



ДАНЕВИЧ

Федір Анатолійович — доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу фізики лептонів Інституту ядерних досліджень НАН України

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕЙТРИНО І СЛАБКОЇ ВЗАЄМОДІЇ У ПОДВІЙНОМУ БЕТА-РОЗПАДІ АТОМНИХ ЯДЕР

За матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 1 липня 2015 року

Дослідження подвійного бета-розпаду дозволяють вивчати природу і властивості нейтрино та слабкої взаємодії, перевірити стандартну модель елементарних частинок. Пошук безнейтринної моди подвійного бета-розпаду потребує чутливого експериментального обладнання, здатного зареєструвати надзвичайно рідкісні події ядерних розпадів з періодами напіврозпаду 10^{26} – 10^{28} років. Україна має значний потенціал для участі у великомасштабних експериментах наступного покоління завдяки розробленим унікальним методам наднизькофонової ядерної спектроскопії, глибокого очищення матеріалів, росту сцинтиляційних кристалів.

Ключові слова: нейтрино, подвійний бета-розпад, низькофонова ядерна спектроскопія, глибоке очищення речовин, сцинтиляційний детектор.

Вступ

У 2005 р. журнал Science до свого 125-річчя опублікував список із 125 проблем, на вирішенні яких ученим варто зосередитися у найближчій чверть століття [1]. Першим у списку стоїть питання «Як і з чого побудований Всесвіт?», а п'ятим, після питань про біологічні основи свідомості, геном людини і зв'язок генетичної мінливості зі здоров'ям, йде питання «Чи можна об'єднати закони фізики?». Відповідь на перше питання вже передбачає поглиблення знань про елементарні частинки, тоді як п'ята проблема — це власне і є фізика елементарних частинок і взаємодій.

Сучасну модель елементарних частинок, так звану стандартну модель, було побудовано у другій половині ХХ ст. завдяки зусиллям фізиків ядра і високих енергій. Згідно з цією моделлю, матерія складається з шести кварків (їх позначають u , d , s , c , b , t) і шести лептонів (електрон, мюон, тау-лептон і три сорти нейтрино: електронне, мюонне і тау-лептонне). Ці частинки —

ферміони, вони мають напівцілий спін, тобто описуються статистикою Фермі—Дірака, коли в одному квантовому стані може перебувати лише одна частинка. Взаємодії між ферміонами здійснюються за допомогою 12 бозонів — частинок із цілим спіном, які підпорядковуються статистиці Бозе—Ейнштейна, коли в одному стані може перебувати необмежена кількість частинок. Електромагнітні взаємодії здійснюються гамма-квантом, сильні взаємодії переносяться 8 глюонами, а слабкі взаємодії відбуваються за рахунок обміну трьома калібрувальними бозонами: двома зарядженими (W^+ , W^-) і одним нейтральним (Z_0). В основу стандартної моделі покладено теорію електрослабких взаємодій, яка поєднала електромагнітні і слабкі взаємодії і стала прикладом об'єднання законів фізики.

Нещодавно на Великому адронному колайдері Європейської організації з ядерних досліджень (ЦЕРН) було спостережено частинки, які дуже схожі на передбачені ще у 60-х роках Пітером Хіггсом та кількома іншими вченими бозони з нульовим спіном, введені для пояснення механізму спонтанного порушення електрослабкої симетрії. Це відкриття (хоча воно ще потребує уточнення) можна було б розглядати як тріумф стандартної моделі частинок, якби не ціла низка проблем цієї моделі. Неприємним фактом є те, що доводиться вводити доволі велику кількість вільних параметрів, усього їх принаймні 19. Зокрема, маси частинок і константи взаємодії вимірюються експериментально, а не випливають із теорії. Гравітацію взагалі не включено в модель, і, на жаль, труднощі з побудовою квантової теорії гравітації виглядають доволі серйозними. В усякому разі, поки ніяк не вдається її побудувати (не кажучи вже про те, що кванти гравітаційного поля, гравітони, усе ще не спостережені). Незрозумілою є і проблема конфайнменту, яка полягає в тому, що кварки не існують у вільному стані. І нарешті, без відповіді залишається просте питання: а чому є три покоління кварків і лептонів? Адже усю існуючу зараз матерію можна побудувати з частинок лише одного покоління.

Взагалі, об'єднання теорій електрослабкої і сильної взаємодій виглядає штучним, це ще далеко не «теорія всього», про що мріють фізики і про що власне йдеться у «п'ятому питанні». Можна сказати, що стандартна модель елементарних частинок подібна до геоцентричної системи світу давньогрецького вченого Клавдія Птолемея. Його модель непогано описувала рухи небесних тіл, але, по-перше, геоцентрична система була доволі громіздкою, а по-друге, вимагала постійного вдосконалення і введення усе нових і нових поправок для точного опису рухів планет, Сонця і зірок. Тому система Коперника виявилася принципово більш досконалою, хоча, за великим рахунком, йдеться лише про вибір системи координат!

Однак, крім зазначених проблем стандартної моделі, є вже й чіткі експериментальні вказівки на її недосконалість. По-перше, у стандартній моделі немає частинок, які могли б пояснити існування темної матерії і темної енергії у Всесвіті. По-друге, спостереження явища осциляцій нейтрино вказує на наявність у нейтрино маси, що безумовно є ефектом, який не описується в рамках стандартної моделі. Тому у фізиків є чітке розуміння необхідності розширення стандартної моделі елементарних частинок.

Важливо підкреслити, що ефект нейтринних осциляцій, фактично перший явний ефект за межами стандартної моделі, було спостережено не за допомогою колайдерів, а у підземному експерименті, в якому вимірювали потік нейтрино від Сонця. Потім нейтринні осциляції було спостережено в експериментах з атмосферними нейтрино, реакторними та нейтрино від прискорювачів. Сьогодні можна вже впевнено стверджувати, що нейтрино осцилюють, а отже, є масивними частинками. Спостережані аромати нейтрино є суперпозицією масивних станів нейтрино. Проте осциляційні експерименти чутливі до різниці квадратів масових станів нейтрино, тоді як власне значення маси нейтрино залишається невідомим. Крім того, ми не знаємо, якою є схема масових станів (можливими є вироджена, інвертована і нормальна схеми). Відкритими залишаються і

питання про природу нейтрино (частинка Дірака чи Майорани?), збереження лептонного заряду, існування правих струмів у слабкій взаємодії, бозонів Намбу–Голдстоуна (майоронів) [2].

Подвійний β -розпад і властивості нейтрино та слабкої взаємодії

На всі ці фундаментальні питання можна відповісти, досліджуючи подвійний бета-розпад ($2\nu\beta$) атомних ядер [3–5]. Більш того, безнейтринний подвійний бета-розпад ($0\nu 2\nu\beta$) може відбуватися за рахунок цілого ряду процесів за межами стандартної моделі, і тому його розглядають як одну з небагатьох доступних можливостей перевірки цієї моделі [6, 7].

Є дві принципово різні моди подвійного бета-розпаду: двонейтринна ($2\nu 2\nu\beta$) і безнейтринна ($0\nu 2\nu\beta$). Найбільший інтерес становить саме безнейтринний процес, оскільки він можливий лише у випадку порушення закону збереження лептонного заряду, а також за умови, що нейтрино є масивною частинкою Майорани (античастинка, тотожна своїй частинці).

У випадку, коли масовий механізм домінує в процесі $0\nu 2\nu\beta$ -розпаду, період напіврозпаду ядра ($T_{1/2}^{0\nu 2\nu\beta}$) пов'язаний з ефективною масою нейтрино Майорани ($\langle m_\nu \rangle$) так:

$$\left[T_{1/2}^{0\nu 2\nu\beta} \right]^{-1} = G_{0\nu} |M_{0\nu}|^2 \langle m_\nu \rangle^2, \quad (1)$$

де $G_{0\nu}$ — інтеграл за фазовим об'ємом, який залежить від енергії розпаду та заряду ядра; $M_{0\nu}$ — ядерний матричний елемент, що визначається властивостями ядра. Ефективна маса нейтрино, у випадку легкого нейтрино, визначається як суперпозиція масових станів нейтрино (m_k):

$$\langle m_\nu \rangle = \sum_k (U_{ek})^2 m_k, \quad (2)$$

де U_{ek} — матриця змішування нейтрино.

Отже, якщо нейтрино є частинкою Майорани, ефективну масу нейтрино (або обмеження зверху на її величину) можна отримати з експериментального значення періоду напіврозпаду (обмеження) і розрахованих значень фазового інтеграла і ядерного матричного елемента.

Як уже зазначалося, крім масового механізму, $0\nu 2\nu\beta$ -розпад може відбуватися за рахунок домішок гіпотетичних правих струмів у слабкій взаємодії, випромінювання безмасових (або дуже легких) бозонів Намбу–Голдстоуна та інших механізмів за межами стандартної моделі частинок. Спостереження цього процесу буде дуже важливим навіть зі світоглядної точки зору, оскільки означатиме існування нового типу матерії — ферміонів, у яких частинка і античастинка тотожні. Крім того, майоранівські нейтрино розглядають як один із можливих механізмів баріон-антибаріонної асиметрії Всесвіту, внаслідок якої ми, власне, існуємо. Важко переоцінити значення досліджень подвійного бета-розпаду з огляду на коло питань, на які вдасться відповісти в разі спостереження цього процесу. Втім, навіть відсутність сигналу від $0\nu 2\nu\beta$ -розпаду в чутливих експериментах накладає важливі обмеження на параметри теорій — розширень стандартної моделі елементарних частинок.

Стан досліджень β -розпаду

Двонейтринний подвійний бета-розпад дозволений у стандартній моделі, але, оскільки він є процесом другого порядку за рахунок слабкої взаємодії, вірогідність цього розпаду надзвичайно мала. Не дивно, що за майже 70 років експериментальних пошуків різними методами вдалося зареєструвати $2\nu 2\nu\beta$ -розпад лише у 11 ядер з періодами напіврозпаду 10^{18} – 10^{24} років.

Один з експериментів, у яких зареєстровано $2\nu 2\nu\beta$ -розпад, а саме, ядра ^{116}Cd з періодом напіврозпаду близько $3 \cdot 10^{19}$ років [8], було виконано у Солотвинській підземній лабораторії на Закарпатті. Цю лабораторію побудували на початку 1980-х років за ініціативою члена-кореспондента НАН України Юрія Георгійовича Здесенка. Експеримент, який і дотепер залишається одним із найчутливіших у світі, було здійснено за допомогою унікальних кристалічних сцинтиляторів вольфрамату кадмію з кадмію, збагаченого ізотопом кадмію-116 ($^{116}\text{CdWO}_4$). Кристал розроблено вперше у

світі у 1986 р. у співпраці з Інститутом монокристалів у Харкові (нині — Інститут скінтіляційних матеріалів НАН України). За ініціативою та активною участю українських учених було спостережено двонейтринний подвійний бета-розпад ядра ^{100}Mo на збуджений рівень дочірнього ядра [9] (zareєстрований, крім ядра ^{100}Mo , лише для ^{150}Nd).

Дослідження дозволеної моди 2β -розпаду важливі не лише з огляду на розроблення теоретичних розрахунків власне $2\nu 2\beta$ -розпаду, а й стосовно вдосконалення розрахунків безнейтринної моди, від яких залежать значення маси нейтрино та інших параметрів теорії, які можна отримати з експериментальних даних. Крім того, експериментальне спостереження настільки рідкісних розпадів завжди розглядають як своєрідний тест експериментальних методів для пошуку безнейтринної моди 2β -розпаду. Важливо також, що дані про двонейтринну моду необхідні для розвитку експериментів, спрямованих на пошук безнейтринної моди, адже двонейтринний розпад у дуже чутливих експериментах, коли різні джерела фону вдається істотно зменшити, часто є основним джерелом фону в околі енергій, де очікується сигнал від $0\nu 2\beta$ -розпаду.

Незважаючи на значні і тривалі зусилля експериментаторів, безнейтринний 2β -розпад усе

ще не спостережений. Найбільш чутливі експерименти дають лише обмеження на періоди напіврозпаду на рівні 10^{23} – 10^{25} років, звідки випливає обмеження на ефективну масу нейтрино Майорани на рівні 0,2–2 еВ. Слід зазначити, що наведений діапазон мас пов'язаний з неточністю розрахунків ядерних матричних елементів, оскільки розрахунки в рамках різних моделей дають різні значення для одних і тих самих ядер. Це зумовлено проблемою багатьох тіл (атомне ядро є такою системою), коли точні результати отримати неможливо і для різних задач використовують різні моделі.

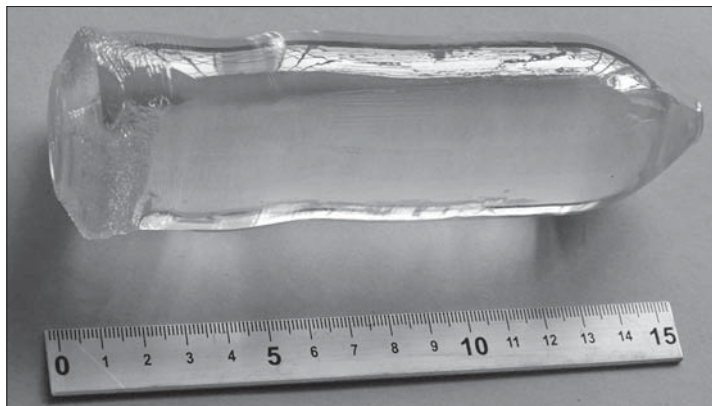
Найчутливіший експеримент з пошуку $0\nu 2\beta$ -розпаду ядра ^{116}Cd також було виконано у Солотвино зі скінтіляторами $^{116}\text{CdWO}_4$. Для $0\nu 2\beta$ -розпаду ^{116}Cd встановлено обмеження $T_{1/2} > 1,7 \cdot 10^{23}$ років, звідки випливає:

- одне з найбільш жорстких обмежень на масу нейтрино: $\langle m_\nu \rangle < 1,7$ еВ;
- обмеження на константу зв'язку нейтрино з майороном $\langle g_M \rangle \leq 4,6 \cdot 10^{-5}$;
- параметри домішок правих струмів у слабкій взаємодії $\langle \eta \rangle \leq 2,5 \cdot 10^{-8}$, $\langle \lambda \rangle \leq 2,2 \cdot 10^{-6}$;
- параметр порушення R -парності в мінімальній суперсиметричній стандартній моделі з незбереженням R -парності $\epsilon \leq 7 \cdot 10^{-4}$ [8].

У Солотвино було також здійснено найчутливіший експеримент з пошуку подвійного

Характеристики можливих експериментів з пошуку $0\nu 2\beta$ -розпаду на рівні чутливості, що відповідає інвертованій схемі масових станів нейтрино (ізотопне збагачення прийняте рівним 100 % за винятком ядра ^{48}Ca , для якого взято 20 %)

Ядро	Період напіврозпаду, що відповідає $\langle m_\nu \rangle = 0,02$ еВ [2] ($\times 10^{27}$ років)	Детектор, принцип дії	Кількість ядер у детекторі масою 1 т ($\times 10^{27}$)	Кількість розпадів за 5 років
^{48}Ca	3–28	$^{48}\text{CaF}_2$ (20% ^{48}Ca), скінтілятор	1,4	0,2–1,9
^{76}Ge	3–7	HP ^{76}Ge , напівпровідниковий детектор	7,9	1,6–9
^{82}Se	1–4	Zn ^{82}Se , криогенний скінтіляційний болометр	4,1	3–13
^{100}Mo	0,3–1,5	Zn $^{100}\text{MoO}_4$, криогенний скінтіляційний болометр	2,6	6–30
		$^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$, криогенний скінтіляційний болометр	3,0	4–34
		Li $_2^{100}\text{MoO}_4$, криогенний скінтіляційний болометр	3,4	8–39
^{116}Cd	0,8–1,3	$^{116}\text{CdWO}_4$, криогенний скінтіляційний болометр	1,7	4–7
^{130}Te	0,7–3	$^{130}\text{TeO}_2$, криогенний болометр	3,8	4–18
^{136}Xe	1–4	^{136}Xe , газовий або скінтіляційний детектор	4,4	4–14



Сцинтиляційні кристали вольфрамату кадмію зі збагачених ізотопів ^{106}Cd (ліворуч) і ^{116}Cd (праворуч)

бета-розпаду ядра ^{160}Gd [10]. В експериментах за участю українських учених було отримано пріоритетні результати у дослідженнях подвійного бета-розпаду ізотопів $^{40}, ^{46}, ^{48}\text{Ca}$, $^{64}, ^{70}\text{Zn}$, ^{82}Se , ^{84}Sr , ^{96}Zr , $^{96}, ^{104}\text{Ru}$, ^{100}Mo , $^{106}, ^{108}, ^{114}\text{Cd}$, $^{136}, ^{138}\text{Ce}$, $^{156}, ^{158}\text{Dy}$, $^{184}, ^{192}\text{Os}$, $^{190}, ^{198}\text{Pt}$, $^{180}, ^{186}\text{W}$, ^{196}Hg .

Слід зауважити, що обмеження на масу нейтрино з $0\nu2\beta$ -експериментів є порівнянними за чутливістю і доповнюють дані прямих вимірювань бета-спектру тритію (кінематична маса нейтрино менша за 2 eV [11]) і космологічних обмежень (сума мас нейтрино не перевищує 0,2–1,3 eV [12]). Діапазон значень для космологічних обмежень пов'язаний з модельною залежністю оцінок, отриманих з аналізу різних астрофізичних даних.

Завдання і перспективи

Завданнями експериментів наступного покоління є доведення їх чутливості до рівня ефективної маси нейтрино, що відповідає інвертованій схемі масових станів нейтрино 0,02–0,05 eV. Такій масі нейтрино відповідають величезні періоди напіврозпаду 10^{26} – 10^{28} років. У таблиці наведено характеристики можливих експериментів з пошуку $0\nu2\beta$ -розпаду на рівні чутливості, що відповідає масі нейтрино $\langle m_{\nu} \rangle = 0,02$ eV. Для розрахунків очікуваної $0\nu2\beta$ -активності використано матричні елементи з роботи [3], отримані в рамках різних моделей.

Для реєстрації такої малої активності необхідно поставити надзвичайно чутливі експерименти з масою досліджуваного ізотопу в сотні чи навіть тисячі кілограмів (для порівняння: у солотвинському експерименті було використано близько 100 г збагаченого ізотопу кадмію-116).

Згідно з Ю.Г. Здесенком [13], чутливість експерименту з пошуку $0\nu2\beta$ -розпаду (обмеження на період напіврозпаду $\lim T_{1/2}$) визначається формулою:

$$\lim T_{1/2} \sim \varepsilon \delta \sqrt{\frac{mt}{RB}}, \quad (3)$$

де ε – ефективність реєстрації ефекту, δ – концентрація досліджуваного ізотопу, t – час вимірювань, m – маса, R – енергетична роздільна здатність, B – швидкість лічби фону в околі енергій, де очікується пік від $0\nu2\beta$ -розпаду.

З формули (3) випливає необхідність використання детекторів з високою ефективністю реєстрації (тобто таких, що містять у своєму складі певний елемент, ізотоп якого є 2β -активним), виготовлених з ізотопно збагачених матеріалів з якомога вищою енергетичною роздільною здатністю і якомога нижчим (в ідеальному випадку нульовим) фоном. Усім цим вимогам найбільшою мірою відповідають низькотемпературні (криогенні) сцинтиляційні болометри зі сцинтиляційними кристалами, виготовленими зі збагачених ізотопів. Забезпечуючи високу ефективність реєстрації на рівні 80–90 % і високу енергетичну роздільну здатність (кілька keV на енергії розпаду близь-

ко 3 MeV), детектори цього типу здатні досягти майже нульового фону за маси детектора близько тонни.

Важливо підкреслити необхідність розвитку техніки експерименту для різних ядер. По-перше, в разі спостереження ефекту в одному ядрі потрібно буде підтвердити це відкриття з іншим ядром. По-друге, спостереження у кількох ядрах значно полегшить теоретикам завдання визначення маси нейтрино і з'ясування механізму розпаду. Крім того, можна сподіватися на прорив у чутливості експериментів з тим чи іншим ядром завдяки розвитку техніки збагачення ізотопів, очищення речовин, нових принципів ядерної спектрометрії. І тут знову низькотемпературні скінтіляційні болометри виявляються найбільш придатними, оскільки існують скінтілятори різного складу. Як видно з таблиці, є скінтіляційні кристали з молібденом, кадмієм, селеном — елементами, у яких є потенційно 2β -активні ізотопи з великою енергією розпаду, сприятливими теоретичними оцінками, порівняно високою концентрацією таких ізотопів та можливістю їх збагачення у значних кількостях.

Участь України в експериментах наступного покоління

Скінтілятори $^{116}\text{CdWO}_4$, розроблені в 1980-ті роки і застосовані в одному з найчутливіших експериментів [8], показали перспективність використання скінтіляційних кристалів зі збагачених ізотопів. Нещодавно було розроблено кристали вольфрамату кадмію зі збагачених ізотопів кадмію-106 [14] і кадмію-116 [15]. Скінтіляційні кристали вольфрамату кадмію зі збагачених ізотопів кадмію наведено на рисунку. Глибоке очищення ізотопно збагачених ^{106}Cd і ^{116}Cd було виконано в Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій ННЦ ХФТІ методами вакуумної дистиляції [16]. Це, у поєднанні з методом Чохральського з низьким градієнтом температури для росту кристалів, дозволило отримати раніше недосяжну оптичну якість скінтіляторів. Детектори $^{106}\text{CdWO}_4$ і $^{116}\text{CdWO}_4$ успішно викорис-

товують для пошуку процесів 2β -розпаду ізотопів ^{106}Cd [17] і ^{116}Cd [18]. Узагалі науковці цього Інституту продемонстрували винятково високий рівень в очищенні багатьох цікавих для досліджень подвійного бета-розпаду матеріалів: археологічного свинцю, рутенію, осмію, гафнію, цинку. Глибоке очищення металів від домішок, насамперед радіоактивних елементів (торію, радію, урану, калію, рідкісноземельних елементів), необхідне для зниження швидкості лічби фону в 2β -експериментах.

Запропоновані українськими вченими скінтіляційні кристали молібдатів цинку [19] і літію [20] демонструють надзвичайно високі спектрометричні характеристики і достатньо низький рівень радіоактивної забрудненості [21, 22], що зумовлює їх використання як перспективних детекторів для пошуку $0\nu 2\beta$ -розпаду ядра ^{100}Mo (проект LUMINEU) [23]. Нещодавно, уперше у світі, було розроблено кристали молібдату цинку зі збагаченого ізотопу молібдену-100 [24], що відкриває перспективу застосування цього матеріалу у великомасштабних експериментах.

Ще одна колаборація за участю українських учених, AMoRE [25], має намір використовувати скінтіляційні кристали молібдату кальцію зі збагаченого молібдену-100 і кальцію, збідненого на ізотоп кальцію-48. Таке збагачення і водночас збіднення потрібне для досягнення дуже низького рівня фону, оскільки навіть сам по собі надзвичайно рідкісний процес двонейтринного 2β -розпаду ^{48}Ca виявляється помітним джерелом фону для пошуку $0\nu 2\beta$ -розпаду ядра ^{100}Mo .

Ще одним джерелом фону, на яке вперше звернули увагу українські вчені, є випадкові збіги подій $2\nu 2\beta$ -розпаду в криогенних болометрах через низьку часову роздільну здатність цих детекторів [26]. Розроблено методи зменшення цього фону шляхом аналізу форми сигналів [27].

Також науковці Інституту ядерних досліджень НАН України беруть участь у підготовці єдиного експерименту з повною реконструкцією подій 2β -розпаду — у великому міжнародному проєкті SuperNEMO [28].

Завдяки розробленим методам глибокого очищення металів, росту кристалів, зниження радіоактивного фону відкривається перспектива участі України у великомасштабних експериментах, здатних не лише перевірити інвертовану схему масових станів нейтрино, а й дати можливість рухатися в напрямі перевірки нормальної схеми масових станів (маса нейтрино менша за 0,01 eV) [29, 30].

Висновки

Дослідження подвійного бета-розпаду дозволяють визначити природу нейтрино (частинка Дірака чи Майорани?), масу і схему масових станів нейтрино, перевірити закон збереження лептонного заряду, існування правих струмів у слабкій взаємодії та інших ефектів за межами стандартної моделі частинок.

Упродовж останніх 70 років спостережено двонейтринний процес у 11 ядер з періодами напіврозпаду 10^{19} – 10^{24} років, тоді як найбільш цікавий з погляду вивчення властивостей нейтрино і слабкої взаємодії процес $0\nu 2\beta$ -розпаду не спостерігається на рівні чутливості $\lim T_{1/2} \approx 10^{23}$ – 10^{25} років. Проте навіть із цих експериментів, які не бачать $0\nu 2\beta$ -розпад, можна зробити важливі висновки про те, що маса нейтрино менша за 0,2–2 eV.

Учені НАН України зробили і роблять значний внесок у дослідження 2β -розпаду, їх досягнення визнано на світовому рівні. Це і вимірювання $2\nu 2\beta$ -розпаду ядер ^{48}Ca , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo (у тому числі на збуджений рівень дочірнього ядра), ^{130}Te , ^{150}Nd , найбільш чутливі обмеження на $0\nu 2\beta$ -розпад ядер ^{100}Mo і ^{116}Cd ,

звідки впливають жорсткі обмеження на масу нейтрино, домішки правих струмів у слабкій взаємодії, константу зв'язку нейтрино з майороном та інші параметри теорії. Отримано пріоритетні результати у дослідженнях 2β -розпаду ізотопів кальцію, цинку, селену, стронцію, цирконію, рутенію, молібдену, кадмію, церію, диспрозію, гадолінію, осмію, платини, ртуті. Уперше запропоновано і досліджено можливість застосування кристалів молібдату літію і цинку як низькотемпературних сцинтиляційних болометрів. Розроблено і використано у чутливих експериментах унікальні сцинтиляційні кристали вольфрамату кадмію і молібдату цинку зі збагачених ізотопів.

Завдання експериментів наступного покоління полягає в досягненні чутливості до маси нейтрино на рівні інвертованої схеми масових станів (ефективна маса нейтрино $\langle m_\nu \rangle \approx 0,02$ – $0,05$ eV). Найперспективнішими детекторами для таких експериментів є низькотемпературні сцинтиляційні болометри з кристалами зі збагачених ізотопів.

Учені НАН України беруть участь у кількох великих проектах низькотемпературних експериментів наступного покоління – LUMINEU і AMORE, у розробленні експерименту CUPID, а також у єдиному експерименті з повною реконструкцією подій 2β -розпаду – SuperNEMO.

Україна здатна і надалі робити гідний внесок у дослідження 2β -розпаду, оскільки ми маємо кваліфікованих фахівців і талановиту молодь, маємо напрацювання і науково-технічну базу в низькофоновій ядерній спектроскопії, глибокому очищенні матеріалів, розробленні сцинтиляторів.

REFERENCES

1. <http://www.sciencemag.org/site/feature/misc/webfeat/125th/>.
2. Mohapatra R.N. et al. Theory of neutrinos: A white paper. *Rep. Prog. Phys.* 2007. **70**(11): 1757–867.
3. Vergados J.D., Ejiri H., Šimkovic F. Theory of neutrinoless double-beta decay. *Rep. Prog. Phys.* 2012. **75**(10): 106301.
4. Barea J., Kotila J., Iachello F. Limits on Neutrino Masses from Neutrinoless Double- β Decay. *Phys. Rev. Lett.* 2012. **109**(4): 042501.
5. Rodejohann W. Neutrino-less double beta decay and particle physics. *J. Phys. G.* 2012. **39**(12): 124008.
6. Deppisch F.F., Hirsch M., Päs H. Neutrinoless double-beta decay and physics beyond the standard model. *J. Phys. G.* 2012. **39**(12): 124007.
7. Bilenky S.M., Giunti C. Neutrinoless double-beta decay: A probe of physics beyond the Standard Model. *Int. J. Mod. Phys. A.* 2015. **30**(4): 1530001.
8. Danevich F.A., Georgadze A.Sh., Kobychiev V.V., Kropivnyansky B.N., Nikolaiko A.S., Ponkratenko O.A., Tretyak V.I., Zdesenko S.Yu., Zdesenko Yu.G., Bizzeti P.G., Fazzini T.F., Maurenzig P.R. Search for 2β decay of cadmium and tungsten isotopes: Final results of the Solotvina experiment. *Phys. Rev. C.* 2003. **68**(3): 035501.
9. Belli P. et al. New observation of $2\nu 2\beta$ decay of ^{100}Mo to the 0_1^+ level of ^{100}Ru in the ARMONIA experiment. *Nucl. Phys. A.* 2010. **846**: 143–156.
10. Danevich F.A., Kobychiev V.V., Ponkratenko O.A., Tretyak V.I., Zdesenko Yu.G. Quest for double beta decay of ^{160}Gd and Ce isotopes. *Nucl. Phys. A.* 2001. **694**: 375–391.
11. Drexlin G., Hannen V., Mertens S., Weinheimer C. Current Direct Neutrino Mass Experiments. *Adv. High Energy Phys.* 2013. ID 293986.
12. Abazajian K.N. et al. Cosmological and astrophysical neutrino mass measurements. *Astropart. Phys.* 2011. **35**(4): 177–184.
13. Zdesenko Yu. Colloquium: The future of double β decay research. *Rev. Mod. Phys.* 2002. **74**(3): 663.
14. Belli P. et al. Development of enriched $^{106}\text{CdWO}_4$ crystal scintillators to search for double β decay processes in ^{106}Cd . *Nucl. Instr. Meth. A.* 2010. **615**(3): 301–06.
15. Barabash A.S. et al. Low background detector with enriched $^{116}\text{CdWO}_4$ crystal scintillators to search for double β decay of ^{116}Cd . *JINST.* 2011. **6**: P08011.
16. Bernabey R. et al. Production of high-pure Cd and ^{106}Cd for CdWO_4 and $^{106}\text{CdWO}_4$ scintillators. *Metallofizika i Noveishije Tekhnologii.* 2008. **30**: 477 [in Russian].
17. Belli P. et al. Search for double- β decay processes in ^{106}Cd with the help of a $^{106}\text{CdWO}_4$ crystal scintillator. *Phys. Rev. C.* 2012. **85**(3): 044610.
18. Polischuk O.G. et al. Investigation of Double Beta Decay of ^{116}Cd with the Help of Enriched $^{116}\text{CdWO}_4$ Crystal Scintillators. *Proc. Conf. MEDEX'15.*
19. Gironi L. et al. Performance of ZnMoO_4 crystal as cryogenic scintillating bolometer to search for double beta decay of molybdenum. *JINST.* 2010. **5**: P11007.
20. Barinova O.P. et al. First test of Li_2MoO_4 crystal as a cryogenic scintillating bolometer. *Nucl. Instr. Meth. A.* 2010. **613**: 54.
21. Armengaud E. et al. Development and underground test of radiopure ZnMoO_4 scintillating bolometers for the LUMINEU $0\nu 2\beta$ project. *JINST.* 2015. **10**: P05007.
22. Bekker T.B. et al. Aboveground test of an advanced Li_2MoO_4 scintillating bolometer to search for neutrinoless double beta decay of ^{100}Mo . *Astropart. Phys.* 2016. **72**: 38.
23. Beeman J.W. et al. A next-generation neutrinoless double beta decay experiment based on ZnMoO_4 scintillating bolometers. *Phys. Lett. B.* 2012. **710**(2): 318.
24. Barabash A.S. et al. Enriched $\text{Zn}^{100}\text{MoO}_4$ scintillating bolometers to search for $0\nu 2\beta$ decay of ^{100}Mo with the LUMINEU experiment. *Eur. Phys. J. C.* 2014. **74**: 3133.
25. Kim G.B. et al. A CaMoO_4 Crystal Low Temperature Detector for the AMoRE Neutrinoless Double Beta Decay Search. *Adv. High Energy Phys.* 2015. ID 817530.
26. Chernyak D.M., Danevich F.A., Giuliani A., Olivieri E., Tenconi M., Tretyak V.I. Random coincidence of $2\nu 2\beta$ decay events as a background source in bolometric $0\nu 2\beta$ decay experiments. *Eur. Phys. J. C.* 2012. **72**: 1989.
27. Chernyak D.M., Danevich F.A., Giuliani A., Mancuso M., Nones C., Olivieri E., Tenconi M., Tretyak V.I. Rejection of randomly coinciding events in ZnMoO_4 scintillating bolometers. *Eur. Phys. J. C.* 2014. **74**: 2913.
28. Chauveau E. et al. SuperNEMO Project Status. *AIP Conf. Proc.* 2009. **1180**: 26.

29. Wang G. et al. CUPID: CUORE (Cryogenic Underground Observatory for Rare Events) Upgrade with Particle Identification. arXiv:1504.03599v1.
 30. Wang G. et al. R&D towards CUPID (CUORE Upgrade with Particle IDentification). arXiv:1504.03612v1.

Ф.А. Даневич

Институт ядерных исследований НАН Украины
 пр. Науки, 47, Киев, 03680, Украина

ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ НЕЙТРИНО И СЛАБОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ДВОЙНОМ БЕТА-РАСПАДЕ АТОМНЫХ ЯДЕР

По материалам научного доклада на заседании Президиума НАН Украины 1 июля 2015 года

Исследование двойного бета-распада позволяет изучать природу и свойства нейтрино и слабого взаимодействия, проверить стандартную модель элементарных частиц. Поиск безнейтринной моды двойного бета-распада требует чувствительного экспериментального оборудования, способного зарегистрировать чрезвычайно редкие события ядерных распадов с периодами полураспада 10^{26} – 10^{28} лет. Украина имеет значительный потенциал для участия в крупномасштабных экспериментах следующего поколения благодаря разработанным уникальным методам сверхнизкофоновой ядерной спектроскопии, глубокой очистки материалов, роста сцинтилляционных кристаллов.

Ключевые слова: нейтрино, двойной бета-распад, низкофоновая ядерная спектроскопия, глубокая очистка веществ, сцинтилляционный детектор.

F.A. Danevich

Institute for Nuclear Research of National Academy of Sciences of Ukraine
 47 Nauky Ave., Kyiv, 03680, Ukraine

INVESTIGATION OF NEUTRINO AND WEAK INTERACTIONS IN DOUBLE BETA DECAY OF ATOMIC NUCLEI

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine July 1, 2015

Double beta decay is a unique way to study the nature and properties of neutrinos and weak interaction, to test the Standard Model of particles. Investigations of neutrinoless double beta decay require sensitive experimental approaches to detect extremely rare nuclear decays with the half-lives on the level of 10^{26} – 10^{28} years. Ukraine has a significant potential to participate in the next generation large-scale experiments thanks to developed methods of ultra-low background nuclear spectrometry, deep purification of materials, crystal growth technologies.

Keywords: neutrino, double beta decay, low-background experiments, deep purification of materials, scintillation detector.