

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,
доцента кафедри ядерної фізики та високих енергій фізичного факультету
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
Оніщука Юрія Миколайовича
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»

Актуальність обраної теми дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Зарицького М.М. є завершеною науковою працею, що присвячена моделюванням методом Монте-Карло та їх застосуванню в експериментах проєктів CUPID-Mo та CROSS що використовують низькотемпературні сцинтиляційні болметри для дослідження перспективних з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер ^{100}Mo та ^{130}Te .

Моделювання методом Монте-Карло широко використовуються в експериментах в сучасній фізиці елементарних частинок, ядерній, прискорювальній та медичній фізиці. В експериментах з дослідження подвійного бета розпаду, моделювання методом Монте-Карло відіграють важливу роль, зокрема, дозволяють дослідити різні конфігурації експериментальних установок, визначати найбільш оптимальне розташування калібрувальних джерел та допомагають визначити рівень фону від радіоактивної забрудненості елементів установки, що дозволяє підбирати найбільш відповідні умови та конфігурації експериментальних установок.

Дослідження природи нейтрино є однією з найважливіших проблем сучасної фізики елементарних частинок. Відкриття абсолютної маси нейтрино має велике значення для фізики частинок, оскільки підтверджує існування нових фізичних процесів поза межами Стандартної моделі елементарних частинок і взаємодій та вказує на необхідність розширення цієї теорії. Майбутні експерименти з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду, розробка яких активно триває, зокрема, в рамках проєктів CUPID-Mo та CROSS, очікують досягнення необхідного рівня чутливості для дослідження шуканого ефекту, виявлення якого свідчитиме про походження маси нейтрино механізмом Майорани.

Оцінка структури дисертації

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 225 найменувань, 35 рисунків та 22 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 146 сторінок. Дисертація написана послідовно за формально-логічною структурою з дотриманням наукового стилю викладення в ній матеріалів досліджень, наукових положень та висновків. Результати, що наведені в дисертаційній роботі неодноразово доповідалися на міжнародних конференціях та нарадах колаборацій CUPID-Mo та CROSS, що підтверджує їх апробацію.

У *вступі* міститься загальна характеристика роботи та обґрунтування актуальності обраної теми досліджень. Автором сформульована мета та задачі досліджень, розкритий зв'язок роботи з науковими планами, відображена наукова новизна та практична цінність отриманих результатів.

У *першому розділі*, що є літературним оглядом, наведено основні аспекти з теорії подвійного бета-розпаду ядер та викладено результати експериментів з дослідження подвійного бета-розпаду. Наведено обмеження на період напіврозпаду безнейтринного подвійного бета-розпаду та ефективну масу майоранівського нейтрино для різних радіонуклідів, отримані в найбільш чутливих до шуканого ефекту експериментах.

Другий розділ присвячено моделюванням методом Монте-Карло калібрувального джерела ^{56}Co для експерименту CUPID-Mo в якому використовуються болометричні детектори з кристалами молібдату літію $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ для пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ядра ^{100}Mo . Вказано, що джерело ^{56}Co є одним з можливих кандидатів для калібрування детекторів на основі досліджуваного ядра з високим значенням $Q_{2\beta}$. За результатами проведених моделювань визначено найбільш оптимальну конфігурацію розташування та активності калібрувальних джерел ^{56}Co в установці CUPID-Mo. Показано, що моделювання методом Монте-Карло джерел ^{56}Co показують хорошу узгодженість з експериментальними даними.

У третьому розділі описано моделювання радіоактивного фону в експерименті CUPID-Mo, який розділяють на чотири групи: близькі до детекторів джерела, джерела в області кріостату «10 мК», інфраструктурні джерела та зовнішні джерела. Автором було описано моделювання геометрії певних елементів установки CUPID-Mo, що розташовуються близько до детекторів та є джерелами радіоактивного фону в області шуканого ефекту. Показано, що активності радіоактивних забруднень цих елементів, отримані з результатів апроксимації експериментального спектру детекторів моделями фону, добре узгоджуються з виміряними значеннями.

У четвертому розділі міститься опис експерименту CROSS, в якому ведеться розробка нової болометричної технології зі зменшення радіоактивного фону в області шуканого ефекту, що відіграє вирішальне значення для експериментів з пошуку безнейтринного бета-розпаду. За результатами моделювань методом Монте-Карло установки CROSS, дисертантом було визначено оптимальну конфігурацію розташування калібрувальних джерел, проаналізовано ступені зниження фону шляхом додавання додаткового зовнішнього захисту та проведено моделювання впливу радіоактивного забруднення елементів різних конфігурацій установки на фон в області шуканого ефекту.

Наукова новизна одержаних результатів

За результатами наведеними в дисертаційній роботі, сформульовано низку положень і висновків, що містять елементи наукової новизни:

1. За результатами моделювань методом Монте-Карло енергетичного спектру детекторів установки CUPID-Mo із калібрувальними джерелами ^{56}Co , визначено оптимальну конфігурацію розташування та величину активності калібрувальних джерел ^{56}Co для використання в експерименті. Моделювання узгоджуються з експериментальними даними та використовуються для підтвердження точності моделей радіоактивного фону в експерименті CUPID-Mo.

2. З метою побудови моделі радіоактивного фону в експерименті CUPID-Mo, було проведено моделювання геометрії елементів установки, що розташовані в безпосередній близькості до детекторів. Показано узгодженість між вимірними значеннями активності радіоактивних забруднень цих елементів та отриманих з результатів апроксимації експериментального спектру детекторів моделями фону.

3. За результатами моделювань методом Монте-Карло визначено оптимальну конфігурацію калібрувальних джерел в установці CROSS з масивом детекторів $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ розмірами $4.5 \times 4.5 \times 4.5 \text{ см}^3$.

4. Для установки CROSS з різними конфігураціями детекторів з кристалами TeO_2 , $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ зі збагаченим, збідненим ($\text{Li}_2^{100\text{depl}}\text{MoO}_4$) та природним складом молібдену ^{100}Mo і з кристалами CdWO_4 з природним і збагаченим складом кадмію ^{116}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.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів

Результати отримані з моделювань методом Монте-Карло дозволили ефективно провести калібрування детекторів установки CUPID-Mo з використанням джерел ^{56}Co . Використання калібрувального джерела ^{56}Co з γ -квантами високих енергій є перспективним у використанні в майбутніх великомасштабних експериментах з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду.

Моделювання радіоактивного фону в експерименті CUPID-Mo було використано для апроксимації експериментального фону моделями. Використовуючи результати апроксимації експериментального спектра моделями фону, було оцінено рівень фону для шуканого ефекту безнейтринного подвійного бета-розпаду ядра ^{100}Mo в області ± 15 кеВ навколо 3034 кеВ. Цей рівень фону на даний момент є найнижчим значенням, досягнутим в болометричному експерименті з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду.

Завдяки виконаним моделюванням для експерименту CROSS, було показано можливість досягнення дуже низького рівня фону в області шуканого ефекту безнейтринного подвійного бета-розпаду для ядер ^{100}Mo та ^{130}Te , що дозволило планувати великомасштабні експерименти нового покоління для дослідження безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер.

Повнота викладення наукових положень, висновків і результатів в опублікованих працях

Результати досліджень Зарицького М.М. були опубліковані в 11 роботах, що пов'язані з темою дисертації, та внесок дисертанта в яких є помітним: 7 статей у реферованих фахових журналах 1-го та 2-го квартиля та 4 тез конференцій. Положення та висновки, що були наведені в дисертаційній роботі відображаються в основних публікаціях. 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

Загалом, позитивно оцінюючи наукове і практичне значення отриманих дисертантом результатів, варто зазначити наступні дискусійні положення та зауваження до змісту дисертаційної роботи Зарицького М.М. «Монте-Карло моделювання для експериментів з пошуку подвійного бета-розпаду»: окрім порівняння з експериментальними даними результатів моделювань відгуку детекторів CUPID-Mo з калібрувальними джерелами ^{56}Co , варто було б навести отриману калібрувальну криву та криву енергетичної роздільної здатності за результатами калібрування; слід було б детальніше описати проблеми суттєвого рівня радіоактивного фону, що спостерігався в експерименті CUORE, що є причиною розробки експерименту наступного покоління CUPID для пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду; у тексті дисертації зустрічаються стилістичні помилки, зокрема, в деяких місцях відсутні або зайві розділові знаки.

Однак, наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Відповідність дисертації встановленим вимогам

Ознак порушення автором академічної доброчесності, зокрема випадків оприлюднення, частково або повністю, наукових результатів, отриманих іншими особами, як результатів власного дослідження або відтворення опублікованих текстів інших авторів без зазначення їх авторства не виявлено. Дисертаційна робота Зарицького М.М. є самостійним дослідженням здобувача та її оформлення за структурою, стилем, представленням матеріалу та мовою відповідає вимогам оформлення дисертацій, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40.

Загальний висновок

Дисертація Зарицького М.М. «Монте-Карло моделювання для експериментів з пошуку подвійного бета-розпаду», подання на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю «104 Фізика та астрономія» є завершеним дослідженням, яке містить низку нових, актуальних та достовірних результатів. Під час аналізу дисертаційної роботи випадків порушення академічної доброчесності не було виявлено. Дисертаційна робота Зарицького Миколи Миколайовича за актуальністю проблеми, обсягом, повнотою викладу наукових положень, науково-теоретичним та практичним значенням повністю відповідає вимогам п. 6 «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, а дисертант Зарицький Микола Миколайович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю «104 Фізика та астрономія».

Офіційний опонент:

Кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри ядерної фізики та високих енергій
фізичного факультету
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка



Оніщук Ю.М.