

Голові разової спеціалізованої вченої  
ради Інституту ядерних досліджень  
НАН України  
доктору фізико-математичних наук,  
завідувачу відділу фізики важких іонів  
ІЯД НАН України  
Понкратенку Олегу Анатолійовичу

**ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**  
кандидата фізико-математичних наук,  
старшого наукового співробітника відділу фотоядерних процесів  
Інституту електронної фізики НАН України  
Парлага Олега Олександровича  
на дисертацію Зарицького Миколи Миколайовича  
на тему: «Монте-Карло моделювання для експериментів  
з пошуку подвійного бета-розпаду»,  
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**

Пошук безнейтринного подвійного бета ( $0\nu 2\beta$ ) розпаду відіграє важливу роль у сучасній фізиці елементарних частинок, оскільки цей процес є забороненим у рамках Стандартної Моделі елементарних частинок. Спостереження  $0\nu 2\beta$ -розпаду дозволить визначити природу (частинка Майорани чи Дірака), масу та схему масових станів нейтрино (нормальна чи обернена), перевірити закон збереження лептонного числа. Експериментальні дослідження  $0\nu 2\beta$ -розпаду потребують умов низького рівня фону в області шуканого ефекту.

У дисертаційній роботі розглядаються моделювання методом Монте-Карло для експериментів CUPID-Mo та CROSS, метою яких є розробка технологій для майбутнього великомасштабного експерименту CUPID, що націлений на досягнення чутливості експерименту на рівні, що дозволяє досліджувати область оберненої схеми масових станів нейтрино. В експериментах такого типу, моделювання методом Монте-Карло відіграють критичну роль, та дозволяють дослідити різні конфігурації експериментальних установок, визначити найбільш оптимальне розташування калібрувальних джерел та допомагають визначити рівень фону від радіоактивної забрудненості елементів установки. Це дозволяє підбирати найбільш відповідні умови та конфігурації експериментальних установок.

Зважаючи на вищезазначене, можна стверджувати, що дисертація Зарицького Миколи Миколайовича є повністю актуальною, а її результати є важливими для майбутніх досліджень.

## **2. Структура дисертаційної роботи**

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку посилань і додатку, що містить перелік публікацій здобувача за темою дисертації. Загальний обсяг дисертації становить 146 сторінок.

**Перший розділ** містить досить докладний огляд літератури, присвячений теорії подвійного бета-розпаду та його експериментальним дослідженням. Детально висвітлено теоретичний опис механізмів безнейтринного подвійного бета-розпаду, що передбачає існування нових частинок. Також, детально описані експериментальні методи дослідження подвійного бета-розпаду, та вимоги до високої чутливості таких експериментів. Подано результати експериментів та періоди напіврозпаду нуклідів у яких спостерігається  $2\beta$ -розпад. Наведено обмеження на період напіврозпаду безнейтринного  $2\beta$ -розпаду та ефективну масу майоранівського нейтрино для різних радіонуклідів, отримані з сучасних експериментів.

**Другий розділ** присвячено моделюванням методом Монте-Карло калібрувального джерела  $^{56}\text{Co}$  для експерименту CUPID-Mo. В цьому розділі стисло описано основні передумови та характеристики експерименту CUPID-Mo. Детально обґрунтовано вибір калібрувального джерела  $^{56}\text{Co}$  що характеризується випромінюванням гама-квантів достатньо високих енергій, що є перевагою для цього експерименту. За результатами моделювань методом Монте-Карло автором було визначено найбільш оптимальну конфігурацію розташування джерел  $^{56}\text{Co}$  та їх активності, та показано хорошу узгодженість з експериментальними даними.

В **третьому розділі** розглядаються моделювання радіоактивного фону в установці CUPID-Mo. В розділі детально описано геометрію установки та деталі її реалізації в програмному пакеті Geant4. Наведено список основних джерел радіоактивного фону в установці. Автором було описано проведення детального моделювання геометрії певних елементів установки, що розташовуються поблизу детекторів. Також, було показано, що активності радіоактивних забруднених цих елементів, отримані з результатів апроксимації експериментального спектру детекторів моделями фону, добре узгоджуються з вимірними значеннями.

В **четвертому розділі** дисертації описано експеримент CROSS в якому випробовується нова болометрична технологія по зниженню рівня фону в детекторах на основі кристалів молібдату літію ( $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ ) та оксиду телуру ( $\text{TeO}_2$ ), яка буде використовуватись в майбутніх великомасштабних

експериментах з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду. В розділі описано результати моделювань кріостату установки CROSS з різними конфігураціями детекторів з кристалами оксиду телуру  $\text{TeO}_2$ , молібдату літію  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$  зі збагаченим, збідненим ( $\text{Li}_2^{100\text{depl}}\text{MoO}_4$ ) та природнім складом молібдену  $^{100}\text{Mo}$  і з кристалами вольфрамату кадмію  $\text{CdWO}_4$  з природнім і збагаченим складом кадмію  $^{116}\text{Cd}$ . Наведено вплив радіоактивного забруднення елементів установки CROSS на фон в детекторах в області шуканого ефекту.

### 3. Наукова новизна одержаних результатів

- Розроблено модель енергетичного спектру детекторів  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$  установки CUPID-Mo із калібрувальними джерелами  $^{56}\text{Co}$ , що дозволило визначити оптимальну конфігурацію розташування калібрувальних джерел  $^{56}\text{Co}$  та їх величину активності для використання в проєкті CUPID-Mo.

- Проведено моделювання геометрії елементів в установці CUPID-Mo, що розташовані близько до детекторів та показано узгодженість з вимірними значеннями активності радіоактивних забруднень цих елементів, отриманих з результатів апроксимації експериментального спектру детекторів моделями фону.

- За результатами моделювань методом Монте-Карло, визначено оптимальну конфігурацію калібрувальних джерел для установки CROSS з масивом детекторів  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ .

- Для установки CROSS з різними конфігураціями детекторів з кристалами  $\text{TeO}_2$ ,  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$  зі збагаченим, збідненим ( $\text{Li}_2^{100\text{depl}}\text{MoO}_4$ ) та природнім складом молібдену  $^{100}\text{Mo}$  і з кристалами  $\text{CdWO}_4$  з природнім і збагаченим складом кадмію  $^{116}\text{Cd}$ , було проведено моделювання впливу радіоактивного забруднення елементів установки на фон в області шуканого ефекту.

- Було реалізовано геометрію установки CROSS із додатковим зовнішнім свинцевим захистом та проаналізовано ступінь зниження рівня фону для експериментальних та змодельованих даних.

### 4. Теоретичне та практичне значення одержаних результатів

Результати моделювання методом Монте-Карло калібрувальних джерел  $^{56}\text{Co}$  в установці CUPID-Mo, дозволили визначити найбільш оптимальну активність джерел  $^{56}\text{Co}$  для виробництва для цього експерименту та розташування калібрувальних джерел в експериментальній установці. Окрім цього, модель енергетичного спектру детекторів  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$  установки CUPID-Mo із калібрувальними джерелами  $^{56}\text{Co}$ , було використано для підтвердження точності моделей фону в експерименті CUPID-Mo. Використання калібрувального джерела  $^{56}\text{Co}$  з  $\gamma$ -квантами з високими енергіями є

перспективним у використанні в майбутніх великомасштабних експериментах з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду.

Моделювання методом Монте-Карло радіоактивної забрудненості елементів установки CUPID-Мо було використано в апроксимації експериментального фону. Це дало змогу оцінити рівень фону експерименту CUPID-Мо в області шуканого ефекту, встановити обмеження на період напіврозпаду  $T_{1/2}^{0\nu}$  безнейтринного  $2\beta$ -розпаду ядра  $^{100}\text{Mo}$ , визначити період напіврозпаду нукліду  $^{100}\text{Mo}$  відносно двонейтринного подвійного бета-розпаду на перший збуджений рівень  $0^+$  дочірнього ядра і встановити обмеження для переходів на кілька інших обмежених рівнів ядра  $^{100}\text{Ru}$ , а також виміряти нове значення фактора форми спектру  $2\nu 2\beta$ -розпаду ядра  $^{100}\text{Mo}$ .

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

Дисертаційне дослідження виконане автором самостійно, сформульовані в ньому положення, висновки і результати обґрунтовано на підставі його особистих досліджень і викладено в 7 наукових статтях, які індексуються в міжнародних наукометричних базах даних Scopus та Web of Science, а також 4 тез конференцій, що підтверджують апробацію результатів дисертації. 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.

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

До змісту дисертаційної роботи можна висловити декілька зауважень та запитань:

1. В роботі значна увага приділена використанню сцинтиляційних кристалів в експериментах з пошуку подвійного бета-розпаду, тому наявність відповідного підрозділу в літературному огляді зробило б роботу більш цілісною.

2. Для моделювань різних конфігурацій розташування калібрувальних джерел  $^{56}\text{Co}$  в експерименті CUPID-Мо наведено таблиці із значеннями швидкості лічби в детекторах, проте варто також було б навести та порівняти ці значення для експериментальних вимірювань.

3. Доволі мало описано результати моделювання джерел фону для конфігурації установки CROSS з шістьма детекторами.

4. Моделювання матеріалів активного захисту для проєкту BINGO проведено лише для конфігурації детекторів на основі кристалів оксиду телуру ( $\text{TeO}_2$ ), а не і для молібдату літію ( $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ ), як в інших моделюваннях для цього проєкту.

Загалом наведені зауваження не знижують високий науковий рівень роботи і не заперечують той факт, що дисертаційна робота Зарицького М.М. є самостійною і завершеною науковою працею.

#### 7. Відсутність порушень академічної доброчесності

Порушень академічної доброчесності не зафіксовано при розгляді дисертації та наукових публікацій Зарицького М.М.

#### 8. Загальний висновок та оцінка дисертації

Дисертація виконана на належному методологічному рівні, тема є актуальною, виклад матеріалу логічний і послідовний. Отримані результати вирішують важливі наукові завдання і мають широке практичне застосування. Основні результати викладені в опублікованих працях. Дисертаційна робота Зарицького Миколи Миколайовича «Монте-Карло моделювання для експериментів з пошуку подвійного бета-розпаду» відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними змінами) та «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 №44 від 12 січня 2022 року, а автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент:

Кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
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

М.П.

02 » лютого 2024 року