

Облікова картка дисертації

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0823U102045

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 28-12-2023

Статус: Наказ про видачу диплома

Реквізити наказу МОН / наказу закладу: №46-к від 11.03.2024р.



II. Відомості про здобувача

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Зарицький Микола Миколайович

2. Mykola M. Zarytskyi

Кваліфікація:

Ідентифікатор ORCID ID: Не застосовується

Вид дисертації: доктор філософії

Аспірантура/Докторантура: так

Шифр наукової спеціальності: 104

Назва наукової спеціальності: Фізика та астрономія

Галузь / галузі знань: природничі науки

Освітньо-наукова програма зі спеціальності: ОП 47753 Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу

Дата захисту: 20-02-2024

Спеціальність за освітою: фізика та астрономія

Місце роботи здобувача: Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 23724640

Місцезнаходження: проспект Науки, буд. 47, Київ, 03028, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

III. Відомості про організацію, де відбувся захист

Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради): ID 4112

Повне найменування юридичної особи: Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 23724640

Місцезнаходження: проспект Науки, буд. 47, Київ, 03028, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію

Повне найменування юридичної особи: Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 23724640

Місцезнаходження: проспект Науки, буд. 47, Київ, 03028, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

V. Відомості про дисертацію

Мова дисертації: Українська

Коди тематичних рубрик: 29.15.15

Тема дисертації:

1. Монте-Карло моделювання для експериментів з пошуку подвійного бета-розпаду
2. Monte Carlo simulations for the double beta decay experiments

Реферат:

1. Дисертаційна робота присвячена моделюванням методом Монте-Карло та їх застосуванню в експериментах проектів CUPID-Mo, CROSS та BINGO, що використовують низькотемпературні сцинтиляційні болометри для дослідження перспективних з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер ^{100}Mo та ^{130}Te . Для проекту CUPID-Mo було проведено моделювання методом Монте-Карло з метою визначення оптимальної кількості калібрувальних джерел ^{56}Co , їх активності та місця розташування навколо екрану "300 К" всередині кріостату з 20 детекторами на основі кристалів молібдату літію $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$. Конфігурація обиралась з урахуванням вимоги щодо найвищої частоти реєстрації для високоенергетичних гамма-квантів ^{56}Co в околі піку 3253 кеВ (для області шуканого ефекту з енергією розпаду $Q_{2\beta}=3034$ кеВ), забезпечення якнайбільше рівномірної швидкості лічби в усіх детекторів, не перевищуючи значення в окремому детекторі ~ 0.17 Гц. За результатами моделювань було показано, що найбільш оптимальною є конфігурація

розташування двох джерел ^{56}Co , де джерела розміщені за мідними деталями установки. У середньому швидкість лічби в детекторах у цій конфігурації складає 2.6×10^{-3} подій на розпад зі стандартним відхиленням 0.4×10^{-3} подій на розпад. За умов обмеження на загальну швидкість лічби, при активності кожного джерела в 51 Бк очікувалась би реєстрація 19 подій на тиждень в області піку з енергією 3253 кеВ для детектора з найнижчою швидкістю лічби. Після проведення енергетичного калібрування впродовж 19 днів з двома джерелами ^{56}Co , було змодельовано конфігурацію з уточненим розташуванням джерел з відповідністю до експериментальних вимірювань. Було показано, що моделювання методом Монте-Карло джерел ^{56}Co показують хорошу узгодженість в апроксимації експериментальних даних в діапазоні енергій від 200 до 4000 кеВ. Було проведено детальне моделювання геометрії певних елементів установки CUPID-Mo, що розташовуються близько до детекторів та є джерелами радіоактивного фону в області шуканого ефекту. Активності радіоактивних забруднень стабілізаційних пружин та латунних гвинтів в мідних ґратках, отримані з результатів апроксимації експериментального спектра детекторів моделями фону, добре узгоджуються з виміряними значеннями, та відповідають значенням активності для радіонукліда ^{228}Th : 20 ± 5 мБк / кг (виміряне значення 21 ± 5 мБк / кг) для стабілізаційних пружин та 3.5 ± 0.9 мБк / кг (виміряне значення < 18 мБк / кг) для латунних гвинтів. Проведено моделювання методом Монте-Карло кріостату установки CROSS з масивом зі 144 детекторів $\text{Li}^{2100}\text{MoO}_4$ розміром $45 \times 45 \times 45$ мм³. З метою оптимізації калібрування показано, що конфігурація з чотирма калібрувальними джерелами ^{208}Tl , ^{228}Ac , ^{212}Bi та ^{212}Pb довжиною по 70 см, дає найбільш рівномірну швидкість лічби в детекторах. Також для цієї конфігурації детекторів було проведено моделювання впливу радіоактивного забруднення елементів установки радіонуклідами ^{214}Bi та ^{208}Tl на фон в області шуканого ефекту. Вплив радіоактивного забруднення радіонуклідом ^{208}Tl на фон в детекторах $\text{Li}^{2100}\text{MoO}_4$ та оксиду телуру TeO_2 відповідно має наступні значення: $< 4.5 \times 10^{-5}$ та $< 1.7 \times 10^{-4}$ відліків / (кеВ кг рік) для тримачів з міді марки NOSV з активністю < 4.3 мБк / кг, $8(3) \times 10^{-5}$ та $1.51(6) \times 10^{-3}$ відліків / (кеВ кг рік) для частини мідного екрана з активністю $0.3(1)$ мБк / кг, $< 1.2 \times 10^{-8}$ та $1(2) \times 10^{-6}$ відліків / (кеВ кг рік) для низькотемпературних кабелів з активністю $5(6)$ мБк / кг, а також $< 3 \times 10^{-6}$ та $2.2(1) \times 10^{-4}$ відліків / (кеВ кг рік) для колон зі склопластику з активністю $1.41(5)$ Бк / кг. За результатами моделювань показано, що рівень фону в області шуканого ефекту є задовільним для поставлених цілей експерименту CROSS. Було реалізовано геометрію установки CROSS з додатковим зовнішнім свинцевим захистом. Порівняно ступінь зниження рівня фону від додаткового зовнішнього захисту в області піку природної радіоактивності при енергії 2615 кеВ для експериментальних та змодельованих даних: в 5.5 та 29(8) разів для детектора $\text{Li}^{2100}\text{MoO}_4$, в 4.6(1) та 48(6) разів для детектора TeO_2 , а також у 7.8 та 13.9(7) разів для детектора на основі кристала вольфрамату кадмію CdWO_4 . Розбіжність ступеня зниження рівня фону для експериментальних та змодельованих даних вказує на наявність радіоактивних забруднень елементів установки всередині свинцевого захисту. Також було змодельовано геометрію установки CROSS з кристалами молібдату літію $\text{Li}^{2100}\text{MoO}_4$ зі збагаченим, збідненим на ізотоп молібдену-100 ($\text{Li}^{2100}\text{deplMoO}_4$) та природним складом молібдену 100Mo і кристали CdWO_4 з кадмію з природним складом ізотопів та збагаченого ізотопом ^{116}Cd . Було змодельовано фон в детекторах від радіоактивного радону між екранами та свинцевим захистом, свинцевого захисту, мідних тримачів детекторів, мідного екрана та зовнішнього фону в установці CROSS. Було проведено моделювання з метою дослідження впливу радіоактивного фону від елементів, що виконують роль тримачів детекторів $\text{Li}^{2100}\text{MoO}_4$ та TeO_2 в установці з мінімізованою кількістю матеріалів.

2. Qualifying scientific work on the rights of a manuscript. The thesis for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy by specialization 104 – physics and astronomy – Institute for Nuclear Research, The National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2023. The results of the Monte Carlo simulations for the CUPID-Mo, CROSS, and BINGO experiments, which use low-temperature scintillation bolometers to study promising 100Mo and 130Te nuclei to search for neutrinoless double beta decay. Monte Carlo simulations were performed for the CUPID-Mo experiment to find an optimal number of ^{56}Co calibration sources, activity, and position around the «300 K» screen in the cryostat with 20 $\text{Li}^{2100}\text{MoO}_4$ detectors. The configuration was chosen considering the requirement for the highest rate of high-energy gamma-quanta of ^{56}Co (particularly of 3253 keV) and provide as much as

possible uniform counting rate across all detectors, ensuring the counting rate below ~ 0.17 Hz. The results of the simulations show that the most optimal configuration is achieved with two ^{56}Co sources, where the sources are shifted behind the copper bars structure of the setup. On average, the counting rate in the detectors in this configuration is 2.6×10^{-3} events per decay with a standard deviation of 0.4×10^{-3} events per decay. Under the limitation of the total counting rate, with the activity of each source of 51 Bq, one would expect 19 events per week detected in the region of the γ -line of 3253 keV for the detector with the lowest count rate. After the 19 days energy calibration with two ^{56}Co sources, a configuration with precise actual source locations was simulated to match the experimental data. The Monte Carlo simulations of ^{56}Co sources show a good agreement with the experimental data in the energy range from 200 to 4000 keV. A precise geometry of the stabilizing springs, used as detector holders in the CUPID-Mo set-up, was implemented for the Monte Carlo simulations. The geometry of the brass screws in the copper bars around the detector tower holder structure was also implemented. The radioactive contamination of the stabilizing springs and the brass screws activities in the copper bars obtained from the background model fit are in a good agreement with the measured values. The comparison of the ^{228}Th activity obtained from the model fit of the experimental data and measured values gives the following results: 20 ± 5 mBq / kg (21 ± 5 mBq / kg measured) for stabilization springs, and 3.5 ± 0.9 mBq / kg (< 18 mBq / kg measured) for brass screws. The Monte Carlo simulation of the CROSS set-up was performed with an array of 144 $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ detectors with the size of $4.5 \times 4.5 \times 4.5$ cm³. The results of the simulations show that the configuration with four 70 cm long calibration thorium containing sources with radionuclides ^{208}Tl , ^{228}Ac , ^{212}Bi and ^{212}Pb , gives the most uniform counting rate in the detectors. Also, for this detectors set-up with $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ and TeO_2 detectors, the background index in the region of interest from the radioactive contamination of ^{214}B and ^{208}Tl in the elements of the set-up was simulated. The background index in $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ and TeO_2 detectors from ^{208}Tl in the elements of the set-up is estimated to be: $< 4.5 \times 10^{-5}$ and $< 1.7 \times 10^{-4}$ counts / (keV kg year) from the NOSV copper holders with the activity of < 4.3 μBq / kg, $8(3) \times 10^{-5}$ and $1.51(6) \times 10^{-3}$ counts / (keV kg year) from the copper screen part with the activity of 0.3(1) mBq / kg, $< 1.2 \times 10^{-8}$ and $1(2) \times 10^{-6}$ counts / (keV kg year) for the plank cables with the activity of 5(6) mBq / kg, $< 3 \times 10^{-6}$ and $2.2(1) \times 10^{-4}$ counts / (keV kg year) for the fiberglass columns with the activity of 1.41(5) Bq / kg. The geometry of the CROSS set-up with additional external lead shielding was implemented in simulations. The background reduction factor from additional lead shielding in the region of the natural radioactivity peak at 2615 keV for experimental and simulated data is compared: 5.5 and 29(8) for the $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ detector, 4.6(1) and 48(6) for the TeO_2 detector, 7.8 and 13.9(7) for the CdWO_4 detector. The discrepancy between the experimental and simulated data of the background reduction factor was explained by presence of inner radioactive contamination of the set-up elements inside the lead shielding. The geometry of the CROSS set-up was simulated with Li_2MoO_4 crystals with an enriched, depleted and natural composition of ^{100}Mo and CdWO_4 crystals with natural and enriched composition of ^{116}Cd . The background from the elements of the CROSS set-up was simulated for this detector configuration. The Monte Carlo simulation of the radioactive contamination in nylon wires was performed for the set-up with a reduced number of materials. To reach the background index of 10^{-5} counts / (keV kg year) the nylon wires radioactive contaminants should be reduced: in ~ 10 times for ^{208}Tl , and in ~ 30 and ~ 300 times for ^{214}Bi in the region of interest of ^{100}Mo and ^{130}Te .

Державний реєстраційний номер ДіР:

Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки: Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави

Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності: Освоєння нових технологій транспортування енергії, впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, освоєння альтернативних джерел енергії

Підсумки дослідження: Нове вирішення актуального наукового завдання

Публікації:

- 1. E. Armengaud, ... M. Zarytsky et al., «New Limit for Neutrinoless Double-Beta Decay of ^{100}Mo from the CUPID-Mo Experiment», Physical Review Letters, vol 126, 181802, 2021, Q1, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.181802>
- 2. C. Augier, ... M. Zarytsky et al., «Final results on the $0\nu\nu\beta\beta$ decay half-life limit of ^{100}Mo from the CUPID-Mo experiment», European Physical Journal C, vol. 82, 1033, 2022, Q1, DOI: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10942-5>
- 3. C. Augier, ... M. Zarytsky et al., «The background model of the CUPID-Mo $0\nu\nu\beta\beta$ experiment», European Physical Journal C, vol. 83, 675, 2023, Q1, DOI: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-11830-2>
- 4. C. Augier, ... M. Zarytsky et al., «New measurement of double beta decays of ^{100}Mo to excited states of ^{100}Ru with the CUPID-Mo experiment», Physical Review C, vol 107, 025503, 2023, Q1, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.107.025503>
- 5. C. Augier, ... M. Zarytsky et al., «Measurement of the $2\nu\nu\beta\beta$ decay rate and spectral shape of ^{100}Mo from the CUPID-Mo experiment», Physical Review Letters, vol 131, 162501, 2023, Q1, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.162501>
- 6. I.C. Bandac, ... M.M. Zarytsky et al., « $\text{Li}_2^{100}\text{deplMoO}_4$ Scintillating Bolometers for Rare-Event Search Experiments», Sensors 23, no. 12, 5465, 2023, Q1, DOI: <https://doi.org/10.3390/s23125465>
- 7. A. Ahmine, ... M.M. Zarytsky et al., «Test of $^{116}\text{CdWO}_4$ and Li_2MoO_4 scintillating bolometers in the CROSS underground facility with upgraded detector suspension», Journal of Instrumentation, vol. 18, p. P12004, 2023, Q2, DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/12/P12004>

Наукова (науково-технічна) продукція: методи, теорії, гіпотези

Соціально-економічна спрямованість:

Охоронні документи на ОПВ:

Впровадження результатів дисертації: Планується до впровадження

Зв'язок з науковими темами: 0121U111684 0122U002390 0122U002390 0120U104845

VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

- Даневич Федір Анатолійович
- Fedor A. Danevich

Кваліфікація: д.ф.-м.н., с.н.с., 01.04.16

Ідентифікатор ORCID ID: Не застосовується

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 23724640

Місцезнаходження: проспект Науки, буд. 47, Київ, 03028, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів

Офіційні опоненти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Оніщук Юрій Миколайович
2. Onischuk Yurii M.

Кваліфікація: к. ф.-м. н., доц., 01.04.16

Ідентифікатор ORCID ID: Не застосовується

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Код за ЄДРПОУ: 02070944

Місцезнаходження: вул. Володимирська, буд. 60, Київ, 01033, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Парлаг Олег Олександрович
2. Oleg O. Parlag

Кваліфікація: к. ф.-м. н., 01.04.16

Ідентифікатор ORCID ID: Не застосовується

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Інститут електронної фізики Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 05540008

Місцезнаходження: вул. Університетська, буд. 21, Ужгород, Ужгородський р-н., 88000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

Рецензенти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Желтоножський Віктор Олександрович

2. Viktor O. Zheltonozhsky

Кваліфікація: д. ф.-м. н., 01.04.16

Ідентифікатор ORCID ID: Не застосовується

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 23724640

Місцезнаходження: проспект Науки, буд. 47, Київ, 03028, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Хоменков Володимир Петрович

2. Volodymyr P. Khomenkov

Кваліфікація: к. ф.-м. н., 01.04.16

Ідентифікатор ORCID ID: Не застосовується

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 23724640

Місцезнаходження: проспект Науки, буд. 47, Київ, 03028, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

VIII. Заключні відомості

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові
голови ради**

Понкратенко Олег Анатолійович

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові
головуючого на засіданні**

Понкратенко Олег Анатолійович

**Відповідальний за підготовку
облікових документів**

Порицький Павло Віталійович

Реєстратор

УкрІНТЕІ

**Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є
відповідальним за реєстрацію наукової
діяльності**



Юрченко Тетяна Анатоліївна