

Відгук

офіційного опонента на дисертацію Мокіної Валентини Михайлівни

«Сцинтиляційні детектори на основі кристалів молібдатів та вольфраматів для пошуку подвійного бета-розпаду», яку подано на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій

Дисертаційна робота Валентини Мокіної присвячена створенню сцинтиляційних детекторів на основі кристалів молібдатів та вольфраматів для пошуку подвійного бета-розпаду. Не викликає сумнівів **важливість та актуальність** цього завдання тому, що пошуки безнейтринного подвійного бета-розпаду (2β -розпад і $0\nu 2\beta$ -розпад) атомних ядер є однією з найбільш актуальних задач фізики елементарних частинок. З'ясування природи нейтрино (чи є воно частинкою Майорани або Дірака) є ключовою проблемою фізики взагалі. Спостереження $0\nu 2\beta$ -розпаду однозначно свідчатиме про те, що нейтрино є масивною частинкою Майорани, а також про незбереження лептонного заряду. Одразу підкреслимо, що дисертація виконувалась у відповідності до цільової комплексної програми НАН України «Астрофізичні і космологічні проблеми прихованої маси і темної енергії Всесвіту».

Відзначу також, що проблема оксидних матеріалів стає все більш актуальною також для сцинтиляційної техніки й матеріалознавства. Коло застосувань таких матеріалів постійно поширюється, виникають нові несподівані застосування оксидних кристалів, такі як виготовлення низькотемпературних сцинтиляційних болометрів, що здатні забезпечити енергетичне розділення на рівні кількох кеВ у широкому діапазоні енергій. Перевагою цих детекторів є можливість використання сцинтиляційних кристалів, які містять елементи, до складу яких входять потенційно 2β -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 2β -активними ізотопами, є актуальною задачею.

Незважаючи на те, що проблема є складною, а експериментальні дослідження трудомісткими, авторка досягла успіху у виконанні завдань роботи. Результати її досліджень ґрунтовно викладено в дисертації. Основна частина роботи викладена на 128 сторінках, містить 40 рисунків і 11 таблиць. Сама робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, а також списку використаних літературних джерел. У вступі обґрунтована актуальність обраної теми, чітко сформульовані об'єкт, предмет та описані методи дослідження, вказано на найважливіші нові результати, отримані в дисертації, їхнє практичне значення, детально визначено особистий внесок автора.

Перш за все, відзначу, що з великим інтересом я прочитав **літературний огляд** «Подвійний β -розпад. Основні положення теорії та експерименти», де розглянуто основні теоретичні погляди щодо 2β -розпаду і безнейтринного подвійного $0\nu 2\beta$ -розпаду. Викладено практично усі сучасні та майбутні експерименти, де здійснювалася перевірка теоретичних висновків, надано класифікацію експериментів. Приємно відзначити, що цей розділ має усі ознаки аналітичного огляду, тобто здобувач критично розглядає існуючі експерименти.

Другий розділ «Сцинтиляційні кристали вольфраматів та молібдатів як потенційні криогенні детектори» є найбільш принциповим для суті дисертації і стосується найбільш цікавих експериментальних досліджень, тому зупинимося на результатах цього розділу найбільш ретельно. З цим розділом пов'язано перший пункт новизни: «уперше досліджено відносний світловий вихід та кінетику сцинтиляційних сигналів у кристалах $PbWO_4$, $PbMoO_4$, $ZnWO_4$ та $MgWO_4$ у широкому діапазоні температур від кімнатної до температури рідкого гелію, показано перспективність цих кристалів як криогенних детекторів для пошуків подвійного бета-розпаду». Експериментальні дослідження цього розділу хоча і є рутинними, але є обов'язковими для подальшого застосування матеріалів. Відзначу, що температурні залежності люмінесценції мають і самостійну наукову цінність для вивчення вказаних матеріалів.

Розглянуто методику низькотемпературних досліджень, показано, що одночасне вимірювання сцинтиляційного і теплового сигналів дає можливість ідентифікувати бета-частинки (гамма-кванти) і альфа-частинки, а отже суттєво знизити фон від слідових забруднень сцинтиляційних кристалів ураном, радієм і торієм і продуктами їх розпаду. Висновок про придатність кристалів $PbWO_4$, $PbMoO_4$, $ZnWO_4$ та $MgWO_4$ для низькотемпературних низькофонових експериментів завдяки високому світловому виходу при низьких температурах, а також низькій радіоактивній забрудненості є цілком зрозумілим і обґрунтованим.

3-й розділ називається «Оптимізація умов світлозбору в криогенних сцинтиляційних болометрах». Добре відомо, що оптимізація світлозбору у низькотемпературних сцинтиляційних болометрах є дуже актуальною задачею, особливо для кристалів з низьким світловим виходом. Тому, важливо було не тільки дослідити умови оптимізації світлозбору, а й вдосконалити методи моделювання процесів розповсюдження фотонів у сенсорних матеріалах, що дає змогу без трудомістких вимірювань при низьких температурах, сконструювати детектор з високою ефективністю збору світла.

З цим розділом пов'язано другий пункт наукової новизни: «уперше систематично вивчено вплив форми кристалів, обробки їх поверхні, форми та матеріалу відбивача світла, наявності оптичного контакту з фотоприймачем на енергетичне розділення та відносну амплітуду сигналів з метою оптимізації ефективності світлозбору у низькотемпературних сцинтиляційних болометричних детекторах для дослідження подвійного бета-розпаду, пошуку темної матерії, дослідження рідкісних альфа-розпадів». Одразу відзначу, що мені не подобається формулювання цього висновку, слід було вказати саме тут яка форма (обробка, відбивач) є оптимальними. Незважаючи на цей недолік, з тексту розділу цілком зрозуміло, які умови збору світла авторка вважає оптимальним. Деякі зауваження до результатів цього розділу я наведу нижче.

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 якістьми є завжди актуальною задачею у сцинтиляційних експериментах для дослідження подвійного бета-розпаду атомних ядер.

Четвертий і останній **розділ** дисертації як раз і присвячено рішення такої проблеми. Він має назву «Розробка світловоду з кристалу вольфрамату свинцю для експерименту з пошуку подвійного β -розпаду ^{106}Cd ». В цьому розділі описано унікальний світловод, який виготовлено з кристалу PbWO_4 . Для зниження фону у якості сировини використано археологічний свинець.

Авторка використовує сполучення «розробка світловоду». Відомо, що розробка передбачає низку послідовних технологічних операцій. Дійсно, така послідовність описана для технології отримання кристалів $^{106}\text{CdWO}_4$. Цитую автореферат: «Виробництво сцинтиляційних кристалів вольфрамату кадмію, збагачених ізотопом ^{106}Cd , включає декілька основних етапів: ...». Порівняємо з описом світловода. «Розроблено сцинтиляційний кристал вольфрамату свинцю з археологічного свинцю з високим рівнем хімічної чистоти 99, 9996%. З кристалу $^{apx}\text{PbWO}_4$ було виготовлено світловод розмірами $\varnothing 40 \times 83$ мм». На мою думку більш ретельно слід було зосередитися саме на технології отримання $^{apx}\text{PbWO}_4$. Другий варіант – не використовувати слово «розробка», яке передбачає наявність документу (наприклад – технологічний регламент). За моїм враженням авторка була відповідальним виконавцем за створення цього світловоду. Вона зробила дуже важливу роботу, саме цей результат є найбільш анонсованим серед наукової спільноти. Такий низькофоновий світловод вже використовується у експерименті по пошуку подвійного бета-розпаду кадмію-106.

Якщо підсумувати зміст усіх частин роботи, то можна сказати, що дисертація написана досить зрозуміло і грамотно, її структура має логічний характер. Слід відзначити, що в кожному розділі наведено різнобічний ілюстративний матеріал у вигляді досконало виконаних рисунків і таблиць. **Автореферат в повній мірі відображає** зміст виконаної роботи.

Ступінь **обґрунтованості та достовірності** наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, забезпечений ретельними експериментальними вимірюваннями, використанням перевіреного експериментального обладнання, методик та приладів, методів аналізу даних, за допомогою яких були здійснені описані в дисертації дослідження. Відзначу, що усі результати дисертації проходили незалежну перевірку за кордоном.

На практичному значенні отриманих результатів я вже зупинявся. Той факт, що низькофоновий світловод вже використовується у міжнародному експерименті є блискучою ілюстрацією практичного значення отриманих результатів.

Але поряд з позитивним враженням від дисертації В. Мокіної є кілька зауважень.

1. Перше зауваження стосується особистого внеску здобувача у авторефераті, цей пункт сформульовано невдало. Не можу повірити, що творчий внесок захований у словах «брала участь у підготовці до друку публікацій».
2. В таблиці 3.1 дисертації приведені оптичні характеристики матеріалів, що є важливими для розрахунків ефективності світлозбору. Незрозуміло чому не надано коефіцієнт поглинання кристалу – один з найважливіших параметрів моделювання.
3. Розрахунки враховують такі тонкі важелі впливу як залежність відбивання від довжини хвилі, але дисперсія коефіцієнтів заломлення і поглинання кристалу навіть не обговорюється.
4. Авторка використовує термін «відбивач ЗМ». Насправді ЗМ – це назва фірми, що виробляє цілу низку матеріалів. Марка відбивача – ESR (Enhanced Specular Reflector). Цитована

література містить роботу [132], де М. Janesek пояснює як походження назви оптичних матеріалів, так і перелік фірм-розробників та постачальників цих матеріалів.

5. Аналіз результатів моделювання неповний. Нема аналізу впливу розмірного фактору, так об'єм трикутної призми є меншим у ~ 3 рази об'єму циліндру, тому менший хід променів спричинить кращий збір світла. Видалення периферійної частки матеріалу може забезпечити значне покращення енергетичного розділення внаслідок радіальної неоднорідності кристалу.
6. У тексті дисертації і автореферату зустрічаються вирази типу «розроблено **сцинтиляційний** кристал ... для застосування як світловоду у ... **сцинтиляційному** детекторі». Визначення **сцинтиляційний** не відображає функціональне призначення світловоду. Гарний світловод не має свічення і не сцинтилює.

Однак ці зауваження принципово не знижують наукову і практичну цінність дисертації В.М. Мокіної, яка в цілому являє собою закінчене наукове дослідження, а наукові та практичні результати мають усі ознаки обраної спеціальності – фізики ядра, елементарних частинок та високих енергій. Основний зміст дисертації та положень наукової новизни достатньо повно розкрито в 15 наукових працях серед них 11 статей у фахових наукових журналах, серед яких відзначу 2 публікації у IEEE Transaction on Nuclear Science, а також 6 статей у Nuclear Instrument and Methods. Результати роботи доповідались на престижних національних і міжнародних вчених форумах, в тому числі самою авторкою.

Підсумовуюче сказане, я вважаю, що дисертаційна робота є кваліфікаційною науковою працею, яка за своїм обсягом, актуальністю проблеми, новизною результатів та їх практичною цінністю повністю відповідає вимогам ДАК МОН України щодо кандидатських дисертацій, а її автор – В.М. Мокіна – безумовно заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю – 01.04.16 – «Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій».

Професор кафедри фізико-математичних дисциплін
Національного університету цивільного захисту України
доктор технічних наук, старший науковий співробітник

_____ Кудін О.М.

Підпис О.М. Кудіна засвідчую
Вчений секретар Національного університету
цивільного захисту України, к.т.н.

_____ Кукура Д.В.

31серпня 2015 року