

**ПРУЖНЕ, НЕПРУЖНЕ РОЗСІЯННЯ І ОДНОНУКЛОННА ПЕРЕДАЧА ПРИ  
ВЗАЄМОДІЇ  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  ДЛЯ  $E_{\text{лаб}}(^{12}\text{C}) = 61$  МеВ ТА ЕНЕРГЕТИЧНА ЗАЛЕЖНІСТЬ  
ОПТИЧНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ**

**А.Т. Рудчик, С.Ю. Межевич, В.А. Зіман, О.А. Момотюк,  
Г.В. Мохнач, В.К. Чернієвський, А.П. Ільїн**

Отримано кутові розподіли пружного та непружного розсіяння іонів  $^{12}\text{C}$  ядрами  $^{11}\text{B}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{12}\text{C}) = 61$  МеВ для переходів в основні та низькозбуджені стани ядер  $^{12}\text{C}$  та  $^{11}\text{B}$ . Ці експериментальні дані та дані при інших енергіях проаналізовано за оптичною моделлю та моделлю зв'язаних каналів реакцій. Досліджено енергетичну залежність параметрів оптичного потенціалу для розсіяння  $^{12}\text{C} + ^{11}\text{B}$ .

В області порогових енергій ( $E_{\text{с.ц.м.}} < 30$  МеВ) спостерігається сильна енергетична залежність потенціалів ядерно-ядерної взаємодії та резонанси квазімолекулярного типу, для вивчення яких необхідна багата база експериментальних даних у широкому діапазоні енергій для пружного і непружного розсіяння та малонуклонних передач при взаємодії важких іонів з ядрами. Непружне розсіяння та малонуклонні передачі послуговує ефективним тестом оптичних потенціалів, отриманих з аналізу даних пружного розсіяння іонів ядрами. Пружне і непружне розсіяння та одонуклонна передача при взаємодії  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  вивчались у діапазоні енергій  $E_{\text{с.ц.м.}} = 7,17 - 11,48$  [1];  $7,65 - 11,48$  МеВ [2];  $9,5 - 20$  МеВ [3];  $41,61$  МеВ [4].

Дана праця присвячена вивченню квазіпружних процесів при взаємодії  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  для енергії  $E_{\text{лаб}}(^{12}\text{C}) = 61$  МеВ ( $E_{\text{с.ц.м.}} = 29,17$  МеВ). Кутові розподіли пружного і непружного розсіяння іонів  $^{12}\text{C}$  ядрами  $^{11}\text{B}$  та реакції  $^{11}\text{B}(^{12}\text{C}, ^{11}\text{B})^{12}\text{C}$  вимірювались на київському циклотроні У-240 за допомогою  $\Delta E$ - $E$ -спектрометрів з кремнійовими детекторами товщиною  $40$  мкм ( $\Delta E$ ) та  $0,5$  мм ( $E$ ). Розкид енергії пучка іонів  $^{12}\text{C}$  на мішені не перевищував  $0,6$  %. Мішенню  $^{11}\text{B}$  служила самопідтримна фольга товщиною близько  $200$  мкг/см<sup>2</sup>. В експерименті використовувалась стандартна електроніка та система аналізу і накопичення спектрометричної інформації на базі ЕОМ. В експерименті отримувались  $\Delta E \times E$  - спектри для продуктів реакцій з  $Z = 3 - 7$ . Для розділення ізотопів в елементних локусах використовувались спеціально розроблені програми. Для отримання кутових розподілів використовувались локуси двовимірних спектрів для  $Z = 6$  та  $5$  (С та В). Типовий спектр для  $^{11}\text{B}$  показано на рис. 1. Видно, що умови експерименту дозволяли отримати кутові розподіли для низькоенергетичних станів ядер  $^{12}\text{C}$  та  $^{11}\text{B}$ . Кутові розподіли пружного і непружного розсіяння та реакції  $^{11}\text{B}(^{12}\text{C}, ^{11}\text{B})^{12}\text{C}$  показано на рис. 2 - 4.

Експериментальні дані пружного розсіяння  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  аналізувались за оптичною моделлю (ОМ) з використанням оптичного потенціалу Вудса - Саксона з об'ємною уявною частиною. У розрахунках використовувався кулонівський потенціал рівномірно зарядженої кулі. Розрахунки за оптичною моделлю здійснювались за допомогою програми GENOA [5].

Для отримання енергетичної залежності параметрів оптичного потенціалу пружного розсіяння  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  за оптичною моделлю, крім наших даних, аналізувались також експериментальні кутові розподіли з праць [1 - 4]. Отримані з аналізу параметри потенціалів розсіяння  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  для різних енергій подано у табл. 1. У розрахунках використовувався оптичний потенціал Вудса - Саксона з об'ємною уявною частиною та радіусом  $R_i = r_i (A_T^{1/3} + A_P^{1/3})$ , де  $A_T, A_P$  - маси ядер мішені та іона пучка,  $i = V, W, C$ .

Одночасний аналіз експериментальних даних кутових розподілів пружного і непружного розсіяння та реакції  $^{11}\text{B}(^{12}\text{C}, ^{11}\text{B})^{12}\text{C}$  проводився за моделлю зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) з використанням програми FRESCO [6]. У МЗКР-розрахунках реакції  $^{11}\text{B}(^{12}\text{C}, ^{11}\text{B})^{12}\text{C}$  використовувались спектроскопічні амплітуди протона, обчислені в рамках



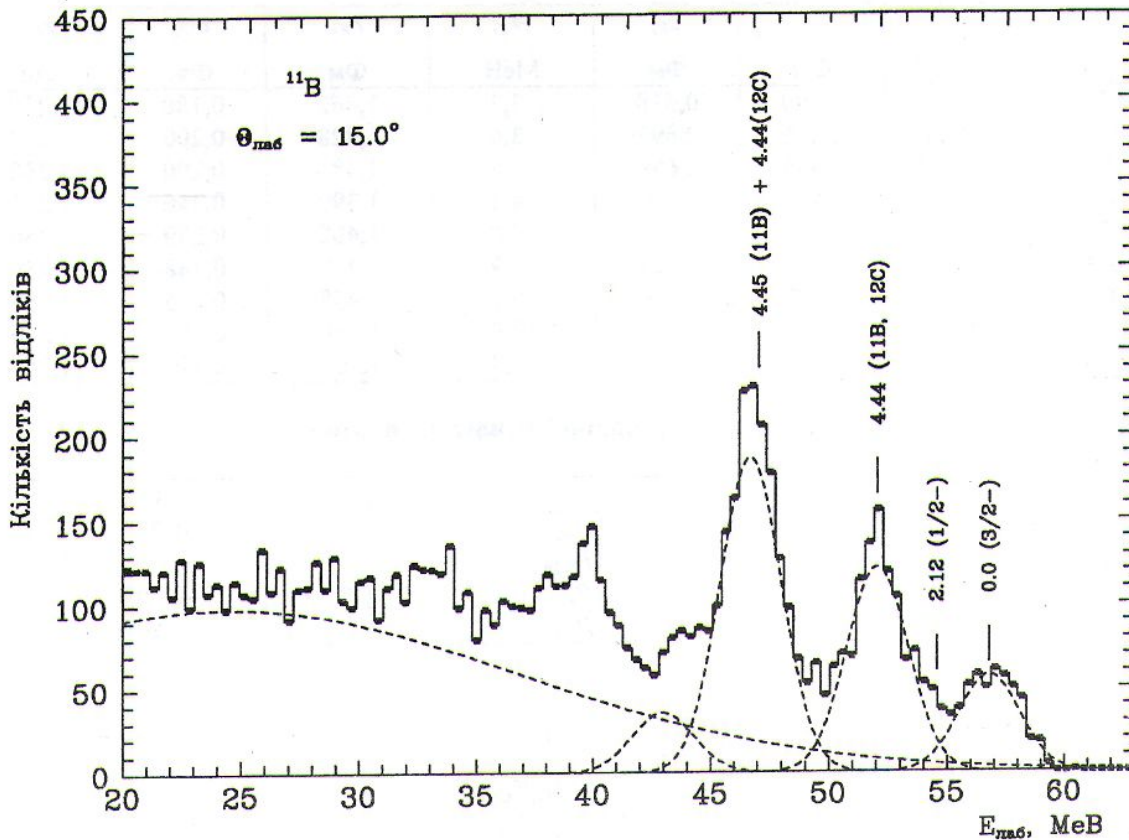


Рис. 1. Енергетичний спектр іонів  $^{11}\text{B}$  із розсіяння  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  та з реакції  $^{11}\text{B}(^{12}\text{C}, ^{11}\text{B})^{12}\text{C}$ , зареєстрований на куті  $\theta_{\text{лаб}} = 15^\circ$  при енергії пучка  $E_{\text{лаб}}(^{12}\text{C}) = 61$  MeV.

трансляційно-інваріантної моделі оболонки (ТІМО) методами праці [7] за допомогою програми DESNA [8]. Ці спектроскопічні амплітуди наведено в табл. 2.

У МЗКР-розрахунках непружного розсіяння вважалося, що низькоенергетичні рівні ядер  $^{12}\text{C}$  та  $^{11}\text{B}$  мають ротаційну природу. Задовільний опис наших експериментальних даних з непружного розсіяння отримано при значенні параметрів деформації  $\delta_2 = 1,2$  Фм ( $\beta_2 = 0,66$ ) для ядра  $^{11}\text{B}$  і  $\delta_2 = -0,9$  Фм ( $\beta_2 = -0,48$ ) для ядра  $^{12}\text{C}$ . У схему зв'язку каналів включались пружне і непружне розсіяння з переходами на низькоенергетичні рівні ядер  $^{12}\text{C}$  та  $^{11}\text{B}$ , процес реорієнтації ядра  $^{11}\text{B}$  та передача протона. Вклади цих процесів в експериментальні дані показано для пружного розсіяння на рис. 2 відповідними кривими.

З рис. 2 видно, що потенціальне розсіяння з врахуванням процесу реорієнтації ядра  $^{11}\text{B}$  (крива  $\langle e1+geor \rangle$ ) вносить малий вклад у переріз на великих кутах. Там переважну роль грає передача протона (крива  $\langle p \rangle$ ).

На рис. 3 показано кутовий розподіл сумарного перерізу непружного розсіяння іонів  $^{12}\text{C}$  ядрами  $^{11}\text{B}$  та реакції передачі протона для переходів на рівні 4,439 MeV ( $2^+$ ) ядра  $^{12}\text{C}$  і 4,445 MeV ( $5/2^-$ ) ядра  $^{11}\text{B}$ . Видно, що домінуючий вклад в експериментальні дані вносить перехід на збуджений рівень 4,439 MeV ( $2^+$ ) ядра  $^{12}\text{C}$ . Суцільною кривою позначено когерентну суму непружного розсіяння та реакції передачі протона. На великих кутах основну роль відіграє реакція передачі протона.

Кутовий розподіл непружного розсіяння для переходу на рівень 5,02 MeV ( $3/2^-$ ) ядра  $^{11}\text{B}$  показано на рис. 4. Видно, що на передніх кутах експериментальні дані повністю визначаються непружним розсіянням.

Таблиця 1. Параметри ОМ-потенціалу Вудса - Саксона для розсіяння  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$

$E_{\text{с.ц.м.}}$ MeB	$V_s$ MeB	$r_{V_s}$ ФМ	$a_{V_s}$ ФМ	$W_s$ MeB	$r_{W_s}$ ФМ	$a_{W_s}$ ФМ	$r_C$ ФМ
7,17 [1]	80,1	0,990	0,618	3,3	1,462	0,180	1,250
7,65 [2]	90,6	0,896	0,697	3,6	1,428	0,200	1,250
8,13 [1]	97,7	0,835	0,659	3,8	1,481	0,200	1,250
8,60 [2]	104,4	0,811	0,690	4,1	1,399	0,246	1,250
9,57 [1]	122,1	0,841	0,712	4,8	1,400	0,299	1,250
10,52 [1,2]	128,1	0,804	0,721	5,9	1,410	0,348	1,250
14,60 [3]	195,5	0,808	0,769	9,1	1,458	0,465	1,250
29,17	218,4	0,787	0,803	17,9	1,250	0,530	1,250
41,60 [4]	208,8	0,788	0,790	18,9	1,250	0,530	1,250

Таблиця 2. Спектроскопічні амплітуди протона  $S_p$

Система	$nlj$	$S_p$
$^{12}\text{C} = ^{11}\text{B} + p$	$1P_{3/2}$	-1,706
$^{12}\text{C} = ^{11}\text{B}^*_{5,02} + p$	$1P_{3/2}$	-1,706
$^{12}\text{C}^*_{4,44} = ^{11}\text{B} + p$	$1P_{1/2}$	-0,505
	$1P_{3/2}$	-0,505

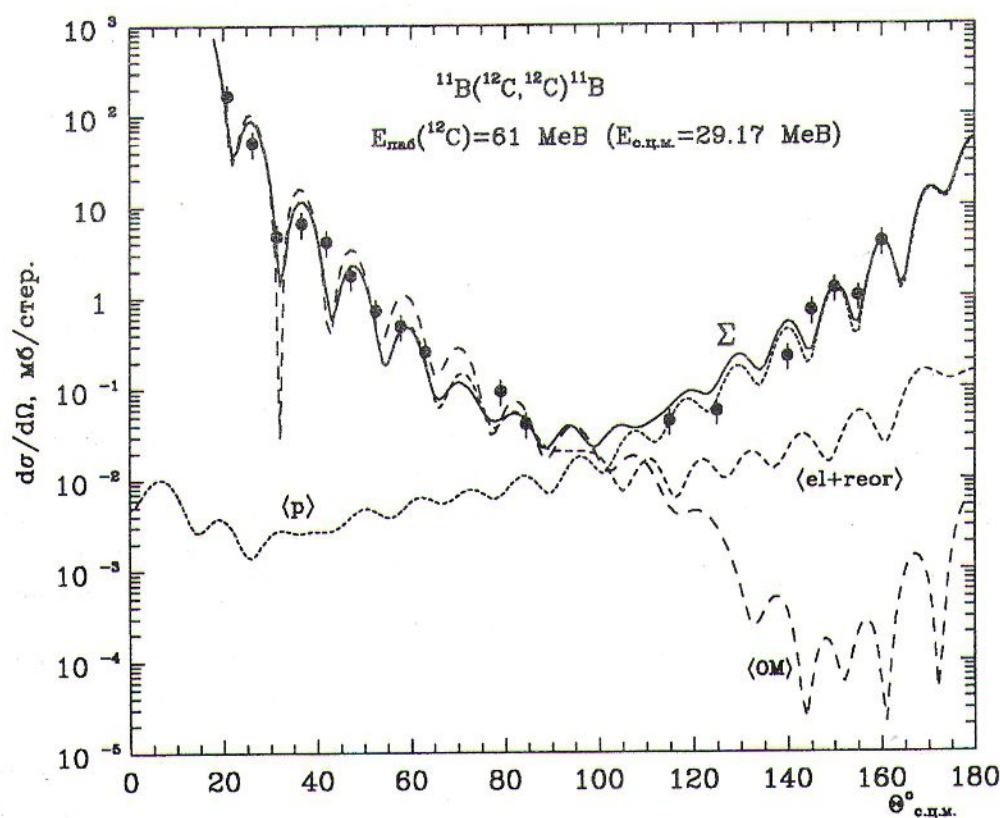


Рис. 2. Кутовий розподіл пружного розсіяння іонів  $^{12}\text{C}$  ядрами  $^{11}\text{B}$  та реакції  $^{11}\text{B}(^{12}\text{C}, ^{11}\text{B})^{12}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{12}\text{C}) = 61$  MeB. Криві позначають розрахунки за оптичною моделлю (крива  $\langle \text{OM} \rangle$ ) і моделлю зв'язаних каналів реакцій для пружного розсіяння з врахуванням реорієнтації  $^{11}\text{B}(\langle \text{el+reor} \rangle)$ .



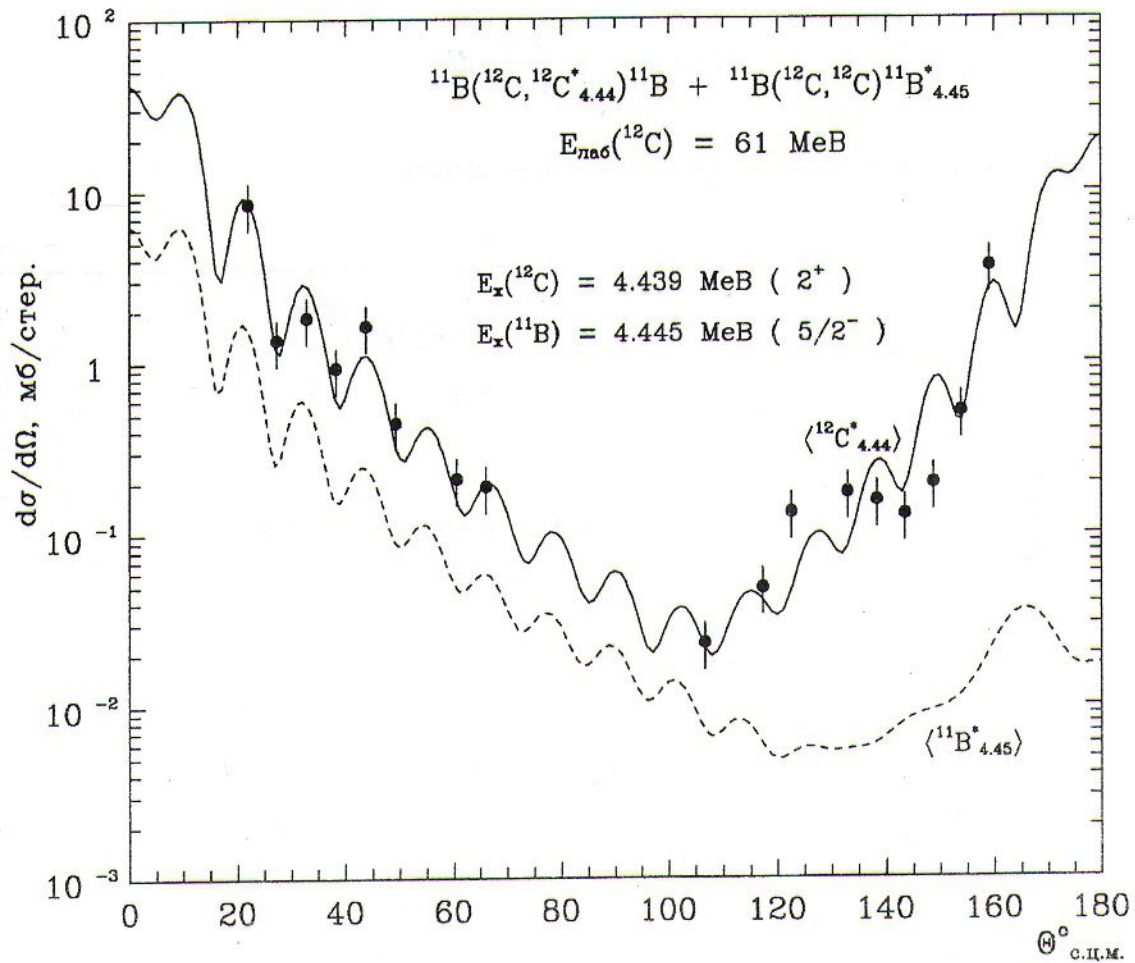


Рис. 3. Кутовий розподіл непружного розсіяння іонів  $^{12}\text{C}$  ядрами  $^{11}\text{B}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{12}\text{C}) = 61$  MeV для переходів на рівні  $4,439$  MeV ( $2^+$ ) ядра  $^{12}\text{C}$  і  $4,445$  MeV ( $5/2^-$ ) ядра  $^{11}\text{B}$  (сумарний переріз) та реакції  $^{11}\text{B}(^{12}\text{C}, ^{11}\text{B})^{12}\text{C}^*_{4,44}$ . Криві – МЗКР-розрахунки для переходів на відповідні рівні ядер  $^{11}\text{B}$  і  $^{12}\text{C}$ .

З рис. 2 – 4 видно, що ОМ-потенціал, параметри якого представлено в табл. 1, задовільно описує всю сукупність отриманих нами даних для взаємодії  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{12}\text{C}) = 61$  MeV. Описаний тут МЗКР-аналіз проводився нами також для даних при інших енергіях. У результаті були знайдені значення параметрів ОМ-потенціалів, подані в табл. 1 і показані в енергетичній залежності на рис. 5. Для опису цієї залежності використано функції з роботи [9]

$$X_i(E) = \begin{cases} X_i^{\max} - (X_i^{\max} - X_i^{\min}) \cdot g(E, E_x, \Delta E_x), & \text{де } X_i = V_0, W_S, a_V, a_W, \\ X_i^{\min} + (X_i^{\max} - X_i^{\min}) \cdot g(E, E_x, \Delta E_x), & \text{де } X_i = r_V, r_W, \end{cases} \quad (1)$$

де

$$E = E_{\text{с.ц.м.}}, \quad g(E, E_x, \Delta E_x) = \left[ 1 + \exp\left(\frac{E - E_x}{\Delta E_x}\right) \right]^{-1},$$

та дисперсійне співвідношення між дійсною та уявною частинами оптичного потенціалу [10]

$$V(E) = V_0(E) + \Delta V(E), \tag{2}$$

де

$$\Delta V(E) = \frac{P}{\pi} \int_0^\infty \frac{W_s(E')}{E'-E} dE'. \tag{3}$$

Літерою P позначено головне значення інтегралу.

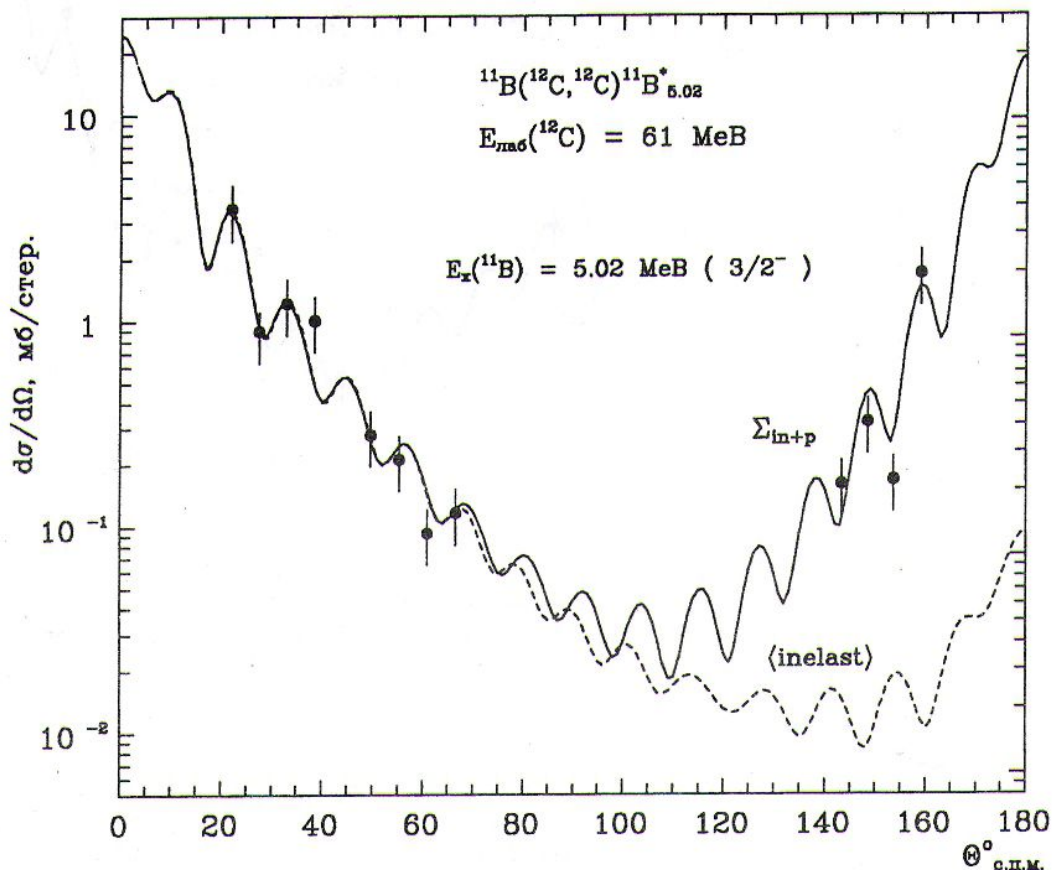


Рис. 4. Кутовий розподіл непружного розсіяння іонів  $^{12}\text{C}$  ядрами при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{12}\text{C}) = 61$  MeV для переходу на рівень  $5,02$  MeV ( $3/2^-$ ) ядра  $^{11}\text{B}$ . Криві – МЗКР-розрахунки для непружного розсіяння (крива <inelast>) та когерентної суми амплітуд непружного розсіяння й реакції передачі протона (крива  $\Sigma_{\text{in+p}}$ ).

Параметри функцій (1), що описують енергетичну залежність параметрів оптичних потенціалів розсіяння  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$ , наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Енергетична залежність параметрів  $X_i$  оптичних потенціалів розсіяння  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$

$X_i$	$V_0$ , MeV	$W_s$ , MeV	$r_{V_s}$ , ФМ	$r_{W_s}$ , ФМ	$a_{V_s}$ , ФМ	$a_{W_s}$ , ФМ
$X_i^{\text{min}}$	0,0	0,0	0,787	1,246	0,560	0,063
$X_i^{\text{max}}$	272,0	19,0	1,300	2,150	0,798	0,524
$E_{X_i}$ (MeV)	9,3	15,0	5,000	3,500	0,860	9,618
$\Delta_{X_i}$ (MeV)	4,7	5,0	2,000	3,500	0,290	2,180



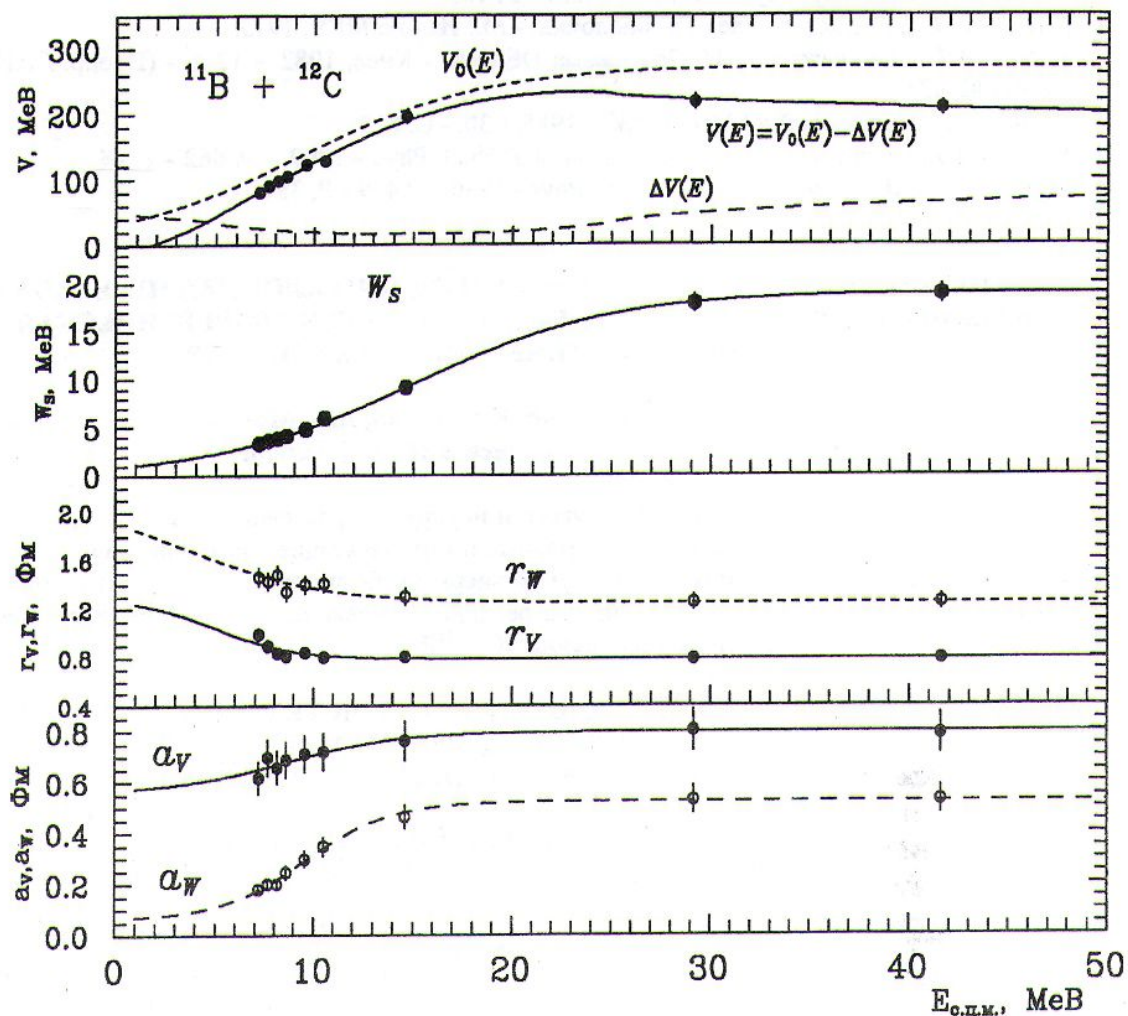


Рис. 5. Енергетична залежність параметрів оптичного потенціалу Вудса - Саксона для розсіяння  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$ .

З рис. 5 видно, що параметри радіусів і дифузностей дійсної та уявної частин ОМ-потенціалу для розсіяння  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  сильно змінюються тільки в області енергій  $E_{\text{с.ц.м.}} < 15$  МеВ. Для  $V$  і  $W_s$  ця область енергії значно більша. Завдяки дисперсійному співвідношенню глибина  $V$  потенціалу ОМ має тривалий асимптотичний спад.

На закінчення зазначимо основні результати даної праці. Поміряні кутові розподіли пружного і непружного розсіяння  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  та реакції передачі протона  $^{11}\text{B}(^{12}\text{C}, ^{11}\text{B})^{12}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{12}\text{C}) = 61$  МеВ для переходів на низькоенергетичні рівні ядер  $^{11}\text{B}$  і  $^{12}\text{C}$ . Експериментальні дані для широкого діапазону енергій проаналізовано за оптичною моделлю та методом зв'язаних каналів реакцій. Отримано енергетичну залежність параметрів ОМ-потенціалу Вудса - Саксона.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bohne W., Gelbke C.K., Braun-Munzinger P. et al. // Nucl. Phys. – 1974. – A 222 – P. 117.
2. Dück P., Treu W., Galster W. et al. // Nucl. Phys. – 1975. – A 251 - P. 344.
3. Sromicki J., Kamys B., Magiera A. et al. // Nucl. Phys. – 1983. – A 406 – P. 390.

4. Liu M., Von Oertzen W., Jacmart J. C. et al. // Nucl. Phys. – 1971. – А 165 – P.118.
5. Nilsson B.S. SPI-GENOA: an Optical Model Search Code. - 1976. - (Niels Born Institute report).
6. Thompson I.J. // Comp. Phys. – 1988. – Vol. 7 - P. 167.
7. Бояркина А.Н. Структура ядер 1р- оболочки. - М.: Изд-во МГУ, 1973.
8. Рудчик А.Т., Чувильский Ю.М. Программа DESNA. - Киев, 1982. - 12 с. - (Препр. / АН УССР; КИЯИ-82-12).  
Рудчик А.Т., Чувильский Ю.М. // УФЖ. - 1985. - 30. - С. 819
9. Rudchik A.T., Momotyuk O.A., Ziman V.A. et.al. // Nucl. Phys – 1999. – А 662 – P. 44.
10. Mahaux C., Ngô H., Satchler G.R. // Nucl. Phys - 1986. - A449 - P. 354.

**УПРУГОЕ, НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ И ОДНОНУКЛОННАЯ ПЕРЕДАЧА ПРИ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ  $^{11}\text{B}+^{12}\text{C}$  ДЛЯ  $E_{\text{ЛАБ}}(^{12}\text{C}) = 61$  МЭВ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ  
ЗАВИСИМОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ**

**А.Т. Рудчик, С.Ю. Межевич, В.А. Зиман, А.А. Момотюк,  
А.В. Мохнач, В.К. Черниевский, А.П. Ильин**

Получены угловые распределения упругого и неупругого рассеяния ионов  $^{12}\text{C}$  ядрами  $^{11}\text{B}$  при энергии  $E_{\text{лаб}}(^{12}\text{C}) = 61$  МэВ для переходов в основные и низколежащие состояния ядер  $^{11}\text{B}$  и  $^{12}\text{C}$ . Эти экспериментальные данные и данные при других энергиях были проанализированы при помощи оптической модели и модели связанных каналов реакций. Исследована энергетическая зависимость параметров оптического потенциала для рассеяния  $^{12}\text{C} + ^{11}\text{B}$ .

**ELASTIC, INELASTIC SCATTERING AND ONE-NUCLEON TRANSFER IN THE  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$   
INTERACTION AT  $E_{\text{LAB}}(^{12}\text{C}) = 61$  MEV  
AND ENERGY DEPENDENCE OF OPTICAL POTENTIALS**

**A.T. Rudchik, S.Y. Mezhevych, V.A. Ziman, O.A. Momotyuk,  
G.V. Mokhnach, V.K. Chernievsky, A.P. Ilyin**

The angular distributions for elastic and inelastic scattering of  $^{12}\text{C}$  ions on  $^{11}\text{B}$  nuclei at  $E_{\text{lab}}(^{12}\text{C}) = 61$  MeV for transitions to ground and low-excited states of  $^{12}\text{C}$  and  $^{11}\text{B}$  were obtained. These experimental data and data at other energies were analyzed with the help of optical model and model of coupled channel reactions. Energy dependence of the parameters of optical potential for  $^{12}\text{C} + ^{11}\text{B}$  scattering was studied.