

ПОШУК АЛЬФА ТА ПОДВІЙНОГО АЛЬФА-РОЗПАДУ НУКЛІДІВ З ПРИРОДНИХ РАДІОАКТИВНИХ РЯДІВ ТА ЛЮТЕЦІЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРІЇ

І. С. Ключев¹, П. Беллі², Р. Бернабей², Ф. А. Даневич^{1,2,3}, В. Ю. Денисов¹, С. С. Драпей¹, А. Інчіккітті⁴, Ф. Каппелла^{4,5}, В. Караччіоло², Д. В. Касперович¹, В. Р. Клавдієнко¹, В. В. Кобичев¹, В. І. Киришук¹, М. Лаубенштайн⁶, А. Леончіні², В. Мерло², С. Нісі⁶, В. І. Третяк^{1,3,6}, Ф. Ферелла⁶, Р. Черуллі²

¹Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

²Національний інститут ядерної фізики, секція у Римі "Тор Вергата", Рим, Італія

³Інститут експериментальної та прикладної фізики, Чеський технічний університет у Празі, Прага, Республіка Чехія

⁴Національний інститут ядерної фізики, секція у Римі, Рим, Італія

⁵Римський університет "Ла Сапієнца", Рим, Італія

⁶Національний інститут ядерної фізики, Національна лабораторія Гран-Сассо, Ассерджі, Італія

Подвійний альфа-розпад (2α) є надзвичайно рідкісним каналом радіоактивних перетворень, у якому материнське ядро випромінює дві α -частинки в процесі єдиного корельованого процесу. На відміну від двох послідовних α -розпадів, цей механізм розглядається як самостійний вид ядерного розпаду. Його можливість була вперше обґрунтована в теоретичних дослідженнях 1980-х років, тоді як сучасний інтерес істотно посилюється після роботи [1], де було наведено оцінки парціальних періодів напіврозпаду, встановлено експериментальне обмеження на 2α -розпад ^{209}Bi , та запропоновано потенційні експериментальні підходи до пошуку цього виду розпаду. На сьогодні подвійний α -розпад не має експериментального підтвердження, водночас для низки нуклідів встановлено нижні межі на парціальні періоди напіврозпаду в наших роботах [1-3]. Експериментальні пошуки 2α -розпаду ведуться і іншими групами, зокрема в ЦЕРН [4]. Теоретичні оцінки періодів напіврозпаду деяких радіоактивних нуклідів в рамках симетричної моделі процесу є доволі оптимістичними [5], що дає надію на його реєстрацію. У даній роботі пошук 2α -розпаду виконано методом низькофонової γ -спектрометрії з використанням германієвих детекторів. Аналіз проведено для двох незалежних експериментальних підходів: вимірювання зразка оксиду урану (U_3O_8) та сцинтиляційного кристалу GAGG:Ce ($\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}(\text{Ce})$).

У випадку уранового зразка використовувався U_3O_8 із відомим ізотопним складом, вимірювання велися протягом 46.3 днів за допомогою широкодіапазонного напівпровідникового германієвого (BEGe) детектора. Калібрування енергетичної шкали спектрометра виконувалось за відомими γ -лініями нуклідів природних радіоактивних рядів, а піки апроксимувалися модифікованими функціями Гаусса з урахуванням асиметрії. Ефективність реєстрації γ -квантів визначалася експериментально за γ -піками, присутніми у даних та за допомогою Монте-Карло моделювання з використанням програмного пакета Simourg 1.5.0 [6], що функціонує як оболонка над пакетом симуляцій GEANT4 [7,8].

Методика пошуку ґрунтується на аналізі γ -піків дочірніх радіонуклідів, що утворюються внаслідок β -розпадів після шуканого 2α -переходу. Для кожного очікуваного піку від γ -переходу виконувалась апроксимація та ставилось обмеження на площу піка. На цій основі встановлювались нижні межі на парціальні періоди напіврозпаду.

Для кристалу GAGG:Ce вимірювання виконано в підземній лабораторії Гран-Сассо (Італія) з використанням BEGe детектора. Аналіз включав пошук γ -піків, що можуть відповідати розпадам дочірніх ядер після 2α -процесів у нуклідах уран-торієвих рядів, а також у $^{175,176}\text{Lu}$, присутніх як домішки. Моделювання ефективності реєстрації здійснювалося методом Монте-Карло з використанням Simourg 1.5.0, а верифікація — за γ -лініями ^{176}Lu .

У результаті аналізу експериментальних спектрів не виявлено піків, які могли б бути інтерпретовані як прояви подвійного α -розпаду. На цій основі встановлено нижні межі на парціальні періоди напіврозпаду. Для нуклідів уран-торієвих рядів обмеження мають значення $T_{1/2} \gtrsim 10^4$ хв -10^{14} років, тоді як для $^{175,176}\text{Lu}$ — на рівні $T_{1/2} \gtrsim 10^{12}-10^{13}$ років з довірчою ймовірністю (Д.Й.) 90%. Зокрема, з аналізу спектру GAGG отримано обмеження на 2α -розпад $^{175,176}\text{Lu}$ відповідно $T_{1/2} > 3,9 \times 10^{13}$ років та $T_{1/2} > 4,9 \times 10^{12}$ років (90% Д.Й.), а зі спектру оксиду-урану найкращі обмеження для нуклідів $^{238,235}\text{U}$ $T_{1/2} > 6,1 \times 10^{13}$ та $T_{1/2} > 2,9 \times 10^{14}$ років (усі обмеження оцінені з 90% Д.Й.). Також було оцінено нижні межі на парціальні періоди напіврозпаду по каналу альфа розпаду. Повний перелік отриманих результатів наведено в таблиці 1.

Розпад	Мода розпаду	$T_{1/2}$ материнського нукліду	$\lim T_{1/2(\alpha, 2\alpha)}$	Обмеження на відносну імовірність розпаду
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Ac}$	2α	$4,46 \times 10^9$ р	$6,1 \times 10^{13}$ р	$7,37 \times 10^{-5}$
$^{234}\text{Th} \rightarrow ^{230}\text{Ac}$	α	24,11 д	895,0 р	$7,37 \times 10^{-5}$
$^{234}\text{Th} \rightarrow ^{226}\text{Fr}$	2α	24,11 д	665,9 р	$9,91 \times 10^{-5}$
$^{234\text{m}}\text{Pa} \rightarrow ^{230}\text{Ac}$	α	1,16 хв	10,9 д	$7,37 \times 10^{-5}$
$^{234\text{m}}\text{Pa} \rightarrow ^{226}\text{Fr}$	2α	1,16 хв	8,1 д	$9,91 \times 10^{-5}$
$^{214}\text{Pb} \rightarrow ^{206}\text{Au}$	2α	27,06 хв	50,1 д	$3,75 \times 10^{-4}$
$^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{206}\text{Au}$	2α	19,71 хв	36,5 д	$3,75 \times 10^{-4}$
$^{235}\text{U} \rightarrow ^{227}\text{Ra}$	2α	$7,04 \times 10^8$ р	$2,9 \times 10^{14}$ р	$2,44 \times 10^{-6}$
$^{231}\text{Th} \rightarrow ^{227}\text{Ra}$	α	25,52 год	1193,6 р	$2,44 \times 10^{-6}$
$^{231}\text{Th} \rightarrow ^{223}\text{Rn}$	2α	25,52 год	132,5 р	$2,02 \times 10^{-5}$
$^{211}\text{Pb} \rightarrow ^{203}\text{Pt}$	2α	36,16 хв	7,4 д	$3,38 \times 10^{-3}$
$^{212}\text{Pb} \rightarrow ^{204}\text{Au}$	2α	10,63 год	200,0 д	$2,21 \times 10^{-3}$
$^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{204}\text{Au}$	2α	60,55 хв	19,0 д	$2,21 \times 10^{-3}$
$^{176}\text{Lu} \rightarrow ^{168}\text{Ho}$	2α	$3,71 \times 10^{10}$ р	$4,9 \times 10^{12}$ р	$7,70 \times 10^{-3}$
$^{176}\text{Lu} \rightarrow ^{172}\text{Tm}$	α	$3,71 \times 10^{10}$ р	$6,1 \times 10^{12}$ р	$6,15 \times 10^{-3}$
$^{175}\text{Lu} \rightarrow ^{167}\text{Ho}$	2α	-	$3,9 \times 10^{13}$	-

Табл.1 Обмеження на парціальні періоди напіврозпаду нуклідів з уран-торієвих рядів та нуклідів лютецію по α та 2α каналам (обмеження оцінені з 90% Д.Й.)

Отримані результати демонструють, що γ -спектрометрія є доволі чутливим методом для пошуку рідкісних каналів розпаду, однак її чутливість залишається недостатньою. Це визначає необхідність подальшого вдосконалення методики експерименту, зокрема використання детекторів більшого розміру, а також використанням зразків з більшою активністю нуклідів, що представляють інтерес.

1. V.I. Tretyak. Nucl. Phys. At. Energy 22(2) (2021) 121.
2. P. Belli et al. Eur. Phys. J. A 60 (2024) 46.
3. P. Belli et al. Eur. Phys. J. A 60 (2024) 150.
4. C. Theisen, E. Khan. CERN-INTC-2021-054, INTC-P-616 (2021).
5. V.Yu. Denisov. Phys. Lett. B 835 (2022) 137569.
6. V.V. Kobychев. Nucl. Phys. At. Energy 12(3) (2011) 301.
7. J. Allison et al. IEEE Trans. Nucl. Sci. 53 (2006) 270.
8. S. Agostinelli et al. Nucl. Instrum. Methods A 506 (2003) 250.