

ВИВЧЕННЯ (γ, p)-РЕАКЦІЇ НА ІЗОТОПАХ ТИТАНУ

В. О. Желтоножський¹, А. М. Саврасов¹, Л. В. Садовніков¹, П. С. Деречкей²

¹Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

²Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород

Мало інформації існує щодо фотоядерних реакцій на легких ядрах з вильотом протонів, хоча вони мають підвищену селективність щодо структури збуджених і кінцевих станів [1]. Основною причиною цього є кулонівський бар'єр, який знижує їх переріз, але не так значно, як у важких та середніх ядрах. Тому роль статистичного механізму, внесок якого незначний для важких та середніх ядер, може зростати. Отже експериментальне вивчення даних реакцій та порівняння з теоретичними даними дозволить пролити світло на механізми їх перебігу та оцінити співвідношення між ними. Виходячи з вищевикладеного метою даної роботи є дослідження виходів напрацювання ядер $^{46}\text{Sc}^{m+g}$, ^{47}Sc та ^{48}Sc в (γ, p)-реакції на ядрах титану при опроміненні мішені з природного металічного титану гамма-квантами з граничною енергією ($E_{\text{гр}}$) 19 МеВ.

Вивчення середньозважених виходів проводилось активаційним методом на гальмівному γ -пучку мікротрону М-30 [2]. В якості моніторингових мішеней використовувались зразки природного металічного танталу та золота. До них додавалась мішень металічного титану. В якості гальмівної мішені використовувався металічний тантал товщиною 1.05 мм, за яким на відстані 10 см розміщувались досліджувані мішені. Тантал та золото використовувались для отримання потоку гальмівних γ -квантів за допомогою реакцій $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ та $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$, відповідно. Виконувалось декілька серій опромінь та вимірювань в низькофоновій спектрометричній лабораторії.

Спектри опромінених мішеней вимірювались на двох гамма-спектрометрах, зібраних на базі надчистих напівпровідникових детекторів фірм Canberra та Ortec з ефективністю реєстрації 15 та 40 % порівняно з NaI(Tl)-детектором розмірами 3'' \times 3'' та блоків електроніки цих же фірм. Енергетична роздільна здатність обох спектрометрів складала 1,9 кеВ на γ -лініях 1173 та 1332 кеВ з розпаду ^{60}Co .

В γ -спектрах, обробка яких проводилась за допомогою програми Winspectrum [3] γ -переходи, які супроводжують розпад $^{46}\text{Sc}^{m+g}$, ^{47}Sc , ^{48}Sc , ^{196}Au та ^{180}Ta спостерігаються з достатньою статистичною точністю. Зокрема на рис. 1 показано фрагменти γ -спектру опроміненої мішені титану.

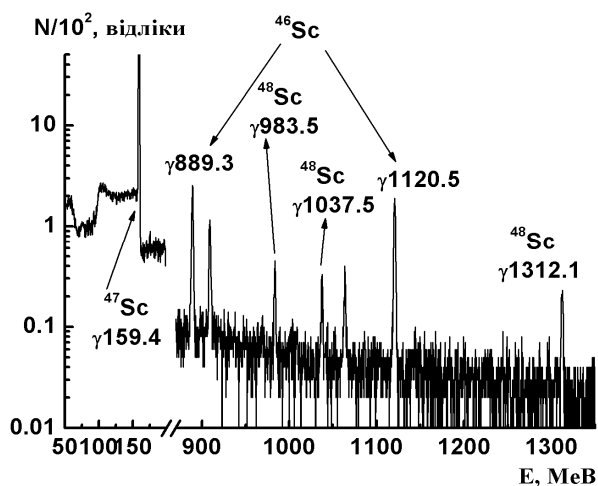


Рис. 1. Фрагмент γ -спектру активованої мішені металічного титану природного ізотопного складу. Його маса складала 0,6 г. Тривалість опромінення складала 3 години, період витримки 8 діб, тривалість вимірювання 12 годин.

Моделювання гальмівного спектру проводилось в рамках програмного коду GEANT4 [4]. Враховувалась реальна геометрія гальмівної та експериментальних мішеней. При вимірюванні наведеної активності мішеней коефіцієнти самопоглинання γ -квантів, які відповідають розпадам досліджуваних нуклідів розраховувались в рамках програмного коду MCNP [5].

Використовуючи стандартні формули активаційного аналізу [6] були розраховані експериментальні значення середньозважених виходів досліджуваних реакцій $\langle Y \rangle_{\text{exp}}$, які наведені в таблиці 1.

З метою порівняння експериментальних та теоретичних даних, було проведено моделювання досліджуваних реакцій в рамках програмного коду TALYS-1.96 [7]. Розраховані теоретичні виходи ($\langle Y \rangle_{\text{stat}}^{\text{theor}}$) також показані в таблиці 1 разом із енергетичними бар'єрами зазначених реакцій (Q).

Таблиця 1. Середньозважені виходи (γ, p)-реакцій на ядрах титану

Реакція	Q, MeB	$\langle Y \rangle$, мбн		
		$\langle Y \rangle_{\text{exp}}$	$\langle Y \rangle_{\text{stat}}^{\text{theor}}$	$\langle Y \rangle_{\text{exp}}^{\text{other}}$
$^{49}\text{Ti}(\gamma, p)^{48}\text{Sc}$	11,4	0,49(6)	0,310(15)	0,570(28) [8]
$^{48}\text{Ti}(\gamma, p)^{47}\text{Sc}$	11,4	1,70(14)	0,70(4)	1,48(8) [8]
$^{47}\text{Ti}(\gamma, p)^{46}\text{Sc}^{\text{m+g}}$	10,5	3,8(3)	0,92(5)	2,60(13) [8]

Використовуючи експериментальні перерізи досліджуваних реакцій для монохроматичних γ -квантів з роботи [8] та наш гальмівний спектр були отримані середньозважені виходи $\langle Y \rangle_{\text{exp}}^{\text{other}}$, які також наведені в таблиці.

Для середньозважених виходів, які розраховувались за даними коду TALYS-1.96 ($\langle Y \rangle_{\text{stat}}^{\text{theor}}$) похибка складається лише з похибки моделювання гальмівного спектру в кодї GEANT4, яка знаходиться в межах 5 % для даних граничних енергій гальмівних гамма-квантів, оскільки теоретичні виходи розраховуються як згортка модельованого гальмівного γ -спектру з теоретичними перерізами для монохроматичних гамма-квантів з кроком 1 MeB. Таку ж невизначеність ми залишили й для $\langle Y \rangle_{\text{exp}}^{\text{other}}$, оскільки в роботі [8] похибка експериментальних перерізів не оцінена.

Похибка потоку гальмівних γ -квантів при розрахунку експериментальних середньозважених виходів ($\langle Y \rangle_{\text{exp}}$) знаходиться в межах 7 %. В нашому випадку похибки визначення квантових виходів склали менше 1 %, оскільки ми використовували найбільш інтенсивні γ -лінії. Статистична похибка визначення площ піків переважно домінувала в загальній невизначеності лише для реакції $^{49}\text{Ti}(\gamma, p)^{48}\text{Sc}$ (біля 9%). Для інших реакцій вона перебувала в межах 1-3 %. Загальна похибка визначення ефективностей реєстрації коливалася в межах 2-3%, оскільки проводяться відносні вимірювання. Тому загальна похибка експериментальних середньозважених виходів знаходилась в межах 8-12 %.

Середньозважені виходи усіх (γ, p)-реакцій виміряні нами вперше при даній граничній енергії гальмівних γ -квантів. Причому для реакції $^{49}\text{Ti}(\gamma, p)^{48}\text{Sc}$ домінує статистичний механізм, в той час як для інших реакцій середньозважені виходи значно вищі теоретичних даних. Це свідчить про нестатистичний характер перебігу даних реакцій. Можливий значний внесок прямих та напівпрямих механізмів.

1. A. Zilges et al. Prog. Part. Nucl. Phys. 122 (2022) 103903.
2. M.I. Romanyuk et al. VANT 3(139) (2022) 137.
3. N.V. Strilchuk The WinSpectrum manual (2000).
4. S. Agstinelli et al. Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res A 506 (2003) 250.
5. J.F. Briesmeister, MCNP—A General Monte Carlo *N*-Particle Transport Code, Los Alamos National Laboratory Report LA-12625-M, 989, 1997.
6. V.A. Zheltonozhsky et al. Eur. Phys. Jour. A 57 (2021) 121.
7. A.J. Koning, S. Hilaire and M. C. Duijvestijn TALYS: Comprehensive nuclear reaction modeling. In: AIP Conference Proceedings. Proc. of the Inter. Conf. on Nucl. Data for Science and Technology, Santa Fe, USA, 26 September-1 October, 2004 (Washington, 2005) p. 1154.
8. T.R. Sherwood and W.E. Turchinets Nucl. Phys. 29 (1962) 292.