

А. Т. Рудчик^{1,*}, А. А. Рудчик¹, О. Е. Куцик¹, К. Русек², К. В. Кемпер³, Е. П'ясецькі², А. Столяж²,
А. Тщінська², Вал. М. Пірнак¹, О. А. Понкратенко¹, І. Строек⁴, Є. І. Кощій⁵, Р. Сюдак⁶,
С. Б. Сакута⁷, В. А. Плюйко⁸, А. П. Ільїн¹, Ю. М. Степаненко¹, В. В. Улещенко¹, Ю. О. Ширма¹

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

³ Відділ фізики, Флоридський державний університет, Таллахасі, США

⁴ Національний центр ядерних досліджень, Варшава, Польща

⁵ Циклотронний інститут Техаського A&M університету, Техас, США

⁶ Інститут ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського, Краків, Польща

⁷ Національний дослідницький центр «Інститут Курчатова», Москва, Росія

⁸ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

*Відповідальний автор: rudchik@kinr.kiev.ua

МЕХАНІЗМИ РЕАКЦІЇ $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ 81 MeV ТА ВЗАЄМОДІЯ ЯДЕР $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$

Досліджено реакцію $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeV для основних та збуджених станів ядер ^{14}C і ^{13}N . Отримано нові дані диференціальних перерізів реакції. Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). Пружне розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ та найбільш імовірні реакції передачі нуклонів і кластерів було включено в схему зв'язку каналів. У МЗКР-розрахунках використовувались потенціали Вудса - Саксона (WS) взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ для вхідного каналу реакції та взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ для вихідних каналів реакції. Для вхідного каналу реакції використано WS потенціал, отриманий при аналізі експериментальних даних пружного ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$, а потенціал WS для вихідного каналу $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ реакції отримано методом підгонки МЗКР-перерізів реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ до експериментальних даних цієї реакції. У МЗКР-розрахунках перерізів цієї реакції використовувались спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів в ядрах, які обчислювались за трансляційно-інваріантною моделлю 1p-оболонки. У результаті МЗКР-аналізу реакції отримано відомості про потенціал WS взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ та механізми передачі нуклонів і кластерів. Установлено, що в даній реакції основну роль відіграють передачі протонів та 2n-кластерів. Досліджено відмінності МЗКР-перерізів реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при використанні в її вихідному каналі потенціалів взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ і $^{14}\text{C} + ^{14}\text{N}$ (ізотопічні ефекти).

Ключові слова: ядерна реакція $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при 81 MeV, аналіз за методом зв'язаних каналів реакцій, спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів, механізми реакції.

1. Вступ

Реакції взаємодії важких іонів з ядрами широко використовуються для отримання відомостей про потенціали взаємодії та структуру стабільних та нестабільних ядер в основних і збуджених станах. У даній роботі такі дослідження проведено, використовуючи реакцію $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeV, для ядер ^{14}C і ^{13}N вихідного каналу реакції в основних та збуджених станах. Як засвідчили наші літературні пошуки, ця реакція раніше не досліджувалась. Вимірювання диференціальних перерізів цієї реакції проведено в експерименті одночасно з пружним і непружним розсіянням іонів ^{15}N при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeV та комплексом реакцій $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, X)Y$ з виходом ядер X, Y із $Z = 3 - 8$. Експериментальні дані реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ досліджено за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР), використовуючи потенціали Вудса -

Саксона (WS) для вхідного й вихідного каналів реакції. Параметри потенціалу WS для вхідного каналу реакції отримано раніше при МЗКР-аналізі експериментальних даних пружного й непружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при енергії 81 MeV [1, 2], а параметри потенціалу WS взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ визначено при МЗКР-аналізі експериментальних даних реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$. При цьому в МЗКР-розрахунках одно- й двоступінчастих передачі нуклонів і кластерів у реакції використовувались спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів, обчислені за трансляційно-інваріантною моделлю 1p-оболонки (ТІМО).

2. Методика експерименту

Вимірювання диференціальних перерізів реакцій $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, X)Y$ проведено на циклотроні U-200P Лабораторії важких іонів Варшавського університету на експериментальній установці ICARE [3]

© 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, В. А. Плюйко, А. П. Ільїн, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма, 2019

при енергії 81 MeV пучка іонів ^{15}N з використанням трьох ΔE - E -спектрометрів з кремнієвими ΔE - і E -детекторами та одного з газовим ΔE - і кремнієвим E -детекторами. У газовому детекторі використовувався стиснутий аргон. Розкид енергії іонів ^{15}N на мішені не перевищував 0,5 %. В експерименті використовувалась самопідтримна мішень ^{12}C товщиною $\sim 0,5 \text{ мг/см}^2$.

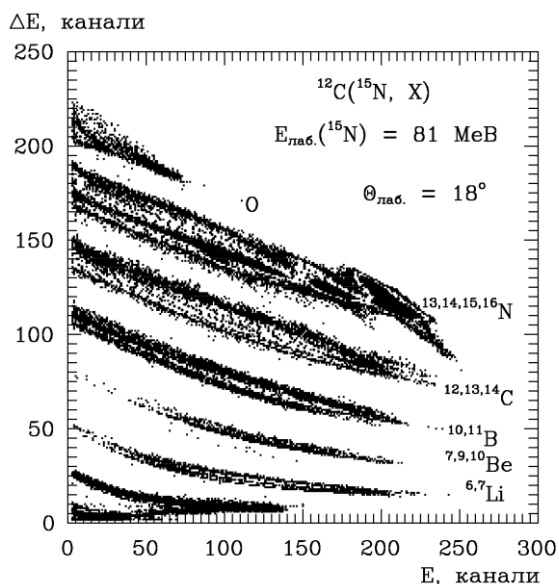


Рис. 1. Типовий $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, X)Y$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81 \text{ MeV}$.

Накопичення та збереження спектрометричної інформації забезпечували електронні методики ICARE та SMAN [4]. Система SMAN використовувалася також для спостереження реєстрації продуктів реакцій на дисплеї комп'ютера у вигляді $\Delta E(E)$ -спектрів. Електронна методика експерименту забезпечувала вимірювання $\Delta E(E)$ -спектрів продуктів реакцій $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, X)Y$ із зарядами $Z = 3 - 8$. Типовий $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, X)Y$ показано на рис. 1. Видно, що експериментальна методика забезпечувала розділення продуктів реакцій за зарядами та масами.

Типові енергетичні спектри ядер ^{14}C і ^{13}N , продуктів реакцій $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ і $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{13}\text{N})^{14}\text{C}$, отримані з $\Delta E(E)$ -спектрів проектуванням локусів цих ядер на E -вісь, наведено на рис. 2:

- а) спектр ^{14}C з неперервним фоном (суцільна крива) від багаточастинкових реакцій;
- б) спектр ^{14}C після вилучення неперервного фону (криві – наближення експериментальних піків симетричними гауссіанами);
- в) спектр ^{13}N з неперервним фоном (суцільна крива) від багаточастинкових реакцій;
- г) спектр ^{13}N після вилучення неперервного фону (криві – гауссіани).

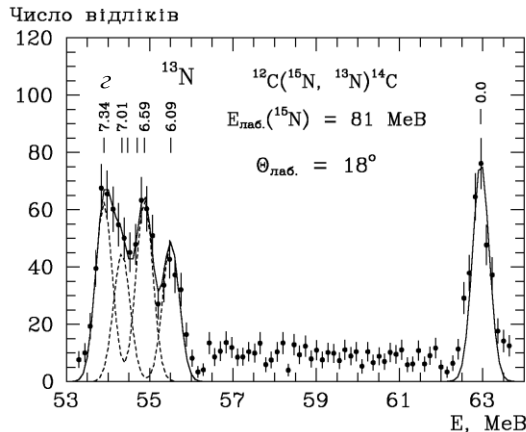
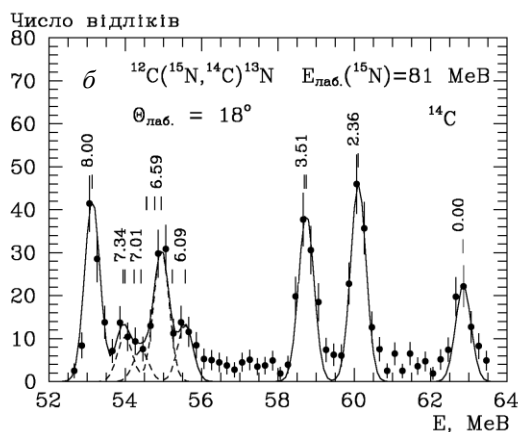
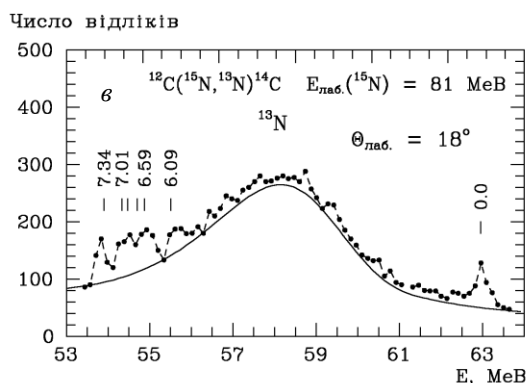
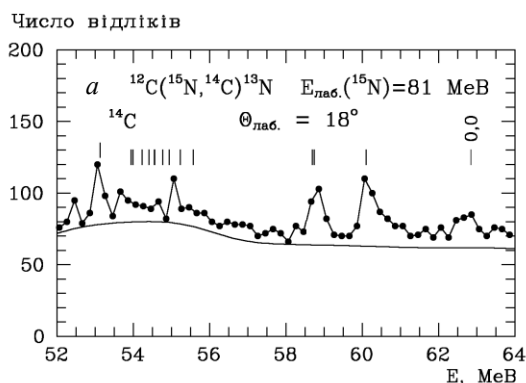


Рис. 2. Типові енергетичні спектри ^{14}C і ^{13}N - продуктів реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81 \text{ MeV}$. Кривими показано наближення фонів від багаточастинкових реакцій (а, в) та наближення експериментальних піків симетричними гауссіанами (б, г).

Площі гауссіанів використовувалися для обчислення диференціальних перерізів реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$. При цьому для кутів $\theta^{\circ}_{\text{с.ц.м.}}(^{14}\text{C}) < 90^{\circ}$ використовувались енергетичні спектри ^{14}C , а спектри ^{13}N - для кутів $\theta^{\circ}_{\text{с.ц.м.}}(^{14}\text{C}) = 180^{\circ} - \theta^{\circ}_{\text{с.ц.м.}}(^{13}\text{N})$. Таким методом було отримано кутові розподіли перерізів реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ у повному кутовому діапазоні для основних та збуджених станів ядер ^{14}C і ^{13}N . Оскільки ядро ^{13}N у збуджених станах розпадає, то перерізи реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ для цих станів ядра ^{13}N було поміряно лише при використанні спектрів ядер ^{14}C .

Одержані експериментальні дані диференціальних перерізів реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ для основних та збуджених станів ядер ^{14}C і ^{13}N показано на рис. 3.

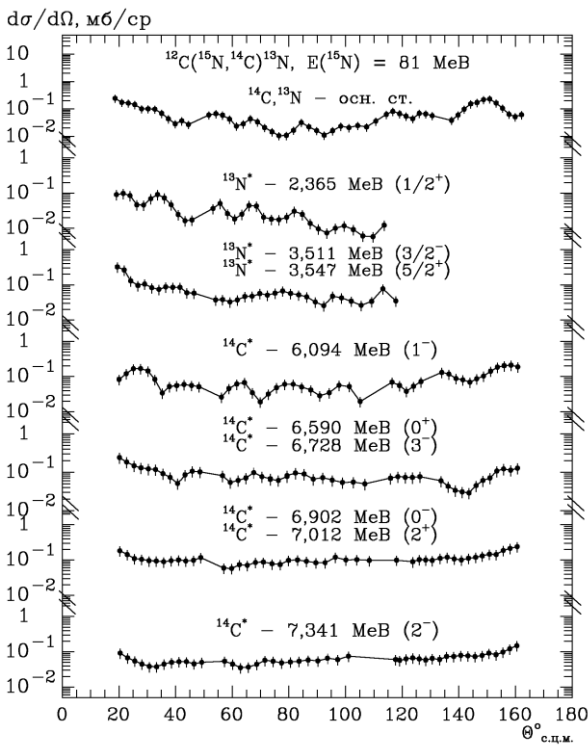


Рис. 3. Диференціальні перерізи реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ.

3. Аналіз експериментальних даних

Експериментальні дані диференціальних перерізів реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ проаналізовано за

МЗКР із включенням у схему зв'язку каналів пружного розсіювання ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ та одно- й дво-ступінчастих реакцій передач нуклонів і кластерів, діаграми яких показано на рис. 4. МЗКР-розрахунки реакції проводились за допомогою програми FRESKO [5].

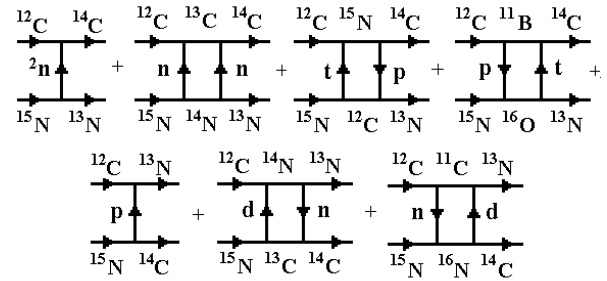


Рис. 4. Діаграми передач нуклонів та кластерів у реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$.

Необхідні для МЗКР-розрахунків перерізів реакції спектроскопічні амплітуди S_x нуклонів і кластерів x в ядрах $A = C + x$ обчислювалися за ТІМО [6], використовуючи програму DESNA [7, 8]. Ці спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів x , переданих у реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ згідно з діаграмами рис. 4, подано в табл. 1.

У МЗКР-розрахунках перерізів реакції використовувались потенціали WS

$$U(r) = -V_0 \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_v}{a_v}\right) \right]^{-1} - iW_s \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_w}{a_w}\right) \right]^{-1} \quad (1)$$

для вхідного та вихідних каналів реакції.

Для вхідного каналу реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ використано параметри потенціалу WS взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$, отримані в роботі [1] при дослідженні пружного й непружного розсіювання іонів ^{15}N ядрами ^{12}C при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ. Для вихідного ж каналу реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ параметри потенціалу WS взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ визначено методом підгонки МЗКР-розрахунків до експериментальних даних реакції. Ці параметри подано в табл. 2.

Таблиця 1. Спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів x у системах $A = C + x$

A	C	x	nL _J	S _x
^{12}C	^{11}B	p	$1P_{3/2}$	-1,706 ^(a)
^{12}C	^{11}C	n	$1P_{3/2}$	1,706 ^(a)
^{13}C	^{12}C	n	$1P_{1/2}$	0,601
^{14}C	^{11}B	t	$2P_{3/2}$	0,368 ^(a)
^{14}C	^{12}C	2n	$2S_0$	0,615
$^{14}\text{C}^*_{6,09}$	^{12}C	2n	$1P_1$	0,615
^{14}N	^{12}C	d	$1D_1$	0,246
^{15}N	^{12}C	t	$2P_{1/2}$	0,380
^{15}N	^{13}C	d	$2S_1$	0,248 ^(a)
			$1D_1$	0,444 ^(a)
^{15}N	^{14}C	p	$1P_{1/2}$	-0,598
^{15}N	$^{14}\text{C}^*_{6,09}$	p	$2S_{1/2}$	0,598

A	C	x	nL _J	S _x	A	C	x	nL _J	S _x
¹⁴ C* _{6,59}	¹² C	² n	2S ₀	0,615	¹⁵ N	¹⁴ C* _{6,59}	p	1P _{1/2}	-0,598
¹⁴ C* _{6,90}	¹² C	² n	2S ₀	0,615	¹⁵ N	¹⁴ C* _{6,90}	p	1P _{1/2}	-0,598
¹⁴ C* _{7,01}	¹² C	² n	1D ₂	0,246	¹⁵ N	¹⁴ C* _{7,01}	p	1P _{3/2}	1,336
¹⁴ C* _{7,34}	¹² C	² n	1D ₂	0,246	¹⁵ N	¹⁴ C* _{7,34}	p	1P _{3/2}	1,336
¹⁴ C	¹³ C	n	1P _{1/2}	-1,094 ^(a)	¹⁵ N	¹³ N	² n	2S ₀	0,608
¹³ N	¹¹ C	d	2S ₁	0,203	¹⁵ N	¹³ N* _{2,36}	² n	2S ₀	-0,608
			1D ₁	0,125	¹⁵ N	¹³ N* _{3,51}	² n	1D ₂	-0,544
			1D ₂	0,375 ^(a)	¹⁵ N	¹³ N* _{3,54}	² n	1D ₂	-0,246
¹³ N	¹² C	p	1P _{1/2}	0,601	¹⁵ N	¹⁴ N	n	1P _{1/2}	-1,091 ^(a)
¹³ N* _{2,36}	¹² C	p	2S _{1/2}	0,601				1P _{3/2}	0,386
¹³ N* _{3,51}	¹² C	p	1P _{3/2}	0,601	¹⁶ N	¹⁴ C	d	2P ₂	0,380
¹³ N* _{3,55}	¹² C	p	1D _{5/2}	0,101	¹⁶ N	¹⁵ N	n	1D _{3/2}	-0,270
¹⁴ N	¹³ N	n	1P _{1/2}	-0,461	¹⁶ O	¹³ N	t	2P _{1/2}	-0,910 ^(a)
			1P _{3/2}	-0,163 ^(a)	¹⁶ O	¹⁵ N	p	1P _{1/2}	-1,461 ^(a)

$$^{(a)}S_{FRESKO} = (-1)^{J_C + J_A - J_X} S_x = -S_x.$$

Таблиця 2. Параметри потенціалів взаємодії ядер

Ядра	E _{с.п.м.} , MeB	V ₀ , MeB	r _V , фм	a _V , фм	W _S , MeB	r _W , фм	a _W , фм	Літ.
¹⁵ N + ¹² C	36,0	195	0,790	0,750	8,0	1,250	0,750	[1]
¹⁴ C + ¹³ N	27,7	190	0,790	0,870	6,0	0,900	0,870	
¹⁴ C + ¹⁴ N	58,0	150	0,812	0,708	35,4	0,958	0,789	[9]

Експериментальні дані реакції ¹²C(¹⁵N, ¹⁴C)¹³N при енергії E_{лаб}(¹⁵N) = 81 MeB для основних станів ядер ¹⁴C і ¹³N та відповідні МЗКР-розрахунки показано на рис. 5 для передач протонів (крива <p>), 2n-кластерів (крива <2n>), двоступінчастих передач нейтронів n + n (крива <nn>), тритонів і протонів t + p і p + t (крива <tp>) та дейтронів і нейтронів d + n і n + d (крива <dn>). Кривою Σ_{WS} показано когерентну суму МЗКР-перерізів усіх процесів. Видно, що ця сума Σ_{WS} задовільно описує експериментальні дані реакції ¹²C(¹⁵N, ¹⁴C)¹³N. Передачі протонів і 2n-кластерів, як видно на рисунку, домінують у цій реакції. Передача протонів p домінує на малих кутах, а передача дінейтронів 2n - на великих кутах. Внески двоступінчастих процесів у перерізи реакції незначні.

На рис. 6 показано МЗКР-перерізи реакції ¹²C(¹⁵N, ¹⁴C)¹³N, обчислені з використанням у вихідному каналі ¹⁴C + ¹³N параметрів потенціалу WS взаємодії ядер ¹⁴C + ¹³N, отриманих у даній роботі (суцільна крива Σ_{WS}(¹³N + ¹⁴C)), та взаємодії ядер ¹⁴C + ¹⁴N [9] (штрихова крива Σ_{WS}(¹⁴N + ¹⁴C)). Ці параметри подано в табл. 2. На цьому ж рисунку показано також МЗКР-перерізи реакції при використанні в її вихідному каналі оптичного фолдінг-потенціалу DF

$$U_{DF}(r) = V_{DF}(r) + ikV_{DF}(r), \quad (2)$$

при k = 0,1 для взаємодії ядер ¹⁴C + ¹⁴N (штрихова крива Σ_{DF}(¹⁴N + ¹⁴C)). Фолдінг-потенціал DF взаємо-

дії ядер ¹⁴C + ¹⁴N обчислено за допомогою програми DFROT [10] з використанням розподілів нуклонів в ядрах ¹⁴C і ¹⁴N, поданих у роботі [11].

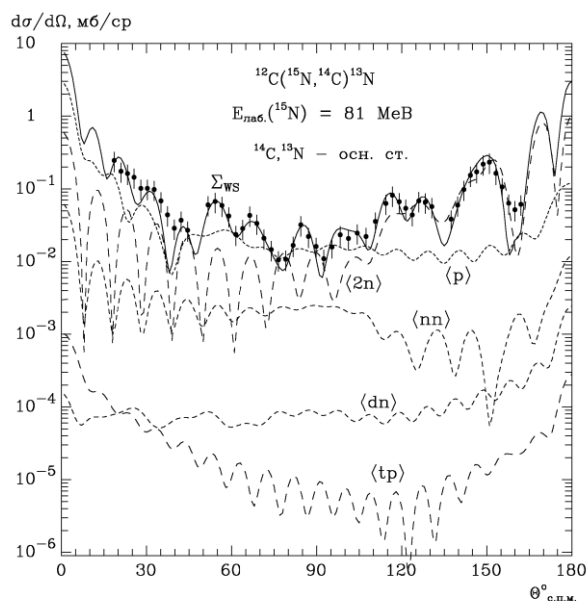


Рис. 5. Диференціальні перерізи реакції ¹²C(¹⁵N, ¹⁴C)¹³N при енергії E_{лаб}(¹⁵N) = 81 MeB для основних станів ядер ¹⁴C і ¹³N. Криві – МЗКР-перерізи реакції передач нуклонів і кластерів (див. рис. 4).

На рис. 6 видно значні відмінності МЗКР-перерізів реакції ¹²C(¹⁵N, ¹⁴C)¹³N при використанні у вихідному каналі параметрів потенціалів WS взаємодії ядер ¹⁴C + ¹³N та ¹⁴C + ¹⁴N. При використанні оптичного фолдінг-потенціалу DF (2) з k = 0,1 ці відмінності значно менші.

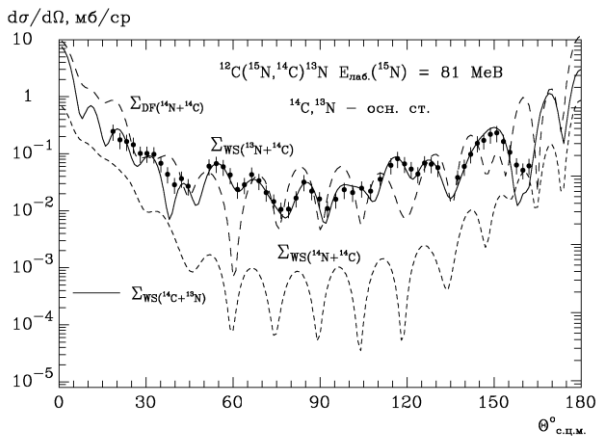


Рис. 6. Порівняння МЗКР-перерізів реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$, обчислених з використанням в її вихідному каналі параметрів потенціалу WS для взаємодій ядер $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ і $^{14}\text{C} + ^{14}\text{N}$ [9] (суцільна крива $\Sigma_{\text{WS}}(^{13}\text{N} + ^{14}\text{C})$ і штрихова крива $\Sigma_{\text{WS}}(^{14}\text{N} + ^{14}\text{C})$ відповідно) та фолдинг-потенціалу DF взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{14}\text{N}$ (штрихова крива $\Sigma_{\text{DF}}(^{14}\text{N} + ^{14}\text{C})$).

Експериментальні дані диференціальних перерізів реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ та відповідні МЗКР-розрахунки для збуджених станів ядер ^{14}C і ^{13}N показано на рис. 7 – 9. На цих рисунках у кутових розподілах реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ із збудженим рівнем 2,365 MeB ($1/2^+$) ядра ^{13}N та збудженими рівнями 6,094 MeB (1^-) і 7,341 MeB (2^-) ядра ^{14}C штриховими кривими $\langle p \rangle$ і $\langle 2n \rangle$ показано МЗКР-перерізи реакції, обчислені для передач протонів p і дінейтронів $2n$ відповідно, а суцільними кривими Σ_{WS} – когерентні суми МЗКР-перерізів цих передач.

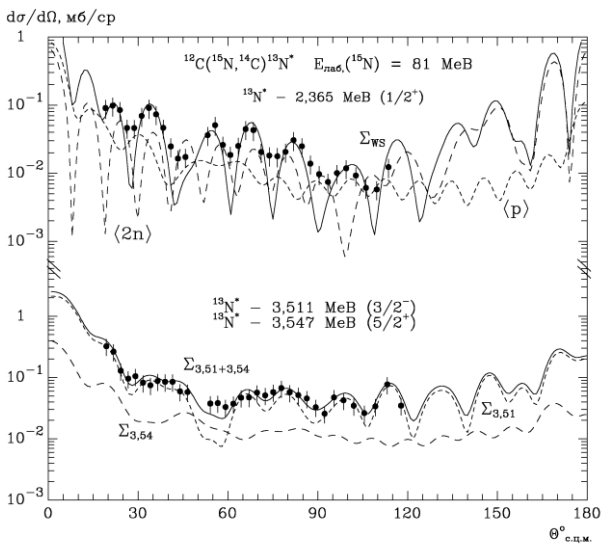


Рис. 7. Диференціальні перерізи реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeB для збудженого стану 2,365 MeB та нерозділених в експерименті станів 3,511 + 3,547 MeB ядра ^{13}N . Криві $\langle p \rangle$, $\langle 2n \rangle$ і Σ_E – МЗКР-перерізи для передач протонів p і кластерів $2n$ та їхні суми.

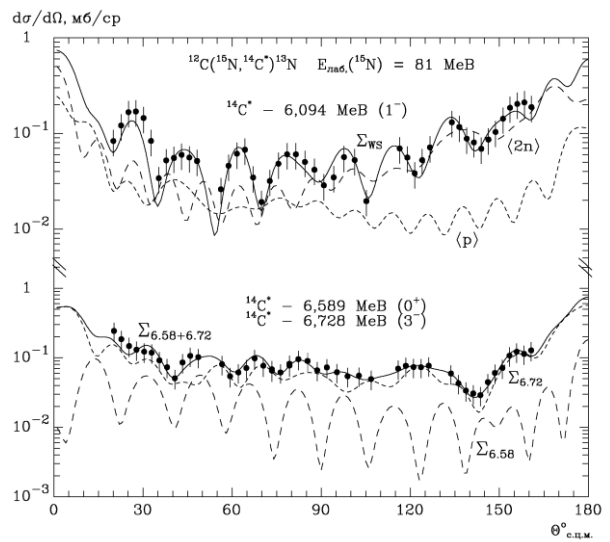


Рис. 8. Диференціальні перерізи реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeB для збудженого стану 6,094 MeB та станів 6,589 + 6,728 MeB ядра ^{14}C . Криві – МЗКР-перерізи для передач протонів та $2n$ -кластерів (див. текст).

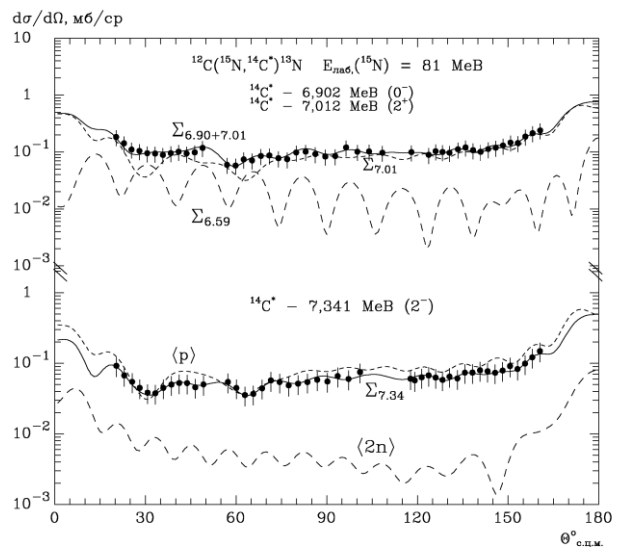


Рис. 9. Диференціальні перерізи реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeB для збуджених станів 6,902 + 7,012 MeB та 7,341 MeB ядра ^{14}C . Криві – МЗКР-перерізи для передач протонів та $2n$ -кластерів (див. текст).

Для нерозділених в експерименті збуджених рівнів E_1 ядер ^{14}C і ^{13}N штриховими кривими Σ_{E_i} на рис. 7 – 9 показано когерентні суми МЗКР-перерізів реакції для передач протонів p і кластерів $2n$, а суцільними кривими $\Sigma_{E_1 + E_2}$ – некогерентні суми МЗКР-перерізів Σ_{E_1} та Σ_{E_2} .

4. Основні результати та висновки

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeB для основних та

збуджених станів 2,365 - 3,547 MeV ядра ^{13}N та збуджених станів 6,095 - 7,341 MeV ядра ^{14}C .

Експериментальні дані $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ проаналізовано за МЗКР із включенням у схему зв'язку каналів пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ та каналів одно- і двоступінчастих передач нуклонів і кластерів 2n, d, t з утворенням ядер $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ в основних і збуджених станах.

У МЗКР-розрахунках використовувались потенціали WS взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ для вхідного каналу реакції та взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ в основних і збуджених станах у вихідних каналах передач нуклонів і кластерів у реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$. Для вхідного каналу реакції використано потенціал WS, параметри якого було отримано в роботах [1, 2] при дослідженні пружного й непружного розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^{12}C при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeV, а параметри потенціалу WS для вихідного каналу $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ реакції отримано в даній роботі методом підгонки МЗКР-перерізів реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ до експериментальних даних.

Спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів, необхідні для МЗКР-розрахунків передач нуклонів і кластерів, обчислено за ТІМО.

Отримано відомості про роль одно- та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів у даній реакції для основних та збуджених станів ядер ^{14}C і ^{13}N . Установлено, що в даній реакції основну роль відіграють передачі протона p та дінейтрона 2n. Внески двоступінчастих передач нуклонів і кластерів у перерізи реакції незначні.

Досліджено МЗКР-перерізи реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при використанні у вихідному каналі $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ параметрів потенціалу WS і оптичного фолдінг-потенціалу DF взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{14}\text{N}$. При цьому виявлено значні відмінності МЗКР-перерізів реакції (ізотопічні ефекти).

Дана робота була профінансована за рахунок коштів наукового проекту «Дослідження структури нейтронно-надлишкових ядер 1p-оболонки у ядерних реакціях», що виконується відповідно до Цільової програми наукових досліджень НАН України «Фундаментальні дослідження з фізики високих енергій та ядерної фізики (міжнародна співпраця)» на 2018 - 2020 рр.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. А.Т. Рудчик та ін. Пружне та непружне розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^{12}C при енергії 81 MeV. *Ядерна фізика та енергетика* 19 (2018) 210.
2. A.T. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of ^{15}N ions by ^{12}C at 81 MeV and the effect of transfer channels. *Acta Phys. Polon. B* 50 (2019) 733.
3. E. Piasecki et al. *Project ICARE at HIL* (Warsaw: Heavy Ion Laboratory, 2007) 38 p.
4. M. Kowalczyk. SMAN: a Code for Nuclear Experiments. Warsaw University Report (1998).
5. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* 7 (1988) 167.
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 1p-оболочки (программа DESNA). Препринт Ин-та ядерных исследований АН УССР. КИЯИ-82-12 (Киев, 1982) 27 с.
8. А.Т. Рудчик, Ю.М. Чувильский. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1p-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач. *УФЖ* 30 (1985) 819.
9. А.Т. Рудчик et al. Scattering, one-nucleon transfers and charge-exchange reactions in the $^{14}\text{C} + ^{14}\text{N}$ interaction at $E(^{14}\text{N}) = 116$ MeV. *Nucl. Phys. A* 589 (1995) 535.
10. J. Cook. DFPOT: a program for the calculation of double folded potentials. *Comp. Phys. Com.* 25 (1982) 125.
11. 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.

А. Т. Рудчик^{1,*}, А. А. Рудчик¹, А. Е. Куцык¹, К. Русек², К. В. Кемпер³, Е. Пясецкий², А. Столяж², А. Тщиньска², Вал. М. Пирнак¹, О. А. Понкратенко¹, И. Строек⁴, Е. И. Коцкий⁵, Р. Сюдак⁶, С. Б. Сакута⁷, В. А. Плюйко⁸, А. П. Ильин¹, Ю. Н. Степаненко¹, В. В. Улещенко¹, Ю. О. Ширма¹

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Лаборатория тяжелых ионов Варшавского университета, Варшава, Польша

³ Отдел физики, Флоридский государственный университет, Таллахасси, США

⁴ Национальный центр ядерных исследований, Варшава, Польша

⁵ Циклотронный институт Техасского А&М университета, Техас, США

⁶ Институт ядерной физики им. Г. Неводничаньского, Краков, Польша

⁷ Национальный исследовательский центр «Институт Курчатова», Москва, Россия

⁸ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

*Ответственный автор: rudchik@kinr.kiev.ua

МЕХАНИЗМИ РЕАКЦІЇ $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ 81 МэВ І ВЗАЙМОДІЙСТВО ЯДЕР $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$

Исследована реакция $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при энергии $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МэВ для основных и возбужденных состояний ядер ^{14}C и ^{13}N . Получены новые данные дифференциальных сечений реакции. Экспериментальные данные проанализированы по методу связанных каналов реакций (МСКР). Упругое рассеяние ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ и наиболее вероятные

реакции передач нуклонов и кластеров были включены в схему связи каналов. В МСКР-расчетах использовались потенциалы Вудса - Саксона (WS) взаимодействия ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ для входного канала реакции и взаимодействия ядер $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ для выходных каналов реакции. Параметры потенциала WS для входного канала реакции раньше были получены при МСКР-анализе экспериментальных данных упругого и неупругого рассеяния ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$, а параметры потенциала WS для выходного канала $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ реакции получены в данной работе методом подгонки МСКР-сечений реакции $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ к ее экспериментальным данным. В МСКР-расчетах сечений этой реакции использовались спектроскопические амплитуды нуклонов и кластеров в ядрах, которые вычислялись по трансляционно-инвариантной модели 1p-оболочки. В результате МСКР-анализа реакции получены сведения о потенциале WS взаимодействия ядер $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ и механизмы передач нуклонов и кластеров. Было установлено, что в данной реакции главную роль играют передачи протонов и 2n-кластеров. Были исследованы отличия МСКР-сечений реакции $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при использовании в ее выходном канале потенциалов взаимодействия ядер $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ и $^{14}\text{C} + ^{14}\text{N}$ (изотопические эффекты).

Ключевые слова: ядерная реакция $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при 81 МэВ, анализ по методу связанных каналов реакций, спектроскопические амплитуды нуклонов и кластеров, механизмы реакции.

A. T. Rudchik^{1*}, A. A. Rudchik¹, O. E. Kutsyk¹, K. Rusek², K. W. Kemper³, E. Piasecki², A. Stolarz²,
A. Trzczińska², Val. M. Pirnak¹, O. A. Ponkratenko¹, I. Strojek⁴, E. I. Koshchiy⁵, R. Siudak⁶, S. B. Sakuta⁷,
V. A. Plujko⁸, A. P. Ilyin¹, Yu. M. Stepanenko¹, V. V. Uleshchenko¹, Yu. O. Shyrma¹

¹ Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Heavy Ion Laboratory, Warsaw University, Warsaw, Poland

³ Physics Department, Florida State University, Tallahassee, USA

⁴ National Institute for Nuclear Research, Warsaw, Poland

⁵ Cyclotron Institute, Texas A&M University, College Station, USA

⁶ H. Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Krakow, Poland

⁷ Russian Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

⁸ Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: rudchik@kinr.kiev.ua

$^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ REACTION MECHANISMS AT ENERGY 81 MeV AND $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ NUCLEI INTERACTION

The $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ reaction at the energy $E_{\text{lab}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeV for ground and excited states of ^{14}C and ^{13}N nuclei was investigated. New experimental data of the reaction cross-sections were obtained. The data were analyzed within the coupled reaction channels method (CRC). The $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ elastic scattering as well as the more important reactions of nucleon and cluster transfers were included in the channels-coupling scheme. In the CRC-calculations, the Woods - Saxon potentials (WS) were used for the interactions of $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ and $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ nuclei in the entrance and exit reaction channels. WS potential parameters for the reaction entrance channel were deduced previously from CRC-analysis of the $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ elastic and inelastic scattering data, then the WS potential parameters for the reaction exit channel were deduced from the fitting of $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ reaction data. The spectroscopic amplitudes of nucleons and clusters, used in the CRC-calculations, were computed within translational invariant shell model. As the results of the reaction CRC-analysis, the information about WS potential of $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ nuclei interaction as well as about mechanisms of nucleons and clusters transfer was deduced. It was found, that transfers of protons and 2n-clusters dominate in this reaction. It was also studied the differences of the reaction CRC cross-sections calculated using the $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ i $^{14}\text{C} + ^{14}\text{N}$ potentials in the reaction exit channel (isotopic effects).

Keywords: nuclear reaction $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ at 81 MeV, coupled reaction channels method, spectroscopic amplitudes of nucleons and clusters, reaction mechanisms.

REFERENCES

1. A.T. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of ^{15}N ions by ^{12}C at 81 MeV. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 19 (2018) 210. (Ukr).
2. A.T. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of ^{15}N ions by ^{12}C at 81 MeV and the effect of transfer channels. *Acta Phys. Polon. B* 50 (2019) 733.
3. E. Piasecki et al. *Project ICARE at HIL* (Warsaw: Heavy Ion Laboratory, 2007) 38 p.
4. M. Kowalczyk. SMAN: a Code for Nuclear Experiments. Warsaw University report (1998).
5. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* 7 (1988) 167.
6. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the p -shell nuclei. *Phys. Rev. C* 15 (1977) 84.
7. A.T. Rudchik, Yu.M. Tchuvil'sky. Calculation of spectroscopic amplitudes for arbitrary associations of nucleons in 1p-shell nuclei (program DESNA). Preprint of the Institute for Nucl. Res. AS UkrSSR. KINR-82-12 (Kyiv, 1982) 27 p. (Rus)
8. A.T. Rudchik, Yu.M. Tchuvil'sky. Calculation of spectroscopic amplitudes of multi-nucleon clusters in 1p-shell nuclei and analysis of reactions of multi-nucleon transmissions. *Ukr. J. Phys.* 30(6) (1985) 819 (Rus).
9. A.T. Rudchik et al. Scattering, one-nucleon transfers and charge-exchange reactions in the $^{14}\text{C} + ^{14}\text{N}$ interaction at $E(^{14}\text{N}) = 116$ MeV. *Nucl. Phys. A* 589 (1995) 535.
10. J. Cook. DFPOT: a program for the calculation of double folded potentials. *Comp. Phys. Com.* 25 (1982) 125.
11. 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.

Надійшла 24.06.2019

Received 24.06.2019