

Голові разової спеціалізованої вченої  
ради Інституту ядерних досліджень  
НАН України  
*д.ф.-м.н., провідн.н.с. відділу  
структури ядра*  
Віктору Олександровичу  
**ЖЕЛТОНОЖСЬКОМУ**

## РЕЦЕНЗІЯ

*д.ф.-м.н., с.н.с., зав. відділу фізики важких іонів  
Інституту ядерних досліджень НАН України  
Понкратенка Олега Анатолійовича*  
на дисертацію *Клавдієнка Володимира Руслановича*  
на тему: “*Подвійний бета-розпад ядра  $^{106}\text{Cd}$* ”,  
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
у галузі знань “10 Природничі науки”  
за спеціальністю “104 Фізика та астрономія”

**Актуальність** обраної теми дисертаційної роботи стосується сучасних досліджень у фізиці елементарних досліджень без прискорювачів. Дисертаційна робота належить до сфери ядерної фізики та присвячена дослідженню процесів подвійного бета-розпаду ( $2\beta$ -розпад) ядра  $^{106}\text{Cd}$  та бета-розпаду ядра  $^{50}\text{V}$ . В роботі досліджено різні канали і моди  $2\beta$ -розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  та визначено обмеження на період напіврозпаду цього ядра. Також вивчено схему розпаду ядра  $^{50}\text{V}$  та отримано результати щодо його періоду напіврозпаду по двох каналах розпаду. Робота також містить аналіз експериментальних даних, визначення відгуків детекторної системи на основі моделювання, апроксимацію енергетичних спектрів та оцінку радіоактивної забрудненості компонентів детекторної установки.

Подвійний бета-розпад є найрідкіснішим процесом у ядерній фізиці, що вимагає високо чутливих детекторів та точних методів аналізу даних. Вивчення цього процесу має велике наукове значення, оскільки воно дозволяє вивчити фундаментальні властивості ядерних процесів та призвести до виявлення нових фізичних явищ та взаємодій, які не враховані в поточних теоретичних моделях. Крім того, даний процес може дозволити визначити природу елементарної частинки нейтрино (чи є вона частинкою Дірака, чи частинкою Майорани) а також визначити майоранівську масу нейтрино та структура масових станів нейтрино. Також дослідження  $2\beta$ -розпаду може допомогти перевірити закон збереження лептонного числа, що має важливе значення для космології, оскільки впливає на еволюцію Всесвіту.

## **Структури дисертації.**

Дисертація написана на 135 сторінка, складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків. Містить 14 таблиць, 40 рисунків, 2 додатки та список використаних джерел зі 197 посилань.

У **вступі** викладено обґрунтування вибору теми дослідження, мета і завдання, методи дослідження, наукова новизна отриманих результатів, а також особистий внесок здобувача. Подано список наукових конференцій та шкіл-семінарів на яких було представлено результати наукової роботи, а також список наукових програм та грантів в рамках яких виконувалось дисертаційне дослідження.

У **першому розділі** представлено огляд літератури за темою дослідження. Викладено основні аспекти подвійного бета-розпаду ядер: коротка історична довідка, можливі канали й моди  $2\beta$ -розпаду, теоретичні та експериментальні аспекти даного дослідження. Подано залежність спектра випромінюваних електронів під час  $2\beta$ -розпаду в залежності від різних теоретичних моделей. Представлено теоретичні формули для оцінки періоду напіврозпаду відносно  $2\beta$ -розпаду, його залежності від ядерно-матричних елементів, аксіально векторної константи зв'язку слабкої взаємодії  $g_A$  та ефективної маси майоранівського нейтрино. Також подано експериментальні вимоги та представлені характеристики сучасних експериментів з пошуку  $2\beta$ -розпаду. Подано результати експериментів (геохімічних, радіохімічного, методом прямих вимірювання) та періоди напіврозпаду нуклідів у яких спостерігається  $2\beta$ -розпад. Показано характеристики майбутніх експериментів з пошуку безнейтринної моди  $2\beta$ -розпаду.

У **другому розділі** описано експериментальну установку з пошуку  $2\beta$ -розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  та її вдосконалення. Представлено методи обробки експериментальних даних, які були використані у даному дослідженні. Визначено стабільність детекторної системи, її часові та спектрометричні характеристики. Проведено порівняння експериментальних даних з Монте-Карло моделями, що дозволило уточнити енергетичні пороги та перевірити коректність роботи детекторної системи у режимі збігів. Проведено аналіз форм сцинтиляційних імпульсів та відокремлення подій від  $\alpha$ - та  $\gamma(\beta)$ -частинок. Визначено активність  $^{228}\text{Th}$  у кристалах  $^{106}\text{CdWO}_4$  та  $\text{CdWO}_4$  за допомогою часово-амплітудного аналізу. Проведено аналіз  $\alpha$ -спектрів, виміряних лічильниками  $\text{CdWO}_4$ . Побудовано модель фону та проведено апроксимацію енергетичних спектрів набраних детектором  $^{106}\text{CdWO}_4$  у антизбігах з лічильниками  $\text{CdWO}_4$  та у збігах з анігіляційними  $\gamma$ -квантами 511 кеВ принаймні в одному з лічильників  $\text{CdWO}_4$ . За результатами апроксимації було визначено радіоактивне забруднення матеріалів низькофонової установки до її вдосконалення.

У **третьому розділі** автор подає результати експерименту з пошуку  $2\beta$ -розпаду  $^{106}\text{Cd}$ . Визначено обмеження на період напіврозпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  відносно  $2\beta$ -процесів, показано спектри набрані експериментальною установкою після її вдосконалення. Також проведено апроксимацію енергетичних спектрів набраних різними детекторами у різних умовах відбору, що дозволило визначити радіоактивне забруднення матеріалів низькофонової установки після її вдосконалення. Визначено експериментальну чутливість до процесів  $2\nu\text{EC}\beta^+$ -,  $0\nu\text{EC}\beta^+$ -,  $0\nu2\beta^+$ - та  $0\nu2\text{EC}$ -розпаду у  $^{106}\text{Cd}$  після 649 днів набору даних.

**Четвертий розділ** дисертації присвячений дослідженню схеми розпаду ядра  $^{50}\text{V}$ , яке розпадається по каналах електронного поглинання та бета-розпаду (обидва канали є чотирикратно забороненими неунікальними). Описано зв'язок даного дослідження з пошуком подвійних бета-розпадів атомних ядер, а саме: аналіз експериментів з пошуку чотирикратно заборонених неунікальних розпадів дає можливість оцінити ефективно значення аксіально-векторної константи змішування  $g_A$ , яка відіграє важливу роль у розрахунках періоду напіврозпаду ядер відносно  $2\beta$ -розпаду. Описано експериментальну установку, яка використовувалась у даному дослідженні. Проаналізовано енергетичні спектри набрані HPGe детекторами, ідентифіковано всі інтенсивні гамма-піки. Визначено радіоактивну забрудненість зразка ванадію. Розраховано значення періоду напіврозпаду  $^{50}\text{V}$  по каналу електронного поглинання на  $2^+$  збуджений рівень 1553.8 кеВ ядра  $^{50}\text{Ti}$ . Визначено джерела систематичної похибки. Також встановлено обмеження на період напіврозпаду  $\beta^-$ -розпаду  $^{50}\text{V}$  на  $2^+$  збуджений рівень 783.3 кеВ ядра  $^{50}\text{Cr}$ . Автором подані рекомендації щодо підвищення чутливості майбутнього експерименту, у якому  $\beta$ -розпад ядра  $^{50}\text{V}$  міг би бути спостереженим.

У **висновках** наводяться основні наукові результати, представлені у дисертаційній роботі.

Гарний науковий рівень досліджень, обґрунтованість та достовірність отриманих результатів підтверджуються публікаціями дисертанта в визнаних наукових журналах, які використовують процес рецензування. Крім того, дисертація містить ретельне викладення методології дослідження та використання відповідних методів та інструментів для збору та аналізу даних. Дослідник провів аналіз експериментальних даних, використовуючи різні методи, включаючи часово-амплітудний аналіз, залежність форми сцинтиляційних сигналів від енергії для  $\gamma(\beta)$ - та  $\alpha$ -частинок, а також побудував модель фону та визначив забрудненість матеріалів експериментальної установки. Важливим досягненням роботи є вдосконалення низькофонової експериментальної установки для пошуку  $2\beta$ -розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ . Дослідник провів калібрування детекторів, визначення їхньої роздільної здатності та стабільності роботи, що дозволило побудувати експериментальні спектри та використовувати їх для подальшого аналізу. Результати роботи точно визначені

та сформульовані, що свідчить про високий науковий рівень автора. Окрім цього результати дослідження мають доволі високий рівень цитування в інших наукових працях.

Дослідження було проведено в рамках чотирьох науково-технічних робіт, що виконувались в Інституті ядерних досліджень Національної академії наук України:

1. «Дослідження властивостей елементарних частинок і пошуки ефектів за межами Стандартної моделі елементарних частинок методами низькофонової ядерної спектроскопії» (Державний реєстраційний номер 0122U002390).
2. «Подвійний бета-розпад атомних ядер» (Державний реєстраційний номер: 0120U104845).
3. «Дослідження подвійного бета-розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ » (Державний реєстраційний номер 0120U002152).
4. «Дослідження подвійного бета-розпаду ядер  $^{106}\text{Cd}$  і  $^{116}\text{Cd}$  за допомогою сцинтиляторів із збагачених ізотопів» (Державний реєстраційний номер 0123U103151).

Автор дисертації брав активну участь у наукових конференціях де доповідав про результати своєї роботи. Його зусилля та внесок в дослідження ядерної фізики є помітними та важливими для розвитку цієї наукової галузі. Результати досліджень були опубліковані у 15 роботах: 3 статті у реферованих фахових журналах, 2 статті за матеріалами конференцій та 10 тез конференцій.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в отриманні нових обмежень на період напіврозпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  та ядра  $^{50}\text{V}$ , що є важливими результатами в контексті розвитку теоретичних моделей та перевірки гіпотез у ядерній фізиці. Зокрема, у роботі встановлено нове обмеження на період напіврозпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  по каналу резонансного безнейтринного подвійного електронного поглинання на збуджений рівень 2718 кеВ  $^{106}\text{Pd}$ . Даний результат має важливе значення для наукової спільноти.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у використанні отриманих обмежень на значення періоду напіврозпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  для розрахунків ядерних матричних елементів для двонейтринного подвійного бета-розпаду. Крім цього, дослідження схеми розпаду ядра  $^{50}\text{V}$  можуть бути використані для визначення ефективного значення аксіально-векторної константи змішування  $g_A$ .

Також практичне значення полягає у можливості використання низькофонової установки для проведення експериментів з пошуку різних рідкісних ядерних розпадів після завершення експерименту з пошуку

подвійного бета-розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ . Вдосконалена низькофонова сцинтиляційна установка має високу чутливість до радіоактивної забрудненості сцинтиляторів, яка була досягнута завдяки високій ефективності реєстрації та застосування методів аналізу даних. Дана чутливість перевищує чутливість низькофонових напівпровідникових детекторів із надчистого германію аналогічного об'єму.

Проаналізувавши наукові публікації можна сказати, що вони повністю пов'язані з темою дослідження. Всі положення і висновки отримані в рамках дисертаційного дослідження відображені в основних публікаціях здобувача, а також в статтях та тезах за матеріалами доповідей на конференціях. Всі основні статті написані в журналах індексовані Web of Science Core Collection та Scopus. Крім того, дві статті написані у виданнях, що належать до кuartилів Q1 та Q2, що прирівнює кожен з цих статей до двох публікацій. Отже, наукові публікації відповідають вимогам п. 8 “Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії”, затвердженого Постановою № 44 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р.

Дисертація містить незначну кількість друкарських та граматичних помилок. Однак дане зауваження не впливає на загальну позитивну оцінку наукового дослідження. Дисертація містить всі необхідні компоненти та відповідає вимогам оформлення дисертацій, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40.

Дисертаційна робота є самостійним дослідженням здобувача, яка відповідає спеціальності “104 Фізика та астрономія” та вимогам “Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Узагальнюючи, дисертаційна робота є цінним внеском у вивчення процесів подвійного бета-розпаду та вдосконалення методів експериментального дослідження в цій області. Результати досліджень мають важливе наукове значення та можуть бути корисними для подальших досліджень у ядерній фізиці. Автор дисертації, Клавдієнко Володимир Русланович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю “104 Фізика та астрономія”.

Рецензент:

д.ф.-м.н., с.н.с.,

зав. відділу фізики важких іонів  
Інституту ядерних досліджень  
НАН України

О.А. Понкратенко

Підпис О. А. Понкратенко затверджую  
Вчений секретар Інституту ядерних досліджень  
НАН України



Л. Дорошко