



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



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



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

УДК 539.165.8

У НЕЙТРИНО Є МАСА

Нобелівська премія з фізики 2015 р.

Нобелівську премію в галузі фізики в 2015 році присуджено Артуру Макдональду (Канада) і Такаакі Кадзіті (Японія) «за відкриття осциляцій нейтрино, які свідчать про те, що у нейтрино є маса». Це — перший ефект за рамками Стандартної моделі елементарних частинок, значення якого для подальшого розвитку науки важко переоцінити. У статті коротко викладено історію досліджень нейтрино і слабкої взаємодії, зокрема тих, які у 2015 р. були відзначені Нобелівською премією. Обговорюється внесок українських учених у нейтринні дослідження, перспективи їх участі у великих міжнародних нейтринних проєктах.

Ключові слова: нейтрино, слабка взаємодія, маса нейтрино, нейтринна астрофізика, низькофоновий експеримент.

«Я зробив сьогодні жакливу річ. Фізику-теоретика ніколи не слід такого робити. Я запропонував щось таке, чого ніколи не можна буде перевірити експериментально», — сказав австрійський фізик Вольфганг Паулі німецькому астрофізику Вальтеру Бааде на конференції з фізики в Римі наприкінці 1931 р. Паулі запропонував нову частинку, яка мала випромінюватися у бета-розпаді атомних ядер разом з електроном і яка «рятувала» одразу два фундаментальні закони фізики: збереження енергії і моменту імпульсу. Ця частинка, яка не мала електричного заряду (а тому, на думку Паулі, не могла бути спостереженою), повинна бути дуже легкою. Вона несла частину енергії розпаду і мала спін (власний момент імпульсу), які, здавалося, просто зезали у β -розпаді. Сумніви Паулі можна зрозуміти, адже вчені так не люблять порушувати принцип, відомий як «бритва Оккама»: не припускати нічого, що не є вкрай необхідним! Та ще й такого, що неможливо перевірити в експерименті! Проте в цьому разі геніальний теоретик, відомий своєю дивакуватою поведінкою та іронічним ставленням до експериментаторів, таки недооцінив своїх колег. Але про це — трошки пізніше.

Між тим, уже через рік блискучий Енріко Фермі, використовуючи ідею Паулі, розробив теорію β -розпаду і дав таке гарне ім'я новій частинці — «нейтрино», що італійською означає «нейтрончик». Для цього йому довелося припустити існування нової взаємодії, яку він цілком логічно назвав «слабкою». Дій-

сно, оцінки показували, що нова взаємодія в мільярди разів слабкіша за електромагнітну взаємодію і у десятки тисяч мільярдів — за сильну. Слабка взаємодія проявляється в β -розпадах атомних ядер та в деяких взаємодіях частинок. Отже, з'явилася надія, що нейтрино, незважаючи на надзвичайно малу інтенсивність взаємодії з матерією, все-таки можна зареєструвати в експерименті. Для цього знадобився ядерний реактор (який є потужним джерелом нейтрино через величезну β -радіоактивність ядер, що утворюються в результаті поділу урану) і надзвичайно чутливий детектор, розміщений за кілька метрів біля активної зони реактора і ретельно захищений від його потужного γ - і нейтронного випромінювання. Експерименти, в яких було підтверджено існування нейтрино, у 1950-х роках виконали американські вчені Фредерік Райнес (Frederick Reines) і Клайд Коуен (Clyde Cowan). У 1995 р. Ф. Райнеса за це відкриття було удостоєно Нобелівської премії.

Вагомий внесок у дослідження нейтрино і слабкої взаємодії зробили американські фізики китайського походження Чжаньнін Ян (Chen-Ning Yang) та Цзундао Лі (Tsung-Dao Lee), які у 1956 р. звернули увагу на те, що в слабких взаємодіях може порушуватися просторова парність [1]. А вже рік потому це припущення було блискуче підтверджено в знаменитому експерименті, здійсненому групою під керівництвом Цзяньсюн Ву (Chien-Shiung Wu), також китаянки, яка на той час уже працювала у США. Ву та її співробітники показали, що в β -розпаді ядра ^{60}Co електрони випромінюються переважно в напрямку, протилежному спіну ядер кобальту [2]. Як виявилось згодом, частинки, що беруть участь у слабкій взаємодії, завжди є «лівими», тобто такими, в яких спін завжди спрямований проти напрямку руху. Одночасно з дослідями Ву інша група вчених за допомогою циклотрона дослідила розпади мюонів і також знайшла явний ефект порушення парності [3]. Ці властивості слабкої взаємодії виділяли її серед інших відомих на той час взаємодій: електромагнітної, сильної і гравітаційної, адже в цих взаємодіях парність не порушується. Інакше кажучи, дослідник не

зміг би зрозуміти, що він перебуває в іншому, уявному «дзеркальному» світі, допоки він не почав би експерименти, в яких проявляється слабка взаємодія. Більше того, в експериментах на прискорювачах з К-мезонами було виявлено слабке порушення парності в комбінації із зарядовим спряженням (порушення СР-інваріантності). Отже, ми можемо бачити, що вже в середині ХХ ст. дослідження нейтрино і слабкої взаємодії приводили до спостереження нових явищ і властивостей матерії.

Упродовж тривалого часу відкритим було питання про масу нейтрино. Взагалі, маса частинок залишається загадкою для фізики елементарних частинок. У рамках так званої Стандартної моделі маси частинок є вільними параметрами, які необхідно вимірювати, їх неможливо отримати в розрахунках, спираючись на наші знання про матерію, простір і час. Так само і константи всіх відомих взаємодій (електромагнітної, сильної, слабкої і гравітаційної) залишаються вільними параметрами Стандартної моделі, що є одним із важливих аргументів вважати цю модель наближеною, такою, що потребує побудови більш досконалої теорії. Така теорія, до того ж, мала б об'єднати всі відомі взаємодії (в тому числі гравітацію), пояснити існування трьох поколінь лептонів і кварків, баріонну асиметрію Всесвіту, природу темної матерії і темної енергії та цілу низку інших проблем фізики елементарних частинок і космології. Саме тому кажуть, що серед елементарних частинок нейтрино є ключовою частинкою. Проте чому саме нейтрино, а не електрон чи, наприклад, t -кварк або джей-псі-мезон? Нейтринна фізика цікава і важлива тому, що саме експерименти з нейтрино виявляють щось принципово нове, а не просто вимірюють певні параметри з усе більшою точністю або дають дедалі більш жорсткі обмеження на ефекти за межами існуючих моделей [4].

Однак повернемося до маси нейтрино. Спроби виміряти її розпочалися вже у 1950-х роках, зокрема в дослідженнях β -спектра тритію поблизу максимальної енергії електронів. Адже, якщо нейтрино має масу, максимальна енергія електронів буде меншою саме на вели-

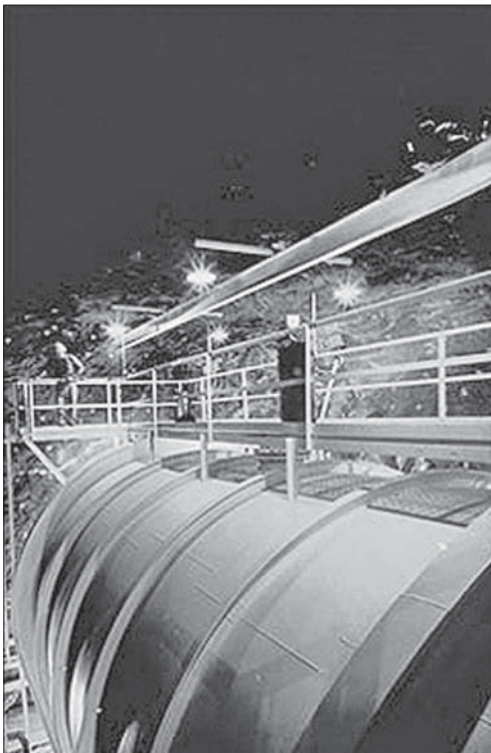


Рис. 1. Установка Девіса для реєстрації сонячних нейтрино у шахті Хоумстейк (Південна Дакота, США). Джерело: Tufts University (<http://www.tufts.edu/>)

чину маси нейтрино. У середині 1980-х років наукову спільноту сколихнули повідомлення В.О. Любімова та його колег з московського Інституту теоретичної і експериментальної фізики про спостереження дуже малої, але не нульової маси нейтрино в інтервалі $14 < m_\nu < 46$ eV [5]. Цю новину бурхливо обговорювали на всіх нейтринних конференціях, а кілька дослідницьких груп одразу взялися повторити експеримент радянських учених. Однак поступово з'ясувалося, що повідомлення було помилковим. Проаналізували також і причини помилок, зокрема того факту, що майже всі експерименти давали *негативне* значення квадрата маси нейтрино, що виглядало явно нефізичним результатом [6–10]. Постійні вдосконалення установок, подібних за принципом роботи до тих, що використовувала група Любімова, дозволили на сьогодні встановити верхню межу на масу нейтрино — близько 2 eV

[11, 12]. Зараз у Технологічному університеті Карлсруе в Німеччині вже споруджена і готується до пуску колосальна за своїми розмірами і технічними характеристиками установка KATRIN, яка має перевірити наявність маси у нейтрино із ще на порядок величини більшою чутливістю (читач може ознайомитися із сучасним станом і перспективами експериментальних досліджень маси нейтрино в β -розпаді в прекрасному огляді [13]).

Хоча те давнє повідомлення про спостереження маси нейтрино і виявилось помилковим, воно, як це часто буває у науці, активізувало дослідження властивостей нейтрино від реакторів, прискорювачів, з верхніх шарів атмосфери, від Сонця і навіть від вибухів далеких наднових зірок.

Спроби зареєструвати сонячні нейтрино розпочалися ще на початку 1960-х років, коли американський хімік і фізик Раймонд Девіс (Raymond Davis) та його співробітники побудували на глибині майже 1,5 км у шахті Хоумстейк (штат Південна Дакота) величезну як на той час установку, що містила понад 600 т перхлоретилену (рис. 1). Ідея, запропонована свого часу Бруно Понтекорво, полягала в реєстрації розпадів ядер аргону-37, продукту взаємодії нейтрино з ядрами хлору-37. Завдяки значним відмінностям у фізико-хімічних властивостях хлору і аргону навіть дуже малу кількість Ar порівняно легко зібрати, виділивши з великої кількості хлору. Розташування чутливого детектора глибоко під землею було необхідне для зменшення ймовірності фонового утворення ядер ^{37}Ar під дією космічних променів. Періодично вчені екстрагували з перхлоретилену утворений під дією нейтрино радіоактивний аргон і вимірювали його активність за допомогою маленького, об'ємом усього кілька кубічних сантиметрів, надзвичайно чутливого газового лічильника, виготовленого із кварцу та інших чистих з точки зору радіоактивності матеріалів. Це було потрібно для вимірювання надзвичайно малої активності ^{37}Ar — близько одного розпаду за добу. Результат виявився дивним — виміряна активність аргону-37 була приблизно втричі меншою за очікувану.

Учені ретельно перевіряли експериментальне обладнання і теоретичні розрахунки потоку нейтрино від Сонця, основані на астрономічних даних про його масу, розміри і температуру поверхні, а також ядерно-фізичні дані про реакції термоядерного синтезу легких елементів. Р. Девісу і його співробітникам знадобилося 25 років, щоб довести і собі, і науковому співтовариству, що потік електронних нейтрино від Сонця насправді втричі менший за теоретично очікуваний. Цю розбіжність стали називати проблемою дефіциту сонячних нейтрино.

Дослідники будували все складніші й більші детектори, щоб якомога точніше виміряти потоки та спектри нейтрино від реакторів і з верхніх шарів атмосфери. У 1980-х роках у Японії у шахті Каміюка на глибині близько 1 км було споруджено величезний детектор КаміюкаNDE. Принцип його дії був оснований на ефекті Черенкова — випромінюванні світла у середовищі, коли заряджена частинка проходить через нього зі швидкістю, більшою за швидкість світла у цьому середовищі (це аж ніяк не порушує засади теорії відносності, оскільки абсолютна заборона стосується лише перевищення вакуумної швидкості світла, а світлова хвиля, наприклад, у воді розповсюджується на чверть повільніше, ніж у вакуумі). Детектор являв собою циліндричний резервуар розмірами приблизно 16×16 м, який містив 3 тис. т надчистої води; на його внутрішній поверхні було встановлено близько тисячі фотоелектронних помножувачів. Хоча детектор КаміюкаNDE будували з метою пошуку не менш важливого фізичного явища — розпаду протону (до речі, усе ще не спостережено!), він виявився чутливим також і до так званих атмосферних нейтрино, які виникають у верхніх шарах атмосфери під дією космічних променів.

Результати вимірювань на детекторі КаміюкаNDE свідчили про те, що отримане співвідношення між потоками різних типів нейтрино (електронних і мюонних) також відрізняється від передбаченого теоретично. Виміряне співвідношення, подібно до результатів Девіса із сонячними нейтрино, вказувало на дефіцит нейтрино — на цей раз мюонних. А ще, 23 люто-

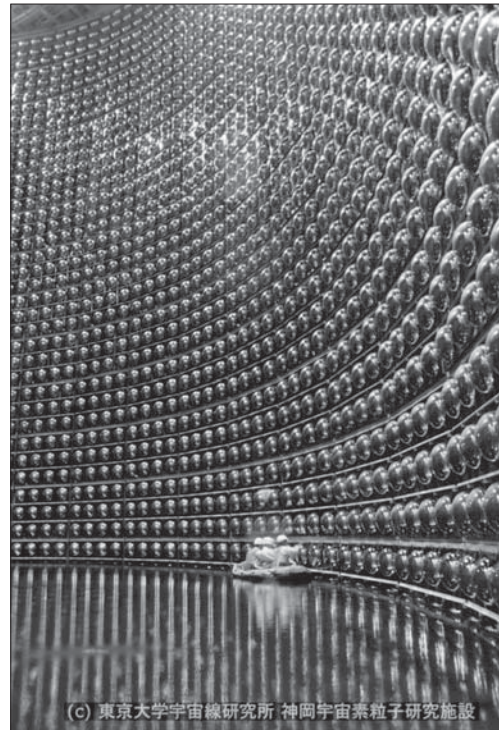
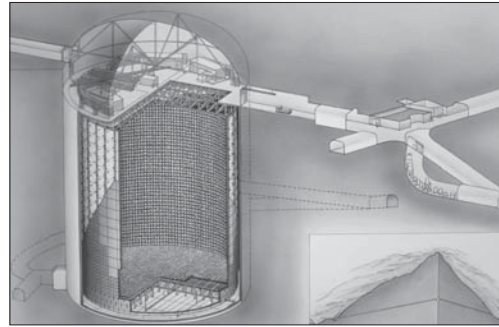


Рис. 2. Схема детектора Super-Kamiokande. На фото внизу показано, як фізики на човні здійснюють перевірку фотоелектронних помножувачів усередині детектора (публікується з дозволу Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo)

го 1987 р. детектор КаміюкаNDE зареєстрував нейтрино від вибуху наднової зірки SN1987A у Великій Магеллановій Хмарі, карликовій галактиці, розташованій на відстані близько 50 кілопарсек від нашої Галактики. Отримані Раймондом Девісом і керівником проекту КаміюкаNDE Масатосі Косібою (Masatoshi

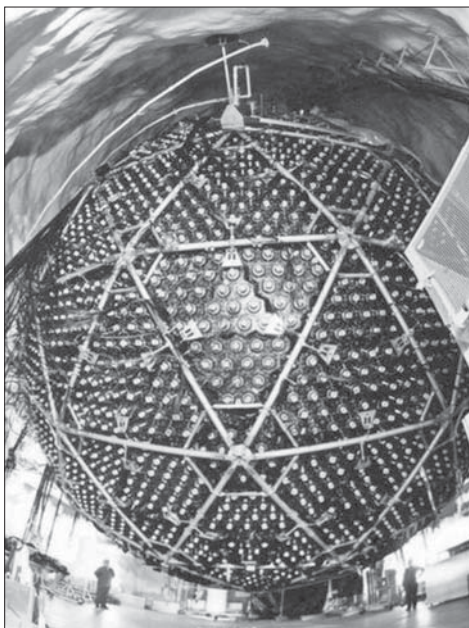
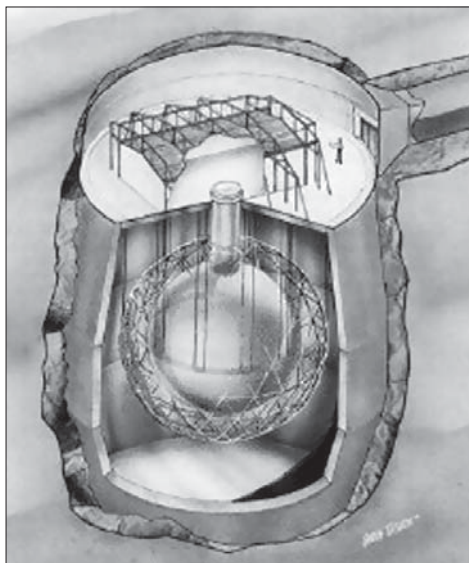


Рис. 3. Схематичний вигляд детектора SNO і зовнішній вигляд конструкції, на якій встановлено фотопомножувачі (публікується з дозволу Нейтринної обсерваторії в Садбері)

Koshiba) результати були достойно оцінені науковою спільнотою. У 2002 р. їм було присуджено Нобелівську премію з фізики «за новаторський внесок в астрофізику, зокрема, за виявлення космічних нейтрино».

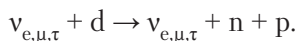
Дефіцит нейтрино спостерігався і в японському експерименті KamLAND, в якому вимірювали потік і спектр нейтрино від японських і південнокорейських ядерних реакторів, віддалених на кілька десятків кілометрів. Усі ці результати вказували на передбачене ще у 1957 р. Бруно Понтекорво та Володимиром Грибовим явище осциляцій нейтрино (історію ранніх теоретичних та експериментальних робіт з осциляції нейтрино викладено в огляді [14]). Це явище полягає у перетворенні одного виду нейтрино (а всього їх відомо три: електронне, мюонне і тау-лептонне) на інші під час його руху. Варто зазначити, що осциляції нейтрино можливі лише у випадку, якщо маса нейтрино не дорівнює нулю — нехай це відбувається у вакуумі чи під час руху нейтрино через Сонце завдяки ефекту, свого часу теоретично передбаченому радянськими фізиками Станіславом Міхеєвим і Олексієм Смирновим [15] та незалежно від них американським ученим Лінкольном Вольфенштейном [16, 17].

З урахуванням досвіду роботи детектора KamiokaNDE наприкінці 1990-х років було побудовано нову, майже в 20 разів більшу установку Super-Kamiokande. Це резервуар із нержавіючої сталі діаметром 39 м і висотою 41 м, заповнений надчистою водою загальною масою 50 тис. т (рис. 2). За всім об'ємом води спостерігають 11 тис. фотоелектронних помножувачів, встановлених на стінках детектора. Важливо, що спалахи черенковського світла несуть інформацію про енергію і напрям руху заряджених частинок в об'ємі детектора. У такий спосіб можна чітко відрізнити мюонні нейтрино, що прилетіли зверху, пройшовши шлях близько 20 км, від тих, що потрапили знизу, подолавши відстань приблизно 13 тис. км. Крім того, детектор здатний розрізнити події, зумовлені електронами, і мюонні події. Виявилося, що потік атмосферних мюонних нейтрино зверху приблизно вдвічі перевищує потік таких нейтрино знизу [18]. Детальний розгляд залежності потоку нейтрино від їх типу, енергії та напрямку однозначно свідчить про осциляції нейтрино впродовж руху через Землю, а отже, про наявність у цих частинок маси. Саме

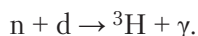
за цей результат керівнику проекту Super-Kamiokande японському вченому Такаакі Кадзіті (Takaaki Kajita) було присуджено Нобелівську премію з фізики у 2015 р.

Підтвердження осциляцій нейтрино від Сонця і наявності у них маси було отримано в Нейтринній обсерваторії в Садбері (Sudbury Neutrino Observatory, SNO), розташованій у нікелевій шахті Крейтон Вале Інко (Канада) на глибині понад 2 км. Детектор SNO (рис. 3) являє собою сферу діаметром 18 м, заповнену 1 тис. т надчистої важкої води. Реєструють черенковське світло від заряджених частинок, які виникають у результаті взаємодії нейтрино з ядрами атомів важкої води, 9 тис. фотопомножувачів. Ще майже 8 тис. т надчистої звичайної води оточують прозорий акриловий контейнер з важкою водою для захисту від радіоактивного випромінювання скельних порід. Уся лабораторія обладнана як чисте приміщення класу 2000 для запобігання потраплянню пилу в робочий об'єм детектора, що потрібно для зменшення радіоактивного фону детектора від розпадів урану і торію та їх дочірніх ядер, присутніх у навколишньому середовищі (у тому числі, у пилу).

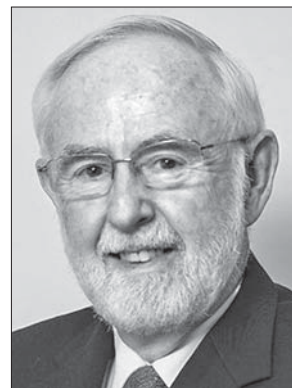
Слід підкреслити, що саме використання важкої води стало принциповою перевагою цього детектора, яка дала можливість надійно спостерігати осциляції сонячних нейтрино. Справа в тому, що у важкій воді міститься дейтерій — ізотоп водню, у ядрі якого крім протона є нейтрон. З ядрами дейтерію можуть взаємодіяти нейтрино різних типів: і електронне (ν_e), і мюонне (ν_μ), і тау-лептонне (ν_τ). Взаємодія, яка відбувається завдяки так званім нейтральним струмам (НС), приводить до розщеплення ядра дейтерію (d) на протон (p) і нейтрон (n):



Утворений нейтрон потім поглинається іншим ядром дейтерію з утворенням ядра тритію (^3H) і випромінюванням гамма-кванта:



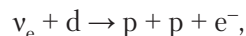
Останній вибиває з речовини детектора високоенергетичний електрон, який можна за-



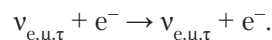
Нобелівські лауреати з фізики 2015 р. Такаакі Кадзіті (Takaaki Kajita) і Артур Макдональд (Arthur B. McDonald)

реєструвати за допомогою детектора через черенковське випромінювання.

Крім того, детектор реєстрував поглинання нейтрино нейтроном у ядрах дейтерію (реакція за рахунок заряджених струмів (ЗС), в яку вступають тільки електронні нейтрино):



і пружне розсіяння (ПР) нейтрино на електронах (в реакції задіяні всі типи нейтрино, але електронні вступають у неї з більшою ймовірністю):



У ПР- і ЗС-реакціях детектор реєстрував високоенергетичні електрони, утворені в результаті взаємодії нейтрино. Аналіз даних (усього з півмільярда зареєстрованих детектором за рік вимірювань було відібрано 2928 подій) чітко підтвердив, що нейтрино на шляху від Сонця до Землі осцилюють з перетворенням у мюонні і тау-нейтрино [19], а це також вказувало на наявність ненульової маси нейтрино. Отже, проблему дефіциту сонячних нейтрино було вирішено [20]. За цей результат Артур Макдональд (Arthur B. McDonald), керівник проекту SNO, отримав Нобелівську премію з фізики у 2015 р. разом із Такаакі Кадзітою.

Отже, в експериментах із сонячними, атмосферними, реакторними нейтрино і нейтрино від прискорювачів отримано переконливі докази нейтринних осциляцій між різними ви-

дами (ароматами) нейтрино, спричинених змішуванням масових станів нейтрино, а також того, що відомі нам види нейтрино (електронне, мюонне і тау-лептонне) є суперпозиціями масових станів нейтрино:

$$\nu_{iL} = \sum_{j=1}^n U_{ij} \nu_{jL},$$

де ν_{iL} – спостережувані види нейтрино, ν_{jL} – масові стани нейтрино, U_{ij} – так звана матриця Понтекорво – Макі – Накагави – Сакати (PMNS-матриця). Це означає, що нейтрино народжуються і взаємодіють з іншими частинками свого аромату (тобто як, наприклад, електронне або мюонне нейтрино), а розповсюджуються між точками взаємодії як масивні нейтрино – частинки з дуже малою, поки що невідомою масою. Нейтрино певного аромату при цьому не мають чітко визначеної маси і, навпаки, нейтрино з визначеною масою є, в певному сенсі, сумішшю трьох ароматів. Електронне нейтрино народжується як суміш трьох масових станів, але вони розповсюджуються з дещо різною хвильовою швидкістю – більш важкі компоненти відстають від легких. Тому пропорція компонент у суміші поступово порушується, а це відповідає появі інших ароматів, тобто в пучку електронних нейтрино з'являються мюонні і тау-нейтрино, які в принципі можна зареєструвати (або виявити зменшення потоку електронних нейтрино). У макроскопічному світі важко підібрати аналог цій дивній поведінці, вона є суто квантово-механічним явищем.

Незважаючи на ці успіхи в дослідженнях нейтрино, відкритими залишається багато питань про властивості нейтрино і слабкої взаємодії. Одним із найбільш фундаментальних є, власне, питання про величину маси нейтрино, адже осциляційні експерименти чутливі лише до різниці квадратів масових станів нейтрино Δm_{ij}^2 . Невідомою є і схема масових станів нейтрино, а також його природа: чи є нейтрино частинкою Дірака (коли частинка і античастинка відрізняються), чи Майорани (коли частинка і античастинка є тотожними). Немає поки що відповідей на питання про стабільність нейтри-

но, його магнітний момент, існування стерильних нейтрино, збереження лептонного заряду, домішки правих струмів у слабкій взаємодії, можливість нового виду взаємодій нейтрино з іншими частинками. До цього варто додати необхідність точного вимірювання кутів змішування, різниць квадратів масових станів нейтрино та елементів PMNS-матриці (ми радимо читачам роботи [4, 21, 22], де сформульовані завдання і проблеми нейтринної фізики). Слід також пам'ятати, що нейтрино є єдиною відомою компонентою темної матерії, а також про можливість пояснити баріонну асиметрію Всесвіту (у випадку, якщо нейтрино є частинкою Майорани).

Важливо зазначити, що з моменту створення Стандартної моделі елементарних частинок нейтринні осциляції є першим спостереженим ефектом за межами цієї моделі, яка досі успішно описувала всі явища субатомної фізики. При цьому нейтринні осциляції знайдено не за допомогою надзвичайно дорогих прискорювачів, а саме у підземних експериментах.

Молода галузь фізики, яку в англійській літературі називають *Astroparticle Physics*, почала бурхливо розвиватися в останні тридцять років. Нейтрино надзвичайно слабо взаємодіють з матерією, тому для захисту чутливого обладнання від впливу космічних променів дослідження необхідно проводити в підземних лабораторіях. Зараз у світі функціонують багато підземних лабораторій. Крім уже згаданих Нейтринної обсерваторії в Канаді і лабораторії Каміока в Японії, такі лабораторії є в Італії, Франції, Іспанії, Росії, Кореї, Великій Британії, Сполучених Штатах, Фінляндії, Бельгії; споруджуються в Індії, Чилі (спільно з Аргентиною), Південно-Африканській Республіці, Австралії. Унікальний нейтринний детектор масою близько мільярда тонн (робочою речовиною детектора є лід) функціонує на станції Амундсен–Скотт на Південному полюсі в Антарктиді, подібні (водяні) детектори споруджуються на Байкалі та у Середземному морі.

Як відомо, усі фундаментальні відкриття рано чи пізно знаходять своє практичне вико-

ристання. Наприклад, Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ) ініціювало розроблення детекторів антинейтрино для контролю роботи ядерних реакторів. Вимірний нещодавно за допомогою детектора Bogexino (у цьому експерименті беруть участь учені з Інституту ядерних досліджень НАН України) потік нейтрино від протон-протонної реакції в надрах Сонця підтверджує стабільність енерговиділення Сонця за останні 100 тис. років [23]. Крім того, детектор Bogexino надає унікальну інформацію про будову Землі, вимірюючи потік нейтрино з її надр (геонейтрино), а отже, дає можливість уточнювати геологічні дані, значення яких для геологорозвідки корисних копалин важко переоцінити.

Можливо, ми сьогодні навіть не в змозі уявити майбутнє практичне застосування того моря нейтрино, в якому ми живемо (за секунду через кожний квадратний сантиметр на Землі проходить близько 10^{11} сонячних нейтрино). Однак уже зараз є ідеї щодо використання нейтрино для космічного і земного зв'язку (наприклад, з підводними човнами) і перші такі експериментальні спроби вже здійснюються [24].

В Україні теоретичними розробками в галузі фізики нейтрино займаються науковці Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України та Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Експериментальні дослідження нейтрино виконують в Інституті ядерних досліджень НАН України, співробітники якого беруть активну участь у кількох міжнародних колабораціях, метою яких є дослідження нейтрино: в експерименті Bogexino (в якому вимірюють 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 β -розпаду атомних ядер – процесу, здатного визначити природу і масу нейтрино [25]). До цих досліджень методологічно примикають інші експерименти в галузі неперискорюваної фізики частинок: пошуки частинок тем-

ної матерії (європейський проект EURECA) та інших гіпотетичних частинок і ефектів за межами Стандартної моделі: аксіонів, незбереження електричного і баріонного заряду, порушення принципу Паулі (колаборації DAMA та Bogexino), вимірювання надзвичайно рідкісних α - і β -розпадів атомних ядер. Ці експерименти здійснюють у найбільшій у світі підземній лабораторії Гран-Сассо (Італія), у підземних лабораторіях Модан (Франція), Янг-Янг (Корея), лабораторії HADES Інституту стандартних матеріалів та вимірювань Об'єднаного дослідницького центру Європейської комісії (Бельгія). Учені з Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України досліджують нейтрино в рамках колаборації CMS на Великому адронному колайдері в Європейському центрі ядерних досліджень (ЦЕРН). Учені КНУ імені Тараса Шевченка розпочали співробітництво в рамках запланованого у ЦЕРНі проекту експерименту SHiP, спрямованого на пошуки важких стерильних нейтрино. Фізики з Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна співпрацюють з Баксанською нейтринною обсерваторією (Росія). Теоретичні роботи, пов'язані з нейтрино у космології, проводять у Головній астрономічній обсерваторії НАН України.

Цей (скоріш за все, неповний) перелік робіт українських учених у галузі нейтринної фізики за останні роки демонструє величезний потенціал нашої науки (насамперед – людський) і переконливо свідчить про те, що ми можемо ефективно працювати на міжнародному рівні, на передньому краї розвитку науки. На сьогодні установи НАН України все ще мають видатні здобутки, кваліфікований кадровий потенціал і певну матеріально-технічну базу для нейтринних досліджень. У цьому найактуальнішому напрямі українські вчені не лише отримують важливі результати світового рівня, а й розробляють нові експериментальні методики і матеріали, які вже застосовуються у підготовці великих міжнародних експериментів наступного покоління. Це, наприклад, унікальні методи наднизькофонової ядерної

спектрометрії, глибокого очищення матеріалів, росту сцинтиляційних кристалів.

Усі ці роботи координуються Національною академією наук України з метою не лише закріпити наші позиції в цій галузі, а й вивести ці дослідження на новий щабель. Розроблення експериментального обладнання для нейтринних експериментів потребує тісної співпраці фізиків, хіміків, спеціалістів з глибокого очищення речовин, формуючи тим самим нову

галузь в Україні — матеріалознавство радіоактивно чистих матеріалів.

Україна здатна і надалі робити гідний внесок у дослідження нейтрино, передусім завдяки самовідданості кваліфікованих фахівців, які, незважаючи на всі труднощі, продовжують отримувати достойні наукові результати, навчають молодь, розширюють міжнародне співробітництво, беруть участь у нинішніх і майбутніх нейтринних експериментах.

REFERENCES

1. Lee T.D., Yang C.N. Question of parity conservation in weak interactions. *Phys. Rev.* 1956. **104**(1): 254.
2. Wu C.S., Ambler E., Hayward R.W., Hoppes D.D., Hudson R.P. Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay. *Phys. Rev.* 1957. **105**(4): 1413.
3. Garwin R.L., Lederman L.M., Weinrich M. Observations of the Failure of Conservation of Parity and Charge Conjugation in Meson Decays: The Magnetic Moment of the Free Muon. *Phys. Rev.* 1957. **105**(4): 1415.
4. Strumia A., Vissani F. Neutrino masses and mixings and... arXiv:hep-ph/0606054v3, 2010.
5. Lubimov V.A., Novikov E.G., Nozik V.Z., Tretyakov E.F., Kosik V.S. An estimate of the ν_e mass from the β -spectrum of tritium in the valine molecule. *Phys. Lett. B.* 1980. **94**(2): 266.
6. Robertson R.G.H., Bowles T.J., Stephenson G.J., Wark D.L., Wilkerson J.F., Knapp D.A. Limit on anti-electron-neutrino mass from observation of the beta decay of molecular tritium. *Phys. Rev. Lett.* 1991. **67**(8): 957.
7. Kawakami H. et al. New upper bound on the electron anti-neutrino mass. *Phys. Lett. B.* 1991. **256**(1): 105.
8. Holzschuh E., Fritschi M., Kündig W. Measurement of the electron neutrino mass from tritium β -decay. *Phys. Lett. B.* 1992. **287**(4): 381.
9. Chengrui C., Tsohsiu H., Dongqi L., Yajun M., Shiping C., Hanchenget S. A possible explanation of the negative values of $m^2\nu_e$ obtained from the β spectrum shape analyses. *Int. J. Mod. Phys. A.* 1995. **10**(19): 2841.
10. Stoeffl W., Decman D.J. Anomalous structure in the β decay of gaseous molecular tritium. *Phys. Rev. Lett.* 1995. **75**(18): 3237.
11. Aseev V.N. et al. Upper limit on the electron antineutrino mass from the Troitsk experiment. *Phys. Rev. D.* 2011. **84**(11): 112003.
12. Kraus Ch. et al. Final results from phase II of the Mainz neutrino mass search in tritium β decay. *Eur. Phys. J. C.* 2005. **40**(4): 447.
13. Drexlin G., Hannen V., Mertens S., Weinheimer C. Current Direct Neutrino Mass Experiments. *Adv. High Energy Phys.* 2013. **2013**: 293986.
14. Bilenky S.M. The history of neutrino oscillations. *Phys. Scripta.* 2005. **T121**: 17.
15. Mikheev S.P., Smirnov A.Yu. Resonance enhancement of oscillations in matter and solar neutrino spectroscopy. *Soviet Journal of Nuclear Physics.* 1985. **42**: 913.
[Михеев С.П., Смирнов А.Ю. Резонансное усиление осцилляций в веществе и спектроскопия солнечных нейтрино. *Ядерная физика.* 1985. Т. 42, № 6. С. 913].
16. Wolfenstein L. Neutrino oscillations in matter. *Phys. Rev. D.* 1978. **17**(9): 2369.
17. Wolfenstein L. Neutrino oscillations and stellar collapse. *Phys. Rev. D.* 1979. **20**(10): 2634.
18. Fukuda Y. et al. Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos. *Phys. Rev. Lett.* 1998. **81**(8): 1562.
19. Ahmad Q. et al. Measurement of the Rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ Interactions Produced by ^8B Solar Neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory. *Phys. Rev. Lett.* 2001. **87**(7): 071301.
20. McDonald A.B., Klein J.R., Wark D.L. Solving the Solar neutrino problem. *Scientific American.* 2006. **15**: 22.
21. Mohapatra R.N. et al. Theory of neutrinos: a white paper. *Rep. Prog. Phys.* 2007. **70**(11): 1757.
22. Smirnov A. The landscape of neutrino physics. Talk at TAUP 2015. (Sept. 7–12, 2015, Turin, Italy).
23. Bellini G. et al. Neutrinos from the primary proton-proton fusion process in the Sun. *Nature.* 2014. **512**: 383.
24. Stancil D.D. et al. Demonstration of communication using neutrinos. *Mod. Phys. Lett. A.* 2012. **27**(12): 1250077.

25. Danevich F.A. Investigation of neutrino and weak interactions in double beta decay of atomic nuclei. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2015. (9): 39.

[Даневич Ф.А. Дослідження властивостей нейтрино і слабкої взаємодії у подвійному бета-розпаді атомних ядер. *Вісн. НАН України*. 2015. № 9. С. 39–47].

Стаття надійшла 16.11.2015.

Ф.А. Даневич, В.В. Кобычев, В.И. Третьак

Институт ядерных исследований НАН Украины (Киев)

У НЕЙТРИНО ЕСТЬ МАССА

Нобелевская премия по физике 2015 года

Нобелевская премия по физике в 2015 году присуждена Артуру Макдональду (Канада) и Такааки Кадзите (Япония) «за открытие осцилляций нейтрино, которые свидетельствуют о том, что у нейтрино есть масса». Это — первый эффект за рамками Стандартной модели элементарных частиц, значение которого для дальнейшего развития науки трудно переоценить. В статье кратко изложена история исследований нейтрино и слабого взаимодействия, в частности тех, которые в 2015 году были отмечены Нобелевской премией. Обсуждается вклад украинских ученых в нейтринные исследования, перспективы их участия в крупных международных нейтринных проектах.

Ключевые слова: нейтрино, слабое взаимодействие, масса нейтрино, нейтринная астрофизика, низкофоновый эксперимент.

F.A. Danevich, V.V. Kobychhev, V.I. Tretiyak

Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

NEUTRINOS ARE MASSIVE

Nobel Prize in Physics 2015

The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Arthur B. McDonald (Canada) and Takaaki Kajita (Japan) “for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass.” Observation of the neutrino oscillations is the first effect beyond the Standard Model of elementary particles, whose role for the further development of science is exceptionally important. The main steps of the neutrino and the weak interaction investigations, in particular of those awarded by the Nobel Prize in 2015, are presented. The contribution of the Ukrainian scientists to neutrino researches, prospects for their participation in the current and future international neutrino projects are briefly discussed.

Keywords: neutrinos, weak interaction, neutrino mass, neutrino astrophysics, low-background experiments.