

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Інституту ядерних досліджень

НАН України

академік НАН України

В.І. Слісенко

« 8 » грудня



## ВИСНОВОК

Інституту ядерних досліджень НАН України

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Зарицького Миколи Миколайовича на тему:

«Монте-Карло моделювання для експериментів з пошуку подвійного бета-розпаду»,

поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки

за спеціальністю 104 Фізика та астрономія

### Витяг

з протоколу № 734 засідання розширеного наукового семінару відділу фізики лептонів від «8» грудня 2023 року.

**Присутні:** Головуючий на засіданні – зав. ВФЛ ІЯД НАН України к.ф.-м.н., ст.досл. В.В. Кобичев, д.ф.-м.н., проф. Ф.А. Даневич (ВФЛ ІЯД), к.ф.-м.н. Д.В. Касперович (ВФЛ ІЯД), к.ф.-м.н. О.Г. Поліщук (ВФЛ ІЯД), д.ф.-м.н., с.н.с. О.А. Понкратенко (ВФВІ ІЯД), д.ф.-м.н. А.М. Саврасов (ВСЯ ІЯД), к.ф.-м.н., с.н.с. В.І. Третяк (ВФЛ ІЯД), к.ф.-м.н. С.О. Омельченко (ВТЯП ІЯД), д.ф.-м.н., с.н.с. В.В. Давидовський (ВТЯП ІЯД), к.ф.-м.н. Ю.С. Рознюк (ВЯР ІЯД), д.ф.-м.н. В.О. Желтоножський (ВСЯ ІЯД), к.ф.-м.н. В.П. Хоменков (ВСЯ ІЯД), к.ф.-м.н., с.н.с. О.К. Горпинич (ВЯР ІЯД).

Серед присутніх 5 докторів наук і 8 кандидатів наук. З них 13 – фахівці зі спеціальності, з якої виконувалась дисертація.

### Порядок денний:

Обговорення дисертаційного дослідження М.М. Зарицького на тему «Монте-Карло моделювання для експериментів з пошуку подвійного бета-розпаду», поданого на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Науковий керівник – д.ф.-м.н., проф., в.о. головного наукового співробітника Інституту ядерних досліджень НАН України Даневич Федір Анатолійович.

Дисертація виконувалась у відділі фізики лептонів Інституту ядерних досліджень НАН України. Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради Інституту ядерних досліджень НАН України (протокол № 1 від 28.01.2020 року).

### Виступили:

Здобувач М.М. Зарицький представив доповідь за основними положеннями дисертації «Монте-Карло моделювання для експериментів з пошуку подвійного бета-

розпаду», поданої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Після закінчення презентації виступили рецензенти дисертаційної роботи В.О. Желтоножський та В.П. Хоменков, які наголосили на позитивних аспектах дослідження та висловили свої побажання та зауваження.

**Д.ф.-м.н. В.О. Желтоножський:** 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 ( $0\nu2\beta$ ) відіграє важливу роль у сучасній фізиці елементарних частинок. Цей процес є особливо цікавим, оскільки він заборонений в рамках Стандартної Моделі елементарних частинок та взаємодій. Виявлення  $0\nu2\beta$ -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.

2. 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.

3. 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 використовуються в побудові загальної моделі фону для опису експериментальних даних.

4. Завдання зменшення радіоактивного фону в області шуканого ефекту відіграє вирішальне значення для експериментів з пошуку безнейтринного  $2\beta$ -розпаду, тому важливою є розробка методів зниження фону, які дозволять підвищити чутливість майбутніх експериментів до шуканого ефекту.

Калібрування детектора є критичним завданням в експериментах з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер з високою енергією розпаду. Використання калібрувального джерела  $^{56}\text{Co}$  з  $\gamma$ -квантами з високими енергіями є перспективним у майбутніх великомасштабних експериментах з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ядра  $^{100}\text{Mo}$ . На основі результатів моделювань методом Монте-Карло калібрувальних джерел  $^{56}\text{Co}$  в установці CUPID-Mo, було визначено активність джерел  $^{56}\text{Co}$  для виробництва та розташування калібрувальних джерел в експериментальній установці. Результати моделювань 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. 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 в області шуканого ефекту  $0\nu 2\beta$ -розпаду. Результати моделювання також були використані для визначення періоду напіврозпаду нукліду  $^{100}\text{Mo}$  відносно двонейтринного подвійного бета-розпаду на основний та перший збуджений рівень  $0^+$  дочірнього ядра та встановлення обмеження для переходів на кілька вищих збуджених рівнів ядра  $^{100}\text{Ru}$ . Розробка технологій зниження рівня радіоактивного фону в проєкті CROSS відіграє дуже важливу роль 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  $^{100}\text{Mo}$  та  $^{130}\text{Te}$ .

Дисертаційна робота є цінним внеском у вивчення процесів подвійного бета-розпаду та вдосконалення методів експериментальних досліджень у цій області. Результати досліджень мають важливе наукове значення та можуть бути корисними для подальших досліджень у ядерній фізиці. Але є зауваження стосовно оформлення рисунків в дисертаційній роботі, які мають бути виконані українською мовою (зараз у дисертації є підписи англійською мовою).

**К.ф.-м.н. В.П. Хоменков:** 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 та оксиду телуру для пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер  $^{100}\text{Mo}$  та  $^{130}\text{Te}$ .

Вивчення безнейтринного подвійного бета-розпаду відіграє важливу роль у сучасній фізиці елементарних частинок. Ця розпад є особливо цікавим для перевірки Стандартної Моделі елементарних частинок, оскільки він заборонений в рамках цієї моделі. Спостереження  $0\nu 2\beta$ -розпаду дасть нам можливість дізнатися більше про природу нейтрино (чи вони є частинками Майорани чи Дірака), масу та схему масових станів (нормальна чи обернена). Розпад порушує закон збереження лептонного числа, а отже дає можливість перевірити цей закон. Моделювання методом Монте-Карло відіграють суттєву роль в експериментах, в яких досліджується подвійний бета-розпад, оскільки дозволяє оптимізувати розташування калібрувальних джерел та оцінювати рівень радіоактивного фону. Також, змодельовані енергетичні спектри від джерел радіоактивного фону елементів установки використовуються в побудові моделі фону для опису експериментальних даних.

Дисертант виконав велику і важливу роботу, результати якої опубліковані провідних журналах та заслуговує на присудження звання доктора філософії. Однак є одне суттєве зауваження до роботи. Обсяг роботи може не відповідати існуючим вимогам до дисертаційного дослідження, беручи до уваги усі рисунки та таблиці, що наведені в роботі. Необхідно звернути на ці деталі увагу та відповідно розширити текст дисертаційної роботи.

Після виступів рецензентів виступив науковий керівник – д.ф.-м.н., проф. **Ф.А. Даневич**.

Керівник: Перед М.М. Зарицьким було поставлено кілька складних і важливих задач, від яких залежали успішна підготовка, проведення та аналіз даних експериментів з метою дослідження подвійного бета-розпаду: оптимізація умов проведення калібрувальних вимірювань з джерелом  $^{56}\text{Co}$  в установці CUPID-Mo (призначеній для дослідження двонейтринного та пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ядра  $^{100}\text{Mo}$ ), розрахунки кількох важливих джерел фону у цій установці (що було критично важливо для визначення періоду напіврозпаду цього ядра відносно двонейтринного подвійного бета-розпаду на основний та збуджені рівні дочірнього ядра та пошуку безнейтринної моди розпаду), моделювання різних джерел фону в установці CROSS для покращення її фонових характеристик, оцінки можливості досягнення безпрецедентно низького фону болометричних сцинтиляційних детекторів на основі кристалів молібдату літію та оксиду телуру для пошуку подвійного бета-розпаду ядер  $^{100}\text{Mo}$  та  $^{130}\text{Te}$  з чутливістю, що відповідає нормальній схемі масових станів нейтрино.

З усіма цими задачами Микола успішно справився. Результати його роботи дозволили виконати підготовку джерел  $^{56}\text{Co}$ , провести калібрувальні вимірювання з цими джерелами в установці CUPID-Mo, виконати перевірку результатів моделювання, порівнявши експериментальні дані з моделями.

Виконані моделювання відгуку установки CUPID-Mo до кількох важливих джерел фону дозволили успішно побудувати модель фону в експерименті з 20-ма детекторами молібдату літію, виготовленими з молібдену, збагаченого ізотопом молібдену-100. Результати роботи Зарицького були використані також для визначення значення періоду напіврозпаду та форми бета-спектру двонейтринної моди подвійного бета-розпаду ядра  $^{100}\text{Mo}$  (найточніше вимірювання серед усіх виконаних на цей час для усіх ядер), побудувати модель фону в області безнейтринного подвійного бета-розпаду цього ядра і отримати одне з найбільш жорстких обмежень на масу нейтрино Майорани. Результати моделювання також були використані для визначення періоду напіврозпаду нукліду  $^{100}\text{Mo}$  відносно двонейтринного подвійного бета-розпаду на перший збуджений рівень  $0^+$  дочірнього ядра та дозволити встановити обмеження на переходи на кілька інших збуджених рівнів ядра  $^{100}\text{Ru}$ . Завдяки виконаним моделюванням показано можливість досягнення дуже низького рівня фону  $10^{-5}$  відліків / (рік кеВ кг), що дозволило планувати великомасштабні експерименти нового покоління для дослідження безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер  $^{100}\text{Mo}$  та  $^{130}\text{Te}$  на рівні чутливості до маси нейтрино  $\sim 0.005 - 0.01$  еВ, що відповідає нормальній схемі масових станів нейтрино.

Завдяки успішному виконанню поставлених перед ним задач, Микола увійшов до складу кількох міжнародних колаборацій з пошуку подвійного бета-розпаду: CUPID, CUPID-Mo, CROSS, BINGO. Він доповідав результати Монте-Карло моделювання джерела  $^{56}\text{Co}$  на конференції “Neutrino”, фактично найбільш престижній конференції з фізики нейтрино, та ще на кількох конференціях та нарадах колаборацій. Результати роботи М.М. Зарицького опубліковані у журналах найвищого рівня, серед яких Physical Review Letters (2 статті), European Physical Journal C (2 статті), Physical Review C, Sensors (усі журнали – у 1-му квартилі).

Таким чином, М.М. Зарицький успішно виконав індивідуальні плани наукової та

навчальної роботи, продемонстрував високу кваліфікацію в галузі фізики, математики, застосуванні програмних методів, достатньо вільно володіє англійською мовою, підготовлена ним дисертація повністю готова до захисту.

Після виступу наукового керівника присутніми на захисті фахівцями були поставлені наступні запитання, зауваження і коментарі по суті дисертації:

**Д.ф.-м.н. В.В. Давидовський:** Де проводились описані в дисертаційній роботі експерименти? Чи брав безпосередньо участь дисертант в побудові експериментальних установок, окрім розробки моделювань та обробки результатів? Чи проводились незалежні моделювання для підтвердження результатів наведених дисертантом?

**М.М. Зарицький:** Описані в дисертаційній роботі експерименти проводяться за кордоном. Експеримент із установкою CUPID-Мо знаходився в підземній лабораторії Модан (Франція). Установа CROSS розташовується в підземній лабораторії Канфранк (Іспанія). Дисертант безпосередньої участі в побудові експериментальних установок не приймав, проте їздив у відрядження у Францію, знайомився з цими експериментами, брав участь у нарадах колаборацій.

Стосовно підтвердження результатів моделювань. Окрім дисертанта, над розробкою моделювань для експерименту CUPID-Мо також брали участь інші фахівці. Для проєкту CROSS усі моделювання було проведено дисертантом самостійно. Ці напрацювання також активно використовуються в подібних проєктах. Певні розрахунки для експериментів CROSS та BINGO також проводились іншими фахівцями, що узгоджуються з результатами дисертанта.

**К.ф.-м.н. С.О. Омельченко:** Чи є вірним те, що період напіврозпаду безнейтринного подвійного бета-розпаду обернено пропорційний ефективній майоранівській масі нейтрино?

**М.М. Зарицький:** Вірно, період напіврозпаду безнейтринного подвійного бета-розпаду обернено пропорційний квадрату ефективної майоранівської маси нейтрино. Сучасні експерименти лише встановлюють обмеження на період напіврозпаду безнейтринного подвійного бета-розпаду. 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 сучасних та майбутніх експериментів, у тому числі проєкту CUPID, у якому група з ІЯД НАНУ приймає участь.

В обговоренні дисертаційного дослідження взяли участь:

**К.ф.-м.н., с.н.с. В.І. Третяк:** Наголошено на важливість проведення моделювань рівня фону від радіоактивної забрудненості навіть найдрібніших елементів установок, що може впливати на успішність проведення описаних в дисертаційній роботі довготривалих експериментів.

**К.ф.-м.н., ст.досл. В.В. Кобичев:** Як фахівець, що безпосередньо брав участь в нарадах колаборацій CUPID-Мо та CROSS разом із М.М. Зарицьким, зазначив, що дисертант продемонстрував високу кваліфікацію в галузі фізики, математики,

застосуванні програмних методів та достатньо вільно володіє англійською мовою, що є необхідним в роботі в міжнародних колабораціях.

## ВИСНОВОК

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації  
Зарицького Миколи Миколайовича на тему «Монте-Карло моделювання для  
експериментів з пошуку подвійного бета-розпаду», поданої на здобуття ступеня  
доктора філософії за спеціальністю 104 Фізика та астрономія**

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Дослідження природи нейтрино є однією з найважливіших проблем сучасної фізики елементарних частинок. Дослідження їх властивостей, маси, спіну, природи (частинка Дірака чи Майорани?) має вирішальне значення для розуміння фундаментальних принципів Всесвіту. Зокрема, майоранівська природа нейтрино здатна пояснити природу асиметрії поширення матерії та антиматерії. Згідно Стандартної моделі елементарних частинок, нейтрино має нульову масу, проте результати сучасних експериментів, в яких спостерігаються осциляції нейтрино, вказують на те, що нейтрино мають масу, хоча вони і не здатні її визначити, оскільки вимірюють лише різницю квадратів масових станів нейтрино. Тому, визначення абсолютної маси нейтрино має велике значення для розвитку фізики елементарних частинок. Загалом, безнейтринний подвійний бета-розпад є одним із шляхів перевірки Стандартної моделі елементарних частинок і взаємодій.

Ряд провідних теоретичних моделей передбачають вирішення проблеми походження маси нейтрино механізмом Майорани, в рамках якого нейтрино та антинейтрино є своїми власними античастинками. З цього випливає наявність процесу безнейтринного подвійного бета-розпаду за схемою  $(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e$ , коли відбувається порушення закону збереження лептонного числа, що виходить за рамки Стандартної моделі елементарних частинок. 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. Це можливо за рахунок досягнення високої ефективності реєстрації, збільшення концентрацій ізотопів та маси досліджуваних зразків, великого часу вимірювання, високої енергетичної здатності, а головне – шляхом зменшення рівня радіоактивного фону в області шуканого ефекту на енергії розпаду  $Q_{2\beta}$  досліджуваного ядра.

Використання моделювань методом Монте-Карло відіграє суттєву роль в експериментах з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду. Моделювання дозволяють дослідити різні конфігурації експериментальних установок та визначити найбільш оптимальне розташування калібрувальних джерел в експериментальних установках. Оскільки в подібних експериментах критичну роль відіграє рівень радіоактивного фону в області шуканого ефекту, моделювання допомагають 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 і отриманні фізичних результатів: вимірюванні періодів напіврозпаду, визначенні форми бета-спектрів, встановленні обмежень на гіпотетичні канали розпаду.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.** Дослідження, представлені в дисертаційній роботі, виконувалися в рамках кількох держбюджетних тем, науково-дослідних робіт за додатковими цільовими темами та робіт по міжнародним угодам, співвиконавцем яких був автор:

1. Науково-технічна робота «Розробка болометричних експериментів для пошуку подвійного бета-розпаду» (Державний реєстраційний номер 0121U111684). Місце виконання: Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України.
2. Науково-технічна робота «Дослідження властивостей елементарних частинок і пошуки ефектів за межами Стандартної моделі елементарних частинок методами низькофонові ядерної спектрометрії» (Державний реєстраційний номер 0122U002390). Місце виконання: Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України.
3. Науково-технічна робота «Подвійний бета-розпад атомних ядер» (Державний реєстраційний номер 0120U104845). Місце виконання: Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України.

**Мета і завдання дослідження** полягали в моделюванні методом Монте-Карло та їх застосуванні 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  $\text{TeO}_2$  для пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер  $^{100}\text{Mo}$  та  $^{130}\text{Te}$ .

**Об'єкт дослідження:** калібрувальні джерела в експериментах з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду; низькофонові установки для дослідження подвійного бета-розпаду; фон в детекторах від радіоактивної забрудненості елементів низькофонових установок.

**Предмет дослідження:** моделювання методом Монте-Карло джерел  $^{56}\text{Co}$  для енергетичного калібрування детекторів  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$  установки CUPID-Mo та перевірки точності моделей фону, розробка моделей радіоактивного фону від елементів установки CUPID-Mo, моделювання методом Монте-Карло для проектів CROSS та BINGO з метою розробки методів зниження рівня радіоактивного фону в детекторах  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$  та  $\text{TeO}_2$  в області дослідження безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер  $^{100}\text{Mo}$  та  $^{130}\text{Te}$  відповідно.

**Методи дослідження.** У роботі використовувався метод Монте-Карло для моделювань відгуку детекторів до радіоактивного випромінювання. Достовірність результатів забезпечується використанням програмних пакетів Geant4 для моделювань методом Монте-Карло та ROOT для обробки даних результатів досліджень. Ці програмні пакети широко використовуються в експериментах в сучасній фізиці елементарних частинок, ядерній, прискорювальній та медичній фізиці.

**Наукова новизна дослідження:**

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

2. Було проведено моделювання відгуку детекторів установки CUPID-Mo до радіоактивної забрудненості деталей установки, розташованих у безпосередній близькості до детекторів. Показано узгодженість з виміряними іншими методами значеннями активностей 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  $\text{TeO}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  (як збагачених ізотопом молібдену-100, так і збіднених на цей ізотоп) та  $\text{CdWO}_4$  (з природним складом ізотопів кадмію і збагачених ізотопом  $^{116}\text{Cd}$ ) 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 рівнів фону для різних детекторів.

#### **Теоретичне та практичне значення отриманих результатів.**

Калібрування детектора є критичним завданням для експериментів з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду. Оскільки, значення енергії розпаду  $Q_{2\beta}$  для ядра  $^{100}\text{Mo}$ , 3034 кеВ, є вищим за енергію характерної гамма-лінії 2615 кеВ ядра  $^{208}\text{Tl}$ , то виникає проблема для калібрування детектора, оскільки більшість гамма-ліній зі стандартних джерел калібрування, таких як  $^{232}\text{Th}$  або  $^{238}\text{U}$ , є нижчими за  $Q_{2\beta}$ . Джерело  $^{56}\text{Co}$  є перспективним калібрувальним джерелом із декількома інтенсивними піками  $\gamma$ -квантів вище 3 МеВ, яке можна створити відносно просто та використовувати в подібних експериментах. На основі результатів моделювань методом Монте-Карло калібрувальних джерел  $^{56}\text{Co}$  в установці CUPID-Mo, було визначено активність джерел  $^{56}\text{Co}$  для виробництва та розроблені рекомендації щодо розташування калібрувальних джерел в експериментальній установці. Також, результати 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.

Результати моделювань геометрії стабілізуючих пружин та латунних гвинтів в установці CUPID-Mo 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  $\pm 15$  кеВ навколо значення енергії розпаду ядра  $^{100}\text{M}$ :  $Q_{2\beta} = 3034$  кеВ. За результатами розрахунків було отримано рівень фону:  $b = 2.7_{-0.6}^{+0.7}(\text{стат})_{-0.5}^{+1.1}(\text{сист}) \times 10^{-3}$  відліків / (кеВ кг рік). Це значення є



найнижчим досягнутим в болометричному експерименті з пошуку  $0\nu 2\beta$ -розпаду. Також, завдяки виконаним моделюванням було отримано нове найбільш жорстке обмеження на  $0\nu 2\beta$ -розпад ядра  $^{100}\text{Mo}$  на рівні  $T_{1/2} > 1.8 \times 10^{24}$  років, звідки розраховано обмеження на ефективну масу нейтрино Майорани  $\langle m_{\beta\beta} \rangle < (0.28-0.49)$  eВ.

Розробка методів зниження рівня радіоактивного фону в області шуканого ефекту в проєктах CROSS та BINGO відіграє важливу роль у підготовці експериментів наступного покоління з метою дослідження області нормальної схеми масових станів нейтрино. Використання детекторів з молібдату літію становить великий інтерес для досліджень подвійного бета-розпаду ядра  $^{100}\text{Mo}$ , пошуку аксіонів з  $^7\text{Li}$  та взаємодії спін-залежних частинок темної матерії на ядрах  $^7\text{Li}$ , нейтронної спектроскопії на основі  $^6\text{Li}$  та контролю фону від  $\gamma(\beta)$ -частинок в експериментах при низьких температурах і низькому рівні фону. В рамках проєктів CROSS та BINGO досліджено технології зниження рівня радіоактивного фону з метою покращення чутливості в області дослідження безнейтринного подвійного бета-розпаду. Результати моделювання методом Монте-Карло для проєктів CROSS та BINGO активно використовуються на різних етапах розробки експериментів, та дозволяють перевіряти та оцінювати вплив радіоактивної забрудненості елементів установки на фон в детекторах.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертантом було розроблено модель калібрувальних джерел  $^{56}\text{Co}$  в установці CUPID-Mo використовуючи програмний код змодельованої установки CUPID-Mo із детекторами  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$  на основі моделі експерименту EDELWEISS. Використовуючи ці розробки, автором дисертації було отримано енергетичні спектри відгуку детекторів  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$  для різних конфігурацій розташування та калібрувальних джерел  $^{56}\text{Co}$  та вказано найбільш оптимальну. Також, після проведення енергетичного калібрування з джерелами  $^{56}\text{Co}$ , дисертантом було проведено моделювання методом Монте-Карло уточненого розташування калібрувальних джерел  $^{56}\text{Co}$  у відповідності до експериментального розташування. Автором дисертації було розроблено детальну геометрію елементів установки CUPID-Mo використовуючи програмний код змодельованої установки CUPID-Mo із детекторами  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$  на основі моделі експерименту EDELWEISS. Всі моделювання методом Монте-Карло для установки CROSS було проведено дисертантом особисто.

Використані в дисертації ідеї, положення чи гіпотези інших авторів мають відповідні посилання і використані лише для підкріплення ідей здобувача.

**Апробація результатів дослідження.** Результати, викладені у дисертації, доповідалися на наступних конференціях, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. 27-а Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, 21-25.09.2020, Київ, Україна;
2. Постерна доповідь на International Conference Neutrino 2020, 22.06-02.07.2020, онлайн;
3. 28-а Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, 27.09-01.10.2021, Київ, Україна;
4. Постерна доповідь на International Conference Neutrino 2022, 30.05-04.06.2022, Seoul, Korea (онлайн);
5. 29-а Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, 26.09-30.09.2022, Київ, Україна;

6. 30-а Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, 25.09-29.09.2023, Київ, Україна;

7. Наради колаборацій CUPID-Mo, CROSS та BINGO

**Публікації.** За результатами дослідження опубліковано 7 наукових праць у виданнях, що проіндексовані в базі даних Scopus та/або Web of Science Core Collection.

**Список опублікованих праць, в яких опубліковано головні результати дисертації:**

1. E. Armengaud, ...M. Zarytskyu, et al, «New Limit for Neutrinoless Double-Beta Decay of  $^{100}\text{Mo}$  from the CUPID-Mo Experiment», *Physical Review Letters*, vol 126, 181802, 2021, **Q1** (моделювання радіоактивного фону від елементів установки навколо детекторів).

2. C. Augier, ...M. Zarytskyu, et al, «Final results on the  $0\nu\beta\beta$  decay half-life limit of  $^{100}\text{Mo}$  from the CUPID-Mo experiment», *European Physical Journal C*, vol. 82, 1033, 2022, **Q1** (використовуються розроблені моделі фону від елементів установки навколо детекторів).

3. C. Augier, ...M. Zarytskyu, et al, «The background model of the CUPID-Mo experiment», *European Physical Journal C*, vol. 83, 675, 2023, **Q1** (розробка моделей методом Монте-Карло елементів установки навколо детекторів з метою побудови моделі фону експерименту, моделювання калібрувального джерела  $^{56}\text{Co}$ ).

4. C. Augier, ...M. Zarytskyu, et al, «New measurement of double beta decays of  $^{100}\text{Mo}$  to excited states of  $^{100}\text{Ru}$  with the CUPID-Mo experiment», *Physical Review C*, vol 107, 025503, 2023, **Q1** (використовуються розроблені моделі фону від елементів установки навколо детекторів).

5. C. Augier, ...M. Zarytskyu, et al, «Measurement of the decay rate and spectral shape of  $^{100}\text{Mo}$  from the CUPID-Mo experiment», *Physical Review Letters*, vol 131, 162501, 2023, **Q1** (використовуються розроблені моделі фону експерименту).

6. I.C. Baudac, ...M. Zarytskyu, et al, « $\text{Li}_2^{100\text{depl}}\text{MoO}_4$  Scintillating Bolometers for Rare-Event Search Experiments», *Sensors* 23, no. 12: 5465, 2023, **Q1** (використовуються моделювання фону в установці CROSS із детекторами  $\text{Li}_2^{100\text{depl}}\text{MoO}_4$ ).

7. A. Ahmine, ...M. Zarytskyu, et al, «Test of  $^{116}\text{CdWO}_4$  and  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  scintillating bolometers in the CROSS underground facility with upgraded detector suspension», *Journal of Instrumentation*, 18 P12004, 2023, **Q2** (використовуються моделювання фону в установці CROSS із детекторами  $^{116}\text{CdWO}_4$  and  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ ).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 225 найменувань (на 30 сторінок), 35 рисунків, 22 таблиці. Загальний обсяг дисертації становить 146 сторінок (з них основного тексту 98 сторінок).

**Характеристика особистості здобувача.** Дисертант має високу кваліфікацію в галузі фізики, математики, застосуванні програмних методів, достатньо вільно володіє англійською мовою.

**Оцінка мови та стилю дисертації.** Дисертація виконана фаховою українською мовою, текстове подання матеріалу відповідає стилю науково-дослідної літератури.

**Рецензенти рекомендують:** відповідно до п.15 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, *пропонується такий склад разової ради:*

**Голова ради:**

**Понкратенко Олег Анатолійович**, доктор фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), завідувач відділу фізики важких іонів ІЯД;

**Рецензенти:**

**Желтоножський Віктор Олександрович**, доктор фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), провідний науковий співробітник відділу структури ядра ІЯД.

**Хоменков Володимир Петрович**, кандидат фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), завідувач відділу структури ядра ІЯД;

**Офіційні опоненти:**

**Онішук Юрій Миколайович**, кандидат фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), доцент кафедри ядерної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

**Раткевич Сергій Станіславович**, кандидат фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), провідний науковий співробітник кафедри фізики ядра та високих енергій імені О. І. Ахієзера, ННІ «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

У результаті попередньої експертизи дисертації Зарицького Миколи Миколайовича і повноти публікації основних результатів дослідження

**УХВАЛЕНО:**

1. Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Зарицького Миколи Миколайовича на тему: «Монте-Карло моделювання для експериментів з пошуку подвійного бета-розпаду».

2. Констатувати, що за актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація М.М. Зарицького відповідає спеціальності 104 Фізика та астрономія та вимогам **Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)**, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261, пп. 6, 7, 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 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

3. Рекомендувати дисертацію М.М. Зарицького на тему: «Монте-Карло моделювання для експериментів з пошуку подвійного бета-розпаду» до захисту на

здобуття ступеня доктора філософії у разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

4. Рекомендувати вченій раді Інституту ядерних досліджень затвердити склад разової спеціалізованої вченої ради:

**Голова ради:**

**Понкратенко Олег Анатолійович**, доктор фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), завідувач відділу фізики важких іонів ІЯД;

**Рецензенти:**

**Желтоножський Віктор Олександрович**, доктор фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), провідний науковий співробітник відділу структури ядра ІЯД.

**Хоменков Володимир Петрович**, кандидат фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), завідувач відділу структури ядра ІЯД;

**Офіційні опоненти:**

**Оніщук Юрій Миколайович**, кандидат фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), доцент кафедри ядерної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

**Раткевич Сергій Станіславович**, кандидат фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), провідний науковий співробітник кафедри фізики ядра та високих енергій імені О. І. Ахієзера, ННІ «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Результати голосування щодо рекомендації до захисту дисертації М.М. Зарицького:

«За» – 13;

«Проти» – немає;

«Утримались» – немає.

Презентація Зарицького Миколи Миколайовича на 33 стор. додається.

**Голова семінару**

зав. відділом фізики  
лептонів ІЯД НАН України  
к.ф.-м.н., ст.досл.

  
В.В. Кобичев

**Секретар семінару**

к.ф.-м.н., ст. наук. сп.

  
В.І. Третяк

**Учений секретар**  
ІЯД НАН України

  
Н. Л. Дорошко

