



Ідентифікатор подання: 35

Тип: Секційна доповідь

## Дослідження збудження $^{67}\text{Cu}$ в $(\gamma, p)$ -реакції

середа, 28 травня 2025 р. 15:55 (20 хвилин)

$^{67}\text{Cu}$  є важливим радіонуклідом у ядерній медицині і є надзвичайно ефективним при терапії раку. Його ефективність в сотні разів перевищує усі відомі на сьогоднішній день способи радіотерапевтичного лікування раку внаслідок зручного періоду напіврозпаду ( $T_{1/2}=61.8$  год.) та випромінювання низькоенергетичних електронів. Ядра  $^{67}\text{Zn}$ , на який розпадається  $^{67}\text{Cu}$  швидко виводяться з організму з сечовиною. Оскільки природню суміш міді складають два ізотопи  $^{63}\text{Cu}$  та  $^{65}\text{Cu}$  то даний радіонуклід неможливо отримати безпосередньо в  $(n, \gamma)$ -реакції на теплових нейтронах. Основним способом отримання  $^{67}\text{Cu}$  на сьогоднішній день є опромінення оксиду цинку збагаченого  $^{68}\text{Zn}$  та  $^{70}\text{Zn}$  протонами на лінійних та циклічних прискорювачах. В той же час залишається актуальним завдання пошуку реакцій, які призводять до напрацювання  $^{67}\text{Cu}$ . Виходячи з вищевикладеного метою даної роботи є дослідження виходів напрацювання ядер  $^{67}\text{Cu}$  в  $(\gamma, p)$ -реакції при опроміненні мішеней бетону зі значним вмістом цинку гальмівними гамма-квантами з енергією в області гігантського дипольного резонансу (ГДР). Дана реакція досліджувалась для гальмівних  $\gamma$ -квантів з граничною енергією вищою 30 МеВ (див. роботу [1] та посилання в ній).

Дослідження середньозважених виходів проводилось з використанням активаційного методу на гальмівному  $\gamma$ -пучку мікротрона М-30 для граничних енергій гальмівних  $\gamma$ -квантів ( $E_{\text{gr}}$ ) 17.5 та 19.5 МеВ. Для обох  $E_{\text{gr}}$  в якості моніторних мішеней використовувались зразки природного металічного танталу та золота. До них додавалась мішень порошкоподібного бетону. В якості гальмівної мішені використовувалась металічний тантал товщиною 1.05 мм, за яким на відстанях 8-42 см розміщувались досліджувані мішені. Тантал та золото використовувались для отримання потоку гальмівних  $\gamma$ -квантів за допомогою реакцій  $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$  та  $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$ , експериментальні перерізи яких реакції добре відомі для монохроматичних  $\gamma$ -квантів в досліджуваному енергетичному діапазоні. Виконувалось декілька серій опромінь та вимірювань в низькофоновій спектрометричній лабораторії.

Спектри опромінених мішеней вимірювались на двох гамма-спектрометрах, зібраних на базі HPGe-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 спектрометрів складала 1.9 кеВ на  $\gamma$ -лінії 1332 кеВ, яка спроводжує розпад  $^{60}\text{Co}$ .

В  $\gamma$ -спектрах, обробка яких проводилась за допомогою програми Winspectrum [2] з високою статистичною точністю виділені  $\gamma$ -переходи, які супроводжують розпад  $^{65}\text{Zn}$  та  $^{67}\text{Cu}$ . Зокрема на рис. 1 по-казано фрагмент  $\gamma$ -спектру опроміненої мішені подрібненого бетону при  $E_{\text{gr}} = 17.5$  МеВ.

Рис. 1. Фрагмент  $\gamma$ -спектру активованої мішені подрібненого бетону при  $E_{\text{gr}} = 17.5$  МеВ. Його маса складала 7,5 г. Тривалість опромінення 2 го-дини, тривалість витримки 50 годин, час вимірювання 19 годин.

Моделювання гальмівного спектру проводилось в рамках програмного коду Geant4 [3]. Враховувалась реальна геометрія гальмівної та експериментальних мішеней. Даний код враховує поглинання гальмівного пучка в усіх мішенях зі збірки, яка опромінювалася. В той же час при вимірюванні наведеної активності мішеней коефіцієнти самопоглинання  $\gamma$ -квантів, які відповідають розпадам досліджуваних нуклідів розраховувались в рамках програмного коду MCNP [4].

Використовуючи стандартні формули активаційного аналізу [5], оскільки ми не знаємо вміст цинку в бетоні були розраховані експериментальні значення відношень середньозважених виходів реакцій  $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$  до  $^{66}\text{Zn}(\gamma, n)^{65}\text{Zn}$ . Після цього дані відношення були перераховані з врахуванням вмісту  $^{68}\text{Zn}$  в природній ізотопній суміші і отримані відношення  $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$  до  $^{68}\text{Zn}(\gamma, n)^{67}\text{Zn}$ .

Було проведено моделювання досліджуваних реакцій в рамках програмного коду TALYS-1.96 [6]. Розраховані теоретичні середньозважені виходи реакцій  $^{66}\text{Zn}(\gamma, n)^{65}\text{Zn}$  та  $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Zn}$  узгоджуються з експериментальними даними роботи [7]. Враховуючи результати моделювання та отримані відношення були розраховані середньозважені виходи реакції  $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$ , які склали 250(15) мкб та 650(46) мкб при  $E_{\text{gr}} = 17.5$  та 19.5 МеВ, відповідно.

Для середньозважених виходів, які розраховувались за даними коду TALYS-1.96 похибка складається лише з похибки моделювання гальмівного спектру в коді Geant4, яка знаходиться в межах 5 % для даних граничних енергій гальмівних гамма-квантів.

Оскільки проводились відносні вимірювання то похибка потоку гальмівних  $\gamma$ -квантів була відсутня. В нашому випадку похибки визначення квантових виходів склали менше 1 %, оскільки ми використовували найбільш інтенсивні  $\gamma$ -лінії, статистична похибка визначення площ піків перебувала в межах 1-2 %, Загальна похибка визначення ефективностей реєстрації коливалася в межах 2-3%, оскільки проводяться відносні вимірювання. Тому загальна похибка експериментальних середньозважених виходів знаходилась в межах 6-7 %, домінуючою при цьому є невизначеність теоретичного середньозваженого виходу реакції  $^{68}\text{Zn}(\gamma, n)^{67}\text{Zn}$ .

Середньозважений вихід реакції  $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$  виміряний нами вперше при даних граничних енергіях гальмівних гамма-квантів. Причому при  $E_{\gamma} = 19.5$  MeV він порівняний з перерізом, отриманим в роботі [1] при  $E_{\gamma} = 30$  MeV, і це дозволяє напрацьовувати значну кількість ядер  $^{67}\text{Cu}$  на відносно дешевого в експлуатації мікротроні M-30.

1. G.N. Hovhannisyany, T.M. Bakhshian and R.K. Dallakyan Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res B498 (2021) 48.
2. N.V. Strilchuk The WinSpectrum manual (2000).
3. S. Agstinelli 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. A57 (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, San-ta Fe, USA, 26 September-1 October, 2004 (Washington, 2005) p. 1154.
7. A.M.Goryachev, G.N.Zalesnyy Vopr. Teor. i Yad. Fiz. 8 (1982) 121.

**Authors:** Д-р. САВРАСОВ, Андрій (KINR); Проф. СЛІСЕНКО, Василь (KINR); Д-р. ЖЕЛТОНОЖСЬКИЙ, Віктор (KINR); Д-р. МИЗНИКОВ, Дмитро (KINR); Д-р. КУЛІЧ, Надія (KINR)

**Доповідач:** Д-р. САВРАСОВ, Андрій (KINR)

**Тип засідання:** Експериментальна ядерна фізика

**Класифікація за напрямком:** Експериментальна ядерна фізика