

© 2011 Н. Р. Дзисюк^{1,2}, А. О. Каденко¹, І. М. Каденко¹, Г. І. Применко¹¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ² Національна лабораторія Леньяро (INFN), Падуя, Італія**ПЕРЕРІЗИ ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ (n, x) НА ІЗОТОПАХ ДИСПРОЗІУ ТА ЕРБІУ**

Представлено результати експериментального визначення перерізів ядерних реакцій $^{162,163}\text{Dy}(n, x)^{162}\text{Tb}$, $^{163,164}\text{Dy}(n, x)^{163}\text{Tb}$, $^{156}\text{Dy}(n, 2n)^{155}\text{Dy}$, $^{158}\text{Dy}(n, 2n)^{157(m+g)}\text{Dy}$, $^{166,167}\text{Er}(n, x)^{166g}\text{Ho}$ та $^{170}\text{Er}(n, p)^{170g}\text{Ho}$ при енергії нейтронів $(14,6 \pm 0,2)$ MeV. Вимірювання перерізів виконано з використанням нейтронно-активаційного методу. Зразки диспрозію та ербію природного ізотопного складу опромінювалися (d-t) нейтронами. Апаратурні спектри гамма-випромінювання продуктів активації вимірювалися на спектрометрі з HPGe детектором. При обробці експериментальних даних було враховано нестационарність нейтронного потоку, реальну геометрію експерименту, ефекти каскадного додавання при вимірюваннях апаратурних гамма-спектрів та поглинання гамма-квантів у зразках. Уперше виміряно значення перерізу для ядерної реакції $^{162}\text{Er}(n, p)^{162(m+g)}\text{Ho}$. Теоретичний розрахунок функцій збудження досліджуваних ядерних реакцій виконано з використанням коду TALYS-1.2.

Ключові слова: переріз реакції, нейтронно-активаційний метод, функція збудження.

Вступ

Завдання даного дослідження було сформульовано відповідно до існуючих запитів на ядерні дані, що є ключовими компонентами для розвитку теорії ядерних реакцій, а також прикладних застосувань у галузі ядерної енергетики [1]. Експериментальне вимірювання перерізів реакцій (n, x) посідає важливе місце, оскільки є надійним та ефективним засобом отримання інформації щодо структури атомного ядра та перебігу ядерних реакцій за відповідними каналами. Аналіз літературних джерел та баз ядерних даних [2, 3] свідчить про наявність великої кількості інформації щодо експериментальних даних із взаємодії нейтронів з ядрами, однак також указує на існування прогалин у визначенні перерізів ядерних реакцій при деяких енергіях нейтронів. Додатковою проблемою є суттєві розходження в результатах, що представлені різними експериментальними групами та сягають до 60 % і навіть більше [2]. Таке становище ускладнює процес оцінки ядерних даних, що виконується періодично відповідно до підвищення вимог до ядерних даних. У роботі досліджувалися реакції на диспрозій та ербій – елементах, що належать до групи рідкоземельних металів (лантанодів) та характеризуються як специфічними властивостями, так і суттєво вираженою деформацією ядер рідкоземельних елементів в основному стані. Саме це привертає увагу з точки зору теоретичного опису особливостей перебігу ядерних реакцій на таких ядрах, оскільки існуючі теоретичні моделі не є досконалими та потребують тестування та модифікацій, базуючись на наявних експериментальних даних [4].

Надійне визначення перерізів ядерних реакцій (n, x) є також важливим для оцінки радіаційної

стійкості поглинаючих елементів системи управління та захисту реакторів ВВЕР-1000 та РБМК [5]. Відомо, що диспрозій має велике значення перерізу поглинання теплових нейтронів, але з урахуванням енергетичного інтервалу спектра поділу властивості його мають бути дослідженими при енергіях нейтронів до 20 MeV у вхідному каналі реакцій та великих флюенсах нейтронів. З цієї точки зору ербій також може застосовуватися для ядерної енергетики та має бути ретельно дослідженим.

Відповідно до проблем ядерної астрофізики перерізи ядерних реакцій на ізотопах диспрозію є також необхідними для здійснення розрахунків, пов'язаних із синтезом елементів та передбаченням їхнього поширення у Всесвіті. Так, ядро ^{163}Dy є взагалі екзотичним, оскільки цей стабільний на поверхні землі ізотоп зазнає розпаду в умовах зіркового середовища [4].

Методика експерименту

Вимірювання перерізів виконано з використанням нейтронно-активаційного методу [6], джерелом нейтронів був нейтронний генератор НГ-300 [7], максимальна густина потоку нейтронів у місці опромінювання зразка становила $5,2 \cdot 10^8$ (1/см²·с) та була визначена експериментально. Під час експериментів для генерації нейтронів використовувався змішаний (D^+ - D_2^+) компонент іонного пучка з максимальною енергією ~ 225 кеВ. Для опромінювання було використано матеріал диспрозію ($^{156}\text{Dy} - 0,06\%$, $^{158}\text{Dy} - 0,1\%$, $^{160}\text{Dy} - 2,34\%$, $^{161}\text{Dy} - 18,9\%$, $^{162}\text{Dy} - 25,5\%$, $^{163}\text{Dy} - 24,9\%$, $^{164}\text{Dy} - 28,2\%$) та ербію ($^{162}\text{Er} - 0,14\%$, $^{164}\text{Er} - 1,61\%$, $^{166}\text{Er} - 33,6\%$, $^{167}\text{Er} - 22,95\%$, $^{168}\text{Er} - 26,8\%$, $^{170}\text{Er} - 14,9\%$) природного ізотопного складу. Два зразки диспрозію мали форму дисків із розмірами $\varnothing 15,4 \times 0,07$ мм та масою 132 мг

кожний, які перед опромінюванням було досліджено на предмет присутності домішок інших елементів [8]. Результат аналізу показав наявність таких елементів: гадоліній – 1,21 %, скандій – 0,039 %, мідь – 0,017 %. Зразок ербію мав форму паралелепіпеду з розмірами $8,5 \times 7,3 \times 2,1$ мм та масою 1,022 г. Апаратурні гамма-спектри ядер-продуктів активації накопичувалися спектрометром на основі коаксіального HPGe детектора (об'єм ~ 110 см³). Енергетична роздільна здатність спектрометра становила 2,0 кеВ для гамма-квантів з енергією 1332 кеВ, що супроводжують розпад ⁶⁰Со та 0,9 кеВ для гамма-квантів з енергією 122 кеВ при розпаді ⁵⁷Со.

Для фіксування положення пучка дейтронів на мішені прискорювача в іонопроводі на відстані 28 см від мішені було встановлено діафрагму діаметром 8 мм, що дало змогу зменшити діаметр пучка дейтронів на мішень до 10 мм. Положення осі пучка дейтронів знаходили з розподілу густини потоку нейтронів на мішені методом активації тонких алюмінієвих фольг. Величина густини потоку нейтронів підтримувалась постійною з похибкою < 5 %.

Відомо, що спектр нейтронів не є моноенергетичним (рис. 1), внаслідок перерозсіяння швидких нейтронів на конструкційних елементах нейтронного генератора та стінах експериментальної зали. Для врахування можливих особливостей спектра нейтронів було розроблено модель нейтронного генератора, використовуючи програмний код MCNP4C [9] та реальну геометрію опромінення зразків, інформацію про складові конструкційних матеріалів, розміри зразка та його положення відносно титан-третієвої мішені. Валідацію моделі виконано на основі реакцій (n, γ) на тербії [10].

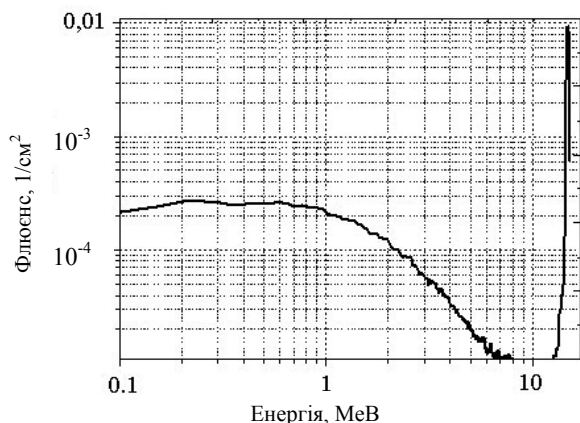


Рис. 1. Розрахований спектр (d-t) нейтронів.

Низькоенергетичну частину перерозсіяного спектра (фракційна частка FC) від (d, t) нейтронів було визначено за формулою

$$FC = \frac{\int_0^{E_c} S(E)\sigma(E)dE}{\int_0^{E_c} S(E)\sigma(E)dE + \int_{E_c}^{E_{max}} S(E)\sigma(E)dE}, \quad (1)$$

де $S(E)$, $\sigma(E)$, E_c та E_{max} - енергетичний спектр нейтронів, переріз досліджуваної реакції при відповідній енергії нейтронів E , енергія “відсічки” (обрана рівною 10 МеВ) та максимальна гранична енергія (обрана в околі 15 МеВ) відповідно [11]. Фактори FC було розраховано з використанням інформації про перерізи реакцій $\sigma(E)$ з оціненої бібліотеки ядерних даних JENDL-3.3 [12].

Опромінювання зразків диспрозію та ербію проводилося під кутом 0 градусів до осі пучка дейтронів на відстані 10 мм від Ті-Т шару мішені. Такій геометрії відповідає значення середньої енергії нейтронів, що випромінюються, – 14,6 МеВ. Величина енергії нейтронів, усередненої по зразку, та її розкид були визначені на основі декількох підходів: перший – шляхом проведення кінематичних розрахунків у програмному коді DROSG [13] (рис. 2); другий – з використанням модельного підходу на основі Монте-Карло розрахунків; третій – експериментально на основі Zr/Nb методу [14].

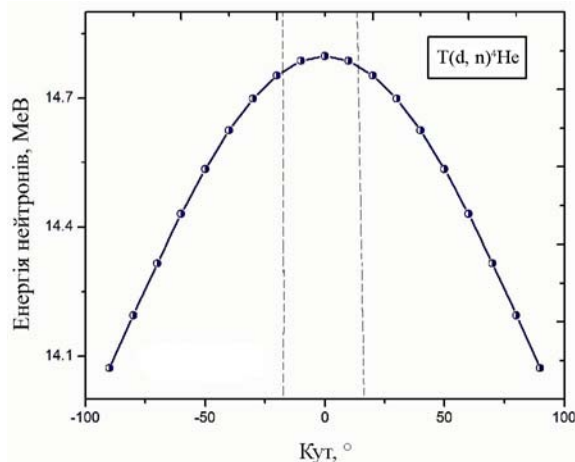


Рис. 2. Розрахована енергія (d-t) нейтронів залежно від кута вильоту.

З метою надійної ідентифікації ядер-продуктів активації варіювався час вимірювання апаратурних гамма-спектрів (від 20 хв до 36 год). Час витримки опромінених зразків було мінімізовано, що дало змогу реєстрації продуктів реакцій із мінімально можливим періодом напіврозпаду. Величини перерізів ядерних реакцій визначалися відносним методом, при цьому опорною (моніторною) ядерною реакцією було обрано таку ²⁷Al(n, α)²⁴Na [15].

Для забезпечення надійності результатів вимірювання необхідно врахувати ряд ефектів, що мають суттєвий вплив на кінцевий результат. У першу чергу це ефекти самопоглинання гамма-випромінювання, оскільки використані зразки диспрозій та ербію мають достатньо велику густину та товщину. Вимірювання проведено в близькій геометрії (зразок на поверхні криостату детектора), тому необхідним було врахування гамма-квантів, що випромінювалися під малими кутами до поверхні детектора. Для цього в коді MCNP4C створено модель детектора, що застосовувався в експерименті (рис. 3). Валідацію моделі виконано на основі порівняння експериментально вимірюваних значень ефективності в різних геометріях (близькій та дальній) із теоретично розрахованими, базуючись на розробленій нами моделі. Відповідні поправочні коефіцієнти визначалися як відношення ефективності детектора у варіанті точкового та об'ємного джерел. Поправки на ефекти каскадного додавання гамма-квантів виконано з використанням коду Nuclide Master+ [16]. Вхідною інформацією для цього коду була реальна геометрія вимірювань та інформація про структуру ядер із бази ядерних даних ENSDF[17].

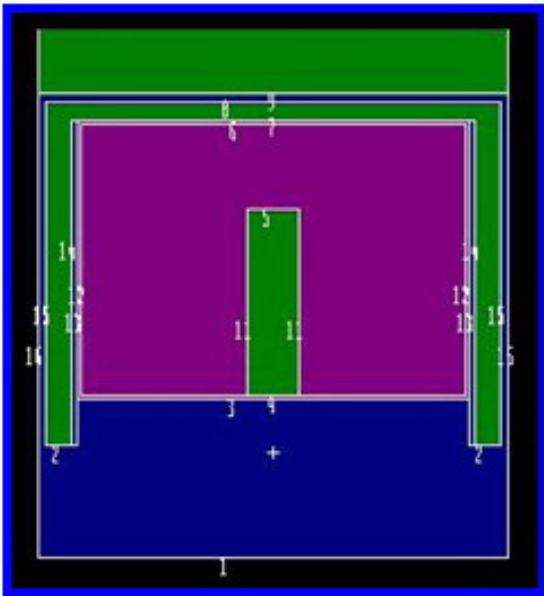


Рис. 3. Модель HPGe детектора.

Результати вимірювань перерізів реакцій

Основні результати вимірювань із вказаними величинами похибок для кожного значення перерізу представлено в таблиці. Енергія налітаючих нейтронів становила $(14,6 \pm 0,2)$ MeV для всіх перерізів, вимірюваних у даній роботі. Також для порівняння представлено дані з бази ядерних даних EXFOR та ENDF/B-VII [2]. Теоретичні

розрахунки виконано з використанням коду TALYS-1.2 [18].

У досліджуваному діапазоні енергій нейтронів для реакцій $^{156}\text{Dy}(n, 2n)^{155}\text{Dy}$ та $^{158}\text{Dy}(n, 2n)^{157(m+g)}\text{Dy}$ наявні дані представлено в обмеженій кількості робіт [19 - 21]. На основі цих даних немає можливості однозначного проведення функції збудження в діапазоні енергій нейтронів $(14 \div 15)$ MeV (рис. 4). Середні значення похибок для перерізів вищенаведених ядерних реакцій (8 - 20) %, у той час як у даній роботі ці перерізи виміряно з похибкою (4 - 15) %.

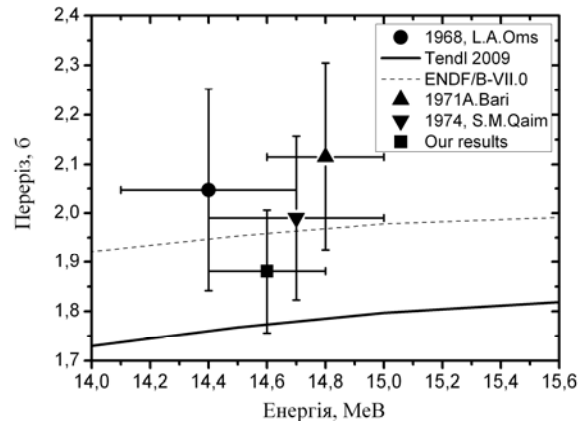


Рис. 4. Експериментальні та оцінені дані для реакції $^{158}\text{Dy}(n, 2n)^{157}\text{Dy}$.

Уточнено величини перерізів ядерних реакцій $^{162,163}\text{Dy}(n, x)^{162}\text{Tb}$, $^{163,164}\text{Dy}(n, x)^{163}\text{Tb}$, $^{166,167}\text{Er}(n, x)^{166g}\text{Ho}$ та $^{170}\text{Er}(n, p)^{170g}\text{Ho}$. Природний диспрозій та ербій містять декілька стабільних ізотопів, така особливість суттєво ускладнює отримання надійних ядерних даних унаслідок виникнення інтерференцій між відкритими каналами реакцій при опромінуванні.

Значення перерізу реакції $^{162}\text{Er}(n, p)^{162(m+g)}\text{Ho}$ при енергії нейтронів 14,6 MeV виміряно вперше, при цьому у вихідному каналі реакції ядро ^{162}Ho має метастабільний стан з енергією 105,9 keV та часом життя 67 хв, що з імовірністю 0,62 розпадається до основного стану ^{162g}Ho через ізомерний перехід (рис. 5). У свою чергу ядро ^{162g}Ho внаслідок поглинання електрона з періодом напіврозпаду 15 хв розпадається до ^{162}Dy у збудженому стані. Далі ядро ^{162}Dy переходить до основного стану шляхом випромінювання гамма-квантів, найінтенсивнішими з яких є $E_\gamma = 1319,3$ keV ($I = 3,8$ %) та $E_\gamma = 80,66$ keV ($I = 8$ %). Для розрахунку перерізу реакції $^{162}\text{Er}(n, p)^{162(m+g)}\text{Ho}$ було використано гамма-лінію з енергією $E_\gamma = 1319,3$ keV. Площа піка даної гамма-лінії визначалася з апаратного спектра, час накопичення якого становив 25,9 хв, а час витримки зразка до початку вимірювання –

1,5 хв. Для надійної ідентифікації відповідних каналів реакцій нами було використано аналіз періодів напіврозпаду продуктів активації.

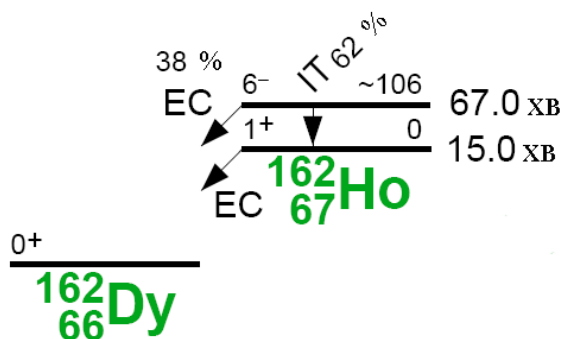
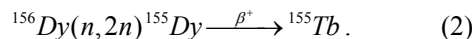


Рис. 5. Схема розпаду ядра ¹⁶²Ho.

Вимірювання перерізів реакцій (n, d + np) є складним завданням унаслідок малості величини цього перерізу та особливостей перебігу таких реакцій. Власне через це доступною є досить обмежена кількість експериментальних даних, особливо це стосується ядер рідкоземельної групи елементів. У даному випадку на гамма-спектрах нами однозначно ідентифіковано піки,

що відповідали найбільш інтенсивним лініям ядра ¹⁵⁵Tb. Перше припущення стосувалося того, що ми спостерігаємо дочірнє ядро з реакції ¹⁵⁶Dy(n, d + np)¹⁵⁵Tb. Ядро ¹⁵⁵Tb має період напіврозпаду 5,32 доби, що є зручним для аналізу спаду активності з часом. Ретельний розгляд інтенсивностей відповідних гамма-ліній виявив суттєве завищення величини перерізу (~1,4 б), що не є характерним для реакції такого типу. Аналіз усіх можливих шляхів напрацювання даного ізотопу дозволив встановити можливу інтерференцію



Ядра ¹⁵⁵Dy та ¹⁵⁵Tb мають період напіврозпаду 9,9 год та 5,32 доби відповідно, а отже, у радіоактивному розпаді ланцюга двох зв'язаних радіонуклідів не спостерігається радіоактивної рівноваги. Додаткове дослідження залежності активності ¹⁵⁵Tb з часом одразу після опромінення зразків дало можливість підтвердити саме канал (2) напрацювання ядер ¹⁵⁵Tb через розпад ядра ¹⁵⁵Dy [22].

Результати вимірювань перерізів реакцій (n, x) на ізотопах диспрозію та ербію

Ядерна реакція	T _{1/2}	Дана робота	Оцінені дані [2]		EXFOR	
		Переріз, мб	Переріз, мб (TALYS-1.2)	Переріз, мб (ENDF/B-VII)	Переріз, мб	SubEntry
¹⁵⁶ Dy(n, 2n) ¹⁵⁵ Dy	9,9 год	1596 ± 104	1670 ⁽⁹⁾	1840 ⁽⁹⁾	1852 ± 143 (14,7 MeB)	20541040 ⁽⁹⁾
					1982 ± 178 (14,8 MeB)	10431056 ⁽⁹⁾
					1943 ± 194 (14,4 MeB)	12131002 ⁽⁹⁾
¹⁵⁸ Dy(n, 2n) ^{157(m+g)} Dy	8,14 год	1881 ± 125	1770 ⁽¹⁰⁾	1960 ⁽¹⁰⁾	1990 ± 167 (14,7 MeB)	20541041 ⁽¹⁰⁾
					2115 ± 190 (14,8 MeB)	10431057 ⁽¹⁰⁾
					2047 ± 205 (14,4 MeB)	12131003 ⁽¹⁰⁾
^{162,163} Dy(n, x) ¹⁶² Tb	7,6 хв	3,9 ± 0,3	4,1 ⁽⁸⁾	4 ⁽⁸⁾	3,92 ± 0,4 (14,6 MeB)	22391007 ⁽⁸⁾
					0,67 ± 17% (14,58 MeB)	22800016 ⁽⁷⁾
^{163,164} Dy(n, x) ¹⁶³ Tb	19,5 хв.	3 ± 0,2	4 ⁽⁶⁾	3,2 ⁽⁶⁾	3,17 ± 0,57 (14,58 MeB)	22391008 ⁽⁶⁾
					0,3 ± 22% (14,64 MeB)	22809007 ⁽⁵⁾
¹⁵⁶ Dy(n, d + np) ¹⁵⁵ Tb	5,32 доби	*	1,7 ⁽¹⁴⁾	2 ⁽¹⁴⁾	-	-

Продовження таблиці

Ядерна реакція	T _{1/2}	Дана робота	Оцінені дані [2]		EXFOR	
		Переріз, мб	Переріз, мб (TALYS-1.2)	Переріз, мб (ENDF/B-VII)	Переріз, мб	SubEntry
¹⁷⁰ Er(n, p) ^{170g} Ho	2,76 хв	0,25 ± 0,05	2,2 ⁽¹³⁾	2,65 ⁽¹³⁾	0,21 ± 0,02 (14,8 MeB)	20860009 ⁽¹⁾
					1,13 ± 0,12 (14,8 MeB)	20860010 ⁽²⁾
					1,8 ± 0,5 (14,8 MeB)	12033048 ⁽²⁾
¹⁶² Er(n, p) ^{162(m+g)} Ho	15 хв	10,5 ± 3,2	15,7 ⁽¹¹⁾	11 ⁽¹¹⁾	-	-
^{166,167} Er(n, x) ^{166g} Ho	26,8 год	4,7 ± 0,8	7,4 ⁽¹²⁾	6,7 ⁽¹²⁾	4,3 ± 0,3 (14,7 MeB)	31497015 ⁽⁴⁾
					2,3 ± 0,2 (14,8 MeB)	12872009 ⁽⁴⁾
					6,7 ± 0,9 (14,8 MeB)	20860005 ⁽⁴⁾
					5,6 ± 0,8 (14,7 MeB)	20933012 ⁽⁴⁾

* Зроблено теоретичний розрахунок функції збудження з використанням коду TALYS-1.2.

(1) Канал реакції (68-ER-170(N,P)67-HO-170-G,,SIG).

(2) Канал реакції (68-ER-170(N,P)67-HO-170-M,,SIG).

(4) Канал реакції (68-ER-166(N,P)67-HO-166-G,,SIG).

(5) Канал реакції (66-DY-164(N,X)65-TB-163,,SIG).

(6) Канал реакції (66-DY-163(N,P)65-TB-163,,SIG).

(7) Канал реакції (66-DY-163(N,X)65-TB-162,,SIG) Sum of (N,N+P) And (N,D) Reactions.

(8) Канал реакції (66-DY-162(N,P)65-TB-162,,SIG).

(9) Канал реакції (66-DY-156(N,2N)66-DY-155,,SIG).

(10) Канал реакції (66-DY-158(N,2N)66-DY-157,,SIG).

(11) Канал реакції (ER-162(N,P)HO-162,SIG).

(12) Канал реакції (ER-166(N,P)HO-166,SIG).

(13) Канал реакції (ER-170(N,P)HO-170,SIG).

(14) Канал реакції (DY-156(N,N+P)TB-155,SIG).

Оцінки похибок величин перерізів

Основними джерелами систематичних похибок при застосуванні нейтронно-активаційних вимірювань є: ядерні константи (період напіврозпаду, квантовий вихід, дані розпаду), наявність продуктів інтерферуючих реакцій, домішки у зразках, густина нейтронного потоку, визначення середньої енергії нейтронів у зразку, інструментальні фактори (час опромінювання, витримки, та вимірювання зразків), похибки визначення коригуючих факторів. Зміною нейтронного потоку під час опромінювання можна було знехтувати. Похибки визначення маси зразків є суттєво малими (< 0.05 %). Вимірювання декількох інтенсивних гамма-ліній із надійно відомими квантовими виходами давало можливість зменшити вплив похибок ядерних констант.

Основні джерела похибок перерізів

Швидкість лічби	(1 - 48) %
Калібровка по ефективності	(0,6 - 6,5) %
Самопоглинання	
гамма-квантів	(1 - 5) %
Поправочний коефіцієнт на ефект каскадного додавання	(1 - 5) %
Константи (маса)	< 0,1 %
Похибка квантового виходу	(0,02 - 0,09) %
Моніторне значення перерізу	(1÷10) %
Середнє значення енергії нейтронів	(Δ)(170÷269) keB

Кінцеве значення похибки для більшості величин перерізів становило (4 - 7) %. Для багатьох сфер застосувань такі величини похибок можуть вважатися як прийнятними, а значення перерізів - як такими, що є надійно визначеними.

Теоретичні розрахунки величин перерізів реакцій та обговорення результатів

Теоретичні розрахунки величин перерізів ядерних реакцій з використанням сучасних кодів є невід'ємною складовою дослідження та процесу підтвердження надійності виміряних ядерних даних. У даній роботі для аналізу ядерних реакцій нами було використано сучасний програмний код TALYS-1.2. Здебільшого розрахунки виконано на основі базових модельних параметрів коду в рамках статистичної моделі Хаузера - Фешбаха та екситонної моделі для врахування передрівноважних процесів. При енергіях нейтронів, вищих за 8 MeV, передрівноважні процеси стають домінуючими, через це застосовано двокомпонентну екситонну модель. Для розрахунку використано також оптичну модель із параметризацією OMP Koning та Delaroche [23], що є автоматично скоригованими для деформованих ядер.

Для надійного розрахунку функції збудження виміряних перерізів ядерних реакцій треба пересвідчитися у прийнятності параметрів коду TALYS-1.2, що використовуються, шляхом порівняння з експериментально виміряними значеннями. На рис. 6 представлено результат розрахунку функції збудження кодом TALYS-1.2 із стандартним набором модельних параметрів для реакції $^{158}\text{Dy}(n, 2n)^{157}\text{Dy}$. На графік для порівняння нанесено також експериментальне значення перерізу цієї реакції з енергією в околі 14,6 MeV, отримане в даній роботі, що є дещо заниженим порівняно з отриманими значеннями перерізів інших експериментальних груп. У той же час спостерігається дуже гарне узгодження розрахованих та отриманої нами експериментально величин перерізу, що підтверджує коректність застосування розробленої нами

нейтронно-активаційної методики, доповненої необхідними модельними розрахунками. Саме тому для реакцій $^{156}\text{Dy}(n, 2n)^{155}\text{Dy}$, $^{162,163}\text{Dy}(n, x)^{162,164}\text{Tb}$ та $^{163,164}\text{Dy}(n, x)^{163}\text{Tb}$ нам вдалося досягти гарного узгодження наших експериментально отриманих результатів з даними інших груп та результатами теоретичних розрахунків. У той час для реакції $^{170}\text{Er}(n, p)^{170\text{g}}\text{Ho}$ нами, найбільш імовірно, підтверджено найнижче значення перерізу даної реакції порівняно з усіма відповідними у EXFOR величинами.

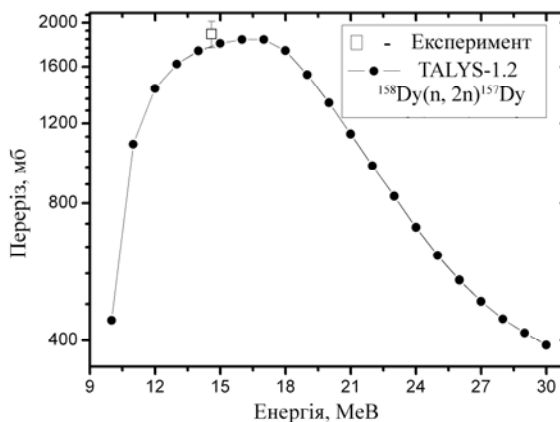


Рис. 6. Функція збудження реакції $^{158}\text{Dy}(n, 2n)^{157}\text{Dy}$.

На рис. 7 та 8 представлено результати розрахунку функції збудження для реакцій $^{156}\text{Dy}(n, d)^{155}\text{Tb}$ та $^{156}\text{Dy}(n, np)^{155}\text{Tb}$ у діапазоні енергій нейтронів (1 - 30) MeV. Відомо, що механізм реакції з вильотом дейтрона є достатньо складним для теоретичного опису. З цією метою було проаналізовано залежність даного перерізу реакції від застосованого типу оптичного потенціалу (dispersion u), густини рівнів (γ 1), а також параметра, що відповідає за механізм формування дейтрона у вихідному каналі реакції шляхом реакції зриву (cstrip).

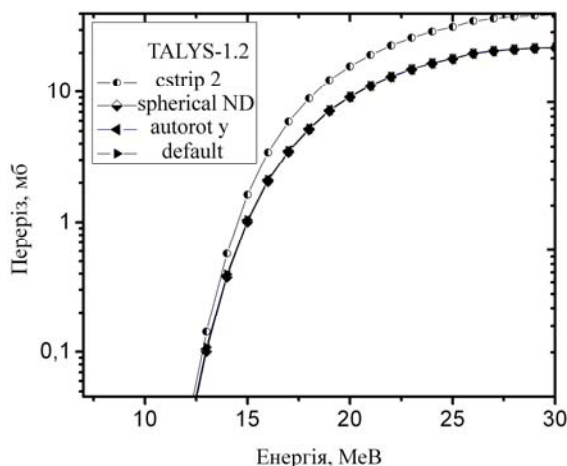


Рис. 7. Функція збудження реакції $^{156}\text{Dy}(n, d)^{155}\text{Tb}$.

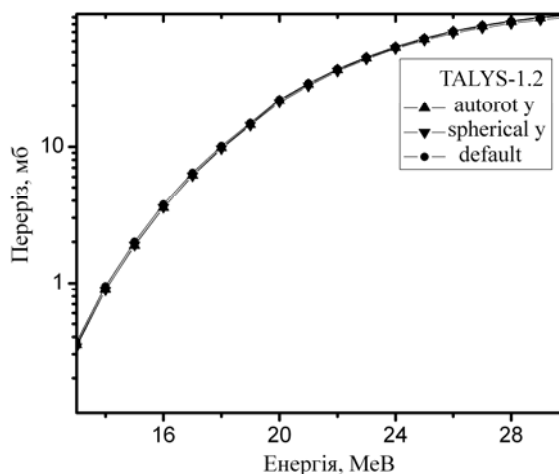


Рис. 8. Функція збудження реакції $^{156}\text{Dy}(n, np)^{155}\text{Tb}$.

Як видно з рис. 7, у випадку параметра *cstrip* 2 переріз реакції стрімко зростає, починаючи з енергії нейтронів 14 МеВ. Проаналізувавши таку залежність перерізу цієї реакції від енергії налітаючих нейтронів можна зробити припущення щодо потенційної можливості провести вимірювання перерізу реакції $^{156}\text{Dy}(n, d + np)^{155}\text{Tb}$, починаючи з енергії нейтронів ~ 15 МеВ, шляхом розробки ретельно спланованого експерименту. У рамках такого експерименту необхідним є використання зразка диспрозію, збагаченого по ^{156}Dy ізотопу, планарного детектора, схеми збігів та іншої прецизійної електроніки.

Висновки

У роботі експериментально виміряно перерізи ядерних реакцій (n, x) на ізотопах диспрозію та ербію при енергії налітаючих нейтронів 14,6 МеВ.

Зроблено уточнення перерізів ядерних реакцій $^{162,163}\text{Dy}(n, x)^{162}\text{Tb}$, $^{163,164}\text{Dy}(n, x)^{163}\text{Tb}$, $^{156}\text{Dy}(n, 2n)^{155}\text{Dy}$, $^{158}\text{Dy}(n, 2n)^{157(m+g)\text{Dy}}$, $^{166,167}\text{Er}(n, x)^{166g}\text{Ho}$ та $^{170}\text{Er}(n, p)^{170g}\text{Ho}$ при енергії налітаючих нейтронів 14,6 МеВ. Узгодження представлених результатів із результатами інших авторів у випадку реакції (n, 2n) трактується як свідчення коректності застосування розробленої нами методики нейтронно-активаційних вимірювань разом із розрахунковою частиною.

Для реакції $^{156}\text{Dy}(n, d + np)^{155}\text{Tb}$ зроблено теоретичний розрахунок функції збудження в діапазоні налітаючих нейтронів (1 - 30) МеВ, що дає можливість зробити висновок про механізм формування частинок у вихідному каналі реакції та оцінити можливість реалізації експериментального вимірювання перерізу даної реакції.

Уперше виміряно значення перерізу для ядерної реакції $^{162}\text{Er}(n, p)^{162(m+g)\text{Ho}}$ при енергії налітаючих нейтронів 14,6 МеВ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Koning A.J., Blomgren J.* Nuclear data for sustainable nuclear energy // JRC Scientific and Tech. Rep. - 2009. - Vol. EUR23977EN.
2. Cross section information storage and retrieval system (EXFOR) II National Nuclear Data Center (NNDC) // Brookhaven National Laboratory, USA. - <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor00.htm> (online).
3. *Forrest R. A.* Data requirements for neutron activation Part I: Decay data // Fusion Engineering and Design. - 2006. - Vol. 81. - P. 2143 - 2156.
4. *S.-Y. Oh, Ch.-S. Cil* // Journal of the Korean Nuclear Society - 2001. - Vol. 33, No. 1. - P. 46 - 61.
5. *Фридман С. Р., Рисованый В. Д., Захаров А. В., Топорова В. Г.* Радиационная стойкость ПЭЛ ПС СУЗ реакторов ВВЭР-1000 с карбидом бора // Вопросы атомной науки и техники. - 2001. - № 2. - С. 84 - 90.
6. *Кузнецов Р.А.* Активационный анализ. - М.: Атомиздат, 1974. - 344 с.
7. *Применко Г.И., Майданюк В.К., Неплюев В.М. и др.* Генератор 14 МэВ нейтронов с потоком $5 \cdot 10^{11} \text{ c}^{-1}$ // Приборы и техника эксперимента. - 1989. - № 6. - С. 39 - 41.
8. *Самчук А.І.* Хімічний аналіз порід та мінералів / Інститут геохімії мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка, відділ геохімії техногенних металів та рудоутворення. - К., 2010.
9. *Briesmeister J.F.* MCNP - a general Monte Carlo N-particle transport code. Los Alamos National Laboratory Report. - 1997. - Vol. LA-12625-M.
10. *Дзисюк Н.Р.* Перерізи ядерних реакцій (n, x) на ізотопах германію, тербію та лютецію при енергіях нейтронів в околі 14 МеВ: Дис. ... канд. фіз.-мат. наук / Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна. - Х., 2008.
11. *Kawade K., Sakane H., Kasugai Y. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. - 2003. - Vol. A496. - P. 183 - 197.
12. *Software:* Janis 3.0, Java-based nuclear data display program, OECD Nuclear Energy Agency. - France, 2007.
13. *Software:* DROSG, web-site: <http://www-nds.iaea.org/ndspub/libraries/larelkin/larelkin.pdf>.
14. *Agrawal H.M., Pepelnik R.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. - 1995. - Vol. A366 - P. 349.
15. *Filatenkov A.A., Chuvaev S.V.* Khlopin Radium Institute // Leningrad Reports - 2001. - No. 258.
16. *Berlizov A., Danilenko M., Kazimirov A., Solovyova S.* // At. Energy. - 2006. - P. 382.
17. *Tuli J.K.* Evaluated Nuclear Structure Data File // A Manual for Preparation of Data Sets, Brookhaven National Laboratory. - 1987. - BNL-NCS-51655-Rev. 87.
18. *Koning A.J., Hilaire S., Duijvestijn M.C.* TALYS-1.2 A nuclear reaction program // User manual. - 2009. - 379 p.
19. *Qaim S.M.* Nucl. Phys. - 1974. - Vol. A224. - P. 319.
20. *Bari A.* // Dissertation Abstracts B (Sciences). - 1972. - Vol. 32. - P. 5091.
21. *Oms L.A., Polm J.M.* // Bull. Am. Phys. Soc. - 1968. - Vol. (CA9), No. 13. - P. 1699.
22. http://profbeckman.narod.ru/RH0.files/4_4_2.pdf
23. *Koning A. J., Delaroche J. P.* // Nucl. Phys. - 2003. - Vol. A713. - P. 231.

Н. Р. Дзисюк, А. А. Каденко, И. Н. Каденко, Г. И. Применко

СЕЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ (n, x) НА ИЗОТОПАХ ДИСПРОЗИЯ И ЭРБИЯ

Представлены результаты экспериментального определения сечений ядерных реакций $^{162,163}\text{Dy}(n, x)^{162}\text{Tb}$, $^{163,164}\text{Dy}(n, x)^{163}\text{Tb}$, $^{156}\text{Dy}(n, 2n)^{155}\text{Dy}$, $^{158}\text{Dy}(n, 2n)^{157(m+g)}\text{Dy}$, $^{166,167}\text{Er}(n, x)^{166g}\text{Ho}$ и $^{170}\text{Er}(n, p)^{170g}\text{Ho}$ при энергии нейтронов $(14,6 \pm 0,2)$ МэВ. Измерение сечений проведено с использованием нейтронно-активационного метода. Образцы диспрозия и эрбия естественного изотопного состава облучались (d-t) нейтронами. Аппаратурные спектры гамма-излучения продуктов активации измерялись на спектрометре с HPGe детектором. При обработке экспериментальных данных учтены нестационарность нейтронного потока, реальная геометрия эксперимента, эффекты каскадного суммирования, поглощение гамма-квантов в образцах. Впервые измерено значение сечения ядерной реакции $^{162}\text{Er}(n, p)^{162(m+g)}\text{Ho}$. Теоретический расчет функций возбуждения исследуемых ядерных реакций выполнен с использованием кода TALYS-1.2.

Ключевые слова: сечение реакции, нейтронно-активационный метод, функция возбуждения.

N. R. Dzysiuk, A. O. Kadenko, I. M. Kadenko, G. I. Primenko

NUCLEAR (n, x) REACTIONS CROSS SECTIONS ON DYSPROSIUM AND ERBIUM ISOTOPES

Cross sections of nuclear reactions $^{162,163}\text{Dy}(n, x)^{162}\text{Tb}$, $^{163,164}\text{Dy}(n, x)^{163}\text{Tb}$, $^{156}\text{Dy}(n, 2n)^{155}\text{Dy}$, $^{158}\text{Dy}(n, 2n)^{157(m+g)}\text{Dy}$, $^{166,167}\text{Er}(n, x)^{166g}\text{Ho}$, $^{170}\text{Er}(n, p)^{170g}\text{Ho}$ were measured and presented for incident neutron energy (14.6 ± 0.2) MeV. The measurements were undertaken with neutron-activation technique. Samples of natural composition of above mentioned elements were irradiated with (d-t) neutrons. Instrumental gamma-ray spectra of induced activities were measured using HPGe detectors. The main sources of uncertainties for cross section values were considered and taken into account. Measured cross section for $^{162}\text{Er}(n, p)^{162(m+g)}\text{Ho}$ nuclear reaction is considered as original data. Theoretical calculations of excitation functions for all reactions in specified energy range were performed with TALYS-1.2 code.

Keywords: cross section, activation technique, excitation function.

Надійшла до редакції 24.02.11,
після доопрацювання - 01.06.11.