

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

РЕЦЕНЗІЯ

доктора фізико-математичних наук,
провідного науковий співробітника
відділу структури ядра ІЯД НАН України
Желтоножського Віктора 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»

Актуальність обраної теми дисертаційної роботи

Дисертаційна робота належить до сфери ядерної фізики та присвячена моделюванням методом Монте-Карло та їх застосуванню в експериментах з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду. Робота містить опис моделювання геометрії елементів експериментальних установок, калібрувальних джерел, впливу на фон від радіоактивних забруднень елементів установок, аналіз змодельованих даних та порівнянні їх з експериментальними даними.

Актуальність теми дисертації визначається декількома ключовими аспектами:

1. Вивчення безнейтринного подвійного бета-розпаду ($0\nu 2\beta$) відіграє важливу роль у сучасній фізиці елементарних частинок. Ця реакція є особливо цікавою, оскільки вона заборонена згідно зі Стандартною Моделлю елементарних частинок. Виявлення $0\nu 2\beta$ -розпаду дасть нам можливість дізнатися більше про природу нейтрино (чи вони є частинками Майорани чи Дірака), їхню масу, тип масових станів (нормальний чи обернений) та

перевірити закон збереження лептонного числа. Найбільш чутливі експерименти дають лише обмеження на період напіврозпаду ядер відносно цього процесу на рівні $\lim T_{1/2} \sim 10^{24} - 10^{26}$ років. Проте майбутні експерименти з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду, розробка яких активно ведеться, очікують досягнення необхідного рівня чутливості для дослідження шуканого ефекту у випадку оберненої схеми масових станів нейтрино. Досягнення чутливості до маси нейтрино на рівні інвертованої схеми масових станів (з метою перевірки цієї схеми) є актуальною задачею для сучасних та майбутніх експериментів.

2. Використання моделювань методом Монте-Карло відіграє суттєву роль в експериментах з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду. Моделювання дозволяють дослідити різні конфігурації експериментальних установок, визначити найбільш оптимальне розташування калібрувальних джерел, визначити рівень фону від радіоактивної забрудненості елементів установки, що дозволяє підбирати найбільш підходящі умови та конфігурації експериментальних установок. Також, змодельовані енергетичні спектри в детекторах від радіоактивного фону елементів установки використовується в побудові загальної моделі фону для опису експериментальних даних.

3. Завдання по зменшенню радіоактивного фону в області шуканого ефекту відіграє вирішальне значення для експериментів з пошуку безнейтринного 2β -розпаду, тому важливою є розробка технологій, які могли б дозволити збільшити чутливість майбутніх експериментів до шуканого ефекту.

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

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків. Загальний обсяг дисертації становить 146 сторінок, що включає 35 рисунків та 22 таблиці. Список використаних джерел складається з 225 найменувань.

У **вступі** викладено обґрунтування вибору теми дослідження, мета і завдання, методи дослідження, наукова новизна отриманих результатів а також особистий внесок здобувача. Подано список наукових конференцій на яких було представлено результати наукової роботи а також список наукових програм та грантів в рамках яких виконувалось дисертаційне дослідження.

У **першому розділі** представлено огляд літератури за темою дослідження. Викладено основні аспекти подвійного бета-розпаду ядер: коротка історична довідка, можливі канали і моди 2β -розпаду, теоретичні та експериментальні

аспекти даного дослідження. Подано залежність спектру випромінюваних електронів під час 2β -розпаду в залежності від різних теоретичних моделей. Представлено теоретичні формули для оцінки періоду напіврозпаду 2β -розпаду, його залежності від ядерно-матричних елементів та ефективної маси майоранівського нейтрино. Також подано експериментальні вимоги та представлені характеристики сучасних експериментів з пошуку 2β -розпаду. Подано результати експериментів та періоди напіврозпаду нуклідів у яких спостерігається 2β -розпад. Наведено обмеження на період напіврозпаду безнейтринного 2β -розпаду та ефективну масу майоранівського нейтрино для різних радіонуклідів, отримані з сучасних експериментів.

У **другому розділі** описано основні характеристики експериментальної установки CUPID-Mo, метою якої є дослідження безнейтринного 2β -розпаду ядра ^{100}Mo . Вказано специфіку вибору калібрувального джерела для подібних експериментів, та показано, що джерело ^{56}Co є одним із можливих кандидатів. Визначено найбільш оптимальну конфігурацію розташування калібрувальних джерел ^{56}Co в установці CUPID-Mo, в якій два джерела з активністю 51 Бк кожне встановлено за мідними деталями установки. Проведено додаткове моделювання з уточненим розташуванням джерел з відповідністю до експериментальних вимірювань. Показано, що моделювання методом Монте-Карло джерел ^{56}Co показують хорошу узгодженість з експериментальними даними.

У **третьому розділі** описано характеристики установки CUPID-Mo із болометричними детекторами з кристалами молібдату літію $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$. Наведено список основних джерел фону в установці та описано деталі моделювання методом Монте-Карло геометрії установки. Проведено детальне моделювання геометрії певних елементів установки CUPID-Mo, що розташовуються в безпосередній близькості 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.

Четвертий розділ дисертації присвячений експерименту CROSS в якому випробовується нова болометрична технологія по зниженню рівня фону в детекторах. В розділі описано результати моделювань кріостату установки CROSS з різними конфігураціями детекторів з кристалами оксиду телуру TeO_2 , молібдату літію Li_2MoO_4 зі збагаченим, збідненим ($\text{Li}_2^{100\text{depl}}\text{MoO}_4$) та природнім

складом молібдену ^{100}Mo і з кристалами вольфрамату кадмію CdWO_4 з природним і збагаченим складом кадмію ^{116}Cd . Наведено вплив радіоактивного забруднення елементів установки CROSS на фон в детекторах в області шуканого ефекту. Проведено моделювання калібрувальних джерел в установці, та показано, яка конфігурація дає найбільш рівномірну швидкість лічби в детекторах.

У **висновках** наводнитися перелік основних наукових результатів, представлений у дисертаційній роботі.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Було досліджено конфігурації розташування калібрувальних джерел ^{56}Co та їх активності, та визначено оптимальну конфігурацію та величину активності для використання в проєкті CUPID-Mo. Розроблено модель енергетичного спектру детекторів $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ установки CUPID-Mo із калібрувальними джерелами ^{56}Co , що узгоджується з експериментальними даними та використовується для підтвердження точності моделей фону в експерименті CUPID-Mo.

2. Було проведено моделювання геометрії елементів в установці CUPID-Mo, що розташовані в безпосередній близькості до детекторів. Показано узгодженість з вимірними значеннями активності радіоактивних забруднень цих елементів, отриманих з результатів апроксимації експериментального спектру детекторів моделями фону.

3. Проведено моделювання методом Монте-Карло установки CROSS з масивом детекторів $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ розмірами $4.5 \times 4.5 \times 4.5 \text{ см}^3$. Досліджено й визначено оптимальну конфігурацію калібрувальних джерел для цієї установки.

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

Калібрування детектора є критичним завданням для експериментів з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду. Використання калібрувального джерела ^{56}Co з γ -квантами з високими енергіями є перспективним у використанні в майбутніх великомасштабних експериментах з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду. На основі результатів моделювань методом Монте-Карло калібрувальних джерел ^{56}Co в установці CUPID-Mo, було визначено активність джерел ^{56}Co для виробництва та розташування калібрувальних джерел в експериментальній установці. Модель енергетичного спектру детекторів $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ установки CUPID-Mo із калібрувальними джерелами ^{56}Co , було використано для підтвердження точності моделей фону в експерименті CUPID-Mo.

Результати моделювань геометрії елементів установки CUPID-Mo, що розташовуються в безпосередній близькості до детекторів, було використано для побудови моделі фону в детекторах $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$. Апроксимацію експериментального фону моделями було використано, для оцінки рівня фону шуканого ефекту $0\nu 2\beta$ -розпаду в області навколо 3034 кеВ. Результати моделювання також були використані для визначення періоду напіврозпаду нукліду ^{100}Mo відносно двонейтринного подвійного бета-розпаду на перший збуджений рівень 0^+ дочірнього ядра та встановити обмеження для переходів на кілька інших обмежених рівнів ядра ^{100}Ru .

Розробка технологій зниження рівня радіоактивного фону в області шуканого ефекту в проєктах CROSS та BINGO відіграє одну з найважливіших ролей у підготовці експериментів наступного покоління з метою дослідження області нормальної схеми масових станів нейтрино. Завдяки виконаним моделюванням показано можливість досягнення дуже низького рівня фону, що дозволило планувати великомасштабні експерименти нового покоління для дослідження безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер.

Повнота викладення наукових положень, висновків і результатів в опублікованих працях

Автор дисертації брав активну участь у наукових конференціях де доповідав про результати своєї роботи. Його зусилля та внесок в дослідження ядерної фізики є помітними та важливими для розвитку цієї наукової галузі. Результати досліджень були опубліковані в 11 роботах: 7 статей у реферованих фахових журналах та 4 тез конференцій. Положення та висновки, що

сформульовані в дисертації, є обґрунтованими на основі особистих досліджень автора та відображаються в основних публікаціях здобувача. 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.

Незважаючи на загальне позитивне враження, до роботи є наступні зауваження та запитання:

1. В частині дисертації присвяченій огляду літератури, слід було б навести більше прикладів 2β -розпадів ядер які було спостережено за допомогою геохімічного та радіохімічного методу дослідження подвійного бета-розпаду.
2. Варто було б навести більш детальніше результати вимірювань в експерименті CUPID-Мо із калібрувальними джерелами ^{56}Co . Чим вони відрізняються в порівнянні зі стандартними калібрувальними джерелами з U/Th рядів?

Висловлені зауваження не знижують високий науковий рівень роботи. Вони є дискусійними і спрямовані, швидше, на окреслення шляхів подальших досліджень, доцільність продовження яких не викликає сумніву.

Відповідність дисертації встановленим вимогам

У дисертаційній роботі Зарицького Миколи Миколайовича та його наукових публікаціях не виявлено порушень академічної доброчесності. Дисертаційна робота 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

Робота виконана на належному рівні, є цілісною і завершеною. Тема дисертації є актуальною, її структура добре продумана, а матеріал викладений логічно і послідовно. Отримані в роботі наукові результати мають важливі наукові завдання, що дозволяють планувати та реалізовувати майбутні великомасштабні експерименти нового покоління для дослідження

безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер. Результати дисертаційної роботи достатньо повно викладені в опублікованих працях. Дисертаційна робота «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 її автор, Зарицький Микола Миколайович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Рецензент:

Провідний науковий співробітник відділу структури ядра
Інституту ядерних досліджень НАН України
доктор фізико-математичних наук

В.О. Желтоножський

Підпис В.О. Желтоножського затверджую
Вчений секретар Інституту ядерних досліджень
НАН України

Н. Л. Дорошко

