

А. Т. Рудчик<sup>1</sup>, О. В. Геращенко<sup>1</sup>, К. А. Черкас<sup>1</sup>, А. А. Рудчик<sup>1</sup>, С. Клічевські<sup>2</sup>, Вал. М. Пірнак<sup>1</sup>,  
 Е. П'ясецькі<sup>3</sup>, К. Русек<sup>3</sup>, А. Трціньська<sup>3</sup>, С. Б. Сакута<sup>4</sup>, Р. Сюдак<sup>2</sup>, І. Строек<sup>5</sup>, А. Столяж<sup>3</sup>,  
 Є. І. Кошій<sup>6</sup>, А. О. Барабаш<sup>1</sup>, А. П. Ільїн<sup>1</sup>, О. А. Понкратенко<sup>1</sup>, Ю. М. Степаненко<sup>1</sup>,  
 В. В. Улещенко<sup>1</sup>, Ю. О. Ширма<sup>1</sup>, Я. Хоїньські<sup>3</sup>, А. Щурек<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Інститут ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського, Краків, Польща

<sup>3</sup> Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

<sup>4</sup> Національний дослідницький центр «Курчатовський інститут», Москва, Росія

<sup>5</sup> Національний центр ядерних досліджень, Варшава, Польща

<sup>6</sup> Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків

## ПРУЖНЕ ТА НЕПРУЖНЕ РОЗСІЯННЯ ІОНІВ <sup>15</sup>N ЯДРАМИ <sup>11</sup>B ПРИ ЕНЕРГІЇ 84 МеВ

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного та непружного розсіяння ядер <sup>11</sup>B + <sup>15</sup>N при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ. Експериментальні дані проаналізовано за оптичною моделлю та методом зв'язаних каналів реакцій. Пружне та непружне розсіяння, процеси реорієнтації спінів ядер <sup>11</sup>B і <sup>15</sup>N в основних та збуджених станах, а також найбільш важливі реакції передачі включались у схему зв'язку каналів. Визначено параметри оптичного потенціалу взаємодії ядер <sup>11</sup>B + <sup>15</sup>N в основних та збуджених станах, а також параметри деформації цих ядер. Оцінено внески реакцій одно- та двоступінчастих передачі у диференціальні перерізи пружного й непружного розсіяння ядер <sup>11</sup>B + <sup>15</sup>N.

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

### Вступ

Дослідження ядерних процесів при взаємодії рідкісних іонів типу <sup>15</sup>N (<sup>14</sup>N – 99,63 %, <sup>15</sup>N – 0,37 %) з ядрами заслуговують на значну увагу та мають дуже важливе значення для отримання відомостей про структуру та взаємодію рідкісних нестабільних ядер, утворених у реакціях. Відомі лише поодинокі експериментальні дослідження з такими іонами.

У цій роботі досліджено пружне та непружне розсіяння іонів <sup>15</sup>N ядрами <sup>11</sup>B при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ, експериментальні дані якого одночасно з реакціями <sup>11</sup>B(<sup>15</sup>N, X) було вперше поміряно в даній роботі. Експериментальні дані досліджено за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) із включенням у схему зв'язку як каналів розсіяння, так і найбільш вагомих реакцій передачі. При цьому вважалось, що низькоенергетично збуджені рівні ядер мають колективну природу, а в розрахунках перерізів реакцій використовувались спектроскопічні амплітуди переданих у реакціях частинок, обчислені в рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки.

### Методика експерименту

Диференціальні перерізи пружного та непружного розсіяння іонів <sup>15</sup>N ядрами <sup>11</sup>B одночасно з реакціями <sup>11</sup>B(<sup>15</sup>N, X) поміряно на циклотроні U-200P Лабораторії важких іонів Варшавського університету при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ. Для отримання пучка іонів <sup>15</sup>N було використано збагачену цим ізотопом кальцієву селітру ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ). Розкид енергії іонів у пучку на мішені не перевищував 0,5 %. В експерименті використовувалась самопідтримна мішень бору природного ізотопного складу (<sup>11</sup>B – 80 %, <sup>10</sup>B – 20 %) товщиною ~ 0,5 мг/см<sup>2</sup>.

Експеримент проводився на експериментальній установці ICARE [1]. Для реєстрації та ідентифікації продуктів ядерних процесів в експерименті використовувалась  $\Delta E$ - $E$ -методика з кремнієвими  $\Delta E$ - та  $E$ -детекторами товщиною 40 мкм та 0,3 мм відповідно.

Типовий двовимірний  $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій <sup>11</sup>B(<sup>15</sup>N, X) показано на рис. 1. Видно, що експериментальна методика забезпечувала вимірювання продуктів реакцій із зарядами  $Z = 3 - 8$  та ідентифікацію їх як за зарядами, так і за масами.

© А. Т. Рудчик, О. В. Геращенко, К. А. Черкас, А. А. Рудчик, С. Клічевські, Вал. М. Пірнак, Е. П'ясецькі, К. Русек, А. Трціньська, С. Б. Сакута, Р. Сюдак, І. Строек, А. Столяж, Є. І. Кошій, А. О. Барабаш, А. П. Ільїн, О. А. Понкратенко, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма, Я. Хоїньські, А. Щурек, 2014

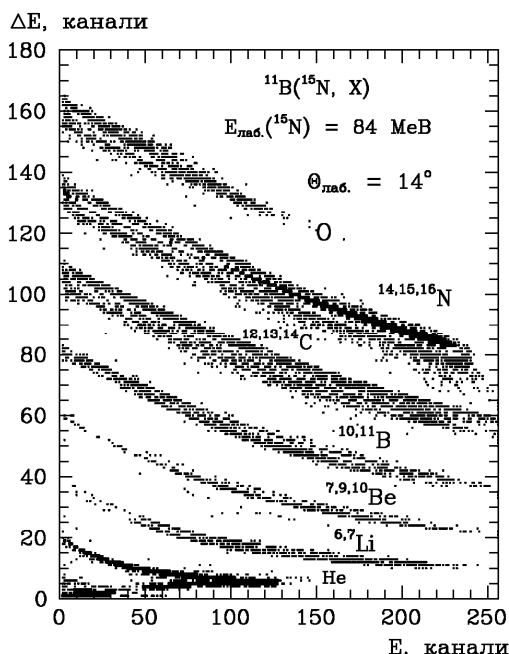


Рис. 1. Типовий  $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій  $^{11}\text{B}(^{15}\text{N}, X)$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ.

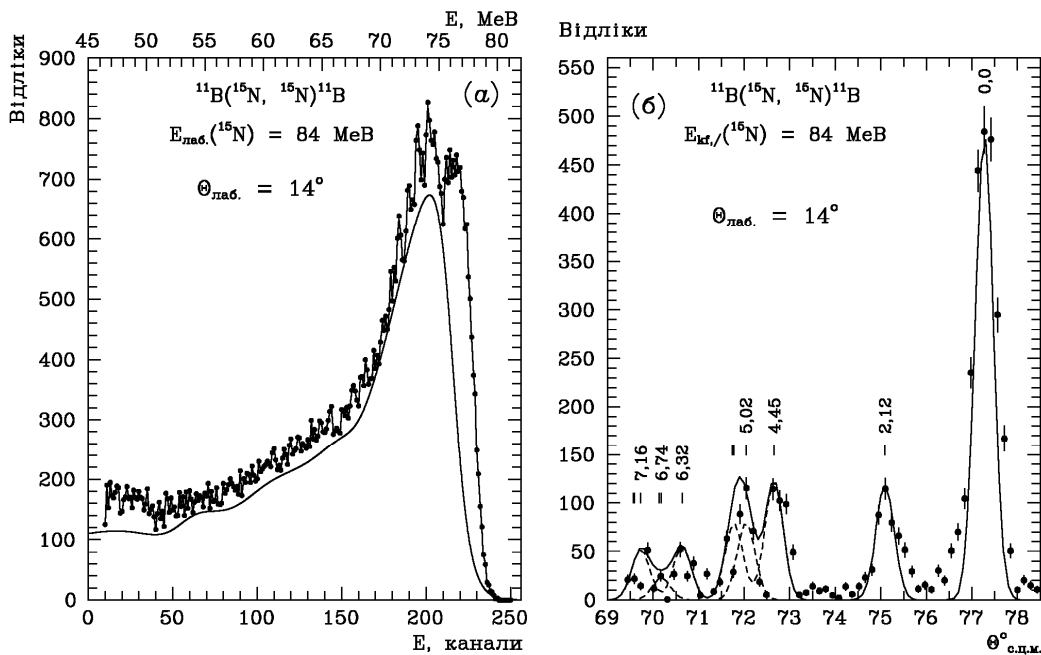


Рис. 2. Типові енергетичні спектри  $^{15}\text{N}$  з розсіяння  $^{11}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{11}\text{B}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ з неперервним фоном від багаточастинкових реакцій (а) та з вилученим фоном (б). Криві – симетричні функції Гаусса (б).

Типові енергетичні спектри  $^{15}\text{N}$  та  $^{11}\text{B}$  показано на рис. 2 і 3 відповідно: а) експериментальні спектри з неперервним фоном від багаточастин-

кових реакцій та б) з вилученим фоном.

Фон наближувався параметризованими асиметричними сігмоїдальними функціями

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

методом підгонки параметрів  $E_{1i}$ ,  $E_{2i}$ ,  $H_{1i}$ ,  $H_{2i}$  (криві на рис. 2, а і 3, а) до глибоких мінімумів спектрів, а піки спектрів з вилученими фонами -

симетричними гауссіанами (див. рис. 2, б і 3, б). Для обробки енергетичних спектрів використовувалась відома програма PEAKFIT.

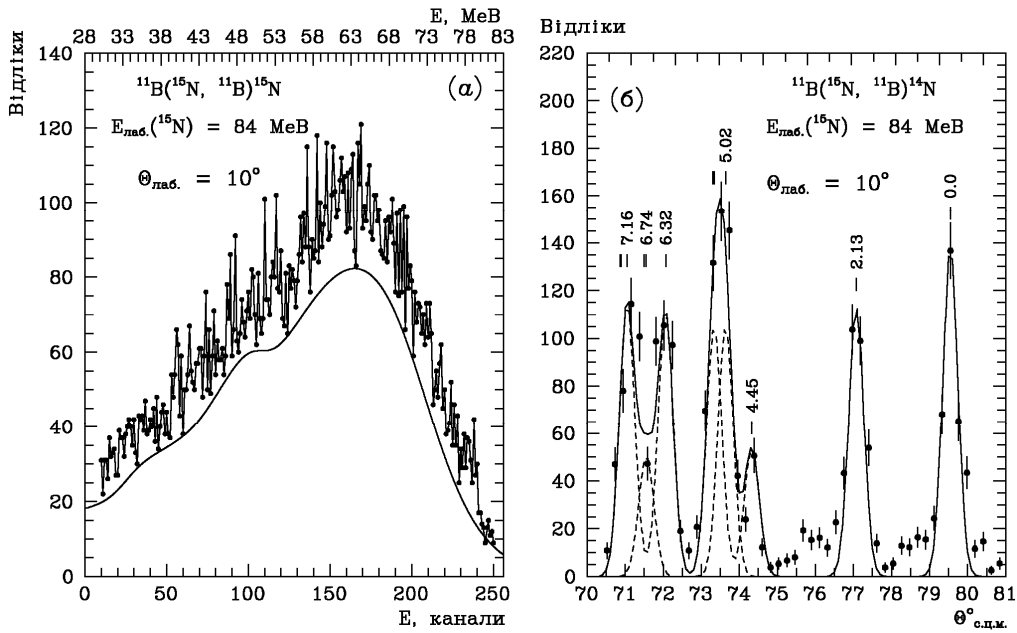


Рис. 3. Типові енергетичні спектри  $^{11}\text{B}$  з реакції  $^{11}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{11}\text{B})^{15}\text{N}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ з неперервним фоном від багаточастинкових реакцій (а) та з вилученим фоном (б). Криві – симетричні функції Гаусса.

Площі гауссіанів використовувались для обчислення диференціальних перерізів розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$ . Похибки в обчисленні площ частково перекритих піків не перевищували 20 %. Для повністю перекритих піків ці похибки становили 30 - 40 %.

Отримані у відносних одиницях перерізи пружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  нормувались до обчислених за оптичною моделлю (ОМ) на малих кутах ( $\theta_{\text{с.ц.м.}} < 40^\circ$ ), де домінує кулонівське розсіяння та ОМ-перерізи слабо залежать від невизначеності параметрів оптичного потенціалу. Отриманий множник абсолютизації перерізів пружного розсіяння цих ядер використовувався також для

нормування диференціальних перерізів непружного розсіяння. Похибка абсолютизації диференціальних перерізів пружного та непружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  не перевищує 20 %.

Отримані дані диференціальних перерізів пружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ показано на рис. 4 залежно від переданого імпульсу  $q_t$ . Там же для порівняння представлено також експериментальні дані пружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{14}\text{N}$  при енергіях  $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 41$  МеВ і 77 МеВ [2]. Видно, що при малих значеннях  $q_t$  (малі кути) експериментальні дані добре узгоджуються.

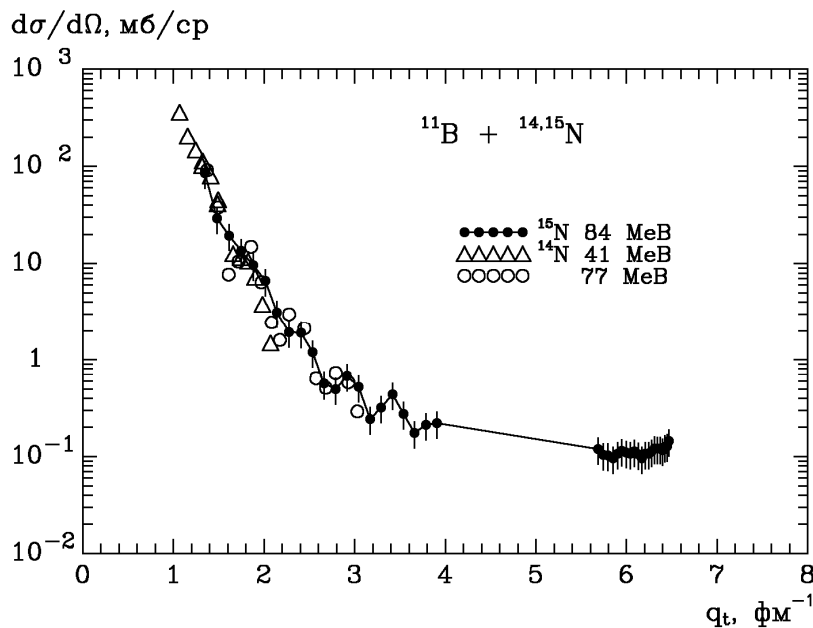


Рис. 4. Диференціальні перерізи пружного розсіяння  $^{11}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{11}\text{B}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ та  $^{11}\text{B}(^{14}\text{N}, ^{14}\text{N})^{11}\text{B}$  при енергіях  $E_{\text{лаб.}}(^{14}\text{N}) = 41$  МеВ і 77 МеВ [2] залежно від переданого імпульсу  $q_t$ .

**Аналіз експериментальних даних**

**Методи розрахунків**

Експериментальні дані пружного та непружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  аналізувались за ОМ та МЗКР, використовуючи для вхідного та вихідних каналів розсіяння потенціал типу Вудса - Саксона з об'ємним поглинанням

$$U(r) = V_0 \left[ 1 + \exp\left(\frac{r - R_V}{a_V}\right) \right]^{-1} + iW_S \left[ 1 + \exp\left(\frac{r - R_W}{a_W}\right) \right]^{-1} \quad (2)$$

та кулонівський потенціал рівномірно зарядженої кулі

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

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 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  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  для переходів, показаних на рис. 5, процес реорієнтації спіна  $^{11}\text{B}$  в основному та збуджених станах (показано дугами на рис. 5), а також реакції одно- та двоступінчастих передач, діаграми яких представлено на рис. 6.

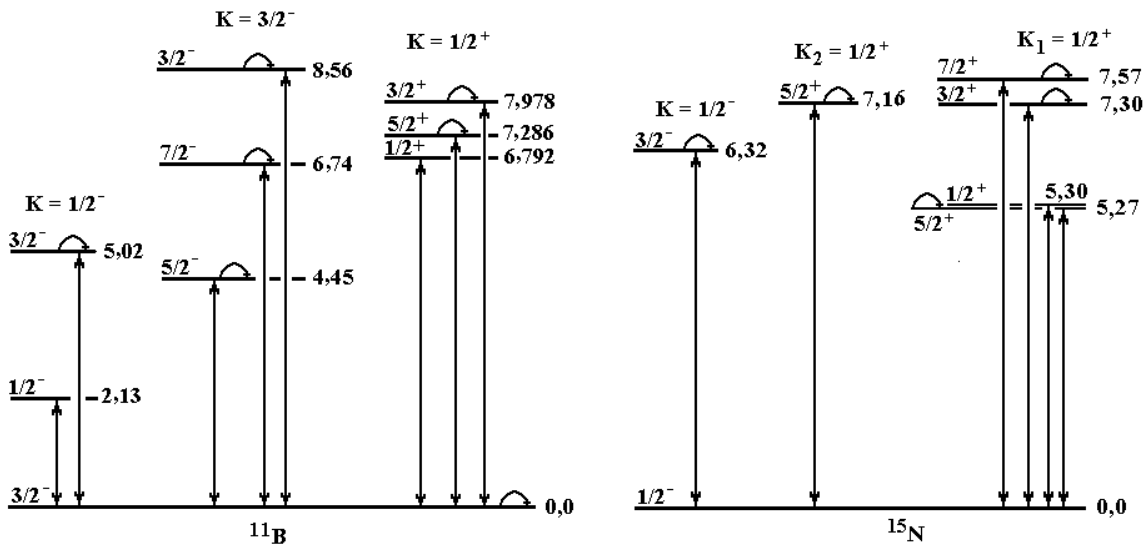


Рис. 5. Схеми переходів ядер  $^{11}\text{B}$  та  $^{15}\text{N}$  у збуджені стани. Дугами показано процес реорієнтації спінів ядер.

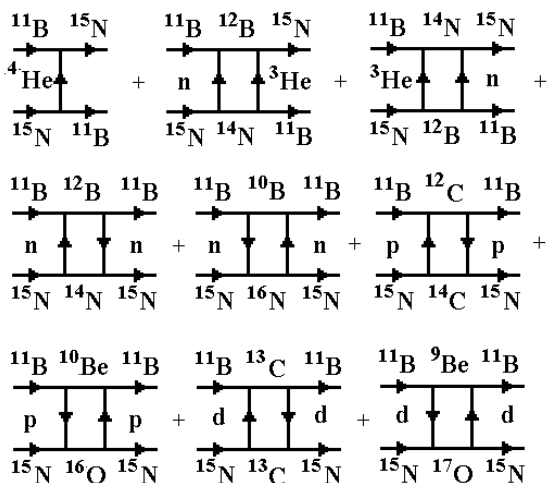


Рис. 6. Діаграми одно- та двоступінчастих передач у розсіянні ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$ .

При цьому вважалось, що низькоенергетичні збудження ядер мають колективну природу (ро-

таційну або вібраційну). При обчисленні матричних елементів переходів використовувався форм-фактор

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

де  $\delta_\lambda$  - довжина деформації ядра  $\lambda$ -мультимольності.

Параметри деформації ядер  $^{11}\text{B}$  і  $^{15}\text{N}$  подано в табл. 1.

У МЗКР-розрахунках у схему зв'язку каналів включались також одно- та двоступінчасті реакції передач, діаграми яких подано на рис. 6.

Необхідні для розрахунків спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів  $x$  в ядерних системах  $A = C + x$

$$S_x = \left( \frac{A}{x} \right)^{1/2} \langle \Psi_A | \Psi_C \Psi_x; \varphi_{xC} \rangle \quad (5)$$

обчислювались у рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки (ТМО) [5] за допомогою програми DESNA [6, 7] з використанням таблиць хвильових функцій ядер 1р-оболонки [8]. Тут  $\Psi_i$  -

хвильові функції внутрішніх станів елементів системи,  $\varphi_{xc}$  – хвильова функція руху кластера  $x$  відносно кора  $C$ . Спектроскопічні амплітуди  $S_x$  подано в табл. 2.

Таблиця 1. Параметри деформації ядер

Ядра	$E_{зб.}$ MeV	$J^\pi$	$\lambda$	$\delta_\lambda$ , фм	$\beta_\lambda^*$	Література	
$^{11}\text{B}$	2,125	1/2 <sup>-</sup>	2	1,2	0,43	[3]	
	4,445	5/2 <sup>-</sup>	2	1,2	0,43	[3]	
			4	1,0	0,36	[3]	
	5,021	3/2 <sup>-</sup>	2	1,2	0,43	[3]	
	6,743	7/2 <sup>-</sup>	2	1,2	0,43	[3]	
			4	1,0	0,36	[3]	
	6,792	1/2 <sup>+</sup>	1	1,0	0,36	[4]	
	7,286	5/2 <sup>+</sup>	1	1,0	0,36	[4]	
			3	1,2	0,43	[4]	
	7,978	3/2 <sup>+</sup>	1	1,0	0,36	[4]	
			3	1,2	0,43	[4]	
	8,560	3/2 <sup>-</sup>	2	1,2	0,43	[4]	
	$^{15}\text{N}$	5,270	5/2 <sup>+</sup>	3	1,0	0,32	
		5,299	1/2 <sup>+</sup>	1	1,0	0,32	
6,324		3/2 <sup>-</sup>	2	1,0	0,32		
7,155		5/2 <sup>+</sup>	3	1,0	0,32		
7,301		3/2 <sup>+</sup>	1	1,0	0,32		
			3	1,0	0,32		
7,567		7/2 <sup>+</sup>	3	1,0	0,32		

$$*\beta_\lambda = \delta_\lambda/R, R = 1,25A^{1/3} \text{ фм.}$$

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

$A$	$C$	$x$	$nL_i$	$S_x$	$A$	$C$	$x$	$nL_i$	$S_x$		
$^{11}\text{B}$	$^9\text{Be}$	d	$2S_1$	-0,607 <sup>(a)</sup>	$^{15}\text{N}$	$^{11}\text{B}$	$\alpha$	$2D_2$	0,435 <sup>(a)</sup>		
			$1D_1$	-0,109 <sup>(a)</sup>				$2P_{1/2}$	0,254 <sup>(a)</sup>		
			$1D_3$	0,610 <sup>(a)</sup>				$2P_{3/2}$	-0,090		
$^{11}\text{B}$	$^{10}\text{Be}$	p	$1P_{3/2}$	0,699	$^{15}\text{N}$	$^{13}\text{C}$	d	$2S_1$	0,248 <sup>(a)</sup>		
$^{11}\text{B}$			n	$1P_{3/2}$				-1,347 <sup>(a)</sup>	$1D_1$	0,444 <sup>(a)</sup>	
$^{12}\text{B}$	$^{11}\text{B}$	n		$1P_{1/2}$	-0,142 <sup>(a)</sup>	$^{15}\text{N}$	$^{14}\text{C}$	p	$1P_{1/2}$	-0,598	
			$1P_{3/2}$	-0,127	$^{15}\text{N}$				$^{14}\text{N}$	n	$1P_{1/2}$
$^{12}\text{C}$	$^{11}\text{B}$	p	$1P_{3/2}$	-1,706 <sup>(a)</sup>	$^{16}\text{N}$	$^{15}\text{N}$	n	$1P_{3/2}$			0,386
$^{13}\text{C}$			d	$2S_1$				-0,263	$^{16}\text{O}$	$^{15}\text{N}$	p
	$1D_1$	-0,162		$^{17}\text{O}$	$^{15}\text{N}$	d	$1D_2$	-0,276			
	$1D_2$	-0,485 <sup>(a)</sup>					$1D_3$	-0,074 <sup>(a)</sup>			
$^{14}\text{N}$	$^{11}\text{B}$	$^3\text{He}$	$2P_{1/2}$	-0,107 <sup>(a)</sup>							
			$2P_{3/2}$	-0,096							
			$1F_{5/2}$	-0,292 <sup>(a)</sup>							

$$^{(a)}S_{\text{FRESCO}} = (-1)^{J_c + J - J_x} S_x = -S_x.$$

Хвильові функції зв'язаних станів кластерів  $x$  у системах  $A = C + x$  обчислювались підгонкою глибини  $V_0$  потенціалу Вудса - Саксона з параметрами  $a_V = 0,65$  фм і  $r_V = 1,25 \cdot A^{1/3} / (C^{1/3} + x^{1/3})$  для отримання енергії зв'язку кластера  $x$  у цій системі.

Для розрахунків за ОМ використовувалась програма SPI-GENOA [9], а МЗКР-розрахунки виконувались за допомогою програми FRESCO [10].

### Пружне розсіяння ядер $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$

Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84$  MeB по-

казано на рис. 7 в абсолютних одиницях (а) та у відношенні до кулонівського розсіяння (б).

Спочатку експериментальні дані аналізувались за ОМ з метою визначення параметрів потенціалу взаємодії ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$ , при яких досягався задовільний опис даних на малих кутах, де домінує потенціальне розсіяння. Отриманий набір ОМ-параметрів  $\{X_i\} = \{V_{0b}, r_V, a_V, W_S, r_W, a_W\}$  потім уточнювався в МЗКР-розрахунках. Визначені таким чином параметри потенціалу взаємодії ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84$  MeB такі:

$V_0$ , MeV	$r_V$ , фм	$a_V$ , фм	$W_S$ , MeV	$r_W$ , фм	$a_W$ , фм
200	0,790	0,750	11	1,250	0,750

Помилка у визначенні параметрів потенціалу взаємодії ядер становить  $\sim 10\%$ .

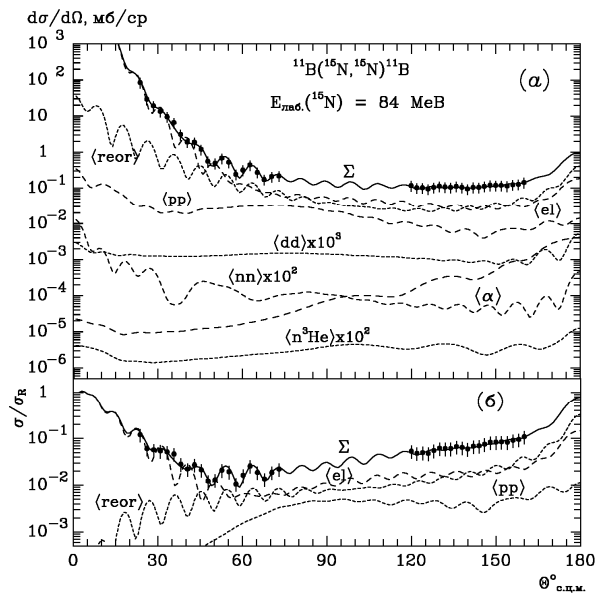


Рис. 7. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{11}\text{B}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84$  MeV. Штрихові криві – МЗКР-перерізи для різних процесів. Суцільні криві  $\Sigma$  – когерентні суми МЗКР-перерізів всіх механізмів.

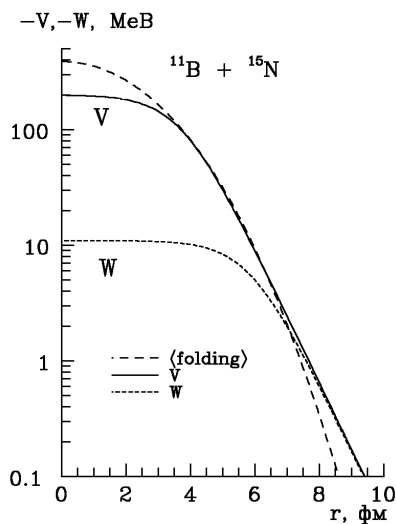


Рис. 8. Потенціал взаємодії ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  у порівнянні з фолдінг-потенціалом.

МЗКР-розрахунки пружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  показано кривими на рис. 7. Видно, що основну роль у розсіянні на малі кути відіграє потенціальне розсіяння (крива  $\langle el \rangle$ ), а на середні та великі кути – потенціальне розсіяння, реорієнтація  $^{11}\text{B}$  (крива  $\langle reor \rangle$ ) та двоступінчасті обміни протонами (крива  $\langle pp \rangle$ ). Роль послідовних передач нейтронів (крива  $\langle nn \rangle$ ), передач кластерів

$n + ^3\text{He}$  і  $^3\text{He} + n$  (крива  $\langle n^3\text{He} \rangle$ , когерентна сума), передачі  $\alpha$ -кластера (крива  $\langle \alpha \rangle$ ) та обмін дейтронами (крива  $\langle dd \rangle$ ) незначна. Кривими  $\Sigma$  показано когерентну суму МЗКР-перерізів пружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  за участю всіх процесів.

Потенціал взаємодії ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$ , отриманий з аналізу експериментальних даних розсіяння, порівнюється на рис. 8 з відповідним фолдінг-потенціалом, обчисленим за допомогою програми DFROT [11, 12].

### Непружне розсіяння ядер $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$

Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84$  MeV для переходів на збуджені рівні цих ядер представлено на рис. 9 і 10.

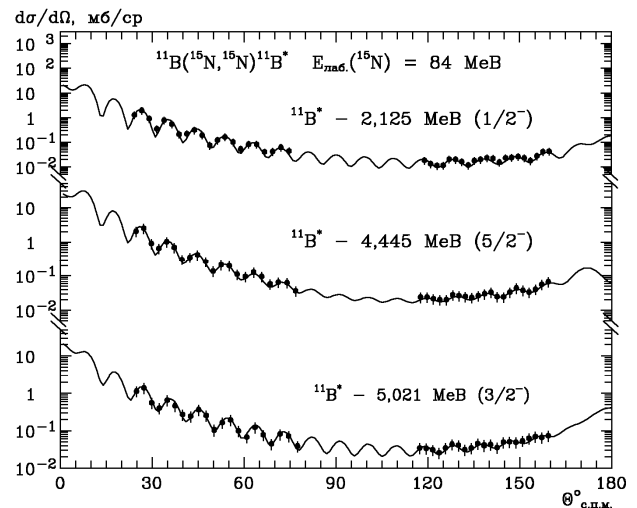


Рис. 9. Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{11}\text{B}^*$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84$  MeV для переходів на збуджені рівні  $^{11}\text{B}$ . Криві – МЗКР-перерізи.

Як зазначалось вище, вважалось, що низькоенергетичні збуджені стани ядер  $^{11}\text{B}$  і  $^{15}\text{N}$  мають колективну природу. Тому в МЗКР-розрахунках матричних елементів переходів на ці рівні використовувався форм-фактор (4) та параметри деформації ядер  $^{11}\text{B}$  і  $^{15}\text{N}$ , подані в табл. 1 разом з переданими орбітальними моментами  $\lambda$ . Параметри деформації цих ядер, узяті з робіт [3] і [4], тестувались та уточнювались при МЗКР-аналізі отриманих у цій роботі даних непружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$ . Помилка у визначенні параметрів деформації цих ядер становить  $\sim 20\%$ .

Для непружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$ , як і для пружного, також оцінювались можливі внески від реакцій передач та процесу реорієнтації спінів цих ядер у збуджених станах. Виявилось, що роль цих процесів у непружному розсіянні ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  незначна.

Як видно на рис. 9 і 10, експериментальні дані непружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84 \text{ MeV}$  задовільно описуються в усьому кутовому діапазоні МЗКР-перерізами для колективних переходів ядер  $^{11}\text{B}$  і  $^{15}\text{N}$  у збуджені стани з енергією до 8 MeV.

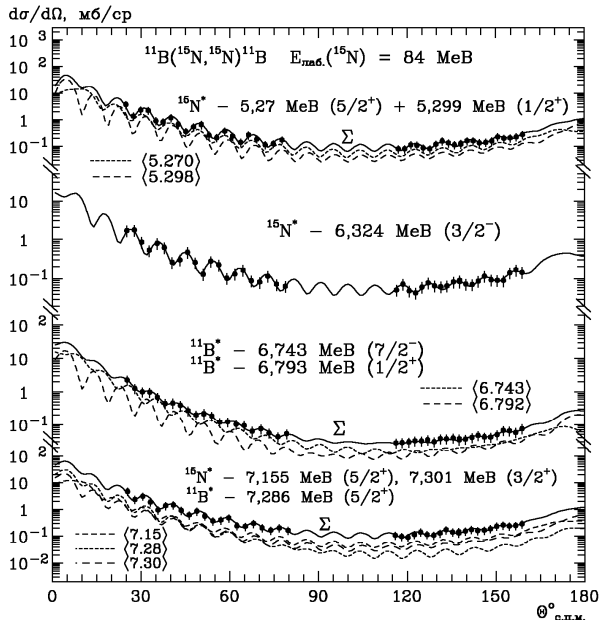


Рис. 10. Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{11}\text{B}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84 \text{ MeV}$  для переходів на збуджені рівні  $^{11}\text{B}$  і  $^{15}\text{N}$ . Криві – МЗКР-перерізи.

## Основні результати та висновки

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного та непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{11}\text{B}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84 \text{ MeV}$  для переходів на основні та збуджені рівні 2,125 - 7,285 MeV ядра  $^{11}\text{B}$  та 5,270 - 7,567 MeV ядра  $^{15}\text{N}$ . Дані отримано вперше.

Експериментальні дані проаналізовано за ОМ та МЗКР із включенням у схему зв'язку каналів пружного та непружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$ , процесів реорієнтації спінів цих ядер в основних і збуджених станах, а також найпростіших реакцій передачі.

Установлено, що в пружному розсіянні ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  домінує потенціальне розсіяння на малих кутах, а на середніх та великих кутах - потенціальне розсіяння, процес реорієнтації спіна ядра  $^{11}\text{B}$  і процес обміну протонами. Експериментальні дані непружного розсіяння ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  задовільно описуються МЗКР-перерізами для переходів ядер у збуджені стани колективної природи.

Визначено параметри потенціалу взаємодії ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  при енергії  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84 \text{ MeV}$  та параметри деформації ядер  $^{11}\text{B}$  і  $^{15}\text{N}$ . Цей потенціал, отриманий з аналізу експериментальних даних розсіяння  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$ , добре узгоджується з фолдінг-потенціалом у периферійній області взаємодії ядер.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Piasecki E., Antczak M., Devine J. et al. Project ICARE at HIL // Annual report 2006. Warsaw University. Heavy Ion Laboratory. - Warsaw, 2007. - P. 9, 38.
2. Liu M., Von Oertzen W., Jacmart J.C. et al. Investigation of one-nucleon transfer reactions between complex nuclei at incident energies between 3 MeV/nucleon and 8 MeV/nucleon // Nucl. Phys. A. - 1971. - Vol. 165. - P. 118 - 128.
3. Rudchik A.T., Budzanowski A., Chernievsky V.K. et al. The  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  elastic and inelastic scattering at  $E_{\text{лаб.}}(^{11}\text{B}) = 49 \text{ MeV}$  and energy dependence of the  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  interaction // Nucl. Phys. A. - 2001. - Vol. 695. - P. 51 - 68.
4. Rudchik A.T., Kyryanchuk V.M., Budzanowski A. et al. Mechanism of large angle enhancement of the  $^9\text{Be} + ^{11}\text{B}$  scattering // Nucl. Phys. A. - 2003. - Vol. 714. - P. 391 - 411.
5. Smirnov Yu.F., Tchuvil'sky Yu.M. Cluster spectroscopic factors for the  $p$ -shell nuclei // Phys. Rev. C. - 1977. - Vol. 15. - P. 84 - 93.
6. Рудчик А.Т., Чувильський Ю.М. Вычисление спектроскопических амплитуд для произвольных ассоциаций нуклонов в ядрах  $1p$ -оболочки (программа DESNA). - Киев, 1982. - 27 с. - (Препр. /АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-82-12).
7. Рудчик А.Т., Чувильський Ю.М. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах  $1p$ -оболочки и анализ реакций многонуклонных передач // УФЖ. - 1985. - Т. 30, № 6. - С. 819 - 825.
8. Бояркина А.Н. Структура ядер  $1p$ -оболочки. - М.: Изд-во Москов. ун-та, 1973. - 62 с.
9. Nilsson B.S. SPI-GENOA: an Optical Model Search Code. - 1976 // (Report / A Niels Bohr Institute).
10. Thompson I.J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comp. Phys. Rep. - 1988. - Vol. 7. - P. 167 - 212.
11. Cook J. DFPO: a program for the calculation of double folded potentials // Comp. Phys. Com. - 1982. - Vol. 25. - P. 125.
12. De Vries H., De Jager C.W., De Vries C. Atomic data and nuclear data tables. - 1987. - Vol. 36. - P. 495.

**А. Т. Рудчик, О. В. Геращенко, К. А. Черкас, А. А. Рудчик, С. Кличевски, Вал. М. Пирнак,  
Э. Пясеcki, К. Русек, А. Трциньска, С. Б. Сакута, Р. Сюдак, И. Строек, А. Столяж,  
Е. И. Коший, А. О. Барабаш, А. П. Ильин, О. А. Понкратенко,  
Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма, Я. Хоиньски, А. Щурек**

### УПРУГОЕ И НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ИОНОВ $^{15}\text{N}$ ЯДРАМИ $^{11}\text{B}$ ПРИ ЭНЕРГИИ 84 МэВ

<sup>1</sup> *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

<sup>2</sup> *Институт ядерной физики им. Г. Неводинчаньского, Краков, Польша*

<sup>3</sup> *Лаборатория тяжелых ионов Варшавского университета, Варшава, Польша*

<sup>4</sup> *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

<sup>5</sup> *Национальный центр ядерных исследований, Варшава, Польша*

<sup>6</sup> *Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков*

Получены новые экспериментальные данные дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  при энергии  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84$  МэВ. Экспериментальные данные проанализированы по оптической модели и методу связанных каналов реакций. Упругое и неупругое рассеяние, процессы реориентации спинов ядер  $^{11}\text{B}$  и  $^{15}\text{N}$  в основных и возбужденных состояниях, а также наиболее важные реакции передач были включены в схему связи каналов. Определены параметры оптического потенциала взаимодействия ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  в основных и возбужденных состояниях, а также параметры деформации этих ядер. Оценены вклады реакций одно- и двухступенчатых передач в дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния ядер  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$ .

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

**A. T. Rudchik, O. V. Herashchenko, K. A. Chercas, A. A. Rudchik, S. Kliczewski, Val. M. Pirnak,  
E. Piasecki, K. Rusek, A. Trzecińska, S. B. Sakuta, R. Siudak, I. Strojek, A. Stolarz,  
E. I. Koshchy, A. O. Barabash, A. P. Ilyin, O. A. Ponkratenko,  
Yu. M. Stepanenko, V. V. Uleshchenko, Yu. O. Shyrma, J. Choiński, A. Szczurek**

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

<sup>2</sup> *H. Niewodniczański Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences, Cracow, Poland*

<sup>3</sup> *Heavy Ion Laboratory, Warsaw University, Warsaw, Poland*

<sup>4</sup> *National Research Centre "Kurchatov Institute" Moscow, Russia*

<sup>5</sup> *National Centre for Nuclear Research, Warsaw, Poland*

<sup>6</sup> *V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine*

### ELASTIC AND INELASTIC SCATTERING OF $^{15}\text{N}$ IONS BY $^{11}\text{B}$ AT 84 MeV

Angular distributions of the  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  elastic and inelastic scattering were measured at  $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 84$  MeV. The data were analyzed within the optical model and coupled-reaction-channels method. The elastic and inelastic scattering, reorientations of  $^{11}\text{B}$  and  $^{15}\text{N}$  in ground and excited states as well as the important one- and two-step transfer reactions were included in the channels-coupling-scheme. The  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  optical potential parameters as well as deformation parameters of these nuclei were deduced. The contributions of one- and two-step transfers in the  $^{11}\text{B} + ^{15}\text{N}$  elastic and inelastic scattering channels were estimated.

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

#### REFERENCES

1. *Piasecki E., Antczak M., Devine J. et al.* Project ICARE at HIL // Annual report 2006. Warsaw University. Heavy Ion Laboratory. - Warsaw, 2007. - P. 9, 38.
2. *Liu M., Von Oertzen W., Jacmart J.C. et al.* Investigation of one-nucleon transfer reactions between complex nuclei at incident energies between 3 MeV/nucleon and 8 MeV/nucleon // Nucl. Phys. A. - 1971. - Vol. 165. - P. 118 - 128.
3. *Rudchik A.T., Budzanowski A., Chernievsky V.K. et al.* The  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  elastic and inelastic scattering at  $E_{\text{лаб.}}(^{11}\text{B}) = 49$  MeV and energy dependence of the  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  interaction // Nucl. Phys. A. - 2001. - Vol. 695. - P. 51 - 68.
4. *Rudchik A.T., Kyryanchuk V.M., Budzanowski A. et al.* Mechanism of large angle enhancement of the  $^9\text{Be} + ^{11}\text{B}$  scattering // Nucl. Phys. A. - 2003. - Vol. 714. - P. 391 - 411.
5. *Smirnov Yu.F., Tchuvil'sky Yu.M.* Cluster spectroscopic factors for the  $p$ -shell nuclei // Phys. Rev. C. - 1977. - Vol. 15. - P. 84 - 93.
6. *Rudchik A.T., Chuvil'skij Yu.M.* Calculation of spectroscopic amplitudes for arbitrary associations of nucleons in nuclei 1p-shell (program DESNA). - Kyiv, 1982. - 27 p. - (Prepr. / AS USSR. Institute for Nucl.



- Res.; KINR-82-12). (Rus)
7. Rudchik A.T., Chuvil'skij Yu.M. // UFZh. - 1985. - Vol. 30, No. 6. - P. 819 - 825. (Rus)
  8. Boyarkina A.N. The structure of the  $1p$ -shell nuclei. - Moskva: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1973. - 62 p. (Rus)
  9. Nilsson B.S. SPI-GENOA: an Optical Model Search Code. - 1976 // (Report / A Niels Bohr Institute).
  10. Thompson I.J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comp. Phys. Rep. - 1988. - Vol. 7. - P. 167 - 212.
  11. Cook J. DFPOT: a program for the calculation of double folded potentials // Comp. Phys. Com. - 1982. - Vol. 25. - P. 125.
  12. De Vries H., De Jager C.W., De Vries C. Atomic data and nuclear data tables. - 1987. - Vol. 36. - P. 495.

Надійшла 07.08.2014

Received 07.08.2014