

А. Т. Рудчик¹, Р. М. Зелінський¹, А. А. Рудчик¹, Вал. М. Пірнак, С. Клічевські²,
Є. І. Кошій³, К. Русек^{4,5}, В. А. Плюйко⁶, О. А. Понкратенко¹, С. Ю. Межевич¹,
А. П. Ільїн¹, В. В. Улещенко¹, Р. Сюдак⁴, Я. Хоїнські⁶, Б. Чех⁴, А. Щурек⁴

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

² Інститут ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського Польської АН, Краків, Польща

³ Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків

⁴ Національний центр ядерних досліджень, Варшава, Польща

⁵ Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

⁶ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

ПРУЖНЕ Й НЕПРУЖНЕ РОЗСІЯННЯ ІОНІВ ¹⁸O ЯДРАМИ ⁶Li ПРИ ЕНЕРГІЇ 114 МеВ ТА ІЗОТОПІЧНІ ВІДМІННОСТІ ВЗАЄМОДІЇ ЯДЕР ^{6,7}Li + ¹⁸O ТА ⁶Li + ^{16,18}O

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння ядер ⁶Li + ¹⁸O при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114$ МеВ в експерименті з одночасним вимірюванням диференціальних перерізів реакцій ⁶Li(¹⁸O, X) з виходом ядер ^{16,17,19}O + ^{8,7,5}Li, ^{14,15,16,17}N + ^{10,9,8,7}Be та ^{12,13,14}C + ^{12,11,10}B. Експериментальні дані проаналізовано за оптичною моделлю та методом зв'язаних каналів реакцій. Визначено параметри потенціалу взаємодії ядер ⁶Li + ¹⁸O, параметри деформації ядер ⁶Li й ¹⁸O та механізми розсіяння цих ядер. Досліджено ізотопічні відмінності розсіяння ядер ^{6,7}Li + ¹⁸O і ⁶Li + ^{16,18}O та параметрів потенціалів взаємодії їх.

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

Вступ

Ефективне дослідження властивостей нестабільних ядер за допомогою реакцій, в яких вони утворюються, можливе в рамках сучасної теорії реакцій лише при досконалому знанні потенціалів вхідних каналів таких реакцій. Ядро-ядерні потенціали ж, як відомо, енергетично та (A, Z)-залежні і для визначення їхніх параметрів найбільш ефективно в даний час використовуються експериментальні дані відповідних пружних і непружних розсіянь ядер. А тому дуже важливі є експерименти з одночасним вимірюванням як пружного й непружного розсіяння ядер, так і реакцій.

У даній роботі представлено результати дослідження пружного й непружного розсіяння іонів ¹⁸O ядрами ⁶Li при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114$ МеВ ($E_{\text{с.ц.м.}} = 28,5$ МеВ), експериментальні дані якого отримано в експерименті з одночасним вимірюванням реакцій ⁶Li(¹⁸O, X) з виходом ядер ^{16,17,19}O + ^{8,7,5}Li, ^{14,15,16,17}N + ^{10,9,8,7}Be та ^{12,13,14}C + ^{12,11,10}B. Результати дослідження цих реакцій за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) будуть опубліковані в наступних роботах.

До наших вимірювань були відомі лише єдині дані пружного розсіяння іонів ⁶Li ядрами ¹⁸O при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{6}\text{Li}) = 32$ МеВ [1] ($E_{\text{с.ц.м.}} = 24$ МеВ), поміряні у вузькому кутовому діапазоні та проаналізовані лише за оптичною моделлю (ОМ).

У даній роботі ці дані аналізуються як за ОМ, так і за МЗКР.

Параметри (¹⁶Li + ¹⁸O)-потенціалу порівнюються із параметрами потенціалів взаємодії ядер ⁷Li + ¹⁸O [2] та ⁶Li + ¹⁶O [3]. Виявлено ізотопічні відмінності цих потенціалів.

Методика експерименту

Диференціальні перерізи пружного й непружного розсіяння іонів ¹⁸O ядрами ⁶Li та реакцій ⁶Li(¹⁸O, X) з виходом ядер із Z = 3 - 9 вимірювались на циклотроні С-200Р Варшавського університету при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114$ МеВ. Розкид енергії пучка іонів на мішені не перевищував 0,5 %. В експерименті використовувалась самопідтримна мішень літію товщиною ~ 900 мкг/см² із ~ 85 %-ним збагаченням ізотопом ⁶Li.

Продукти реакцій реєструвались трьома ΔE -E-спектрометрами з кремнієвими ΔE -детекторами товщиною 30, 40 і 67 мкм та E-детекторами товщиною ~ 1 мм. В експерименті використовувалась електроніка стандарту САМАС та напичувально-аналізуюча система SMAN [4] на базі персонального комп'ютера, що забезпечувала візуалізацію та зберігання експериментальної інформації у вигляді двовимірних $\Delta E(E)$ -спектрів.

Типовий двовимірний $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій ⁶Li(¹⁸O, X) для спектрометра з 67 міліметровим ΔE -детектором показано на рис. 1.

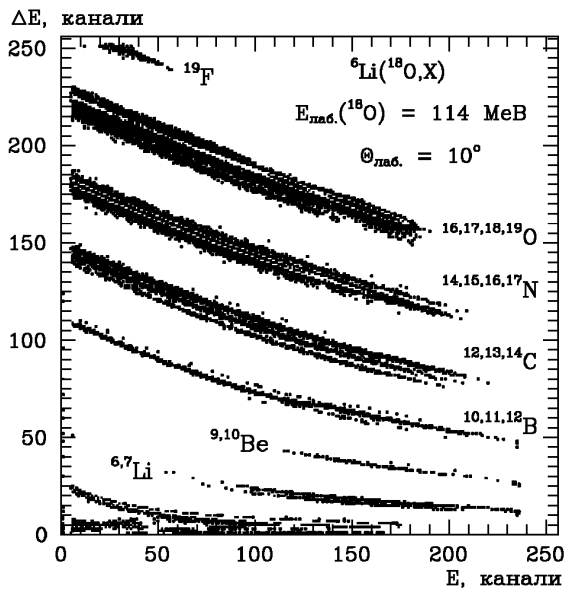


Рис. 1. Типовий $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій ${}^6\text{Li}({}^{18}\text{O}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114 \text{ MeV}$.

Видно, що експериментальна ΔE - E -методика забезпечувала ідентифікацію продуктів реакцій як за зарядами, так і за масами.

Типові енергетичні спектри ${}^{18}\text{O}$ та ${}^6\text{Li}$ показано на рис. 2 і 3 відповідно.

На рис. 2, а і 3, а представлено експериментальні спектри з неперервними фонами від багаточастинкових реакцій, які наближувались параметризованими функціями

$$N(E) = \sum_i N_i(E) = \sum_i N_{0i} \left[1 + \exp\left(-\frac{E - E_{1i} + E_{2i}/2}{H_{1i}}\right) \right]^{-1} \times$$

$$\times \left\{ 1 - \left[1 + \exp\left(-\frac{E - E_{1i} - E_{2i}/2}{H_{2i}}\right) \right]^{-1} \right\} \quad (1)$$

методом підгонки параметрів E_{1i} , E_{2i} , H_{1i} , H_{2i} до мінімальних значень зареєстрованих подій (суцільні криві на рис. 2, а і 3, а) та віднімались з експериментальних спектрів. Отримані залишкові енергетичні спектри показано на рис. 2, б і 3, б, на яких зазначено положення піків, що відповідають основним та збудженим станам ядер ${}^{18}\text{O}$ і ${}^6\text{Li}$. Піки, що відповідають рівням ядер домішок у мішені (${}^{16}\text{O}$, ${}^{12}\text{C}$), вилучені з даного спектра. Піки енергетичних спектрів наближувались симетричними гауссіанами

$$N(E) = N_{0i} \exp\left[0,5 \frac{(E - E_{0i})^2}{h_i^2}\right], \quad (2)$$

де N_{0i} , E_{0i} та h_i – максимальне число відліків, кінетична енергія розсіяного іона в i -му стані, отримана з кінематичних розрахунків двочастинкових реакцій, та півширина i -го піка відповідно. Для параметрів h_i використовувалось середнє значення ізольованих піків або природна півширина відповідного рівня ядра. Максимальні значення піків N_{0i} підганялись до експериментальних спектрів, використовуючи відому програму РЕАКФІТ.

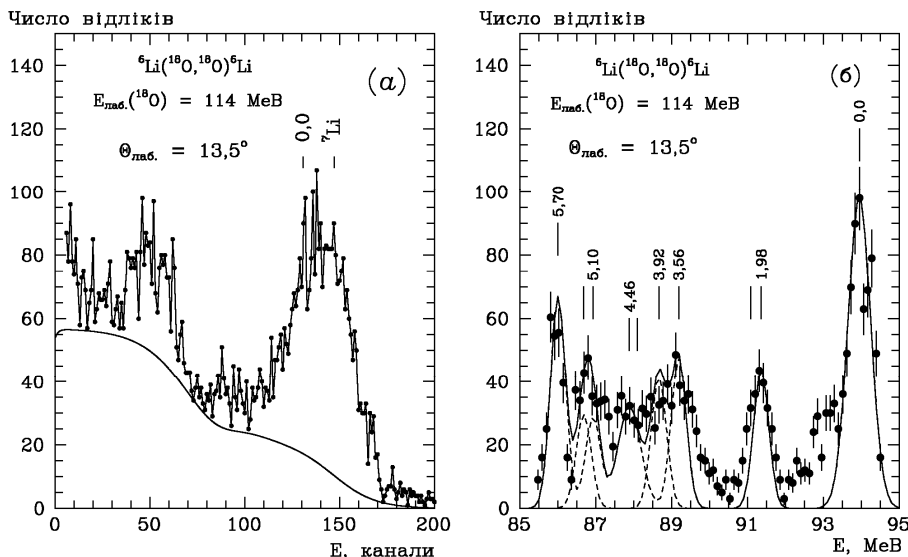


Рис. 2. Типові енергетичні спектри пружного й непружного розсіяння іонів ${}^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114 \text{ MeV}$ з а) неперервним фоном від багаточастинкових реакцій та б) без нього (залишковий спектр).

За площами гауссіанів обчислювались диференціальні перерізи розсіяння ядер ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$. Похибки в обчисленні площ частково перекритих

піків не перевищували 20 %. Для повністю перекритих піків ці похибки становили 30 - 40 %. Отримані у відносних одиницях перерізи пруж-

ного розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ нормувались до обчислених за ОМ на малих кутах ($\theta_{\text{с.ц.м.}} < 30^\circ$), де домінує кулонівське розсіяння та ОМ-перерізи слабо залежать від невизначеності параметрів оптичного потенціалу. Отриманий множник абсолютизації перерізів пружного розсіяння цих

ядер використовувався також для нормування диференціальних перерізів непружного розсіяння їх. Похибка абсолютизації диференціальних перерізів пружного та непружного розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ не перевищувала $\sim 20\%$.

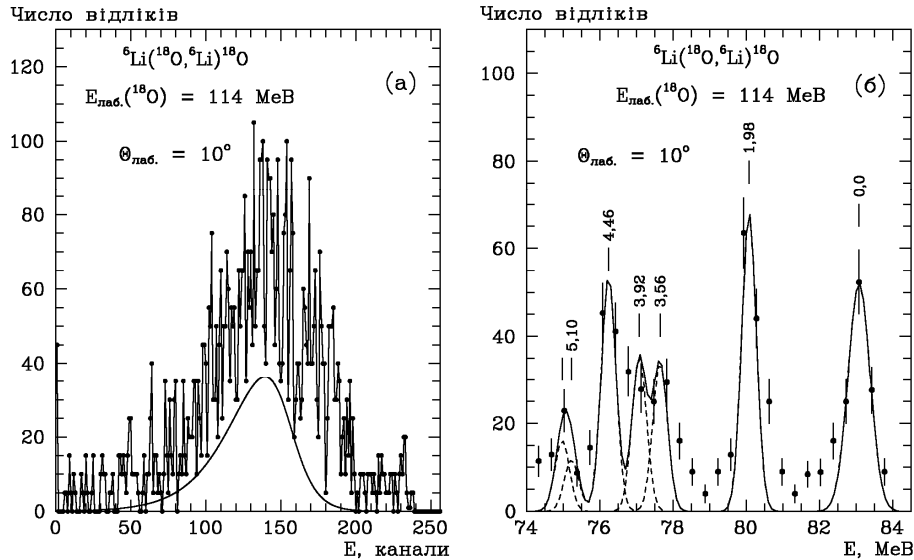


Рис. 3. Типові енергетичні спектри ^6Li пружного й непружного розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114$ МеВ з а) неперервним фоном від багаточастинкових реакцій та б) без нього (залишковий спектр).

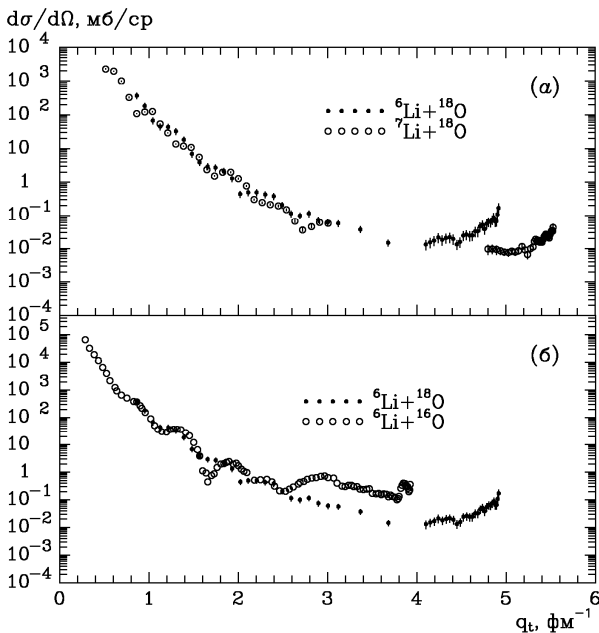


Рис. 4. Порівняння диференціальних перерізів пружного розсіяння ядер а) $^{6,7}\text{Li} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114$ МеВ та б) $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ при цій енергії з $^6\text{Li} + ^{16}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 68,57$ МеВ [4].

Отримані диференціальні перерізи пружного розсіяння іонів ^{18}O ядрами ^6Li при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114$ МеВ порівнюються на рис. 4, а з експериментальними даними розсіяння цих іонів ядрами ^7Li [2] та з даними розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{16}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{16}\text{O}) = 68,57$ МеВ [5]

($E_{\text{с.ц.м.}} = 18,7$ МеВ) залежно від переданого імпульсу q_t . Видно, що отримані в цій роботі експериментальні дані добре узгоджуються з відомими даними пружного розсіяння ядер $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$ [2] і $^6\text{Li} + ^{16}\text{O}$ [5] за абсолютною величиною для малих значень переданих імпульсів. Відмінності спостерігаються при великих переданих імпульсах, що може бути обумовлено різною роллю непружних процесів, що впливають на канали пружного розсіяння ядер, та залежністю потенціального розсіяння ядер від енергії.

Аналіз експериментальних даних

Методи розрахунків

Експериментальні дані пружного й непружного розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ проаналізовано за ОМ та МЗКР з використанням ядро-ядерного потенціалу типу Вудса - Саксона з об'ємним поглинанням

$$V(r) = V_0 \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_V}{a_V}\right) \right]^{-1} + iW_S \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_W}{a_W}\right) \right]^{-1} \quad (3)$$

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 $R_i = r_i(A_P^{1/3} + A_T^{1/3})$ ($i = V, W, C$) та A_P, Z_P і A_T, Z_T – масові й зарядові числа налітаючого іона P та мішені T відповідно. Для потенціалу кулонівської взаємодії ядер в усіх розрахунках використовувався параметр $r_C = 1,25$ фм.

У МЗКР-розрахунках у схему зв'язку каналів включались пружне й непружне розсіяння ядер ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$, процес реорієнтації спіну ${}^6\text{Li}$, а також найпростіші реакції одно- та двоступінчастих передач. Схеми переходів ядер ${}^6\text{Li}$ і ${}^{18}\text{O}$ у збуджені стани показано на рис. 5, а діаграми реакцій передач – на рис. 6.

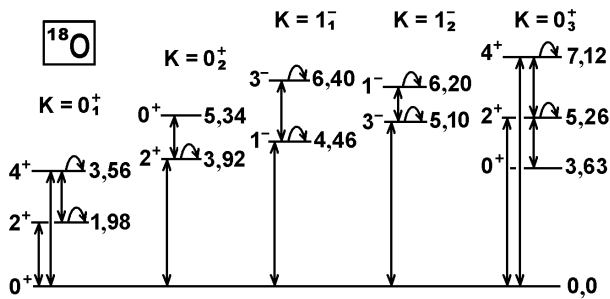
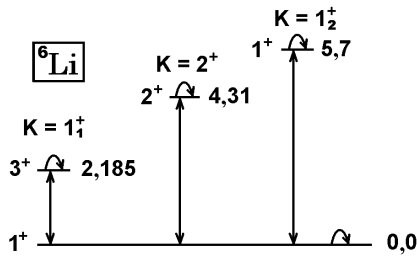


Рис. 5. Схеми переходів ядер ${}^6\text{Li}$ і ${}^{18}\text{O}$ у збуджені стани.

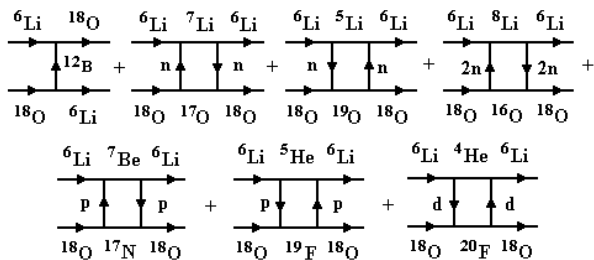


Рис. 6. Діаграми реакцій передач для пружного й непружного розсіяння ядер ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$.

Дугами на рис. 5 показано процеси реорієнтації спінів ядер. При цьому вважалось, що низькоенергетичні збудження ядер мають колективну природу (ротаційну або вібраційну). При обчисленні матричних елементів переходів ядер у ці збуджені стани використовувались форм-фактори

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

де δ_λ – параметр деформації ядра λ -мультипольності. Матричні елементи реорієнтації спінів ядер обчислювалися як квадрупольні колективні переходи. Параметри деформації δ_λ ядер ${}^6\text{Li}$ і ${}^{18}\text{O}$ та передавані орбітальні моменти λ подано в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри деформації ядер ${}^6\text{Li}$ та ${}^{18}\text{O}$

| Ядро | $E_{зб.}, \text{MeV}$ | J^π | λ | $\delta_\lambda, \text{фм}$ | $\beta_\lambda^{(a)}$ | Літ. |
|-------------------|-----------------------|---------|-----------|-----------------------------|-----------------------|------|
| ${}^6\text{Li}$ | 0,000 | 1^+ | 2 | -1,54 | -0,68 | [5] |
| | 2,185 | 3^+ | 2 | -1,54 | -0,68 | [5] |
| | | | 4 | 1,00 | 0,44 | |
| | 4,310 | 2^+ | 2 | -1,54 | -0,68 | [5] |
| | 5,700 | 1^+ | 2 | -1,54 | -0,68 | [5] |
| ${}^{18}\text{O}$ | 1,982 | 2_1^+ | 2 | 1,00 | 0,30 | [2] |
| | 3,555 | 4^+ | 4 | 1,00 | 0,30 | [2] |
| | 3,920 | 2_2^+ | 2 | 1,00 | 0,30 | [2] |
| | 4,456 | 1^- | 1 | 1,00 | 0,30 | [2] |
| | 5,098 | 3^- | 3 | 1,00 | 0,30 | [2] |
| | | | 2 | 1,00 | 0,30 | [2] |
| | 5,255 | 2_3^+ | 2 | 1,00 | 0,30 | [2] |
| | | | 2 | 1,00 | 0,30 | [2] |

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

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

| A | C | x | nL_j | S_x |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------|------------|-----------------------|
| ${}^6\text{Li}$ | ${}^4\text{He}$ | d | $2S_1$ | 1,061 |
| ${}^6\text{Li}$ | ${}^5\text{He}$ | p | $1P_{1/2}$ | -0,596 ^(a) |
| | | | $1P_{3/2}$ | 0,667 |
| ${}^6\text{Li}_{3,562}^*$ | ${}^5\text{He}$ | p | $1P_{3/2}$ | 0,894 ^(a) |
| ${}^6\text{Li}$ | ${}^5\text{Li}$ | n | $1P_{1/2}$ | 0,596 ^(a) |
| | | | $1P_{3/2}$ | -0,667 |
| ${}^6\text{Li}_{3,562}^*$ | ${}^5\text{Li}$ | n | $1P_{3/2}$ | 0,894 ^(a) |
| ${}^7\text{Li}$ | ${}^6\text{Li}$ | n | $1P_{1/2}$ | -0,657 |
| | | | $1P_{3/2}$ | -0,735 ^(a) |
| ${}^7\text{Li}$ | ${}^6\text{Li}_{3,562}^*$ | n | $1P_{3/2}$ | -0,569 |
| ${}^8\text{Li}$ | ${}^6\text{Li}$ | 2n | $1D_2$ | -0,667 ^(a) |
| ${}^7\text{Be}$ | ${}^6\text{Li}$ | p | $1P_{1/2}$ | -0,657 |
| | | | $1P_{3/2}$ | -0,735 ^(a) |
| ${}^7\text{Be}$ | ${}^6\text{Li}_{3,562}^*$ | p | $1P_{3/2}$ | 0,569 |
| ${}^{18}\text{O}$ | ${}^{12}\text{B}$ | ${}^{12}\text{B}$ | $3D_1$ | 0,022 |
| ${}^{18}\text{O}$ | ${}^{17}\text{N}$ | p | $1P_{1/2}$ | 1,198 ^(a) |
| ${}^{18}\text{O}_{3,921}^*$ | ${}^{17}\text{N}$ | p | $1P_{3/2}$ | 1,198 ^(a) |
| ${}^{18}\text{O}_{3,6338}^*$ | ${}^{17}\text{N}$ | p | $1P_{1/1}$ | 1,198 ^(a) |
| ${}^{18}\text{O}$ | ${}^{16}\text{O}$ | 2n | $3S_0$ | 0,615 |
| ${}^{18}\text{O}$ | ${}^{17}\text{O}$ | n | $1D_{5/2}$ | 1,406 ^(a) |
| ${}^{18}\text{O}_{3,921}^*$ | ${}^{17}\text{O}$ | n | $1D_{5/2}$ | 0,403 ^(a) |
| ${}^{18}\text{O}_{3,6338}^*$ | ${}^{17}\text{O}$ | n | $1D_{5/2}$ | 1,406 ^(a) |
| ${}^{19}\text{O}$ | ${}^{18}\text{O}$ | n | $1D_{5/2}$ | 0,527 |
| ${}^{19}\text{O}$ | ${}^{18}\text{O}_{3,921}^*$ | n | $2S_{1/2}$ | 0,470 |
| ${}^{19}\text{O}$ | ${}^{18}\text{O}_{3,635}^*$ | n | $1D_{5/2}$ | 0,471 |
| ${}^{19}\text{F}$ | ${}^{18}\text{O}$ | p | $2S_{1/2}$ | 0,699 |
| ${}^{19}\text{F}$ | ${}^{18}\text{O}_{3,921}^*$ | p | $1D_{5/2}$ | 1,315 |
| ${}^{19}\text{F}$ | ${}^{18}\text{O}_{3,635}^*$ | p | $2S_{1/2}$ | -0,522 |
| ${}^{20}\text{F}$ | ${}^{18}\text{O}$ | d | $2D_2$ | 0,380 |

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

Необхідні для МЗКР-розрахунків спектроскопічні амплітуди S_x нуклонів і кластерів x в ядерних системах $A = C + x$ обчислювались методом Смірнова - Чувільського в рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки (TIMO) [6] за допомогою програми DESNA [7, 8] з використанням таблиць хвильових функцій ядер 1р-оболонки А. Н. Бояркіної [9]. Спектроскопічні амплітуди S_x подано в табл. 2.

Хвильові функції відносного руху нуклонів і кластерів x у системах $A = C + x$ обчислювались стандартним способом підгонки глибини V_0 дійсного $(C + x)$ -потенціалу типу Вудса - Саксона до експериментального значення енергії зв'язку ϵ_x частинки x в ядрі A . При цьому використовувались параметри $a_V = 0,65$ фм і $r_V = 1,25 \cdot A^{1/3} / (C^{1/3} + x^{1/3})$ фм.

ОМ-розрахунки та підгонка параметрів потенціалу взаємодії ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ проводились за допомогою програми SPI-GENOA [10], а МЗКР-розрахунки - за програмою FRESKO [11].

Пружне розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$

Кутові розподіли диференціальних перерізів пружного розсіяння іонів ^{18}O ядрами ^6Li при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114$ МеВ показано на рис. 7 в абсолютних одиницях (а) та відносно кулонівського розсіяння (б). Криві - МЗКР-розрахунки для потенціального розсіяння іонів ^{18}O (криві <pot>), реорієнтації спіну ^6Li (криві <geor>) та реакцій послідовних передач нуклонів (криві <nn> і <pp>), дейтронів (крива <dd>) і 2n-кластерів (крива <2n2n>). Кривими Σ і <tr> показано когерентні суми перерізів усіх процесів та реакцій передач відповідно. МЗКР-розрахунки проводились із використанням параметрів оптичного потенціалу взаємодії ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$, поданих у табл. 3. Там же для порівняння приведено також параметри потенціалів взаємодії ядер $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$ та $^6\text{Li} + ^{16}\text{O}$ типу Вудса - Саксона з об'ємним W_S та поверхневим W_D поглинаннями при близьких енергіях. Параметри $(^6\text{Li} + ^{18}\text{O})$ -потенціалу визначались спочатку методом підгонки ОМ-перерізів до експериментальних даних пружного роз-

сіяння цих ядер, а після досягнення задовільного опису даних на малих кутах проводилось уточнення отриманих значень параметрів у МЗКР-розрахунках для задовільного опису кутових розподілів розсіяння іонів ^{18}O в усьому кутовому діапазоні.

На рис. 7 видно, що в області малих і середніх кутів домінує потенціальне розсіяння іонів ^{18}O , а на великих кутах, крім потенціального розсіяння, важливу роль відіграє процес реорієнтації спіну ^6Li (криві <geor>) та реакції обмінів нуклонами (криві <nn> і <pp>). Внески реакцій передач дейтронів та дінейтронів у канал пружного розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ незначні.

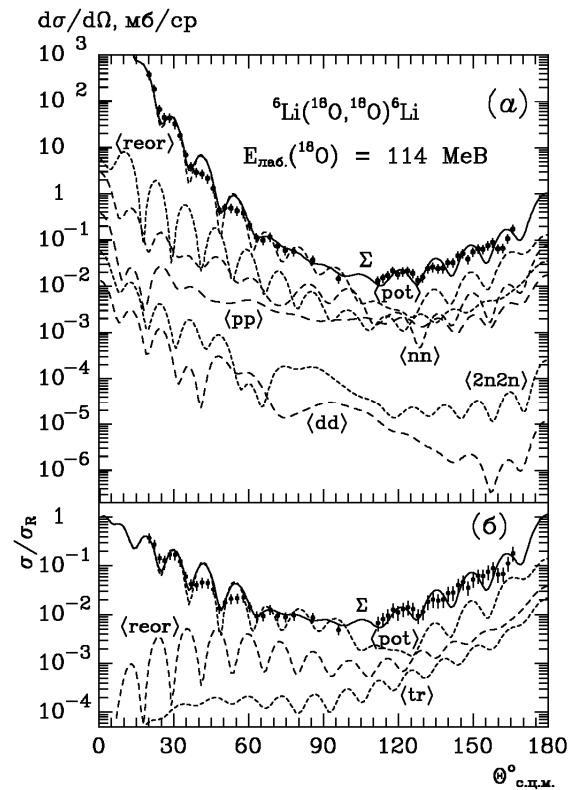


Рис. 7. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114$ МеВ. Штрихові криві - МЗКР-перерізи для різних процесів. Криві Σ і <tr> - когерентні суми МЗКР-перерізів усіх ядерних процесів та всіх реакцій передач відповідно.

Таблиця 3. Параметри потенціалів взаємодії ядер

| Ядра | $E_{\text{с.п.м.}}$, МеВ | Набори параметрів | V_0 , МеВ | r_V , фм | a_V , фм | W_S , МеВ | r_W , фм | a_W , фм | W_D , МеВ | r_{WD} , фм | a_{WD} , фм | Літ. |
|-------------------------------|------------------------------|----------------------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------|------------------|------------------|------|
| $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ | 28,50 | A | 175,6 | 0,800 | 0,763 | 14,0 | 1,250 | 0,763 | 0 | | | |
| $^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$ | 31,92 | B | 174,5 | 0,806 | 0,900 | 13,0 | 1,470 | 0,900 | 0 | | | [2] |
| $^6\text{Li} + ^{16}\text{O}$ | 26,18 | C | 174,0 | 0,782 | 0,790 | 13,5 | 1,100 | 0,650 | 5,500 | 0,974 | 0,450 | [3] |

Опис МЗКР-перерізами експериментальних даних розсіяння іонів ^6Li ядрами ^{18}O при енергії $E_{\text{лаб.}}(^6\text{Li}) = 32$ МеВ [1] показано на рис. 8. У розрахунках використовувався набір А параметрів

$(^6\text{Li} + ^{18}\text{O})$ -потенціалу (див. табл. 3). Видно, що в розсіянні іонів ^6Li на малі кути, для яких тільки і відомі експериментальні дані, основну роль відіграє потенціальне розсіяння іонів.

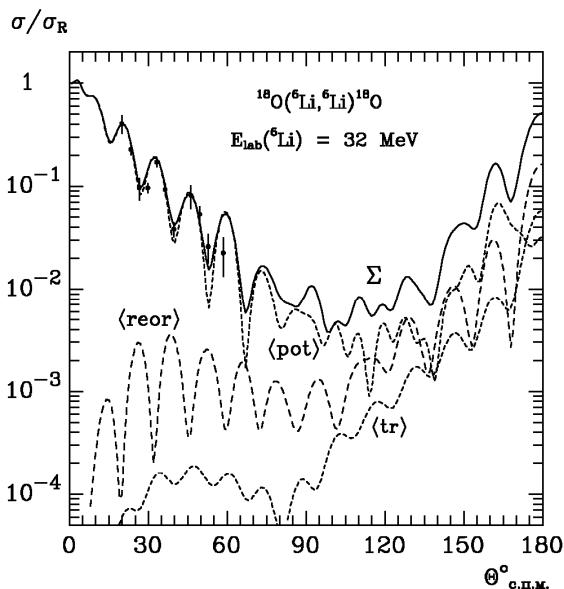


Рис. 8. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^6\text{Li}) = 32 \text{ MeV}$ [1]. Криві $\langle \text{reor} \rangle$, $\langle \text{pot} \rangle$, $\langle \text{tr} \rangle$ і Σ – МЗКР-перерізи для реорієнтації спіну ${}^6\text{Li}$, потенціального розсіяння іонів ${}^6\text{Li}$ ядрами ${}^{18}\text{O}$, всіх реакцій передач і всіх ядерних процесів (когерентні суми).

Дійсні та уявні частини потенціалів взаємодії ядер ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ і ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ [2] при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114 \text{ MeV}$ та ${}^6\text{Li} + {}^{16}\text{O}$ [3] при енергії $E_{\text{с.ц.м.}} = 26,18 \text{ MeV}$ показано на рис. 9. Там же дійсні частини цих потенціалів порівнюються з $({}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O})$ -фолдінг-потенціалом, обчисленим за моделлю подвійної згортки з використанням нуклон-нуклонного потенціалу МЗУ Рейда (Reid)

$$v(s) = 7999 \frac{e^{-4s}}{4s} - 2134 \frac{e^{-2,5s}}{2,5s} - 276 (1 - 0,005 \frac{E_P}{A_P}) \frac{\delta(s)}{s^2}, \quad (6)$$

де A_P і E_P – маса й енергія іона P в лабораторній системі. Для розрахунків фолдінг-потенціалу використовувалась програма DFPOT [12], а для розподілів нуклонів в ядрах ${}^6\text{Li}$ і ${}^{18}\text{O}$ – таблиці з роботи [13].

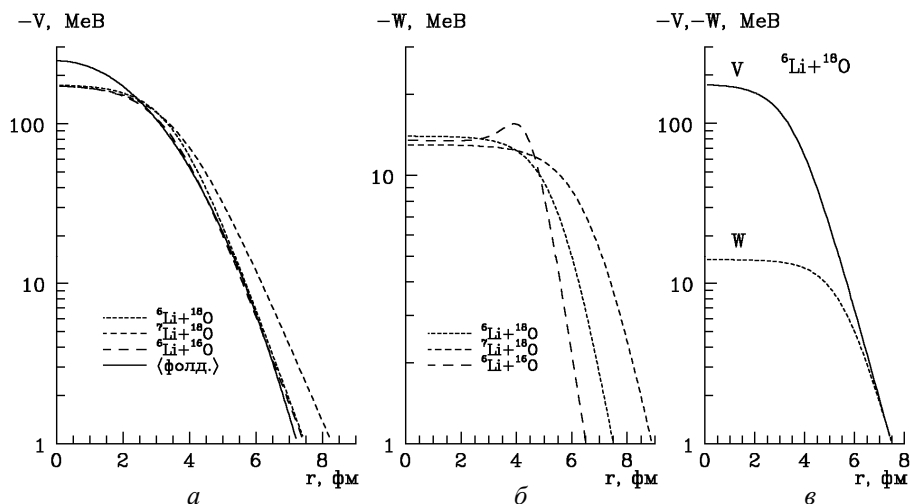


Рис. 9. Порівняння дійсних та уявних частин потенціалів взаємодії ядер ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ і ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ [2] при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114 \text{ MeV}$ ($E_{\text{с.ц.м.}} = 28,5$ і $31,92 \text{ MeV}$ відповідно) та ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{с.ц.м.}} = 26,18 \text{ MeV}$ [3] (див. табл. 3). Крива $\langle \text{фолд.} \rangle$ – фолдінг-потенціал взаємодії ядер ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$.

На рис. 9, *a* видно, що дійсні частини $({}^6\text{Li} + {}^{16,18}\text{O})$ -потенціалів відрізняються незначно, а ця частина $({}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O})$ -потенціалу більш простяжна в периферійній області. Уявні частини цих трьох потенціалів також в основному відрізняються в поверхневій області (рис. 9, *b*). Обидві частини $({}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O})$ -потенціалу, параметри якого отримані з аналізу експериментальних даних, та відповідний фолдінг-потенціал показано на рис. 9, *в*. Видно, що ці потенціали добре узгоджуються в периферійній області, де в основному відбувається взаємодія ядер.

Про те, як впливають ізотопічні відмінності

параметрів потенціалів взаємодії ядер ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$, ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ і ${}^6\text{Li} + {}^{16}\text{O}$ на опис диференціальних перерізів пружного розсіяння ядер ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$, можна судити з рис. 10, де кривими $\langle A \rangle$, $\langle B \rangle$ і $\langle C \rangle$ показано МЗКР-розрахунки з $({}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O})$ -потенціалом при використанні наборів параметрів A , B і C , поданими в табл. 3. Видно, що лише $({}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O})$ -потенціал із набором параметрів A , отриманим з аналізу даних розсіяння ядер ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$, забезпечує задовільний опис експериментальних даних. Цей рисунок ілюструє високу чутливість кутових розподілів МЗКР-перерізів до наборів параметрів потенціалу взаємодії ядер.

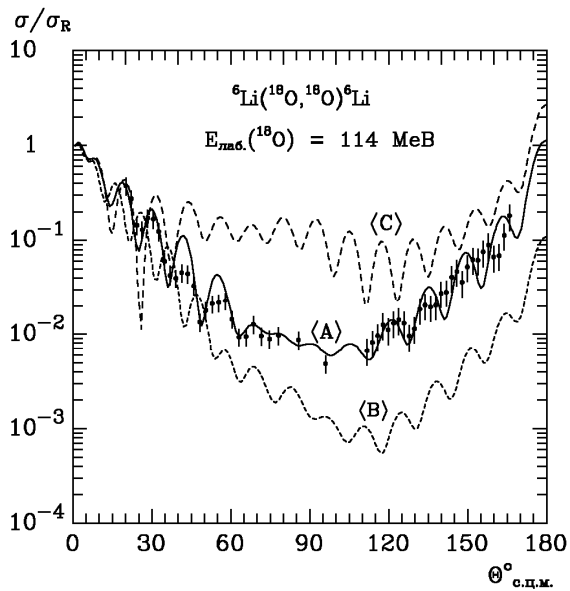


Рис. 10. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$ MeV. Криві <A>, і <C> – МЗКР-розрахунки з відповідними наборами параметрів потенціалів взаємодії ядер ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$, ${}^7\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ і ${}^6\text{Li} + {}^{16}\text{O}$ (див. табл. 3).

Непружне розсіяння ядер ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$

Диференціальні перерізи непружного розсіяння іонів ^{18}O ядрами ${}^6\text{Li}$ при енергії

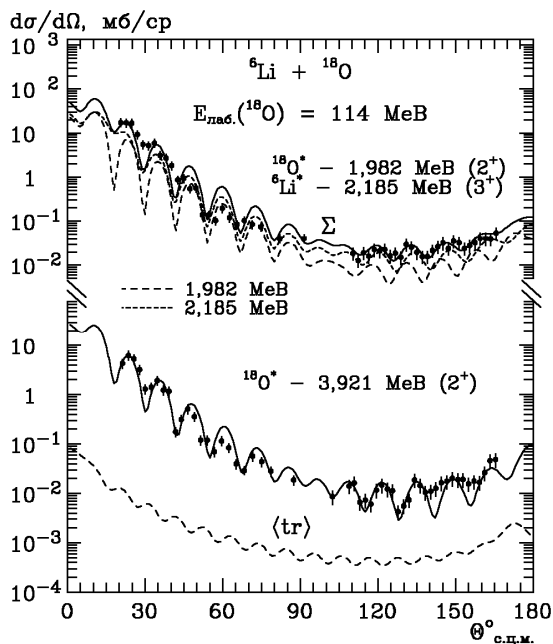


Рис. 11. Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$ MeV для переходів ядра ${}^6\text{Li}$ у збуджений стан 2,185 MeV (3^+) та ядра ${}^{18}\text{O}$ у стани 1,982 MeV (2^+) і 3,921 MeV (2^+). Криві – МЗКР-розрахунки для колективних переходів та всіх реакцій передач (крива <tr>, когерентна сума).

$E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$ MeV для переходів ядра ${}^6\text{Li}$ у збуджені стани 2,185 MeV (3^+), 3,562 MeV (0^+ , $T = 1$), 4,31 MeV (2^+) і 5,7 MeV (1^+) та ядра ${}^{18}\text{O}$ у стани 1,982 MeV (2^+), 3,555 MeV (4^+) + 3,635 MeV (0^+), 3,921 MeV (2^+), 5,098 MeV (3^+) і 5,26 MeV (2^+) показано на рис. 11 – 13. Криві – МЗКР-розрахунки для колективних переходів ядер у збуджені стани та реакцій передач, схеми й діаграми яких показано на рис. 5 і 6 відповідно.

На рис. 11 представлено диференціальні перерізи для нерозділених в експерименті переходів ядра ${}^6\text{Li}$ у збуджений стан 2,185 MeV (3^+) і ядра ${}^{18}\text{O}$ у стан 1,982 MeV (2^+). Штрихові криві – МЗКР-перерізи для цих станів, а суцільна крива Σ – некогерентна сума цих перерізів. Видно, що МЗКР-перерізи цих двох переходів близькі за величиною. На цьому ж рисунку показано також диференціальні перерізи для переходу ядра ${}^{18}\text{O}$ у збуджений стан 3,921 MeV (2^+). Суцільна крива – МЗКР-перерізи для колективного переходу ядра ${}^{18}\text{O}$ у цей стан, а крива <tr> – МЗКР-перерізи для цього переходу через реакції передач. Видно, що внесок реакцій передач у перерізи цього переходу незначний. Така ж ситуація спостерігалась і для інших переходів ядер ${}^6\text{Li}$ і ${}^{18}\text{O}$ у збуджені стани.

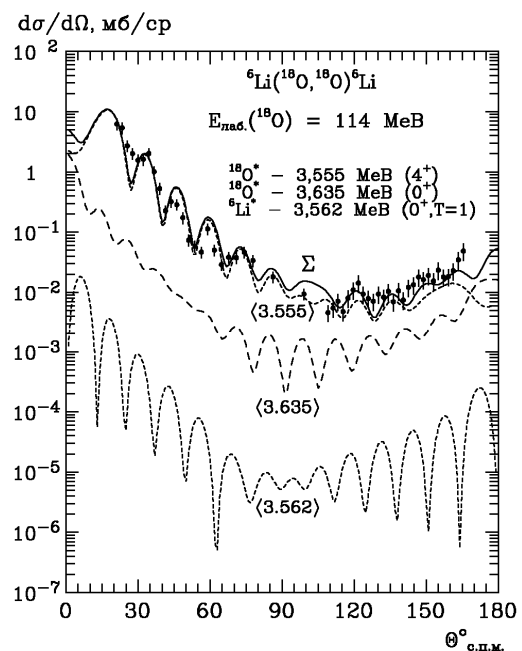


Рис. 12. Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер ${}^6\text{Li} + {}^{18}\text{O}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{18}\text{O}) = 114$ MeV для переходів ядра ${}^6\text{Li}$ у стан 3,562 MeV (0^+ , $T = 1$) та ядра ${}^{18}\text{O}$ у стани 3,635 MeV (0^+) і 3,555 MeV (4^+). Крива <3.555> – МЗКР-розрахунки для колективного переходу, а криві <3.562> і <3.635> для реакцій передач (когерентні суми). Крива Σ – некогерентна сума всіх МЗКР-перерізів.

На рис. 12 це показано для збудження ядра ^{18}O на рівень 3,635 MeV (0^+) та ядра ^6Li на рівень 3,635 MeV (0^+). Безпосередні колективні переходи $0^+ \rightarrow 0^+$ (^{18}O) та $1^+ \rightarrow 0^+$ (^6Li) заборонені, але збудження цих станів ядер ^6Li і ^{18}O можливі через реакції передач. МЗКР-розрахунки для цих механізмів показано кривими $\langle 3.635 \rangle$ та $\langle 3.562 \rangle$. Видно, що ймовірність цих переходів мала, а експериментальні дані задовільно описуються МЗКР-перерізами колективного переходу ядра ^{18}O на рівень 3,555 MeV (4^+) (крива $\langle 3.555 \rangle$). Кривою Σ показано некогерентну суму всіх переходів.

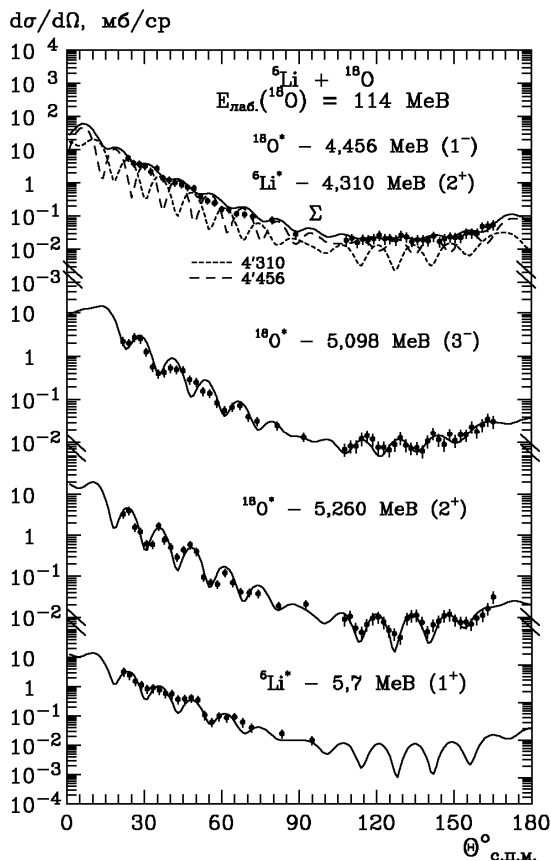


Рис. 13. Те ж саме, що на рис. 11, але для інших збуджених станів ядер ^6Li і ^{18}O .

Диференціальні перерізи непружного розсіювання іонів ^{18}O ядрами ^6Li для переходів цих ядер в інші збуджені стани показано на рис. 13. Видно, що представлені кривими МЗКР-перерізи для колективних збуджень ядер задовільно описують усі експериментальні дані.

Основні результати та висновки

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного й непружного

розсіювання іонів ^{18}O ядрами ^6Li при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114$ MeV з одночасним вимірюванням диференціальних перерізів реакцій $^6\text{Li}(^{18}\text{O}, X)$ з виходом ядер $^{16,17,19}\text{O} + ^{8,7,5}\text{Li}$, $^{14,15,16,17}\text{N} + ^{10,9,8,7}\text{Be}$ та $^{12,13,14}\text{C} + ^{12,11,10}\text{B}$.

Дані проаналізовано за ОМ та методом МЗКР із включенням у схему зв'язку каналів пружного й непружного розсіювання ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$, процесу реорієнтації спіну ^6Li в основному стані та найпростіших реакцій передач нуклонів і кластерів, що можуть давати внески в канали розсіювання цих ядер.

Визначено параметри оптичного потенціалу взаємодії ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ та досліджено механізми розсіювання іонів ^{18}O ядрами ^6Li . Аналіз даних показав, що в пружному розсіюванні іонів ^{18}O на кути $\theta_{\text{с.п.м.}} < 90^\circ$ основну роль відіграє їхнє потенціальне розсіювання, а на великі кути – також процес реорієнтації спіну ^6Li та реакції обміну нуклонами. У непружному розсіюванні ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ домінують переходи для колективних низькоенергетичних збуджень цих ядер. Реакції передач відіграють другорядну роль.

Оптичний потенціал взаємодії ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ порівнюється з ($^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$)- та ($^6\text{Li} + ^{16}\text{O}$)-потенціалами та з його фолдінг-потенціалом. Виявлено добру узгодженість отриманого з аналізу даних ($^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$)-потенціалу з фолдінг-потенціалом у периферійній області, де в основному відбувається взаємодія ядер, та ізоотопічну відмінність його уявної частини з іншими потенціалами. Показано, що невеликі ізоотопічні відмінності наборів параметрів потенціалу значно впливають на МЗКР-перерізи розсіювання ядер.

Зауважимо, що ізоотопічні відмінності оптичних ядро-ядерних потенціалів тісно зв'язані із структурою взаємодіючих ядер та індивідуальними особливостями їхніх збуджених станів. Ця ізоотопічна проблематика потребує ретельних теоретичних досліджень, які виходять за межі експериментальних робіт. Проте в цих дослідженнях можуть бути ефективно використані результати аналізу експериментальних даних розсіювання іонів на ізотопах, які, зокрема, отримані в наших роботах [2, 3, 14 - 19].

З аналізу даних непружного розсіювання ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ визначено параметри деформації цих ядер в основних та збуджених станах, які добре узгоджуються з відомими значеннями, отриманими в інших роботах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Giesen U., Browne C.P., Gorres J. et al.* The influence of low-energy resonances on the reaction rate of $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ // Nucl. Phys. A. - 1994. - Vol. 567. - P. 146 - 164.
2. *Рудчик А.А., Рудчик А.Т., 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.
3. *Рудчик А.Т., Зелінський Р.М., Плюйко В.А. та ін.* Енергетична залежність розсіяння ядер $^6\text{Li} + ^{16}\text{O}$ та ізотопічні відмінності потенціалів взаємодії ядер $^6, ^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$ // Ядерна фізика та енергетика. - 2012. - Т. 13, № 3. - С. 237 - 245.
4. *Kowalczyk M.* SMAN: A Code for Nuclear Experiments, Warsaw University report (1998).
5. *Vineyard M.F., Kemper K.W., Cook J.* Excitation of ^6Li by ^{16}O at $E_{\text{c.m.}} = 18.7$ MeV // Phys. Lett. B. - 1984. - Vol. 142. - P. 249 - 252.
6. *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.
7. *Рудчик А.Т., Чувильський 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).
8. *Рудчик А.Т., Чувильський Ю.М.* Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1р-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач // УФЖ. - 1985. - Т. 30, № 6. - С. 819 - 825.
9. *Бояркина А.Н.* Структура ядер 1р-оболочки. - М.: Изд-во Москов. ун-та, 1973. - 62 с.
10. *Nilsson B.S.* SPI-GENOA: an Optical Model Search Code. - 1976 (Report / A Niels Bohr Institute).
11. *Thompson I.J.* Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comp. Phys. Rep. - 1988. - Vol. 7. - P. 167 - 212.
12. *Cook J.* DFPOT - a program for the calculation of double folded potentials // Comp. Phys. Com. - 1982. - Vol. 25, Is. 2. - P. 125 - 139.
13. *De Vries H., De Jager C.W., De Vries C.* Nuclear charge-density-distribution parameters from elastic electron scattering // Atomic data and nuclear data tables. - 1987. - Vol. 36. - P. 495 - 536.
14. *Rudchik A.T., Shyrma Yu.O., Kemper K.W. et al.* Isotopic effects in elastic and inelastic $^{12}\text{C} + ^{16,18}\text{O}$ scattering // Eur. Phys. J. A. - 2010. - Vol. 44. - P. 221 - 231.
15. *Rudchik A.T., Shyrma Yu.O., Kemper K.W. et al.* Elastic and inelastic scattering of $^{13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ versus $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ and $^{13}\text{C} + ^{16}\text{O}$ // Nucl. Phys. A. - 2011. - Vol. 852. - P. 1 - 14.
16. *Rudchik A.T., Shyrma Yu.O., Kemper K.W. et al.* Elastic and inelastic scattering of $^{14}\text{C} + ^{18}\text{O}$ versus $^{12,13}\text{C} + ^{18}\text{O}$ and $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$ // Eur. Phys. J. A. - 2011. - Vol. 47. - P. 50 (10).
17. *Rudchik A.T., Romanyshyn V.O., Koshchy E.I. et al.* Isotopic effects in the $^7\text{Li} + ^{10,11}\text{B}$ elastic and inelastic scattering // Eur. Phys. J. A. - 2007. - Vol. 33. - P. 317 - 325.
18. *Rudchik A.A., Rudchik A.T., Kozeratska G.M. et al.* $^7\text{Li} + ^{11}\text{B}$ elastic and inelastic scattering in a coupled-reaction-channels approach // Phys. Rev. C. - 2005. - Vol. 72. - P. 034608.
19. *Mezhevych S.Yu., Rusek K., Rudchik A.T. et al.* The $^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$ elastic and inelastic scattering and isotopic effects in the $^{12,13}\text{C} + ^{11}\text{B}$ scattering // Nucl. Phys. A. - 2003. - Vol. 724. - P. 29 - 46.

**А. Т. Рудчик, Р. М. Зелінський, А. А. Рудчик, Вал. Н. Пирнак, С. Кличевски,
Е. І. Кошій, К. Русек, В. А. Плюйко, О. А. Понкратенко, С. Ю. Межевич,
А. П. Ильин, В. В. Улещенко, Р. Сюдак, Я. Хоиньски, Б. Чех, А. Щурек**

УПРУГОЕ И НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ИОНОВ ^{18}O ЯДРАМИ ^6Li ПРИ ЭНЕРГИИ 114 МэВ И ИЗОТОПИЧЕСКИЕ ОТЛИЧИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯДЕР $^6, ^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$ И $^6\text{Li} + ^{16,18}\text{O}$

Получены новые экспериментальные данные дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ при энергии $E_{\text{лаб.}}(^{18}\text{O}) = 114$ МэВ в эксперименте с одновременным измерением дифференциальных сечений реакций $^6\text{Li}(^{18}\text{O}, X)$ с выходом ядер $^{16,17,19}\text{O} + ^{8,7,5}\text{Li}$, $^{14,15,16,17}\text{N} + ^{10,9,8,7}\text{Be}$ и $^{12,13,14}\text{C} + ^{12,11,10}\text{B}$. Экспериментальные данные проанализированы по оптической модели и методу связанных каналов реакций. Определены параметры потенциала взаимодействия ядер $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$, параметры деформации ядер ^6Li и ^{18}O и механизмы рассеяния этих ядер. Исследованы изотопические отличия рассеяния ядер $^6, ^7\text{Li} + ^{18}\text{O}$ и $^6\text{Li} + ^{16,18}\text{O}$ и параметров потенциалов взаимодействия их.

Ключевые слова: рассеяние тяжелых ионов, оптическая модель, метод связанных каналов реакций, спектроскопические амплитуды, оптические потенциалы, механизмы реакций.

**A. T. Rudchik, R. M. Zelinsky, A. A. Rudchik, Val. M. Pirnak, S. Kliczewski,
E. I. Koshech, K. Rusek, V. A. Plujko, O. A. Ponkratenko, S. Yu. Mezhevych,
A. P. Ilyin, V. V. Uleschenko, R. Siudak, J. Choiński, B. Czech, A. Szczurek**

**ELASTIC AND INELASTIC SCATTERING OF ^{18}O IONS BY ^6Li AT 114 MeV
AND ISOTOPIIC DIFFERENCES OF $^{6,7}\text{Li} + ^{18}\text{O}$ AND $^6\text{Li} + ^{16,18}\text{O}$ NUCLEI INTERACTIONS**

Angular distributions of the $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ elastic and inelastic scattering as well as the $^6\text{Li}(^{18}\text{O}, X)$ reactions with production of $^{16,17,19}\text{O} + ^{8,7,5}\text{Li}$, $^{14,15,16,17}\text{N} + ^{10,9,8,7}\text{Be}$ and $^{12,13,14}\text{C} + ^{12,11,10}\text{B}$ nuclei were measured at $E_{\text{lab}}(^{18}\text{O}) = 114$ MeV. The data were analyzed within the optical model and coupled-reaction-channels method. The $^6\text{Li} + ^{18}\text{O}$ optical potential parameters as well as deformation parameters of these nuclei were deduced and the scattering mechanisms were studied. The isotopic differences between the $^{6,7}\text{Li} + ^{18}\text{O}$ and $^6\text{Li} + ^{16,18}\text{O}$ scattering as well as their potential parameters were investigated.

Keywords: heavy-ion scattering, optical model, coupled-reaction-channels method, spectroscopic amplitudes, optical potentials, reaction mechanisms.

Надійшла 16.07.2012

Received 16.07.2012