

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

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

*Доктора фізико-математичних наук, професора,
завідувача кафедри ядерної фізики та високих енергій
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
Каденка Ігоря Миколайовича*

на дисертаційну роботу Сокура Назара Володимировича
на тему: “Альфа-розпад ^{212}Po та пошук надважкого елементу сиборгію”,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань “10 Природничі науки”
за спеціальністю “104 Фізика та астрономія”

1. Актуальність обраної теми дисертаційної роботи

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню дослідницьких задач щодо уточнення періоду напіврозпаду ядра ^{212}Po , пошуку надважкого елементу сиборгію та вивченню фону від альфа-частинок в експерименті АМоRE.

Глибоке розуміння особливостей альфа-розпаду є дуже важливим для розвитку моделей ядер. І хоча альфа-розпад вивчають вже понад 100 років, удосконалення детекторних систем і методик аналізу дозволяє значно покращити результати попередніх досліджень та отримати нові дані, що раніше були недосяжними. Так, 2003 року було вперше спостережено альфа-активність ядра ^{209}Bi , що вважалось найважчим стабільним ядром. Прецизійне визначення періодів напіврозпаду ядер є однією з основних задач у ядерній фізиці. Коли ж йдеться про часові величини порядку сотень наносекунд, у таких випадках при проведенні експериментів значно зростають вимоги до швидкодії обладнання та якості аналізу даних. Ядро ^{212}Po має найменший час життя серед відомих природних радіоактивних ізотопів і є частиною ланцюжку розпаду ^{232}Th , зумовлюючи зростання фону. Таким чином, визначення періоду напіврозпаду ^{212}Po є актуальною темою.

Надважкі елементи зацікавили науковців як можливе підтвердження існування острівця стабільності та перевірки магічних чисел в ядрах з великим атомним номером. До того ж, розширення періодичної таблиці породжує питання, наскільки великими за розмірами можуть бути відносно стабільні ядра. Згідно з теоретичними підходами надважкі ядра могли бути утвореними в зіткненнях нейтронних зір й опинитися на Землі в достатній концентрації, щоб їх виявити. Використаний метод пошуку надважкого елементу сиборгію полягає у вимірюванні спектру кристалу вольфрамату кадмію. Хімічно подібний до сиборгію вольфрам може мати його домішки. Тому, в цілях пошуку надважких елементів, можна використати довготривалі дослідження з детекторами, що мають у своєму складі елементи, хімічно подібні до надважких. Завдяки великому часу експозиції такий метод дослідження може перевершити інші методи за чутливістю, що й було досягнуто в ході проведеного дослідження, викладеного в дисертаційній роботі.

Врешті, останнім предметом вивчення був подвійний бета-розпад. Цей надзвичайно рідкісний процес досліджують багато наукових міжнародних груп. Причина інтересу до цього явища полягає в тому, що це найперспективніший наразі спосіб визначитися з природою нейтрино. Як відомо, є дві теорії, в рамках яких визначено два типу нейтрино - нейтрино Майорани й нейтрино Дірака. Майоранівська природа відкрила б фізикам шлях до нових теорій, які можуть бути пов'язаними з найбільшими загадками Всесвіту, включно з причиною його існування, і поясненням баріонної асиметрії (переважанням матерії над антиматерією). Саме тому цей напрям досліджень інтенсивно розвивається. AMoRE — міжнародний експеримент з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ізотопу ^{100}Mo в підземній лабораторії в Південній Кореї. Використана методика реєстрації частинок, яка зветься сцинтиляційним болометричним дослідженням, дозволяє отримувати одні з найкращих результатів за такими параметрами, як розпізнавання різних типів частинок та висока енергетична роздільна здатність. Частину досліджень дисертанта присвячено вивченню альфа-фону, що є невід'ємною складовою підвищення чутливості. Без досконалого аналізу фону і його пригнічення ефективність реєстрації дослідження до шуканого ефекту різко знижується. Таким чином, актуальність і цієї частини виконаної роботи не підлягає сумніву.

Кожне з трьох досліджень дисертанта розкриває важливі риси досліджуваних явищ та виглядає як самостійна наукова задача, але водночас наведені дисертантом містки між цими задачами об'єднують їх

фундаментальністю поставлених питань.

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

Роботу викладено на 138 сторінках друкованого тексту, що складається з переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків та списку посилань. Текст супроводжується 42 рисунками, 11 таблицями і 264 посиланнями. Список публікацій дисертанта наведено після анотації та в кінці в додатку. Зміст дисертації є логічно зв'язаним, виклад тексту дотримано в науковому стилі гарною українською мовою.

У вступній частині стисло обґрунтовано вибір теми дисертаційної роботи, мету і завдання досліджень, методи, використані в ході виконання досліджень, наукову новизну отриманих результатів, особистий внесок здобувача, викладення матеріалів дисертації на конференціях.

Перший розділ містить оглядові дані про теоретичні уявлення про альфа-розпад і подвійний бета-розпад, а також описує розвиток експериментальних досліджень на підтримку цих явищ. Зокрема, обґрунтовано, чому і сьогодні важливими є дослідження процесів альфа-розпаду. Пояснено також роль досліджень з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду, розглянуто та описано декілька сучасних наймасштабніших передових експериментів, що проводяться зараз або плануються в майбутньому.

В другому розділі розглядається дослідження з визначення періоду напіврозпаду ядра ^{212}Po . Структура розділу містить вступну частину, опис установки, аналіз даних та висновки. У вступі викладено використану методику дослідження, огляд наявних результатів вимірювань періоду напіврозпаду ^{212}Po , останні проведені дослідження та зазначено невелике розходження в отриманих результатах. Обґрунтовано недоліки попередніх досліджень та наведено рішення, що їх було прийнято для усунення недоліків. Описано підготовку сцинтиляційного матеріалу та обладнання для експериментів, а також викладено детальний аналіз даних дослідження. Висновки сформульовано відповідно до мети дослідження.

Третій розділ присвячено пошуку надважкого елемента сиборгію. Розділ містить огляд з описом поточного стану таких досліджень. Визначення обмеження на вміст сиборгію виконано шляхом аналізу енергетичного спектру у певному інтервалі. Підкреслено, що такий метод є модельно-залежним і не виключає того, що сиборгій таки може бути присутнім у зразку, але виявляти

себе інакшим чином, про що сказано у висновках.

Четвертий розділ присвячено вивченню альфа-фону в дослідженні AMoRE з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ^{100}Mo . Вибір методики дослідження обґрунтовано здатністю розділяти частинки за їх типом завдяки одночасній реєстрації теплового і світлового сигналів і високою роздільною здатністю низькотемпературного болометричного детектора. Використані методи аналізу є широкозастосовуваними в низькофонових дослідженнях, ефективність яких доведено на практиці. Відповідно до висновків дисертанта оцінений фон є більшим за необхідно досяжний, тому на наступних стадіях дослідження детекторна система потребує подальшого очищення, в тому числі й від поверхневої забрудненості кристалів, про що докладно описано в розділі й висновках до розділу.

У вступі дисертаційної роботи зазначено, що роботи проводилися в межах наступних договорів:

1. 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.

2. Подвійний бета-розпад атомних ядер / Конкурс НФДУ “Підтримка досліджень провідних та молодих учених”

3. 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 результатів проведено на міжнародних та вітчизняних конференціях, школах-семінарах і нарадах.

3. Наукова новизна одержаних результатів

1. У дослідженні з ядром ^{212}Po отримано найпрецизійніше значення його періоду напіврозпаду, що дорівнює $T_{1/2} = 295,1(4)$ нс. Частково це вдалося завдяки зменшенню впливу повільної складової сцинтиляційного сигналу на визначення характеристик другого сигналу BiPo -ланцюжку.

2. За результатами моделювання BiPo -подій у даних з кристалами вольфрамату кадмію було зроблено верхню оцінку вмісту природного сиборгію відносно атомів вольфраму як $\eta < 5,1 \times 10^{-15}$ з довірчою ймовірністю 0,9. Отриманий результат в даній моделі розпаду сиборгію покращує обмеження на

його концентрацію в 11 разів порівняно з попереднім отриманим обмеженням з кристалами вольфрамату цинку.

3. Визначений фон від альфа-частинок в дослідженні АМоRE складає $(2,22 \pm 0,03) \times 10^{-2}$ відліків на (кеВ \times кг \times рік) навколо досліджуваної області $Q(^{100}\text{Mo}) = 3034$ кеВ. Змодельовані спектри добре узгоджуються з виміряними даними. На наступних стадіях дослідження буде враховано всі результати, отримані в ході аналізу дисертантом у даній роботі.

4. Теоретичне та практичне значення одержаних результатів

Одержані результати мають як теоретичне, так і практичне значення. Так, визначення періоду напіврозпаду ядра ^{212}Po та верхньої оцінки на вміст природного сиборгію відносно кількості атомів вольфраму поповнюють загальну скарбницю ядерних даних. Але, крім цього, розвинений метод аналізу сигналів та швидких ланцюжків сигналів на основі відомого методу сталого множника може бути застосованим і в інших дослідженнях. Дослідження з пошуку сиборгію може додати внесок до загальної теорії щодо існування острівця стабільності. Оскільки точкової оцінки не одержано, на практиці це може відобразитися таким чином, що пошуки природного сиборгію будуть скоригованими та проводитися із застосуванням інших моделей його розпаду. Проведений аналіз теплових та світлових сигналів з болометричного детектору дослідження АМоRE для вивчення альфа-фону матиме значення на наступних стадіях дослідження. Отриману інформацію буде використано в оцінюванні періоду напіврозпаду подвійного бета-розпаду ^{100}Mo . АМоRE – не єдине дослідження з такою методикою реєстрації, тому отриманий досвід можна застосувати і в інших дослідженнях з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду, наприклад, у експерименті CUPID-Mo. Таким чином, результати дисертанта є вагомим внеском у дослідження природи нейтрино.

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

Роботу автора дисертації висвітлено в трьох наукових працях першого квартилю. Публікації прямо пов'язано з темою дисертаційної роботи. Сформульовані положення та висновки є результатом особистих здобутків автора, що їх відображено у відповідних статтях. Особистий внесок автора є вагомим. 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.

6. Дискусійні положення та зауваження до дисертаційної роботи

Робота сприймається дуже позитивно, оскільки викладена гарною науковою українською мовою, прекрасно структурована і не містить логічних прогалин при формулюванні, вирішенні та підсумовування поставлених наукових завдань.

У той же час в наявності є наступні питання та зауваження:

1. Для визначення періоду напіврозпаду ^{212}Po розроблено і застосовано прецизійну методику, що є експериментально досить досконалою, але є не зрозумілим з фізичної точки зору, які нові знання можуть бути отриманими після цієї оцінки, і чи стане вона рекомендованою величиною замість 299(2)нс.

2. Якщо сиборгій є хімічно схожим до вольфраму, можливо він не є моноізотопом, і містить інші ізотопи. Цей аспект у роботі не розглянуто. Крім того, відсутнім є порівняння отриманої верхньої оцінки поширеності з аналогічними хоча б теоретичними оцінками за іншими модами бета-розпадів. І чи потрібно інтерпретувати отриману оцінку чисто специфічною для даного кристалу, чи, можливо, вона має право вважатися як такою для поширеності даного елемента у природі?

3. Багато уваги приділено моделюванням поверхневого та внутрішнього альфа-фону, але первинний аналіз теплових та світлових сигналів (як основна перевага низькотемпературної болометричної методики) виглядає не таким глибоким. Мають бути, принаймні, вказаними ті додаткові можливі джерела, що їх не враховано в дослідженні.

4. На стор. 29 у виразі (1.5) не визначено величину R_0 , що описана лише згодом у виразі (1.7).

5. У роботі містяться декілька невдалих формувань на кшталт: “нуклонне спарювання” (стор.19), треба “нуклонне двійкування”; “... вимагає наднизьких фонів ...” (стор.20), краще “...наднизьких фонових умов...”; на цій є сторінці “збрудники”, “за можливості”; у формулі (1.4) “...товщина потенціалу...”, треба “...ширина потенціального бар’єру ...”, тощо.

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, а питання й зауваження не знижують її високий науковий рівень.

7. Відповідність дисертації встановленим вимогам

Вимоги щодо оформлення дисертації за структурою, стилем представлення матеріалу, мовою, затверджені наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40 не порушено.

Дисертаційна робота здобувача Н.В. Сокура є самостійним науковим дослідженням здобувача. Академічну добросовісність як у самій роботі, так і в наукових працях, де представлено результати, дотримано.

8. Загальний висновок.

Дисертаційна робота Сокура Назара Володимировича «Альфа-розпад ^{212}Po та пошук надважкого елементу сиборгію» 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. Актуальність проведеної роботи відповідає передовим позиціям ядерної фізики. Наукова новизна в купі з теоретичним та практичним значенням проведених досліджень, значний особистий внесок в роботі надає дисертантові право на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю “104 Фізика та астрономія”.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук,
професор, завідувач кафедри ядерної
фізики та високих енергій фізичного
факультету Київського національного
університету імені Тараса Шевченка



Ігор КАДЕНКО