

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

кандидата фізико-математичних наук,
старшого наукового співробітника
відділу структури ядра ІЯД НАН України
Хоменкова Володимира Петровича
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 теми дисертації

Дисертаційна робота М.М. Зарицького присвячена моделюванням методом Монте-Карло та їх застосуванню в експериментах CUPID-Mo та CROSS, в яких використовуються болометричні детектори на основі кристалів молібдену літію $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ та оксиду телуру TeO_2 для пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер ^{100}Mo та ^{130}Te .

Вивчення безнейтринного подвійного бета-розпаду відіграє важливу роль у сучасній фізиці елементарних частинок. Ця реакція є особливо цікавою, оскільки вона заборонена згідно зі Стандартною Моделлю елементарних частинок. Виявлення безнейтринного подвійного бета-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. Моделювання методом Монте-Карло відіграють важливу роль в експериментах з пошуку подвійного бета-розпаду, дозволяючи оптимізувати розташування калібрувальних джерел та оцінювати рівень радіоактивного фону. Також,

змодельовані енергетичні спектри в детекторах від радіоактивного фону елементів установки використовується в побудові загальної моделі фону для опису експериментальних даних.

Оцінка структури дисертації та змісту роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку та списку використаних джерел (225 найменувань). Загальний обсяг дисертації становить 146 сторінок (35 рисунків та 22 таблиці).

У **вступі** розкривається обґрунтування обраної теми дослідження, визначаються його мета та завдання, описуються використані методи, вказується наукова новизна отриманих результатів, а також висвітлюється особистий внесок дослідника. Також подається перелік наукових конференцій, де були представлені результати дослідження, та перелік наукових програм і грантів, що фінансували дисертаційне дослідження.

У **першому розділі** надано огляд наукової літератури, присвяченої обраній темі дослідження. Розглянуті ключові аспекти подвійного бета-розпаду, включаючи короткий історичний нарис, можливі моди 2β -розпаду, а також теоретичні та експериментальні аспекти даного процесу. Представлено аналіз залежності спектру випромінюваних електронів під час 2β -розпаду згідно різних теоретичних моделей. Наведено формули для теоретичної оцінки періоду напіврозпаду 2β -розпаду, його залежності від ядерних матричних елементів та ефективної маси майоранівського нейтрино. Також розглянуті експериментальні вимоги та описані характеристики сучасних експериментів щодо вивчення 2β -розпаду. Подані результати експериментів та визначені періоди напіврозпаду для ядер, у яких спостерігається 2β -розпад. Надані обмеження для періоду напіврозпаду безнейтринного 2β -розпаду та ефективної маси майоранівського нейтрино для різних радіонуклідів, отримані з сучасних експериментів.

У **другому розділі** наведено опис основних характеристик експериментальної установки CUPID-Mo, метою якої є дослідження безнейтринного 2β -розпаду ядра ^{100}Mo . Розглянута специфіка вибору калібрувального джерела для подібних експериментів, і підкреслено, що джерело ^{56}Co є одним із потенційних кандидатів. Використовуючи моделювання методом Монте-Карло, визначено оптимальну конфігурацію розташування калібрувальних джерел ^{56}Co в установці CUPID-Mo, де два джерела з активністю 51 Бк кожне розміщено за мідними деталями установки. Проведено додаткове моделювання з уточненим розташуванням джерел,

враховуючи експериментальні вимірювання. Підкреслено, що моделювання методом Монте-Карло для джерела ^{56}Co демонструє хорошу узгодженість із експериментальними даними.

У **третьому розділі** наведено опис деталей установки CUPID-Mo, в якій використовуються болометричні детектори із кристалів молібдату літію $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$. Наведено перелік основних джерел фону у цій установці та описано моделювання геометрії установки в Geant4. Проведено детальне моделювання геометрії певних елементів установки CUPID-Mo, які знаходяться у безпосередній близькості до детекторів та є джерелами радіоактивного фону в області шуканого ефекту. Показано, що активності радіоактивних забруднень цих елементів, отримані шляхом апроксимації експериментального спектру детекторів за допомогою моделей фону, добре узгоджуються із виміряними значеннями.

В **четвертому розділі** дисертації розглядається експеримент CROSS, у якому випробовується нова технологія для зменшення рівня фону в детекторах. У цьому розділі представлені результати моделювань кріостату установки CROSS з різними конфігураціями детекторів, що містять кристали оксиду телуру 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}Mo , а також кристали вольфрамату кадмію CdWO_4 з природнім і збагаченим складом кадмію ^{116}Cd . Наведено вплив радіоактивного забруднення елементів установки CROSS на фон в детекторах в області шуканого ефекту. Також проведено моделювання калібрувальних джерел установки та вказано, яка конфігурація забезпечує найбільш однорідну швидкість лічби в детекторах.

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

Наукова новизна отриманих результатів

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

2. Проведено моделювання геометрії елементів установки CUPID-Mo, що знаходяться в безпосередній близькості до детекторів. Показано, що активності радіоактивних забруднень цих елементів, отримані шляхом апроксимації

експериментального спектру детекторів за допомогою моделей фону, добре узгоджуються із вимірними значеннями.

3. Змодельовано установку CROSS із масивом детекторів $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ та досліджено та визначено оптимальну конфігурацію калібрувальних джерел для цієї установки. Проведено моделювання впливу радіоактивного забруднення елементів установки CROSS на фон в області шуканого ефекту для різних конфігурацій детекторів, що містять кристали оксиду телуру TeO_2 , молібдату літію $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ зі збагаченим, збідненим ($\text{Li}_2^{100\text{depl}}\text{MoO}_4$) та природним складом молібдену ^{100}Mo , а також кристали вольфрамату кадмію CdWO_4 з природним і збагаченим складом кадмію ^{116}Cd . Реалізовано геометрію установки CROSS із додатковим зовнішнім свинцевим захистом та проаналізовано зниження рівня фону для експериментальних та змодельованих даних.

Наукове та практичне значення отриманих результатів. Для експериментів з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду, використання калібрувального джерела ^{56}Co може бути достатньо ефективним, зокрема, для майбутніх великомасштабних експериментів. Розроблену модель енергетичного спектру детекторів установки CUPID-Mo із калібрувальними джерелами ^{56}Co , було використано для підтвердження точності моделей фону в експерименті CUPID-Mo.

Використовуючи результати апроксимації експериментального спектра моделями радіоактивного фону елементів установки CUPID-Mo, було оцінено рівень фону для шуканого ефекту $0\nu 2\beta$ -розпаду ядра ^{100}Mo на рівні $\sim 10^{-3}$ відліків / (кеВ · кг · рік). Також, за цими результатами було встановлено обмеження на період напіврозпаду безнейтринного 2β -розпаду ядра ^{100}Mo : $T_{1/2} > 1.8 \times 10^{24}$ років.

Виконані моделювання впливу радіоактивного забруднення елементів установки CROSS на фон в області шуканого ефекту в різних конфігураціях 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 природним складом молібдену ^{100}Mo і з кристалами вольфрамату кадмію CdWO_4 з природним та збагаченим складом кадмію ^{116}Cd , дозволяють ефективніше планувати майбутні 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. Результати досліджень були опубліковані у 11 роботах: 7 статті у реферованих фахових журналах, які індексуються в наукометричній базі даних SCOPUS, та 4 тези конференцій. Результати сформульовані в дисертації 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.

1. В розділі 3, присвяченому моделюванню фону в експерименті CUPID-Mo, недостатньо детально описано як використовувались моделювання методом Монте-Карло, що зокрема дозволило отримати точне визначення періоду напіврозпаду ядра ^{100}Mo .
2. В розділі 4, слід було б більш повно описано результати моделювання джерел фону для конфігурації установки CROSS з шістьма детекторами.
3. Загалом в тексті присутні деякі стилістичні помилки.

Проте, зроблені зауваження і побажання не впливають на загальний високий науковий рівень дисертації, не піддають сумніву основні наукові результати, отримані автором, їх новизну та практичне значення.

Відповідність дисертації встановленим вимогам

Робота не містить ознак академічного плагіату і відповідає вимогам академічної доброчесності. Дисертаційна робота є самостійним дослідженням здобувача та відповідає вимогам оформлення дисертацій, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40.

Загальний висновок

Дисертація Зарицького Миколи Миколайовича «Монте-Карло моделювання для експериментів з пошуку подвійного бета-розпаду» є самостійним і завершеним науковим дослідженням. Дисертантом отримано нові науково обґрунтовані теоретичні та практичні результати та зроблені відповідні висновки, що дозволяють стверджувати про вирішення автором поставлених у роботі наукових завдань.

Зміст дисертаційної роботи і висвітлені в ній результати дослідження відповідають 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, а її автор, Зарицький Микола Миколайович - заслуговує присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Рецензент:

к.ф.-м.н., с.н.с. відділу структури ядра
Інституту ядерних досліджень
НАН України



В.П.Хоменков

Підпис В.П. Хоменкова засвідчую:

Вчений секретар
Інституту ядерних досліджень
НАН України



Н.Л. Дорошко