих передач (криві $\langle x \rangle$ і $\langle xy \rangle$). Крива Σ – когерентна сума всіх процесів.

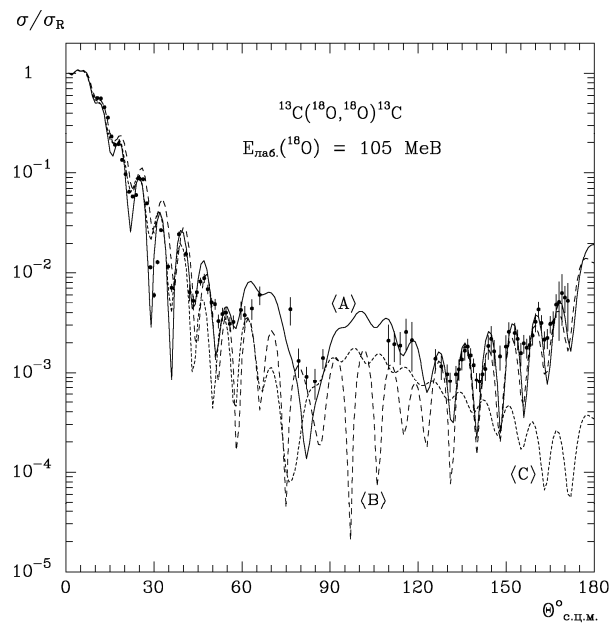


Рис. 7. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$. Криві – МЗКР-розрахунки з параметрами А, В і С.

Таблиця 3. Параметри потенціалів розсіяння ядер

Іон + ядро	$E_{\text{лаб.}}$, МеВ	$E_{\text{с.ц.м.}}$, МеВ	Набір парам.	V_0 , МеВ	r_V , фм	a_V , фм	W_S , МеВ	r_{WS} , фм	a_{WS} , фм	W_D , МеВ	r_{WD} , фм	a_{WD} , фм
$^{18}\text{O} + ^{13}\text{C}$	15	6,29		68,0	1,630	0,370	1,4	1,605	0,027	0,40	1,841	0,100
	20	8,39		64,2	1,430	0,376	3,3	1,559	0,028	0,40	1,808	0,100
	24	10,07		69,0	1,374	0,390	5,4	1,520	0,029	0,40	1,778	0,100
	31	13,00		85,0	1,354	0,381	7,2	1,448	0,032	0,33	1,718	0,123
$^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$	24	13,94		100,0	1,345	0,391	7,5	1,448	0,032	0,33	1,710	0,123
$^{18}\text{O} + ^{13}\text{C}$	105	44,03	А	309,0	0,790	0,729	16,1	1,126	0,729	0,13	1,227	0,233
$^{18}\text{O} + ^{12}\text{C}$		44,03	В	260,5	0,794	0,680	15,1	1,201	0,446	1,00	1,400	0,397
$^{16}\text{O} + ^{13}\text{C}$		44,03	С	294,6	0,805	0,686	17,1	0,944	0,562	5,20	1,168	0,719

Оптичні потенціали розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ МеВ}$ ($E_{\text{с.ц.м.}} = 4,03 \text{ МеВ}$) з наборами параметрів А, В і С показано на рис. 8. Видно, що в основному вони відрізняються своїми уявними частинами в периферійній області взаємодії ядер. На цьому ж рисунку показано також фолдінг-потенціал взаємодії ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$, обчислений за моделлю подвійної згортки

$$V_f(r) = \int \rho_p(r_p) \rho_T(r_T) \nu(|\vec{r} + \vec{r}_T - \vec{r}_p|) d^3r_p d^3r_T, \quad (6)$$

де $\rho_p(r_p)$, $\rho_T(r_T)$ - розподіли густин нуклонів в іоні $P(^{18}\text{O})$ та ядрі мішені $T(^{13}\text{C})$ 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)

$$\nu(s) = 7999 \frac{e^{-4s}}{4s} - 2134 \frac{e^{-2,5s}}{2,5s} - 276 (1 - 0,005 \frac{E_p}{A_p}) \frac{\delta(s)}{s^2}, \quad (7)$$

де A_p і E_p - маса й енергія іона P в лабораторній системі, а також розподіли нуклонів, обчислені за розподілами зарядів (протонів) в ядрах ^{13}C і ^{18}O [14]. Обчислювався фолдінг-потенціал $V_f(r)$ за допомогою програми DFROT [15, 16].

На рис. 8 потенціал $V_f(r)$ (крива <фолдінг>) порівнюється з дійсними частинами потенціалу, отриманими з аналізу експериментальних даних розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$. Видно, що дійсна частина оптичного потенціалу ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ МеВ}$ добре узгоджується з фолдінг-потенціалом.

Експериментальні дані пружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 15, 20, 24 \text{ МеВ}$ [3], 31 МеВ [4] і $E_{\text{лаб.}}(^{13}\text{C}) = 24 \text{ МеВ}$ [5] було також проаналізовано за ОМ і МЗКР. Отримані набори параметрів потенціалу $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ з підгонки цих даних подано в табл. 3, а на рис. 9 показано відповідні МЗКР-розрахунки. Штриховими кривими <pot> і <tr> показано МЗКР-розрахунки для потенціального розсіяння та реакцій

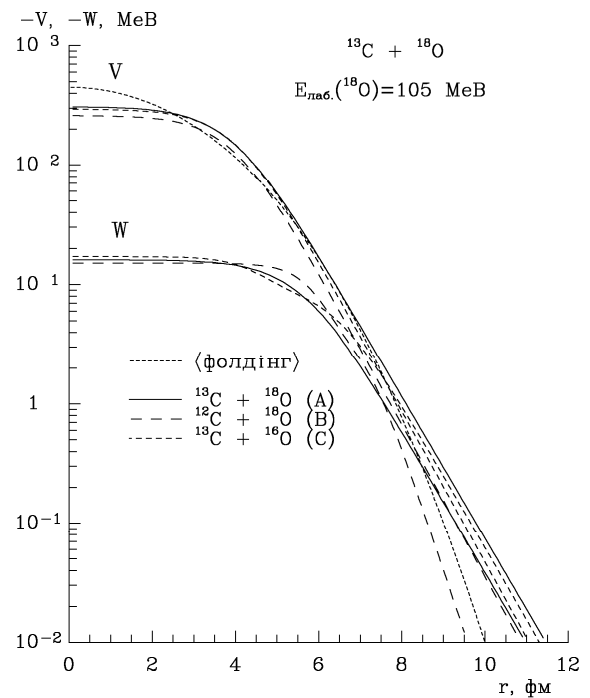


Рис. 8. Оптичні потенціали розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ МеВ}$ з наборами параметрів А, В і С (див. табл. 3) та фолдінг-потенціал взаємодії цих ядер.

передач відповідно. Суцільні криві – когерентна сума всіх процесів. Видно, що при всіх енергіях домінує потенціальне розсіяння іонів.

На рис. 10 показано потенціал розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 20, 31$ і 105 МеВ . Видно, що для енергій $E_{\text{с.ц.м.}} < 44 \text{ МеВ}$ потенціали поглинання мають квазімолекулярну форму з вузькими максимумами в периферійній області, яким передують глибокі мінімуми. Положення цих максимумів $R(E) = r_{WD}(A_p^{1/3} + A_T^{1/3})$ близькі до положень максимумів потенціальних бар'єрів парціальних ефективних потенціалів

$$V_{\text{еф}}(r) = V_C(r) + V(r) + \hbar^2 l(l+1) / 2\mu r^2, \quad (8)$$

які представлено на рис. 11 для $l = 16, 19$ і 28 для енергій $E_{\text{с.ц.м.}}/E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 8,39/20, 13/31$ і $44,03/105 \text{ МеВ}$ відповідно. Значками Δ показано положення периферійних максимумів $R(E)$ відповідних потенціалів поглинання.

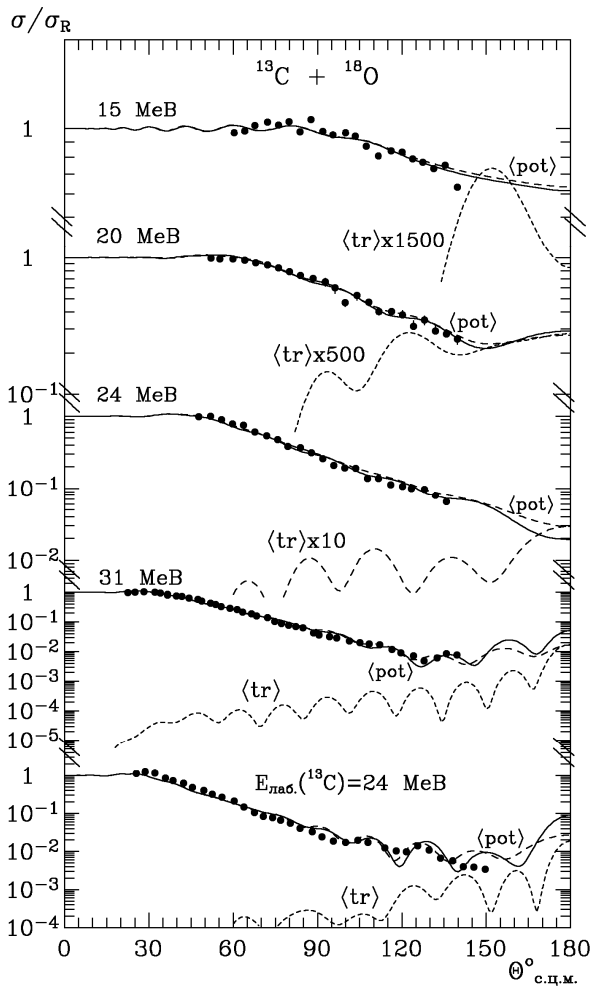


Рис. 9. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 15, 20, 24$ MeV [3], 31 MeV [4] і $E_{\text{лаб.}}(^{13}\text{C}) = 24$ MeV [5]. Криві – МЗКР-розрахунки.

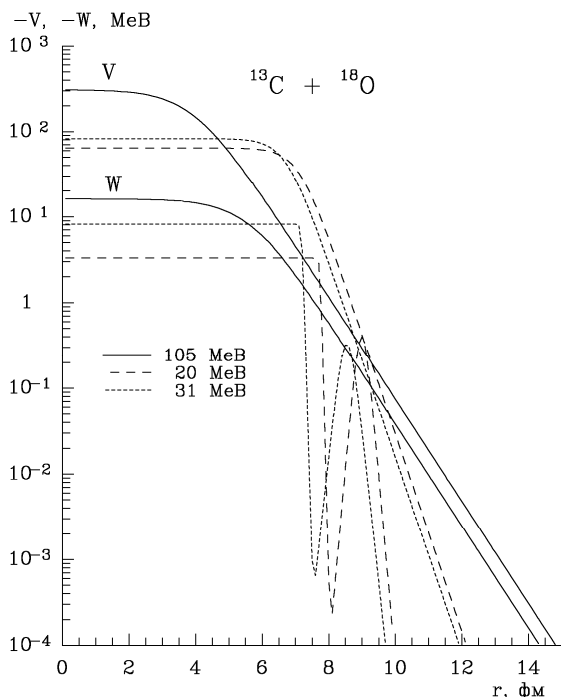


Рис. 10. Оптичні потенціали розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 20, 31$ і 105 MeV.

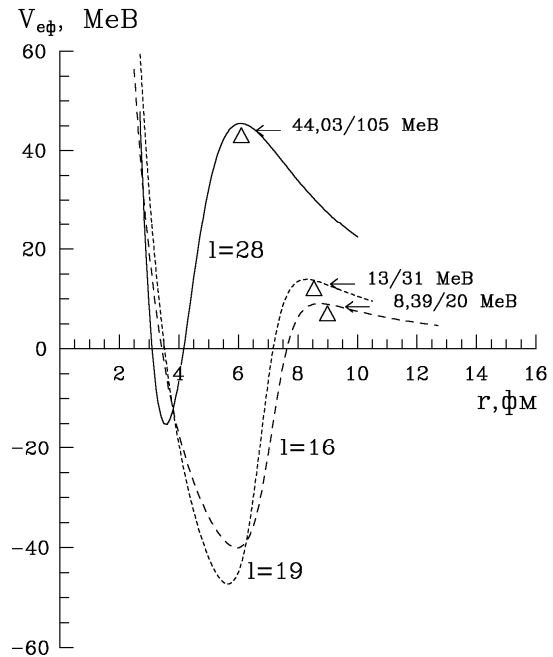


Рис. 11. Ефективні потенціали розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 20, 31$ і 105 MeV.

Близькість кінетичних енергій $E_{\text{с.ц.м.}}$ розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ до висот бар'єрів відповідних ефективних потенціалів і може бути причиною резонансних компонент потенціалів поглинання.

Непружне розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$

Експериментальні дані непружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ MeV та відповідні МЗКР-розрахунки показано на рис. 12 і 13. Для непружного розсіяння цих ядер, так як і для пружного, також визначались можливі внески реакцій передач. Виявилось, що ці внески незначні в порівнянні з колективними (ротаційними й вібраційними) переходами ядер ^{13}C і ^{18}O у збуджені стани. Найбільш важливими з них виявились послідовні передачі нуклонів (криві $\langle nn \rangle$ і $\langle pp \rangle$ на рис. 12), але їхня роль у непружному розсіянні ядер ^{13}C і ^{18}O незначна. На рис. 12 і 13 суцільними кривими показано МЗКР-розрахунки колективних переходів ядер ^{13}C і ^{18}O у збуджені стани згідно із схемами, показаними на рис. 4. У цих розрахунках використовувались параметри деформації ядер ^{13}C і ^{18}O , подані в табл. 1, та параметри оптичних потенціалів взаємодії ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ у вихідних каналах, представлені в табл. 3. Для нерозділених в експерименті переходів ядер ^{13}C і ^{18}O у збуджені стани 3,555 MeV (4^+) (^{18}O) + 3,684 MeV ($1/2^+$) (^{13}C) та 3,921 MeV (2^+) (^{18}O) + 3,854 MeV ($5/2^+$) (^{13}C) суцільні криві на рис. 12 представляють некогерентні суми перерізів цих переходів. Як видно на рис. 12 і 13, кутові розподіли непружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ задовільно описуються МЗКР-перерізами для всіх досліджених колективних переходів цих ядер у збуджені стани, тобто ці стани мають переважно колективну природу.

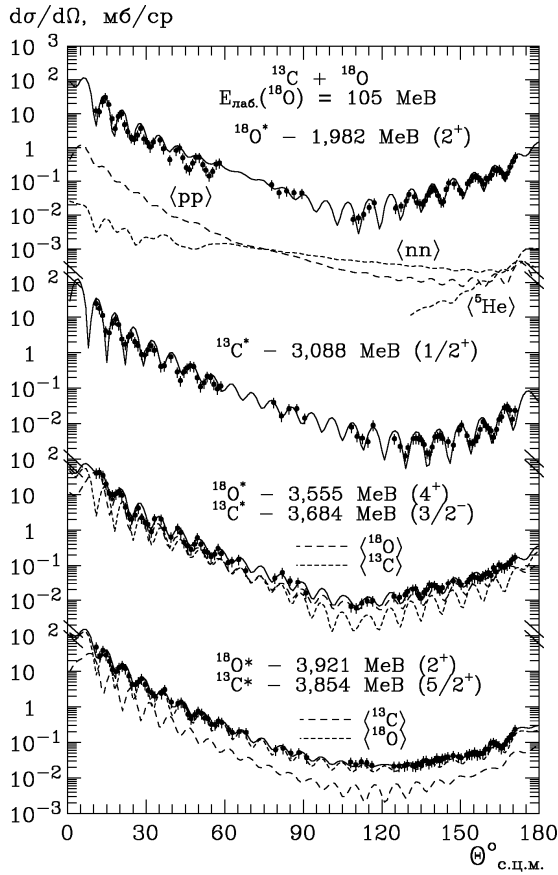


Рис. 12. Диференціальні перерізи непружного розсіювання ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ MeB. Криві – МЗКР-розрахунки.

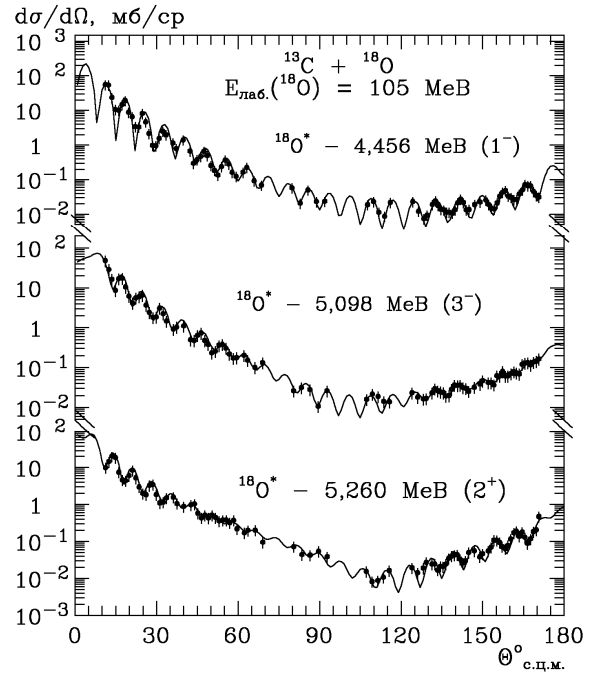


Рис. 13. Таке ж саме, як на рис. 12, але для інших збуджених станів ядра ^{18}O .

Енергетична залежність параметрів $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -потенціалу

Параметри $X_i = \{V_0, r_V, a_V, W_S, r_{WS}, a_{WS}, W_D, r_{WD}, a_{WD}\}$ оптичного потенціалу взаємодії ядер

$$X_i(E) = \begin{cases} X_i^{\max} - (X_i^{\max} - X_i^{\min}) \cdot g(E, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}) & \text{для } X_i = V_0, W_S, W_D, a_V, a_{WS}, a_{WD}, \\ X_i^{\min} + (X_i^{\max} - X_i^{\min}) \cdot g(E, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}) & \text{для } X_i = r_V, r_{WS}, r_{WD}, \end{cases} \quad (9)$$

де

$$g(E, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}) = \left[1 + \exp\left(\frac{E - E_{X_i}}{\Delta E_{X_i}}\right) \right]^{-1}, \quad (10)$$

$\{Y_i\} = \{X_i^{\min}, X_i^{\max}, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}\}$ – параметри енергетичної залежності потенціалу. При цьому враховувалось дисперсійне співвідношення між дійсною $V(r, E)$ та уявною $W(r, E)$ частинами оптичного потенціалу [17]:

$$V(r, E) = V_0(r, E) + \Delta V_W(r, E), \quad (11)$$

де

$$\Delta V_W(r, E) = \frac{P}{\pi} \int_0^\infty \frac{W(r, E')}{E' - E} dE' \quad (12)$$

(P вказує на головне значення інтеграла). При

$^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ в основних і збуджених станах (див. табл. 3) показано точками на рис. 14 залежно від енергії $E_{\text{с.ц.м.}}$. Криві – наближення параметрів потенціалу залежними від енергії функціями

$r = 0$ ці співвідношення виражають зв'язок між параметрами глибин дійсної та уявної частин ядро-ядерного оптичного потенціалу.

Параметри Y_i функцій $X_i(E)$ та V_0 підганялись. Отримані з підгонки параметри Y_i енергетичної залежності потенціалу взаємодії ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ подано в табл. 4.

Для порівняння на рис. 14 кривими $\langle ^{16}\text{O} \rangle$ показано також енергетичні залежності параметрів V і W_S оптичного потенціалу розсіювання ядер $^{13}\text{C} + ^{16}\text{O}$ [2]. Видно, що при низьких енергіях потенціал об'ємного поглинання цього розсіювання значно менший від аналогічного потенціалу розсіювання ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$, а при енергіях $E_{\text{с.ц.м.}} > 30$ MeB навпаки - об'ємне поглинання менше при розсіянні $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$, ніж при розсіянні $^{13}\text{C} + ^{16}\text{O}$.

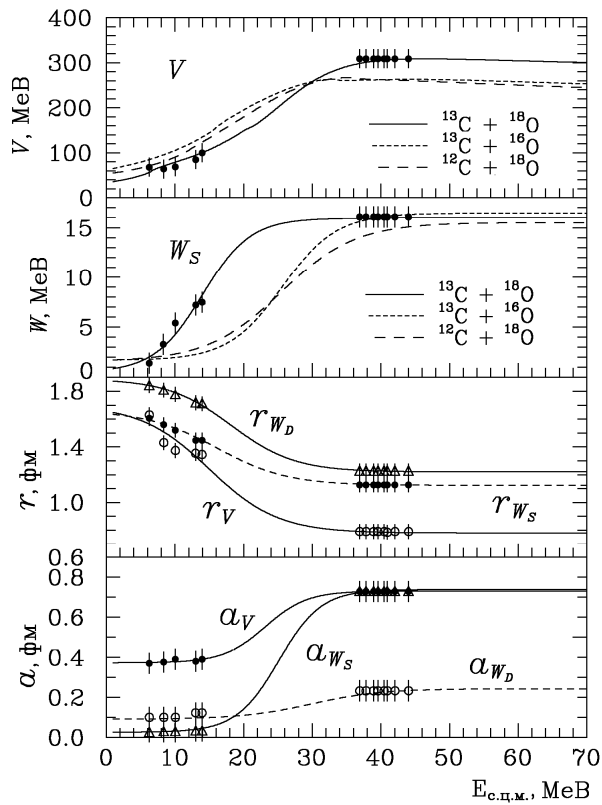


Рис. 14. Енергетична залежність параметрів $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -потенціалу в порівнянні з аналогічною залежністю $^{13}\text{C} + ^{16}\text{O}$ -потенціалу [2] (криві $\langle ^{16}\text{O} \rangle$ для параметрів V і W_S).

Таблиця 4. Параметри Y_i енергетичної залежності потенціалу взаємодії ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$

Y_i	X_i								
	$-V_0$, MeV	r_V , фм	a_V , фм	$-W_S$, MeV	r_{W_S} , фм	a_{W_S} , фм	$-W_D$, MeV	r_{W_D} , фм	a_{W_D} , фм
X_i^{\min}	80,0	0,780	0,373	0,5	1,123	0,026	0,43	1,221	0,091
X_i^{\max}	380,0	1,700	0,731	16,0	1,661	0,738	0,08	1,889	0,243
E_{X_i} , MeV	24,0	15,000	23,154	14,0	16,094	25,100	29,85	18,187	29,900
Δ_{X_i} , MeV	5,0	5,000	3,063	3,5	5,135	3,100	5,15	4,642	5,100

Визначено параметри оптичного потенціалу взаємодії ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та їхню енергетичну залежність з урахуванням дисперсійного співвідношення між дійсною та уявною частинами оптичного ядро-ядерного потенціалу.

Виявлено, що уявні частини цього потенціалу при енергіях $E_{\text{с.ц.м.}} < 40$ MeV мають квазімолекулярну форму з вузькими максимумами в периферійній області, положення яких добре корелюють з положеннями периферійних бар'єрів відповідних дійсних ефективних l -залежних потенціалів, висота бар'єрів яких близька до кінетичної енергії розсіяння $E_{\text{с.ц.м.}}$. Така кореляція між положе-

женнями бар'єрів і периферійних максимумів потенціалів поглинання можна вважати за свідчення прояву резонансів двоядерних систем.

Основні результати та висновки

Поміряно диференціальні перерізи пружного й непружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ MeV для переходів в основні стани ядер ^{13}C і ^{18}O та на дискретні рівні 3,088 MeV ($1/2^+$), 3,684 MeV ($3/2^-$) і 3,854 MeV ($5/2^+$) ядра ^{13}C , а також на рівні 1,982 MeV (2^+), 3,555 MeV (4^+), 3,921 MeV (2^+), 4,456 MeV (1^-), 5,098 MeV (3^-) і 5,260 MeV (2^+) ядра ^{18}O .

Отримані нові експериментальні дані пружного й непружного розсіяння ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та відомі з літератури дані пружного розсіяння цих ядер при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 15, 20, 24$ MeV [3], 31 MeV [4] і $E_{\text{лаб.}}(^{13}\text{C}) = 24$ MeV 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.

Досліджено механізми пружного й непружного $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -розсіяння. Установлено, що в пружному розсіянні ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ домінує потенціальне розсіяння в усьому діапазоні кутів, а внески реакцій передач незначні. Виявлено, що переходи ядер ^{13}C і ^{18}O у збуджені низькоенергетичні стани мають, в основному, колективну природу.

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

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. A. - 2010. - Vol. 44. - P. 221 - 231.
2. Barbadoro A., Consolaro D., Pellegrini F. et al. Transfer Processes in $^{12}\text{C} + ^{13}\text{C}$, $^{16}\text{O} + ^{13}\text{C}$ and $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ Elastic Scattering // Nuovo Cim. - 1986. - Vol. A95, No. 3. - P. 197 - 210.
3. Knoth H., Barker P.H., Huber A. et al. Some one-neutron transfer reactions with ^{18}O and ^{19}F beams // Nucl. Phys. A. - 1971. - Vol. 172. - P. 25 - 32.
4. Chechik R., Eyal Y., Stocker H., Fraenkel Z. Elastic scattering of $^{17,18}\text{O}$ on $^{12,13}\text{C}$ at $E_{\text{c.m.}} = 12.6\text{-}14.0$ MeV // Nucl. Phys. A. - 1978. - Vol. 296. - P. 307 - 319.
5. Bohne W., Grabisch K., Hergesell J. et al. A study of two-step transfer contributions to the inelastic scattering of ^{13}C on ^{16}O and ^{18}O // Nucl. Phys. A. - 1979. - Vol. 332. - P. 501 - 514.
6. Kowalczyk M. SMAN: A Code for Nuclear Experiments, Warsaw University report (1998).
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Рудчик А. Т., Чувильський 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).
11. Рудчик А. Т., Чувильський Ю. М. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1p-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач // УФЖ. - 1985. - Т. 30, № 6. - С. 819 - 825.
12. Nilsson B. S. SPI-GENOA: an Optical Model Search Code. - 1976 (Report / A Niels Bohr Institute).
13. Thompson I. J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comp. Phys. Rep. - 1988. - Vol. 7. - P. 167 - 212.
14. 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.
15. Cook J. DFPOТ - a program for the calculation of double folded potentials // Comp. Phys. Com. - 1982. - Vol. 25, Is. 2. - P. 125 - 139.
16. Cook J. DFPOТ - a program for the calculation of double folded potentials // Ibid. - 1984. - Vol. 35. - P. C - 775.
17. Mahaux C., Ngõ H., Satchler G. R. Casualty and the threshold anomaly of the nucleus-nucleus potential // Nucl. Phys. A. - 1986. - Vol. 449. - P. 354 - 394.

ИЗОТОПИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В УПРУГОМ И НЕУПРУГОМ РАССЕЯНИИ ИОНОВ $^{16,18}\text{O}$ ЯДРАМИ ^{12}C И ^{13}C

А. Т. Рудчик, Ю. О. Ширма, Е. И. Кощий, С. Кличевски, Б. Г. Новацкий, О. А. Понкратенко, Е. Пясеcki, А. П. Романишина, К. Русек, Ю. М. Степаненко, И. Строек, С. Б. Сакута, А. Будзановски, Л. Гловацка, И. Сквирчиньска, Р. Сюдак, Я. Хоиньски, А. Щуреk

Получены новые экспериментальные данные дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при энергии $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ МэВ для переходов ядер ^{13}C и ^{18}O в основные состояния и на уровни 3,088 МэВ ($1/2^+$), 3,555 МэВ ($1/2^-$) и 3,854 МэВ ($5/2^+$) ядра ^{13}C и на уровни 1,982 МэВ (2^+), 3,555 МэВ (4^+), 3,921 МэВ (2^+), 4,456 МэВ (1^-), 5,098 МэВ (3^-) и 5,260 МэВ (2^+) ядра ^{18}O . Эти и известные из литературы данные упругого рассеяния ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при энергиях $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 15, 20, 24, 31$ МэВ и $E_{\text{лаб.}}(^{13}\text{C}) = 24$ МэВ исследованы по оптической модели и методу связанных каналов реакций. Определены наборы параметров потенциала взаимодействия ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ и их энергетические зависимости. Получена информация о вкладах потенциального рассеяния и реакций передач в каналы упругого и неупругого рассеяния ядер $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$. Исследованы изотопические отличия (эффекты) потенциалов взаимодействия ядер $^{12,13}\text{C} + ^{16,18}\text{O}$.

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

ISOTOPIC EFFECTS IN ELASTIC AND INELASTIC $^{12,13}\text{C} + ^{16,18}\text{O}$ SCATTERING

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

New angular-distribution data of $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ elastic and inelastic scattering at the energy $E_{\text{lab}}(^{18}\text{O}) = 105$ MeV were obtained for the transitions to the ground and excited states 3.088 MeV ($1/2^+$), 3.555 MeV ($1/2^-$), 3.854 MeV ($5/2^+$) of ^{13}C and 1.982 MeV (2^+), 3.555 MeV (4^+), 3.921 MeV (2^+), 4.456 MeV (1^-), 5.098 MeV (3^-), 5.260 MeV (2^+) of ^{18}O . These and the $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ elastic scattering data taken from the literature at the energies $E_{\text{lab}}(^{18}\text{O}) = 15, 20, 24, 31$ MeV

and $E_{\text{lab}}(^{13}\text{C}) = 24$ MeV were analysed within the optical model and coupled-reaction-channels methods. Sets of $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ optical potential parameters and their energy dependence were obtained. Contributions of potential scattering and transfer reactions to the elastic and inelastic channels of $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ scattering were studied. Isotopic differences (effects) in $^{12,13}\text{C} + ^{16,18}\text{O}$ optical potential parameters were investigated.

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

Надійшла до редакції 28.07.10,
після доопрацювання - 25.10.10.