

Д. Пода, О. Поліщук, С. Нагорний, С. Юрченко

РІДКІСНІ ЯДЕРНІ ПРОЦЕСИ

Щорічну Премію Президента України для молодих учених присуджують дослідникам, чії студії роблять вагомий внесок у науку. Таким був цикл «Рідкісні ядерні та суб'ядерні процеси» молодих науковців з Інституту ядерних досліджень НАН України. У ньому представлено результати робіт, що їх виконували співробітники відділу фізики лептонів протягом 2000–2008 рр. Ці здобутки широко висвітлено в 22 вітчизняних і 27 закордонних виданнях, представлено на 19 вітчизняних і 29 міжнародних конференціях. Загальний індекс цитування робіт становить 135, що свідчить про неабиякий інтерес світової наукової спільноти до ядерних досліджень в Україні.

Цикл статей «Рідкісні ядерні та суб'ядерні процеси» об'єднує результати експериментальних досліджень рідкісних ядерних і суб'ядерних процесів, які характеризуються надзвичайно низькою ймовірністю протікання. Серед таких процесів: розпади атомних ядер (альфа-розпад, бета-розпад, подвійний бета-розпад), для яких період напіврозпаду, тобто час, за який розпадеться половина ядер нукліду, становить 1013 років і більше¹. Крім того, деякі з них (безнейтринний подвійний бета-розпад) не мають відбуватися взагалі, тобто «заборонені» за

сучасною теорією частинок — стандартною моделлю елементарних частинок (СМ). Однак певні експериментальні факти вказують на можливість їх протікання, а тому реєстрація таких розпадів однозначно доведе існування нової фізики за межами СМ. Ще один актуальний напрям — пошук нових частинок, які можуть складати темну матерію Всесвіту, прояви якої спостерігають в астрофізиці. Щоб зареєструвати частинки темної матерії, потрібно розробляти нові високочутливі детектори, здатні чітко зафіксувати сигнатуру взаємодії темної матерії з ядрами мішені-детектора. До речі, вивчення подвійного бета-розпаду і темної матерії важливе, зокрема, у плані розвитку астрофізики елементарних частинок у Європі, де відзначено досягнення в цій галузі фізики,

¹ Для порівняння, час життя Всесвіту становить «усього» 10^{10} років, тобто нуклідів з періодом напіврозпаду 10^{13} років потрібно в тисячу разів більше часу, щоб розпалась тільки половина ядер.

© ПОДА Денис Валентинович. Кандидат фізико-математичних наук. Науковий співробітник відділу фізики лептонів Інституту ядерних досліджень НАН України.

ПОЛІЩУК Оксана Григорівна. Провідний інженер цього ж відділу.

НАГОРНИЙ Сергій Сергійович. Молодший науковий співробітник цього ж відділу.

ЮРЧЕНКО Сергій Сергійович. Молодший науковий співробітник цього ж відділу (Київ). 2011.

описано її сучасний стан, обговорюють найперспективніші напрями досліджень на найближчі десять-п'ятнадцять років [1].

Більшість експериментів, націлених на пошук згаданих рідкісних процесів, проводять у низькофонових лабораторіях, розміщених глибоко під землею, з використанням масивного (кілька тонн і більше) захисту для зменшення впливу зовнішнього радіоактивного випромінювання (природного фону) на детектори і підвищення чутливості до шуканих ефектів. Наші дослідження проведено як в Україні, у Солотвинській підземній лабораторії НАН (смт. Солотвино, Закарпатська область), так і за кордоном, у Національній лабораторії Гран-Сассо (м. Ассерджі, Італія). Також для пошуку і реєстрації рідкісних ядерних процесів необхідно як удосконалювати наявні, так і розробляти нові детектори й експериментальну методику.

Саме такі завдання поставлено в роботах із циклу «Рідкісні ядерні та суб'ядерні процеси». Нижче ми детальніше розглянемо напрями проведених досліджень і представимо їхні результати.

НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ РІДКІСНИХ ЯДЕРНИХ ПРОЦЕСІВ І ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Пошук рідкісних альфа-розпадів

Альфа- (α) розпад — це радіоактивний розпад ядра, у результаті якого випромінюється α -частинка (ядро гелію). Тоді масове число (кількість протонів і нейтронів у ядрі) зменшується на чотири одиниці, а атомний номер (число протонів) — на дві. Альфа-розпад властивий важким і середнім ядрам з масовим числом понад 106 (найчастіше середні ядра — рідкоземельні елементи); у легких ядрах він не відбувається, крім ізотопу берилію-8. Імовірність α -розпаду обернено пропорційна до періоду напіврозпаду, експоненційно зростає зі збільшенням енергії α -частинки, однак не тільки воно впливає на час життя α -активного ну-

кліду. Важкі α -активні ядра випромінюють α -частинки з енергіями 4–9 МеВ, у той час як енергія α -частинок, випромінених рідкоземельними елементами, 2–4,5 МеВ. З енергією α -частинки меншою ніж 2–3 МеВ час життя α -активних ядер значно перевищує період існування Всесвіту, а відповідний α -розпад називається рідкісним.

Реєстрація рідкісних α -розпадів важлива для ядерної геохронології, уточнення ядерно-фізичних даних, теоретичних підходів до опису α -розпаду². Знання ядерної структури α -активних ядер з великими періодами напіврозпаду, зокрема ізотопів вольфраму, європію, неодиму (^{180}W , ^{151}Eu , ^{145}Nd) удосконалить астрофізичні моделі синтезу важких елементів, оскільки такі ядра брали участь у нуклеосинтезі елементів (т.зв. *p*-процес) мільйони років тому.

Пошук рідкісних α -розпадів проведено за допомогою сцинтиляційних детекторів. Так, у низькофонових вимірюваннях тривалістю близько 3000 год. у Солотвинській підземній лабораторії зі сцинтилятором вольфрамату кадмію, виготовленим з використанням збагаченого ізотопу кадмію-116 ($^{116}\text{CdWO}_4$), вперше було спостережено альфа-розпад природного вольфраму (ізотопу ^{180}W , див. рис. 1). Вимірний період напіврозпаду відносно α -активності вольфраму-180 становить $T_{1/2} = 1,1 \times 10^{18}$ років [2]. Крім того, у цьому експерименті шукали α -розпади інших ізотопів вольфраму (^{182}W , ^{183}W , ^{184}W , ^{186}W). Хоча їх і не виявили, однак підмічено, що періоди напіврозпаду цих нуклідів перевищують 10^{20} років. Установлені обмеження на періоди напіврозпаду відносно α -активності ізотопів вольфраму [2] на два порядки перевищували результати попередніх досліджень [3].

² Вивчення таких процесів допоможе з'ясувати структуру ядра, оцінити проникність кулонівського бар'єра для α -частинок, імовірність формування α -кластера всередині ядра, інші теоретичні параметри.

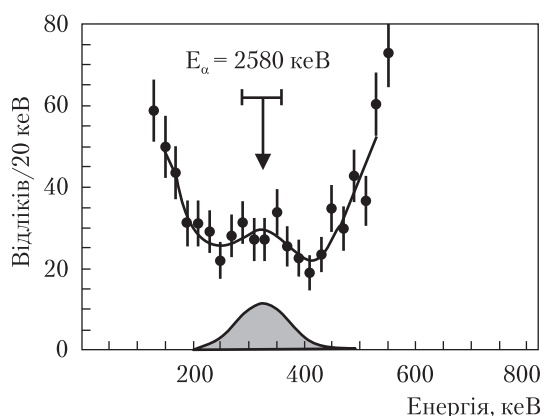


Рис. 1. Фрагмент спектру α -частинок, відокремлених методом ідентифікації за формою імпульсу з даних низькофонових вимірювань з детектором на основі ізотопно-збагаченого скінтілятора $^{116}\text{CdWO}_4$ (тривалість вимірювань близько 3000 год.). Суцільною лінією показано апроксимацію даних. Видимий пік відповідає α -розпаду ^{180}W з періодом напіврозпаду $1,1 \times 10^{18}$ років

Згодом α -розпад ^{180}W зареєстровано в досліді з використанням низькотемпературного скінтіляційного болометра на основі вольфрамату кальцію (CaWO_4) [4], а також у наших експериментах зі скінтіляційними детекторами на основі CaWO_4 [5] і вольфрамату цинку (ZnWO_4) [6], і всі отримані результати узгоджуються між собою.

Для пошуку α -активності природного ізотопу європію проведено низькофонові вимірювання тривалістю близько 7500 год. з детектором на основі фториду кальцію, активованого європієм, $\text{CaF}_2(\text{Eu})$. Уперше спостережено α -розпад ізотопу європію-151 на основний стан, а період напіврозпаду становить $T_{1/2} = 5 \times 10^{18}$ років [7]. Крім того, отримано обмеження на альфа-розпад цього ж нукліду ($T_{1/2} \geq 6 \times 10^{17}$ років) на збуджений стан прометію-147. У вимірюваннях зі зразком літій-європієвого борату методом наднизькофонові спектрометрії вперше досліджено можливість альфа-розпаду ^{153}Eu і встановлено обмеження на нього: $T_{1/2} \geq 10^{16}$ років [8].

Варто зазначити, що отримані значення періодів напіврозпаду відносно α -розпаду ізотопів ^{151}Eu [7] і ^{180}W [2, 5, 6] добре узго-

джуються з теоретичними передбаченнями (див. для прикладу роботи [9–15]). Теоретичні розрахунки періодів напіврозпаду для решти потенційно α -активних ізотопів вольфраму показують, що такі α -розпади не можна зареєструвати у випадку розумно допустимої чутливості майбутніх експериментів. Водночас дослідження таких процесів, напевно, викличуть інтерес до виявлення непередбачених теорією α -розпаду аномальних явищ, які посприяють зростанню на багато порядків імовірності шуканого ефекту.

Дослідження рідкісних бета-розпадів

Бета- (β) розпад — це вид радіоактивного розпаду, зумовлений слабкою взаємодією³, у результаті якого заряд ядра змінюється на одиницю. Тоді ядро може як випромінювати β -частинку (електрон або його античастинку — позитрон), так і захопити атомний електрон з орбітальної оболонки. У випадку випромінювання електрона такий процес називається β^- -розпад, позитрона — β^+ -розпад, захоплення електрона — ϵ -захоплення. У всіх типах β -розпаду ядро випромінює електронне нейтрино⁴ (β^+ -розпад, ϵ -захоплення) або антинейтрино (β^- -розпад). Більшість β -розпадів дозволена чи однократно заборонена⁵.

³ Існують чотири типи взаємодії: сильна (ядерна), слабка, електромагнітна (між об'єктами, що мають заряд), гравітаційна (між об'єктами, що мають масу).

⁴ Нейтрино — стабільна незаряджена елементарна частинка з масою спокою набагато меншою за масу електрона, бере участь лише у слабкій та гравітаційній взаємодіях, надзвичайно слабо взаємодіє з речовиною. Існує три типи нейтрино — електронне ν_e , мюонне ν_μ , тау-нейтрино ν_τ . Кожен з них має свою античастинку.

⁵ Дозволені переходи — це такі, де сумарний орбітальний момент, який виносять електрон і нейтрино, — 0 або 1, а парність материнського і дочірнього ядер однакова. Порядок заборони і класифікацію на унікальні і неунікальні для інших переходів визначає різниця у спінах і парність материнського й дочірнього ядер.

В історії фізики ядра й елементарних частинок дослідження слабкої взаємодії та, зокрема, β -розпаду відіграють суттєву роль. Хоча зараз β -розпад вивчають мало, є кілька аспектів, які привертають до нього підвищену увагу. Насамперед варто виокремити дослідження спектру випромінених електронів (β -спектру) під час β -розпадів, що характеризуються малою енергією випромінювання, для визначення абсолютного значення маси електронного нейтрино⁶. Зараз проводять експерименти з вивчення β -розпаду тритію (див., наприклад, роботи [16–18]) і ренію-187 [19], а також обговорюють можливість вивчення інших β -активних нуклідів [20, 21].

Цікавий для дослідження заборонений β -розпад з високим порядком заборони (чотирикратним і вище) і тривалим періодом напіврозпаду ($>10^{13}$ років). Його експериментальний розгляд важливий не лише для уточнення ядерно-фізичних даних, а й для розвитку теорії слабкої взаємодії⁷.

Ми виконали низькофоновий експеримент у Національній лабораторії Гран-Сассо (Італія) з реєстрації чотирикратно-забороненого неунікального β -розпаду ізотопу кадмію-113 (^{113}Cd). Варто наголосити, що окрім нукліду ^{113}Cd такий розпад можливий лише для двох природних ізотопів ванадію та індію (^{50}V , ^{115}In). У результаті обробітку даних, накопичених за близько 3000 год. вимірювань зі сцинтиляційним детектором CdWO_4 , прецизійно виміряно форму бета-спектру, з найвищою точністю визначено період напіврозпаду ($T_{1/2} = (8,04 \pm 0,05) \times 10^{15}$ років) [24] порівняно з резуль-

⁶ У СМ масу нейтрино вважають нульовою. У той же час з-поміж осягів експериментальної фізики елементарних частинок за останні п'ятнадцять років вирізняють відкриття переходу одного типу нейтрино в інші, так званих осциляцій нейтрино. Вони однозначно вказують на наявність у нейтрино ненульових мас і їх змішування.

⁷ Зокрема, з'ясувати структуру ядра, оцінити вплив ефектів нуклонного спарювання, багатифонових внесків, інших теоретичних параметрів.

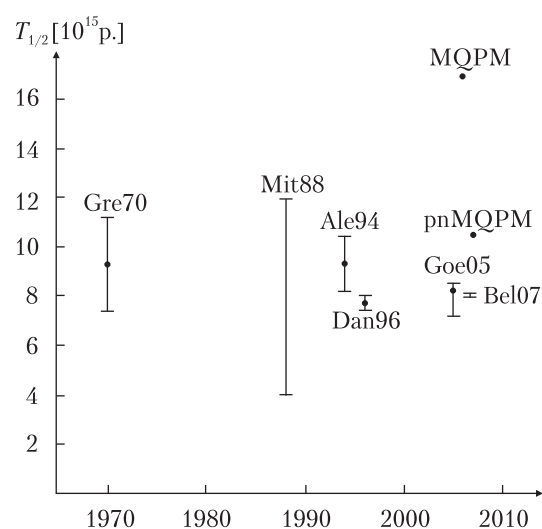


Рис. 2. Зіставлення пошуків чотирикратно-забороненого неунікального β -розпаду ядра кадмію-113. Указано підсумки наших досліджень: Gre70 [25], Mit88 [26], Ale94 [27], Dan96 [28], Goe05 [29], Bel07 [24]. Представлено теоретичні розрахунки: MQPM [22], pnMQPM [23]

татами попередніх досліджень [25–29] (див. також рис. 2 для зіставлення результатів). Порівняння виміряної форми β -спектру з теоретично розрахованою виявило, що найкраще його описує модельна функція, розрахована у випадку трикратно-забороненого унікального β -розпаду ^{113}Cd . Це може свідчити про неправильність визначення парності або материнського (^{113}Cd), або дочірнього (^{113}In) ядер, а отже, її необхідно ретельніше виміряти.

Вивчення процесів 2β -розпаду атомних ядер

У 1935 р., уже через рік після висунення кількісної теорії β -розпаду Енріко Фермі, Марія Гьопперт-Майер указала на можливість існування подвійного бета-розпаду (2β), тобто процесу, зумовленого слабкою взаємодією, у якому заряд ядра одночасно змінюється на дві одиниці [30]. Також вона припустила, що період напіврозпаду для такого процесу має бути надзвичайно великим: 10^{17} років і більше.

До процесів 2β -розпаду належить: 2β -розпад з випромінюванням двох електронів ($2\beta^-$) або двох позитронів ($2\beta^+$), захоплення орбітального електрона з одночасним випромінюванням позитрона ($\epsilon\beta^+$), а також захоплення двох орбітальних електронів (2ϵ). На відміну від звичайного β -розпаду, у 2β -розпаді окрім обов'язкового випромінювання двох нейтрино чи антинейтрино (двонейтринний 2β -розпад — $2\nu 2\beta$) буває, що нейтрино не випромінюються (безнейтринний 2β -розпад — $0\nu 2\beta$). Перший варіант не порушує жодного з законів збереження і дозволений щодо СМ. А другий відбувається лише в разі порушення закону збереження лептонного заряду ⁸, а тому заборонений відносно СМ [31].

Вивчення подвійного бета-розпаду атомних ядер актуальне для фізики ядра, елементарних частинок і астрофізики. Аналіз двонейтринної моди 2β -розпаду важливий для уточнення ядерних даних, теоретичного опису 2β -розпаду, експериментальних методів дослідження рідкісних ядерних процесів. Реєстрація безнейтринного 2β -розпаду приносить унікальну інформацію про нову фізику ⁹, не описану у

⁸ Для кожної з 6 елементарних частинок, належних до лептонів (електрон, мюон, тау-лептон, відповідні їм нейтрино), лептонне число L рівне 1, для їх античастинок, антилептонів, — -1, а для решти частинок — 0. Не зареєстровано процесу, для якого сумарне лептонне число не зберігається. Наприклад, розглянемо $0\nu 2\beta^-$ -розпад: у разі розпаду двох нейтронів ($L = 0$) у залишку є всього два протони ($L = 0$) і два електрони ($L = 2$), тому сумарний лептонний заряд не зберігається, оскільки $0 \neq 0 + 2$. У той же час для $2\nu 2\beta^-$ -розпаду, коли розпадаються два нейтрони ($L = 0$), залишаються два протони ($L = 0$), два електрони ($L = 2$), два антинейтрино ($L = -2$), таким чином, сумарний лептонний заряд зберігається ($0 = 0 + 2 - 2$).

⁹ Лише з дослідження $0\nu 2\beta$ -розпаду встановлюють незбереження лептонного заряду, з'ясовують природу нейтрино (якщо нейтрино тотожне антинейтрино, воно являє частинку Майорани, у протилежному випадку — частинку Дірака), вимірюють ефективну масу електронного нейтрино, визначають схему масових станів нейтрино (нормальна, обернена, вроджена), встановлюють домішки правих струмів

форматі СМ (див. для прикладу огляди з 2β -розпаду [31, 32]).

Подвійний бета-розпад енергетично можливий тільки для 69 нуклідів [33]: для 35 нуклідів — $2\beta^-$ -розпад, а для решти 34 — 2ϵ -захоплення (з них 20 нуклідів бувають водночас кандидатами на $\epsilon\beta^+$ -розпад, і лише для 6 ізотопів енергетично дозволений також $2\beta^+$ -розпад). За останні два десятиліття експериментальна методика суттєво просунулася в дослідженні $2\beta^-$ -розпаду, зокрема зареєстровано $2\nu 2\beta^-$ -розпад для 10 ізотопів [33]. З огляду на те, що виміряні значення періодів напіврозпаду для цього процесу лежать в інтервалі 10^{18} – 10^{21} років (для ^{128}Te $T_{1/2} \sim 10^{24}$ років), $2\nu 2\beta^-$ -розпад по праву вважають найрідкіснішим ядерним розпадом. Більше того, існує одна вказівка на можливу реєстрацію $0\nu 2\beta^-$ -розпаду германію-76 з $T_{1/2} = 2,23 \times 10^{25}$ років на основі результату експерименту Гайдельберг–Москва з напівпровідниковими детекторами, збагаченими ізотопом германію-76 [34]. Цей результат викликає чимало сумнівів, однак може дістати підтвердження (чи спростування) за результатами двох великомасштабних експериментів GERDA [35] і MAJORANA [36] з ізотопно-збагаченими германієвими детекторами, що перебувають на стадії конструкції. Незважаючи на те, що $0\nu 2\beta^-$ -розпад достовірно не зареєстровано ¹⁰, у найчутливіших дослідах встановили обмеження на його періоди напіврозпаду на рівні 10^{23} – 10^{25} років [33, 37, 38]. Водночас для решти можливих 2β -процесів, окрім $2\beta^-$ -розпаду, не зареєстровано і двонейтринної моди, а обмеження на періоди напіврозпа-

у слабкій взаємодії (у якій беруть участь лише ліві струми згідно з СМ), реєструють нові частинки (безмасові бозони Намбу–Голдстоуна — майорони) тощо.

¹⁰ Важливо відмітити, що навіть неспостереження $0\nu 2\beta^-$ -розпаду дає важливу інформацію про властивості нейтрино і слабкої взаємодії. Установлення обмежень на шукані процеси сприяє розвитку теоретичних моделей фізики елементарних частинок.

ду в найчутливіших експериментах не перевищують 10^{19} – 10^{21} років.

Експерименти з пошуку 2β -розпаду займають чільне місце в наших дослідженнях. За останні десять років у відділі фізики лептонів Інституту ядерних досліджень досягли суттєвого прогресу в аналізі 2β -розпаду природних ізотопів цинку, кадмію, молібдену, вольфраму. Всі експерименти проведено з використанням як сцинтиляційного, так і напівпровідникового методів низькофонові спектрометрії.

Заслугує на величезну увагу пошук $2\nu 2\beta$ -розпаду ізотопу молібдену-100 ^{100}Mo на збуджений стан рутенію-100 (^{100}Ru). Дослід здійснено з використанням ~ 1 кг збагаченого близько 99,9% ізотопу ^{100}Mo і наднизькофоновий γ -спектрометра, що складається з чотирьох напівпровідникових германієвих детекторів. Шукали два γ -кванти з енергіями 540 кеВ і 591 кеВ, які мають випромінюватися, коли знято збудження ядра рутенію-100 (див. рис. 3). За більше ніж 18000 год. накопичення даних процес зареєстровано як у сумарному спектрі чотирьох детекторів (див. рис. 4), так і спектрі збігів (одночасна реєстрація двома германієвими детекторами двох γ -квантів). Таким чином, за результатами експерименту було виміряно з високою точністю період напіврозпаду ядра молібдену-100 відносно подвійного бета-розпаду на збуджений рівень дочірнього ядра¹¹ рутенію-100: $(6,9^{+1,0}_{-0,8} \pm 0,7) \times 10^{20}$ років [39].

Зі сцинтиляторами вольфраму кадмію ($^{116}\text{CdWO}_4$, CdWO_4) і вольфраму цинку (ZnWO_4) проведено низькофонові експерименти з пошуку процесів 2β -розпаду ізотопів цинку (^{64}Zn , ^{70}Zn) [40, 41], кадмію (^{108}Cd , ^{114}Cd , ^{116}Cd) [42, 43], вольфраму (^{180}W , ^{186}W) [41, 42]. Розпадів не виявлено, однак отримані обмеження на періоди на-

¹¹ Слід підкреслити, що, окрім молібдену-100, розпад на збуджений рівень зареєстровано і для нукліду неодиму-150.

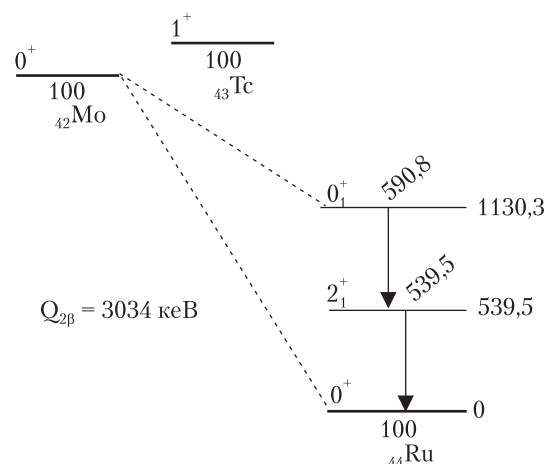


Рис. 3. Схема 2β -розпаду ядра молібдену-100 на основний і другий збуджений рівні ядра рутенію-100. Енергія 2β -розпаду молібдену-100 становить 3035 кеВ. Енергії збуджених рівнів показано в кеВ. У випадку 2β -розпаду на збуджений рівень мають випромінюватися два γ -кванти з енергіями 540 і 591 кеВ

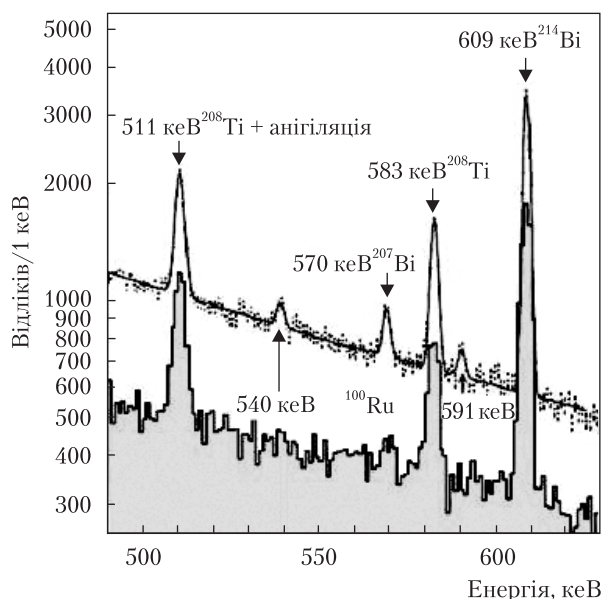


Рис. 4. Енергетичний спектр фону, виміряний зі зразком оксиду молібдену, збагаченого ізотопом молібдену-100, в енергетичному діапазоні 490–630 кеВ (точки з вусами похибок), й апроксимаційна крива. Енергетичний спектр фону германієвого детектора (суцільна гістограма), нормований на час вимірювань 18120 год. Пік з енергією 511 кеВ утворено не лише внеском від талію-208, а й анігіляційними γ -квантами. У спектрі фону, виміряного зі зразком оксиду молібдену, спостерігають два піки з енергіями 540 і 591 кеВ від $2\nu 2\beta$ -розпаду ^{100}Mo на другий збуджений стан ^{100}Ru

піврозпаду на рівні $T_{1/2} \sim 10^{17} - 10^{21}$ років (для ^{116}Cd $T_{1/2} \sim 10^{21} - 10^{23}$ років) перевищують результати інших дослідницьких груп. Крім того, спростовано результати експерименту [44] (опубліковані ще в 1995 р.) про спостереження процесу захоплення електрону з випромінюванням позитрону в ядрі ^{64}Zn .

Нестабільні ядра (для яких властивий α -чи β -розпад) також відкриті для 2β -розпаду (зокрема, для урану-238 окрім звичайного α -розпаду зареєстровано й 2β -розпад). Виходячи з цього, уперше здійснено пошуки 2β -розпаду радіоактивних ядер (α - і/чи β -активних) у спектрометричному досліді. З цією метою проаналізовано дані низькофонових експериментів зі сцинтиляторами CaWO_4 і $^{116}\text{CdWO}_4$, проведених у Солотвинській підземній лабораторії ІЯД. Уперше отримано обмеження на періоди напіврозпаду дочірніх радіонуклідів рядів урану і торію відносно 2β -розпаду [45]. Чутливість такого методу поки що обмежує занадто мала кількість досліджуваних радіоактивних ядер.

На часі аналіз шляхів підвищення чутливості експериментів до безнейтринного 2β -розпаду, зростання їхнього масштабу. За результатами досліджень зі сцинтиляційними детекторами на основі монокристалів молібдату кальцію показано можливість пошуку $0\nu 2\beta$ -розпаду ядра молібдену-100 з $T_{1/2} \sim 10^{24}$ років [46]. Більш того, було запропоновано нові проекти високочутливих експериментів з пошуку безнейтринного 2β -розпаду ядер кальцію-48 [47] і кадмію-116 [48] з чутливістю до періоду напіврозпаду на рівні $T_{1/2} \sim 10^{26} - 10^{27}$ років, до маси нейтрино на рівні сотих еВ, що відповідає інвертованій схемі масових станів нейтрино. Наші проекти мають суттєву перевагу над аналогами, які пропонують досліджувати ті самі нукліди (з подібною задекларованою чутливістю до $0\nu 2\beta$ -розпаду): передовсім меншою масою ізотопно-збагачених детекторів (це визначає вартість

студії), меншими розмірами низькофонових установок (що важливо як для зменшення фону детекторів, так і для відведення місця в низькофонових лабораторіях, де, зазвичай, бракує простору для великогабаритних установок).

Пошуки аксіонів від Сонця

У міру того, як підвищується інтерес до темної матерії¹², виникає необхідність пошуку частинок-кандидатів на цю роль. Її здатен виконати аксіон. Аксіони — це гіпотетичні частинки, які можуть з'являтися в разі порушення глобальної симетрії, запропонованої в 1977 р. вченими Роберто Печчеї та Хелен Квін для розв'язання так званої сильної *CP*-проблеми квантової хромодинаміки для сильних взаємодій. Назву частинці дав Френк Вільчек за торговою маркою прального порошку, оскільки аксіон мав «очистити» квантову хромодинаміку від проблеми сильного *CP*-порушення [49]. Ураховуючи ці факти, експерименти з пошуку аксіонів дуже актуальні для фізики елементарних частинок і астрофізики.

Незважаючи на всі передумови для існування аксіонів, до цього часу немає жодних прямих експериментальних свідчень про їхнє існування. Якщо аксіони існують, Сонце може бути їх інтенсивним джерелом [50]. Ми спирались на те, що аксіон може бути випромінений замість γ -кванту під час зняття збудження ядер літію-7 (збуджено-

¹² Дані астрономії, астрофізики, космології свідчать, що на видиму матерію у Всесвіті припадає не більше 5%, а природа решти 95% лишається невідомою. Припускають, що близько 73% займає т.зв. темна енергія, котра прискорює розширення Всесвіту. Інші 22% — матерія, що складається з невідомих частинок, не проявляє себе електромагнітним випромінюванням, а тому невидима (звідси і назва «темна матерія») і слабо (лише гравітаційно) взаємодіє з відомою матерією. Ураховуючи ці факти, дозволимо собі стверджувати, що темна матерія становить одну з найбільших таємниць сучасної фізики.

го рівня з енергією 477,6 кеВ), утворених за ядерного синтезу на Сонці. Оскільки випромінений аксіон можуть резонансно захопити ядра мішені, на Землі необхідна мішень, яка б містила ядра літію-7. Після захоплення аксіону ядро літію-7 має бути у стані збудження і під час його зняття випромінювати γ -квант з енергією 477,6 кеВ. У низькофоновому експерименті ми використовували порошок фториду літію як мішень для аксіонів і наднизькофоновий напівпровідниковий γ -спектрометр. За 722 год. вимірювань у Національній лабораторії Гран-Сассо (Італія) шуканого ефекту не виявлено, однак було встановлено нове обмеження на масу аксіонів від літію-7: вона має бути меншою за 13,9 кеВ [51], що важливо для розвитку теорії елементарних частинок і методів дослідження аксіонів від Сонця.

Розроблення і дослідження сцинтиляційних детекторів для експериментів, у тому числі кріогенних, з пошуку рідкісних ядерних і суб'ядерних процесів

Як уже зазначено, пошук 2β -розпаду атомних ядер актуальний для фізики ядра, елементарних частинок і астрофізики. Проведення високочутливих експериментів неможливе без високоефективного детектора 2β -розпаду. Такий детектор містить якомога більше досліджуваних ядер, має високу енергетичну роздільну здатність і надзвичайно низьку радіоактивну забрудненість.

В астрофізиці елементарних частинок є тенденція пошуку темної матерії Всесвіту. Окрім згадуваних аксіонів, як кандидатів на її роль розглядають т.зв. масивні частинки слабкої взаємодії (в англійській літературі: WIMPs – weakly interacting massive particles, ВІМП-частинки) – суперсиметричних партнерів звичайних частинок. Гадають, що ВІМП-частинки взаємодіють з матерією шляхом пружного розсіяння на ядрах мішені. Після взаємодії з

ВІМП-частинками вони отримують незначну енергію (і тоді називаються ядрами віддачі), яку може зареєструвати детектор, що включає ці ядра. Таким чином, бажано, щоб високоефективний детектор ВІМП-частинок містив ядра-мішені на основі легких, середніх, важких елементів, мав високу чистоту стосовно радіоактивної забрудненості, низький енергетичний поріг, потужну енергетичну здатність.

Указані умови для розроблення детекторів рідкісних ядерних і суб'ядерних процесів задовольняють детектори на основі сцинтиляційних кристалів. Однак прогресу в таких дослідженнях неможливо досягти без покращення відомих і конструювання нових сцинтиляторів з характеристиками на межі сучасних технологій: з високою сцинтиляційною здатністю (у багатьох випадках за наднизьких температур, порядку мілікельвінів), великим розміром, якомога нижчою (в ідеальному випадку, нульовою) радіоактивною забрудненістю, з умістом певних елементів. Саме розробленню детекторів на основі різних сцинтиляційних кристалів і всебічному вивченню їхніх характеристик присвячено значний обсяг наших досліджень. Нижче ми коротко представимо свій основний доробок у цьому напрямі.

У ході ретельного вивчення було з'ясовано сцинтиляційні і спектрометричні характеристики монокристалів вольфраматів кадмію, цинку, кальцію, свинцю (CdWO_4 , ZnWO_4 , CaWO_4 , PbWO_4) [5, 48, 52–55], $^{116}\text{CdWO}_4$ збагаченого ізотопом ^{116}Cd [2], PbWO_4 , активованих різними елементами (F, Eu, S, Gd, Mo) [56], фториду кальцію, активованого європієм ($\text{CaF}_2:\text{Eu}$) [7], молібдату кальцію (CaMoO_4) [46], алюмоітрієвого гранату, активованого неодимом (YAG:Nd) [57]. Кристал YAG:Nd , широко відомий у лазерній техніці, уперше досліджено як сцинтилятор. Вивчено радіоактивну забрудненість представлених вище сцинтиляторів, а також ортосилікату гадолінію, активованого

церієм ($Gd_2SiO_5:Ce$) [58], літійєвропійового борату ($Li_6Eu(BO_3)_3$) [8], фториду літію (LiF) [51]. Засвідчено дуже високий рівень чистоти сцинтиляторів $ZnWO_4$, $CdWO_4$, $^{116}CdWO_4$, LiF відносно забрудненості радіонуклідами природного й антропогенного походження. Показано перспективність цих матеріалів для вивчення рідкісних ядерних і суб'ядерних процесів.

Для криогенних експериментів (у них сцинтиляційний детектор має працювати за наднизьких температур) з пошуку темної матерії та 2β -розпаду розроблено сцинтиляційні детектори $ZnWO_4$ [59, 60], $ZnWO_4:Ca$ (активований кальцієм) [61], $PbWO_4$ [59, 62], вольфрамат магнію ($MgWO_4$) [59, 63], молібдати свинцю, цинку ($PbMoO_4$, $ZnMoO_4$) [59]. Кристали $MgWO_4$, $ZnMoO_4$ вперше досліджено як сцинтилятори.

Розроблено високоякісний сцинтилятор $CdWO_4$ зі спеціально очищеного кадмію, щоб оцінити можливості виготовлення сцинтиляторів $CdWO_4$ зі збагачених ізотопів кадмію для пошуку 2β -розпаду [64].

Нас зацікавив пошук нових радіоактивних чистих матеріалів. Так, у 2006 р. у Криму проведено підводно-археологічну експедицію і піднято на поверхню три зразки античного (виплавленого з руди в античні часи) свинцю загальною масою $\sim 0,2$ т. Досліджено його радіоактивну забрудненість [65]. Очевидна перспективність використання античного свинцю для низькофонових експериментів з пошуку рідкісних ядерних і суб'ядерних процесів, виготовлення радіоактивно-чистих сцинтиляторів (зокрема $PbWO_4$, $PbMoO_4$).

ВИСНОВКИ

Результати досліджень рідкісних ядерних і суб'ядерних процесів підводять до таких основних висновків.

Ізотопи ^{151}Eu , ^{180}W нестабільні відносно α -розпаду. Реєстрація α -активності інших ізотопів Європію і вольфраму потребує більшої чутливості експериментів.

Найточніше значення періоду напіврозпаду відносно чотирикратно-забороненого неунікального β -розпаду ^{113}Cd — $T_{1/2} = (8,04 \pm 0,05) \times 10^{15}$ років. Виміряна форма β -спектра ідентична з розрахованою для трикратно-забороненого унікального β -розпаду, що вказує на необхідність ретельніших вимірювань парності материнського (^{113}Cd) і дочірнього (^{113}In) ядер.

Ізотоп ^{100}Mo нестабільний відносно $2\nu 2\beta$ -розпаду на збуджений стан ^{100}Ru з періодом напіврозпаду $(6,9^{+1,0} \pm 0,7) \times 10^{20}$ років. На новому рівні чутливості шукано 2β -розпад ядер ^{64}Zn , ^{70}Zn , ^{108}Cd , ^{114}Cd , ^{116}Cd , ^{180}W , ^{186}W , отримано нові обмеження на періоди напіврозпаду відносно різних каналів 2β -розпаду цих ізотопів. Спростовано результати експерименту 1995 року про захоплення електрона з випромінюванням позитрона в ядрі ^{64}Zn . Реєстрація 2β -розпаду α - і/чи β -радіонуклідів складна і потребує нових експериментальних методів.

Маса аксіонів від 7Li менша за 13,9 кеВ. Вищої чутливості можна досягти в низькофонових дослідженнях з кристалами LiF як мішенями для резонансного захоплення сонячних аксіонів від 7Li .

За сцинтиляційними, спектрометричними, фоновими характеристиками сцинтиляційні кристали $CdWO_4$, $ZnWO_4$, $CaWO_4$, $PbWO_4$, $MgWO_4$, $CaMoO_4$, $ZnMoO_4$, $PbMoO_4$, $YAG:Nd$, $CaF_2:Eu$, $Li_6Eu(BO_3)_3$ придатні для використання у вивченні 2β -розпаду, рідкісних α - і β -розпадів.

З огляду на залежність форми сцинтиляційних сигналів $CdWO_4$, $CaWO_4$, $ZnWO_4$ від напрямку опромінення α -частинками, ці сцинтилятори виступають якісними детекторами для дослідження модуляції розсіяння частинок темної матерії протягом доби.

Через високі сцинтиляційні властивості за наднизьких температур кристали $ZnWO_4$, $PbWO_4$, $MgWO_4$, $ZnMoO_4$, $PbMoO_4$ являють собою перспективні криогенні детектори слабких у взаємодії частинок темної матерії.

Дослідження античного свинцю, знайденого на території України, продемонстрували, що це хімічно- і радіоактивно-чистий матеріал, який можна застосувати в низькофонових експериментах як для пасивного захисту установки, так і для виготовлення радіоактивно-чистих сцинтиляторів PbWO_4 і PbMoO_4 .

Високоякісні сцинтиляційні кристали CdWO_4 для пошуку процесів подвійного β -розпаду ядра ^{106}Cd можна розробити з ізотопного збагаченого кадмію-106, очищеного методом вакуумної дистиляції.

Наявність у нейтрино маси на рівні сотих еВ, що відповідає інвертованій схемі масових станів нейтрино, перевіряється у високочутливих експериментах з пошуку $0\nu 2\beta$ -розпаду ізотопів ^{48}Ca і ^{116}Cd .

Узагальнюючи наведений матеріал, стверджуємо, що експерименти з пошуку рідкісних ядерних і суб'ядерних процесів (таких як рідкісні α - і β -розпади, подвійний β -розпад, частинки темної матерії) актуальні у фізиці ядра, елементарних частинок і астрофізиці. Для їх поліпшення необхідні потужна експериментальна методика низькофонових досліджень, розроблення сцинтиляційних детекторів, а також ретельне вивчення їхніх сцинтиляційних, спектрометричних, фонових властивостей. Крім того, слід підкреслити, що всі нові дані про сцинтиляційні і спектрометричні характеристики, а також щодо рівня радіоактивної чистоти сцинтиляторів важливі для їх застосування як у фундаментальних дослідженнях, так і для реалізації ряду прикладних завдань (у медицині, моніторингу довкілля, системах контролю переміщення радіоактивних речовин та ін.).

Автори щиро дякують д.ф.-м.н. Ф.А. Даневичу, к.ф.-м.н. В.І. Третяку, к.ф.-м.н. В.В. Кобичеву за навчання, ідеї та спільні зусилля, без яких представлені тут результати були б неможливі.

1. Status and Perspective of Astroparticle Physics in Europe, Astroparticle Physics Roadmap Phase I // <http://www.aspera-eu.org/>.
2. F.A. Danevich et al. // Phys. Rev. — 2003.
3. A.Sh. Georgadze et al. // JETP. — 1995. — Lett. 61.
4. C. Cozzini et al. // Phys. Rev. — 2004.
5. Yu.G. Zdesenko et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 2005.
6. P. Belli et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. — 2010.
7. P. Belli et al. // Nucl. Phys. — 2007.
8. P. Belli et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 2007.
9. D.N. Poenaru et al. // Phys. Rev. — 1985.
10. B. Buck, A.C. Merchant, S.M. Peres // J. Phys. — 1991; 1992.
11. G. Royer // J. Phys. — 2000.
12. M. Fujiwara et al. // J. Phys. — 2002.
13. E.L. Medeiros et al. // J. Phys. — 2006.
14. O.A.P. Tavares, E.L. Medeiros // Phys. Scripta. — 2007.
15. V.Yu. Denisov, A.A. Khudenko // At. Data Nucl. Data Tables 95. — 2009.
16. V.M. Lobashev // Nucl. Phys. — 2003.
17. Ch. Kraus et al. // Eur. Phys. J. — 2005.
18. A. Osipowicz et al. // arXiv:hep-ex/0109033; C. Weinheimer // arXiv:0912.1619 [hep-ex]; T. Thummler // (for the KATRIN Collaboration), arXiv:1012.2282 [hep-ex].
19. A. Monfardini et al. // Prog. Part. Nucl. Phys. — 2006; Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 2006; R. Dvornicky, K. Muto, F. Simkovic, A. Faessler // arXiv:1101.3413 [hep-ph].
20. C.M. Cattadori, M. De Deo, M. Laubenstein, L. Pandola, V.I. Tretyak // Nucl. Phys. — 2005.
21. J. Kopp, A. Merle // Phys. Rev. — 2010.
22. M.T. Mustonen et al. // Phys. Rev. — 2006; 2007.
23. M.T. Mustonen, J. Suhonen // Phys. Lett. — 2007.
24. P. Belli et al. // Phys. Rev. — 2007.
25. W.E. Greth, S. Gangadharan, R.L. Wolke // J. Inorg. Nucl. Chem. — 1970.
26. L.W. Mitchel, P.H. Fisher // Phys. Rev. — 1988.
27. A. Alessandrello et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 1994.
28. F.A. Danevich et al. // Phys. At. Nucl. — 1996.
29. G. Goessling et al. // Phys. Rev. — 2005.
30. M. Goepfert-Mayer // Phys. Rev. — 1935.
31. F.T. Avignone, S.R. Elliott, J. Engel // Rev. Mod. Phys. — 2008; H.V. Klapdor-Kleingrothaus // Int. J. Mod. Phys. — 2008.
32. H. Ejiri // J. Phys. Soc. Japan — 2005; F.T. Avignone, G.S. King, Yu.G. Zdesenko // New J. Phys. — 2005; S.R. Elliott, J. Engel // J. Phys. — 2004; J.D. Vergados // Phys. Rept. — 2002; S.R. Elliott, P. Vogel // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. — 2002; Yu.G. Zdesenko // Rev. Mod. Phys. — 2002.

33. V.I. Tretyak, Yu.G. Zdesenko // At. Data Nucl. Data Tables 61. — 1995; V.I. Tretyak, Yu.G. Zdesenko // At. Data Nucl. Data Tables 80. — 2002.
34. H.V. Klapdor-Kleingrothaus, I.V. Krivosheina // Mod. Phys. Lett. — 2006.
35. I. Abt et al. // hep-ex/0404039; A.A. Smolnikov and GERDA Collab. // nucl-ex/0812.4194.
36. Majorana Collab. // nucl-ex/0311013; C.E. Aalseth et al. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). — 2005.
37. A.S. Barabash // Phys. Rev. — 2010.
38. A.S. Barabash // Phys. At. Nucl. — 2010.
39. P. Belli et al. // Proc. Int. Conf. Current Problems Nucl. Phys. At. Energy NPAE'2008, 09-15.06.2008, Kyiv, Ukraine. — Kyiv, 2009. — P. 473–476; P. Belli et al. // Nucl. Phys. — 2010.
40. P. Belli et al. // Phys. Lett. — 2008
41. P. Belli et al. // Preprint ROM2F/2007/13. — Rome, 2007. — 12 p.; P. Belli et al. // Nucl. Phys. — 2009.
42. P.G. Bizzeti et al. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). — 2002.
43. P. Belli et al. // Eur. Phys. J. — 2008.
44. I. Bikit et al. // Appl. Radiat. Isot. — 1995.
45. V.I. Tretyak, F.A. Danevich, S.S. Nagorny, Yu.G. Zdesenko // Europhys. Lett. — 2005.
46. A.N. Annenkov et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 2008.
47. Yu.G. Zdesenko et al. // Astropart. Phys. — 2005.
48. F.A. Danevich et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 2006.
49. F. Wilczek // Phys. Rev. — 1978. — Lett. 40.
50. F.A. Danevich, O.V. Ivanov, V.V. Kobychyev, V.I. Tretyak // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. — 2009 [Кинематика и физика небес. — 2009].
51. P. Belli et al. // Nucl. Phys. — 2008.
52. F.A. Danevich et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 2005.
53. F.A. Danevich et al. // Functional Materials. — 2005.
54. L. Bardelli et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 2006.
55. L.L. Nagornaya et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. — 2008.
56. L. Bardelli et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 2008.
57. F.A. Danevich et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 2005.
58. F.A. Danevich et al. // AIP Conf. Proc. — 2005.
59. L.L. Nagornaya et al. // IEEE Nucl. Sci. Symp. — 2008.
60. H. Kraus et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 2009.
61. F.A. Danevich et al. // Phys. Status Solidi — 2008.
62. F.A. Danevich et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 2010.
63. F.A. Danevich et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 2009.
64. P. Бернабей и др. // Металлофизика и новейшие технологии. — 2008. — 30; P. Belli et al. // Preprint ROM2F/2008/17. — Roma: 2 University, 2008. — 9 p.
65. F.A. Danevich et al. // AIP Conf. Proc. — 2007; F.A. Danevich et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 2010.

Д. Пода, О. Поліщук, С. Назорний, С. Юрченко

РІДКІСНІ ЯДЕРНІ ПРОЦЕСИ

Резюме

У статті представлено огляд досліджень рідкісних ядерних і суб'ядерних процесів, проведених у відділі фізики лептонів Інституту ядерних досліджень НАН України. Дані про сцинтиляційні і спектрометричні характеристики, а також щодо рівня радіоактивної чистоти сцинтиляторів важливі для застосування у фундаментальних дослідженнях і для реалізації низки прикладних завдань, зокрема в медицині, системах контролю переміщення радіоактивних речовин, для моніторингу довкілля тощо. Результати наведено за матеріалами циклу праць «Рідкісні ядерні та суб'ядерні процеси» молодих науковців закладу, удостоєних щорічної Премії Президента України для молодих учених у 2010 р.

Ключові слова: розпади атомних ядер, альфа-розпади, бета-розпади, подвійний бета-розпад, пошук аксіонів.

D. Poda, O. Polischuk, S. Nahornyj, S. Yurchenko

RARE NUCLEAR PROCESSES

Abstract

The article gives a survey of rare nuclear and subnuclear processes researches hold in lepton physics department of Nuclear researches Institute of Ukrainian NAS. Data on scintillational and spectrometric features as well as on scintillators radioactive frequency are important for fundamental studies and practical tasks, for instance, for medicine, control of radioactive substances drift, environment monitoring. Results are given according to works cycle «Rare nuclear and subnuclear processes» by young scientists of institution, awarded with every-year Prize of President of Ukraine for young scientists in 2010.

Keywords: nuclear kernel decays, alpha-decays, beta-decays, double beta-decay, axions search.