

ЕНЕРГЕТИЧНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ПОТЕНЦІАЛУ ВЗАЄМОДІЇ ІОНІВ ^{16}O З ЯДРАМИ ^{12}C

А. Т. Рудчик, Ю. О. Ширма, О. А. Понкратенко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Експериментальні дані пружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{с.ц.м.}} = 8,6 - 135$ МеВ проаналізовано за оптичною моделлю та методом зв'язаних каналів реакцій. Одержано набори параметрів ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу типу Вудса - Саксона з об'ємним і поверхневим поглинаннями та досліджено їх енергетичну залежність. Визначено внески найпростіших реакцій передач у пружне розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$.

Ключові слова: пружне розсіяння важких іонів, реакції передач, оптична модель, метод зв'язаних каналів реакцій, оптичні потенціали.

Вступ

Розсіяння важких іонів – один з ефективних методів дослідження колективних рухів ядер, їх структури та ядерних процесів, що відбуваються, в основному, на поверхні взаємодіючих ядер. Ці відомості отримуються в рамках теоретичних ядерних моделей, найбільш широкого застосування серед яких набули оптична модель (ОМ) та метод зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). Розрахунки в них проводяться з використанням оптичних потенціалів ядро-ядерної взаємодії, параметри яких визначаються методом підгонки до відповідних експериментальних даних. Як проявляються індивідуальні особливості структури поверхонь взаємодіючих стабільних і нестабільних ядер у параметрах оптичних потенціалів – одне з важливих питань сучасної фізики важких іонів. Відповідь на це питання можна отримати із систематичного дослідження передусім пружного розсіяння ядер у широкому діапазоні енергій, зважаючи на енергетичну залежність ядро-ядерної взаємодії. Саме за положеннями максимумів поверхневого поглинання в оптичних потенціалах, отриманих з аналізу даних пружного розсіяння ядер, можна найвірогідніше визначати області поверхонь ядер, найбільш сприятливих для здійснення непружних процесів.

Тепер особливу увагу привертають дослідження оптичних потенціалів взаємодії нестабільних і незв'язаних ядер як у безпосередніх (прямих) експериментах з розсіяння радіоактивних іонів, так і з використанням експериментальних даних реакцій передач. В останньому випадку важливу роль відіграють оптичні потенціали взаємодії стабільних ядер у вхідних каналах реакцій, отримані з аналізу пружного розсіяння іонів у широкому діапазоні енергій, оскільки вони є основою МЗКР-аналізу даних реакцій. У цьому випадку параметри оптичного потенціалу взаємодії нестабільних або незв'язаних ядер вхідного каналу реакції визначаються шляхом підгонки МЗКР-перерізів до даних реакцій.

Важливе місце належить оптичним потенціалам взаємодії стабільних ядер також при дослідженні ізотопічних та ізобаричних ефектів у розсіянні нестабільних і незв'язаних ядер. Так, ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціал є еталоном у дослідженнях ізотопічної залежності розсіяння ядер $^{12, 13, 14}\text{C} + ^{16, 17, 18}\text{O}$. Вивченню властивостей цього потенціалу присвячено цю роботу.

Розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ досліджувалось у багатьох працях у широкому діапазоні енергій $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 20 - 1503$ МеВ [1 - 10]. Експериментальні дані аналізувались, в основному, за оптичною та дифракційною моделями. Внески непружних процесів в експериментальні дані пружного розсіяння, вплив зв'язку каналів на пружне ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-розсіяння та енергетична залежність параметрів ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу досі не вивчались. Зазначені питання є предметом досліджень цієї роботи.

Тут подано результати сукупного аналізу експериментальних даних пружного ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-розсіяння при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 20 - 315$ МеВ [1 - 7] за ОМ та МЗКР, визначено набори параметрів оптичного ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу при різних енергіях та їх енергетичну залежність, досліджено можливі внески реакцій передач у канал пружного розсіяння цих ядер.

Аналіз експериментальних даних

Процедура розрахунків

В ОМ- та МЗКР-розрахунках диференціальних перерізів ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-розсіяння використовувався оптичний потенціал типу Вудса - Саксона з об'ємним та поверхневим поглинаннями

$$U(r) = V_0 \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_v}{\alpha_v}\right) \right]^{-1} + \tag{1}$$

$$+ iW_s \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_{W_s}}{\alpha_{W_s}}\right) \right]^{-1} + i4W_D \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_{W_D}}{\alpha_{W_D}}\right) \right]^{-2}$$

та кулонівський потенціал рівномірно зарядженої кулі

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

де $R_i = r_i (A_p^{1/3} + A_T^{1/3})$, $i = \{V, W_S, W_D, C\}$; A_p, Z_p , та A_T, Z_T – маси і заряди іонів P та ядер мішені T відповідно.

У всіх розрахунках $r_C = 1,25$ фм. Параметри $X_i = \{V_0, r_V, a_V, W_S, r_W, a_W, W_D, r_{WD}, a_{WD}\}$ потенціалу (1) в ОМ підганялись за χ^2 -критерієм до експериментальних даних розсіяння, а потім уточнювались у МЗКР-розрахунках.

У МЗКР-розрахунках у систему зв'язку каналів включались пружне та непружне розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$, а також найбільш важливі реакції передач, діаграми яких представлено на рис. 1. При цьому вважалось, що збудження ядер ^{12}C і ^{16}O до енергії 10 МеВ мають колективну природу (ротаційну або вібраційну) і переходи в ці стани обчислювались із використанням форм-факторів типу

$$V_\lambda(r) = -\frac{\delta_\lambda}{\sqrt{4\pi}} \frac{dU(r)}{dr}, \quad (3)$$

де δ_λ – параметр деформації ядра λ -мультипольності. Значення параметрів деформації ядер ^{12}C і ^{16}O брались із відомих досліджень непружного розсіяння нуклонів і легких частинок цими ядра-

ми. В основному $\delta_\lambda = 1,0$ фм ($\lambda = 1 - 4$), за винятком $\delta_2 = -1,0$ фм для ^{12}C .

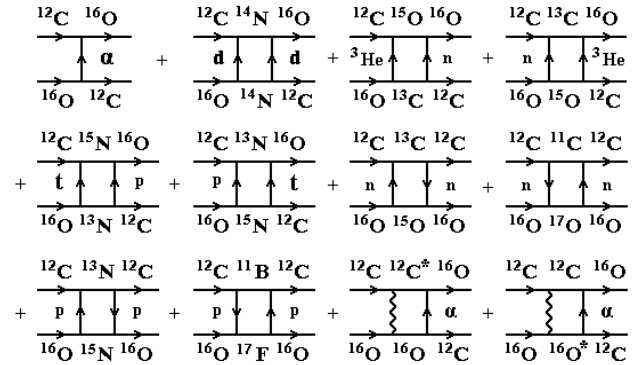


Рис. 1. Діаграми одно- й двоступінчастих передач для пружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$.

Необхідні для МЗКР-розрахунків реакцій передач спектроскопічні амплітуди S_x кластерів та нуклонів x у системах $A = C + x$

$$S_x = \begin{pmatrix} A \\ x \end{pmatrix}^{1/2} \langle \Psi_A | \Psi_C \Psi_x; \varphi_{x,C} \rangle \quad (4)$$

було обчислено в рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки (ТІМО) [11] за допомогою програми DESNA [12, 13] із використанням таблиць хвильових функцій роботи [14]. У виразі (4) Ψ_A, Ψ_C, Ψ_x – хвильові функції внутрішніх станів ядер A, C, x , а $\varphi_{x,C}$ – хвильова функція руху кластера x відносно ядра-кора C . Спектроскопічні амплітуди S_x подано у табл. 1.

Таблиця 1. Спектроскопічні амплітуди S_x кластерів та нуклонів x у системах $A = C + x$

A	C	x	$E_{зв}, \text{MeV}$	nL_j	S_x
^{12}C	^{11}B	p	15,957	$1P_{3/2}$	$-1,706^{(a)}$
^{12}C	^{11}C	n	18,722	$1P_{3/2}$	$1,706^{(a)}$
^{13}C	^{12}C	n	4,946	$1P_{1/2}$	0,601
^{13}N	^{12}C	p	1,944	$1P_{1/2}$	0,601
^{14}N	^{12}C	d	10,272	$1D_1$	0,246
^{15}N	^{12}C	t	14,848	$2P_{1/2}$	0,380
^{15}O	^{12}C	^3He	12,076	$2P_{1/2}$	0,380
^{16}O	^{12}C	α	7,162	$3S_0$	0,544
$^{16}\text{O}^*_{6,919}$	^{12}C	α	0,243	$2D_2$	-0,411
^{16}O	$^{12}\text{C}^*_{4,44}$	α	11,601	$2D_2$	1,217
^{16}O	^{13}C	^3He	22,793	$2P_{1/2}$	$0,910^{(a)}$
^{16}O	^{13}N	t	25,033	$2P_{1/2}$	$-0,910^{(a)}$
^{16}O	^{14}N	d	20,736	$1D_1$	$1,400^{(a)}$
^{16}O	^{15}N	p	12,128	$1P_{1/2}$	$-1,461^{(a)}$
^{16}O	^{15}O	n	15,664	$1P_{1/2}$	$1,461^{(a)}$
^{17}F	^{16}O	p	0,601	$1D_{5/2}$	-0,500
^{17}O	^{16}O	n	4,144	$1D_{5/2}$	0,500

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

Хвильова функція зв'язаного стану нуклона або кластера обчислювалась стандартним способом - шляхом підгонки параметра V дійсного по-

тенціалу Вудса - Саксона, щоб обчислене значення енергії зв'язку нуклона чи кластера x в системі $A = C + x$ при параметрах потенціалу $a_V =$

$= 0,65$ фм і $r_V = 1,25(C^{1/3} + x^{1/3})$ фм задовільно узгоджувалось із відповідним експериментальним значенням цієї енергії.

Для розрахунків за ОМ використовувалась програма SPI-GENOA [15], а за МЗКР - програма FRESKO [16].

Аналіз експериментальних даних

У дослідженні пружного ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-розсіяння передусім визначались можливі внески реакцій передач у розсіяння на великі кути, де при багатьох енергіях спостерігається ріст диференціальних перерізів. Такі розрахунки було проведено за МЗКР, використовуючи оптичний ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціал, параметри якого було визначено шляхом підгонки ОМ-перерізів до експериментальних даних.

На рис. 2 показано внески в пружне ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-розсіяння при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 100$ МеВ [6] реакцій передач, діаграми яких представлено на рис. 1. У МЗКР-розрахунках враховувалась як одноступінчаста передача α -кластера (перша діаграма на рис. 1), так і двоступінчасті процеси передачі α -кластера з початковими збудженнями ядра ^{12}C на рівень 4,439 МеВ (2^+) та ядра ^{16}O на рівень 6,919 МеВ (2^+) (див. дві останні діаграми на рис. 1). Видно, що серед реакцій передач найбільшими є перерізи реакцій передачі $n + n$ (крива $\langle nn \rangle$), $p + p$ (крива $\langle pp \rangle$) та α -кластера (крива $\langle \alpha \rangle$). Проте внесок α -передачі в пружне ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-розсіяння навіть на великих кутах значно менший за потенціальне розсіяння (крива $\langle pot \rangle$). Внески реакцій двоступінчастих передач нуклонів і кластерів $^3\text{He} + n$ і $n + ^3\text{He}$, $t + p$ і $p + t$ (когерентні суми) та $d + d$ (криві $\langle n^3\text{He} \rangle$, $\langle tp \rangle$ та $\langle dd \rangle$ відповідно) в пружне ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-розсіяння є мізерними.

Видно, що кутовий розподіл дифенціальних перерізів пружного ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-розсіяння у широкому діапазоні кутів обумовлений, в основному, потенціальним розсіянням. У розсіянні на великі

$d\sigma/d\Omega$, мб/ср

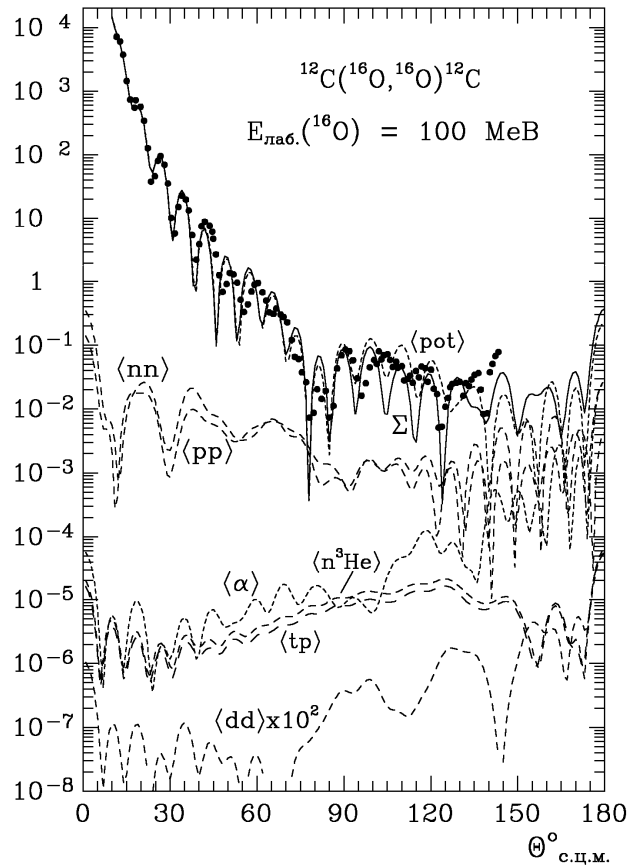


Рис. 2. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 100$ МеВ [4]. Криві – МЗКР-розрахунки.

кути значну роль відіграють також реакції передач нуклонів та α -кластерів.

Визначені шляхом підгонки набори параметрів ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 20 - 315$ МеВ [1 - 7] подано в табл. 2, а відповідні МЗКР-розрахунки разом з експериментальними даними показано на рис. 3 - 7. Криві $\langle tp \rangle$ на цих рисунках показують когерентну суму перерізів усіх реакцій передач. Видно, що МЗКР-перерізи задовільно описують усі особливості кутової залежності диференціальних перерізів ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-розсіяння при всіх енергіях.

Таблиця 2. Параметри потенціалу взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$

$E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}),$ МеВ	$E_{\text{с.п.м.}},$ МеВ	$V_0,$ 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
20	8,57	109,0	1,100	0,560	1,9	1,350	0,100	0,50	1,650	0,100
24	10,29	109,0	0,980	0,620	2,1	1,345	0,100	1,10	1,620	0,250
27	11,57	111,0	0,970	0,620	2,2	1,340	0,100	1,30	1,610	0,150
31,9	13,67	131,4	0,960	0,700	4,1	1,330	0,100	1,40	1,590	0,150
35	15,00	152,0	0,985	0,620	1,9	1,260	0,100	1,40	1,580	0,200
40,32	17,28	156,0	0,970	0,620	3,0	1,260	0,100	1,50	1,570	0,200
42	18,00	161,0	0,950	0,620	4,2	1,260	0,100	1,50	1,530	0,200
48,51	20,79	184,0	0,950	0,620	5,5	1,230	0,100	1,50	1,490	0,200
53,25	22,82	213,0	0,952	0,620	7,3	1,150	0,100	1,50	1,470	0,200
62	26,57	221,0	0,940	0,620	12,6	1,130	0,100	2,30	1,465	0,200

$E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}),$ MeB	$E_{\text{с.п.м.}},$ 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
75	32,14	251,0	0,920	0,620	14,0	1,110	0,100	2,30	1,450	0,250
80	34,29	256,0	0,910	0,620	14,5	1,110	0,110	2,40	1,440	0,270
94,8	40,63	261,0	0,911	0,620	16,5	1,110	0,110	2,40	1,440	0,300
100	42,86	268,0	0,905	0,620	16,5	1,110	0,150	2,50	1,440	0,400
115,9	49,67	268,5	0,900	0,620	16,5	1,110	0,150	3,00	1,390	0,450
124	53,14	272,0	0,900	0,620	16,5	1,110	0,120	4,00	1,350	0,450
132	56,57	274,0	0,900	0,620	16,5	1,110	0,150	4,30	1,330	0,500
139	59,57	271,0	0,840	0,620	16,5	1,110	0,180	4,50	1,230	0,550
140	60,00	270,0	0,830	0,620	16,5	1,110	0,180	4,50	1,230	0,550
170	72,86	255,0	0,825	0,620	16,5	1,110	0,260	6,50	1,160	0,600
200	85,71	255,0	0,820	0,620	16,5	1,110	0,270	7,80	1,200	0,610
218	93,43	255,0	0,815	0,620	16,5	1,110	0,280	8,30	1,100	0,620
230	98,57	255,0	0,825	0,620	16,5	1,110	0,290	10,3	1,090	0,620
260	111,43	262,0	0,816	0,620	16,5	1,190	0,300	10,3	1,065	0,620
315	135,0	249,0	0,816	0,620	16,5	1,190	0,400	10,3	1,050	0,620

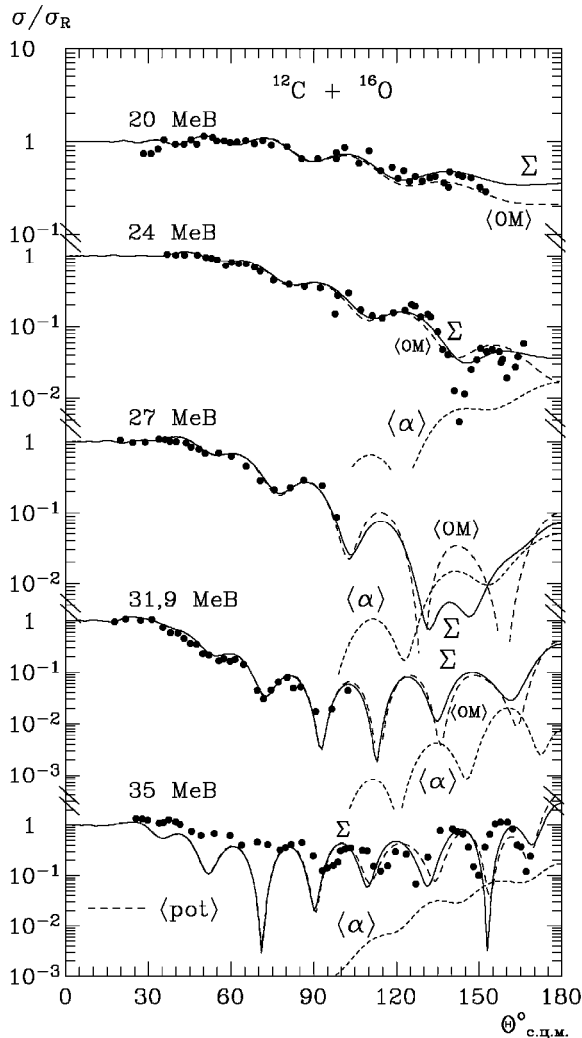


Рис. 3. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 20$ і 24 MeB [2], 27 і 32 MeB [1] та 35 MeB [2]. Криві – розрахунки за OM (криві <OM>) та МЗКР для α -передачі (криві < α >) і когерентної суми потенціального розсіяння та α -передачі (криві Σ).

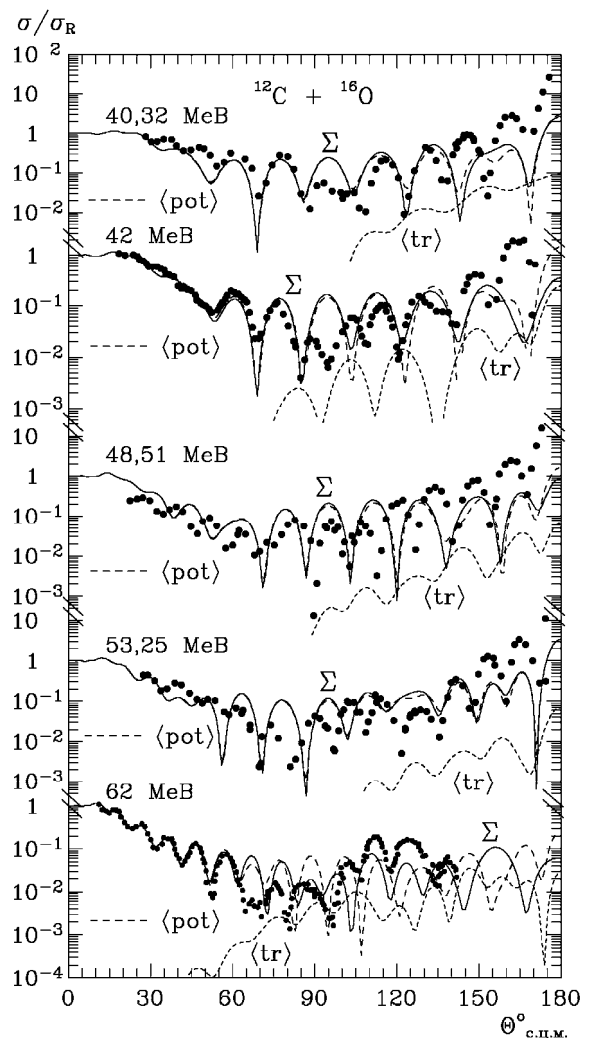


Рис. 4. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 40,32$ MeB [3], 42 MeB [2], $48,51$ і $53,25$ MeB [3], 62 MeB [6]. Криві – розрахунки за МЗКР для потенціального розсіяння (криві <pot>) та когерентної суми перерізів реакцій передач (криві <tr>). Криві Σ – сума всіх механізмів.

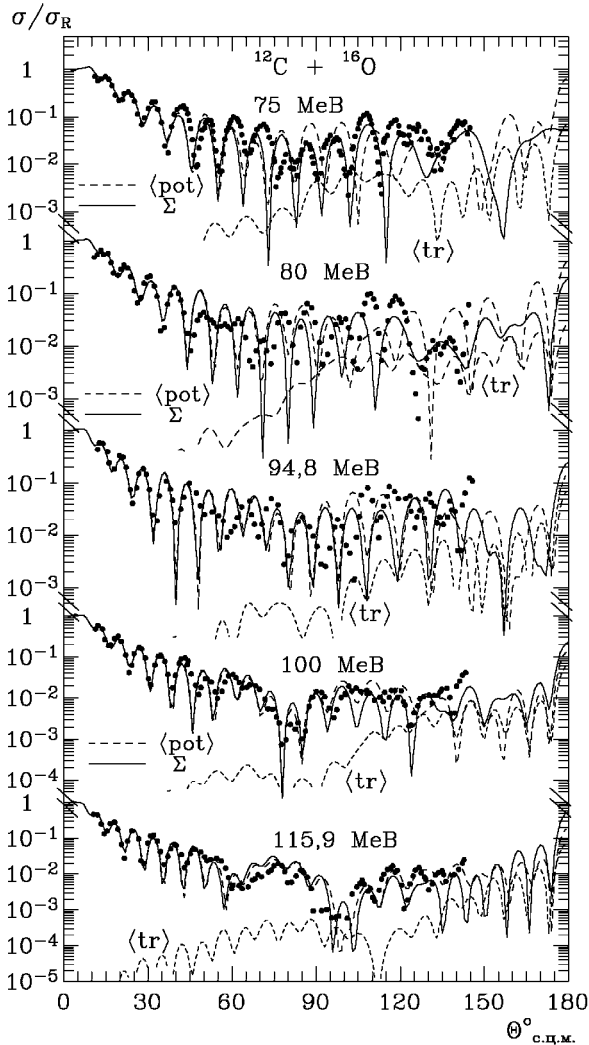


Рис. 5. Те ж саме, що на рис. 4, але при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 75, 80, 94,8, 100$ і $115,9$ MeV [6].

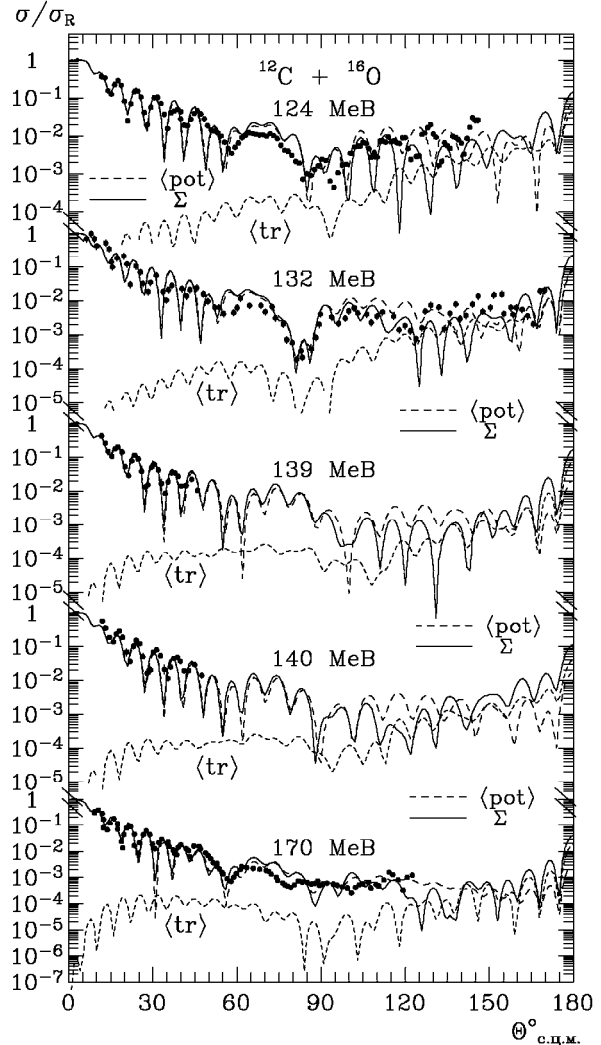


Рис. 6. Те ж саме, що на рис. 4, але при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 124$ MeV [6], 132 MeV [7], 139 MeV [5], 140 MeV [4] і 170 MeV [7].

Енергетична залежність ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу

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 ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу, подані в табл. 2, показано точками на рис. 8 залежно від енергії $E_{\text{с.ц.м.}}$.

$$X_i(E) = \begin{cases} X_i^{\max} - (X_i^{\max} - X_i^{\min}) \cdot g(E, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}) & \text{для } X_i = V_0, W_S, W_D, a_V, a_{W_S}, a_{W_D}, \\ X_i^{\min} + (X_i^{\max} - X_i^{\min}) \cdot g(E, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}) & \text{для } X_i = r_V, r_{W_S}, r_{W_D}, \end{cases} \quad (5)$$

де

$$g(E, E_{X_i}, \Delta E_{X_i}) = \left[1 + \exp\left(\frac{E - E_{X_i}}{\Delta E_{X_i}}\right) \right]^{-1}, \quad (6)$$

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

Видно, що всі параметри цього потенціалу залежать від енергії і ця залежність є плавною. Для отримання аналітичного виразу енергетичної залежності параметрів ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу їх значення, знайдені методом підгонки, наближувались параметризованими функціями:

$$V(r, E) = V_0(r, E) + \Delta V_W(r, E), \quad (7)$$

де

$$\Delta V_W(r, E) = \frac{P}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{W(r, E')}{E' - E} dE', \quad (8)$$

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

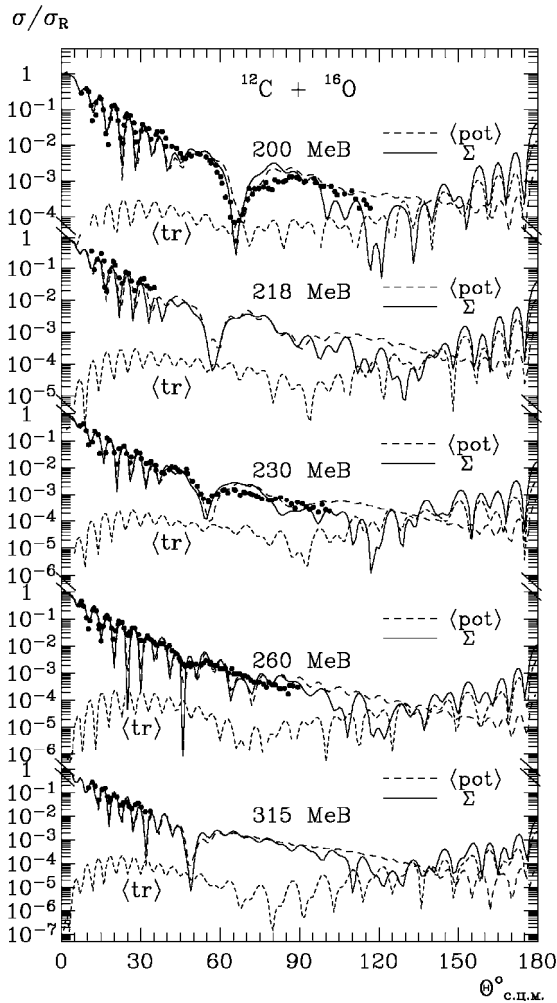


Рис. 7. Те ж саме, що на рис. 4, але при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 200 \text{ MeV}$ [7], 218 MeV [4], 230 і 260 MeV [7], 315 MeV [4].

Визначені методом підгонки параметри $\{Y_i\}$ енергетичної залежності $(^{12}\text{C} + ^{16}\text{O})$ -потенціалу подано в табл. 3, а на рис. 8 кривими показано розрахунки функцій $X_i(E)$ з цими параметрами за формулами (5) - (8). Видно, що з ростом енергії параметри r_V, r_{W_S}, r_{W_D} зменшуються, прямуючи до мінімального асимптотичного значення зближення ядер, а параметри a_V, a_{W_S}, a_{W_D} збільшуються, прямуючи до максимального асимптотичного значення перекриття дифузних поверхонь розподілу нуклонів в ядрах. Глибини W_S і W_D потенціалів об'ємного та поверхневого поглинання з ростом енергії також прямують до своїх максимальних асимптотичних значень, коли всі основні канали непружних процесів стають відкритими. А глибина V_0 , досягнувши свого максимального значення при енергії $\sim 30 \text{ MeV}$, з ростом енергії повільно зменшується згідно з дисперсійним співвідношенням (7): $|V(E)| = |V_0(E)| - |\Delta V_W(E)|$. Малі значення параметра V_0 при низьких енергіях свід-

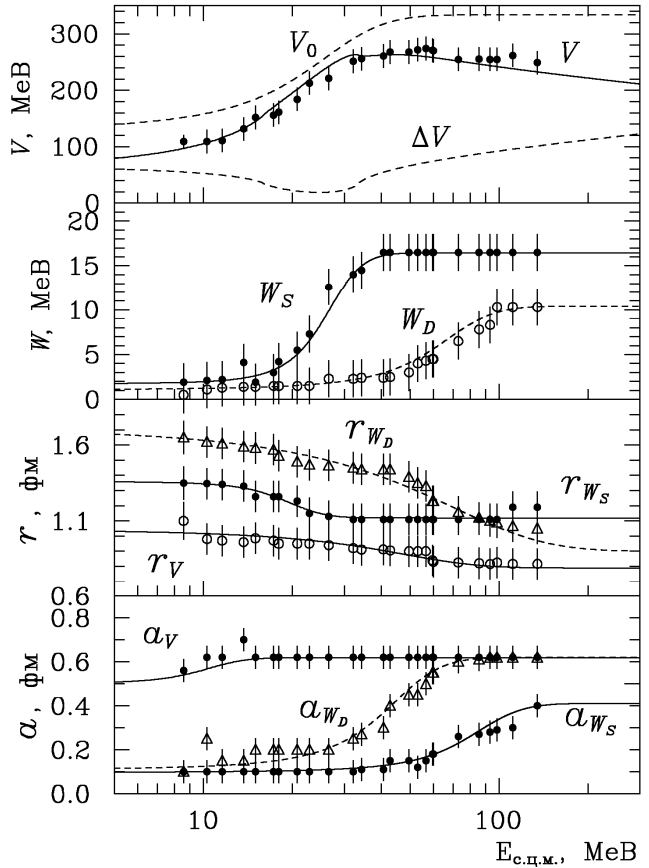


Рис. 8. Енергетична залежність параметрів $(^{12}\text{C} + ^{16}\text{O})$ -потенціалу.

чать про участь у взаємодії незначного числа нуклонів поверхонь ядер, оскільки внаслідок кулонівського відштовхування ядер мінімальна відстань зближення взаємодіючих ядер знаходиться поблизу свого максимального значення. З ростом енергії ця мінімальна відстань прямує до свого асимптотичного мінімального значення, обумовленого дією принципу Паулі, що забороняє подальше зближення ядер без утворення складеного ядра. При досягненні мінімального зближення ядер число взаємодіючих нуклонів на поверхнях ядер не змінюється з ростом енергії, а тому параметр $V_0 = V_0^{\text{max}}$, досягнувши свого асимптотичного максимального значення, не змінюється (див. на рис. 8 штрихову криву V_0).

Компонента ΔV_W глибини $V(E)$ оптичного потенціалу $U(E)$ має мінімальне значення при енергії $E = 25,5 \text{ MeV}$ (див. штрихову криву ΔV на рис. 8) – точки перегину енергетичної залежності параметра $W_S(E)$. Від енергії цього мінімуму залежить положення максимуму параметра $V(E)$.

Таблиця 3. Параметри Y_i енергетичної залежності потенціалу взаємодії ядер $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$

Y_i	X_i								
	V_0 , MeB	r_V , фм	a_V , фм	W_S , MeB	r_{W_S} , фм	α_{W_S} , фм	W_D , MeB	r_{W_S} , фм	α_{W_S} , фм
X_i^{min}	113,9	0,789	0,500	1,7	1,119	0,093	0,9	0,900	0,100
X_i^{max}	333,9	0,961	0,619	16,5	1,361	0,411	10,4	2,200	0,620
E_{X_i} , MeB	20,9	30,000	9,800	25,7	18,476	77,968	60,1	20,000	40,000
Δ_{X_i} , MeB	7,9	20,000	1,800	3,9	3,259	17,939	15,1	40,000	10,000

Великий інтерес викликає енергетична залежність форми уявної частини ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу, положення максимуму якої відображає енергетичну залежність мінімального зближення ядер за максимальною ймовірністю непружних процесів. Цю енергетичну залежність потенціалу $W(r, E) = W_S(r, E) + W_D(r, E)$ показано на рис. 9. Видно, що цей потенціал має чітко виражений максимум у периферійній області з глибоким мінімумом у бік малих значень r , що відображає вузьку радіальну локалізацію непружних процесів на поверхні ядер. При енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) > \sim 200$ MeB непружні процеси відбуваються в

усій поверхневій області взаємодії ядер.

На рис. 10 порівнюються дійсні та уявні частини оптичного ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу при енергіях $E(^{16}\text{O}) = 100$ і 230 MeB. Видно, що в поверхневій області значення цих частин потенціалу приблизно мають однакове значення. На рисунку показано також ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-фолдінг-потенціал [6]. Видно, що він незначно відрізняється від дійсних частин ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу, визначених з аналізу відповідних експериментальних даних, в основному, лише в центральній області, що незначно впливає на розрахункові ОМ- і МЗКР-перерізи.

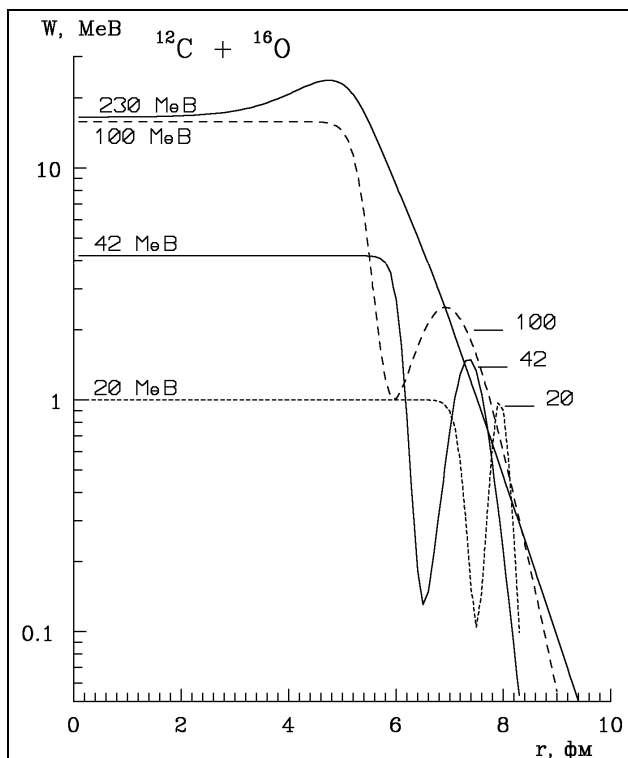


Рис. 9. Радіальна залежність уявної частини $W(r, E)$ оптичного ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу при різних кінетичних енергіях ^{16}O .

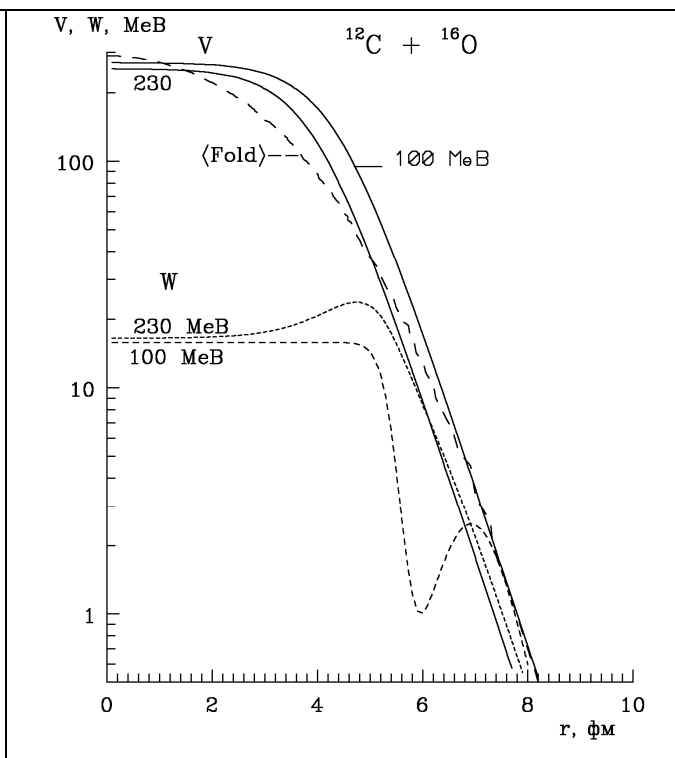


Рис. 10. Радіальні залежності оптичного ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу при $E(^{16}\text{O}) = 100$ і 230 MeB та ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-фолдінг-потенціалу [6].

Основні результати та висновки

Підсумовуючи розгляд пружного ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-розсіяння, зупинимось на основних отриманих результатах та висновках.

З аналізу відомих експериментальних даних при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 20 - 315$ MeB [1 - 7] за ОМ та МЗКР визначено набори параметрів опти-

чного ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу при різних енергіях.

Установлено, що в ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-розсіянні домінує потенціальне розсіяння. Реакції передачі відіграють помітну роль лише в розсіянні на великі кути.

Виявлено, що уявна частина $W(r, E)$ ($^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$)-потенціалу має складну форму з характер-

ним вузьким максимумом у поверхневій області взаємодії ядер при енергіях $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) < \sim 200$ MeB. Визначено енергетичну залежність параметрів

$(^{12}\text{C} + ^{16}\text{O})$ -потенціалу, що має важливе значення для дослідження *ізотопічних залежностей* розсіяння ядер $^{12, 13, 14}\text{C} + ^{16, 17, 18}\text{O}$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Kuehner J. A., Almavits E., Bromley D. A.* Elastic scattering of oxygen ions by carbon, magnesium and aluminium // *Phys. Rev.* - 1963. -Vol. 131. - P. 1254 - 1259.
2. *Voos U. C., Von Oertzen W., Bock R.* Optical-model analysis of the elastic scattering of complex nuclei at low energies // *Nucl. Phys. A.* - 1969. -Vol. 135. - P. 207 - 224.
3. *Charles P., Auger F., Badawy I. et al.* Resonant behaviour of the $^{16}\text{O} - ^{12}\text{C}$ elastic scattering cross section // *Phys. Lett. B.* - 1976. - Vol. 62. - P. 289 - 292.
4. *Brandan M. E., Menchaca-Rocha A.* Total reaction cross section for $^{16}\text{O} - ^{12}\text{C}$ at $E_{\text{c.m.}} = 60, 93,$ and 135 MeV // *Phys. Rev. C.* - 1981. - Vol. 23. - P. 1272 - 1273.
5. *Ogloblin A. A., Dao Khoa T., Kondo Y. et al.* Pronounced Airy structure in elastic $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ scattering at $E_{\text{lab}} = 132$ MeV // *Phys. Rev. C.* - 1998. -Vol. 57. - P. 1797 - 1802.
6. *Nicoli M. P., Haas F., Freeman R. M. et al.* Detailed study and mean field interpretation of $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ elastic scattering at seven medium energies // *Phys. Rev. C.* - 2000. -Vol. 61. - P. 034609.
7. *Ogloblin A. A., Glukhov Yu. A., Trzaska W. H. et al.* New measurement of the refractive, elastic $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ scattering at 132, 170, 200, 230, and 260 MeV incident energies // *Phys. Rev. C.* - 2000. -Vol. 62. - P. 044601.
8. *Brandan M. E., Menchaca-Rocha A., Buenerd M. et al.* Elastic and inelastic $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ scattering at 38 MeV/nucleon // *Phys. Rev. C.* - 1986. -Vol. 34. - P. 1484.
9. *Roussel P., Alamanos N., Auger F. et al.* Nucleus-Nucleus Potential inside the Strong-Absorption Radius from $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ Elastic Scattering at 94 MeV // *Phys. Rev. Lett.* - 1985. - Vol. 54. - P. 1779 - 1782.
10. *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.
11. *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.
12. *Рудчик А. Т., Чувильский 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).
13. *Рудчик А. Т., Чувильский Ю. М.* Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1р-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач // *УФЖ.* - 1985. - Т. 30, № 6. - С. 819 - 825.
14. *Бояркина А. Н.* Структура ядер 1р-оболочки. - М.: Изд-во Москов. ун-та, 1973. - 62 с.
15. *Nilsson B. S.* SPI-GENOA: an Optical Model Search Code. 1976 (Report / The Niels Bohr Institute).
16. *Thompson I. J.* Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // *Comp. Phys. Rep.* - 1988. - Vol. 7. - P. 167.
17. *Mahaux C., Ngö H., Satchler G. R.* Casualty and the threshold anomaly of the nucleus-nucleus potential // *Nucl. Phys. A.* - 1986. - Vol. 449. - P. 354 - 394.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОТЕНЦИАЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНОВ ^{16}O С ЯДРАМИ ^{12}C

А. Т. Рудчик, Ю. О. Ширма, О. А. Понкратенко

Экспериментальные данные упругого рассеяния ядер $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ при энергиях $E_{\text{c.п.м.}} = 8,6 - 135$ MeB проанализированы по оптической модели и методу связанных каналов реакций. Получены наборы параметров $(^{12}\text{C} + ^{16}\text{O})$ -потенциала типа Вудса - Саксона с объемным и поверхностным поглощением и исследована их энергетическая зависимость. Определены вклады наиболее простых реакций передач в упругое рассеяние ядер $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$.

Ключевые слова: упругое рассеяние тяжелых ионов, реакции передач, оптическая модель, метод связанных каналов реакций, оптические потенциалы.

ENERGY DEPENDENCE OF THE POTENTIAL FOR INTERACTION OF ^{16}O IONS WITH ^{12}C NUCLEI

A. T. Rudchik, Yu. O. Shyrma, O. A. Ponkratenko

Experimental data of the $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ elastic scattering at the energies $E_{\text{c.m.}} = 8,6 - 135$ MeV were analyzed within optical model and coupled-reaction-channels method. The sets of parameters for the $(^{12}\text{C} + ^{16}\text{O})$ -potential of Woods - Saxon type with volume and surface absorption as well as their energy dependence were deduced. The contributions of simple transfers in the $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ elastic scattering were obtained.

Keywords: elastic heavy-ion scattering, transfer reactions, coupled-reaction-channels method, optical potentials.

Надійшла до редакції 16.07.09,
після доопрацювання - 09.11.09.