

Тому, на думку Нобелівського комітету, нагородження Туніського квартету національного діалогу є меседжем саме громадським організаціям у всьому світі, щоб вони активно долучалися до боротьби за демократизацію та мирне врегулювання кризових явищ.

За результатами оголошення переможця експерти та провідні світові політики високо оцінили несподіване та мудре рішення Нобелівського комітету. Вони наголошують, що приклад Тунісу, підтриманий світовою спільнотою, має бути зразком для наслідування в інших арабських країнах на Близькому Сході та в Північній Африці. При цьому, завдяки успішному врегулюванню політичної кризи в Тунісі, стає зрозумілою велика роль громадянського суспільства в захис-

ті миру й стабільності, коли політичні партії – як провладні, так і опозиційні – не в змозі дійти компромісу. За словами голови Національного ордеру адвокатів Тунісу М. Махфуда, нагородження Туніського квартету національного діалогу – це меседж усім протиборчим сторонам про те, що будь-який політичний конфлікт можна розв'язати за допомогою діалогу, а мова зброї – це шлях у нікуди.

Необхідно зазначити, що нагородження Нобелівською премією миру цього року відбувається на тлі скандалу у Швеції, пов'язаного з присудженням три роки тому цієї премії Євросоюзу. Так, три члени шведської громадської організації «Складіть зброю»: лауреат премії миру за 1976 рік М. Корриган-Магуайр, політичний активіст зі

США Д. Суонсон та датський учений, экс-голова Датського фонду миру Я. Оберг подали до суду з вимогою визнати незаконність виплати грошової нагороди у 2012 році через невідповідність умовам заповіту А. Нобеля. На думку заявників, «військова політика Євросоюзу прямо суперечить ідеалам миру, які хотів підтримати Нобель».

Тож з огляду на зростання кількості військових конфліктів і політичну напруженість між провідними країнами світу, рішення Нобелівського комітету цього року можна назвати своєрідною підказкою світовим політичним лідерам, національним урядам, громадським організаціям і воюючим сторонам, що єдиним шляхом виходу з політичної кризи є національний діалог та мирне врегулювання.



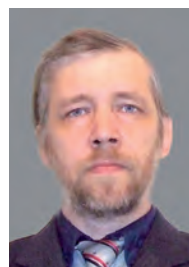
Відкриття осциляцій нейтрино як крок до розгадки будови Всесвіту



Нобелівську премію з фізики в 2015 році присуджено канадцю Артуру Макдональду (Arthur B. McDonald) і Такаакі Кадзіті (Takaaki Kajita) з Японії «за відкриття осциляцій нейтрино, які свідчать про те, що в нейтрино є маса».



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



Владислав КОБИЧЕВ, старший науковий співробітник Інституту ядерних досліджень НАН України, кандидат фізико-математичних наук



Володимир ТРЕТЯК, провідний науковий співробітник Інституту ядерних досліджень НАН України, кандидат фізико-математичних наук



Артур Макдональд



Такаакі Кадзіті

«Я зробив сьогодні жакхливу річ. Фізику-теоретику ніколи не слід такого робити. Я запропонував щось таке, чого ніколи не можна буде перевірити експериментально», – сказав у грудні 1930 року австрійський фізик Вольфганг Паулі німецькому астрофізику Вальтеру Бааде під час фізичної конференції в Римі. Паулі змушений був придумати нову частинку, щоб «врятувати» два фунда-

ментальні закони фізики, які, здавалося, порушуються в бета-розпаді атомних ядер: закони збереження енергії і моменту імпульсу. Занепокоєння Паулі можна зрозуміти, адже вчені дуже не люблять порушувати принцип, відомий як «Бритва Оккама»: не придумуй нічого, що не є вкрай необхідним. Та ще йшлося про те, що, як здавалося Паулі, неможливо перевірити в експерименті! Але тут геніальний теоретик таки недооцінив експериментаторів. Утім, про це трохи пізніше.

А відтак за справу взявся не менш геніальний італієць Енріко Фермі. Переказували, що він однаково легко міг підготувати складний експеримент чи розробити складну теорію. Зважаючи на частинку, мимоволі передбачену Паулі, Фермі (він, до речі, й назвав нову частинку «нейтрино»,

що італійською означає «нейтрончик») невдовзі побудував теорію бета-розпаду. Для цього йому довелося запровадити поняття нової сили, яку він назвав «слабкою». Ця сила проявляється саме в розпадах атомних ядер і, як з'ясувалося пізніше, у деяких взаємодіях частинок. Оцінки засвідчували, що нова сила в мільярди разів слабкіша за електромагнітну й у десятки трильйонів – за силу, яка утримує протони і нейтрони в атомних ядрах. Та насправді слабка взаємодія проявляється в деяких випадках доволі грізно: згадаймо хоча б радіацію після Чорнобильської аварії. Власне, як довели пізніше, якби не слабка взаємодія, то навіть і сонячного світла не було б!

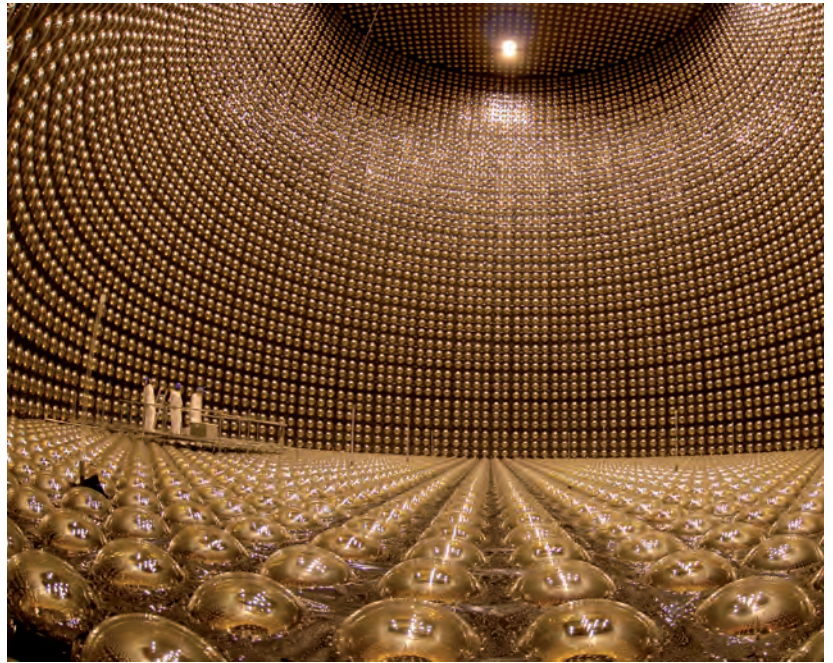
Застереження Паулі щодо неможливості експериментально перевірити існування нової частинки не справди-

лося. Не минуло й чверті століття по тому, як американські вчені Фредерік Райнес і Клайд Коуен довели протилежне. Спочатку вони пропонували зареєструвати нейтрино від вибуху ядерної бомби, а пізніше побудували установку, за допомогою якої змогли вперше виміряти потік нейтрино від ядерного реактора, який є потужним джерелом цих частинок.

Нейтрино не дарма вважають ключовою серед інших елементарних частинок. По-перше, саме в експериментах із нейтрино виявляють останнім часом щось принципово нове, не обмежуючись лише точнішими вимірами тих чи інших параметрів. По-друге, якщо нейтрино виявиться тотожним своїй античастинці, це зможе пояснити механізм баріон-антибаріонної асиметрії Всесвіту, внаслідок якої ми, власне, існуємо. І, нарешті, саме від властивостей цієї загадкової частинки залежить «доля» сучасної стандартної моделі елементарних частинок, згідно з якою вважається, що маса нейтрино дорівнює нулю (всі експерименти впродовж другої половини минулого століття не виявляли в нейтрино маси).

Щоправда, не обійшлося й без декількох повідомлень про виявлення маси нейтрино. Зокрема, у середині 1980-х наукову спільноту сколихнули повідомлення В. Любимова та його колег із Інституту експериментальної і теоретичної фізики в Троїцьку, що під Москвою, про фіксування дуже малої, але не нульової маси нейтрино: десь у двадцять тисяч разів меншу за масу найлегшої з відомих масивних частинок електрона. Група фізиків у Троїцьку досліджувала енергію електронів, що випромінювались під час бета-розпаду радіоактивного тритію, та виявила деяку «нестачу» електронів максимальної енергії. Це можна було розглядати як указівку на наявність маси в нейтрино, котрі теж випромінюються під час цього розпаду, але не реєструються безпосередньо. Повідомлення бурхливо обговорювалося на всіх «нейтринних» конференціях, а кілька груп негайно взялися повторити експеримент радянських учених. І поступово з'ясувалося, що повідомлення є помилковим.

Завдяки постійному вдосконаленню установок, які працюють за принципом, застосованим групою Любимова, наразі досягнуто їхню чутливість до маси нейтрино майже 2 електрон-вольт (одна трьохсоттисячна маси електрона). А в Технологічному університеті Карлсруе в Німеччині спорудили й готують до пуску колосальну установку *KATRIN*, яка має перевірити наявність маси в нейтрино зі ще на порядок кращою чутливістю. Корпус 200-тонного спектрометра такий великий, що під час його транспортування з Дагендорфа



до місця призначення в Карлсруе замість 400 кілометрів прямого шляху довелося долати аж 8600 кілометрів Дунаєм, Чорним і Середземним морями, Атлантичним океаном, річкою Рейн. Непростим був і останній кількakilометровий відрізок дороги, коли в населених пунктах транспорту довелося «вписатися» з точністю в кілька сантиметрів між будинками місцевих жителів.

Як це часто буває в науці, помилкове повідомлення про відкриття троїцької групи активізувало дослідження властивостей нейтрино від різних джерел – реакторів, прискорювачів, верхніх шарів атмосфери, вибухів наднових зірок і від Сонця.

Іще наприкінці 1950-х, майже водночас із дослідженнями реакторних нейтрино Райнеса і Коуена, американський хімік і фізик Раймонд Девіс узявся за багатого складніше завдання, маючи на меті зареєструвати нейтрино від Сонця. Тоді вчені вже чітко розуміли, що джерелом сонячної енергії є термоядерні реакції в ядрі Сонця, яке має бути при цьому потужним джерелом нейтрино. Важливо, що потік і енергетичний спектр нейтрино від Сонця можна було розрахувати, використовуючи дані про його масу, розміри й температуру поверхні, відомі з астрономічних досліджень. Для реєстрації сонячних нейтрино Р. Девіс та його співробітники на початку 1960-х років побудували на глибині майже півтора кілометри в шахті Хоумстейк у штаті Південна Дакота величезну установку, яка містила понад 600 тонн перхлоретилену. Ідея полягала в тому, щоб з такої великої маси речовини виділити надзвичайно малу кількість атомів радіоактивного ізотопу аргону-37, який мав утворюватися у взаємодії

нейтрино з ядрами атомів хлору. Періодично вчені екстрагували з перхлоретилену утворений під дією нейтрино радіоактивний аргон і вимірювали його активність за допомогою малесенького надзвичайно чутливого газового лічильника, ретельно виготовленого з кварцу та інших радіоактивно чистих матеріалів. Це було необхідно для вимірювання дуже малої активності (близько одного розпаду за добу) аргону-37. Для порівняння: у тілі людини за секунду відбувається кілька тисяч розпадів природних радіонуклідів. Результат виявився дивним: виміряна активність аргону-37 була приблизно втричі меншою за очікувану.

Девіс це збентежило. Що не так іде в експерименті? Чому вимірюваний потік нейтрино від Сонця значно менший за очікуваний теоретично? Учений крок за кроком перевіряв і вдосконалював усі вузли установок, знову й знову просив свого колегу Джона Бакала перевірити розрахунки потоку та спектра нейтрино від Сонця. Результат був той самий: потік, вимірюваний установкою, приблизно втричі менший за передбачений теоретично. Робітники, які обслуговували підземну установку, намагалися заспокоїти Девіса: «Не засмучуйтеся, професоре! Ви ж подивіться, яке хмарне було літо цього року, Сонця майже не видно! То, мабуть, через ті хмари й нейтрино не могли пролітати!». Девіс лише сумно посміхався: доброзичливіці не видали, що для нейтрино не лише хмари, а й уся планета Земля та навіть велетенська зірка не становлять перешкоди. Ці частинки проходять через величезні шари матерії без затримки. І лише надзвичайно мала їхня частина поглинається в детекторі. Надзвичайно слабкий ефект треба

було ретельно захистити від фону, тому установку й розмістили глибоко під землею, куди майже не проникають космічні промені.

Двадцять п'ять років знадобилося вченим, щоб довести і собі, і науковій спільноті, що потік електронних нейтрино від Сонця насправді приблизно втричі менший за теоретично очікуваний. Цю розбіжність назвали проблемою дефіциту сонячних нейтрино. До яких тільки гіпотез не вдавалися вчені, щоб пояснити цю нестиковку експерименту з теорією. Казали навіть про те, що Сонце почало згасати. І справді, якщо термоядерні реакції всередині Сонця почали затухати, то саме нейтрино несуть інформацію про це одразу, бо вилітають із Сонця без затримки, тоді як теплова енергія та світло досягають поверхні Сонця з його центру за приблизно сто тисяч років. Але одним із найвірогідніших пояснень проблеми було визнане явище осциляцій нейтрино, передбачене італійсько-радянським ученим Бруно Понтекорво ще в 1957 році. Так, тим самим, якого оспівав Володимир Висоцький:

«Пусть не поймаешь нейтрино
за бороду
И не посадишь в пробирку, —
Было бы здорово, чтоб
Понтекорво
Взял его крепче за шкуру!».

Але взяти нейтрино «за шкуру» виявилось не так-то й просто. Вчені будували дедалі складніші й більші детектори, щоб точніше виміряти потоки та енергії нейтрино від реакторів і з верхніх шарів атмосфери. У 1980-х роках у Японії на глибині близько одного кілометра під землею в шахті Каміока спорудили величезний детектор *KamiokaNDE*. Його принцип дії заснований на ефекті Черенкова – випромінюванні світла в середовищі, коли заряджена частинка проходить через нього зі швидкістю, більшою за швидкість світла в цьому середовищі. Детектор являв собою циліндричний резервуар розмірами близько 16 на 16 метрів, який містив три тисячі тонн надчистої води, зі встановленими на його внутрішній поверхні близько тисячі фотоелектронних помножувачів (ФЕП) – електровакуумних датчиків світла у вигляді великих скляних колб, спроможних спіймати та перетворити на електричний імпульс навіть один окремих фотон. Хоча детектор призначався для пошуку теж важливого явища – розпаду протона (все ще неспостереженого!), він виявився також чутливим до так званих атмосферних нейтрино, які виникають у верхніх шарах атмосфери під дією космічних променів. Результати вимірювань на детекторі *KamiokaNDE* вказували на те, що ви-

міряне співвідношення між потоками різних типів нейтрино, електронних і мюонних, також відрізняється від передбаченого теоретично. Це співвідношення, подібно до результатів Девіса із сонячними нейтрино, вказувало на дефіцит мюонних нейтрино. А ще 23 лютого 1987 року детектор *KamiokaNDE* зареєстрував нейтрино від вибуху наднової зірки *SN1987A* у Великій Магеллановій Хмарі – карликовій галактиці, розташованій на відстані близько 50 кілопарсеків від нашої галактики. Отримані Раймондом Девісом і Масатосі Косібою (керівником проекту *KamiokaNDE*) результати були гідно оцінені науковою спільнотою. У 2002 році вчених нагородили Нобелівською премією з фізики «за новаторський внесок в астрофізику, зокрема за виявлення космічних нейтрино».

Обидва ефекти – дефіцит сонячних і атмосферних нейтрино, а також нижчий за теоретично передбачуваний потік нейтрино від віддалених на кілька десятків кілометрів ядерних реакторів, виміряний у японському експерименті *KamLAND*, – вказували на передбачене Бруно Понтекорво явище осциляцій нейтрино. Воно полягає в перетворенні одного виду нейтрино (а загалом їх відомо три: електронне, мюонне й тау-лептонне) на інші. Це схоже на те, якби людина з цілком білою шкірою вилетіла з Нью-Йорка і прилетіла до Амстердама чорношкірим афроамериканцем, а потім у Києві того чолові'ягу побачили на Хрещатику вже як справжнього японця! Варто пояснити, що осциляції нейтрино можливі лише в разі, якщо його маса не дорівнює нулю – незалежно від того, чи це відбувається у вакуумі чи під час руху крізь Сонце.

Оскільки детектор *KamiokaNDE* був «замалим» для надійного спостереження ефекту нейтринних осциляцій, японці побудували нову, майже у двадцять разів більшу установку *Super-KamiokaNDE*. Величезна бочка з нержавіючої сталі діаметром 39 метрів і заввишки 41 метр була, знову-таки, заповнена надчистою водою загальною масою 50 тисяч тонн, яка проглядалася 11 тисячами ФЕП, установлених на стінках детектора.

Цього разу величина установки виявилася достатньою для надійного вимірювання різниці (приблизно у два рази) потоків атмосферних мюонних нейтрино зверху та знизу. Пояснити таку різницю можна було перетворенням мюонних нейтрино за час їх проходження крізь товщу Землі на інший тип (тау-лептонні) нейтрино, яких детектор не міг зареєструвати. Результати експерименту *Super-KamiokaNDE* вказували на осциляції мюонних нейтрино та на ненульову масу нейтрино. Тут варто відзначити виняткове працелюбство й настирність японців. 12 листопада

2001 року в установці *Super-KamiokaNDE* сталася велика аварія, коли внаслідок вибуху одного з ФЕП ударна хвиля розбила сусідні колби та виникла «ланцюгова реакція», яка за кілька секунд пошкодила близько семи тисяч із одинадцяти тисяч ФЕП установки. Але не минуло й року, як у жовтні 2002-го експеримент був продовжений! Ось у цій наполегливості, а також у величезних масштабах наукових досліджень і полягають складові економічних успіхів Японії, де, здається, немає майже нічого, крім гір, моря та землетрусів. До речі, нині Японія має намір будувати підземний детектор *Hyper-KamiokaNDE* (у 20 разів більший за *Super-KamiokaNDE*) й готується посилати на астероїди автоматичні станції.

Іще одне підтвердження осциляцій нейтрино від Сонця та наявності у них маси отримано в Нейтринній обсерваторії в Садбері (*SNO*), розташованій на глибині понад два кілометри в нікелевій шахті Крейтон Валле Інко (Канада). Детектор *SNO* являв собою сферу діаметром 18 метрів, заповнену тисячею тонн надчистої важкої води. Десять тисяч фотопомножувачів реєструють черенковське світло від заряджених частинок, що виникають унаслідок взаємодії нейтрино з ядрами атомів важкої води. Цікаво, що цю кількість важкої води вчені отримали від уряду Канади за... один канадський долар (за умови, що після експерименту важка вода буде повернута державі). Ще майже вісім тисяч тонн надчистої звичайної води оточували прозорий акриловий контейнер із важкою водою для захисту від радіоактивного випромінювання ближніх скальних порід.

Нікелева шахта – це дуже брудне місце. Багнюка під ногами, шум, пилюка супроводжують вас увесь час, поки ви спочатку спускаєтеся двома підйомниками вниз на двокілометрову глибину, а потім йдете до лабораторії. Автори проекту, звісно, врахували, що коли бодай грам пилу з шахти потрапить у середину детектора, виконання вимірювань стане неможливим. Тому весь об'єм лабораторії обладнано як чисту кімнату класу 2000. Тож кожен, хто сюди потрапляє, має скинути робочий і захисний одяг, приїняти душ, одягнути чистий захисний спецодяг і лише потім, через спеціальний шлюз, потрапити в лабораторію. Таку «процедуру» довелося пройти й одному з авторів цієї статті. Цьогорічний нобелівський лауреат Артур Макдональд любить жартома нагадати, що й прем'єр-міністра Канади пустили в лабораторію тільки після того, як він роздягнувся й прийняв душ...

Спостереження за допомогою детектора *SNO* чітко вказували на присутність мюонних і тау-нейтрино



від Сонця – саме в тій кількості, що разом із електронними нейтрино дає теоретично передбачений потік. Отже, тільки третина нейтрино долітає до Землі в тому вигляді, в якому вони народилися в центрі Сонця, і мають шанс бути зареєстрованими в хлор-аргоновому експерименті Девіса (що є чутливим тільки до електронних нейтрино). Тож розгадку дефіциту сонячних нейтрино було знайдено. Це – осциляції. А звідси впливає й наявність маси у нейтрино.

Нерідко можна почути, що такі великі експерименти роблять сотні людей, а Нобелівську премію отримують одиниці. Так-то воно так, але треба знати Макдональда, аби не було сумнівів, що саме він заслуговує на високу нагороду. Надзвичайно наполегливий, інтелігентний, справжній джентльмен. Одного з авторів цієї статті вразило ставлення Артура до людей: у Дубні, куди він прибув, щоб отримати премію Бруно Понтекорова, відбулася також нарада про перспективи співробітництва. Він знайшов можливість підійти до кожного. Привітався й обняв також тих, із ким зустрівся вперше.

Варто підкреслити, що нейтринні осциляції є першим спостереженим ефектом за межами стандартної моделі елементарних частинок з моменту створення цієї моделі, яка досі надзвичайно успішно описувала всі явища субатомної фізики. При цьому він виявлений не за допомогою надзвичайно дорогих прискорювачів, а саме в підземному експерименті. Молода галузь фізики, яка в англійській літературі називається *Astroparticle Physics*, почала бурхливо розвиватися в останні тридцять років. Нині в усьому світі функціонують багато підземних лабораторій. Окрім уже згаданих Нейтринної обсерваторії в Садбері та лабораторії Каміока в Японії, підземні лабораторії є в Італії, Франції, Іспанії, Росії, Кореї, Великій Британії, Сполучених Штатах, Фінляндії, Бельгії. Унікальний нейтринний детектор масою близько мільярда тонн (робочою речовиною детектора в цьому випадку є лід) функціонує на станції Амундсен-Скотт на Південному полюсі в Антарктиді, подібні до нього (водяні) детектори споруджуються на Байкалі та в Середземному морі.

В Україні також з 1984 року функціонувала підземна лабораторія на глибині 430 метрів у соляній шахті селища Солотвино на Закарпатті, де проводилися дослідження нейтрино й слабкої взаємодії, вимірювання рідкісних процесів розпадів атомних ядер. У лабораторії отримали результати світового рівня в галузі фізики нейтрино та рідкісних ядерних процесів: встановлено одне з найбільш жорстких обмежень на масу нейтрино, виміряно надзвичайно

рідкісний процес двонейтринного подвійного бета-розпаду кадмію, вперше спостережено альфа-активність природного вольфраму, розроблено унікальний детектор зі збагаченого ізотопу. На жаль, у 2008 році лабораторію закрили через затоплення шахти підземними водами. Але не втрачатимемо надію, що здоровий глузд перемаже і в Солотвино не лише відродиться видобуток солі, який там вели ще давні римляни (!), а й відновить роботу унікальна підземна нейтринна лабораторія.

Теоретичними розробленнями в галузі фізики нейтрино в Україні займаються науковці Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, Інституту прикладних проблем механіки і математики імені Я. С. Підстригача НАН України та Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Експериментальні дослідження нейтрино ведуться в Інституті ядерних досліджень НАН України та Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

Українські науковці беруть активну участь у кількох міжнародних колабораціях, метою котрих є дослідження нейтрино: експеримент *Borexino* (у якому вимірюються потоки нейтрино не лише від Сонця, а й з надр Землі), *SOX* (пошук осциляцій нейтрино на дуже малих відстанях), *SuperNEMO*, *AMoRE*, *LUCINEU* і *CUPID* (пошуки безнейтринного подвійного бета-розпаду атомних ядер – процесу, здатного визначити природу та масу нейтрино). До цих досліджень методологічно примикають інші експерименти в галузі неприскорювальної фізики частинок: пошуки частинок темної матерії (європейський проєкт *EURECA*) та інших гіпотетичних частинок і ефектів за межами стандартної моделі: аксіонів, незбереження електричного і баріонного заряду, порушення принципу Паулі (колаборації *DAMA* та *Borexino*), вимірювання надзвичайно рідкісних альфа- та бета-розпадів атомних ядер. Ці експерименти проводять у найбільшій у світі підземній лабораторії Гран-Сассо (Італія) та підземних лабораторіях Модан (Франція), Янг-Янг (Корея), *HADES* Інституту стандартних матеріалів та вимірювань Об'єднаного дослідницького центру Європейської комісії (Бельгія), колаборацією *CMS* на Великому адронному колайдері в Європейському центрі ядерних досліджень (ЦЕРН). Учені Київського національного університету ім. Тараса Шевченка розпочали співпрацю в рамках запланованого в ЦЕРНі проєкту експерименту *SHIP*, спрямованого на пошуки важких стерильних нейтрино. Фізики

з Харківського національного університету ім. Каразіна співробітничують із Баксанською нейтринною лабораторією (Росія). Теоретичні роботи, пов'язані з роллю нейтрино в космології, ведуться в Голівній астрономічній обсерваторії НАН України. Цей, певно, неповний перелік робіт українських учених у нейтринній фізиці за останні роки демонструє величезний потенціал нашої науки (передовсім людський), яка все ще може працювати на міжнародному рівні в найактуальніших напрямках досліджень.

Установи НАН України мають видатні надбання, висококваліфікований кадровий потенціал і ще не зовсім втрачену матеріально-технічну базу для нейтринних досліджень. Попри всі труднощі, українські вчені не лише отримали вагомий результати світового рівня в цьому напрямі, а й розробили нові експериментальні методику і матеріали, які вже застосовуються в підготовці великих міжнародних експериментів наступного покоління. Це унікальні методи наднизькофонові ядерної спектроскопії, глибокого очищення матеріалів, вирощування сцинтиляційних кристалів. Ці роботи потребують посиленої координації, аби не лише закріпити позиції України в цьому напрямі, а й вивести дослідження на новий рівень. Розроблення експериментального обладнання для нейтринних експериментів потребує співпраці фізиків, хіміків, спеціалістів з глибокого очищення речовин. На часі – формування в Україні нової галузі – матеріалознавства радіоактивно чистих матеріалів.

Як відомо, усі фундаментальні відкриття колись знаходять своє практичне використання. Наприклад, Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ) ініціювало розроблення детекторів антинейтрино для контролю роботи ядерних реакторів. Нещодавно виміряний за допомогою детектора *Borexino* (за участю українських учених) потік нейтрино від протон-протонної реакції в надрах Сонця підтверджує стабільність енерговиділення Сонця в останні сто тисяч років. Окрім того, детектор *Borexino* надає унікальну інформацію про будову Землі, вимірюючи потік нейтрино з її надр (геонейтрино), а отже, дає можливість уточнювати геологічні дані, значення яких для розвідки корисних копалин важко переоцінити.

Якщо трохи пофантазувати, то можна очікувати, що високорозвинені позаземні цивілізації посилять у космос не електромагнітні (які людство безрезультатно шукає вже майже шістьдесят років), а саме нейтринні сигнали: мовляв, нас не цікавлять цивілізації, котрі не навчилися реєструвати нейтринні сигнали!