

ЯДЕРНА ФІЗИКА
NUCLEAR PHYSICS

УДК 539.171/539.172

<https://doi.org/10.15407/jnpae2018.03.210>

**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. Коший⁵, 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, Україна² Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща³ Відділ фізики, Флоридський державний університет, Таллахасі, США⁴ Національний центр ядерних досліджень, Варшава, Польща⁵ Циклотронний інститут Техаського А&М університету, Техас, США⁶ Інститут ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського, Краків, Польща⁷ Національний дослідницький центр «Інститут Курчатова», Москва, Росія⁸ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

*Відповідальний автор: rudchik@kinr.kiev.ua

**ПРУЖНЕ І НЕПРУЖНЕ РОЗСІЯННЯ ІОНІВ ¹⁵N ЯДРАМИ ¹²C
ПРИ ЕНЕРГІЇ 81 МеВ**

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного і непружного розсіяння іонів ¹⁵N ядрами ¹²C при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ. Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). Пружне і непружне розсіяння та найбільш важливі реакції передач нуклонів і кластерів включалися у схему зв'язку каналів. У МЗКР-розрахунках використовувалися потенціал подвійної згортки (фолдінг-потенціал DF) взаємодії ядер ¹⁵N + ¹²C та потенціал Вудса - Саксона (WS). Визначено параметри потенціалу WS та деформації ядер ¹²C і ¹⁵N. Отримано відомості про внески реакцій одно- та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів у пружне і непружне розсіяння ядер ¹⁵N + ¹²C. Відомі з літератури дані пружного розсіяння ядер ¹⁵N + ¹²C при енергіях $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 22,4 - 31,4$ МеВ, поміряні на великих кутах, також було проаналізовано за МЗКР й отримано залежні від енергії параметри потенціалу WS взаємодії цих ядер. Порівнюючи дані пружного розсіяння ядер ¹⁵N + ¹²C і ¹⁴N + ¹²C та МЗКР-розрахунки (¹⁵N + ¹²C)-розсіяння з потенціалами WS цих двох пар ядер, виявлено значні відмінності як експериментальних даних, так і МЗКР-розрахунків, особливо на великих кутах, де крім потенціального розсіяння спостерігаються внески реакцій передач. Це може бути інтерпретовано як прояв ізотопічних ефектів у розсіянні пар ядер ¹⁵N + ¹²C і ¹⁴N + ¹²C.

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

1. Вступ

У дослідженнях структури, взаємодії ядер та механізмів ядерних процесів пружне і непружне розсіяння є одним із базових, оскільки експериментальні дані цього розсіяння використовуються для отримання відомостей про потенціли ядро-ядерної взаємодії, деформацію ядер та мають прикладне значення. Так, у дослідженнях прямих ядерних реакцій передач $T(P, X)Y$ з виходом різних ядер X і Y у розрахунках перерізів реакцій у рамках сучасних теорій прямих ядерних передач нуклонів і кластерів для вхідних каналів $P + T$ використовуються потенціали взаємодії ядер, отримані з аналізу експериментальних даних пружного і непружного розсіяння цих ядер. Усе це та інші потреби в експериментальних даних ядро-ядерного розсіяння та в потенціалах ядро-ядерної взаємодії обумовлюють важливість дослідження пружного і непружного розсіяння ядер.

У даній роботі досліджено пружне і непружне розсіяння іонів ¹⁵N ядрами ¹²C при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ, експериментальні диференціальні перерізи якого поміряно на Варшавському циклотроні U-200P одночасно з реакціями передач ¹²C(¹⁵N, X)Y з виходом ядер X, Y із зарядами $Z = 3 - 8$. Метою таких комплексних досліджень розсіяння та реакцій передач з використанням пучків іонів ^{10,11}B, ¹²C, ^{14,15}N, ^{16,18}O циклотрона U-200P, починаючи з 2000 р., є отримання нових експериментальних даних ядерних процесів, відомостей про структуру стабільних і нестабільних легких ядер, їхню ядро-ядерну взаємодію, механізми ядерних процесів, можливість практичного використання пучків важких іонів тощо.

Метою даної роботи було отримання нових експериментальних даних пружного і непружного розсіяння ядер ¹⁵N + ¹²C при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ у повному кутовому діапазоні

© 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. Коший, Р. Сюдак, С. Б. Сакута, В. А. Плюйко, А. П. Ільїн, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма, 2018

та аналіз цих даних у рамках сучасних ядерних моделей. Результати цього аналізу дуже потрібні для дослідження реакцій із виходом нестабільних ядер. У літературі були відомі лише раніше дані про пружне розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при енергіях $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 22,4 \div 31,4$ МеВ (10 енергій), поміряні в роботі [1] в інтервалі кутів $\theta_{\text{с.п.м.}}^0 > 140^\circ$. Ці дані в цій роботі не було проаналізовано в рамках жодних ядерних моделей. Інших експериментальних даних розсіяння $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ не відомо в науковій літературі.

Отримані в даній роботі експериментальні дані порівнюються з даними пружного розсіяння $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при енергіях $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 22,4 \div 31,4$ МеВ (10 енергій) [1], поміряними в інтервалі кутів $\theta_{\text{с.п.м.}}^0 > 140^\circ$. Ці дані роботи [1] та отримані нами дані при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). Проведено також порівняння даних розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ з даними розсіяння ядер $^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при енергіях $E_{\text{лаб}}(^{14}\text{N}) = 116$ МеВ [2] та 78 МеВ [3].

У першому розділі даної роботи подано основні відомості про експеримент, методику вимірювання та отримання кутових розподілів експериментальних даних розсіяння $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$. Результати аналізу експериментальних даних пружного і непружного розсіяння $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ за МЗКР подано у другому розділі. Завершується робота переліком основних результатів та висновків.

2. Методика експерименту

Вимірювання диференціальних перерізів пружного і непружного розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^{12}C одночасно з реакціями передач $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ проведено на циклотроні U-200P Лабораторії важких іонів Варшавського університету. Для отримання пучка іонів ^{15}N було використано збагачену цим ізотопом кальцієву селітру ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$). Розкид енергії іонів на мішені не перевищував 0,5 %. В експерименті використовувалася самопідтримна мішень ^{12}C товщиною $\sim 0,5$ мг/см². Експеримент проводився на експериментальній

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

методом підгонки параметрів N_{0i} , E_{1i} , E_{2i} , H_{1i} , H_{2i} до глибоких мінімумів спектрів. Для наближення піків експериментальних спектрів цих ядер використовувалися симетричні гауссіани з напівширинами 200 кеВ, враховуючи енергетичну роздільну здатність методики ~ 400 кеВ.

установці ICARE [4] із використанням ΔE - E -методики з кремнієвими ΔE - і E -детекторами товщиною 40 та 300 мкм відповідно.

Типовий $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, X)$ показано на рис. 1. Видно, що експериментальна методика забезпечувала розділення продуктів реакцій за зарядами та масами. Реєструвалися одночасно продукти ядерних процесів із зарядами $Z = 3 - 8$.

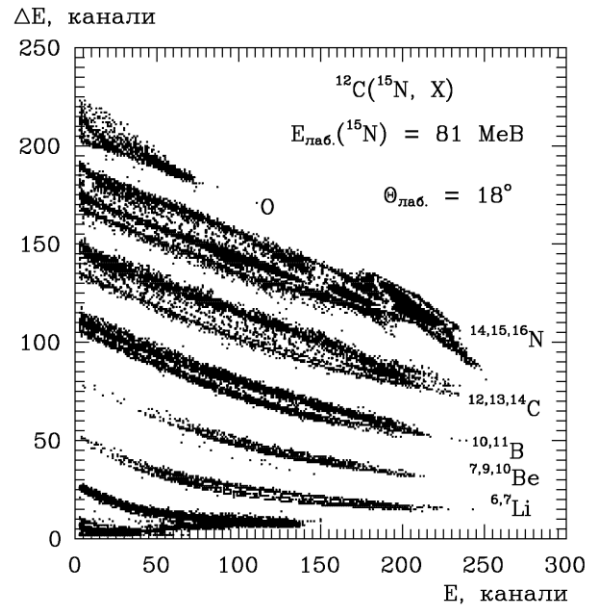


Рис. 1. Типовий $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ.

Типові енергетичні спектри ядер ^{15}N і ^{12}C із розсіань $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{12}\text{C}$ та $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{12}\text{C})^{15}\text{N}$, отримані з $\Delta E(E)$ -спектрів проектуванням локусів цих ядер на E -вісь, подано на рис. 2: а) спектр ^{15}N з неперервним фоном від багаточастинкових реакцій (суцільна крива); б) спектр ^{15}N після вилучення неперервного фону (криві – наближення експериментальних піків симетричними гауссіанами); в) спектр ^{12}C з неперервним фоном від багаточастинкових реакцій (суцільна крива); г) спектр ^{12}C після вилучення неперервного фону.

Неперервні фони експериментальних спектрів ядер ^{15}N і ^{12}C наближувалися параметризованими асиметричними сігмоїдальними функціями

Площі гауссіанів піків спектрів іонів ^{15}N та ядер віддачі ^{12}C використовувалися для обчислення диференціальних перерізів розсіяння $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{12}\text{C}$ на кутах $\theta_{\text{с.п.м.}}^0(^{15}\text{N})$ реєстрації ^{15}N та на великих кутах $\theta_{\text{с.п.м.}}^0(^{15}\text{N}) = 180^\circ - \theta_{\text{с.п.м.}}^0(^{12}\text{C})$ на основі спектрів ^{12}C . Таким способом було

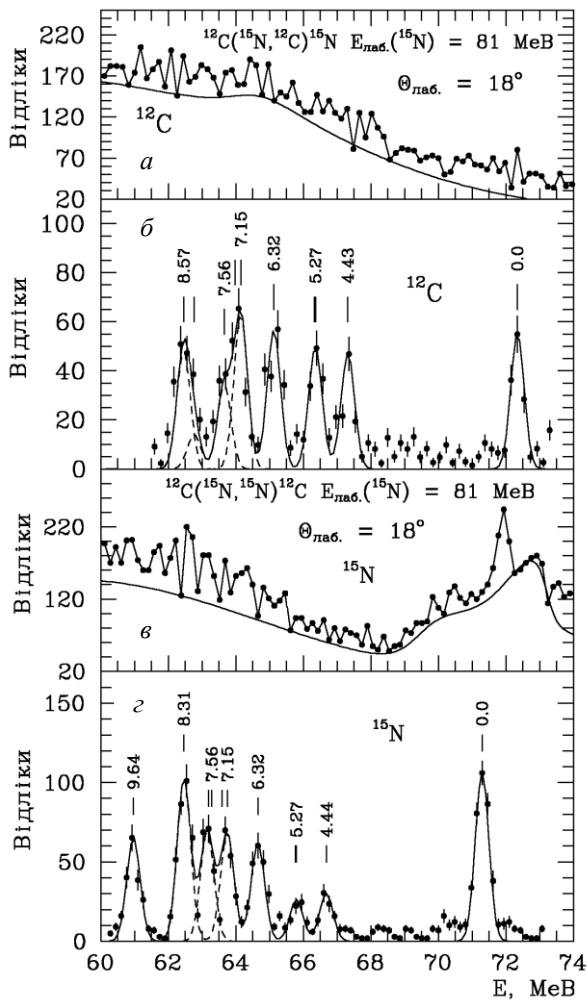


Рис. 2. Типові енергетичні спектри ^{15}N і ^{12}C продуктів пружного і непружного розсіяння $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{12}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ. Кривими показано наближення неперервних фонів від багаточастинкових реакцій (а, в) та експериментальних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

отримано кутові розподіли перерізів пружного і непружного розсіяння $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^{12}\text{C}$ у повному кутовому діапазоні.

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 $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ 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 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 і непружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ не перевищує 20 %.

На рис. 3 показано диференціальні перерізи пружного розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^{12}C від переданого імпульсу q_t у порівнянні з даними пружного розсіяння іонів ^{14}N ядрами ^{12}C при енергіях $E_{\text{лаб}}(^{14}\text{N}) = 116$ МеВ [2] та 78 МеВ [3]. Видно незначні відмінності перерізів розсіянь ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ і $^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$ для малих значень переданих імпульсів q_t та значні при $q_t > 2$ фм $^{-1}$.

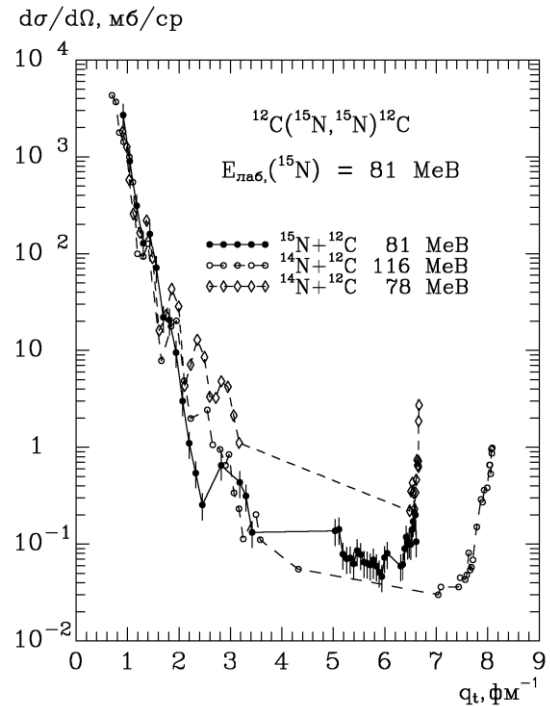


Рис. 3. Залежності диференціальних перерізів пружних розсіянь ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ і $^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$ від переданих імпульсів q_t при енергіях $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ та $E_{\text{лаб}}(^{14}\text{N}) = 116$ МеВ [2] і 78 МеВ [3].

3. Аналіз експериментальних даних

Експериментальні дані пружного і непружного розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^{12}C проаналізовано за МЗКР (CRC) із включенням у схему зв'язку каналів розсіяння та одно- і двоступінчастих реакцій передач нуклонів та малонуклонних кластерів. Для проведення розрахунків розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ за МЗКР використовувалася програма FRESKO [5].

Схеми збуджень ядер ^{15}N і ^{12}C показано на рис. 4, а діаграми реакцій передач – на рис. 5.

Вважалося, що низькоенергетичні збудження ядер мають колективну природу (ротаційні або вібраційні). Для обчислення переходів ядер ^{15}N і ^{12}C у ці збуджені стани використовувався форм-фактор

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

де δ_λ - параметр деформації ядра λ -мультипольності; $U(r)$ - потенціал взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$. У

розрахунках перерізів непружного розсіяння ядер ¹⁵N + ¹²C за МЗКР використовувалися параметри деформації ядер δ_λ (табл. 1). Там же подано та-

кож значення параметрів деформації β_λ = δ_λ/R, де радіус ядра R = 1,25 A^{1/3} фм.

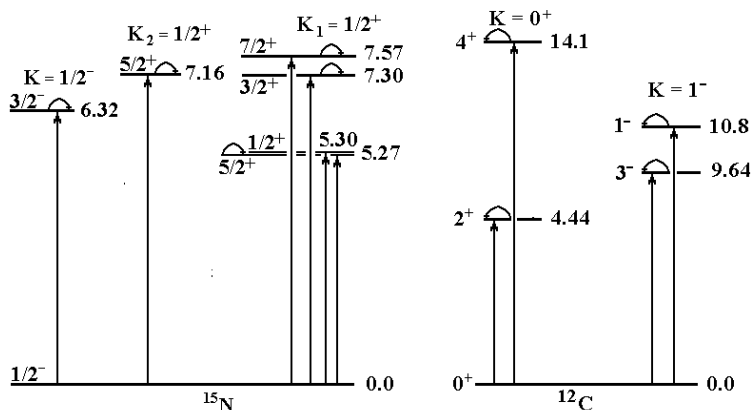


Рис. 4. Схеми переходів ядер ¹⁵N і ¹²C у збуджені стани. Дугами показано переходи з переорієнтацією спінів ядер.

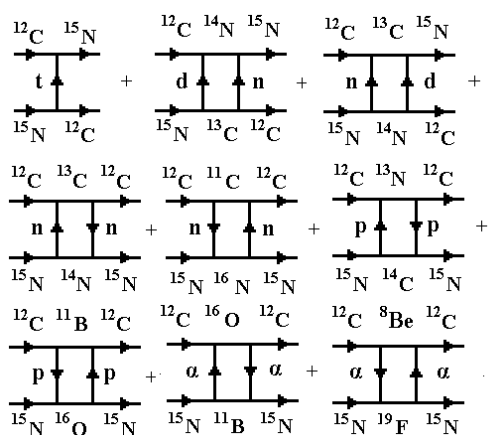


Рис. 5. Діаграми реакцій передач нуклонів і кластерів із виходом ядер ¹⁵N та ¹²C.

Із підгонки МЗКР-перерізів непружного розсіяння ядер ¹⁵N + ¹²C до експериментальних даних на кутах θ_{с.п.м.} < 40° визначено параметри деформації δ₁, δ₂ і δ₃ основного стану ядра ¹⁵N з мінімальною похибкою, рівною точності абсолютизації експериментальних даних ~ 20%. Як і в раніше опублікованій роботі [7], отримано δ₁ ≈ δ₂ ≈ δ₃ ≈ 1,0 ± 0,3 фм.

Таблиця 1. Параметри деформації ядер ¹²C і ¹⁵N

Ядра	0 → E ₃ , MeV	J ^π	λ	δ _λ , фм	β _λ *	Літ.
¹² C	0 → 4,439	2 ⁺	2	-1,07	-0,37	[6]
¹⁵ N	0 → 5,270	5/2 ⁺	3	1,0	0,32	[7]
	0 → 5,299	1/2 ⁺	1	1,0	0,32	[7]
	0 → 6,324	3/2 ⁻	2	1,0	0,32	[7]
	0 → 7,155	5/2 ⁺	3	1,0	0,32	[7]
	0 → 7,301	3/2 ⁺	1	1,0	0,32	[7]
	0 → 7,567	7/2 ⁺	3	1,0	0,32	[7]

* β_λ = δ_λ/R (R = 1,25 A^{1/3}).

Спектроскопічні амплітуди S_x нуклонів і кластерів x в ядрах A = C + x, які використовували-

ся при розрахунках реакцій передач, обчислювалися за трасляційно-інваріантною моделлю оболонки (ТІМО) [8], використовуючи програму DESNA [9, 10]. Ці спектроскопічні амплітуди для реакцій передач, діаграми яких показано на рис. 5, подано в табл. 2.

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

A	C	x	nL _J	S _x
¹² C	⁸ Be	α	3S ₀	0,822
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
¹³ N	¹² C	p	1P _{1/2}	0,601
¹⁴ N	¹² C	d	1D ₁	0,246
¹⁵ N	¹¹ B	α	2D ₂	0,435 ^(a)
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
			1F _{5/2}	0,296
¹⁵ N	¹⁴ N	n	1P _{1/2}	-1,091 ^(a)
			1P _{3/2}	0,386
¹⁶ N	¹⁵ N	n	1D _{3/2}	-0,270
¹⁶ O	¹⁵ N	p	1P _{1/2}	-1,461 ^(a)
¹⁶ O	¹² C	α	3S ₀	0,544
¹⁹ F	¹⁵ N	α	3S ₀	-0,638

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

Хвильові функції відносного руху нуклонів і кластерів x в ядрах A = C + x було обчислено 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 використовувалися параметри a_v = 0,65 фм і r_v = 1,25A^{1/3} / (C^{1/3} + x^{1/3}) фм.

У розрахунках диференціальних перерізів розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ за МЗКР (CRC) для взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ використовувався оптичний фолдінг-потенціал (DF, потенціал подвійної згортки взаємодії нуклонів ядер) з уявною частиною

$$U_{\text{DF}} = V_{\text{DF}} + iW_{\text{DF}} = V_{\text{DF}} + i0,6V_{\text{DF}}, \quad (2)$$

а також оптичний потенціал ядро-ядерної взаємодії Вудса - Саксона (WS)

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

та кулонівський потенціал взаємодії ядер як рівномірно заряджених куль з радіусами

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

Параметри $X_i = \{V_0, r_V, a_V, W_S, r_W, a_W\}$ потенціалу WS визначалися методом підгонки до DF у поверхневій області, забезпечивши при цьому задовільний опис експериментальних даних пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81 \text{ MeV}$. Потенціали DF та WS порівнюються на рис. 6.

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	J_V / J_W , МеВ фм ³	R_V , фм	R_W , фм	Літ.
$^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$	81	195	0,790	0,750	8,0	1,250	0,750	344 / 45	4,03	5,38	
$^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$	116	150	0,812	0,722	29,8	0,958	0,796	281 / 88	3,99	4,57	[2]
	78	100	0,850	0,840	8,0	1,480	0,180	228 / 68	4,40	5,43	[3]

На рис. 7 показано кутовий розподіл диференціальних перерізів пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81 \text{ MeV}$. Штриховими кривими показано обчислені за МЗКР перерізи пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ із використанням потенціалу WS для потенціального розсіяння (крива <rot>) та реакцій передач, діаграми яких показано на рис. 5, (криві <t>, <dn>, <pp>, <np>, <aa> відповідно). Суцільною кривою Σ_{WS} показано когерентну суму всіх процесів. Видно, що основну роль у пружному розсіянні ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ відіграє потенціальне розсіяння. На великих кутах незначні внески дають реакції передач нейтронів $n + n$ (крива <np>) та тритонів t (крива <t>). Когерентна сума перерізів потенціального розсіяння та реакцій передач задовільно описує експериментальні дані в усьому кутовому діапазоні (крива Σ_{WS}).

Аналіз даних пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ за МЗКР проведено також із використанням у розрахунках оптичного фолдінг-потенціалу DF взаємодії цих ядер.

Отримані таким способом параметри X_i потенціалу WS подано в табл. 3 разом із значеннями об'ємних інтегралів J_V і J_W на один нуклон взаємодіючих ядер та радіусів R_V і R_W .

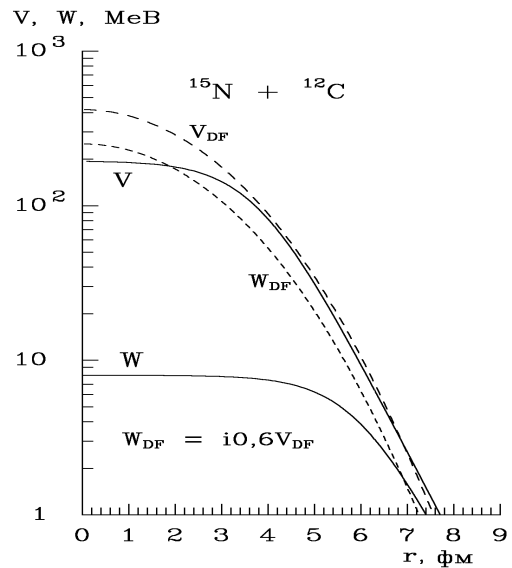


Рис. 6. Порівняння дійсних V та уявних W частин потенціалів DF і WS.

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

Ці МЗКР-розрахунки для пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ показано на рис. 8. Кривими Σ_{WS} і Σ_{DF} на рисунку показано сумарні перерізи пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$, обчислені при використанні потенціалів WS та DF відповідно. Видно, що ці МЗКР-перерізи найбільше відрізняються в інтервалах кутів $\theta_{\text{с.п.м.}}^0 \approx 70^\circ - 100^\circ$ та $\theta_{\text{с.п.м.}}^0 > 160^\circ$.

На рис. 9 порівнюються МЗКР-перерізи пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$, обчислені при використанні набору параметрів потенціалу WS даної роботи (суцільна крива) та наборів параметрів потенціалу $^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при енергіях $E_{\text{лаб}}(^{14}\text{N}) = 116 \text{ MeV}$ [2] і 78 MeV [3] (штрихові криві < $^{14}\text{N} - 78$ > та < $^{14}\text{N} - 116$ > відповідно). Видно незначні розбіжності цих МЗКР-перерізів в інтервалі малих кутів розсіяння, де значну роль відіграє кулонівське розсіяння ядер. На великих кутах розрахунки МЗКР-перерізів пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ з параметрами потенціалів взаємодії ядер $^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$ значно відрізняються від

експериментальних даних цього розсіяння. Іншими словами, спостерігається прояв ізотопічного ефекту в розсіянні іонів ^{15}N і ^{14}N ядрами ^{12}C навіть при близьких енергіях (81 і 78 MeV [3] відповідно).

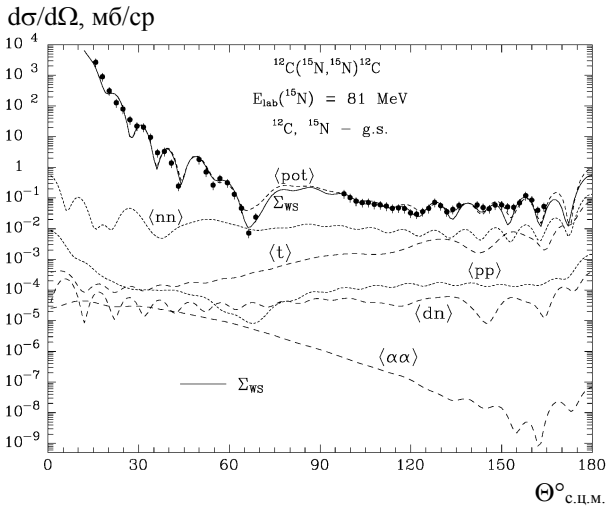


Рис. 7. Диференціальні перерізи пружного розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^{12}C при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeV. Кривими показано розрахунки за МЗКР перерізів різних процесів пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ з використанням потенціалу WS (див. табл. 3).

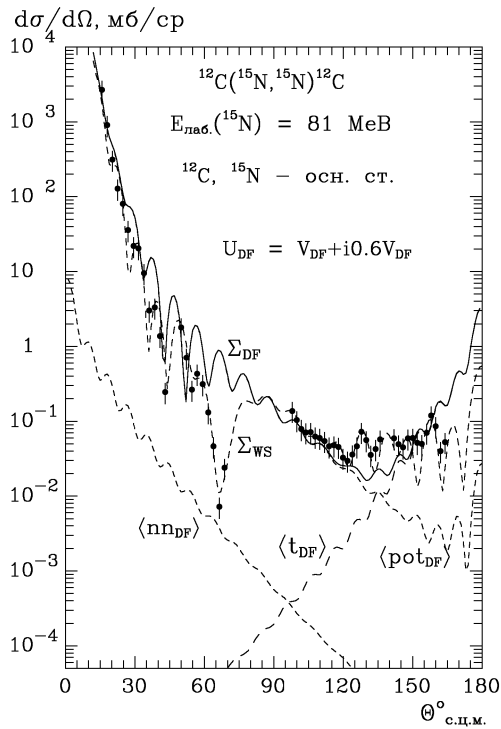


Рис. 8. Те саме, що на рис. 7, але для розрахунків з фолдінг-потенціалом DF. Кривими Σ_{WS} і Σ_{DF} показано сумарні перерізи пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при використанні потенціалів WS та DF відповідно.

Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ для збуджених станів ядер ^{15}N і ^{12}C (див. рис. 4) показано на рис. 10 і 11. Як зазначалося вище, в МЗКР-розрахунках вважа-

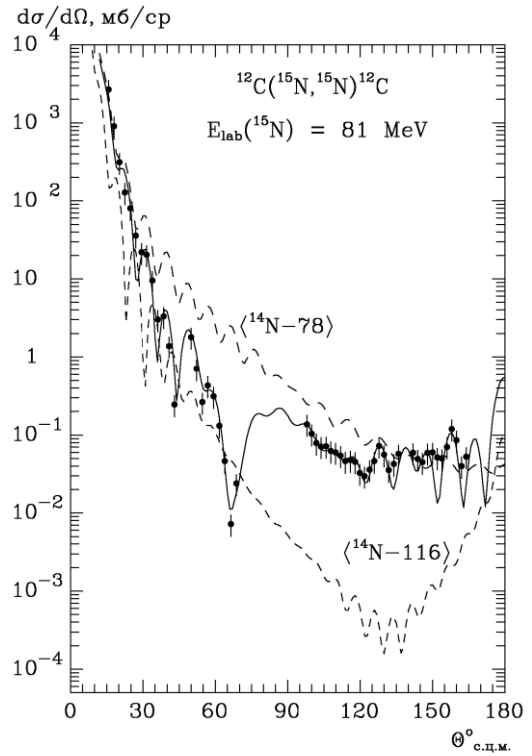


Рис. 9. Порівняння МЗКР-розрахунків пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeV при використанні параметрів потенціалів взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ (суцільна крива) та $^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$ (штрихові криві) (див. табл. 3).

лося, що ці стани деформованих ядер ^{15}N і ^{12}C мають колективну природу збуджень. Параметри деформацій δ_λ цих ядер подано в табл. 1. Кривими $\langle \text{WS} \rangle$ показано МЗКР-розрахунки перерізів непружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ із використанням потенціалів WS.

На рис. 10 показано експериментальні дані диференціальних перерізів непружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ для збудженого стану ^{12}C та для збуджених станів ядра ^{15}N 6,323 MeV ($3/2^-$) і нерозділених в експерименті станів 5,270 MeV ($5/2^+$) + 5,299 MeV ($1/2^+$), для яких поміряно сумарні диференціальні перерізи.

На рис. 11 показано диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeV для збуджених станів ядра ^{15}N 7,155 MeV ($5/2^+$) + 7,301 MeV ($3/2^+$), 7,567 MeV ($7/2^+$) та 8,313 MeV ($1/2^+$) + 8,571 MeV ($3/2^+$).

На рис. 10 і 11 видно, що експериментальні дані непружного розсіяння задовільно описуються МЗКР-перерізами в усьому кутовому діапазоні при використанні потенціалу WS. Кривими Σ_{WS} на рисунках показано сумарні МЗКР-перерізи.

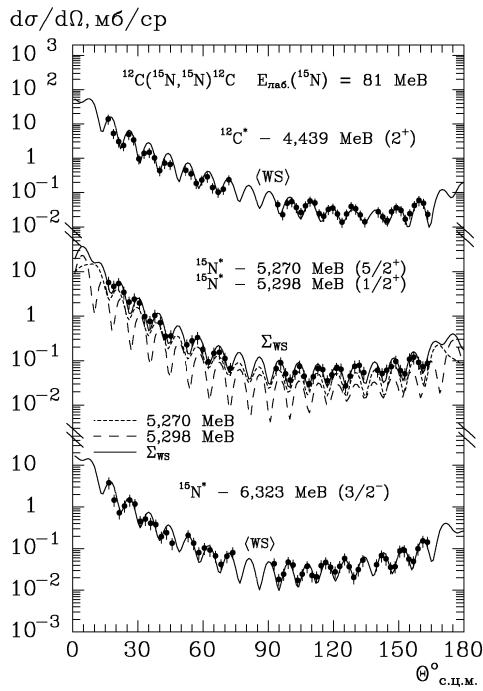


Рис. 10. Диференціальні перерізи непружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeB для збудження 4,439 MeB (2^+) ядра ^{12}C та збуджень 5,270 MeB ($5/2^+$) + 5,298 MeB ($1/2^+$) і 6,323 MeB ($3/2^-$) ядра ^{15}N . Суцільними та штриховими кривими показано МЗКР-перерізи, обчислені з використанням потенціалу WS.

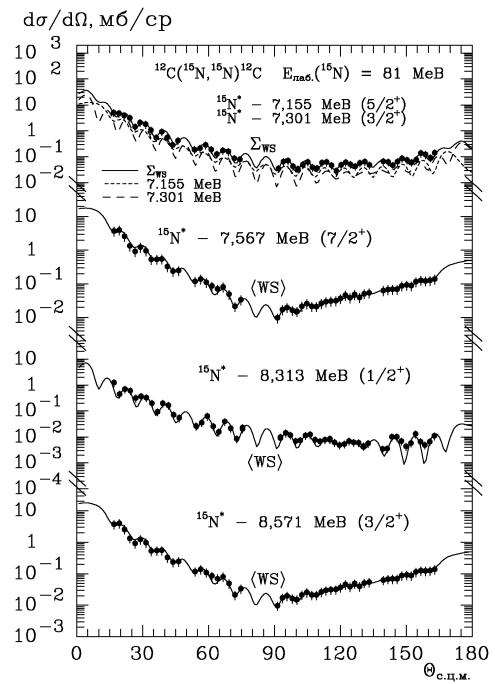


Рис. 11. Те саме, що на рис. 10, але для збуджених станів 7,155 MeB ($5/2^+$) + 7,301 MeB ($3/2^+$), 7,567 MeB ($7/2^+$), 8,313 MeB ($1/2^+$) та 8,571 MeB ($3/2^+$) ядра ^{15}N .

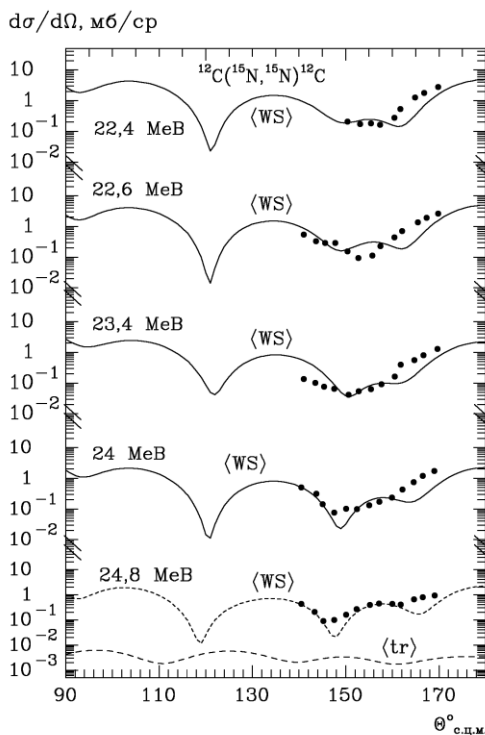


Рис. 12. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер іонів ^{15}N ядрами ^{12}C при енергіях $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 22,4 - 24,8$ MeB [1]. Суцільними кривими показано МЗКР-перерізи потенціального розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$. Штриховою кривою <tr> показано сумарні перерізи реакцій передач для пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при енергії 24,8 MeB.

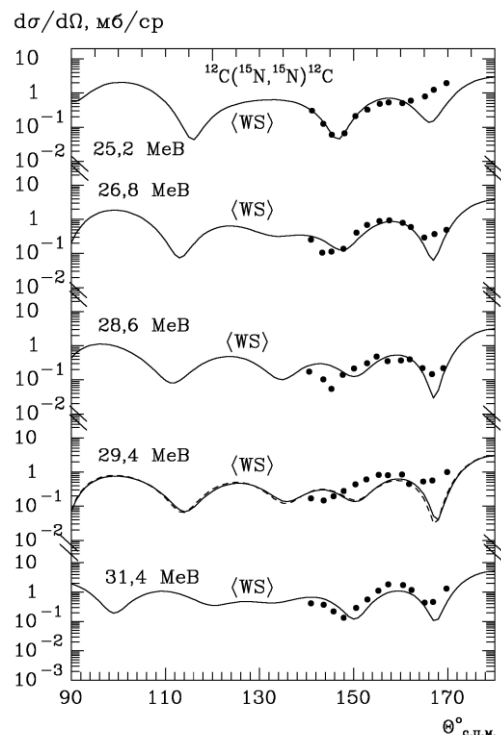


Рис. 13. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер іонів ^{15}N ядрами ^{12}C при енергіях $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 25,5 - 31,4$ MeB [1]. Суцільними кривими показано перерізи потенціального розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$.

З метою дослідження енергетичної залежності взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ було також проаналізовано відомі з літератури експериментальні дані пружного розсіяння цих ядер при енергіях $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 22,4 - 31,4$ МеВ [1]. Ці дані та результати МЗКР-розрахунків перерізів пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при використанні потенціалів WS показано на рис. 12 і 13 (криві <WS>). Параметри потенціалів WS для різних енергій подано в табл. 4. Основну роль у пружному розсіянні ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при цих енергіях відіграє потенціальне розсіяння. Внески реакцій передач у пружне розсіяння цих ядер при даних енергіях дуже незначні, як видно на рис. 12 для енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 24,8$ МеВ (крива <tr>). Для отримання більш достовірних висновків про взаємодію ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ необхідні експериментальні дані пружного розсіяння цих ядер в усьому кутовому діапазоні.

Таблиця 4. Параметри потенціалів WS взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$

E , МеВ	V_0 , МеВ	r_v , фм	a_v , фм	W_s , МеВ	r_w , фм	a_w , фм
22,4	193	0,87	0,80	4,4	1,29	0,80
22,6	193	0,87	0,80	4,4	1,29	0,80
23,4	198	0,85	0,80	5,5	1,27	0,80
24,0	198	0,85	0,80	5,5	1,27	0,80
24,8	198	0,85	0,80	5,5	1,27	0,80
25,2	200	0,85	0,80	5,5	1,25	0,80
26,8	200	0,85	0,80	5,5	1,25	0,80
28,6	200	0,85	0,80	6,0	1,25	0,80
29,4	200	0,84	0,80	6,0	1,25	0,80
31,4	200	0,80	0,80	5,5	1,20	0,80
81,0	195	0,79	0,75	8,0	1,25	0,75

4. Основні результати та висновки

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів пружного і непружного розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^{12}C при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ для основних станів ядер ^{15}N і ^{12}C , збудженого стану 4,439 МеВ (2^+) ядра ^{12}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}N . Експериментальні дані отримано в широкому діапазоні кутів.

Експериментальні дані проаналізовано за МЗКР із включенням у схему зв'язку каналів пружного і непружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ та реакцій передач нейтронів, протонів і кластерів d, t, α . Було припущення, що досліджувані збудження ядер ^{15}N і ^{12}C мають колективну природу (ротаційні і вібраційні).

У розрахунках МЗКР-перерізів розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ та реакцій передач використано потенціали WS та DF (V_{DF}) з уявною частиною $W_{\text{DF}} = 0,6 V_{\text{DF}}$. Визначено параметри дійсної частини $V(r)$ потенціалу WS із підгонки її до потенціалу $V_{\text{DF}}(r)$ у периферійній області взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ і параметри уявної частини $W_S(r)$ цього потенціалу з підгонки МЗКР-перерізів до експериментальних даних пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$. Установлено, що дані непружного розсіяння цих ядер задовільно описуються МЗКР-перерізами в рамках моделі колективного збудження ядер ^{15}N і ^{12}C при використанні параметрів деформації цих ядер, наведених у роботах [6, 7].

Досліджено внески реакцій одно- та двоступінчастих реакцій передач у пружне розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$. Спектроскопічні амплітуди переданих у реакціях нуклонів і кластерів обчислено за ТМО, використовуючи програму DESNA [9, 10]. Установлено, що незначні внески в пружне розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ дають реакції передач нейтронів та t-кластерів на великих кутах розсіяння іонів ^{15}N . Внески реакцій передач інших кластерів мізерні. Основну роль у пружному розсіянні ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ відіграє потенціальне розсіяння іонів ^{15}N .

Проведено порівняння пружних розсіянь ізотопів азоту ^{15}N і ^{14}N ядрами ^{12}C залежно від переданого імпульсу q_t та МЗКР-перерізів пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при використанні потенціалів взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ і $^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$ [2, 3]. Виявлено значні ізотопічні ефекти в обох цих порівняннях, а саме: 1) експериментальні дані пружних розсіянь цих пар ядер близькі за величиною лише при передачах імпульсів $q_t < 2$ фм $^{-1}$, а при більших передачах імпульсів q_t спостерігаються значні відмінності їхніх дифракційних структур; 2) кутові розподіли МЗКР-перерізів пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ також значно відрізняються при використанні потенціалів взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ і $^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$.

Виявлено, що при використанні в МЗКР-розрахунках фолдінг-потенціалу DF задовільно описати експериментальні дані розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ можна лише в інтервалі малих кутів, а для деяких збуджень цих ядер МЗКР-перерізи значно відрізняються від експериментальних даних в усьому діапазоні кутів розсіяння іонів ^{15}N .

У даній роботі також проаналізовано за МЗКР відомі з літератури експериментальні дані пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при енергіях $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 22,4 - 31,4$ МеВ [1] в області великих кутів. Визначено параметри ($^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$)-потенціалів WS для різних енергій. Виявлено енергетичну залежність деяких параметрів цього потенціалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. M.E. Ortiz et al. Nonstatistical effects in the $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, \alpha)$ reaction. *Phys. Rev. C* **22** (1980) 1104.
2. V.A. Ziman et al. Channel couplings in the $^{12}\text{C}(^{14}\text{N}, X)$ reactions at $E(^{14}\text{N}) = 116$ MeV. *Nucl. Phys. A* **624** (1997) 459.
3. W. Von Oertzen et al. Direct Reactions Induced by ^{14}N on ^{12}C at 78 MeV. *Nucl. Phys. A* **143** (1970) 34.
4. E. Piasecki et al. *Project ICARE at HIL* (Warsaw: Heavy Ion Laboratory, 2007) 38 p.
5. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* **7** (1988) 167.
6. J. Specht et al. Evidence for oblate shape of ^{12}C from inelastic α -particle scattering. *Nucl. Phys. A* **171** (1971) 65.
7. A.T. Rudchik et al. ^{15}N elastic and inelastic scattering by ^{11}B at 84 MeV. *Nucl. Phys. A* **939** (2015) 1.
8. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the p -shell nuclei. *Phys. Rev. C* **15** (1977) 84.
9. А.Т. Рудчик., Ю.М. Чувильский. Вычисление спектроскопических амплитуд для произвольных ассоциаций нуклонов в ядрах 1р-оболочки (программа DESNA). Препринт Ин-та ядерных исследований АН УССР КИЯИ-82-12 (Киев, 1982) 27 с.
10. А.Т. Рудчик., Ю.М. Чувильский. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1р-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач. УФЖ **30** (1985) 819.
11. J. Cook. DFPOТ: 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.

А. Т. Рудчик^{1*}, А. А. Рудчик¹, А. Э. Куцык¹, К. Русек², К. В. Кемпер³, Е. Пясецки², А. Столяж², А. Тщиньска², Вал. М. Пирнак¹, О. А. Понкратенко¹, И. Строек⁴, Е. И. Коший⁵, Р. Сюдак⁶, С. Б. Сакута⁷, В. А. Плюйко⁸, А. П. Ильин¹, 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 Отдел физики, Флоридский государственный университет, Таллахаси, США

⁴ Национальный центр ядерных исследований, Варшава, Польша

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

⁶ Институт ядерной физики им. Г. Неводинчаньского, 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

УПРУГОЕ И НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ИОНОВ ^{15}N ЯДРАМИ ^{12}C ПРИ ЭНЕРГИИ 81 МэВ

Получены новые экспериментальные данные дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния ионов ^{15}N ядрами ^{12}C при энергии $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МэВ. Экспериментальные данные проанализированы по методу связанных каналов реакций (МСКР). Упругое и неупругое рассеяние ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ и наиболее важные реакции передач нуклонов и кластеров были включены в схему связи каналов. В МСКР-расчетах были использованы фолдинг-потенциал (DF) взаимодействия ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ и потенциал Вудса - Саксона (WS). Определены параметры потенциала WS и деформации ядер ^{12}C и ^{15}N . Получены сведения о вкладах реакций одно- и двухступенчатых передач нуклонов и кластеров в упругое и неупругое рассеяние ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$. Ранее опубликованные данные упругого рассеяния ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ при энергиях $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 22,4 - 31,4$ МэВ, измеренные на больших углах, также были проанализированы по МСКР и получены зависимые от энергии параметры потенциала WS взаимодействия этих ядер. При сравнении данных по упругому рассеянию ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ и $^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$ и МСКР-расчетов рассеяния с потенциалами WS для этих двух пар ядер были обнаружены значительные различия как между экспериментальными данными, так и МСКР-расчетами, особенно на больших углах, где кроме потенциального рассеяния наблюдаются вклады реакций передач. Это может быть интерпретировано как проявление изотопических эффектов в рассеянии пар ядер $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ и $^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$.

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

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 National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

⁸ Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: rudchik@kinr.kiev.ua

ELASTIC AND INELASTIC SCATTERING OF ^{15}N IONS BY ^{12}C NUCLEI AT ENERGY 81 MeV

New angular distributions of the $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ elastic and inelastic scattering were measured at the energy $E_{\text{lab}}(^{15}\text{N}) = 81$ MeV. The data were analyzed within the coupled-reaction-channels method (CRC). The elastic and inelastic scattering as well as the more important one- and two-step transfer reactions were included in the channels-coupling scheme. The $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ double folding-potential (DF) and that of Woods - Saxon form (WS) were used in the CRC-calculations. The WS potential parameters as well as deformation parameters of ^{12}C and ^{15}N were deduced. The contributions of one- and two-step transfers in the $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ elastic and inelastic scattering channels were obtained. The $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ elastic scatterings data, published previously at energies $E_{\text{lab}}(^{15}\text{N}) = 22 - 31$ MeV for the large angles, were also analyzed and energy dependence of the WS potential parameters were deduced. Comparing the data of elastic scattering data of the $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ and $^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$ nuclei and CRC calculations of the $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ scattering with WS potentials of these two nuclear pairs, considerable differences were observed as in the experimental data so in the CRC calculations, especially at the large angles where the transfer reactions contribute to the elastic scattering. By other words, the scattering isotopic effects were observed in scattering on nuclei $^{15}\text{N} + ^{12}\text{C}$ and $^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$.

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

REFERENCES

1. M.E. Ortiz et al. Nonstatistical effects in the $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, \alpha)$ reaction. *Phys. Rev. C* **22** (1980) 1104.
2. V.A. Ziman et al. Channel couplings in the $^{12}\text{C}(^{14}\text{N}, X)$ reactions at $E(^{14}\text{N}) = 116$ MeV. *Nucl. Phys. A* **624** (1997) 459.
3. W. Von Oertzen et al. Direct Reactions Induced by ^{14}N on ^{12}C at 78 MeV. *Nucl. Phys. A* **143** (1970) 34.
4. E. Piasecki et al. *Project ICARE at HIL* (Warsaw: Heavy Ion Laboratory, 2007) 38 p.
5. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* **7** (1988) 167.
6. J. Specht et al. Evidence for oblate shape of ^{12}C from inelastic α -particle scattering. *Nucl. Phys. A* **171** (1971) 65.
7. A.T. Rudchik et al. ^{15}N elastic and inelastic scattering by ^{11}B at 84 MeV. *Nucl. Phys. A* **939** (2015) 1.
8. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the p -shell nuclei. *Phys. Rev. C* **15** (1977) 84.
9. A.T. 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. A.T. Rudchik, Yu.M. Tchuvil'sky. Spectroscopic amplitudes of multinuclear clusters in the $1p$ -shell nuclei and multinuclear transfer reaction analysis. *Ukr. Fiz. Zh.* **30** (1985) 819. (Rus)
11. J. Cook. DF POT: 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.

Надійшла 04.06.2018

Received 04.06.2018