

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Директор Інституту ядерних досліджень НАН  
України

Василь Слісенко  
(Власне ім'я та Прізвище)



**АНОТОВАНИЙ ЗВІТ**  
**про виконану роботу у 2021 році в рамках реалізації проєкту**  
**із виконання наукових досліджень і розробок**

Подвійний бета-розпад атомних ядер  
(назва Проєкту)

**Назва конкурсу:** : Підтримка досліджень провідних та молодих учених  
**Ресстраційний номер Проєкту:** 2020.02/0011

**Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок** (ресстраційний номер та назва Проєкту) 2020.02/0011 «Подвійний бета-розпад атомних ядер»

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу «Підтримка досліджень провідних та молодих учених» протокол від «16-17» вересня 2020 року № 21

## 1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Загальна тривалість виконання проєкту 2020 рік - 2022 рік

Тривалість виконання Проєкту у 2021 році

Початок – 30 квітня 2021 р.  
(дата укладання Договору про виконання наукового дослідження і розробки)

Закінчення – 15 грудня 2021 р.

Загальна вартість Проєкту, грн. 6 613 059,00 грн. (шість мільйонів шістсот тринадцять тисяч п'ятдесят дев'ять гривень 00 копійок)

Вартість Проєкту по роках, грн.:

1-й рік 730 252,00 (сімсот тридцять тисяч двісті п'ятдесят дві гривні 00 копійок)

2-й рік 2 773 100,00 (два мільйони сімсот сімдесят три тисячі сто гривень 00 копійок)

3-й рік 3 109 707,00 (три мільйони сто дев'ять тисяч сімсот сім гривень 00 копійок)

## 2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту залучено 7 виконавців, з них:

доктори наук 1

кандидати наук 3

інші працівники 3

## 3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(Ї) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ

Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України

## 4. ОПИС ПРОЄКТУ

### 4.1. Мета Проєкту (до 200 знаків)

Пошук 2 $\beta$ -розпаду ядер  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{106}\text{Cd}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{184}\text{Os}$ ,  $^{192}\text{Os}$ ,  $^{190}\text{Pt}$  і  $^{198}\text{Pt}$ , вимірювання 2 $\nu$ 2 $\beta$ -розпаду  $^{150}\text{Nd}$ , оцінка маси нейтрино, підвищення чутливості до 0 $\nu$ 2 $\beta$ -розпаду  $^{100}\text{Mo}$ , пошук  $\beta$ -розпаду  $^{50}\text{V}$ .

### 4.2. Основні завдання Проєкту (до 400 знаків)

Підвищення чутливості до 2 $\beta$ -розпаду ядер  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{106}\text{Cd}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{184}\text{Os}$ ,  $^{192}\text{Os}$ , точності вимірювання 2 $\nu$ 2 $\beta$ -розпаду  $^{150}\text{Nd}$  на  $0_1^+$  збуджений рівень  $^{150}\text{Sm}$ . Зниження фону детекторів 2 $\beta$ -розпаду  $^{100}\text{Mo}$  шляхом аналізу форми сигналів, відкидання подій  $\alpha$ - та  $\beta$ -розпадів на поверхні детектора, перевірка болометричних детекторів з кристалами  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  кубічної форми для проєкту CUPID, зареєструвати  $\beta$ -розпад  $^{50}\text{V}$ .

### 4.3. Детальний зміст Проєкту:

- Сучасний стан проблеми (до 400 знаків)

Пошуки безнейтринного 2 $\beta$ -розпаду є важливою задачею фізики ядра та елементарних частинок завдяки можливості досліджувати властивості нейтрино, перевірити закон збереження лептонного числа. Необхідно підвищити чутливість експериментів до рівня інвертованої схеми масових станів нейтрино. Застосування болометричних детекторів є найбільш перспективним шляхом до цієї мети.  $\beta$ -розпад  $^{50}\text{V}$  не спостережений.

- Новизна Проєкту (до 400 знаків)

Отримано нове обмеження на 0 $\nu$ 2 $\beta$ -розпад  $^{100}\text{Mo}$   $T_{1/2} \geq 1.5 \times 10^{24}$  р, звідки слідує обмеження на ефективну масу нейтрино Майорани  $\langle m_\nu \rangle \leq (0.31 - 0.54)$  еВ. На новому рівні чутливості виконано пошук 2 $\beta$ -розпаду  $^{184}\text{Os}$ ,  $^{192}\text{Os}$ ,  $^{190}\text{Pt}$  і  $^{198}\text{Pt}$ , завершується експеримент для вимірювання 2 $\beta$ -розпаду  $^{150}\text{Nd}$  на  $0_1^+$  збуджений рівень  $^{150}\text{Sm}$ , покращено характеристики установки для пошуку 2 $\beta$ -розпаду  $^{106}\text{Cd}$  та  $\beta$ -розпаду  $^{50}\text{V}$ .

- Методологія дослідження (до 400 знаків)

Експеримент з  $^{100}\text{Mo}$  був виконаний з болометричними детекторами з кристалами  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ . Пошук 2 $\beta$ -розпаду ізоотопів осмію, платини,  $\beta$ -розпаду  $^{50}\text{V}$  і вимірювання 2 $\beta$ -розпаду  $^{150}\text{Nd}$  на  $0_1^+$  збуджений рівень  $^{150}\text{Sm}$  ведеться з низькофоновими напівпровідниковими детекторами з надчистого германію. Пошук 2 $\beta$ -розпаду  $^{106}\text{Cd}$  продовжується із сцинтиляційним детектором  $^{106}\text{CdWO}_4$ .

## 5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) в поточному році/ в рамках реалізації Проєкту, зокрема:

### 5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)

За допомогою низькотемпературних сцинтиляційних болометричних детекторів з кристалами молібдату літію, збагачених ізотопом молібдену-100 ( $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ ), отримано нове обмеження на період напіврозпаду ядра  $^{100}\text{Mo}$  відносно безнейтринного 2 $\beta$ -розпаду  $T_{1/2} \geq 1.5 \times 10^{24}$  років, звідки слідує одне з найбільш жорстких обмежень на ефективну масу нейтрино Майорани  $\langle m_\nu \rangle \leq (0.31 - 0.54)$  еВ. Розроблені методи аналізу форми сигналів від низькотемпературних сцинтиляційних болометричних детекторів з кристалами  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$  з метою відкидання фонових подій випадкових збігів та шумових подій в експериментах з пошуку подвійного бета-розпаду ядра  $^{100}\text{Mo}$ . Розроблено та перевірено методи зниження фону від радіоактивної забрудненості

поверхонь низькотемпературних сцинтиляційних болометричних детекторів для пошуку подвійного бета-розпаду ядер  $^{100}\text{Mo}$  та  $^{130}\text{Te}$ . Показано, що низькотемпературні сцинтиляційні болометричні детектори з кристалами  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$  кубічної форми мають характеристики порівняні з характеристиками детекторів з кристалами циліндричної форми, що дозволить збільшити масу досліджуваного ізотопу та знизити рівень фону у великомасштабному проєкті експерименту з пошуку подвійного бета-розпаду CUPID (на стадії розробки). На новому рівні чутливості виконано пошук  $2\beta$ -розпаду ядер  $^{184}\text{Os}$ ,  $^{192}\text{Os}$ ,  $^{190}\text{Pt}$  і  $^{198}\text{Pt}$ , пошук резонансного безнейтринного подвійного електронного поглинання у ядрі  $^{190}\text{Pt}$  на збуджений рівень 1,2 1326.9 кеВ дочірнього  $^{190}\text{Os}$  виконано вперше. Виконано калібрувальні вимірювання і продовжено набір даних в експерименті для пошуку  $2\beta$ -розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  із сцинтиляційним детектором  $^{106}\text{CdWO}_4$  у збігах із сцинтиляційними детекторами вольфрамату кадмію великого об'єму, виконані розрахунки ефективностей реєстрації різних мод та каналів  $2\beta$ -розпаду та фонових подій від різних джерел у збігах (антизбігах) між сигналами детекторної системи. Продовжується набір та аналіз даних в експерименті, метою якого є дослідження  $2\beta$ -розпаду ядра  $^{150}\text{Nd}$  на збуджені рівні дочірнього ядра за допомогою низькофонових напівпровідникових германієвих детекторів та зразка глибоко очищеного оксиду неодиму. В даних спостерігається двонейтринний  $2\beta$ -розпад  $^{150}\text{Nd}$  на перший  $0^+$  збуджений рівень дочірнього ядра з періодом напіврозпаду  $T_{1/2} = 9.7_{-2.4}^{+3.3} \times 10^{19}$  років. Вимірювання продовжуються з метою отримати найбільш точне значення періоду напіврозпаду шляхом зменшення статистичної невизначеності. Як додатковий результат, опубліковано огляд про процеси безнейтринного подвійного електронного поглинання, період напіврозпаду ядра  $^{212}\text{Po}$  визначено з найвищою точністю, вперше виконано пошук подвійного  $\alpha$ -розпаду ядра  $^{209}\text{Bi}$ , встановлено обмеження на період напіврозпаду на рівні  $T_{1/2} > 2.9 \times 10^{20}$  років.

#### Публікації за результатами Проєкту

1. K. Blaum et al., [Neutrinoless double-electron capture](#), Rev. Mod. Phys. 92 (2020) 045007. (Q1)
2. E. Armengaud et al., [New limit for neutrinoless double-beta decay of  \$^{100}\text{Mo}\$  from the CUPID-Mo experiment](#), Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 181802. (Q1)
3. A. Armatol et al., [Characterization of cubic  \$\text{Li}\_2^{100}\text{MoO}\_4\$  crystals for the CUPID experiment](#), Eur. Phys. J. C 81 (2021) 104. (Q1)
4. I.C. Bandac et al., [Phonon-mediated crystal detectors with metallic film coating capable of rejecting  \$\alpha\$  and  \$\beta\$  events induced by surface radioactivity](#), Appl. Phys. Lett. 118 (2021) 184105. (Q1)
5. P. Belli et al., [New experimental limits on double-beta decay of osmium](#), J. Phys. G 48 (2021) 085104. (Q1)
6. A. Armatol et al., [A CUPID  \$\text{Li}\_2^{100}\text{MoO}\_4\$  scintillating bolometer tested in the CROSS underground facility](#), JINST 16 (2021) P02037. (Q1)
7. R. Huang et al., [Pulse shape discrimination in CUPID-Mo using principal component analysis](#), JINST 16 (2021) P03032. (Q1)
8. O.G. Polischuk et al., [Double beta decay of  \$^{150}\text{Nd}\$  to the first  \$0^+\$  excited level of  \$^{150}\text{Sm}\$](#) , Phys. Scripta 96 (2021) 085302. (Q2)
9. A. Armatol et al., [Novel technique for the study of pileup events in cryogenic bolometers](#), Phys. Rev. C 104 (2021) 015501. (Q1)
10. P. Belli et al., [The half-life of  \$^{212}\text{Po}\$](#) , Eur. Phys. J. A 57 (2021) 215. (Q1)
11. V.I. Tretyak, [Spontaneous double alpha decay: First experimental limit and prospects of investigation](#), Nucl. Phys. At. Energy 22(2021)121-126. (Q3)

12. F.A. Danevich et al., [New limits on double-beta decay of  \$^{190}\text{Pt}\$  and  \$^{198}\text{Pt}\$](#) , submitted to Eur. Phys. J. C. (Q1)

Доповіді результатів проєкту на конференціях, нарадах, семінарах

1. V.I. Tretyak, [Possible searches for  \$2\alpha\$  and  \$2\beta\$  decays of  \$^{232}\text{Th}\$  in  \$\text{ThO}\_2\$  measurements with HPGe detector](#), The 21st AMoRE collaboration meeting (on-line), February 24-26, 2021.
2. V.V. Kobychhev, [Cylinder or box: choice of the crystal shape for AMoRE-II](#), The 21st AMoRE collaboration meeting (on-line), February 24-26, 2021.
3. N.V. Sokur, [Different approaches for analysis of pile-up events in cryogenic detectors](#), The 21st AMoRE collaboration meeting (on-line), February 24-26, 2021.
4. V.R. Klavdiienko, [Study of double beta decay of  \$^{106}\text{Cd}\$  by using  \$^{106}\text{CdWO}\_4\$  crystal](#), International Conference of Young Students and Postgraduates "IEF-2021", May 26-28, 2021, Uzhgorod (on-line).
5. N.V. Sokur, [Comparison of approaches for analysis of pile-up events in the AMoRE experiment](#), International Conference of Young Students and Postgraduates "IEF-2021", May 26-28, 2021, Uzhgorod (on-line).
6. M.M. Zarytskyy, [Monte Carlo simulations for the CROSS experiment](#), CROSS annual meeting (on-line), 14 - 16 Jun 2021.
7. V.V. Kobychhev, [Monte Carlo simulation of radiogenic backgrounds for BINGO](#), The 1st BINGO General Meeting (on-line), July 12-13, 2021.
8. V.I. Tretyak, [Some rare processes in Li, Mo, W, Zn for possible search in the BINGO experiment](#), The 1st BINGO General Meeting (on-line), July 12-13, 2021.
9. N.V. Sokur, [Analysis of pile-up events](#), The 22nd AMoRE collaboration meeting, 23-25 August 2021, Institute for Basic Science, Korea (on-line)
10. N.V. Sokur, [The half-life of  \$^{212}\text{Po}\$](#) , 10th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2021), August 23rd - September 2nd, 2021, OAC conference center, Kolymbari, Crete, Greece (on-line)
11. N.V. Sokur, [Analysis of pile-up events for the AMoRE](#), Int. school-seminar for young scientists "Functional materials for technical and biomedical applications", 6-10 September 2021 Kharkiv, Ukraine
12. V.R. Klavdiienko, [New results of the experiment to search for double beta decay of  \$^{106}\text{Cd}\$  with the help of enriched  \$^{106}\text{CdWO}\_4\$  scintillator](#), Int. school-seminar for young scientists "Functional materials for technical and biomedical applications", 6-10 September 2021 Kharkiv, Ukraine
13. D.V. Kasperovych, [Investigation of rare nuclear processes in neodymium and osmium naturally occurring isotopes](#), Seminar at the INFN section Rome 1, 8 November 2021, Rome, Italy.

## **5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами**

В рамках Проєкту отримані нові ядерні дані, розроблені експериментальні та аналітичні методи зниження фону низькотемпературних болометричних детекторів є унікальними і перевищують існуючі у світі аналоги.

## **5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)**

Метою Проєкту є фундаментальні дослідження властивостей атомних ядер та елементарних частинок.

**5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.**

Результати проєкту будуть використовуватися для подальшого розвитку науки, зокрема в експериментах нового покоління для досліджень властивостей нейтрино і слабкої взаємодії.

**Науковий керівник Проєкту**

Завідувач відділу фізики лептонів ІЯД НАНУ  
(посада)

Федір Даневич  
(Власне ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

  
(підпис)