

ВЗАЄМОДІЯ ШВИДКИХ НЕЙТРОНІВ З ЯДРАМИ ІТРІЮ

І. О. Корж, М. Т. Скляр

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Проведено аналіз експериментальних даних з повних перерізів, перерізів пружного та непружного розсіяння нейтронів ядрами ^{89}Y в області енергій 0,2 – 22 МеВ. Експериментальні дані проаналізовано в рамках оптико-статистичного підходу, основу якого становлять сферична оптична модель, модель зв'язаних каналів, модель збудженого остова та сучасні варіанти статистичної моделі. Показано можливість адекватного опису всієї сукупності експериментальних даних у рамках цього підходу тільки при використанні індивідуального набору параметрів оптичного потенціалу. З адекватного теоретичного опису сукупності експериментальних даних зроблено висновки про механізми розсіяння швидких нейтронів ядрами ^{89}Y в широкій області енергій.

Вступ

Як і більшість лантаноїдів, ітрій (природний ітрій складається з одного стабільного ізотопу – ^{89}Y) належить до числа тридцяти найбільш поширених елементів Землі. Нині ітрій використовується в ряді областей науки та техніки. Особливо слід відзначити широке використання його при будівництві атомних реакторів. Із сплавів ітрію з берилієм виготовляють поглиначі та відзеркалювачі, що працюють в атомних реакторах при температурі більш як 1100 °С. Використання ітрію як конструкційного матеріалу для атомних реакторів стимулювало проведення досліджень взаємодії нейтронів з цим ядром у широкій області енергій. У літературі на цей час уже накопичено значну експериментальну інформацію щодо повних перерізів взаємодії нейтронів з ядрами ітрію та про кутові й енергетичні розподіли пружного та непружного розсіяння нейтронів з ядрами ітрію. Проте до теперішнього часу не зроблено критичного аналізу експериментальної інформації про процеси взаємодії швидких нейтронів з ядрами ітрію, одержаної в різних лабораторіях і різними авторами, та недостатньо апробовано теоретичні моделі, спроможні кількісно передбачити перерізи розсіяння швидких нейтронів непарними ядрами. Тому до цього часу немає вичерпної інформації щодо механізмів взаємодії нейтронів з ядрами ітрію в широкій області енергій.

Для ядер ^{89}Y значні труднощі зустрічаються на шляху теоретичної інтерпретації прямого непружного розсіяння. Нині для непарних ядер, до яких належать і ядра ^{89}Y , для інтерпретації прямого непружного розсіяння можна застосувати тільки модель збудженого остова (МЗО) [1], яку раніше нами було плідно використано при проведенні теоретичного аналізу непружного розсіяння швидких нейтронів ядрами $^{63,65}\text{Cu}$ [2] і ^{93}Nb [3]. Ядро ^{89}Y має один непарний протон на оболонці $2p_{1/2}$ та, як і його сусіди парно-парні ядра ^{88}Sr і ^{90}Zr , має заповнену нейтронну оболонку ($N = 50$). Стронцій і цирконій мають низькорозташовані колективні стани. У ^{88}Sr нижче енергії 3 МеВ знаходиться лише два колективних стани з $E_p = 1,836$ МеВ ($J^\pi = 2^+$) та $E_p = 2,734$ МеВ ($J^\pi = 3^-$), а у ^{90}Zr три колективних стани з $E_p = 2,186$ МеВ ($J^\pi = 2^+$), $E_p = 2,319$ МеВ ($J^\pi = 5^-$) та $E_p = 2,748$ МеВ ($J^\pi = 3^-$). Тому є підстава низькозбуджені стани ^{89}Y розглядати у МЗО, в якій одна $2p_{1/2}$ -протонна частинка (або дірка) була б зв'язана з колективними станами в ядрах ^{88}Sr (або ^{90}Zr). Для апробації застосовності МЗО до опису перерізів непружного розсіяння швидких нейтронів ядрами ^{89}Y необхідно провести аналіз наявних експериментальних даних з повних перерізів і перерізів розсіяння нейтронів в області енергій 0,2 – 22 МеВ та на базі надійних експериментальних даних провести теоретичний аналіз у рамках оптико-статистичного підходу, основу якого становлять сферична оптична модель (СОМ), модель сильнозв'язаних каналів (МЗК), МЗО та сучасні варіанти статистичної моделі (СМ). На рішення цієї задачі й було націлено дану роботу.

Перерізи взаємодії швидких нейтронів з ядрами ітрію

У досліджуваній області енергій нейтронів нині накопичено значну й надійну інформацію про повні перерізи взаємодії нейтронів з ядрами ітрію. Для відтворення енергетичної

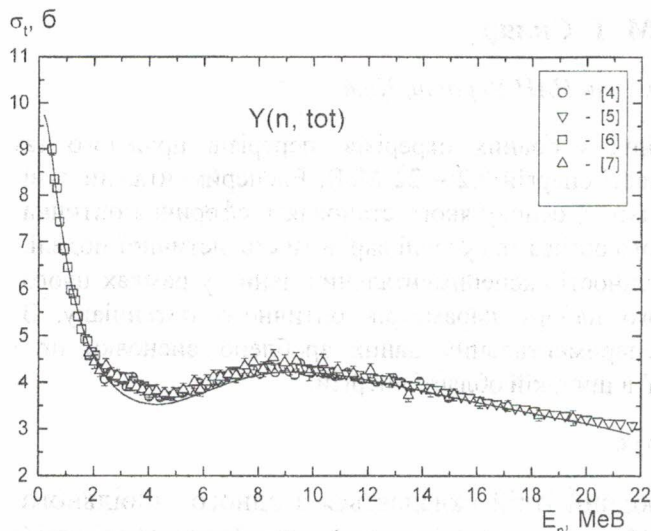


Рис. 1. Енергетична залежність повного перерізу взаємодії швидких нейтронів з ядрами ^{89}Y . Символи – експериментальні дані робіт [4 - 7], крива – розрахунки перерізів за СОМ з параметрами, отриманими в даній роботі.

залежності σ_t немає необхідності наводити дані всіх робіт, що є в літературі, а досить навести тільки дані робіт [4 - 7], що є найбільш повними та систематичними. Дані цих робіт наведено на рис. 1 не всіма точками, а в основному з кроком 0,1 - 0,25 MeV. З рисунка видно, що дані цих робіт у межах експериментальних похибок узгоджуються між собою в спільному для них енергетичному інтервалі й надійно ілюструють енергетичну залежність σ_t в широкій області енергій.

Експериментальні дослідження кутової й енергетичної залежності перерізів пружного розсіяння швидких нейтронів ядрами ітрію було розпочато майже одночасно з експериментами по $\sigma_t(E)$. На сьогодні база експериментальних даних з $\sigma_{el}(\theta, E)$ на ядрах ітрію досягає майже такої ж повноти й точності, як і для $\sigma_t(E)$. Тому кутові розподіли пружного розсіяння нейтронів ядрами ітрію наведено на рис. 2 не всіма точками по енергії, що є в літературі, а тільки 10 значеннями енергій з робіт [6, 8 - 12] для характеристики тенденцій зміни анізотропії зі зміною енергії нейтронів та узгодженості даних різних авторів у досліджуваному діапазоні енергій. З рисунка видно, що експериментальні дані різних авторів добре узгоджуються між собою й кутові розподіли пружно розсіяних нейтронів проявляють плавну зміну анізотропії зі зміною енергії нейтронів. Найбільш систематичними є дані робіт [9, 12 - 14]. Енергетичну залежність інтегральних перерізів пружного розсіяння нейтронів ядрами ітрію в досліджуваній області енергій за даними робіт [8 - 23] наведено на рис. 3. При енергіях, вищих за 4 MeV, значна частина даних одержана нами інтегруванням експериментальних $\sigma_{el}(\theta)$. З рисунка видно, що дані різних авторів добре узгоджуються між собою й за винятком області енергій 2,5 - 3,0 MeV плавно змінюються зі зміною енергії нейтронів.

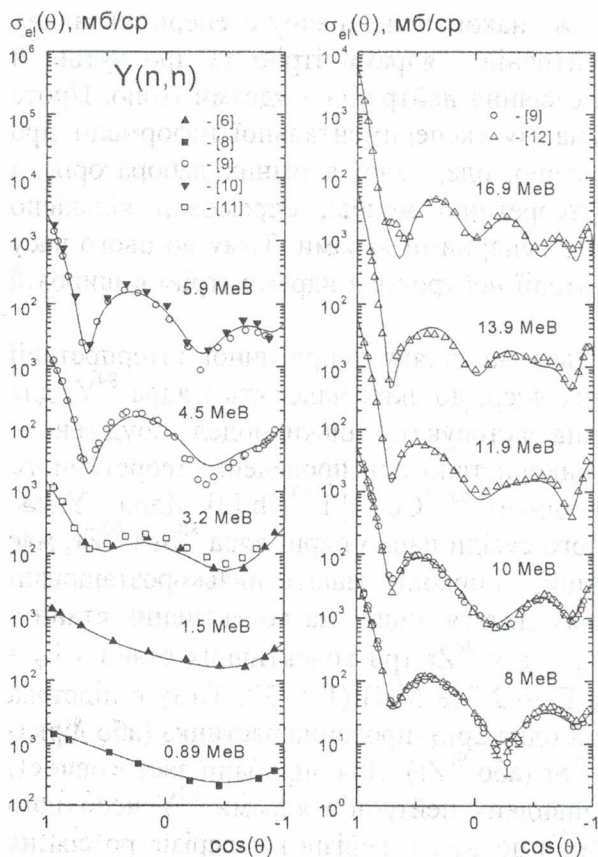


Рис. 2. Диференціальні перерізи пружного розсіяння швидких нейтронів ядрами ітрію. Символи – експериментальні дані робіт [6, 8 - 12], криві – розрахунки перерізів за СОМ і СМ з параметрами, отриманими в даній роботі.

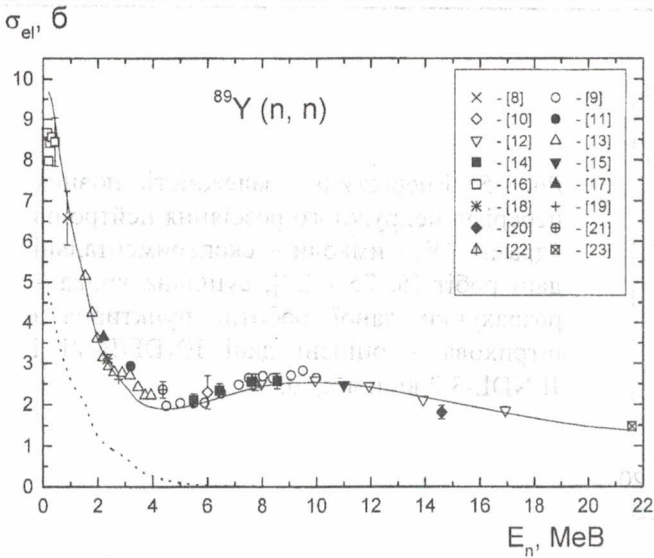


Рис. 3. Енергетична залежність перерізу пружного розсіяння нейтронів ядрами ітрію. Символи – експериментальні дані робіт [8 - 23], суцільна крива – розрахунки перерізів за COM і CM, пунктирна – розрахунки перерізів за CM з параметрами, отриманими в даній роботі.

Найвні експериментальні дані з повних перерізів і перерізів пружного розсіяння швидких нейтронів ядрами ітрію дозволяють обґрунтовано вважати, що вони є надійною базою для знаходження індивідуальних параметрів оптичного потенціалу для цього ядра.

Що стосується перерізів непружного розсіяння нейтронів зі збудженням найнижчих рівнів ядер ітрію, то незважаючи на те, що експерименти по дослідженню кутової й енергетичної залежності перерізів непружного розсіяння розпочаті майже одночасно з експериментами по $\sigma_{el}(\theta, E)$, у літературі й на сьогодні ще не досягнуто такої ж повноти й точності, як для σ_{el} . Перерізи непружного розсіяння нейтронів зі збудженням п'яти найнижчих рівнів ядер ^{89}Y в області енергій, нижчих за 11 MeV, виміряно в багатьох точках по енергії [6, 14, 15, 18, 24, 25]. Дані цих робіт наведено на рис. 4. З рисунка видно, що систематичні дані є тільки в області енергій < 6 MeV, і найбільший розкид у даних спостерігається в цій області енергій.

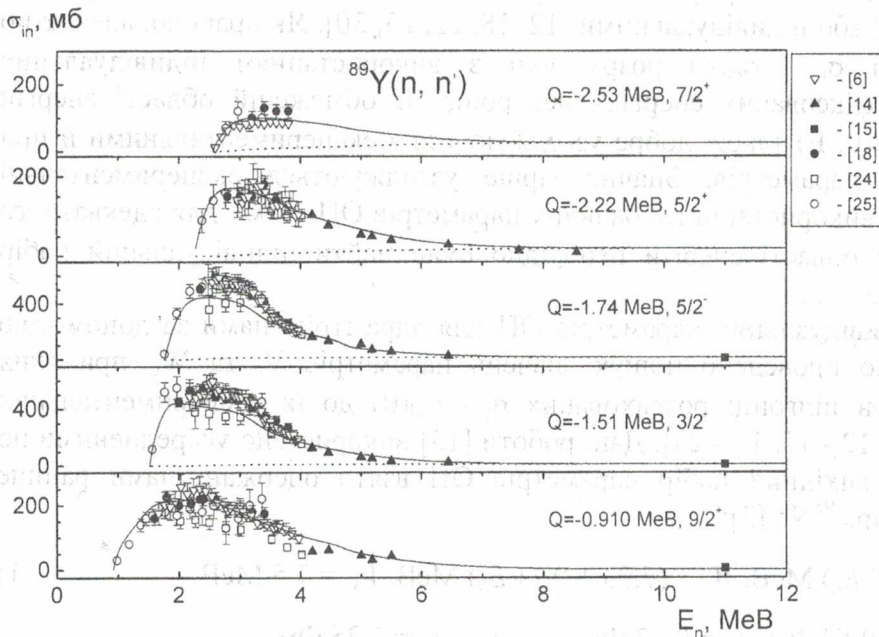


Рис. 4. Енергетична залежність перерізів непружного розсіяння швидких нейтронів зі збудженням перших п'яти рівнів ядер ^{89}Y . Символи – експериментальні дані робіт [6, 14, 15, 24, 25], суцільні криві – розрахунки перерізів за CM і M3O, пунктирні – розрахунки перерізів за M3O.

Крім даних з перерізів непружного розсіяння зі збудженням окремих рівнів у літературі [6, 25 - 27] є й дані з повних перерізами непружного розсіяння нейтронів ядрами ітрію. Дані цих робіт за повними перерізами непружного розсіяння наведено на рис. 5. З рисунка видно, що експериментальні дані в області енергій > 9 MeV відсутні.

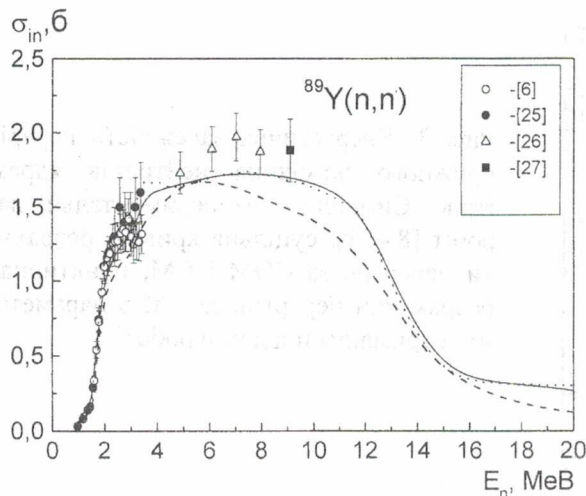


Рис. 5. Енергетична залежність повних перерізів непружного розсіяння нейтронів ядрами ^{89}Y . Символи – експериментальні дані робіт [6, 25 - 27], суцільна крива – розрахунки даної роботи, пунктирна і штрихова – оцінені дані ENDF/B-VI і JENDL-3.2 відповідно.

Характеризуючи в цілому наявні експериментальні дані про повні перерізи й перерізи розсіяння нейтронів ядрами ітрію, можна зробити висновок, що за кількістю та якістю їх достатньо для проведення на їх базі теоретичного аналізу в рамках оптико-статистичного підходу з метою дослідження механізмів взаємодії нейтронів з ядрами ітрію в широкій області енергій.

Теоретичний аналіз експериментальних даних з перерізів взаємодії швидких нейтронів з ядрами ітрію

Сукупність експериментальних даних з перерізів взаємодії швидких нейтронів з ядрами ітрію можна порівняти з обчисленими перерізами в рамках оптико-статистичного підходу, основу якого становлять СОМ, МЗК, МЗО та сучасні варіанти СМ. Основу розрахунків за цими моделями складає набір параметрів оптичного потенціалу (ОП).

На сьогодні в літературі є ряд наборів параметрів ОП, що являються глобальними [20, 28], регіональними [9, 13, 29] або індивідуальними [12, 18, 22, 23, 30]. Як правило, адекватно описують експериментальні σ_t і $\sigma_{el}(\theta)$ розрахунки з використанням індивідуальних параметрів ОП тільки при фіксованих енергіях нейтронів. В обмеженій області енергій обчислені перерізи $\sigma_t(E)$ і $\sigma_{el}(\theta, E)$ також добре узгоджуються з експериментальними й при використанні регіональних параметрів. Значно гірше узгоджуються експериментальні перерізи з обчисленими при використанні глобальних параметрів ОП. Тому для адекватного опису σ_t і $\sigma_{el}(\theta)$ в широкій області енергій необхідно було знайти індивідуальний набір параметрів ОП для ядра ітрію.

Для знаходження індивідуальних параметрів ОП для ядра ітрію нами за допомогою програми GENOA [31] було проведено пошук значень параметрів V_c та W_c , при яких досягається мінімуму χ^2 при підгонці розрахованих σ_t і $\sigma_{el}(\theta)$ до їх експериментальних значень, узятих з робіт [8, 9, 12 - 15, 17 - 23]. Дані роботи [13] використано усередненими по інтервалу $\sim 0,35$ MeV. За вихідний набір параметрів ОП взято одержані нами раніше оптимальні параметри для ядра ^{93}Nb [3]:

$$V_c = (48,53 - 0,26 \cdot E_n) \text{ MeV}, W_c = (7,93 + 0,11 \cdot E_n) \text{ MeV}, V_{so} = 7,5 \text{ MeV}, \quad (1)$$

$$a_v = a_{so} = 0,65 \text{ Фм}, a_w = 0,47 \text{ Фм}, r_v = r_w = r_{so} = 1,25 \text{ Фм}.$$

На цій стадії пошуку значень параметрів W_c та V_c інші параметри залишалися незмінними на значеннях (1). Визначені таким шляхом параметри V_c та W_c у широкій області енергій наведено на рис. 6 при 28 фіксованих значеннях енергії й у подальшому використано нами для визначення їх енергетичної залежності. За нашими даними, енергетичну залежність V_c та W_c для ядра ітрію можна представити у вигляді

$$V_c = (49,76 - 0,38 E_n) \text{ MeV},$$

$$W_c = (5,65 + 0,26 E_n) \text{ MeV при } E_n < 11 \text{ MeV}, \tag{2}$$

$$W_c = 8,57 \text{ MeV при } E_n > 11 \text{ MeV}.$$

Одержані нами енергетичні залежності V_c і W_c (2) і значення геометричних параметрів (1) задовільно узгоджуються з параметрами роботи [39], які плідно використано для розрахунків компаундних перерізів у широкій області енергій. У подальшому нами систематичні розрахунки σ_t та $\sigma_{sel}(\theta)$ для ядра ітрію проведено з використанням параметрів ОП у вигляді (1) за винятком V_c та W_c , енергетичну залежність яких узято у вигляді (2).

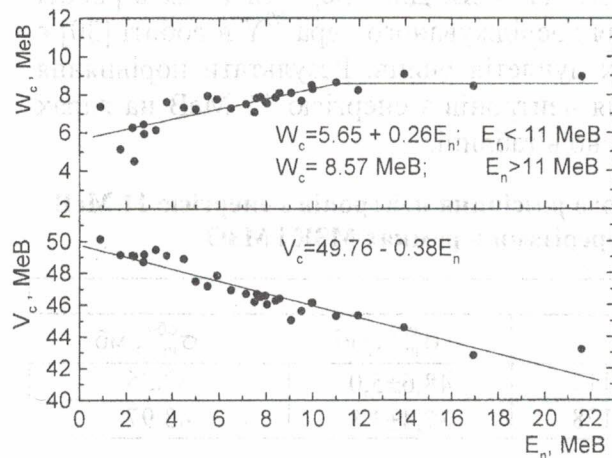


Рис. 6. Енергетична залежність параметрів ОП V_c і W_c для ядра ^{89}Y за результатами даної роботи.

Компаундні компоненти перерізів пружного та непружного розсіяння нейтронів ядрами ітрію в області енергій збудження, де добре відомі характеристики рівнів ($< 3,5$ MeV), обчислено за моделлю Хаузера - Фешбаха [35] з поправками Молдауера [34] на флуктуацію ширин рівнів за програмою LIANA [35]. При більш високих енергіях збудження розрахунки перерізів через складене ядро проведено за програмою STATIS [36], де як конкурентні канали непружного розсіяння враховано канали зі збудженням як дискретного, так і безперервного спектрів рівнів ядра. Характеристики рівнів дискретного спектра ядра ^{89}Y взято з роботи [37]. Щільність рівнів обчислено за композитною формулою Гільберта - Камерона [38], що складається з виразу моделі постійної температури при низьких енергіях і виразу моделі Фермі-газу. Параметри моделі Фермі-газу і параметри моделі постійної температури взято з роботи [32], в якій параметри моделі постійної температури визначено зі збігу щільностей рівнів і температур для цих моделей при $U_x = 5,303$ MeV. У наших розрахунках використано такі значення параметрів моделі Фермі-газу: $a = 9,365 \text{ MeV}^{-1}$, $\Delta = 1,22 \text{ MeV}$ і моделі постійної температури: $T = 0,82 \text{ MeV}$, $E_0 = 1,181 \text{ MeV}$.

Для опису прямої компоненти непружного розсіяння нейтронів на ядрах ^{89}Y нами використано модель МЗО, яку схематично наведено на рис. 7. У цій моделі перші колективні стани 2^+ і 3^- в ^{88}Sr і ^{90}Zr розщеплюються на дуплет станів ітрію через зв'язок $2p_{1/2}$ протона або дірки зі станами 2^+ і 3^- остова ^{88}Sr або ^{90}Zr відповідно. Центри ваги станів дуплетів у ядрі ^{89}Y , обчислені за формулою

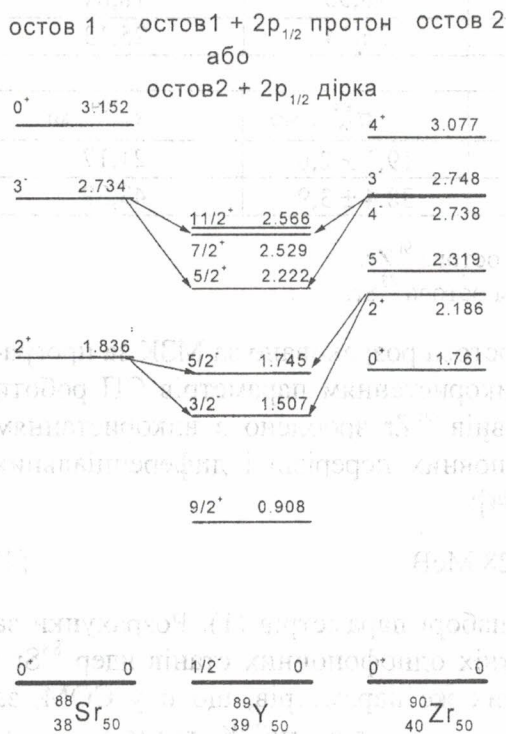


Рис. 7. Модель збудженого остова для ^{89}Y .

$$E_c = \sum_J (2J+1)E_J / \sum_J (2J+1), \quad (3)$$

непогано збігаються з положенням рівнів 2^+ і 3^- сусідніх парно-парних ядер ^{88}Sr і ^{90}Zr . Дещо кращий збіг спостерігається для ядра ^{88}Sr . Таке узгодження вказує на те, що усереднені характеристики збуджених станів ядра ітрію можна розглядати як у моделі слабкого зв'язку протонної частинки в оболонці $2p_{1/2}$ - зі збудженими станами остова ^{88}Sr , так і в моделі слабкого зв'язку протонної дірки в оболонці $2p_{1/2}$ - зі збудженими станами остова ^{90}Zr . Критерієм надійності вибору остова може служити тільки збіг експериментального перерізу збудження колективного стану остова з сумарним перерізом дуплету станів ядра ^{89}Y в області енергій, де компаундними процесами можна знехтувати. Для досліджуваних ядер таке порівняння коректно можна зробити при енергії 11 МеВ. Для ядер ^{88}Sr і ^{90}Zr в роботі [39] є дані з перерізів збудження 2^+ і 3^- станів, а для досліджуваного ядра ^{89}Y в роботі [30] є експериментальні дані з перерізів збудження двох дуплетів рівнів. Результати порівняння експериментальних перерізів непружного розсіяння нейтронів з енергією 11 МеВ на ядрах ^{88}Sr , ^{89}Y і ^{90}Zr з обчисленими перерізами представлено в таблиці.

Порівняння експериментальних перерізів непружного розсіяння нейтронів з енергією 11 МеВ на ядрах ^{88}Sr , ^{89}Y і ^{90}Zr з обчисленими перерізами в рамках МЗК і МЗО

^{88}Sr				
E_p, MeV	J^π	β	$\sigma_{in}^{екс}, \text{мб}$	$\sigma_{in}^{обч}, \text{мб}$
1,836	2^+	$\beta_2=0,112$	$48,6 \pm 5,0$	37,26
2,734	3^-	$\beta_3=0,178$	$37,4 \pm 3,8$	43,97
^{89}Y				
E_p, MeV	J^π	$\sigma_{in}^{екс}, \text{мб}$	$\sigma_{in}^{обч*}, \text{мб}$	$\sigma_{in}^{обч**}, \text{мб}$
1,507	$3/2^-$	$6,9 \pm 1,2$	8,47	14,90
1,745	$5/2^-$	$10,3 \pm 1,9$	12,70	22,36
2,222	$5/2^+$	$13,2 \pm 2,4$	18,55	18,84
2,529	$7/2^+$	$13,8 \pm 2,5$	24,74	25,13
^{90}Zr				
E_p, MeV	J^π	β	$\sigma_{in}^{екс}, \text{мб}$	$\sigma_{in}^{обч}, \text{мб}$
2,186	2^+	$\beta_2 = 0,083$	$19,3 \pm 2,0$	21,17
2,748	3^-	$\beta_3 = 0,172$	$38,4 \pm 3,9$	43,29

* Обчислені перерізи в рамках МЗО з використанням остова ^{90}Zr .

** Обчислені перерізи в рамках МЗО з використанням остова ^{88}Sr .

Переріз прямого збудження колективних рівнів остова розраховано за МЗК за програмою ECIS-94 [40]. Розрахунки для ^{88}Sr проведено з використанням параметрів ОП роботи [39]. Розрахунки перерізів збудження колективних рівнів ^{90}Zr зроблено з використанням параметрів ОП, знайдених у даній роботі з аналізу повних перерізів і диференціальних перерізів пружного розсіяння за даними робіт [39, 41 - 44]:

$$V_c = (49,42 - 0,31 \cdot E_n) \text{ MeV}; \quad W_c = 8,28 \text{ MeV}. \quad (4)$$

Значення геометричних параметрів наведено в наборі параметрів (1). Розрахунки за МЗК проведено в допущенні вібраційної природи нижніх однофононних станів ядер ^{88}Sr і ^{90}Zr (схема зв'язку $0^+ - 2^+, 3^-$) та при використанні тих же параметрів, що й у COM, за винятком потенціалу поглинання, який зменшувався до значення $0,9 \cdot W_c^{COM}$. У МЗО переріз прямого збудження рівнів дуплету від'ємної та додатної парностей ядра ^{89}Y визначається за формулами

$$\frac{d\sigma}{d\omega}(J^\pi, {}^{89}\text{Y}) = \left(\frac{2J+1}{10}\right) \frac{d\sigma}{d\omega}(2^+, {}^{88}\text{Sr} \text{ (або } {}^{90}\text{Zr)}), \quad (5)$$

$$\frac{d\sigma}{d\omega}(J^\pi, {}^{89}\text{Y}) = \left(\frac{2J+1}{14}\right) \frac{d\sigma}{d\omega}(3^-, {}^{88}\text{Sr} \text{ (або } {}^{90}\text{Zr)}), \quad (6)$$

де $\frac{d\sigma}{d\omega}(2^+, {}^{88}\text{Sr} \text{ (або } {}^{90}\text{Zr)})$ і $\frac{d\sigma}{d\omega}(3^-, {}^{88}\text{Sr} \text{ (або } {}^{90}\text{Zr)})$ – переріз прямого збудження рівня остова ${}^{88}\text{Sr}$ (або ${}^{90}\text{Zr}$) квадрупольної й октупольної деформації відповідно.

З таблиці видно, що кращий збіг експериментального перерізу непружного розсіяння дуплетів станів ядра ${}^{89}\text{Y}$ з обчисленими перерізами спостерігається при використанні в якості остова ядра ${}^{90}\text{Zr}$. Тому систематичні розрахунки прямого непружного розсіяння ядра ${}^{89}\text{Y}$ зроблено в моделі слабого зв'язку протонної дірки в оболонці $2p_{1/2}$ зі збудженими станами остова ${}^{90}\text{Zr}$.

У рамках розглянутих моделей у подальшому нами було проведено систематичні розрахунки повних перерізів, перерізів пружного та непружного розсіяння швидких нейтронів ядрами ітрію. Розрахунки перерізів проведено з використанням знайдених нами оптимальних параметрів ОП. На рис. 1 - 5 результати розрахунків перерізів взаємодії швидких нейтронів з ядрами ітрію було порівняно з експериментальними даними.

З рис. 1 - 3 видно, що обчислені повні перерізи, диференціальні та інтегральні перерізи пружного розсіяння нейтронів ядрами ітрію в широкій області енергій добре узгоджуються з експериментальними, що свідчить про надійність визначених нами параметрів ОП й обґрунтованість прийнятого нами підходу до опису перерізів пружного розсіяння швидких нейтронів ядрами ітрію.

З рис. 4 видно, що результати обчислень енергетичної залежності інтегральних перерізів збудження п'яти найнижчих рівнів ядра ${}^{89}\text{Y}$ (з характеристиками $E_1 = 0,908 \text{ MeV}$ ($9/2^+$), $E_2 = 1,507 \text{ MeV}$ ($3/2^-$), $E_3 = 1,745 \text{ MeV}$ ($5/2^-$), $E_4 = 2,222 \text{ MeV}$ ($5/2^+$), $E_5 = 2,529 \text{ MeV}$ ($7/2^+$)) також добре узгоджуються з експериментальними в широкій області енергій. Тому для рівнів і областей енергій, де відсутні експериментальні дані, результати розрахунків можна розглядати як рекомендовані перерізи непружного розсіяння. Обчислені повні перерізи непружного розсіяння як різниця між $\sigma_t(E)$ і $\sigma_{el}(E)$ з поправками на внесок відкритих каналів реакцій (n, p) , (n, α) , (n, d) , (n, np) , $(n, n\alpha)$ і $(n, 2n)$ також добре узгоджуються з експериментальними й оціненими даними із бібліотек ENDF/B-VI та JENDL-3.2. Цю узгодженість добре ілюструє рис. 5. В області енергій, вищих за 9 MeV, експериментальні дані відсутні, тому наші розрахунки повного перерізу непружного розсіяння нейтронів можна також розглядати як рекомендовані значення перерізів.

Результати теоретичного аналізу нами використано для дослідження механізмів взаємодії швидких нейтронів з ядрами ітрію. Обчислені перерізи розсіяння нейтронів ядрами ${}^{89}\text{Y}$ в широкій області енергій свідчать про те, що компаундний механізм розсіяння дає суттєвий внесок у перерізи пружного розсіяння тільки в області енергій до $\sim 7 \text{ MeV}$, а в перерізах непружного розсіяння він домінує в області енергій до 6 MeV. Величина перерізу прямого збудження рівнів 2^+ і 3^- ядер ${}^{90}\text{Zr}$ розподілена між членами дуплетів рівнів ядра ${}^{89}\text{Y}$ у пропорції 0,4 : 0,6 і 0,43 : 0,57 відповідно. Як і очікувалось, компоненти прямої взаємодії для них за абсолютною величиною невеликі й домінують тільки при енергіях, вищих за 7 MeV.

Висновки

У роботі зроблено порівняльний аналіз експериментальних даних з повних перерізів і перерізів розсіяння швидких нейтронів ядрами ${}^{89}\text{Y}$. Показано, що сукупність експериментальних даних з перерізів взаємодії нейтронів з ядрами ітрію в широкій області енергій можна адекватно описати в рамках оптико-статистичного підходу, в основу якого покладено СОМ, МЗК, МЗО, СМ та індивідуальний набір параметрів ОП, в якому тільки дійсна й уявна частини потенціалу залежать від енергії нейтронів. Обґрунтовано викори-

стання ядра ^{90}Zr в якості остова при розрахунках прямої компоненти непружного розсіяння в рамках МЗО. Результати теоретичного аналізу використано для вивчення механізмів пружного й непружного розсіяння нейтронів ядрами ^{89}Y в широкій області енергій.

Автори висловлюють подяку Т. І. Яковенко за допомогу в проведенні аналізу експериментальних перерізів взаємодії швидких нейтронів з ядрами ітрію.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Hodgson P.E.* // Nuclear Reaction and Nuclear Structure. - Oxford: Clarendon Press, 1971.
2. *Корж І.О., Скляр М.Т.* // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних дослід. - 2002. - № 1(7). - С. 34 - 39.
3. *Korzh I.O., Sklyar M.T., Yakovenko T.I.* // Ukr. J. Phys. - 2004. - Vol. 49, No. 1. - P. 9 - 15.
4. *Foster D.G., Glasgow D.W.* // Phys. Rev. C. - 1971. - Vol. 3, No. 2. - P. 576 - 603.
5. *Abfalterer W.P., Bateman F.B., Dietrich F.S. et al.* // Phys. Rev. C. - 2001. - Vol. 63, No. 4. - 044608 (19 pages).
6. *Budtz-Jørgensen C., Guenther P., Smith A. et al.* // Z. Phys. A. - 1984. - Vol. 319, No. 1. - P. 47 - 56.
7. *Poenitz W.P., Whalen J.* // Report ANL - NDM - 80. - 1983; EXFOR 12853.
8. *Cox S.A., Dawling - Cox E.E.* // Report ANL-7935. - 1972; EXFOR 10332.
9. *Lawson R.D., Guenther P.T., Smith A.B.* // Phys. Rev. - Vol. 34, No. 5. - P. 1599 - 1609.
10. *Wilenzik R.M., Seth K.K., Bevington P.R., Lewis H.W.* // Nucl. Phys. - 1965. - Vol. 62, No. 3. - P. 511 - 525.
11. *Becker R.L., Guindon W.G., Smith G.J.* // Nucl. Phys. - 1966. - Vol. 89. - P. 154 - 164.
12. *Honoré G.M., Pedroni R.S., Howell C.R. et al.* // Phys. Rev. C. - 1986. - Vol. 34, No. 3. - P. 825 - 834.
13. *Smith A.B., Guenther P.T., Whalen J.F.* // Nucl. Phys. A. - 1984. - 415. - P. 1 - 29.
14. *Perey F.G., Kinney W.E.* // Report ORNL - 4552. - 1970; EXFOR 10130.
15. *Mellema S., Petler J.S., Finlay R.W. et al.* // Phys. Rev. - 1987. - Vol. 36, No. 2. - P. 577 - 584.
16. *Popov A.B., Samosvat G.S.* // Preprint JINR - P3 - 86 - 599. - 1986.
17. *Landon H.H., Elwyn A.J., Glasoe G.N., Oleksa S.* // Phys. Rev. - 1958. - Vol. 112. - P. 1192 - 1200.
18. *Towle J.H.* // Nucl. Phys. A. - 1969. - Vol. 131, No. 3. - P. 561 - 573.
19. *Mc Daniel F.D., Brandenberger J. D., Glasgow G.P. et al.* // Report A-KTY - 74/77. - 1977; EXFOR 10770.
20. *Hansen L.F., Dietrich F.S., Pohl B.A. et al.* // Phys. Rev. C. - 1985. - Vol. 31, No. 1. - P. 111 - 119.
21. *Трыкова І.І., Барыба В.Я.* // ВАНТ. Сер. Ядерные константы. - М.: Атомиздат, 1975. - Вып. 19. - С. 66 - 76.
22. *Schreder G., Grum W., Hammer J. W. et al.* // Phys. Rev. C. - 1989. - Vol. 39, No. 5. - P. 1774 - 1779.
23. *Olsson N, Trostell B., Ramstrom E, Holmqvist B.* // Nucl. Phys. A. - 1987. - Vol. 472. - P. 237 - 268.
24. *Ramström E.* // Nucl. Phys. A. - 1979. - Vol. 315, No. 1, 2. - P. 143 - 156.
25. *Shafroth S.M., Trehan P.N., Van Patter D.M.* // Phys. Rev. - 1963. - Vol. 129, No. 2. - P. 704 - 716.
26. *Симаков С.П., Ловчикова Г.Н., Лунёв В.П. и др.* // ВАНТ. Сер. Ядерные константы. - М.: ЦНИИАтоминформ, 1992. - Вып. 3 - 4. - С. 74 - 92.
27. *Бирюков Н.С., Журавлев Б.В., Корнилов Н.В. и др.* // Нейтронная физика. - М.: ЦНИИАтоминформ, 1976. - Ч. 4. - С. 118 - 122.
28. *Holmqvist B., Wiedling T.* // J. Nucl. Energy. - 1973. - Vol. 27. - P. 543 - 551.
29. *Пасечник М.В., Корж І.А., Каууба І.Е.* Нейтронная физика. - Киев: Наук. думка, 1972. - Ч. 1. - С. 253 - 261.
30. *Yan Yiming, Brient C.E., Finlay R.W. et al.* // Nucl. Phys. A. - 1982. - Vol. 390, No. 3. - P. 449 - 460.
31. *Perey F.* // SPI - GENOA. An Optical Model Search Code: The Niels Bohr Institute. - Computer Program Library. - 1975.
32. *Arthur E.D.* // Nucl. Sci. Eng. - 1980. - Vol. 76, No. 2. - P. 137 - 147.
33. *Hauser W., Feshbach H.* // Phys. Rev. - 1952. - Vol. 87, No. 2. - P. 366 - 373.
34. *Moldauer P.A.* // Phys. Rev. B. - 1964. - Vol. 135, No. 3. - P. 642 - 659; Rev. Mod. Phys. - 1964. - Vol. 41, No. 4. - P. 1079 - 1084.
35. *Smith W.R.* // Computer Physics Communications. - 1969. - Vol. 1. - P. 181 - 190.
36. *Stocstad R.* // STATIS. - A Hauser - Feshbach Computer Code: Yale University. - 1972. - Report No. 52. - P. 35.
37. *Sievers H.* // Nucl. Data Sheets. - 1989. - Vol. 58, No. 2. - P. 351 - 441.
38. *Gilbert A., Cameron A.G.W.* // Can. J. Phys. - 1965. - Vol. 43. - P. 1446 - 1496.

39. *Bainum D.E., Finlay R.W., Rapaport J.* // Nucl. Phys. A. - 1978. - Vol. 311, No. 3. - P. 492 - 506.
40. *Raunil J.* // Notes on ECIS - 94. - Centre d'Etudes de Saclay Service de Physique Théorique Laboratoire de la Direction des Sciences de la Matière. - Septembre 1994. ISSN 0429 - 3460. CEA - N - 2772.
41. *Wang Y., Rapaport J.* // Nucl. Phys. A. - 1990. - Vol. 517. - P. 301 - 328.
42. *Guenther P., Smith A., Whalen J.* // Phys. Rev. C. - 1975. - Vol. 12, No. 6. - P. 1797 - 1807.
43. *Mc Daniel F., Brandenberger J., Glasgow G., Leighton H.* // Phys. Rev. C. - 1974. - Vol. 10, No. 3. - P. 1087 - 1098.
44. *Tanaka S., Yamanouti Y.* // NEANDC Report No. NEANDC (J) - 55/U, 1980.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ С ЯДРАМИ ИТТРИЯ

И. А. Корж, Н. Т. Скляч

Проведен анализ экспериментальных данных по полным сечениям, сечениям упругого и неупругого рассеяния нейтронов ядрами ^{89}Y в области энергий 0,2 – 22 МэВ. Экспериментальные данные проанализированы в рамках оптико-статистического подхода, основу которого составляют сферическая оптическая модель, модель связанных каналов, модель возбужденного остова и современные варианты статистической модели. Показана возможность адекватного описания всей совокупности экспериментальных данных в рамках этого подхода только при использовании индивидуального набора параметров оптического потенциала. Из адекватного теоретического описания совокупности экспериментальных данных сделаны выводы о механизмах рассеяния быстрых нейтронов ядрами ^{89}Y в широкой области энергий.

INTERACTION OF FAST NEUTRON WITH ^{89}Y NUCLEI

I. O. Korzh, M. T. Sklyar

The analysis of experimental data on total cross sections, cross sections of elastic and inelastic scattering of neutrons by nuclei ^{89}Y in 0,2 - 22 MeV energy range has been done. The experimental data were analyzed within the framework of the optical-statistical approach, based on the spherical optical model, model of the coupled channels, model of excited core and modern variants of statistical model. It is shown that adequate description of this set of experimental data is possible within this approach only at use of the individual set of optical potential parameters. The conclusions about mechanisms of fast neutron scattering by nuclei ^{89}Y in broad energy range were made from the adequate theoretical description of set of experimental data.

Надійшла до редакції 14.06.04,
після доопрацювання – 21.07.04.