

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

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

*к.ф.-м.н., с.н.с., с.н.с. відділу фотоядерних процесів  
Інституту електронної фізики НАН України  
Парлага Олега Олександровича*  
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 теми дисертаційної роботи**

Дослідження Клавдієнка В.Р. стосується сучасної нової галузі фізики, а саме неперискорювальної фізики елементарних частинок. Відкриття осциляцій нейтрино свідчить про ненульову масу даної частинки, що суперечить Стандартній моделі елементарних частинок і взаємодій. Експерименти з пошуку рідкісних ядерних розпадів, зокрема і подвійного бета-розпаду  $^{106}\text{Cd}$ , є гарним методом дослідження природи нейтрино, визначення її маси, ієрархії масових станів нейтрино, перевірки закону збереження лептонного числа та пошуку нової фізики. Всі ці положення є безумовно актуальними проблемами фундаментальної фізики. Актуальність теми дисертації підтверджується і результатами огляду та аналізу дисертантом статей у провідних світових фахових журналах в яких обґрунтовано потреби в експериментальному вивченні подвійного бета-розпаду атомних ядер. Нині існують великі міжнародні експерименти, як то CUPID, LEGEND, KamLAND2-Zen чи AMoRE, які в змозі зробити прорив у даній галузі в найближчі роки. Однак не слід нівелювати важливість невеликих експериментів учасником яких є автор дисертації. Результати даного експерименту безумовно доповнюють та розширюють наявні знання.

### **Структури дисертації.**

Дисертація Клавдієнка В.Р. написана на 134 сторінках, складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновку та списку використаних джерел зі 197

посилань. Робота гарно оформлена, має велику кількість ілюстративних матеріалів (40 рисунків), 14 таблиць, два додатки. Коротко ознайомимось зі змістом основних розділів дисертації.

Перший розділ має оглядовий характер. Дисертант провів гарний аналіз як теоретичних, так і експериментальних результатів дослідження подвійного бета-розпаду атомних ядер. У розділі містяться теоретичні моделі для опису спектра подвійного бета-розпаду, його залежність від природи частинки нейтрино, показано зв'язок між значенням періоду напіврозпаду безнейтринної моди розпаду та майоранівською масою нейтрино. Також у розділі описані вимоги до експериментів, представлені значення періодів напіврозпаду різних нуклідів та чутливість майбутніх експериментів. Описано зв'язок майоранівської маси нейтрино з ієрархією масових станів нейтрино.

У другому розділі автор зробив детальний опис експериментальних методів які були використані при дослідженні подвійного бета-розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ . Описано експериментальну установку у двох її модифікаціях, систему збору даних, аналіз стабільності установки, визначено основні часові та спектроскопічні характеристики детекторної системи. Для уточнення енергетичних порогів детекторів та перевірки коректності роботи режиму збігів детекторної системи автор провів порівняння калібрувальних спектрів з Монте-Карло моделями. Реалізовано аналіз форми сцинтиляційних сигналів і відділення сигналів від бета-частинок/гамма-квантів та альфа-частинок. Дисертант виконав часово-амплітудний аналіз дочірніх елементів  $^{228}\text{Th}$  та апроксимацію альфа-спектра для визначення забрудненостей кристалів  $\text{CdWO}_4$  альфа-активними дочірніми нуклідами  $^{232}\text{Th}$  і  $^{238}\text{U}$ . Побудував модель фону та оцінив забрудненості елементів низькофонової експериментальної установки.

Третій розділ також присвячений дослідженню  $^{106}\text{Cd}$ , а саме встановленню обмежень на подвійний бета-розпад даного ядра відносно різних каналів та мод розпаду. Автор зробив детальний опис методів та підходів, які були використані в даному аналізі. Виконано порівняння отриманих результатів з попередніми роботами. Крім того, автор оцінив обмеження на ефективний ядерний матричний елемент для двонейтринного електронного поглинання з вильотом позитрона на основний рівень  $^{106}\text{Pd}$ . Також у цьому розділі наведено результати дослідження подвійного бета-розпаду  $^{106}\text{Cd}$  після вдосконалення експериментальної установки, реалізована нова складніша модель фону для опису експериментальних спектрів та оцінена забрудненість елементів вдосконаленої установки. Оцінена чутливість оновленого експерименту до деяких процесів подвійного бета-розпаду  $^{106}\text{Cd}$ .

Останній розділ дещо відрізняється від теми дисертації та присвячений дослідженню чотирикратно заборонених неунікальних процесів електронного

поглинання та бета-розпаду  $^{50}\text{V}$  на збуджені рівні сусідніх ядер. Хоча автор вказав на зв'язок даного дослідження із подвійним бета-розпадом, а саме можливість оцінити аксіально-векторну константу  $g_A$ , яка відіграє важливу роль у розрахунках ймовірності безнейтринного подвійного бета-розпаду. Автор описав експериментальну установку, виконав аналіз спектрів набраних детекторами, встановив обмеження на період напіврозпаду ядра  $^{50}\text{V}$  по каналу бета-розпаду та визначив період напіврозпаду по каналу електронного поглинання. Також у розділі подані оцінки вимог до майбутніх експериментів, здатних виявити бета-розпаду  $^{50}\text{V}$ .

### **Достовірність та обґрунтованість наукових результатів.**

Кожен розділ закінчується посиланнями на основні публікації, що містять матеріали присвячені даній частині роботи. Безпосередньо наукові результати представлені в розділах 2, 3, 4. Достовірність отриманих результатів та висновків підтверджується використанням автором для вирішення поставлених задач науково-методичних підходів, що мають широке застосування у фундаментальних та прикладних дослідженнях у фізиці ядра та фізиці елементарних частинок. Крім того, у роботі детально описані використані автором методи, а результати підкріплюються великою кількістю ілюстрацій. Отримані результати пройшли наукову апробацію під час їх опублікування в провідних реферованих наукових журналах та при представленні результатів на міжнародних конференціях та школах-семінарах, що свідчить про достовірність отриманих результатів. Загалом, варто відзначити високий науковий рівень дисертації.

### **Зв'язок дисертації з науковими програмами, планами, темами.**

Тематика дисертаційної роботи тісно пов'язана із провідним напрямком наукових досліджень відділу фізики лептонів Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України, де було виконано представлені в роботі дослідження. Дослідження також проводились в рамках чотирьох науково-дослідних проєктів: «Дослідження властивостей елементарних частинок і пошуки ефектів за межами Стандартної моделі елементарних частинок методами низькофонової ядерної спектрометрії» (ДР: 0122U002390), «Подвійний бета-розпад атомних ядер» (ДР: 0120U104845), «Дослідження подвійного бета-розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ » (ДР: 0120U002152) та «Дослідження подвійного бета-розпаду ядер  $^{106}\text{Cd}$  і  $^{116}\text{Cd}$  за допомогою сцинтиляторів із збагачених ізотопів» (ДР 0123U103151).

## **Наукова новизна одержаних результатів**

Встановлено нові обмеження на період напіврозпаду  $^{106}\text{Cd}$  відносно різних каналів та мод подвійного бета-розпаду на рівні  $T_{1/2} \sim 10^{20} - 10^{22}$  років. Зокрема встановлено нове обмеження на двонейтринне електронне поглинання з вильотом позитрона на основний рівень  $^{106}\text{Pd}$ :  $T_{1/2} > 2.1 \times 10^{21}$  років та резонансне безнейтринне подвійне електронне поглинання на 2718 кеВ збуджений рівень  $^{106}\text{Pd}$ :  $T_{1/2} > 2.9 \times 10^{21}$  років.

Вдосконалено експериментальну установку для пошуку подвійного бета-розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  та виконано ретельний аналіз її характеристик, зокрема, оцінено чутливість установки до кількох найбільш цікавих мод і каналів подвійного бета-розпаду.

Отримано одне з найбільш точно вимірених значень періоду напіврозпаду  $^{50}\text{V}$  відносно процесу електронного поглинання на  $2^+$  збуджений рівень 1553.8 кеВ  $^{50}\text{Ti}$ :  $T_{1/2} = 2.774_{-0.20}^{+0.20} \times 10^{17}$  років. Встановлено одне з найбільш жорстких обмежень на період напіврозпаду  $^{50}\text{V}$  відносно каналу бета-розпаду на  $2^+$  збуджений рівень 783.3 кеВ  $^{50}\text{Cr}$ :  $T_{1/2} > 8.9 \times 10^{18}$  років.

## **Теоретичне та практичне значення одержаних результатів.**

Результати дослідження, отримані дисертантом, доповнюють наявні наукові дані про рідкісні ядерні розпади атомних ядер. Отримані обмеження на періоди напіврозпаду можуть бути використані для уточнення ядерних матричних елементів та теоретичних моделей подвійного бета-розпаду. Результати дослідження схеми розпаду ядра  $^{50}\text{V}$  важливі для майбутніх експериментів з визначення періоду напіврозпаду даного ядра по каналу бета-розпаду та форми бета-спектра з метою встановлення ефективного значення аксіально-векторної константи  $g_A$ . Розроблені автором методи аналізу експериментальних даних можуть бути застосовані у подібних низькофонових експериментах.

Покращена експериментальна установка, яка використовується для пошуку подвійного бета-розпаду  $^{106}\text{Cd}$ , має низький рівень фону та може бути використана у майбутніх експериментах з пошуку рідкісних ядерних розпадів інших атомних ядер.

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

Робота написана на основі трьох статей виданих в міжнародних наукових виданнях які проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus. Статті присвячені подвійному бета-розпаду  $^{106}\text{Cd}$  мають квартиль Q2 та Q4. Дослідження схеми розпаду  $^{50}\text{V}$  опубліковано у виданні з квартилем Q1. Всі основні результати дисертаційної роботи є новими та вчасно опубліковані у

наукових виданнях. Наукові публікації повністю відповідають вимогам до публікацій для присудження ступеня доктора філософії, а саме 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.

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

У дисертації присутні певні граматичні та друкарські помилки. Наприклад: на сторінці 2 написано «<sup>160</sup>Cd» замість «<sup>106</sup>Cd», два розділи у роботі мають однаковий номер «2.3.9», сторінка 22 «...період напіврозпаду ядра <sup>106</sup>Cd по рідним модам », сторінка 41 «... перевірка івертованої схеми мас нейтрино...» тощо. Рисунок 2.6, 2.13 та 3.6 мають дрібні підписи під осями.

Також варто зауважити, що останній розділ дисертації дещо відрізняється від основної теми дослідження. Однак, як згадувалось раніше, дисертант показав зв'язок дослідження чотирикратно заборонених неунікальних розпадів з подвійними бета-розпадом атомних ядер, тому дане зауваження має більше рекомендаційний характер.

Загалом, всі вищезгадані дискусійні положення не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

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

Робота Клавдієнка В.Р. відповідає стилістичним та структурним вимогам оформлення дисертацій, що затверджені наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40. Дисертаційна робота є самостійним дослідженням здобувача і пройшла відповідні перевірки на плагіат. Мною не були виявлені порушення академічної доброчесності ні в дисертації, ні в наукових працях, в яких подано результати даного дослідження.

### **Загальний висновок.**

Дисертаційна робота Клавдієнка Володимира Руслановича «Подвійний бета-розпад ядра <sup>106</sup>Cd» є самостійною та завершеною науковою роботою. Актуальність роботи, наукова новизна представлених результатів, їх обґрунтованість, теоретичне і практичне значення відповідають 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. Робота заслуговує на

позитивну оцінку, а її автор на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю “104 Фізика та астрономія”

Офіційний опонент:

к.ф.-м.н., с.н.с., с.н.с. відділу фотоядерних процесів  
Інституту електронної фізики НАН України

Парлаг О.О.

Підпис Парлага О.О. засвідчую

**Вчений секретар:**

Інституту електронної фізики НАН України,  
кандидат хімічних наук, старший дослідник

Людмила РОМАНОВА



«24» січня 2024 року