Національна академія наук України
Інститут сцинтиляційних матеріалів

УКРАЇНСЬКИЙ ВНЕСОК У ФІЗИКУ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК: ІСТОРІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

За редакцією:
В'ячеслав Греков, Тетяна Гриньова,
Сергій Перепелиця, Ірина Споденець,
Максим Стріха

Харків
2026

УКРАЇНСЬКИЙ ВНЕСОК У ФІЗИКУ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК: ІСТОРІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ»: “ІСМА”, 2026. – 224 стор.

ISBN 966-02-2555-5 (серія)
978-617-14-0574-5

Ця книга присвячена 10-й річниці асоційованого членства України в Європейській організації з ядерних досліджень (ЦЕРН), ця книга включає матеріали доповідей, представлених на науковій нараді «Український внесок у фізику елементарних частинок: історія та перспективи», що відбулася 26–29 січня 2026 року у гібридному форматі з майданчиками у ЦЕРН (Женева) та Харкові.

Представлені роботи відображають широке коло питань історії розвитку фізичної науки в Україні, визначення внеску українських фізиків як в Україні, так і за її межами, у дослідження фізики високих енергій.

Показано, що внесок українських вчених у дослідження фізики елементарних частинок та в міжнародну співпрацю є науковою традицією, яка потребує системного осмислення та публічного визнання. Без цього неможливо говорити ні про науковий суверенітет, ні про повноцінну інтеграцію України до світового дослідницького простору, ні про визначенню напрямів подальшого розвитку цього напряму науки.

Книга буде цікава та корисна для студентів, наукових співробітників, спеціалістів та широкого кола читачів, які цікавляться історією науки та України.

Редколегія випуску
В. Греков, Т. Гриньова, С. Перепелиця, І. Споденець, М. Стріха

Головний редактор Б.В. Гриньов
Відповідальний секретар Є.В. Щербіна

ISBN 966-02-2555-5 (серія)
978-617-14-0574-5
© ІСМА 2026

Зміст

Передмова
Анатолій Загородній 5

Внесок України у розвиток фізики елементарних частинок
Тетяна Гриньова, Максим Стріха, В'ячеслав Греков 9

Відновлення наративу: шляхи переосмислення світового внеску української фізичної науки
В'ячеслав Греков 60

УКРАЇНА–ЦЕРН: шлях до співпраці
Борис Гриньов, Тетяна Гриньова 69

Академічні обміни та технологічне/промислове шпигунство ГРУ / КДБ на Заході
Сергій Жук 89

Професор Д.В. Волков у ЦЕРН
Олексій Нурмагамбетов 103

Джордж Гамов: від бета-розпаду до космологічного нуклеосинтезу
Богдан Новосядлий 116

Славні скрижалі видатного фізика XX століття Дмитра Іваненка
Василь Шендеровський 130

Гліб Ватагін та його місія в Бразилії
Карола Добригкайт* 144

Київські витоки сучасної математичної фізики
Віктор Герасименко** 159

* Розширена версія цього внеску з'явиться англійською мовою в одному з наступних випусків журналу European Physical Journal H.

** Розширена версія цього внеску з'явиться англійською мовою в одному з наступних випусків журналу European Physical Journal H.

Харківська наукова школа ядерної фізики:
Рувін Йосель-Гіршович Гарбер(1909–2001 рр.)
Тверитникова Олена, Гутник Марина 171

Сцинтилятори ICMA на базі йодиду цезія в
експериментах з фізики високих енергій та астрофізики
Володимир Тарасов 178

Сцинтилятор PWO: як почалася історія
Ірина Тупіцина*** 192

Фізика високих густин енергії в Інституті теоретичної
фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України у Києві:
історичний огляд
Марк Горенштейн, Сергій Перепелиця,
Віктор Трубніков 211

*** Вперше опубліковано Tupitsyna, I. PWO scintillator: how the story began. Eur. Phys. J. H (2026) 51:12, https://doi.org/10.1140/epjh/s13129-026-00128-y, Copyright 2026. Передруковано з дозволу Springer. Переклад автора.

Передмова

Наука є одним із фундаментів цивілізації. Вона формує сучасний світ, сприяє технологічному розвитку, економічному зростанню держав і створює простір міжнародного співробітництва. Проте наука існує не лише у вимірі відкриттів і формул. Вона має власну історію, пам'ять і традицію. Збереження цієї пам'яті є не менш важливим, ніж створення нових знань, адже саме вона забезпечує спадкоємність наукових шкіл, формує національну ідентичність і визначає місце країни у світовому інтелектуальному просторі.

Україна належить до тих держав, без яких неможливо повноцінно написати історію світової фізики. Саме тут сформувалися наукові колективи, що визначили розвиток ядерної фізики, фізики низьких температур, матеріалознавства, фізики плазми та фізики елементарних частинок. Українські дослідники створювали наукові школи світового рівня, брали участь у міжнародних дослідницьких проєктах і здійснювали відкриття, які стали невід'ємною частиною світового наукового поступу.

Особливе місце в цій історії посідає фізика елементарних частинок – галузь, у розвиток якої українські вчені зробили вагомий внесок, починаючи від формування фундаментальних теоретичних засад і розвитку прискорювальної техніки до участі в наймасштабніших міжнародних експериментах сучасності. Саме цій традиції, її історії та перспективам присвячена ця збірка.

Водночас значна частина цієї історії залишалася прихованою за імперськими та радянськими наративами. Досягнення українських учених нерідко втрачали власний контекст, а їхні імена, наукові школи й інституції інтегрувалися до історії інших держав. Сьогодні ми дедалі чіткіше усвідомлюємо, що відновлення історичної справедливості – це не питання політичної кон'юнктури, а необхідна умова розвитку сучасної науки. Наукове знання повинно ґрунтуватися на достовірних джерелах, критичному аналізі та повазі до історичної правди. Повномасштабна російська агресія проти України надала цій роботі нового виміру. Захист держави нерозривно пов'язаний зі збереженням її культурної, освітньої та наукової спадщини, а також історичної пам'яті. Саме тому дослідження історії науки в Україні сьогодні виходить далеко за межі академічної дисципліни. Воно стає важливою складовою формування національної пам'яті, зміцнення культурної ідентичності та інтеграції України до європейського інтелектуального простору.

Символічно, що збірка «Український внесок у фізику елементарних частинок: історія та перспективи» виходить у рік десятиріччя асоційованого членства України в CERN. Видання підготовлено за підсумками міжнародної наукової наради, проведеної у гібридному форматі за участю українських учених та дослідників CERN. Воно поєднує історичний аналіз із сучасним баченням розвитку галузі та окреслює перспективи подальшої міжнародної співпраці. Доречно зазначити, що у 2028 році виповнюється сто років від дня заснування Українського фізико-технічного інституту в Харкові, правонаступником якого є Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут». Ювілей цієї установи, першого центру фізики елементарних частинок на території України, також знаменує 100 років досліджень фізики елементарних частинок в Україні і є нагодою для осмислення місця України в історії науки та її внеску у розвиток фізики XX–XXI століть.

Статті цієї збірки знайомлять читача з сучасними поглядами на окремі розділи історії фізики в Україні, розвиток відповідних наукових шкіл, діяльність визначних учених і внесок українських наукових інституцій у світову науку. Водночас вони торкаються питання про місце науки у культурній спадщині суспільства. Адже лабораторії, архіви, наукові прилади, дослідницькі центри, біографії вчених і створені ними знання є такою ж невід'ємною частиною національної спадщини, як пам'ятки архітектури, мистецтва чи літератури.

Сучасна Європа дедалі більше уваги приділяє дослідженню та збереженню наукової спадщини як важливого складника культурної політики. Україна є органічною частиною цього процесу. Наше завдання полягає не лише у збереженні матеріальних свідчень розвитку науки, а й у відновленні інтелектуальної традиції, поверненні українського контексту до світової історії науки та формуванні нової культури пам'яті, заснованої на відкритості, академічній доброчесності й міжнародній співпраці. Саме в цьому полягає призначення цієї збірки. Вона віддзеркалює погляди її авторів і жодним чином не претендує на остаточне слово в осмисленні історії фізики в Україні, зокрема і фізики високих енергій. Навпаки, вони запрошують до дискусії навколо висвітлених питань, подальшого наукового діалогу, відкриття нових джерел і переосмислення усталених підходів.

Переконаний, що представлені матеріали становитимуть інтерес для фізиків, істориків науки, дослідників культурної спадщини, викладачів і студентів, а також для всіх, хто прагне глибше зрозуміти місце України у світовій історії науки. Вони сприятимуть зміцненню міжнародного авторитету української науки, розвитку нових досліджень і збереженню інтелектуальної спадщини для майбутніх поколінь.

Сьогодні Україна не лише виборює своє майбутнє. Вона повертає світові власну історію, історію держави, яка впродовж століття була одним із важливих центрів розвитку світової науки і яка сьогодні впевнено утверджує своє місце в європейському та глобальному науковому просторі. Саме наукова спадщина, збережена, осмислена й належно представлена світові, є запорукою того, що нові покоління українських учених творитимуть майбутнє, спираючись на власну інтелектуальну традицію та цінності відкритої європейської науки.

Анатолій Загородній,
Президент Національної Академії Наук України

Внесок України у розвиток фізики елементарних частинок

Т. Гриньова (CNRS, Франція),
М. Стріха (Київський національний університет ім.Тараса Шевченка, Україна),
В. Греков (Музейно-культурний комплекс УФТІ, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України, Харків, Україна)

1. Вступ

Досягнення українських вчених часто приписують «Російській імперії» або «Радянському Союзу» (СРСР), а також численним країнам, до яких деякі з них емігрували, щоб врятувати своє життя та продовжити свої наукові дослідження. Хоча і Російська імперія, і СРСР були багатоетнічними державами, в англійській мові всіх їхніх мешканців часто помилково називають Russian[1], тобто росіянами. Отже, головним завданням цієї статті є визначення того, хто може вважатися українськими вченими до проголошення

1 З Оксфордського словника англійської мови: Член східнослов'янськомовного народу, який проживає переважно в Росії та сусідніх країнах; уродженець або мешканець Росії, або (у ширшому сенсі) її колишньої імперії чи колишнього Радянського Союзу; особа російської національності. Original text [Oxford]: "Russian 1.a. A member of an East Slavonic-speaking people living primarily in Russia and neighbouring countries; a native or inhabitant of Russia, or (more widely) its former empire or the former Soviet Union; a person of Russian nationality."

незалежності України в 1991 році та окреслення їхніх досягнень в галузі фізики елементарних частинок.

Хоча коріння української національної ідеї можна простежити аж до часів Речі Посполитої (1569-1795) [Plokhy, 2010; Snyder, 2003], більша частина її сучасного розвитку відбулася за часів імперій, окрім короткого періоду незалежних держав у 1917-1921 роках під час/після Першої світової війни. З 1795 по 1917 рік територія сучасної України була розділена спочатку між Російською імперією/Австрійською імперією[2], а в 1922-1939 роках - СРСР/Польщею, з невеликими частинами в Румунії та Чехословаччині.

Політична ситуація для українців у всіх цих державах була суттєво різною: у Російській імперії до 1905 року не існувало політичних свобод, а українська мова була суворо обмежена у публічному вжитку; натомість Австрійська імперія з 1848 року була парламентською монархією, де українська мова частково визнавалася в місцевих адміністраціях, освіті тощо. Саме тому частина Західної України під владою династії Габсбургів на початку XX століття вважалася своєрідним «українським П'ємонтом», оплотом національних інституцій.

Як постановила конституція Української Радянської Соціалістичної Республіки (УРСР) 1929 року, "Українська соціялістична радянська республіка входить до складу Союзу радянських соціялістичних республік як суверенна договірна держава і зберігає за собою право вільного виходу з Союзу" [ВУЦВК, 1929, ст. І.3]. УРСР була одним із засновників Організації Об'єднаних Націй у 1945 році (окремо від СРСР). Міжнародно визнані кордони України набули своєї нинішньої форми у 1954 році.

Період становлення української нації збігається з розвитком систематичного розуміння структури нашого Всесвіту. На цей час припало введення поняття «хімічний елемент» [Lavoisier, 1789], відкриття структури атома [Thomson, 1897; Rutherford, 1911], поява і становлення квантової теорії у 1900-1927-х роках, відкриття

2 З 1867 року — Австро-Угорська імперія.

величезної кількості субатомних частинок у 1930-х – 1950-х роках, розвиток кваркової моделі та розуміння фундаментальних сил у 1960-х – 1970-х роках і, нарешті, створення та підтвердження Стандартної моделі фізики елементарних частинок з 1970-х років і донині. Вчені, народжені в Україні, які працювали у галузях хімії, фізики, математики та інженерії, відіграли важливу роль у цих досягненнях.

Ця стаття слугує кроком до відновлення історичної справедливості, повернення із забуття забутих імен та реконструкції внеску України у розвиток фізики елементарних частинок. У Розділі 2 розглядаються провідні українські установи в галузі фізики та техніки. У Розділі 3 обговорюється робоче середовище в цих інститутах до здобуття Україною незалежності. У Розділі 4 пояснюється роль української мови, як маркера української національної ідентичності. У Розділі 5 підсумовується вплив русифікації на населення України, а в Розділі 6 описуються хвилі еміграції та їхній вплив на українську наукову діаспору. У Розділі 7 окреслено критерії, що використовуються в цій роботі для визначення вчених як «українських». У Розділі 8 розповідається про перші статті з фізики українською мовою, а також про дослідження, які призвели до розвитку фізики елементарних частинок. У розділах 9-11 представлено внесок України в теорію фізики елементарних частинок, прискорювачі та експерименти відповідно. Розділ 12 розповідає про наукову дипломатію вчених з України.

2. Провідні українські установи в царині фізики та технологій

Перший університет (у сучасному розумінні цього слова) на території України було засновано[3] в 1784 році у Львові, який тоді входив до складу Австрійської імперії. Перший університет на українських територіях, що тоді входили до складу Російської імперії, було засно-

3 "Попередником університету була Львівська єзуїтська академія (у деяких внутрішніх документах її називають «університетом»), яка діяла в місті між 1661 і 1773 роками,.", коли Львів входив до складу Речі Посполитої. [Bilenky].

вано в Харкові в 1804/1805 роках. Потім університети постали також у Києві в 1834 році, в Одесі в 1865 році, та в Чернівцях в 1875 році. Хоча ці університети діяли повністю під імперським контролем, а українська мова не була мовою викладання, вони відіграли ключову роль у формуванні української інтелігенції. Науковці та студенти університету започаткували дослідження української історії, мови та культури, що призвело до українського національного відродження [Snyder, 2003]. Ще три університети з'явилися в 1918 році під час боротьби України за незалежність: у Дніпрі[4], Кам'янці-Подільському та Сімферополі[5]. Університети в Радянській Україні були в період між 1921 і 1933 роками реорганізовані в інститути народної освіти, що призвело до зниження академічних стандартів та від'їзду багатьох студентів та викладачів. Слід також відзначити створення університету в Ужгороді в 1945 році та в Донецьку в 1965 році.

У 19 столітті, коли індустріалізація збільшила попит на інженерів, науковців та технічних спеціалістів по всій імперії, було засновано низку політехнічних інститутів: перший постав у Львові в 1877 році; інститути в Харкові в 1885 році, в Києві (КПІ) в 1898 році, в Дніпрі в 1899 році та в Одесі в 1918 році були засновані один за одним.

Після вищезгаданих закладів вищої освіти, у дві хвилі, у 1920-х та 1960-х роках, було створено низку спеціалізованих дослідницьких інститутів, що спеціалізуються як на фундаментальній та прикладній фізиці, так і на матеріалознавстві. Друга хвиля часто перетворювала на нові інститути філії вже наявних на той час установ. Усі ці інститути були впроваджені в структурі Національної академії наук України, яка була заснована в 1918 році як головна наукова організація країни, що координує дослідження між дисциплінами. Нижче наведено вибраний список цих установ, найбільш причетних до досліджень у галузі фізики елементарних частинок:

4 Дніпро називався Катеринослав до 1926 року (у короткий період української незалежності в 1919 році він був Січеславом), а Дніпропетровськ до 2016 року.

5 Спочатку він був утворений як Таврійська філія Київського університету.

- Інститут фізики (1929, Київ) — ІФ спочатку зосереджувався на фізиці твердого тіла, напівпровідниках, діелектриках, а згодом також на ядерній фізиці та фізиці елементарних частинок.
- Український фізико-технічний інститут (1928, Харків) — УФТІ, заснований у Харкові, тодішній столиці Української РСР, був першим дослідницьким центром з ядерної фізики та фізики елементарних частинок у Радянському Союзі [Ранюк, 2006]. Нині відомий як Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» (ХФТІ).
- Інститут монокристалів (1955, Харків) — спеціалізується на вирощуванні та дослідженні монокристалів, зосереджуючись на оптичних матеріалах, сцинтиляторах і функціональних кристалах для наукових та промислових застосувань [Тарасов, 2026; Тупіцина, 2026].
- Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова (1960, Київ) — ключова установа у галузі досліджень напівпровідників та мікроелектроніки.
- Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна (1965–2014 у Донецьку, нині в Києві) — зосереджується на дослідженнях у галузі фізики твердого тіла та матеріалознавства.
- Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова (1966, Київ) — ІТФ є провідним центром теоретичної фізики [Горенштейн, 2026].
- Інститут ядерних досліджень (1970, Київ) — ІЯД зосереджується на ядерній фізиці, ядерній енергетиці та пов'язаних технологіях.
- Інститут прикладної фізики (1991, Суми) — ІПФ спеціалізується на прикладній фізиці, зокрема фізиці плазми та електроніці.
- Інститут сцинтиляційних матеріалів (2002, Харків) — ІСМА був створений на базі Інституту монокристалів і зосереджується на розробці сцинтиляційних матеріалів

та детекторів для медичних приладів і фізики високих енергій [Тарасов, 2026; Тупіцина, 2026].

Інституційне становлення фізичної науки в Україні еволюціонувало від класичних університетів 18-19 століть до створення спеціалізованих дослідницьких центрів. ХФТІ від моменту свого заснування у 1928 році відігравав провідну роль у розвитку фізики елементарних частинок в Україні. Політехнічні інститути задовольняли потреби в інженерних кадрах, тоді як дві хвилі створення академічних установ (у 1920-х та 1960-х роках) заклали основу для досліджень у галузі фізики елементарних частинок в Україні. Ця розгалужена мережа наукових установ та університетів не лише акумулювала значний інтелектуальний потенціал та залучала таланти з інших частин колишнього СРСР[6], але й сприяла інтеграції України в глобальні проєкти з фізики високих енергій.

3. Робоче середовище в українських наукових установах до здобуття незалежності

Часто не згадують, що наприкінці 19-го та на початку 20-го століття (впродовж останніх десятиліть існування Російської імперії та перших двох десятиліть існування Радянського Союзу) вчені з України мали змогу отримати освіту в Західній Європі, а також здійснювати численні дослідницькі поїздки за кордон [Timoshenko, 1968; Gamow, 1970; Боголюбов, 1996]. Деякі з цих вчених, як-от Кирило Синельников, повернулися до України зі своїми іноземними дружинами [Lucie Str., 1944]. УФТІ мав не лише іноземних гостей, зокрема Бора, Ван дер Граафа, Дірака [Tan'shyna, 2019], але й іноземних дослідників у своєму штаті. У книзі «*My Life as Physicist*»

6 Лев Шубніков (н. Санкт-Петербург 1901, УФТІ 1930-37), Лев Ландау (н. Баку 1908, УФТІ 1932-37), Іван Обреїмов (н. Аннесі 1894, УФТІ 1929-1941), Антон Вальтер (н. Санкт-Петербург 1905, УФТІ з 1930), Олександр Ахієзер (н. Чериков у Білорусі 1911, КПІ 1929-34, УФТІ з 1934), Наум Ахієзер (н. Чериков у Білорусі 1901, у Харкові з 1922), Олександр Лейпунський (н. Драглі у Польщі 1903, УФТІ 1930-1941, ІФ у Києві 1941-1949), Дмитро Волков (н. Ленінград 1925, у Харкові з 1951), Геннадій Зінов'єв (н. Біробіджан 1941, 1958-63 Дніпровський університет, з 1975 в ІТФ у Києві), Олександр Капустніков (н. Баку 1945 р., з 1963 р. навчався і працював у Дніпровському університеті) та ін.

Віктор Вайскопф згадує[7] : “In 1933 I went to Kharkov, Russia[8] for almost a year, where it was possible to get a job with subsistence. Working in Kharkov at that time were Landau, Lifschitz, and Achiezer, and many other young Russian physicists[9]. Life in Russia was by no means easy. There was a serious famine[10] because of the difficulties of collectivization. But life was interesting and instructive.” [Weisskopf, 1972]. У цьому уривку підкреслюється, що за відсутності на той час незалежної української держави більшість науковців, які працювали в установах України, сприймалися за кордоном як «росіяни».

Невдовзі радянський уряд почав із підозрою ставитися до свободи наукових досліджень і міжнародної співпраці українських учених. Наприкінці 1930-х років було заарештовано 16 науковців УФТІ, зокрема Ландау; восьмеро з них згодом були страчені [Tan’shyna, 2019], як і багато інших українських учених того часу [Timoshyn, 2025]. Іноземних учених змусили залишити Українську РСР[11], причому деякі з них перед від'їздом пройшли через радянські в'язниці [Weissberg-Cybulski, 1951].

Як зазначено у звіті першої делегації ЦЕРНу до незалежної України у 1992 році “Indeed the highly centralized systems of the former USSR made it difficult for institutes outside the Moscow or St.

7 У 1933 році я майже на рік поїхав до Харкова, Росія, де можна було влаштуватися на роботу з можливістю заробітку. У Харкові в той час працювали Ландау, Ліфшиц, Ахієзер та багато інших молодих російських фізиків. Життя в Росії було аж ніяк не легким. Через труднощі колективізації був серйозний голод. Але життя було цікавим і повчальним.

8 Вайскопф використовує русифіковане написання назви Харків, яке було поширеним на момент публікації (1970). Він також помилково розмістив Харків у Росії, тоді як Харків був столицею Радянської України до червня 1934 року.

9 Ця цитата Вайскопфа є прикладом неправильного застосування терміну «російські фізики». Ландау (1908-1968) народився та навчався в Баку до 1924 року, його батьки були родом з сучасної Білорусі; він навчався в Ленінграді в 1924-1929 роках, а у 1929–1931 роках здійснив дослідницьку поїздку за кордон, перш ніж поїхати працювати до Харкова (1932-1937). Ліфшиц народився в Харкові. О. Ахієзер народився в сучасній Білорусі, але все своє життя пропрацював у Харкові.

10 Вайскопф перебував у Харкові під час Голодомору, який призвів до загибелі щонайменше 3,3 мільйона людей у Радянській Україні у 1932-1933 роках [Snyder, 2015 с. 53

11 Єдиним винятком у УФТІ був Ф. Ланге (1899-1987), який не зазнав жодних репресій [Ранюк, 2006].

Petersburg area to follow an independent policy of scientific contacts. A certain feeling of isolation is the result, despite the fact that Kharkov has produced quite a few eminent physicists (e.g. Landau, Lifshitz, Pomeranchuk). Few people we have met had had the opportunity to go abroad and our visit was for many the first direct contact with CERN.[12]" [CERN, 1992].

Наукові установи в Українській РСР систематично обмежувалися, їм нав'язувалися консерватизм та провінційність [Греков, 2026]. Тим, хто брав участь у секретних військових проєктах, не дозволялося публікувати свої результати. Слід зазначити, що до 1991 року завжди відбувалася міграція науковців[13] з установ на території України до імперських наукових центрів (Москва, Ленінград, Новосибірськ, Дубна тощо). Багато вчених не повернулися до України після Другої світової війни. Розглянемо кар'єру Дмитра Іваненка (1904 - 1994), теоретика, народженого в Полтаві, який передбачив протон-нейтронну структуру атомного ядра [Шендеровський, 2026]. Іваненко навчався в Полтаві, Харкові та Ленінграді, потім короткий період працював в УФТІ в Харкові (1929-1931), повернувся до Ленінграда, був засланий до Томська в Сибіру, повернувся до України, щоб викладати в Київському університеті в 1940-41 роках, а після Другої світової війни працював у Москві. Його сестрою була популярна українська письменниця Оксана Іваненко.

12 Дійсно, високо централізовані системи колишнього СРСР ускладнювали для інститутів за межами Москви чи Санкт-Петербурга проведення незалежної політики наукових контактів. Результатом є певне відчуття ізоляції, незважаючи на те, що Харків випустив чимало видатних фізиків (наприклад, Ландау, Ліфшиць, Померанчук). Мало хто з тих, кого ми зустріли, мав можливість поїхати за кордон, і для багатьох наш візит був першим прямим контактом із ЦЕРНом.

13 Л. Мандельштам, Н. Папалексі та І. Тамм (переїхали з Одеси в 1922 році), А. Александров (переїхав у 1930 році), Д. Іваненко (переїхав у 1932 році), Л. Ландау (переїхав у 1937 році, щоб уникнути чисток), Є. Ліфшиц (переїхав у 1939 році, услід за Ландау), М. Боголюбов (переїхав у 1941 році, поєднання посад в Україні та в Росії 1945-1956, 1966-1973), І. Халатников і О. Компанієць (переїхали у 1941 році), В. Огієвецький (переїхав у 1950 році), В. Баєр (переїхав у 1955 році), І. Хриплович (переїхав у 1959 році), І. Ліфшиц (поєднання посад 1962-68, переїхав у 1969 році), М. Азбель (переїхав у 1964 році) та багато інших. Більше обговорення в [Azbel, 1981].

У періоди скасування українських університетів між 1920 і 1933 роками або зниження рівня університетської освіти, як-от після Другої світової війни, найкращі студенти виїжджали на навчання до Москви та Ленінграда (або Дубни після 1956 року)[14], приєднуючись до лав своїх співвітчизників, які раніше переїхали до центрів Російської імперії[15]. Ці центри мали жваву українську емігрантську громаду [Timoshenko, 1968].

Вчені з України, які працювали або навчалися в Москві та Ленінграді, мали більше можливостей для дослідницьких поїздок за кордон як у 1920-30-х роках, так і після смерті Сталіна в 1953 році. Більшість досліджень у галузі фізики елементарних частинок та міжнародної співпраці в Радянському Союзі здійснювалися через новий дослідницький центр, створений у Дубні, за 110 км на північ від Москви, у 1956 році.

У 1975 році W.O. Lock опублікував ґрунтовний огляд історії співпраці між CERN і науково-дослідними установами СРСР у 1955–1970 роках [Lock, 1975]. Документ містить згадки про численних учених, народжених в Україні, зокрема В. І. Векслера (1907–1966), Г. Й. Будкера (1918–1977) [Johnsen, 1977], А. Ф. Йоффе (1880–1960) [Physics Today, 1961] та В. Ярба (нар. 1935), чию діяльність буде розглянуто далі в цій статті. У ньому також згадуються назви кількох радянських республік[16]; однак, дещо несподівано, відсутні будь-які згадки про «Україну» або прикметник «український», хоча Київ — у його русифікованій формі «Kiev» — згадується чотири рази, переважно як місто проведення Міжнародної конференції з фізики високих енергій (International Conference on High Energy Physics, ICHEP) 1959 року, однієї з найпрестижніших міжнародних конференцій з фізики елементарних частинок. Хоча Київ був одним

14 Переїхали на навчання до Ленінграда: Г. Гамов (1923), Д. Іваненко (1923), М. Бронштейн (1926); до Москви: Г. Будкер (1936), І. Халатніков (1941) [Теряева, 2019], Г. Горелік (закінчив 1972 і залишився), до Дубни: Л. Єнковський (1964-67) [Csörgő, 2025].

15 Родина Капіци, А. Йоффе, С. Тимошенко, І. Тамм.

16 “Georgia”, “Georgian”, “Latvia”, “Kazakh Academy of Science”, “Armenian Academy of Science”.

із небагатьох міст світу, які двічі приймали цю конференцію, у 1959 та 1970 роках, у тогочасній міжнародній науковій спільноті його не асоціювали з Україною [Lalli, 2024].

Четвертий Міжнародний симпозіум з історії фізики елементарних частинок, що відбувся в ЦЕРНі у 2025 році, був зосереджений на розробках у фізиці елементарних частинок з 1980 по 2000 рік. Внески "Kiev National University[17]" та "Kharkov Physical Technical Institute[18]" було згадано в презентації «Діаспора російських фізиків елементарних частинок після 1980-х років» [Shiltsev, 2025, с. 7]. Її автор показав, що лише 3 зі 102 дослідницьких груп з «радянських та російських лабораторій та університетів», які брали участь у різних експериментах у Лабораторії Фермі (Fermilab), США в 1972-2017 роках, базувалися в Україні. Якщо врахувати, що в 1930-х роках близько 25% радянських дослідницьких робіт з ядерної фізики було виконано в Україні [Ранюк 2006, с. 265], це свідчить про руйнівний вплив радянського проєкту на розвиток фундаментальних наукових досліджень в Україні. Ця презентація є також прикладом наполегливих зусиль російських вчених та діаспори щодо залучення української наукової спільноти до сфери свого впливу, спираючись на російську як спільну мову спілкування.

Вищезазначене підкреслює, що хоча Українська РСР (1921-1991) мала багато формальних прав на папері, а також представництво у 37 міжнародних організаціях [Жук, 2026], включаючи Організацію Об'єднаних Націй з 1945 року, її наукові установи не визнавалися «українськими».

Робоче середовище в українських наукових інститутах до 1991 року характеризувалося суперечливим поєднанням міжнародного визнання та імперських обмежень. Незважаючи на візити деяких провідних світових вчених (наприклад, Нільса Бора, Поля Дірака) та активну співпрацю з іноземними дослідниками, Голодомор та

17 Київський національний університет, зверніть увагу на русифіковане написання Київ в оригінальному тексті [Shiltsev, 2025, с. 7].

18 Харківський фізико-технічний інститут, зверніть увагу на русифіковане написання Харків в оригінальному тексті [Shiltsev, 2025, с. 7].

сталінські репресії 1930-х років серйозно підірвали кадровий потенціал УФТІ. Подальша централізація науки в СРСР призвела до систематичного «витоку мізків» до Москви та Дубни. Крім того, досягнення вчених з України часто помилково називали «російськими». Навіть за умов ізоляції та примусової провінціалізації українські центри підтримували високий рівень досліджень, хоча їхня суб'єктність на міжнародній арені (зокрема, в ЦЕРНі) залишалася в тіні радянського центру аж до відновлення незалежності.

4. Українська мова як маркер української національної ідентичності

До проголошення незалежності України в 1991 році володіння українською мовою було ключовим маркером української ідентичності. Однак у Російській імперії, а пізніше й у СРСР, успішна наукова кар'єра вимагала володіння російською мовою. Стефан Тимошенко (1878-1972), один із членів-засновників Української академії наук, згадує у своїй автобіографії [Timoshenko, 1968]: "In childhood we spoke a mixture of Russian and Ukrainian, and I grew up without knowing Russian well. That was probably the most troublesome subject for me in the entire realschole curriculum. In speaking Russian I was never able to get rid of my Ukrainian accent. Later, when I entered the Institute of Ways and Communication, the other fellows there called me a khokhol (a derisive nickname meaning Ukrainian).[19]"

Хоча в Російській імперії публікації українською мовою стикалися з майже повною забороною до 1917 року, наукові статті з фізики українською мовою публікувалися у Львові з 1877 року [Стріха, 2024; Пулюй, 1996]. Той факт, що перша така стаття І. Пулюя «Про радіометр або світловий млин» була опублікована у львівсь-

19 "У дитинстві ми розмовляли сумішшю російської та української мов, і я виріс, не знаючи російської добре. Це був, мабуть, найскладніший для мене предмет з усієї програми реальної школи. Розмовляючи російською, я так і не зміг позбутися свого українського акценту. Пізніше, коли я вступив до Інституту шляхів і зв'язку, інші студенти називали мене хохлом (зневажливе прізвисько, що означає українець)."

кому часописі "Правда" № 20 (1877), 772, «щомісячнику для літератури, науки та політики», підкреслює важливість природничонаукових досліджень для українського суспільства. Наукове товариство імені Шевченка (НТШ), яке мало вирішальне значення для становлення української наукової спільноти, було засноване у Львові у 1892 році. Основна частина наукових публікацій українською мовою на той час публікувалися в «Записках Наукового товариства імені Шевченка»[20]. Вони включали як оригінальні праці українських вчених, так і огляди результатів останніх досліджень, опублікованих іншими мовами. До складу товариства входили І. Пулюй, С. Тимошенко, А. Йоффе, М. Планк, А. Айнштайн та Д. Рожанський [Головач, 2018]. НТШ часто вважають неофіційною українською академією наук [Стріха, 2024].

Створення Академії наук України в 1918 році протягом короткого періоду незалежності України сприяло утвердженню української мови в її наукових установах, а також в освіті. Перший спеціалізований фізичний журнал українською мовою, «Фізичні записки», був започаткований Олександром Гольдманом (1884–1971) у 1926 році [Стріха, 2024; Козирський, 2020]. Халатніков, який навчався в українській школі в той період, згадує [Теряева, 2019]: «Що стосується загальної «українізації» тих років, то ми, мабуть, взагалі її не відчували. Нам довелося вивчити українську мову, і ми її вивчили. Це не сприймалося як катастрофа, на відміну від сьогоднішнього ставлення до таких реформ. Українська мова дуже мелодійна і її легко вивчати». Вивчення української мови в школах було важливим також і після Другої світової війни, як виявив харків'янин Марк Азбель (1932-2020), повернувшись до Харкова в 1944 році: "All courses were easy for me except for the Ukrainian language. … I was not the only failure; Kharkov having just been liberated, there were other children who were also ex-refugees and who had been in Siberia, or other regions outside the Ukraine, where this language was not

20 З 1892 року. "Збірник математичної, природписної та лікарської секції", де опубліковано основний корпус природничо-наукових статей НТШ, почав виходити з 1897 року.

studied in school.[21]" [Azbel, 1981]. У 1949 році Боголюбов (1909-1992) опублікував свої «Лекції з квантової статистики» українською мовою у видавництві Київського університету [Герасименко, 2026].

Цей прогрес був досить короткочасним: хоча розмовна мова ніколи не була заборонена, а видавництво українською мовою не заборонялося з 1917 року, вона зіткнулася з систематичним придушенням протягом тривалих періодів русифікації (до 1917 року та між 1932-1985 роками), що показано в **Таблиці 1**. Існувало упередження, що українською мовою «не було ні науки, ні наукової термінології[22]» порівняно з «російською мовою, яка мала значний корпус наукової літератури»[23] (хоча насправді це було не так, принаймні з 1920-х років).

Політика русифікації в поєднанні з регулярними чистками українських еліт[24] у Радянському Союзі (1930-ті, 1960-ті роки) призвела до домінування російської ідеології та мови не лише в українських школах, а й у його наукових установах:

- «У містах України 1958 в укр. школах навчався тільки 21% учнів (у 1926 — 97%)» [Дзюба].
- «Український фізичний журнал» видавався з 1956 року лише українською мовою (з розширеними англійськими анотаціями), потім у 1965 році «для зручності читачів з інших республік» було започатковано паралельну російську версію, а наприкінці 1976 року українську версію було ліквідовано «за непотрібністю» [Стріха, 2024].

---

21 "Усі предмети давалися мені легко, окрім української мови. … Я був не єдиним невдахою; щойно звільнили Харків, там були й інші діти, які також були колишніми біженцями та були в Сибіру чи інших регіонах за межами України, де цю мову не вивчали в школі."

22 "language there was neither science nor scientific terminology" [Timoshenko, 1968, c. 290].

23 "Russian, which had a large scientific literature" [Timoshenko, 1968, c. 290].

24 Зокрема, були страчені Лев Штрум (1890-1936) [Kragh, 2025], Лев Шубников (1901-1937) і Матвій Бронштейн (1906-1938). У в'язниці потрапили Дмитро Іваненко (1904-1994), Олександр Лейпунський (1903-1972), Олександр Гольдман (1884–1971), Вадим Лашкарьов (1903 – 1974) та багато інших.

У 1980-х роках здавалося, що україномовна фізика закінчилася, але ситуацію змінило національне відродження під час перебудови та здобуття незалежності, що настало після неї: в середині 1990-х років «Український фізичний журнал» знову став україномовним, а англійське видання з'явилося у 2004 році [Стріха, 2024].

Перепис населення України 2001 року[25] [ДКСУ, 2001] зафіксував, що 67,5% розмовляли українською мовою та 29,6% російською. Ті громадяни України, які вважали себе українцями, розмовляли 85% українською та 14,8% російською, тоді як ті, хто вважав себе росіянами, розмовляли 3,9% українською та 95,9% російською. Ці цифри поступово змінювалися протягом останніх десятиліть, особливо з початку повномасштабної російсько-української війни у 2022 році. Усі опитування останніх років демонструють понад 90% носіїв української мови на контрольованій урядом території. Ці зміни зумовлені як реальним переходом у мовних практиках, так і тим фактом, що близько 20% національної території, де у 2001 році домінувала російська мова, більше не перебуває під контролем України.

Використання української мови в наукових публікаціях здавна слугувало маркером національної ідентичності, попри системні обмеження в Російській імперії та СРСР. Від перших праць Івана Пулюя в журналах Наукового товариства імені Шевченка до періоду «коренізації» 1920-х років відбувалося активне формування термінології та видавничої бази. Однак хвилі репресій проти еліт та запровадження російської мови як мови «вищої науки» призвели до поступового витіснення української мови з академічного обігу. Сьогодні, незважаючи на тривалі наслідки русифікації, незалежність та національне відродження повернули українській мові статус державної мови в науці, що є критично важливим для міжнародної ідентифікації української наукової спільноти. Однак наслідки десятиліть цієї мовної політики відчуваються серед науковців з України

25 Перепис населення 2001 року був найновішим і єдиним переписом, проведеним на сьогодні в незалежній Україні.

Таблиця 1. Основні періоди українізації та русифікації на основі [Дзюба]. Не вказано періоди часткового «пом'якшення» русифікації, наприклад, 1905-1910, хрущовська відлига (1953-1958) та перебудова (1985-1991).

Українізація	**Русифікація**
	Імперська русифікація (до 1917 р.) Обмеження[1] української мови та культури (наприклад, повна заборона використання української мови в адміністрації, освіті, суворі обмеження на українську художню літературу та театр, тощо); просування російської мови в усіх сферах суспільного життя; сприйняття української ідентичності як загрози.
Революційна українізація (1917–1921) Відродження протягом короткого періоду незалежності України; поширення української мови в адміністрації та освіті.	
Рання радянська коренізація (1923 – 1931) Офіційна політика українізації, що просувала українську мову та культуру в освіті, управлінні та засобах масової інформації як інструмент «побудови соціалізму»; поширена українізація шкіл та видань.	
	Сталінські репресії (1932–1953) Різке завершення політики українізації, чистки українських еліт, Голодомор (1932-1933), придушення мовних реформ. Російська мова закріпилася як основна мова управління, освіти та професійної мобільності.

1 Валуєвський циркуляр 1863 року та Емський акт 1876 року.

Українізація	Русифікація
	Пізня радянська русифікація (1958 – 1985) Реформи освіти на користь російської мови; зменшення кількості україномовних публікацій; російська мова стає домінуючою в містах та вищих навчальних закладах.
Незалежність (з 1991 р.) Відновлення та просування української мови як державної; поступове поширення української мови в суспільному житті, освіті та засобах масової інформації (змінюється з часом).	**Часткова окупація Росією** (з 2014 року) Політика Росії на тимчасово окупованих територіях України подібна до тієї, що здійснювалася за часів сталінських репресій. Усі форми україномовної публічної діяльності там заборонені та переслідуються.

навіть сьогодні, через 35 років після проголошення незалежності України. Широке використання російської мови науковцями з України та українською науковою діаспорою досі ускладнює їхню ідентифікацію як українців за кордоном.

5. Вплив русифікації на населення України

Окрім заходів щодо сприяння використанню російської мови, описаних вище, політика русифікації включала різноманітні інші кампанії з інтеграції українського населення:

- шляхом заохочення перехресних шлюбів [Анна Іоанівна, 1905], типові результати яких влучно задокументовані в автобіографії Гамова, який народився в Одесі: "один з моїх предків по батьківській лінії був офіцером Імператорської російської армії і був направлений з Санкт-Петербурга (нині Ленінград) десь на початку вісімнадцятого століття, щоб ліквідувати непокірних запорожців[26]… З боку моєї

26 Козаки Війська Запорозького створили напівавтономну політичну одиницю на півдні та в центрі України, яка кинула виклик владі Речі Посполитої, Російського царства та Кримського ханства (16-18 століття). Як військова та політична сила, що чинила опір іноземному пануванню, вони були натхненниками для утвердження української державності та національної ідентичності. [Plokhy,

матері є довгий рід південного духовенства, яке стверджувало, що походить від Запорожців"… [Gamow, 1970];

- шляхом заохочення та сприяння переселенню населення з інших регіонів Російської імперії до України [Plokhy, 2015], яке посилилося за часів Радянського Союзу після скорочення населення після Голодомору, Другої світової війни тощо. Наприклад, родина Боголюбових переїхала до Києва в 1913 році, коли його батька було прийнято на роботу викладати в Київський університет [Боголюбов, 1996];
- завдяки імперським [Российская империя, 1889] та радянським програмам переселення велика кількість українців мігрувала як до імперських центрів, так і до віддалених регіонів Російської імперії та Радянського Союзу, включаючи Далекий Схід. За переписом населення СРСР 1959 року, кількість українців у Росії[27] становила близько 3359 тисяч осіб [СССР, 1959], дещо зменшившись до 3346 тисяч до 1970 року [СССР, 1970], що було зумовлено русифікацією та асиміляцією[28], переміщенням та еміграцією, про які йдеться в наступному розділі. Наприклад[29]:
- П. Капиця (1894-1984) народився в Кронштадті поблизу Санкт-Петербурга; його мати походила з дворянської родини Стебницьких з Волині в Україні, а батько — з Бессарабії.
- І. Тамм (1895–1971) народився у Владивостоці, хоча його родина була з Єлисаветграда (нині Кропивницький), і він закінчив школу та гімназію в Єлисаветграді, потім

2015]

27 В решті тексту використовується для позначення Російської Федеративної Соціалістичної Республіки (1921-1991).

28 Дітям від змішаних шлюбів у СРСР дозволялося у віці 16 років обирати свою етнічну приналежність, і багато хто надавав перевагу декларуванню себе як росіян у внутрішніх паспортах. У них не було вибору, якщо обоє батьків були однієї національності. Ця інформація також записувалася в СРСР у свідоцтвах про народження та шлюб. Ця інформація більше не записується в українських паспортах та свідоцтвах про народження.

29 Більше прикладів було наведено у виносках 13-15.

навчався в Единбурзі та Москві; з 1918 року викладав у Таврійському університеті в Сімферополі, а в 1921–1922 роках в Одеському політехнічному інституті; з 1922 року працював у Москві.

- В. Векслер (1907-1966) народився в Житомирі, його родина переїхала до Москви в 1915 році.
- А. Зельманов (1913-1987) народився в Гадячі (Полтавська область), його родина переїхала до Ленінграда в 1924 році.
- І. Шкловський (1916-1986) народився в м. Глухів Сумської області, у 1930 р. родина переїхала до Казахстану.
- Г. Будкер (1918-1977) народився в Українській Народній Республіці в 1918 році, після навчання та роботи в Московській області (1941-1958) заснував Інститут ядерної фізики в Новосибірську, який зараз носить його ім'я [Johnsen, 1977].

Результати радянської політики русифікації чітко видно в даних перепису населення, наведених у **Таблиці 2**: російське населення України неухильно зростало та подвоїлося між 1928 та 1989 роками, тоді як відсоток українського населення в Україні зменшився за той самий період. Збільшення відсотка українців у 2001 році не пов'язане зі збільшенням фактичної кількості людей, а є радше артефактом зменшення загальної чисельності населення. Водночас єврейське населення України, яке було третім за величиною у світі наприкінці 1920-х років після США та Польщі [Linfield, 1928], скоротилося через Голодомор, Голокост, радянську політику асиміляції та переміщення населення в межах СРСР, а також хвилі еміграції, про які йдеться в наступному розділі.

Важливо також відзначити урбанізацію населення України після 1928 року. Незважаючи на те, що в 1900 році понад 90% етнічних українців проживали в сільській місцевості, а міста на території України мали (з адміністративних причин імперської політики) переважно змішане російсько-єврейсько-українсько-польське на-

селення, у 1950-х роках як більшість українців проживала вже в містах, так і більшість населення міських районів в Українській РСР тепер становили етнічні українці.

Політика русифікації спричинила глибокі демографічні трансформації в Україні, заохочуючи міжетнічні шлюби, масове переселення та асиміляцію. Статистичні дані свідчать про швидке зростання частки російського населення (з 9,5% у 1928 році до 22,1% у 1989 році) на тлі міграції української інтелектуальної еліти до імперських центрів. Приклади Капиці, Тамма, Векслера та Будкера ілюструють масштаби міграції цих науковців, чиє українське коріння часто приховувалося радянською системою. Водночас відбувся глибокий зсув у національному складі міського населення та трагічне зникнення єврейської громади, що докорінно змінило соціально-етнічний ландшафт країни та умови для розвитку української науки.

6. Еміграція з території України

Окрім переміщень населення в межах території Російської імперії/Радянського Союзу до 1991 року, про які йшлося в попередньому розділі, за останні 150 років з території України відбулося шість хвиль еміграції, які узагальнені в **Таблиці 3**.

Перша хвиля (1880-1915) була зумовлена еміграцією сільськогосподарських робітників, ремісників та дрібних торговців, які рятувалися від економічних труднощів, швидкої індустріалізації та погромів [Rovenchak, 2018; Petrovsky-Shtern, 2014, с. 18]. Не дивно, що у цієї хвилі не було імен відомих науковців. Біографії М. Остроградського (1801-1862), І. Пулюя (1845-1918) та С. Тимошенка (1878-1972) ілюструють, як легко вчені цієї епохи могли подорожувати Європою для навчання, досліджень чи відпочинку, користуючись перевагами інтегрованої світової економіки. Вчені та інженери, емігранти з цієї хвилі, зазвичай залишили Україну маленькими дітьми або народжувалися за кордоном і більшу частину свого навчання проходили за кордоном. Прискорення еміграції

Таблиця 2. Відсоток українців, росіян та євреїв у населенні України за результатами перепису населення 1928 року [Кльований, 1928] (лише в межах Української РСР на той час), 1959 [СССР, 1959], 1970 [СССР, 1979], 1989 та 2001 років [ДКСУ, 2001].

Загальна кількість населення	28,900,000	41,869,046	47,126,517	51,917,817	48,457,000
% від кількості населення загальної (міської)	1928 (міської)	1959	1970	1989	2001
українці	79% (38.5%)	76.8%	74.9%	72.7%	77.8%
росіяни	9.5% (27%)	16.9%	19.4%	22.1%	17.3%
євреї	6.5% (29.5%)	2.0%	1.7%	0.9%	0.2%
Міське	18.2%	н/д	н/д	65%	63%
Сільське	81.8%	н/д	н/д	35%	37%

наприкінці цієї хвилі було зумовлено Першою світовою війною з її військовим призовом.

Друга хвиля еміграції з України була зумовлена тими, хто намагався втекти від радянської влади після розпаду Російської імперії в 1917 році, Австро-Угорської імперії в 1918 році, а також невдачі спроб утвердити Україну, як незалежну державу. С. Тимошенко [Timoshenko, 1968], Е. Гінзтон [Cottrell, 1995] та Ж. Шарпак [Charpak, 2008] яскраво описують цей період: складні рішення, з якими вони та їхні родини стикалися, покидаючи свої домівки — іноді не один раз, а двічі; складні подорожі, які вони здійснювали, щоб дістатися до місця призначення. Деякі емігранти вважали себе росіянами та надавали перевагу російській мові (навіть якщо знали українську), ті, хто був більш «національно свідомим» [Rovenchak, 2018], не лише вважали себе українцями та надавали перевагу українській мові, але й створили розгалужену систему організацій української діаспори[30], особливо у Чехословаччині, де їх підтримував президент Т. Масарик.

30 Прикладами таких зусиль є Вільний український університет (з 1921 року) [Petrovsky-Shtern, 2014, с. 297-311], Українська господарська академія в Подебрадах (1922-1935) [Zavorotna, 2020], тощо. Ці організації мали на меті

Третя хвиля – це родини біженців із західних регіонів України, анексованих СРСР безпосередньо перед Другою світовою війною, та в'язні післявоєнних таборів для біженців в Австрії та Німеччині [Rovenchak, 2018; Kobchenko, 2020]. Л. Романків згадує: «Я поїхав з України, коли мені було 13 років. Коли увечері до Жовкви прийшли совєтські війська, то вже вночі з'явилися списки тих хто має бути розстріляний наступного ранку. У тих списках був мій батько, котрий працював адвокатом у Жовкві. Його встигли вивезти за ріку Солокію до Угніва, де якраз затрималися німці і так мій батько врятувався в німецький частині. А нас – мене сестру та маму вивезли наступної ночі. Для тих, хто хотів втекти від совєтської окупації, уночі їздив спеціальний неосвітлений потяг до Угніва. Якби я лишився в Україні, то був би у Сибіру, або розстріляний.» [Лазур, 2021]. Третя хвиля, в якій переважали професіонали (освічені лікарі, юристи, інженери тощо), посилила зусилля другої хвилі емігрантів щодо збереження української національної ідентичності.

Після придушення дисидентського руху 1960-х років, Шестиденної війни (1967) та вторгнення радянських військ до Чехословаччини у 1968 році, багато українських активістів усвідомили, що радянську систему неможливо реформувати зсередини. У межах політики розрядки у відносинах із Заходом радянський уряд дозволив еміграцію, переважно під приводом «возз'єднання сімей» [Petrovsky-Shtern, 2014, c. 58–60; Azbel, 1981]. Емігранти здебільшого були критично налаштовані щодо Радянського Союзу. Через переміщення вчених, народжених в Україні, до радянських наукових центрів у Росії, частина з них емігрувала саме звідти, як показано в **Таблиці 3**. Одним із наслідків цієї хвилі еміграції, яка тривала й після 1991 року, стало формування великої російськомовної єврейської діаспори, розселеної по всьому світу. Значна частина її представників мала походження з України[31].

підготовку фахівців для роботи в незалежній Україні після падіння радянської влади.

31 Дані перепису населення підтверджують міграцію євреїв з України до радянських центрів: якщо в 1928 році в Україні проживало 1796 тисяч євреїв, а

Наступна хвиля була зумовлена добровільною економічною міграцією після розпаду Радянського Союзу, і [Rovenchak, 2018] зазначає її «специфічну мовну особливість»: «велика кількість російськомовних українців, що становлять приблизно половину її представників». Емігранти цієї хвилі спиралися на наявні міжнародні зв'язки та мережі співпраці, які значною мірою були орієнтовані на радянські центри влади. С. Жук оцінив, що «між 1991 і 2005 роками переважна більшість (85 відсотків) пострадянської академічної міграції до Сполучених Штатів, принаймні, була російського походження… Понад 80 відсотків цієї діаспори на Заході складають москвичі, жителі Москви!»[32] [Zhuk, 2024]. Водночас чимало науковців, народжених в Україні, які оселилися за кордоном, навчалися або працювали в наукових установах Росії. Частина з них «ідентифікує себе не як українці (національно, етнічно, культурно, за мовою), а радше як росіяни, російськомовні, резиденти (пост)СРСР» [Rovenchak, 2018]. Це особливо стосується науковців старшого покоління, народжених в Українській РСР, які оселилися в Росії до 1991 року та ніколи не жили в незалежній Україні. Вторгнення Росії в Україну в 2014 році перервало зв'язки між російськими та українськими науковими установами: українці більше не їдуть навчатися та працювати до Росії. Тим часом українські установи розвинули прямі закордонні контакти [Гриньов, 2019], минаючи колишні радянські наукові центри (наприклад, асоційований статус України в програмі ЄС «Horizon-2020» у 2015 році, асоційоване членство України в ЦЕРН у 2016 році, LIA/IRP IDEATE з CNRS, Франція тощо).

Повномасштабне вторгнення Росії в Україну 24 лютого 2022 року започаткувало нову хвилю еміграції вчених з України. За

в Росії — лише 518 тисяч [Linfield, 1928], то до 1959 року єврейське населення України скоротилося до 840 тисяч порівняно з 897 тисячами в Росії [СССР, 1959]. Ця тенденція підкріплювалася більшою кількістю емігрантів з України, ніж з Росії, між 1970 і 1997 роками [Petrovsky-Shtern, 2014, с. 60].

32 Дослідження С. Жука було зосереджено на спеціалістах з російських досліджень (історія, антропологія, політологія) і потребує переробки для фізики елементарних частинок.

дуже приблизними оцінками, понад 10% активних дослідників покинули Україну у 2022 році, частина з них повернулася пізніше, коли ситуація стала більш передбачуваною. Цей процес досі триває, і його остаточний вплив наразі незрозумілий.

Історія еміграції з України за останні 150 років охоплює шість основних хвиль, кожна з яких по-своєму вплинула на наукову діаспору. Якщо перша хвиля була переважно економічною, то наступні (після 1917, 1945 та 1968 років) призвели до вимушеної еміграції інтелектуальної еліти через війни та політичні репресії. Еміграція дозволила багатьом ученим, народженим в Україні, таким як Г. Брейт, Ж. Шарпак, Г. Гамов, Е. Гінзтон, М. Гольдгабер, Г. Ватагін, — якщо назвати лише кількох, — зробити вагомий внесок у розвиток фізики елементарних частинок. Важливою проблемою залишається розмивання ідентичності: через те, що багато вчених перед еміграцією пройшли через російські наукові центри, їх упродовж тривалого часу сприймали як частину російськомовної або радянської діаспори, і лише тепер це починає змінюватися завдяки безпосереднім контактам України з міжнародними інституціями.

7. Критерії визначення вченого як українського

У попередніх розділах було окреслено основні труднощі у визначенні того, кого слід вважати українським вченим, виходячи зі звичайних критеріїв. Національність є проблематичною, оскільки Україна здобула незалежність лише у 1991 році (хоча з 1922 року мала формально суверенний статус у складі СРСР [ВУЦВК, 1929, ст. I.3]) та зазнала великих переміщень населення протягом останніх 150 років. Етнічна приналежність, культура та мова також є складними критеріями через довгострокову політику русифікації країни.

Таким чином, наше дослідження застосовуватиме принаймні один із чотирьох основних критеріїв для визначення вченого як українця:

Таблиця 3. Основні хвилі міграції з території України за даними [Rovenchak, 2018; Petrovsky-Shtern, 2014]. «*» означає виїзд з Москви/Санкт-Петербурга. ^ через родину. Якщо дата не вказана, родина переїхала незадовго до народження. Імена наведені латиницею, як їх знають за кордоном.

Період часу та основні напрямки еміграції	Причини	Репрезентативні науковці (рік від'їзду за кордон)
1-ша хвиля (1880-1915) до США, Канади, Бразилії, Аргентини, Палестини, Південної Африки	Економічні труднощі, погроми, нестача землі, політичний гніт за часів Австро-Угорської та Російської імперій, війна	H. Brown^, M. Chodorow^[2], M. Goldhaber^ (1914) and G. Goldhaber^[3], G. Breit^ (1915)[4], L. Lederman^
2-га хвиля (1919-1939) до Західної Європи (Чехословаччина, Франція, Німеччина, Польща), США, Палестина	Війни, голод (Голодомор 1932–1933 років), політичні переслідування	G. Kistiakowsky (1920), S. Timoshenko (1919, 1920), G. Wataghin^ (1920), M. Haissinsky (1921)[5], M. Moshinsky^ (1924), E. Ginzton^ (1919*, 1927), A. Smakula (1922, 1930), A. Chichibabin (1930*), G. Charpak^ (1926, 1931), G. Gamow (1933*), S. Deser^ (1935)[6]
3-тя хвиля (1940-1955) до Німеччини, США, Канади, Австралії	Переміщення населення під час Другої світової війни, нацистська окупація, радянські репресії, примусова праця	Z. Chraplyvy (1944), L. Romankiw^ (1944)[7], R. Hoffman^ (1949)
4-та хвиля (1970-1989) до США, Ізраїлю тощо.	Провал дисидентського руху 1960-х років	A. Vilenkin (1976)[8], M. Azbel (1977*)[9], E. Gliner^ (1980*)
5-та хвиля (1991-2021) до Північної Америки, Західної Європи, Ізраїлю	Економічні та професійні можливості, пострадянська трудова міграція. Деякі з цих науковців емігрували за кордон через Росію (*), проте після 2022 року лише небагато з них[10] залишилися в Росії.	E. Shuryak (1990*), G. Gorelik (1992*), V. Yarba (1992*), T. Hryn'ova (1997), V. Akulov[11] (1998), D. Kovalsky (1998*), A. Neronov (1999*), A. Boyarsky (1999*), M. Titov (2003*), M. Vyazovska (2005), S. Barsuk (2006*), L. Shchutska (2008*), O. Shadura (2014), V. Zhovkovska (2019)...
6-та хвиля (після 02.2022)	Війна	триває зараз

2 Chodorow, 2005.
3 Crease, 2012.
4 Hull, 1998.
5 Cottin, 1979.
6 Chang, 2023.
7 Лазур, 2021.
8 Stober, 2009.
9 Azbel, 1981.
10 Наприклад, І. Єлецьких працює в ОІЯД у Дубні з 2007 року.
11 https://esu.com.ua/article-43550

1. **Походження:** Народження в межах сучасних міжнародно визнаних державних кордонів України[33] [ВРУ, 1992].
2. **Приналежність:** Проведення досліджень у наукових установах України.
3. **Науковий внесок:** Заснування або розвиток наукових шкіл в Україні.
4. **Самоідентифікація:** охоплює українську культурну та політичну традицію, використання української мови, участь в українських наукових та культурних організаціях[34], тощо.

До 1991 року для науковців було складно та невигідно називати себе українцями, особливо враховуючи тиск тоталітарних систем. Крім того, з 1920-х років регулярно проводилися кампанії з дискредитації українського руху за незалежність як за кордоном, так і в Україні [Petrovsky-Shtern, 2014, с. 3–64]. Відлуння цих кампаній можна знайти у мемуарах відомих фізиків [Weisskopf, 1991, с. 13; Charpak, 2008, с. 9–11]. «*Загалом, протягом усієї холодної війни, і навіть сьогодні, радянська / російська розвідка намагалася переконати західну аудиторію, що українська діаспора та весь український рух за незалежність були організовані послідовниками Степана Бандери та «фашистськими» українськими колаборантами з нацистами під час Другої світової війни, які втекли до Америки та яких використовували американські розвідувальні служби в різних американських «імперіалістичних війнах» проти Радянського Союзу, а тепер проти Російської Федерації*» [Zhuk, 2024]. Тому особливо важливо, що і М. Планк, і А. Айнштайн, провідні діячі міжнародної наукової спільноти, стали членами в Науковому товаристві імені Шевченка відповідно у 1924 та 1929 роках [Головач, 2018]. У своєму листі про згоду вступити до товариства Планк написав:

33 «Україна» в решті тексту означає територію в межах державних кордонів України, як визначено у [ВРУ, 1992], навіть якщо подія відбулася до появи цього документа.

34 Наукове товариство імені Шевченка, Українська академія наук, Вільний український університет, Українська господарська академія в Подебрадах тощо.

«*Я вважаю, що Ви знаєте, що в Німеччині українська культура викликає жвавий інтерес, а українська політична боротьба повністю та віддано підтримується…*» [Головач, 2018].

Важливо бути точним у визначенні того чи іншого дослідника як українського, особливо для періоду до 1991 року, враховуючи весь перелік критеріїв, наведених вище. Наприклад, Мар'яна Смолуховського[35] не можна вважати українським фізиком, незважаючи на те, що всі його основні результати були отримані в 1898-1913 роках у період його роботи у Львівському університеті (тоді Австро-Угорщина), оскільки він весь час демонстрував свою сильну польську самоідентифікацію. Так само Миколу Боголюбова [Боголюбов, 1996; Герасименко, 2026] не слід розглядати лише як російського вченого, незважаючи на його народження та смерть у Росії та його роботу в Дубні. Тут мають бути взяті до уваги його сильна українська самоідентифікація (включаючи факт публікації деяких основних результатів українською мовою в той час, коли це було своєрідною політичною демонстрацією), його тривалий період професійної діяльності в Україні та його активна участь в роботі української наукової спільноти, навіть коли його основна дослідницька посада була в Росії. Випадок Лева Ландау складніший: етнічний єврей, народжений у Баку (нині Азербайджан), він отримав частину своїх основних результатів в Україні, а частину - в Росії. Однак, його особиста самоідентифікація була не російською і не українською (хоча він знав українську мову, працюючи в Харкові), а «радянською». Тому визначення «радянський фізик», запропоноване «Вікіпедією»[36], видається найбільш правильним.

Визначення вченого як «українця» в історичному контексті вимагає комплексного підходу, що ґрунтується на чотирьох критеріях: походження, приналежність, внесок у створення місцевих

35 Народився у 1872 році у Фордер-Брюлі (поблизу Відня), працював у Львові у 1899-1913 роках, де був президентом Польського товариства дослідників природи імені Коперника (1906–1907). Переїхав до Кракова у 1913 році та помер там у 1917 році.

36 https://en.wikipedia.org/wiki/Lev_Landau

наукових шкіл та самоідентифікація. Такий підхід допомагає уникнути спрощених інтерпретацій, спричинених тривалою відсутністю незалежної державності та політикою русифікації. Приклади Смолуховського (польська ідентичність), Боголюбова (українська самосвідомість) та Ландау (радянська ідентичність) демонструють важливість врахування особистої позиції та культурного контексту. Такий збалансований підхід допомагає відновити історичну справедливість щодо наукової спадщини України, протидіючи давнім спробам применшити її національну суб'єктивність в очах світової спільноти.

8. Передісторія фізики елементарних частинок

Перша стаття з фізики українською мовою в 1877 році була присвячена радіометрам. Її автор, Іван Пулюй (1845-1918), який народився в Гримайлові на Тернопільщині, був розробником катодних ламп (так званих ламп Пулюя), що дозволило йому відкрити Х-промені в 1895 році, або навіть раніше, незалежно від Вільгельма Рентгена[37] та отримувати високоякісні рентгенівські зображення. Спостереження Пулюя підтвердили, що Х-промені проникають крізь речовину, впливають на фотопластинки та мають можливі біологічні ефекти [Пулюй, 1996]. Він також висунув гіпотезу в серії статей «Промениста речовина електрода» (1880-1882), що катодні промені є потоками негативно заряджених частинок електрода [Головач, 2018], випередивши більш ніж на десятиліття відкриття електрона Дж. Дж. Томсоном у 1897 році [Thomson, 1897]. Досвід Пулюя підкреслює важливість оперативної публікації та оприлюднення власних відкриттів, а отже, встановлення наукового пріоритету.

Питання наукового пріоритету добре розуміла Марія Кюрі (уроджена Склодовська), яка отримала дві Нобелівські премії (1903, 1911) за дослідження явищ радіоактивності. Моїз Гайсинськийй[38]

37 Рентген отримав Нобелівську премію 1901 р. за відкриття Х-променів у 1895 році.

38 Його син, Жак Гайсинский (1935-2024), був відомим фізиком елементарних частинок [CERN, 2024].

(1898–1972), який народився в Таращі на Київщині, приєднався до лабораторії Марії Кюрі в Парижі у 1930 році, як особистий асистент. Дослідження М. Гайсинського згодом заклали основи сучасної радіохімії[39] [Haïssinski, 1957].

Питання наукового пріоритету також хвилювало фізиків з УФТІ, коли вони вирішили дослідити розпад атомів літію високошвидкісними протонами[40] після візитів Гамова та Кокрофта[41] до Харкова у серпні 1931 року [Lucie Str, 1944]. Такий експеримент готувався в Кембриджі з 1929 року. Він базувався на концепції квантового тунелювання, запропонованій Гамовим для пояснення альфа-розпаду ядра [Gamow, 1928; Новосядлий, 2026]. Експеримент у Харкові був завершений у жовтні 1932 року [Sinelnikov, 1932], на кілька місяців пізніше, ніж у Кокрофта та Волтона[42]. Тим не менш, К. Синельников, О. Лейпунський, А. Вальтер та Г. Латишев оголосили про своє досягнення на першій шпальті головної радянської щоденної газети «Правда» 22 жовтня 1932 року[43]. Цей результат вивів УФТІ (тепер відомий як ХФТІ) на передову досліджень ядерної фізики в Радянському Союзі.

Крім того, на початку 1940 року «харківські дослідники Фрідріх Ланге, Володимир Шпінель та Віктор Маслов подали патенти на ядерну бомбу та методи виробництва урану-235 – ще до аналогічних проєктів у інших країнах світу. Однак на той час ці ідеї вважалися

39 Мойз Гайсинський вивчав утворення та властивості колоїдних розчинів радіоактивних елементів, використовував електрохімічні та радіохімічні методи для дослідження сполук протактинію, полонію та кюрію, встановив фундаментальні принципи, що регулюють радіоліз води та водних основ, і передбачив електронні конфігурації, ступені окислення, іонні та атомні радіуси, потенціали іонізації та ключову хімічну поведінку важких елементів [Cottin, 1979].

40 Оскільки радіоактивність – це процес, за допомогою якого нестабільні атомні ядра спонтанно розпадаються, цей експеримент призвів би до контрольованої версії подібного явища.

41 Гамов, як Синельников та Ландау, які працювали у той час у Харкові, були знайомі з Кокрофтом з їхніх стажувань у Кембриджі, Велика Британія.

42 Цей результат приніс Кокрофту та Волтону Нобелівську премію з фізики 1951 р. [Cockcroft, 1932].

43 No. 293 (5458) [Ранюк, 2006, с. 100-103].

надто революційними та не отримали належної підтримки та розвитку в Радянському Союзі. Лише після атомних бомбардувань, що завершили Другу світову війну, стало зрозуміло, наскільки передовими насправді були дослідження, проведені в УФТІ. Незважаючи на це, роль Харкова часто ігнорується в підручниках та публікаціях з історії радянської ядерної енергетики, поступаючись місцем Москві» [Гриньова, 2026].

Навмисне забуття української наукової спадщини додатково ілюструється історією відкриття у ХФТІ в 1930-х роках Левом Шубніковим, Володимиром Хоткевичем, Георгієм Шепелєвим та Юрієм Рябініним надпровідників II типу, які зараз лежать в основі магнітів Великого адронного колайдера (ВАК) у ЦЕРНі. Їхні імена були заборонені в СРСР після радянських чисток, а відкриття забуте, аж до повторного відкриття цих матеріалів в 1961 році [Shepelev, 2011].

Розуміння структури атома та ядра, разом з експериментальними методами, розробленими для їх вивчення, забезпечили основу для досліджень у галузі фізики елементарних частинок. Водночас, у 1950-х роках, фізики здобули значний престиж у своїх країнах, оскільки їхній досвід виявився життєво важливим для розробки потужної нової зброї та стратегічних технологій. Цей авторитет дозволив їм домогтися фінансування нових наукових центрів і брати участь у міжурядових переговорах, що зрештою створило передумови для міжнародної співпраці у фізиці елементарних частинок. Цей розвиток подій та його вплив на міжнародні наукові зв'язки розглянуто в останньому розділі.

Вчені з України були на передовій досліджень, спрямованих на розуміння природи субатомних частинок, завдяки новаторським роботам І. Пулюя з катодних та Х-променів, і Г. Гамова щодо квантового тунелювання для пояснення експериментальних результатів альфа-розпаду, а також раннім проєктам з прискорювачів частинок та дослідженням використання ядерної енергії в Харкові. Незважаючи на репресії та приховування досягнень (зокрема, відкриття

надпровідників II типу Шубніковим), цей період сприяв формуванню висококваліфікованих наукових кадрів та закладенню основи для майбутніх досліджень у фізиці частинок.

9. Внесок у теорію фізики елементарних частинок та суміжні галузі

Прогрес у фізиці елементарних частинок спирається на тісну взаємодію між експериментом і теорією, причому експериментальні відкриття розкривають несподівані нові явища, а теоретичні моделі пояснюють їх і передбачають нові явища, спрямовуючи подальші дослідження, як це було у випадку з експериментами зі штучного розпаду літію швидкими протонами. Робота в теоретичній фізиці вимагала лише відмінної підготовки з сучасної фізики та математики, паперу та доступу до ідей, тоді як експериментальна фізика залежала від дорогого обладнання, матеріалів та стабільної інфраструктури, яких часто було мало або вони жорстко контролювалися за обмежених економічних умов, що робило теоретичні дослідження набагато доступнішими для фізиків у наукових установах України та СРСР загалом.

Провідним центром теоретичних досліджень у галузі фізики елементарних частинок в Україні довгий час був Харківський фізико-технічний інститут. Вичерпний огляд проведених там робіт можна знайти в [Храмов, 1991]. Першим керівником теоретичної групи з 1929 по 1931 р. був Д. Іваненко, відомий завдяки його протон-нейтронній моделі атомного ядра [Шендеровський, 2026]. Після його від'їзду, з 1932 по 1937 р. групу очолював Лев Ландау, який розробив концепцію «теоретичного мінімуму». Ця сувора система іспитів для студентів-теоретиків виховала покоління фізиків, які зробили новаторський внесок у квантову теорію поля, фізику елементарних частинок та ядра, теорію твердого тіла. Першими, хто склав теоретичний мінімум, були О. Компанієць (нар. Дніпро 1914-1974), Є. Ліфшиц (нар. Харків 1915-1986), О. Ахієзер (нар. Черіков, Білорусь 1911-2000) та І. Померанчук (нар. Варшава,

Польща 1913-1966). Перебуваючи в Харкові, Ландау разом з Ліфшицем, П'ятигорським та Розенкевичем почали писати десятитомний «Курс теоретичної фізики», який протягом багатьох років слугував базовим підручником з фізики. Після втечі Ландау до Москви харківська школа продовжувала процвітати під керівництвом О. Ахієзера у фізиці елементарних частинок та І. Ліфшица у теорії твердого тіла. Серед їхніх досягнень

- розробка О. Ахієзером та М. Шульгою (нар. Харків 1947-2024) квазікласичної теорії когерентного випромінювання каналованих та надбар'єрних електронів і позитронів у кристалах, яка має застосування у фізиці прискорювачів [Sytov, 2022],
- розробка М. Рекалом (нар. Донецька область 1938-2004) релятивістської теорії поляризаційних ефектів у розсіюванні електронів на дейтронах високих енергій та його розрахунки разом з О. Ахієзером електромагнітних характеристик адронів [Неклюдов, 2004],
- а також внесок Д. Волкова, В. Акулова та В. Сороки у побудову теорій супергравітації та суперсиметрії [Нурмагамбетов, 2026].

Теоретичні групи В. Огієвецького (нар. Дніпро 1928-1996) в ОІЯД у Дубні та А. Капустнікова (нар. Баку, Азербайджан 1945-2003) і В. Скалозуба (нар. Дніпро 1949) в Дніпровському університеті також працювали в подібних напрямках.

Ще одним провідним центром досліджень теоретичної фізики елементарних частинок в Україні був Київ, де сформувалася наукова школа навколо М. М. Боголюбова [Герасименко, 2026; Горенштейн, 2026]. Теорема Боголюбова–Парасюка [Боголюбов, 1955; Bogoliubow, 1957], виведена у 1955 році в Інституті математики Академії наук Української РСР спільно з О. С. Парасюком (нар. на Львівщині, 1921–2007) [Загородній, 2022], є одним із наріжних каменів сучасної квантової теорії поля, оскільки забезпечує строге математичне обґрунтування процедури ренормалізації розбіж-

ностей у діаграмах Файнмена. Після заснування Боголюбовим Інституту теоретичної фізики, ІТФ, у 1966 році до Києва переїхали такі фізики-теоретики, як

- Б. Струмінський, відомий своїми роботами над кварковою структурою адронів та, зокрема, запропонованим у 1965 році новим квантовим числом – кольором [Tkachov, 2009],
- а також Г. Зінов'єв, який відіграв ключову роль у ранній інтеграції української спільноти фізиків елементарних частинок до ЦЕРНу [Гриньов, 2026] та розвитку в Україні фізики релятивістських зіткнень важких йонів [Горенштейн, 2026], зокрема досліджень кварк-глюонної плазми[44].

Сучасні дослідження в ІТФ зосереджені на вивченні нових фазових станів речовини за надвисоких густин енергії [Горенштейн, 2026] та фізиці малих значень змінної Бйоркена x [Martynov, 2019].

Видатними представниками Львівської школи теоретичної фізики є Зенон Храпливий[45] (нар. Тернопільська область 1904-1972) та Василь Міліянчук (нар. Івано-Франківська область 1905–1958), відомі теоретичними роботами з квантової механіки та електродинаміки [Шендеровський, 2019].

Багато важливих теоретичних внесків також зробили вчені, які працювали за межами України, нижче згадано лише про деяких з них. Грегорі Брейт (нар. Миколаїв 1899-1981) відомий формулою Брейта-Вігнера, що описує резонансну поведінку в ядерній фізиці та фізиці елементарних частинок, а також роботою з релятивістських корекцій у структурі атома. Він також описав дуже рідкісний процес, у якому позитронно-електронна пара створюється внаслідок зіткнення двох фотонів; цей так званий процес Брейта-Вілера нещодавно спостерігався на ВАК [CMS, 2025]. Йосип Хриплович

44 Термін «кварк-глюонна плазма» був запропонований у 1978 році Е. Шуряком (нар. Одеса 1948).

45 Він покинув Україну в 1944 році. Син Зенона, Andrew Chraplyvy (нар. Сент-Луїс, Міссурі, США, 1950) відомий розробкою систем оптичного волоконного зв'язку.

(нар. Київ 1937–2024) відомий своєю ранньою роботою над теорією Янга-Міллса, відкриттям антиекранування в 1969 році – ключового інгредієнта того, що пізніше стало відомим як асимптотична свобода, а також дослідженнями слабкої взаємодії між електронами та нуклонами. Його теоретичні передбачення були підтверджені численними експериментами [Shifman, 2025].

Важливі теоретичні дослідження з теорії відносності були проведені в Інституті фізики в Києві Левом Штрумом (нар. Київ 1907-1936), який працював, зокрема, над частинками, що рухаються швидше за світло [Kragh, 2025], та Натаном Розеном (працював у Києві 1936-38) [Щербак, 2012]. Слід також відзначити основоположну роботу Матвія Бронштейна з квантової гравітації і Г. Гамова з моделі Великого вибуху та передбачення первинного нуклеосинтезу. Їхні наробки продовжив Петро Фомін (1930-2011) [Бакай, 2020], який працював у ХФТІ та ІТФ. У 1973 році він припустив, що Всесвіт може спонтанно виникнути внаслідок гравітаційної нестабільності квантового вакууму, об'єднавши загальну теорію відносності з квантовою теорією поля та заклавши ранню основу для квантової космології, галузі, яку далі розвивали Ераст Глінер (нар. Київ 1923–2021) та Олександр Віленкін (нар. Харків 1949).

За обмежених економічних умов в Україні теоретичні дослідження, що потребували менше ресурсів, часто були доступнішими і тому особливо помітними. Великі центри, такі як Харківський фізико-технічний інститут та наукові установи в Києві, Львові та Дніпрі, сприяли розвитку впливових шкіл теоретичної фізики. Фізики які народилися або працювали в Україні, відіграли значну роль у розвитку галузей від з фізики елементарних частинок до космології, формуючи ключові концепції, такі як суперсиметрія та супергравітація, асимптотична свобода, модель Великого вибуху тощо.

10. Внески у розробку прискорювачів

Експериментальна перевірка є вирішальною частиною встановлення будь-якої теорії. У фізиці елементарних частинок такі тести часто спираються на прискорювачі елементарних частинок.

Галузь фізики прискорювачів швидко розвивалася після своєї появи в 1930-х роках.

У 1944 році В. Векслер[46], незалежно від Едвіна Макміллана, відкрив принцип фазової стабільності, який зробив можливими сучасні синхротрони та прискорювачі високих енергій. Він також відіграв провідну роль у створенні протонного синхротрона на 10 ГеВ у лабораторії в Дубні, яка зараз носить його ім'я.

Розробка потужних мікрохвильових пристроїв, таких як резонаторний магнетрон для радарів, під час Другої світової війни [Cottrell, 1995; Yanovsky, 2016], дозволила генерувати інтенсивні електромагнітні поля коротких довжин хвиль, що започаткувало дослідження їх застосування для прискорення заряджених частинок у лінійних прискорювачах. Вони були зокрема використані в лінійному прискорювачі електронів Mark-I в Стенфордському університеті, який досяг енергії 6 МеВ у 1947 році. Лінійні прискорювачі Стенфорда зазвичай пов'язують з іменами Bill Hansen, Sigurd та Russell Varian та W.K.H. Panofsky (Панофський). Залишається поза увагою той факт, що першим директором Стенфордського центру лінійних прискорювачів (SLAC) був Едвард Гінзтон (1915-98), який народився в Дніпрі. Гінзтон[47] і Марвін Ходоров (Marvin Chodorow)[48] відіграли важливу роль у технічних розробках, які дозволили збільшити потужність клістрона на понад три порядки, що призвело до створення лінійних прискорювачів Mark II (49 МеВ, 1951), Mark III (1 ГеВ наприкінці 1950-х років), Mark IV (80 МеВ, 1955) та 2-мильного лінійного прискорювача у SLAC (20 ГеВ у 1966 році, збільшено до 53 ГеВ у 1989 році). Більш детальну інформацію про ці розробки можна знайти в [Cottrell, 1995]. Ці прискорювачі

46 «Вулиця В. Векслера» — єдина в ЦЕРНі названа на честь вченого, народженого в Україні.

47 Гінзтон також обіймав посаду генерального директора компанії Varian Associates (1964–1972), однієї з компаній, що стояли біля витоків Кремнієвої долини в Каліфорнії.

48 Родина М. Ходорова емігрувала до США з України незадовго до його народження [Chodorow, 2005]. Ходоров також зробив вагомий внесок у створення кафедри прикладної фізики Стенфордського університету.

уможливили розгортання масштабної програми з фізики елементарних частинок у SLAC, що призвела до чотирьох Нобелівських премій: у 1961 році за дослідження розсіювання електронів в атомних ядрах, у 1990 році за підтвердження існування кварків, у 1976 році за відкриття чарівних кварків та у 2008 році за точне вимірювання порушення CP-симетрії в B-мезонах [Panofsky, 2007; Тарасов, 2026].

Програму лінійного прискорювача електронів з енергією до 2 ГеВ в Україні було ініційовано А. Вальтером у ХФТІ в 1950-х роках [Ранюк, 2006]. Його спорудження здійснювалося під керівництвом Я. Файнберга[49], який запропонував і реалізував принципово новий метод забезпечення одночасної радіальної та фазової стійкості частинок у лінійних прискорювачах на тлі прискорювальних полів — метод знакозмінного фазового фокусування [Fainberg, 2005]. Лінійний прискорювач працював у ХФТІ з 1965 по 1990 рік і був прискорювачем електронів з найвищою енергією у Європі, а протягом кількох місяців – у світі, доки не почав працювати 2-мильний прискорювач у SLAC [Ранюк, 2006]. Слід зазначити, що Харківська програма залишалася здебільшого невідомою для вчених за кордоном, оскільки «більшість результатів ХФТІ до 1990 року були опубліковані в радянських журналах» [Levchuk, 2026]. Цікаво відзначити, що «велика проблема поляризації 1993 року» при зборі даних SLD-детектора у SLAC [Swartz, 2025] була вирішена завдяки препринту з Харкова [Levchuk, 1992].

Панофський зазначив під час свого першого візиту до СРСР у 1956 році, що «ми не бачили жодних експериментальних установок ні в ІТЕФ, ні в Дубні, які б не були створені за зразком попередніх західних робіт. Винятком із цього спостереження була лабораторія Будкера в Москві, де проводилися піонерські роботи з упровадження деяких сміливих нових технологій: експерименти з утримання плазми, імпульсні магніти з межами, сформованими вихрострумо-

49 Народився в Золотоноші Черкаської області в 1918 році. Помер у 2005 році [Fainberg, 2005].

вими шарами, а також інші новітні технології». Візит Панофського призвів до довгострокової співпраці між інститутом, який Будкер заснував у Новосибірську в 1959 році, та SLAC [Panofsky, 2007]. Герш Будкер найбільш відомий своїм винаходом методу електронного охолодження, який широко використовується в сучасних прискорювальних установках у всьому світі. У Новосибірську він ініціював будівництво кількох накопичувальних кілець: ВЕП-1 (1963), електрон-позитронного ВЕПП-2 2х700 МеВ (1967), ВЕПП-3 2х2,2 ГеВ (1972) та ВЕПП-4 2х7 ГеВ (1985). На цих машинах проводилися експерименти вивчення мезонних резонансів [Johnsen, 1977]. Інші вчені з України, такі як В. Байєр[50] (нар. Харків 1930-2010), працювали з Г. Будкером над розробкою електрон-позитронних колайдерів у Новосибірську.

Щоб фінансувати свої дослідження, вчені та інженери в Харкові, Стенфорді та Новосибірську будували багато менш високоенергетичних лінійних прискорювачів для використання у фізиці елементарних частинок, медицині та промисловості [Cottrell, 1995; Ранюк, 2006; Johnsen, 1977]. А українські заводи також постачали компоненти для великих міжнародних прискорювачів, наприклад, запорізький «ЗАПОРОЖТРАНСФОРМАТОР» - трансформатори для LEP200 у ЦЕРН у 1990-1992 роках [CERN, 1992].

В останні роки дослідження прискорювачів в Україні були зосереджені в Інституті прикладної фізики Національної академії наук України в Сумах, який був заснований та очолюваний Володимиром Сторіжком (н. Вільховатка, Харківська область, 1935). Фізики з України, такі як Віктор Ярба [Ярба, 2019] (н. Долино-Кам'янка, Одеська область, 1935), а також молодше покоління, Ярослава Профатилова, Андрій Носич, Євген Іванісенко, Анна

50 Покинув Україну, щоб захистити дисертацію в аспірантурі під керівництвом І. Тамма (захистив її у 1958 році). Його зведена сестра по батьківській лінії, Ніна Баєр, є матір'ю А. К. Гейма (лауреат Нобелівської премії з фізики 2010 року). Його батько Микола Баєр був засновником і першим ректором Кам'янець-Подільського університету, який став оплотом україномовної освіти протягом короткого періоду незалежності України у 1918-20 роках [П'ядик 2003].

Внученко, Володимир Родін, продовжують робити свій внесок у розвиток прискорювачів.

Розвиток фізики прискорювачів став результатом синергії фундаментальних ідей та інженерних проривів, де значну роль відіграли вчені українського походження. Відкриття принципу фазової стабільності Векслером, розробка потужних клістронів Гінзтоном у Стенфорді та створення унікальних методів фокусування та охолодження частинок Файнбергом і Будкером заклали основу для сучасних колайдерів. Діяльність у ХФТІ у Харкові, інституті Будкера в Новосибірську та SLAC у США демонструє паралельний прогрес у розвитку електронних прискорювачів, що призвело до низки Нобелівських премій. Сьогодні інтеграція українських фахівців та промислових потужностей у глобальні проєкти (зокрема, в ЦЕРН) забезпечує їхній постійний внесок у передову фізику прискорювачів у всьому світі.

11. Внески у експериментальну фізику елементарних частинок та суміжні галузі

Основну програму експериментальних досліджень у галузі фізики ядра та елементарних частинок в Україні започаткував Антон Вальтер (1905-1965) та зосередив її на електронному лінійному прискорювачі з енергією 2 ГеВ, який працював у Харкові у 1965-1990 роках. Павло Сорокін [Слабоспицький, 2003] очолював програму, яка була зосереджена на дослідженнях електромагнітних процесів з нуклонами та ядрами [Храмов, 1991; Ранюк, 2006]: наприклад, «результати, отримані харківськими фізиками щодо фотонародження одного піона на протоні, були включені до збірок Particle Data Group (PDG)» [Levchuk, 2026].

Але вплив вчених з України був глобальним. Підручники Ландау, написані для його українських студентів та разом з його українськими колегами, підготували покоління фізиків у всьому світі. Робота Гліба Ватагіна в Бразилії в 1934-48 роках стала переламною для створення там експериментальних та теоретичних

програм фізики елементарних частинок [Добригкайт, 2026], зокрема, великої дослідницької програми з космічних променів. Ласло Єнковському (1942-2025) приписують заснування школи процесів у передній області (“forward” фізики) в Угорщині [Csörgő, 2025].

Одним із найвідоміших фізиків-експериментаторів у галузі елементарних частинок, народжених в Україні, є Моріс Гольдгабер (н. Львів, 1911-2011). У 1934 році, навчаючись на докторантурі в Кембриджському університеті, він провів свій перший визначний експеримент – по фоторозпаду дейтрона, який дозволив виміряти масу нейтрона. Разом зі своєю дружиною Гертрудою Шарфф-Гольдгабер він у 1940-х роках встановив, що бета-частинки ідентичні електронам. Іншим його важливим відкриттям було визначення спіральності нейтрино в 1958 році, що стало ключовим елементом для розвитку теорії слабкої взаємодії. М. Гольдгабер був директором Брукгейвенської національної лабораторії в США з 1961 по 1973 рік і патріархом родини трьох поколінь американських фізиків [Crease, 2012].

Хоча з 1991 року в Україні не проводилося жодних експериментів з фізики елементарних частинок, українські вчені беруть участь у широкому спектрі міжнародних експериментів з фізики елементарних частинок: у ЦЕРНі [Горенштейн, 2026; Levchuk, 2026], у SLAC, у KEK, у DESY, у Fermilab тощо. Вони також зробили важливий внесок у розробку детекторів, починаючи з Жоржа Шарпака [Charpak, 2008], який, працюючи в ЦЕРНі наприкінці 1960-х років, революціонізував сучасні детектори фізики елементарних частинок, винайшовши багатодротову пропорційну камеру, що дозволило швидко, точно та електронно відстежувати частинки у високоенергетичних експериментах. Передові надлегкі технології міжз’єднань від науково-виробничого підприємства ЛТУ у Харкові використовуються в детекторі ALICE у ЦЕРНі [Горенштейн, 2026].

У 1992 році Людмила Нагорна з Інституту монокристалів у Харкові запропонувала використовувати кристали вольфрамату

свинцю ($PbWO_4$) для детекторів ALICE та CMS на ВАК ЦЕРНу [Тупіцина, 2026]. Харківські сцинтилятори також збирають дані для електромагнітного калориметра детектора Belle II в KEK (Японія), космічного телескопа FermiLAT та адронного калориметра експерименту CMS у CERN. Вони використовувалися в електромагнітному калориметрі експерименту BaBar у SLAC (США) та в системі тригера процесів мінімального зміщення (minimum bias) детектора ATLAS у CERN. Калориметричні вимірювання мали вирішальне значення для відкриття бозона Гіґґса в експерименті CMS, що було відзначено Нобелівською премією з фізики 2013 року, а вимірювання порушення CP у B-мезонах експериментами BaBar та Belle призвело до Нобелівської премії з фізики 2008 року [Тарасов, 2026].

Нещодавно Харківський інститут сцинтиляційних матеріалів (ІСМА) у співпраці з ХФТІ та Київським університетом зробили свій внесок у розробку технологічних пропозицій, моделювання, створення прототипів, випробування на пучках та інноваційних досліджень старіння нового люмінометра (PLUME) для детектора LHCb у ЦЕРНі. ІСМА також координував проєкт Horizon Europe TWISMA (2022-2025) за участю ЦЕРНу, зосереджений на дослідженнях інноваційних калориметрів на основі передових сцинтиляційних матеріалів для майбутніх експериментів фізики високих енергій [Сідлецький, 2025].

Експерименти з фізики елементарних частинок також вимагають зберігання та обробки величезних обсягів даних. Загальний обсяг даних ВАК за останнє десятиліття перевищує сотні петабайтів, розподілених по Всесвітній обчислювальній мережі ВАК (WLCG) для аналізу тисячами фізиків у всьому світі. Любомир Романків[51] [Шендеровський, 2019], співвинахідник сучасної технології магнітного зберігання даних на жорстких дисках на основі гальванізованих тонких магнітних плівок (розробленої спільно з IBM), забезпечив зберігання даних високої щільності, що лежить

51 1931-2024 роки. Народився у Жовкві Львівської області.

в основі сучасних обчислень. Його інновації були важливими для зберігання, адміністрування та аналізу величезних наборів даних, отриманих в результаті сучасних експериментів з фізики елементарних частинок.

Вчені, що народилися в Україні, як-от Микола Говорун[52], активно працювали над автоматизацією обробки даних для прискорювальних експериментів у ЦЕРНі та ОІЯДі [Ярба, 2019]. Його спадщину в ОІЯД вшанували суперкомп'ютером «Говорун» – науковою обчислювальною платформою, що використовується для моделювання та аналізу даних у сучасних експериментах у Дубні.

У Харківському ХФТІ розташований український обчислювальний центр Tier-2[53] в рамках Всесвітньої обчислювальної мережі ВАК (WLCG), який об'єднує глобально розподілені обчислювальні ресурси для обробки та аналізу величезних обсягів даних, отриманих в результаті експериментів на ВАК [Levchuk, 2026].

Вчені, пов'язані з Україною, зробили вагомий внесок у численні фундаментальні відкриття та технологічні прориви в експериментальній фізиці елементарних частинок. Внесок Моріса Гольдгабера у визначення маси нейтрона та спіральності нейтрино, а також винахід Жоржем Шарпаком багатодротяної пропорційної камери стали віхами у світовій науці. Відкриття бозона Гіґґса на ВАК у ЦЕРНі та порушення CP-симетрії в B-мезонах, яке було виявлено у КЕК, Японія, та SLAC, США, стали можливими завдяки харківським сцинтиляторам. Розробки Любомира Романківа в галузі магнітного запису даних та участь українських обчислювальних центрів у мережі WLCG забезпечують обробку колосальних масивів інформації, необхідної щоб покращити наше розуміння навколишнього світу.

52 1930-1989. Народився в Луганській області в 1930 році, навчався в Московському університеті в 1948-53 роках та здобув ступінь доктора філософії в 1955-1961 роках, працював у Харкові в 1954-55 роках та в ОІЯД з 1958 року.

53 Ще один обчислювальний центр Tier-2 знаходився в Інституті теоретичної фізики імені Боголюбова в Києві для обробки даних для експерименту ALICE. Ним керував Євгеній Мартинов (1948-2025).

12. Наукова дипломатія замість висновку

Векслеру належать слова: «Зараз існує три галузі фізики: експериментальна фізика, теоретична фізика та дипломатична фізика» [Panofsky, 2007]. Дійсно, Векслер, Будкер, Боголюбов, Йоффе та інші вчені з України відіграли вирішальну роль у відкритті радянської науки світові, починаючи з першої конференції «Атом за мир», що відбулася в Женеві в 1955 році [Lock, 1975; Lalli, 2024]. У 1956 році на Женевській конференції з фізики високих енергій Я. Файнберг представив свої ідеї принципово нового напрямку у фізиці прискорювачів — методи колективного прискорення. Його колега з ХФТІ, Д. Волков, мав змогу кілька разів відвідувати ЦЕРН у наступні роки [Нурмагамбетов, 2026], а молодше покоління українських фізиків (В. Ярба, М. Говорун [Ярба, 2019]) одержало можливість тривалого перебування в ЦЕРНі. Необхідне систематичне дослідження інституційних архівів та мемуарів, щоб оцінити проникність «залізної завіси» для фізиків з України, зокрема, щоб порівняти рівень співпраці з рівнем першої глобалізації (1870-1914), яка створила галузь фізики елементарних частинок. Варто також нагадати, що Грегорі Брейт[54], вчений з України, який приїхав до Сполучених Штатів підлітком, у квітні 1940 року запропонував Національній дослідницькій раді США, щоб американські вчені цензурували свою роботу, щоб запобігти її потенційному військовому використанню ворожими державами під час Другої світової війни — ідея, яка перегукується із сучасними закликами до наукових санкцій.

Окрім наукової співпраці в межах проєктів зі створення прискорювачів і детекторів, українцям довелося зустрічатися один з одним за столом переговорів під час холодної війни, зокрема у процесі обговорення питань контролю над озброєннями. Джордж Кістяковський[55] [Шендеровський, 2019], наприклад, був членом,

54 Г. Брейт очолював ранні дослідження атомної бомби в США.

55 1900-1982. Народився в Києві, у 1933 році став громадянином США, працював над Манхеттенським проєктом.

а згодом головою Науково-консультативного комітету при президентові США[56] у 1957–1961 роках. Чи згадували вони під час цих зустрічей про своє спільне походження та спільний досвід воєнних трагедій, які їх розділили? Чи були їхні українські ідентичності повністю переформатовані або стерті?

Потрібні додаткові дослідження, щоб зрозуміти вплив проголошення незалежності 1991 року на спільноту фізики елементарних частинок в Україні, коли обмеження на перетин Залізної завіси були зняті, але привілейований статус і більшість джерел фінансування зникли. Чи компенсувалося це свободою слова та можливістю представляти себе як українських вчених? Нещодавно відкриті документи архіву ЦЕРНу містять детальний опис заходів, яких ужив уряд незалежної України для забезпечення участі українських науковців в експериментах ЦЕРНу [CERN, 1992; Гриньов, 2026]. Ми сподіваємося, що наша стаття відкриє новий етап у розумінні того, як вчені з України формували галузь фізики елементарних частинок, що допоможе нам не лише відновити забуті імена, а й записати нові, надихаючи майбутні покоління фізиків.

Подяки

Ми вдячні всім учасникам наради «Український внесок у фізику елементарних частинок: історія та перспективи» за їхню активну участь та жваві дискусії, які надихнули нас на цю роботу. Ми також дякуємо тим, хто відповів на наші численні запитання, надіслав свої коментарі, виправлення та пропозиції. Одна з нас (Т.Г.) вдячна співробітникам бібліотеки ЦЕРНу за допомогу в доступі до великої кількості джерел, перелічених у списку літератури, а також за їхнє терпіння під час багаторазового поновлення цих книг. Деякі з них були придбані спеціально після нашого запиту в контексті цього дослідження, і ми сподіваємося, що ця робота викличе інтерес до

56 Цей комітет був створений 21 листопада 1957 року президентом США Ейзенхауером у відповідь на запуск «Супутника» Радянським Союзом. Радянську космічну програму координував С. Корольов (1907-1966), який народився в Житомирі в Україні.

них з боку інших користувачів ЦЕРНу. Ми також вдячні колегам з ICMA за їхню допомогу в публікації цієї роботи. Усі помилки, що залишилися, є нашими.

Посилання

Azbel, M. (1981). Refusenik: Trapped in the Soviet Union. London: Hamish Hamilton.

Bilenky S., Struminsky B. Lviv National University. The Internet Encyclopedia of Ukraine. https://www.encyclopediaofukraine.com/display.asp?linkpath=pages%5CL%5CV%5CLvivNationalUniversity.htm

Bogoliubow, N. N., & Parasiuk, O. S. (1957). Über die Multiplikation der Kausalfunktionen in der Quantentheorie der Felder [Про множення причинних функцій у квантовій теорії поля]. Acta Mathematica, 97, 227–266. https://doi.org/10.1007/BF02392399

CERN (1992). Relation with Non-Members States. Ukraine, 1992-1994. CERN-ARCH-DSU-DO-02-2-17. https://cds.cern.ch/record/1953628?ln=en

CERN (2024). Jacques Haissinski (1935-2024). CERN Courier, July 2024. https://cerncourier.com/a/jacques-haissinski-1935-2024/

Chang, K. (2023). Stanley Deser, Whose Ideas on Gravity Help Explain the Universe, Dies at 92. The New York Times, 8-10 May 2023. https://www.nytimes.com/2023/05/08/science/stanley-deser-dead.html.

Charpak, G. (2008). "Mémoires d'un déraciné, physicien, citoyen du monde", Paris: Odile Jacob. Також доступний в українському перекладі як Шарпак, Ж. (2014). Спогади вигнанця, фізика, громадянина світу. Видавництво Кальварія.

Chodorow (2005). Memorial resolution of Marvin Chodorow (1913-2005) https://web.archive.org/web/20111020145405/http://histsoc.stanford.edu/pdfmem/ChodorowM.pdf

CMS Collaboration. (2025). Measurement of light-by-light scattering and the Breit–Wheeler process, and search for axion-like particles in ultraperipheral PbPb collisions at √sNN = 5.02 TeV. Journal of High Energy Physics, 8, Article 6. https://doi.org/10.1007/JHEP08(2025)006.

Cockcroft, J.D. and Walton, E.T. (1932). Proc. Roy. Soc. A, 136, 619.

Cottin, M (1979). Monsieur Moïse HAÏSSINSKY au Laboratoire. JOURNAL DE CHIMIE PHYSIQUE. 1979. 76, n° 7-8.

Cottrell, A. G., & Cottrell, L. S. (Eds.). (1995). Times to remember: The life of Edward L. Ginzton. Berkeley: Blackberry Creek Press.

Crease R. and Goldhaber A. (2012). Maurice Goldhaber 1911–2011, National Academy of Sciences. http://biographicalmemoirs.org/pdfs/goldhaber-maurice.pdf

Csörgő, T. (2025). In Memoriam László Jenkovszky, Low-X workshop. https://indico.cern.ch/event/1490864/contributions/6682446/attachments/3132867/5558039/2025-09-09-Csorgo-4-Jenkovszky-v3.pdf

Fainberg, Ya. (2005). In Memory of Yakov Borisovich Fainberg (September 7, 1918–March 7, 2005). Plasma Physics Reports, Vol. 31, No. 10, 2005, pp. 891–892. Translated from Fizika Plazmy, Vol. 31, No. 10, 2005, pp. 959–960. https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/1.2101977.pdf

Gamow, G. (1928). Zur Quantentheorie des Atomkernes. Zeitschrift für Physik, 51, 204–212.

Gamow, G. (1970). My world line. New York: The Viking Press.

Haïssinski, M. (1957). La chimie nucléaire et ses applications. Paris: Masson.

Hull, M. (1998). Gregory Breit 1899-1981, Washington D.C.: National Academies Press. http://biographicalmemoirs.org/pdfs/breit-gregory.pdf

Johnsen, K. (1977). Gersh Budker. Nature 270, 459. https://doi.org/10.1038/270459a0

Kobchenko, K. (2020). Ukrainian emigration to Germany after WWII: Formation and Self-Representation of a Transnational Community (1945–1991), Euxeinos, Vol. 10, No. 30, https://gce.unisg.ch/fileadmin/user_upload/HSG_ROOT/Institut_GCE/Euxeinos/30/Euxeinos_30_71-89_Kobchenko.pdf

Kragh, H. (2025). Tachyons before tachyons: Lev Strum (1890–1936) and superluminal velocities. EPJ H 50, 9 (2025). https://doi.org/10.1140/epjh/s13129-025-00103-z

Lalli, R., & Navarro, J. (eds.) (2024). Globalizing Physics. Oxford: Oxford University Press.

Lavoisier, A. (1789). Traité Élémentaire de Chimie. Paris: Cuchet.

Levchuk, L. (1992). The intra-atomic motion of bound electrons as a possible source of a systematic error in electron beam polarization measurements by means of a Moller polarimeter, KFTI 92-32, https://inis.iaea.org/records/58e6a-15s46

Levchuk, L. (2026). NSC KIPT in experimental particle physics: from 2 GeV electron Linac to CMS experiment at LHC. https://indico.cern.ch/event/1603776/contributions/6848846/

Linfield, H. S. (1928). The American Jewish Year Book, Vol. 31 (October 5, 1929, to September 22, 1930 / 5690), pp. 299-334, https://www.jstor.org/stable/pdf/23601425.pdf

Lock, W.O. (1975). A history of the collaboration between the European Organization for Nuclear Research and the Joint Institute for Nuclear Research, and with Soviet research institutes in the USSR 1955-1970, CERN-75-07, https://cds.cern.ch/record/186009

Lucie Str. (1944). I married a Russian : Letters from Kharkov. London : George Allen & Unwin Ltd.

Martynov, E., Nicolescu, B. (2019). Odderon effects in the differential cross-sections at Tevatron and LHC energies. Eur. Phys. J. C 79, 461. https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6954-6

Oxford English Dictionary. Russian (n. and adj.) https://www.oed.com/dictionary/russian_n

Panofsky, W. K. H. (2007). Panofsky on physics, politics, and peace: Pief remembers. Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-69732-1.

Petrovsky-Shtern, Y., and Polonsky, A. (Eds.). (2014). POLIN: Studies in Polish Jewry (Vol. 26, Jews and Ukrainians). The Littman Library of Jewish Civilization. https://doi.org/10.2307/j.ctv2vr8vjf.

Plokhy, S. (2010). The origins of the Slavic Nations. Cambridge: Cambridge University Press.

Plokhy, S. (2015). The Gates of Europe. London: Allen Lane.

Physics Today (1961, January). https://aip.brightspotcdn.com/PTO.v14.i1.98_3.online.pdf

RASA, https://rasa-usa.org/

Rovenchak O. and Volodko V. (2018), "Comparative Analysis of the Identity and Practices of Post-war Representatives and the Contemporary Wave of Ukrainian Immigrants to the United States", Annales Universitatis Mariae Curie-Sklodowska Lublin - Polonia, vol. XLIII, I, p. 33. https://journals.umcs.pl/i/article/download/6541/5801

Rutherford E. (1911). The Scattering of α and ß Particles by Matter and the Structure of the Atom. Philosophical Magazine, Series 6, 21 (125), 669–688.

Shepelev, A. and Larbalestier, D. (2011). The discovery of type II superconductors, CERN Courier, October 2011. https://cerncourier.com/a/the-discovery-of-type-ii-superconductors/

Shifman, M., Vainshtein, A., Shuryak E., and Zelevinsky V. (2025). Iosif Khriplovich 1937–2024 CERN Courier, May 2025. https://cerncourier.com/a/iosif-khriplovich-1937-2024/

Shiltsev, V. (2025). Post 1980s Diaspora of Russian Particle Physicists. 4th international symposium on the history of particle physics. CERN. 10-13 November. https://indico.cern.ch/event/1480892/contributions/6386322/.

Sinelnikov, C., Leipunsky, A., Walther, A., and Latischev, G. (1932). The disintegration of lithium by high velocity protons. Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion, 2(3), 285.

Snyder, T. (2003). The reconstruction of nations : Poland, Ukraine, Lithuania, Belarus, 1569-1999. New Haven & London: Yale University Press.

Snyder, T. (2015). Bloodlands. London: Vintage.

Stober, D. (2009). Physicist: Universes pop up ad infinitum, Stanford report, 1 April. https://news.stanford.edu/news/2009/april1/hofstadter-lecture-tufts-cosmologist-alexander-vilenkin-040109.html

Swartz, M. (2025), https://indico.cern.ch/event/1480892/contributions/6377879/attachments/3170044/5635322/SLD_Electroweak_Physics_M_Swartz.pdf

Sytov, A., et al. (2022). First design of a crystal-based extraction of 6 GeV electrons for the DESY II Booster Synchrotron. European Physical Journal C, 82 (3), Article 197. https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10115-4

Tan'shyna, A. (2019). Titans of Ukraine, Ukr. J. Phys. 2019. Vol. 64, No. 1 https://ujp.bitp.kiev.ua/index.php/ujp/article/view/2019294/1320

Thomson, J. J. (1897). "Cathode Rays." Philosophical Magazine, Series 5, 44 (269), 293–316.

Timoshenko, S. (1968). As I remember Princeton, N.J.: Van Nostrand

Timoshyn D., Hryn'ova T., Kostiuk I. (2025), Ukrainian contribution to particle physics: historical perspective and prospects, PoS ICHEP2024 1197, https://arxiv.org/abs/2501.03878

Tkachov, F. V. (2009). A contribution to the history of quarks: Boris Struminsky's 1965 JINR publication (arXiv:0904.0343). https://doi.org/10.48550/arXiv.0904.0343

Weissberg-Cybulski, A. (1951). The Accused. Simon and Schuster.

Weisskopf, V. (1972). Physics in the Twentieth Century: Selected Essays, Cambridge (USA) and London (England): The MIT Press.

Weisskopf, V. (1991). The joy of insight, BasicBooks.

Yanovsky, F. (2016). Glimpses of Early Radar Developments in Ukraine and the Former Soviet Union, Radio Science Bulletin 358, pp. 35-68.

Zavorotna, N. (2020). in Scholars in Exile: The Ukrainian Intellectual World in Interwar Czechoslovakia Pages: 53–71 University of Toronto Press, https://utppublishing.com/doi/10.3138/9781487504458.004

Zhuk, S. (2024). The KGB, Russian Academic Imperialism, Ukraine, and Western Academia 1946-2024. Lanham: Lexington Books.

Анна Іоанівна (1905). Именной указ императрицы Анны Иоанновны князю Шаховскому, правителю Малороссии, о браках малороссиян (31 січня 1734 р.). Киевская старина, 91 (жовтень).

Бакай, О. С. та ін. (2020). До 90-річчя Петра Івановича Фоміна (1930–2011). Український фізичний журнал, 65(8), 735. https://doi.org/10.15407/ujpe65.8.735

Боголюбов, А. Н. (1996). Н. Н. Боголюбов: Жизнь и творчество. Дубна: ОИЯИ.

Боголюбов, Н. Н., & Парасюк, О. С. (1955). О вычитательном формализме при умножении причинных сингулярных функций. Доклады Академии наук СССР, 100 (3), 429–432.

ВРУ (1992). Верховна Рада України. Про державний кордон України. Відомості Верховної Ради України, (2), ст. 5. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1777-12#Text

ВУЦВК. (1929). Конституція (Основний Закон) Української Соціялістичної Радянської Республіки. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0001316-29#Text

Герасименко, В. (2026). Київські витоки сучасної математичної фізики. У цих матеріалах.

Головач, Ю., Гончар, Я., & Красницька, М. (2018). Фізика та фізики у Науковому товаристві імені Шевченка. Журнал фізичних досліджень, 22(4), 4003. https://doi.org/10.30970/jps.22.4003

Горенштейн, М., Перепелиця, С., & Трубніков, В. (2026). Фізика високої енергії щільності в ІТФ: історичний огляд. У цих матеріалах.

Греков, В. (2026). Відновлення наративу: шляхи переосмислення світового внеску української фізичної науки. У цих матеріалах.

Гриньов, Б. В., Тітов, М. П., & Стадник, П. О. (2019). Україна — CERN: шлях до співробітництва. Наука та інновації, 15(5), 93–105. https://doi.org/10.15407/scin15.05.093

Гриньов, Б., & Гриньова, Т. (2026). Україна–CERN: шлях до співпраці. У цих матеріалах.

Гриньова, Т., Греков, В., & Споденець, І. (2026, 17 лютого). Квант незалежності: Як Україна повертає свою історію фізики у світовий вимір. ZN.UA. https://zn.ua/ukr/TECHNOLOGIES/kvant-nezalezhnosti-jak-ukrajina-povertaje-svoju-istoriju-fiziki-u-svitovij-vimir.html

ДКСУ (2001). Державний комітет статистики України. Всеукраїнський перепис населення. https://web.archive.org/web/20110811204954/https://2001.ukrcensus.gov.ua/results/general/nationality/

Дзюба І.М., РУСИФІКАЦІЯ в українському контексті [Електронний ресурс]. https://www.history.org.ua/?termin=Rusyfikatsiia

Добригкайт, К. (2026). Гліб Ватагін та його місія в Бразилії. У цих матеріалах.

Жук, С. (2026). Академічні обміни та технологічне/промислове шпигунство ГРУ/КДБ на Заході. У цих матеріалах.

Загородній, А. Г., та ін. (2022). До 100-річчя видатного вченого Остапа Степановича Парасюка (20.12.1921–22.11.2007). Український математичний журнал, 74(2), 286–288. https://doi.org/10.37863/umzh.v74i2.6873

Кльований, Л. (1928). Географічний атлас України. Київ: Державне видавництво України.

Козирський, В. Г., & Шендеровський, В. А. (2020). До історії теоретичних досліджень в Інституті фізики НАН України. Оптоелектроніка та напівпровідникова техніка, 55, 58–82. http://www.iop.kiev.ua/assets/files/2020/vtp_history.pdf

Лазур, В. (2021). В Україні мене б вислали у Сибір чи розстріляли»: Любомир Романків про блискучу кар'єру в США та Apple. https://web.archive.org/web/20210417201817/https://www.radiosvoboda.org/a/lubomyr-romankiv-ibm-90-rokiv/31203042.html

Неклюдов, І. М., та ін. (2004). Пам'яті Михайла Петровича Рекала. Питання атомної науки і техніки, 4, 155–156. https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2004_4/article_2004_4_155.pdf

Новосядлий, Б. (2026). Джордж Гамов: від бета-розпаду до космологічного нуклеосинтезу. У цих матеріалах.

Нурмагамбетов, О. (2026). Професор Д. В. Волков у ЦЕРН. У цих матеріалах.

Пулюй, І. (1996). Зібрання праць. За ред. В. Шендеровського. Київ: Рада.

П'ядик, Ю. В., & Баженов, Л. В. (2003). Баєр Микола Миколайович. Енциклопедія Сучасної України. Інститут енциклопедичних досліджень НАН України. https://esu.com.ua/article-38794

Ранюк, Ю. (2006). Лабораторія № 1: історія ядерної фізики в Україні. Харків: АКТА.

Российская империя. (1889). «О добровольном переселении сельских обывателей и мещан на казенные земли и о порядке перечисления лиц означенных сословий, переселенных в прежнее время», Полное собрание законов Российской империи (3-е собрание). Санкт-Петербург, 1891. Т. 9 № 6198.

СССР. (1959). Всесоюзная перепись населения. https://web.archive.org/web/20241206162837/https://www.demoscope.ru/weekly/ssp/sng_nac_59.php?reg=2

СССР. (1970). Всесоюзная перепись населения. https://web.archive.org/web/20251212092033/https://www.demoscope.ru/weekly/ssp/sng_nac_70.php?reg=2

Сідлецький, О. (2025). Українські кристали для Великого адронного колайдера: коли наука сильніша за війну. Дзеркало тижня. 22 жовтня. https://zn.ua/ukr/TECHNOLOGIES/ukrajinski-kristali-dlja-velikoho-adronnoho-kolajdera-koli-nauka-silnisha-za-vijnu.html

Слабоспицький, Р. П. (2024). Сорокін Павло Володимирович. Енциклопедія Сучасної України. Інститут енциклопедичних досліджень НАН України. https://esu.com.ua/article-883374

Стріха, М. В. (2024). Українська мова і фізика: коротка історична ретроспектива (до 150-річчя Наукового товариства імені Шевченка). Укр. фіз. журн., 69(2), 124. http://jnas.nbuv.gov.ua/uk/article/UJRN-0001484461

Тарасов, В. (2026). Сцинтилятори ICMA на базі йодиду цезія в експериментах з фізики високих енергій та астрофізики. У цих матеріалах.

Теряева, Н. (2019). Академику Халатникову сто лет! Открытая Дубна, 18 октября. https://web.archive.org/web/20201031153708/https://open-dubna.ru/obshchestvo/7296-akademiku-khalatnikovu-sto-let

Тупіцина, І. (2026). Сцинтилятор PWO: як почалася історія. У цих матеріалах.

Храмов, Ю. (1991). История формирования и развития физических школ на Украине. Киев: МП Феникс.

Шендеровський, В. (2019). Вчені України у світовій науці. Київ: Простір.

Шендеровський, В. (2026). Славні скрижалі видатного фізика XX століття Дмитра Іваненка. У цих матеріалах.

Щербак, О. (2012). Натан Розен в Україні: невідомі сторінки життя та творчості, Вісник НТУ ХПІ, 42 (948) с. 179. https://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2012_42.pdf

Ярба, В. А. (2019). Здесь и там, или Там и здесь. Воспоминания физика. Дубна: ОИЯИ.

Відновлення наративу: шляхи переосмислення світового внеску української фізичної науки

В'ячеслав Греков
Відомчий науково-технічний музей
«УФТІ Музейно-культурний комплекс»,
Національний науковий центр
«Харківський фізико-технічний інститут»
Національної академії наук України

Це дослідження є розвідкою на перетині історії науки та постколоніальних студій. Стаття порушує критичне питання: як деконструювати імперський міф про «єдину російську науку» та повернути суб'єктність українським науковцям і внеску української фізичної науки загалом, і зокрема, фізики елементарних частинок у глобальний розвиток науки.

Проголошення незалежності України в 1991 році вперше за століття дало можливість українським дослідникам та діячам культури проводити власні студії та переосмислювати минуле України та українців, попри тривалий вплив попередніх режимів на українську академічну спільноту. Ця спадщина також чинить потужний вплив на іноземних науковців, зважаючи на тотальну російську пропаганду, яка привласнює всі минулі досягнення, водночас дискредитуючи будь-яких інших претендентів на ці успіхи. Початок російсько-української війни у 2014 році та повномасштабне вторгнення Росії 24 лютого 2022 року прискорили рефлексію над

українською культурою та історією. Фізика елементарних частинок та інші галузі фізики зазвичай асоціюються з російськими дослідниками. Разючим прикладом такої асоціації є так званий радянський ядерний проєкт. Згадуючи про ядерний проєкт, першою референцією зазвичай стає Курчатовський інститут у Москві. Хоча Український фізико-технічний інститут (згодом Харківський фізико-технічний інститут) був важливим центром фізичних досліджень. Власне, саме в УФТІ було засновано Лабораторію № 1. Директор інституту Кирило Синельников брав активну участь у ядерному проєкті Радянського Союзу, а Ігор Курчатов, якого вважають організатором і виконавцем радянського ядерного проєкту, мав тісні зв'язки з УФТІ та безпосередньо з Кирилом Синельниковим. Ця проблема висвітлена в низці досліджень, присвячених постаті Кирила Синельникова та історії Українського фізико-технічного інституту (Иванов, 1979; Коган, 1982; Бреславец, 2001; Ранюк, 2001; Ранюк, 2002; Танцюра, 2001; Швець, 2011). Важливим джерелом для дослідження історії взаємин Кирила Синельникова та Ігоря Курчатова, ролі УФТІ у становленні останнього як науковця, а також ролі інституту в радянському ядерному проєкті є мемуари Марини Курчатової. Вона була сестрою Кирила Синельникова та дружиною Ігоря Курчатова. Також велике значення мають спогади доньки Кирила Синельникова — Джилліан. У презентації під назвою «К. Д. Синельников та І. В. Курчатов — друзі, соратники, родичі» демонструється історія взаємин Кирила Синельникова та Ігоря Курчатова, деталізуються їхні професійні шляхи та підкреслюється роль Синельникова в реалізації радянського ядерного проєкту. Відповідно, переосмислення історії фізики елементарних частинок в Україні та інших галузей фізики є надзвичайно важливим завданням, оскільки наукова спадщина ще не ставала об'єктом такої рефлексії.

Щоб зрозуміти складність процесу переосмислення внеску українських фізиків, необхідно врахувати політику, яку проводила російська та радянська влада на підконтрольних їй територіях.

Влада як Російської імперії, так і Радянського Союзу систематично впроваджувала політику, спрямовану на розмивання місцевого інтелектуального та культурного простору. Яскравим прикладом є ситуація в історичній науці першої половини XIX століття. У цей період приблизно 50 відсотків українських істориків переїхали до Росії, більшість до Санкт-Петербурга та Москви. На їхнє місце прибували історики із периферійних регіонів (Grekov, 2025, с. 60-61). Згодом ця ситуація лише загострювалася.

У 2024–2026 роках у межах програми «Документуючи Україну» Інституту гуманітарних наук (IWM, Відень) було записано серію інтерв'ю зі співробітниками Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» (ННЦ ХФТІ). Проєкт мав на меті задокументувати особисту та інституційну історію українських фізиків, поєднуючи усну історію з архівними дослідженнями. Окрім академічного аналізу, він також спрямований на повернення українського внеску у світову науку та популяризацію фізики серед широкої аудиторії. Ми записали 32 інтерв'ю з представниками ХФТІ — не лише з дослідниками, а й з адміністративним персоналом, членами їхніх родин та мешканцями академічного містечка П'ятихатки[1]. Вони виникли навколо «Нового промислового майданчика» ХФТІ у другій половині XX століття. Записані та розшифровані інтерв'ю зберігаються в архіві Відомчого науково-технічного музею «УФТІ. Музейно-культурний комплекс» при ННЦ ХФТІ (Фонд АІ, одиниці зберігання 1454-1486). Ці записи стали основними джерелами для мого дослідження.

Усна історія дає змогу дослідити прояви колоніалізму на мікрорівні, включити прямо чи опосередковано, людей, які брали участь у розвитку фізичної науки в Україні, та залучити їх до прямої дискусії. Більше того, практика запису та архівування усних

1 Академічне містечко П'ятихатки розташоване на околиці Харкова. Воно виникло поруч із однойменним хутором як місце розгортання «Нового промислового майданчика» ХФТІ. Неподалік також є місце масових поховань радянських громадян, репресованих наприкінці 1930-х років, та польських військовополонених, розстріляних у 1940 році.

свідчень відкриває шлях для подальшого вивчення та реапропріації історії української науки, яка раніше була практично відсутня окремо від російської та радянської. Респонденти зазначали, що до 1991 року діяла система розподілу: випускників фізичних, технічних та інших факультетів цілеспрямовано направляли на роботу до конкретної установи або надавали можливість вибору з короткого списку. Парадоксально, але випускникам фізико-математичного факультету Харківського державного університету імені О. М. Горького, чиїми керівниками були відомі фізики ХФТІ, фактично забороняли залишатися на роботу в Харківському фізико-технічному інституті. До цієї групи входили й студенти під керівництвом Антона Вальтера. Таким чином, штат інституту значною мірою формувався ззовні, а це означало, що велика частина його співробітників була з інших республік СРСР (Інтерв'ю зі співробітниками, 2024-2025). Це сприяло стиранню національних відмінностей і традицій, а також конструюванню нової «радянської» нації з домінуванням російських рис. З огляду на це, вивчення взаємовідносин між центром і периферією є надзвичайно важливим завданням для процесу переосмислення внеску та ролі місцевих/республіканських фізиків і наукових установ. Традиційним прикладом репрезентації історії УФТІ є ідея ленінградського «десанту», який був відправлений до Харкова у 1929–1930 роках. УФТІ було засновано у 1928 році за ініціативи Абрама Йоффе, віцепрезидента Академії наук СРСР. До речі, Абрам Йоффе родом з України — він народився в місті Ромни Полтавської губернії. Він був ідеологом створення багатьох академічних центрів по всьому Радянському Союзу, і УФТІ став одним із них. Цю концепцію вперше запропонував Юрій Ранюк у своїй книзі «Справа УФТІ»: «Що стосується ленінградського "десанту" вчених, то він мав з'явитися в Харкові навесні наступного року» (Павленко, 1998, с. 130). Інший цікавий фрагмент стверджує: «Ленінградські "колоністи", як вони самі себе називали, або "варяги", як їх називали харків'яни, зазнали великих втрат під час трагічних подій, описаних у цій книзі»

(Павленко, 1998, с. 134). На жаль, Юрій Ранюк не вказав джерело та не надав детальнішої інформації. Проте можна припустити, що він мав особисті неофіційні контакти, оскільки був вельми шанованою та відомою постаттю. Такі формулювання підсвідомо транслюють ідею, що «цивілізація» та «знання» були принесені ззовні, ігноруючи місцеві умови. Концепція ленінградського «десанту» ігнорує той факт, що частина цих фізиків були українського походження або походили з інших республік Радянського Союзу і просто були зібрані в Ленінградському фізико-технічному інституті. Дійсно, тогочасна наукова система як Російської імперії, так і Радянського Союзу заохочувала існування лише кількох дослідницьких установ на всю державу та стимулювала переїзд перспективних науковців до цих центрів. Сама концепція ленінградського «десанту» потребує детального вивчення, зокрема: кого саме можна до нього зарахувати, який період він охоплює та яким був характер взаємовідносин між приїжджими та місцевим науковим середовищем.

Саме на переосмисленні ролі периферії зосереджені підходи Деколоніальних та Нових імперських студій. При застосуванні цих концептуальних рамок важливо пам'ятати, що Україна не була «класичною» колонією Російської імперії чи Радянського. Подібним чином Радянський Союз не був звичайною імперією з метрополією та заморськими володіннями. З огляду на це, застосування цих підходів до дослідження історії української фізики та її внеску має свої специфічні нюанси. Коротко ці підходи можна описати так: деколоніальні студії розглядають історію з точки зору місцевого населення та наголошують на його суб'єктності та внеску. Згідно з підходом нової імперської історії, наратив також змінюється. У центрі уваги перебуває не «колонізатор», а складні взаємовідносини центру і периферії та вплив «периферії» на «центр», з акцентом на історії центральної політики в межах конкретного регіону, що вивчається. Обґрунтованість цих підходів демонструється низкою прикладів із записаних інтерв'ю. Респонденти зазначали, що перспективних науковців часто переводили з Харківського

фізико-технічного інституту до Москви або, загалом, до російських інститутів (Утенков, 29.01.2025, с. 41). Низка перспективних напрямів досліджень також була перенесена до російських інститутів, наприклад, після смерті керівників лабораторій та відділів у Харкові. Цю тему також можна завершити коментарем про те, що багато технологічних винаходів, зроблених у Харківському інституті, які потребували будівництва заводів, були реалізовані в Росії (Давидов, 07.02.2025, с. 14-15). Це робило союзні республіки залежними від центрального уряду та зменшувало їхню частку в міжнародній торгівлі. Цікавим спостереженням є те, що респонденти узагальнюють досягнення фізичної науки, використовуючи поняття «радянської» науки. У деяких випадках, наприклад, при описі відрядження до Сарова[2], зазначається, що половина науковців там були українцями (Морозов, 27.02.2025, с. 12). Як наслідок, досягнення цих науковців та розвиток передових галузей фізики представляються вже не як українські, а як російські, оскільки Росія асоціюється з Радянським Союзом. Це відображає ширший процес привласнення досягнень Росією, який проявляється не лише у фізичній науці, а й у науці в цілому, а також у культурі та інших сферах.

На основі вищезазначених особливостей функціонування української фізичної науки та науки загалом, можна запропонувати наступні критерії для визначення того, кого можна вважати українським фізиком. Використовуючи термін «український фізик», ми не визначаємо етнічну приналежність науковця; натомість ми спираємося на сучасні підходи до інтерпретації терміна «український» (або будь-якого іншого демоніма, похідного від назви держави), де першочергове значення має державна або інституційна приналежність. Наявність хоча б одного з цих критеріїв є підставою для ідентифікації фізика як українського вченого. Першим критерієм є походження. Відповідно до нього, науковці, народжені на території

2 У радянські часи Саров був надсекретним закритим містом, також відомим як Арзамас-16. У 1946 році він зник з усіх мап, щоб стати ядерним серцем СРСР. Саме тут зрештою була створена перша радянська атомна бомба та розроблялася ядерна зброя.

України, визначаються як українські в широкому розумінні цього терміна. Другий критерій — самоідентифікація. Це більш складний фактор, оскільки протягом тривалого періоду ідентифікація себе як українця була небезпечною та шкідливою для професійного просування. Крім того, для багатьох фізиків національна ідентичність часто відігравала другорядну роль. Третім критерієм визначення «українськості» є науковий внесок. Згідно з ним, якщо основні або вагомі наукові здобутки були зроблені в межах України, це дає достатні підстави називати вченого українським. Останній критерій тісно пов'язаний із попереднім: основна інституційна приналежність науковця. Застосування такого багатогранного підходу стане першим кроком до всебічного переосмислення українського внеску в розвиток світової фізики, зокрема у галузі фізики елементарних частинок. Крім того, це продемонструє справжній масштаб впливу українських учених на еволюцію науки та їхню інтеграцію у світову наукову спільноту. Проте важливо зазначити, що ідентифікація фізика як українського вченого не є виключною категорією; у межах глобалізованого світу існування множинних ідентичностей є цілком припустимим.

Підсумовуючи це дослідження, можна стверджувати, що процес переосмислення внеску української фізичної науки є не просто академічним пошуком, а стратегічним кроком у протидії російській пропаганді. Протягом тривалого часу радянські та імперські наративи систематично стирали суб'єктність українських дослідників, привласнюючи їхні здобутки через політику «центру-периферії». Історія Українського фізико-технічного інституту (УФТІ) у Харкові є яскравим прикладом такої інтелектуальної колонізації. Попри те, що УФТІ був ключовим майданчиком для реалізації ядерного проєкту, його роль часто маргіналізувалася на користь московських інститутів. Крім того, такі концепти, як «ленінградський десант», слугували лише для закріплення уявлення про місцеву наукову школу як про другорядну чи похідну.

Метод усної історії, застосований у межах програми «Документуючи Україну» (Documenting Ukraine), надав унікальну можливість простежити прояви колоніалізму на мікрорівні. Інтерв'ю зі співробітниками ННЦ ХФТІ підтверджують існування системи цілеспрямованого розподілу кадрів, що перешкоджало наступності та формуванню українських наукових династій. Вимивання талановитої молоді до Росії та передача готових технологічних розробок на заводи РФСР призвели до того, що український інтелектуальний продукт маркувався як «радянський» або «російський».

Для відновлення історичної справедливості необхідно застосовувати рамки деколоніальних студій та нової імперської історії, які зміщують фокус із «центру» на внутрішню логіку регіонального розвитку. У цьому контексті пропонується оновлена система визначення поняття «український фізик», що базується на чотирьох критеріях: територіальне походження, особиста самоідентифікація, місце здійснення основний наукового внеску та інституційна приналежність. Такий підхід дозволяє виокремити українську науку із загальної «радянської маси» та визнати її повноправним, автономним суб'єктом світового наукового прогресу. Повернення цих імен до національного наративу продемонструє справжній масштаб інтеграції українських учених у глобальну науку та слугуватиме фундаментом для формування сучасної ідентичності наукової спільноти України.

Література

Grekov, V. D. (2025). Interpretation of the "Rus" Concept in the Ukrainian and Russian Historiography in the Russian Empire (1805–1860). *Slavica Slovaca, 60(1)*, 58-70.

Бреславец, К. Г., Власов, В. В., Волобуев, А. В. (Ред). (2001). *Академик АН УССР К.Д. Синельников (воспоминания близких и соратников)*. ННЦ ХФТИ

Иванов, В. Е. (Ред.). (1979). *Кирилл Дмитриевич Синельников: воспоминания друзей и соратников*. Наукова думка

Інтерв'ю з Л. М. Давидовим, 07.02.2025 р., Ф. АІ од. 1460. Відомчий науково-технічний музей ННЦ «ХФТІ»

Інтерв'ю з С. М. Утенков, 29.01.2025 р., Ф. АІ од. 1473. Відомчий науково-технічний музей ННЦ «ХФТІ»

Інтерв'ю з О. М. Морозовим, 27.02.2025 р., Ф. АІ од. 1466. Відомчий науково-технічний музей ННЦ «ХФТІ»

К. Д. Синельников та І. В. Курчатов – друзі, соратники, родичі. URL: https://kef.univer.kharkov.ua/doc/presentation/sinelnikov_i_kurchatov.pdf

Коган, В. С. (1982). *Кирилл Дмитриевич Синельников*. Наукова думка

Павленко Ю. В., Ранюк, Ю. Н, Храмов, Ю. А. (1998). *«Дело» УФТИ 1935-1938*. Издательство «Феникс» УАННП

Танцюра, Т. П. (2001). *К.Д. Синельников: ученый, организатор науки, педагог*. ХНУ им. В. Н. Каразина

Ранюк, Ю. М. (2001). *Лабораторія № 1. Ядерна фізика в Україні*. Акта

Ранюк, Ю. М. (2002). УФТІ і «Атомний проект». *Питання історії науки і техніки*, № 4, 12-18.

Швець, В. М. (2011). *К.Д. Синельников і становлення академічної та університетської фізики в Харкові*. ХНУ ім. В. Н. Каразіна,

УКРАЇНА-ЦЕРН: шлях до співпраці

Борис Гриньов (ICMA, Україна),
Тетяна Гриньова (CNRS, Франція)

Європейська рада з ядерних досліджень (ЦЕРН) з моменту свого заснування у 1954 році є центром для розробки нових технологій та проведення експериментів, спрямованих на розуміння нашого Всесвіту для фізиків елементарних частинок з усього світу. Хоча Україна здобула незалежність лише у 1991 році, вчені, які народилися в Україні або працювали в інститутах на території України, брали участь у дослідженнях в ЦЕРН з моменту його заснування. У цій статті буде надано огляд наших сучасних знань про внесок України в ЦЕРН та його експерименти.

1. Від створення ЦЕРНу до здобуття незалежності України (1954–1991)

До 1991 року внески науковців, які народилися або працювали в Україні, часто приписували «Радянському Союзу» чи «Росії», а іноді й країнам, до яких емігрували українські науковці, щоб врятувати своє життя та продовжити свої дослідження. Критерії визначення науковців як «українських», що використовуються в цій статті, були узгоджені на нараді[1] «Український внесок у фізику елементарних частинок: історія та перспективи» у січні 2026 року та детально описані в [Греков, 2026; Гриньова, 2026].

1 https://indico.cern.ch/event/1603776/

ЦЕРН був заснований у 1954 році після великих хвиль еміграції та воєн першої половини 20-го століття [Гриньова, 2026]. У той час вчені, народжені в Україні, які працювали в галузі фізики елементарних частинок, опинилися не лише розкиданими по всьому світу, але й обіймали ключові посади в цій галузі:

- Едвард Гінзтон (Edward Ginzton) працював у Стенфордському університеті в США, керуючи проектами зі створення там 2-мильного лінійного прискорювача (він був першим директором SLAC);
- Морис Гольдгабер (Maurice Goldhaber) працював у Брукхейвенській національній лабораторії в США, якою він керував з 1961 по 1973 рік;
- Грегорі Брейт (Gregory Breit) очолював проект розробки атомної бомби в США до 1942 року, був професором Єльського університету та редактором Physical Review (1927-29, 1939-41, 1954-56, 1961-63);
- Гліб Ватагін (Gleb Wataghin) повернувся до Італії з Бразилії, де сприяв створенню спільноти фізиків елементарних частинок;
- Жорж Шарпак (George Charpak) та Моїз Гайсинський (Moïse Haissinsky) працювали у Французькому національному центрі наукових досліджень (CNRS) у Парижі, перший переїхав до ЦЕРНу в 1959 році;
- Кирило Синельников, зять Ігоря Курчатова (керівника радянського проекту атомної бомби), відбудовував Фізико-технічний інститут у Харкові (ХФТІ) після руйнувань Другої світової війни. Під його керівництвом ХФТІ мав розмістити як Лабораторію № 1 радянського проекту атомної бомби, так і електронний лінейний ускорювач на 2 ГеВ, який був найбільшим прискорювачем енергії такого типу в Європі [Ранюк, 2006];
- Володимир Векслер працював над розробкою синхрофазотрона на 10 ГеВ у Дубні (завершено в 1957 році) та U-70

у Протвіно, завершеного лише через рік після його смерті в 1967 році;

- Герш Будкер створював центр фізики елементарних частинок у Новосибірську (1959), який зараз носить його ім'я;
- Абрам Йоффе, засновник Фізико-технічного інституту в Ленінграді, який зараз носить його ім'я, обіймав ключові посади в Радянській Академії наук.

Не слід забувати про численних науковців, які або здобули освіту, або працювали, або і те, й інше, в наукових інститутах України (Микола Боголюбов, Лев Ландау, Лев Шубніков, Віктор Вайскопф/Victor Weisskopf, Фрідріх Хоутерманс/Friedrich Houtermans, Ісаак Померанчук, Олександр Ахієзер)... Тому не дивно, що після створення ЦЕРНу згадані вище науковці відіграли вирішальну роль у забезпеченні можливості фізиків з усього світу працювати в ЦЕРНі [Lalli, 2024].

«Перший неофіційний контакт між радянськими вченими та вченими ЦЕРНу» відбувся у вересні 1955 року, коли група радянських вчених на чолі з В. Векслером відвідала ЦЕРН під час першої конференції «Атом за мир», що відбулася в Женеві [Lock, 1975, с. 2-3]. У той час ЦЕРН все ще будувався. Наступного року, у червні 1956 року, В. Векслер, Г. Будкер та Я. Файнберг, серед інших радянських вчених, відвідали двотижневий «Симпозіум з прискорювачів високих енергій та фізики піонів» у ЦЕРНі. Ще більша кількість вчених, зокрема Д. Волков з ХФТІ [Нурмагамбетов, 2026], відвідали Міжнародну конференцію з фізики високих енергій (ICHEP) у ЦЕРНі в липні 1958 року. Наступна конференція ICHEP відбулася в Києві у 1959, і знову повернулася до Києва в 1970 році. Ці конференції надали можливість фізикам ЦЕРНу відкрити для себе Україну, а фізикам українського походження, які проживали за межами України (таким як Гліб Ватагін, Моріс Гольдгабер), відвідати її знову [Jackson, 1999]. Вчені, фахівці з фізики елементарних частинок та суміжних галузей, часто представляли свої уряди на

різних міжнародних заходах, що дозволяло їм перетинати «залізну завісу» в обох напрямках.

Паралельно з цими науковими зустрічами та дипломатичними місіями, у 1959 році Боголюбов працював над створенням програм наукового обміну між ЦЕРНом та Радянським Союзом [Lock, 1975, с. 3-5]. Ця ініціатива дозволила вченим з України не лише приїжджати до ЦЕРНу для короткострокових візитів, а й для тривалого перебування: В. Ярба (1965-1966, 1973-1974), Н. Говорун (1965-66), Д. Волков (1961, 1962, 1965, 1976-77), Г. Будкер (квітень 1967).

ЦЕРН також приваблював науковців українського походження з-поза меж Радянського Союзу: Е. Гінзтон провів свій академічний рік у Женеві в 1957 році [Cottrell, 1995, с. 133], Ж. Шарпак почав працювати в ЦЕРНі в 1959 році [Шарпак, 2014], …

Час, проведений у ЦЕРНі, завжди був корисним для навчання (наприклад, М. Говорун вивчив Fortran, який він потім адаптував для використання на радянських комп'ютерах [Ярба, 2019]) та натхненним (наприклад, відкриття Волковим SUSY та SUGRA [Нурмагамбетов, 2026]). Водночас ці фізики з України зробили свій внесок у дослідження ЦЕРНу з прискорювачів, детекторів, теорії та експериментів з фізики елементарних частинок. І це були не лише фізики: деякі компоненти для прискорювачів ЦЕРНу також вироблялися в Україні (наприклад, трансформатори LEP200 виготовлялися в Запоріжжі [CERN, 1992]).

2. Перші кроки незалежної України в ЦЕРНі (1991–1993)

Україна здобула незалежність наприкінці 1991 року. Це принесло як зрив науково-дослідних проектів, оскільки установи зіткнулися з серйозними проблемами фінансування, так і нові можливості для української науки: свободу співпрацювати на міжнародному рівні та визначати власні пріоритети досліджень. Після припинення збору даних на лінійному прискорювачі ХФТІ в 1990 році країна більше не мала жодних великих установок з

фізики елементарних частинок [Ранюк, 2006]. Обмежене державне фінансування науки призвело до поширеної думки, що уряд незалежної України нехтував цим сектором. Однак документи в архівах ЦЕРНу [CERN, 1992] дають більш нюансовану картину, принаймні у фізиці елементарних частинок.

25 лютого 1992 року Голова Державного комітету України з питань науки і технологій, професор С. Рябченко[2], завдяки ініціативі проф. Г. Зінов'єва[3], надіслав листа Карло Руббіа, тодішньому генеральному директору ЦЕРНу, висловивши зацікавленість «в отриманні Україною статусу країни-спостерігача в ЦЕРНі». Цей лист було отримано 28 квітня 1992 року та призвело до жвавого обговорення в керівництві ЦЕРНу, яке охоплювало різні питання: від "Ukrainia could also claim to be a successor of USSR, like Russia. This could create a political difficulty[4]", "The particular case of the Ukraine is clear, and since it has already been recognised by the United Nations, there seems to be no reason not to go ahead with the observer status[5]", "Observer status should not be given to countries without a strong and active base in HEP. For those who do not have a strong base in HEP a Cooperation Agreement is much more appropriate. It is my feeling that the Ukraine falls into the latter category at present.[6]"

С. Рябченко відвідав ЦЕРН 7 травня 1992 року. Під час його візиту, ЦЕРН запропонував підписати Угоду про співробітництво з Україною. 16-22 листопада 1992 року до України було направлено «місію з ознайомлення від ЦЕРНу» для встановлення контактів

2 С. Рябченко — фізик твердого тіла.

3 Г. Зінов'єв був завідувачем відділу фізики високих густин енергії в Інституті теоретичної фізики ім. Боголюбова в Києві (ІТФ).

4 Україна також може претендувати на звання правонаступниці СРСР, як і Росія. Це може створити політичні труднощі.

5 Конкретний випадок України очевидний, і оскільки вона вже була визнана Організацією Об'єднаних Націй, здається, немає причин не надавати їй статус спостерігача.

6 Статус спостерігача не слід надавати країнам, які не мають сильної та активної бази у фізиці високих енергій. Для тих, хто не має сильної бази у фізиці високих енергій, Угода про співробітництво є набагато доцільнішою. На мою думку, Україна наразі належить до останньої категорії.

із зацікавленими науковими установами в Україні. Представники ЦЕРНу, W. Hoogland/В. Хугланд, O. Barbalat/О. Барбалат та N. Koulber/Н. Коулбер, відвідали Інститут електрозварювання ім. Патона, Інститут ядерних досліджень та Науково-дослідний Інститут проблем матеріалознавства у Києві, а також Харківський фізико-технічний інститут та НТК Інститут монокристалів НАН України у Харкові. У висновку візиту зазначалося, що «існує сильна політична воля, висловлена як віце-прем'єр-міністром[7], так і Головою Державного комітету з питань науки і технологій, співпрацювати з ЦЕРНом та демонструвати науково-технологічний потенціал країни»[8].

С. Рябченко у супроводі В. Бар'яхтара (віце президента Академії наук України), В. Болдичева (ХФТІ), Д. Волкова (ХФТІ), Г. Зінов'єва (ІТФ) і П. Сорокіна (ХФТІ) знову відвідав ЦЕРН з 29 березня по 2 квітня 1993 року, а в останній день його візиту було підписано Угоду про співробітництво між Україною та ЦЕРНом. Україна наполягла на додаванні до угоди виділеного жирним шрифтом пункту: "CONSIDERING that this co-operation is independent of the co-operation established on the basis of the Agreement signed on 4 July 1967 between CERN and the former USSR, and does not affect the rights and obligations of the Ukraine as one of the successors to the former USSR in respect of the later Agreement."[9]

Незважаючи на фінансові труднощі початку 1990-х років, наполегливі дипломатичні зусилля незалежного українського уряду

---

7 Віце-прем'єр-міністр І. Юхновський - фізик-теоретик працював у галузі статистичної механіки, автор ідеї провести референдум про незалежність України.

8 There is a strong political will expressed, both by the Vice-Prime Minister and the Chairman of the State Committee on Science and Technology, to collaborate with CERN and demonstrate the scientific and technological potential of the country. [CERN, 1992]

9 ВРАХОВУЮЧИ, що це співробітництво є незалежним від співробітництва, встановленого на підставі Угоди, підписаної 4 липня 1967 року між ЦЕРН та колишнім СРСР, **і не впливає на права та зобов'язання України як однієї з держав-правонаступниць колишнього СРСР щодо зазначеної Угоди.**

та вчених призвели до підписання Угоди про співробітництво між ЦЕРНом та Україною в 1993 році, яка заклала основу для довгострокової співпраці у фізиці елементарних частинок. Документи в архівах ЦЕРНу [CERN, 1992] свідчать про важливу роль, яку відіграв професор Геннадій Зінов'єв у підготовці цієї угоди, забезпечуючи зв'язок між українськими урядовими установами та керівництвом ЦЕРНу.

3. Україна в ЦЕРНі 1993–2016

Ця угода відкрила шлях до прямої співпраці між українськими науковими установами та ЦЕРНом у вирішальний для проекту Великого адронного колайдера (ВАК) період, коли в грудні 1994 року Рада ЦЕРНу схвалила його будівництво, а конфігурації детекторів для майбутніх експериментів ще перебували на стадії розробки.

Один із найпомітніших внесків українських груп до експериментів на ВАК полягає в області калориметрії. На початку 1990-х років колаборації CMS та ALICE вибирали сцинтиляційні кристали для своїх калориметрів. Фториди, такі як BaF_2, CeF_3 та PbF_2, були серед фаворитів [CERN, 1992], але коли Людмила Нагорна представила на конференції Crystal-2000 у Шамоні у Франції в 1992 році результати виробництва перших у світі великорозмірних кристалів вольфрамату свинцю ($PbWO_4$), вирощених у Харкові в 1991 році, вони виявилися найоптимальнішим сцинтиляційним матеріалом для цих експериментів. Понад 100 тонн PWO було використано для виготовлення 80 000 великих кристалів лише для калориметра CMS [Тупіцина, 2026].

Дослідники з новозаснованого Інституту сцинтиляційних матеріалів у Харкові, під керівництвом Б. Гриньова, поставили радіаційно стійкі пластикові сцинтилятори для адронного калориметра експерименту CMS та сцинтиляційного детектора тригерної системи мінімального зміщення (MBTS) експерименту ATLAS.

Харківські інженери також опанували унікальну технологію виготовлення мікро кабелів, яка була корисною для надійного

з'єднання частин детекторів ВАК. Такі мікрокабелі були розроблені та виготовлені в Харкові для детектора ALICE у співпраці з командою фізиків з Інституту теоретичної фізики імені Боголюбова у Києві під керівництвом Г. Зінов'єва [Горенштейн, 2026].

Вчені з Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України (ІЯД) у Києві під керівництвом В. Пугача розробили систему радіаційного моніторингу для внутрішнього трекера LHCb на основі детекторів з металевої фольги [Pugatch, 2009].

На початку 2000-х років групи з ХФТІ під керівництвом Л. Левчука та з ІТФ (відповідальний Є. Мартинов) розробила спеціалізовані обчислювальні комплекси (Tier-2) для Всесвітній мережі LHC-GRID (WLCG) забезпечивши розподілені ресурси для обробки та аналізу величезних обсягів даних для експериментів CMS та ALICE.

Вчені з українських інститутів і університетів є учасниками трьох із чотирьох основних експериментів на ВАК у ЦЕРНі з початку 2000-х років [ALICE, 2000; LHCb, 2000]. Вони беруть активну участь у розробці детекторів, зборі та аналізі експериментальних даних. Крім того, фізики Інституту прикладної фізики Національної академії наук України (Суми) під керівництвом В. Сторіжка зробили вагомий внесок у дослідницькі проєкти з розробки нових прискорювальних технологій, зокрема компактного лінійного колайдера (Compact Linear Collider, CLIC) у ЦЕРНі. Водночас група Київського національного університету імені Тараса Шевченка (КНУ) під керівництвом С. Вільчинського була серед перших учасників експерименту SHiP (Search for Hidden Particles, «Пошук прихованих частинок»), метою якого є пошук рідкісних слабковзаємодіючих частинок за допомогою високоінтенсивного протонного пучка Суперпротонного синхротрона (Super Proton Synchrotron, SPS) ЦЕРНу, спрямованого на мішень.

У 2011 році Рольф Ландау від імені ЦЕРНу та Станіслав Довгий від імені Малої академії наук України підписали спільну деклара-

цію[10], яка започаткувала організацію українських національних освітніх програм у ЦЕРНі. У рамках цих програм у 2011–2013 роках ЦЕРН щороку відвідували до 40 українських учителів і 20 студентів [Гриньова, 2025]. Цю програму було призупинено у 2014 році після початку російської агресії проти України.

Розширення контактів між українськими дослідниками та ЦЕРНом сприяло усвідомленню переваг тіснішої кооперації у сфері науки і технологій. У жовтні 2011 року ЦЕРН та Україна підписали Спільну декларацію щодо можливої заявки на асоційоване членство в ЦЕРНі, у якій були визначені пріоритети науково-технічної співпраці. У жовтні 2013 року Генеральний директор ЦЕРНу Rolf Heuer/Рольф Хойер та віце-прем'єр-міністр України Костянтин Грищенко підписали Угоду про асоційоване членство між Україною та ЦЕРНом. Верховна Рада України ратифікувала Угоду у 2014 році, але офіційне повідомлення ЦЕРНу було відкладено для проведення всебічного аналізу наслідків її реалізації, зокрема фінансових зобов'язань України [Гриньов, 2019]. Остаточні документи, необхідні для набуття Україною статусу асоційованого члена ЦЕРНу, були підписані Міністром освіти і науки України Лілією Гриневич у ЦЕРНі у жовтні 2016 року.

4. Україна як асоційований член ЦЕРНу (з 2016 року)

Як асоційований член ЦЕРНу, Україна отримала для своїх учених доступ не лише до участі в експериментах ЦЕРНу як користувачів, а й до роботи на дослідницьких посадах безпосередньо в ЦЕРНі, а для української промисловості — можливість брати участь у тендерах на контракти ЦЕРНу. Водночас українські вчені досі не мають права обіймати постійні посади в ЦЕРНі, а обсяг витрат ЦЕРНу на закупівлі в Україні та персонал з України обмежується сумою внесків України як асоційованого члена. Хоча Україна щорічно сплачує до організації близько 1 млн швейцарських франків[11],

10 https://cds.cern.ch/record/1378088

11 Ця сума покривається державами-членами з початку повномасштабного вторгнення у 2022 році в рамках підтримки України.

Таблиця 1. Витрати ЦЕРН (тисячі швейцарських франків) на закупівлю матеріалів, послуг та дрібних замовлень в Україні та заробітна плата дослідників з України.

Рік	Закупівлі	Персонал
2019	78	976
2020	30	1164
2021	56	1620
2022	64	2081
2023	46	1787

це становить лише 10% від суми, яку вона сплачувала б як повноправний член. Як видно з **Таблиці 1**, витрати ЦЕРНу на персонал з України та закупівлі в Україні постійно перевищують українські внески, проте це перевищення припадає переважно на категорію витрат на персонал. Оптимальною є ситуація, за якої витрати на закупівлі та персонал є збалансованими, а внесок країни до ЦЕРНу відповідає рівню фінансування фізики елементарних частинок в Україні.

Уряд України має представників у Раді ЦЕРНу: Бориса Гриньова (з 2017 року), Анатолія Загороднього (у 2017–2021 роках) та Євгена Кудрявця (з 2022 року). Вони беруть участь у засіданнях Ради ЦЕРНу, які відбуваються приблизно чотири рази на рік. Однак як асоційований член Україна не має права голосу при ухваленні рішень Ради і має менший вплив та вужчі зобов'язання, ніж повноправні держави-члени. З 2017 року Борис Гриньов також представляє Україну у Фінансовому комітеті ЦЕРНу та виконує функції представника з питань взаємодії з промисловістю, консультуючи українські підприємства щодо можливостей співпраці з ЦЕРНом.

Україна також має представників в Європейському комітеті майбутніх прискорювачів (ECFA) – групі стратегічного планування, яка допомагає координувати та планувати довгострокове майбутнє

Таблиця 2. Українські інститути та університети, що беруть участь в експериментах CERN станом на 1 червня 2026 року*.

Експеримент	Українські інститути/університети (керівники груп)
ALICE	ІТФ (В. Трубніков)
CFT3	Інститут прикладної фізики
CMS	ІСМА (Б. Гриньов), ХФТІ/ХНУ** (Л. Левчук), КНУ (В. Аушев)
ISOLDE	Ужгородський національний університет (Ю. Височанський)
LHCb	КНУ (О. Безшийко), ІЯД (О. Охріменко), ІСМА (А. Бояринцев), ХФТІ (І. Кириллін)
RD-18/Crystal Clear	ІСМА (О. Сідлецький)
SHIP	КНУ (С. Вільчинський)
FCC EOI	ІСМА, ІТФ, КНУ, ХНУ, ХФТІ

* https://greybook.cern.ch/country/detail?id=UA

** Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна (ХНУ)

фізики високоенергетичних частинок у Європі та служить дорадчим органом для керівництва ЦЕРНу. Цю роль виконував Микола Шульга до своєї смерті у 2024 році, а з 2025 року її виконує Ігор Кирилін. З 2025 року Україна також має представника (Денис Кофанов) у групі ECFA для молодих дослідників (ECR).

Користувачі з українських інститутів мають представника в Консультативному комітеті користувачів ЦЕРНу (ACCU), який чотири рази на рік проводить засідання для обговорення з керівництвом ЦЕРНу питань, пов'язаних із діяльністю користувачів. У 2018–2025 роках цю дворічну посаду обіймала Тетяна Гриньова, а у 2026 році на цю посаду було обрано Ігоря Костюка.

Станом на червень 2026 року 10 українських інститутів беруть участь у семи експериментах ЦЕРНу, як показано в **Таблиці 2**.

Після набуття Україною асоційованого членства у ЦЕРНі внесок України в три основні експерименти ВАК суттєво зріс: нова група з КНУ приєдналася до експерименту CMS, у якому Україну тепер представляють чотири наукові групи; до експерименту LHCb також приєдналися групи з ІСМА, КНУ та ХФТІ; крім того, фізики з ХНУ беруть участь в експерименті ALICE під егідою ІТФ. У 2024 році було схвалено експеримент SHiP, збір даних у якому розпочнеться на початку 2030-х років. Після набуття Україною статусу асоційованого члена ЦЕРНу нова група з Ужгородського університету працює на установці онлайн-розділення ізотопів (ISOLDE) над міждисциплінарним проектом з дослідження матеріалів зі спонтанною намагніченістю та поляризацією [CERN Courier, 2024]. У січні 2025 року п'ять українських наукових установ підписали заяву про зацікавленість (Expression of Interest, EOI) щодо проекту Майбутнього кільцевого колайдера (Future Circular Collider, FCC).

Окрім 60 дослідників з українських інститутів[12], які працюють у ЦЕРН станом на 1 червня 2026 року, понад 170 додаткових дослідників з України пов'язані або з неукраїнськими науковими установами, або безпосередньо з ЦЕРН. Міжнародні мережі та досвід цих науковців з різних наукових культур зміцнюють дослідження, освіту та передачу знань між Україною та світовою науковою спільнотою. Деякі з них очолюють експериментальні групи у своїх установах або відіграють важливу роль в експериментальних колабораціях у ЦЕРНі, координуючи різні дослідницькі групи з фізики чи детекторів. Наприклад, Максим Тітов з 2024 року є одним із керівників колаборації ECFA DRD1 з «Розробки технологій газових детекторів».

Українські науковці в ЦЕРНі також відіграють важливу роль у розвитку наукової освіти в Україні через Українські національні освітні програми у ЦЕРНі, які були відновлені у 2016 році[13]. Ці програми координують О. Юров від Малої академії наук України та

12 з яких 28 мають статус користувача у ЦЕРНі
13 https://teacher-programmes.web.cern.ch/ukrainian-teacher-programme

дослідники у ЦЕРНі: Тетяна Гриньова (2016–2021), Дарія Тернова (2021–2022), Оксана Животова (2022–2023) та Леся Щуцька (з 2024 року). Через пандемію COVID-19 та повномасштабне вторгнення Росії в Україну ці програми із 2020 року перейшли в онлайн-формат та були доповнені щомісячними вебінарами. Участь у цих онлайн-програмах залишається високою: у прямих ефірах беруть участь до ста осіб, а записані відео набирають тисячі переглядів. Ці освітні ініціативи допомагають підтримувати інтерес до науки, зміцнювати викладацьку спільноту та надавати учасникам, особливо представникам постраждалих від війни регіонів України, можливість ознайомитися з роботою в реальному дослідницькому середовищі.

Як асоційований член Україна також має представника у Форумі викладачів і студентів ЦЕРНу (Teacher and Student Forum), який разом із Міжнародною групою з питань популяризації фізики елементарних частинок (IPPOG)[14] координує діяльність у сфері освіти. Цю роль виконує Тетяна Гриньова з 2016 року. Асоційоване членство України в ЦЕРНі також дає українським викладачам і студентам змогу брати участь у щорічних міжнародних програмах ЦЕРНу для викладачів та студентів [Гриньова, 2025].

Робота молодих науковців з України часто відзначається їхніми експериментами[15]: наприклад, Валерія Жовковська та Владислав Орлов отримали нагороду для молодих вчених (Early-Career Scientist Award) від колаборації LHCb у 2022 році, а Сергій Чернишенко у 2025 році. Видатна роль українських наукових установ у розробці люмінометра-детектора PLUME для LHCb, координація Україною проекту Horizon Europe TWISMA за участю ЦЕРНу [Сідлецький, 2025] – все це ілюструє зростаючу інтеграцію українських інститутів у експериментальні колаборації ЦЕРНу. За свою роботу українські вчені, учасники колаборацій ATLAS[16], ALICE, CMS

14 Україна не є членом IPPOG.

15 https://lhcb.web.cern.ch/Collaboration_prizes/Early_career_awards.html

16 Є вчені, народжені в Україні, які працюють на експерименті ATLAS, хоча в ньому немає жодної установи з України.

та LHCb, отримали премію «Прорив у фундаментальній фізиці» (Breakthrough Prize in Fundamental Physics) у 2025 році [Лукашенко, 2025]. Було надихаюче слухати Валерію Жовковську, молоду українську дослідницю, під час офіційного святкування 70-ї річниці ЦЕРНу 1 жовтня 2024 року[17].

Як видно з даних **Таблиці 1** та **Таблиці 2**, незважаючи на розпочату Росією війну проти України у 2014 році та повномасштабне вторгнення у 2022 році, інтеграція України до наукової спільноти ЦЕРНу не припинилася; навпаки, співпраця та інституційні зв'язки з ЦЕРНом продовжують поглиблюватися та змінюватися з часом [Grynyov, 2025].

5. Українська громада у ЦЕРНі після лютого 2022 року

Після повномасштабного вторгнення, Рада ЦЕРНу ухвалила низку резолюцій щодо скасування або зменшення щорічного фінансового внеску України в рамках заходів солідарності з Україною під час війни. Також були реалізовані програми відкриття спеціалізованих тимчасових посад у ЦЕРНі (2022-2024), дистанційних студентських стажувань (2023-2024) та сприяння передачі обладнання з ЦЕРНу та його держав-членів до українських наукових установ[18]. У 2022 році серед співробітників ЦЕРНу було організовано внутрішню кампанію зі збору коштів, під час якої пожертви були подвоєні ЦЕРНом, а потім перераховані Швейцарському Червоному Хресту на допомогу Україні[19]. Це лише окремі приклади численних ініціатив спільноти ЦЕРНу на підтримку України та її громадян.

Завдяки активним зусиллям української спільноти в ЦЕРН[20] у лютому 2023 року чотири основні експериментальні колаборації ВАК (ALICE, ATLAS, CMS та LHCb) вирішили виключити посилання на установи в Росії та Білорусі зі своїх публікацій та списків

17 https://www.youtube.com/watch?v=bw1lp5YUAEs

18 https://www.swissilo.ch/ilo-ukraine-initiative

19 https://home.cern/cern-fundraising-effort-contributes-aiding-ukrainian-civilians/

20 Детальний опис наведено в Додатку до англомовної версії цієї статті: Grynyov, B., Hryn'ova, T. (2026). UKRAINE-CERN: the way to cooperation.

авторів [Van Noorden, 2023]; слід зазначити, що всі їхні публікації були призупинені з березня 2022 року до прийняття цього рішення. Крім того, у грудні 2023 року Рада ЦЕРН вирішила припинити співпрацю з дослідницькими інститутами в Білорусі з червня 2024 року [CERN/3758, 2023] та в Росії з листопада 2024 року [CERN/3757, 2023]. На жаль, попри обмеження, накладені на співпрацю ЦЕРНу з Об'єднаним інститутом ядерних досліджень у Дубні, Росія у червні 2022 року [CERN/3638, 2024; CERN/3671, 2024], рішення Ради ЦЕРНу продовжувати співпрацю з цією організацією[21] до січня 2030 року викликає занепокоєння [Hryn'ova, 2026].

Таким чином, окрім того, що ЦЕРН є провідним науковим центром, він також слугує важливим майданчиком для наукової дипломатії, надаючи українським дослідникам можливість висвітлювати діяльність російської наукової спільноти, пов'язану з воєнними зусиллями: зокрема обхід санкцій [Hryn'ova, 2026]; інтеграцію окупованих українських територій до Росії через наукову співпрацю, публікації та наукові бази даних [Plastun, 2025]; мілітаризацію освіти; а також привласнення українських наукових здобутків [Гриньова, 2026].

6. Висновки

Асоційоване членство в ЦЕРНі забезпечує Україні доступ до сучасної експериментальної інфраструктури, передових детекторних технологій та глобальних екосистем аналізу даних, які неможливо створити на національному рівні. Це дає змогу українським студентам і дослідникам долучатися до масштабних міжнародних колаборацій, де вони набувають практичного досвіду роботи з передовими приладами, обчислювальними системами та дослідницькими методологіями, що формують сучасну фізику високих енергій.

Інтеграція України до ЦЕРНу стала можливою завдяки зусиллям окремих науковців, які сприяли встановленню та підтриманню інституційних зв'язків між українськими дослідницькими устано-

21 https://council.web.cern.ch/en/content/217





Рис. 1. (зверху) Учасники наради «Український внесок у фізику елементарних частинок: історія та перспективи» на вулиці В. І. Векслера в ЦЕРНі. (знизу) Вхід до нещодавно відремонтованої зали Жоржа Шарпака в ЦЕРНі. Обидві фотографії зроблені 29.01.2026.

вами та експериментами ЦЕРНу. Їхня діяльність сприяла формуванню довгострокових каналів співпраці, міцніше закріпивши Україну в міжнародній спільноті фізики високих енергій. Водночас

довгострокова стійкість цієї інтеграції залежить від переходу від індивідуального лідерства до сталих інституційних механізмів, а також від створення надійних організаційних рамок і стабільних національних механізмів фінансування.

Дискусії на нараді «Український внесок у фізику елементарних частинок: історія та перспективи» показали, що вчені народжені в Україні були присутні в ЦЕРНі з перших днів його заснування. У ЦЕРНі є вулиці та конференц-зали, названі на їхню честь, як показано на **Рисунку 1.** Повномасштабне вторгнення змусило українську спільноту фізиків елементарних частинок повною мірою оцінити масштаби її історичного внеску в ЦЕРН, виходячи з інформації, що зберігається в архівах ЦЕРНу. Визнання давньої участі українських вчених у ЦЕРНі підкреслює усталену роль України в європейській науці та зміцнює її інтеграцію в дослідницький простір ЄС, що підкріплюється членством України в ЦЕРНі.

Посилання

Горенштейн, М., Перепелиця, С., & Трубніков, В. (2026). *Фізика високої енергії щільності в ІТФ: історичний огляд*. У цих матеріалах.

Греков, В. (2026). *Відновлення наративу: шляхи переосмислення світового внеску української фізичної науки*. У цих матеріалах.

Гриньов, Б. В., Тітов, М. П., & Стадник, П. О. (2019). Україна — CERN: шлях до співробітництва. *Наука та інновації,* **15**(5), 93–105. https://doi.org/10.15407/scin15.05.093

Гриньова, Т. (2025, May 24). *Українські фізики у CERN і в школах: наука, якою варто пишатися*. ZN.UA. https://zn.ua/ukr/EDUCATION/ukrajinski-fiziki-u-cern-i-v-shkolakh-nauka-jakoju-varto-pishatisja.html

Гриньова, Т., Стріха, М., Греков В. (2026). *Внесок України у розвиток фізики елементарних частинок*. У цих матеріалах.

Лукашенко, В. (2025, April 26). Українські науковці — серед лауреатів «наукового Оскара» Breakthrough Prize. ZN.ua. https://zn.ua/ukr/EDUCATION/ukrajinski-naukovtsi-sered-laureativ-naukovoho-oskara-breakthrough-prize.html

Нурмагамбетов, О. (2026). *Професор Д. В. Волков у ЦЕРН*. У цих матеріалах.

Ранюк, Ю. (2006). *Лабораторія № 1: історія ядерної фізики в Україні*. Харків: АКТА.

Туліцина, І. (2026). *Сцинтилятор PWO: як почалася історія*. У цих матеріалах.

Шарпак, Ж. (2014). *Спогади вигнанця, фізика, громадянина світу*, Видавництво Кальварія. Переклад Іван Рябчій за Charpak, G. (2008). "Mémoires d'un déraciné, physicien, citoyen du monde", Paris: Odile Jacob.

Ярба, В. А. (2019). Здесь и там, или Там и здесь. Воспоминания физика. Дубна: ОИЯИ.

ALICE (2000). Memorandum of Understanding for Collaboration in the Construction of the ALICE Detector. Directors of Research CERN, Geneva. Ministry for Education and Science, Kyiv, Ukraine. CERN-ARCH-DIR-RES-02-1-1-24. https://cds.cern.ch/record/835436

CERN (1992). *Relation with Non-Members States. Ukraine, 1992-1994* CERN-ARCH-DSU-DO-02-2-17 https://cds.cern.ch/record/1953628?ln=en

CERN Courier. (2024, January 11). *Portraits of particle physics in Ukraine*. CERN. https://cerncourier.com/a/portraits-of-particle-physics-in-ukraine/

CERN/3638 (2022, June 17). *Council resolution concerning cooperation with the Joint Institute for Nuclear Research*. CERN Council. https://council.web.cern.ch/sites/default/files/c-e-3638Corr_Council%20Resolution_JINR.pdf

CERN/3671 (2022, June 17). *Decision-making procedure for matters related to the Joint Institute for Nuclear Research*. CERN Council. https://council.web.cern.ch/sites/default/files/c-e-3671_Resolution_Decision_making_JINR_June22.pdf

CERN/3757 (2023, December 15). *Termination of the international cooperation agreement between CERN and the Russian Federation.* CERN Council. https://council.web.cern.ch/sites/default/files/c-e-3757-Resolution%20RU%2015%20December%202023.pdf

CERN/3758 (2023, December 15). *Termination of the international cooperation agreement between CERN and the Republic of Belarus.* CERN Council https://council.web.cern.ch/sites/default/files/c-e-3758-Resolution%20BY%2015%20December%202023.pdf

Cottrell, A. G., & Cottrell, L. S. (Eds.). (1995). *Times to remember: The life of Edward L. Ginzton.* Berkeley: Blackberry Creek Press.

Grynyov, B., et al. (2025). *Input of Ukraine to the 3rd Update of the European Strategy for Particle Physics*. Input to the European Strategy for Particle Physics – 2026 Update. CERN Indico. https://indico.cern.ch/event/1439855/contributions/6461445/

Hryn'ova, T. (2026). *Scientific Research as a Weapon in Russia's Hybrid War in Europe: an Example of the Joint Institute for Nuclear Research in Dubna, Russia.* In Cahiers de l'IEP (Special issue: War at Europe's Doorstep: Geopolitical, Economic, and Social Implications of the Russian-Ukrainian War, No. 96, June 2026). https://hal.science/hal-05562178v2

Jackson, J. D. (1999). *Snapshots of a physicist's life. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 49,* 1–33. https://doi.org/10.1146/annurev.nucl.49.1.1

Lalli, R., & Navarro, J. (eds.). (2024). *Globalizing Physics.* Oxford University Press.

Lock, W.O. (1975), A history of the collaboration between the European Organization for Nuclear Research (CERN) and the Joint Institute for Nuclear Research (JINR), and with Soviet research institutes in the USSR 1955-1970, CERN-75-07, https://cds.cern.ch/record/186009

LHCb (2000). Memorandum of Understanding for Collaboration in the Construction of the LHCb Detector. Directors of Research CERN, Geneva. Ministry for Education and Science, Kyiv, Ukraine. CERN-ARCH-DIR-RES-02-1-4-12. https://cds.cern.ch/record/835172

Plastun, A., Hryn'ova, T., Plastun, V., Sliusareva, L., & Kazak, O. (2025). *How Russia uses science to justify the annexation of Ukrainian territories.* Knowledge and Performance Management, 9(2), 79–94. https://doi.org/10.21511/kpm.09(2).2025.07

Pugatch, V. M., Pylypchenko, Y. V., Okhrimenko, O. Y., Iakovenko, V. M., Kyva, V. O., Borysova, M. S., Kovalchuk, O. S., & Mykhaylenko, O. V. (2009). *Radiation monitoring system for LHCb inner tracker.* Ukrainian Journal of Physics, 54(4).

Van Noorden, R. (2023, February 17). *LHC physicists resolve stalemate over Russian authors.* Nature. https://www.nature.com/articles/d41586-023-00503-5

Академічні обміни та технологічне/промислове шпигунство ГРУ / КДБ на Заході

Сергій І. Жук (Університет Болл Стейт, Індіана, США)

Жорстока війна Росії проти України у 2022 році продемонструвала важливість розвідувальної діяльності та шпигунських операцій російських пострадянських спецслужб, таких як ФСБ (Федеральна служба безпеки, колишній радянський КДБ) та ГРУ (Головне розвідувальне управління), які були спрямовані не лише проти України, а й проти її західних союзників у Європі та Америці.

Ці російські спецслужби використовували «традиційний арсенал» радянських ГРУ та КДБ, відомий у спеціальній літературі як «активні заходи», що включали такі таємні операції, як інфільтрація проросійських агентів у західні політичні, військові, промислові та наукові організації й середовища. Нині ГРУ та ФСБ використовують не лише російську діаспору на Заході, а й представників української діаспори, особливо українських біженців, для здійснення провокацій та шпигунських операцій [1].

Саме тому сьогодні, в умовах воєнних дій та нестабільності світової політики, необхідно нагадати читачам про коріння цієї російської агресії та провокацій у радянському минулому. Це есе є спробою такого нагадування.

ГРУ та КДБ використовували культурні й академічні обміни між СРСР і Заходом для здійснення різноманітних «активних заходів» — провокацій та шпигунства проти різних міжнародних організацій і технологічних та наукових центрів на Заході. Ці обміни особливо активізувалися під час покращення міжнародних відносин зі Сполученими Штатами за правління Микити Хрущова.

27 червня 1959 року керівництво КДБ подало спеціальні рекомендації до регіональних підрозділів КДБ щодо «ініціювання пошуку кандидатів на заміщення посади радника з питань науки і техніки» при радянських посольствах у США, Англії, Федеративній Республіці Німеччина та Швейцарії. Основною вимогою цих рекомендацій було те, що потенційні кандидати «повинні знати іноземні мови (особливо англійську) та бути фахівцями в одній із таких галузей, як хімія, нафтова промисловість, автоматика, радіоелектроніка, аналітичне приладобудування, електротехнічна промисловість, а також мати практичний досвід роботи директором промислового підприємства або головним конструктором конструкторського відділу такого підприємства, мати щонайменше науковий ступінь кандидата наук і, нарешті, вирізнятися широкою ерудицією та ґрунтовними технологічними й культурними знаннями» [2].

Водночас 20 липня 1959 року для своїх співробітників, які виїжджали за кордон, керівництво КДБ розіслало короткий опис «ознак американського шпигуна, який діє під виглядом туриста», головною «рисою» якого було «інтенсивне зацікавлення радянськими стратегічними секретами» [3].

В Україні КДБ рекомендував тим оперативним працівникам, яких відбирали для розвідувальної роботи у США, встановлювати контакти з «можливими колишніми агентами-шпигунами, які працювали в капіталістичних країнах і тепер оселилися в Україні», а також намагатися розвивати різні форми «власних активних заходів» і «вивчати» можливі контакти цих осіб на Заході.

Водночас керівництво КДБ скаржилося на «недостатнє володіння іноземними мовами» новонабраних молодих співробітників

КДБ для роботи у США та наголошувало на необхідності залучення справжніх фахівців з іноземних мов, таких як англійська, німецька, французька, іспанська, арабська, як майбутніх агентів КДБ, «особливо для направлення їх до міжнародних організацій у Нью-Йорку, Женеві та Відні» [4].

23 лютого 1962 року керівництво КДБ у Києві обговорювало можливості використання міжнародних організацій, особливо у США, де Радянська Україна була членом, як платформи для розвідувальної діяльності та шпигунства в інтересах КДБ [5]. Як повідомляли аналітики КДБ, «існувало 37 таких організацій, серед яких найважливішими для розвідувальної роботи та операцій КДБ були Організація Об'єднаних Націй (далі — ООН) у Нью-Йорку, ЮНЕСКО у Парижі (Франція), Європейське відділення ООН, Економічна комісія ООН для Європи, а також Міжнародна організація праці у Женеві (Швейцарія) та Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ) у Відні (Австрія). Розширення квот представництва Радянської України в цих організаціях надавало [КДБ] можливість інфільтрувати їх своїми агентами, які представляли Україну» [6].

Оперативні працівники КДБ, що працювали в Нью-Йорку, підготували детальний аналіз історії та структури ООН, приділяючи «особливу увагу канцелярії Генерального секретаря ООН та її кадровому управлінню». Згідно з їхніми звітами, «у цьому підрозділі зосереджувалася унікальна кількість особових справ різних посадових осіб ООН з інших країн і персоналу організації, що дозволило б [за певних умов] кандидатові КДБ вивчити можливості використання інформації з цих справ» для майбутніх спеціальних операцій КДБ [7].

Керівництво КДБ надало своїм агентам детальні інструкції щодо того, як різні підрозділи таких організацій, як ЮНЕСКО та Європейське відділення Організації Об'єднаних Націй, «надавали численні можливості для шпигунства через різноманітні контакти тощо» [8].

Згідно з аналізом КДБ, Економічна комісія ООН для Європи «надавала [агентам КДБ] унікальну можливість встановлювати контакти з представниками урядів і ділових кіл головного противника, а також ознайомлюватися з економікою цих держав» [9]. Ще одним корисним майданчиком для шпигунської діяльності КДБ була Міжнародна організація праці, яка «надавала [агентам КДБ] широкі можливості для встановлення особистих зв'язків із державними, діловими та профспілковими колами нашого головного противника; [і агенти КДБ] мали намагатися просуватися на керівні посади та в органи цієї організації як офіційні представники Радянської України» [10].

Керівництво КДБ також забезпечило своїх оперативних працівників детальними інструкціями щодо того, як працювати й будувати кар'єру всередині цих організацій [11]. Як зазначалося в цих інструкціях, «головним завданням усіх відряджень агентів КДБ у цих організаціях [було] вивчення (*изучение*) представників держав нашого головного противника [США, Канади, Великої Британії тощо]» [12].

Також рекомендувалося використовувати різноманітні вечірки з алкоголем і прийоми в цих організаціях для встановлення особистих контактів із впливовими особами тощо. «У Женеві, — підкреслювалося в документі, — існує унікальна розслаблена атмосфера для громадян США та Великої Британії без контролю з боку їхніх держав, тому вони [офіційні представники цих країн] можуть бути більш відкритими до контактів із радянськими громадянами» [13].

Керівництво КДБ особливо рекомендувало використовувати різдвяні свята (у грудні) та великодні свята (у квітні) «для встановлення більш тісних контактів» із представниками «головного противника» [14].

Промислове/технологічне шпигунство стало важливою складовою «активних заходів» КДБ, спрямованих проти американців як у самих США, так і за кордоном. Як видно, співробітники КДБ

постійно активно збирали технічну інформацію на виставках у США. Ця практика особливо характеризувала операції КДБ за кордоном [15]. Як КДБ звітував партійному та державному керівництву, «спеціальна науково-технічна інформація здобувалася оперативним шляхом і впроваджувалася в зацікавлених організаціях». Така інформація подавалася щорічно на регулярній основі. Найдетальніший звіт щодо подібної діяльності було подано 11 липня 1968 року, у якому описувалися матеріали, зібрані агентами КДБ з України в іноземних країнах протягом першої половини того року [16].

Перша категорія матеріалів стосувалася запитів Військово-промислової комісії Ради Міністрів СРСР. Вона включала «дві моделі (множильний пристрій і фотоелемент) американської електронної обчислювальної машини IBM System/360, які були впроваджені в Центрі»; а також «інформацію японської фірми Mitsubishi щодо фотоелектричних маркувальних матеріалів у суднобудуванні, яка також була впроваджена в Центрі». Усі ці матеріали були здобуті співробітниками КДБ у США [17].

Особлива увага приділялася проблемам обчислювальної техніки, радіоелектроніки та зв'язку. Агенти КДБ забезпечили українські науково-дослідні інститути технічними матеріалами компаній General Electric (США), Siemens (Західна Німеччина) та Olivetti (Італія), що стосувалися програмного забезпечення та систем програмування (усі вони були здобуті у США); технічними матеріалами комп'ютера IBM System 360/60; матеріалами щодо обчислювальних систем General Electric із розподілом часу; матеріалами з цифрових, аналогових і гібридних обчислень, алгоритмічних мов, програм і елементів обчислювальної техніки, мікроелектроніки, інтегральних схем і напівпровідникових приладів (усю цю інформацію було впроваджено в Інституті кібернетики Академії наук УРСР); а також інформацією щодо самоналаштовуваних систем, регулювання положення штучних супутників Землі та керування космічними апаратами (усе це було впроваджено в науково-дослідному інституті

Київського вищого військового авіаційного інженерного училища ВПС СРСР) [18].

Ще одним пріоритетом промислового шпигунства КДБ у США були проблеми астрономії та космічних досліджень. Цей напрям включав матеріали Гарвардського університету щодо вивчення сонячного випромінювання на штучних супутниках Землі (впроваджені в Академії наук СРСР); інформацію про американський космічний проєкт «Сатурн-Аполлон» (впроваджену в Міністерстві загального машинобудування СРСР); «засекречені роботи» Комісії з атомної енергії Великої Британії, присвячені науковим результатам досліджень Сонця та іншим питанням (впроваджені в Кримській обсерваторії); а також фотографії приекваторіальної зони Місяця, отримані американською станцією Surveyor 6 (передані до Центру [КДБ]) [19].

Інші проблеми науки і техніки також привертали увагу КДБ у Києві. Серед них найважливішими були: шістдесят робіт американських наукових центрів з дослідження плазми (впроваджені в Міністерстві середнього машинобудування СРСР); інформація для випробування геометрично подібних моделей танкерів (впроваджена в Міністерстві суднобудівної промисловості СРСР); комплекс даних щодо нових типів синтетичних каучуків, покриттів, клеїв і зразків окремих видів цієї продукції; а також інформація з проблем фізики низьких температур, матеріалознавства, металургії та зварювання [20].

Як підсумував голова українського КДБ Віталій Нікітченко, за першу половину 1968 року його колеги з українського підрозділу цієї організації здобули шляхом технологічного шпигунства у США та впровадили у спеціалізованих науково-дослідних центрах Радянської України понад 200 зразків науково-технічної інформації та моделей нових технологій [21].

Українські науковці, які працювали на КДБ, використовували можливості академічних обмінів для викрадення щонайменше 23 одиниць «науково-технічної інформації з радіоелектроніки та

обчислювальної техніки зі США» восени 1971 року, які негайно впроваджувалися у всесоюзних міністерствах, пов'язаних із радянською обороною. Водночас у жовтні 1971 року щонайменше 38 одиниць «науково-технічної інформації щодо прикладних проблем радіоелектроніки», викрадених «КДБ України» у США, були впроваджені в Київському науково-дослідному інституті радіоелектроніки [22].

Навіть напередодні офіційного візиту президента США Річарда Ніксона до Києва у травні 1972 року українські науковці та дослідники, які відвідували США як учасники програм академічного обміну, передавали КДБ викрадену цінну технологічну інформацію. Серед цих матеріалів були: «спеціалізоване програмне забезпечення американської фірми IBM»; «технологічні деталі американського виробництва автомобілів з електричною трансмісією»; «чотири дослідження американських учених з теорії планового управління та перспективного прогнозування науково-технічного прогресу, пов'язані з військово-промисловим комплексом США та державною стратегічною доктриною щодо науково-технологічного майбутнього США»; «тринадцять інформаційних матеріалів американської гірничодобувної компанії American Magnesium Corporation щодо питань електролітичного виробництва алюмінію та магнію»; та багато інших.

Більше того, 18 травня 1972 року, на початку періоду розрядки, керівництво КДБ звітувало першому секретарю ЦК КП України Петру Шелесту про успіхи такого промислового та технологічного шпигунства, організованого членами Академії наук України та провідними радянськими вченими з Радянської України, які брали участь у програмах обміну з американськими дослідниками й змогли здобути «багатий масив науково-технічної інформації», що «задовольняв запити військово-промислової комісії СРСР, різних оборонних галузей СРСР, Державного комітету з науки і техніки при Раді Міністрів СРСР і впроваджувався в різних центральних відомствах СРСР» [23].

Водночас у звітах КДБ американських науковців звинувачували у шпигунстві за їхніми радянськими колегами за кордоном. Зазначалося, що американці завжди намагалися «викрасти секретну інформацію про ракетобудування [зокрема, про окислювач ракетного палива] та освоєння космосу під час міжнародних конференцій» у 1975 та 1976 роках [24].

Щороку КДБ надавав результати такого промислового та технологічного шпигунства комуністичному керівництву України. Найтиповіший звіт про такі «активні заходи» у США, що включали акти прямого шпигунства, був поданий керівництвом КДБ УРСР 25 квітня 1978 року за підсумками діяльності у 1977 році. Мета переслідувалася та сама — «здобути важливу документацію та зразки техніки у США», необхідні «для оборонної промисловості та всієї економіки СРСР» [25].

20 найважливіших документів, отриманих у результаті операцій КДБ у США, містили інформацію про «новий тип бактеріологічної зброї, біологічний вплив електромагнітних полів, тенденції розвитку електроніки в США, матеріалознавство, ракетобудування, створення нових типів сталі для військової промисловості, напрямки в конструюванні гіроскопів; зразки кумулятивних снарядів, зразки американських буїв для виявлення підводних човнів, результати досліджень теплових трубок для космічних кораблів тощо» [26].

Уся ця інформація впроваджувалася у спеціальних відділах «оборонки» та науково-дослідних інститутах Академії наук СРСР. У Радянській Україні КДБ забезпечував впровадження «викрадених у США інновацій» на заводах конструктора О. Антонова, на абразивному заводі в Запоріжжі та на інших підприємствах і наукових центрах (зокрема на заводах оборонної промисловості, таких як «Південмаш» у Дніпрі) [27].

Майже щороку протягом 1980-х (включаючи період перебудови) радянські «технологічні шпигуни» продовжували викрадати «американські технологічні секрети» у США та привозити їх до

Радянської України, де місцеві вчені та інженери впроваджували американські інновації для потреб радянської «оборонки» [28].

Незважаючи на те, що в операціях КДБ офіційно наголошувалося на контрпропагандистських зусиллях та запобіганні встановленню зв'язків американців з антирадянськими елементами серед радянських громадян (такими як «українські націоналісти та єврейські сіоністи»), головним результатом «активних заходів» КДБ проти американських виставок та «операцій на американській землі» було типове промислове та технологічне шпигунство. КДБ забезпечував радянські військові заводи та науково-дослідні центри цінною технічною та промисловою інформацією. Як виявили офіцери КДБ, які курирували ці операції в Києві, [у період] між 1965 та 1987 роками майже 90% усіх технологічних інновацій у всіх науково-дослідних інститутах та на заводах «військово-промислового комплексу» Радянської України базувалися на інформації, викраденій у капіталістичних країнах спеціально підготовленими агентами КДБ. І щонайменше 80% усіх тих «секретних зразків» важливих технологічних «винаходів» походили безпосередньо зі Сполучених Штатів Америки.

Парадоксально, але більшість цих технологічних секретів була викрадена з американських лабораторій та коледжів радянськими інженерами та вченими, які брали участь у програмах міжнародних академічних обмінів і виконували накази КДБ, здійснюючи функції радянських шпигунів на американській землі [29].

Сучасні небезпеки: Замість висновку

Після розпаду Радянського Союзу в 1991 році Захід, і особливо західні наукові кола, а зокрема американські академічні установи, стали свідками масового виходу колишніх радянських учених на Захід, передусім до Сполучених Штатів та Канади. Згідно з моїм дослідженням, демографічна модель цього виходу була абсолютно такою ж, як і демографія академічних обмінів між Радянським Союзом та Заходом під час розрядки та після неї. В обох випадках,

як у радянських програмах академічних візитів 1970-х – 1980-х років, так і в пострадянській академічній еміграції після 1991 року, ми спостерігаємо однакові закономірності: понад 70% як радянських візитерів, так і пострадянських мігрантів походили з правлячих радянських політичних еліт, і понад 80% із них представляли лише одне місто радянського геополітичного простору — Москву [30].

Між 1991 та 2005 роками переважна більшість (85%) пострадянської академічної міграції, принаймні до Сполучених Штатів, була російською за походженням. Якщо ми додамо кількість тих радянських російських академіків, які оселилися в США до 1991 року, ми отримаємо зростаючу російську академічну діаспору на Заході, особливо в Сполучених Штатах та Канаді. Понад 80% цієї діаспори на Заході складають москвичі — жителі Москви [31]!

Як описували цю демографічну ситуацію в російській діаспорі в Америці деякі сучасники: «Після 1991 року росіяни домінували в усій пострадянській академічній еміграції до Америки, і переважали саме росіяни — мешканці міста Москви, ті самі російські "ЧМО". У Канаді та Сполучених Штатах двоє з трьох пострадянських іммігрантів були "ЧМО" з Москви; крім того, слід враховувати роль жінок-іммігранток "ЧМО", які нав'язували свої проросійські погляди американським чоловікам» [32].

Інший мій колега, якого я критикував за співпрацю з КДБ під час його «американських подорожей» до 1991 року, пояснив мені, що він «мусив це робити [співпрацювати з радянською розвідкою], щоб отримати офіційну підтримку для своїх поїздок до Америки, але всі його московські колеги, які імігрували до США та Канади, були або агентами КДБ, або офіцерами КДБ [за його словами, вони мали "погони КДБ"]. Але зараз ці москвичі мають роботу в Америці, викладають у різних канадських чи американських університетах і дистанціюються від Путіна. Водночас вони бояться критикувати російський політичний режим, маючи сім'ї та близьких друзів, які досі живуть у Москві. Як вони можуть бути проти російської політики, якщо вони пов'язані з цими російськими правлячими

елітами своїм походженням, своїми сім'ями, своєю освітою! І не забувайте про сильний промосковський вплив тих російських жінок, які вдало вийшли заміж за американських фахівців зі славістики та заохочують своїх чоловіків підтримувати проросійську політику, а не лише їхні дослідження. Відверто кажучи, ці москвичі в західних наукових колах, особливо в галузі славістики, відіграють роль "п'ятої колони" путінського режиму на Заході» [33].

Через багато років після цих інтерв'ю останні події в західних наукових колах підтверджують правдивість тих спостережень. Багато російських учених, як-от Юрій Сльозкін із Каліфорнійського університету, відкрито підтримують політичний режим Путіна в його протистоянні із Заходом. Попри свої публікації, у яких він критикував Радянську імперію, Сльозкін зрештою після 2022 року уникав відкритої критики путінського російського імперіалізму та російської війни проти України. У жовтні 2022 року Юрій Сльозкін стверджував, що Захід зберігає єдність частково завдяки тому, що характеризує Росію як «зло», зазначаючи: «Де був би Захід без цього?». Він також натякав на нібито суперечливі ідеї в Україні, які не узгоджуються із західними поглядами: «Українська націоналістична ідеологія багато в чому є протилежністю того, чого нас вчать у Сполучених Штатах чи в Західній Європі» [34].

Більше того, створена ФСБ організація «Міжнародний дискусійний клуб "Валдай"», яка підтримувала проросійських інтелектуалів із Заходу, використовуючи їх для просування російських геополітичних інтересів, нагородила Сльозкіна премією Валдайського клубу у 2020 році [35]. Як жартували колишні офіцери українського КДБ: «російська організація КДБ, Валдайський клуб, підтримувала лише своїх союзників у західних наукових колах, таких як Джон Міршаймер та Марлен Ларюель, американські політологи, які звинувачували Захід у війні в Україні; і Сльозкін був одним із тих російських союзників...» [36].

Посилання

1. Детальніше про це див. у моїй нещодавній книзі: Sergei I. Zhuk, The KGB, Russian Academic Imperialism, Ukraine and Western Academia, 1946-2024 (Lanham, MD and Boulder, CO: Rowman and Littlefield's Lexington Press, 2024) [Bloomsbury Publishing USA, 2025], особливо стор. 40, 47, 161, 171, а також у публікації Ольги Бертельсен про зв'язки українського вченого Георгія Касьянова з Олексієм Міллером, російським пропутінським пропагандистом, пов'язаним із ФСБ: Olga Bertelsen, "Russian Front Organizations and Western Academia," International Journal of Intelligence and Counterintelligence, 2023, vol. 36, no. 4, 1184-1209. Порівняйте з нещодавною публікацією: Joshua Yaffa, "To Build A Fire: Inside Russia's Secret Campaign of Sabotage in Europe," The New Yorker, February 9, 2026, pp. 38-47.
2. СБУ, ф. 16, оп. 1, спр. 927, арк. 126–127.
3. Там само, арк.139.
4. Там само, арк. 167–168.
5. СБУ, ф. 16, оп. 1, спр. 938, арк. 92–109.
6. Там само, арк. 92–93.
7. Там само, арк. 94–95. В російському оригіналі це звучало так: «это дало бы нашему агенту возможность наведения наводок на объектов и их первичного изучения».
8. Там само, арк. 95–97, 97–98.
9. Там само, арк. 99-100.
10. Там само, арк. 100-102.
11. Там само, арк. 102-104.
12. Там само, арк. 105.
13. Там само, арк. 106.
14. Там само, арк. 107.
15. Про те, як КДБ обирав цілями різні науково-дослідні центри в США, викрадаючи технологічні інновації американських учених та інженерів під час регулярних академічних дослідницьких обмінів у 1964–1965 роках, див. у СБУ, ф. 16, оп. 1,

спр. 949, арк. 424–426, 427–429.

16. СБУ, ф. 16, оп. 1, спр. 974, арк. 42–45.
17. Там само, арк. 42.
18. Там само, арк. 43.
19. Там само, арк. 44.
20. Там само, арк. 44–45.
21. Там само, арк. 45.
22. СБУ, ф. 16, оп. 1, спр. 1026, арк. 174–175, 235–236.
23. СБУ, ф. 16, оп. 1, спр. 1043, арк. 312–315.
24. СБУ, ф. 16, оп. 1, спр. 1127, арк. 80–81.
25. СБУ, ф. 16, оп. 1, спр. 1144, арк. 137.
26. Там само, арк. 138.
27. Там само, арк. 138–139. Про цей «ракетний завод» див. детальніше у: Sergei I. Zhuk, Rock and Roll in the Rocket City: The West, Identity, and Ideology in Soviet Dniepropetrovsk, 1960-1985 (Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press & Washington, D.C.: Woodrow Wilson Center Press, 2010), 5, 18-28, 86-87, 221-228.
28. Найдетальнішу інформацію про таку науково-технічну розвідувальну роботу станом на 29 грудня 1980 року див. у СБУ, ф. 16, оп. 1, спр. 1175, арк. 260–262.
29. Інтерв'ю зі Степаном Івановичем К. у Києві та Ігорем Т., колишніми офіцерами КДБ із Киева та Дніпропетровська, Україна.
30. Див. мої розрахунки у: Sergei I. Zhuk, Soviet Americana, 96, та там само, KGB Operations, 88, 93, 171-187. Порівняйте з документами IREX та інших організацій США з Колекції рукописів Бібліотеки Конгресу та архівними документами СБУ з фонду 16, Київ, Україна.
31. Я перевірив певну кількість фахівців із російських студій (історія, антропологія, політологія) серед викладацького складу найбільших вишів — університетів та коледжів — у США та Канаді. Типові заклади в моєму дослідженні включали Університет Південної Кароліни, де на історичному факультеті

я знайшов москвичку, професорку Олену Осокіну, та Йоркський університет, де на факультеті політології я знайшов іншого москвича, доцента Сергія Плеханова.

32. Інтерв'ю з Леонідом К. Він посилався на антимосковський радянський фольклор. Ще у 1950-х роках жителі провінції почали називати москвичів «чмо» (акронім від російського словосполучення «человек Москвы и Московской области» — людина з Москви та Московської області). За словами відставних радянських військових офіцерів, у 1950-х роках раптовий приплив фізично слабких і жіночних молодих призовників із Московської області до Радянської армії призвів до того, що старші офіцери скаржилися на непідготовленість цих молодих солдатів із Москви до вимог військової служби. Згодом радянські офіцери почали використовувати акронім «чмо» у своїх документах, щоб помічати прізвища призовників із Москви та Московської області. У 1960-х та 70-х роках цей акронім вийшов за межі армійських кіл, проник у цивільне середовище і став популярним словом для характеристики будь-якого слабкого чи жіночного чоловіка. Як наслідок, люди забули про армійське походження цього терміна. Традиційно провінційне населення СРСР дистанціювалося від москвичів, використовуючи різні лайливі слова, зокрема й «чмо». Див. у: Sergei Zhuk, Nikolai Bolkhovitinov, 244.
33. Я цитую свої інтерв'ю з Леонідом Лещенком від 23 червня 2012 року та 25 червня 2013 року, Київ, Україна.
34. Я цитую його фрази з: https://www.youtube.com/watch?v=uQGWpgjDiSs
35. https://valdaiclub.com/events/posts/articles/yuri-slezkine-author-of-the-book-the-house-of-government-is-winner-/?sphrase_id=1575974
36. Інтерв'ю з Леонідом К., офіцером КДБ у відставці, 30 липня 2021 року, Київ, Україна.

В пам'ять Сталініти Іванівни Волкової
28.12.1931 – 16.01.2026

Професор Д.В. Волков у ЦЕРН

О.Ю. Нурмагамбетов[1,2,3]
[1]*Інститут теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера ННЦ ХФТІ, Харків, Україна*
[2]*ННІ «Фізико-технічний факультет», Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*
[3]*Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова, Харків, Україна*
Email: a.j.nurmagambetov@gmail.com; ajn@kipt.kharkov.ua

У 1954 році було засновано Європейську організацію з ядерних досліджень (ЦЕРН). Відтоді вона стала місцем зустрічі вчених з усього світу для обміну новими ідеями, та місцем, яке сприяло прогресу в розумінні фундаментальних основ Всесвіту. У цьому нарисі, заснованому на доповіді автора на нараді ЦЕРН-Україна «Український внесок у фізику елементарних частинок: історія та перспективи» (Харків-ЦЕРН, 26-29 січня 2026 р.), висвітлено три епізоди з наукового життя академіка Дмитра Волкова, а також роль ЦЕРН у його науковій кар'єрі.

Вступ

3 липня 2025 року виповнилося 100 років від дня народження Дмитра Васильовича Волкова – видатного радянського та українського фізика-теоретика, дійсного члена Національної академії наук України, лауреата Державної премії України, професора, заслуженого діяча науки України, кавалера орденів і медалей.

Дмитро Васильович прожив насичене життя, позначене військовими та трудовими подвигами, ставши втіленням цілого покоління радянської молоді, яка, залишивши шкільні парти, вирушила на фронт Другої світової війни, а після повернення до цивільного життя вступила до вищих навчальних закладів, прагнучи усіма силами надолужити найкращі роки свого життя, втрачені через війну.



Фото 1. Д. В. Волков — випускник університету (1952 р.). З сімейного архіву Волкових.

Далі зосередимося лише на трьох епізодах наукової кар'єри Волкова, два з яких так чи інакше пов'язані з ЦЕРН. З огляду на життєвий шлях Дмитра Волкова, легко оцінити той вирішальний вплив, який його поїздки до ЦЕРН, зокрема участь у конференціях, а також коротко- й довгострокові візити, мали на його становлення як вченого. Кожен візит до ЦЕРН супроводжувався публікацією дедалі вагоміших праць, кульмінацією яких стало відкриття суперсиметрії та прорив у супергравітації. Усе це буде розглянуто нижче.

Епізод 1: Початок

Дмитро Волков народився в Ленінграді 3 липня 1925 року. У віці 18 років його було призвано до Червоної армії, де він служив до демобілізації в 1946 році. Через рік, у 1947 році, він вступив на фізичний факультет Ленінградського державного університету (ЛДУ), але не закінчив його. Під час так званої «Ленінградської справи», що була частиною сталінських репресій наприкінці 1940-х років, багато професорів ЛДУ зазнали переслідувань. Крім того, студентську групу, в якій навчався Волков, було розпущено, а всім її членам загрожувало виключення з університету.



Фото 2. Д. В. Волков разом з академіком О. І. Ахієзером у 1970-х роках. З сімейного архіву Волкових.

Порятунок несподівано надійшов з українського Харкова, де у 1946 році при фізичному факультеті університету було створено кафедру ядерної фізики для підготовки молодих фахівців для Українського фізико-технічного інституту (УФТІ, зараз ХФТІ). Волкову та іншим студентам ЛДУ (Євгену Інопіну, Віталію Алексіну, Костянтину Степанову, які згодом стали відомими вченими) було запропоновано завершити навчання в Харківському державному університеті (ХДУ). ХДУ він закінчив у 1952 році.

Упродовж аспірантури (1952–1956), яку він проходив у ХФТІ під керівництвом професора О. І. Ахієзера, Дмитро Волков займався проблемами скалярної електродинаміки. У 1958 році він захистив кандидатську дисертацію на тему «Застосування оператора маси в скалярній електродинаміці» (Volkov, 1958). Він пропрацював у ХФТІ до кінця свого життя.

Епізод 2: Парастатистика та «змова» полюсів Редже

У 1954 році було засновано Європейську організацію з ядерних досліджень (ЦЕРН). Відтоді вона стала місцем зустрічі вчених з



Фото 3. Візит до ЦЕРН у 1960-х роках: ліворуч – академік Д. І. Блохінцев, за ним – Д. В. Волков. З сімейного архіву Волкових.

усього світу для обміну новими ідеями, та місцем, яке сприяло прогресу в розумінні фундаментальних основ Всесвіту. У період «холодної війни» ЦЕРН був також однією з небагатьох публічних платформ для контактів між вченими зі Сходу та Заходу.

Як дуже перспективний молодий науковець, Волков входив до складу делегацій радянських вчених, що відвідували конференції в ЦЕРН, а також брав участь у дослідженнях, які проводилися там у різних відділах.

Він неодноразово відвідував ЦЕРН, а його участь у засіданнях і конференціях, а також особисті бесіди з видатними західними фізиками (Ю. Намбу, Л. ван Ховом, М. Гелл-Манном, Б. Зуміно) мали значний вплив на його подальші наукові відкриття.

Дійсно, після першого візиту до ЦЕРН у 1958 році Волков опублікував статтю «Про квантування полів з напівцілочисельним спіном» (Volkov, 1959), результати якої нині відомі як парастатистика Грінберга-Волкова.



Фото 4. Конференція у ЦЕРН: на передньому плані – Д. В. Волков і М. Гелл-Манн. З сімейного архіву Волкових.

Наступні два візити до ЦЕРН (1961, 1962) надихнули Волкова на вдосконалення теорії сильних взаємодій Редже та, спільно з його давнім другом ще зі студентських років у Ленінграді Володимиром Грібовим, на пошук розв'язання так званої проблеми «змови полюсів Редже» (Volkov & Gribov, 1963). Грібов, як і І.Я. Померанчук та В.І. Огієвецький, був постійним опонентом Волкова в наукових дискусіях на різних конференціях і зустрічах.

Епізод 3: Суперсиметрія та супергравітація

Суперсиметрія – новий тип симетрії між частинками з різною квантовою статистикою – є однією з найпривабливіших ідей в історії теоретичної фізики. Волков, безсумнівно, був одним із її піонерів. У чотиривимірному просторі-часі суперсиметрію було незалежно відкрито Гольфандом і Ліхтманом (Golfand & Likhtman, 1971), Волковом і Акуловим (Volkov & Akulov, 1972), а також Вессом і Зуміно (Wess & Zumino, 1973), виходячи з різних теоретичних засад.

Перш ніж створити суперсиметричні моделі в дусі звичайних калібрувальних теорій, Волков разом з іншими вченими активно



Фото 5. Зліва направо: Л.Д. Фаддєєв, В.Н. Грібов, Д.В. Волков, М.П. Рекало. З сімейного архіву Волкових.

досліджував застосування симетрій SU(n) у фізиці елементарних частинок. Під час свого візиту до ЦЕРН у середині 1965 року він розробив систематику адронів на основі представлень груп вищої симетрії та їхніх підгруп (Volkov, 1965a; Volkov, 1965b).

Динамічну основу для теорій з явними або прихованими симетріями він сформулював, використовуючи математичний апарат диференціальних форм, розроблений Елі Картаном. Це стало підґрунтям «методу феноменологічних лагранжіанів» Волкова (Volkov, 1969; Volkov, 1971).

Для Волкова суперсиметрія (SUSY) стала природною відповіддю на його давнє запитання: що сталося б, якби частинки Голдстоуна були ферміонами? Розв'язок було знайдено у 1972 році (Volkov & Akulov, 1972; Volkov & Akulov, 1973) завдяки запровадженню нового типу симетрії.

Відкриття суперсиметрії швидко здобуло високу оцінку на Заході. У перших працях, присвячених чотиривимірним теоріям суперсиметрії, саме А. Салам наголосив на фундаментальному факті: теорії суперсиметрії є суперперенормовними. Проблема



Фото 6. Обговорення на конференції в ОІЯД. Зліва направо: В.Н. Грібов, Д.В. Волков, В.Н. Первушин, В.І. Огієвецький. З сімейного архіву Волкових.

ультрафіолетових нескінченностей зникає, щойно йдеться про суперсиметрію!

Ці та інші видатні властивості теорій суперсиметрії дали поштовх розвитку цієї галузі в усьому світі, зокрема в Теоретичному відділі ЦЕРН на Заході, а також в ОІЯД[1] і ХФТІ на Сході. Дружба між Д.В. Волковим і В.І. Огієвецьким стала мостом для співпраці між Харковом і Дубною, який був остаточно зруйнований після російського вторгнення у 2022 році.

Локалізація перетворень суперсиметрії має привести до побудови калібрувальної теорії. Волков чітко усвідомлював цей факт. Він також розумів, що замкненість супералгебри Пуанкаре вимагає локалізації параметрів генераторів імпульсу та появи відповідних калібрувальних полів, які в формалізмі Картана для гравітації є тетрадами (або фірбайнами). Шляхом локалізації алгебри SUSY Волков дійшов до суперсиметричного узагальнення теорії гравітації – супергравітації!

1 ОІЯД — це Об'єднаний інститут ядерних досліджень у Дубні.

Ці ідеї було покладено в основу першої моделі супергравітації (скорочено SUGRA), представленої у двох статтях, написаних у співавторстві з В.О. Сорокою та опублікованих у 1973 і 1974 роках (Volkov & Soroka, 1973; Volkov & Soroka, 1974). Водночас у західній літературі появу SUGRA зазвичай датують 1976 роком, коли побачили світ праці С. Дезера та Б. Зуміно (Deser & Zumino, 1976) та С. Феррари, Д. Фрідмана і П. ван Ньювенхейзена (Freedman et al., 1976).

В історії науки нерідко трапляється, що різні люди майже одночасно відкривають одні й ті самі або дуже схожі речі. Однак політика замовчування може призвести до того, що чиєсь внесок сприйматимуть як менш значущий або навіть недостатній. Подібна ситуація склалася і з Волковим, чий внесок у створення SUGRA було «навмисно» применшено.

У 1993 році С. Феррара, Д. Фрідман і П. ван Ньювенхейзен були нагороджені Золотою медаллю Дірака ICTP «за відкриття теорії супергравітації у 1976 році та значний внесок у подальший розвиток цієї теорії». Реакцією Волкова на ці події став електронний лист до Феррари, Фрідмана та ван Ньювенхейзена, у якому він намагався – і не вперше – відстояти свої пріоритети. Насправді він не заперечував, що ці видатні вчені дійсно зробили фундаментальний внесок у розвиток теорії супергравітації. Однак його заперечення стосувалося формулювання «за відкриття теорії супергравітації у 1976 році».

Чи намагався Волков змінити погляди наукової спільноти на історію відкриття супергравітації? Безперечно, так – і неодноразово. Наприклад, під час свого візиту до ЦЕРН у 1976-1977 роках він виступив із доповіддю «On the Higgs Effect and Supergravity» (Volkov, 1977). У 1994 році його запросили взяти участь у Міжнародній конференції «On the History of Original Ideas and Basic Discoveries in Particle Physics» (Центр Е. Майорана, Еріче, Італія) з доповіддю «Supergravity before 1976» (Volkov, 1996). Під час свого останнього візиту до ЦЕРН у 1995 році він прочитав лекцію у Відділі теоретичної фізики ЦЕРН «Supergravity before and after 1976», засновану на препринті (Volkov, 1994).



Фото 7. Д. В. Волков в Еріче, Італія. З сімейного архіву Волкових.

Чи мало це якийсь ефект? Не зовсім. Адже, як завжди, у кожного конфлікту є дві сторони, і навіть справедливість не завжди є об'єктивною. У 2019 році С. Феррара, Д. Фрідман і П. ван Ньювенхейзен отримали Спеціальну премію «Breakthrough Prize» у галузі фундаментальної фізики за 2019 рік «за винахід супергравітації у 1976 році». Тлумачення відмінності між «відкриттям» і «винаходом» залишимо філологам; у будь-якому разі, запрошення Волкова виступити з доповіддю про супергравітацію на престижній конференції в Еріче свідчить про те, що її організатори були обізнані з його внеском у цю галузь.

Отже, у чому полягає відмінність між результатами Волкова та результатами інших засновників супергравітації? Головним здобутком Волкова стало відкриття ефекту супер-Гіггса, яке дало змогу сформулювати функціонал дії безмасових полів зі спіном 1 і 2, загально інваріантних відносно локальних перетворень

суперсиметрії (Volkov & Soroka, 1973; Volkov & Soroka, 1974). Ця конструкція є дуже близькою до так званого формалізму першого порядку С. Дезера та Б. Зуміно (Deser & Zumino, 1976). Водночас існує фундаментальна відмінність, на яку С. Дезер, С. Феррара, Д. Фрідман та П. ван Ньювенхейзен звертали увагу у приватному листуванні з Волковим. Зокрема, формалізм Волкова все ще включає нетривіальне поле Голдстіно, усунення якого призвело б до дії SUGRA, побудованої у двох різних формулюваннях (Deser & Zumino, 1976; Freedman et al., 1976) у 1976 році.

Із цієї точки зору підхід Волкова є скоріше попередником супергравітації, хоча він, безперечно, містив ключові елементи повної теорії.

Резюме

У цьому нарисі стисло розглянуто деякі з найважливіших епізодів наукової діяльності академіка Дмитра Волкова, а також роль, яку відіграв ЦЕРН у його кар'єрі. Навіть побіжний огляд біографії Волкова чітко свідчить про те, що його візити до ЦЕРН істотно вплинули як на його наукові інтереси, так і на характер фундаментальних проблем фізики частинок і фізики високих енергій, які він формулював і досліджував.

Докладніші відомості про його життя та наукову кар'єру Д. В. Волкова, а також інтерв'ю з ним, зібрано в кількох виданнях, більшість з яких було надруковано в Україні (наприклад, у книзі (Volkova & Nurmagambetov, 2007)). Вибрані фундаментальні праці Дмитра Волкова були представлені у (Volkova & Nurmagambetov, 2007), а також в англійському перекладі у (Wess & Akulov, 1998). Деякі відомості про Дмитра Волкова зібрано на веб-сайті, створеному С. Дуплієм (Duplij, 2003). Різні аспекти відкриття супергравітації, зокрема порівняння конкуруючих формулювань, також узагальнено в працях (Soroka, 2001; Bandos et al., 2016; Duplij, 2019; Kuzenko, 2023; West, 2025).

Подяки. Автор вдячний Дмитру Васильовичу Волкову за жваві дискусії щодо суперсиметрії, супергравітації та теорії струн. Особлива подяка Дмитру Сорокіну за цінні зауваження щодо початкового варіанту статті та Івану Трутню за коментарі та обробку фотографій. Автор висловлює вдячність організаторам наради ЦЕРН-Україна «Український внесок у фізику елементарних частинок: історія та перспективи» (Харків-ЦЕРН, 26–29 січня 2026 р.) за люб'язне запрошення виступити з доповіддю. Нарешті, автор висловлює глибоку вдячність Сталініті Іванівні Волковій за її терпіння та неоціненну допомогу під час підготовки книги (Volkova & Nurmagambetov, 2007), присвяченої професору Д.В. Волкову. Цей нарис написано в її пам'ять.

Посилання

Bandos, I., Martucci, L., Sorokin, D., & Tonin, M. (2016). Brane induced supersymmetry breaking and de Sitter supergravity. *JHEP 02*, 080. http://doi.org/10.1007/JHEP02(2016)080

Deser, S., & Zumino, B. (1976). Consistent Supergravity. *Phys. Lett. B62*, 335-337. http://doi.org/10.1016/0370-2693(76)90089-7

Duplij, S. (2003). https://www.uni-muenster.de/IT.StepanDouplii/old/volkov/index.html

Duplij, S. (2019). Supergravity Was Discovered by D.V. Volkov and V.A. Soroka in 1973, Wasn't it? *East Eur. J. Phys. 3*, 81-82. http://doi.org/10.26565/2312-4334-2019-3-10

Freedman, D.Z., van Nieuwenhuizen, P., & Ferrara, S. (1976). Progress Toward a Theory of Supergravity. *Phys. Rev. D13*, 3214-3218. http://doi.org/10.1103/PhysRevD.13.3214

Golfand, Y.A., & Likhtman, E.P. (1971). Extension of the Algebra of Poincare Group Generators and Violation of p Invariance. *JETP Lett., 13*, 323-326. http://doi.org/10.1142/9789814542340_0001

Kuzenko, S.M. (2023). Local supersymmetry: variations on a theme by Volkov and Soroka. *Proc. Roy. Soc. Lond. A479(2271)*, 20230022. http://doi.org/10.1098/rspa.2023.0022

Soroka, V.A. (2001). Starting point of supergravity. Preprint at https://arxiv.org/abs/hep-th/0111271v1

Volkov, D.V. (1958). The Application of the Mass Operator in Scalar Electrodynamics. PhD Thesis, Kharkiv. (In Russian.)

Volkov, D.V. (1959). On quantization of fields with a half-integer spin. *JETP, 29*, 414-416.

Volkov, D.V., & Gribov, V.N. (1963). Regge poles in the nucleon-nucleon and nucleon-anti-nucleon scattering amplitudes. *JETP, 44*, 1068-1077.

Volkov, D.V. (1965a). Negative Parity Baryon Resonances and Broken SU(6)⨯SU(6) symmetry. *Nuov. Cim., 40*, 281-283.

Volkov, D.V. (1965b). U(6,6) symmetry and higher baryon resonances. *Nuov. Cim., 40*, 284-288.

Volkov, D.V. (1969). Phenomenological Lagrangian of Goldstone particles interaction. *Preprint of Bogoliubov Institute for Theoretical Physics* #69-75, Kyiv. (In Russian.)

Volkov, D.V. (1971). Phenomenological Lagrangians invariant under symmetry group containing the Poincare group as a subgroup. *Preprint of Lebedev Physical Institute* #141, Moscow. (In Russian.)

Volkov, D.V. (1977). On the Higgs effect and supergravity. *Preprint CERN TH. 2288.*

Volkov, D.V. (1994). Supergravity before and after 1976. *Preprint CERN TH. 7226.*

Volkov, D.V. (1996). Supergravity before 1976. In: *Proc. of Int. Conf. on the History of Original Ideas and Basic Discoveries in Particle Physics, Erice, Italy, 1994. Plenum Pub.* (pp. 663-674).

Volkov, D.V., & Akulov, V.P. (1972). On a possible universal interaction of neutrino. *JETP Lett. 16*, 621-624. (In Russian.)

Volkov, D.V., & Akulov, V.P. (1973). Is the neutrino a Goldstone particle? *Phys. Lett. B46*, 109-110. https://doi.org/10.1016/0370-2693(73)90490-5

Volkov, D.V., & Soroka, V.A. (1973). Higgs effect for Goldstone particles of one-half spin. *JETP Lett. 18*, 529-532. (In Russian.)

Volkov, D.V., & Soroka, V.A. (1974). Gauge fields for a symmetry group with spinorial parameters. *Theor. Math. Phys. 20*, 829-834. http://doi.org/10.1007/BF01040161

Volkova, S.I., & Nurmagambetov, A.J. (eds). (2007). *Dmitry Vasilyevich Volkov. Articles, essays, memoirs. Timchenko AN Pub., Kharkiv*. (In Russian.)

Wess, J., & Akulov, V.P. (eds). (1998). Supersymmetry and Quantum Field Theory. *Proceedings of the D. Volkov Memorial Seminar Held in Kharkov, Ukraine, 5-7 January 1997*. LNP 509, Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/BFb0105228

Wess, J., & Zumino, B. (1974). A Lagrangian Model Invariant Under Supergauge Transformations. *Phys. Lett. B49*, 52-54. http://doi.org/10.1016/0370-2693(74)90578-4

West, P. (2025). The discovery of supergravity and its early development. *Int. J. Mod. Phys. A40(34)*, 2530020. http://doi/org/10.1142/S0217751X25300200

Джордж Гамов: від бета-розпаду до космологічного нуклеосинтезу

Богдан Новосядлий
Львівський національний університет імені Івана Франка

1. Вступ

Історія фізики XX століття є не лише історією відкриттів і творення нових теорій, але й історією наукових спільнот, інтелектуальних традицій і культур, що формували сучасне бачення світу в якому ми живемо. У цьому контексті особливого значення набуває внесок учених, чиї життєві чи/та наукові біографії пов'язані з Україною — регіоном, який історично був відкритим до європейських інтелектуальних впливів і водночас часто опинявся в умовах політичних обмежень.



Георгій Антонович Гамов (1904–1968) є однією з найбільш яскравих постатей такого типу. Його наукова діяльність розгорталася в період бурхливого розвитку квантової механіки, ядерної фізики та космології, і він належав до покоління вчених, які прагнули інтегруватися в міжнародну наукову спільноту, працюва-

ти в контексті відкритого обміну ідеями та формувати універсальну мову опису природи.

Народжений в Одесі, Гамов здобув освіту в науковому середовищі, яке поєднувало локальні традиції з активним засвоєнням новітніх досягнень європейської фізики. Його подальша кар'єра — від роботи в Ленінграді до наукових центрів Західної Європи і Сполучених Штатів — відображає не лише особистий шлях ученого, але й ширший процес входження фізики, пов'язаної з Україною, у глобальний науковий простір.

Постать Гамова показова тим, що його науковий розвиток відбувався у постійному діалозі з провідними ідеями світової науки. Його роботи не були ізольованими або локальними — вони одразу ставали частиною міжнародного наукового дискурсу. Водночас його біографія нагадує про складні умови, в яких часто опинялися вчені того часу, і про їхнє прагнення зберегти належність до відкритої науки, орієнтованої на універсальні цінності пізнання.

Метою цієї статті є розглянути основні етапи наукової діяльності Георгія Гамова в цьому ширшому контексті — як приклад взаємодії локальних наукових традицій і глобального розвитку фізики, що привела до формування сучасної моделі гарячого Всесвіту.

2. Ранні і студентські роки

Георгій Гамов народився у 1904 році в Одесі — місті, яке на початку XX століття було одним із важливих наукових і культурних центрів півдня України. Саме тут сформувалися його перші інтереси до математики та фізики. Уже в юнацькі роки він проявляв схильність до теоретичного мислення та інтерес до фундаментальних питань природи. Фото молодого Георгія Гамова дитячих, шкільних та студентських років наведено на рис. 1.

У 1921 році Гамов вступив до Одеського університету (тоді Інститут народної освіти), де розпочав систематичне вивчення фізики. Водночас він працював асистентом в Одеській астрономічній обсерваторії, що дало йому перший досвід наукової роботи. Цей період



Рис. 1. Г. Гамов у дитячі, шкільні та студентські роки.

його життя припав на час становлення квантової механіки, яка швидко перетворювалася на універсальну мову опису мікросвіту. Гамов належав до першого покоління фізиків, що формувалися в рамках нової квантової парадигми, і природно сприйняв її як основний інструмент пізнання.

У 1922 році він продовжив навчання в Ленінградському університеті, де його науковим керівником став Олександр Фрідман — один із засновників релятивістської космології. Хоча співпраця з Фрідманом тривала недовго через його передчасну смерть у 1925 році, саме в цей період Гамов отримав важливий імпульс до ширшого бачення фізики, що виходить за межі атомних масштабів. У 1923 році з Харківського університету (тоді Інститут народної освіти) до Ленінградського університету перевівся Дмитро Іваненко. Згодом Гамов та Іваненко, обидва з України, стали друзями та організаторами неформального кола молодих фізиків-теоретиків, яке отримало назву «джаз-бенд». Наступного року до них доєднався Лев Ландау, який перевівся до Ленінградського університету з Баку. У 1926-му на перший курс Леніградського університету вступив Матвій Бронштейн, народжений в українській Вінниці, який згодом теж став активним учасником «джаз-бенду». Всі четверо в майбутньому



Рис 2. Г. Гамов, Д. Іваненко (верхній ряд) та Л. Ландау (нижній ряд, 2-й справа) серед членів студентського гуртка "Джаз-бенд".

стали визначними фізиками-теоретиками. Це середовище було не стільки школою в традиційному сенсі, скільки інтелектуальним простором, де активно обговорювалися нові ідеї, швидко формувалися концепції і заохочувалася наукова сміливість (рис. 2). Саме ними на початку 1928 року була опублікована робота «Світові сталі і граничний перехід» [1], у якій було запропоновано ієрархію фізичних теорій на основі фундаментальних констант так звану cGh-систему. Ця робота відображає характерний для того часу пошук універсальних принципів, що об'єднують різні фізичні теорії.

Формування Гамова як ученого відбувалося в період надзвичайно швидкого розвитку фізики. Поєднання доброї математичної підготовки, інтелектуального середовища та відкритості до нових ідей визначило його подальший науковий стиль — інтуїтивний, сміливий і водночас фізично глибокий.

3. Прориви у ядерній фізиці

Перші фундаментальні результати Георгія Гамова пов'язані з однією з ключових проблем фізики початку XX століття — природою радіоактивного розпаду атомних ядер. Зокрема, альфа-розпад, відкритий ще на початку століття, залишався незрозумілим у рамках класичної фізики: альфа-частинка, перебуваючи в потенціальній ямі ядра, не мала достатньої енергії для подолання кулонівського бар'єра і, відповідно, не могла його покинути. Розв'язання цієї проблеми стало можливим лише після створення квантової механіки. У 1928 році Гамов показав, що альфа-частинка може залишати ядро завдяки ефекту квантового тунелювання [2]. Ймовірність такого процесу визначається експоненціальним фактором, який у квазікласичному наближенні має вигляд

$$P \sim exp\left(-2\int \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}\left(V\left(r\right)-E\right)}dr\right),$$

де $V(r)$ — потенціальний бар'єр, а E — енергія альфа-частинки, m – її маса, а $\hbar$ – стала Планка. Саме ця експоненціальна залежність пояснює надзвичайно широкий діапазон часів життя радіоактивних ядер.

Цей результат став одним із перших прикладів застосування квантової механіки до ядерних процесів і заклав основу для подальшого розвитку теорії радіоактивності. Важливо підкреслити, що підхід Гамова поєднував математичну строгість із фізичною інтуїцією, що дозволило отримати результат, який одразу знайшов експериментальне підтвердження.

Подальші дослідження Гамова у ядерній фізиці були спрямовані на розуміння внутрішньої структури атомного ядра та механізмів ядерних реакцій. Він одним із перших увів у розгляд дискретні збуджені стани ядер, що стало важливим кроком у формуванні квантового опису ядерних систем. Крім того, він показав, що протони є ефективними «зондами» для дослідження ядерної

структури, що мало значення для розвитку експериментальної ядерної фізики.

Разом із тогочасними фізиками Гамов брав участь у становленні моделей ядра, зокрема моделі рідинної краплі, яка дозволяла описувати колективні властивості ядерної речовини. Ці ідеї стали основою для подальшого розвитку теорії ядерних реакцій та пояснення явищ, пов'язаних із поділом ядер.

Важливе місце в його науковій діяльності займали також дослідження бета-розпаду. У роботах, виконаних спільно з Едвардом Теллером, було сформульовано правила відбору, які визначають можливість тих чи інших бета-переходів [3,4]. У цих роботах було прояснено роль спіну, парності та зміни кутового моменту, що стало важливим етапом у розвитку теорії слабких взаємодій.

Наукові досягнення Гамова в цей період були високо оцінені: у 1932 році, у віці лише 28 років, його було обрано членом-кореспондентом Академії наук СРСР. Водночас цей період його життя збігся з активною участю в міжнародному науковому житті. Зокрема, у 1933 році він брав участь у Сьомій Сольвеївській конференції — одному з найважливіших форумів тогочасної фізики, де обговорювалися фундаментальні проблеми квантової теорії (рис. 3).

Саме цей етап став переломним у його біографії. Після участі у 7 Сольвеївській конференції Гамов не повернувся до СРСР і продовжив свою наукову діяльність у провідних наукових центрах Європи, а згодом у Сполучених Штатах. Цей крок визначив подальший розвиток його наукової кар'єри, відкривши можливість повноцінної інтеграції в міжнародну наукову спільноту.

Праці Гамова в галузі ядерної фізики і фундаментальних взаємодії узагальнені у монографіях [5-7], що стали класичними для ядерної фізики (рис. 4). Вони відіграли важливу роль у систематизації знань про атомне ядро і вплинули на формування наступних поколінь фізиків.

Таким чином, роботи Гамова кінця 1920-х – 1930-х років заклали фундамент для квантового опису ядерних процесів і водночас



Рис. 3. Георгій Гамов серед учасників 7 Сольвеївської конференції з фізики 1933 року (задній ряд у центрі).

продемонстрували можливість застосування нових фізичних ідей до розв'язання конкретних експериментальних проблем. Саме в цей період сформувався його науковий стиль, який згодом визначив його внесок у астрофізику та космологію.

4. Астрофізика і космологія

Перехід Георгія Гамова від ядерної фізики до астрофізики був природним продовженням його наукових інтересів. Якщо квантова механіка дозволила зрозуміти процеси в атомному ядрі, то наступним кроком стало питання про роль цих процесів у більш масштабних астрофізичних системах. Гамов був серед перших, хто усвідомив, що термоядерні реакції можуть бути основним джерелом енергії зір. У той час це питання ще не було остаточно вирішеним,

і його дослідження сприяли утвердженню уявлення про ядерну природу джерел енергії зір. Він розглядав структуру та еволюцію зір, аналізуючи, як ядерні реакції визначають їхні фізичні властивості.

Однак справжній масштаб його ідей проявився тоді, коли він поставив значно ширше питання: якщо ядерні реакції визначають еволюцію зір, то чи могли подібні процеси відбуватися на ранніх стадіях існування Всесвіту? Це питання привело його до космології. У 1946–1948 роках Гамов разом із Ральфом Альфером і Робертом Германом розробив теорію утворення хімічних елементів у гарячому ранньому Всесвіті [8,9]. Основна ідея полягала в тому, що на ранніх етапах космічної еволюції Всесвіт перебував у стані високої температури і густини, за яких могли ефективно відбуватися ядерні реакції. У цих умовах співвідношення нейтронів і протонів визначалося термодинамічною рівновагою і приблизно описувалося експоненціальною залежністю

$$\frac{n}{p} \sim exp\left(-\frac{\Delta m}{kT}\right),$$

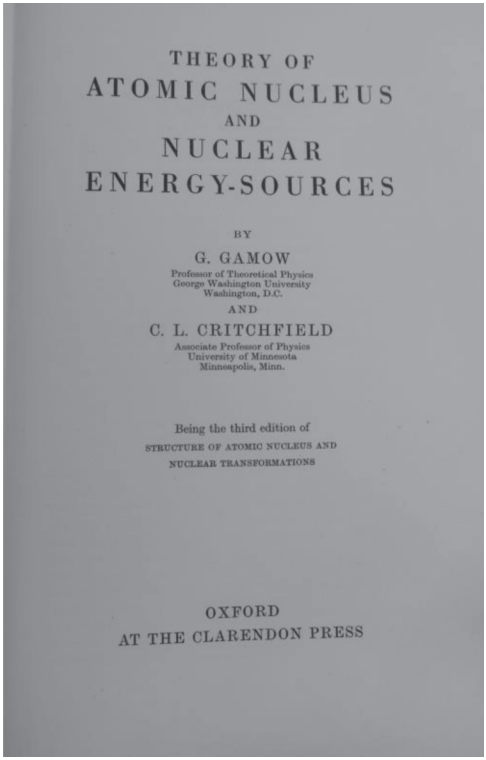
де Δm — різниця мас нейтрона і протона. У міру розширення Всесвіту і зниження температури це співвідношення «заморожувалося», що визначало подальший перебіг нуклеосинтезу.

Подальші ядерні реакції приводили до утворення легких елементів — передусім гелію. Важливою особливістю цього процесу є те, що він обмежений відсутністю стабільних ядер із масовими числами 5 і 8, що істотно гальмує утворення важчих елементів на цій стадії. У результаті первинний нуклеосинтез приводить до формування Всесвіту, склад якого доміновано воднем і гелієм, що добре узгоджується зі спостереженнями.

Одним із найглибших наслідків цієї теорії стало передбачення існування реліктового випромінювання — залишкового теплового випромінювання, що виникло внаслідок гарячої початкової фази еволюції Всесвіту. У роботах Альфера і Германа було показано, що

це випромінювання повинно зберігатися донині у вигляді майже ізотропного фону з температурою у кілька Кельвінів.

Це передбачення було експериментально підтверджене у 1965 році відкриттям Арно Пензіасом і Робертом Вільсоном космічного мікрохвильового фонового випромінювання, яке стало одним із ключових доказів моделі гарячого Всесвіту. Хоча Гамов не дожив до присудження Нобелівської премії за це відкриття, його внесок у формування цієї ідеї є важливим (рис. 5).


THEORY OF
ATOMIC NUCLEUS
AND
NUCLEAR
ENERGY-SOURCES

BY

G. GAMOW

Professor of Theoretical Physics
George Washington University
Washington, D.C.

AND

C. L. CRITCHFIELD

Associate Professor of Physics
University of Minnesota
Minneapolis, Minn.

Being the third edition of
STRUCTURE OF ATOMIC NUCLEUS AND
NUCLEAR TRANSFORMATIONS

OXFORD
AT THE CLARENDON PRESS

Рис. 4. Титульна сторінка книги "Теорія атомних ядер і джерел ядерної енергії", однієї з 3-х важливих наукових книг.

Таким чином, роботи Гамова в астрофізиці та космології стали якісно новим етапом у розвитку фізики. Вони показали, що закони мікросвіту — квантової і ядерної фізики — можуть безпосередньо визначати властивості і еволюцію зір та Всесвіту як цілого. Цей підхід заклав основу сучасної фізичної космології.

5. Генетика

Одним із найбільш несподіваних напрямків наукової діяльності Георгія Гамова стала його участь у становленні молекулярної біології. У 1950-х роках, після відкриття структури ДНК, перед

науковцями постала фундаментальна проблема: яким чином інформація, закодована в послідовності нуклеотидів, визначає амінокислотну послідовність білків. Гамов був одним із перших, хто сформулював цю проблему в чіткій фізичній формі. Він розглядав генетичний код як задачу відповідності між двома різними типами структур і намагався знайти її розв'язання, виходячи з комбінаторних і симетрійних міркувань. Його підхід базувався на ідеї, що код повинен бути достатньо простим і водночас здатним забезпечити однозначне кодування амінокислот. Хоча запропоновані ним моделі генетичного коду не були підтверджені експериментально, сам факт постановки задачі мав важливе значення. Він сприяв формуванню нового напрямку досліджень і залученню фізиків до проблем біології, що стало характерною рисою науки другої половини XX століття.

Цей епізод у науковій біографії Гамова ще раз підкреслює універсальність його мислення і здатність переносити методи теоретичної фізики на нові області. Водночас важливою рисою Гамова була його здатність не лише генерувати ідеї, але й об'єднувати навколо себе інших дослідників. Він був своєрідним «атрактором» у науковому середовищі — людиною, довкола якої природно формувалися неформальні інтелектуальні спільноти. Прикладом такого середовища, окрім раннього «джаз-бенду», є так званий «кравatковий клуб» — коло науковців, які регулярно збиралися для обговорення нових ідей у невимушеній атмосфері. Цей аспект його діяльності описано, зокрема, у книзі Джіно Сеґре «Звичайні генії», де показано роль неформальних наукових спільнот у розвитку фізики XX століття.

6. Освіта і популяризація науки

Поряд із фундаментальними дослідженнями Георгій Гамов відіграв важливу роль у формуванні наукової освіти і популяризації фізики. Його монографії з ядерної фізики та космології стали одними з перших систематичних викладів цих галузей і

використовувалися як навчальні посібники протягом тривалого часу (рис. 4). Ці праці відзначаються поєднанням математичної строгості та фізичної наочності, що зробило їх важливими не лише для фахівців, але й для студентів, які лише починали знайомство з новими розділами фізики.

Водночас Гамов був видатним популяризатором науки. Його науково-популярні книги робили складні ідеї сучасної фізики доступними для широкої аудиторії. Він володів рідкісним даром пояснювати глибокі фізичні концепції просто і водночас точно, не спрощуючи їх змісту. Саме завдяки таким роботам багато майбутніх учених вперше зацікавилися проблемами космології та ядерної фізики. Його популяризаторська діяльність відіграла важливу роль у поширенні ідей сучасної науки і формуванні наукового світогляду в другій половині XX століття.

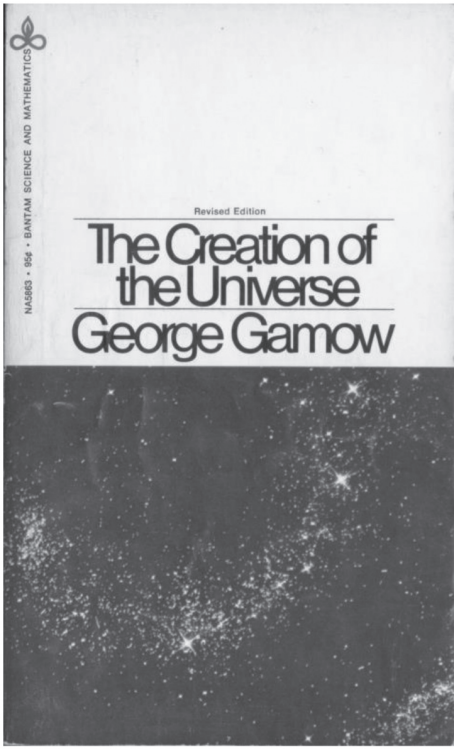


Рис. 5. Титульна сторінка книги "Створення Всесвіту", в якій підсумовано погляди Георгія Гамова на ранній Всесвіт і передбачення реліктового випромінювання.

7. Наукова спадщина

Наукова спадщина Георгія Гамова охоплює широкий спектр проблем — від квантових процесів у атомному ядрі до еволюції Всесвіту і природи генетичного коду. Його роботи стали важливою ланкою в розвитку фізики XX століття і суттєво впли-

нули на формування сучасної наукової картини світу. Особливе значення має той факт, що Гамов одним із перших продемонстрував можливість прямого зв'язку між мікрофізикою і космологією. Його дослідження показали, що властивості елементарних частинок і ядерних процесів можуть визначати глобальні характеристики Всесвіту, включаючи його хімічний склад і теплову історію. Водночас його наукова біографія є прикладом інтеграції вченого, пов'язаного з українським науковим середовищем, у світову науку. Його діяльність відображає прагнення до відкритості, міждисциплінарності та участі в глобальному інтелектуальному процесі, що є характерною рисою розвитку науки XX століття.

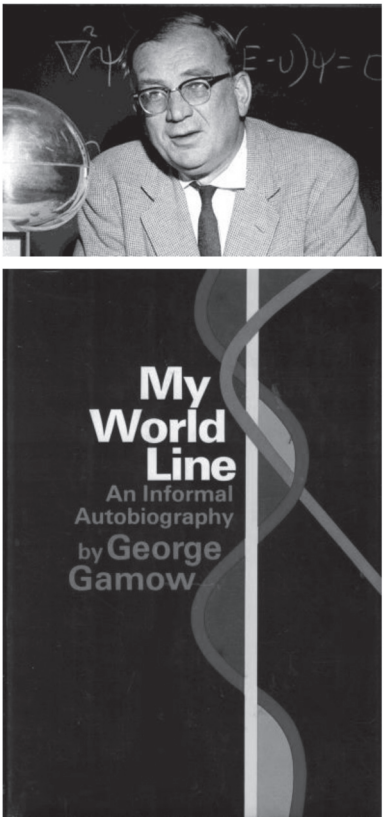


Рис. 6. Георгій Гамов талановитий лектор та популяризатор науки.

Сьогодні ім'я Георгія Гамова пов'язане не лише з конкретними науковими результатами, але й із ширшим уявленням про єдність фізики — від квантових явищ до космологічних масштабів. Його праці залишаються актуальними як приклад глибокого фізичного мислення і як основа для подальшого розвитку сучасної науки.

Про Гамова написано багато статей та книг як в Україні, так і за її межами (див. короткий список [10-19]). Першоджерелом є його відома "My World Line: An Informal Autobiography" 1970 року (рис. 6), яка перекладена в Україні (нажаль тільки російською) у 1999 році до його 95-річчя від дня на-

родження [10-11]. Важливою є також популяризація вкладу Гамова в науку та увіковічнення його імені у науковому і культурному просторі. Ім'я Гамова присвоєно малій планеті та кратеру на Місяці, що підкреслює визнання його внеску в науку. В Україні пам'ять про нього зберігається, зокрема, в Одесі — місті його народження, де його іменем названо сквер. Національна академія наук України присуджує Премію імені Георгія Гамова за видатні досягнення в галузі астрофізики та космології. Важливу роль у збереженні і розвитку наукової традиції відіграє також щорічна Гамівська школа-конференція в Одесі, яка об'єднує молодих дослідників і провідних учених, продовжуючи традицію відкритого наукового діалогу, що була характерною для самого Гамова. Ці форми вшанування не лише віддають належне видатному вченому, але й підкреслюють тяглість наукової культури, частиною якої він був і яку допоміг сформувати.

Подяки. Текст підготовлено за підтримки ініціативної теми Астрономічної обсерваторії ЛНУ ім. І. Франка "Структура, еволюція та фундаментальні компоненти Всесвіту: від Темних віків до сучасної епохи".

Література

1. Г. Гамов, Д. Иваненко, Л. Ландау. Мировые постоянные и предельный переход, Журнал Русского физико-химического общества. Часть физическая, Т. LX, с. 13, 1928.

2. G. Gamow. Zur Quantentheorie des Atomkernes, Zeitschrift für Physik, Bd. 51, s. 204, 1928.

3. G. Gamow, E. Teller. Selection Rules for the β-Disintegration, Physical Review, Vol. 49, p. 895, 1936.

4. G. Gamow, E. Teller. Some Generalizations of the β Transformation Theory, Physical Review, Vol. 51. p. 289, 1937.

5. G. Gamow. Constitution of Atomic Nuclei and Radioactivity. Clarendon Press, 1931.

6. G. Gamow. Structure of Atomic Nuclei and Nuclear Transformations. Clarendon Press, 1937.

7. G. Gamow, C. L. Critchfield. Theory of Atomic Nucleus and Nuclear Energy-Sources. Clarendon Press, 1949.

8. R. A. Alpher, H. Bethe, G. Gamow. The Origin of Chemical Elements, Physical Review, Vol. 73, p. 803, 1948.

9. R. A. Alpher, R. Herman, G. A. Gamow. Thermonuclear Reactions in the Expanding Universe, Physical Review, Vol. 74, p. 1198, 1948.

10. Gamow G. My World Line: An Informal Autobiography, 1970.

11. Гамов Г. А. Моя мировая линия : необычная автобиография, пер.: И. Л. Гамов, И. Тронин; предисл. С. М. Улам ; Соврем. гуманитар. ун-т. – М. : Соврем. образование, 1999. – 105 с.

12. Ранюк Ю. М. Георгій Гамов і розщеплення атомного ядра : до 100-річчя від дня народження Г. А. Гамова, Наука та наукознавство, No 3, с. 167, 2004.

13. Ранюк Ю.М. Георгій Гамов: той, хто відкрив дорогу, Світогляд, No 3 (41), с. 59, 2013.

14. Рябов М. И., Чернин А. Д., Рикун И. Э. Г. А. Гамов: физика - космология - генетика, Одеса : ОНУ, 2019. – 183 с.

15. Френкель В. Я., Чернин А. Д. От альфа-распада до большого взрыва, М. : Знание, (Новое в жизни, науке, технике) No 10, 1990, 64 с.

16. Чернин А. Д. Гамов в Америке, 1934–1968 : к 90-летию со дня рождения Г. А. Гамова, Успехи физ. наук, Т. 164, No 8. с. 867, 1994.

17. Чернин А. Джордж Гамов и большой взрыв, Квант, No 9/10, с. 21, 1993.

18. Segrè G. *Ordinary Geniuses: Max Delbrück, George Gamow, and the Origins of Genomics and Big Bang Cosmology*. New York: Viking, 2011.

19. A. Bottino and C. Favero, I Never Call It Big Bang: George Gamow – The Extraordinary Story of a Genius of Physics. World Scientific, 2024.

Славні скрижалі видатного фізика XX століття Дмитра Іваненка

Василь Шендеровський
доктор фізико-математичних наук,
професор Інституту фізики НАНУ

Світова історія не завжди була справедливою до окремих націй чи до окремих осіб. На малі нації вона не завжди зважала, їхніх представників науки і культури часто привласнювали великі, як правило, імперські нації, а їхні наукові досягнення отримували інше національне забарвлення. Це спричиняло до хибної думки, яку можна сформулювати словами: «… національної науки немає, так само як немає національної таблиці множення» /1/. Насправді, на нашу думку, адекватними є слова видатного французького мікробіолога і хіміка, засновника медичної мікробіології та імунології Луї Пастера: «Наука не має Вітчизни, але не буває без Вітчизни ученого, і те значення, яке його праці можуть мати у світі, він повинен відносити до своєї Вітчизни» /2/. Адже люди (рівно ж науковці) належать до певного народу, певної історичної епохи, певного суспільного класу. Наука виступає як соціальне явище з певними соціальними функціями, найперше – бути безпосередньо виробничою силою під егідою тих класів, які панують у сфері матеріального виробництва…

«Навіть коли наука нічого не дає суспільству, її потрібно зберегти, щоб це суспільство не повернулося до дикунства», – наголошував видатний математик Михайло Лаврентьєв /2/. Обов'язком

кожної нації є підвищення матеріального і духовного добробуту людського суспільства. Не з шовінізму, не з ксенофобії, а для того, щоб показати світові, що вона, як культурна нація, усвідомлює свій обов'язок – покласти свій доробок у спільну вселюдську скарбницю.

Нині утвердження України у світовому співтоваристві великою мірою пов'язане з процесом повернення історичної правди про внесок її вчених у розвиток сучасної науково-технічної думки, загальнолюдське пізнання законів природи. Добре знаним є, що серед основних наук особливе місце належить фізиці – науці про фундаментальні закони природи, а зі всіх найзнаменитіших постатей у цій ділянці не можна не виділити ім'я талановитого вченого фізика-теоретика Дмитра Іваненка /3/.

Саме його ім'я пов'язане зі становленням сучасної ядерної фізики, фізики елементарних частинок, квантової механіки, квантової теорії тяжіння і фізичних полів. Вчений був, поза всяким сумнівом, одним з найбільш величних вчених XX століття. На жаль, його ім'я, як і імена багатьох інших видатних вчених, свідомо замовчували або не асоціювали з українською нацією /1/.

В Українській Радянській Енциклопедії (УРЕ) читаємо: «Іваненко Дмитро Дмитрович (16(29).VII.1904, Полтава) – радянський фізик-теоретик, доктор фізико-математичних наук (з 1940). Після закінчення Ленінгр. ун-ту (1927) працював у ряді наук. установ і вузів країни (з 1930 – професор). З 1942 – в Московському ун-ті. Наукові роботи з теорії атомного ядра, фізики космічного проміння, теорії гравітації, квантової теорії поля і елементарних частинок тощо. Першим запропонував гіпотезу про будову атомного ядра з протонів і нейтронів (1932). Одночасно з І. Є. Таммом заклав основи теорії ядерних сил (1934–36). Спільно з І. Я. Померанчуком передбачив синхротронне випромінювання і розробив його теорію (1946–48). Держ. премія СРСР 1950» /4/. І все, навіть світлини немає.

Народився Дмитро Іваненко 29 липня 1904 року у Полтаві. Батько, Дмитро Іваненко, походив з родини священників, закінчив юридичний факультет Київського університету Святого Володимира, отримав (як всі випускники університету) особисте дворянство, що поширювалося на дітей жіночої статі. Працював редактором газет «Полтавский вестник» (1902–1907) і «Полтавский голос» (1907–1915), за радянської влади викладав українську й російську літератури у трудовій школі /5/. Мати, Лідія Миколаївна, походила з дворянської родини Слатіних. У сім'ї Іваненків росла ще й дочка Оксана, яка народилася 13 квітня 1906 року. На відміну від брата, який був міщанином, Оксана успадкувала дворянство, закінчила педагогічний факультет університету в Харкові, згодом стала відомою письменницею. У 1974 році Оксана Іваненко стала лауреатом літературної премії імені Лесі Українки за повість «Рідні діти», роман «Тарасові шляхи» та «Лісові казки», а 1986 року їй була присуджена Шевченківська премія за книгу «Завжди в житті». Загальний наклад книг Оксани Іваненко складає більше п'яти з половиною мільйонів /6/.

Дмитро був тісно здруженим із сестрою, на їхню долю випало щасливе дитинство: родина жила духовним життям – відвідували театри в Полтаві й інших містах, випускали журнали, влаштовували домашні спектаклі /7/.

Спочатку Дмитро навчався в Полтавській гімназії, в якійсь колись отримував початкову освіту видатний український математик і механік Михайло Остроградський (1801-1862). Слід зауважити, що в часи Першої світової війни до Полтави евакуювали з Польщі, з невеличкого містечка Грубешова, гімназію, і багато професорів викладали у ній. Отже, знання Іваненко отримав чудові (в гімназії він мав кличку «професор»), володів кількома європейськими мовами. З гімназійних товаришів Дмитро Іваненко згодом підтримував близькі дружні стосунки з Євгеном Гапоном (1904-1950), видатним фізиком-хіміком професором Тимірязівської сільськогосподарської академії.

Після закінчення 1920 року гімназії Дмитро Іваненко працює спочатку бібліотекарем в одній зі шкіл Полтави, а потім – викладачем фізики і математики у своїй гімназії. Одночасно він навчається і закінчує Полтавський педагогічний інститут, вступає 1922 року до Харківського інституту народної освіти[1] (працюючи без оплати в Полтавській астрономічній обсерваторії). Проте рівень викладання в інституті не задовольнив молодого Іваненка, і він переїздить восени 1923 року до Москви, а згодом, у грудні 1923 році, опиняється в Ленінградському університеті. Одночасно з навчанням він працює у Державному оптичному інституті /8/.

Тут, у Ленінграді, відбулася зустріч трьох у майбутньому знаменитих фізиків: Георгія Гамова (Джо), Лева Ландау (Дау) і Дмитра Іваненка (Дімуса) /10/. Між ними трьома встановилися теплі дружні стосунки. Гамов закінчив університет раніше, а 1927 року закінчили Іваненко і Ландау. Вони всі вступають до аспірантури Фізико-математичного інституту АН СРСР. 1928 року Іваненко отримує пропозицію від Івана Обреїмова переїхати до Харкова, де з ініціативи Абрама Йоффе створювали Фізико-технічний інститут /10/. Молодий вчений погоджується на переїзд, адже туди, до Харкова, переїхали на викладацьку роботу і батько, і сестра Оксана. У 1929–1931 роках Іваненко працює першим завідувачем теоретичного відділу в Українському фізико-технічному інституті (УФТІ) у Харкові (на той час столиці України). Він стає професором у Механіко-машинобудівному інституті й університеті. У травні 1929 року за ініціативи Дмитра Іваненка на базі створюваного УФТІ провели першу в Радянському Союзі теоретичну конференцію, в якій брали участь відомі фізики-теоретики: Я. Френкель, В. Фок, Л. Ландау, Г. Гамов, І. Тамм, В. Фредерікс, П. Лукирський, В. Амбарцумян, Л. Штрум та інші. Приїхали також два відомих німецьких вчених: В. Гейтлер і П. Йордан (один із засновників квантової механіки). У 1931 році Дмитро Іваненко організував ще одну Всесоюзну конференцію з

1 Вища школа, створена в 1921 році на базі ліквідованого Харківського університету. Існувала до 1930, як університет відновлено у 1933 році.

магнетизму (друга Всесоюзна теоретична конференція). Цього ж року він ініціює видання у Харкові фізичного журналу німецькою мовою «Physikalische Zeitschrift der Sowjet Union», а потім організовує видання журналу і англійською мовою /10/.

1931 року Дмитро Іваненко повертається до Ленінграда, де працює старшим науковим працівником Ленінградського фізико-технічного інституту АН СРСР до 1935 року. Тут було створено ядерний відділ, яким керував Ігор Курчатов. Дмитро Іваненко очолив ядерний семінар, а також брав активну участь у підготовці до проведення першої конференції щодо ядра у 1933 році. Ця робота зумовила необхідність зустрічей із самим комуністичним можновладцем Сергієм Кіровим, вбивство якого згодом спричинило масові репресії у країні. Не оминула караюча рука і молодого вченого. 27 лютого 1935 року Іваненка арештували. Причиною арешту стала нібито участь Дмитра Іваненка в контрреволюційній групі, яку очолював неповерненець Георгій Гамов. Крім того, Іваненка звинувачували в тому, що він у себе на квартирі організовував нелегальні зібрання під виглядом наукових бесід. Його було засуджено як «соціально-небезпечний елемент» до трьох років таборів з конфіскацією майна і відправлено в Карагандинський виправно-трудовий табір. Майно повністю конфіскували, а дружину разом з трирічною дитиною вислали «через справу чоловіка» в Оренбург (на щастя, дитину все ж вдалося залишити у батьків дружини у Ленінграді). Через рік табір було замінено на заслання до кінця закінчення терміну до Томська (за Д. Іваненка клопотали Я. Френкель, С. Вавилов, А. Йоффе, але своїм рятівником Іваненко вважав все ж Сергія Вавилова). Там Іваненко працював старшим науковим співробітником Томського фізико-технічного інституту, професором і завідувачем кафедри теоретичної фізики університету /11/.

1939 року Дмитро Іваненко переїжджає до Свердловська, де стає завідувачем теоретичної кафедри Свердловського університету, а з грудня 1940 року – завідувачем кафедри теоретичної фізики в Свердловському університеті. У 1940–1941 роках

Дмитро Іваненко – професор і завідувач кафедри теоретичної фізики Київського університету (і керівник теоретичного відділу в Інституті фізики Академії наук) /11/.

25 червня 1940 року у Фізичному інституті АН СРСР Дмитро Іваненко захистив докторську дисертацію на тему: «Основи теорії ядерних сил». Опонентами були Я. Френкель, Д. Блохінцев і І. Тамм /12/. Диплом доктора фізико-математичних наук, як і атестат професора, вчений отримав тільки в 1946 році. Починаючи з серпня 1943 року, Дмитро Іваненко стає завідувачем кафедри електроніки і йонних процесів фізичного факультету Московського державного університету за сумісництвом, а вже з жовтня він працює на кафедрі теоретичної фізики. За рекомендацією Є. Гапона в січні 1944 року Дмитро Іваненко стає завідувачем кафедри фізики в Тимірязівській сільськогосподарській академії, де розпочав біофізичні дослідження з застосуванням ізотопних індикаторів /1/.

Зауважмо, що з квітня по вересень 1945 року Дмитро Іваненко був направлений керівником спеціальної групи в Німеччину, з метою оцінки стану її ядерної програми. З 1949 року по 1963 рік Дмитро Іваненко працює старшим науковим співробітником за сумісництвом в Інституті природознавства. Пізніше назву змінили, додавши «і техніки». Ідея створення цього інституту належала Володимиру Вернадському /11/.

Слід зауважити, що Іваненко був також видатним істориком науки. Він написав велику главу «Фізика» до тритомного видання «Історія природознавства в СРСР» (на жаль, видання не побачило світ) /12/.

1959 року вчений бере участь в Міжнародній гравітаційній конференції у Парижі, де було створено Міжнародний гравітаційний комітет, до складу якого увійшов і Дмитро Іваненко. Цього ж року відбулася Міжнародна Рочестерська конференція з фізики елементарних частинок у Києві, на якій був присутній серед багатьох іноземців і Вернер Гейзенберг /12/.

До кінця свого життя Дмитро Іваненко бував (після дозволу бути «виїзним» за кордон у 1956 році) на багатьох конференціях, наукових симпозіумах, був ініціатором проведення багатьох із них. В Україні вчений бував нечасто: у 1964 році в Києві – на Нараді з філософських проблем релятивістської космології; крім того, хіба що ще двічі, зокрема, на початку 60-х років в Ужгородському університеті (за спогадами Олександра Лендьєла), очевидно на запрошення свого учня професора Юрія Ламсадзе, читав курс лекцій з квантової теорії поля (згодом була публікація про ці заходи в науковому збірнику Ужгородського державного університету /13/).

У 1930 р. Дмитро Іваненко разом з Віктором Амбарцумяном запропонували сміливу гіпотезу /14/: що в ядрі зовсім немає ніяких електронів, а β-електрон народжується під час самого процесу β-розпаду на кшталт випромінювання фотонів. Він розв'язав дилему звідки беруться електрони і гіпотетична частинка Паулі, яку Енріко Фермі назвав «нейтрино».

Славу великого фізика-теоретика принесла Іваненку праця, надрукована 28 травня 1932 року (йому тоді було 27 років) у журналі «Nature» /15/, в якій він вперше висловив твердження, що ядро складається тільки з протонів і нейтронів. Це усувало так звану азотну катастрофу. Нейтрон, нова частинка зі спіном ½ /9,16/ і масою близькою до маси протона, був відкритий Джеймсом Чедвіком на початку 1932 року /17/. Тільки через декілька тижнів німецький фізик Вернер Гейзенберг також опублікував статтю про протон-нейтронну модель ядра /18/, пославшись на роботу Дмитра Іваненка у журналі «Nature» /15/.

Іваненко також ставить питання про те, «наскільки нейтрони можна вважати елементарними частинками» /15/. Ця думка Іваненка відповідає сучасному стану розуміння, якщо мати на увазі, що протони і нейтрони одинаковим способом не вважаються елементарними, так як складаються відповідно із кварків - більш елементарних частинок. Ідею, що нейтрони і протони складені із частинок більш фундаментального ієрархічного рівня

Дмитро Іваненко висловлював на Ленінградській конференції задовго до того як з'явилися перші гіпотези про кварки /12/.

Важливо згадати тут ще одну фундаментальну працю Дмитра Іваненка щодо з'ясування природи ядерних сил. Ця праця /19/ була опублікована на одній сторінці зі статтею Ігоря Тамма /20/ у журналі «Nature» у червні 1934. Ці роботи стали результатом спільного обговорення, в якому брав участь і Віктор Амбарцумян. Ядерні сили Тамма–Іваненка були першою моделлю взаємодії через обмін масивними частинками з потенціалом близькодії, і вони стали відправною точкою моделі ядерних сил Юкави, який послався на них /21/. Робота Х. Юкави була закінчена у вересні 1934 року, зроблена доповідь про неї на зібранні Японського фізико-математичного товариства 17 жовтня і опублікована в 1935 році в працях Товариства /21/.

Визнанням наукових заслуг Дмитра Іваненка може слугувати також участь багатьох визначних вчених (П. Дірак, Ф. Жоліо-Кюрі, В. Вайскопф, Ф. Перрен, Ф. Разетті) у роботі 1-ої Всесоюзної ядерної конференції у Ленінграді у 1933 році, ініціатором і одним з організаторів якої був учений /10/.

Характерною рисою Дмитра Іваненка було його напрочуд феноменальне сприйняття нових, а іноді божевільних ідей. Варто згадати його першу працю з Георгієм Гамовим щодо 5-вимірного простору (1926 р.) /22/; теорію спіноров як антисиметричних тензорних полів (разом з Ландау, 1928 р.) /23/; теорію дискретного простору–часу Іваненка-Амбарцумяна (1930 р.) /24/, теорію гіперядер (разом з Колесниковим, 1956 р.) /25/; гіпотезу квантових зірок (разом з Д. Курдгелаїдзе, 1965 р.) /26/.

До числа його найвизначніших наукових праць, поза всяким сумнівом, належить також книга, видана в 1949 році (разом з Арсенієм Соколовим) «Класична теорія поля» /27/, в якій послідовно викладено формалізм узагальнених функцій. Чимало закордонних фізиків, наприклад, нобелівський лауреат Ілля Пригожин, вважав цю книгу за настільну (її перевидано багатьма

іноземними мовами). 1950 року Дмитрові Іваненку присудили Сталінську премію другого ступеня (спільно з Арсенієм Соколовим і Ісаком Померанчуком) «за роботи з теорії "електрона, який світиться", і щодо сучасних проблем електродинаміки, викладені в монографії "Класична теорія поля"».

Про визнання наукових здобутків Дмитра Іваненка можуть свідчити знамениті вислови на стінах його кабінету 4–59 на фізичному факультеті, залишені шістьма нобелівськими лауреатами. Ось ці вислови /12/:

- «Physical law should have mathematical beauty[2]» (Поль Дірак, 1956);
- «Nature is simple in its essence[3]» (Хідекі Юкава, 1959);
- «Contraria non contradictoria sed complimenta sunt[4]» (Нільс Бор, 1961);
- «Time precedes existence[5]» (Ілля Пригожин, 1987);
- «Physics is an experimental science[6]» (Семюел Тінг, 1988);
- «Nature Conformable to Herself in Complexity[7]» (Мюррей Гелл-Манн, 2007).

Дмитро Іваненко не став академіком. Чому? Залишається загадкою. Кажуть, що його кандидатуру подавали на здобуття Нобелівської премії 15 (!) разів. Не присудили. Не отримав він і Зірки Героя (на відміну від багатьох своїх колег-фізиків). Правда, 1980 року його було нагороджено орденом Трудового Червоного Прапора (у зв'язку з 225-річчям) Московського державного університету (вчений був дуже засмучений цим). Двічі йому було відмовлено у отримані «Почесного звання заслуженого діяча науки і техніки» (у 1974 і 1984 роках). Щодо цього, ще один цікавий факт наукової оцінки рівня вченого: 1985 року Дмитро Іваненко брав участь у ювілейній конференції в Ленінграді, приуроченій до 50-річчя від-

2 Фізичний закон має бути математично прекрасним.
3 Природа за свою суттю є простою.
4 Протилежності не є протиріччями, але взаємно доповнюють одне одного.
5 Час передує всьому, що існує.
6 Фізика є наукою експериментальною.
7 Природа самоузгоджена у своїй складності.

криття Георгієм Фльоровим і Костянтином Петржаком спонтанного поділу ядра урану 235. Під час конференції Георгій Фльоров сказав таке: «Коли я стою поруч з Дмитром Дмитровичем, мені стає соромно, що я – академік» /12/.

Вже незадовго до кончини видатного науковця 19 грудня 1994 року йому було присуджено почесне звання «Заслужений професор Московського університету». Однак свідоцтво про нагородження Дмитра Іваненка дружина отримала вже після смерті /11/.

Бувши великим вченим, Дмитро Іваненко любив життя, добре розумів і цінував живопис, знав минувшину, уважно ставився до наукової термінології. Це він увів до наукової літератури нині звичні нам терміни «власне значення» і «власні вектори», а в деяких джерелах йому приписують навіть введення терміна «комп'ютер» /12/. У нього було багато захоплень: ботаніка, філателія, фотографування, кінозйомка, колекціонування метеликів, шахи, великий теніс, керування автомобілем. Вчений вірив у Бога, що у радянські часи йому доводилося приховувати. Любив свободу, чим викликав нерозуміння багатьох людей радянської епохи, не вступав до лав КПРС, категорично відмовлявся працювати над ядерною програмою, не брав участі у суботниках, політзаняттях й інших громадських заходах /7/.

Дмитро Іваненко був одружений двічі. Перший раз – з внучкою відомого художника-передвижника Ксенією Корзухіною, яка працювала лікарем. У сім'ї Іваненків було троє дітей: Мар'яна, Михайло і Олексій. Сім'я протрималася разом недовго, розлад виник у час арешту Іваненка 27 лютого 1935 року. Офіційний розрив Іваненка з дружиною відбувся 1949 року, хоча ще тривалий час вони то сходилися, то розходилися /12/.

У 1961 році Дмитро Іваненко звернув увагу на стенографістку (Римму Куликову), яка прийшла працювати на фізичний факультет. Їхнє спільне життя почалося 1969 року і тривало до самої смерті Іваненка. Ця подія (офіційний шлюб відбувся у 1972 році) на той час була небувалим скандалом, викликом «радянській мо-

ралі». Зазначмо, що упродовж наступних років життя Іваненка в усіх характеристиках для закордонних поїздок вченого та й інших справ обов'язковою була фраза: «факт розлучення парткому відомий». Іноді, коли новому подружжю випадала можливість їздити разом за кордон, то дружина могла зауважити, що Іваненко завжди притягував до себе увагу, адже він розмовляв німецькою так само, як українською і російською, знав англійську, французьку, італійську, іспанську мови. Спілкування з ним завжди було цікавим. Недаремно на докір Л. Ландау М. Бронштейну за його стосунки з Іваненком, останній відповів: «…з Дімусом цікаво» /7/.

1985 року, після повернення Іваненка з конференції у Японії, вчений захворів – у нього виявили рак передміхурової залози. Йому зробили операцію, після чого він прожив активно ще десять років, працював, їздив на конференції. У цьому велика заслуга його дружини. Вона навіть хотіла залишити свою роботу у Центрі міжнародної освіти МДУ, але Дмитро Іваненко категорично заборонив їй це робити.

30 грудня 1994 року Дмитро Іваненко помер. Поховано вченого на Кунцевському кладовищі у Москві. Лише у 1989 року Дмитра Іваненка було реабілітовано. Як згадує його дружина, Іваненко щиро зрадів, побачивши по телевізору знесення пам'ятника Дзержинському. «Все-таки я пережив цю владу» /7/, – такою була реакція людини, що прожила життя, сповнене страху і принижень, арештів і таборів.

Звичайно, відносини з колегами, друзями і представниками наукової еліти у Іваненка були непростими. Кожен з них був особистістю в науці. Часто ці стосунки були складними через організаційні причини. Іваненко мав неабиякий талант організатора, організовуючи семінари, конференції, симпозіуми, наукові товариства. Архів Іваненка містить 45 аудіокасет спогадів самого вченого і про нього, а також близько тисячі документів і листів вітчизняних і закордонних вчених, зокрема і листів 20 лауреатів Нобелівської

премії, особливо чимала переписка з багатьма вченими різних країн, науковими центрами та університетами /12/.

Наукова спадщина вченого дуже велика: він опублікував більше 300 наукових праць, монографія Д. Іваненка і А. Соколова «Класична теорія поля» (1949) була першою книгою щодо сучасної теорії поля. Під редакцією Дмитра Іваненка видано 27 монографій і збірників статей провідних закордонних вчених, які відіграли визначальну роль у розвитку світової науки. За словами доктора фізико-математичних наук, провідного наукового співробітника кафедри теоретичної фізики фізичного факультету МДУ Геннадія Сарданашвілі, одного з близьких учнів і співробітників Дмитра Іваненка, Дмитро Іваненко – суперзірка вітчизняної фізики, один з великих фізиків-теоретиків XX століття /12/.

На відзнаку заслуг видатного вченого у 2005 році впроваджено стипендію імені Дмитра Іваненка для студентів фізичного факультету МДУ. А що маємо на Україні? Згадаємо хіба що таке: у Полтаві, на батьківщині Дмитра Іваненка у липні 2004 року відбулося святкування, приурочене 100-річчя від дня народження видатного фізика /11/. Чи не мало цього?

Подяка

Автор щиро дякує організаторам семінару «Український внесок у фізику елементарних частинок: історія та перспективи» за натхненну атмосферу та підтримку у публікації цієї статті.

Література

1. Шендеровський В.А. Вчені України у світовій науці. Київ: ВД «Простір». 2019. с. 282-287.
2. Розсип думок. Упорядник В.А.Шендеровський. 5-е видання. Київ: ВД «Простір». 2026. 160 с.
3. Храмов Ю.О. Фізика. Історія фундаментальних ідей, теорій та відкриттів. Київ: «Фенікс». 2012. 816 с.

4. Українська радянська енциклопедія. Київ: Видання друге. Т.4. С.320. 1979.

5. Скобельський В. Дмитро Іваненко – «батько» першої міської газети. Полтавський вісник. 7 жовтня 2014. № 40 (1316).

6. Казки,написні серцем.До 100 –річчя від дня народження Оксани Іваненко (1906-1997). Національна бібліотека України для дітей. 2006. https:// chl.kiev.ua

7. Д. Д. Иваненко - вне науки и политики. По рассказам Р.А. Куликовой-Иваненко. VIVOS VOCO: «К 100-летию со дня рождения Д. Д. Иваненко». Записала Н.В.Успенская. Природа. 2004, № 8.

8. Шендеровський В. Нехай не гасне світ науки. У 4-х томах, Київ: ВД «Простір». 2017. Т.4. С. 67–73.

9. Герштейн С. С. На заре ядерной физики. VIVOS VOCO: «К 100-летию со дня рождения Д. Д. Иваненко». Природа. 2004. № 8.

10. Ранюк Ю.М. Лабораторія № 1. Ядерна фізика в Україні. Харків: Акта. 2006. 579 с.

11. Звонкова Г.Л. Початок досліджень з ядерної фізики в Україні. / Матеріали 28 Всеукраїнської наукової конференція молодих істориків науки, техніки і освіти та спеціалістів за темою «Історія науки і техніки у кризові періоди суспільного розвитку».Київ, 14 квітня 2022. С.126-129.

12. Сарданашвили Г. А. Дмитрий Иваненко – суперзвезда советской физики. Ненаписанные мемуары. Режим доступа: http:// phys.msu.ru/upload/iblock/815/ivanenko-book.pdf.

13. Иваненко Д., Ломсадзе Ю. Конференция по теории элементарных частиц (Ужгород, 14 – 23 окт. 1963 г.). Успехи физических наук. 1964. Т. 83, вып. 1. С. 190–196.

14. Ambarzumian V., Iwanenko D., Les électrons inobservables et les rayons,. Compt. Rend. Acad Sci. Paris, v. 190, p.582-584, 1930. https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3143v/f584.item

15. Iwanenko D., The Neutron Hypothesis.// Nature. 129. 798 (1932). https://doi.org/10.1038/129798d0

16. Gapon, E., Iwanenko, D. Zur Bestimmung der Isotopenzahl. Naturwissenschaften 20, 792–793 (1932). https://doi.org/10.1007/BF01494007

17. Chadwick J., Possible Existence of a Neutron. // Nature. 129. 312 (1932). https://doi.org/10.1038/129312a0

18. Heisenberg W., Über den Bau der Atomkerne. I. Z. Physik. 77. 1–11 (1932). https://doi.org/10.1007/BF01342433

19. Iwanenko D. Interaction of Neutrons and Protons. Nature 133. 981–982 (1934). https://doi.org/10.1038/133981b0

20. Tamm I. Exchange Forces between Neutrons and Protons, and Fermi's Theory. Nature 133. 981 (1934). https://doi.org/10.1038/133981a0

21. Yukawa, H. On the interaction of elementary particles. I. Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan, Third Series, 17 (1935), 48–57. https://doi.org/10.11429/ppmsj1919.17.0_48

22. Gamow, G., Iwanenko, D. Zur Wellentheorie der Materie. Z. Physik 39, 865–868 (1926). https://doi.org/10.1007/BF01451755

23. Iwanenko D., Landau L. Zur theorie des magnetischen electrons. 1. Zeitschrift fur Physik. Bd. 48. S. 340-348.1928.

24. Ambarzumian V., Iwanenko D. Eine guantentheoretische emerkung zur einheitlischen feldtheorie. ДАН СССР. №3.С.45-49.1930.

25. Иваненко Д.Д., Колесников Н.Н. Энергия связи гипер-ядер. ЖЭТФ. Т. 30, вып. 4. С.800-801. 1956.

26. Иваненко Д.Д., Курдгелаидзе Д.Ф. Гипотеза кварковых звёзд. Астрофизика. Т. 1. № 6. С. 479.1965.

27. Иваненко Д.Д., Соколов А.А., Классическая теория поля. Гостехиздат. М.-Л.,1949.

Гліб Ватагін та його місія в Бразилії

Карола Добригкайт
Інститут фізики імені Гліба Ватагіна,
Університет Кампінаса, Кампінас, штат
Сан-Паулу, Бразилія

1. Вступ

Історія Гліба Ватагіна ілюструє, як наука часто розвивається завдяки людям, які перетинають кордони, відновлюють інституції та передають знання між континентами у складні історичні часи. Його внесок у бразильську фізику не можна оцінити лише за його науковою діяльністю, а скоріше за школою, яку він створив, інституціями, які він допоміг сформувати, та поколіннями фізиків, яких він підготував. Отже, його спадщина є як науковою, так і інституційною, національною та міжнародною.

Історія сучасної фізики в Бразилії нерозривно пов'язана з приїздом Гліба Ватагіна до Сан-Паулу в 1934 році. Як і для багатьох європейських вчених його покоління, міжнародна кар'єра Ватагіна була глибоко позначена політичними та культурними потрясіннями, що ознаменували першу половину XX століття як у Європі, так і в Бразилії.

Ця стаття базується на нещодавно прочитаній лекції та відображає точку зору й бачення її автора. Її метою є подати стислий, але вичерпний огляд наукової кар'єри Ватагіна, його ролі у заснуванні сучасної фізики в Бразилії та тривалого впливу його роботи на

різних континентах. Вона не є працею з історії науки, заснованою на архівних дослідженнях. Натомість вона написана з точки зору фізика, який мав честь зустріти Ватагіна в Кампінасі та глибоко захопитися його науковим баченням та особистою чесністю. Моя власна наукова кар'єра була присвячена вивченню космічних променів надвисокої енергії — інтелектуальній традиції, що веде до Ватагіна через мого наукового керівника, Сезара Латтеса, одного з його учнів та перших співпрацівників. Ця перспектива природно визначає акценти розповіді, яка прагне підкреслити роль Ватагіна як вченого, педагога та організатора наукових інституцій, а також тривалий вплив його спадщини на бразильську фізику.

2. Ранні роки та наукова підготовка в Європі

Гліб Васильович Ватагін народився 1899 року в освіченій та заможній родині в містечку Бірзула, яке згодом було перейменовано на Котовськ, а з 2016 року — на Подільськ, що нині знаходиться на території України, а тоді містечко входило до складу Російської імперії. Батько майбутнього вченого був інженером, який обіймав посаду директора південно-західних імперських залізниць. Ватагін отримав ґрунтовну початкову освіту в Імператорській Олександрівській (Першій чоловічій) гімназії у Києві та розпочав навчання в Київському університеті в 1918 році.

Політичні потрясіння, що послідували за Російською революцією, кардинально змінили життя родини. У 1919 році, серед хаосу, що охопив Східну Європу, Ватагін разом із батьками та сестрою втік через Одесу та Чорне море, зрештою дістався Турина (Італія) після низки проміжних подорожей. Ця вимушена міграція вирішально визначила його подальший життєвий шлях.

У Турині Ватагін проявив надзвичайну рішучість і стійкість. Заробляючи на життя, акомпануючи на фортепіано до німих фільмів, даючи приватні уроки та працюючи перекладачем, він продовжував навчання з винятковим успіхом. У 1922 році він отримав диплом з фізики в Туринському університеті, а менш ніж через два роки, у

1924 році, — диплом з математики, обидва з найвищими оцінками та з відзнакою.

У період з 1925 по 1933 рік Ватагін викладав у Королівській академії та Школі артилерії та інженерних застосувань у Турині, а з 1929 по 1934 рік обіймав посаду лектора в Туринському університеті. У цей період він набув італійського громадянства та глибоко інтегрувався в європейську наукову спільноту. Він брав участь у міжнародних конференціях, відвідував провідні установи та налагодив особисті контакти з багатьма центральними фігурами фізики XX століття, уважно стежачи за становленням квантової механіки та ранніми розробками у фізиці елементарних частинок.

3. Чому Бразилія? Сан-Паулу на початку 1930-х років

На початку 1930-х років Сан-Паулу різко контрастував із жвавими науковими центрами Європи. Вища освіта існувала переважно у вигляді ізольованих професійних шкіл, таких як юридична, медична та інженерна, але не було університету, присвяченого викладанню та дослідженням у широкому спектрі дисциплін. Водночас серед інтелектуалів та політичних лідерів Сан-Паулу набирав обертів потужний рух, що виступав за створення сучасного університету, здатного сприяти науковим дослідженням та культурному розвитку.

Цей рух завершився створенням Університету Сан-Паулу в 1934 році. У рамках цього амбітного проєкту Факультет філософії, наук та літератури (FFCL) був задуманий як інтелектуальне ядро нового Університету Сан-Паулу. Стратегія була явно міжнародною: вчених мали залучати з Європи, щоб закласти міцні основи в природничих та гуманітарних науках. Біологів, ботаніків та зоологів шукали переважно в Німеччині, гуманітаріїв — у Франції, а математиків та фізиків — в Італії.

Місію з набору європейських фізиків очолив бразильський математик Теодоро Рамос, який зв'язався з Енріко Фермі, щоб обговорити можливість професорської посади в Сан-Паулу. Од-

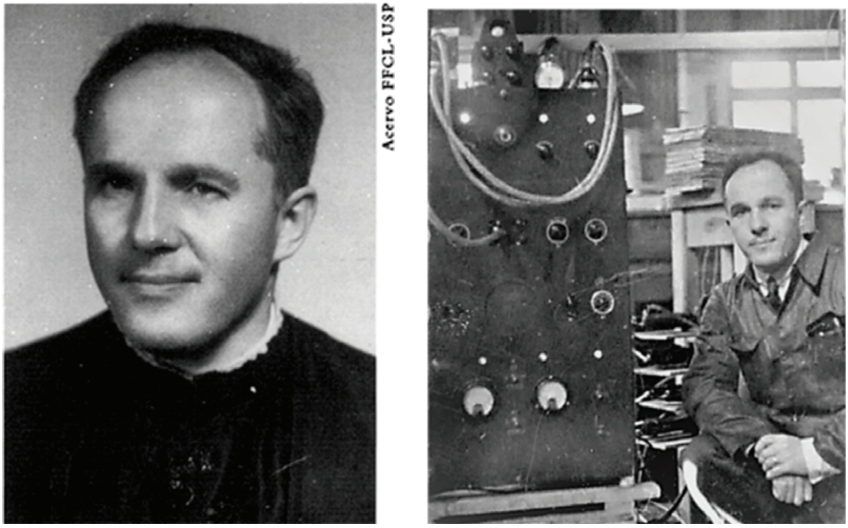


Рисунок 1. Гліб у перші роки в Сан-Паулу (ліворуч) та у фізичній лабораторії в 1930-х роках із лічильником Гейгера, який використовувався в експериментах з космічними променями (праворуч). Джерело: Архів FFCL-USP.

нак Фермі відхилив запрошення і натомість запропонував Гліба Ватагіна. Спочатку вагаючись і побоюючись наукової ізоляції від основних центрів фізики, Ватагін зрештою прийняв пропозицію. Політичні події в Італії на той час у поєднанні з його власними незалежними поглядами відіграли вирішальну роль у цьому поворотному моменті. Він прибув до Сан-Паулу в 1934 році, саме в рік заснування університету.

На рисунку 1 (ліворуч) показано рідкісне фото Гліба в перші роки перебування в Сан-Паулу та у фізичній лабораторії в 1930-х роках із лічильником Гейгера, який використовувався в експериментах з космічними променями (праворуч) (FFCL-USP).

4. Місія: впровадження сучасної фізики в Бразилії

Ватагін не розглядав свій переїзд до Бразилії лише як академічне призначення. Він бачив у цьому місію: впровадити сучасну

фізику та наукову освіту, засновану на дослідженнях, у країні, де такі традиції ще перебували у зародковому стані. З самого початку він з надзвичайною інтенсивністю та ентузіазмом присвятив себе викладанню, пропонуючи курси з фізики як студентам-інженерам, так і студентам-фізикам. Його лекції з сучасної фізики, квантової механіки та теорії відносності мали настільки великий вплив, що не один майбутній інженер вирішив повністю відмовитися від інженерії та здобути ступінь з фізики.

Хоча за освітою він був теоретиком, Ватагін чітко розумів стратегічне значення експериментальних досліджень. Він усвідомлював, що для розвитку сильної фізичної школи в Бразилії потрібні не лише теоретичні знання, а й практична експериментальна діяльність, здатна давати оригінальні результати та інтегрувати бразильські дослідження в міжнародний науковий простір.

Виклики, з якими він зіткнувся, були грандіозними. Він прибув до новоствореного університету, який не мав усталених фізичних традицій, спеціального приміщення чи лабораторії, визначеного навчального плану, технічної інфраструктури та мав лише невелику кількість студентів. Проте завдяки надзвичайній енергії, оптимізму та організаторським здібностям Ватагін фактично з нуля заклав основи фізичної школи. Це поєднання інтелектуального бачення та інституційної відданості незабаром виявилося вирішальним для розвитку бразильської фізики.

5. Від теорії до експерименту: космічні промені в Сан-Паулу

Хоча Гліб Ватагін мав освіту теоретика, він чітко розумів, що для створення потужної школи фізики в Бразилії потрібна експериментальна програма, здатна давати оригінальні результати. У країні, де лабораторії, обладнання та технічна інфраструктура були ще вкрай обмеженими, цей вибір був і сміливим, і стратегічним. Замість того, щоб намагатися відтворити експерименти, що залежали від складних і дорогих установок, Ватагін вирішив

зосередитися на тому, що було природно доступним: космічному випромінюванні та його взаємодії з речовиною.

Під його керівництвом у Сан-Паулу була сформована група експериментальної фізики, а Марчелло Дамі та Пауло Аулус Помпея були призначені його першими помічниками. Група вирішила зосередитися на тому, що було легкодоступним: всюдисущі космічні промені та потоки частинок, які вони ініціюють через взаємодію в атмосфері. Перед ними стояло завдання побудувати майже все з нуля, включаючи детектори, електронні схеми та методи вимірювання. Незважаючи на ці обмеження, експериментальна робота, що розвивалася в Сан-Паулу, швидко досягла рівня, порівнянного з рівнем провідних міжнародних лабораторій.

Початкові вимірювання зосередилися на проникаючій складовій космічного випромінювання. Лічильники Гейгера-Мюллера використовували для вивчення інтенсивності зливів за різних товщин скельної породи та різних експериментальних умов. Вимірювання проводили в шахті Морро-Велью (Бразилія) на глибинах 200 і 400 м водного еквіваленту під поверхнею та в Сан-Паулу на глибині 50 м водного еквіваленту [1–3]. У висновках [2] автори підкреслюють, що «вже отримані результати дають підстави вважати, що спостережувані частинки пов'язані з проникними ядрами широких атмосферних каскадів, відкритих Оже та його колегами» [4]. За цими експериментами в наступні роки послідували вимірювання на висоті 7000–8000 м з використанням літака бразильських ВПС. На рисунку 2 зображені Ватагін та його технік Франсіско Бентівольо Гвідолін з обладнанням, яке використовувалося під час польотів. Результати також були опубліковані в журналі Physical Review [5,6].

Одним із найважливіших ранніх результатів було спостереження розгалужених потоків одночасних проникаючих частинок, що утворювалися під час взаємодій космічних променів. Ці відкриття сприяли формуванню розуміння каскадів високоенергетичних частинок і вивели групу з Сан-Паулу на передові позиції в дослідженні космічних променів того часу.

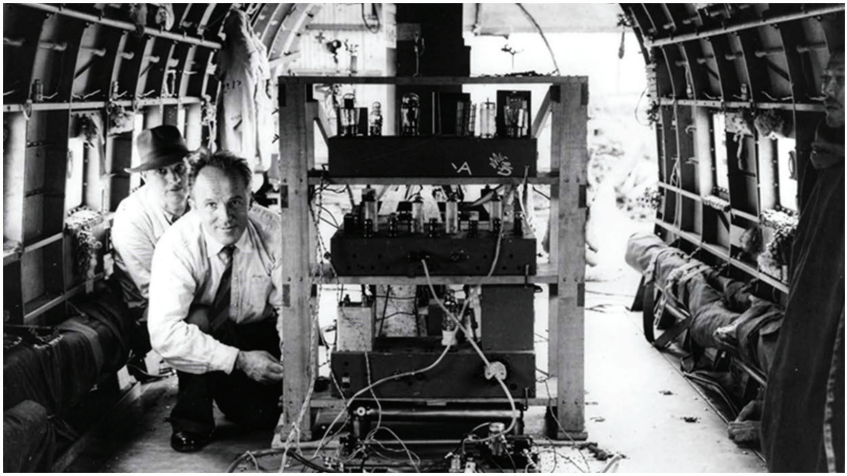


Рисунок 2. Технік Франсіско Бентівольйо Гідолін та Гліб Ватагін у середині 1940-х років при вимірюванні частинок космічного випромінювання під час польотів на літаку.

Примітно, що менше ніж за п'ять років після створення група публікувала результати у найпрестижніших міжнародних журналах. Цей стрімкий успіх не був випадковим. Він став результатом поєднання наукового бачення Ватагіна, його здатності мотивувати та організовувати молодих дослідників, а також його наполегливості у дотриманні суворих стандартів, порівнянних із тими, що існували у визнаних закордонних центрах. Він вирішив надсилати результати у формі листів до редакції журналу «Physical Review». Стислість багатьох із цих публікацій відображає не брак змісту, а практичні обмеження наукової комунікації того часу, коли швидке поширення інформації залежало від листування та поштових послуг. Таким чином, експериментальна програма з космічних променів стала центральним стовпом Школи фізики, яку він будував, і відіграла вирішальну роль в інтеграції бразильської фізики в міжнародне наукове співтовариство.

6. Міжнародна школа фізики

Одним із найхарактерніших аспектів підходу Гліба Ватагіна була його рішучість інтегрувати новостворену Школу фізики в Сан-Паулу до міжнародного наукового співтовариства. З самого початку він розумів, що наукова ізоляція буде згубною для молодої дослідницької групи, розташованої далеко від основних центрів фізики. Щоб протидіяти цьому, він активно сприяв обміну людьми та ідеями, заохочуючи своїх студентів працювати за кордоном і запрошуючи іноземних вчених до Сан-Паулу, коли це було можливо.

Кілька учнів і співробітників Ватагіна були відправлені до провідних наукових центрів Європи та США. Марчелло Дамі працював з Вільямом Бреггом, Пауло Аулус Помпея співпрацював з Артуром Комптоном, а Маріо Шенберг проводив дослідження з Енріко Фермі, Вольфгангом Паулі, Джорджем Гамовим, а пізніше — з Субраманьяном Чандрасекаром. Соня Ашауер працювала з Полом Діраком, Вальтер Шютцер — з Юджином Вігнером у Принстоні, Джеймі Тіомно — з Джоном Вілером та Юджином Вігнером, а Оскар Сала — з Реймондом Джорджем Гербом.

Особливо показовим прикладом цієї міжнародної мережі є історія Джузеппе Оччаліні. Його приїзд до Сан-Паулу в 1937 році був зумовлений не лише академічними міркуваннями. На прохання свого батька та в контексті дедалі складнішого політичного клімату в Європі наприкінці 1930-х років Ватагін допоміг Оччаліні переїхати до Бразилії. Оччаліні привіз із собою цінний досвід, набутий під час співпраці з Патріком Блекеттом та Бруно Россі, і незабаром був призначений доцентом у Сан-Паульському університеті, де зробив значний внесок у зміцнення експериментальної діяльності групи. Коли в 1942 році Бразилія оголосила війну Італії, Оччаліні був звільнений зі своєї посади. Потім він деякий час провів у горах Ітатіаї, де написав путівник по цьому регіону, перш ніж зрештою покинути Бразилію і виїхати до Великої Британії.

У Великій Британії Оччаліні приєднався до Сесіла Пауелла в Брістолі, де тривала новаторська робота з ядерними емульсіями. У цей період він підтримував тісний контакт із Сезаром Латтесом, з яким у Сан-Паулу у нього склалися міцні особисті та наукові дружні стосунки. Завдяки листам, у яких описував стрімкий прогрес експериментів з емульсіями в Брістолі, Оччаліні відіграв вирішальну роль у стимулюванні інтересу Латтеса до приєднання до цього напряму досліджень. Пізніше Латтес брав безпосередню участь у цих дослідженнях, що увінчалися відкриттям піону в 1947 році — знаковим результатом у фізиці елементарних частинок і визначальним моментом для бразильської науки.

Окрім цих довготривалих обмінів, Сан-Паулу також відвідували провідні діячі міжнародної фізики. Енріко Фермі завітав сюди у 1934 році, незабаром після прибуття Ватагіна до Бразилії, у час, коли Університет Сан-Паулу ще перебував у стадії становлення. У 1941 році Артур Комптон прибув до Бразилії в складі експедиції і разом з Оскаром Салою провів вимірювання за допомогою водневих балонів для вивчення частинок космічного випромінювання в стратосфері та їх залежності від геомагнітної широти й магнітного поля Землі. Комптон також взяв участь у симпозіумі з космічного випромінювання, що відбувся в Ріо-де-Жанейро, ще більше зміцнивши міжнародну впізнаваність та інтеграцію бразильської групи.

Ця послідовність подій ілюструє, як школа Ватагіна була глибоко вкорінена в міжнародних наукових та людських мережах, сформованих не лише науковими амбіціями, а й політичними реаліями того часу. Окрім цього інституційного та наукового лідерства, протягом свого життя Гліб Ватагін опублікував 155 статей у міжнародних журналах та зробив внесок у роботу академій наук Італії та Бразилії. Його наукові праці з'являлися кількома мовами, зокрема німецькою, французькою, італійською та португальською. Він також є автором книги з електромагнетизму та оптики.

7. Теорія, астрофізика та процес Урка

Паралельно зі стрімким розвитком експериментальних досліджень у галузі космічних променів теоретична робота залишалася центральною складовою наукової діяльності Гліба Ватагіна в Бразилії. Його інтереси були широкими й охоплювали широке коло питань — від квантової теорії поля та теорії відносності до статистичних моделей утворення частинок, астрофізики та космології. Ця інтелектуальна широта відіграла вирішальну роль у формуванні наукової школи, в якій теорія й експеримент розвивалися у тісному взаємозв'язку, а не як окремі напрямки.

З огляду на те, що лекція, яка передувала моїй нинішній доповіді на конференції, була присвячена Джорджу Гамову, тут особливий акцент робиться на його співпраці з учнем Ватагіна Маріо Шенбергом, яка привела до одного з найвпливовіших теоретичних досягнень, пов'язаних із групою з Сан-Паулу.

Особливо значущим прикладом цієї взаємодії став візит Гамова до Бразилії в 1939 році. Під час цього візиту Гамов тісно співпрацював з Ватагіном і Шенбергом, що призвело до дискусій про еволюцію зірок та гравітаційний колапс. Ці обміни завершилися формулюванням того, що пізніше стало відомим як процес Урка — теоретичний механізм, що описує інтенсивну втрату енергії на пізніх стадіях еволюції зірок через випромінювання нейтрино.

Гамов і Шенберг припустили, що в зірках, які стискаються і наближаються до колапсу, відбуваються специфічні ядерні процеси, під час яких електрони захоплюються ядрами, утворюючи нейтрино, що майже вільно виходять із ядра зірки. Це швидке випромінювання нейтрино призводить до ефективного охолодження та прискорює колапс зірки. Назва «процес Урка» була обрана за аналогією зі швидкою втратою грошей у знаменитому казино «Казіно да Урка» в Ріо-де-Жанейро — образ, який яскраво відображав фізичну суть механізму.

Формулювання процесу Урка особливо наочно ілюструє рівень, на якому працювала школа Ватагіна. Хоча це формулювання було розроблено в Бразилії, воно стосувалося питань, що перебували на передньому краї міжнародних досліджень в астрофізиці та ядерній фізиці. Воно також продемонструвало, що теоретичні ідеї, що походять із Сан-Паулу, були повністю вбудовані у глобальний науковий діалог і здатні впливати на розуміння фундаментальних процесів у природі.

Цей епізод ще раз окреслює наукове середовище, створене Ватагіном, в якому молодих дослідників заохочували займатися амбітними проблемами та природно взаємодіяти з провідними міжнародними діячами. Процес Урка залишається одним із найтриваліших теоретичних внесків, пов'язаних із бразильським періодом кар'єри Ватагіна, та яскравим прикладом інтелектуальної зрілості, якої досягла його школа.

8. Повернення до Італії та відновлення фізики в Турині

Після закінчення Другої світової війни Італія зіткнулася зі складним завданням відновлення своїх наукових інституцій та оновлення академічного персоналу. Багатьох вчених, які покинули країну в попередні десятиліття, було запрошено повернутися, щоб долучитися до цих зусиль. У цьому контексті Гліб Ватагін повернувся до Італії в 1949 році, відновивши свою академічну кар'єру в своїй альма-матер, Туринському університеті.

Вкотре Ватагін продемонстрував ту саму видатну здатність до розбудови інституцій, що характеризувала його роботу в Бразилії. Він став завідувачем кафедри теоретичної фізики та відіграв центральну роль у реорганізації та зміцненні фізичного факультету в Турині. Зберігаючи свою характерну відкритість до діалогу, він сприяв тісній взаємодії між теоретиками та експериментаторами, сприяючи створенню динамічного та колективного наукового середовища.



Рисунок 3. Ватагін під час церемонії відкриває меморіальну дошку з написом свого імені біля входу до будівлі нашого інституту (1971).

У цей період Ватагін брав активну участь у початковому етапі розвитку Національного інституту ядерної фізики, підтримуючи ініціативи, які згодом стали центральними для італійської ядерної фізики та фізики елементарних частинок. Він також сприяв встановленню та експлуатації великих експериментальних установок у Турині, зокрема бетатрона потужністю 30 МеВ, а згодом — синхротрона потужністю 100 МеВ, який працював протягом кількох десятиліть і відігравав важливу роль у наукових дослідженнях та навчанні.

Вплив Ватагіна виходив за межі досліджень та викладання. Він був членом Академії наук Турина та Національної академії Лінчеї, а в 1951 році отримав престижну премію Фельтрінеллі. Протягом цих років він продовжував займатися своєрідною науковою дипломатією, запрошуючи іноземних вчених до Турина та підтримуючи активну співпрацю з дослідницькими центрами за кордоном, зокрема в Бразилії.

Хоча його професійне життя знову зосередилося в Європі, Ватагін зберіг міцні та тривалі зв'язки з бразильською фізичною спільнотою. Він уважно стежив за кар'єрою своїх колишніх студентів та колег і залишався надзвичайно авторитетною та шанованою постаттю в Бразилії. Гліб Ватагін помер у Турині в 1986 році, залишивши після себе наукову спадщину, міцно вкорінену по обидва боки Атлантики.

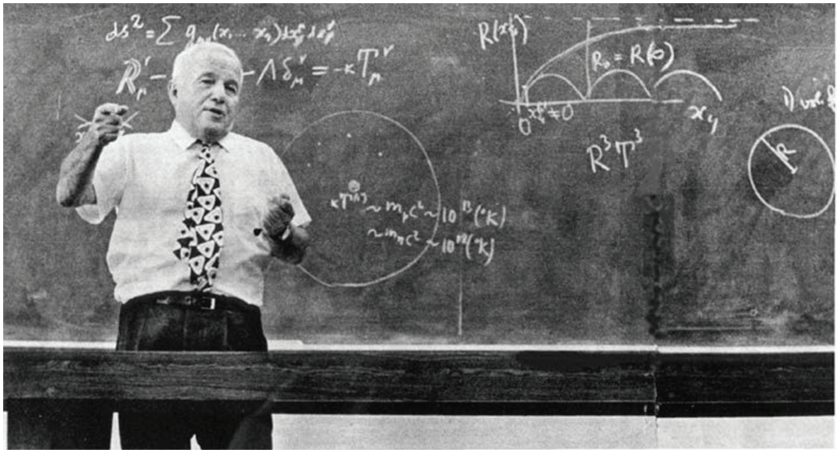


Рисунок 4. Гліб Ватагін читає лекцію з загальної теорії відносності в Інституті фізики імені Гліба Ватагіна (IFGW) Університету Кампінаса на початку 1970-х років.

9. Особисті якості та спадщина

Окрім своїх наукових досягнень та впливу на інституції, Гліб Ватагін запам'ятався студентам та колегам низкою особистих якостей, які відіграли вирішальну роль у його успіху як вченого та педагога. Його ентузіазм щодо фізики був заразливим. Він мав надзвичайну здатність доносити ідеї чітко та захоплено і був відомий тим, що з щирою пристрастю розповідав про космічні промені та фундаментальну фізику аудиторіям з будь-яким рівнем підготовки.

Ватагін був невиправним оптимістом, глибоко переконаним у цінності науки та освіти. Він отримував велике задоволення від того, що ділився знаннями та заохочував молодь і виявляв винятковку щедрість у підтримці студентів та колег, часто допомагаючи їм далеко за межами офіційних академічних обов'язків. Його моральна цілісність, інтелектуальна чесність та вишукані манери залишили незабутнє враження на всіх, хто з ним спілкувався. Для багатьох він

уособлював образ справжнього джентльмена, поєднуючи наукову строгість із людяністю та теплотою.

Особливо значущим визнанням його впливу в Бразилії стало те, що в 1971 році Інститут фізики Університету Кампінаса отримав назву Instituto de Física Gleb Wataghin. Назва інституту символізувала не лише інституційну шану, а й визнання фундаментальної ролі Ватагіна у формуванні поколінь фізиків у Бразилії. На рисунку 3 показано, як Ватагін відкриває меморіальну дошку з написом свого імені біля входу до будівлі нашого інституту.

Під час своїх візитів Гліб Ватагін читав лекції нам, тоді ще студентам, на теми, над якими він раніше працював (рисунок 4).

Під час свого останнього візиту до Кампінаса в 1974 році Ватагін мав нагоду на власні очі побачити життєву силу фізичної спільноти, яка виросла з насіння, яке він посіяв десятиліттями раніше.

10. Висновки

Мало хто з вчених мав такий глибокий і тривалий вплив на науковий розвиток іноземної країни, як Гліб Ватагін у Бразилії. Його спадщина виходить далеко за межі його власних наукових досягнень. Вона живе в установах, які він допоміг створити, у міжнародних мережах, які він налагодив, і, перш за все, у поколіннях фізиків, яких він навчив і надихнув.

Завдяки його баченню бразильська фізика міцно інтегрувалася в міжнародну наукову спільноту. Його учні та учні його учнів розійшлися по всій країні, формуючи розвиток фізики в університетах та наукових центрах по всій країні. Сьогодні бразильські фізики беруть активну участь у великих міжнародних співпрацях — від фізики високоенергетичних частинок у ЦЕРН до провідних експериментів у галузі фізики космічних променів та астрочастинок у всьому світі.

Життя та робота Ватагіна ілюструють, як науковий прогрес часто рухають особи, здатні поєднувати інтелектуальну глибину, інституційну відданість та людську щедрість. Його спадщина за-

лишається потужним прикладом того, як наука може перетинати кордони та історичні обставини, залишаючи незгладимий слід на різних континентах.

Подяка

Я хотіла б подякувати організаторам наради «Український внесок у фізику елементарних частинок: історія та перспективи», зокрема д-ру Тетяні Гриньовій, за люб'язне запрошення взяти участь у семінарі та вшанувати пам'ять професора Гліба Ватагіна та його внесок у розвиток фізики в Бразилії. Для мене було великою приємністю взяти участь у цій нараді.

Література

1. Pompeia, P. A., Damy de Souza Santos, M., & Wataghin, G. (1940). Simultaneous penetrating particles in the cosmic radiation. Physical Review, 57(1), 61. https://doi.org/10.1103/PhysRev.57.61
2. Pompeia, P. A., Damy de Souza Santos, M., & Wataghin, G. (1940). Simultaneous penetrating particles in the cosmic radiation II. Physical Review, 57(3), 339. https://doi.org/10.1103/PhysRev.57.339
3. Damy de Souza Santos, M., Pompeia, P. A., & Wataghin, G. (1941). Showers of penetrating particles. Physical Review, 59(12), 902. https://doi.org/10.1103/PhysRev.59.902
4. Auger, P., Ehrenfest, P., Maze, R., Daudin, J., & Fréon, R. A. (1939). Extensive cosmic-ray showers. Reviews of Modern Physics, 11(3), 288–291. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.11.288
5. Sala, O., & Wataghin, G. (1946). Showers of penetrating particles at an altitude of 22,000 feet. Physical Review, 70(5–6), 430. https://doi.org/10.1103/PhysRev.70.430
6. Wataghin, G. (1947). Showers of penetrating particles at an altitude of 26,000 feet. Physical Review, 71(7), 453. https://doi.org/10.1103/PhysRev.71.453

Київські витоки сучасної математичної фізики

Віктор Герасименко
Інститут математики НАН України,
Терещенківська, 3, Київ, 01601, Україна

Переднє слово

У статті розглянуто початковий етап розвитку сучасної математичної фізики в Києві, який замовчувався або значною мірою ігнорувався в історії Академії наук України. Фактично, науковий прорив, про який тут йдеться, відбувся в середині 20 століття, коли фундаментальна наука не могла розвиватися в імперських провінціях і перебувала під «пильним» контролем партійного керівництва Академії наук. На жаль, ці «традиції» залишаються чинними й сьогодні, і, отже наука в Україні продовжує розвиватися всупереч, а не відповідно до суспільних пріоритетів.

Нижче наведено деякі історичні факти, пов'язані з організацією Інституту математики в Києві [1], першої математичної наукової школи професора Д.О. Ґраве [2],[3], та впливом на їх розвиток постійних структурних змін (реорганізацій) Академії наук, спрямованих на посилення партійного контролю над вченими. На тлі цього досліджено джерела виникнення сучасної математичної фізики в Києві, і в цьому контексті надано огляд рукописів професора М.М. Боголюбова [4], створених в Інституті математики.

Створення та перші десятиліття розвитку Математичного інституту УАН

Математичний інститут у складі Української академії наук було офіційно засновано за таких подій. У лютому 1920 року Загальні збори Української академії наук вирішили обрати професора Д.О. Ґраве (1863–1939) першим математиком-членом Академії на наступних Загальних зборах 8 березня 1920 року. Професора Д.О. Ґраве було одноголосно обрано на кафедру чистої математики з дорученням якнайшвидше організувати Математичний інститут УАН, який «було засновано в той самий час без зволікання» [1].

Соціальні процеси того періоду були тісно переплетені з багатовіковою історією української культури. Варто зазначити, що саме в цей час науковцям нарешті дозволили захищати дисертації українською мовою. 23 березня 1918 року Центральна Рада підтвердила статус української мови як мови офіційного ведення справ. За основу було взято абетку, розроблену митрополитом Іларіоном (Іваном) Огієнком. Це сталося через 42 роки після Емського указу про заборону української мови. Трохи більше року тому, 12 березня 1917 року, Центральна Рада постановила, що мовою першого звернення українського парламенту має бути українська.

Окремі фрагменти історичної атмосфери, в яких зароджувалась сучасна математична фізика в Інституті математики, правдиво відображені в статті [6] легендарного академіка І.М. Дзюби.

«... Початок 1930-х років приніс нові виклики Академії. Атмосфера в ній була гнітючою через політичні репресії в країні, навмисне «загострення класової боротьби» та наслідки голоду. Функцію «непримиримої боротьби з ворожими елементами Всеукраїнської академії наук (ВУАН)» виконувала комуністична фракція ВУАН, яка перетворилася на своєрідного офіційного наглядача за діяльністю всієї Академії та кожного її окремого члена під приводом «всебічного, конкретного, поглибленого вивчення наукової продукції співробітників ВУАН, спрямованого на сприяння переважній

більшості науковців у методологічній перепідготовці та виявленні явно ворожих елементів» (Резолюція комуністичної фракції ВУАН про політичне становище Академії від 20 травня 1932 року).»

Бурхливий період перших трьох десятиліть XX століття в Києві [5] та ранні етапи становлення Інституту математики висвітлені в есе [1].

Наукова школа професора Д.О. Ґраве

Історія Інституту математики нерозривно переплетена з долею його засновника академіка Д.О. Ґраве. Важко відокремити спадок вченого від спадку математичної установи Академії наук. Його визначний внесок у математику, механіку та математичну фізику визнаний у всьому світі. Академік Д.О. Ґраве відіграв ключову роль не лише у створенні Інституту математики, а й самої Академії наук України, а також у заснуванні різних наукових товариств і кафедр математики та механіки в Києві.

Значну роль у формуванні великої математичної школи навколо професора Д.О. Ґраве відіграв науковий семінар, який він започаткував у 1908 році. З перших років існування семінару його відвідували не лише вчені, а й студенти. Науковий семінар Ґраве було присвячено тогочасним проблемам чистої та застосовної математики. У 1920-х роках тематика семінару охоплювала широкий спектр напрямів, включаючи класичну гідродинаміку, механічну теорію ефіру, теорію електрики Максвелла, механіку Ґерца, теорію Айнштайна, квантову механіку, актуарну математику та механіку молекулярних структур. Щоб зрозуміти масштаби наукових інтересів Дмитра Ґраве, достатньо ознайомитися зі списком книг та підручників, автором яких він є [3]. Для більш детального аналізу наукової творчості професора Д.О. Ґраве та її впливу на розвиток математики ми відсилаємо до статей [2] та [3].

Участь у науковому семінарі професора Д.О. Ґраве сформувала світогляд багатьох відомих українських вчених. Найвідомішим серед них був Микола Боголюбов.

М.М. Боголюбов (1909–1992)

З тринадцяти років М.М. Боголюбов став активним учасником семінару Д.О. Ґраве. Дух семінару та особистий вплив професора Д.О. Ґраве сформував М.М. Боголюбова як натурфілософа та вченого у галузі математичної та теоретичної фізики. У червні 1925 року, за клопотанням Д.О. Ґраве, Мала Президія Укрголовнауки прийняла рішення вважати М.М. Боголюбова на становищі аспірантом до науково-дослідної кафедри математики в Києві. У 1928 році він захистив дисертацію на звання наукового працівника на тему «Про розробку нових методів варіаційного чисельного аналізу». Цей історичний прецедент ілюструє важливість наукової школи для розвитку вченого.

Інститут математики офіційно прийняв М.М. Боголюбова на посаду старшого наукового співробітника 1 березня 1945 року. 1 квітня він обійняв посаду завідувача відділу асимптотичних методів та статистичної механіки. Наказ про звільнення від 1 листопада 1956 року був підписаний його учнями Ю.О. Митропольським, який тоді був виконувач обов'язки директора інституту, та О.С. Парасюком. Слід зазначити, що донедавна причетність М.М. Боголюбова до Інституту математики не визнавалася і була офіційно підтверджена лише під час святкування його 100-річчя у 2009 році [4].

Праці М.М. Боголюбова в Інституті математики

Працюючи в Інституті математики, М.М. Боголюбов написав багато визначних праць [7] – [16]. Прокоментуємо деякі з цих манускриптів у контексті раніше невідомих фактів про їх написання в зазначений період.

Звіт М.М. Боголюбова в Інституті математики за 1945 рік під назвою «Проблеми динамічної теорії у статистичній фізиці» послужив рукописом [7] для нині відомої монографії «Проблеми динамічної теорії у статистичній фізиці», яка була опублікована в 1946 році. Результати, представлені в цій монографії, ознаменували новий етап у розвитку статистичної фізики.

Як відомо, еволюція стану системи скінченної кількості частинок описується фундаментальним еволюційним рівнянням Ліувілля [19]. Еквівалентний підхід до опису еволюції станів ґрунтується на ієрархії еволюційних рівнянь для послідовності редукованих функцій розподілу, які задовольняють ієрархією еволюційних рівнянь, відомої як ієрархія ББГКІ (Боголюбов – Борн – Грін – Кірквуд – Івон). Витоки поняття цих рівнянь сягають праць Ж. Івона 1935 р., М.М. Боголюбова в 1945 р., М. Борна і Г.С. Гріна, та Дж.Г. Кірквуда у 1946 році [7]. Переваги такої ієрархії рівнянь полягають у можливості строгого опису еволюції систем нескінченної кількості частинок, колективна поведінка яких виявляє статистичні (термодинамічні) особливості, а саме існування рівноважного стану в такій системі, а також кінетичну або гідродинамічну поведінку у відповідних масштабних наближеннях. Ієрархія ББГКІ описує як нерівноважний, так і рівноважний стани систем багатьох частинок. Нерівноважні стани описуються розв'язком початкової задачі для цієї ієрархії [7], а, відповідно, рівноважні стани є розв'язками стаціонарної ієрархії ББГКІ [13].

У своєму манускрипті 1945 року М.М. Боголюбов сформулював послідовний підхід до виведення кінетичних рівнянь з динаміки систем багатьох частинок [7]. Витоки цієї проблеми можна простежити до праць А. Пуанкаре в 1905 році [17] та Д. Гільберта в 1912 році [18], коли вона була сформульована в контексті виведення гідродинамічних рівнянь з кінетичного рівняння Больцмана. Використовуючи методи теорії збурень, М.М. Боголюбов вперше розробив підхід до побудови узагальнення рівняння Больцмана, відомого нині як кінетичне рівняння Боголюбова, а також обґрунтував інші кінетичні рівняння [7, 9]. Ця робота пояснює механізм незворотності еволюції багаточастинкових систем, динаміка яких описується оборотними в часі фундаментальними еволюційними рівняннями. Результати щодо класичних багаточастинкових систем були поширені на квантові системи [12],[13]. Строге обґрунтування кінетичного рівняння Больцмана залишається актуальною

проблемою. Сучасний стан і перспективи розвитку цього напряму в математичній фізиці розглянуто в огляді [19].

У піонерській роботі [12] явище надтекучості вперше було описано за допомогою квантового кінетичного рівняння. У 1947 році стаття Боголюбова була опублікована в Збірнику праць Інституту математики. Її було перекладено з української мови на декілька мов і вона зараз є найбільш цитованою працею з квантової теорії конденсованого стану:

- М.М. Боголюбов: До теорії надплинності. Збірник праць Інституту математики АН УРСР, 1947, **9**, 89–103 (подано до друку 24.09.1946);
- Bogolyubov, N. N.: On the theory of superfluidity. Izv. AN SSSR, Phys. series, 1947, **11**(1), 77–90;
- Bogolyubov, N. N.: On the theory of superfluidity. J. Phys., 1947, **11** (1), 23–32;
- Bogoljubow, N. N.: Zur Theorie der Superflüssigkeit. Sowjetwissenschaft, 1948, **1**, 162–176.

М.М. Боголюбовим успішно було побудовано послідовну мікроскопічну теорію надпровідності, продемонструвавши, що надпровідність можна трактувати як надплинність газу електронів. Експериментальне відкриття бозе-конденсації в розріджених газах (Нобелівська премія з фізики за 2001 рік) цілком підтвердило теорію Боголюбова від 1946 року. Це підтвердження також стосується Нобелівської премії з фізики 2004 року, присудженої за досягнення в галузі надпровідності та надплинності. У своїй роботі М.М. Боголюбов запровадив новий математичний підхід, тепер відомий як канонічне перетворення Боголюбова. У 1957 році він застосував це перетворення для подальшого розвитку теорії надпровідності, створивши послідовну мікроскопічну теорію надпровідності незалежно від праць Дж. Бардіна, Л. Купера та Дж. Р. Шріффера. Подальше висунення в 1958 р. ідеї надпровідності як надплинності систем фермі-частинок дозволило М.М. Боголюбову відкрити явище

надплинності в ядерній матерії, яке в наш час є вирішальним для розуміння природи атомних ядер.

У 1948 р. в Збірнику праць Інституту математики [14] М.М. Боголюбов опублікував статтю про виведення рівнянь гідродинаміки з ієрархії рівнянь ББГКІ. Зауважимо, що строгий вивід рівнянь суцільного середовища із динаміки багатьох частинок все ще залишається відкритою математичною проблемою.

Згадаймо також підручник [16] М.М. Боголюбова за 1949 р. під назвою «Лекції з квантової статистики. Питання статистичної механіки квантових систем». Ця книга написана на основі лекцій, які він читав студентам Київського університету, і спочатку була опублікована українською мовою. Підручник став класичним і вважається таким, що випередив свій час на десятиліття.

Щоб оцінити дивовижну широту наукових інтересів Боголюбова в київський період його творчості (1 березня 1945 р. – 1 листопада 1956 р.), досить поглянути на список його звітів зроблених в Інституті математики [4].

Звіт за 1945 р. на тему: «Проблеми динамічної теорії в статистичній фізиці» (на 126 арк.!);

за 1946 р. за темами: «*Методи нелінійної механіки в статистичній фізиці*», & «*Про позитивні цілком неперервні оператори*»;

за 1947 р. на тему: «*Теорія полярної моделі металу*»;

за 1948 р. на тему: «*Про усунення розбіжностей власної енергії в нерелятивістській теорії поля*»;

за 1949 р. на тему: «*Структура функцій розподілу в квантовій гідродинаміці*», (не опубліковано!);

за 1950 р. на тему: «*Теорія сильного зв'язку частинки з квантовим полем*».

Ідеї, висунуті Боголюбовим в Інституті математики, заклали основу теорії кінетичних рівнянь та стали колискою сучасної статистичної механіки, як це визнано в наші дні [20].

Синопсис еволюції поглядів Боголюбова на теорію елементарних частинок

На початку 1950-х років методи вторинного квантування, розроблені М.М. Боголюбов для опису квантових статистичних систем, привернули його увагу до проблем квантової теорії поля. Нижче ми подаємо короткий огляд внеску Боголюбова у квантову теорію поля, який розвиває ідеї, викладені в його попередніх працях [4].

▫ R-операція (теорема Боголюбова — Парасюка) на початку 1950-х років.

Теорія R-операції є основою сучасних теорій перенормування у квантовій теорії поля. Як відомо, розвиток квантової теорії поля розпочався з квантової електродинаміки, основні рівняння якої були сформульовані наприкінці 1920-х років. М.М. Боголюбов першим зазначив, що у квантовій теорії поля виникають математичні об'єкти, для адекватного опису яких мають бути використані узагальнені функції. Це спостереження прояснило математичний сенс процедури віднімання нескінченностей. Вирішальну роль у подальшому розвитку квантової теорії поля відіграло відкриття загального вигляду процедури перенормування та її обґрунтування. У результаті це дозволило довести перенормовність єдиної теорії електрослабких взаємодій, а також суперсиметричних теорій.

▫ У 1961 р. М.М. Боголюбов ввів фундаментальне поняття квазісередніх і, по суті, побудував нову теорію фазових переходів.

Застосування цих ідей до фізики елементарних частинок в наш час відоме як спонтанне порушення симетрії.

▫ М.М. Боголюбов одним з перших започаткував напрям, який тепер відомий як аксіоматична теорія поля (метод дисперсійних співвідношень для амплітуд розсіювання).

▫ Період 1964–1966 років включає праці М.М. Боголюбова з теорії симетрії та кваркових моделей елементарних частинок.

Велике значення для подальшого розвитку теорії елементарних частинок мало запропоноване ним та його учнями (А.Н. Тавхелідзе та

Б.В. Струмінський, Український фізичний журнал – золоті сторінки теоретичної фізики України до 90-річчя Академії наук України) новий квантовий заряд для кварків, який нині відомий як колір. Цікаво відзначити символічний зв'язок кольорів кварків: червоного, зеленого і синього з кольорами 12 томів творів Боголюбова, виданих до його сторіччя в серії «Класики науки». Перші чотири томи, присвячені математиці, червоні; наступні чотири, присвячені статистичній механіці, зелені; і останні чотири, що охоплюють квантову теорію поля, сині.

Обговорення та висновок

Один із найпродуктивніших періодів творчості М.М. Боголюбова пов'язаний з Києвом, зокрема з Інститутом математики, де він працював з 1945 по 1956 рр. Фундаментальні дослідження М.М. Боголюбова започаткували нові напрями в теоретичній і математичній фізиці; зокрема, його перу належать класичні праці з сучасної статистичної механіки. Пізніше він заснував Інститут теоретичної фізики та був його першим директором з 1966 по 1973 рік. В наш час цей інститут має його ім'я. Про феномен наукової творчості професора М.М. Боголюбова та його вплив на розвиток сучасної математичної фізики, відсилаємо до дискусії в роботі [4].

Наукова діяльність М.М. Боголюбова виявила єдність математичної структури теорій різних розділів фізики. Його праці відіграли значну роль у сприянні обміну та взаємному збагаченню математичними методами та фізичними концепціями в різних галузях природничих наук протягом 20 століття. Учень М.М. Боголюбова академік В.С. Владимиров, зазначав: «Органічне злиття математики та фізики у творчості М.М. Боголюбова дозволило йому зробити вирішальний внесок у розвиток теоретичної фізики й фактично закласти основи сучасної математичної фізики, яка продовжує традиції Гільберта, Пуанкаре, Айнштайна, Дірака» [4].

За ініціативи М.М. Боголюбова, з 1972 року регулярно проводяться міжнародні конференції з математичних проблем квантової

теорії поля та квантової статистики, які згодом переросли в конгреси з математичної фізики – всесвітні зібрання провідних учених у цій галузі. У своєму програмному виступі на міжнародній конференції з проблем квантової теорії поля в 1981 р. М.М. Боголюбов так характеризував прогрес математичної та теоретичної фізики: «На наших очах за останні роки сформувалася зовсім нова галузь науки, яку найдоцільніше назвати сучасною математичною фізикою». З 1972 року Міжнародний конгрес математичної фізики представлено відомим логотипом M∪P.

У 1966 році в Дубні М.М. Боголюбов був ушанований найпрестижнішою премією в галузі математичної фізики – премії Денні Хайнемана «За низку видатних досягнень у поширенні методів сучасної математики на фундаментальні проблеми фізики та, зокрема, до вперше строгого доведення дисперсійних співвідношень для непрямого розсіяння елементарних частинок». У своєму вітальному слові з цього приводу професор Р. Йост зазначив: «Ви справили на мене незабутнє враження. Більшість теоретиків того часу зневажливо ставилися до математики, а логічну дедукцію «розтоптували ногами». Лише романтичний вплив генія міг мати якесь значення. І ось з'явились Ви, людина, яка володіє і математикою, і фізикою, готова братися за складні проблеми, які вимагають їх логічного поєднання. Мені здається, що в цьому є відображає національного характеру вашого великого народу»...

На пошану наукового подвигу М.М. Боголюбова, до 100-річчя від дня його народження була викарбувана монета української національної валюти, яка зображує ієрархію фундаментальних еволюційних рівнянь, яку він вперше сформулював в Інституті математики в Києві (ієрархія рівнянь ББГКІ). На нашу думку, той, хто не знає свого минулого, не вартий майбутнього; ті, хто не знають про славу своїх предків, не варті пошани. Національна академія наук України створила 1966 року Інститут теоретичної фізики імені М.М. Боголюбова та заснувала 1992 року Премію для відзначення видатних вчених за досягнення в галузі математичної фізики.

Зрештою, не буде перебільшенням сказати, що спадщина М.М. Боголюбова продовжує жити у працях його учнів і численних послідовників, у тому числі в Інституті математики НАН України.

Подяки. Автор щиро дякує організаторам наради «Український внесок у фізику елементарних частинок: історія та перспективи» за натхненну атмосферу та підтримку у публікації цієї статті. Слава Україні!

Цитовані джерела

[1] Герасименко, В.І., Дрозд, Ю.А., Максименко, С.І.: 100 років Математичному інституту Української академії наук. У: Сучасні проблеми математики та її застосувань. **I**. Київ: ІМ, 2020, стор. 1–9.

[2] Герасименко, В.І., Максименко, С.І., Тимоха, О.М.: Засновник першої великої математичної школи в Україні. До 160-річчя від дня народження академіка Д.О. Ґраве. Вісник НАН України, 2023, №10, стор. 78–86. doi:10.15407/visn2023.10.078

[3] Герасименко, В.І., Максименко, С.І.: CLX років від дня народження академіка Д.О. Ґраве. У: Сучасні проблеми математики та її застосувань. **III**. Київ: ІМ, 2023, стор. 685–697. doi:10.3842/trim.v20n1.525

[4] Герасименко, В.І., Загородній, А.Г.: Геній сучасної теоретичної і математичної фізики. У: Творець сучасної теоретичної і математичної фізики: до 110-річчя від дня народження академіка М.М. Боголюбова. Київ: Академперіодика, pp. 13–30, 2019. doi:10.15407/akademperiodyka.387.532

[5] Кратко, М.І.: Галгофа академіка Кравчука. Луцьк: ВІПДО, 2011.

[6] Дзюба, І.М: Національна академія наук України. Енциклопедія Сучасної України. Київ: Інститут енциклопедичних досліджень НАНУ, 2001, **1**, https://esu.com.ua/article-43408

[7] Bogolyubov, M.M.: Problems of Dynamic Theory in Statistical Physics. M.: Gostekhizdat, 1946 (*IM report 1945, 7.02.1046*).

[8] Bogolyubov, M.M.: On some Statistical Methods in Mathematical Physics. Kyiv: AN USSR, 1945.

[9] Bogolyubov, M.M.: Kinetic equations. JETP, 1946, **10** (3), 265–274 (*submitted 07.1945*).

[10] Bogolyubov, M.M.: Expansions by powers of a small parameter in the theory of statistical equilibrium. JETP, 1946, **16** (8), 681–690 (*submitted 10.1945*).

[11] Боголюбов, М.М.: Метод функціональних похідних в статистичній механіці. Зб. праць ІМ АН УРСР, 1947, **8**, 177–189 (*отримано 25.12.1944*).

[12] Боголюбов, М.М.: До теорії надплинності. Зб. праць ІМ АН УРСР, 1947, **9**, 89–103 (*отримано 24.09.1946*).

[13] Bogolyubov, M.M., Gurov, K.P.: Kinetic equations in quantum mechanics. JETP, 1947, **17** (7), 614–628. (*submitted 26.10.1947*).

[14] Боголюбов, М.М.: Рівняння гідродинаміки в статистичній механіці. Зб. праць ІМ АН УРСР, 1948, **10**, 41–59 (*отримано 25.03.1947*).

[15] Bogolyubov, M.M., Khatset, B.I.: On some mathematical questions of the theory of statistical equilibrium. Reports of Acad. Sci. USSR, 1949, **66** (3), 321–324.

[16] Боголюбов, М.М.: Лекції з квантової статистики. Питання статистичної менаніки квантових систем. Київ: Радянська школа, 1949 (*Передмова від 30.12.1948*).

[17] Poincarė, H. The principles of mathematical physics. *The Monist*, 1905, 15(1), 1–24. doi:10.5840/monist190515137.

[18] Hilbert, D. Begründung der kinetischen gastheorie. *Math. Ann.*, 1912, 72, 562–577. doi:10.1007/BF01456676.

[19] Gerasimenko, V.I., Gapyak I.V.: Advances in theory of evolution equations of many colliding particles. Proc. Inst. Math. NASU, 2023, **20** (1), 729–804. doi:10.3842/trim.v20n1.528

[20] Ernst, M.H.: Bogoliubov Choh Uhlenbeck theory: cradle of modern theory. In: W. Sung (ed.), Progress in Statistical Physics, World Scientific, 1998.

Харківська наукова школа ядерної фізики: Рувін Йосель-Гіршович Гарбер (1909–2001 рр.)

Тверитникова Олена, Гутник Марина
Кафедра українознавства, культурології та історії науки, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Наукова школа у царині фізики сягає витоками у позаминуле століття. Створення у 1804/1805 рр. Харківського університету започаткувало й дослідження у галузі фізики. Засновник університету Василь Каразін був освіченою людиною, упевнено орієнтувався у таких галузях природознавства, як хімія, фізика, ботаніка та метеорологія, володів ґрунтовною фаховою підготовкою. Тому цілком логічним було заснування в університеті фізичного кабінету й кафедри дослідної та теоретичної фізики. Проблемами фізики в університеті опікувалися Афанасій Стойкович, який викладав теоретичну й дослідну фізику; Василь Комлишенський, один з очільників кафедри фізики та фізико-математичного факультету; Василь Лапшин, автор проєкту електричного освітлення Харкова; відомі фізики Юрій Морозов, Андрій Шимков, Олександр Грузинцев та Олександр Погорелко; талановитий експериментатор Микола Пильчиков; засновник радіотехніки на теренах України

Дмитро Рожанський; фундатор наукової школи теоретичної і експериментальної наукової фотографії Торічан Кравець. Подальший розвиток фізичних досліджень в університеті пов'язано з діяльністю Дмитра Штейнберга та Абрама Слуцкіна, які зробили новаторські внески у розробку магнетрона, Андрія Желеховського, учасника ініціативної групи зі створення Українського фізико-технічного інституту (УФТІ), фізика-теоретика Льва Ландау та ін.



Рис. 1 Рувін Гарбер, 1931 р.

Історія науки знає імена, які стають символами цілих напрямів. Для Харківської школи фізики твердого тіла таким ім'ям є Рувін Гарбер. Однак його біографія – це не лише лінійний шлях від експерименту до теорії. Це дзеркало епохи, в якій найвищі злети людського розуму співіснували з безоднею політичного терору. Сьогодні, коли ми говоримо про Р. Гарбера, ми не можемо оминути мовчанням ту атмосферу «Українського Кембриджа» 1930-х рр., яка загартувала його як ученого і як людину.

Рувін Йосель-Гіршович Гарбер народився 13 січня 1909 р. в Одесі. Його дитинство та юність припали на роки революційного зламу. Втрата батька у 14 років, дитячий будинок, робота токарем на одеському заводі (1925–1930 рр.) – це був суворий життєвий університет. Саме біля верстата, відчуваючи опір металу різцю, майбутній професор, ймовірно, вперше задумався про природу міцності. Його шлях до науки був стрімким: у 1930 р. він став студентом-дипломантом Одеського індустріального інституту, а вже у 1931 р. переїхав до Харкова, та вступив до аспірантури УФТІ (рис. 1) [1, арк. 2–5].

Якраз коли молодий Р. Гарбер переступив поріг УФТІ, він потрапив у епіцентр світової фізики. Це був унікальний час і місце. Інститут, створений лише за кілька років до того, вирував енергією молодості. Середній вік співробітників не перевищував 30 років, а коридорами лунала німецька та англійська мови – сюди їхали працювати зірки європейської науки: Віктор Фредерік Вайскопф, Георг Плачек, Рудольф Пайєрлс. Сам Р. Гарбер, як зазначено у його особовій справі, вільно володів німецькою, французькою та англійською мовами [2].

10 жовтня 1932 р., через рік після прибуття Р. Гарбера до Харківа, сталася подія, що сколихнула світ. «Високовольтна бригада» у складі Антона Вальтера, Кирила Синельникова, Олександра Лейпунського та Георгія Латишева вперше в СРСР (і вдруге в світі після Кокрофта і Волтона) розщепила ядро літію [3]. Це був тріумф. Харків став ядерною столицею Союзу. Молодий Р. Гарбер працював у цій атмосфері наукового куражу, де здавалося, що для розуму немає меж. Лев Ландау формував тут свою теоретичну школу, Лев Шубніков отримував рідкий гелій та водень, закладаючи основи кріогеніки.

Однак «золотий вік» тривав недовго. З середини 1930-х років. інститут став об'єктом посиленого ідеологічного тиску та політичного контролю, що згодом переросло у масштабні репресії проти наукових кадрів. Інтернаціоналізм УФТІ, який був його силою, став його вироком в очах НКВС. Почалося полювання на «шпигунів» та «ворогів народу», відоме в історії як «Справа УФТІ» [4].

Для Р. Гарбера це був час страшних випробувань. У 1937–1938 роках репресивна машина перемолола цвіт інституту: розстріляно геніального експериментатора Лева Шубнікова. Розстріляно талановитих фізиків Лева Вікторовича Розенкевича та Володимира Семеновича Горського. Заарештовано іноземних фахівців Фридриха Георга Гоутерманса та Олександра Вайсберга. Заарештовано Лева Ландау (який встиг переїхати до Москви, але це його не врятувало від року тюрми) [5].

Найболючішим ударом для Р. Гарбера став арешт його безпосереднього вчителя та наукового керівника – Івана Обреїмова у 1938 р.

Важко уявити собі стан молодого вченого Р. Гарбера: лабораторія обезголовлена, колеги зникають уночі, наукові журнали закриваються (у 1938 р. припинено випуск знаменитого «Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion»), а будь-який експеримент може бути витлумачений як «шкідництво». Саме в цей, найтемніший час, Р. Гарбер мав проявити неабияку мужність, щоб не зламатися і продовжити роботу.

Якраз у 1938 р., коли в інституті панувала атмосфера страху, Р. Гарбер робить своє головне відкриття. Досліджуючи кальцит та натрієву селітру, він виявляє явище пружного двійникування. Суть відкриття (Диплом № 49, виданий значно пізніше, у 1967 році, рис. 2) революційна: пластична деформація, яка вважалася незворотною, виявилася оборотною на початковій стадії. Під навантаженням виникає двійник, який зникає («вистрибує» назад) при знятті зусилля. Це відкриття стало науковим подвигом. Воно доводило, що навіть у часи руйнації людських доль, закони природи залишаються непорушними, а істина – єдиним порятунком. У вересні 1938 р., після арешту І. Обреїмова, Р. Гарбер фактично бере на себе відповідальність за лабораторію кристалів, рятуючи науковий напрямок від знищення.

Друга світова війна на теренах України застала Р. Гарбера завідувачем кафедри фізики Харківського інституту інженерів комунального будівництва. В евакуації в Алма-Аті вчений демонструє феноменальну працездатність. У 1943 р. – переломному році війни – він захищає докторську дисертацію. Після повернення до Харкова і «реабілітації» фізики (значною мірою завдяки атомному проєкту, де знання про дефекти кристалів стали критично важливими для реакторобудування), Р. Гарбер продовжує розвивати свій успіх. Одночасно працюючи в УФТІ, він продовжив завідування кафедрою фізики Харківського інституту інженерів комунального

будівництва, очолював кафедру фізики і математики Харківського інституту радянської торгівлі, у 1945 р. – завідувач кафедри фізики Харківського хіміко-технологічного інституту (у 1949 р. увійшов до складу сучасного НТУ «ХПІ»).



ДИПЛОМ
НА ОТКРЫТИЕ

В соответствии с „Положением об открытиях, изобретениях и рационализаторских предложениях" Комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР установил, что гражданин Союза Советских Социалистических Республик:

ГАРБЕР Рувин Иосель-Гиршевич

сделал открытие, определяемое следующей формулой:

„Обнаружено неизвестное ранее явление упругого двойникования кристаллов, заключающееся в том, что под действием сосредоточенной нагрузки возникает зародыш двойниковой ориентации, который исчезает после снятия нагрузки или превращается в устойчивую двойниковую прослойку при дальнейшем увеличении действующих сил".

Настоящее открытие зарегистрировано в Государственном реестре открытий СССР под № 49, с приоритетом 14 октября 1938 года.

Председатель Комитета *Ю.Максарев*

Рис. 2 Диплом на відкриття Р. Гарбера, 1967 р.

У повоєнні роки Гарбер разом із теоретиками Іллею Ліфшицем та Арнольдом Косевичем створюють завершену картину двійникування. Його експериментальні дані стали фундаментом для досліджень макроскопічної теорії двійникування (І. М. Ліфшиць, 1948 р.) [6]; дислокаційної теорії тонкого двійника (А. М. Косевич, В. С. Бойко, 1971 р.) [7]; механічне двійникування кристалів (М. В. Классен-Неклюдова, 1960 р.) [8]. Кульмінацією цієї роботи стала монографія «Оборотна пластичність кристалів» (1991) [9], яка й досі є настільною книгою фахівців з фізики міцності.

Р. Гарбер здійснював комплексні наукові дослідження, присвячені з'ясуванню механізмів пластичної деформації та руйнування монокристалічних і полікристалічних металів, зокрема урану, берилію та цирконію. Вагоме місце в його працях посідало вивчення фазових перетворень у металах і сплавах, а також дослідження кристалічної структури на атомному рівні з використанням створеного ним автоіонного мікроскопа, що дало змогу безпосередньо спостерігати атомарну будову речовини. Значну увагу вчений приділяв математичному моделюванню дефектної структури кристалів, зокрема визначенню геометричних та енергетичних характеристик

дислокацій, меж зерен і меж поділу фаз. Окремим напрямом його наукової діяльності були дослідження процесів отримання водню за допомогою радіолізу водовмісних кристалічних матеріалів, що мало перспективне значення для розвитку матеріалознавства, енергетики та ядерних технологій [10].

Рувін Йосель-Гіршович працював до останнього. У 1990-ті роки, коли наука знову переживала скрутні часи (вже економічні), він займався прикладними задачами зміцнення сталей та навіть отриманням водню. Науковець пішов з життя 7 лютого 2001 р.

Висновки.

Р. Гарбер – це не просто вчений. Це приклад стійкості «людського матеріалу». Він вижив і творив у часи, коли ламалися найміцніші кристали і найсильніші люди. Його відкриття пружного двійникування – це метафора його власного життя: здатність витримувати колосальний тиск, зберігати свою структуру та повертатися до вихідного стану, не втрачаючи цілісності.

Саме така внутрішня стійкість формувалася не ізольовано, а в особливому науковому середовищі. Вирішальну роль у становленні Р. Гарбера відіграв Український фізико-технічний інститут, який у 1930-х роках став одним із центрів інтенсивного розвитку фізики. Тут поєднувалися передові ідеї, сміливі експерименти та потужна школа теоретичної думки. Попри складну політичну атмосферу й ідеологічний тиск, це середовище не лише не зламалося, а й загартувало своїх науковців, навчило їх мислити незалежно та працювати в умовах постійного виклику.

Тому не випадково, що учні школи І. Обреїмова, а пізніше і Р. Гарбера продовжують їхню справу, пам'ятаючи, що за кожною формулою і графіком стоїть не лише суха фізика, а й жива, часто трагічна, історія людей, які цю фізику творили.

Список використаних джерел:

1. Архів УФТІ. (1949–2000). Ф.1, 1-ЛД, № 28, розп. 01.03.1949 р., закін. 06.03.2000 р., 107 арк.
2. Таньшина, А. (2014). Український фізико-технічний інститут: до 95-ліття Національної академії наук України та 85-ої річниці УФТІ, до 120-ліття від дня народження академіка І.В. Обреїмова, *Світогляд*, *1* (45), 56–65. https://www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/svitogliad/svit-2014-09-1/svitoglyad-2014-1-14-tyanshina.pdf
3. Шульга, М.Ф. (2018). 85 років розщепленню атомного ядра у Харкові. *Вісник НАН України, 5*, 45–48.
4. Павленко, Ю.В., Ранюк, Ю.Н., & Храмов, Ю.А. (1998). *Дело УФТИ. 1935–1938*. Київ: Феникс.
5. Tverytnykova, E., & Gutnyk, M. (2022). World physics in Ukraine: A unique experience of consolidation of scientists of the Kharkiv physics center (the 1920s–1930s). *Acta Baltica Historiae et Philosophiae Scientiarum, 10* (2), 5–23.
6. Лифшиц, И.М. (1948). О макроскопическом описании явления двойникования кристаллов, *Журнал экспериментальной и теоретической физики, 18* (12), 1134–1143.
7. Косевич, А.М., & Бойко, В.С. (1971). Дислокационная теория упругого двойникования кристаллов. *Успехи физических наук, 104* (2), 201–255, doi: 10.3367/UFNr.0104.197106b.0201
8. Классен-Неклюдова, М.В. (1960). *Механическое двойникование кристаллов*. Москва: АН СССР.
9. Бойко, В.С., Гарбер, Р.И.-Г., & Косевич, А.М. (1991). *Обратимая пластичность кристаллов*. Москва: Наука.
10. Неклюдов, І.М. (2006). Гарбер Рувим-Йосель Гіршович. *Енциклопедія Сучасної України*. Київ: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України. Режим доступу: https://esu.com.ua/article-28711

Сцинтилятори ICMA на базі йодиду цезія в експериментах з фізики високих енергій та астрофізики

Володимир Тарасов
Інститут сцинтиляційних матеріалів
НАН України, Харків

В статті йдеться про розвиток виробництва сцинтиляторів на базі лужногалоїдних кристалів в Харкові з 50-х років XX сторіччя і про забезпечення експериментів з фізики високих енергій (ФВЕ) і астрофізики сцинтиляційними монокристалами на основі йодиду цезія (CsI) наприкінці XX і початку XXI сторіч. Описані основні завдання з отримання монокристалів певної якості і конфігурації для проектів з ФВЕ і астрофізики. Для експерименту PiBeta такими були усічені піраміди з шестикутниками в основах з високочистого неактивованого CsI з великою часткою швидкого компоненту світіння. Для експериментів BaBar та Belle були потрібні усічені піраміди з прямокутними основами з активованих кристалів CsI:Tl з високою однорідністю світлового виходу по довжині кристалу. Для телескопа Fermi були необхідні прямокутні бруски з активованих кристалів CsI:Tl з високою позиційною чутливістю. Приведені результати досліджень, що сприяли виконанню завдань отримання кристалів високої якості для експериментів, а також основні результати самих експериментів з ФВЕ і астрофізики.

Вступ

Лужно-галоїдні кристали (ЛГК) почали вирощувати і вивчати у якості сцинтиляторів в Харкові ще у 50-х роках XX сторіччя. Спочатку на заводі хімічних реактивів, потім у Всесоюзному Науково-Дослідному Інституті. У 70-ті роки він перетворився у Науково-Виробниче Об'єднання «Монокристалреактив», пізніше - у Науково-Технологічний Комплекс (НТК) «Інститут монокристалів». І завжди створення і дослідження сцинтиляторів на базі ЛГК було одним з основних напрямків робіт. Ось основні результати розвитку цього напряму за той період: у 1959 р. налагоджено виробництво монокристалів йодиду натрію, активованого талієм; в 1964 р. - виробництво монокристалів йодиду цезію активованого талієм та створення сцинтилятору йодиду цезію, активованого натрієм; 1975 р. – розроблено технологію автоматизованого вирощування ЛГК великого розміру; 1978 р. – отримано чистий (неактивований йодид цезію); 1987 р. - вперше отримано ЛГК діаметром 500 мм; 1989 р. - отримано йодистий цезій, активований іонами карбонату $CsI(CO_3)$ [Семиноженко, 2005].

У 90-ті роки ці роботи було продовжено. В рамках НТК «Інститут монокристалів» НАН України було створено Науково-дослідне відділення лужно-галоїдних кристалів (НДВ ЛГК) з дослідним виробництвом. В НДВ ЛГК створювали і досліджували нові сцинтилятори і розвивали технологію їх виробництва. Дослідне виробництво, яке з часом перетворилося на структуру Amcrys, виготовляло і постачало сцинтиляційні детектори на базі ЛГК. У 2002 році на базі НДВ ЛГК було створено Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України (ІСМА), який охопив практично всю тематику отримання, дослідження і технологій виробництва різноманітних сцинтиляційних матеріалів і детекторів на їх основі [*ИСМА*, 2012]. Висока кваліфікація співробітників і технологічні можливості дозволили прийняти участь, спочатку НДВ ЛГК і Amcrys, а потім й ІСМА, в забезпеченні сцинтиляторами експериментів з фізики високих

енергій (PiBeta, BaBar, Belle) і астрофізики (Телескоп великої площі Фермі LAT).

В експериментах з фізики високих енергій (ФВЕ) вивчаються продукти зіткнень прискорених частинок. Для вивчення зіткнень застосовують багатошарові детектори (БШД). Складовою частиною БШД є електромагнітний калориметр (ЕМК), який реєструє електромагнітні зливи (ЕМЗ) від фотонів, електронів та позитронів і вимірює їх енергію через повне поглинання ЕМЗ. Для ефективного гальмування енергетичних частинок потрібні важкі матеріали. До них відноситься йодид цезію (CsI). Він має велику гальмівну здатність (через достатньо великі щільність - 4.51 г/см^3 і ефективний атомний номер-54), високий вихід світла сцинтиляцій і є доступним за технологією та ціною.

Для вказаних проектів були потрібні сцинтилятори саме з монокристалів йодиду цезію. З від сотень до тисяч таких кристалів (загальною вагою в кілька тон) були складені масштабні ЕМК. При забезпеченні кожного зі вказаних експериментів виникали свої проблеми, які успішно вирішувалися. Про це йдеться у наступних розділах.

Забезпечення сцинтиляторами CsI експерименту PiBeta.

Першою пробою було забезпечення експерименту PiBeta сцинтиляторами на базі неактивованих кристалів CsI. Експеримент PiBeta готувався і проводився в Інституті Пауля Шерера (PSI), Швейцарія. Завданням експерименту було вимірювання (з точністю краще, ніж 0.5 %) коефіцієнту розгалуження розпаду π^+ мезона на нейтральній π^0 -мезон, позитрон (e^+) і нейтрино, для порівняння з передбаченням стандартної моделі (СМ) [Počanić, 2021]. В СМ цей бета-розпад очікується лише в 1 з 10^8 розпадів заряджених піонів, тому що майже 100% π^+ розпадається на мюони та нейтрино. Характерна ознака цих рідкісних подій показана на Рисунку 1: дві енергійні нейтральні зливи розвернуті майже на 180° одна від одної, від розпаду π^0 на два фотона (γ) у ЕМК.

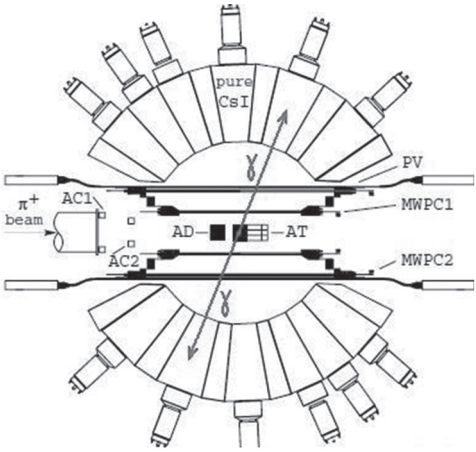


Рисунок 1 Багатошаровий детектор з експерименту PiBeta з електромагнітним калориметром на базі чистого CsI. Адаптовано з [Počanić, 2021, с. 024.3].

В експерименті PiBeta використовувався БШД з ЕМК на базі чистого (без домішок) CsI для детектування e^+ та γ з бета - розпаду π^+ (Рисунок 1).

Вибір CsI для ЕМК ґрунтувався на короткому часі світіння цього сцинтилятору, його стабільності (негігроскопічності і радіаційній стійкості для умов використання) і доступності за технологією та ціною. Завданням ICMA в експерименті PiBeta було забезпечення ЕМК кристалами CsI певної форми, з великою часткою швидкого світіння сцинтилятора. Головною проблемою стала наявність домішок натрію, талію і карбонатів у сировині та у вирощених кристалах. Їх присутність на рівні 10^{-4} % ваг. перетворюють швидкий сцинтилятор CsI (час світіння ~ 10 нс) на «повільні» сцинтилятори CsI(Na), CsI(Tl), $CsI(CO_3)$ з часом світіння до кількох мікросекунд. Для отримання позитивних результатів знадобилися додаткові дослідження і розробка технології додаткового очищення вихідної сировини (направлена кристалізація), розплаву (додавання реагентів і фільтрація), вирощування великогабаритних кристалів вагою близько 200 кг (модифікований метод Кіропулоса). Очищена

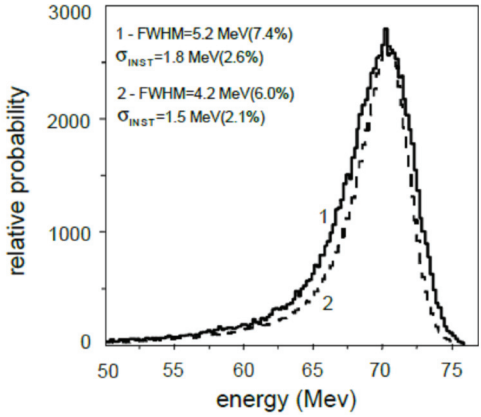


Рисунок 2 Відгук збірки з 44-х детекторів чистого CsI на позитрони з енергією 70 МеВ до (1) і після (2) нанесення шифтерної плівки. Взято з [Andryustchenko, 2002, с. 44].

сировина контролювалася на домішки за спектрами радіолюмінісценції.

З отриманих злитків вирізалися зразки для досліджень якості кристалів, а також для отримання сцинтиляторів у формі гексагональних усічених пірамід, всі грані яких полірувалися. Якість кристалів контролювалася за "fast/total» (F/T) - параметром, який оцінювався з вимірювань форми імпульсу їх сцинтиляції, як відношення площини (інтенсивності) під швидкою частиною імпульсу до загальної площини (інтенсивності).

Для кристалів заданих розмірів значною проблемою стала невисока прозорість CsI для власного швидкого випромінювання. Світло з віддалених і близьких до фотоприймача ділянок кристалу ослаблюються значно по-різному, що знижує енергетичну роздільну здатність детектора.

Для покращення роздільної здатності було запропоновано зсувати ультрафіолетовий (УФ) спектр світіння CsI в область більшої прозорості за допомогою спеціальних покриттів - шифтерів. Плівка з шифтером наносилася на бічну поверхню сцинтилятора - піраміди. При попаданні на шифтер УФ-світло поглинається в

ньому і знов випромінюється з більшою довжиною хвилі, в області більшої прозорості сцинтилятора. Результатом стало покращення однорідності збору світла на фотоприймач, зросло F/T співвідношення, підвищилась енергетична роздільна здатність детектора (Рисунок 2). При цьому лише незначно зріс час швидкого світіння (з 10 до 15 нс) [Andryustchenko, 2002].

Для забезпечення експерименту було виготовлено 240 кристалів CsI у вигляді пірамід. Складання ЕМК і всього детектора було завершено у 1997 році. Запуск експерименту відбувся у 1998 році. Набір даних тривав до 2004 року. Одним з головних досягнень експерименту PiBeta було дуже точне вимірювання коефіцієнта розгалуження бета-розпаду піона, що підтвердило прогнози СМ на рівні ~0,5%. Експеримент сприяв поліпшенню на порядок точності визначення коефіцієнтів розгалуження рідкісних розпадів заряджених піонів, а також пов'язаних з ними параметрів СМ [Počanić, 2021].

Забезпечення сцинтиляторами CsI(Tl) експерименту BaBar

Для ЕМК в експерименті BaBar були потрібні сцинтилятори на базі активованих монокристалів CsI(Tl). Мотивацією експерименту був пошук порушення CP-симетрії B-мезонами. Детектор для експерименту BaBar було розміщено навколо точки зіткнення пучків електронів (e^-) і позитронів (e^+) асиметричної енергії (9 та 3.1 ГеВ, відповідно) на колайдері PEP-II у SLAC, Стенфорд (США). Результуюча енергія зіткнення в центрі мас, що дорівнює 10.58 ГеВ, відповідає резонансу Υ (4S), який миттєво розпадається на заряджені або нейтральні пари B- та анти-B-мезонів. Якщо дотримується CP-симетрія, розпади B- та анти-B-мезонів будуть абсолютно однаковими. В ЕМК продукти розпаду B-мезонів утворюють ЕМЗ, з яких можна реконструювати напрямок руху продуктів розпаду і їх енергію. Схема БШД з ЕМК експерименту BaBar наведена на Рисунку 3.

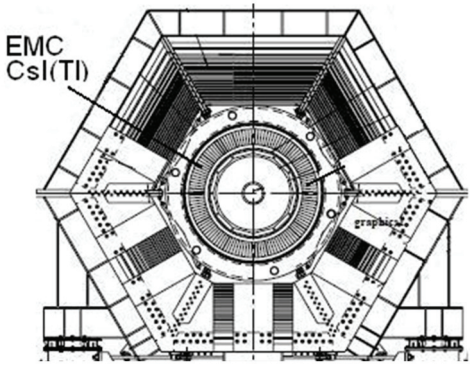


Рисунок 3 Схема багатошарового детектора BaBar з позначеним електромагнітним калориметром: EMC CsI(Tl). Адаптовано з [Aubert, 2002, с. 14].

Вибір CsI(Tl), як матеріалу сцинтилятора для ЕМК, базувався на його технологічній і ціновій доступності, стабільності, високій гальмівній здатності для частинок, високому світловому виходу і добрій спектральній узгодженості світла сцинтиляцій з кремнієвим фотоприймачем [Aubert, 2002].

Головним завданням ІСМА було забезпечення експерименту BaBar кристалами CsI(Tl) певної форми (довгомірні піраміди) і якості. Кристали повинні були мати мінімальний вміст домішок, у тому числі таких, як натрій і карбонати, які можуть сильно змінювати властивості сцинтилятора, високий світловий вихід і високу енергетичну роздільну здатність.

Досягнути потрібні параметри вдалося шляхом очищення сировини і розплаву від домішок при вирощуванні великих кристалів. Процес отримання кінцевих кристалів також включав вирізання і формування зразків, обробку їх поверхні, контроль світлового виходу і роздільної здатності сцинтиляторів.

Для зразків з не дуже високою прозорістю спостерігалася значна неоднорідність світлового виходу (НСВ) по довжині кристалів, що значно впливала на їх енергетичну роздільну здатність. На той час в ІСМА вже були накопичені результати експериментальних

досліджень і комп'ютерного моделювання, які доводили, що селективна обробка поверхні довгомірних сцинтиляторів зменшує НСВ [Grinyov, 1991]. Для експерименту BaBar оптимізацію світлового виходу по довжині кристалів проводили індивідуально, шляхом селективної обробки поверхні кристалів CsI(Tl).

Окрім ІСМА(Amcrys-H) кристали CsI(Tl) для експерименту BaBar постачали: Crismatec (Франція), Hilger Analytical (Велика Британія), Шанхайський інститут кераміки (КНР) і Пекінський інститут досліджень скла (КНР). У ЕМК детектора BaBar було використано 6580 кристалів CsI(Tl) [Aubert, 2002]. Експеримент було розпочато у 1998 році і завершено у 2008 році. За час експерименту було зареєстровано майже 500 мільйонів пар B і анти-B мезонів. Головним результатом стало відкриття порушення CP-симетрії і підтвердження механізму Кабіббо-Кобаяші-Маскава, що призвело до присудження Нобелівської премії з фізики 2008 року [*BaBar Experiment*, 2012]. За час проведення експерименту була накопичена велика база даних, що і надалі дозволяє проводити високоточні перевірки СМ.

Забезпечення сцинтиляторами CsI(Tl) експерименту Belle

Мотивація для експерименту Belle [Abashian, 2002; Belle experiment, 2026] була такою ж, як в експерименті BaBar, що призвело до аналогічного експериментального вибору, включаючи кристали CsI(Tl) як матеріал для ЕМК. Детектор для експерименту Belle був розміщений навколо точки зіткнення позитронних (e^+) та електронних (e^-) пучків з асиметричними енергіями (3.5 та 8 ГеВ відповідно) на колайдері KEKB (Цукуба, Японія). Схематична діаграма ЕМК CsI(Tl) експерименту Belle показана на Рисунку 4. ЕМК експерименту Belle має два торці, тоді як у BaBar був лише один у більш енергійному напрямку пучка

Головним завданням ІСМА в підготовці експерименту Belle також було забезпечення кристалами CsI(Tl) певної форми (довгомірні

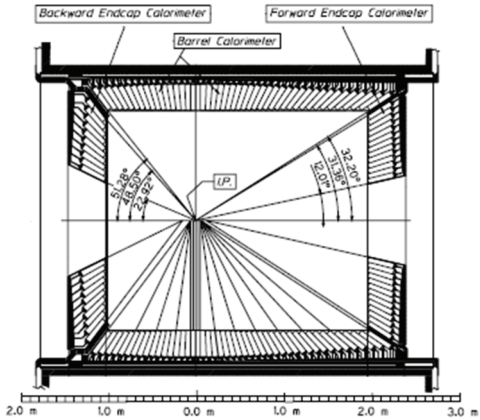


Рисунок 4. Схема з перерізом електромагнітного калориметра на базі кристалів CsI(Tl для експерименту Belle. Адаптовано з [Abashian, 2002, с. 175].

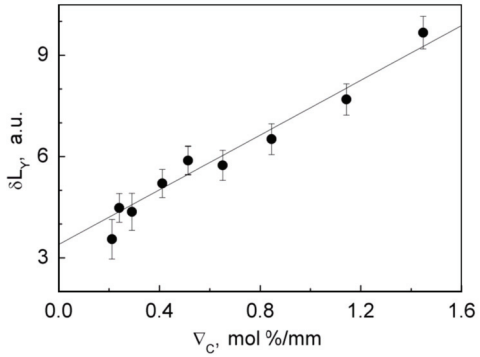


Рисунок 5. Неоднорідність світлового виходу δL як функція градієнту концентрації Tl за довжиною кристалів CsI(Tl) Взято з [Zosim, 2015, с.142].

піраміди) і якості. Вимоги до кристалів ті ж самі, що і для BaBar, тому при виготовленні кристалів CsI(Tl) була застосована вже розроблена технологія. Хоча статистичний аналіз характеристик і умов виготовлення попередніх зразків кристалів CsI(Tl) показав (Рисунок 5), що на НСВ значно впливає градієнт концентрації талію по довжині кристалів [Gektin, 2009; Zosim, 2015], було зроблено

висновок, що створення потрібного градієнту є значно складнішим завданням, ніж вибіркова обробка поверхні кристалів. З цих міркувань зменшення НСВ проводили шляхом обробки поверхні кристалів, як це було зроблено для експерименту BaBar.

Окрім ІСМА (НДВ ЛГК НТК Інституту монокристалів) кристали CsI(Tl) для експерименту Belle постачали: Crismatec (Франція) і Шанхайський інститут кераміки (КНР).

Для складання ЕМК детектора Belle було використано 8736 кристалів CsI(Tl) [Abashian, 2002].

Збір даних в рамках експерименту розпочався у 1999 році, а його перша фаза була завершена у 2010 році, зібравши понад 770 мільйонів пар B- та анти-B-мезонів. Результати експерименту Belle, засновані на цих даних, сприяли присудженню Нобелівської премії з фізики 2008 року Кобаяші та Маскава [Belle experiment, 2026].

Під час модернізації прискорювальної установки до SuperKEKB було запропоновано замінити кристали CsI(Tl) в одному з торців ЕМК неактивованими кристалами йодиду цезію. ІСМА надала зразки для вивчення очікуваних покращень від цієї модифікації, але ця пропозиція зрештою не була реалізована. Модернізований детектор Belle II (з немодифікованим ЕМК) відновив збір даних у 2018 році. Експеримент продовжує вивчати рідкі розпади, шукати екзотичні частинки та виконувати надточні вимірювання властивостей СМ.

Забезпечення кристалами CsI(Tl) телескопа Фермі

Телескоп великої площі Фермі LAT (ТФ) - це телескоп високоенергетичних гамма-променів (діапазон енергій від 20 МеВ до 300 ГеВ). Він повинен ідентифікувати гамма-джерела високої енергії у просторі (блазари, пульсари, гамма-спалахи, дифузну радіацію нашої Галактики). ТФ містить трекер і ЕМК для детектування конверсій фотонів високої енергії. Принцип дії телескопу: вхідний фотон генерує у шарах вольфраму трекера пару e^+-e^-, яка рухається, зберігаючи напрямок руху гамма-випромінювання.

Напрямок руху пари визначається за треками у шарах кремнію, який перемежає шари з вольфрама. У ЕМК на базі CsI(Tl) визначається енергія і структура зливи від пари e^+-e^- [Atwood, 2009].

Вибір CsI(Tl) для ЕМК проведено з тих же міркувань, що й для ЕМК BaBar та Belle. Завдання ІСМА в цьому разі було таким же - забезпечення ТФ кристалами CsI(Tl) певної форми і якості з використанням встановлених виробничих процедур. Окрім стандартних вимог до кристалів CsI(Tl), загальних з BaBar та Belle, необхідною була позиційна чутливість кристалів. Дослідження ІСМА щодо позиційної чутливості цих кристалів показали [Gektin, 2005], що можна підібрати такі варіанти обробки поверхні, при яких різницевий сигнал діодів з обох торців сцинтилятора дає максимальну позиційну чутливість, а сумарний сигнал буде слабко залежати від місця спалаху. Це дає змогу чітко визначити місце і втрату енергії в кристалі. На Рисунку 6 приведені позиційні залежності швидкості лічення n для окремих фотоприймачів PD1 та PD2, і позиційна чутливість P для сумарного сигналу з обох фотоприймачів для кристалу 20x30x400 мм^3 CsI(Tl).

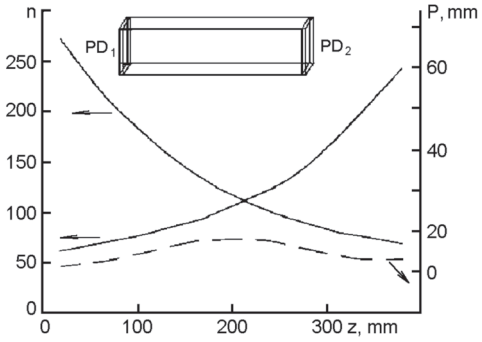


Рисунок 6. Позиційні зміни швидкості лічення n і позиційної утливості P для кристалу 20x30x400 мм CsI(Tl) з різними варіантам підключення фотоприймачів PD1 та PD2. Взято з [Gektin, 2005, с.140].

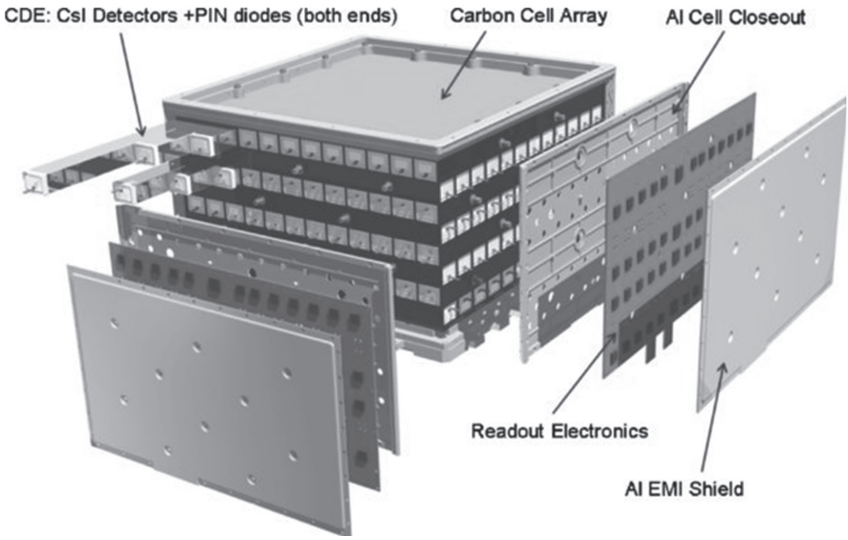


Рисунок 7. Модуль електромагнітного калориметра телескопа Fermi. Взято з [Atwood, 2009, с.1077].

Для ЕМК ТФ було виготовлено 1536 кристалів CsI(Tl). З ними було зібрано 16 модулів з 96 кристалами у кожному з них. Кристали у модулі розміщують у 8 шарів по 12 кристалів у кожному шарі. Розміри телескопу 1.8x1.8x0.72 $м^3$, маса 2790 кг (з них ~ 1500 кг - кристали CsI(Tl)). На Рисунку 7 показний один з 16 модулів калориметра телескопа Фермі.

Запуск телескопа відбувся у червні 2008 року. ТФ ще залишається дієвим. Основними результатами є: отримана карта гамма-джерел у просторі з високою чутливістю; ідентифіковано тисячі гамма-джерел; гамма від супермасивних чорних дірок; відкрито сотні нових пульсарів; зафіксовано спалахи гамма-променів; знайдено потенційний доказ наявності темної матерії у Галактиці [Fermi, 2025].

Висновки

Великі замовлення на кристали CsI для детекторів PiBeta, BaBar та Belle, а також телескопа Fermi з'явилися у вирішальний момент 1990-х та початку 2000-х років, коли фінансування наукової діяльності в новій незалежній Україні було дуже обмеженим, і вони допомогли підтримати вчених ІСМА у цей складний період. Окрім цих експериментів, нещодавно харківські вчені поставили кристали CsI для експерименту Califa колаборації FAIR. Всі роботи успішно проводилися завдяки високій кваліфікації співробітників і технологічним можливостям ІСМА.

Посилання

ИСМА НАН УКРАИНЫ. ПЕРВЫЕ ДЕСЯТЬ ЛЕТ (2003–2012). (2012). Харьков: "ИСМА". https://functmaterials.org.ua/contents/book/Book2-2012.pdf

Семиноженко, В. П. (Ред.). (2005). *НТК «Институт монокристаллов». Страницы истории 1955-2005*. Харьков: НТК «Институт монокристаллов». https://functmaterials.org.ua/books

Abashian A. et al. (2002). The Belle detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, *A479* (1), 117–232. https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)02013-7

Andryustchenko L. A., Kudin A. M., Goriletsky V. I., Zaslavsky B. G., Zosim D. I., Charkina T. I., Trefilova L. N., Renker D., Ritt S., & Mzavia D.A. (2002). Functional possibilities of organosilicon coatings on the surface of CsI-based scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research,* (A486), 40–47. https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00672-1

Atwood, W. B., et al. (2009). The large area telescope on the Fermi gamma-ray space telescope mission. *The Astrophysical Journal, 697*(1), 1071–1102. https://doi.org/10.1088/0004-637X/697/2/1071

Aubert, B., et al. (2002). The BABAR detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, (A479), 1–116. https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)02012-5

BaBar Experiment Confirms Time Asymmetry. (2012, November, 19). slac.stanford.edu. https://www6.slac.stanford.edu/news/2012-11-19-babar-experiment-confirms-time-asymmetry.

Belle experiment. (2026, February, 13). Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Belle_experiment.

Fermi Gamma-ray Space Telescope. (2025, November, 17). Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Fermi_Gamma-ray_Space_Telescope.

Gektin A. V., Gavrylyuk, V. P., Zosim D. I., & Yankelevich, V. L. (2005). Unidimensional position sensetive detector. *Functional materials*, *12*(1), 136-140.

Gektin, A. V., Grinev, B. V., Zosim, D. I., & Boyarintsev, A. Yu. (2009). Light output tuning for the long-length CsI:Tl scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A598*(1), 270–272. https://doi.org/10.1016/J.NIMA.2008.08.123

Grinyov, B. V., & Yankelevich, V.L. (1991). On the axial distribution of light output in cylindrical scintillation detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A306*(1), *229-232. https://doi.org/10.1016/0168-9002(91)90326-L*

Počanić, D. (2021). The pion beta and radiative electronic decays. *SciPost Physics Procceedings*, 5(024), 024.1-024.8. doi:10.21468/SciPostPhysProc.5.024

Zosim, D. I., & Gektin, A. V. (2015). Engeeniring of long length CsI: Tl scintillators for high energy physics. Functional materials, 22(1), 140-143. http://dx.doi.org/10.15407/fm22.01.14

Сцинтилятор PWO: як почалася історія

Ірина Тупіцина
Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України

Розвиток сцинтиляційного матеріалознавства значною мірою пов'язаний із дослідженнями Людмили Лаврентіївни Нагорної (Інститут монокристалів НАН України, Харків). У 1992 році вона запропонувала використання кристалів вольфрамату свинцю ($PbWO_4$) в експериментах з фізики елементарних частинок. Розроблені під її керівництвом методи вирощування великогабаритних високоякісних монокристалів довели перспективність цього матеріалу світовій науковій спільноті. Наразі кристали $PbWO_4$ становлять основу електромагнітних калориметрів у детекторах ALICE та CMS на Великому адронному колайдері (ЦЕРН), де ефективно використовуються для збору даних з 2008 року. Наукова спадщина Л.Л. Нагорної втілена у сучасних розробках її дослідницької групи, яка створює сцинтиляційні монокристали нового покоління. Крім калориметрії високих енергій, увага науковців зосереджена на низькофоновій ядерній спектрометрії. Ця галузь потребує матеріалів із надзвичайною радіочистотою та унікальними фізичними характеристиками. Розроблені сцинтилятори застосовуються в експериментах із дослідження рідкісних фізичних явищ поза межами Стандартної моделі: пошуку небаріонних взаємодій темної матерії, реєстрації безнейтринного подвійного бета-розпаду, вивчення радіо-

активного розпаду довгоживучих ізотопів, а також детектування нейтрино від наднових зірок за допомогою когерентного пружного нейтрино-ядерного розсіювання.

Історія функціональних матеріалів насамперед пов'язана з розвитком науки. Нові знання зумовлюють потребу у створенні нових матеріалів або модифікації вже відомих для отримання певних властивостей. Так, поява нового класу матеріалів - сцинтиляторів - була зумовлена відкриттям рентгенівського та інших видів високоенергетичного випромінювання. Сцинтиляційні матеріали, що здатні перетворювати енергію фотонів або інших елементарних частинок у видиме світло, стали ключовим інструментом їхнього вивчення.

Для експериментів у галузі фізики елементарних частинок і високих енергій тривалий час використовували лужногалоїдні кристали NaI(Tl), CsI(Tl) та CsI (проєкти Cleo II, Crystal Ball, KTeV, Belle/Belle II, BaBar та інші експерименти), а згодом – деякі оксидні кристали, як-от BGO для проєкту L3 та швидкодіючі фториди BaF_2 в експерименті TAPS [1]. У Таблиці 1 наведено характеристики сцинтиляційних кристалів, які застосовують в електромагнітній калориметрії [2, 3].

На початку 1990-х років було затверджено грандіозний проєкт XXI століття – створення Великого адронного колайдера (LHC) в Європейському центрі ядерних досліджень (CERN), здатного прискорювати зустрічні пучки протонів до рекордної енергії 7 TeB. Заплановані експерименти з фізики частинок і високих енергій, зокрема пошук бозона Гіґґса, потребували сцинтиляційних матеріалів із принципово новими характеристиками. Для реалізації проєкту були необхідні швидкі, щільні, радіаційно стабільні та недорогі сцинтилятори з малою радіаційною довжиною і малим радіусом Мольєра. Для детекторів знадобилося понад 80 000 одиниць сцинтиляторів, розмір кожного з яких мав дорівнювати 19-25 радіаційним довжинам.

Таблиця 1– Сцинтилятори для калориметрів у фізиці високих енергій [2,3].

	NaI (Tl)		BaF_2		CsI (Tl)		CeF_3		BGO $Bi_4 Ge_3 O_{12}$		PWO $PbWO_4$	
X_0, cm	2.59	☹	2.03	☹	1.86	😐	1.7	😐	1.12	☺	0.89	☺
ρ, g/cm ^{3}	3.67	☹	4.89	☹	4.51	☹	6.16	☺	7.13	☺	8.3	☺
τ, ns	245	☹	0.6^f 650^s	☺ ☹	1220	☹	30	☺	300	😐	10^f 30^s	☺
λ_{max}, nm	410	☺	220^f 300^s	☺ 😐	550	☺	340	😐 😐	480	☺	420^f 425^s	😐
LY, % NaI	100	☺	$4{,}1^f$ 36^s	☹ ☹	165	☺	7,3	😐	21	☺	0.077^f 0.3^s	☹
експеримент	Crystal Ball		TAPS		Belle , BaBar Bes III				L3		ALICE, CMS	

На старті проєкту розглядали низку кристалів для застосування в калориметрах LHC. Зокрема, достатньо щільний (7,13 г/см^3) монокристал германату вісмуту (BGO) виявився надто повільним (час загасання ~300 нс) і мав порівняно низьку радіаційну стабільність. Кристали силікату гадолінію (GSO:Ce) занадто дорогі, а вирощування великих зразків є складним технологічним завданням. Швидкі сцинтилятори, фторид барію та особливо монокристали фториду церію, вважалися перспективними кандидатами для калориметрів CMS і ALICE, для них навіть організували промислове виробництво. Однак вони не могли забезпечити необхідну компактність детекторів через значну радіаційну довжину ($X_0 \geq 1{,}7$ см).

Інтерес до сцинтиляторів на основі вольфраматів має тривалу історію. У 1948 р. Р. Крьогер (R.A.Kröger) [4] виявив перспективні люмінесцентні властивості сполук $CaWO_4$, $CdWO_4$ та $ZnWO_4$. Пізніше, у 70-х роках, монокристали $PbWO_4$ (PWO) розглядалися як акустооптичні матеріали [5], проте складність вирощування великогабаритних зразків через високу крихкість обмежила їх за-



Рис. 1 – Група Л.Л. Нагорної (2012 р.). Справа наліво: Юрій Вострецов, Ірина Тупіцина, Ганна Якубовська, Олександр Дубовик, Олег Стрювер.



Рис. 2 – Керівник групи Людмила Нагорна.

стосування. Попри вивчення люмінесцентних властивостей PWO [6], низька інтенсивність люмінесценції тривалий час не дозволяла розглядати цей матеріал як ефективний сцинтилятор.

Але крім низького світлового виходу, кристали PWO мають унікальне поєднання властивостей, що є оптимальним для створення калориметрів високих та надвисоких енергій. Велика густина (8,3 г/см^3), швидкодія (10 нс), мала радіаційна довжина (0,89 см) та невеликий радіус Мольєра дозволяють проєктувати компактні детектори повного поглинання. Проте на початку 90-х років технології виготовлення та масового виробництва монокристалів вольфрамату свинцю не існувало.

Революційним кроком у розробці таких матеріалів стали розробки групи Л.Л. Нагорної. Починаючи з кінця 80-х років, вона очолила роботи з отримання та дослідження монокристалів вольфраматів і висунула ідею про перспективність PWO як сцинтиляційного матеріалу для експериментів у фізиці елементарних частинок. У 1989-1990 роках спільно з колегами Ю. Я. Вострецовим,

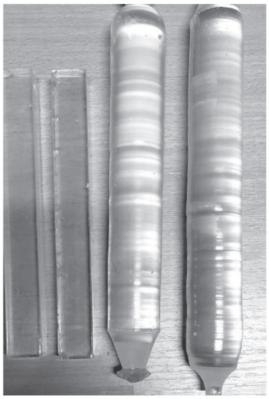


Рис. 3 – Перші зразки повнорозмірних монокристалів PWO

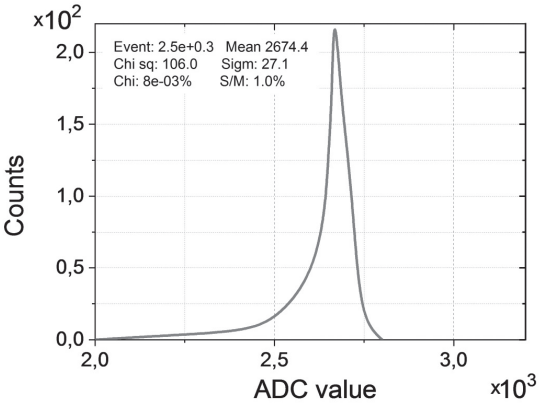


Рис.4 – Спектрограма детектора на основі кристала PWO 20×20×150 мм^3 при збуджені електронами з енергією 26 ГеВ

В. П. Мартиновим, І. А. Тупіциною та іншими було отримано й досліджено перші зразки розміром Ø20×20 мм. Аналіз їхніх оптико-люмінесцентних та сцинтиляційних властивостей підтвердив, що кристал PWO є перспективним для експериментів у галузі фізики високих енергій для енергій понад 10 ГеВ.

Згодом в Інституті монокристалів під керівництвом Л.Л.Нагорної розпочалися роботи з вирощування великогабаритних кристалів вольфрамату свинцю. Ці дослідження активізувалися після оголошення пошуку нового сцинтилятора для детектора повного поглинання у межах проєкту LHC. Було оптимізовано теплові умови та склад атмосфери вирощування, що забезпечило отримання кристалів PWO з мінімальною концентрацією центрів розсіювання та забарвлення [8, 9]. Розроблено методику термічного відпалу, спрямовану на підвищення оптичної якості монокристалів вольфрамату свинцю [10, 11]. Крім того, досліджено вплив домішок на оптико-люмінесцентні характеристики та радіаційну стійкість матеріалу [7, 9], що дало змогу сформулювати практичні рекомендації щодо його легування.

У 1991 році методом Чохральського було отримано перші великогабаритні кристали PWO (Ø33×220 мм) та виготовлено сцинтилятори розмірами від 20×20×(40÷70) мм^3 до 22×22×150 мм^3 (рис.3). Було вивчено їхні спектрометричні та сцинтиляційні характеристики. Дослідження показали, що матеріал має високу радіаційну стійкість та спектрометричні властивості. На рис. 4 наведено спектрограму детектора на основі кристала PWO (20×20×150 мм^3), виміряну на макеті електромагнітного калориметра при збудженні електронами з енергією 26 ГеВ (з використанням ФЕП типу ХР-202). Результати підтвердили високу якість сцинтилятора: світловий вихід для PWO становив 10000 фотоелектронів/ГеВ. Таким чином, вимірювання на пучках прискорювача довели високу ефективність кристалів PWO для реєстрації частинок високих енергій.

Порівняльні дослідження різних сцинтиляторів довели, що PWO - найбільш перспективний матеріал для електромагнітних (ЕМ) калориметрів повного поглинання [12]. Розуміння цього факту науковою громадськістю настало після анонсу результатів дослідження на першій конференції «Crystal-2000», яка була проведена у 1992 р. Головною метою конференції в м.Шамоні (Франція) був вибір матеріалу для проекту LHC. На початку роботи конференції фаворитами були кристали BaF_2 і CeF_3 які вироблялися у промислових масштабах у Korth Kristalle (Німеччина) та Шанхайському інституті кераміки (Китай).

На конференції було представлено лише чотири доповіді, присвячені кристалам вольфрамату свинцю. У своєму виступі М. Кобаяші (M. Kobayashi) [13] проаналізував кристали розмірами 8×8×20 мм^3 та 10×10×40 мм^3, які були низької оптичної якості. Автор зазначив, що PWO може стати перспективним матеріалом лише за умови отримання безбарвних зразків, проте на той час вважати їх придатними для практичного застосування було передчасно.

Інші три доповіді базувалися на дослідженні кристалів, вирощених групою Л.Л. Нагорної в Інституті монокристалів (м. Харків)

[14–16]. У роботі [15] вперше було вивчено кінетику загасання сцинтиляційного імпульсу PWO, визначено внесок компонент із різним часом загасання (A_1 = 75% – 4,5 нс; A_2 = 25% – 10,2 нс) та встановлено світловий вихід на рівні 10000-15000 фотоелектронів/ГеВ. Дослідження радіаційної стійкості показали, що при опроміненні ^{60}Co дозою до 10 Мрад світловий вихід залишається незмінним, а при 50 Мрад його зниження не перевищує 10 %.

Найбільш вагомі результати представила Л. Л. Нагорна у доповіді [16], присвяченій особливостям отримання високоякісних великогабаритних кристалів PWO, а також впливу дефектності структури на їхні радіаційно-оптичні, кінетичні та спектрометричні характеристики. Авторка продемонструвала полірований сцинтиляційний елемент розміром 20×20×70 мм^3, виготовлений із безбарвного кристала та вперше довела можливість отримання кристалів PWO необхідних габаритів з високою оптичною якістю, однорідністю, малим часом висвічування та високою радіаційною стабільністю.

Ці результати викликали значний резонанс, а під час наукових дискусій із провідними вченими було підтверджено незаперечні переваги матеріалу, хоча на початку конференції ставлення до PWO було скептичним. Зокрема, проф. С. Дерензо (S.E. Derenzo) вніс корективи у свою заключну пленарну доповідь, зазначивши, що монокристал вольфрамату свинцю придатний для використання в проєкті, попри те, що в його попередніх роботах PWO не розглядався як перспективний матеріал для калориметрії [6].

Конференція в м.Шамоні та доповідь Л.Л. Нагорної зробили вольфрамат свинцю найзатребуванішим об'єктом досліджень серед технологів і розробників сцинтиляційних матеріалів на наступне десятиліття [17-23]. Вже у 1993 році на конференції SCINT цьому кристалу було присвячено понад половину всіх доповідей. Було доведено, що для експериментів на Великому адронному колайдері кристал PWO є найбільш оптимальним, попри нижчий світловий вихід порівняно з іншими кристалами-кандидатами.

Вирішальними критеріями вибору стали його характеристики у поєднанні з відносно низькою вартістю виробництва. У 1995 році, після остаточного затвердження PWO як основного сцинтилятора для детекторів LHC, розпочався період інтенсивних фундаментальних досліджень та розробки промислових технологій його масового виробництва. Тоді хтось пожартував про те, що Людмила Нагорна запропонувала свій вольфрамат свинцю та розорила два заводи по вирощуванню BaF_2 і CeF_3. На міжнародних конференціях з сцинтиляційної тематики найближчі п'ять років більшість доповідей було присвячено кристалу вольфрамату свинцю.

Організація виробництва 80000 великогабаритних елементів вагою 100 тонн лише для експерименту CMS на LHC вимагала небачених досі зусиль. Всі ці зусилля увінчалися успіхом: в 2012 р. вчені Європейського центру ядерних досліджень (ЦЕРН) в Женеві оголосили сенсаційну новину про сигнал від частинки з масою, що дорівнює 125 ГеВ. Таким чином, було відкрито нову субатомну частинку, параметри якої відповідають бозону Гіґґса.

Коли Л.Л. Нагорна святкувала свій 80-річний ювілей у 2012 р., їй надійшов лист від Поля Лекока (Paul Lecoq), технічного координатора будівництва електромагнітного калориметра експерименту CMS у ЦЕРНі:

Дорога Людмило!

Яка кар'єра!

Я знаю Вас з історії PWO, і Ви справді можете пишатися своїм неоціненним внеском.

Як Ви знаєте, 100 тонн PWO в нашому калориметрі CMS «побачили» бозонГіґґса – про це було оголошено в липні цього року. Без Вас цей калориметр, можливо, взагалі не був би побудований!

Мушу додати, що, окрім Вашого фантастичного наукового внеску, робота з Вами протягом усіх цих років була для мене справжнім задоволенням.

З найкращими побажаннями

Поль Лекок CERN Dept: PH/CMA 1211-Geneva-Switzerland

Тема: For Ludmila Nagornaya
От: plecoq <paul.lecoq@cern.ch>
Дата: 21.09.2012, 16:20
Кому: <tupitsyna@isma.kharkov.ua>

Dear Ludmila
What a career!
I have known you through the PWO story and you can be really proud of your invaluable contribution.
As you know, the 100 tons of PWO we have in our CMS calorimeter have seen the Higgs boson , which has been announced in July this year.
Without you this calorimeter could not have been built!
I must add that, besides you fantastic scientific contribution, it has been a real pleasure to work with you all over these years.
I whish you a restful retirement.
Best regards
Paul Lecoq
.

Dr Paul Lecoq CERN Dept: PH/CMA 1211-Geneva-Switzerland

Рис.5 – Лист Поля Лекока Людмилі Нагорної, вітання з 80-річчам

Запуск міжнародного проєкту LHC зі створення великого адронного колайдера на початку 90-х років минулого століття став великим кроком для формування глобальної колаборації у галузі сцинтиляційного матеріалознавства. Глибока переконаність Л.Л. Нагорної в перспективності вольфрамату свинцю як сцинтилятора для фізики високих енергій, а також наполегливість у розробці технології отримання високоякісних великогабаритних кристалів, дозволили переконати провідних учених світу в доцільності цієї ідеї та дали поштовх до масштабних досліджень. На сьогодні монокристал вольфрамату свинцю є одним із найкращих сцинтиляторів для використання в експериментах із фізики елементарних частинок.

Однак історія вольфрамату свинцю як матеріалу для дослідження елементарних частинок на цьому не завершилася. Наразі вольфрамат свинцю є найбільш уживаним сцинтиляційним матеріалом в електромагнітній калориметрії (ЕМК) у сучасних та перспективних прискорювальних експериментах. Розробка кристалів PWO для ЕМК триває, зокрема для роботи в діапазоні

енергій значно нижче 1 ГеВ. Це необхідно для забезпечення вимог детектора PANDA в дослідницькому центрі FAIR (Німеччина) та інших менших калориметрів [24]. Результатом цих досліджень стало створення сцинтиляційного кристала PWO-II з покращеними характеристиками. Такі монокристали демонструють удвічі вищий світловий вихід, відсутність компонентів повільної люмінесценції та суттєво кращу енергетичну роздільну здатність. Отримані результати стимулювали вивчення можливостей застосування PWO-II у позитронно-емісійній томографії (ПЕТ) [25].

Наукова група Л.Л. Нагорної, яка пішла з життя у 2013 році, продовжує розвивати її спадщину, розробляючи нові сцинтиляційні монокристали з унікальними характеристиками. Ще один відомий метод досліджень у цій галузі – низькофонова ядерна спектрометрія. Пошук рідкісних подій, таких як взаємодія з небаріонною темною матерією, безнейтринний подвійний бета-розпад ядер або радіоактивний розпад довгоживучих ізотопів, є надзвичайно актуальною проблемою сучасної фізики. Очікується, що ці події доведуть існування нових фундаментальних частинок, а також розширять наше уявлення про будову Всесвіту [26-30].

Чутливість таких експериментів насамперед залежить від рівня власного радіаційного фону при вимірюваннях, який має бути надзвичайно низьким. Низькофонові експерименти із застосуванням спектрометричного методу проводять у глибоких підземних лабораторіях для захисту від космічного випромінювання. Радіоактивні домішки природного, космогенного або антропогенного походження присутні в усіх частинах експериментальної апаратури. Детектори, їхні компоненти та навколишнє середовище можуть бути джерелами фону, що є основним чинником, який обмежує чутливість [26, 31].

Останнім часом чутливість низькофонових експериментів завдяки використанню кріогенних сцинтиляційно-болометричних детекторів наблизилася до показників кращих напівпровідникових аналогів. Завдяки унікальним властивостям, насамперед високій оптичній прозорості та великій густині, монокристали вольфрамату

Таблиця 2. Радіоактивні домішки у $PbWO_4$ зі звичайного свинцю (дані отримані за допомогою γ-спектроскопії на LNGS [31]).

Ланцюг	Нукліди	Активність, мБк/кг
^{232}Th	^{226}Ra	≤13
^{238}U	^{226}Ra ^{210}Pb	≤10 (53÷79)×10 ^{3}

свинцю виявилися перспективним матеріалом. Проте звичайний свинець містить радіоактивний ізотоп ^{210}Pb, активність якого може сягати десятків і навіть тисяч мБк/кг, що є неприйнятним для низькофонових сцинтиляційних пристроїв. Вольфрамат свинцю, виготовлений зі звичайного свинцю, містить значну кількість радіонуклідів, особливо ^{210}Pb (табл. 2).

Для вирощування низькофонового PWO науковці групи Л.Л. Нагорної використовували так званий археологічний свинець. Оскільки період напіврозпаду ^{210}Pb становить 22,3 роки, радіоактивність свинцю, виплавленого понад сто років тому, суттєво зменшується завдяки природному розпаду. На рис. 6 показано археологічний свинець, знайдений у деталях грецького корабля, що затонув поблизу південного берега Криму в I столітті до н. е. Саме цей матеріал було застосовано для вирощування низькофонових кристалів PWO. У кристалах вольфрамату свинцю, вирощених із такої сировини після завершення десятків періодів напіврозпаду, ізотоп ^{210}Pb майже повністю відсутній [32–34] (табл. 3).

Комплексний метод рафінування археологічного свинцю шляхом дистиляції у вакуумі розробили фахівці Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут" [35], що дозволило виготовити свинець чистотою 99,9996 %. З цієї сировини співробітники Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України (м. Харків) виростили низькофонові кристали вольфрамату свинцю (рис. 7).

Унікальні властивості монокристалів PWO дозволяють використовувати їх не лише як елементи кріогенних сцинтиляційно-болометричних детекторів для пошуку темної матерії, рідкісних



Рис. 6 – Зразки ^{arch}Pb [32]

Таблиця 3. Радіоактивні домішки в зразках ^{apx}Pb [32]

Ланцюг	Нукліди	Активність, мБк/кг
^{232}Th	^{40}K	<7
	^{60}Co	<0.2
	^{137}Cs	<0.5
	^{226}Ra	<0.4
	^{228}Th	<1.2
^{238}U	^{234m}Pa	<21
	^{226}Ra	<10
	^{210}Pb	<30
	^{210}Po(α)	<0.3

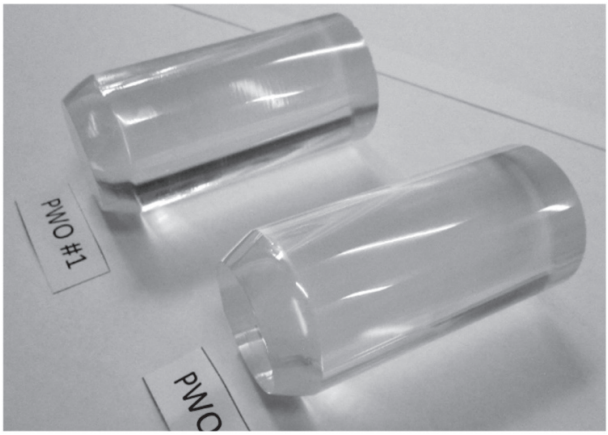


Рис.7 Монокристали $^{apx}PbWO_4$

подій та дослідження когерентного розсіювання нейтрино на ядрах важких елементів, а й як активний захист від радіоактивного фону фотоелектронних помножувачів (ФЕП) у спектрометричних експериментах [26, 31].

Для цього з таких радіаційно чистих монокристалів було виготовлено світловод, який застосовувався в експерименті з дослідження подвійного бета-розпаду ізотопу ^{106}Cd, з використанням збагаченого кристала $^{106}CdWO_4$. Експеримент проводився в підземній

лабораторії Гран-Сассо (LNGS, Італія), починаючи з 2012 року. За результатами 13085 годин набору даних було встановлено нові, більш жорсткі межі для характеристик цих процесів. Отримані результати перевершують показники попередніх експериментів і є ближчими до теоретичних передбачень [36, 37].

Нещодавно у межах проєкту RES-NOVA було поставлено за мету дослідження нейтрино від наднових зірок із колапсуючим ядром за допомогою когерентного пружного нейтрино-ядерного розсіювання (CEvNS). Для цього планується використовувати масивні кріогенні болометри на основі кристалів із великою густиною, що містять важкі елементи [38]. Тестові вимірювання з використанням наших низькофонових кристалів PWO підтвердили високу ефективність цього матеріалу [38-41]. Наразі проєкт затверджено: у ньому буде задіяно 2,4 тонни низькофонового вольфрамату свинцю, виготовленого з археологічної сировини.

У цій статті наведено історичний огляд застосування сцинтилюючих кристалів PWO, від їх відкриття в 1970-х роках до сьогодення, підкреслюючи фундаментальну роль, яку відіграли Людмила Нагорна та її колеги з Харкова у становленні їх як ключового матеріалу для детекторів у фізиці елементарних частинок. Цей матеріал у майбутньому може знайти застосування і в інших галузях фундаментальної та прикладної фізики.

Посилання

1. Novotny, R. (1998). Performance of the BaF_2-calorimeter TAPS. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, *61*(3), 137-142. https://doi.org/10.1016/S0920-5632(97)00552-5

2. Lecoq, P., Gektin, A., & Korzhik, M. (2017). Inorganic scintillators for detector systems. *Springer, Berlin, Germany*, *10*, 1245-1250. DOI: 10.1007/978-3-319-45522-8

3. S. Navas et al.(Particle Data Group). (2024 and 2025 update). Review of Particle Physics. *Physical Review D, 110*. 030001. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.030001

4. Kröger, F. A., & Urbach, F. (1948). Some aspects of the luminescence of solids. *Physics Today*, *1*(7), 24-25. DOI:10.1063/1.3066188

5. Coquin, G. A., Pinnow, D. A., & Warner, A. W. (1971). Physical properties of lead molybdate relevant to acousto-optic device applications. *Journal of Applied Physics*, *42*(6), 2162-2168. https://doi.org/10.1063/1.1660520

6. Derenzo, S. E., Moses, W. W., Cahoon, J. L., Perera, R. C. C., & Litton, J. E. (1990). Prospects for new inorganic scintillators. *IEEE transactions on nuclear science*, *37*(2), 203-208. DOI:10.1109/23.106619

7. Nagornaya, L. L., Ryzhikov, V. D., Vostretsov, U. Y., Tupitsina, I. A., Burachas, S. F., Martynov, W. P., & Katrunov, K. A. (1995). Fast heavy scintillators on the basis of tungstate single crystals. *Radiation measurements*, *24*(4), 375-377. https://doi.org/10.1016/1350-4487(95)00271-F

8. Нагорна Л.Л., Востецов Ю.Я., Мартинов В.П., Бурачас С.Ф., Рижиков В.Д., Тупіцина І.А. (1997). *Спосіб одержання сцинтиляційних монокристалів вольфраму свинцю* (Патент України № 19641). Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/329367/

9. Yu. Borodenko, S. Burachas, L. Nagornaya et al (1996). In Dorenbos, P., & van Eijk, C. W. (Eds.). (1996). *SCINT 95: Proceedings of the International Conference on Inorganic Scintillators and Their Applications: Delft, the Netherlands, August 28-September 1, 1995*. (p. 260-263). Delft University Press

10. Nagornaya, L. L., Bondar, V. G., Vostretsov, Y. Y., Grinyov, B. V., Katrunov, K. A., Martynov, V. P., ... & Tupitsyna, I. A. (2005). Growing and study of optical and luminescence properties of scintillation oxide crystals. *Functional Materials*, *12*(4), 689-694.

11. Бабійчук І.П., Бондар В.Г., Гриньов Б.В., Кривошеін В.І., Нагорна Л.Л., Пирогов Є.М., Рижиков В.Д., Катрунов К.О. (2006). *Спосіб термічної обробки монокристалів вольфрамату свинцю* (Патент Украины 76025). Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій. https://

sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/388751/

12. Baccaro, S., Bohacek, P., Borgia, B., Cecilia, A., Dafinei, I., Diemoz, M., ... & Vedda, A. (1997). Influence of La^{3+}-doping on radiation hardness and thermoluminescence characteristics of $PbWO_4$. *Physica Status Solidi A (Applied Research)*, *160*. https://doi.org/10.1002/1521-396x(199704)160:2<r5::aid-pssa99995>3.0.co;2-l

13. M. Kobayashi, M. Ishii, Y. Usuki, H. Yahagi (1993). PbWO4 scintillator at room temperature. In De Notaristefani, F., Lecoq, P., & Schneegans, M. (Eds.), *Heavy Scintillators for Scientific and Industrial Applications: Proceedings of the" Cristal 2000" International Workshop* (p.375-379). Atlantica Séguier Frontières.

14. V.A.Kachanov, Y.D.Prokoshkin, L.L.Nagornaya et al. (1993). In De Notaristefani, F., Lecoq, P., & Schneegans, M. (Eds.), *Heavy Scintillators for Scientific and Industrial Applications: Proceedings of the" Cristal 2000" International Workshop* (p. 381-386). Atlantica Séguier Frontières.

15. L.V. Myasoedov , V.I. Selivanov, I.V. Sinitsin, V.D. Torokhov, L.L. Nagornaya, Y.I. Vostresov, I.A. Tupitsina (1993). $PbWO_4$: A heavy, fast and radiation resistant scintillator for EM calorimetry. In De Notaristefani, F., Lecoq, P., & Schneegans, M. (Eds.), *Heavy Scintillators for Scientific and Industrial Applications: Proceedings of the" Cristal 2000" International Workshop* (p. 437-442). Atlantica Séguier Frontières.

16. L. Nagornaya, V. Ryzhikov (1993). Fast scintillators based on large 'heavy' tungstate single crystals In De Notaristefani, F., Lecoq, P., & Schneegans, M. (Eds.), *Heavy Scintillators for Scientific and Industrial Applications: Proceedings of the" Cristal 2000" International Workshop* (p. 367-374). Atlantica Séguier Frontières.

17. Nagornaya, L., Ryzhikov, V., Tupitsina, I., Krisyuk, M., & Nedelko, S. (1995). Development of large heavy fast $PbWO_4$ scintillators. *IEEE transactions on nuclear science*, *42*(4), 337-340. DOI: 10.1109/23.467825

18. Nagornaya, L., Apanasenko, A., Ryzhikov, V., Tupitsina, I.,

& Golubev, N. (1997). Luminescence and radiation damage of the single crystals $PbWO_4$. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, *44*(3), 866-869. DOI: 10.1109/NSSMIC.1996.591483

19. Nagornaya, L., Apanasenko, A., Burachas, S., Ryzhikov, V., Tupitsyna, I., & Grinyov, B. (2000, October). Influence of doping on radiation hardness of scintillators based on lead tungstate and cadmium tungstate single crystals. In 2000 IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record (Cat. No. 00CH37149) (Vol. 1, pp. 6-193). IEEE.

20. Nagornaya, L., Apanasenko, A., Burachas, S., Ryzhikov, V., Tupitsyna, I., & Grinyov, B. (2002). Influence of doping on radiation stability of scintillators based on lead tungstate and cadmium tungstate single crystals. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, *49*(1), 297-300. DOI: 10.1109/TNS.2002.998657

21. Burachas, S., Bondar, V., Borodenko, Y., Katrunov, K., Martinov, V., Nagornaya, L., ... & Manko, V. (1999). Lead tungstate PbWO4 crystals for high energy physics. *Journal of crystal growth*, *198*, 881-884. https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)01237-8

22. Britwich, G., Burachas, S., Vostretsov, Y., Kuptsov, S., Martynov, V., Nagornaya, L., ... & Ryzhikov, V. (1997). Scintillation and kinetic parameters of PbWO/sub 4/scintillators. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, *44*(3), 534-537. DOI: 10.1109/23.603706

23. Nagornaya, L. L., Ryzhikov, V. D., & Tupitsina, I. A. (1993, October). PbWO/sub 4/-based Fast Heavy Scintillator For The Total Absorption Detectors Of EM Calorimeters. In *1993 IEEE Conference Record Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference* (pp. 156-158). IEEE.

24. Novotny, R. W., Brinkmann, K. T., Dormenev, V., Finger, M., Houzvicka, J., Korjik, M., ... & Zaunick, H. G. (2018). High-quality lead tungstate crystals for PANDA produced at CRYTUR. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, *65*(8), 1998-2003. DOI: 10.1109/TNS.2018.2804387

25. Follin, M., Sharyy, V., Bard, J. P., Korzhik, M., & Yvon, D. (2021). Scintillating properties of today available lead tungstate crystals. *Journal of Instrumentation*, *16*(08), P08040. https://doi.

org/10.1088/1748-0221/16/08/P08040

26. Ковтун, Г. П., Бойко, Р. С., Даневич, Ф. А., Кропивянский, Б. Н., Мокина, В. М., Потина, Т. С., ... & Шлегель, В. Н. (2014). Производство и свойства низкофоновых сцинтилляторов вольфраматов кадмия и свинца для поиска двойного бета-распада. *Ядерна фізика та енергетика*, (15,№ 1), 92-100. https://doi.org/10.15407/jnpae2014.01.092

27. Dore, U., & Orestano, D. (2008). Experimental results on neutrino oscillations. *Reports on Progress in Physics*, *71*(10), 106201. https://doi.org/10.1088/0034-4885/71/10/106201

28. Mohapatra, R. N., Antusch, S., Babu, K. S., Barenboim, G., Chen, M. C., De Gouvêa, A., ... & Wolfenstein, L. (2007). Theory of neutrinos: a white paper. *Reports on Progress in Physics*, *70*(11), 1757-1867. DOI: 10.1088/0034-4885/70/11/R02

29. Vergados, J. D., Ejiri, H., & Šimkovic, F. (2012). Theory of neutrinoless double-beta decay. *Reports on Progress in Physics*, *75*(10), 106301. https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/10/106301

30. Cappella, F., & Incicchitti, A. (2021). Techniques for background identification in the search for rare processes with crystal scintillators. *Physics*, *3*(2), 187-206. https://doi.org/10.3390/physics3020015

31. Danevich, F. A., Georgadze, A. S., Kobychev, V. V., Kropivyansky, B. N., Nagorny, S. S., Nikolaiko, A. S., ... & Missevitch, O. (2006). Application of PbWO4 crystal scintillators in experiment to search for 2β decay of 116Cd. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, *556*(1), 259-265. DOI: 10.1016/j.nima.2005.09.049

32. Danevich, F. A., Kim, S. K., Kim, H. J., Kim, Y. D., Kobychev, V. V., Kostezh, A. B., ... & Voronov, S. A. (2009). Ancient Greek lead findings in Ukraine. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, *603*(3), 328-332. https://

doi.org/10.1016/j.nima.2009.02.018

33. Alessandrello, A., Cattadori, C., Fiorentini, G., Fiorini, E., Gervasio, G., Heusser, G., ... & Zanotti, L. (1991). Measurements on radioactivity of ancient roman lead to be used as shield in searches for rare events. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, *61*(1), 106-117. https://doi.org/10.1016/0168-583X(91)95569-Y

34. Alessandrello, A., Allegretti, F., Brofferio, C., Camin, D. V., Cremonesi, O., Fiorini, E., ... & Zanotti, L. (1993). Measurements of low radioactive contaminations in lead using bolometric detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, *83*(4), 539-544. DOI: 10.1016/0168-583X(93)95884-8

35. Virich, V. D., Gorbenko, Y. V., Kovtun, G. P., Nagorny, S. S., Potina, T. S., Solopikhin, D. A., & Shcherban, A. P. (2016). Refining ancient lead by vacuum distillation. *East european journal of physics*, (3, Num. 4), 60-65. DOI: https://doi.org/10.26565/2312-4334-2016-4-06

36. Tretyak, V. I., Belli, P., Bernabei, R., Brudanin, V. B., Cappella, F., Caracciolo, V., ... & Tupitsyna, I. A. (2016, May). New limits on 2β processes in ^{106}Cd. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 718, No. 6, p. 062062). IOP Publishing. DOI 10.1088/1742-6596/718/6/062062

37. Belli, P., Bernabei, R., Brudanin, V. B., Cappella, F., Caracciolo, V., Cerulli, R., ... & Tupitsyna, I. A. (2016). Search for 2 β decay of Cd ^{106} with an enriched $Cd^{106}WO_4$ crystal scintillator in coincidence with four HPGe detectors. *Physical Review C*, *93*(4), 045502. https://doi.org/10.1103/PhysRevC.93.045502

38. Pattavina, L., Ferreiro Iachellini, N., & Tamborra, I. (2020). Neutrino observatory based on archaeological lead. *Physical Review D*, *102*(6), 063001. DOI:10.1103/PhysRevD.102.063001

39. Beeman, J. W., Benato, G., Bucci, C., Canonica, L. U. C. I. A., Carniti, P. A. O. L. O., Celi, E., ... & Wagner, V. (2023). Characterization of a kg-scale archaeological lead-based PbWO4

cryogenic detector for the RES-NOVA experiment. *Applied Radiation and Isotopes*, *194*, 110704. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110704

40. Ferreiro Iachellini, N., Pattavina, L., Abdelhameed, A. H., Bento, A., Canonica, L., Danevich, F., ... & Tupitsyna, I. A. (2022). Operation of an archaeological lead PbWO 4 crystal to search for neutrinos from astrophysical sources with a transition edge sensor. *Journal of Low Temperature Physics*, *209*(5), 872-878. DOI: 10.1007/s10909-022-02823-8

41. RES-NOVA Group of Interest, Beeman, J. W., Benato, G., Bucci, C., Canonica, L., Carniti, P., ... & Wagner, V. (2022). Radiopurity of a kg-scale PbWO4 cryogenic detector produced from archaeological Pb for the RES-NOVA experiment. *The European Physical Journal C*, *82*(8), 692. DOI: 10.1140/epjc/s10052-022-10656-8

Фізика високих густин енергії в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України у Києві: історичний огляд

Марк Горенштейн, Сергій Перепелиця, Віктор Трубніков
Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України

1. Вступ

Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова Національної академії наук України (ІТФ) є однією з провідних установ у галузі фізики високих енергій в Україні. Він був заснований у 1966 році. Першим директором ІТФ (1966–1973) був видатний фізик-теоретик і математик Микола Миколайович Боголюбов (Рис. 1 (а)). Він особисто брав участь у всіх аспектах його створення — від вибору місця та контролю за проектуванням будівлі (Рис.1 (б)) до визначення напрямків досліджень та формування наукового персоналу.

Заснування інституту теоретичної фізики в Києві було винятковою та, на той час, малоймовірною подією. Тоді вже був створений Інститут теоретичної фізики в Чорноголовці (нині Інститут теоретичної фізики ім. Ландау), й ініціатива Боголюбова спочатку зустріла скептицизм. Зрештою, ініціатива досягла успіху завдяки міжнародній репутації та науковому авторитету Боголюбова, а

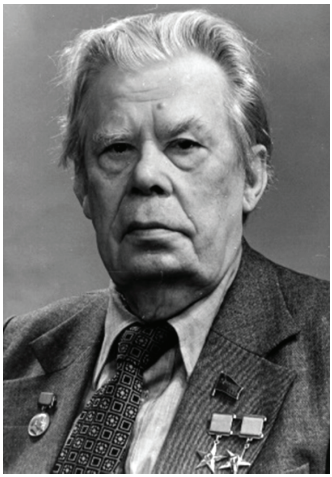


Рис. 1 (а) Микола Миколайович Боголюбов (1909-1992)



Рис. 1 (б) Головний корпус ІТФ, збудований у 1970 році.

також підтримці академіка Бориса Євгеновича Патона та уряду України.



Рис. 2 Геннадій Зінов'єв (1941-2021)

На початку своєї діяльності Інститут складався з трьох основних відділів: математичних методів у теоретичній фізиці (керівник Остап Парасюк), теорії ядра (керівник Олександр Давидов) та теорії елементарних частинок (керівник Альберт Тавхелідзе). З часом сфера його досліджень розширювалася, що призвело до створення нових відділів. У 1983 році під керівництвом професора Геннадія Зінов'єва (член-кореспондент Національної академії наук України з 2012 року) було створено спеціалізовану лабораторію фізики високих густин енергії. Ця лабораторія перетворилася на повноцінний відділ у 1986 році. Професор Геннадій Зінов'єв (Рис. 2) очолював відділ до своєї смерті у 2021 році, і ця стаття присвячена його пам'яті.

У цій статті представлено короткий огляд історії, поточного стану та майбутніх планів внеску ІТФ у пошук нових фаз матерії з високою густиною енергії в релятивістських ядро-ядерних зіткненнях. Основні теоретичні результати, отримані співробітниками Відділу фізики високих густин енергії, обговорюються в Розділі 2. Кілька прикладів плідної співпраці між дослідниками ІТФ та Європейською організацією ядерних досліджень (CERN) представлено в Розділі 3, а Розділ 4 містить заключні зауваження.

2. Відділ фізики високих густин енергії

З самого початку основним напрямком досліджень відділу було визначено вивчення властивостей сильновзаємодійної матерії за екстремальних умов високих температур та густини баріонного числа.

Сильна взаємодія є однією з чотирьох фундаментальних взаємодій у природі. Цей факт було усвідомлено у 1932 році. Після відкриття James Chadwick у лютому 1932 року нової субатомної частинки — нейтрона (Chadwick, 1932), український фізик Дмитро Іваненко негайно запропонував протон-нейтронну модель атомного ядра (Iwanenko, 1932). Його публікація ознаменувала народження як ядерної фізики, так і теорії сильних взаємодій. До цього часу були відомі лише дві фундаментальні взаємодії: електромагнітна та гравітаційна. Однак стало очевидним, що їх недостатньо для пояснення взаємодії протонів і нейтронів усередині атомних ядер.

Теорією сильних взаємодій є квантова хромодинаміка (КХД). Основні об'єкти цієї теорії — кольорові кварки та глюони — не існують у вигляді вільних частинок (конфайнмент). Натомість вони входять до складу безкольорових зв'язаних станів, що називаються адронами. Адрони, що складаються з трьох кварків, називаються баріонами, а частинки, утворені парою кварк-антикварк — мезонами. Найвідомішими баріонами є вже згадані протони та нейтрони — основні складові атомних ядер. Серед мезонів найкраще відомі піони — найлегші адрони, які у великій кількості народжуються у

високоенергетичних процесах у космічних променях та на прискорювачах. На сьогодні відомо кілька сотень адронів та їхніх збуджених станів (резонансів). З іншого боку, існують переконливі аргументи на користь того, що за високих густин енергії сильновзаємодійна речовина повинна переходити у деконфайнований стан і існувати у формі кварк-глюонної плазми (КГП).

Фазова діаграма сильновзаємодійної речовини, зокрема можливе існування критичної точки КХД, є одним із головних напрямів сучасних досліджень у ядерній фізиці високих енергій. Науковці нашого відділу активно працюють над цією тематикою. Екстремальні умови, за яких утворюється кварк-глюонна плазма, можуть бути створені в лабораторних експериментах із релятивістських зіткнень важких іонів на Суперпротонному синхротроні (SPS) та Великому адронному колайдері (LHC) у CERN поблизу Женеви, а також на Релятивістському колайдері важких іонів (RHIC) у Brookhaven National Laboratory (BNL) поблизу Нью-Йорка. Пошук критичної точки та визначення її розташування на фазовій діаграмі «температура – баріонний хімічний потенціал» є одним із пріоритетних завдань цих експериментальних програм.

З 2021 року відділ фізики високих густин енергії очолює доктор фіз.-мат. наук, професор Марк Горенштейн. Сьогодні діяльність відділу згрупована у три основні напрямки досліджень:

1. Статистична механіка сильновзаємодійної матерії



М. Горенштейн А. Лисенко Р. Побережнюк В. Кузнєцов

2. Релятивістська гідродинаміка та кінетика ядерно-ядерних зіткнень



Ю.Синюков С.Аккелін В.Шаповал М.Ажимамбетов В.Набока

3. Граткове формулювання квантової хромодинаміки



О. Борісенко С. Волошін В. Челноков

Теоретичні дослідження у відділі проводяться у тісній співпраці з провідними міжнародними теоретичними центрами та у постійному контакті з експериментальними колабораціями. Одним із перших важливих досліджень співробітників відділу було побудування точно розв'язуваної моделі фазового переходу деконфайнменту (Gorenstein, 1981). Це був перший приклад статистичної моделі, яка описувала як газ адронів-резонансів за низьких температур, так і кварк-глюонну плазму за високих температур. На той час уже стало зрозуміло, що наші теоретичні передбачення можуть бути перевірені експериментально в релятивістських зіткненнях ядер. За малих енергій зіткнень можуть формуватися рівноважні стани адронної речовини. Із підвищенням енергії зіткнень можна спостерігати перехід до деконфайнованої матерії, тобто утворення кварк-глюонної плазми на ранніх стадіях зіткнень ядер.

На початку 1980-х років розпочалися експериментальні спроби реалізації цієї амбітної програми.

Речовина, що утворюється в зіткненнях ядер, еволюціонує дуже швидко. Для опису цієї еволюції дослідники відділу розробили методи релятивістської гідродинаміки та кінетики. Зокрема, було запропоновано метод піонного інтерферометричного мікроскопа для вимірювання дуже малих просторово-часових характеристик надщільних адронних і кварк-глюонних систем, а також отримано оцінку часу життя таких систем (Makhlin, 1988). Було введено поняття «довжин однорідності» в інтерферометричних вимірюваннях, яке нині стало загальноприйнятою основою для інтерпретації результатів кореляційного аналізу. Також було розроблено новий метод опису кулонівської взаємодії у кінцевому стані для тотожних частинок, що випромінюються від відносно великих розширюваних джерел. Цей метод нині без винятку використовується у всіх експериментальних колабораціях (Sinyukov, 1998).

Від перших етапів роботи відділу калібрувальні теорії на ґратці стали важливим напрямом досліджень. Цей підхід дає змогу виводити з перших принципів КХД залежність термодинамічних функцій від температури в цікавих областях фазової діаграми сильновзаємодійної речовини. Дослідники відділу запропонували нову концепцію фазового переходу деконфайнменту в квантовій хромодинаміці за скінченних температур. Фаза деконфайнменту визначається як фаза, в якій ґлюонне екранування кварків домінує над динамічним екрануванням (Faber, 1995; Faber, 1998).

У 2000 році CERN повідомив про «переконливі докази» існування КГП у зіткненнях Pb+Pb на прискорювачі SPS (Heinz, 2000). Експериментальні сигнали не були надто переконливими — на цей час Нобелівську премію за це відкриття не було присуджено. Труднощі в інтерпретації сигналів КГП змусили науковців переглянути стратегію їх пошуку. Якщо КГП справді утворюється в центральних зіткненнях ядер свинцю за максимальної енергії SPS, то слід очікувати сигнали фазового переходу до КГП за ни-

жчих енергій зіткнень (Gazdzicki, 1999). Ці теоретичні аргументи ініціювали експериментальну пропозицію колаборації NA49: сканування енергій зіткнень на CERN SPS для пошуку початку деконфайнменту. Спостереження передбачених сигналів стало важливим додатковим підтвердженням утворення КГП у зіткненнях Pb+Pb на SPS у CERN.

Це приклади останніх результатів за кожним із напрямів досліджень відділу:

- Сформульовано модель адрон-резонансного газу, яка включає ефекти притягання та відштовхування між баріонами та між антібаріонами. Ця модель правильно описує основний стан та фазовий перехід рідина-газ в ядерній матерії при низьких температурах та великих баріонних густинах. Наявність ефектів взаємодії дає також краще узгодження з результатами КХД на решітці при нульових значеннях хімічних потенціалів та температурах від 140 МеВ до 180 МеВ (Vovchenko, 2017).
- Запропоновано новий гідро-кінетичний підхід для опису еволюції екстремальних станів речовини та формування одно- та багато-частинкових спектрів в релятивистських зіткненнях ядер (Sinyukov, 2023).
- Отримано дуальні представлення для моделей петель Полякова в квантовій хромодинаміці. В рамках цих представлень отримана позитивна вага Больцмана, що вирішує проблему знаку для цих моделей та дає можливість проводити чисельні симуляції методом Монте-Карло (Borisenko, 2020).

Більш детальну інформацію з цих питань можна знайти в (Gazdzicki, 2020), де стисло подано історію, сучасний стан і плани пошуку критичних структур — початку утворення вогняної кулі, початку деконфайнменту та критичної точки деконфайнменту — у високоенергетичних зіткненнях ядер.

3. Діяльність групи ІТФ в рамках колаборації ALICE в ЦЕРНі

Досягнення сучасної фізики елементарних частинок високих енергій є неможливими без об'єднаних зусиль багатьох науковців та інженерів з різних країн, які спільно працюють у великих міжнародних експериментах. З цієї причини науковці ІТФ протягом багатьох років активно беруть участь в експерименті ALICE на LHC у ЦЕРНі, офіційно приєднавшись до колаборації у 2000 році (CERN, 2000). Група бере участь у різних аспектах експерименту — від теорії та феноменології до детекторних технологій та інженерії.

Група ALICE у ІТФ була заснована визначним українським ученим, професором Геннадієм Зінов'євим. Протягом останніх кількох десятиліть група ІТФ була залучена до теоретичних і феноменологічних досліджень кварк-глюонної плазми. Нині основним науковим фокусом групи є вивчення народження дивності у ультрарелятивістських зіткненнях важких іонів.

Участь українських наукових груп у великих міжнародних колаборціях залишається критично важливим фактором підтримання наукової компетентності та технологічного розвитку нашої країни. Одним із ключових напрямів діяльності групи ІТФ є інтеграція студентів і молодих науковців у передові дослідницькі середовища. У останні роки кілька студентів Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна взяли участь у проєктах у складі групи ІТФ у колаборації ALICE, роблячи внесок як у розробку програмного забезпечення, так і в аналіз даних.

Зокрема, участь у стажуваннях у ЦЕРНі, як дистанційних, так і очних, надала студентам доступ до передової експериментальної інфраструктури та можливість інтеграції в міжнародну наукову спільноту. У 2023 році з'явилася нова можливість, коли колаборація ALICE запровадила спеціальну програму дистанційного стажування для українських студентів. Ця ініціатива була особливо важливою в умовах обмеженої мобільності та порушення інфраструктури

війною. У межах цієї програми студент з Харкова успішно виконав проєкт «Розробка програмного забезпечення онлайн/офлайн моніторингу детектора ITS експерименту ALICE». Робота була зосереджена на створенні спеціалізованих програм для моніторингу роботи та якості даних внутрішньої трекової системи (ITS) експерименту ALICE, що збирав дані на LHC. Успішне завершення цього проєкту призвело до подальшої участі студента в дослідницьких роботах, пов'язаних з ITS, що демонструє ефективність підготовки студентів у групі ІТФ та їх залучення до високорівневих експериментальних досліджень. Важливість цієї роботи була визнана керівництвом експерименту, що було відображене у офіційному листі подяки від координатора проєкту ITS.

Спираючись на цей досвід, у 2025 році інший студент взяв участь в очному стажуванні у ЦЕРНі, підтриманому Університетом Мічигану (США). Проєкт під назвою «Аналіз кутового розподілу треків у системі контролю якості внутрішньої трекової системи експерименту ALICE» був спрямований на статистичні та геометричні властивості розподілів треків експериментальних частинок.

Внесок групи ІТФ не обмежується лише освітньою діяльністю. Попри триваючу війну, розв'язану росією проти України, та пов'язані з цим обмеження на поїздки, члени команди ІТФ брали активну участь у зборі даних ALICE в ЦЕРНі, виконуючи необхідну кількість чергувань у Центрі керування експериментом відповідно до річних зобов'язань групи. Крім того, дистанційна діяльність групи ІТФ разом із очною роботою в ЦЕРНі (Рисунок 3) офіційно визнається колаборацією ALICE, як виконання сервісних завдань. Регулярний щотижневий аналіз даних контролю якості ITS, що доповідається в CERN, допомагає забезпечувати найкращу продуктивність збору даних детектора ITS. Це робить групу ІТФ однією з найефективніших українських груп у ЦЕРНі.

Участь групи ІТФ у діяльності ALICE ITS також полягає у багаторічній співпраці з науково-виробничім підприємством «ЛТУ» у Харкові, щодо розробки компонентів детекторів для експерименту

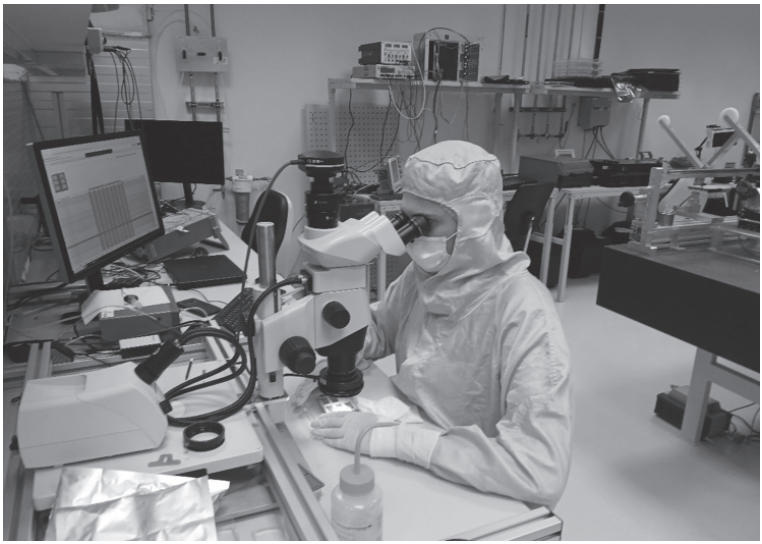


Рис. 3 Член групи ІТФ працює в лабораторії у ЦЕРНі (серпень 2024).

ALICE. Зокрема, харківські дослідники зробили внесок у створення елементів детектора ITS1, який успішно працював під час зборів даних LHC у 2010–2013 та 2015–2018 роках. Ці досягнення були визнані на інституційному рівні: компоненти, розроблені в Харкові, нині експонуються в музеї експерименту ALICE у ЦЕРНі. Поточні дослідження та розробки ЛТУ продовжуються. Серед актуальних проєктів — розробка прототипів піксельних шарів, випробування вигнутих кремнієвих сенсорів і вдосконалення методів міжз'єднань. Ці роботи підкреслюють сталу технічну експертизу групи та її значущість для майбутніх модернізацій детекторів високих енергій.

Попри ці досягнення, група зіткнулася зі значними викликами після початку повномасштабного вторгнення росії в Україну у 2022 році. Обмеження на поїздки, нестабільне електропостачання, обмежений доступ до інтернету та тимчасове закриття лабораторних приміщень суттєво порушили стандартні режими роботи. Водночас команда ІТФ продемонструвала значну стійкість, зберігаючи



Рис. 4 Участь науковців з ІТФ у пленарних засіданнях ALICE Week (листопад 2023).

активну участь у засіданнях колаборації, таких як ALICE Week, пленарних сесіях ITS та голосуваннях колаборації. Дистанційна участь, часто в складних умовах, забезпечила збереження інтеграції групи в процеси ухвалення рішень колаборації.

Важливим аспектом діяльності групи була її участь у ширших обговореннях політики ЦЕРНу. У період міжнародних дискусій щодо санкцій група ІТФ сприяла комунікації між українськими науковими установами та ЦЕРНом, зокрема беручи участь у поширенні офіційних заяв Національної академії наук України в межах колаборації ALICE та інших експериментах (Grynyov, 2026).

4. Висновок

Підсумовуючи, досвід групи ІТФ у колаборації ALICE ілюструє критичну важливість міжнародної наукової співпраці, особливо в умовах повномасштабної агресії. Успішна інтеграція студентів у дослідницькі проекти, продовження технологічного розвитку та підтримка активної участі у колаборації демонструють сталу модель

збереження наукового потенціалу. Ці зусилля не лише сприяють розвитку фізики високих енергій в Україні, але й забезпечують безперервність передачі знань та підготовку майбутніх поколінь вчених.

Посилання

Borisenko, O., Chelnokov, V., & Voloshin, S. (2020). Physical Review D, 102, 014502.

CERN (2000). Memorandum of Understanding for Collaboration in the Construction of the ALICE Detector. Directors of Research CERN, Geneva. Ministry for Education and Science, Kyiv, Ukraine. CERN-ARCH-DIR-RES-02-1-1-24. https://cds.cern.ch/record/835436

Faber, M., Borisenko, O., & Zinovjev, G. (1995). Nucl. Phys. B, 444, 563.

Faber, M., Borisenko, O., & Zinovjev, G. (1998). Nucl. Phys. B, 63, 409.

Gazdzicki, M., & Gorenstein, M. I. (1999). Acta Phys. Pol. B, 30, 2705.

Gazdzicki, M., Gorenstein, M., & Seyboth, P. (2020). Brief history of the search for critical structure in heavy-ion collisions. Acta Phys. Pol. B, 51, 1034.

Gorenstein, M. I., Petrov, V. R., & Zinovjev, G. M. (1981). Physics Letters B, 106, 327.

Grynyov, B., Hryn'ova, T. (2026), *UKRAINE-CERN: the way to cooperation*, У цих матеріалах.

Heinz, U., Jacob, M. (2000). Evidence for a new state of matter: An assessment of the results from the CERN lead beam programme. arXiv:nucl-th/0002042.

Iwanenko D., The Neutron Hypothesis. Nature. 129. 798 (1932). https://doi.org/10.1038/129798d0

Makhlin, A. N., & Sinyukov, Yu. M. (1988). Z. Phys. C, 39, 69.

Sinyukov, Y. M., Lednicky, R., Pluta, J., Erazmus, B., & Akkelin, S. V. (1998). Physics Letters B, 432, 248.

Sinyukov, Y. M., Shapoval, V. M., & Adzhymambetov, M. D. (2023). Universe, 9, 433.

Vovchenko, V., Gorenstein, M. I., & Stoecker, H. (2017). Physical Review Letters, 118, 18.

Національна академія наук України
Інститут сцинтиляційних матеріалів

Стан та перспективи розвитку функціональних матеріалів для науки і техніки ®

УКРАЇНСЬКИЙ ВНЕСОК У ФІЗИКУ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК: ІСТОРІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

За редакцією:
В'ячеслав Греков,
Тетяна Гриньова,
Сергій Перепелиця,
Ірина Споденець,
Максим Стріха

Відповідальний секретар Є.В. Щербіна
Компьютерна верстка С.В.Бараннік

Здано в набір 10.09.2026. Формат 60×84 1/16. Бумага типограф. Гарнітура Century Schoolbook. Друк високий з ФПФ. Тираж 60 екз.

Харків
2026