

О. А. Понкратенко, А. А. Рудчик, А. Т. Рудчик, Ю. М. Степаненко,  
В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

## ГЛОБАЛЬНІ ПОТЕНЦІАЛИ ВЗАЄМОДІЇ ДЛЯ ДИФРАКЦІЙНОГО РОЗСІЯННЯ $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ ТА $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ У ШИРОКОМУ ДІАПАЗОНІ ЕНЕРГІЙ

Проведено детальне дослідження поведінки наявних експериментальних даних диференціального перерізу пружного розсіяння в системах  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  та  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  в енергетичному діапазоні від 1 до 200 МеВ/нуклон. Виявлено, що в діапазоні переданих імпульсів від 0 до 3-4 фм<sup>1</sup> диференціальні перерізи демонструють яскраво виражений дифракційний характер розсіяння для всіх енергій з досліджуваного діапазону. Установлено загальні закономірності поведінки положень восьми перших дифракційних максимумів і мінімумів та значень перерізів у цих максимумах зі зміною енергії взаємодії. На основі аналізу в рамках оптичної моделі побудовано енергетично залежні оптичні потенціали взаємодії для даних систем у повному діапазоні енергій. Отримані потенціали задовільно описують усі наявні експериментальні дані, чітко відображають характерні риси перерізу дифракційного розсіяння. За допомогою отриманих енергетично залежних потенціалів продемонстровано еволюцію параметрів потенціалів зі зміною енергії взаємодії.

*Ключові слова:* розсіяння важких іонів, енергетична залежність параметрів потенціалу, оптична модель, фолдінг-модель, оптичні потенціали, дифракційне розсіяння.

### Вступ

Складність теоретичного опису взаємодії ядер з перших принципів залишає якнайбільш актуальною проблему побудови адекватної феноменологічної картини цієї взаємодії. Дуже бажаною властивістю такої феноменологічної теорії мала б бути здатність не тільки пояснити, а й передбачити (з достатньою точністю) переріз реакції чи розсіяння для взаємодії довільних ядер при довільній енергії.

У дослідженнях взаємодії ядер оптична модель (ОМ) зарекомендувала себе достатньо ефективним інструментом опису їхнього пружного розсіяння (ПР). Удосконалення ОМ до методу деформованих хвиль DWBA вже дає змогу описати і процеси непружного розсіяння та найпростіші реакції передач. Метод зв'язаних каналів є ще більш потужним інструментом опису процесу взаємодії, що враховує вже декілька вихідних каналів одночасно.

З іншого боку, результати прогнозування перерізу навіть ПР в області енергій, де немає експериментальних результатів, є поки що досить неоднозначними, оскільки для кожної пари ядер, що взаємодіють, потрібен окремий потенціал взаємодії, який ще й змінюється зі зміною енергії зіткнення. У такій картині саме потенціал, що в ОМ є комплексною функцією відстані між ядрами, є тією емпіричною величиною, яка характеризує взаємодію у процесі розсіяння. Таким чином, аби передбачити переріз ПР для певної системи ядер, необхідно мати потенціал, відповідний до даної системи та даної енергії.

Ситуація ускладнюється тим, що потенціал визначається неоднозначно: один і той же диференціальний переріз (кутовий розподіл) можна отримати за допомогою великої кількості потенціалів взаємодії, часто досить сильно відмінних один від одного. Зменшити неоднозначність при побудові потенціалу дозволяє більш глобальний підхід: опис одним енергетично залежним потенціалом великого масиву даних (в ідеалі від різних процесів). Багато років досліджень, як експериментальних так і теоретичних, уже дали змогу проявити багато характерних рис потенціалу взаємодії для різних ядерних систем. Відзначено вже також певні характерні особливості еволюції форми потенціалу зі зміною енергії.

Накопичені знання роблять можливим єдиний підхід до опису процесів розсіяння (як мінімум пружного) у широкому діапазоні енергій від підбар'єрних до ~100 МеВ/нуклон. Побудова потенціалу взаємодії, що прогнозував би відомі характерні особливості еволюції зі зміною енергії і працював би в широкому діапазоні енергій, дала б можливість передбачити з достатньою точністю перерізи процесів при енергіях, для яких не проводились експериментальні вимірювання. Очевидно, що побудову такого потенціалу треба проводити для кожної системи ядер індивідуально.

З'являються достатньо обґрунтовані спроби побудувати потенціали, які б описували взаємодію певних ядерних систем у широкому діапазоні енергій. Через не дуже точну передбачувальну здатність наявних феноменологічних теорій такі спроби з необхідністю мають опиратися на великий масив експериментальних даних.

© О. А. Понкратенко, А. А. Рудчик, А. Т. Рудчик, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма, 2014

Хорошим прикладом системи, для якої існує великий обсяг експериментальних даних у широкому діапазоні енергій, є системи  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  та  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ .

### Оптичний потенціал

Феноменологічний оптичний потенціал (ОП), що використовувався для опису кутових розподілів ПР для кожної окремої енергії, мав вигляд

$$U(r) = V(r) + iW(r) + V_c(r), \quad (1)$$

де дійсна частина  $V(r)$  потенціалу вибиралась у вигляді квадрата формфактора типу Вудса - Саксона ( $WS2$ )

$$V(r) = \frac{V_0}{(1 + \exp[(r - R_V) / a_V])^2} \quad (2)$$

або у вигляді потенціалу подвійної згортки (фолдінг-потенціал  $DF$ ) з нормуючим множником  $N_R$ :

$$V(r) = N_R V_{DF}(r, E). \quad (3)$$

Фолдінг-потенціал  $V_{DF}(r, E)$ , що складається з прямої та обмінної частин, описано в роботах [1 - 3]. Форма розподілів густин описувалась формфактором Вудса - Саксона з двома параметрами: радіусом 2,6 фм для  $^{16}\text{O}$  та 2,115 фм для  $^{12}\text{C}$  і поверхневою дифузністю, що становила 0,45 фм для обох ядер [4]. Також ми використо-

ували залежний від густини ефективний потенціал нуклон-нуклонної взаємодії  $DDM3Y1$  Рейда, в який входить нуклон-нуклонний потенціал з прямою та обмінною компонентами [2]. Розрахунки фолдінг-потенціалу здійснювались за допомогою програми DFMSPH [5]. Варто відзначити, що фолдінг-потенціал є різним для різних значень енергії через енергетичну залежність нуклон-нуклонної взаємодії  $DDM3Y1$ .

Для обох варіантів дійсної частини уявна частина ОМ-потенціалу вибиралась у вигляді суми об'ємної ( $WS$ ) та поверхневої ( $WSD$ ) компонент:

$$W(r) = W_S(r) + W_D(r), \quad (4)$$

$$W_S(r) = \frac{W_S}{1 + \exp[(r - R_{WS}) / a_{WS}]}, \quad (5)$$

$$W_D(r) = \frac{4W_D \exp[(r - R_{WD}) / a_{WD}]}{(1 + \exp[(r - R_{WD}) / a_{WD}])^2}, \quad (6)$$

де, так само як і в рівнянні (2), радіус взаємодії  $R_i = r_i(A_p^{1/3} + A_t^{1/3})$ ,  $i = \{V, WS, WD\}$ .

Глобальний енергетично залежний потенціал шукався з таким же типом радіальної залежності, як і потенціали для кожної енергії окремо.

Енергетична залежність параметрів уявної частини ОМ-потенціалу  $p_i = N_R, V_0, R_V, a_V, W_S, R_{WS}, a_{WS}, W_D, R_{WD}, a_{WD}$  апроксимувалась такими параметризованими функціями [6, 7]:

$$p_i(E) = \begin{cases} p_i(+\infty)(1 - \exp[(E_{0i} - E) / \Delta_i]), & E > E_{0i} \\ 0, & E < E_{0i} \end{cases} \quad p_i = W_S, W_D$$

$$p_i(E) = p_i(+\infty) + [p_i(0) - p_i(+\infty)] \exp(-E / \Delta_i) \quad p_i = R_V, a_V, R_{WS}, a_{WS}, R_{WD}, a_{WD}, V_0, N_R \quad (7)$$

Для енергетичної залежності параметрів  $N_R, W_S, W_D$  використовувалась також кусково-лінійна параметризація

$$p_i(E) = p_i(E_j) + \frac{p_i(E_{j+1}) - p_i(E_j)}{E_{j+1} - E_j} (E - E_j), \quad E_j < E < E_{j+1}. \quad (8)$$

Параметри  $p_i(+\infty), E_{0i}, p_i(0), \Delta_i, p_i(E_j)$  визначались шляхом підгонки ОМ-перерізів до експериментальних даних у всьому енергетичному діапазоні одночасно.

Енергетична залежність дійсної частини ОМ-потенціалу визначалась головним чином дисперсійним співвідношенням [8] між енергетично залежними дійсною та уявною частинами потенціалу в усьому діапазоні енергій. Дійсна частина енергетично залежного потенціалу є сумою двох доданків:

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

де  $V_0(r, E)$  – потенціал зі слабкою залежністю від енергії, що зумовлена нелокальністю взаємодії, обміном нуклонами між ядрами та залежністю нуклон-нуклонної взаємодії від ядерної густини, а  $\Delta V(r, E)$  розраховується як

$$\Delta V(r, E) = \frac{1}{\pi} P \int \frac{W(r, E')}{E' - E} dE'. \quad (10)$$

Тут  $P$  означає головне значення інтеграла.

Для обчислення інтеграла у виразі (10) область інтегрування ділиться на  $m$  ділянок, у межах яких  $W(r, E)$  береться лінійно залежним від енергії [3, 6].

### Результати та обговорення

Було проаналізовано експериментальні дані диференціальних перерізів ПР для 76 енергій взаємодії  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  ( $E_{\text{лаб}}(^{16}\text{O}) = 18 \div 1500$  MeV) [3, 9 - 22] та для 39 енергій взаємодії  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  ( $E_{\text{лаб}}(^{12}\text{C}) = 12 \div 2400$  MeV) [23 - 34].

На рис. 1 представлено експериментальні дані ПР  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  та  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  для енергій, що вказані в підписі до рисунка, в області переданих імпульсів  $q < 4,2$  фм $^{-1}$ . Суцільні криві – розрахунки за ОМ для кожної енергії окремо при  $q < 3,1$  фм $^{-1}$  (тобто

для підгонки параметрів ОП мінімізацією величини  $\chi^2$  використовувались тільки перерізи ПР у діапазоні  $q < 3,1$  фм $^{-1}$ ), штрихові – при  $q < 4,1$  фм $^{-1}$ . Уявна частина потенціалу вибиралась у вигляді  $WS + WSD$  (5, 6). Для дійсного потенціалу застосовувалась форма  $WS2$  (2). У процедурі мінімізації  $\chi^2$ , як і в роботі [3], використовувалась однакова відносна похибка (10 %) для всіх експериментальних диференціальних перерізів ПР. Дані з ПР аналізувались у рамках ОМ за допомогою програм GENOA [35] та FRESKO [36].

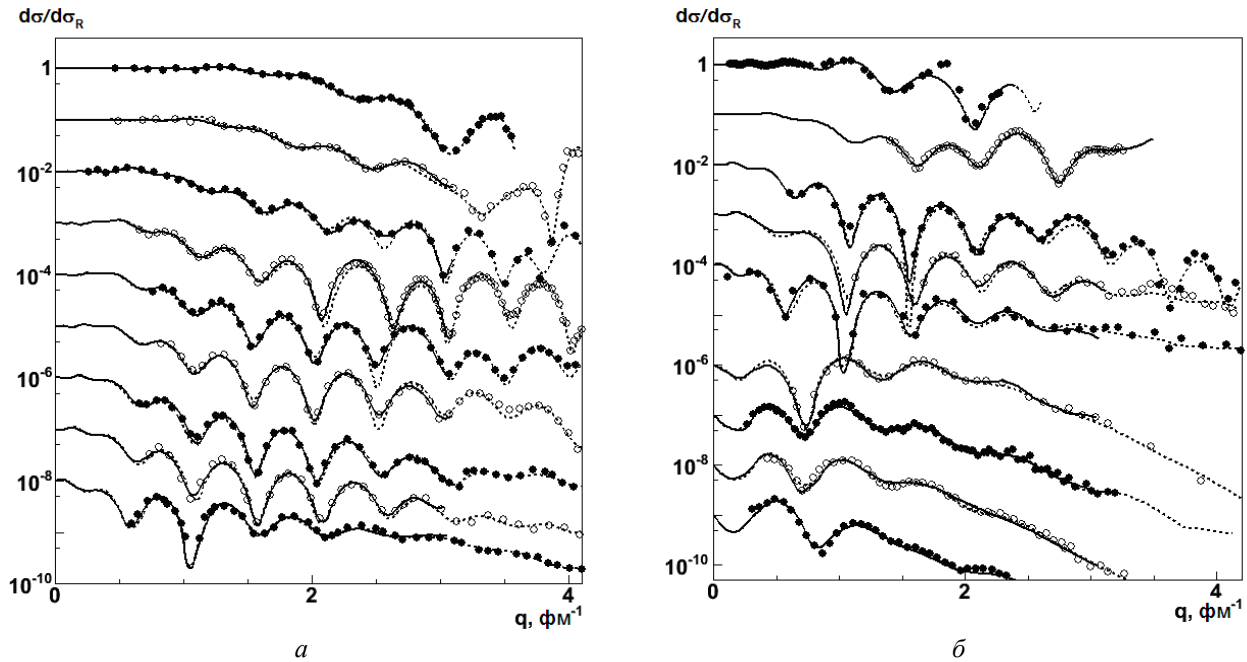


Рис. 1. Експериментальні диференціальні перерізи ПР ядер: *a* -  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  ( $E_{\text{лаб}}(^{16}\text{O}) = 25,7, 32,7, 51, 75, 100, 115,9, 170, 260, 608$  MeV); *б* -  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  ( $E_{\text{лаб}}(^{12}\text{C}) = 18,96, 37,6, 93,8, 121,6, 300, 1016, 1440, 1620, 2400$  MeV). Суцільні криві – розрахунки за ОМ для кожної енергії окремо при  $q < 3,1$  фм $^{-1}$ , штрихові – при  $q < 4,1$  фм $^{-1}$ .

На рис. 1 добре видно загальні риси поведінки перерізу, що проявляються в усій області енергій взаємодії. Положення максимумів і мінімумів зберігаються на тих самих місцях (по відношенню до переданого імпульсу) від найменших до найбільших значень енергії зіткнення. Це вказує на приблизну незмінність геометричних розмірів області, в якій відбувається дифракція. Зі збільшенням значення переданого імпульсу значення перерізу в максимумах у середньому монотонно спадає в області  $q < 4$  фм $^{-1}$ . У майже всіх кутових розподілах присутня область глибоких мінімумів (зменшення перерізу на 1 - 3 порядки порівняно із сусіднім максимумом). При малих енергіях ця область відповідає значенням  $q \sim 4$  фм $^{-1}$ , а зі збільшенням енергії ця область зміщується до менших значень переданого імпульсу. Це є чіткою ознакою сильної інтерференції між близькими за величиною ближньою і дальньою компонентами амплітуд ПР. Така поведінка є характерною для дифракції в області із сильним поглинанням.

Наявність фізично обґрунтованих модельних розрахунків для кожного кутового розподілу окремо, що в цілому добре описують експериментальні дані, дає можливість досить акуратно кількісно проаналізувати характерні особливості експериментальних диференціальних перерізів в області дифракційного розсіяння. Саме з підігнаних модельних кривих визначались такі характеристики, як положення максимумів чи мінімумів диференціального перерізу, значення перерізу в максимумах чи мінімумах, що використовуються в подальшому аналізі.

Для більш чіткого підтвердження дифракційного характеру взаємодії, що проявляється візуально, був проведений детальний кількісний аналіз поведінки експериментальних даних. Такий аналіз є також корисним для оцінки адекватності теоретичного опису.

В області енергій, вищій за 40 - 50 MeV, положення перших дифракційних максимумів/мінімумів можна вважати в першому набли-

женні сталими. При зниженні енергії зсув усієї дифракційної картини до більших значень переданого імпульсу пояснюється ефективним змен-

шенням прицільного параметра зіткнення під впливом кулонівської взаємодії.

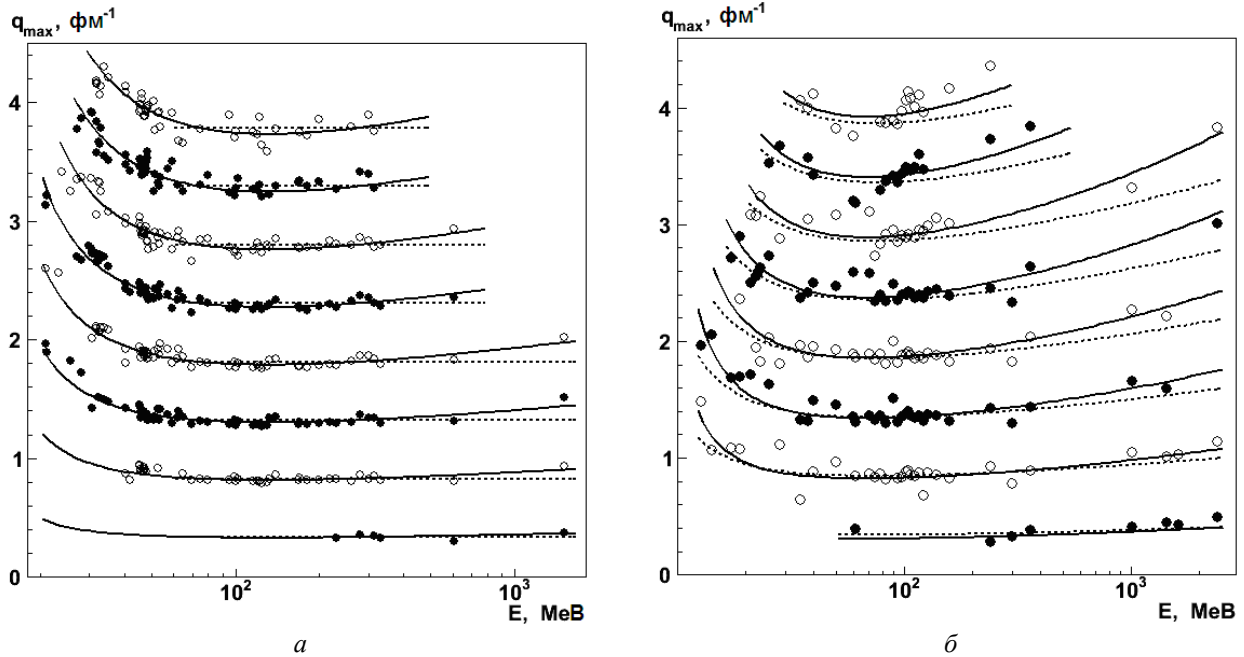


Рис. 2.  $q$ -координати максимумів диференціальних перерізів ПР  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  (а) та  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  (б) залежно від енергії налітаючого іона в лабораторній системі. Суцільні та штрихові лінії – апроксимації (детальніше див. у тексті).

На рис. 2 показано положення по  $q$  максимумів і мінімумів у перерізі ПР у всій області досліджуваних енергій. Точки відповідають положенням максимумів, знайденим для кожного розподілу окремо. Видно, що в усьому діапазоні енергій, що розглядається, спостерігається еквідистантність по  $q$  положень максимумів і мінімумів. На рис. 2, а (для  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ ) штриховими прямими лініями показано такі еквідистантні положення максимумів і мінімумів за формулою

$$q_{\max(\min)} = \pi(i + \alpha) / R_d, \quad (11)$$

де  $i = 0 - 7$  - номер максимуму (мінімуму);  $R_d$  - дифракційний радіус взаємодії;  $\alpha$  - параметр, відстань (в одиницях  $\pi/R_d$ ) до першого максимуму (мінімуму), ( $i = 0$ ). Підгонка положень максимумів функцією (11) для  $E_{\text{лаб}} > 60$  MeV дає такі значення параметрів:  $R_d = 6,37(3)$  фм,  $\alpha = 0,68(1)$ . Підгонка ж положень мінімумів дає  $R_d = 6,54(3)$  фм,  $\alpha = 1,33(1)$ . У дифракційній моделі

$$\frac{d\sigma}{d\sigma_R} \sim (J_1(qR_d) \cdot qR_d)^2, \quad (12)$$

де  $J_1$  - циліндрична функція Бесселя. Дифракційна модель (12) дає еквідистантні положення максимумів і мінімумів (за умови незалежності  $R_d$  від  $q$ ) та значення параметра  $\alpha = 0,766$  для максимумів і  $\alpha = 1,22$  для мінімумів.

Оскільки положення максимумів і мінімумів перерізів зсувається в бік більших переданих імпульсів при високих енергіях  $E_{\text{лаб}} > 30$  MeV/нуклон та низьких енергіях  $E_{\text{лаб}} < 3$  MeV/нуклон, то для їхнього опису було запропоновано апроксимацію

$$q_{\max(\min)} = \frac{\pi(i + \alpha)}{R_d(E) \sqrt{1 - \frac{V_b}{E}}},$$

$$R_d(E) = \left( R_d(100 \text{ MeV}) + \beta \ln \left( \frac{E}{100 \text{ MeV}} \right) \right). \quad (13)$$

Підгонка положень максимумів (мінімумів) функцією (13) на всьому інтервалі енергій дає значення параметрів, які наведено в таблиці.

На рис. 2, б (для  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ ) штриховими лініями показано таку ж залежність, як і на рис. 2, а (суцільні лінії), але при енергіях, що відповідають тій самій відносній швидкості руху ядер

$$E = \frac{12}{16} E(^{16}\text{O}), \text{ та параметрах}$$

$$R_d = \frac{12^{1/3} + 12^{1/3}}{12^{1/3} + 16^{1/3}} R_d(^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}) \text{ та}$$

$$V_b = \frac{Z_{^{12}\text{C}}}{Z_{^{16}\text{O}}} V_b(^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}).$$

**Значення параметрів функції, якою апроксимуються положення максимумів та мінімумів диференціальних перерізів**

		$R_d(100 \text{ MeV}), \text{ фм}$	$\alpha$	$\beta, \text{ фм}$	$V_b, \text{ MeV}$
$^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$	max	6,94	0,68	-0,39	13,6
	min	7,13	1,38	-0,39	13,6
$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$	max	6,36	0,60	-0,53	9,5
	min	6,34	1,14	-0,44	9,5

Енергетична залежність параметрів уявної частини ОМ-потенціалу  $p_i = V_0, R_V, a_V, W_S, R_{WS}, a_{WS}, W_D, R_{WD}, a_{WD}$  параметризувалась функціями (7). Для параметрів  $W_S, W_D$  та  $N_R$  (нормуючий множник потенціалу подвійної згортки) використовувалась також кусково-лінійна параметризація (8). Розрахунки з підгонкою параметрів енергетично

залежного потенціалу проводились у повному діапазоні енергій (1 - 100 МеВ/нулон для  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  та 1 - 200 МеВ/нулон для  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ ) і в діапазоні переданого імпульсу  $q < 4,1 \text{ fm}^{-1}$ , як з урахуванням дисперсійного співвідношення (10) між енергетично залежними дійсною та уявною частинами потенціалу, так і без нього.

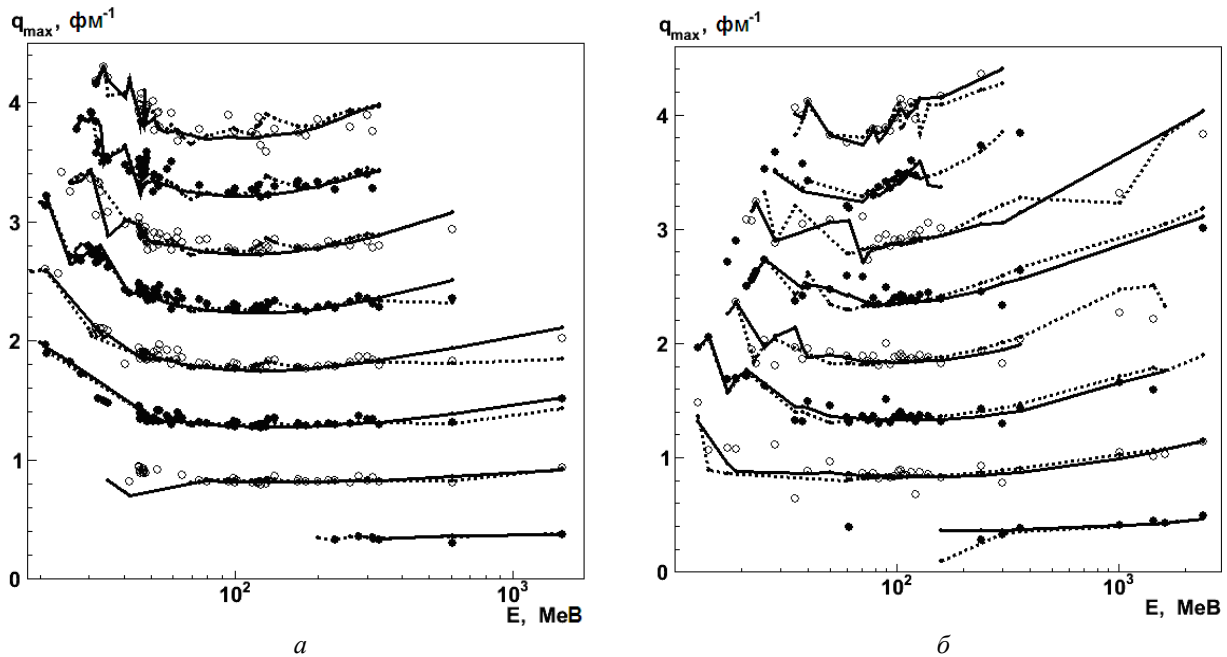


Рис. 3.  $q$ -координати максимумів диференціальних перерізів ПР  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  (а) та  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  (б) залежно від енергії налітаючого іона в лабораторній системі. Суцільні та штрихові лінії – апроксимації (детальніше див. у тексті).

На рис. 3 і 4 показано положення максимумів та значення в максимумах диференціальних перерізів ПР  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  і  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  залежно від енергії налітаючого іона в лабораторній системі. На рис. 4 порядок максимумів зверху донизу відповідає зростанню переданого імпульсу  $q$  (на рис. 3 навпаки). Кожний розподіл на рис. 4 помножено на коефіцієнт  $10^{-n+1}$ , де  $n$  – порядковий номер розподілу, починаючи згори. Останній розподіл помножено на  $10^{-n}$ . Суцільною лінією на рис. 3, а і 4, а показано розраховані за ОМ положення максимумів та значення перерізів у максимумах з потенціалом  $WS2 + i (WS + WD)$  (2, 5, 6), в якому залежність від енергії параметрів ОП задається формулою (7) з 27 параметрами  $p_i(+\infty), E_{0i}, p_i(0), \Delta_i$ , де  $p_i = V_0, R_V, a_V, W_S, R_{WS}, a_{WS}, W_D, R_{WD}, a_{WD}$ ; штриховою лінією на цих рисунках - з потенціалом  $DF + i WS$  (3, 5), в якому залежність від енергії параметрів глибини  $N_R, W_S$  задається кус-

ково-лінійною параметризацією (8) з 40 параметрами  $p_i(E_j)$  ( $m = 20$ ) та параметрів форми  $R_{WS}, a_{WS}$  задається формулою (7) з 6 параметрами  $p_i(+\infty), p_i(0), \Delta_i$ , де  $p_i = R_{WS}, a_{WS}$ . Суцільною лінією на рис. 3, б і 4, б ( $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ ) – з потенціалом  $WS2 + i WS$  (2, 5), в якому залежність від енергії параметрів ОП задається формулою (7) з 18 параметрами  $p_i(+\infty), E_{0i}, p_i(0), \Delta_i$ , де  $p_i = V_0, R_V, a_V, W_S, R_{WS}, a_{WS}$ ; штриховою лінією на цих рисунках – з потенціалом  $DF + i (WS + WD)$  (3, 5, 6) з 19 параметрами, параметр  $N_R$  не залежить від енергії. Спостерігається задовільний опис експериментальних даних за всіма характеристиками, що розглядаються, в області перших чотирьох максимумів. Певні розбіжності починають з'являтися в області 5 - 8 максимумів ( $q > 2 - 3 \text{ fm}^{-1}$ ) при не дуже високих значеннях енергії взаємодії  $E < 100 \text{ MeV}$ .

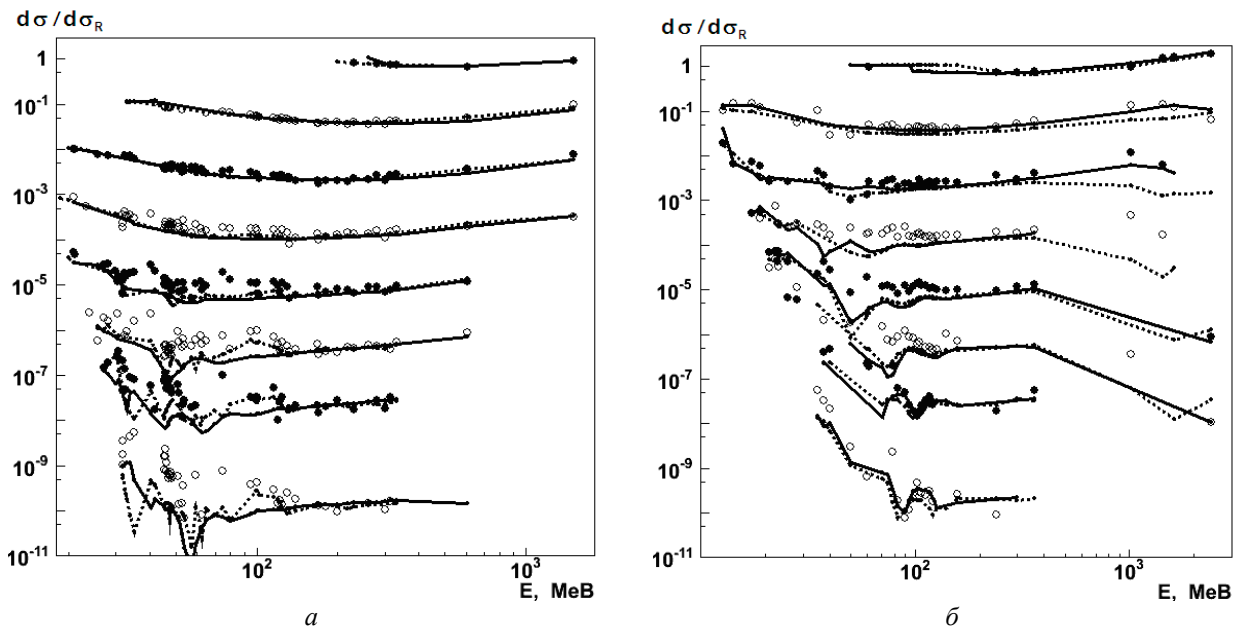


Рис. 4. Значення у максимумах диференціальних перерізів ПР  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  (а) та  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  (б) залежно від енергії налітаючого іона в лабораторній системі. Суцільні та штрихові лінії – розраховані за ОМ з різними енергетично залежними потенціалами.

### Основні результати та висновки

Виконано систематичний аналіз кутових розподілів ПР при 76 енергіях взаємодії ядер  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  ( $E_{\text{лаб}}(^{16}\text{O}) = 18 \div 1500$  MeV) та при 39 енергіях взаємодії ядер  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  ( $E_{\text{лаб}}(^{12}\text{C}) = 12 \div 2400$  MeV). Отримано набори параметрів ОП при кожній енергії окремо для опису ПР цих систем.

Уперше знайдено, що положення (у шкалі переданого імпульсу  $q$ ) перших восьми дифракційних максимумів та мінімумів у перерізах ПР ядер  $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$  та  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  слабо залежать від енергії налітаючого іона в широкому інтервалі енергій 1 - 200 MeV/нуклон. Ця енергетична залежність була описана відповідними параметризованими функціями. Показано еквідистантність по  $q$  положень максимумів і мінімумів.

Виявлено, що зміна положень максимумів з енергією є плавною та подібною для обох систем при перетворенні енергії та відповідних параметрів до умови рівності швидкості відносного руху взаємодіючих ядер, їхніх розмірів та кулонівських бар'єрів.

Уперше отримано енергетичні залежності потенціалів взаємодії ядер  $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$  та  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  з урахуванням дисперсійних співвідношень між дійсною та уявною частинами ОП для широкого діапазону енергій налітаючого іона (1 - 200 MeV/нуклон) та переданого імпульсу.

У той час, як було знайдено енергетично залежний потенціал, що задовільно описує значення максимумів для системи  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  в усій досліджуваній області енергій та переданого імпульсу, для системи  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  задовільний опис досягнуто лише у перших чотирьох максимумах в усьому діапазоні енергій, а в 5 - 8 максимумах – тільки при  $E > 100$  MeV.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Khoa Dao T., Satchler G.R.* Generalized folding model for elastic and inelastic nucleus-nucleus scattering using realistic density dependent nucleon-nucleon interaction // *Nucl. Phys. A.* - 2000. - Vol. 668. - P. 3 - 41.
2. *Gontchar I.I., Hinde D.J.* Double folding nucleus-nucleus potential applied to heavy-ion fusion reactions // *Phys. Rev. C.* - 2004. - Vol. 69. - P. 024610.
3. *Понкратенко О.А., Улещенко В.В., Ширма Ю.О.* Енергетична залежність розсіяння ядер  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  // *Ядерна фізика та енергетика.* - 2013. - Т. 14, № 3. - С. 239 - 246.
4. *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.
5. *Gontchar I.I., Chushnyakova M.V.* A C-code for the double folding interaction potential of two spherical nuclei // *Comput. Phys. Commun.* - 2010. - Vol. 181. - P. 168 - 182.
6. *Satchler G.R.* Heavy-ion scattering and reactions near the Coulomb barrier and "threshold anomalies" // *Phys. Rep.* - 1991. - Vol. 199, № 3. - P. 147 - 190.
7. *Carstoiu F., Trache L., Tribble R.E et al.* Refractive effects in the scattering of loosely bound nuclei // *Phys. Rev. C.* - 2004. - Vol. 70. - P. 054610.
8. *Mahaux C., Hgo H., Satchler G.R.* Causality and the threshold anomaly of the nucleus-nucleus potential // *Nucl. Phys. A.* - 1985. - Vol. 449. - P. 354 - 395.

9. *Hamada Sh., Burtebayev N., Gridnev K.A. et al.* Analysis of alpha-cluster transfer in  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  and  $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$  at energies near Coulomb barrier // Nucl. Phys. A. - 2011. - Vol. 859. - P. 29 - 38.
10. *Gutbrod H.H., Bock R., Von Oertzen W. et al.* Elastic and inelastic scattering of  $^{16}\text{O}$  by  $^{12}\text{C}$  at forward and backward angles // Z. Phys. - 1973. - Vol. 262. - P. 377 - 392.
11. *Krubasik E., Voit H., Blatt E. et al.* Elastische streuung von  $^{16}\text{O}$  an  $^9\text{Be}$ ,  $^{10}\text{B}$ , und  $^{12}\text{C}$  // Z. Phys. - 1969. - Vol. 219. - P. 185 - 200.
12. *Malmin R.E., Harris J.W., Paul P.* Intermediate structure resonances in the inelastic scattering of  $^{12}\text{C}$  on  $^{16}\text{O}$  // Phys. Rev. C. - 1978. - Vol. 18. - P. 163. - 179.
13. *Frawley A.D., Roy A., Fletcher N.R.* Transparency to the I = 9 Partial Wave in the Region of the 14.7-MeV Resonance I // Phys. Rev. Lett. - 1980. - Vol. 44. - P. 1377 - 1380.
14. *Malmin R.E., Siemssen R.H.* Resonance in  $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$  scattering at  $E_{\text{c.m.}} = 19.7$  MeV\* // Phys. Rev. Lett. - 1972. - Vol. 24. - P. 1590 - 1593.
15. *Wilschut H.W., Braun-Munzinger P., Berkowitz G.M. et al.* The 19.7 MeV resonance in the system  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  // Phys. Lett. - 1982. - Vol. 113B. - P. 141 - 145.
16. *Villari A.C.C., Lepine-Szily A., Lichtenhaler Filho R. et al.* Total reaction cross section and forward glory for  $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$  // Nucl. Phys. A. - 1989. - Vol. 501. - P. 605 - 620.
17. *Cole A.J., Longequeue N., Cavaignac J.F.*  $^{16}\text{O} - ^{12}\text{C}$  scattering: description of the gross structure features using an optical model // Le Journal de Phys. - 1977. - Vol. 38. - P. 1043 - 1049.
18. *Bohlen H.G., Ossenbrink H., Von Oertzen W. et al.* Measurement of spin-alignment of excited  $^{12}\text{C}_{2+}$  nuclei in interactions of  $^{16}\text{O}$  with  $^{12}\text{C}$  using  $\gamma$ -decay in flight // Z. Phys. A - 1978. - Vol. 285. - P. 379 - 388.
19. *Motobayashi T., Kohno I., Ooi T. et al.*  $\alpha$ -transfer reactions between light nuclei // Nucl. Phys. A. - 1979. - Vol. 331. - P. 193 - 212.
20. *Hiebert J.C., Garvey G.T.* Elastic and inelastic scattering at 168 MeV in the  $^{16}\text{O} - ^{12}\text{C}$  system // Phys. Rev. - 1964. - Vol. 135. - P. B346 - B357.
21. *Brandan M.E., Menchaca-Rocha A., Trache L. et al.* Refractive elastic scattering of  $^{16}\text{O}$  by  $^{12}\text{C}$  at 300 MeV // Nucl. Phys. A. - 2001. - Vol. 688. - P. 659 - 668.
22. *Демьянова А.С., Глухов Ю.А., Гончаров С.А. и др.* Изучение упругого рассеяния  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  при энергии ядер  $^{16}\text{O}$  330 МэВ // Программа и тез. докл. 54 Междунар. сов. по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Белгород, Россия, 2004. - С. 187.
23. *Ostrowski A.N., Tiereth W., Voit H.* Forward nuclear glory in  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  scattering // Phys. Rev. C. - 1991. - Vol. 44. - P. 2082.
24. *Emling H., Nowotny R., Pelte D. et al.* Elastic and inelastic scattering of identical heavy ions // Nucl. Phys. A. - 1975. - Vol. 239. - P. 172 - 188.
25. *Wieland R., Gobbi A., Chua L. et al.* Inelastic Scattering of  $^{12}\text{C}$  on  $^{12}\text{C}$  // Phys. Rev. C. - 1973. - Vol. 8. - P. 37.
26. *Stokstad R.G., Wieland R.M., Satchler G.R. et al.* Elastic and inelastic scattering of  $^{12}\text{C}$  by  $^{12}\text{C}$  from  $E_{\text{c.m.}} = 35 - 63$  MeV // Phys. Rev. C. - 1979. - Vol. 20. - P. 655.
27. *Kubono S., Sugitani M., Tanaka M.H. et al.*  $3\alpha$ -breakup induced dynamical polarization potential of  $^{12}\text{C}$  at  $E/A \geq 10$  MeV // Phys. Lett. B. - 1985. - Vol. 163. - P. 75 - 78.
28. *Kubono S., Tanaka M.H., Sugitani M. et al.* Elastic and inelastic scattering of  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  at  $E/A \geq 10$  MeV and the deformation parameters // Phys. Rev. C. - 1985. - Vol. 31. - P. 2082.
29. *Bohlen H.G., Chen X.S., Cramer J.G. et al.* Refractive Scattering and the Nuclear Rainbow in the Interaction of  $^{12,13}\text{C}$  with  $^{12}\text{C}$  at 20 MeV/N // Z. Phys. A. - 1985. - Vol. 322. - P. 241 - 261.
30. *Bohlen H.G., Clover M.R., Ingold G. et al.* Observation of the Nuclear Rainbow Scattering for  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  at  $E_{\text{Lab}} = 300$  MeV // Z. Phys. A. - 1982. - Vol. 308. - P. 121 - 131.
31. *Buenerd M., Lounis A., Chauvin J. et al.* Elastic and inelastic scattering of carbon ions at intermediate energies // Nucl. Phys. A. - 1984. - Vol. 424. - P. 313 - 334.
32. *Buenerd M., Pinston J., Cole J. et al.* Elastic and inelastic scattering of 1.03 GeV  $^{12}\text{C}$  projectiles // Phys. Lett. B. - 1981. - Vol. 102. - P. 242 - 246.
33. *Hostachy J.Y., Buenerd M., Chauvin J. et al.* Elastic scattering of  $^{12}\text{C}$  on  $^{12}\text{C}$  at  $E/A = 120$  MeV/u and 200 MeV/u // Phys. Lett. B. - 1987. - Vol. 184. - P. 139 - 143.
34. *Ichihara T., Niizeki T., Okamura H. et al.* Spin-isospin resonances observed in the ( $d, ^2\text{He}$ ) and ( $^{12}\text{C}, ^{12}\text{N}$ ) reactions at  $E/A = 135$  MeV // Nucl. Phys. A. - 1994. - Vol. 569. - P. 287c - 296c.
35. *Nilsson B.S.* SPI-GENOA: an Optical Model Search Code. - 1976. - (Report / The Niels Bohr Institute).
36. *Thompson I.J.* Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comp. Phys. Rep. - 1988. - Vol. 7. - P. 167 - 212.

О. А. Понкратенко, А. А. Рудчик, А. Т. Рудчик, Ю. Н. Степаненко, В. В. Улешенко, Ю. О. Ширма

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

### ГЛОБАЛЬНЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ДИФРАКЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ И $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ

Выполнено детальное исследование поведения имеющихся экспериментальных данных по дифференциальным сечениям упругого рассеяния в системах  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  и  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  для диапазона энергий от 1 до 200 МэВ на нуклон. Найдено, что в диапазоне переданных импульсов от 0 до 3-4 фм<sup>-1</sup> дифференциальные сечения демонстрируют ярко выраженный дифракционный характер рассеяния для всех энергий исследованного диапазона. Проанализирована эволюция положений первых восьми дифракционных максимумов и минимумов и величины сечений

в максимумах при изменении энергии взаимодействия. Выполнен анализ экспериментальных данных в рамках оптической модели. Построен зависящий от энергии оптический потенциал взаимодействия для рассмотренных систем в полном диапазоне энергий. Полученный потенциал удовлетворительно описывает все имеющиеся экспериментальные данные, четко отражает характерные черты сечений дифракционного рассеяния.

*Ключевые слова:* рассеяние тяжелых ионов, оптические потенциалы, энергетическая зависимость параметров потенциала, оптическая модель, фолдинг-модель, дифракционное рассеяние.

**O. A. Ponkratenko, A. A. Rudchik, A. T. Rudchik, Yu. M. Stepanenko, V. V. Uleschenko, Yu. O. Shyrma**

*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

### GLOBAL POTENTIAL OF INTERACTION FOR $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ - AND $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ -DIFFRACTIVE SCATTERING IN THE WIDE ENERGY RANGE

Detailed study of the behavior of experimental differential cross sections for the  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ -,  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ -elastic scattering in the energy range from 1 to 200 MeV/nucleon have been carried out. It is found that differential cross sections in the range of transfer momentum from 0 to 3-4 fm<sup>-1</sup> shows the diffraction character for scattering in the overall energy range. The behavior features of the allocations of the first eight diffraction maxima and minima as well values of cross-sections in the maxima at the change of the interaction energy have been analyzed. It has been received energy-dependent optical potentials of the interaction for examines systems at the full range of energies. The obtained potentials describe the available experimental data satisfactorily and reproduce typical features of diffractive scattering cross sections.

*Keywords:* heavy ions scattering, optical potentials, energy dependence of the potential parameters, optical model, folding model, diffractive scattering.

#### REFERENCES

1. *Khoa Dao T., Satchler G.R.* Generalized folding model for elastic and inelastic nucleus-nucleus scattering using realistic density dependent nucleon-nucleon interaction // Nucl. Phys. A. - 2000. - Vol. 668. - P. 3 - 41.
2. *Gontchar I.I., Hinde D.J.* Double folding nucleus-nucleus potential applied to heavy-ion fusion reactions // Phys. Rev. C. - 2004. - Vol. 69. - P. 024610.
3. *Ponkratenko O.A., Uleschenko V.V., Shyrma Yu.O.* // Nucl. Phys. At. Energy. - 2013. - Vol. 14, No. 3. - P. 239 - 246. (Ukr)
4. *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.
5. *Gontchar I.I., Chushnyakova M.V.* A C-code for the double folding interaction potential of two spherical nuclei // Comput. Phys. Commun. - 2010. - Vol. 181. - P. 168 - 182.
6. *Satchler G.R.* Heavy-ion scattering and reactions near the Coulomb barrier and "threshold anomalies" // Phys. Rep. - 1991. - Vol. 199, № 3. - P. 147 - 190.
7. *Carstou F., Trache L., Tribble R.E. et al.* Refractive effects in the scattering of loosely bound nuclei // Phys. Rev. C. - 2004. - Vol. 70. - P. 054610.
8. *Mahaux C., Hgo H., Satchler G.R.* Causality and the threshold anomaly of the nucleus-nucleus potential // Nucl. Phys. A. - 1985. - Vol. 449. - P. 354 - 395.
9. *Hamada Sh., Burtebayev N., Gridnev K.A. et al.* Analysis of alpha-cluster transfer in  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  and  $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$  at energies near Coulomb barrier // Nucl. Phys. A. - 2011. - Vol. 859. - P. 29 - 38.
10. *Gutbrod H.H., Bock R., Von Oertzen W. et al.* Elastic and inelastic scattering of  $^{16}\text{O}$  by  $^{12}\text{C}$  at forward and backward angles // Z. Phys. - 1973. - Vol. 262. - P. 377 - 392.
11. *Krubasik E., Voit H., Blatt E. et al.* Elastische Streuung von  $^{16}\text{O}$  an  $^9\text{Be}$ ,  $^{10}\text{B}$ , und  $^{12}\text{C}$  // Z. Phys. - 1969. - Vol. 219. - P. 185 - 200.
12. *Malmin R.E., Harris J.W., Paul P.* Intermediate structure resonances in the inelastic scattering of  $^{12}\text{C}$  on  $^{16}\text{O}$  // Phys. Rev. C. - 1978. - Vol. 18. - P. 163. - 179.
13. *Frawley A.D., Roy A., Fletcher N.R.* Transparency to the I = 9 Partial Wave in the Region of the 14.7-MeV Resonance I // Phys. Rev. Lett. - 1980. - Vol. 44. - P. 1377 - 1380.
14. *Malmin R.E., Siemssen R.H.* Resonance in  $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$  scattering at  $E_{c.m.} = 19.7$  MeV\* // Phys. Rev. Lett. - 1972. - Vol. 24. - P. 1590 - 1593.
15. *Wilschut H.W., Braun-Munzinger P., Berkowitz G.M. et al.* The 19.7 MeV resonance in the system  $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  // Phys. Lett. - 1982. - Vol. 113B. - P. 141 - 145.
16. *Villari A.C.C., Lepine-Szily A., Lichtenthaler Filho R. et al.* Total reaction cross section and forward glory for  $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$  // Nucl. Phys. A. - 1989. - Vol. 501. - P. 605 - 620.
17. *Cole A.J., Longequeue N., Cavaignac J.F.*  $^{16}\text{O} - ^{12}\text{C}$  scattering: description of the gross structure features using an optical model // Le Journal de Phys. - 1977. - Vol. 38. - P. 1043 - 1049.
18. *Bohlen H.G., Ossenbrink H., Von Oertzen W. et al.* Measurement of spin-alignment of excited  $^{12}\text{C}_{2+}$  nuclei in interactions of  $^{16}\text{O}$  with  $^{12}\text{C}$  using  $\gamma$ -decay in flight // Z. Phys. A - 1978. - Vol. 285. - P. 379 - 388.
19. *Motobayashi T., Kohno I., Ooi T. et al.*  $\alpha$ -transfer reactions between light nuclei // Nucl. Phys. A. - 1979. - Vol. 331. - P. 193 - 212.
20. *Hiebert J.C., Garvey G.T.* Elastic and inelastic scattering at 168 MeV in the  $^{16}\text{O} - ^{12}\text{C}$  system // Phys. Rev. - 1964. - Vol. 135. - P. B346 - B357.
21. *Brandan M.E., Menchaca-Rocha A., Trache L. et al.* Refractive elastic scattering of  $^{16}\text{O}$  by  $^{12}\text{C}$  at 300 MeV // Nucl. Phys. A. - 2001. - Vol. 688. - P. 659 - 668.



22. Dem'yanova A.S., Glukhov Yu.A., Goncharov S.A. et al. // Program and Abstracts of 54 Int. Meeting on Nucl. Spectroscopy and Nucl. Structure. Belgorod, Russia, 2004. - P. 187. (Rus)
23. Ostrowski A.N., Tiereth W., Voit H. Forward nuclear glory in  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  scattering // Phys. Rev. C. - 1991. - Vol. 44. - P. 2082.
24. Emling H., Nowotny R., Pelte D. et al. Elastic and inelastic scattering of identical heavy ions // Nucl. Phys. A. - 1975. - Vol. 239. - P. 172 - 188.
25. Wieland R., Gobbi A., Chua L. et al. Inelastic Scattering of  $^{12}\text{C}$  on  $^{12}\text{C}$  // Phys. Rev. C. - 1973. - Vol. 8. - P. 37.
26. Stokstad R.G., Wieland R.M., Satchler G.R. et al. Elastic and inelastic scattering of  $^{12}\text{C}$  by  $^{12}\text{C}$  from  $E_{\text{c.m.}} = 35 - 63$  MeV // Phys. Rev. C. - 1979. - Vol. 20. - P. 655.
27. Kubono S., Sugitani M., Tanaka M.H. et al.  $3\alpha$ -breakup induced dynamical polarization potential of  $^{12}\text{C}$  at  $E/A \geq 10$  MeV // Phys. Lett. B. - 1985. - Vol. 163. - P. 75 - 78.
28. Kubono S., Tanaka M.H., Sugitani M. et al. Elastic and inelastic scattering of  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  at  $E/A \geq 10$  MeV and the deformation parameters // Phys. Rev. C. - 1985. - Vol. 31. - P. 2082.
29. Bohlen H.G., Chen X.S., Cramer J.G. et al. Refractive Scattering and the Nuclear Rainbow in the Interaction of  $^{12,13}\text{C}$  with  $^{12}\text{C}$  at 20 MeV/N // Z. Phys. A. - 1985. - Vol. 322. - P. 241 - 261.
30. Bohlen H.G., Clover M.R., Ingold G. et al. Observation of the Nuclear Rainbow Scattering for  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  at  $E_{\text{Lab}} = 300$  MeV // Z. Phys. A. - 1982. - Vol. 308. - P. 121 - 131.
31. Buenerd M., Lounis A., Chauvin J. et al. Elastic and inelastic scattering of carbon ions at intermediate energies // Nucl. Phys. A. - 1984. - Vol. 424. - P. 313 - 334.
32. Buenerd M., Pinston J., Cole J. et al. Elastic and inelastic scattering of 1.03 GeV  $^{12}\text{C}$  projectiles // Phys. Lett. B. - 1981. - Vol. 102. - P. 242 - 246.
33. Hostachy J.Y., Buenerd M., Chauvin J. et al. Elastic scattering of  $^{12}\text{C}$  on  $^{12}\text{C}$  at  $E/A = 120$  MeV/u and 200 MeV/u // Phys. Lett. B. - 1987. - Vol. 184. - P. 139 - 143.
34. Ichihara T., Niizeki T., Okamura H. et al. Spin-isospin resonances observed in the ( $d, ^2\text{He}$ ) and ( $^{12}\text{C}, ^{12}\text{N}$ ) reactions at  $E/A = 135$  MeV // Nucl. Phys. A. - 1994. - Vol. 569. - P. 287c - 296c.
35. Nilsson B.S. SPI-GENOA: an Optical Model Search Code. - 1976. - (Report / The Niels Bohr Institute).
36. Thompson I.J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comp. Phys. Rep. - 1988. - Vol. 7. - P. 167 - 212.

Надійшла 20.08.2014  
Received 20.08.2014