

А. Т. Рудчик^{1,*}, А. А. Рудчик¹, О. О. Чепурнов¹, К. Русек², К. В. Кемпер³, Е. П'ясецькі²,
А. Столяж², А. Тщінська², Вал. М. Пірнак¹, О. А. Понкратенко¹, І. Строек⁴, Є. І. Кошій⁵,
Р. Сюдак⁶, С. Б. Сакута⁷, 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 А&М університету, Техас, США

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

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

*Відповідальний автор: rudchik@kinr.kiev.ua

ПРУЖНЕ ТА НЕПРУЖНЕ РОЗСІЯННЯ ІОНІВ ¹⁵N ЯДРАМИ ⁶Li ПРИ ЕНЕРГІЇ 81 МеВ

Поміряно диференціальні перерізи пружного та непружного розсіяння іонів ¹⁵N ядрами ⁶Li при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ. Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). Пружне та непружне розсіяння, процес переорієнтації спіну ядра ⁶Li та реакції передач нуклонів і кластерів включались у схему зв'язку каналів. У МЗКР-розрахунках використовувався потенціал Вудса - Саксона (WS) та фолдінг-потенціал DF взаємодії ядер ¹⁵N + ⁶Li. Визначено параметри потенціалу WS, деформації ядер ⁶Li і ¹⁵N й отримано відомості про роль інших процесів у пружному та непружному розсіянні ядер ¹⁵N + ⁶Li. У МЗКР-розрахунках реакцій передач використовувались спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів, обчислені за трансляційно-інваріантною моделлю оболонки. Установлено, що в пружному розсіянні ядер ¹⁵N + ⁶Li основну роль відіграють потенціальне розсіяння та процес переорієнтації спіну ядра ⁶Li. Внески реакцій передач нуклонів і кластерів у це розсіяння незначні. При порівнянні результатів досліджень пружних розсіянь ядер ¹⁵N + ⁶Li та ¹⁵N + ⁷Li при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ виявлено помітні розбіжності як експериментальних даних, так і потенціалів взаємодії цих пар ядер (*ізотопічні ефекти*).

Ключові слова: ядерні реакції ⁶Li(¹⁵N, ¹⁵N), $E = 81$ МеВ, ядерні спектри, $\sigma(\theta)$, механізми розсіяння ядер, параметри деформації ядер.

1. Вступ

Дослідження пружного та непружного розсіяння ядер важливе як для отримання інформації про взаємодію та збудження ядер, так і як вхідні канали ядерних реакцій передач з виходом стабільних і нестабільних ядер. Зокрема, результати дослідження розсіяння іонів ¹⁵N ядрами ⁶Li необхідні для вивчення реакцій передач ⁶Li(¹⁵N, X)Y з виходом ядер ¹⁶N + ⁵Li, ¹³N + ⁸Li, ¹⁴C + ⁷Be, ¹³C + ⁸Be тощо, експериментальна інформація для дослідження яких була вперше отримана одночасно з вимірюванням розсіяння ядер ¹⁵N + ⁶Li при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ. У літературі не знайдено жодної інформації про експериментальне дослідження розсіяння ядер ¹⁵N + ⁶Li, експериментальні дані розсіяння іонів ¹⁵N ядрами ⁶Li та іонів ⁶Li ядрами ¹⁵N відсутні в літературі при будь-якій енергії.

У даній роботі було поміряно диференціальні перерізи пружного та непружного розсіяння іонів ¹⁵N ядрами ⁶Li із збудженням ядер ¹⁵N до енергії 8,571 МеВ та ядер ⁶Li до енергії 5,7 МеВ. Експериментальні дані було проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) із включенням у схему зв'язку каналів потенціального розсіяння ядер ¹⁵N + ⁶Li, процесу переорієнтації спіну ядра ⁶Li, каналів збудження ядер ¹⁵N і ⁶Li колективної природи (ротаційні та вібраційні переходи) та реакцій одно- й двоступінчастих передач нуклонів і кластерів з найбільшими внесками в пружне розсіяння цих ядер.

У роботі розсіяння ядер ¹⁵N + ⁶Li порівнюється з раніше дослідженим розсіянням ядер ¹⁵N + ⁷Li при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ [1]. Виявлено відмінності як у взаємодії ядер ¹⁵N + ⁶Li і ¹⁵N + ⁷Li, так і в механізмах розсіяння цих ядер (*ізотопічні ефекти* розсіяння).

© А. Т. Рудчик, А. А. Рудчик, О. О. Чепурнов, К. Русек, К. В. Кемпер, Е. П'ясецькі,
А. Столяж, А. Тщінська, Вал. М. Пірнак, О. А. Понкратенко, І. Строек, Є. І. Кошій,
Р. Сюдак, С. Б. Сакута, А. П. Ільїн, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма, 2019

2. Методика експерименту

Диференціальні перерізи пружного та непружного розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^6Li одночасно з реакціями $^7\text{Li}(^{15}\text{N}, X)$ поміряно на циклотроні С-200Р Лабораторії важких іонів Варшавського університету при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ. Для отримання пучка іонів ^{15}N було використано збагачену ізотопом ^{15}N кальцієву селітру ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$). Розкид енергії іонів у пучку на мішені не перевищував 0,5 %.

В експерименті використовувалась самопідтримна мішень літій товщиною $\sim 0,5$ мг/см 2 з 80 % збагаченням ^6Li .

Експеримент проводився на експериментальній установці ICARE [2]. Для реєстрації та ідентифікації продуктів ядерних процесів використовувались три ΔE - E -телескопи з кремнієвими ΔE - і E -детекторами товщиною 40 мкм і 0,3 мм відповідно та один телескоп з газовим ΔE -детектором, еквівалентним кремнієвому ΔE -детектору товщиною 5 мкм, та кремнієвим E -детектором (0,3 мм).

Типовий двовимірний $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій $^6\text{Li}(^{15}\text{N}, X)$ показано на рис. 1. Видно, що експериментальна методика забезпечувала реєстрацію продуктів реакцій із зарядами $Z = 3 - 8$ та ідентифікацію їх за зарядами і масами.

Типові енергетичні спектри ^{15}N та ^6Li показано на рис. 2. Суцільними кривими a і b показано неперервні фони, а δ і ε – наближення піків ек-

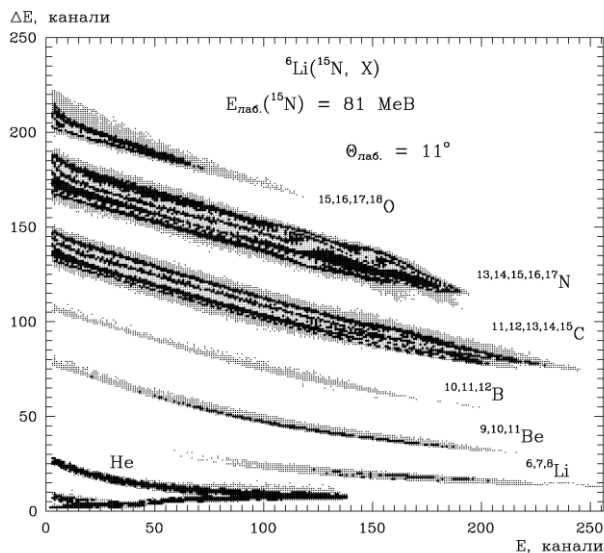


Рис. 1. Типовий $\Delta E(E)$ -спектр продуктів реакцій $^6\text{Li}(^{15}\text{N}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ.

периментальних спектрів ^{15}N і ^6Li симетричними гауссіанами, площі яких використовувались для обчислення диференціальних перерізів $\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega}$ розсіяння іонів ^{15}N на малих кутах $\theta_{\text{с.п.м.}}(^{15}\text{N})$ на основі спектрів ^{15}N та на великих кутах $\theta_{\text{с.п.м.}}(^{15}\text{N}) = 180^\circ - \theta_{\text{с.п.м.}}(^6\text{Li})$ на основі спектрів ^6Li . Таким способом було отримано кутові розподіли перерізів пружного та непружного розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^6Li у повному кутовому діапазоні.

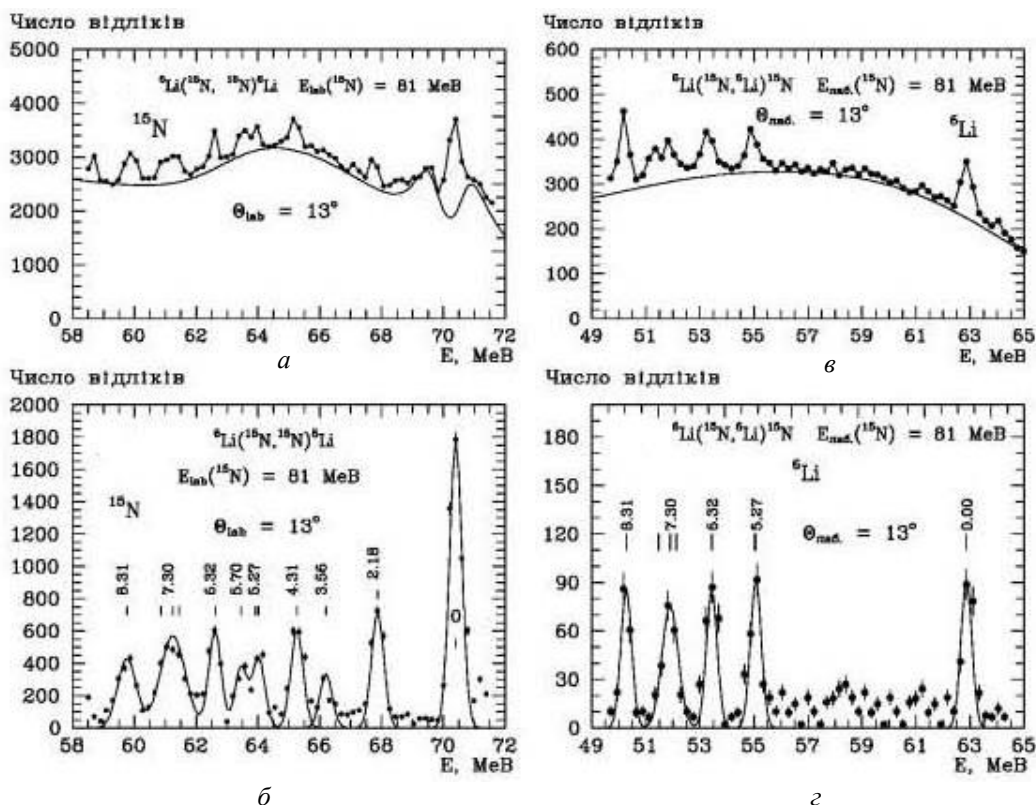


Рис. 2. Типові енергетичні спектри ^{15}N і ^6Li з розсіяння $^6\text{Li}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})^6\text{Li}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ: a, b – спектри з неперервними фонами від багаточастинкових реакцій (суцільні криві – фони); c, d – спектри з вилученими фонами (криві – симетричні гауссіани).

Похибки в обчисленні площ ізольованих та частково перекритих піків не перевищували 20 %. Для повністю перекритих піків ці похибки становили 30 - 40 %.

Отримані у відносних одиницях експериментальні перерізи пружного розсіяння ядер ${}^6\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ нормувалися до розрахованих за оптичною моделлю (ОМ) на малих кутах ($\theta_{\text{с.п.м.}} < 30^\circ$), де домінує кулонівське розсіяння та ОМ-перерізи слабо залежать від невизначеності параметрів оптичного потенціалу. При цьому використовувався оптичний потенціал WS з параметрами дійсної частини, отриманими з підгонки цієї частини до фолдінг-потенціалу DF (потенціал подвійної згортки потенціалів взаємодії нуклонів ядер ${}^{15}\text{N}$ і ${}^6\text{Li}$ – Double Folded potential) з використанням потенціалу нуклон-нуклонної взаємодії МЗУ Рейда (Reid) [13, 14].

Визначений множник абсолютизації перерізів пружного розсіяння цих ядер використовувався

також для нормування диференціальних перерізів непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{15}\text{N}$. Похибка абсолютизації диференціальних перерізів пружного та непружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ не перевищувала $\sim 20\%$.

Отримані експериментальні диференціальні перерізи пружного розсіяння іонів ${}^{15}\text{N}$ ядрами ${}^6\text{Li}$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{15}\text{N}) = 81 \text{ MeV}$ порівнюються на рис. 3 з експериментальними даними пружного розсіяння ядер ${}^7\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ при тій самій енергії ${}^{15}\text{N}$ [1] залежно від переданого імпульсу q_t . Видно відмінності експериментальних даних пружних розсіянь ядер ${}^6\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ і ${}^7\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ для багатьох значень переданих імпульсів q_t , що може бути обумовлено як відмінністю потенціального розсіяння цих пар ядер, так і різними внесками в канали пружних розсіянь інших ядерних процесів (переорієнтацій спінів ядер ${}^6\text{Li}$ і ${}^7\text{Li}$ та внесків реакцій передач).

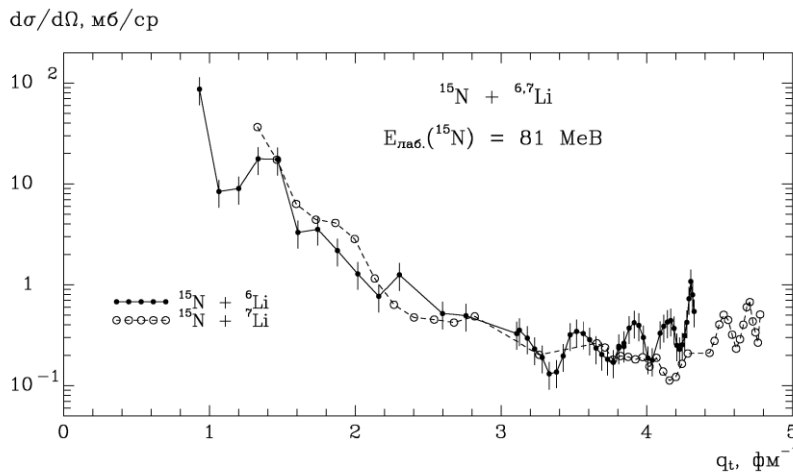


Рис. 3. Порівняння диференціальних перерізів пружних розсіянь ${}^6\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{15}\text{N}){}^6\text{Li}$ та ${}^7\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{15}\text{N}){}^7\text{Li}$ [1] при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{15}\text{N}) = 81 \text{ MeV}$, залежних від переданих імпульсів q_t .

3. Аналіз експериментальних даних

Експериментальні дані пружного та непружного розсіяння ядер ${}^6\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ проаналізовано за МЗКР з використанням потенціалу WS з об'ємним поглинанням (W_S)

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

з параметрами $X_k = \{V, r_V, a_V, W_S, r_W, a_W\}$ та кулонівського потенціалу взаємодії ядер ${}^6\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ ($T + P$) як рівномірно заряджених куль з радіусами

$$R_i = r_i(A_P^{1/3} + A_T^{1/3}) \quad (i = V, W_S, C). \quad (2)$$

Для потенціалу кулонівської взаємодії ядер ${}^6\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ в усіх МЗКР-розрахунках використовувався параметр $r_C = 1,25 \text{ фм}$.

Початкові значення параметрів $X_V = \{V_0, r_V, a_V\}$ дійсної частини

$$U_V(r) = V_0 \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_V}{a_V}\right) \right]^{-1}$$

потенціалу WS визначалися з підгонки потенціалу $U_V(r)$ до фолдінг-потенціалу DF взаємодії ядер ${}^6\text{Li} + {}^{15}\text{N}$ у периферійній області цих потенціалів зміною параметрів X_V . Для розрахунків потенціалу DF використано програму DFROT [3] та розподіли зарядів в ядрах ${}^6\text{Li}$ і ${}^{15}\text{N}$ з роботи [4]. Остаточні значення параметрів X_k отримано з підгонки МЗКР-перерізів пружного розсіяння ядер ${}^{15}\text{N} + {}^6\text{Li}$ до експериментальних даних.

МЗКР-розрахунки виконувались за допомогою програми FRESKO [5].

У МЗКР-розрахунках у схему зв'язку каналів включались пружне та непружне розсіяння ядер ⁶Li + ¹⁵N, процес переорієнтації спіну ядра ⁶Li, а також реакції одно- та двоступінчастих передач нуклонів і кластерів. При цьому вважалось, що низькоенергетичні збудження ядер мають колективну природу (ротаційну або вібраційну).

Для обчислення переходів ядер ⁶Li та ¹⁵N у збуджені стани використовувався форм-фактор

$$V_\lambda(r) = -\frac{\delta_\lambda}{\sqrt{4\pi}} \frac{dU(r)}{dr}, \quad (3)$$

де δ_λ - довжина деформації ядра λ -мультипольності (табл. 1).

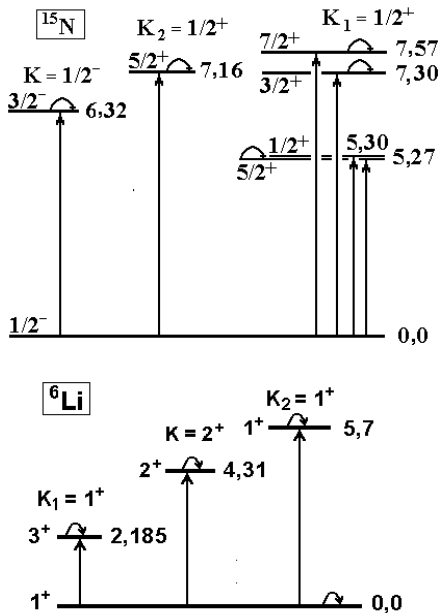


Рис. 4. Схеми переходів ядер ⁶Li та ¹⁵N у збуджені стани. Дугами показано процес переорієнтації спінів ядер.

Необхідні для МЗКР-розрахунків спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів x в ядерних системах $A = C + x$ обчислювались у рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонок (ТІМО)

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

A	C	x	nL _j	S _x
⁶ Li	d	α	2S _{1/2}	1,061
⁶ Li	t	³ He	2S _{1/2}	0,943
⁶ Li	³ He	t	2S _{1/2}	0,943
⁶ Li	α	d	2S ₁	-1,056
⁶ Li	⁵ He	p	1P _{1/2}	-0,596 ^(a)
			1P _{3/2}	0,667
⁶ Li	⁵ Li	n	1P _{1/2}	0,596 ^(a)

A	C	x	nL _j	S _x
¹⁵ N	⁶ Li	⁹ Be	3S _{3/2}	-0,274
			2D _{1/2}	-0,091 ^(a)
			2D _{3/2}	-0,182
¹⁵ N	¹¹ B	α	2D ₂	0,435 ^(a)
¹⁵ N	¹² B	³ He	2P _{1/2}	0,254 ^(a)
			2P _{3/2}	-0,090
¹⁵ N	¹² C	t	2P _{1/2}	0,380

Таблиця 1. Параметри деформації ядер ⁶Li і ¹⁵N

Ядра	0 → E _{зб.} , MeB	J π	λ	δ_λ , фм	β_λ^*	Літ.
⁶ Li	0 → 0,0	1 ⁺	2	-0,78	-0,36	[6]
	0 → 2,185	3 ⁺	2	-2,54	-0,72	[6]
			4	1,00	0,47	[7]
	0 → 4,310	2 ⁺	2	-2,54	-0,72	[6]
¹⁵ N	0 → 5,700	1 ⁺	2	-2,54	-0,72	[6]
	0 → 5,270	5/2 ⁺	3	1,0	0,27	[8]
	0 → 5,299	1/2 ⁺	1	1,0	0,27	[8]
	0 → 6,324	3/2 ⁻	2	1,0	0,27	[8]
	0 → 7,155	5/2 ⁺	3	1,0	0,27	[8]
	0 → 7,301	3/2 ⁺	1	1,0	0,27	[8]
	0 → 7,567	7/2 ⁺	3	1,0	0,27	[8]

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

Схеми переходів ядер ⁶Li і ¹⁵N показано на рис. 4, а діаграми реакцій передач – на рис. 5.

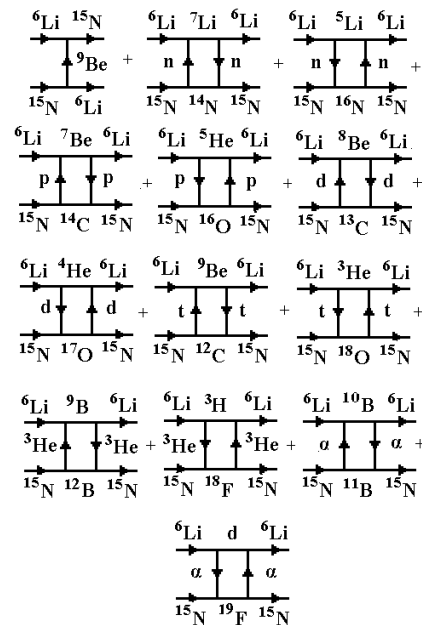


Рис. 5. Діаграми реакцій одно- та двоступінчастих передач, внески яких враховувались в розсіянні ядер ⁶Li + ¹⁵N.

[9] за допомогою програми DESNA [10, 11] з використанням таблиць хвильових функцій ядер 1p-оболонки [12]. Спектроскопічні амплітуди S_x подано в табл. 2.

A	C	x	nL _j	S _x	A	C	x	nL _j	S _x
			1P _{3/2}	-0,667	¹⁵ N	¹³ C	d	2S ₁	0,248 ^(a)
⁷ Li	⁶ Li	n	1P _{1/2}	-0,657				1D ₁	0,444 ^(a)
			1P _{3/2}	-0,735 ^(a)	¹⁵ N	¹⁴ C	p	1P _{1/2}	-0,598
⁷ Be	⁶ Li	p	1P _{1/2}	-0,657	¹⁵ N	¹⁴ N	n	1P _{1/2}	-1,091 ^(a)
			1P _{3/2}	-0,735 ^(a)				1P _{3/2}	0,386
⁸ Be	⁶ Li	d	2S ₁	1,217	¹⁶ N	¹⁵ N	n	1D _{3/2}	-0,270
⁹ Be	⁶ Li	t	2P _{1/2}	-0,192	¹⁶ O	¹⁵ N	p	1P _{1/2}	-1,461 ^(a)
			2P _{3/2}	-0,215 ^(a)	¹⁷ O	¹⁵ N	d	2P ₂	-0,552
⁹ B	⁶ Li	³ He	2P _{1/2}	-0,192	¹⁸ O	¹⁵ N	t	2P _{1/2}	-0,261 ^(a)
			2P _{3/2}	-0,215 ^(a)	¹⁸ F	¹⁵ N	³ He	2P _{1/2}	-0,061
¹⁰ B	⁶ Li	α	2D ₂	-0,215				2P _{3/2}	0,174 ^(a)
					¹⁹ F	¹⁵ N	α	4P ₀	-0,638

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

Кутові розподіли експериментальних даних пружного розсіяння ядер ¹⁵N + ⁶Li при енергії E_{лаб}(¹⁵N) = 81 MeV та відповідні МЗКР-перерізи різних процесів, обчислені з параметрами потен-

ціалу WS, наведеними в табл. 3, показано на рис. 6. Для порівняння в таблиці наведено також параметри потенціалу WS взаємодії ядер ¹⁵N + ⁷Li [1].

Таблиця 3. Параметри потенціалів взаємодії ядер

T + P	E _{лаб} , MeV	V ₀ , MeV	r _v , фм	a _v , фм	W _S , MeV	r _w , фм	a _w , фм	Літ.
⁶ Li + ¹⁵ N	81	140	0,805	0,75	10	1,25	0,75	
⁷ Li + ¹⁵ N	81	150	0,800	0,76	12	1,25	0,76	[1]

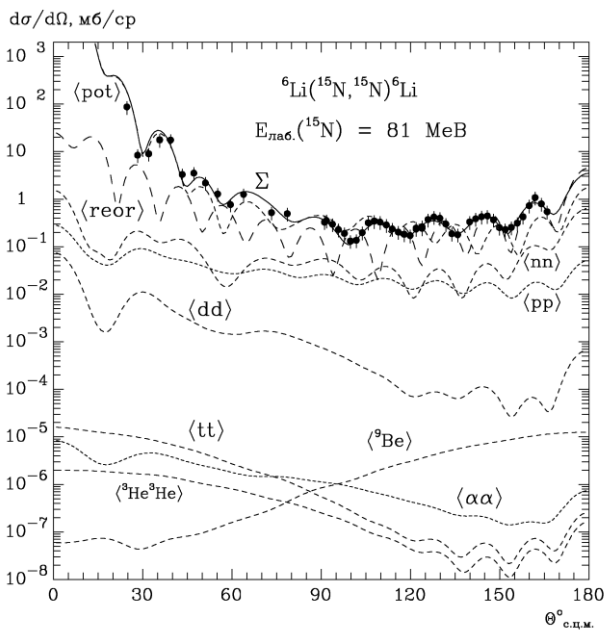


Рис. 6. Диференціальні перерізи пружного розсіяння ядер ⁶Li(¹⁵N, ¹⁵N)⁶Li при енергії E_{лаб}(¹⁵N) = 81 MeV. Криві – МЗКР-перерізи різних ядерних процесів (див. текст). Крива Σ – когерентна сума перерізів усіх процесів.

Штриховими кривими показано потенціальне розсіяння іонів ¹⁵N ядрами ⁶Li (крива <pot>), процес переорієнтації спіну ядра ⁶Li (крива

<reor>) та двоступінчасті процеси (див. рис. 5) передач нейтронів n + n, протонів p + p, дейтронів d + d, тритонів t + t, ³He + ³He, α + α (криві <nn>, <pp>, <dd>, <tt>, <³He³He>, <αα> відповідно), а також передача кластера ⁹Be (крива <⁹Be>).

Видно, що в пружному розсіянні ядер ¹⁵N + ⁶Li домінують потенціальне розсіяння та процес переорієнтації спіну ядра ⁶Li. Незначні внески в це розсіяння дають двоступінчасті передачі нейтронів і протонів. Внески інших реакцій передач мізерні. Суцільною кривою Σ на цьому рисунку показано сумарні МЗКР-перерізи пружного розсіяння ядер ¹⁵N + ⁶Li при врахуванні всіх процесів. Видно, що ці МЗКР-перерізи задовільно описують експериментальні дані з пружного розсіяння ядер ¹⁵N + ⁶Li.

На рис. 7 порівнюються сумарні МЗКР-перерізи пружного розсіяння ядер ¹⁵N + ⁶Li при використанні параметрів потенціалів WS взаємодії ядер ¹⁵N + ⁶Li (крива Σ(_{6Li+15N})) та ¹⁵N + ⁷Li (крива Σ(_{7Li+15N})) із врахуванням процесу переорієнтації спіну ядра ⁷Li (δ₂ = 2,0 фм [1]). Видно значні відмінності цих МЗКР-перерізів на великих кутах (ізотопічний ефект). На цьому рисунку також показано МЗКР-перерізи пружного

розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$ при використанні оптичного потенціалу DF

$$U_{\text{DF}}(r) = V_{\text{DF}}(r) + i W_{\text{DF}}(r) = V_{\text{DF}}(r) + i k V_{\text{DF}}(r) \quad (3)$$

при значенні параметра $k = 0,1$, визначеного методом підгонки МЗКР-розрахунків з використанням потенціалу $U_{\text{DF}}(r)$ до експериментальних даних цього розсіяння (крива Σ_{DF}).

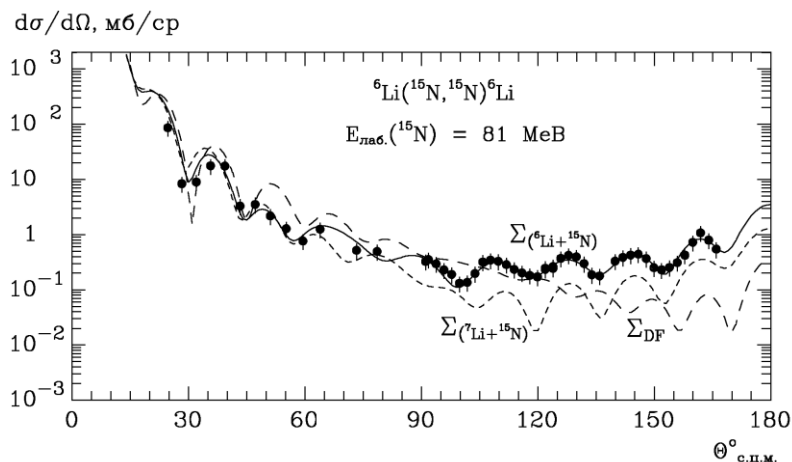


Рис. 7. Порівняння МЗКР-перерізів пружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$ при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ при використанні параметрів потенціалів WS взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$ (крива $\Sigma_{(6\text{Li}+^{15}\text{N})}$) та $^{15}\text{N} + ^7\text{Li}$ (крива $\Sigma_{(7\text{Li}+^{15}\text{N})}$), а також при використанні фолдінг-потенціалу DF взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$ (крива Σ_{DF}).

Оптичні потенціали WS та DF взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$ порівнюються на рис. 8. Дійсна частина потенціалу WS (крива V) добре узгоджується з фолдінг-потенціалом DF у поверхневій області взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$ ($r > 3$ фм), де в основному відбуваються ядерні процеси.

Отримані експериментальні дані непружного розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^6Li при енергії

$E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ показано на рис. 9 для збуджень 2,185 МеВ (3^+), 4,31 МеВ (2^+), 5,7 МеВ (1^+) ядра ^6Li та на рис. 10 і 11 – для збуджень 5,27 – 8,57 МеВ ядра ^{15}N . Кривими на цих рисунках показано МЗКР-розрахунки за моделлю ротаційних та вібраційних збуджень ядер ^6Li і ^{15}N , використовуючи форм-фактор (1).

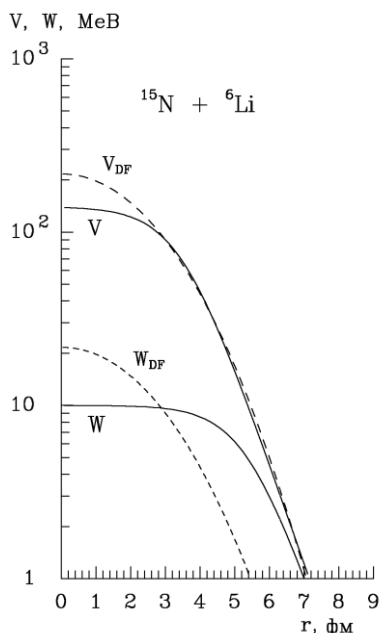


Рис. 8. Порівняння оптичних потенціалів WS і DF взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$.

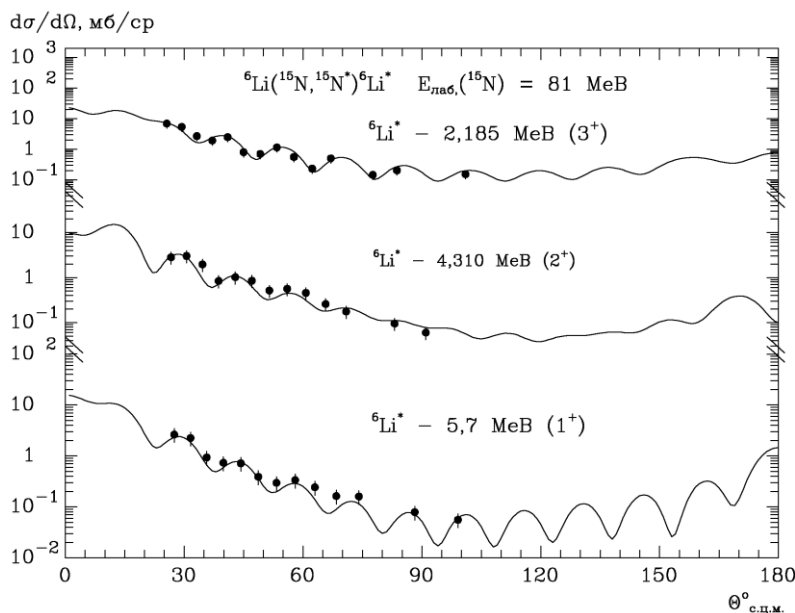


Рис. 9. Диференціальні перерізи непружного розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^6Li при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ для збуджених станів 2,185 - 5,7 МеВ ядра ^6Li . Криві – МЗКР-розрахунки за моделлю колективних збуджень.

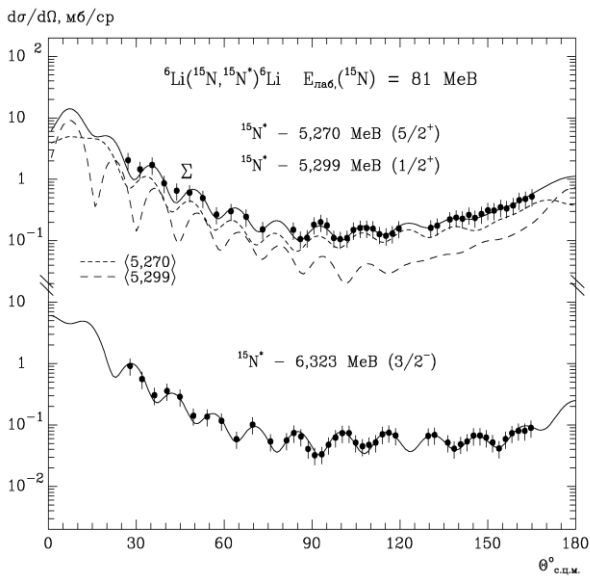


Рис. 10. Диференціальні перерізи непружного розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^6Li при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ для збуджених станів 5,27 + 5,299 МеВ і 6,323 МеВ ядра ^{15}N . Криві – МЗКР-розрахунки за моделлю колективних збуджень.

4. Основні результати та висновки

Поміряно диференціальні перерізи пружного та непружного розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^6Li при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ для основних та збуджених станів 2,185 - 5,7 МеВ ядра ^6Li і збуджених станів 5,27 - 8,571 МеВ ядер ^{15}N . Експериментальні дані диференціальних перерізів розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$ отримано в широкому кутовому діапазоні.

Експериментальні дані розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$ проаналізовано за МЗКР із включенням у схему зв'язку каналів пружного й непружного розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$ та реакцій передач нуклонів і кластерів. Вважалось, що збуджені стани ядер ^{15}N і ^6Li мають колективну природу (ротаційні або вібраційні).

У розрахунках МЗКР-перерізів розсіяння ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$ та реакцій передач використовувались потенціали взаємодії ядер типу WS та потенціал

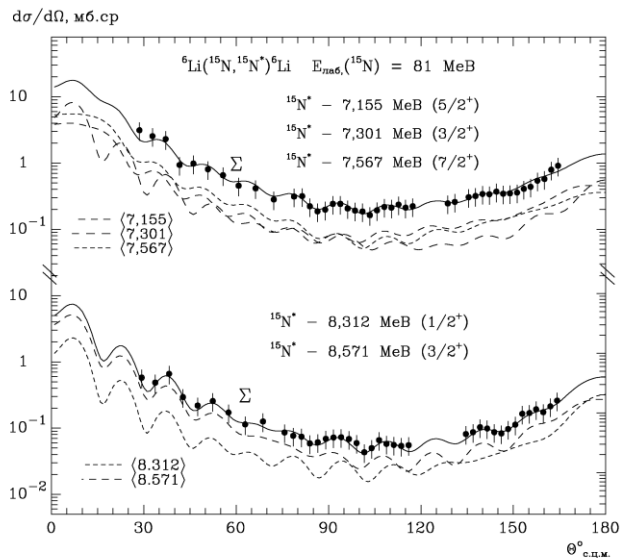


Рис. 11. Диференціальні перерізи непружного розсіяння іонів ^{15}N ядрами ^6Li при енергії $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ для збуджених станів 7,155 - 8,571 МеВ ядра ^{15}N . Криві – МЗКР-розрахунки за моделлю колективних збуджень.

DF подвійної згортки взаємодії нуклонів ядер ^{15}N і ^6Li (фолдінг-потенціал V_{DF}) з уявною частиною $W_{\text{DF}} = i0,1V_{\text{DF}}$.

Визначено параметри оптичного потенціалу WS взаємодії ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$ та механізми пружного й непружного розсіяння цих ядер. Установлено, що в пружному розсіянні ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$ основну роль відіграють потенціальне розсіяння та процес переорієнтації спіну ядра ^6Li . Внески реакцій передач нуклонів і кластерів у це розсіяння незначні. У МЗКР-розрахунках реакцій передач використовувались спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів, обчислені в даній роботі за ТІМО.

Проведено порівняння пружних розсіянь ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$ та $^{15}\text{N} + ^7\text{Li}$ при $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ. Виявлено розбіжності їхніх експериментальних даних та потенціалів взаємодії цих пар ядер (*ізотопічні ефекти*).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. A.T. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of ^{15}N ions by ^7Li at 81 MeV versus that of ^{14}N ions by ^7Li at 80 and 110 MeV. *Nucl. Phys. A* 958 (2017) 234.
2. E. Piasecki et al. *Project ICARE at HIL* (Warsaw: Heavy Ion Laboratory, 2007) 38 p.
3. J. Cook DF POT: a program for the calculation of double folded potentials. *Comp. Phys. Com.* 25 (1982) 125.
4. 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.
5. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* 7 (1988) 167.
6. M.F. Vineyard, K.W. Kemper, J. Cook. Excitation of ^6Li by ^{16}O at $E_{\text{cm}} = 18.7$ MeV. *Phys. Lett. B.* 142 (1984) 249.
7. A.T. Rudchik et al. Energy dependence of the $^6\text{Li} + ^{16}\text{O}$ elastic scattering versus that of $^7\text{Li} + ^{16}\text{O}$. *Eur. Phys. J. A* 49 (2013) 74.
8. A.T. Rudchik et al. ^{15}N elastic and inelastic scattering by ^{11}B at 84 MeV. *Nucl. Phys. A* 939 (2015) 1.
9. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the p-shell nuclei. *Phys. Rev. C* 15 (1977) 84.

10. 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 (К., 1982) 27 с.
11. А.Т. Рудчик, Ю.М. Чувильский. Спектроскопические амплитуды многонуклонных кластеров в ядрах 1p-оболочки и анализ реакций многонуклонных передач. УФЖ 30 (1985) 819.
12. А.Н. Бояркина. Структура ядер 1p-оболочки (Москва, Московский ун-т, 1973) 62 с.
13. R. Reid. Local phenomenological nucleon-nucleon potentials. *Annals of Physics* 50(3) (1968) 411.
14. R.V. Bertsch et al. Interactions for inelastic scattering derived from realistic potentials. *Nucl. Phys. A* 284(3) (19767) 399.

А. Т. Рудчик^{1,*}, А. А. Рудчик¹, О. О. Чепурнов¹, К. Русек², К. В. Кемпер³, Е. Пясеcki², А. Столяж², А. Тщиньска², Вал. М. Пирнак¹, О. А. Понкратенко¹, И. Строек⁴, Е. И. Коший⁵, Р. Сюдак⁶, С. Б. Сакута⁷, А. П. Ильин¹, Ю. М. Степаненко¹, В. В. Улешенко¹, 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. Неводничаньского, Краков, Польша

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

*Ответственный автор: rudchik@kinr.kiev.ua

УПРУГОЕ И НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ИОНОВ ^{15}N ЯДРАМИ ^6Li ПРИ ЭНЕРГИИ 81 МэВ

Измерены дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния ионов ^{15}N ядрами ^6Li при энергии $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МэВ. Экспериментальные данные проанализированы по методу связанных каналов реакций (МСКР). Упругое и неупругое рассеяние, процесс реориентации спина ядра ^6Li и реакции передач нуклонов и кластеров были включены в схему связи каналов. В МСКР-расчетах использованы потенциал Вудса - Саксона (WS) и фолдинг-потенциал DF взаимодействия ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$. Определены параметры потенциала WS, деформации ядер ^6Li и ^{15}N и получены сведения о роли других процессов в упругом и неупругом рассеянии ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$. В МСКР-расчетах реакций передач использованы спектроскопические амплитуды нуклонов и кластеров, рассчитанные по трансляционной инвариантной модели оболочек. Установлено, что в упругом рассеянии ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$ основную роль играют потенциальное рассеяние и процесс реориентации спина ядра ^6Li . Вклады реакций передач нуклонов и кластеров в это рассеяние незначительны. При сравнении результатов исследования упругих рассеяний ядер $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$ и $^{15}\text{N} + ^7\text{Li}$ при энергии $E_{\text{лаб}}(^{15}\text{N}) = 81$ МэВ обнаружены заметные различия как экспериментальных данных, так и потенциалов взаимодействия этих пар ядер (*изотопические эффекты*).

Ключевые слова: ядерные реакции $^6\text{Li}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})$, $E = 81$ МэВ, ядерные спектры, $\sigma(\theta)$, механизмы рассеяния ядер, параметры деформации ядер.

А. Т. Rudchik^{1,*}, А. А. Rudchik¹, О. О. Chepurnov¹, К. Rusek², К. W. Kemper³, Е. Piasecki², А. Stolarz², А. Trzczińska², Вал. М. Pirnak¹, О. А. Ponkratenko¹, I. Strojek⁴, Е. I. Koshchy⁵, R. Siudak⁶, S. B. Sakuta⁷, А. Р. Ilyin¹, Yu. M. Stepanenko¹, V. V. Uleshchenko¹, Yu. O. Shyrma¹

*Corresponding author: rudchik@kinr.kiev.ua

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

² Heavy Ion Laboratory of Warsaw University, Warsaw, Poland

³ Physics Department, Florida State University, Tallahassee, USA

⁴ National Center for Nuclear Researches, Warsaw, Poland

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

⁶ H. Niewodniczański Institute of Nuclear Physics, Cracow, Poland

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

*Corresponding author: rudchik@kinr.kiev.ua

ELASTIC AND INELASTIC SCATTERING OF ^{15}N IONS BY ^6Li NUCLEI AT ENERGY 81 MeV

Angular distributions of the elastic and inelastic scattering of ^{15}N ions by ^6Li nuclei 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, spin reorientation of ^6Li as well as the one- and two-step transfer reactions were included in the channels-coupling scheme. The potential of Woods - Saxon form (WS) and double folded potential DF for the $^{15}\text{N} + ^6\text{Li}$

nuclei interaction were used in CRC-calculations. The WS potential parameters, deformation parameters of ${}^6\text{Li}$ and ${}^{15}\text{N}$ nuclei were deduced and the information about the role of other processes in the ${}^{15}\text{N} + {}^6\text{Li}$ elastic and inelastic scattering was obtained. Spectroscopic amplitudes of nucleons and clusters, calculated according to a translational invariant shell model, were used in the CRC-calculations. It was established that the potential scattering and the ${}^6\text{Li}$ spin reorientation are dominated in the ${}^{15}\text{N} + {}^6\text{Li}$ elastic scattering. Contributions from particle transfers in this scattering were negligible. Comparing the ${}^{15}\text{N} + {}^6\text{Li}$ and ${}^{15}\text{N} + {}^7\text{Li}$ elastic scattering at the energy $E_{\text{lab}}({}^{15}\text{N}) = 81$ MeV, it was found marked differences between the experimental data and interaction potentials (*isotopic effects*).

Keywords: nuclear reactions ${}^6\text{Li}({}^{15}\text{N}, {}^{15}\text{N})$, $E = 81$ MeV, particle spectra, $\sigma(\theta)$, nuclear scattering mechanisms, nuclear deformation parameters.

REFERENCES

1. A.T. Rudchik et al. Elastic and inelastic scattering of ${}^{15}\text{N}$ ions by ${}^7\text{Li}$ at 81 MeV versus that of ${}^{14}\text{N}$ ions by ${}^7\text{Li}$ at 80 and 110 MeV. *Nucl. Phys. A* **958** (2017) 234.
2. E. Piasecki et al. *Project ICARE at HIL* (Warsaw: Heavy Ion Laboratory, 2007) 38 p.
3. J. Cook. DFPOT: a program for the calculation of double-folded potentials. *Comp. Phys. Com.* **25** (1982) 125.
4. 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.
5. I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comp. Phys. Rep.* **7** (1988) 167.
6. M.F. Vineyard, K.W. Kemper, J. Cook. Excitation of ${}^6\text{Li}$ by ${}^{16}\text{O}$ at $E_{\text{cm}} = 18.7$ MeV. *Phys. Lett. B* **142** (1984) 249.
7. A.T. Rudchik et al. Energy dependence of the ${}^6\text{Li} + {}^{16}\text{O}$ elastic scattering versus that of ${}^7\text{Li} + {}^{16}\text{O}$. *Eur. Phys. J. A* **49** (2013) 74.
8. A.T. Rudchik et al. ${}^{15}\text{N}$ elastic and inelastic scattering by ${}^{11}\text{B}$ at 84 MeV. *Nucl. Phys. A* **939** (2015) 1.
9. Yu.F. Smirnov, Yu.M. Tchuvil'sky. Cluster spectroscopic factors for the p -shell nuclei. *Phys. Rev. C* **15** (1977) 84.
10. A.T. Rudchik, Yu.M. Tchuvil'sky. Spectroscopic amplitude calculations for different clusters in the $1p$ -shell nuclei (code DESNA). The preprint of the Institute for Nuclear Researches AS of Ukraine. КИЯИ-82-12 (Kyiv, 1982) 27 p. (Rus).
11. A.T. 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)
12. A.N. Boyarkina. *Structure of Nuclei of $1p$ -shell* (Moskva, Moscow University, 1973) 62 p. (Rus)
13. R. Reid. Local phenomenological nucleon-nucleon potentials. *Annals of Physics* **50**(3) (1968) 411.
14. G. Bertsch et al. Interactions for inelastic scattering derived from realistic potentials. *Nucl. Phys. A* **284**(3) (1977) 399.

Надійшла 31.07.2019

Received 31.07.2019