

Голові разової спеціалізованої вченої  
ради Інституту ядерних досліджень  
НАН України  
доктору фізико-математичних наук,  
провідному науковому співробітнику  
відділу структури ядра  
Андрію Миколайовичу САВРАСОВУ

## РЕЦЕНЗІЯ

*кандидата фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника  
навчального центру з фізичного захисту, обліку та контролю ядерного  
матеріалу Інституту ядерних досліджень НАН України*

*Володимира Івановича Кирищука*

*на дисертацію Сокура Назара Володимировича*

*на тему: “Альфа-розпад  $^{212}\text{Po}$  та пошук надважкого елементу сиборгію”,  
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
у галузі знань “10 Природничі науки”  
за спеціальністю “104 Фізика та астрономія”*

### **Актуальність обраної теми дисертаційної роботи**

Перші теоретичні моделі ядра з'явилися вже більше століття тому. Суттєвим внеском в їх розвиток є вивчення альфа-розпаду, на ймовірність якого впливає структура ядра. Тому дослідження цього процесу розширює знання про природу ядра. Пошук надважких елементів безпосередньо стосується пошуку альфа-розпадів. Деякі моделі передбачають розпад надважких елементів через послідовні альфа-розпади з великою енергією альфа-частинки. Наприклад, елемент Оганесян виявлено з реєстрації послідовно випромінених альфа-частинок. Острівець стабільності — одна із причин досліджень з пошуку надважких елементів. Завдяки розвитку чутливості детекторних систем можна значно покращити результати попередніх досліджень та, можливо, одержати нові. Дослідження надважких елементів пов'язано з питанням про межу стабільних ядер і як їх період напіврозпаду залежить від кількості нуклонів, що, до речі, пов'язано з магічними числами. Отже, актуальність пошуку надважких елементів наразі лежить в теоретичній площині, а також це є предметом інтенсивних експериментальних пошуків, і в разі виявлення нових стабільних або довгоживучих елементів у майбутньому їм безсумнівно знайдуть і практичне застосування, заради чого варто продовжити дослідження.

Вивчення альфа-розпадів часто пов'язані з уточненнями ядерних даних. Однак, окрім того, дослідження ядра з найкоротшим періодом напіврозпаду серед відомих природних ізотопів, яким є ядро  $^{212}\text{Po}$ , дозволяє вивчати явища, що проявляються в порівняно дуже малих часових масштабах, порядку мікросекунд та наносекунд. В таких дослідженнях необхідно використовувати обладнання, що має високі часові характеристики. Вивчення сигналів з тривалістю кілька наносекунд — десятків наносекунд може бути корисним у ширшому колі задач, наприклад, у дослідженнях сцинтиляційних процесів у різних речовинах, або у вдосконаленні методів аналізу сигналів таких детекторів, як сцинтиляційні болометри, що використовують у дослідженнях подвійного бета-розпаду, пошуках темної матерії тощо.

Безнейтринний подвійний бета-розпад наразі є основним способом, яким намагаються визначити природу нейтрино. Як відомо, є два способи його опису — нейтрино Дірака і нейтрино Майорани. Спостереження безнейтринного подвійного бета-розпаду свідчитиме про майоранівську природу нейтрино. Окрім того, це відкриття дасть визначити абсолютну шкалу масових станів, позаяк зараз відомо лише про різницю квадратів мас із осциляційних дослідів. Важливою складовою досліджень подвійного бета-розпаду є низький фон, рівень якого є ключовим пунктом у чутливості до реєстрації шуканого ефекту. Отже, вивчення фону від альфа-частинок є невід'ємною складовою будь-якого дослідження подвійного бета-розпаду.

Таким чином, актуальність роботи дисертанта дійсно є вагомою у сучасній ядерній фізиці.

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

Текст дисертації складається із анотації, змісту, списку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку із переліком наукових праць. Загальний обсяг дисертації складає 138 сторінок, які містять 42 рисунки та 11 таблиць. Кількість посилань налічує 264 найменування.

**Вступна частина** обґрунтовує важливість теми дисертації. Сформовано мету та методику досліджень. Зазначено особистий внесок здобувача. Подано список публікацій та виступи на конференціях. Також розкрито наукове значення проведених досліджень.

**У першому розділі** викладено основні відомості про теорію альфа-розпаду та подвійного бета-розпаду. Вивчення альфа-розпадів дозволяє поліпшувати наші знання про внутрішню будову ядра та процеси, які в

ньому відбувається, такі як ймовірність утворення кластеру, оболонкові ефекти тощо. Також описано вплив досліджень з пошуку надважких елементів на розвиток моделей структури ядра. Докладно розповідається про передові експериментальні дослідження подвійного бета-розпаду і як фон від альфа-частинок впливає на чутливість до шуканого ефекту.

**У другому розділі** висвітлено дослідження про визначення періоду напіврозпаду ядра  $^{212}\text{Po}$ . Ядро  $^{212}\text{Po}$  має дуже короткий період напіврозпаду, тому докладно описано детекторне обладнання та методику аналізу, які сприяли встановленню найточнішого його значення. Окремим пунктом сформовано перелік можливих систематичних неточностей, які вплинули на результат дослідження. Проведена робота підсумувала результати всіх проведених раніше досліджень.

**У третьому розділі** розглядається дослідження з пошуку надважкого елементу сиборгію з даними експерименту Auger. Хоча первісно це дослідження мало за мету вивчити подвійний бета-розпад ядра  $^{116}\text{Cd}$ , але наявність вольфраму в кристалі  $\text{CdWO}_4$  дала можливість провести пошуки хімічно подібного до вольфраму сиборгію. Завдяки великому часу вимірів дане дослідження є чутливішим за попередні. Описано аналіз енергетичних спектрів кристалів та промодельовано фон в області, де може бути присутній ефект розпаду сиборгію. За результатами аналізу, наслідків присутності сиборгію не виявлено, але попереднє встановлене обмеження на його поширеність покращено більше ніж на порядок.

**Четвертий розділ** дисертації присвячений дослідженню AMoRE з пошуку подвійного бета-розпаду  $^{100}\text{Mo}$ . Обґрунтовано вибір даного ядра та методику дослідження. Описано план роботи на подальших стадіях. Достатньо широко висвітлено проблему внутрішньої та поверхневої забрудненості кристалів. Окрім того, підкреслено важливість поверхневої забрудненості матеріалів детекторної системи. Аналіз проведено з даними першої стадії AMoRE-pilot, метою якої було налагодити роботу із сигналами від теплового та світлового датчиків та вивчити фон від альфа-джерел. Результати роботи вказують, що рівень фону наразі потребує зменшення, щоб досягти необхідної чутливості для досягнення оберненої схеми масових станів нейтрино.

**У Висновках** підсумовано результат трьох досліджень, яким присвячено дисертаційну роботу.

Перелік тем/контрактів/грантів, в рамках яких проведено представлені в дисертації дослідження, зазначено на с. 25-26 вступної частини, а саме:

- Дослідження подвійного бета-розпаду, рідкісних альфа- та бета-розпадів / Гранти НАН України дослідницьким лабораторіям/групам

молодих вчених НАН України для проведення досліджень за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки 2020-2021 рр.

- Подвійний бета-розпад атомних ядер / Конкурс НФДУ “Підтримка досліджень провідних та молодих учених”.
- Розробка болометричних експериментів для пошуку подвійного бета-розпаду / Цільова програма наукових досліджень НАН України “Участь в новітніх міжнародних проєктах з фізики високих енергій та ядерної фізики” на 2021-2023 рр.

Апробацію матеріалів дисертації зазначено на с. 24-25 вступної частини дисертації, дисертант брав участь в українських та міжнародних конференціях.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

- В дослідженні із насиченим торієм рідким сцинтилятором встановлено найточніше значення періоду напіврозпаду ядра  $^{212}\text{Po}$  як  $T_{1/2} = 295.1(4)$  нс. Результат свідчить, що значення, отримане раніше в досліді з кристалом  $\text{BaF}_2$   $T_{1/2} = 298.8(16)$  нс, є завищеним; знайдене значення узгоджується з результатами колаборацій Borexino та XENON.
- Встановлено нове обмеження на поширеність природного сиборгію у вольфрамі в дослідженні зі сцинтиляційними кристалами  $^{116}\text{CdWO}_4$ , що становить  $\eta \leq 5.1 \times 10^{-15}$  атомів(Sg)/атомів(W) з 90% довірчою ймовірністю. Попереднє верхнє обмеження, встановлене із кристалами  $\text{ZnWO}_4$ , поліпшено в 11 разів.
- В експерименті AMoRE проведено роботу з аналізу поверхневої забрудненості кристалів молібдатів кадмію. Моделювання ланцюжків розпадів  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  та  $^{235}\text{U}$  добре узгоджується з даними всіх шістьох кристалів в області 2.5-7.0 МеВ. Успіхи проведеної роботи вплинуть на проведення аналізу наступних стадій дослідження AMoRE-I і AMoRE-II.

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

Проведена робота з визначення періоду напіврозпаду  $^{212}\text{Po}$  розвиває способи аналізу збігів сигналів, що часто є фоном в інших низькофонових дослідженнях, наприклад, таких як вивчення подвійного бета-розпаду. Дослідження із пошуку сиборгію показало, що його вміст відносно вольфраму менший за  $5.1 \times 10^{-15}$ , на практиці це означає, що варто проводити чутливіші дослідження, проводити пошуки в іншій енергетичній області або переглядати наші теоретичні моделі про острівцеву стабільність. У дослідженні AMoRE оцінено рівень фону від поверхневих альфа-

забрудників, що буде взято до уваги на наступних стадіях дослідження. Якщо вдасться досягти необхідного рівня фону, буде досягнуто оберненої схеми мас нейтрино. Наразі питання про природу нейтрино та його масу є відкритими, тому дослідження AMoRE буде сприяти розгадці цих проблем.

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

Дисертант має три наукові праці, в яких викладено роботи, що виносяться на захист. Журнали з цими працями індексуються в наукометричній базі SCOPUS і належать до першого квартилю. Якість публікацій оцінюю на високому науковому рівні. Кожен описаний крок логічно обґрунтований. На результати усіх досліджень суттєво вплинула проведена здобувачем робота. Вищезазначені наукові публікації повністю 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.

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

До тексту дисертації маю наступні зауваження:

- В третьому розділі про пошук надважкого елементу сиборгію зазначено, що основною заслугою дисертанта є моделювання фону від ВіРо-подій в області проведення пошуку альфа-піку від дочірнього ядра сиборгію. Варто було в тексті дисертації більш розширено описати це питання, позаяк отримати обмеження на вміст сиборгію дав змогу саме внесок дисертанта, який подекуди не так гарно помітний в порівнянні з деякими іншими пунктами розділу.
- У висновках дисертант зазначив суто наукові результати проведених досліджень. Було б добре зазначити вплив виконаної роботи на майбутнє фізичних досліджень загалом.

Однак загальна позитивна оцінка від висловлених зауважень не знижується.

### **Відповідність дисертації встановленим вимогам**

Структура дисертаційної роботи здобувача є зрозумілою та логічною. Стиль викладення повністю підпорядковується вимогам оформлення дисертації, які зазначено в наказі Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40. Порухень академічної доброчесності не виявлено.

### Загальний висновок

Підсумувавши все вище сказане, можна постановити, що робота здобувача Н.В. Сокура «Альфа-розпад  $^{212}\text{Po}$  та пошук надважкого елементу сиборгію» містить самостійні наукові дослідження, є цілісною і завершеною із належним науковим рівнем. Нові науково обґрунтовані результати роблять вагомий внесок у фундаментальній фізиці. Висновки роботи буде застосовано в наступних дослідженнях.

Дисертація належить до спеціальності “104 Фізика та астрономія” та не порушує вимоги “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. Дисертація заслуговує позитивної оцінки, а автор безсумнівно вартий присудження наукового ступеня доктора філософії.

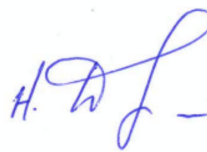
Рецензент:

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник навчального центру з фізичного захисту, обліку та контролю ядерного матеріалу  
Інституту ядерних досліджень НАН України



Володимир Іванович  
КИРИЩУК

Підпис В.І. Киришука затверджую  
Вчений секретар Інституту ядерних досліджень  
НАН України



Н.Л. Дорошко