

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

**Мокіна Валентина Михайлівна**

УДК 539.165

**СЦИНТИЛЯЦІЙНІ ДЕТЕКТОРИ НА ОСНОВІ КРИСТАЛІВ МОЛЬБДАТІВ ТА  
ВОЛЬФРАМАТІВ ДЛЯ ПОШУКУ ПОДВІЙНОГО БЕТА-РОЗПАДУ**

01.04.16 — фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій

**А в т о р е ф е р а т**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті ядерних досліджень НАН України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
**Даневич Федір Анатолійович**,  
завідуючий відділом фізики лептонів  
Інституту ядерних досліджень НАН України,

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник,  
**Кудін Олександр Михайлович**,  
професор кафедри фізико-математичних дисциплін  
Національного університету захисту України,

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
**Купленніков Едуард Леонідович**,  
провідний науковий співробітник  
Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний  
інститут» НАН України.

Захист відбудеться “ 17 ” вересня 2015 р. о 14-15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.167.01 при Інституті ядерних досліджень НАН України за адресою: 03680 МСП, м. Київ, проспект Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту ядерних досліджень НАН України, 03680, м. Київ, проспект Науки, 47.

Автореферат розісланий “ 28 ” липня 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д26.167.01  
кандидат фізико-математичних наук



Хоменков В.П

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Пошуки подвійного бета-розпаду атомних ядер є однією з найбільш актуальних задач фізики атомного ядра і елементарних частинок. Це пов'язано з тим, що дослідження безнейтринного ( $0\nu$ ) подвійного бета-розпаду ( $2\beta$ ) дозволяють з'ясувати природу нейтрино (частинка Майорани чи Дірака), схему масових станів та абсолютне значення маси нейтрино, перевірити закон збереження лептонного заряду. Необхідно зазначити, що існування маси нейтрино необхідне для пояснення явища нейтринних осциляцій, спостережених у численних експериментах. Крім того, у більшості розширень стандартної моделі нейтрино є частинкою Майорани (частинка, що співпадає зі своєю античастинкою). Спостереження  $0\nu 2\beta$ -розпаду однозначно свідчатиме про те, що нейтрино є масивною частинкою Майорани, а також про незбереження лептонного заряду. Більше того,  $0\nu 2\beta$ -розпад може відбуватися завдяки цілому ряду гіпотетичних процесів, передбачених у різних розширеннях стандартної моделі елементарних частинок, а отже розглядається як можливість зареєструвати ефекти за межами цієї моделі.

У той час як двонейтринний розпад зареєстрований у одинадцяти ядрах з періодами напіврозпаду  $10^{19}$  –  $10^{24}$  років, безнейтринна мода  $2\beta$ -розпаду не спостерігалась. У найбільш чутливих експериментах встановлені лише обмеження на періоди напіврозпаду на рівні  $10^{23}$  –  $10^{25}$  років. Реєстрація таких рідкісних подій вимагає надзвичайно чутливих детекторів з високими ефективністю реєстрації ефекту і енергетичною роздільною здатністю, якомога меншим фоном. Таким вимогам відповідають низькотемпературні сцинтиляційні болометри, що здатні забезпечити енергетичну роздільну здатність на рівні кількох кеВ у широкому діапазоні енергій. Перевагою цих детекторів є можливість використання сцинтиляційних кристалів, які містять елементи, до складу яких входять потенційно  $2\beta$ -активні ізотопи. Це дає змогу досягнути високої ефективності реєстрації  $0\nu 2\beta$ -розпаду. Тому розробка сцинтиляційних матеріалів з високою сцинтиляційною ефективністю при низьких температурах, що містять елементи з  $2\beta$ -активними ізотопами, є актуальною задачею.

Крім того, одночасне вимірювання сцинтиляційного і теплового сигналів дає можливість ідентифікувати бета- і альфа-частинки, а отже суттєво знизити фон від слідових забруднень сцинтиляційних кристалів ураном, радієм, торієм і продуктами їх розпаду. Тому оптимізація світлозбору у низькотемпературних сцинтиляційних болометрах є актуальною задачею, особливо для сцинтиляційних кристалів із низьким світловиходом. Важливо не тільки дослідити умови оптимізації світлозбору, а й розробити методи моделювання процесів розповсюдження фотонів у сцинтиляційних детекторах, що дасть змогу, без трудомістких вимірювань при низьких температурах, сконструювати детектор з високою ефективністю збору світла.

Ще однією актуальною задачею є вдосконалення відомих, а також пошук і розробка нових низькотемпературних сцинтиляційних матеріалів для досліджень подвійного бета-розпаду. Вимірювання характеристик сцинтиляторів при низьких температурах дозволяють перевірити можливість застосування матеріалів як криогенних детекторів, вдосконалити технології очищення вихідних матеріалів та росту кристалів.

Зниження фону сцинтиляційних детекторів для дослідження подвійного бета-розпаду у випадку використання фотоелектронних помножувачів як детекторів сцинтиляційних сигналів завжди є актуальною проблемою. Ця задача особливо

ускладнюється коли є додаткова вимога мінімізувати розміри сцинтиляційного детектора. Тому розробка світловодів із матеріалів з високою густиною, низьким рівнем радіоактивної забрудненості і високими оптичними якостями є актуальною задачею у сцинтиляційних експериментах для дослідження подвійного бета-розпаду атомних ядер.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота була виконана в Інституті ядерних досліджень НАН України у рамках держбюджетних тем, робіт за міжнародними угодами та науково-дослідних робіт, співвиконавцем яких була автор: держбюджетної науково-дослідної роботи у 2005–2007 рр.: “Дослідження подвійного бета-розпаду атомних ядер та пошуки рідкісних ядерних процесів, в тому числі з порушенням законів збереження лептонного та баріонного зарядів” (ДР № 0105V0010507); науково-дослідної роботи за договором № К-465 від 24.06.2005 р. між ІЯД НАНУ та ННЦ “Харківський фізико-технічний інститут” НАНУ 2005–2006 рр.: “Розробка наднизькофонових сцинтиляційних детекторів для вивчення рідкісних процесів розпадів атомних ядер” (ДР № 0105V008110); науково-дослідної роботи в рамках Цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України “Дослідження структури та складу Всесвіту, прихованої маси і темної енергії” (“Космомікрофізика”), (договори № 4/39107 від 09.07.2007 р. та № 15/08 від 04.04.2008 р.): “Експериментальні дослідження мікробудови темної матерії” (ДР № 0107U008445); науково-дослідної роботи за договором № М-361-2008 між Міністерством освіти та науки України та ІЯД НАН України 2008–2010 рр.: «Розробка детекторів для пошуку подвійного бета-розпаду атомних ядер та частинок темної матерії» (ДР № 0108U006161); науково-дослідної роботи за 2010 р. в рамках Цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Астрофізичні і космологічні проблеми прихованої маси і темної енергії Всесвіту» («Космомікрофізика-2»), (договір 15/10 від 01 липня 2010 р.): «Властивості нейтрино як кандидата на роль однієї зі складових небаріонної компоненти темної матерії» (ДР № 0110U005224); науково-дослідної роботи за 2011 р. в рамках Цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Астрофізичні і космологічні проблеми прихованої маси і темної енергії Всесвіту» («Космомікрофізика-2»), (договір 9/11 від 21 квітня 2011 р.): «Властивості нейтрино як кандидата на роль однієї зі складових небаріонної компоненти темної матерії» (ДР № 0111U009087); науково-дослідної роботи за 2012 р. в рамках Цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Астрофізичні і космологічні проблеми прихованої маси і темної енергії Всесвіту» («Космомікрофізика-2»), (договір 10/12 від 28 березня 2012 р.): «Властивості нейтрино як кандидата на роль однієї зі складових небаріонної компоненти темної матерії» (ДР № 0112U004349); науково-дослідної роботи за відомчою тематикою наукових досліджень НАН України у 2007–2011 рр. «Дослідження властивостей нейтрино в процесах подвійного бета-розпаду атомних ядер», шифр 180/160 (ДР № 0107U005725); науково-дослідної роботи за відомчою тематикою наукових досліджень НАН України у 2008–2012 рр., «Дослідження подвійного бета-розпаду і пошуки темної матерії», шифр 180/181 (ДР № 0108U002916); міжнародних угод між відділом фізики лептонів ІЯД НАНУ (Київ, Україна) та групою DAMA Національного інституту

ядерної фізики, відділення „Тор Вергата” (Рим, Італія) про спільну науково-дослідну роботу у 2006–2007 рр., 2008–2009 рр., 2010–2012 рр. та 2013–2014 рр.; гранту НАН України для молодих вчених НАНУ “Розробка сцинтиляційних детекторів, у тому числі ізотопно збагачених  $^{106}\text{CdWO}_4$ ,  $^{116}\text{CdWO}_4$ ,  $\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ , для пошуку  $2\beta$ -розпаду”, 2009–2010 рр., (ДР № 0109U007070); гранту НАН України для молодих вчених НАНУ «Дослідження процесів подвійного бета-розпаду кадмію-106», 2013–2014 рр., (ДР № 0113U005378).

### **Мета й завдання дослідження**

**Метою роботи** були дослідження сцинтиляційних властивостей (світловиходу і кінетики сцинтиляційних сигналів у широкому діапазоні температур); вивчення впливу форми, типу обробки поверхні кристалу, умов світлозбору на енергетичну роздільну здатність та відносну амплітуду сигналів у сцинтиляційних детекторах з кристалами вольфраматів цинку ( $\text{ZnWO}_4$ ) та кальцію ( $\text{CaWO}_4$ ); розробка сцинтиляційних кристалів вольфрамату свинцю із археологічного свинцю ( $^{apx}\text{PbWO}_4$ ) з низьким рівнем радіоактивної забрудненості і високими оптичними якостями для сцинтиляційних експериментів для дослідження подвійного бета-розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  за допомогою сцинтилятора вольфрамату кадмію збагаченого ізотопом кадмію-106.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі **задачі**:

- проаналізувати перспективні сцинтиляційні кристали для подвійного бета-розпаду;
- дослідити сцинтиляційні характеристики кристалів вольфраматів свинцю ( $\text{PbWO}_4$ ), молібдату свинцю ( $\text{PbMoO}_4$ ),  $\text{ZnWO}_4$ , вольфрамату магнію ( $\text{MgWO}_4$ ) у діапазоні температур від кімнатної до 7 К;
- проаналізувати експериментальні дані з метою оцінки можливості використання сцинтиляційних кристалів  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{ZnWO}_4$ ,  $\text{MgWO}_4$  у криогенних сцинтиляційних експериментах для пошуку подвійного бета-розпаду;
- виміряти сцинтиляційні характеристики кристалів  $\text{ZnWO}_4$  циліндричної та гексагональної форм, а також  $\text{CaWO}_4$  у формі циліндра, гексагональної, квадратної та трикутної призм, з різною обробкою поверхні, з різними відбивачами світла, у різних умовах оптичного контакту на світловихід та енергетичну роздільну здатність сцинтиляційних детекторів з цими кристалами з метою оптимізації світлозбору, у першу чергу, у криогенних сцинтиляційних болометрах;
- розробити низькофонової сцинтиляційний кристал вольфрамату свинцю із археологічного свинцю для подальшого його використання як світловоду у експерименті для пошуку подвійного бета-розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  із сцинтиляційним кристалом вольфрамату кадмію із кадмію збагаченого ізотопом  $^{106}\text{Cd}$  ( $^{106}\text{CdWO}_4$ );
- дослідити сцинтиляційні та оптичні характеристики кристалів  $\text{CdWO}_4$ ,  $^{106}\text{CdWO}_4$  та  $\text{PbWO}_4$  із археологічного свинцю.

**Об'єкт дослідження** – сцинтиляційні кристали  $\text{ZnWO}_4$ ,  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{MgWO}_4$  для криогенних експериментів для пошуку  $2\beta$ -розпаду; сцинтиляційні кристали  $\text{ZnWO}_4$  у формі циліндра та гексагональної призми, а також  $\text{CaWO}_4$  у формі циліндра, гексагональної, квадратної та трикутної призм із полірованою та матовою поверхнею;

сцинтиляційний кристал  $^{210}\text{PbWO}_4$  як світловід для експерименту з метою пошуку  $2\beta$ -розпаду ядра кадмію-106 за допомогою сцинтиляційного кристалу  $^{106}\text{CdWO}_4$ .

**Предмет дослідження** – сцинтиляційні властивості кристалів  $\text{ZnWO}_4$ ,  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{MgWO}_4$  при низьких температурах; світловихід та енергетична роздільна здатність сцинтиляційних детекторів з кристалами  $\text{ZnWO}_4$  та  $\text{CaWO}_4$  різної форми, з різною обробкою поверхні, з відбивачами світла різної форми, при наявності та відсутності оптичного контакту між сцинтилятором і фотодетектором; оптичні властивості кристалів  $^{210}\text{PbWO}_4$  та сцинтиляційні властивості детектора вольфрамату кадмію із світловодом  $^{210}\text{PbWO}_4$ .

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети та вирішення задач дослідження були використані наступні методи: сцинтиляційний метод для дослідження спектрометричних, сцинтиляційних характеристик сцинтиляторів; методика мультифотонних збігів сигналів від окремих фотонів із наступним записом форми сигналу для дослідження сцинтиляційних характеристик у діапазоні температур 7-300 K; метод лазерної мас-спектрометрії, мас-спектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою, атомно-абсорбційної спектрометрії для визначення домішкового складу у сцинтиляційних кристалах. Експериментальні дані аналізувались за допомогою програм RAW та Origin. Моделювання здійснювалось у програмному пакеті GEANT4.

**Наукова новизна отриманих результатів** визначається наступним:

- уперше досліджено відносний світловий вихід та кінетику сцинтиляційних сигналів у кристалах  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{ZnWO}_4$  та  $\text{MgWO}_4$  у широкому діапазоні температур від кімнатної до температури рідкого гелію і показано перспективність цих сцинтиляційних кристалів як криогенних детекторів для пошуків подвійного бета-розпаду;

- уперше систематично вивчено вплив форми кристалів, обробки їх поверхні, форми та матеріалу відбивача світла, наявності оптичного контакту з фотодетектором на енергетичну роздільну здатність та відносну амплітуду сигналів сцинтиляційних кристалів  $\text{ZnWO}_4$  та  $\text{CaWO}_4$  з метою оптимізації ефективності світлозбору у низькотемпературних болометричних детекторах для дослідження подвійного бета-розпаду, пошуку темної матерії, дослідження рідкісних альфа-розпадів;

- уперше розроблено сцинтиляційний кристал вольфрамату свинцю із археологічного свинцю для використання як світловоду для сцинтиляційного кристалу вольфрамату кадмію із збагаченого ізотопу  $^{106}\text{Cd}$  у низькофоновому експерименті з пошуку подвійного бета-розпаду ізотопу  $^{106}\text{Cd}$ .

**Наукове та практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що:

- результати отриманні під час проведення даної роботи дають змогу покращити характеристики експериментальних установок із використанням оксидних сцинтиляційних кристалів для пошуків темної матерії, досліджень подвійного бета-розпаду та інших рідкісних ядерних процесів;

- показано, що кристали  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{ZnWO}_4$  та  $\text{MgWO}_4$  є перспективними сцинтиляційними матеріалами для низькотемпературних низькофонових експериментів

завдяки високому світловиходу при низьких температурах, а також низькій радіоактивній забрудненості;

- експериментально доведено, що шліфування поверхні кристалів  $ZnWO_4$  та  $CaWO_4$ , використання не циліндричної форми кристалів (гексагональна або трикутна призма), застосування конічних відбивачів світла покращують амплітуду сигналів та роздільну енергетичну здатність в умовах збору світла близьких до криогенних сцинтиляційних болометрів;

- розроблений сцинтиляційний кристал вольфрамату свинцю із археологічного свинцю успішно застосовується як світловід у експериментах для пошуку подвійного бета-розпаду ядра  $^{106}Cd$  із низькофононим сцинтиляційним детектором з кристалом вольфрамату кадмію збагаченим ізотопом кадмію 106.

**Особистий внесок здобувача.** Внесок автора полягає:

- в участі у плануванні та підготовці усіх експериментів та досліджень, монтуванні детектуючих систем;

- у підготовці зразків ізотопно збагаченого  $^{106}Cd$  та археологічного свинцю для мас-спектрометричних вимірювань;

- у проведенні вимірювань сцинтиляційних характеристик кристалів  $PbWO_4$ ,  $PbMoO_4$ ,  $ZnWO_4$ ,  $MgWO_4$  в діапазоні температур від кімнатної до 7 К та обробці експериментальних даних з метою оцінки можливості використання сцинтиляційних кристалів  $PbWO_4$ ,  $PbMoO_4$ ,  $ZnWO_4$ ,  $MgWO_4$  у криогенних експериментах;

- у проведенні вимірювань сцинтиляційних характеристик кристалів  $ZnWO_4$  циліндричної та гексагональної форм, а також кристалів  $CaWO_4$  у формі циліндра, гексагональної, квадратної та трикутної призм з різною обробкою поверхні, з різними відбивачами світла, у різних умовах оптичного контакту з фотодетектором, а також обробці експериментальних даних;

- у дослідженнях сцинтиляційного детектора  $^{106}CdWO_4$  із кристалом  $^{арх}PbWO_4$  як світловодом;

- в участі у підготовці до друку усіх публікацій за результатами виконаних досліджень.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення й результати дисертації доповідалися й обговорювалися на наступних конференціях, школах та нарадах: 2nd Int. Conf. on Current Problems Nucl. Phys. At. Energy, Kyiv-2008, Ukraine; Int. Workshop on Radiopure Scintillators for EURECA, RPScint 2008, Kyiv, Ukraine; Конференція "Сучасне матеріалознавство: матеріали та технології" СММТ-2008, Ін-т проблем матеріалознавства, Київ, Україна; Щорічна конференція ІЯД НАНУ, Київ, Україна, (2009, 2012, 2013, 2014, 2015 pp.); Школа-семинар "Сцинтилляционные процессы и материалы для регистрации ионизирующего излучения", Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков, Украина (2009, 2010, 2011, 2014 pp.); 2nd Int. Workshop on Radiopure Scintillators for EURECA (RPScint'2009), INR Kyiv, Ukraine; міжнародна конференція Humboldt-Kolleg HCS2-Kiev2009, Київ, Україна; Int. Conf. "Astronomy and Space Physics in Taras Shevchenko Nat. University of Kyiv", Kyiv-2010, Ukraine; Int. Conf. "Crystal Materials 2010 (ICCM'2010)", Kharkov, Ukraine; Int. Conf. on Current Problems Nucl. Phys. At. Energy, Kyiv-2010, Ukraine; Нарada за результатами

виконання цільової комплексної програми НАН України «Астрофізичні і космологічні проблеми прихованої маси і темної енергії Всесвіту (Космомікрофізика-2)», Київ, Україна, 2012 р.; міжн. конф. молодих учених і аспірантів ІЕФ-2013, Ужгород, Україна; Межд. школа мол. ученых по яд. физике и энергетике, Алушта, Украина, 2013 р.; Int. School on Astroparticle Physics, Laboratorio Subteraneo de Canfrans, Spain, (ISAPP-2013); Int. Workshop on Radiopure Scint. RPScint'2013, Kyiv, Ukraine; Int. Conf. on Oxide Materials for Electronic Engineering OMEE'2014, Lviv, Ukraine.

**Публікації.** Всього за темою дисертації опубліковано 15 робіт, з них: основні результати опубліковані в 11 реферованих наукових виданнях [2 – 6, 9 – 13]; 1 – в матеріалах міжнародних конференцій [15]; а решта 3 – тези доповідей на конференціях [7 – 8, 14]. Всі публікації виконано у співавторстві, внесок здобувача вказано вище.

**Структура й об'єм роботи.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків і списку використаних літературних джерел. Матеріал дисертації викладений на 128 сторінках і містить у собі 104 сторінки основного тексту, 40 рисунків, 11 таблиць (з них 6 рисунків займають 3 окремих сторінок). Список використаних джерел на 19 сторінках нараховує 182 найменування.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** коротко сформульовані актуальність теми, мета й задачі дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, приведено наукову новизну отриманих результатів, наукове та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок автора, апробація результатів дисертації та публікації.

У **першому розділі** дисертаційної роботи зроблено стислий огляд теорії подвійного бета-розпаду ( $2\beta$ ), розглянуто різні канали та моди  $2\beta$ -розпаду, коротко представлена інформація про  $2\beta$ -активні ядра (енергія розпаду, ізотопна поширеність). Розглянуто геохімічний, радіохімічний та метод прямої реєстрації ефекту з активним або пасивним джерелом для дослідження подвійного бета-розпаду.

Дотепер було спостережено двонейтринний  $2\beta$ -розпад для 11 ядер ( $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{116}\text{Cd}$ ,  $^{128}\text{Te}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{238}\text{U}$ ), у той час як безнейтринний розпад усе ще не спостережений, хоча є повідомлення про реєстрацію  $0\nu 2\beta$ -розпаду  $^{76}\text{Ge}$ . Експеримент колаборації Гейдельберг-Москва був направлений на пошук безнейтринного подвійного бета-розпаду  $^{76}\text{Ge}$ . У експерименті використовувались 5 детекторів з надчистого германію HPGe з рівнем збагачення  $^{76}\text{Ge}$  до 86 %. Колаборація дала лише обмеження на період напіврозпаду  $T_{1/2}(^{76}\text{Ge}) > 1,5 \times 10^{25}$  років (95% C.L.). Але згодом один із керівників колаборації з кількома співавторами, після додаткового аналізу даних оголосили про реєстрацію  $0\nu 2\beta$ -розпаду ядра  $^{76}\text{Ge}$  зі значенням  $T_{1/2}(^{76}\text{Ge}) \approx 2 \times 10^{25}$  років. Маса нейтрино була оцінена як  $\langle m_\nu \rangle \approx 0,3$  еВ.

Експеримент GERDA мав на меті перевірку заяви про спостереження  $0\nu 2\beta$ -розпаду ядра  $^{76}\text{Ge}$ . Експериментальна установка складалась із масиву збагачених германієвих детекторів занурених у рідкий аргон. Чутливість експерименту GERDA до безнейтринного подвійного бета-розпаду становила  $\text{lim} T_{1/2} = 2,1 \times 10^{25}$  років. Колаборація GERDA стверджує, що спростовує заяву про спостереження  $0\nu 2\beta$ -розпаду ядра  $^{76}\text{Ge}$ , але, на жаль, результат експерименту недостатньо надійний через



недостатню експозицію. Зараз колаборація готує другий етап експерименту з експозицією близько 100 кг×років з чутливістю  $2 \times 10^{26}$  років, що відповідає ефективній масі нейтрино на рівні 0,09 – 0,3 еВ.

Крім того, зараз діють, споруджуються та проектуються кілька експериментів націлених на підвищення чутливості до безнейтринного подвійного  $\beta$ -розпаду до рівня, що відповідає інвертованій схемі масових станів нейтрино (ефективна маса нейтрино  $\approx 0,05$  еВ). В деяких експериментах досліджувані ізотопи входять до складу детектора. Це напівпровідникові германієві детектори, часово-проекційні ксенонові камери, сцинтиляційні кристали  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{ZnSe}$ ,  $\text{CaMoO}_4$ ,  $\text{ZnMoO}_4$ ,  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ , рідкосцинтиляційні детектори із розчиненими в об'ємі сцинтилятора ксеноном або з добавками, що містять телур. На наш погляд, самими перспективними для пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду є низькотемпературні сцинтиляційні болометричні детектори. Вони мають високу енергетичну роздільну здатність, можливість ефективно відділяти події від альфа-частинок, а отже знижувати фон. Тому важливо досліджувати властивості сцинтиляційних кристалів при низьких температурах і розроблювати нові матеріали для низькотемпературних експериментів.

У розділі 2 “Сцинтиляційні кристали вольфраматів та молібдатів як потенційні кріогенні детектори” описані вимоги до кріогенних детекторів з пошуку рідкісних ядерних процесів. Реєстрація рідкісних подій подвійного бета-розпаду вимагає надзвичайно чутливих детекторів з високою енергетичною роздільною здатністю та можливістю дискримінації фонових подій, які можуть забезпечити зокрема, кріогенні детектори (болометри), що працюють при температурах 10 – 20 мК. Також суттєвою перевагою цієї методики є широкий вибір можливих матеріалів детектора і висока ефективність реєстрації подвійного бета-розпаду. Підвищення світловиходу сцинтиляторів, покращення оптичної якості кристалів, розвиток технології виготовлення кристалів великого об'єму (десятки і сотні  $\text{см}^3$ ) і високої якості з якомога нижчим рівнем радіоактивної забрудненості – все це актуальні задачі, які потрібно вирішити для підвищення чутливості болометричних експериментів.

У розділі зроблено огляд властивостей сцинтиляційних кристалів вольфрамату цинку, свинцю, магнію та молібдатів свинцю. Показано, що кристали потребують додаткових досліджень, яким і присвячений даний розділ. Відносний світловий вихід досліджуваних сцинтиляторів і кінетика сцинтиляційних сигналів вивчалися в діапазоні температур 7 – 300 К з використанням методики мультифотонних збігів сигналів від окремих фотонів із наступним записом форми сигналу (MPCC, Multiple Photon Counting Coincidence Technique). Зразок кристалу розміщувався всередині гелій-проточного кріостату з двома оптичними вікнами і опромінювався або  $\alpha$ -частинками джерела  $^{241}\text{Am}$  (5.5 MeV), або ж  $\gamma$ -квантами джерела  $^{60}\text{Co}$ . Сцинтиляційний сигнал реєструвався двома фотоелектронними помножувачами (ФЕП, Electron Tubes 9124A) з поліпшеною чутливістю фотокатоду в зеленій частині оптичного спектру. Методика MPCC базується на записі послідовності фотоелектронних імпульсів ФЕП після реєстрації фотонів сцинтиляційної події. Кожен імпульс у послідовності відповідає індивідуальному фотоелектрону, що вилітає з фотокатоду ФЕП. Розподіл часу приходу фотонів надає інформацію про часові характеристики сцинтиляційного процесу, в той час як зареєстроване число фотонів пропорційне світловиходу сцинтилятора. Отже, записуючи велику кількість окремих сцинтиляційних подій ( $10^3 - 10^4$ ), можна отримати

часові характеристики сцинтиляційного сигналу і дані про світловихід сцинтилятора в одному вимірюванні.

Для сумісності експериментальних результатів вимірювалися оптично поліровані зразки фіксованих розмірів ( $5 \times 5 \times 1$  мм) у фіксованій геометрії. За умови забезпечення виконання цих умов, точність вимірювань оцінена в межах 10 %. Похибка вимірювань відносного світловиходу для різних матеріалів складає 30 %, оскільки вона включає додаткові похибки даних про спектри люмінесценції і спектральну чутливість ФЕП.

Залежність відносного світловиходу сцинтиляційного кристалу  $\text{ZnWO}_4$  в інтервалі температур 7 – 300 К приведена на Рис. 1. З рисунку видно, що світловихід кристалу  $\text{ZnWO}_4$  при понижених температурах збільшується приблизно на 180 % відносно значення при кімнатній температурі. Відносний світловихід  $\text{ZnWO}_4$  становить  $115 \pm 18\%$  від світловиходу сцинтилятора  $\text{CaWO}_4$ , що добре узгоджується із величиною, що була виміряна при збудженні згаданих кристалів рентгенівськими променями від синхротрону при температурі 8 К.

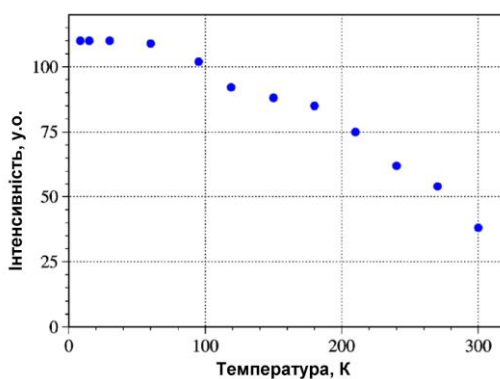


Рис. 1. Температурна залежність світловиходу сцинтиляційного кристалу  $\text{ZnWO}_4$  при збудженні  $\alpha$ -частинками джерела  $^{241}\text{Am}$  в інтервалі температур 7 – 300 К.

Температурна залежність постійних часу загасання сцинтиляційних сигналів кристалу  $\text{ZnWO}_4$  вимірювалась за допомогою  $\gamma$ -джерела  $^{60}\text{Co}$ . Форма сцинтиляційного імпульсу кристалу  $\text{ZnWO}_4$  при кімнатній температурі (300 К) описувалась сумою трьох експонент з постійними часу загасання  $\tau_1 = 1$  мкс,  $\tau_2 = 4$  мкс та  $\tau_3 = 25$  мкс. Всі три постійні загасання сцинтиляційного сигналу повільно зростають при зниженні температури від 300 К до  $\sim 20$  К. Нижче температури  $\sim 20$  К, значення постійних загасання різко та суттєво збільшуються при подальшому охолодженні.

На Рис. 2 показані результати вимірювань сцинтиляційного світловиходу кристалів  $\text{PbWO}_4$  і  $\text{PbMoO}_4$  в залежності від температури аж до  $T = 7$  К. У кристалі  $\text{PbWO}_4$  світловихід зростає по мірі охолодження до  $\sim 200$  К, а нижче температури 150 К зростання стає менш явним, при температурах нижче 50 К спостерігається зменшення сцинтиляційної ефективності. Кристал  $\text{PbMoO}_4$  має подібну залежність світловиходу від температури (див. Рис. 2). Сцинтиляційна ефективність досягає максимуму при температурі близько 80 К і з подальшим охолодженням зменшується на одну третю його максимального значення. Відносний світловихід зразка вольфрамату свинцю складає  $27 \pm 8\%$  відносно світловиходу зразка  $\text{CaWO}_4$  при 7 К, молібдат свинцю демонструє аналогічну поведінку ( $34 \pm 10\%$  від  $\text{CaWO}_4$  при 7 К).

Значення констант часу розпаду і відносні інтенсивності відповідних компонентів при температурах 7 і 77 К надані в Таблиці 1. Константи часу згасання

сцинтиляційного сигналу поступово зростають із зниженням температури до приблизно 50 К і 40 К в  $\text{PbWO}_4$  і  $\text{PbMoO}_4$ , відповідно. Нижче цієї температури носії можуть бути захоплені і збережені дрібними пастками, які докорінно змінюють кінетику розпаду і скорочують загальний світловихід. Нижче цієї температури може спостерігатися дуже довготривала компонента сцинтиляційного розпаду викликана рекомбінаційними процесами у кристалі.

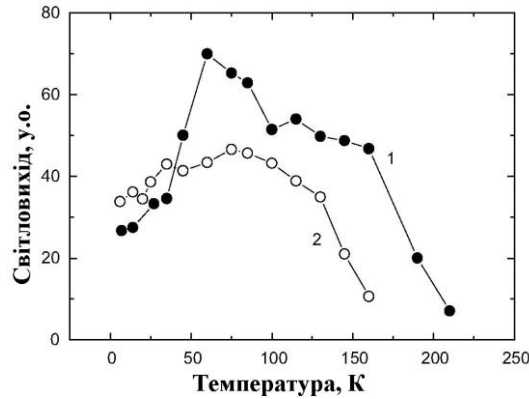


Рис. 2. Температурні залежності світловиходу кристалів  $\text{PbWO}_4$  (1) і  $\text{PbMoO}_4$  (2), виміряні при збудженні  $\alpha$ -частинками  $^{241}\text{Am}$ .

Таблиця 1.

Сцинтиляційні властивості кристалів  $\text{PbWO}_4$  та  $\text{PbMoO}_4$  при температурах 7 та 77 К.

Кристал	Т, К	Світловихід*, %	Константи розпаду ( $\tau_i$ ), та відносні інтенсивності ( $A_i$ )		
			$\tau_1$ , мс ( $A_1$ ,%)	$\tau_2$ , мс ( $A_2$ ,%)	$\tau_3$ , мс ( $A_3$ ,%)
$\text{PbWO}_4$	77	$66 \pm 19$	$0,8 \pm 0,1$ (54,5)	$5,3 \pm 0,1$ (45)	$40 \pm 7$ (0,5)
	7	$27 \pm 8$	$1,8 \pm 0,1$ (91)	$31,3 \pm 0,5$ (8,5)	$1145 \pm 47$ (0,5)
$\text{PbMoO}_4$	77	$46 \pm 15$	$1,7 \pm 0,1$ (40)	$10,8 \pm 0,1$ (56)	$57 \pm 3$ (4,0)
	7	$34 \pm 10$	$2,4 \pm 0,2$ (86,5)	$34,7 \pm 0,4$ (12,5)	$1077 \pm 22$ (1,0)

\* відносно кристалу  $\text{CaWO}_4$ .

Залежність світловиходу кристалу  $\text{MgWO}_4$  від температури у температурному діапазоні 7 – 305 К показано на Рис. 3. Відносна сцинтиляційна ефективність при 7 К складає  $33 \pm 12\%$  від  $\text{ZnWO}_4$ . Це можна пояснити гіршою якістю кристала  $\text{MgWO}_4$  у порівнянні з сцинтилятором  $\text{ZnWO}_4$  (що не дивно, враховуючи те, що кристал  $\text{MgWO}_4$  був вирощений уперше). Це показує, що над поліпшенням характеристик  $\text{MgWO}_4$  як сцинтилятора потрібно працювати далі.

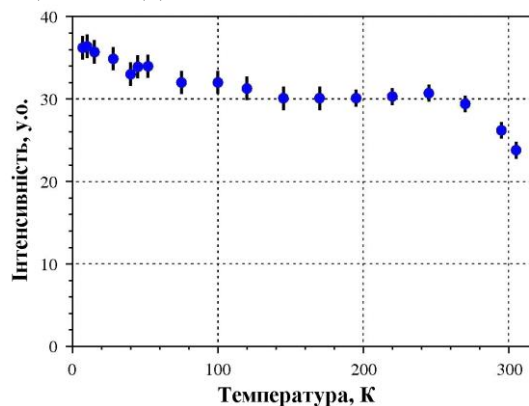


Рис. 3. Температурна залежність світловиходу сцинтиляційного кристалу  $\text{MgWO}_4$  при збудженні  $\alpha$  частинками джерела  $^{241}\text{Am}$ .

Найдовша константа часу згасання сцинтиляційного сигналу у кристалі  $\text{MgWO}_4$  повільно зростає із зниженням температури до 30 К, а потім швидко зростає з подальшим охолодженням. При температурі 7 К сцинтиляційні сигнали можуть бути описані чотирма експоненціальними функціями з постійними:  $\tau_1=1,1$  мс,  $\tau_2=6$  мс,  $\tau_3=20$  мс і  $\tau_4=94$  мс.

У розділі 3 дисертаційної роботи “Оптимізація умов збору світла в криогенних сцинтиляційних болометрах” описано результати дослідження впливу різних факторів на покращення світлозбору та енергетичної роздільної здатності в умовах близьких до умов світлозбору у криогенних сцинтиляційних болометрах. Світлозбір відіграє вирішальну роль у низькотемпературних експериментах для пошуку темної матерії оскільки він визначає величину енергетичного порогу і важливий в експериментах для пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду, оскільки більше відношення сигнал / шум дозволяє з вищою ефективністю визначати події випадкових збігів сигналів (а отже, знижувати рівень фону).

У дослідженнях було використано два сцинтиляційних кристали  $\text{ZnWO}_4$  циліндричної та гексагональної форм розмірами  $\text{Ø}20 \times 20$  мм (у випадку циліндра), і з діагоналлю 20 мм і висотою 20 мм (у випадку призми). Вимірювання енергетичної роздільної здатності та відносної амплітуди імпульсу проводились з використанням  $\gamma$ -джерела у наступних умовах (див. Рис. 4). Геометрія експерименту “С” відтворює умови збору світла близькі до криогенних сцинтиляційних болометрів. Вимірювання у кожній геометрії проводились зі зміною типу обробки поверхні кристалу від полірованої до шліфованої.

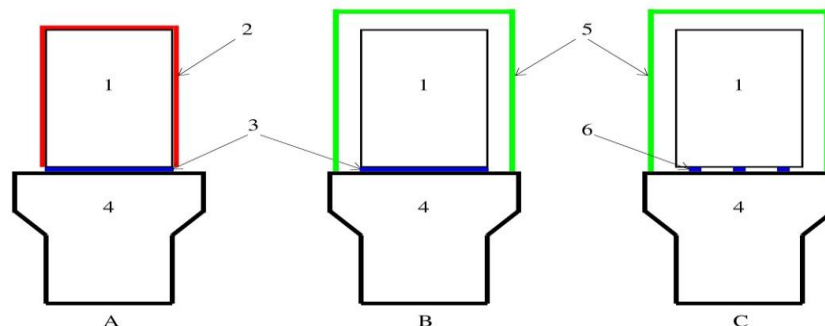


Рис. 4. Схема вимірювань з сцинтиляційним кристалом  $\text{ZnWO}_4$  (1 – кристал, 2 – 3 шари плівки РТФЕ, 3 – оптичний контакт, 4 – ФЕП, 5 – відбивач 3М, 6 – кубики із органічного скла  $2 \times 2 \times 2$  мм).

Середні значення енергетичної роздільної здатності (повна ширина на половині максимуму – ПШПВ) та відносної амплітуди імпульсів виміряні при опроміненні сцинтиляторів  $\gamma$  квантами  $^{137}\text{Cs}$  з енергією 662 кеВ приведені на Рис. 5 для різних умов вимірювань.

З метою оптимізації сцинтиляційних криогенних детекторів було зроблено новий підхід до моделювання світлозбору методом Монте-Карло за допомогою програмного забезпечення GEANT4 (v.9.6). Моделювання процесів усередині сцинтиляційних кристалів було зроблено спіробітниками відділу фізики лептонів Кобичевим В.В. та Кобичевим Р.В. Для оцінки ступеня достовірності отриманих у моделюванні результатів вони порівнювалися з експериментальними даними. Моделювання

світловиходу сцинтиляційних кристалів  $ZnWO_4$  циліндричної та гексагональної форм проводилось для тих самих умов, при яких були проведені вимірювання (див. Рис. 6) та для тих самих типів поверхні.

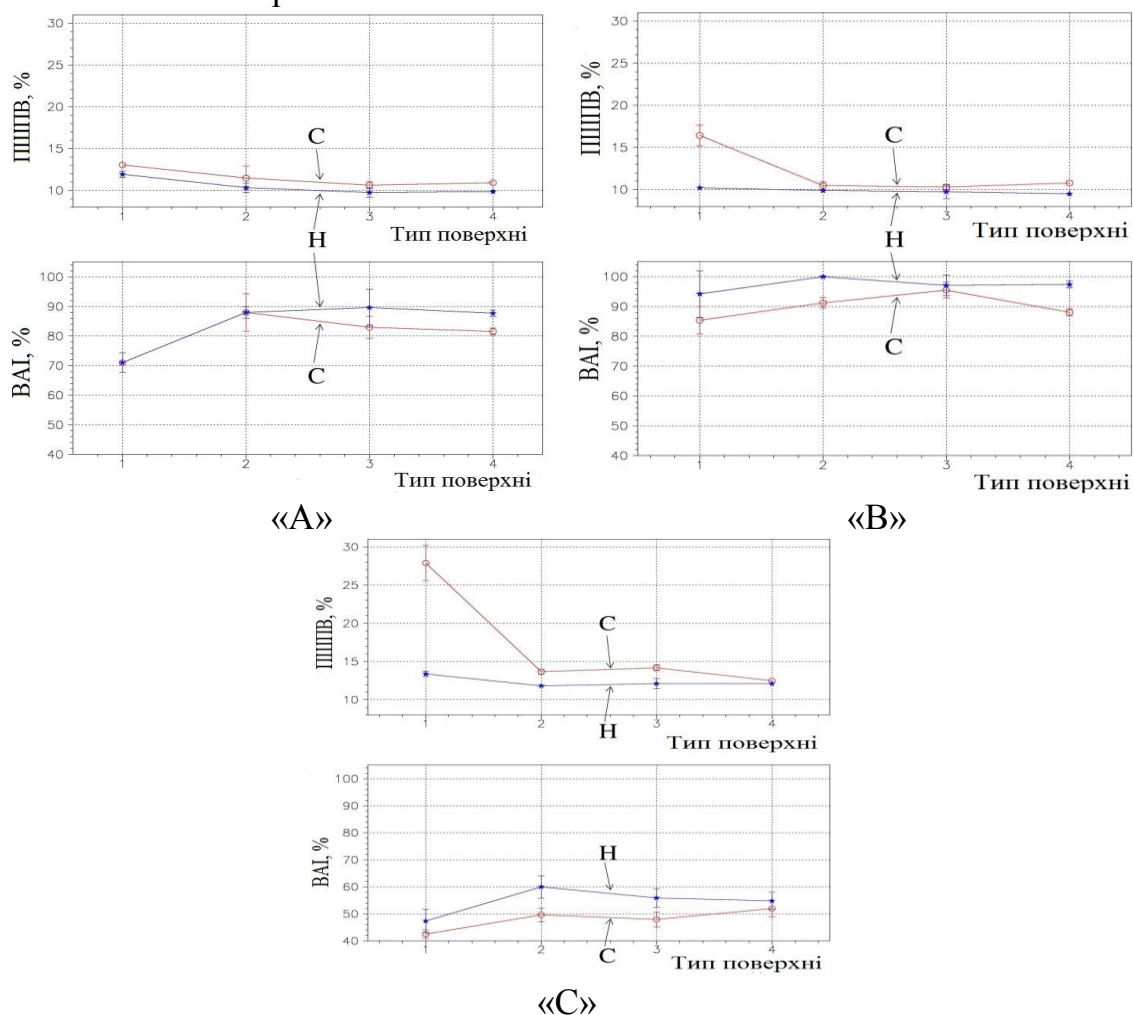


Рис. 5. Енергетична роздільна здатність та відносна амплітуда імпульсу для гамма-квантів з енергією 662 кеВ джерела  $^{137}\text{Cs}$  виміряні із сцинтиляційними кристалами  $ZnWO_4$  гексагональної (Н) та циліндричної (С) форми у геометріях «А», «В» та «С» (див. Рис. 4) для різних типів поверхні (1 – уся поверхня полірована, 2 – бокова поверхня кристалу шліфована, торці поліровані, 3 – бокова та торець шліфовані, торець суміжний з фотокатодом ФЕП – полірований, 4 – уся поверхня кристалу шліфована).

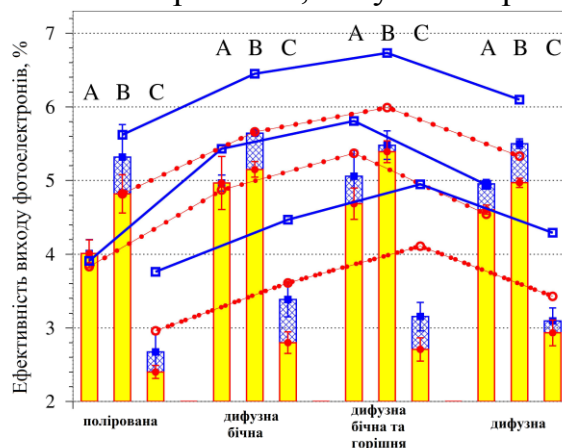


Рис. 6. Порівняння результатів моделювання (квадратики, з'єднані суцільними лініями відповідають гексагональній формі кристалу; кружочки, з'єднані пунктирними лініями

– циліндрична форма) та експерименту (заштриховані бари – гексагональна форма, забарвлені бари – циліндрична). Експериментальні дані нормовані на значення отримані для циліндричної форми полірованого кристалу у «геометрії» «В».

У даному розділі також описано процес оптимізація світлозбору у сцинтиляційних криогенних болометрах з кристалами  $\text{CaWO}_4$ . Перевагою сцинтиляторів  $\text{CaWO}_4$  для таких досліджень є вища сцинтиляційна ефективність та відсутність значної анізотропії кристалів (остання обставина спрощує моделювання світлозбору). Використано ті ж самі умови вимірювань (див. Рис. 4), але був досліджений також відбивач світла у формі усіченого конусу. Також розглядалися чотири типи обробки поверхні кристалу: від полірованої до шліфованої. Моделювання передачі світла у сцинтиляційних детекторах було виконано В. Михайликом з використанням програмного забезпечення ZEMAX. Були виготовлені чотири сцинтиляційних елементи різної форми (з зовнішнім діаметром 17,6 мм і висотою 14,6 мм) з одного кристалу  $\text{CaWO}_4$ . Похибка вимірювань положення піку від джерела гамма-квантів  $^{137}\text{Cs}$  була оцінена як  $\pm 2\%$ . Під час вимірювань записувались енергетичні спектри з джерелами гамма-квантів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{207}\text{Bi}$  від сцинтиляційних кристалів  $\text{CaWO}_4$  з використанням двох зовнішніх відбивачів (циліндричного або у формі усіченого конуса) і зі зміною обробки поверхонь кристалів:

Результати вимірювань енергетичної роздільної здатності з  $\gamma$ -квантами джерела  $^{137}\text{Cs}$  з енергією 662 кеВ у різних умовах вимірювань представлена на Рис. 7.

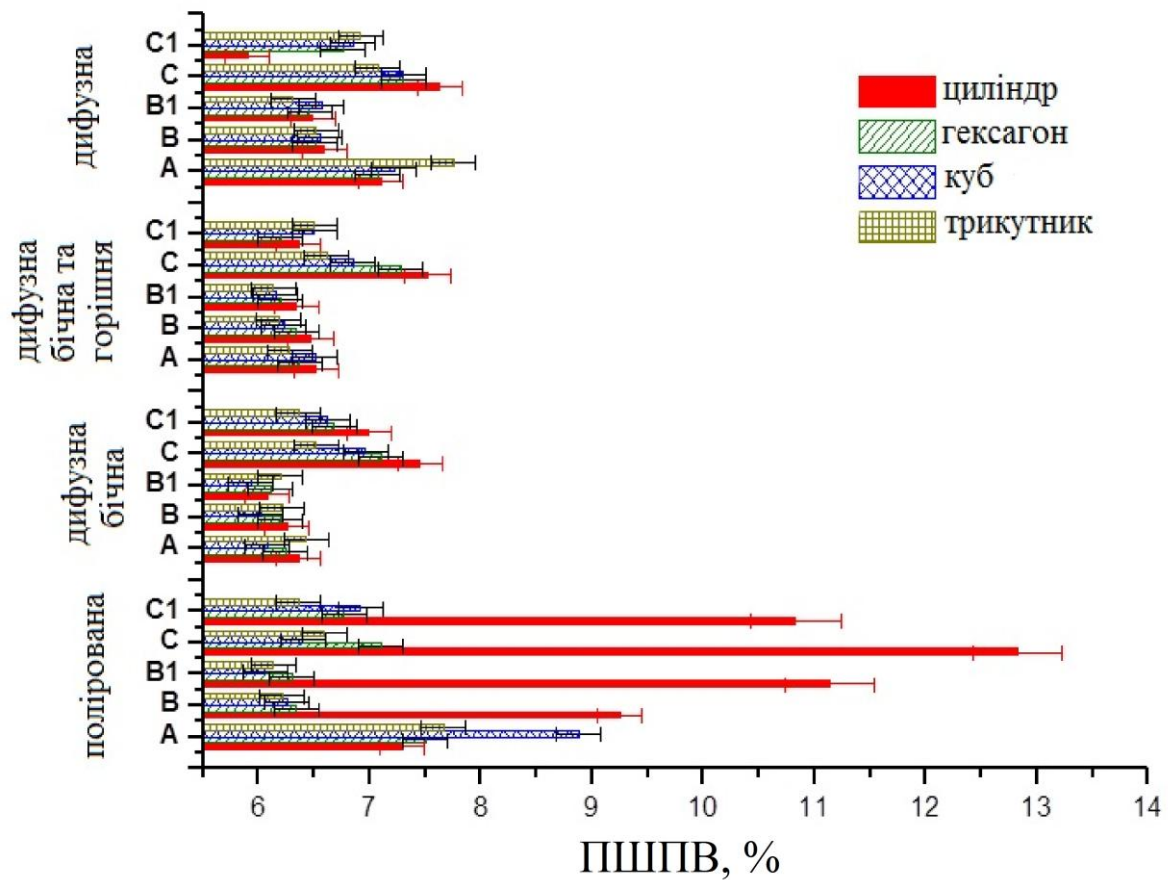


Рис. 7. Енергетична роздільна здатність отримана із сцинтиляційними кристалами  $\text{CaWO}_4$  у формі циліндра, гексагональної, прямокутної і трикутної призми у вимірюваннях з  $\gamma$ -квантами від джерела  $^{137}\text{Cs}$  для різних обробок поверхні кристалів і

різних зовнішніх відбивачів світла та за/без наявності оптичного контакту між сцинтилятором і фотодетектором.

Відносні амплітуди імпульсів, виміряні з  $\gamma$ -квантами джерела  $^{137}\text{Cs}$  з енергією 662 кеВ у різних умовах світлозбору представлені на Рис. 8.

Загальна тенденція впливу форми кристала на ефективність світлозбору також узгоджується результатами моделювання у пакеті ZEMAX для всіх розглянутих конфігурацій з трикутною призмою отриманий найвищий світлозбір. Максимальний світловихід був досягнутий для сцинтиляційного детектора у формі трикутної призми з дифузною бічною поверхнею і відбивачем у формі усіченого конуса.

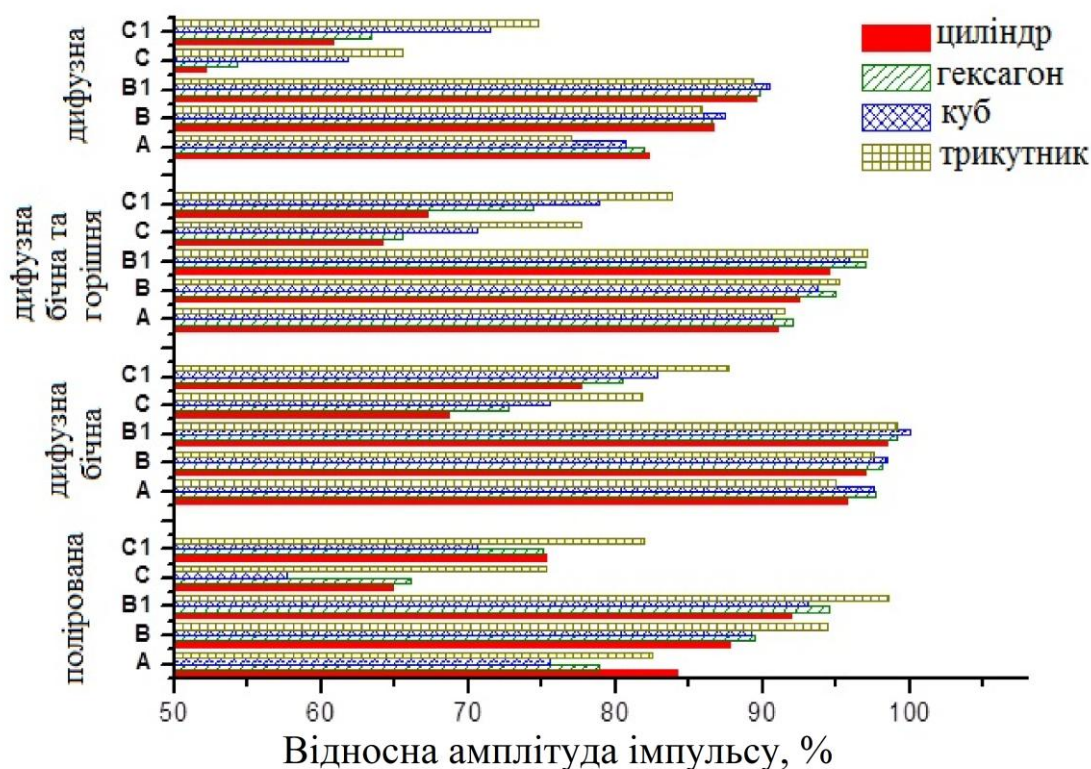


Рис. 8. Відносна амплітуда імпульсу для сцинтиляційних кристалів  $\text{CaWO}_4$  у формі циліндра, гексагональної, прямокутної і трикутної призми, виміряних з  $\gamma$ -квантами з енергією 662 кеВ від джерела  $^{137}\text{Cs}$  для різних типів поверхні кристала і зовнішніх відбивачів за/без наявності оптичного контакту між сцинтилятором і ФЕП.

У **Розділі 4** “Розробка світловоду з кристалу вольфрамату свинцю для експерименту з пошуку подвійного  $\beta$ -розпаду  $^{106}\text{Cd}$ ” описано розробку сцинтиляційних кристалів  $\text{CdWO}_4$  із натурально кадмію та збагаченого ізотопом  $^{106}\text{Cd}$ , а також кристалу  $^{\text{арх}}\text{PbWO}_4$  з археологічного свинцю з низьким вмістом радіоактивного ізотопу  $^{210}\text{Pb}$  для пошуку процесів  $2\beta$ -розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ .

Виробництво сцинтиляційних кристалів вольфрамату кадмію  $^{106}\text{CdWO}_4$  збагачених ізотопом  $^{106}\text{Cd}$  включало декілька основних етапів: очищення зразків ізотопно збагаченого металевого кадмію, контроль чистоти вихідних матеріалів, синтез шихти  $^{106}\text{CdWO}_4$ , вирощування кристалів  $^{106}\text{CdWO}_4$ , а також вимірювання оптичних та сцинтиляційних характеристик (Рис. 9) сцинтилятора  $^{106}\text{CdWO}_4$ . У результаті було

отримано сцинтиляційний елемент  $^{106}\text{CdWO}_4$  масою 215,8 г та розмірами  $\approx \varnothing 27 \times 50$  мм<sup>2</sup>. Були досліджені оптичні та сцинтиляційні властивості кристалу.

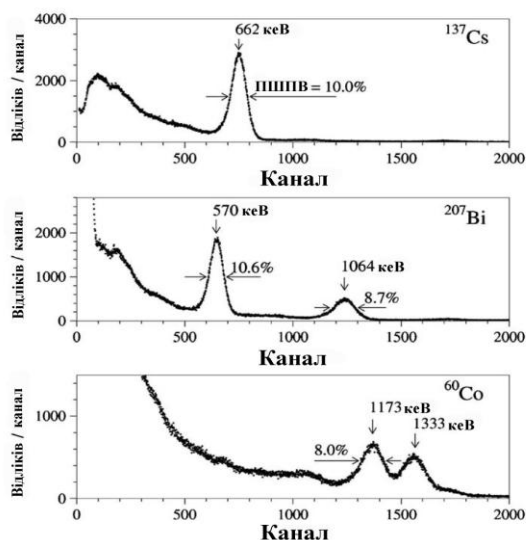


Рис. 9. Енергетичні спектри  $\gamma$ -квантів джерел  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{207}\text{Bi}$ , виміряні з сцинтиляційним кристалом  $^{106}\text{CdWO}_4$  масою 215,8 г та розмірами  $\approx \varnothing 27 \times 50$  мм<sup>2</sup>.

Розроблено сцинтиляційний кристал вольфрамату свинцю з археологічного свинцю з високим рівнем хімічної чистоти 99,9996 %. З кристалу  $^{\text{арх}}\text{PbWO}_4$  було виготовлено світловід розмірами  $\varnothing 40 \times 83$  мм для експерименту з пошуку подвійного бета-розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$  за допомогою сцинтиляційного кристалу  $^{106}\text{CdWO}_4$ . Світловід необхідний для зменшення фону від радіоактивної забрудненості фотопомножувача. Енергетична роздільна здатність та відносна амплітуда сигналів (див Рис. 10) були виміряні для сцинтиляційного кристалу  $\text{CdWO}_4$  розмірами  $\varnothing 20 \times 20$  мм, що проглядався ФЕП через світловід з вольфрамату свинцю. Енергетична роздільна здатність становила 9,2 % для  $\gamma$ -квантів  $^{137}\text{Cs}$  (без використання світловоду ПШПВ = 7,7 %). Відносна амплітуда імпульсів детектора зі світловодом становить 65% у порівнянні із світловиходом кристалу встановленого на ФЕП. Це свідчить про високу якість кристалу і можливість його використання як світловоду у низькофонових експериментах для пошуку подвійного бета-розпаду.

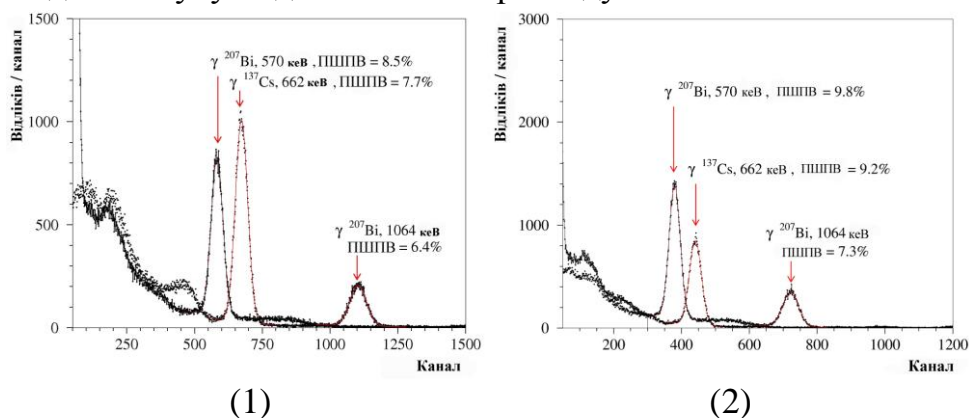


Рис. 10. Енергетичні спектри  $\gamma$ -квантів джерел  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{207}\text{Bi}$  виміряні зі сцинтиляційним кристалом  $\text{CdWO}_4$   $\varnothing 20 \times 20$  мм (1) та з цим ж кристалом, встановленим на світловід розмірами  $\varnothing 40 \times 83$  мм виготовлений з кристалу  $^{\text{арх}}\text{PbWO}_4$  (2).



Наразі, сцинтиляційний кристал  $^{apx}\text{PbWO}_4$   $\varnothing 40 \times 83$  мм успішно використовується як світловід у низькофоновому експерименті з пошуку подвійного бета-ядра  $^{106}\text{Cd}$  у Національній лабораторії Гран Сассо. Описаний вище сцинтиляційний кристал  $^{106}\text{CdWO}_4$  проглядався через низькофоновий високоефективний світловід зі сцинтиляційного кристалу  $^{apx}\text{PbWO}_4$  низькофоновим ФЕП. Детектор  $^{106}\text{CdWO}_4$  функціонував у збігах (антизбігах) з чотирма HPGe гамма-детекторами. Чутливість цього експерименту очікується на рівні  $T_{1/2} \sim 10^{20} - 10^{21}$  років для процесів  $2\varepsilon$ ,  $\varepsilon\beta^+$  та  $2\beta^+$  розпадів ядра  $^{106}\text{Cd}$ . Надалі цей кристал планується використовувати у наступних експериментах з метою дослідження рідкісних ядерних розпадів.

У **висновках** сформульовані основні наукові й практичні результати дисертаційної роботи.

## ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень у рамках дисертаційної роботи виміряно ряд характеристик сцинтиляційних кристалів, у тому числі при низьких температурах, важливих для їх застосування у дослідженнях подвійного бета-розпаду, пошуках темної матерії та дослідженнях інших рідкісних ядерних процесів. Вивчено вплив різних умов світлозбору на світловихід та роздільну здатність сцинтиляційного детектора. Розроблено сцинтиляційний кристал вольфрамату свинцю із археологічного свинцю для використання його як світловоду в експериментах для пошуку подвійного бета-розпаду. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Вперше виміряно характеристики (світловихід та кінетику сцинтиляційних сигналів) сцинтиляційних кристалів  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{ZnWO}_4$ ,  $\text{MgWO}_4$  у широкому діапазоні температур (7 – 300 K) та показано перспективність цих матеріалів для застосування у низькотемпературних сцинтиляційних болометрах.
2. Досліджено залежності світловиходу та енергетичної роздільної здатності від форми сцинтиляційних кристалів  $\text{ZnWO}_4$ , обробки поверхні, форми та матеріалу відбивача світла та наявності оптичного контакту з фотопомножувачем. Кращі результати без оптичного контакту з фотопомножувачем (тобто в умовах близьких до криогенних сцинтиляційних болометрів) отримані з кристалом гексагональної форми, що мав дифузну бічну поверхню та поліровані торці, а також був оточений відбивачем світла з повітряним проміжком між кристалом і відбивачем.
3. Досліджено залежності світловиходу та енергетичної роздільної здатності сцинтиляційного детектора з кристалами  $\text{CaWO}_4$  від форми кристалів (циліндр, гексагональна, прямокутна та трикутна призми), типу обробки поверхні, типу та форми відбивача та наявності оптичного контакту з фотопомножувачем. Встановлено, що шліфовка бічної поверхні та трикутна форма сцинтиляційного кристалу покращують світловихід та енергетичну роздільну здатність кристалу в умовах близьких до умов збору світла у криогенних сцинтиляційних болометрів.
4. Розроблено сцинтиляційний кристал вольфрамату свинцю із археологічного свинцю для використання його як світловоду в експерименті зі сцинтиляційним кристалом вольфрамату кадмію збагаченого кадмієм-106 у експериментах з пошуку подвійного бета-розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ . Відносна амплітуда імпульсів детектора зі світловодом становить 65% у порівнянні з умовами вимірювань, коли кристал був встановлений безпосередньо на ФЕП.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Oxide scintillators to search for dark matter and double beta decay / *L.L. Nagornaya, F.A. Danevich, A.M. Dubovik, B.V. Grinyov, S. Henry, V. Kapustyanyk, H. Kraus, D.V. Poda, V.M. Mokina, V.B. Mikhailik, M. Panasyuk, O.G. Polischuk, V. Rudyk, V. Tsybul'skyi, I.A. Tupitsyna, Yu.Ya. Vostretsov* // IEEE Nucl. Sci. Symp. – 2008. – P. 3266-3271.
2. Получение Cd и  $^{106}\text{Cd}$  высокой чистоты для сцинтилляторов  $\text{CdWO}_4$  и  $^{106}\text{CdWO}_4$  / *Р. Бернабей, В.Д. Вирич, Б.В. Гринев, Ф.А. Даневич, Г.П. Ковтун, В.М. Мокина, Л.Л. Нагорная, С.С. Нагорный, С. Нуси, Д.А. Солонихин, В.И. Третьяк, А.П. Щербань* // *Металлофизика и новейшие технологии – 2008. – Стр. 477-486.*
3.  $\text{ZnWO}_4$  scintillators for cryogenic dark matter experiments / *Kraus H., F.A. Danevich, S. Henry, V.V. Kobychyev, V.B. Mikhailik, V.M. Mokina, S.S. Nagorny, O.G. Polischuk, V.I. Tretyak* // Nucl. Instrum. Meth. A – 2009. – Vol. 600 – P. 594-598.
4.  $\text{MgWO}_4$  – A new crystal scintillator / *F.A. Danevich, D.M. Chernyak, A.M. Dubovik, B.V. Grinyov, S. Henry, H. Kraus, V.M. Kudovbenko, V.B. Mikhailik, L.L. Nagornaya, R.B. Podviyanuk, O.G. Polischuk, I.A. Tupitsyna, Yu.Ya. Vostretsov* // Nucl. Instrum. Meth. A – 2009. – Vol. 608 – P. 107-115.
5. Large volume  $\text{ZnWO}_4$  crystal scintillators with excellent energy resolution and low background / *F.A. Danevich, A.M. Dubovik, B.V. Grinyov, H. Kraus, V.B. Mikhailik, V.M. Mokina, L.L. Nagornaya, S.S. Nagorny, O.G. Shkulkova, I.A. Tupitsyna, Yu.Ya. Vostretsov* // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2009. – Vol. 56 – P. 994-997.
6. Tungstate and molybdate scintillators to search for dark matter and double beta decay / *L.L. Nagornaya, F.A. Danevich, A.M. Dubovik, B.V. Grinyov, S. Henry, V. Kapustyanyk, H. Kraus, D.V. Poda, V.M. Kudovbenko, V.B. Mikhailik, M. Panasyuk, O.G. Polischuk, V. Rudyk, V. Tsybul'skyi, I.A. Tupitsyna, Yu.Ya. Vostretsov* // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2009. – Vol. 56 – P. 2513-2518.
7. Вимірювання характеристик сцинтиляційних кристалів для криогенних експериментів з пошуку частинок темної матерії та подвійного  $\beta$ -розпаду / *В.М. Кудовбенко, Р.С. Бойко, Ф.А. Даневич, Е.Н. Галашов, Б.В. Гриньов, Л.І. Івлева, М.Б. Космина, Х. Краус, Н. Крутяк, В.Б. Михайлик, Л.Л. Нагорна, Л.І. Поткін, І.А. Тупіцина, А.Н. Шеховцов, О.Г. Поліщук, В.Н. Шлегель, Я.В. Васильєв* // *Book of abstracts of Int. Conf. "Astronomy and Space Physics in Taras Shevchenko Nat. University of Kyiv", Kyiv, Ukraine, 24-28.05.2010, p. 101-102.*
8. Вимірювання характеристик сцинтиляційних кристалів для криогенних експериментів по пошуку частинок темної матерії та подвійного  $\beta$ -розпаду / *Р.С. Бойко, Ф.А. Даневич, Е.Н. Галашов, Б.В. Гриньов, Л.І. Івлева, М.Б. Космина, Х. Краус, Н. Крутяк, В.М. Кудовбенко, В.Б. Михайлик, Л.Л. Нагорна, Л.І. Поткін, І.А. Тупіцина, А.Н. Шеховцов, О.Г. Поліщук, В.Н. Шлегель, Я.В. Васильєв* // *Тезиси докладов школы-семинара «Сц. процессы и материалы для регистрации иониз. излучения», ИСМА, Харьков, Украина, 12-15.09.2010 – Харьков, 2010, стр. 21.*
9. Development of enriched  $^{106}\text{CdWO}_4$  crystal scintillators to search for double  $\beta$  decay processes in  $^{106}\text{Cd}$  / *P. Belli, R. Bernabei, R.S. Boiko, V.B. Brudanin, N. Bukilic, R. Cerulli, D.M. Chernyak, F.A. Danevich, S. d'Angelo, V.Ya. Degoda, A.E. Dossovitskiy, E.N. Galashov, Yu.A. Huzhnyi, S.V. Ildyakov, A. Incicchitti, V.V. Kobychyev, O.S. Kolesnyk, G.P. Kovtun, V.M. Kudovbenko, J.R. de Laeter, A.L. Mikhlin, S.S. Nagorny, S.G. Nedilko, A.S. Nikolaiko, S. Nisi, D.V. Poda, R.B. Podviyanuk, O.G. Polischuk, D. Prospero,*

- A.P. Shcherban, V.P. Shcherbatskyi, V.N. Shlegel, D.A. Solopikhin, Yu.G. Stenin, V.I. Tretyak, Ya.V. Vasiliev, V.D. Virich* // Nucl. Instrum. Meth. A – 2010. – Vol. 615 – P. 301-306.
10. Feasibility study of  $\text{PbWO}_4$  and  $\text{PbMoO}_4$  crystal scintillators for cryogenic rare events experiments / *F.A. Danevich, B.V. Grinyov, S. Henry, M.B. Kosmyna, H. Kraus, N. Krutyak, V.M. Kudovbenko, V.B. Mikhailik, L.L. Nagornaya, B.P. Nazarenko, A.S. Nikolaiko, O.G. Polischuk, V.M. Puzikov, A.N. Shekhovtsov, V.I. Tretyak, Yu.Ya. Vostretsov* // Nucl. Instrum. Meth. A – 2010. – Vol. 622 – P. 608-613.
11. Optimization of light collection from crystal scintillators for cryogenic experiments / *F.A. Danevich, R.V. Kobychiev, V.V. Kobychiev, H. Kraus, V.B. Mikhailik, V.M. Mokina* // Nucl. Instrum. Meth. A – 2014. – Vol. 744 – P. 41-47.
12. Impact of geometry on light collection efficiency of scintillation detectors for cryogenic rare event searches / *F.A. Danevich, R.V. Kobychiev, V.V. Kobychiev, H. Kraus, V.B. Mikhailik, V.M. Mokina, I.M. Solsky* // Nucl. Instr. Meth. B – 2014. – Vol. 336 – P. 26-30.
13. Производство и свойства низкофоновых сцинтилляторов вольфраматов кадмия и свинца для поиска двойного бета-распада / *Г.П. Ковтун, Р.С. Бойко, Ф.А. Даневич, Б.Н. Кропивянский, В.М. Мокина, Т.С. Потина, Д.А. Солопихин, И.А. Тупицына, А.П. Щербань, В.Н. Шлегель* // Ядерна фізика та енергетика – 2014. – Том 15 – Стр. 92-100.
14. Optimization of light collection from oxide  $\text{CaWO}_4$  scintillators / *V.M. Mokina, F.A. Danevich, V.V. Kobychiev, R.V. Kobychiev, H. Kraus, V. Mykhaylyk, I.M. Solskii* // Proc. Int. Conf. on Oxide Materials for Electronic Engineering OMEE'2014, 26-30.05.2014, Lviv, Ukraine, p. 251-252.
15. Optimization of light collection from crystal scintillators for cryogenic rare decay experiments / *V.M. Mokina, F.A. Danevich, V.V. Kobychiev, R.V. Kobychiev, H. Kraus, V. Mikhailik, I.M. Solsky* // Solid State Phenomena – 2015 – Vol. 230 – P. 199-204.

## АНОТАЦІЯ

**Мокина В.М. Сцинтиляційні детектори на основі кристалів молібдатів та вольфраматів для пошуку подвійного бета-розпаду. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок та високих енергій. Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, Київ, 2015.

Дисертація присвячена дослідженням сцинтиляційних властивостей кристалів  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{ZnWO}_4$ ,  $\text{CaWO}_4$  та  $\text{MgWO}_4$  як потенційних криогенних детекторів для пошуків подвійного бета-розпаду. Кристали досліджувались у діапазоні температур 305 – 7 К. Вивчено вплив форми (циліндрична, гексагональна, прямокутна та трикутна призми), типу обробки поверхні кристалу (від полірованої всієї до повністю шліфованої), умов світлозбору (наявність чи відсутність оптичного контакту; матеріал та форма відбивача) на енергетичну роздільну здатність та відносну амплітуду сигналів сцинтиляційних детекторів з кристалами  $\text{ZnWO}_4$  та  $\text{CaWO}_4$ . Показано, що шліфування бічної поверхні покращує світлозбір у сцинтиляційному кристалі. Трикутна форма кристалу є кращою серед досліджених форм для забезпечення високого світлозбору у криогенних детекторах. Описано процес розробки сцинтиляційного кристалу вольфрамату свинцю із археологічного свинцю для використання як світловоду в

експерименті із сцинтиляційним кристалом вольфрамату кадмію із збагаченого ізотопу  $^{106}\text{Cd}$  в експериментах з пошуку подвійного бета-розпаду ядра  $^{106}\text{Cd}$ .

Ключові слова: подвійний бета-розпад,  $^{106}\text{CdWO}_4$ ,  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{ZnWO}_4$ ,  $\text{CaWO}_4$ ,  $\text{MgWO}_4$ , низькофононий експеримент, криогенний детектор, світлозбір, сцинтиляційний детектор.

### АННОТАЦІЯ

**Мокина В.М. Сцинтилляционные детекторы на основе кристаллов молибдатов и вольфраматов для поиска двойного бета-распада. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.16 – физика ядра, элементарных частиц и высоких энергий. Институт ядерных исследований Национальной академии наук Украины, Киев, 2014.

Диссертация посвящена исследованиям сцинтилляционных свойств кристаллов  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{ZnWO}_4$ ,  $\text{CaWO}_4$  и  $\text{MgWO}_4$  в качестве потенциальных криогенных детекторов для поисков двойного бета-распада. Кристаллы исследовались в диапазоне температур 305 – 7 К. Изучено влияние формы (цилиндрическая, гексагональная, прямоугольная и треугольная призмы), типа обработки поверхности кристалла (от полированной до полностью шлифованной), условий светосбора (наличие или отсутствие оптического контакта) материала и формы отражателя на энергетическое разрешение и относительную амплитуду сигналов сцинтилляционных детекторов с кристаллами  $\text{ZnWO}_4$  и  $\text{CaWO}_4$ . Показано, что шлифование боковой поверхности улучшает светосбор в сцинтилляционном кристалле. Также треугольная форма кристалла является лучшей среди исследованных с точки зрения улучшения светосбора в криогенных сцинтилляционных детекторах. Разработан кристалл вольфрамата свинца из археологического свинца для использования в качестве световода в экспериментах со сцинтилляционным кристаллом вольфрамата кадмия из обогащенного изотопа  $^{106}\text{Cd}$  для поиска двойного бета-распада ядра  $^{106}\text{Cd}$ .

Ключевые слова: двойной бета-распад,  $^{106}\text{CdWO}_4$ ,  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{ZnWO}_4$ ,  $\text{MgWO}_4$ ,  $\text{CaWO}_4$ , низькофононий експеримент, криогенний детектор, світосбор, сцинтилляционный детектор.

### ABSTRACT

**Mokina V.M. Scintillation detectors based on molybdate and tungstate crystals for double beta-decay search. – Manuscript.**

Thesis for getting the Academic Degree of Candidate of Sciences (Technical) on specialty 01.04.16 – physics of nuclei, elementary particles and high energies. Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2015.

The thesis is dedicated to study of scintillation properties of  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{ZnWO}_4$ ,  $\text{CaWO}_4$  and  $\text{MgWO}_4$  crystal scintillators as promising cryogenic detectors to search for double beta decay. The crystals were investigated in the temperature range 305 K – 7 K. The effect of crystal's shape (cylindrical, hexagonal, rectangular and triangular prisms), surface conditions (polished, diffused), optical conditions (presence or absence of optical contact), material and shape of the light reflector on the energy resolution and relative pulse amplitude of  $\text{ZnWO}_4$  and  $\text{CaWO}_4$  crystal scintillators were studied. It is shown that diffused surface improves light collections from scintillation crystals. Triangular shape of crystals provides the highest light collection. A lead tungstate crystal from archaeological lead was developed and

tested as a light-guide for experiments to search for double beta decay of  $^{106}\text{Cd}$  with the help of cadmium tungstate scintillation crystal from enriched isotope  $^{106}\text{Cd}$ .

Key words: double beta decay,  $^{106}\text{CdWO}_4$ ,  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{ZnWO}_4$ ,  $\text{MgWO}_4$ ,  $\text{CaWO}_4$ , low background experiment, cryogenic detector, light collection, scintillation detector.

---

Підписано до друку 23.07.2015 р. Формат 60x90<sup>1</sup>/16  
Ум. друк. арк. 0,9. Обл-вид. арк. 0,9  
Наклад 100 прим. Замовлення № 113  
Віддруковано на різнографі в видавничому центрі „Принт-центр”  
04053, м. Київ, вул. Артема, 26А  
Тел./факс: 486-50-88, 332-41-10, 277-40-16  
<http://www.printc.com.ua>. E-mail [printcentr@ukr.net](mailto:printcentr@ukr.net)