

ДОСЛІДЖЕННЯ (γ, p) -РЕАКЦІЇ НА ІЗОТОПАХ ТЕЛУРУ

В. О. Желтоножський, А. М. Саврасов, Н. В. Куліч, О. А. Рокицький

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Фотоядерні реакції з вильотом протонів на сьогоднішній день слабодосліджені, хоча в них заселяються інші збуджені стани, в деяких випадках недоступні для (γ, γ') - і (γ, n) -реакцій. Основною причиною цього є високий кулонівський бар'єр, який значно знижує їх вихід. Тому вивчення даних реакцій дозволить пролити світло на механізми їх перебігу. Численні ізотопи телуру в цьому сенсі мають заряд, близький до магічного числа $Z=50$, а це може впливати на положення та ширину гігантського дипольного резонансу (ГДР) [1]. До того ж для фотоактиваційного аналізу потрібно знати виходи (γ, p) -реакцій, оскільки сучасні модельні коди дають занижені величини. Виходячи з вищевикладеного метою даної роботи є дослідження виходів напрацювання ядер $^{122}\text{Sb}^{m+g}$, $^{124}\text{Sb}^{m+g}$ та ^{127}Sb в (γ, p) -реакції на ядрах телуру при опроміненні мішеней з природного металічного телуру гальмівними гамма-квантами з енергією в області ГДР.

Дослідження середньозважених виходів проводилось активаційним методом на гальмівному γ -пучку для граничної енергії гальмівних γ -квантів ($E_{\text{гр}}$) 19 МеВ. В якості моніторних мішеней використовувались зразки природного металічного танталу та золота. До них додавались мішені металічного телуру. 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. Експериментальні перерізи даних реакцій добре відомі для монохроматичних γ -квантів в досліджуваному енергетичному діапазоні. Було проведено кілька серій опромінь та вимірювань в низькофоновій спектрометричній лабораторії.

Активовані мішені вимірювались на двох гамма-спектрометрах, зібраних на базі надчистих напівпровідникових детекторів фірм Canberra та Ortec з ефективністю реєстрації 15 % (у складі антикомптонівського спектрометру) та 40 %, порівняно з NaI(Tl)-детектором розмірами 3"×3" та блоків електроніки цих же фірм. Енергетична роздільна здатність спектрометрів склала 1,9 кеВ на γ -лініях 1173 та 1332 кеВ з розпаду ^{60}Co .

В γ -спектрах, обробка яких проводилась за допомогою програми Winspectrum [2] надійно виділені γ -переходи, які супроводжують розпад $^{122}\text{Sb}^{m+g}$, $^{124}\text{Sb}^{m+g}$, ^{127}Sb , ^{196}Au та ^{180}Ta . Зокрема на рис. 1,2 показано фрагменти γ -спектрів опроміненних мішеней телуру та танталу, відповідно.

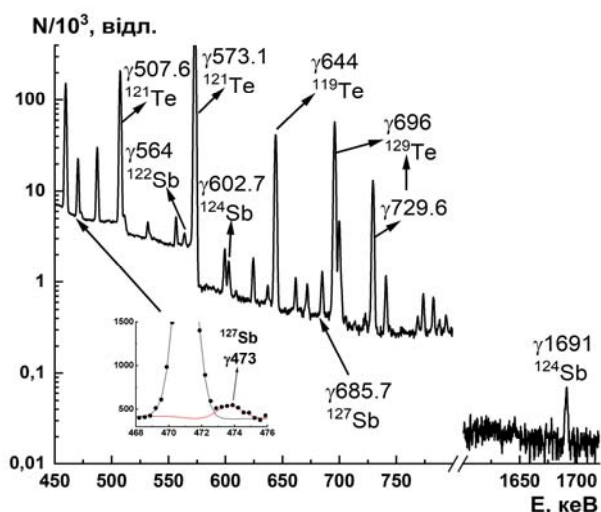


Рис. 1. Фрагмент γ -спектру активованої мішені металічного телуру природного ізотопного складу. Його маса склала 3,8 г. Тривалість опромінення склала 3 години, період витримки 1,2 доби, тривалість вимірювання біля 6 діб.

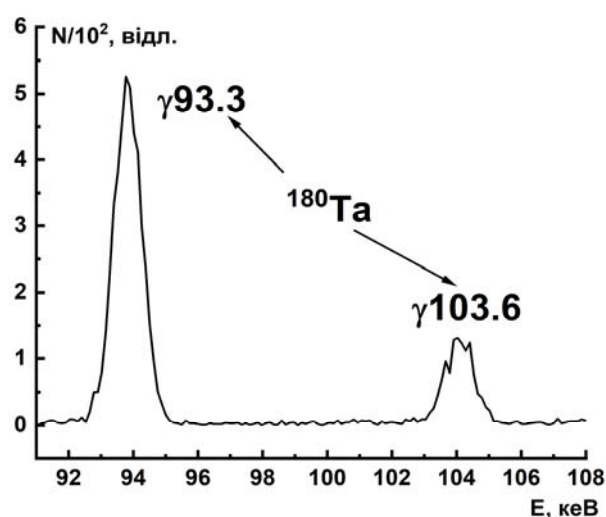


Рис. 2. Фрагмент γ -спектру активованої мішені металічного танталу природного ізотопного складу. Його маса склала 0,12 г. Тривалість опромінення склала 3 години, період витримки 1,2 доби, тривалість вимірювання біля 6 хвилин.

Моделювання гальмівного спектру проводилось в рамках програмного коду GEANT4 [3]. При

цьому враховувалась реальна геометрія гальмівної та збірки мішеней. В той же час при вимірюванні наведеної активності мішеней коефіцієнти самопоглинання γ -квантів, які відповідають розпадам досліджуваних ядер розраховувались в рамках програмного коду MCNP [4].

Використовуючи стандартні формули активаційного аналізу [5] були розраховані експериментальні значення середньозважених виходів досліджуваних реакцій $\langle Y \rangle_{\text{exp}}$, які наведені в таблиці 1.

Було проведено моделювання досліджуваних реакцій в рамках програмного коду TALYS-1.96 [6]. 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 телуру

Реакція	Q, MeV	$\langle Y \rangle$, мкбн	
		$\langle Y \rangle_{\text{exp}}$	$\langle Y \rangle_{\text{stat}}^{\text{theor}}$
$^{123}\text{Te}(\gamma, p)^{122}\text{Sb}^{m+g}$	8,1	100,2(80)	60,0(30)
$^{125}\text{Te}(\gamma, p)^{124}\text{Sb}^{m+g}$	8,7	95,5(80)	22,6(12)
$^{128}\text{Te}(\gamma, p)^{127}\text{Sb}$	9,6	8,4(7)	2,50(13)

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 коді 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 MeV.

Похибка потоку гальмівних γ -квантів при розрахунку експериментальних середньозважених виходів ($\langle Y \rangle_{\text{exp}}$) знаходилася в межах 7 % та домінувала у загальній невизначеності. В нашому випадку похибки визначення квантових виходів складала менше 1 %, оскільки ми використовували найбільш інтенсивні γ -лінії, статистична похибка визначення площ піків перебувала в межах 2-6 %. Загальна похибка визначення ефективностей реєстрації коливалася в межах 2-3%, оскільки проводяться відносні вимірювання. Тому загальна похибка експериментальних середньозважених виходів знаходилася в межах 8-10 %.

Як видно з таблиці 1 середньозважені виходи усіх (γ, p)-реакцій, які виміряні нами вперше значно вищі теоретичних даних. Це свідчить про нестатистичний характер перебігу даних реакцій. Можливий значний внесок прямих та напівпрямих механізмів.

1. C. Sen et al. Phys. Lett. B868 (2025) 139652.
2. N.V. Strilchuk The WinSpectrum manual (2000).
3. S. Agostinelli et al. Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res A 506 (2003) 250.
4. J.F. Briesmeister, MCNP—A General Monte Carlo *N*-Particle Transport Code, Los Alamos National Laboratory Report LA-12625-M, 989, 1997.
5. V.A. Zheltonozhsky et al. Eur. Phys. Jour. A 57 (2021) 121.
6. 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.