

**ЯДЕРНА ФІЗИКА**  
**NUCLEAR PHYSICS**

УДК 539.171+539.172

<https://doi.org/10.15407/jnpae2021.01.010>

**А. Т. Рудчик<sup>1,\*</sup>, А. А. Рудчик<sup>1</sup>, О. Е. Куцик<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>,  
І. Строек<sup>4</sup>, Є. І. Кощій<sup>5</sup>, Р. Сюдак<sup>6</sup>, С. Б. Сакута<sup>7</sup>, С. А. Вознюк<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 державного університету, Таллахасі, США

<sup>4</sup> Національний центр ядерних досліджень, Варшава, Польща

<sup>5</sup> Циклотронний інститут Техаського A&M університету, Техас, США

<sup>6</sup> Інститут ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського, Краків, Польща

<sup>7</sup> Національний дослідницький центр «Курчатівський інститут», Москва, Росія

<sup>8</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

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

**ПРУЖНЕ Й НЕПРУЖНЕ РОЗСІЯННЯ ІОНІВ <sup>15</sup>N ЯДРАМИ <sup>13</sup>C  
ПРИ ЕНЕРГІЇ 84 МеВ**

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння іонів <sup>15</sup>N ядрами <sup>13</sup>C при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ. Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій. Пружне й непружне розсіяння ядер <sup>15</sup>N + <sup>13</sup>C та найбільш важливі реакції передач нуклонів і кластерів включались у схему зв'язку каналів. Визначено параметри потенціалу Вудса - Саксона взаємодії ядер <sup>15</sup>N + <sup>13</sup>C в основних та збуджених станах, а також параметри деформації цих ядер. Оцінено внески реакцій одно- та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів у диференціальні перерізи пружного й непружного розсіяння ядер <sup>15</sup>N + <sup>13</sup>C. Отримані в даній роботі результати дослідження пружного розсіяння ядер <sup>15</sup>N + <sup>13</sup>C при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ порівняно з результатами дослідження пружного розсіяння іонів <sup>15</sup>N ядрами <sup>12</sup>C при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ.

*Ключові слова:* ядерні реакції <sup>13</sup>C(<sup>15</sup>N, <sup>15</sup>N),  $E = 84$  МеВ,  $\sigma(\theta)$ , механізми розсіяння та параметри потенціалу Вудса - Саксона, метод зв'язаних каналів реакцій.

### 1. Вступ

Експериментальне дослідження пружного й непружного розсіяння важких іонів ( $A > 4$ ) легкими та важкими ядрами широко використовується, як відомо, для отримання відомостей про потенціали ядро-ядерної взаємодії, механізми збудження, структуру та форму ядер тощо. Актуальними в даний час є розсіяння іонів нестабільних і рідкісних стабільних ізотопів ядер.

До останніх можна віднести пучки іонів <sup>15</sup>N, розсіяння яких при енергії 84 МеВ досліджено в даній роботі. Раніше пружне розсіяння іонів <sup>15</sup>N ядрами <sup>13</sup>C та реакція <sup>13</sup>C(<sup>15</sup>N, <sup>14</sup>N)<sup>14</sup>C досліджено при енергіях  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 30, 32$  і 45 МеВ у роботі [1].

У даній роботі отримано нові кутові розподіли диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння іонів <sup>15</sup>N при енергії 84 МеВ ядрами <sup>13</sup>C з використанням спектрометричних експериментальних даних, поміряних на Варшавському циклотроні U-200P за допомогою ( $\Delta E$ - $E$ )-спектрометрів установки ICARE [2].

Одним з експериментів на пучку іонів <sup>15</sup>N на циклотроні U-200P було вимірювання  $\Delta E(E)$ -спектрів продуктів ядерних процесів при взаємодії іонів <sup>15</sup>N з легкими ядрами мішеней, у тому числі з <sup>12</sup>C. Результати дослідження експериментальних даних пружного й непружного розсіяння іонів <sup>15</sup>N ядрами <sup>12</sup>C при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ подано в роботах [3, 4]. У даній роботі ці експериментальні дані порівнюються з пружним розсіянням ядер <sup>15</sup>N + <sup>13</sup>C. Виявлено розбіжності як експериментальних даних пружних розсіянь ядер <sup>15</sup>N + <sup>13</sup>C і <sup>15</sup>N + <sup>12</sup>C, так і потенціалів Вудса - Саксона та їхніх взаємодій. Виявлення причин цих розбіжностей («ізотопічних ефектів») потребує спеціальних теоретичних досліджень, які можуть бути предметом окремої роботи.

Значну увагу в даній роботі приділено обчисленням внесків у пружне розсіяння ядер <sup>15</sup>N + <sup>13</sup>C різноманітних одно- й двоступінчастих реакцій передач нуклонів і кластерів. Спектроскопічні амплітуди (фактори) нуклонів і кластерів в

© А. Т. Рудчик, А. А. Рудчик, О. Е. Куцик, К. Русек, К. В. Кемпер, Е. П'ясецькі, А. Столяж, А. Тщінська, Вал. М. Пірнак, О. А. Понкратенко, І. Строек, Є. І. Кощій, Р. Сюдак, С. Б. Сакута, С. А. Вознюк, А. П. Ільїн, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма, 2021

ядрах, необхідні для розрахунків перерізів реакцій, обчислювалися в рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки (ТІМО) [5].

У даній роботі наведено також результати дослідження непружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  із збудженням станів 3,088 - 3,547 МеВ ядра  $^{13}\text{C}$  та станів 5,27 - 8,571 МеВ ядра  $^{15}\text{N}$ . Вважалося, що збудження цих станів ядер  $^{15}\text{N}$  та  $^{13}\text{C}$  мають колективну природу, а тому теоретичні перерізи збуджених станів ядер обчислювалися в рамках ротаційної та вібраційної моделей.

## 2. Методика експерименту

Вимірювання диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{13}\text{C}$  та реакцій передач  $^{13}\text{C}(^{15}\text{N}, X)$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ проведено на циклотроні U-200Р Лабораторії важких іонів Варшавського університету. Для отримання пучка іонів  $^{15}\text{N}$

було використано збагачену цим ізотопом кальцієву селітру ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ).

В експерименті використовувалась самопідтримна мішень вуглецю, збагачена приблизно до 85 % ізотопом  $^{13}\text{C}$  товщиною  $\sim 0,5$  мг/см<sup>2</sup>. Експеримент проводився на експериментальній установці ICARE [2] з використанням ( $\Delta E$ - $E$ )-методики з кремнієвими  $\Delta E$ - і  $E$ -детекторами товщиною 40 та 300 мкм відповідно. В одному із ( $\Delta E$ - $E$ )-спектрометрів  $\Delta E$ -детектором була іонізаційна камера.

Розкид енергії іонів  $^{15}\text{N}$  на мішені не перевищував 0,5 %.

Типовий  $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій  $^{13}\text{C}(^{15}\text{N}, X)$  показано на рис. 1. Видно, що експериментальна методика забезпечувала розділення продуктів реакцій за зарядами та частково за масами. Для досліджень в основному використовувалась спектрометрична інформація продуктів ядерних процесів із зарядами  $Z = 3 - 7$ .

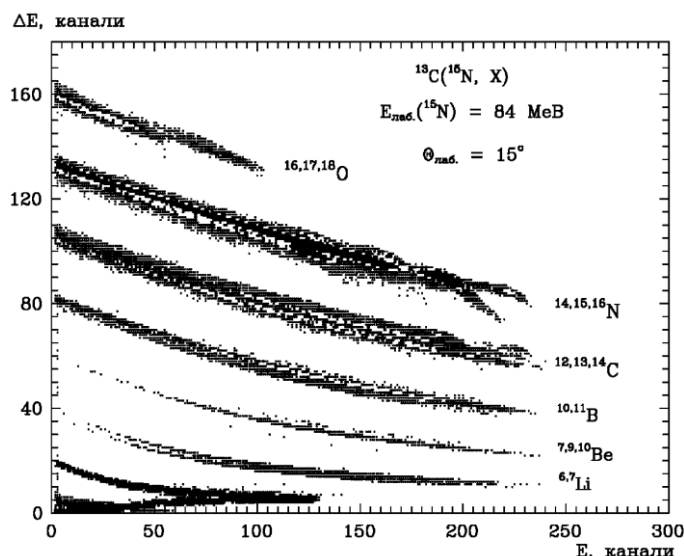


Рис. 1. Типовий  $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій  $^{13}\text{C}(^{15}\text{N}, X)$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ.

Типові енергетичні  $\Delta E(E)$ -спектри  $^{15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$  з розсіяння  $^{13}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{13}\text{C}$  та реакції  $^{13}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{13}\text{C})^{15}\text{N}$ , отримано проектуванням відповідних двовимірних локусів цих ядер на  $E$ -вісь, показано на рис. 2: а) спектр  $^{15}\text{N}$  з неперервним фоном від багаточастинкових реакцій на рисунку показано суцільною кривою; б) спектр  $^{15}\text{N}$  після вилучення неперервного фону (криві – наближен-

ня експериментальних піків симетричними гауссіанами); в) спектр  $^{13}\text{C}$  з неперервним фоном від багаточастинкових реакцій (суцільна крива); г) спектр  $^{13}\text{C}$  після вилучення неперервного фону.

Неперервні фони експериментальних спектрів ядер  $^{15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$  визначалися наближенням глибоких мінімумів спектрів параметризованими функціями

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

методом підгонки параметрів  $N_{0i}$ ,  $E_{1i}$ ,  $E_{2i}$ ,  $H_{1i}$ ,  $H_{2i}$ .

Піки експериментальних спектрів апроксимувалися симетричними гауссіанами з напівшири-

нами 200 кеВ, зважаючи на розкид енергії пучка іонів на мішені та енергетичну роздільну здатність експериментальної методики  $\sim 400$  кеВ.

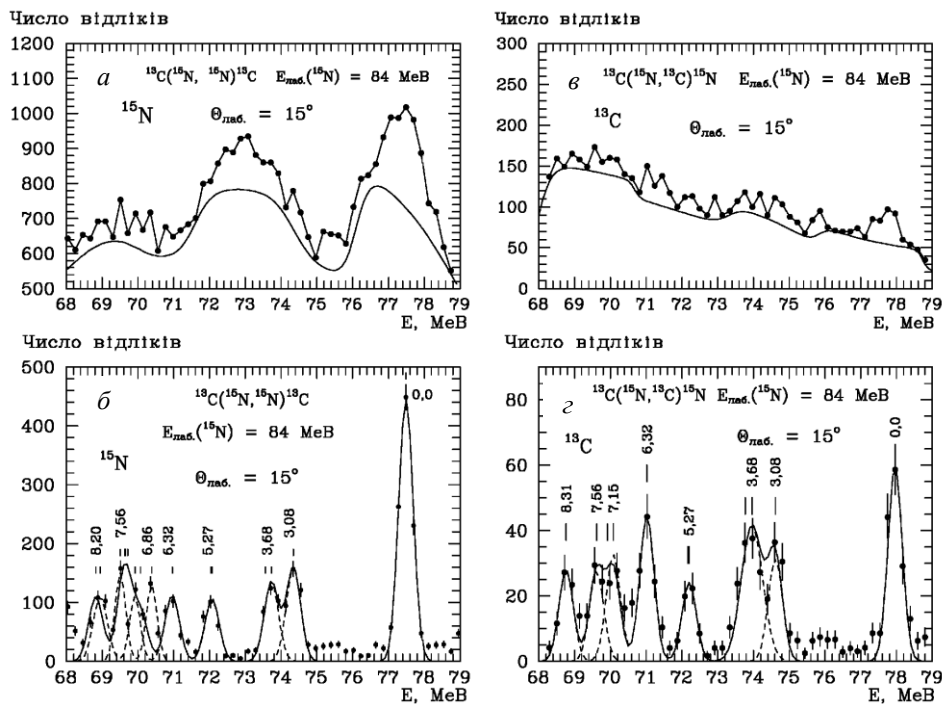


Рис. 2. Типові енергетичні спектри ядер  $^{15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$  – продуктів пружного й непружного розсіяння  $^{13}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ. Кривими показано: (а, в) – наближення неперервних фонів від багаточастинкових реакцій; (б, г) – наближення експериментальних піків симетричними гауссіанами.

Площі гауссіанів експериментальних піків іонів  $^{15}\text{N}$  використовувалися для обчислення диференціальних перерізів розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  на малі кути  $\theta_{\text{с.п.м.}}^{\circ}(^{15}\text{N})$ , а площі гауссіанів піків ядер віддачі  $^{13}\text{C}$  для розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  на великі кути  $\theta_{\text{с.п.м.}}^{\circ}(^{15}\text{N}) = 180^{\circ} - \theta_{\text{с.п.м.}}^{\circ}(^{13}\text{C})$ . Таким способом отримано кутові розподіли перерізів пружного й непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  у повних кутових діапазонах.

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  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  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 за-

лежать 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 й непружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  не перевищує 20 %.

На рис. 3 диференціальні перерізи пружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ порівнюються залежно від переданого імпульсу  $q_t$  з даними такого самого розсіяння при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 45$  МеВ [1] та з даними пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ [3, 4]. Видно значні відмінності цих розсіянь ядер при  $q_t > 2$  фм $^{-1}$ .

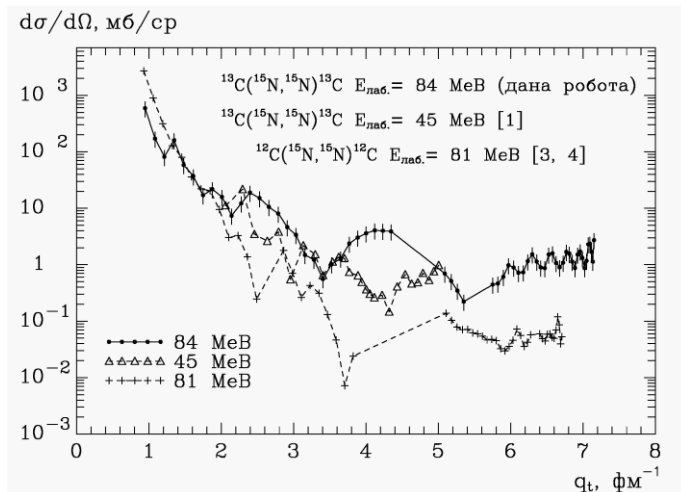


Рис. 3. Порівняння диференціальних перерізів пружного розсіяння  $^{13}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{13}\text{C}$  при енергіях  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ і 45 МеВ [1] з пружним розсіянням  $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{12}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ [3, 4] залежно від переданих імпульсів  $q_t$ .

### 3. Аналіз експериментальних даних

Отримані експериментальні дані пружного й непружного розсіяння іонів <sup>15</sup>N ядрами <sup>13</sup>C проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) із включенням у схему зв'язку каналів розсіяння та реакцій одно- й двоступінчастих

передач нуклонів і кластерів. Для проведення МЗКР-розрахунків використовувалась програма FRESKO [6].

Необхідні схеми збуджень ядер <sup>15</sup>N і <sup>13</sup>C показано на рис. 4, а діаграми реакцій передач – на рис. 5.

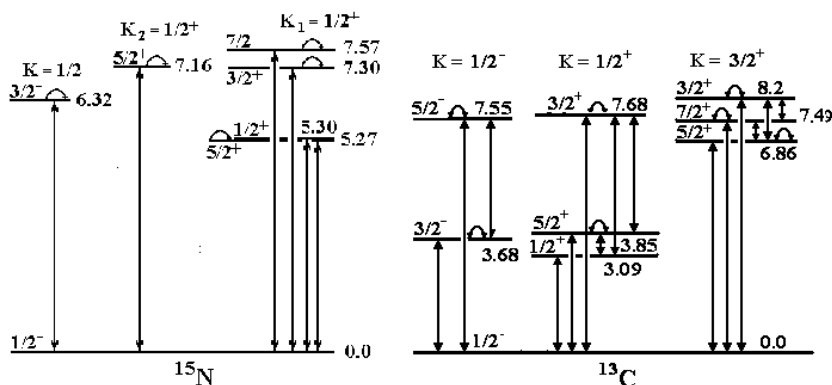


Рис. 4. Схеми переходів ядер <sup>15</sup>N і <sup>13</sup>C у збуджені стани. Дугами показано процеси переорієнтації спінів ядер  $j > 1/2$ .

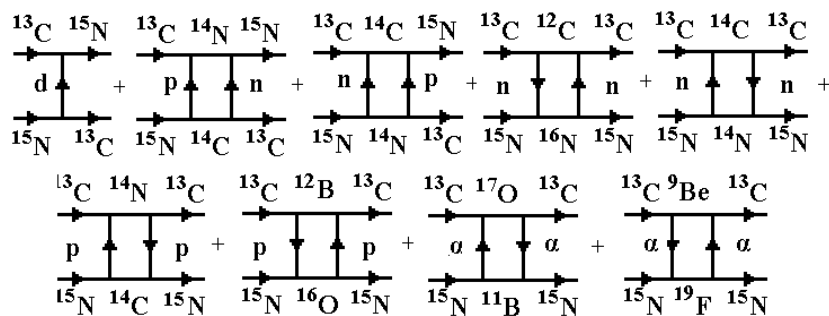


Рис. 5. Діаграми реакцій одно- й двоступінчастих передач нуклонів і кластерів, внески яких зараховувалися в розсіяння ядер <sup>15</sup>N + <sup>13</sup>C.

Вважалося, що низькоенергетичні збудження ядер мають колективну природу (ротаційну або вібраційну). Для обчислення переходів ядер <sup>15</sup>N і <sup>13</sup>C у ці збуджені стани використовувався форм-фактор [6]

$$V_\lambda(r) = -\frac{\delta_\lambda}{\sqrt{4\pi}} \frac{dU(r)}{dr}, \quad (2)$$

де  $\delta_\lambda$  – параметр деформації ядра  $\lambda$ -мультипольності;  $U(r)$  – потенціал взаємодії ядер <sup>15</sup>N + <sup>13</sup>C.

У розрахунках перерізів непружного розсіяння ядер <sup>15</sup>N + <sup>13</sup>C за МЗКР використовувалися параметри деформації ядер  $\delta_\lambda$ , подані в табл. 1. Там же містяться також значення параметрів деформації  $\beta_\lambda = \delta_\lambda/R$  для радіуса ядра  $R = 1,25 A^{1/3}$  фм.

Таблиця 1. Параметри деформації збуджених станів ядер <sup>13</sup>C і <sup>15</sup>N

Ядра	$E_{зб}$ , МеВ	$J^\pi$	$\lambda$	$\delta_\lambda$ , фм	$\beta_\lambda^*$	Літ.
<sup>13</sup> C	3,088	1/2 <sup>+</sup>	2	1,00	0,34	[7]
	3,684	3/2 <sup>-</sup>	1	0,90	0,31	[7]
	3,854	5/2 <sup>+</sup>	3	0,50	0,17	[7]
	6,864	5/2 <sup>+</sup>	3	0,50	0,17	[7]
	7,490	7/2 <sup>+</sup>	3	0,50	0,17	[7]
	7,547	5/2 <sup>-</sup>	2	0,90	0,31	[7]
	7,680	3/2 <sup>+</sup>	1	1,0	0,34	[7]
<sup>15</sup> N	8,200	3/2 <sup>+</sup>	1	1,0	0,34	[7]
	5,270	5/2 <sup>+</sup>	3	1,0	0,32	[8]
	5,299	1/2 <sup>+</sup>	1	1,0	0,32	[8]
	6,324	3/2 <sup>-</sup>	2	1,0	0,32	[8]
	7,155	5/2 <sup>+</sup>	3	1,0	0,32	[8]
	7,301	3/2 <sup>+</sup>	1	1,0	0,32	[8]
	7,567	7/2 <sup>+</sup>	3	1,0	0,32	[8]

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

Спектроскопічні амплітуди  $S_x$  нуклонів і кластерів  $x$  в ядрах  $A = C + x$ , необхідні для МЗКР-розрахунків реакцій передач, обчислювались за ТІМО [5], за допомогою програми DESNA [9, 10]. Ці спектроскопічні амплітуди подано в табл. 2.

Таблиця 2. Спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів  $x$  в ядрах  $A = C + x$

A	C	x	$nL_J$	$S_x$
$^{13}\text{C}$	$^9\text{Be}$	$\alpha$	$2D_2$	0,504
$^{13}\text{C}$	$^{12}\text{B}$	p	$1P_{1/2}$	0,283
			$1P_{3/2}$	0,866
$^{13}\text{C}$	$^{12}\text{C}$	n	$1P_{1/2}$	0,601
$^{14}\text{C}$	$^{13}\text{C}$	n	$1P_{1/2}$	-1,094
$^{14}\text{N}$	$^{13}\text{C}$	p	$1P_{3/2}$	0,461
			$1P_{1/2}$	0,163
$^{15}\text{N}$	$^{11}\text{B}$	$\alpha$	$2D_2$	0,435 <sup>(a)</sup>
$^{15}\text{N}$	$^{13}\text{C}$	d	$2S_1$	0,248 <sup>(a)</sup>
			$1D_1$	0,444 <sup>(a)</sup>
$^{15}\text{N}$	$^{14}\text{C}$	p	$1P_{1/2}$	-0,598
			$1F_{5/2}$	0,296
$^{15}\text{N}$	$^{14}\text{N}$	n	$1P_{1/2}$	-1,091 <sup>(a)</sup>
			$1P_{3/2}$	0,386
$^{16}\text{N}$	$^{15}\text{N}$	n	$1D_{3/2}$	-0,270
$^{16}\text{O}$	$^{15}\text{N}$	p	$1P_{1/2}$	-1,461 <sup>(a)</sup>
$^{17}\text{O}$	$^{13}\text{C}$	$\alpha$	$2D_2$	-0,468
$^{19}\text{F}$	$^{15}\text{N}$	$\alpha$	$3S_0$	-0,638

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

Хвильові функції відносного руху нуклонів і кластерів  $x$  в ядрах  $A = C + x$  обчислювались стандартним способом підгонки глибин  $V$  дійсних потенціалів типу Вудса - Саксона до експериментальних значень енергій зв'язку  $E_x$  частинок  $x$  в ядрах  $A$ . При цьому використовувались параметри  $a_v = 0,65$  фм і  $r_v = 1,25A^{1/3} / (C^{1/3} + x^{1/3})$  фм.

Таблиця 3. Параметри потенціалів взаємодії ядер

Ядра	$E_{\text{лаб}}$ , МеВ	$V_0$ , МеВ	$r_v$ , фм	$a_v$ , фм	$W_s$ , МеВ	$r_w$ , фм	$a_w$ , фм	Літ.
$^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$	84	220	0,79	0,67	9,7	0,90	0,67	Дана робота
	45	100	0,95	0,70	30,0	1,00	0,30	[1]
$^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$	81	195	0,79	0,75	8,0	1,25	0,75	[3, 4]

Для наочності дійсні та уявні частини потенціалів DF і WS порівнюються на рис. 6. Видно лише незначні відмінності дійсних частин  $V_{\text{DF}}$  і  $V$  потенціалів DF і WS при  $r > 3$  фм.

На рис. 7 показано кутовий розподіл диференціальних перерізів пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ. Штриховими кривими показано обчислені МЗКР-перерізи пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  з використанням потенціалу WS (див. табл. 3) для потенціального розсіяння (крива <pot>) та реакцій передач, діаграми яких показано на рис. 5 для передач дейтронів, протонів  $p + p$ , нейтронів

У розрахунках диференціальних перерізів розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  за МЗКР для взаємодії ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  використовувався потенціал ядронної взаємодії Вудса - Саксона (WS)

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

і кулонівський потенціал взаємодії ядер як рівномірно заряджених куль з радіусами

$$R_i = r_i(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}), \quad i = V, W, C,$$

а також оптичний фолдінг-потенціал DF (double-folded potential, потенціал подвійної згортки взаємодії нуклонів ядер) з уявною частиною  $W_{\text{DF}}$

$$U_{\text{DF}} = V_{\text{DF}} + iW_{\text{DF}} = V_{\text{DF}} + i0,6V_{\text{DF}}. \quad (4)$$

Для розрахунків фолдінг-потенціалу взаємодії ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  використано програму DFPOT [11] та розподіли нуклонів в ядрах  $^{15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$  з роботи [12].

Початкові значення параметрів  $X_i = \{V_0, r_v, a_v, W_s, r_w, a_w\}$  потенціалу WS визначались методом підгонки цього потенціалу до потенціалу DF у поверхневій області. Уточнення їхніх значень забезпечувалось у процесі підгонки МЗКР-розрахунків до експериментальних даних пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ. Отримані таким методом параметри потенціалу WS взаємодії ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  подано в табл. 3.

$n + n$ , нуклонів  $p + n$  та альфа-частинок  $\alpha + \alpha$  (криві <d>, <pp>, <nn>, <pn> та < $\alpha\alpha$ > відповідно). Суцільною кривою  $\Sigma$  показано когерентну суму всіх процесів.

Видно, що основну роль у пружному розсіянні ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  відіграє потенціальне розсіяння. На великих кутах незначні внески дають реакції передач нейтронів  $n + n$  та протонів (криві <nn> і <pp>). Внески передач інших частинок у пружне розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  мізерні. Когерентна сума перерізів потенціального розсіяння та реакцій передач задовільно описує експериментальні дані в усьому кутовому діапазоні (крива  $\Sigma$ ).

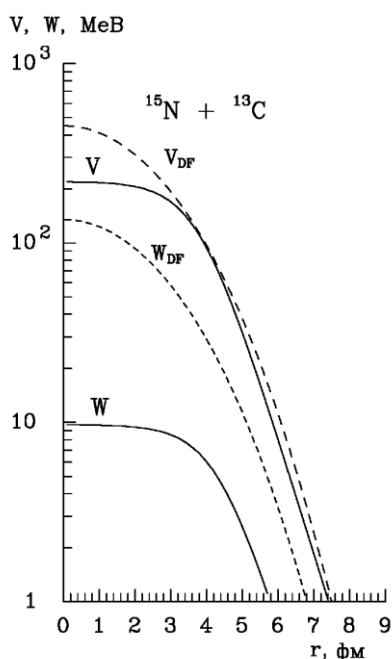


Рис. 6. Порівняння дійсних  $V$ ,  $V_{DF}$  та уявних  $W$ ,  $W_{DF} = 0,6 V_{DF}$  частин потенціалів WS і DF взаємодії ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$ .

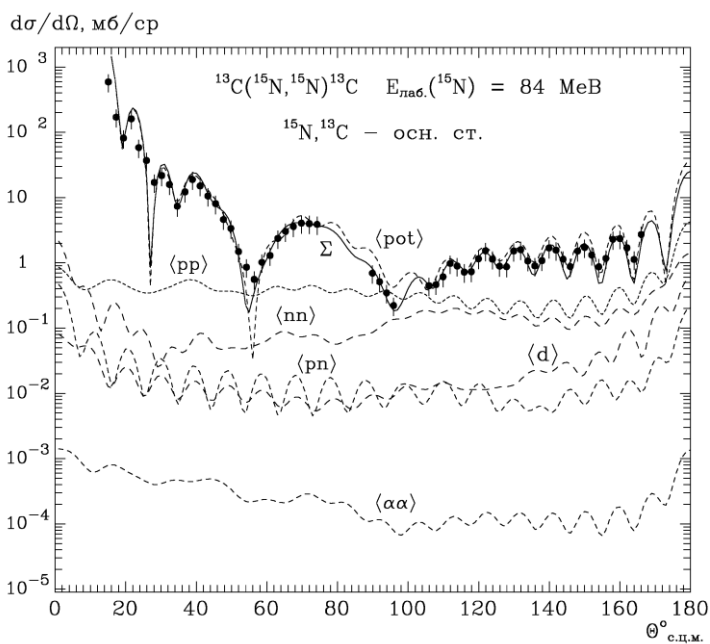


Рис. 7. Диференціальні перерізи пружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ. Кривими показано розрахунки МЗКР-перерізів різних процесів пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  з використанням потенціалу WS (див. табл. 3).

Аналіз даних пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  за МЗКР проведено також із використанням у розрахунках оптичного фолдінг-потенціалу DF взаємодії цих ядер, потенціалу WS пружного розсіяння  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 45$  МеВ та потенціалу WS пружного розсіяння  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ. Ці МЗКР-розрахунки для пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  показано на

рис. 8 кривими  $\Sigma_{^{13}\text{C}+^{15}\text{N}(84)}$ ,  $\Sigma_{DF}$ ,  $\Sigma_{^{13}\text{C}+^{15}\text{N}(45)}$  та  $\Sigma_{^{12}\text{C}+^{15}\text{N}(81)}$  відповідно. Видно, що МЗКР-перерізи пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  при енергії 84 МеВ, обчислені при використанні фолдінг-потенціалу DF взаємодії ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  та параметрів вище зазначених додаткових потенціалів WS, значно відрізняються від експериментальних даних цього розсіяння.

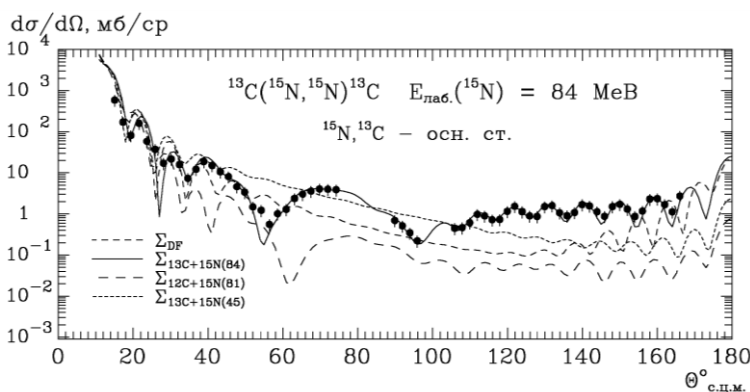


Рис. 8. Порівняння МЗКР-розрахунків пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ (суцільна крива  $\Sigma_{^{13}\text{C}+^{15}\text{N}(84)}$ ) і МЗКР-розрахунків цього розсіяння при використанні оптичного фолдінг-потенціалу DF (крива  $\Sigma_{DF}$ ), потенціалу WS розсіяння  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 45$  МеВ (крива  $\Sigma_{^{13}\text{C}+^{15}\text{N}(45)}$ ) та параметрів потенціалу WS пружного розсіяння  $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$  МеВ (крива  $\Sigma_{^{12}\text{C}+^{15}\text{N}(81)}$ ) (див. табл. 3).

Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  для збуджених станів ядер  $^{15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$  (див. рис. 4) показано на рис. 9 - 11. Деякі із збуджених станів цих ядер не розділялись в експерименті, а тому для них отримано сумарні перерізи.

Як зазначалося вище, в МЗКР-розрахунках вважалось, що стани деформованих ядер  $^{15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$  мають колективну природу збуджень (ротаційні та вібраційні стани). При МЗКР-розрахунках збуджень цих станів використовувався форм-фактор (2). Параметри деформацій  $\delta_\lambda$  цих ядер подано в табл. 1.

Штриховими кривими на рис. 9 - 11 показано МЗКР-розрахунки перерізів непружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  для нерозділених в експерименті станів ядер  $^{15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$ , а суцільними кривими  $\Sigma$  – їхні некогерентні суми.

На рис. 9 показано експериментальні дані та МЗКР-перерізи для збуджених станів 3,088 МеВ ( $1/2^+$ ), 3,684 МеВ ( $3/2^-$ ) + 3,854 МеВ ( $5/2^+$ ) ядра  $^{13}\text{C}$  та збуджених станів 5,270 МеВ ( $5/2^+$ ) + 5,298 МеВ ( $1/2^+$ ) ядра  $^{15}\text{N}$ .

На рис. 10 показано експериментальні дані та МЗКР-перерізи для збуджених станів 6,324 МеВ ( $3/2^-$ ) і 7,155 МеВ ( $5/2^+$ ) + 7,301 МеВ ( $3/2^+$ ) ядра  $^{15}\text{N}$ , а на рис. 11 – для збуджених станів 7,567 МеВ ( $7/2^+$ ), 8,313 МеВ ( $1/2^+$ ) + 8,571 МеВ ( $3/2^+$ ) ядра  $^{15}\text{N}$  та 8,200 МеВ ( $3/2^+$ ) ядра  $^{13}\text{C}$ .

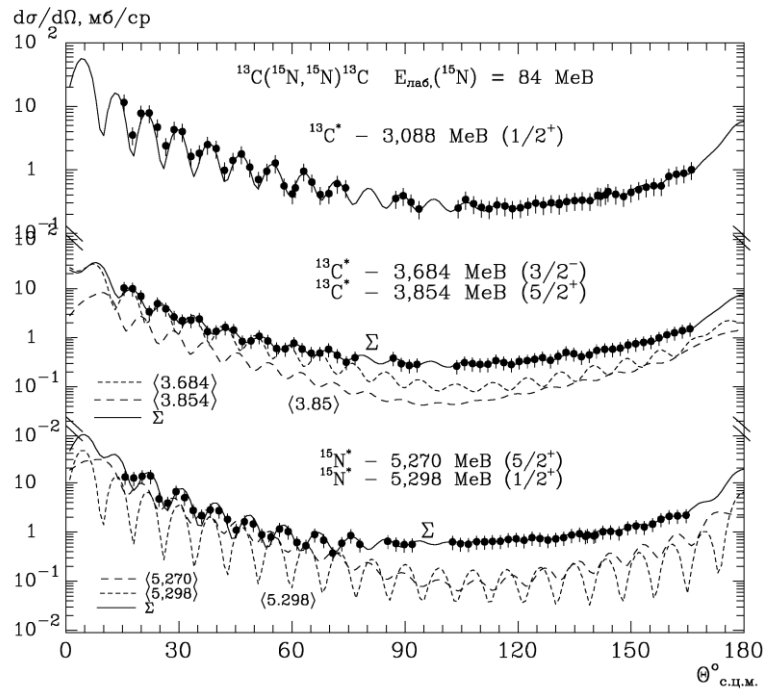


Рис. 9. Диференціальні перерізи непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ для збуджених станів 3,088 - 3,854 МеВ ядра  $^{13}\text{C}$  та станів 5,270 МеВ + 5,298 МеВ ядра  $^{15}\text{N}$ . Штрихові криві – МЗКР-розрахунки для збуджених станів ядер  $^{15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$ , криві  $\Sigma$  – суми МЗКР-перерізів для нерозділених в експерименті станів ядер.

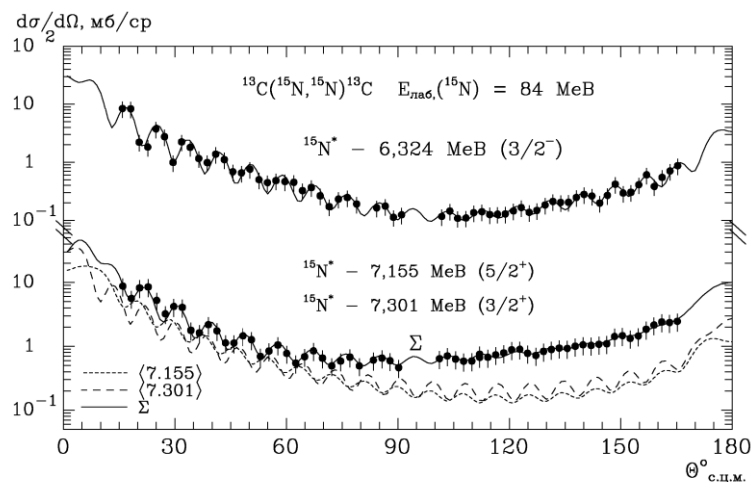


Рис. 10. Диференціальні перерізи непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ для збуджених станів 6,324 МеВ ( $3/2^-$ ) та 7,155 МеВ ( $5/2^+$ ) + 7,301 МеВ ( $3/2^+$ ) ядра  $^{15}\text{N}$ . Криві – МЗКР-розрахунки для збуджених станів ядер  $^{15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$ , криві  $\Sigma$  – суми МЗКР-перерізів нерозділених в експерименті станів ядер.

Видно, що МЗКР-перерізи розділених в експерименті станів ядер  $^{15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$  та відповідні суми МЗКР-перерізів для нерозділених станів ядер

(криві  $\Sigma$ ) задовільно описують експериментальні дані непружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$ .

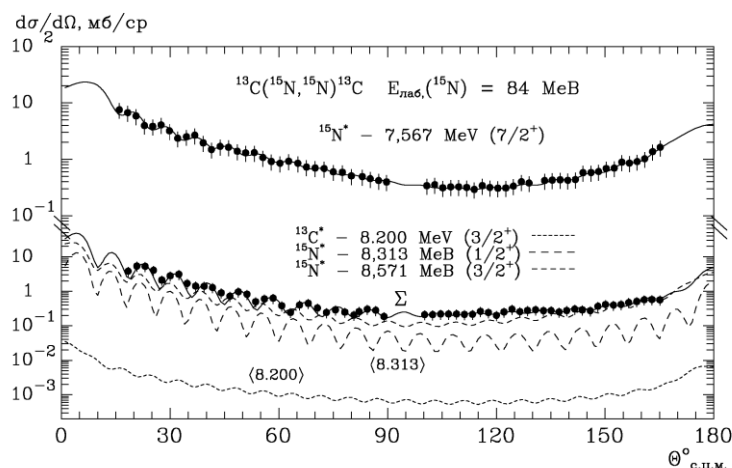


Рис. 11. Диференціальні перерізи непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ для збуджених станів 7,567 МеВ ( $7/2^+$ ), 8,313 МеВ ( $1/2^+$ ) + 8,571 МеВ ( $3/2^+$ ) ядра  $^{15}\text{N}$  та 8,200 МеВ ( $3/2^+$ ) ядра  $^{13}\text{C}$ . Криві – МЗКР-розрахунки для збуджених станів  $^{15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$ . Криві  $\Sigma$  – суми МЗКР-перерізів нерозділених в експерименті станів ядер.

#### 4. Основні результати та висновки

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного й непружного розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{13}\text{C}$  при енергії  $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 84$  МеВ для основних станів ядер  $^{15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$  та збуджених станів 3,088 МеВ ( $1/2^+$ ), 3,684 МеВ ( $3/2^-$ ) + 3,854 МеВ ( $5/2^+$ ) ядра  $^{13}\text{C}$  та збуджених станів 5,270 МеВ ( $5/2^+$ ) + 5,299 МеВ ( $1/2^+$ ), 6,323 МеВ ( $3/2^-$ ), 7,155 МеВ ( $5/2^+$ ) + 7,301 МеВ ( $3/2^+$ ), 7,567 МеВ ( $7/2^+$ ), 8,313 МеВ ( $1/2^+$ ) + 8,571 МеВ ( $3/2^+$ ) ядра  $^{15}\text{N}$ . Експериментальні дані отримано в широкому діапазоні кутів.

Експериментальні дані проаналізовано за МЗКР із включенням у схему зв'язку каналів пружного й непружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  та реакцій передач нейтронів, протонів, d- і  $\alpha$ -кластерів. Розрахунки непружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$  проводились у рамках моделей колективних ротаційних та вібраційних збуджень ядер.

У розрахунках МЗКР-перерізів розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  та реакцій передач використано потенціали Вудса - Саксона WS та фолдінг-потенціал DF ( $V_{\text{DF}}$ ) з уявною частиною  $W_{\text{DF}} = 0,6V_{\text{DF}}$ .

Визначено параметри потенціалу WS з підгонки МЗКР-перерізів до експериментальних даних пружного розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$ . Установлено, що кутові розподіли експериментальних даних непружного розсіяння цих ядер задовільно описуються МЗКР-перерізами в рамках моделі колективного збудження ядер  $^{15}\text{N}$  і  $^{13}\text{C}$  при використанні параметрів деформацій ядер, поданих у роботах [7] і [8].

Досліджено внески реакцій одно- та двоступінчастих реакцій передач у пружне розсіяння ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  з використанням спектроскопічних амплітуд нуклонів і кластерів в ядрах та обчислених у рамках ТІМО, використовуючи програму DESNA [9, 10]. Установлено, що в пружному розсіянні ядер  $^{15}\text{N} + ^{13}\text{C}$  основну роль відіграє потенціальне розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  і незначні внески в це розсіяння дають реакції передач нейтронів та протонів на середніх і великих кутах.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. A. Gamp et al. Interfering proton and neutron transfer in the reaction  $^{13}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{N})^{14}\text{C}$ . *Nucl. Phys. A* 250 (1975) 341.
2. E Piasecki et al. *Project ICARE at HIL* (Warsaw: Heavy Ion Laboratory, 2007) 38 p.
3. А.Т. Рудчик та ін. Пружне і непружне розсіяння іонів  $^{15}\text{N}$  ядрами  $^{12}\text{C}$  при енергії 81 МеВ. *Ядерна фізика та енергетика* 19(3) (2018) 210. / А.Т. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of  $^{15}\text{N}$  ions by  $^{12}\text{C}$  nuclei at energy 81 MeV. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 19(3) (2018) 210. (Ukr)
4. А.Т. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of  $^{15}\text{N}$  ions by  $^{12}\text{C}$  at 81 MeV and the effect of transfer channels. *Acta Physica Polonica B* 50 (2019) 753.
5. Yu. F Smirnov, Yu. M Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the p-shell nuclei. *Phys. Rev. C* 15 (1977) 84.
6. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* 7 (1988) 167.
7. S.Yu. Mezhevych et al. The  $^{13}\text{C} + ^{11}\text{B}$  elastic and inelastic scattering and isotopic effects in the of  $^{12}\text{C} + ^{11}\text{B}$  scattering. *Nucl. Phys. A* 724 (2003) 29.
8. А.Т. Rudchik et al.  $^{15}\text{N}$  elastic and inelastic scattering by  $^{11}\text{B}$  at 84 MeV. *Nucl. Phys. A* 939 (2015) 1.
9. А.Т. Рудчик, Ю.М. Чувильский. Вычисление спектроскопических амплитуд для произвольных



- ассоциаций нуклонов в ядрах 1p-оболочки (программа DESNA) Препринт Ин-та ядерных исслед. АН УССР КИЯИ-82-12 (Киев, 1982) 27 с. / А.Т. Rudchik, Yu.M. Tchuvil'sky. Spectroscopic amplitude calculations for different clusters in the 1p-shell nuclei (code DESNA). Preprint of the Institute for Nuclear Research AS UkrSSR (Kyiv, 1982) 27 p. (Rus)
10. А.Т Рудчик, Ю.М. Чувильский. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1p-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач. УФЖ 30 (1985) 819. / А.Т. Rudchik, Yu.M. Tchuvil'sky. Spectroscopic amplitudes of multinuclear clusters in the 1p-shell nuclei and multinuclear transfer reaction analysis. Ukr. J. Phys. 30 (1985) 819. (Rus)
11. J. Cook DFPO: a program for the calculation of double folded potentials. *Comp. Phys. Com.* 25 (1982) 125.
12. H. De Vries, C.W. De Jager, C. De Vries. Nuclear charge-density-distribution parameters from elastic electron scattering. *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 36 (1987) 495.

**A. T. Rudchik<sup>1,\*</sup>, A. A. Rudchik<sup>1</sup>, O. E. Kutsyk<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. Trzcńska<sup>2</sup>, Val. M. Pirnak<sup>1</sup>, O. A. Ponkratenko<sup>1</sup>, I. Strojek<sup>4</sup>, E. I. Koshchiy<sup>5</sup>, R. Siudak<sup>6</sup>, S. B. Sakuta<sup>7</sup>, S. A. Vozniuk<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, Warsaw University, Warsaw, Poland

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

<sup>4</sup> National Institute for Nuclear Research, Warsaw, Poland

<sup>5</sup> Cyclotron Institute, Texas A&M University, College Station, USA

<sup>6</sup> H. Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Krakow, Poland

<sup>7</sup> National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

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

#### ELASTIC AND INELASTIC SCATTERING OF <sup>15</sup>N IONS BY <sup>13</sup>C NUCLEI AT ENERGY 84 MeV

New experimental data of the <sup>15</sup>N + <sup>13</sup>C elastic and inelastic scattering were obtained at the energy  $E_{\text{lab}}(^{15}\text{N}) = 84$  MeV. The data were analyzed within the coupled-reaction-channels method. The elastic and inelastic scattering of nuclei <sup>15</sup>N + <sup>13</sup>C as well as the more important nucleon and cluster transfer reactions were included in the channels-coupling scheme. The WS potential parameters for the <sup>15</sup>N + <sup>13</sup>C nuclei interactions in ground and excited states as well as deformation parameters of these nuclei were deduced. The contributions of one- and two-step transfers in the <sup>15</sup>N + <sup>13</sup>C elastic and inelastic scattering were estimated. The results of the <sup>15</sup>N + <sup>13</sup>C elastic scattering at the energy  $E_{\text{lab}}(^{15}\text{N}) = 84$  MeV, obtained in this work, were compared with that of the <sup>15</sup>N + <sup>12</sup>C elastic scattering at the energy  $E_{\text{lab}}(^{15}\text{N}) = 81$  MeV.

**Keywords:** nuclear reactions <sup>13</sup>C(<sup>15</sup>N,<sup>15</sup>N),  $E = 84$  MeV,  $\sigma(\theta)$ , scattering mechanisms and Woods-Saxon potential, coupled-reaction-channels analysis.

Надійшла/Received 21.09.2020