

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Інституту ядерних досліджень
НАН України
академік НАН України
В. Слісєнко

« 2023 р.

№Д 23724640

Інститут ядерних досліджень НАН України

ВИСНОВОК

Інституту ядерних досліджень НАН України

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Назара Володимировича Сокура на тему:

«Альфа-розпад ^{212}Po та пошук надважкого елементу сиборгію»,

поданої на здобуття ступеня доктора філософії

з галузі знань «10 Природничі науки» за спеціальністю «104 Фізика та астрономія»

Витяг

з протоколу № 735 засідання розширеного наукового семінару відділу фізики лептонів від 15 грудня 2023 року.

Присутні: Голова засідання – зав. ВФЛ ІЯД НАН України к.ф.-м.н., ст. докл. В.В. Кобичев; д.ф.-м.н., проф. Ф.А. Даневич (ВФЛ ІЯД); к.ф.-м.н. с.н.с. В.І. Третяк (ВФЛ ІЯД); к.ф.-м.н. Д.В. Касперович (ВФЛ ІЯД); к.ф.-м.н. О.Г. Поліщук (ВФЛ ІЯД); д.ф.-м.н. А.М. Саврасов (ВСЯ ІЯД); д.ф.-м.н., с.н.с. В.В. Давидовський (ВТЯП ІЯД); д.ф.-м.н., с.н.с. О.А. Понкратенко (ВФВІ ІЯД); д.філос., М.В. Романюк (ВТЯП ІЯД); к.ф.-м.н., В.І. Киришук (НЦ з ФЗОКЯМ ІЯД); к.ф.-м.н., ст. лосл. В.В. Улещенко (ВФВІ ІЯД).

Серед присутніх 4 доктори наук, 6 кандидатів наук і 1 доктор філософії.

Порядок денний:

Обговорення дисертаційного дослідження Н.В. Сокура на тему «Альфа-розпад ^{212}Po та пошук надважкого елементу сиборгію», поданого на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Науковий керівник – к.ф.-м.н., с.н.с. Інституту ядерних досліджень НАН України Володимир Ілліч Третяк.

Дисертацію виконано у відділі фізики лептонів Інституту ядерних досліджень НАН України. Тему дисертації затверджено на засіданні вченої ради Інституту ядерних досліджень НАН України (протокол № 1 від 28.01.2020 року).

Здобувач надав повний комплект документів: текст дисертації, академ. довідку (наукова та освітня програми навчання в аспірантурі ІЯД виконані повністю), довідку щодо оригінальності (плагіату в тексті дисертації не виявлено), позитивний висновок наукового керівника.

Виступив:

Здобувач Н.В. Сокур представив доповідь за основними положеннями дисертації «Альфа-розпад ^{212}Po та пошук надважкого елементу сиборгію», поданої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Після закінчення презентації присутніми на захисті фахівцями було поставлено наступні запитання:

Д.ф.-м.н., с.н.с. В.В. Давидовський: Підкресліть особистий внесок у проведені дослідження.

Н.В. Сокур: в роботі з визначенням періоду напіврозпаду ^{212}Po мною проведено часово-амплітудний аналіз сигналів, розроблено алгоритм аналізу сигналів у рідкому скінтіляторі, побудовано енергетичні спектри, визначено період напіврозпаду та вплив різних систематичних неточностей. В пошуку сиборгію мною проведено моделювання BiPo -ланцюжків та побудовано їх спектр в області шуканого піку від альфа-частинки дочірнього ядра сиборгію, визначено кількість BiPo -подій в спектрі. В дослідженні AMoRE мною проведено аналіз світлових та теплових сигналів, побудовано енергетичні спектри кристалів.

Д.ф.-м.н., с.н.с. В.В. Давидовський: Проведені роботи були основною метою досліджень чи другорядними?

Н.В. Сокур: у випадку з вимірюванням періоду напіврозпаду ^{212}Po це було основною метою дослідження. Пошук природного надважкого елементу сиборгію проведено як додаткова робота з даними, виміряними в дослідженні Auroga з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ^{116}Cd . Вивчення альфа-фону в досліді AMoRE не є власне самою ціллю, але без проведення аналізу фону неможливо виконати основну мету — пошук безнейтринного подвійного бета-розпаду ^{100}Mo . Успішність дослідження визначається саме рівнем фону.

Після відповідей на запитання виступили **рецензенти** дисертаційної роботи В.В. Улещенко і В.І. Киришук, які наголосили на позитивних аспектах дослідження та висловили свої побажання та зауваження.

К.ф.-м.н. ст. досл. В.В. Улещенко: Дисертаційну роботу присвячено визначенню періоду напіврозпаду ядра ^{212}Po , пошуку надважкого елементу сиборгію та вивченню фону від альфа-частинок в дослідженні AMoRE .

Дисертаційна робота розширює наукові знання про ядерні процеси, такі як альфа-розпад та подвійний бета-розпад, про структуру ядра та методи аналізу в низькофонових дослідженнях. За результатами дослідження з ^{212}Po встановлено найточніше значення періоду напіврозпаду. Вивчено способи аналізу швидких сигналів та ланцюжків сигналів, що допоможе в багатьох інших низькофонових дослідженнях, включно з подвійним бета-розпадом. Вивчення фону в дослідженні AMoRE допоможе дослідити подвійний бета-розпад ^{100}Mo , що, у свою чергу, наблизить до вирішення загадки про природу нейтрино. Сьогодні дослідження з нейтрино є одним з найважливіших напрямків фундаментальної фізики, тому наукове значення проведеної роботи вкрай важливе.

В дисертації в розділі про пошук надважкого елементу сиборгію варто наголосити на тому, чому сиборгій шукають саме таким методом. Докладніше викласти модель, відповідно до якої проведено пошук й обґрунтувати вибір цієї моделі. Також є зауваження до граматичних помилок.

Загалом робота безумовно складає цінність, наведені результати матимуть корисний вплив на планування подальших досліджень.

К.ф.-м.н. В.І. Киришук: В дисертаційній роботі описано дослідження з визначення періоду напіврозпаду ^{212}Po , пошуку надважкого елементу сиборгію та вивчення альфа-фону в дослідженні АМоRE.

Швидкі ланцюжки самі собою є частим предметом аналізу в низькофонових дослідженнях, тому докладне вивчення одного з таких ланцюжків корисно впливають на розвиток загального підходу їх аналізу. Завдяки використаній електроніці та розробленим аспірантом методам вдалося отримати найточніше значення періоду напіврозпаду ^{212}Po серед усіх досліджень. В розділі докладно описано проведену методику і всі тонкощі аналізу.

В розділі про пошук надважкого елементу сиборгію варто привести більше досліджень, що використовують різні методики. Підкреслити, наскільки параметри моделі впливають на очікувану поширеність сиборгію. Сам аналіз добре проведений і вклад аспіранта в роботу мав визначальну роль в кінцевому результаті.

Четвертий розділ дисертації присвячений дослідженню АМоRE з пошуку подвійного бета-розпаду ^{100}Mo . Обґрунтовано вибір даного ядра та методику дослідження. Описано план роботи на подальших стадіях. Достатньо широко висвітлено проблему внутрішньої та поверхневої забрудненості кристалів. Окрім того підкреслено важливість поверхневої забрудненості матеріалів детекторної системи. Аналіз проведено з даними першої стадії АМоRE-pilot, метою якого було налагодити роботу з сигналами від теплового та світлового датчиків та вивчити фон від альфа-джерел. Результати роботи вказують, що рівень фону наразі потребує зменшення. Аспірант описав способи, якими можна зменшити рівень фону.

Загальне враження позитивне, дисертація є цінним внеском у вивченні швидких ланцюжків, альфа-розпадів та їх внеску в забрудненість у низькофонових дослідженнях. Окрім зазначених вище порад, варто звернути увагу на граматичні помилки, чіткіше сформулювати висновки та наукове значення роботи.

Після виступів рецензентів виступив **науковий керівник** — к.ф.-м.н., с.н.с. Володимир Ілліч Третяк.

Науковий керівник: Дисертаційна робота Н.В. Сокура присвячена вивченню альфа-розпадів різних ядер. Не дивлячись на довгу історію, альфа-розпад все ще привертає велику увагу як ефективний інструмент для вивчення структури ядра. Інтерес до цього розпаду також пов'язаний з дослідженнями надважких елементів і з пошуком нових стабільних елементів у давно передбаченому острові стабільності за межами відомих на даний момент стабільних ізотопів. Крім того, альфа-розпад ядер в природних радіоактивних ланцюжках ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U та деяких інших радіоактивних забруднень створює фон при пошуках і вивченні нових явищ і рідкісних ядерних розпадів, що неможливі в Стандартній Моделі частинок, але передбачуються багатьма сучасними теоріями, що її розширюють. Одним із таких явищ є безнейтринний подвійний бета-розпад ($2\beta 0\nu$), що пов'язаний з масою нейтрино та законом збереження лептонного числа. Спостереження $2\beta 0\nu$ -розпаду підтвердило б Майоранівську природу нейтрино і дало б змогу пояснити механізм, що забезпечує малість маси нейтрино порівняно з іншими частинками, а також пояснило б баріонну асиметрію Всесвіту, в якому ми спостерігаємо матерію, але не антиматерію в рівній кількості. Пошуки $2\beta 0\nu$ -розпаду зараз є однією з пріоритетних задач сучасної фізики частинок; експерименти проводяться в підземних лабораторіях (для пониження фону від космічних мюонів), з масивними детекторами

(зараз – до тонни), оточеними багатотонним захистом із надчислених матеріалів. Альфа-розпади можуть створювати суттєвий фон при пошуках $2\beta 0\nu$ -розпаду – іноді більшість подій в області шуканого ефекту пов'язана з α -розпадами, як, наприклад, в експерименті CUORE по пошуку $2\beta 0\nu$ -розпаду ^{130}Te . Тому актуальність теми дисертаційної роботи Н.В. Сокура є незаперечною.

Інтерес до α -розпаду ^{212}Po , предметом досліджень однієї з частин дисертації Назара, пов'язаний з існуючими протиріччями у вимірюваннях його періоду напіврозпаду: рекомендоване (NuclearDataSheets) значення $T_{1/2}=299\pm 2$ нс, основане на старих дослідженнях, було у згоді з нашими попередніми вимірюваннями із кристалічним сцинтилятором BaF_2 , але розходилося із результатами двох сучасних експериментів Borexino (головне присвяченого вивченню сонячних нейтрино) та XENON (пошуки темної матерії), що давали значення, близьке до 295 нс. Для наших нових вимірювань був розроблений детектор на основі рідкого сцинтилятора, насиченого торієм. Завдяки швидкості сцинтилятора (фронт наростання сигналу ~ 1 нс), швидкому фотопомножувачу (~ 2 нс), іншому швидкому обладнанню та великій зібраній статистиці (біля 50 млн записаних подій), період напіврозпаду було визначено з великою точністю як 295.1 ± 0.4 нс, що є найточнішим на сьогодні вимірним значенням (і є у згоді з новим рекомендованим NDS значенням 294.3 ± 0.8 нс). Назар провів скрупульозний аналіз зібраних даних, розробив оригінальний алгоритм пошуку швидких пар розпадів (бета-розпад ^{212}Bi з послідуєчим альфа-розпадом ^{212}Po), впевнився в правильній роботі алгоритму і вірному визначенні $T_{1/2}$ на модельних (згенерованих методом Монте Карло) даних, провів аналіз статистичних і систематичних похибок.

Друга частина роботи Назара пов'язана з пошуками можливої присутності надважкого елемента сиборгію (Sg, атомний номер 106) в сцинтиляторі CdWO_4 . По своїм хімічним властивостям Sg близький до вольфраму, а отже може його супроводжувати в деякій кількості, якщо має достатньо великий період напіврозпаду. Назару належить аналіз подій з енергіями більше 8.9 MeV (енергія α -розпаду ^{212}Po , найбільша в природних U/Th ланцюжках), які в детекторах є, але можуть бути пов'язані з т.зв. BiPo -подіями (бета-розпад ^{212}Bi із швидким альфа-розпадом ^{212}Po , що реєструється як одна подія з великою енергією завдяки малому часу життя ^{212}Po). На основі відгуку системи збору даних був промодельований очікуваний спектр BiPo -подій і їх число. Це дозволило на порядок покращити обмеження на можливу присутність сиборгію в CdWO_4 детекторах без такого аналізу, і отже, внесок Назара в цю роботу був дуже суттєвий. Отримане обмеження на присутність сиборгію $< 5.1\times 10^{-15}$ атомів(Sg)/атомів(W) є аналогічним (або краще) отриманих іншими методами (мас-спектрометрія, пошуки спонтанних поділів, аналіз треків) і на порядок більш жорстке, ніж отримане в нашому попередньому експерименті із сцинтилятором ZnWO_4 .

Третій розділ дисертаційної роботи присвячений аналізу даних в експерименті AMoRE. AMoRE – це міжнародний експеримент по пошуку $2\beta 0\nu$ -розпаду ^{100}Mo із сцинтиляційними болометричними детекторами CaMoO_4 і Li_2MoO_4 із молібденом, збагаченим ізотопом ^{100}Mo до $\sim 95\%$. Технологія вимірів одночасно теплового сигналу (через підвищення температури із-за енерговиділення в α - чи β -розпаді (чи ін.), помітного при низьких (порядку 10 мК) температурах) та світлового сигналу дозволяє краще зрозуміти фон і понизити його (до кількох подій або менше в області шуканого ефекту за

кілька років вимірювань). Перші два етапи (AMoRE-pilot і AMoRE-I з кількома кристалами) вже закінчені. Збудована нова підземна лабораторія на глибині 1.1 км (Корея), спеціально для етапу AMoRE-II, в якому буде використано декілька сотень $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ сцинтиляційних болометрів (120 кг ^{100}Mo). Очікується, що AMoRE-II буде одним із найбільших і найперспективніших експериментів близького майбутнього в області $2\beta 0\nu$ -розпаду. Назар є учасником проекту AMoRE, і його робота дуже важлива для розробки методів зниження фону від альфа-активних радіонуклідів. Він освоїв формат експериментальних даних, виконав формування спектрів альфа-подій від α -розпадів нуклідів природних радіоактивних ланцюжків урану і торію. Н.В. Сокур розробив оригінальний алгоритм пошуку та обробки світлових і теплових сигналів для відбору альфа-подій та побудови енергетичних спектрів для використання в наступному етапі експерименту AMoRE-II.

Результати роботи Н.В. Сокура були опубліковані в 4 статтях в реферованих журналах, що входять в бібліометричні бази Scopus та WebofScience: EuropeanPhysicalJournal C (квартиль в рік публікації за SJR – SCImagoJournalCountry&Rank: Q1), EuropeanPhysicalJournal A (Q1), PhysicaScripta (Q1), Ядерна фізика та енергетика (Q4). Результати були представлені як на щорічних наукових конференціях ІЯД (в 2017, 2019, 2020, 2022 і 2023 рр.), так і на міжнародних конференціях та школах (Львів 2018 і 2021; Харків 2020, 2021 і 2023; Ужгород 2021; Греція 2021 і 2023) та доповідались на нарадах колаборації AMoRE.

Таким чином, Н.В. Сокур успішно виконав індивідуальні плани наукової та навчальної роботи, продемонстрував високу кваліфікацію в галузі фізики і математики, застосуванні програмних методів, він достатньо вільно володіє англійською мовою, і підготовлена ним дисертація повністю готова до захисту.

В обговоренні дисертаційного дослідження взяли участь:

Д.ф.-м.н. с.н.с. В.В. Давидовський: Де проводились описані в дисертаційній роботі дослідження? Чи брав безпосередньо участь дисертант у вимірюваннях або, можливо, побудові чи плануванні детекторних систем? Чи проводив хто-небудь інший незалежний аналіз тих же даних?

Н.В. Сокур: Вперше сигнали у використаному рідкому сцинтиляторі, який використано в досліді з полонієм, спостерігалися в Києві у відділі фізики лептонів. Вимірювання проводили в Італії в Підземній лабораторії Гран Сассо. Учаси у вимірюваннях не брав. Моделювання ВіРо-ланцюжків було зроблено до вже завершеного дослідження. Паралельно моделюванням займався В.В. Кобичев, наші результати мали добре узгодження. Дослідження AMoRE проводять в Інституті природничих наук у Теджоні, Південна Корея. Окрім мене аналізом сигналів займаються й інші члени групи. 2020 року мені вдалося на кілька тижнів відвідати Корею й ближче познайомитися з дослідженням.

Д.ф.-м.н. проф. Ф.А. Даневич: Назар дуже відповідально ставиться до роботи, а його уважність до деталей не залишає сумнівів у якості виконання поставлених завдань. Назар має гарні знання з різних областей фізики, математики, програмування, знає англійську мову, без чого важко уявити наукове життя. Вважаю проведену роботу достойною статусу доктора філософії.

К.ф.-м.н. с.н.с. В.І. Третяк: Прискіпливість Назара є корисною рисою як фізика. Використання знань з інших галузей допомагає широко дивитися на дослідження й пропонувати незвичні способи досягнення цілей. Назар брав участь у різних міжнародних та українських конференціях, де представляв свої наукові результати. Загалом позитивно оцінюю проведену роботу.

К.ф.-м.н. ст.досл. В.В. Улещенко: Маю позитивне враження від проведених Назаром досліджень. Зауваження, що треба чіткіше формулювати теоретичні відомості, на основі яких проведено дані дослідження.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Назара Володимировича Сокура на тему «Альфа-розпад ^{212}Po та пошук надважкого елемента сиборгію», поданої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 Фізика та астрономія

Обґрунтування вибору теми дослідження. Альфа-розпад вперше спостережено 1899 р. Е. Резерфордом, а 1928 р. Дж. Гамовим, і незалежно Р.В. Герні та Е. Кондоном, було запропоновано теоретичний опис цього процесу як квантового тунелювання через кулонівський бар'єр. У квазікласичному наближенні ймовірність проникнення утвореної альфа-частинки крізь кулонівський бар'єр можна обчислити методом Вентцеля-Крамерса-Бріллоена (ВКБ). Складнішою задачею є обчислення ймовірності утворення альфа-частинки всередині ядра.

Дослідження рідкісних альфа-розпадів сприяють уточненню ядерних даних, вивченню структури ядра, процесів нуклонного спарювання тощо. Завдяки розвитку дослідницьких методів та покращенню чутливості, останнім часом зростає зацікавленість до вивчення альфа-розпадів із дуже короткими та дуже довгими періодами напіврозпаду. Наприклад, 2003 року в дослідженні з кристалом германату бісмуту як низькотемпературним сцинтиляційним болометром було виявлено альфа-активність ^{209}Bi (який вважався найважчим стабільним ядром), період напіврозпаду якого оцінили як $T_{1/2} \approx 1,9 \times 10^{19}$ р. Про результати відкриття повідомили в журналі Nature. Дослідження альфа-розпадів також пов'язано з пошуками надважких елементів, можливе існування яких почали обговорювати в 50-х роках 20-го ст. Вважається, що такі елементи могли бути утвореними в, наприклад, зіткненнях нейтронних зір, де присутні великі потоки нейтронів, або з вибухом наднових. Тому, теоретично, надважкі елементи можуть бути присутніми на Землі в достатній концентрації, щоб їх виявити. Дослідження в цій області допоможуть краще зрозуміти такі явища як магічні числа та острівцець стабільності, і потенційно привести до відкриття нових «цеглинок» в додаток до тих приблизно 100, що є зараз в періодичній таблиці елементів.

Дослідження ядра з найкоротшим періодом напіврозпаду серед природних ізотопів, яким є ядро ^{212}Po , дозволяє вивчати явища, що проявляються в порівняно дуже малих часових масштабах, порядку мікросекунд та наносекунд. В таких дослідженнях необхідно використовувати обладнання, що має високі часові характеристики. Вивчення сигналів з тривалістю до кількох десятків наносекунд може бути корисним у ширшому колі задач, наприклад, у дослідженнях сцинтиляційних процесів у різних речовинах, або у

вдосконаленні методів аналізу сигналів таких детекторів, як сцинтиляційні болометри, що використовують у дослідженнях подвійного бета-розпаду, пошуках темної матерії тощо.

Дослідження подвійного бета-розпаду наразі є передовим методом дослідження природи нейтрино. Оскільки період напіврозпаду цього процесу складає більше 10^{17} р., дослідження вимагають наднизьких фонів. Тому такі низькофонові дослідження зазвичай проводять глибоко під землею, а матеріали детекторної установки намагаються якомога краще очистити від забрудників. Оскільки досягти нульового рівня фону неможливо, варто вивчити забрудненість в установці й за можливості знайти способи їх зменшити. Тому багато уваги приділяють вивченню внутрішнього та поверхневого фону. Проводять моделювання, й таким чином намагаються якнайкраще описати форму фонового спектру. В дисертаційній роботі цьому буде присвячено розділ про дослідження AMoRE.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дослідження проводилися в рамках наступних договорів:

1. Дослідження подвійного бета-розпаду, рідкісних альфа- та бета-розпадів / Гранти НАН України дослідницьким лабораторіям/групам молодих вчених НАН України для проведення досліджень за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки 2020-2021 рр. / ДР № 0120U101838 / 2020-2021;
2. Подвійний бета-розпад атомних ядер / Конкурс НФДУ “Підтримка досліджень провідних та молодих учених” / ДР № 0120U104845 / 2020-2022;
3. Розробка болометричних експериментів для пошуку подвійного бета-розпаду / Цільова програма наукових досліджень НАН України “Участь в новітніх міжнародних проєктах з фізики високих енергій та ядерної фізики” на 2021-2023 рр. / ДР № 012U111684 / 2021-2023;

Мета і завдання дослідження.

1. отримати найточніше значення періоду напіврозпаду ядра ^{212}Po .
2. визначити концентрацію надважкого елементу сиборгію в кристалі $^{116}\text{CdWO}_4$ як можливої домішки до хімічно подібного вольфраму.
3. вивчити фон від альфа-розпадів у дослідженні AMoRE з пошуку подвійного бета-розпаду ^{100}Mo .

Об'єкт дослідження: надважкий елемент сиборгій Sg ($Z = 106$), ізотопи ^{212}Po , ^{100}Mo .

Предмет дослідження: пошук надважких елементів, альфа-розпад ядра з найменшим періодом напіврозпаду серед відомих природних радіоактивних ізотопів ^{212}Po та альфа-фон у дослідженні AMoRE з вивчення подвійного бета-розпаду.

Методи дослідження. Визначення періоду напіврозпаду ядра ^{212}Po проведено методом аналізу швидких ланцюжків $^{212}\text{BiPo}$. Характеристикою, яка визначає період напіврозпаду, є розподіл часової відстані між послідовними сигналами від першого розпаду ^{212}Bi та наступного розпаду ^{212}Po . Реєстрування сигналів відбувалося з використанням рідкого сцинтилятора та швидкої електроніки: одного фотопомножувача та осцилографа. Використаний метод визначення відстані між сигналами в BiPo-події зветься “метод сталого множника”. Основною перевагою цього методу є значне зниження залежності так званої критичної точки сигналу (мається на увазі будь-яка точка, жорстко зв'язана із початком сигналу) від висоти та часових флуктуацій сигналу. Аналіз форми сигналів проведено методом оптимального фільтру. Енергетичні спектри побудовано з інтегрування площі сигналу від його початку й за 11 нс (приблизно за 12 нс після початку

сигналу починають з'являтися післяімпульси, які, найімовірніше, пов'язані з особливостями роботи фотопомножувача). Енергетичну шкалу визначено із моделювання бета-спектру ^{212}Bi з використанням пакету Geant4 та порівняння змодельованого спектру із вимірним.

Часовий розподіл подій в BiPo описано двома експоненційними функціями: одна описує власне BiPo -події, інша — фонові збіги. Параметр періоду напіврозпаду внесено у першу функцію.

Визначення сиборгію в кристалі $^{116}\text{CdWO}_4$ проведено методом пошуку високоенергетичного альфа-піку від дочірнього елементу сиборгію. Відповідно до одної з моделей про природний сиборгій, його період напіврозпаду складає 10^9 років, а дочірній елемент, після розпаду сиборгію, зазнає альфа-розпаду з випроміненням альфа-частинки високої енергії. Пошуки цієї альфа-частинки проводили на проміжку від 8,9 МеВ до 14,0 МеВ. Таким чином, проведений пошук сиборгію є модельно-залежним. Тобто результати дослідження з використанням даного методу варто зв'язувати із особливостями моделі, в межах якої дане дослідження зроблено. Вимірювання даних проведено методами низькофонові спектрометрії. Використано два сцинтиляційних кристали $^{116}\text{CdWO}_4$, які оточені кількарівневим пасивним захистом. Аналіз даних складався з часово-амплітудного аналізу, аналізу спектрів, моделювання швидких ланцюжків $^{212}\text{BiPo}$. Альфа-спектр побудовано після відбору альфа-подій методом оптимального фільтру та з відбором за часом наростання сигналу. BiPo -події можуть бути подібними до високоенергетичних альфа-подій, тому, щоб визначити кількість присутніх BiPo -подій в альфа-спектрі, їх спектр було змодельовано відповідно до характеристик детекторної системи. Після наближення змодельованого спектру BiPo -подій до вимірюваного альфа-спектру, в шуканій енергетичній області не було виявлено піку. Тому було використано метод Фельдмана-Коузінса, з якого визначено кількість шуканих подій, що могла бути відсутньою в спектрі з певної довірчою ймовірністю. Метод Фельдмана-Коузінса дав теоретичне верхнє обмеження на поширеність сиборгію в кристалі.

Метою вивчення альфа-фону в дослідженні AMoRE-pilot було продумати необхідні кроки щодо його зниження на подальших стадіях дослідження. Дослідження AMoRE має за мету знайти безнейтринний подвійний бета-розпад ^{100}Mo , а без достатнього низького фону це дослідження просто неможливе. Метод вимірювання даних зветься сцинтиляційним болометричним дослідженням. Суть цього методу полягає в одночасному зчитуванні з кристалу теплового і світлового сигналів. Такий метод є гарним способом розрізнити типи подій за певними особливостями сигналів. Особливо наголошується на співвідношенні між виділеним у кристалі теплом та світлом, яка є різною в різних типів частинок. Кристали охолоджено до температур ~ 10 мК, а температурні зміни реєструє так званий надпровідний квантовий прилад та металевий магнітний калориметр.

Рівень альфа-активності визначено зі швидкості лічби в певному проміжку навколо Q-значення відповідного ізотопу та з аналізу альфа-альфа збігів різних ланцюжків розпаду. Поверхневу та внутрішню альфа-активність змодельовано в пакеті Geant4. Після нормування змодельованого спектру на раніше визначені активності було встановлено чудову узгодженість моделі із вимірним альфа-спектром.

У всіх випадках аналіз проводився з використанням середовища ROOT зі всіма необхідними бібліотеками. ROOT широко використовується у фізиці елементарних

частининок, а робота алгоритмів його бібліотек перевірена багатьма дослідниками за останні 20 років.

Наукова новизна дослідження:

1. Отримано найточніше серед усіх проведених досліджень значення періоду напіврозпаду ядра ^{212}Po як $T_{1/2} = 295,1(4)$ нс, що узгоджується з результатами колаборацій Bogexino та XENON, але відхиляється від табличного значення, рекомендованого до 2019 року, $T_{1/2} = 299(2)$ нс. Наразі табличне значення складає $T_{1/2} = 294,3(8)$ нс.
2. З аналізу даних вимірювань із низькофоновими скінтіляційними детекторами з кристалами $^{116}\text{CdWO}_4$ встановлено обмеження на поширеність надважкого елемента сиборгію в кристалі $^{116}\text{CdWO}_4$ на рівні $\eta \leq 5,1 \times 10^{-15}$ атомів(Sg)/атомів(W) з 90% довірчою ймовірністю.
3. Вивчено поверхневу забрудненість кристалів молібдатів кальцію (СМО) з використанням моделювання у Geant4. Змодельовано ланцюжки розпадів ^{238}U , ^{232}Th та ^{235}U як внутрішні та поверхневі забруднення. Усі змодельовані фонові спектри добре описують дані всіх шести детекторів в області 2,5-7,0 МеВ. Середній рівень фону п'ятих детекторів від поверхневого забруднення становить $(2,22 \pm 0,03) \times 10^{-2}$ відліків на (кеВ \times кг \times рік) в досліджуваній області $Q(^{100}\text{Mo}) = 3034$ кеВ.

Теоретичне значення.

Результати усі трьох досліджень поповнюють знання про властивості ядер та їх перетворення.

Протягом дослідження з полонієм було найточніше виміряно значення його періоду напіврозпаду. Таким чином знято питання про певне розходження в останніх дослідженнях.

Результати пошуку надважкого елемента сиборгію полягають у встановленні обмеження на його поширеність. Подальші дослідження або підтвердять існування сиборгію, або спростують. У другому випадку теорію про існування острівця стабільності необхідно буде змінити. Таким чином моделі теорії ядра зазнають змін. Оскільки за методикою дослідження спираються на конкретну теоретичну модель, то результат говорить саме про справедливість цієї моделі.

Вивчення фону від альфа-частинок є одним з основних елементів у низькофонових дослідженнях. Теоретичне значення полягає в розумінні причин появи фону й пропозиціях щодо подальших способів його усунення.

Практичне значення отриманих результатів.

Розвинута методика в дослідженні ^{212}Po може бути застосована в аналізі інших швидких ланцюжків розпаду. До того ж, такі ланцюжки часто є фоном в інших дослідженнях, а, отже, виміряне значення періоду напіврозпаду дозволить ефективніше знижувати фон в експериментах з пошуку подвійного бета-розпаду, темної матерії та в дослідженнях інших рідкісних ядерних та суб'ядерних процесів.

Результати пошуку сиборгію вказують, що необхідно або підвищувати чутливість до виявлення сиборгію, якщо користуватися методом, застосованим у даному дослідженні, або пробувати шукати сиборгій відповідно до інших теоретичних моделей.

Протягом аналізу даних з досліду АМоRE було застосовано багато алгоритмів роботи із тепловими та світловими сигналами. Зокрема робота сприяє розвитку алгоритмів роботи із дуже малоамплітудними, порівняно з шумами, сигналами. Здобуті знання можна використовувати в інших болометричних дослідженнях, які останнім часом інтенсивно розвиваються.

Особистий внесок здобувача. Дисертант розробив методи аналізу даних, отриманих у вимірюваннях із рідким сцинтилятором насиченим торієм, що проводилися для визначення періоду напіврозпаду ^{212}Po , взяв вирішальну участь в аналізі даних дослідження з пошуку надважкого елементу сиборгію, займався аналізом теплових та сцинтиляційних сигналів низькотемпературного сцинтиляційного болометричного детектора в дослідженні АМоRE, побудовою енергетичних спектрів.

Протягом аналізу даних дослідження з ^{212}Po автору дисертації належить розробка алгоритму аналізу сигналів із рідкого сцинтилятора, а саме, визначення часових характеристик сигналу, їх залежність від енергії, вплив різних виявлених чинників на форму енергетичних спектрів, побудова часового розподілу між сигналами ВіРо-подій, визначення систематичних неточностей, пов'язаних як з аналізом, так і з зовнішніми чинниками, такими як вплив температури, характеристики вимірювальної апаратури.

У дослідженні з пошуку надважкого елементу сиборгію дисертант проводив моделювання ВіРо-подій у сцинтиляторі $^{116}\text{CdWO}_4$. Змодельовано β -сигнали ^{212}Bi та α -сигнали ^{212}Po відповідно до властивостей детекторної системи та побудовано їх енергетичні спектри. Це дозволило визначити кількість фонових ВіРо-подій в області енергетичного спектру, де проводили пошук сигналу від розпаду дочірнього ядра сиборгію, та на порядок покращити чутливість дослідження.

Автором дисертації проведено аналіз теплових та сцинтиляційних сигналів сцинтиляційного болометра дослідження АМоRE. Випробувано кілька алгоритмів аналізу. Побудовано спектри детекторів та оцінено їх енергетичну роздільну здатність.

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

1. 29-а щорічна наукова конференція ІЯД НАНУ, 26-30.09.2022, ІЯД НАНУ, Київ, Україна;
2. Міжнародна конференція молодих учених та аспірантів ІЕФ'2021, 26-28.05.2021, Ужгород, Україна;
3. X International Conference on New Frontiers in Physics (by Zoom), 23.08-02.09.2021, Kolymbari, Crete, Greece;
4. Міжнародна школа-семінар «Functional materials for technical and biomedical applications», 06-10.09.2021, Kharkiv, Ukraine;
5. International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering – fabrication, properties and applications (OMEE), 28.09-02.10.2021, Lviv, Ukraine;
6. 22nd АМоRE collaboration meeting (by Zoom), 23-25.08.2021, IBS, Daejeon, South Korea.

7. 21th AMoRE collaboration meeting (by Zoom), 24-26.02.2021, IBS, Daejeon, South Korea.
8. 27-а щорічна наукова конференція ІЯД НАНУ, 21-25.09.2020, ІЯД НАНУ, Київ, Україна;
9. Міжнародна школа-семінар «Functional materials for technical and biomedical applications», 07-10.09.2020, Коропове, Україна;
10. 26-а щорічна наукова конференція ІЯД НАНУ, 08-12.04.2019, ІЯД НАНУ, Київ, Україна;
11. Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика-2018», 15-17.05.2018, Львів, Україна.

Публікації. За результатами дослідження опубліковано 3 наукові праці у виданнях, що проіндексовані в базі даних Scopus та/або Web of Science Core Collection.

Список опублікованих праць за темою дисертації.

1. V. Alenkov et al., “Alpha backgrounds in the AMoRE-pilot experiment.” *The European Physical Journal C*, vol. 82, no. 1140, 13 p., 2022. (Q1)
2. P. Belli et al., “Search for naturally occurring seaborgium with radiopure $^{116}\text{CdWO}_4$ crystal scintillators.” *Physica Scripta*, vol. 97, no. 085302, 9 p., 2022. (Q1)
3. P. Belli et al., “The half-life of ^{212}Po .” *The European Physical Journal A*, vol. 57, no. 215, 11 p., 2021. (Q1)

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 256 посиланнями, 38 рисунків, 9 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 131 сторінку (з них основного тексту 88 сторінок).

Характеристика особистості здобувача. Дисертант має високу кваліфікацію в галузі фізики, математики, застосуванні програмних методів, на гарному рівні знає англійську мову.

Оцінка мови та стилю дисертації. Дисертацію виконано фаховою українською мовою. Текстове подання матеріалу відповідає стилю науково-дослідної літератури.

Рецензенти рекомендують: відповідно до п.15 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, **пропонується такий склад разової ради:**

Голова ради:

Саврасов Андрій Миколайович, доктор фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), провідний науковий співробітник відділу структури ядра ІЯД;

Рецензенти:

Улещенко Володимир Васильович, кандидат фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), старший дослідник, старший науковий співробітник відділу фізики важких іонів ІЯД;

Киришук Володимир Іванович, кандидат фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), старший науковий співробітник Навчального центру з фізичного захисту, обліку та контролю ядерного матеріалу ІЯД.

Офіційні опоненти:

Маслюк Володимир Трохимович, доктор фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.10 – Фізика напівпровідників і діелектриків), професор, завідувач відділу фотоядерних процесів Інституту електронної фізики НАН України (Ужгород);

Каденко Ігор Миколайович, доктор фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), професор, завідувач кафедри ядерної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

У результаті попередньої експертизи дисертації Назара Володимировича Сокура і повноти публікації основних результатів дослідження

УХВАЛЕНО:

1. Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Назара Володимировича Сокура на тему: «Альфа-розпад ^{212}Po та пошук надважкого елементу сиборгію».

2. Констатувати, що за актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Н.В. Сокура відповідає спеціальності 104 Фізика та астрономія та вимогам **Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)**, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261, пп. 6, 7, 8 **Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії**, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

3. Рекомендувати дисертацію Н.В. Сокура на тему: «Альфа-розпад ^{212}Po та пошук надважкого елементу сиборгію» до захисту на здобуття ступеня доктора філософії у разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

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

Голова ради:

Саврасов Андрій Миколайович, доктор фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), провідний науковий співробітник відділу структури ядра ІЯД;

Рецензенти:

Улещенко Володимир Васильович, кандидат фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), старший дослідник, старший науковий співробітник відділу фізики важких іонів ІЯД;

Киришук Володимир Іванович, кандидат фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), старший науковий співробітник Навчального центру з фізичного захисту, обліку та контролю ядерного матеріалу ІЯД.

Офіційні опоненти:

Маслюк Володимир Трохимович, доктор фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.10 – Фізика напівпровідників і діелектриків), професор, завідувач відділу фотоядерних процесів Інституту електронної фізики НАН України (Ужгород);

Каденко Ігор Миколайович, доктор фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій), професор, завідувач кафедри ядерної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Результати голосування щодо рекомендації до захисту дисертації Н.В. Сокур:

«За» – 11;

«Проти» – немає;

«Утримались» – немає.

Презентація Назара Володимировича Сокура на 23 стор. додається.

Голова семінару

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



В.В. Кобичев

Секретар семінару

к.ф.-м.н., ст. наук. сп.



В.І. Третяк

Учений секретар

ІЯД НАН України



Д. Дорощко

