

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., провідн.н.с. відділу структури ядра

Інституту ядерних досліджень НАН України

Саврасова Андрія Миколайовича

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"

### 1. Актуальність обраної теми дисертаційної роботи

Актуальність представленої теми дисертації визначається кількома ключовими аспектами:

1. Важливість подвійного бета-розпаду. Подвійний бета-розпад ( $2\beta$ -розпад) є одним із найбільш цікавих процесів у ядерній фізиці. Зокрема дослідження цього процесу дає змогу визначити властивості нейтрино, природу даної частинки та структуру масових станів нейтрино. Також  $2\beta$ -розпад має важливе значення для космології, оскільки може пролити світло на питання баріонної асиметрії Всесвіту.

2. Пошуки нових фізичних явищ. Дослідження  $2\beta$ -розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  може призвести до виявлення нової фізики, розширити поточні теоретичні моделі, зокрема Стандартну модель елементарних частинок і взаємодій, що безумовно збагачує наше розуміння природи.

3. Розробка нових методів та технологій. Для дослідження  $2\beta$ -розпаду необхідні чутливі низькофонові детекторні системи та точні методи аналізу даних. Проте, розробка та вдосконалення даних технологій мають практичне застосування і в інших експериментальних дослідженнях рідкісних ядерних розпадів, а в майбутньому можуть знайти і практичне застосування в інших сферах діяльності, де необхідні вимірювання дуже низьких рівнів радіоактивності.

4. Можливість для міжнародного співробітництва. Сучасні дослідження  $2\beta$ -процесів у атомних ядрах потребують міжнародної співпраці, оскільки реалізація експерименту вимагає великих інтелектуальних ресурсів та грошових витрат. Це сприяє розвитку міжнародних відносин у сфері ядерної

фізики, обміну знаннями та ресурсами між різними науковими групами та країнами.

## 2. Оцінка структури дисертації, її наукового рівня та обґрунтованості/достовірності положень, що в ній сформульовані

Загальний обсяг дисертації становить 134 сторінки. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, 40 рисунків, 14 таблиць, 2 додатків, списку використаних джерел із 197 найменувань.

Розділ 1: ПОДВІЙНИЙ БЕТА-РОЗПАД. Перший розділ містить огляд літератури з теми дослідження, включаючи історичний нарис подвійного бета-розпаду, огляд різних каналів і мод розпаду, теоретичні та експериментальні аспекти, а також форми енергетичних спектрів у залежності від теоретичних моделей. Автор аналізує різні канали і моди  $2\beta$ -розпаду, які можуть спостерігатися в ядрах. Важлива увага приділяється теоретичним моделям, які описують  $2\beta$ -розпад, залежності періоду напіврозпаду від аксіально-векторної константи зв'язку слабкої взаємодії  $g_A$  та іншим параметрам. Розділ також включає вимоги до експериментів з пошуку  $2\beta$ -розпаду ядер, огляд сучасних та майбутніх експериментів, а також результати попередніх досліджень.

Розділ 2: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОДВІЙНОГО БЕТА-РОЗПАДУ ЯДРА  $^{106}\text{Cd}$  З ВИКОРИСТАННЯМ ЗБАГАЧЕНОГО КРИСТАЛУ  $^{106}\text{CdWO}_4$ . Другий розділ розглядає експериментальну установку, яка використовувалася для досліджень  $2\beta$ -розпаду в ядрах  $^{106}\text{Cd}$ . Автор описує структуру установки, систему збору даних, детектори, їх часові та спектрометричні характеристики. Особлива увага приділяється вдосконаленню установки. Описані методи обробки експериментальних даних, включаючи калібрування детекторів, визначення стабільності роботи системи та аналіз сигналів. Також проводиться порівняння експериментальних даних з Монте-Карло моделями, вимірювання фонових подій та оцінка радіоактивної забрудненості компонентів установки.

Розділ 3: ПОДВІЙНИЙ БЕТА-РОЗПАД ЯДРА  $^{106}\text{Cd}$ . Третій розділ містить результати досліджень  $2\beta$ -розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ . Автор наводить обмеження на період напіврозпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  відносно різних каналів і мод  $2\beta$ -розпаду, включаючи нове обмеження на період напіврозпаду відносно  $2\nu\text{EC}\beta^+$ -розпаду та резонансного  $0\nu 2\text{EC}$ -розпаду на збуджений рівень 2718 кеВ  $^{106}\text{Pd}$ . У розділі також подаються експериментальні енергетичні спектри та результати апроксимації цих спектрів. Автор проводить аналіз чутливості вдосконаленої експериментальної установки до різних каналів і мод  $2\beta$ -розпаду  $^{106}\text{Cd}$ .

Розділ 4: СХЕМА РОЗПАДУ ЯДРА  $^{50}\text{V}$ . Четвертий розділ присвячений дослідженню схеми розпаду ядра  $^{50}\text{V}$ , яке розпадається по двом чотирикратно забороненим неунікальним каналам бета-розпаду. Автор розглядає зв'язок цього дослідження з пошуком подвійних бета-розпадів атомних ядер і аналізує енергетичні спектри, отримані за допомогою HPGe детекторів. Розраховано значення періоду напіврозпаду  $^{50}\text{V}$  по каналу електронного поглинання на збуджений рівень 1553.8 кеВ  $^{50}\text{Ti}$  та встановлено обмеження для бета-розпаду на збуджений рівень 783.3 кеВ ядра  $^{50}\text{Cr}$ . В розділі також подані рекомендації



щодо підвищення чутливості майбутніх експериментів з пошуку бета-розпаду ядра  $^{50}\text{V}$ .

Достовірність одержаних у роботі результатів, оволодіння здобувачем методології наукової діяльності та високий рівень науковий досліджень підтверджуються публікаціями у міжнародних реферованих журналах, що мають високі наукометричні показники.

Висновки узагальнюють ключові результати та внесок автора у дослідження подвійного бета-розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  та бета-розпаду ядра  $^{50}\text{V}$ , дозволяючи зрозуміти важливість та актуальність цих досліджень у контексті ядерної фізики.

Автор дисертації провів широку апробацію матеріалів дисертації, приймав активну участь у наукових конференціях та школах-семінарах де доповідав про результати своєї роботи. Його внесок є помітними та важливими для розвитку ядерної фізики та неприскорювальної фізики елементарних частинок. Результати досліджень були опубліковані у 15 роботах: 3 статті у реферованих фахових журналах, 2 статті за матеріалами конференцій та 10 тез конференцій.

Дослідження, результати яких представлені в дисертації, були проведені в рамках кількох наукових тем/контрактів/грантів:

1. Науково-технічна робота «Дослідження властивостей елементарних частинок і пошуки ефектів за межами Стандартної моделі елементарних частинок методами низькофонової ядерної спектрометрії» (Державний реєстраційний номер 0122U002390). Місце виконання: Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України.
  2. Науково-технічна робота «Подвійний бета-розпад атомних ядер» (Державний реєстраційний номер: 0120U104845). Місце виконання: Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України.
  3. Науково-технічна робота «Дослідження подвійного бета-розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ » (Державний реєстраційний номер 0120U002152). Місце виконання: Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України.
  4. Науково-технічна робота «Дослідження подвійного бета-розпаду ядер  $^{106}\text{Cd}$  і  $^{116}\text{Cd}$  за допомогою сцинтиляторів із збагачених ізотопів» (Державний реєстраційний номер 0123U103151). Місце виконання: Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України.
- 3. Наукова новизна одержаних результатів**

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в отриманні нових обмежень на період напіврозпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ , розрахунку періоду напіврозпаду ядра  $^{50}\text{V}$  по каналу електронного поглинання та встановленню обмеження на  $\beta^-$ -розпад ядра  $^{50}\text{V}$ . Зокрема у роботі встановлено нове обмеження на період напіврозпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  по каналу резонансного  $0\nu 2\text{EC}$ -переходу на збуджений рівень 2718 кеВ ядра  $^{106}\text{Pd}$ , що наближається до теоретичних оцінок вірогідності цього процесу. Також отримано одне із найточніших значень періоду напіврозпаду ядра  $^{50}\text{V}$  по каналу електронного поглинання. Даний результат має важливе значення для наукового співтовариства.

- 4. Теоретичне та практичне значення одержаних результатів.**

По-перше, практичне значення одержаних здобувачем результатів полягає у вдосконаленні низькофонової сцинтиляційної установки, яка використовувалась в експерименті з пошуку  $2\beta$ -розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ . Дана установка має чутливість до радіоактивної забрудненості сцинтиляторів (радіонуклідами рядів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  та їх дочірніх), яка перевищує чутливість низькофонових напівпровідникових детекторів із надчистого германію. Така чутливість була досягнута завдяки високій ефективності реєстрації та застосуванню розроблених методів аналізу форми сцинтиляційних сигналів та часово-амплітудного аналізу. Дана установка може бути використана для проведення експериментів з пошуку різних рідкісних ядерних розпадів після завершення експерименту з пошуку  $2\beta$ -розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ .

По-друге, отримані обмеження на значення періоду напіврозпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  можуть бути використані для розрахунків ядерних матричних елементів для двонейтринного подвійного бета-розпаду.

Крім того, у роботі були подані рекомендації щодо підвищення експериментальної чутливості до  $\beta^-$ -розпаду  $^{50}\text{V}$ , що можуть бути використані у майбутніх експериментах з пошуку даного розпаду

## 5. Повнота викладення наукових положень, висновків і результатів в опублікованих працях.

Дисертаційна робота ґрунтується на трьох публікаціях здобувача:

1. A.Danevich, M.Hult, D.V.Kasperovych, **V.R.Klavdiienko**, G.Lutter, G.Marissens, O.G.Polischuk, V.I.Tretyak. "Decay scheme of  $^{50}\text{V}$ ". Phys. Rev. C 102(2020)024319, p. 8. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.102.024319> (Наукометричний показник: Q1).
2. P.Belli, R.Bernabei, V.B.Brudanin, F.Cappella, V.Caracciolo, R.Cerulli, F.A.Danevich, A.Incicchitti, D.V.Kasperovych, **V.R.Klavdiienko**, V.V.Kobychev, V.Merlo, O.G.Polischuk, V.I.Tretyak, M.M.Zarytskyu. "Search for double beta decay of  $^{106}\text{Cd}$  with an enriched  $^{106}\text{CdWO}_4$  crystal scintillator in coincidence with  $\text{CdWO}_4$  scintillation counters". Universe 6(2020)182, p. 15. <https://doi.org/10.3390/universe6100182> (Наукометричний показник: Q2).
3. P. Belli, R. Bernabei, F. Cappella, V. Caracciolo, R. Cerulli, F. A. Danevich, A. Incicchitti, D. V. Kasperovych, **V. R. Klavdiienko**, V. V. Kobychev, A. Leoncini, V. Merlo, O. G. Polischuk, V. I. Tretyak. "Low-background experiment to search for double beta decay of  $^{106}\text{Cd}$  using  $^{106}\text{CdWO}_4$  scintillator". Nucl. Phys. At. Energy 24 (2023) p. 193. <https://doi.org/10.15407/jnpae2023.03.193> (Наукометричний показник: Q4).

Якість публікацій здобувача характеризується високими наукометричними показниками міжнародних журналів з високим рейтингом, достатнім рівнем цитування статей у інших наукових публікаціях, вичерпним описом методології



досліджень, чіткою та аргументованою подачею інформації а також актуальністю теми дослідження.

Публікації прямо пов'язані з темою дисертації і розкривають її зміст. Перша стаття стосується дослідження схеми розпаду ядра  $^{50}\text{V}$ . Дві останні статті стосуються дослідження подвійного бета-розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ , методам аналізу експериментальних даних та встановленню обмежень на період напіврозпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ . Сформульовані в дисертації положення та висновки ґрунтуються на дослідженнях автора і відображаються в основних публікаціях. Здобувач зробив вагомий внесок у розробку та реалізацію методів аналізу експериментальних даних та вдосконалення експериментальної установки з пошуку подвійного бета-розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ .

Згідно з вимогою 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. наукові результати дисертації повинні бути висвітлені не менше ніж у трьох наукових публікаціях. Наукове видання Nucl. Phys. At. Energy включено на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України та проіндексовано в у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus. Журнали Universe та Phys. Rev. C на момент публікації є виданнями, що відносяться до першого - третього кuartилів (Q1-Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank, що прирівнює статті у даних журналах до двох наукових публікацій. Отже, наукові публікації і їх кількість відповідають вищезазначеним вимогам.

#### **6. Дискусійні положення та зауваження до дисертаційної роботи.**

Дисертаційна робота містить невелику кількість граматичних та друкарських помилок, однак дане зауваження не впливає на результати і загальну позитивну оцінку роботи.

#### **7. Відповідність дисертації встановленим вимогам.**

Структура та оформлення дисертації відповідає вимогам затвердженими наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40. Дисертаційна робота є самостійним дослідженням здобувача з дотриманням у ній академічної доброчесності.

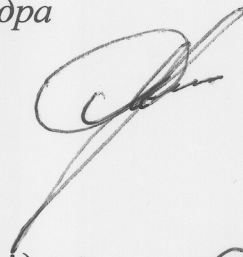
#### **8. Загальний висновок.**

Робота проведена дисертантом є цінним внеском у вивчення подвійного бета-розпаду атомних ядер та рідкісних ядерних розпадів. Результати досліджень мають важливе фундаментальне значення та можуть бути корисними у майбутніх експериментальних та теоретичних дослідженнях у фізиці ядра та елементарних частинок. Дисертація 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. Дана робота заслуговує на позитивну оцінку. Клавдієнко Володимир Русланович гідний присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю “104 Фізика та астрономія”

Рецензент:

*д.ф.-м.н., провідн.н.с. відділу структури ядра  
Інституту ядерних досліджень  
НАН України*



*Андрій САВРАСОВ*

*Підпис А. М. Саврасова затверджую  
Вчений секретар Інституту ядерних досліджень  
НАН України*



*Н. Л. Дорошко*