

ПРУЖНЕ ТА НЕПРУЖНЕ РОЗСІЯННЯ ІОНІВ ^{18}O ЯДРАМИ ^{12}C

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. Строск⁵, С. Б. Сакута⁴, А. Будзановські³, Л. Гловацка⁷, І. Сквірчинська³, Р. Сюдак³,
Я. Хоїньські⁶, А. Щурек³

¹Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

²Харківський національний університет, Харків

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

⁴Російський науковий центр "Курчатовський інститут", Москва, Росія

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

⁶Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

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

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$ ($E_{\text{с.ц.м.}} = 42 \text{ MeV}$). Ці та відомі з літератури дані при енергіях $E_{\text{с.ц.м.}} = 12,9 - 56 \text{ MeV}$ досліджено за оптичною моделлю та методом зв'язаних каналів реакцій. Одержано набори параметрів ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-потенціалу типу Вудса - Саксона та досліджено їх енергетичну залежність. Виявлено ізотопічні відмінності у значеннях параметрів ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)- та ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-потенціалів та форми поверхонь цих потенціалів. Досліджено механізми пружного й непружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та роль реакцій передач у цьому розсіянні.

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

Вступ

Реакції збагачених нейтронами іонів з ядрами є одними з ефективних засобів дослідження утворюваних ними нестабільних ядер. Зокрема, при взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ з великою ймовірністю є вихід нестабільних пар ядер $^{15}\text{C} + ^{15}\text{O}$, $^{17}\text{N} + ^{13}\text{N}$ тощо, оптичні потенціали взаємодії яких можна визначити лише на основі експериментальних даних реакцій передач, бо безпосередні (прямі) експерименти з пружного розсіяння цих ядер, використовуючи одночасно радіоактивні пучки іонів і мішеней, поки що важко здійснити. Для дослідження взаємодії нестабільних ядер у реакціях типу $^{12}\text{C}(^{18}\text{O}, X)Y$ за допомогою сучасних теоретичних моделей реакцій потрібно спочатку визначити параметри потенціалу взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ на основі експериментальних даних їх пружного розсіяння. При цьому бажано це здійснити в широкому діапазоні енергій, щоб встановити їх енергетичну залежність, аналіз даних якої може значно зменшити ступінь невизначеності параметрів оптичних потенціалів ядро-ядерної взаємодії та сприяти знаходженню енергетичної залежності параметрів оптичних потенціалів взаємодії нестабільних ядер вихідних каналів реакції. Отримання відомостей про оптичні потенціали взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та енергетичну залежність їх параметрів стало основною метою цієї праці.

До цього часу відомими були експериментальні дані пружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергіях $E(^{18}\text{O}) = 32,25$ і 35 MeV [1], 70 , 100 і

140 MeV [2], 62 , 12 і 85 , 100 і 120 MeV [3, 4]. Ці дані аналізувались за оптичною моделлю (ОМ), аналіз енергетичної залежності параметрів ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-потенціалу не проводився, не враховувався також вплив зв'язку каналів пружного й непружного розсіяння. Важливим результатом роботи [4] стали отриманні нові відомості про радіальну залежність потенціалу поглинання в його периферійній області.

У цій роботі представлено нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$, поміряні в широкому кутовому діапазоні, та результати їх комплексного аналізу разом із даними інших авторів [1 - 4] за ОМ та методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). Визначено параметри оптичного ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-потенціалу та їх енергетичну залежність із урахуванням зв'язку між дійсною та уявною частинами цього потенціалу.

Методика експерименту

Диференціальні перерізи пружного й непружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та реакцій $^{12}\text{C}(^{18}\text{O}, X)$ 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 вуглицю природного ізотопного складу товщиною 300 мкг/см^2 з незначними домішками міді (не більше 5 %). Розкид енергії пучка іонів на мішені не перевищував 0,5 %.

Продукти реакцій реєструвались ΔE - E -спектрометрами з кремнієвими ΔE - і E -детекторами з товщинами 20 і 67 мкм (ΔE) та 1 мм (E). В експерименті використовувалась електроніка стандарту САМАС та комп'ютерна реєстраційна система SMAN [5]. Детальний опис експериментальної установки та її реєстраційних систем

міститься у роботі [6].

Типові двовимірні $\Delta E(E)$ -спектри ізотопів кисню та вуглецю - продуктів реакцій $^{12}\text{C}(^{18}\text{O}, \text{O})$ і $^{12}\text{C}(^{18}\text{O}, \text{C})$ - показано на рис. 1. Видно, що експериментальна методика забезпечувала ідентифікацію продуктів реакцій як за зарядами, так і за масами.

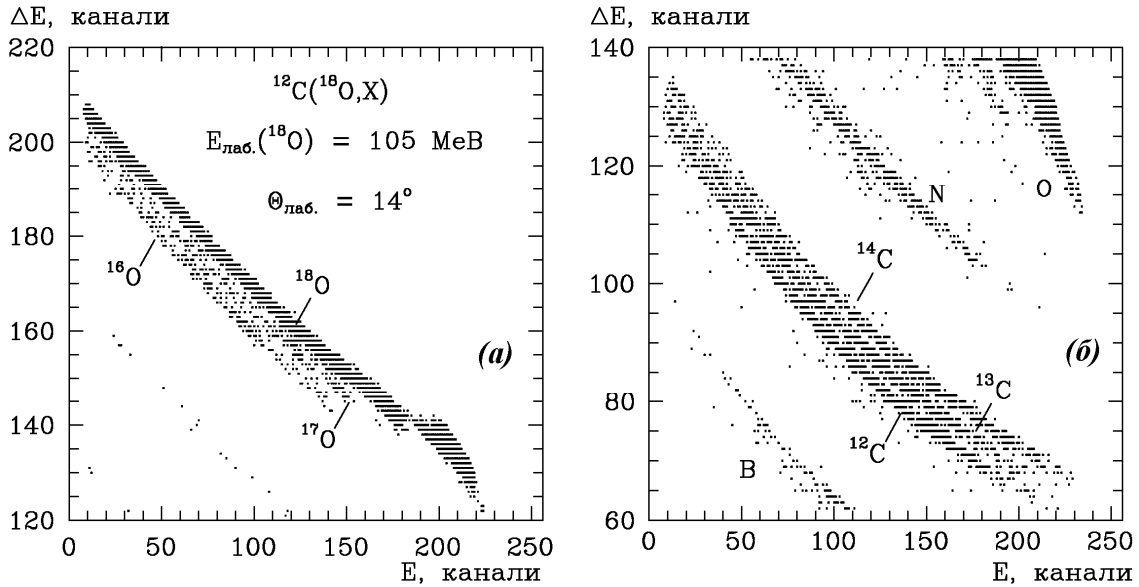


Рис. 1. Типові $\Delta E(E)$ -спектри ізотопів кисню (а) та вуглецю (б) - продуктів реакцій $^{12}\text{C}(^{18}\text{O}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{18}\text{O}) = 105$ MeV.

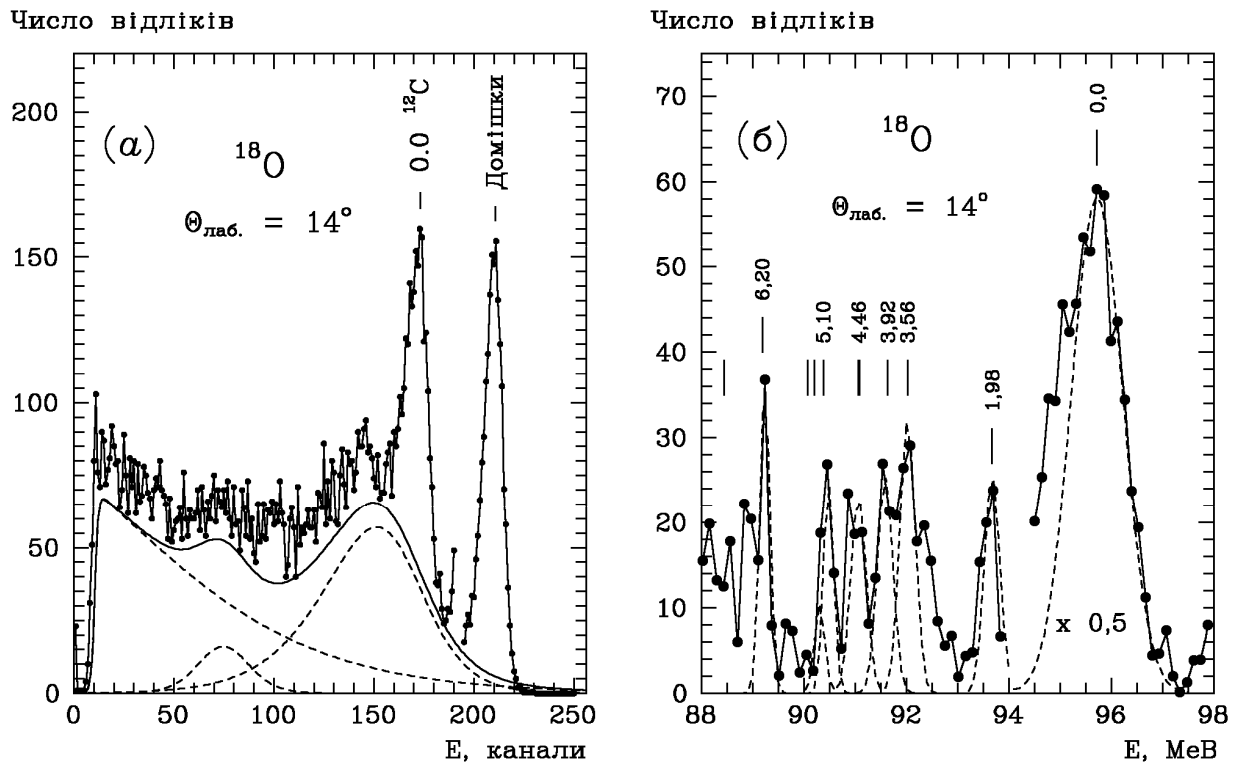


Рис. 2. Типові енергетичні спектри розсіяних іонів ^{18}O : а - експериментальний спектр з неперервним фоном від багаточастинкових реакцій; б - залишковий спектр після вилучення фону з експериментального спектра. Криві: а) наближення фону експериментального спектра функцією (1) (штрихові криві - компоненти фону, суцільна крива - сума компонентів), б) наближення спектра функціями Гаусса (штрихові криві).

На рис. 2 показано типові енергетичні спектри ^{18}O з реакції $^{12}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{18}\text{O})^{12}\text{C}$: (а) зареєстровані в експерименті та б) після вилучення неперервної компоненти (фону) від багаточастинкових реакцій та інших процесів. Фони експериментальних спектрів наближувались 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 $E_{1i}, E_{2i}, H_{1i}, H_{2i}$, використовуючи за дані наближення найменшійші значення експериментального спектра. Штрихові криві на рис. 2, а показують компоненти функції $N_i(E)$, а суцільна крива – їх суму. Наближений фон вилучався з експериментального спектра, і отриманий залишковий спектр (рис. 2, б) підлягав подальшому аналізу для визначення диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$.

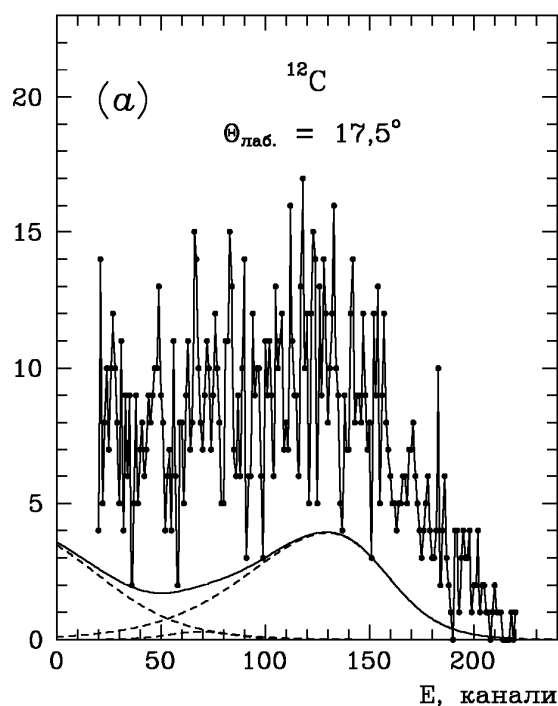
На рис. 2, б показано залишковий енергетичний спектр розсіяння іонів ^{18}O із вказаним положенням рівнів ядер ^{12}C і ^{18}O залежно від їх кінетичної енергії. Для одного або групи збудже-

них рівнів ядер ^{12}C і ^{18}O у спектрі спостерігаються піки, що апроксимувались сумою симетричних функцій Гаусса (штрихові криві):

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

При цьому положення максимумів гауссіанів E_i фіксувались при кінетичних енергіях розсіяння ^{18}O для основних та збуджених станів ядер ^{12}C і ^{18}O , для всіх гауссіанів використовувались однакове значення параметрів h_i , рівне середній ширині ізольованих піків, а підганялись лише максимальні значення N_i гауссіанів.

Число відліків



Число відліків

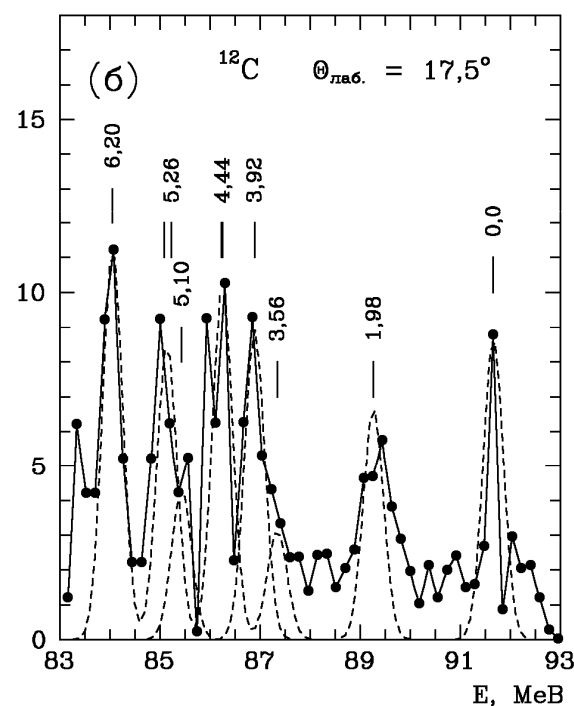


Рис. 3. Типові енергетичні спектри ядер ^{12}C з реакції $^{12}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{12}\text{C})^{18}\text{O}$: а - експериментальний спектр з неперервним фоном від багаточастинкових реакцій; б - залишковий спектр після вилучення фону. Криві: а) наближення фону експериментального спектра функцією (1) (штрихові криві – компоненти фону, суцільна крива – сума компонентів); б) наближення спектра функціями Гаусса (штрихові криві).

Типові енергетичні спектри ядер віддачі ^{12}C показано на рис. 3: а) зареєстровані в експерименті та б) отримані після вилучення фону багаточастинкових реакцій. Обробка цих спектрів проводилась таким же методом, як і ^{18}O -спектрів.

Площі гауссіанів апроксимації ^{18}O - і ^{12}C -

спектрів використовувалась для обчислення диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння для кутів $\theta_{\text{с.ц.м.}}(^{18}\text{O})$ і $\theta_{\text{с.ц.м.}}^*(^{18}\text{O}) = 180^\circ - \theta_{\text{с.ц.м.}}(^{12}\text{C})$ (розсіяння ^{18}O на великі кути) відповідно.

Абсолютизація диференціальних перерізів пружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ здійснювалась нормуванням їх до кулонівського розсіяння на малих кутах. Похибка абсолютизації не перевищувала 15 %.

На рис. 4 представлено отримані в цій роботі дані пружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ залежно від переданого імпульсу q_t (темні точки) у порівнянні з аналогічними даними при $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 100 \text{ MeV}$ [4] (світлі точки). Видно, що експериментальні дані обох робіт добре узгоджуються між собою за абсолютною величиною.

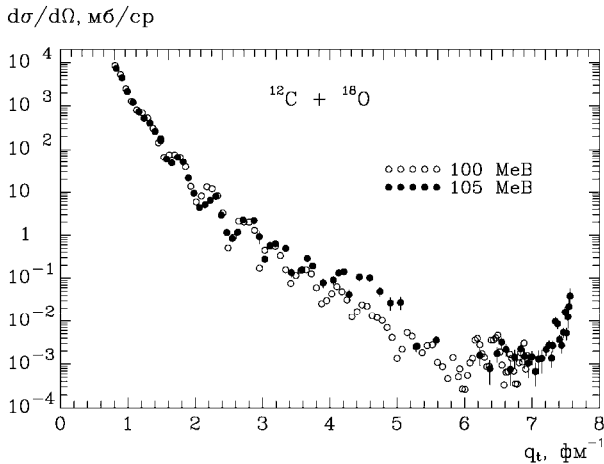


Рис. 4. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 100 \text{ MeV}$ [4] і 105 MeV залежно від переданих імпульсів q_t .

Диференціальні перерізи пружного й непружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105 \text{ MeV}$ та результати їх аналізу за ОМ і МЗКР наведено нижче після викладу основних відомостей про розрахунки за цими моделями.

Аналіз експериментальних даних

Розрахунки за ОМ та МЗКР

Експериментальні дані пружного та непружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ аналізувались за ОМ та МЗКР з використанням ядерного потенціалу типу Вудса - Саксона з об'ємним та поверхневим поглинаннями

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

та кулонівського потенціалу рівномірно зарядженої кулі

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

де

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

A_P, Z_P та A_T, Z_T – маси та заряди ядер іонів і мішені відповідно. В ОМ- і МЗКР-розрахунках використовувався параметр $r_C = 1,25 \text{ фм}$.

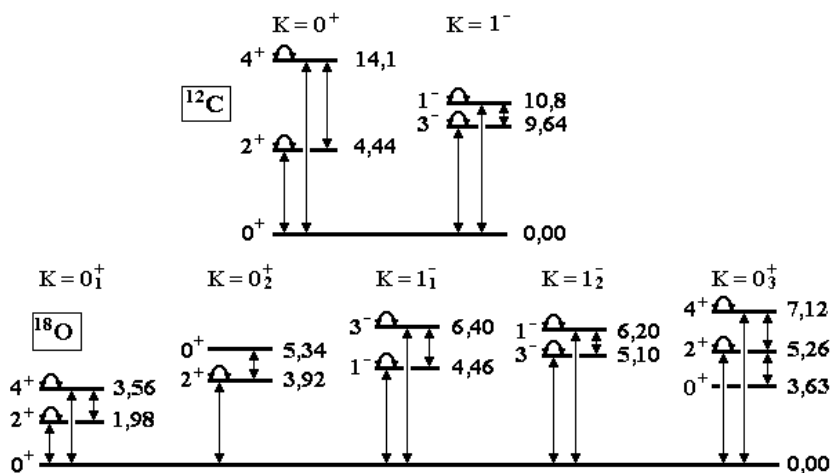


Рис. 5. Схеми переходів ядер ^{12}C і ^{18}O у збуджені стани. Дугами позначено переходи реорієнтації спінів ядер.

У МЗКР-розрахунках у схему зв'язку каналів включались пружне й непружне розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та найбільш важливі реакції передач. Схеми переходів ядер ^{12}C і ^{18}O у збуджені стани

показано на рис. 5, а діаграми найпростіших реакцій передач, які можуть відігравати певну роль у пружному розсіянні цих ядер, - на рис. 6. При цьому вважалось, що низькоенергетичні стани

деформованих ядер ^{12}C і ^{18}O мають переважно колективну природу (ротаційні або вібраційні). У МЗКР-розрахунках колективні переходи обчислювались із використанням операторів (форм-факторів)

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

де δ_λ - довжина (параметр) деформації ядра λ -мультимольності. Параметри деформації ядер

^{12}C і ^{18}O та характеристики переходів їх у збуджені стани, що використовувались у МЗКР-розрахунках, подано в табл. 1.

Необхідні для МЗКР-розрахунків спектроскопічні амплітуди S_x кластерів (нуклонів) x у системах $A = C + x$ обчислювались за трансляційно-інваріантною моделлю оболонки (ТІМО) [9] програмою DESNA [10, 11] з використанням таблиць хвильових функцій 1р-оболонки [12]. Спектроскопічні амплітуди S_x подано у табл. 2.

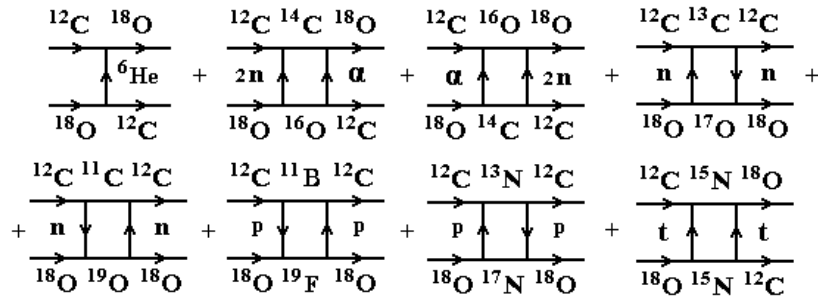


Рис. 6. Діаграми реакцій передач при пружному й непружному розсіянні ядер.

Таблиця 1. Параметри деформації ядер ^{12}C і ^{18}O та орбітальні моменти λ переходів ядер у збуджені стани

Ядро	E_{36}, MeV	J^π	λ	$\delta_\lambda, \text{фм}$	β_λ^a	Література
^{12}C	4,439	2^+	2	-1,07	-0,37	[7]
^{18}O	1,982	2_1^+	2	1,0	0,30	[8]
	3,555	4^+	4	1,0	0,30	[8]
	3,920	2_2^+	2	1,0	0,30	[8]
	4,456	1^-	1	1,0	0,30	[8]
	5,098	3^-	3	1,0	0,30	[8]
	5,255	2_3^+	2	1,0	0,30	[8]

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

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

A	C	x	nL_j	S_x	A	C	x	nL_j	S_x
^{12}C	^{11}C	n	$1P_{3/2}$	1,706 ^a	$^{18}\text{O}^*_{1,982}$	^{12}C	^6He	$3D_2$	-0,167
^{12}C	^{11}B	p	$1P_{3/2}$	-1,706 ^a	^{18}O	^{14}C	α	$4S_0$	-0,566
^{13}C	^{12}C	n	$1P_{1/2}$	0,601	^{18}O	^{15}N	t	$3P_{1/2}$	0,277
^{13}C	$^{12}\text{C}^*_{4,44}$	n	$1P_{3/2}$	-1,124 ^a	^{18}O	^{16}O	$2n$	$3S_0$	0,615
^{13}N	^{12}C	p	$1P_{1/2}$	0,601	^{18}O	^{17}N	p	$1P_{1/2}$	1,198 ^a
^{13}N	$^{12}\text{C}^*_{4,439}$	p	$1P_{3/2}$	-1,124 ^a	$^{18}\text{O}^*_{1,982}$	^{17}N	p	$1P_{1/2}$	-1,198 ^a
^{14}C	^{12}C	$2n$	$2S_0$	0,615	^{18}O	^{17}O	n	$1D_{5/2}$	1,265 ^a
^{15}N	^{12}C	t	$2P_{1/2}$	0,380	$^{18}\text{O}^*_{1,982}$	^{17}O	n	$2S_{1/2}$	0,876 ^a
^{15}N	$^{12}\text{C}^*_{4,439}$	t	$2P_{3/2}$	-0,712 ^a	^{19}O	^{18}O	n	$1D_{5/2}$	-0,882
			$1F_{5/2}$	0,466 ^a	^{19}O	$^{18}\text{O}^*_{1,982}$	n	$2S_{1/2}$	-0,889
^{16}O	^{12}C	α	$3S_0$	0,544	^{19}F	^{18}O	p	$2S_{1/2}$	0,699
^{16}O	$^{12}\text{C}^*_{4,439}$	α	$2D_2$	1,217	^{19}F	$^{18}\text{O}^*_{1,982}$	p	$1D_{3/2}$	1,315 ^a
^{18}O	^{12}C	^6He	$4S_0$	0,371					

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

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

Розрахунки за ОМ та підгонка параметрів ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-потенціалу проводились за допомогою програми SPI-GENOA [13], а для розрахунків за МЗКР використовувалась програма FRESCO [14].

Пружне розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$

Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ МеВ представлено на рис. 7. Кривими показано розрахунки за ОМ та МЗКР.

Спочатку для опису експериментальних даних пружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ за ОМ було використано параметри ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу. Набір B_7 цих параметрів, отриманий з енергетичної залежності параметрів ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу [15], подано в табл. 3. ОМ-розрахунки за цими параметрами ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-розсіяння показано на рис. 7, б кривою $\langle B_7 \rangle$.

Таблиця 3. Параметри потенціалу взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$

$E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}),$ МеВ	$E_{\text{с.п.м.}},$ МеВ	Набори параметрів	$V_0,$ МеВ	$r_V,$ фм	$a_V,$ фм	$W_S,$ МеВ	$r_{W_S},$ фм	$a_{W_S},$ фм	$W_D,$ МеВ	$r_{W_D},$ фм	$a_{W_D},$ фм
32,25	12,9	A ₁	119,0	0,890	0,680	2,5	1,347	0,680			
		B ₁	125,9	1,007	0,601	2,3	1,324	0,101	1,30	1,608	0,132
35	14,0	A ₂	121,0	0,875	0,680	3,3	1,340	0,680			
		B ₂	135,1	1,004	0,608	2,4	1,312	0,102	1,33	1,599	0,136
66,12	26,45	A ₃	233,0	0,820	0,680	9,0	1,250	0,350	1,00	1,400	0,350
		B ₃	242,1	0,958	0,619	9,8	1,138	0,110	1,83	1,497	0,207
70	28,0	A ₄	233,0	0,820	0,680	9,0	1,250	0,350	1,00	1,400	0,350
		B ₄	250,0	0,952	0,619	11,2	1,131	0,111	1,91	1,485	0,220
85	34,0	A ₅	268,3	0,850	0,680	14,9	1,245	0,420	1,00	1,400	0,350
		B ₅	261,2	0,929	0,619	14,9	1,121	0,118	2,30	1,437	0,284
100	40,0	A ₆	265,0	0,804	0,680	14,9	1,240	0,420	1,00	1,400	0,400
		B ₆	262,5	0,906	0,619	16,1	1,119	0,127	2,90	1,391	0,360
105	42,0	A ₇	259,3	0,820	0,680	14,9	1,200	0,450	1,00	1,400	0,350
		B ₇	263,1	0,899	0,619	16,2	1,119	0,131	3,10	1,376	0,386
120	48,0	A ₈	259,0	0,800	0,680	15,0	1,220	0,450	1,00	1,400	0,400
		B ₈	262,8	0,879	0,619	16,4	1,119	0,143	3,80	1,331	0,459
140	56,0	A ₉	252,0	0,792	0,680	15,0	1,150	0,450	1,00	1,400	0,400
		B ₉	259,9	0,856	0,619	16,5	1,119	0,165	5,00	1,276	0,533

Видно, що цей набір параметрів не забезпечує задовільного опису експериментальних даних пружного ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-розсіяння в широкому діапазоні кутів.

З підгонки параметрів ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-потенціалу за даними пружного ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-розсіяння було отримано набір параметрів A₇, з яким було про-

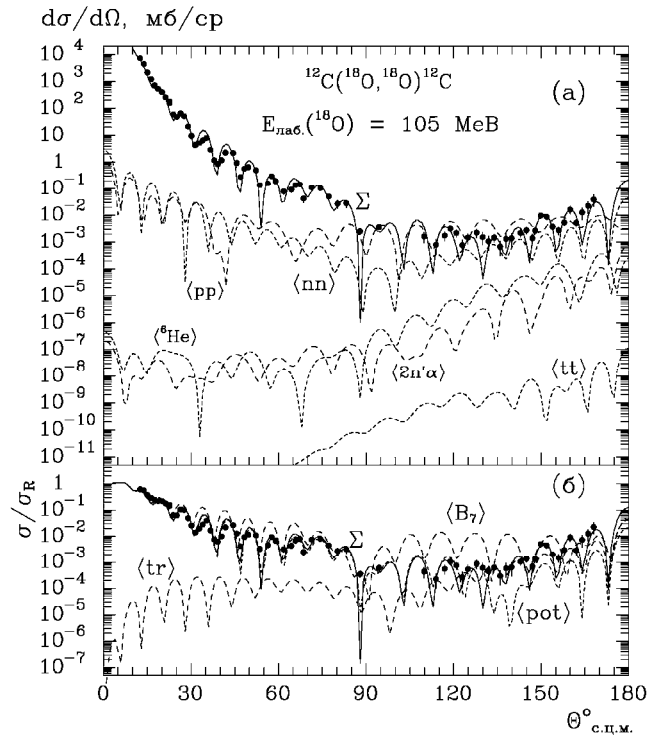


Рис. 7. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ МеВ. Криві – розрахунки за ОМ (крива $\langle B_7 \rangle$) та МЗКР (інші криві, пояснення в тексті).

ведено МЗКР-розрахунки для різних механізмів цього розсіяння, про внески яких до цього розсіяння можна судити з показаних на рис. 7 кривих. Основну роль, звичайно, відіграє потенціальне розсіяння (крива $\langle \text{pot} \rangle$ на рис. 7, б). У ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-розсіянні на великі кути важливі також процеси обміну нейтронами $n + n$ (крива

$\langle nn \rangle$ на рис. 7, а), протонами $p + p$ (крива $\langle pp \rangle$), передача ${}^6\text{He}$ -кластера та послідовні передачі кластерів $2n + \alpha$ і $\alpha + 2n$ (когерентна сума, крива $\langle 2n^{\prime}\alpha \rangle$). Роль послідовної передачі кластерів $t + t$ (крива $\langle tt \rangle$) у $({}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O})$ -розсіянні незначна. Кривою $\langle tr \rangle$ на рис. 7, б показано когерентну суму перерізів всіх реакцій передач.

Відомі з літератури експериментальні дані пружного $({}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O})$ -розсіяння при інших енер-

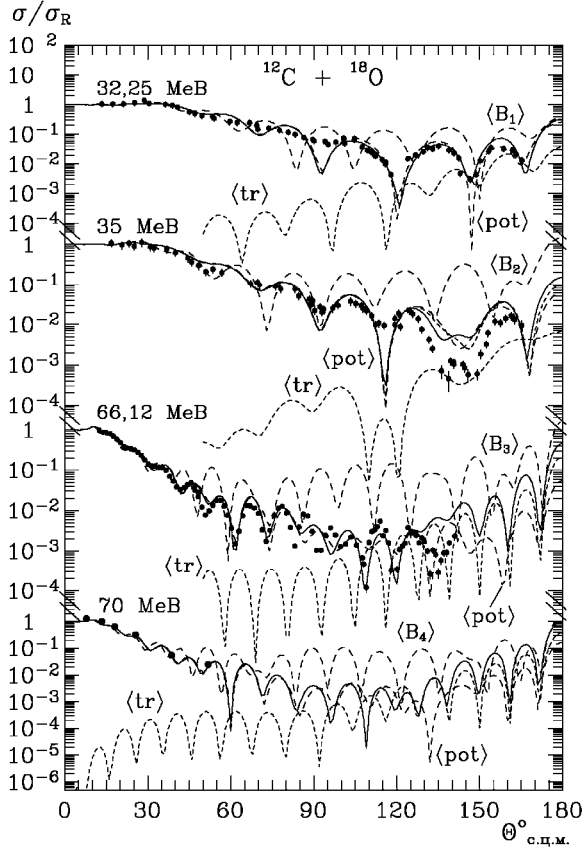


Рис. 8. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер ${}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 32,25$ і 35 MeV [1], $62,12$ MeV [3, 4] і 70 MeV [2]. Криві – розрахунки за OM (криві $\langle B_i \rangle$) та МЗКР. Позначення такі ж самі, як на рис. 7, б.

Кривими $\langle B_i \rangle$ на цих рисунках показано OM-розрахунки з B_i -наборами параметрів $({}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O})$ -потенціалу. Видно, що, як і в попередньому випадку, з цими наборами параметрів можна задовільно описати дані пружного $({}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O})$ -розсіяння лише у вузькому інтервалі малих кутів, де значну роль відіграє кулонівське розсіяння. А з A_i -наборами параметрів експериментальні дані пружного $({}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O})$ -розсіяння задовільно описуються МЗКР-перерізами в усьому діапазоні кутів. При цьому варто зауважити, що в пружному $({}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O})$ -розсіянні в широкому діапазоні кутів домінує потенціальне розсіяння (криві $\langle \text{pot} \rangle$). У розсіянні на великі кути важливу роль відіграють також реакції передач (криві $\langle tr \rangle$).

гіях було також проаналізовано за OM та МЗКР. Ці дані разом з відповідними МЗКР-розрахунками представлено на рис. 8 і 9. У табл. 3 подано A_i -набори параметрів $({}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O})$ -потенціалу, отримані з підгонок OM- і МЗКР-розрахунків до експериментальних даних пружного $({}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O})$ -розсіяння, та набори параметрів B_i , обчислені на основі енергетичної залежності ${}^{12}\text{C} + {}^{16}\text{O}$ -потенціалу.

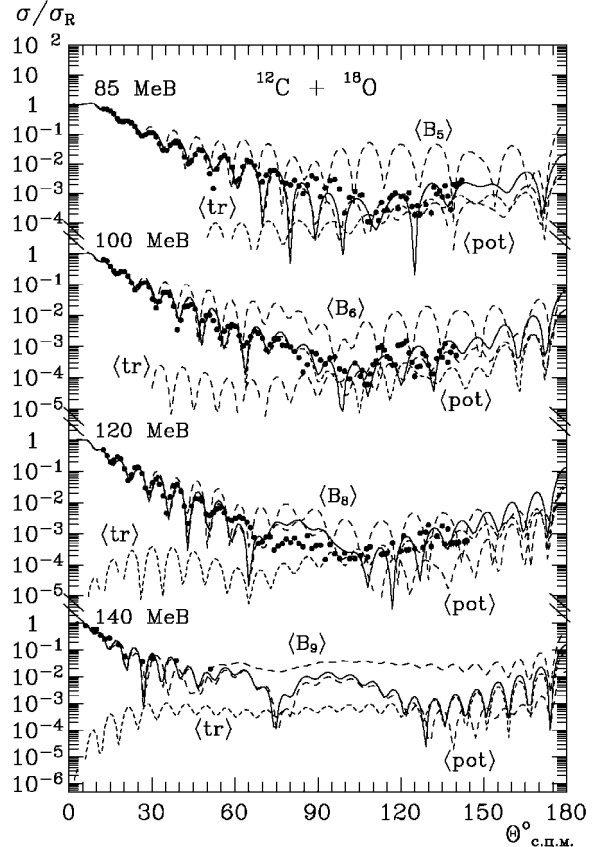


Рис. 9. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер ${}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 85, 100$ і 120 MeV [3, 4] та 140 MeV [2]. Криві – розрахунки за OM (криві $\langle B_i \rangle$) та МЗКР. Позначення такі ж самі, як на рис. 7, б.

Непружне розсіяння ядер ${}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O}$

Експериментальні дані непружного розсіяння ядер ${}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 105$ MeV показано на рис. 10 і 11.

На рис. 10 представлено диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер ${}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O}$ для переходів ядра ${}^{18}\text{O}$ у збуджені стани $1,982$ MeV (2^+), $3,555$ MeV (4^+) і $3,921$ MeV (2^+), а також для збуджень $4,439$ MeV (2^+) (${}^{12}\text{C}$) + $4,456$ MeV (1^-) (${}^{18}\text{O}$) ядер ${}^{12}\text{C}$ і ${}^{18}\text{O}$, нерозділених в експерименті. Суцільні криві на рисунку показують МЗКР-розрахунки для ротаційних і вібраційних переходів λ -мультипольностей, відомості про які подано в табл. 1. Там же містяться значення параметрів деформації δ_λ ядер ${}^{12}\text{C}$ і ${}^{18}\text{O}$, що використовувалися.

лись в обчисленнях оператора переходів $V_{ij}(r)$ за формулою (6). Штриховими кривими $\langle {}^6\text{He} \rangle$, $\langle \text{nn} \rangle$ і $\langle \text{pp} \rangle$ на рис. 10 показано МЗКР-розрахунки реакцій передач ${}^6\text{He}$ -кластера та послідовних нуклонних передач $n + n$ і $p + p$ для переходу ядра ${}^{18}\text{O}$ у збуджений стан 1,982 MeV (2^+). Видно, що реакції передач не відіграють важливої ролі у цьому переході. Це стосується також усіх інших досліджених нами переходів ядер ${}^{12}\text{C}$ і ${}^{18}\text{O}$ у збуджені стани, диференціальні перерізи яких представлено на рис. 10 і 11.

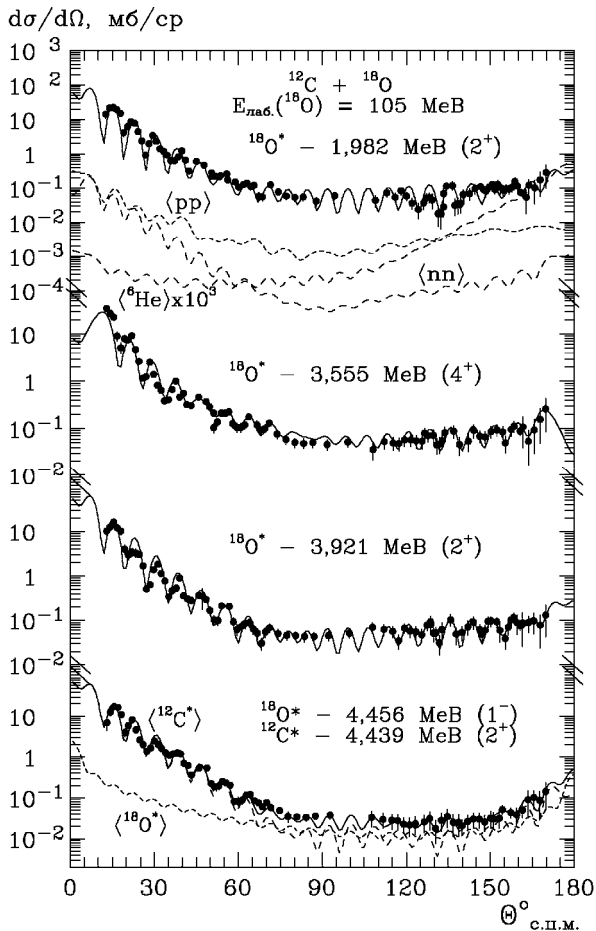


Рис. 10. Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер ${}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 105$ MeV для переходів ядра ${}^{18}\text{O}$ у збуджені стани 1,982 MeV (2^+), 3,555 MeV (4^+) і 3,921 MeV (2^+) та ядер ${}^{12}\text{C}$ і ${}^{18}\text{O}$ у збуджені стани 4,439 MeV (2^+) (${}^{12}\text{C}^*$) + 4,456 MeV (1^-) (${}^{18}\text{O}^*$). Криві – МЗКР-розрахунки.

Для нерозділених в експерименті переходів 4,439 MeV (2^+) (${}^{12}\text{C}$) + 4,456 MeV (1^-) (${}^{18}\text{O}$) ядер ${}^{12}\text{C}$ і ${}^{18}\text{O}$ на рис. 10 штриховими кривими $\langle {}^{12}\text{C}^* \rangle$ і $\langle {}^{18}\text{O}^* \rangle$ показано перерізи колективних переходів $0^+ \rightarrow 2^+$ ядра ${}^{12}\text{C}$ і $0^+ \rightarrow 1^-$ ядра ${}^{18}\text{O}$. Видно, що обидва переходи рівнозначні в розсіянні на великі кути, а в розсіянні на кути $\theta_{\text{с.п.м.}} < 60^\circ$ домінує перехід $0^+ \rightarrow 2^+$ ядра ${}^{12}\text{C}$. Суцільною кривою показано некогерентну суму перерізів цих двох переходів, що задовільно описує експериментальні дані.

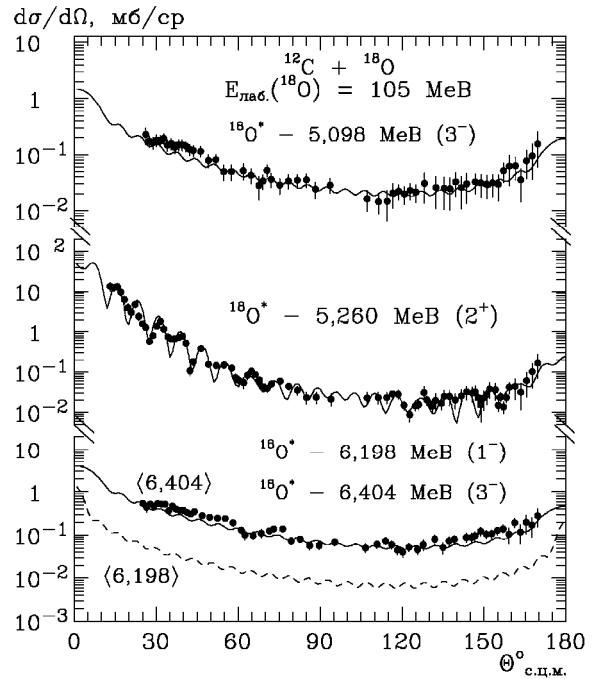


Рис. 11. Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер ${}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 105$ MeV для переходів ядра ${}^{18}\text{O}$ у збуджені стани 5,098 MeV (3^-), 5,26 MeV (2^+) і 6,198 MeV (1^-) + 6,404 MeV (3^-). Криві – МЗКР-розрахунки.

На рис. 11 представлено диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер ${}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O}$ для переходів ядра ${}^{18}\text{O}$ у збуджені стани 5,098 MeV (3^-), 5,260 MeV (2^+) і 6,198 MeV (1^-) + 6,404 MeV (3^-). Кривими на рисунку показано МЗКР-розрахунки для колективних переходів, відомості про які містяться в табл. 1. Для експериментальних даних переходів 6,198 MeV (1^-) + 6,404 MeV (3^-) показано МЗКР-розрахунки кривими $\langle 6,198 \rangle$ та $\langle 6,404 \rangle$. Видно, що експериментальні дані в цьому випадку задовільно описуються МЗКР-перерізами для переходу $0^+ \rightarrow 3^-$. Експериментальні дані інших переходів ядра ${}^{18}\text{O}$ у збуджені стани, представлені на рис. 11, також описуються задовільно МЗКР-перерізами колективної природи.

Енергетична залежність (${}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O}$)-потенціалу

Набори параметрів $A_1 - A_9$ (див. табл. 3) разом з їх похибками, отримані з аналізу експериментальних даних пружного розсіяння ядер ${}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{с.п.м.}} = 19,2 - 56$ MeV, показано на рис. 12 залежно від енергії $E_{\text{с.п.м.}}$. Значення параметрів

$$\{X_i\} = \{V_0, r_V, a_V, W_S, r_{W_S}, a_{W_S}, W_D, r_{W_D}, a_{W_D}\}$$

оптичного (${}^{12}\text{C} + {}^{18}\text{O}$)-потенціалу (3) наближувались параметризованими функціями

$$X_i(E) = \begin{cases} X_i^{\max} - (X_i^{\max} - X_i^{\min}) \cdot g(E, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}) & \text{для } X_i = V_0, W_S, W_D, a_V, a_{W_S}, a_{W_D}, \\ X_i^{\min} + (X_i^{\max} - X_i^{\min}) \cdot g(E, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}) & \text{для } X_i = r_V, r_{W_S}, r_{W_D}, \end{cases} \quad (7)$$

де

$$g(E, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}) = \left[1 + \exp\left(\frac{E - E_{X_i}}{\Delta E_{X_i}}\right) \right]^{-1}, \quad (8)$$

шляхом підгонки параметрів $\{Y_i\} = \{X_i^{\min}, X_i^{\max}, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}\}$. При цьому враховувалось дисперсійне співвідношення між дійсною $V(r, E)$ та уявною $W(r, E)$ частинами оптичного потенціалу [16]

$$V(r, E) = V_0(r, E) + \Delta V_W(r, E), \quad (9)$$

де

$$\Delta V_W(r, E) = \frac{P}{\pi} \int_0^\infty \frac{W(r, E')}{E' - E} dE' \quad (10)$$

(P вказує на головне значення інтеграла). При $r = 0$ ці співвідношення виражають зв'язок між параметрами глибин дійсної та уявної частин ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу.

Визначені методом підгонки параметри $\{Y_i\}$ енергетичної залежності ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-потенціалу подано в табл. 4, а на рис. 12 показано відповідні розрахунки функцій $X_i(E)$ суцільними кривими. Для порівняння на цьому рисунку штриховими кривими показано енергетичну залежність параметрів ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу [15] для параметрів a_b, r_b, W_i . Енергетичні залежності параметра $V(0, E)$ (див. рівняння (9)) ($^{12}\text{C} + ^{16,18}\text{O}$)-потенціалів відрізняються незначно. Тому для цього параметра на рис. 12 показано лише енергетичну залежність потенціалу $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ разом з його компонентами V_0 і ΔV .

Таблиця 4. Параметри Y_i енергетичної залежності потенціалу взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$

Y_i	X_i								
	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
X_i^{\min}	101,0	0,793	0,680	1,6	1,12	0,00	1,0	1,4	0,0
X_i^{\max}	314,0	0,920	0,680	15,6	1,35	0,45	1,0	1,4	0,4
E_{X_i} , MeB	21,0	19,800	13,066	25,6	20,00	20,00	25,1	20,0	20,0
ΔX_i , MeB	6,0	5,200	2,915	5,4	5,00	5,00	4,9	5,2	5,0

З рис. 12 видно, що найбільші розбіжності спостерігаються в значеннях параметрів a_{W_S}, W_D , і a_{W_D} потенціалів взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{16,18}\text{O}$ - параметрів, що визначають форму поверхонь уявних частин цих потенціалів. Про відмінності цих поверхонь потенціалів можна судити з рис. 13, на якому порівнюються оптичні ($^{12}\text{C} + ^{16,18}\text{O}$)-потенціали при енергії $E_{\text{с.ц.м.}} = 42$ MeB. Видно, що дійсні частини цих потенціалів відрізняються незначно, а уявні частини суттєво відрізняються формою своїх поверхонь. Характерний для уявної частини $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ -потенціалу глибокий мінімум на поверхні не спостерігається в уявній частині $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -потенціалу. Тобто поглинання квазімолекулярного типу в розсіянні ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ має значно менше значення, ніж у ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-розсіянні.

Основні результати та висновки

Поміряно диференціальні перерізи пружного й непружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ MeB для переходів в основні та збуджені стани 4,439 MeB (2^+) (^{12}C) +

+ 4,456 MeB (1^-) (^{18}O) ядер ^{12}C і ^{18}O , а також у збуджені стани 1,982 MeB (2^+), 3,555 MeB (4^+), 3,921 MeB (2^+), 5,098 MeB (3^-), 5,260 MeB (2^+) і 6,198 MeB (1^-) + 6,404 MeB (3^-) ядра ^{18}O у широкому кутовому діапазоні.

Отримані експериментальні дані пружного й непружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ та відомі з літературних джерел дані інших авторів 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 оптичного $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -потенціалу при різних енергіях. Досліджено їх енергетичну залежність та аналітично описано ці залежності параметризованими функціями з урахуванням дисперсійного співвідношення між дійсною та уявною частинами оптичного $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -потенціалу.

Досліджено механізми пружного й непружного ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-розсіяння. Установлено, що в пружному ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-розсіянні на кути

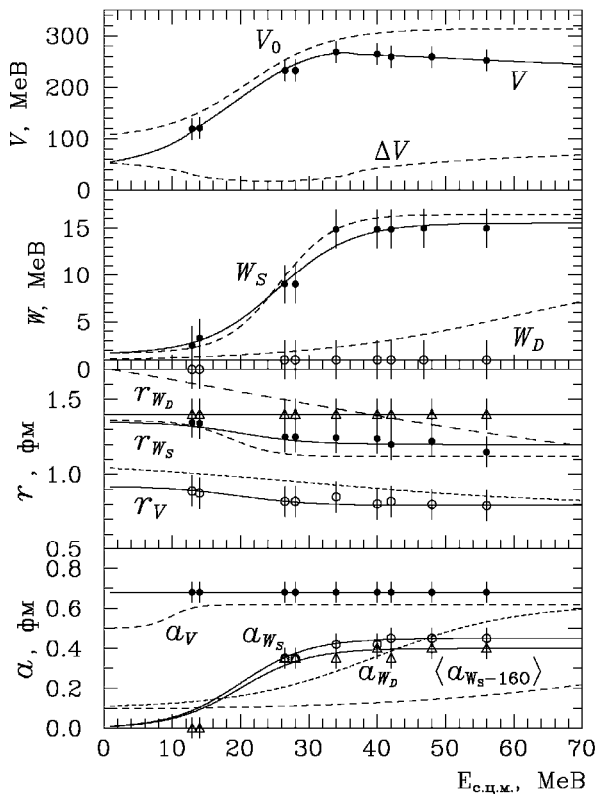


Рис. 12. Енергетична залежність параметрів $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ -потенціалу (точки й суцільні криві) у порівнянні з аналогічною залежністю ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу (штрихові криві для параметрів a_i , r_i , W_i). Криві – наближення параметрів потенціалів функціями $X_i(E)$ згідно з формулою (7).

$\theta_{\text{с.п.м.}} < 90^\circ$ домінує потенціальне розсіяння, а в розсіянні на великі кути важливу роль відіграють також реакції передачі, особливо обміни нуклонами. Установлено, що в непружному ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-розсіянні переходи в досліджені збуджені стани ядер мають, в основному, колективну природу.

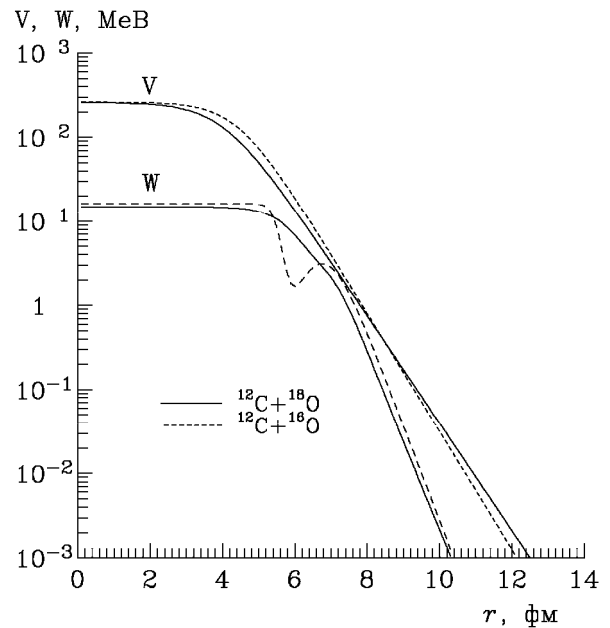


Рис. 13. Оптичні ($^{12}\text{C} + ^{16,18}\text{O}$)-потенціали при енергії $E_{\text{с.п.м.}} = 42$ МеВ.

Досліджено ізотопічні відмінності (ефекти) в розсіянні ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ і $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$. Виявлено, що оптичні потенціали взаємодії цих пар ядер значно відрізняються формою поверхонь уявних частин: ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціал поглинання має квазімолекулярну форму, а в ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-потенціалі поглинання така форма відсутня.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Chechik R., Eyal Y., Stocker H., Fraenkel Z. Elastic scattering of $^{17,18}\text{O}$ on $^{12,13}\text{C}$ at $E_{\text{с.п.м.}} = 12.6 - 14.0$ MeV // Nucl. Phys. A. - 1978. - Vol. 296. - P. 307 - 319.
2. Heusch B., Beck C., Coffin J.P. et al. Entrance channel effect for complete fusion of O + C isotopes // Phys. Rev. C. - 1982. - Vol. 26. - P. 542 - 554.
3. Szilner S., Nicoli M. P., Basrak Z. et al. Refractive effects and difference of absorption between $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ and $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ // Proc. of the 7th Int. Conf. on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, Rab, Croatia, 1999 / Ed. by M. Korolija, Z. Basrak, R. Caplar. - Singapore: World Scientific, 2000. - P. 180.
4. Szilner S., Nicoli M. P., Basrak Z. et al. Refractive elastic scattering of carbon and oxygen nuclei: The mean field analysis and Airy structures // Phys. Rev. C. - 2001. - Vol. 64. - P. 064614-(1-11).
5. Kowalczyk M. SMAN: A Code for Nuclear Experiments: Warsaw University report (1998).
6. 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 дослід. - 2002. - № 2 (8). - С. 216 - 224.
7. Specht J., Schweimer G. W., Rebel H. et al. Evidence for oblate shape of ^{12}C from inelastic α -particle scattering // Nucl. Phys. A. - 1971. - Vol. 171. - P. 65 - 72.
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 ассо-

- циаций 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., Чувильский Ю. М. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1p-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач // УФЖ. - 1985. - Т. 30, № 6. - С. 819 - 825.
 12. Бояркина А. Н. Структура ядер 1p-оболочки. - М.: Изд-во Москов. ун-та, 1973. - 62 с.
 13. Nilsson B. S. SPI-GENOA: an Optical Model Search Code. - Report / A Niels Bohr Institute, 1976.
 14. Thompson I. J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comp. Phys. Rep. - 1988. - Vol. 7. - P. 167 - 212.
 15. Рудчик А. Т., Ширма Ю. О., Понкратенко О. А. Енергетична залежність $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ -потенціалу // Ядерна фізика та енергетика. - 2009. - Т. 10, № 3 - С. 249 - 256.
 16. Mahaux C., Ngô H., Satchler G. R., Casualty and the threshold anomaly of the nucleus-nucleus potential // Nucl. Phys. A. - 1986. - 449. - P. 354 - 394.

УПРУГОЕ И НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ИОНОВ ^{18}O ЯДРАМИ ^{12}C

А. Т. Рудчик, Ю. О. Ширма, Е. И. Кощій, 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. Щурек

Получены новые экспериментальные данные дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ при энергии $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 105$ МэВ ($E_{\text{с.ц.м.}} = 42$ МэВ). Эти и известные из литературы данные при энергиях $E_{\text{с.ц.м.}} = 12,9 - 56$ МэВ исследованы по оптической модели и методом связанных каналов реакций. Получены наборы параметров ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-потенциала типа Вудса - Саксона и исследованы их энергетические зависимости. Обнаружены изотопические отличия значений параметров ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)- и ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-потенциалов и формы поверхностей этих потенциалов. Исследованы механизмы упругого и неупругого рассеяния ядер $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ и роли реакций передач в этом рассеянии.

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

ELASTIC AND INELASTIC SCATTERING OF ^{18}O IONS ON ^{12}C NUCLEI

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. Skwirzynska, R. Siudak, J. Choiński, A. Szczurek

Angular distributions of the $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ elastic and inelastic scattering were measured at the energy $E_{\text{lab}}(^{18}\text{O}) = 105$ MeV ($E_{\text{с.м.}} = 42$ MeV). These data and data known from the literature at the energies $E_{\text{с.м.}} = 12.9 - 56$ MeV were analysed within the optical model and coupled-reaction-channels method. The sets of the Woods-Saxon ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-potential parameters were deduced and their energy dependence was studied. It was found the isotopic differences in the ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)- and ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-potentials parameters and in their surface forms. The mechanisms of elastic and inelastic ($^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$)-scattering and role of transfer reactions were studied.

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

Надійшла до редакції 07.08.09,
після доопрацювання - 16.11.09.