

**А. Т. Рудчик<sup>1,\*</sup>, А. А. Рудчик<sup>1</sup>, В. В. Хейло<sup>1</sup>, К. Русек<sup>2</sup>, К. В. Кемпер<sup>3</sup>,  
Е. П'ясецькі<sup>2</sup>, А. Столяж<sup>2</sup>, А. Тщінська<sup>2</sup>, Вал. М. Пірнак<sup>1</sup>,  
О. А. Понкратенко<sup>1</sup>, Є. І. Кощій<sup>4</sup>, О. Е. Куцик<sup>1</sup>, С. Ю. Межевич<sup>1</sup>,  
А. П. Ільїн<sup>1</sup>, Ю. М. Степаненко<sup>1</sup>, В. В. Улещенко<sup>1</sup>, Ю. О. Ширма<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

<sup>3</sup> Відділ фізики Флоридського університету, Таллахассі, США

<sup>4</sup> Циклотронний інститут Техаського А&М університету, Колледж Стейшен, США

\*Відповідальний автор: rudchik@kinr.kiev.ua

## ПРУЖНЕ ТА НЕПРУЖНЕ РОЗСІЯННЯ ІОНІВ <sup>15</sup>N ЯДРАМИ <sup>10</sup>B ПРИ ЕНЕРГІЇ 81 МеВ. ІЗОТОПІЧНІ ЕФЕКТИ В РОЗСІЯННІ ЯДЕР <sup>15</sup>N + <sup>10</sup>B, <sup>15</sup>N + <sup>11</sup>B, <sup>14</sup>N + <sup>10</sup>B

Отримано нові експериментальні дані кутових розподілів перерізів пружного та непружного розсіяння іонів <sup>15</sup>N ядрами <sup>10</sup>B при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ. Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій. У розрахунках використано оптичні потенціали Вудса - Саксона взаємодії ядер. Визначено параметри потенціалу взаємодії ядер <sup>15</sup>N + <sup>10</sup>B та поміряно кутові розподіли перерізів пружного розсіяння цих ядер. Отримані експериментальні дані пружного розсіяння ядер <sup>15</sup>N + <sup>10</sup>B порівняно з даними розсіяння ядер <sup>15</sup>N + <sup>11</sup>B і <sup>14</sup>N + <sup>10</sup>B. Виявлено ізотопічні ефекти в розсіянні цих трьох пар ядер, обумовлені відмінністю оптичних потенціалів взаємодії цих ядер та їхньою структурою. Отримано нові експериментальні дані непружного розсіяння ядер <sup>15</sup>N + <sup>10</sup>B для збуджень 0,718 - 3,587 МеВ ядра <sup>10</sup>B та 5,270 - 6,324 МеВ ядра <sup>15</sup>N. Ці дані проаналізовано за МЗКР у рамках моделі колективних збуджень ядер <sup>15</sup>N і <sup>10</sup>B. Отримано відомості про деформацію цих ядер.

*Ключові слова:* розсіяння <sup>10</sup>B(<sup>15</sup>N, <sup>15</sup>N)<sup>10</sup>B,  $E = 81$  МеВ, спектри ядер <sup>10</sup>B і <sup>15</sup>N,  $\sigma(\theta)$ , потенціал взаємодії ядер <sup>10</sup>B + <sup>15</sup>N, деформація ядер <sup>10</sup>B і <sup>15</sup>N.

### 1. Вступ

Пружне та непружне розсіяння іонів ядрами є одними з важливих ядерних процесів, оскільки експериментальні дані цих розсіань використовуються для отримання відомостей про деформацію ядер та потенціали ядро-ядерної взаємодії, що використовуються при дослідженні реакцій з виходом стабільних і нестабільних ядер для отримання відомостей про структуру, взаємодію цих ядер та механізми їхнього утворення.

У даній роботі досліджено пружне та непружне розсіяння іонів <sup>15</sup>N ядрами <sup>10</sup>B при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ використовуючи результати вимірювань на Варшавському циклотроні U-200P енергетичних спектрів продуктів ядерних процесів <sup>10</sup>B(<sup>15</sup>N, X)Y детекторною  $\Delta E$ - $E$ -методикою. Метою роботи було отримання експериментальних даних кутових розподілів диференціальних перерізів розсіяння <sup>10</sup>B(<sup>15</sup>N, <sup>15</sup>N)<sup>10</sup>B з виходом ядер <sup>15</sup>N, <sup>10</sup>B в основних та збуджених станах та дослідження цих даних у рамках сучасних теоретичних моделей для визначення потенціалу взаємодії ядер <sup>15</sup>N + <sup>10</sup>B, параметрів їхньої деформації, а також для оцінки можливих внесків у розсіяння

цих ядер реакцій передач нуклонів і кластерів в рамках сучасних оболонкових моделей. Для цього використано метод зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) та трансляційно-інваріантну модель оболонки (ТІМО) для обчислення необхідних спектроскопічних амплітуд (факторів) нуклонів і кластерів у ядрах.

### 2. Методика експерименту та експериментальні дані

Як зазначено вище, вимірювання диференціальних перерізів пружного та непружного розсіяння іонів <sup>15</sup>N ядрами <sup>10</sup>B при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ проведено на циклотроні U-200P Лабораторії важких іонів Варшавського університету. Для отримання пучка іонів <sup>15</sup>N було використано збагачену цим ізотопом кальцієву селітру ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ). Розкид енергії іонів на мішені не перевищував 0,5 %. В експерименті використовувалася самопідтримна збагачена ізотопом <sup>10</sup>B мішень. Експеримент проводився на експериментальній установці ICARE [1]. У вимірюваннях використовувалася  $\Delta E$ - $E$ -методика з кремнієвими  $\Delta E$ - та  $E$ -детекторами товщиною 40 та 300 мкм відповідно.

© А. Т. Рудчик, А. А. Рудчик, В. В. Хейло, К. Русек, К. В. Кемпер, Е. П'ясецькі, А. Столяж, А. Тщінська, Вал. М. Пірнак, О. А. Понкратенко, Є. І. Кощій, О. Е. Куцик, С. Ю. Межевич, А. П. Ільїн, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма, 2022

Типовий двовимірний  $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій  $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, X)$  показано на рис. 1.

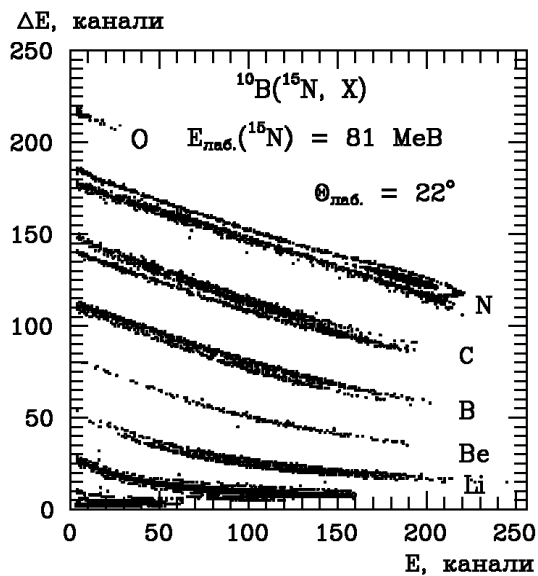


Рис. 1. Типовий  $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій  $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, X)$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81 \text{ MeV}$ .

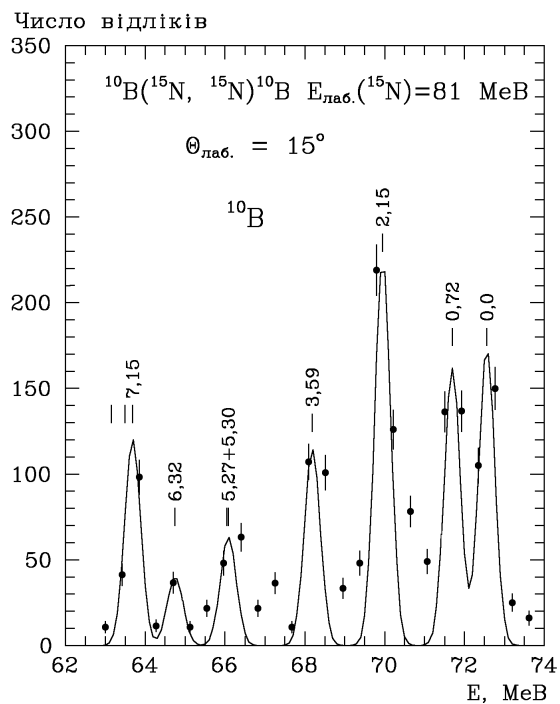
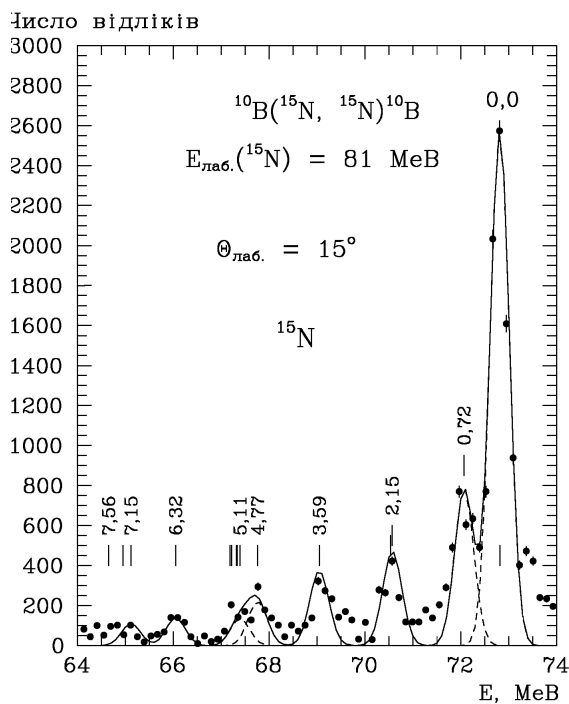


Рис. 2. Типові енергетичні спектри  $^{15}\text{N}$  і  $^{10}\text{B}$  продуктів пружного та непружного розсіяння  $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{10}\text{B}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81 \text{ MeV}$ . Кривими показано наближення експериментальних піків симетричними гауссіанами.

Площі гауссіанів піків спектрів іонів  $^{15}\text{N}$  та ядер віддачі  $^{10}\text{B}$  використовувалися для обчислення диференціальних перерізів розсіяння  $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{10}\text{B}$  на кутах  $\theta_{\text{с.п.м.}}(^{15}\text{N})$  реєстрації  $^{15}\text{N}$  та на великих кутах  $\theta_{\text{с.п.м.}}(^{15}\text{N}) = 180^\circ - \theta_{\text{с.п.м.}}(^{10}\text{B})$  на основі спектрів  $^{10}\text{B}$ . Таким методом було отримано кутові розподіли диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння  $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})$  у повному кутовому діапазоні.

Похибки в обчисленні площ частково перекри-

Видно, що експериментальна методика забезпечувала розділення продуктів реакцій за зарядами (зарядові локуси  $\Delta E(E)$ -спектрів) та масами (масові локуси). Для розділення зарядового локусу на масові загальна ширина зарядового локусу ділилася на число зареєстрованих ізотопів ядер і таким чином визначалися ширини локусів ізотопів ядер, що проектувалися на енергетичну вісь двовимірного спектра для отримання одновимірних енергетичних спектрів ізотопів ядер. У цих масових спектрах присутні енергетично-неперервні спектри продуктів багаточастинкових реакцій (неперервні фони), які потребували обов'язкового видалення для отримання спектрів досліджуваних процесів. Для цього використовувалася програма РЕАКФІТ. Приклад отриманих таким чином одновимірних спектрів ядер  $^{15}\text{N}$  і  $^{10}\text{B}$  показано на рис. 2. Кривими на рис. 2 показано наближення експериментальних піків симетричними гауссіанами.

тих піків не перевищували 20 %. Для повністю перекритих піків ці похибки становили 30 - 40 %.

Отримані у відносних одиницях перерізи пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  нормувалися до обчислених перерізів за оптичною моделлю (ОМ) на малих кутах ( $\theta_{\text{с.п.м.}} < 40^\circ$ ), де домінує кулонівське розсіяння та ОМ-перерізи слабо залежать від невизначеності параметрів оптичного потенціалу. Отриманий множник абсолютизації перерізів пружного розсіяння цих ядер вико-

ристовувався також для нормування диференціальних перерізів непружного розсіяння. Похибка абсолютизації диференціальних перерізів пружного та непружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  не перевищує 20 %.

Диференціальні перерізи пружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{10}\text{B}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81 \text{ MeV}$  показано на рис. 3 (а), а порівняння пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  (81 MeV),  $^{15}\text{N} + ^{11}\text{B}$  (84 MeV) [2] та  $^{14}\text{N} + ^{10}\text{B}$  (50 MeV) [3] – на рис. 3 (б). Видно значні відмінності перерізів пружного розсіяння цих ядер на середніх і вели-

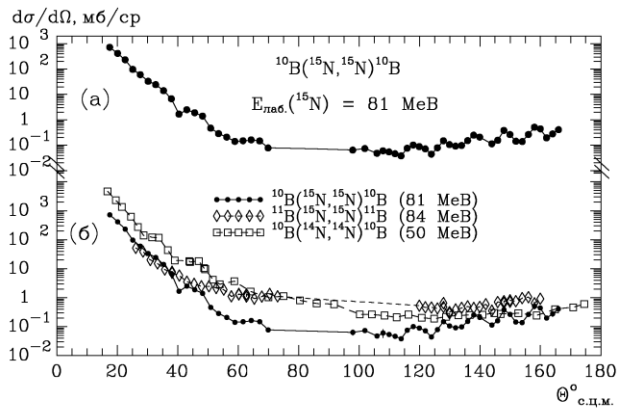


Рис. 3. Диференціальні перерізи пружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{10}\text{B}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81 \text{ MeV}$  (а) та перерізи пружного розсіяння ядер  $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{10}\text{B}$  (81 MeV),  $^{11}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{11}\text{B}$  (84 MeV) [2] і  $^{10}\text{B}(^{14}\text{N}, ^{14}\text{N})^{10}\text{B}$  (50 MeV) (б) [3].

ких кутах (*ізотопічні ефекти*). Ці ефекти можуть бути обумовлені структурою ядер та різницею переданих імпульсів  $q_t$ , залежність перерізів розсіяння від яких показано на рис. 4:

$$q_t = 2k \sin(\theta/2), \quad k = 0.219\sqrt{\mu E},$$

$$\mu = \frac{mM}{m+M}, \quad E = \frac{M}{m+M} E_{\text{лаб}},$$

де  $m$  – маса іону,  $M$  – маса ядра мішені,  $E_{\text{лаб}}$  – лабораторна енергія іону.

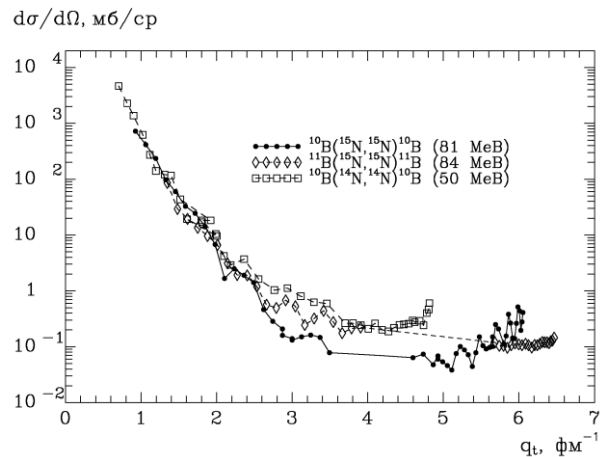


Рис. 4. Залежність диференціальних перерізів пружних розсіянь  $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{10}\text{B}$  (81 MeV),  $^{11}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{11}\text{B}$  (84 MeV) [2] і  $^{10}\text{B}(^{14}\text{N}, ^{14}\text{N})^{10}\text{B}$  (50 MeV) [3] від переданих імпульсів  $q_t$ .

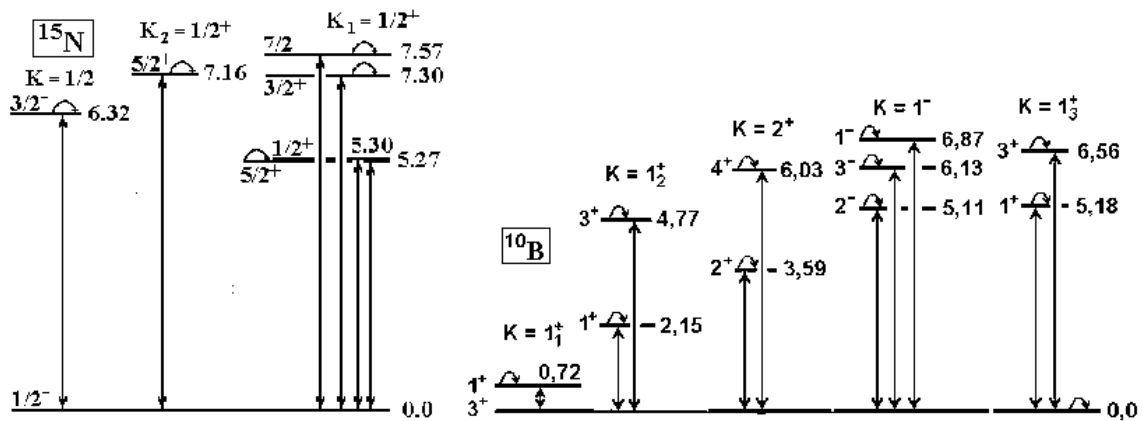


Рис. 5. Схеми збуджень ядер  $^{10}\text{B}$  та  $^{15}\text{N}$ .

Експериментальні дані непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{10}\text{B}$  поміряно для збуджених станів 0,718 MeV ( $1^+$ ), 2,154 MeV ( $1^+$ ), 3,587 MeV ( $2^+$ ) ядра  $^{10}\text{B}$  та станів 5,270 MeV ( $5/2^+$ ) + 5,299 MeV ( $1/2^+$ ), 6,324 MeV ( $3/2^+$ ) ядра  $^{15}\text{N}$ . Схеми збуджень ядер  $^{15}\text{N}$  і  $^{10}\text{B}$  показано на рис. 5.

### 3. Аналіз експериментальних даних

Експериментальні дані пружного та непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{10}\text{B}$  проаналізовано за МЗКР із включенням до схеми зв'язку

каналів розсіяння та реакцій передач нуклонів і кластерів, внески яких можливі у пружне розсіяння  $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{10}\text{B}$ . Діаграми таких передач у реакції  $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{10}\text{B})^{15}\text{N}$  для  $\alpha$ -частинок і нейтронів показано на рис. 6.

Для виконання розрахунків розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  за МЗКР використано програму FRESCO [4].

Вважалося, що низькоенергетичні збудження ядер мають колективну природу (ротаційні або вібраційні).

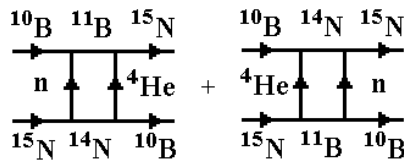


Рис. 6. Діаграми передач нейтронів і  $\alpha$ -частинок у реакції  $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{10}\text{B})^{15}\text{N}$ .

Для обчислення переходів ядер  $^{15}\text{N}$  і  $^{10}\text{B}$  у такі збуджені стани використовувався форм-фактор

$$V_\lambda(r) = -\frac{\delta_\lambda}{\sqrt{4\pi}} \frac{dU(r)}{dr}, \quad (1)$$

де  $\delta_\lambda$  – параметр деформації ядра  $\lambda$ -мультипольності,  $U(r)$  – потенціал взаємодії ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$ . У розрахунках перерізів непружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  за МЗКР використовувались параметри деформації ядер  $\delta_\lambda$ , подані в табл. 1. Там же подано також значення параметрів деформації  $\beta_\lambda = \delta_\lambda/R$ , де радіус ядра  $R = 1,25 A^{1/3}$  фм.

Таблиця 1. Параметри деформації ядер  $^{10}\text{B}$  та  $^{15}\text{N}$

Ядра	$0 \rightarrow E_{зб.}, \text{MeV}$	$J^\pi$	$\lambda$	$\delta_\lambda, \text{фм}$	$\beta_\lambda^*$	Література
$^{10}\text{B}$	$0 \rightarrow 0,718$	$1^+$	2	1,8	0,67	[5]
	$0 \rightarrow 2,154$	$1^+$	2	1,8	0,67	[5]
	$0 \rightarrow 3,587$	$2^+$	2	1,8	0,67	[5]
$^{15}\text{N}$	$0 \rightarrow 5,270$	$5/2^+$	3	1,0	0,32	[2]
	$0 \rightarrow 5,299$	$1/2^+$	1	1,0	0,32	[2]
	$0 \rightarrow 6,324$	$3/2^-$	2	1,0	0,32	[2]

$$*\beta_\lambda = \delta_\lambda/R \quad (R = 1,25 A^{1/3})$$

Із підгонки МЗКР-перерізів непружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  до експериментальних даних на кутах  $\theta_{\text{с.ц.м.}} < 40^\circ$  визначено параметри деформації  $\delta_1, \delta_2$  і  $\delta_3$  основного стану ядра  $^{15}\text{N}$  з мінімальною похибкою, що дорівнює точності абсолютної експериментальних даних  $\sim 20\%$ . Як і в роботі [2] отримано  $\delta_1 \approx \delta_2 \approx \delta_3 \approx 1,0 \pm 0,3$  фм.

У МЗКР-розрахунках пружного й непружного розсіяння  $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{10}\text{B}$  використовувався опти-

чний потенціал Вудса - Саксона (WS), параметри якого  $V, r_v, a_v, W, r_w, a_w$  визначено з підгонки теоретичних МЗКР-перерізів до експериментальних даних цього пружного розсіяння. Отримані значення оптичного потенціалу взаємодії ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  подано в табл. 2. Там же для порівняння подано значення цих параметрів потенціалів взаємодії ядер  $^{15}\text{N} + ^{11}\text{B}$  [2] та  $^{14}\text{N} + ^{10}\text{B}$  [3].

Таблиця 2. Параметри потенціалів взаємодії ядер

Ядра	$E_{\text{лаб}}, \text{MeV}$	$V_0, \text{MeV}$	$r_v, \text{фм}$	$a_v, \text{фм}$	$W_s, \text{MeV}$	$r_w, \text{фм}$	$a_w, \text{фм}$	Література
$^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$	81	190	0,790	0,750	12,0	1,250	0,750	Дана робота
$^{15}\text{N} + ^{11}\text{B}$	84	200	0,790	0,750	11,0	1,250	0,750	[2]
$^{14}\text{N} + ^{10}\text{B}$	50	83,15	0,920	0,770	23,0	1,290	0,393	[3]

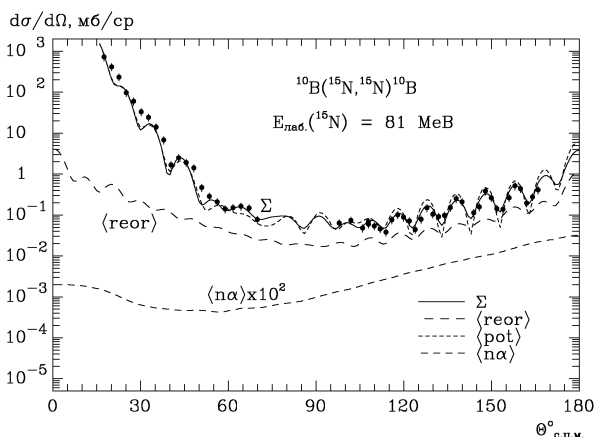


Рис. 7. Диференціальні перерізи пружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{10}\text{B}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81 \text{ MeV}$ . Кривими показано розрахунки за МЗКР перерізів різних процесів пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  з використанням потенціалу WS (див. табл. 2).

На рис. 7 показано МЗКР-розрахунки для пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  у порівнянні з експериментальними даними:

- потенціальне розсіяння (крива  $\langle \text{pot} \rangle$ );
- переорієнтація спіна ядра  $^{10}\text{B}$  (крива  $\langle \text{reor} \rangle$ );
- внесок у пружне розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  реакції  $^{10}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{10}\text{B})^{15}\text{N}$  із врахуванням передач  $\alpha$ -частинок та нейтронів (див. рис. 6).

У розрахунках цієї реакції використано спектроскопічні амплітуди (фактори), обчислені в рамках ТІМО [6] із використанням програми DESNA [7, 8]. Спектроскопічні амплітуди подано в табл. 3.

Суцільною кривою  $\Sigma$  показано МЗКР-розрахунки пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  із врахуванням внесків усіх процесів. Видно, що основну роль у розсіянні ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  відіграє потенціальне розсіяння.

Таблиця 3. Спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів  $x$  у системах  $A = C + x$ 

$A$	$C$	$x$	$nL_J$	$S_x$
$^{11}\text{B}$	$^{10}\text{B}$	$n$	$1P_{3/2}$	$-1,347^{(a)}$
$^{14}\text{N}$	$^{10}\text{B}$	$\alpha$	$2D_2$	$0,111$
			$1G_4$	$0,741$
$^{15}\text{N}$	$^{11}\text{B}$	$\alpha$	$2D_2$	$0,435^{(a)}$
$^{15}\text{N}$	$^{14}\text{N}$	$n$	$1P_{1/2}$	$-1,091^{(a)}$
			$1P_{3/2}$	$0,386$

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

Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  для збуджених станів 0,718 МеВ ( $1^+$ ), 2,154 МеВ ( $1^+$ ), 3,587 МеВ ( $2^+$ ) ядра  $^{10}\text{B}$  показано на рис. 8, а для збуджених станів 5,270 МеВ ( $5/2^+$ ), 5,299 МеВ ( $1/2^+$ ), 6,324 МеВ ( $3/2^-$ ) ядра  $^{15}\text{N}$  – на рис. 9.

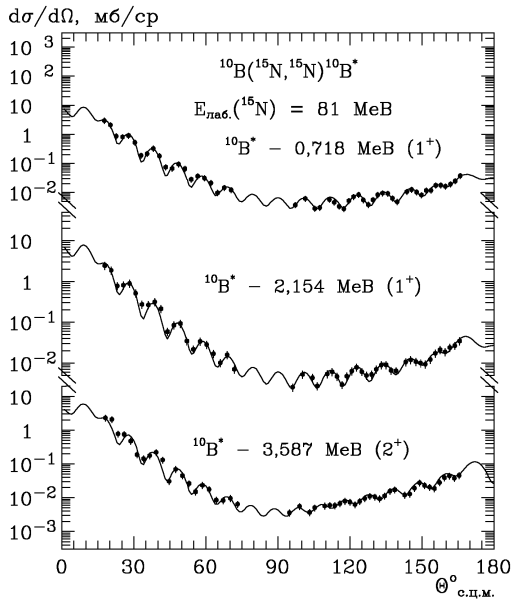


Рис. 8. Диференціальні перерізи непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  для збуджених станів 0,718 МеВ ( $1^+$ ), 2,154 МеВ ( $1^+$ ) та 3,587 МеВ ( $2^+$ ) ядра  $^{10}\text{B}$ .

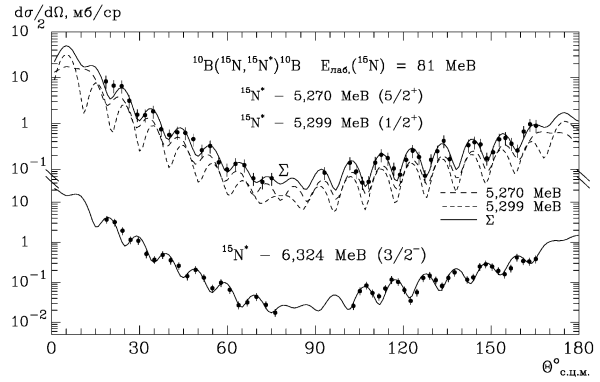


Рис. 9. Диференціальні перерізи непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  для збуджених станів 5,270 МеВ ( $5/2^+$ ) + 5,299 МеВ ( $1/2^+$ ) та 6,324 МеВ ( $3/2^-$ ) ядра  $^{15}\text{N}$ .

#### 4. Основні результати та висновки

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного та непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{10}\text{B}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ для основних станів ядер  $^{15}\text{N}$ ,  $^{10}\text{B}$  та збуджених станів 5,270 МеВ ( $5/2^+$ ) + 5,299 МеВ ( $1/2^+$ ), 6,323 МеВ ( $3/2^-$ ) ядра  $^{15}\text{N}$  і збуджених станів 0,718 МеВ ( $1^+$ ), 2,154 МеВ ( $1^+$ ) і 3,587 МеВ ( $2^+$ ) ядра  $^{10}\text{B}$ . Експериментальні дані отримано в широкому діапазоні кутів.

Експериментальні дані проаналізовано за МЗКР із включенням до схеми зв'язку каналів пружного й непружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  та реакцій передач нейтронів і  $\alpha$ -кластерів. Вважалося, що збудження ядер мають колективну природу (ротаційні та вібраційні). У теоретичних розрахунках використовувався оптичний потенціал WS, параметри якого визначено з підгонки теоретичних перерізів пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  до експериментальних даних. З аналізу непружного розсіяння  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$  визначено параметри деформації цих ядер.

Встановлено, що *потенціальне* розсіяння відіграє основну роль серед можливих ядерних процесів при взаємодії ядер  $^{15}\text{N} + ^{10}\text{B}$ .

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. E. Piasecki et al. *Project ICARE at HIL* (Warsaw: Heavy Ion Laboratory, 2007) 38 p.
2. A.T. Rudchik et al.  $^{15}\text{N}$  elastic and inelastic scattering by  $^{11}\text{B}$  at 84 MeV. *Nucl. Phys. A* 939 (2015) 1.
3. Marzhan Nassurulla et al. New measurements and reanalysis of  $^{14}\text{N}$  elastic scattering on  $^{10}\text{B}$  target. *Chinese Physics C* 44(10) (2020) 104103.
4. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* 7 (1988) 167.
5. A.T. Rudchik et al. Isotopic effects in the  $^7\text{Li} + ^{10,11}\text{B}$  elastic and inelastic scattering. *Eur. Phys. J. A* 33 (2007) 317.
6. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the  $p$ -shell nuclei. *Phys. Rev. C* 15 (1977) 84.
7. А.Т. Рудчик, Ю.М. Чувильский. Вычисление спектроскопических амплитуд для произвольных ассоциаций нуклонов в ядрах 1р-оболочки (программа DESNA). Препринт Ин-та ядерных исследований АН УССР. КИЯИ-82-12 (Киев, 1982) 27 с. / A.T. Rudchik, Yu.M. Tchuvil'sky. Calculation of spectroscopic amplitudes for arbitrary associations of nucleons in 1p-shell nuclei (program DESNA). Prepr. of the Institute for Nucl. Res., AS UkrSSR. KINR-82-12 (Kyiv, 1982) 27 p. (Rus)
8. А.Т. Рудчик, Ю.М. Чувильский. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1р-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач. УФЖ 30 (1985) 819. / A.T. Rudchik, Yu.M. Tchuvil'sky. Spectroscopic amplitudes of multinucleon clusters in 1p-shell nuclei and analysis of multinucleon transfer reactions. *Ukrainian Journal of Physics* 30(6) (1985) 819. (Rus)

A. T. Rudchik<sup>1,\*</sup>, A. A. Rudchik<sup>1</sup>, V. V. Khejlo<sup>1</sup>, K. Rusek<sup>2</sup>, K. W. Kemper<sup>3</sup>, E. Piasecki<sup>2</sup>, A. Stolarz<sup>2</sup>,  
A. Trzcińska<sup>2</sup>, Val. M. Pirnak<sup>1</sup>, O. A. Ponkratenko<sup>1</sup>, E. I. Koshchy<sup>4</sup>, O. E. Kutsyk<sup>1</sup>,  
S. Yu. Mezhevych<sup>1</sup>, A. P. Ilyin<sup>1</sup>, Yu. M. Stepanenko<sup>1</sup>, V. V. Uleshchenko<sup>1</sup>, Yu. O. Shyrma<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Heavy Ion Laboratory, University of Warsaw, Warsaw, Poland

<sup>3</sup> Physics Department, Florida State University, Tallahassee, USA

<sup>4</sup> Cyclotron Institute, Texas A&M University, College Station, USA

\*Corresponding author: rudchik@kinr.kiev.ua

### ELASTIC AND INELASTIC SCATTERING OF <sup>15</sup>N IONS BY <sup>10</sup>B AT ENERGY 81 MeV. ISOTOPIC EFFECTS IN SCATTERING OF <sup>15</sup>N + <sup>10</sup>B, <sup>15</sup>N + <sup>11</sup>B, <sup>14</sup>N + <sup>10</sup>B NUCLEI

New experimental data of angular distributions for the elastic and inelastic scattering of <sup>15</sup>N ions by <sup>10</sup>B nuclei were obtained at the energy  $E_{\text{lab}}(^{15}\text{N}) = 81$  MeV. The experimental data were analyzed within the coupled-reaction channels method (CRC). The Woods - Saxon optical potentials were used for nuclei interactions in the calculations. The potential's parameters for the interaction of <sup>15</sup>N + <sup>10</sup>B nuclei were deduced as well as it was measured the angular distribution of the elastic scattering for these nuclei. The experimental data of the <sup>15</sup>N + <sup>10</sup>B elastic scattering are compared with data of the <sup>15</sup>N + <sup>11</sup>B and <sup>14</sup>N + <sup>10</sup>B scatterings. It was discovered isotopic effects in the scatterings of these three nuclear couples due to the difference in the optical potentials of the interaction of these nuclei and their structure. New experimental data of inelastic scattering of <sup>15</sup>N + <sup>10</sup>B nuclei for 0.718 - 3.587 MeV states of <sup>10</sup>B nucleus and for 5.270 - 6.324 MeV states of <sup>15</sup>N nucleus were measured. These data were analyzed within the CRC method using the translation-invariant shell model for collective excitations of <sup>15</sup>N and <sup>10</sup>B nuclei. Information about deformations of these nuclei was obtained.

*Keywords:* nuclear reactions <sup>10</sup>B(<sup>15</sup>N, <sup>15</sup>N)<sup>10</sup>B,  $E = 81$  MeV, particle spectra of <sup>10</sup>B and <sup>15</sup>N,  $\sigma(\theta)$ , potential of <sup>10</sup>B + <sup>15</sup>N nuclei interaction, deformations of <sup>10</sup>B and <sup>15</sup>N nuclei.

Надійшла/Received 07.07.2022