

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХОДУ ^{67}Cu В (γ, p) -РЕАКЦІЇ ПРИ ГРАНИЧНІЙ ЕНЕРГІЇ 19 МЕВ

В. О. Желтоножський, Д. Є. Мизніков, А. М. Саврасов, В. І. Слісенко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Домінуючою тенденцією в розвитку ядерної медицини є широке використання радіофармацевтичних препаратів, що містять радіоактивні метали. Розробка радіофармацевтичних препаратів, що поєднують діагностичні та терапевтичні функції в одному препараті є особливо актуальною. Такий підхід називається терагностикою. До цих радіонуклідів належить ^{67}Cu , який розпадається з випромінюванням γ -квантів, переважно з енергією 185 кеВ та електронів із середньою енергією 141 кеВ [1] і використовується при діагностиці та лікуванні раку.

Ефективність ядер ^{67}Cu є значною внаслідок зручного періоду напіврозпаду ($T_{1/2}=61,8$ год.) і сам препарат є відносно безпечним, оскільки ядра ^{67}Zn , на який розпадається ^{67}Cu швидко виводяться з організму з сечовиною. Основним способом отримання ^{67}Cu на сьогоднішній день є опромінення електролітично нанесеного цинку збагаченого ^{68}Zn та ^{70}Zn протонами на лінійних та циклічних прискорювачах в реакціях $^{70}\text{Zn}(p, \alpha)^{67}\text{Cu}$ та $^{68}\text{Zn}(p, 2p)^{67}\text{Cu}$. В той же час залишається актуальним завдання пошуку реакцій, які призводять до напрацювання ^{67}Cu , зокрема в (γ, p) -реакції. Дана реакція досліджувалась для гальмівних γ -квантів з граничною енергією вищою 30 МеВ (див. роботу [2] та посилання в ній) та в нашій попередній роботі при граничній енергії 17,5 та 19,5 МеВ [3]. При цьому, оскільки планується напрацювання на мішенях збагачених ^{68}Zn , особливо важливо знизити напрацювання ядер стабільної ^{65}Cu в (γ, t) -реакції, енергетичний поріг якої складає 17,6 МеВ, не втративши активність ^{67}Cu . Виходячи з вищевикладеного, метою даної роботи є дослідження виходів напрацювання ядер ^{67}Cu в (γ, p) -реакції при опроміненні мішеней металічного цинку природного ізотопного складу гальмівними гамма-квантами з граничною енергією 19.0 МеВ.

Дослідження середньозважених виходів проводилось з використанням активаційного методу на гальмівному γ -пучку мікротрона М-30 для граничної енергії гальмівних γ -квантів ($E_{\text{гр}}$) 19,0 МеВ. Для даної $E_{\text{гр}}$ в якості моніторних мішеней використовувались зразки природного металічного танталу та золота. До них додавалась мішень цинку. В якості гальмівної мішені використовувався металічний тантал товщиною 1.05 мм, за яким на відстані біля 8 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 $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$, експериментальні перерізи яких реакцій добре відомі для монохроматичних γ -квантів в досліджуваному енергетичному діапазоні. Виконувалось декілька серій опроміненнь 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"×3" та блоків електроніки цих же фірм. Енергетична роздільна здатність спектрометрів склала 1,9 кеВ на γ -лінії 1332 кеВ, яка супроводжує розпад ^{60}Co .

В γ -спектрах, обробка яких проводилась за допомогою програми Winspectrum [4] з високою статистичною точністю виділені γ -переходи, які супроводжують розпад ^{65}Zn та ^{67}Cu . Зокрема на рис. 1 показано фрагмент γ -спектру опроміненої мішені цинку при $E_{\text{гр}} = 19$ МеВ.

Моделювання гальмівного спектру, який наведений на рис. 2, проводилось в рамках програмного коду GEANT4 [5]. 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 γ -квантів, які відповідають розпадам досліджуваних нуклідів розраховувались в рамках програмного коду MCNP [6].

Використовуючи стандартні формули активаційного аналізу [7], був розрахований середньозважений вихід реакції $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$, який склав 624(50) мкбн.

Оскільки проводились відносні вимірювання то похибка потоку гальмівних γ -квантів була відсутня. В нашому випадку похибки визначення квантових виходів склали менше 1 %, оскільки ми використовувались найбільш інтенсивні γ -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 експериментального середньозваженого виходу знаходилась в межах 7-8 %, домінуючою при цьому є невизначеність середньозважених виходів моніторних реакцій $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ та $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$.

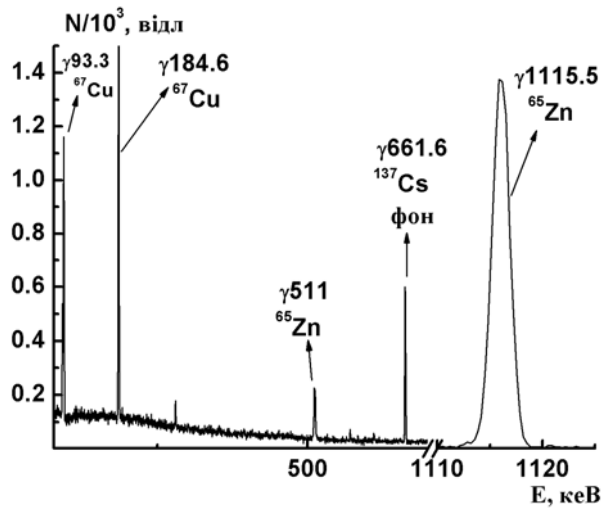


Рис. 1. Фрагмент γ -спектру активованої мішені металічного цинку природного ізотопного складу при $E_{\text{гр}} = 19$ МеВ. Його маса складала 0,55 г. Тривалість опромінення 3 години, тривалість витримки біля 7 діб, час вимірювання 22 години.

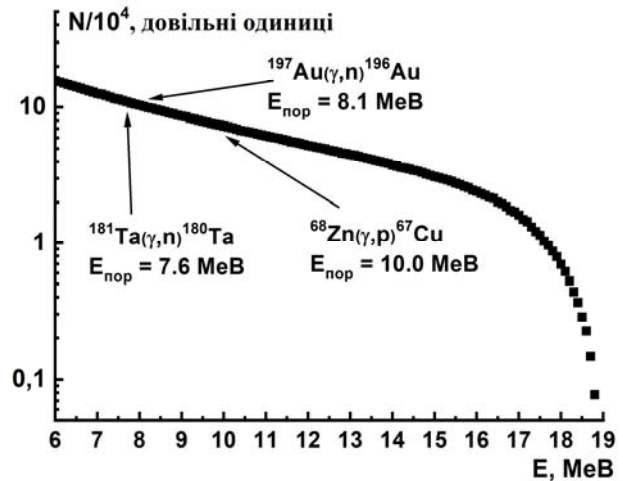


Рис. 2. Гальмівний спектр експериментальної збірки мішеней модельований при $E_{\text{гр}} = 19$ МеВ.

Середньозважений вихід реакції $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$ виміряний нами вперше при даній граничній енергії гальмівних гамма-квантів. При цьому він порівняний з перерізом, отриманим в роботі [1] при $E_{\text{гр}} = 30$ МеВ та дещо нижчий виходу, отриманого нами при $E_{\text{гр}} = 19,5$ МеВ [3], і це дозволяє напрацьовувати значну кількість ядер ^{67}Cu на відносно дешевому в експлуатації мікротроні М-30 також і при граничній енергії гальмівних γ -квантів 19 МеВ.

1. <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/decaysearchdirect.jsp?nuc=67Cu&unc=NDS>
2. G.N. Hovhannisyanyan, T.M. Bakhshian and R.K. Dallakyan Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res B498 (2021) 48.
3. V.A. Zheltonozhsky et al. Rad. Phys. Chem. 241 (2026) 113533.
4. N.V. Strilchuk The WinSpectrum manual (2000).
5. S. Agostinelli et al. Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res A 506 (2003) 250.
6. J.F. Briesmeister, MCNP—A General Monte Carlo N -Particle Transport Code, Los Alamos National Laboratory Report LA-12625-M, 989, 1997.
7. V.A. Zheltonozhsky et al. Eur. Phys. Jour. A57 (2021) 121.