



ДАНЕВИЧ

Федір Анатолійович —

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

ПРО РОЗВИТОК В УКРАЇНІ НЕПРИСКОРЮВАЛЬНОЇ ФІЗИКИ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

За матеріалами доповіді на засіданні
Президії НАН України 12 січня 2022 року

Неприскорювальна фізика елементарних частинок — це нова галузь фізики, яка досліджує властивості елементарних частинок без застосування прискорювачів. У рамках цього напрямку, що бурхливо розвивається в останні 20–30 років, отримано низку вагомих результатів. Зокрема, спостереження осциляцій нейтрино, спричинених масою цих частинок, стало першим експериментальним доказом неповноти Стандартної моделі елементарних частинок і взаємодій. І хоча за останні 20 років роботи в цій галузі було відзначено п'ятьма нобелівськими преміями, в Україні вона залишається майже непоміченою, і це при тому, що кілька колективів українських науковців активно проводять дослідження з фізики елементарних частинок без використання прискорювачів і отримують результати найвищого світового рівня.

Ключові слова: фізика елементарних частинок, нейтрино, темна матерія, темна енергія, космічні промені, низькофоновий експеримент, багатоканальна астрономія.

Як виник і як розвивався Всесвіт у перші миті після Творення і яка його майбутня доля — ці питання хвилювали людство з давніх часів (зрозуміло, в дещо інших формулюваннях) і сьогодні залишаються найбільш важливими проблемами сучасної науки [1]. Але відповіді на ці питання можна лише за умови глибокого розуміння двох нескінченностей: нескінченно великого Всесвіту і нескінченно малого світу елементарних частинок. Всесвіт є предметом досліджень космології, астрофізики, астрономії, а елементарні частинки і взаємодії між ними описуються в рамках Стандартної моделі (СМ) елементарних частинок і взаємодій [2].

Початок цій величній теоретичній конструкції поклали дослідження фізиків-ядерників у 30-х—50-х роках. Так, не варто забувати, що саме ядерники відкрили електрон і його античастинку позитрон, нейтрино, а також слабку і сильну взаємодії, давши поштовх розвитку фізики елементарних частинок. Фак-



Рис. 1. У рамках Стандартної моделі елементарних частинок і взаємодій матерія складається з трьох поколінь ферміонів (6 кварків і 6 лептонів) та 4 бозонів, за допомогою яких описуються взаємодії між ферміонами («сили»). Матерія у спостережуваному Всесвіті складається з частинок лише першого покоління. Два наступні покоління частинок народжуються при високих енергіях і «відігравали» свою роль на ранніх етапах розвитку Всесвіту. У кварків і лептонів є античастинки, але їх кількість у сучасному Всесвіті дуже мала (джерело рисунку [3])

тично такі частинки, як протон, нейтрон, позитрон, мюон та його античастинка, електронне (анти)нейтрино, фотон, було відкрито саме за допомогою неприскорювальних методів (дослідження радіоактивності, світла, космічних променів).

Подальше розроблення і уточнення СМ, зокрема відкриття кварків, з яких складаються протони і нейтрони, а також наступних двох поколінь ферміонів, було здійснено починаючи з 60-х років за допомогою прискорювачів елементарних частинок. СМ з високою точністю описує електромагнітну і слабку взаємодію, які об'єднано в теорію електрослабкої взаємодії, а сильні взаємодії описуються в рамках квантової хромодинаміки (рис. 1).

Незважаючи на всі успіхи СМ, її не можна назвати завершеною теорією. СМ має певні недоліки, головними з яких є майже 20 пара-

метрів, які потрібно визначити експериментально, відсутність у її складі теорії гравітації, проблема калібрувальної ієрархії, пов'язаної з механізмом Хігса, проблеми узгодження з космологічною моделлю (існування темної матерії і темної енергії, баріонної асиметрії та інфляційної стадії у ранньому Всесвіті) і, нарешті, наявність маси у нейтрино [4]. Тому фізики наполегливо шукають шляхи побудови нової, більш досконалої теорії. Найбільш раціональним підходом видаються спроби розширити СМ, зберігши ті її частини, які коректно описують явища у мікросвіті.

Однак уже у 80-х роках стало зрозуміло, що подальший прогрес у фізиці елементарних частинок неможливий через практичні труднощі досягнення необхідних енергій частинок. Річ у тім, що нові ефекти у мікросвіті очікуються при енергіях $\sim 10^{15}$ GeV, тоді як запланована енергія Великого адронного колайдера (який споруджувався близько 30 років і коштував майже 10 млрд дол. США) становить усього 13×10^3 GeV. Навіть фантастичний колайдер розміром з орбіту Землі все ще не зможе дати необхідні енергії.

Отже, для подальшого розвитку фізики елементарних частинок, крім методів фізики високих енергій, потрібні принципово нові підходи.

Неприскорювальна фізика елементарних частинок — що це? Назву нового напрямку «Experimental particle physics without accelerators» (експериментальна фізика елементарних частинок без прискорювачів) було запропоновано у 1987 р. в огляді Мішеля Спіро зі співавторами [5]. У 1995 р. одночасно німецькою і англійською вийшла книга Х.Ф. Клапдора-Кляйнротхауса і А. Штаудта під назвою відповідно «Teilchenphysik ohne Beschleuniger» [6] і «Non-accelerator Particle Physics» [7], перекладена російською мовою як «Неускорительная физика элементарных частиц» [8]. Ми вважаємо назву «неприскорювальна фізика елементарних частинок» (НФЧ) найбільш прийнятною, оскільки вона дуже точно відображає методологію цього напрямку: дослідження властивостей елементарних частинок різними

експериментальними методами, але без застосування прискорювачів¹.

Основними напрямками НФЧ, як вони сформульовані в Дорожній карті розвитку неприскорювальної фізики елементарних частинок у Європі на 2017–2026 рр. [3], є такі:

- екстремальний Всесвіт: що можна зрозуміти про катастрофічні події у Всесвіті, вимірюючи космічні промені, високоенергетичні гамма-кванти, нейтрино, гравітаційні хвилі;
- темний Всесвіт: яка природа темної матерії і темної енергії;
- нейтрино: які їх властивості;
- ранній Всесвіт: що можна дізнатися про Великий вибух з досліджень реліктового випромінювання.

До цього списку варто додати пошуки ефектів та елементарних частинок за рамками Стандартної моделі, насамперед розпаду протона (передбачуваного багатьма так званими теоріями великого об'єднання), аксіонів, стерильних нейтрино, порушення законів збереження (електричного заряду, лептонного та баріонного чисел, принципу Паулі), лоренц-інваріантності та багатьох інших ефектів, можливих у різноманітних моделях, які претендують на роль розширень СМ. Адже «у фундаментальній фізиці, якщо щось може бути перевірено, воно обов'язково має бути перевірено» [9].

Якщо експерименти у фізиці високих енергій є лабораторними (прискорювач дає частинки високих енергій, події зіткнення яких реєструють за допомогою детекторів), то в НФЧ можна говорити скоріше про обсерваторії, які ведуть спостереження за процесами, в яких проявляються властивості елементарних частинок і взаємодій. Це можуть бути події ядерних розпадів чи взаємодій з ядрами (а отже, застосовуються методи ядерної фізики) або ж

випромінювання різної природи, що виникає у космосі (і знов-таки, ці спостереження проводять переважно ядерно-фізичними методами).

Процеси, що є предметом дослідження НФЧ, є вкрай рідкісними, а отже, детектори для їх реєстрації мають бути ретельно захищені від фону, спричиненого радіоактивністю навколишнього середовища, космічними променями, радіоактивністю матеріалів експериментальної установки. Роботи зазвичай виконують у підземних лабораторіях на глибинах у кілька сотень метрів або навіть у кілька кілометрів. У світі функціонують більш як 10 великих підземних лабораторій, ще кілька споруджуються, що свідчить про зростаючий інтерес до таких досліджень [10]. У багатьох випадках детектори та матеріали, розроблені для пошуків темної матерії, дослідження властивостей нейтрино та інших завдань НФЧ, можна використовувати для спостереження рідкісних альфа- і бета-розпадів, пошуку гіпотетичних ядер та розпадів [11–14].

У НФЧ застосовують також «неядерні» методи: дослідження реліктового мікрохвильового випромінювання, гравітаційних хвиль, астрономічні дослідження в радіо-, інфрачервоному, видимому, ультрафіолетовому, рентгенівському діапазонах (останні виконують за допомогою космічних апаратів). Проте ці винятки лише підтверджують правило: головними методами НФЧ є методи ядерної фізики. Хоча слід зазначити, що є чимало експериментів НФЧ, у яких використовують методи фізики високих енергій: вимірювання нейтринних осциляцій з пучками нейтрино від прискорювачів, вимірювання перерізів взаємодії іонів при низьких енергіях за допомогою прискорювачів, що працюють під землею для зниження фону (вимірювання перерізів взаємодії ядер для завдань теоретичного опису процесів у зорях).

Отже, НФЧ користується ядерно-фізичними методами, але зі специфікою, зумовленою пошуками дуже рідкісних процесів, і перебуває в зв'язку з багатоканальною астрономією, яка використовує неелектромагнітні канали спостережень (космічні промені, нейтрино,

¹ Останнім часом в англійській літературі все частіше використовують термін «astroparticle physics», але спроби перекласти цю конструкцію українською як «космомікрофізика» або «фізика астрочастинок» є невдалими. Перший термін дуже рідко використовують навіть російською мовою (звідки він і потрапив в українську), тоді як слова «астрочастинка» в українській взагалі немає.

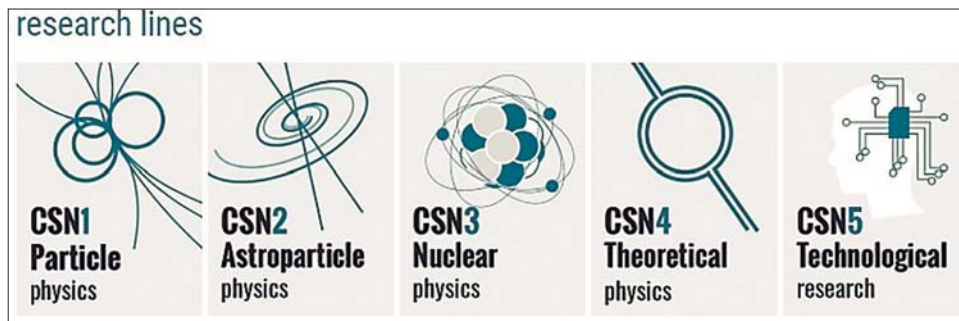


Рис. 2. Неприскорювальна фізика елементарних частинок (astroparticle physics) є другим за масштабом напрямом у Національному інституті ядерної фізики Італії (джерело: сайт INFN <https://home.infn.it/en/>)

гравітаційні та радіохвилі). Ці дослідження дають нові знання про властивості елементарних частинок і взаємодій і недоступні для фізики високих енергій. Саме НФЧ дозволила знайти ефекти за рамками Стандартної моделі, показавши, що нейтрино мають масу (К. Такаакі та А. Макдональд, Нобелівська премія 2015 р.) [15]. Загалом за останні 20 років п'ять нобелівських премій з фізики присуджено за дослідження в галузі НФЧ (2002, 2006, 2011, 2015, 2017). Виходять спеціалізовані журнали (Astroparticle Physics, Physics of the Dark Universe, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics)², проводяться спеціальні конференції (Neutrino, Topics in Astroparticle and Underground Physics, Weak Interactions and Neutrinos, Conference on Neutrino and Nuclear Physics).

Як уже було зазначено, спорудження нових підземних лабораторій очевидно свідчить про зростаючий інтерес до НФЧ. Загалом частка задіяних у цій галузі вчених і рівень фінансування проєктів невпинно зростають починаючи з кінця 90-х років, коли намітилася чітка тенденція до зниження фінансування «традиційної» ядерної фізики, в якій практично не залишилося по-справжньому фундаментальних проблем. Наприклад, у Національному інституті ядерної фізики Італії (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) НФЧ є другим за масштабом напрямом діяльності після фізики високих енергій і потужнішим за такі напрями, як

фізика ядра, теоретична фізика, технологічні розробки (рис. 2).

У 2001 р. в Європі було організовано АРРЕС (Astroparticle Physics European Consortium) — мережу з 18 національних урядових агенцій, відповідальних за фінансування та координацію зусиль у галузі НФЧ в Європейському Союзі. Проєкти з НФЧ є пріоритетними як у Міністерстві енергетики (Department of Energy), так і в Національному науковому фонді США. У Південній Кореї нещодавно створено спеціальний підрозділ Інституту фундаментальних наук — Центр підземної фізики [16], де ведуть дослідження нейтрино, пошуки темної матерії. Хоча в Південній Кореї вже є підземна лабораторія, Центр підземної фізики споруджує нову, значно більшу за розміром і глибшу лабораторію, обладнану з урахуванням останніх досягнень «підземної фізики».

Неприскорювальна фізика частинок в Україні. В Україні дослідження з НФЧ, як теоретичні, так і експериментальні, ведуться в інститутах НАН України та університетах. Нижче розглянемо деякі результати, отримані українськими вченими за останні кілька років, які відображають основні напрями досліджень в Україні.

Пошук обмежень на параметри частинок темної матерії за даними астрофізичних та космологічних спостережень ведуть учені Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України. З аналізу даних рентгенівських телескопів (рентгенівське випромінювання з енергією 3,5 кеВ) отримано вказівку на розпад легких стерильних нейтрино — кандидатів на роль частинок темної матерії [17]. Отримано

² При цьому статті в галузі НФЧ, враховуючи їх актуальність, публікуються і в журналах широкі тематики, таких як Physical Review Letters, Review of Modern Physics, Science, Nature та ін.

обмеження на масу частинок легкої ферміонної темної матерії на основі даних кінематики карликових сфероїдальних галактик [18] та аналізу поширеності галактик на великих червоних зміщеннях [19].

Проблемами теорії гравітації, темної матерії, спробами розширення Стандартної моделі займаються вчені з Астрономічної обсерваторії Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова. Це і побудова моделей з додатковими вимірами, які розглядаються як перспективні напрями розширення СМ [20], й аналіз конформних збуджень внутрішніх просторів як кандидатів на роль темної матерії [21], і дослідження різних гравітаційних моделей з огляду на демонстрацію того, що гравітаційні маси не суперечать гравітаційним тестам, якщо вони мають негативний тиск у внутрішніх просторах [22–24].

Теоретичні дослідження темної матерії і темної енергії ведуться в Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка. Учені Обсерваторії досліджують вплив динамічної темної енергії на рівновагу нейтронних зір [25, 26], отримали обмеження на параметри темної енергії на основі космологічних даних про реліктове випромінювання, баріонні акустичні осциляції видимої матерії у Всесвіті та наднові зорі типу I_a [27–29].

Роботи з вивчення властивостей елементарних частинок, основані на аналізі астрономічних даних, ведуться у Головній астрономічній обсерваторії НАН України та Радіоастрономічному інституті НАН України. Зокрема, аналіз спостережень і теоретичних модельних розрахунків динаміки та активних процесів у галактичних ядрах дає важливу інформацію в контексті фізики елементарних частинок [30–35]. Розподіл вмісту темної і видимої матерії в галактичних системах за відношенням їхньої маси до світності на різних космологічних масштабах є реальним свідченням наявності ефектів за рамками СМ, а в окремих спостережних випадках суперечить Λ CDM-моделі. Роботи з цього напрямку ведуться шляхом аналізу даних в оптичному та інфрачервоному

діапазонах для галактик раннього і пізнього типу [36, 37] та малонаселених груп галактик, виявлених методом мозаїки Вороного [38], у рентгенівському діапазоні для скупчень галактик [39], гамма-променів надвисоких енергій [40], космічних войдів³ як великомасштабних структур Всесвіту з наднизькою густиною видимої матерії, форма та фізичні властивості яких чутливі до стану темної енергії та вмісту темної матерії [41]. В астрофізиці високих енергій войди розглядають як канал поширення релятивістських частинок, де наявність ненульового магнітного поля [42] залишається відкритим питанням.

В Інституті ядерних досліджень НАН України ведуться дослідження властивостей нейтрино і слабкої взаємодії у подвійному бета-розпаді атомних ядер [43–48], пошуки гіпотетичних частинок та ефектів за межами СМ [49, 50], дослідження рідкісних та гіпотетичних ядерних розпадів [51–54], вимірювання потоків нейтрино від Сонця та інших джерел [55–57], розроблення детекторів для пошуків темної матерії [58, 59], реєстрації когерентного розсіяння нейтрино та інших рідкісних процесів [60–62].

Вимірювання потоків нейтрино та дослідження подвійного бета-розпаду ведуться в рамках участі Інституту ядерних досліджень у кількох великих міжнародних проєктах:orexino [63, 64], CUPID-Мо [65–67], CUPID [68, 69], AMoRE [70], CROSS [71, 72]. Слід зазначити, що сучасні експериментальні дослідження в галузі НФЧ потребують значних матеріальних і людських ресурсів, бюджети таких експериментів становлять кілька десятків мільйонів доларів США (наприклад, фінансування кожного із вищезгаданих проєктів CUPID і AMoRE становить близько 5–10 млн дол. США на рік, і це не враховуючи зарплат учасників та обслуговуючого персоналу, вартості інфраструктури, видатків на утримання лабораторій тощо). Важливо розуміти, що проведення сучасних експериментів у цій галузі

³ Від англ. void — порожнеча, ділянка космічного простору, в якій концентрація галактик у десятки разів менша за середню.

на високому рівні не під силу навіть окремим розвиненим країнам.

Група науковців з Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна бере участь в експериментальних дослідженнях подвійного бета-розпаду атомних ядер [70, 73], пошуках аксіонів [74], розробленні методів низькофонових експериментів [75].

Важливим напрямом НФЧ є розроблення методів глибокого очищення матеріалів для зниження фону в експериментах з пошуку подвійного бета-розпаду, темної матерії, дослідження рідкісних ядерних розпадів, вимірювання потоків нейтрино. Такі роботи на найвищому рівні виконуються в Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України [47, 53, 54]. Роботи з розроблення низькофонових сцинтиляторів ведуться в Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України [76, 77].

У 2015 р. Україна стала повноправним членом міжнародного консорціуму Cherenkov Telescope Array (СТА) [78–81]. Це масив гамма-телескопів, які мають бути встановлені у різних місцях Землі, для дослідження невивченого діапазону енергій (20 GeV – 300 TeV). У цьому великому проєкті (загалом колаборація налічує близько 1,5 тис. науковців із 150 наукових установ 25 країн світу) беруть участь вчені з астрономічних обсерваторій Київського національного університету імені Тараса Шевченка та Львівського національного університету імені Івана Франка, а також з Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України.

Вчені Київського національного університету імені Тараса Шевченка беруть участь у двох великих проєктах: Huper-Kamiokande (черенковський детектор з 260 тис. т води) [82] та DUNE (детектор з 40 тис. т зрідженого аргону) [83]. Метою цих мегапроєктів є дослідження осциляцій нейтрино, порушення CP-парності в електрослабкій взаємодії, пошук розпаду протона, спостереження нейтрино від вибухів наднових, дослідження атмосферних та со-

нячних нейтрино. Варто зауважити, що рівень фінансування цих проєктів (600 млн і 1,3 млрд дол. США відповідно) свідчить про важливість досліджень у цій галузі.

У 2007–2012 рр. дослідження в галузі НФЧ в Україні велися в рамках цільових комплексних програм наукових досліджень НАН України «Дослідження структури та складу Всесвіту, прихованої маси і темної енергії» («Космомікрофізика») і «Астрофізичні і космологічні проблеми прихованої маси і темної енергії» («Космомікрофізика-2»). В результаті виконання програм було отримано теоретичні та фундаментальні результати світового рівня, що стосуються властивостей елементарних частинок і взаємодій, фізичних процесів у далекому Всесвіті [29, 84, 85].

Висновки. Неприскорювальна фізика елементарних частинок бурхливо розвивається в останні 20–30 років. Отримано вагомі результати, зокрема спостережено перший ефект за рамками Стандартної моделі елементарних частинок, готуються експерименти, які будуть визначати розвиток фізики елементарних частинок у наступні кілька десятиліть і, можливо, дадуть поштовх новій науковій революції.

В Україні є кілька наукових груп, які ефективно працюють у цій галузі, отримують результати найвищого рівня. Важливо, що в цих групах є молодь, і це свідчить про актуальність і перспективність неприскорювальної фізики елементарних частинок та значний інтерес до неї у світі. Проте в Україні рівень підтримки цих досліджень і кількість науковців, які працюють у цьому напрямі, непропорційно малі порівняно зі світовими тенденціями. Причиною явної недооцінки нової галузі в Україні є, очевидно, той факт, що її розвиток у світі збігся в часі із загальним падінням рівня підтримки науки в нашій країні.

З огляду на викладене вище наразі актуальним є питання про створення при Відділенні ядерної фізики та енергетики НАН України Наукової ради «Неприскорювальна фізика елементарних частинок» із залученням до її складу провідних фахівців НАН України та представників закладів вищої освіти. Така

рада має тісно співпрацювати з Науковою радою «Астрофізика, астрономія» Відділення фізики і астрономії НАН України, оскільки, незважаючи на істотні відмінності у методах досліджень, завдання, що стоять перед ними, близькі.

Було б доцільно розробити концепцію цілової програми досліджень у галузі неперіодичної фізики елементарних частинок і передбачити в ній кошти для участі у міжнародних проєктах. Сучасна наука робиться сьогодні в рамках великих міжнародних проєктів, де очікується не лише інтелектуальний, а й матеріальний внесок, здатність країни-учасниці взяти на себе певні витрати (принаймні на відрядження учасників проєктів на профільні конференції та у ключові лабораторії, в яких

ведуться експериментальні й теоретичні дослідження в цій галузі).

Автор хотів би висловити подяку Володимирі Третяку і Владиславу Кобичеву за цінні зауваження до рукопису статті, а також Володимиру Аушеву, Ірині Вавиловій, Петеру Берцику, Богдану Гнатику, Олександрі Жуку, Геннадію Ковтуну, Богдану Новосядлому, Сергію Раткевичу, Ірині Туницькій, Юрію Штанову за надані матеріали про стан досліджень у галузі неперіодичної фізики елементарних частинок у їхніх групах, а також за зроблені зауваження до тексту рукопису. Ця публікація підтримана в рамках проєкту 2020.02/0011 «Подвійний бета-розпад атомних ядер» Національного фонду досліджень України.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

- 125 Questions: What Don't We Know? *Science*. 2005. **309**(5731). Special Issue. <http://www.sciencemag.org/site/feature/misc/webfeat/125th/>
- Particle Data Group, Zyla P.A. et al. Review of Particle Physics. *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2020. **2020**(8): 083C01. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104>
- Astroparticle Physics European Consortium. <https://www.appec.org/roadmap>
- Mohapatra R.N., Antusch S., Babu K.S. et al. Theory of neutrinos: A white paper. *Rep. Prog. Phys.* 2007. **70**(11): 1757–1867. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/70/11/R02>
- Rich J., Lloyd Owen D., Spiro M. Experimental particle physics without accelerators. *Phys. Rep.* 1967. **151**(5-6): 239–364. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(87\)90055-X](https://doi.org/10.1016/0370-1573(87)90055-X)
- Klapdor-Kleingrothaus H.V., Staudt A. *Teilchenphysik ohne Beschleuniger*. B.G. Teubner Stuttgart, 1995. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-89144-0>
- Klapdor-Kleingrothaus H.V., Staudt A. *Non-accelerator Particle Physics*. IOP Publishing Ltd, 1995. <https://doi.org/10.1002/asna.2113170212>
- Klapdor-Kleingrothaus H.V., Staudt A. *Неускорительная физика элементарных частиц*. Москва: Наука, 1997 (in Russian). [Кладдор-Кляйнгротхаус Г.В., Штаудт А. *Неускорительная физика элементарных частиц*, Москва: Наука, 1997.]
- Okun L.B. O proverke zakona sokhraneniya elektricheskogo zaryada i printsipa Pauli. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1989. **158**(2): 293–301. (in Russian). [Окунь Л.Б. О проверке закона сохранения электрического заряда и принципа Паули. *Успехи физических наук*. 1989. Т. 158, № 2. С. 293–301.]
- Ianni A. Considerations on Underground Laboratories. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. **1342**: 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1342/1/012003>
- Danevich F.A., Georgadze A.Sh., Kobychiev V.V. et al. α activity of natural tungsten isotopes. *Phys. Rev. C*. 2003. **67**(1): 014310. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.67.014310>
- Cattadori C.M., De Deo M., Laubenstein M., Pandola L., Tretyak V.I. Observation of β decay of ^{115}In to the first excited level of ^{115}Sn . *Nucl. Phys. A*. 2005. **748**(1-2): 333–347. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2004.10.025>
- Belli P., Bernabei R., Bukilic N. et al. Investigation of β decay of ^{113}Cd . *Phys. Rev. C*. 2007. **76**(6): 064603. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.76.064603>
- Belli P., Bernabei R., Cappella F. et al. Search for long-lived superheavy eka-tungsten with radiopure ZnWO_4 crystal scintillator. *Phys. Scripta*. 2015. **90**(8): 085301. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/90/8/085301>

15. Danevich F.A., Kobychiev V.V., Tretyak V.I. Neutrinos are massive. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2016. (1): 20–29. <https://doi.org/10.15407/visn2016.01.020>
[Даневич Ф.А., Кобичев В.В., Третяк В.І. У нейтрино є маса. *Вісник НАН України*. 2016. № 1. С. 20–29.]
16. The Institute for Basic Science. http://www.ibs.re.kr/eng/sub02_03_04.do
17. Boyarsky A., Ruchayskiy O., Iakubovskiy D., Franse J. Unidentified Line in X-Ray Spectra of the Andromeda Galaxy and Perseus Galaxy Cluster. *Phys. Rev. Lett.* 2014. **113**(25): 251301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.251301>
18. Savchenko D., Rudakovskiy A. New mass bound on fermionic dark matter from a combined analysis of classical dSphs. *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* 2019. **487**(4): 5711. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz1573>
19. Rudakovskiy A., Mesinger A., Savchenko D., Gillet N. Constraints on warm dark matter from UV luminosity functions of high-*z* galaxies with Bayesian model comparison. *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* 2021. **507**(2): 3046. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab2333>
20. Akarsua Ö., Chopovsky A., Zhuk A. Black branes and black strings in the astrophysical and cosmological context. *Phys. Lett. B.* 2018. **778**(3): 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.01.022>
21. Akarsu Ö., Chopovsky A., Shulga V., Yalçınkaya E., Zhuk A. Weak field limit of higher dimensional massive Brans-Dicke gravity: Observational constraints. *Phys. Rev. D.* 2020. **101**(2): 024004. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.024004>
22. Zhuk A., Chopovsky A., Fakhr S.H., Shulga V., Wei H. Weak-field limit of Kaluza–Klein models with spherically symmetric static scalar field: observational constraints. *Eur. Phys. J. C.* 2017. **77**: 721. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5311-x>
23. Akarsu Ö., Chopovsky A., Eingorn M., Fakhr S.H., Zhuk A. Brane world models with bulk perfect fluid and broken 4D Poincaré invariance. *Phys. Rev. D.* 2018. **97**(4): 044024. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.044024>
24. Canay E., Eingorn M., Zhuk A. Effects of nonlinearity of $f(R)$ gravity and perfect fluid in Kaluza–Klein models with spherical compactification. *Eur. Phys. J. C.* 2020. **80**: 379. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-7979-6>
25. Smerechynskiy S., Tsizh M., Novosyadlyj B. Impact of dynamical dark energy on the neutron star equilibrium. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2021. **2021**(2): 045. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2021/02/045>
26. Smerechynskiy S., Tsizh M., Novosyadlyj B. White dwarfs as a probe of dark energy. *Phys. Rev. D.* 2020. **101**(2): 023001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.023001>
27. Novosyadlyj B., Sergijenko O., Durrer R. Do the cosmological observational data prefer phantom dark energy? *Phys. Rev. D.* 2012. **86**(8): 083008. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.083008>
28. Novosyadlyj B., Sergijenko O., Durrer R., Pelykh V. Constraining the dynamical dark energy parameters: Planck-2013 vs WMAP9. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2014. **2014**: 030. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2014/05/030>
29. Novosyadlyj B., Pelykh V., Stanov Yu., Zhuk Yu. Dark energy and dark matter in the Universe. In: Shulga V. (ed.) *Dark Energy: observational evidence and theoretical models*. Vol. 1. Kyiv: Akadempriodyka, 2013. <https://doi.org/10.15407/akadempriodyka.240.380>
30. Khan F.M., Fiacconi D., Mayer L., Berczik P., Just A. Swift Coalescence of Supermassive Black Holes in Cosmological Mergers of Massive Galaxies. *Astrophys. J.* 2016. **828**(2): 73. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/828/2/73>
31. Khoperskov S. et al. The echo of the bar buckling: Phase-space spirals in Gaia Data Release. *A&A.* 2019. **622**(2): L6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834707>
32. Kennedy G.F. et al. Star-disc interaction in galactic nuclei: orbits and rates of accreted stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2016. **460**(1): 240. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw908>
33. Li S., Liu F.K., Berczik P., Spurzem R. Boosted Tidal Disruption by Massive Black Hole Binaries During Galaxy Mergers from the View of N-Body Simulation. *Astrophys. J.* 2017. **834**(2): 195. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/834/2/195>
34. Khan F.M., Capelo P.R., Mayer L., Berczik P. Dynamical Evolution and Merger Timescales of LISA Massive Black Hole Binaries in Disk Galaxy Mergers. *Astrophys. J.* 2018. **868**(2): 97. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aae77b>
35. Panamarev T. et al. Direct N-body simulation of the Galactic centre. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2019. **484**(3): 3279. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz208>
36. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E. “Scraggy” dark haloes around bulge-less spiral galaxies. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2019. **486**(3): 3697. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz1047>
37. Vavilova I.B. et al. Machine learning technique for morphological classification of galaxies from the SDSS. I. Photometry-based approach. *Astron. Astrophys.* 2021. **648**: A122. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038981>
38. Vavilova I., Elyiv A., Dobrycheva D., Melnyk O. The Voronoi tessellation method in astronomy. In: Zelinka I., Brescia M., Baron D. (eds) *Intelligent Astrophysics*. Springer, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-65867-0>

39. Babyk Iu.V. et al. A Universal Entropy Profile for the Hot Atmospheres of Galaxies and Clusters within R_{2500} . *Astrophys. J.* 2018. **862**(1): 39. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aacce5>
40. Kolesnyk Yu.L., Bobik P.S., Shakhov B.A., Putis M. An exact solution of cosmic ray modulation problem in a stationary composite heliosphere model. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2020. **491**(4): 5826. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz3343>
41. Elyiv A. et al. Cosmic voids detection without density measurements. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2015. **448**(4): 642. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv043>
42. Elyiv A., Neronov A., Semikoz D.V. Gamma-ray induced cascades and magnetic fields in the intergalactic medium. *Phys. Rev. D.* 2009. **80**(2): 023010. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.80.023010>
43. Danevich F.A. Investigation of neutrino and weak interactions in double beta decay of atomic nuclei. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2015. (9): 39–47 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/visn2015.09.039>
44. Belli P. et al. Final results of the Aurora experiment to study 2β decay of ^{116}Cd with enriched $^{116}\text{CdWO}_4$ crystal scintillators. *Phys. Rev. D.* 2018. **98**(9): 092007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.092007>
45. Giuliani A., Danevich F.A., Tretyak V.I. A multi-isotope $0\nu\beta\beta$ bolometric experiment. *Eur. Phys. J. C.* 2018. **78**: 272. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-5750-z>
46. Blaum K. et al. Neutrinoless double-electron capture. *Rev. Mod. Phys.* 2020. **92**(4): 045007. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.92.045007>
47. Danevich F.A. et al. First search for 2ϵ and $\epsilon\beta^+$ decay of ^{174}Hf . *Nucl. Phys. A.* 2020. **996**: 121703. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2020.121703>
48. Danevich F.A. et al. New limits on double-beta decay of ^{190}Pt and ^{198}Pt . *Eur. Phys. J. C.* 2022. **82**(2022): 29. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-09989-1>
49. Gavriljuk Yu.M. et al. New limits on the coupling constant of axion with photon for solar axions. *JETP Lett.* 2018. **107**: 617. <https://doi.org/10.1134/S0021364018100090>
50. Agarwalla S.K. et al. Constraints on avor-diagonal non-standard neutrino interactions from Borexino Phase-II. *J. High Energ. Phys.* 2020. **32**(2020). [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2020\)038](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2020)038)
51. Belli P. et al. Experimental searches for rare alpha and beta decays. *Eur. Phys. J. A.* 2019. **55**: 140. <https://doi.org/10.1140/epja/i2019-12823-2>
52. Danevich F.A. et al. Decay scheme of ^{50}V . *Phys. Rev. C.* 2020. **102**(2): 024319. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.102.024319>
53. Danevich F.A. et al. First search for α decays of naturally occurring Hf nuclides with emission of γ quanta. *Eur. Phys. J. A.* 2020. **56**: 5. <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-019-00005-x>
54. Belli P. et al. Search for α decay of naturally occurring osmium nuclides accompanied by γ quanta. *Phys. Rev. C.* 2020. **102**(2): 024605. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.102.024605>
55. Agostini M. et al. Comprehensive measurement of pp-chain solar neutrinos. *Nature.* 2018. **562**: 505. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0624-y>
56. Agostini M. et al. Experimental evidence of neutrinos produced in the CNO fusion cycle in the Sun. *Nature.* 2020. **587**: 577. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2934-0>
57. Agostini M. et al. Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino. *Phys. Rev. D.* 2020. **101**: 012009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.012009>
58. Belli P. et al. Measurements of ZnWO_4 anisotropic response to nuclear recoils for the ADAMO project. *Eur. Phys. J. A.* 2020. **56**: 83. <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00094-z>
59. Belli P. et al. The Future Role of Inorganic Crystal Scintillators in Dark Matter Investigations. *Instruments.* 2021. **5**(2): 16. <https://doi.org/10.3390/instruments5020016>
60. Danevich F.A., Tretyak V.I. Radioactive contamination of scintillators. *Int. J. Mod. Phys. A.* 2018. **33**(9): 1843007. <https://doi.org/10.1142/S0217751X18430078>
61. Danevich F.A. et al. Growth and characterization of a $\text{Li}_2\text{Mg}_2(\text{MoO}_4)_3$ scintillating bolometer. *Nucl. Instr. Meth. A.* 2018. **889**: 89. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.01.101>
62. Aliane A. et al. First test of a $\text{Li}_2\text{WO}_4(\text{Mo})$ bolometric detector for the measurement of coherent neutrino-nucleus scattering. *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2020. **949**: 162784. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162784>
63. Agostini M. et al. Search for low-energy neutrinos from astrophysical sources with Borexino. *Astropart. Phys.* 2021. **125**: 102509. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2020.102509>
64. Agostini M. et al. Identification of the cosmogenic ^{11}C background in large volumes of liquid scintillators with Borexino. *Eur. Phys. J. C.* 2021. **81**: 1075. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09799-x>
65. Armengaud E. et al. Precise measurement of $2\nu\beta\beta$ decay of ^{100}Mo with the CUPID-Mo detection technology. *Eur. Phys. J. C.* 2020. **80**: 674. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-8203-4>

66. Armengaud E. et al. The CUPID-Mo experiment for neutrinoless double-beta decay: performance and prospects. *Eur. Phys. J. C.* 2020. **80**: 44. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7578-6>
67. Armengaud E. et al. (CUPID-Mo Collaboration). New Limit for Neutrinoless Double-Beta Decay of ^{100}Mo from the CUPID-Mo Experiment. *Phys. Rev. Lett.* 2021. **126**: 181802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.181802>
68. Armatol A. et al. (the CUPID Collaboration). Novel technique for the study of pileup events in cryogenic bolometers. *Phys. Rev. C.* 2021. **104**: 015501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.104.015501>
69. Armatol A. et al. (the CUPID Collaboration). A CUPID $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ scintillating bolometer tested in the CROSS underground facility. *JINST.* 2021. **16**: P02037. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/02/P02037>
70. Alenkov V. et al. First results from the AMoRE-Pilot neutrinoless double beta decay experiment. *Eur. Phys. J. C.* 2019. **79**: 791. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7279-1>
71. Bandac I.C. et al. The $0\nu 2\beta$ -decay CROSS experiment: preliminary results and prospects. *J. High Energ. Phys.* 2020. (1): 18. [https://doi.org/10.1007/JHEP01\(2020\)018](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2020)018)
72. Bandac I.C. et al. Phonon-mediated crystal detectors with metallic film coating capable of rejecting α and β events induced by surface radioactivity. *Appl. Phys. Lett.* 2021. **118**: 184105. <https://doi.org/10.1063/5.0050124>
73. Gavriluk Y.M. et al. Results of In-Depth Analysis of Data Obtained in the Experimental Search for $2\text{K}(2\nu)$ -Capture in ^{78}Kr . *Phys. Part. Nuclei.* 2018. **49**(4): 540. <https://doi.org/10.1134/S1063779618040238>
74. Akhmatov Z.A. et al. Results of Searching for Solar Hadronic Axions Emitted in the M1 Transition in ^{83}Kr Nuclei. *Phys. Part. Nuclei.* 2018. **49**(4): 599. <https://doi.org/10.1134/S1063779618040020>
75. Petrenko O.D. et al. Improving the Precision of Calibrating a Large Low-background Proportional Counter. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. **1690**(1): 012037. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1690/1/012037>
76. Barabash A.S. et al. Improvement of radiopurity level of enriched $^{116}\text{CdWO}_4$ and ZnWO_4 crystal scintillators by recrystallization. *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2016. **833**: 77. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.07.025>
77. Ferreiro Iachellini N. et al. Operation of an archaeological lead PbWO_4 crystal to search for neutrinos from astrophysical sources with a Transition Edge Sensor. (Submitted to *J. Low Temp. Phys.*). <https://arxiv.org/abs/2111.07638>
78. The Cherenkov Telescope Array Consortium: Acharya B.S. et al. *Science with the Cherenkov Telescope Array*. World Sci. Publ. Co., Singapore, 2019. <https://doi.org/10.1142/10986>
79. Acharyya A. et al. Monte Carlo studies for the optimisation of the Cherenkov Telescope Array layout. *Astropart. Phys.* 2019. **111**: 35. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2019.04.001>
80. Acharyya A. et al. Sensitivity of the Cherenkov Telescope Array to a dark matter signal from the Galactic centre. *J. Cosmol. Astropart.* 2021. (1): 057. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2021/01/057>
81. Abdalla H. et al. Sensitivity of the Cherenkov Telescope Array for probing cosmology and fundamental physics with gamma-ray propagation. *J. Cosmol. Astropart.* 2021. (2): 048. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2021/02/048>
82. Hyper-Kamiokande. <https://www.hyperk.org/>
83. DUNE at LBNF – Fermilab. <https://lbnf-dune.fnal.gov/>
84. Shulga V.M. et al. Dark Energy and Dark Matter in the Universe. In: Shulga V. (ed.) *Dark matter: Astrophysical aspects of the problem*. Vol. 2. Kyiv: Akadempriodyka, 2014. <https://doi.org/10.15407/akadempriodyka.253.356>
85. Vavilova I.B. et al. Dark Energy and Dark Matter in the Universe. In: Shulga V. (ed.) *Dark matter: Observational Manifestation and Experimental Searches*. Vol. 3. Kyiv: Akadempriodyka, 2015. <https://doi.org/10.15407/akadempriodyka.287.356>

Fedor A. Danevich

Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9446-9023>

NON-ACCELERATOR PARTICLE PHYSICS IN UKRAINE

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, January 12, 2022

Non-accelerator particle physics is a new field of physics that studies the properties of particles without using accelerators. This area has been developing rapidly for the last 20–30 years providing a number of outstanding results, including the discovery of neutrino oscillations caused by the masses of neutrinos, which became the first experimental proof of an effect beyond the Standard Model of particles and interactions. While the results in the field have won five Nobel Prizes over the last twenty years, this area remains almost unnoticed in Ukraine, despite the fact that here several research groups conduct work on the subject and obtain the results of the highest quality.

Keywords: particle physics, neutrino, dark matter, dark energy, cosmic rays, low-background experiment, multichannel astronomy.