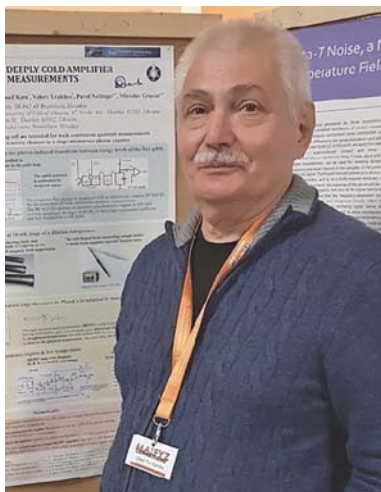




ТУРУТАНОВ

Олег Георгійович —

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу надпровідних та мезоскопічних структур Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, старший дослідник в Університеті Коменського (Братислава, Словаччина)

НОБЕЛІВСЬКА ПРЕМІЯ І ВНЕСОК УКРАЇНСЬКИХ УЧЕНИХ У РОЗУМІННЯ КВАНТОВИХ ЯВИЩ, ЗОКРЕМА ПОВЕДІНКИ МАКРОСКОПІЧНИХ КВАНТОВИХ СИСТЕМ

Нобелівська премія з фізики 2025 року

Нобелівську премію з фізики у 2025 р. присуджено трьом дослідникам: британцю Джону Кларку (John Clarke), американцю Джону Мартінісі (John Martinis) та французу Мішелю Деворе (Michel Devoret) за «відкриття макроскопічного квантового тунелювання та квантування енергії в електричному колі». Як зазначено у пресрелізі Нобелівського комітету, «цьогорічні лауреати провели експерименти з електричним колом, у яких продемонстрували квантово-механічне тунелювання і квантовані енергетичні рівні в системі, достатньо великій, щоб її можна було тримати в руці». Їхні досягнення «відкривають можливості для розроблення наступного покоління квантових технологій, зокрема квантової криптографії, квантових комп'ютерів та квантових сенсорів». У статті в історичному контексті показано роль більш ранніх робіт різних учених, зокрема й співробітників Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, які отримали піонерські результати в цій галузі.

Ключові слова: Нобелівська премія з фізики 2025 року, Джон Кларк, Джон Мартінісі, Мішель Деворе, макроскопічне квантове тунелювання, квантові технології.

Коли великі поводяться як малі,
якщо їм не заважати.

Як завжди, щоосені, після присудження чергової Нобелівської премії з фізики все фізичне співтовариство жваво обговорює суть досліджень, що привели їх авторів до цієї престижної нагороди, а професійні вчені й популяризатори науки намагаються донести до широкої публіки значення отриманих результатів і пояснити, як вони можуть вплинути на подальший розвиток науки. У 2025 р. Шведська королівська академія наук присудила премію двом фізиком-експериментаторам: британцю Джо-

ну Кларку (John Clarke), який більшу частину життя працював у США, і американцю Джону Мартінісу (John Martinis), а також французькому фізику-теоретику Мішелю Деворе (Michel Devoret) «за відкриття макроскопічного квантового тунелювання та квантування енергії в електричному колі»¹. Їхні ключові роботи було проведено в середині 1980-х років у Каліфорнійському університеті в Берклі, який дав світові 75 нобелівських лауреатів. Тоді всі троє дослідників працювали разом у групі Джона Кларка, в якій Джон Мартініс був його аспірантом, а Мішель Деворе приїхав на позицію постдока після захисту дисертації у французькому Центрі ядерних досліджень у Сакле.

Дослідження цьогорічних нобелівських лауреатів ґрунтуються на більш ранніх теоретичних роботах Ентоні Леггетта (Anthony Leggett), який отримав Нобелівську премію з фізики у 2003 р. за «піонерський внесок у теорію надпровідників та надплинних рідин», але більшість подальших його робіт присвячено саме квантовій фізиці макроскопічних систем та конденсованих середовищ. З ім'ям Ентоні Леггетта пов'язане теоретичне передбачення можливості макроскопічного квантового тунелювання [1], хоча за 10 років до нього ймовірність такого процесу в джозефсонівському контакті зі струмом розрахували українські фізики-теоретики з Донецького фізико-технічного інституту Юлій Михайлович Іванченко і Лев Абрамович Зільберман [2]. Їхня робота була відома вищезгаданим нобелівським лауреатам, її навіть процитовано в офіційному науковому обґрунтуванні Нобелівського комітету².

Захопливі подробиці наукових біографій нобелівських лауреатів, опис подекуди драматичної боротьби думок, а також розповіді про безліч супутніх наукових подій за участю як широковідомих, так і менш znаних учених можна знайти у спогадах та інтерв'ю нобеліантів³,

опублікованих у наукових журналах та різних популярних виданнях.

У контексті цього циклу робіт доцільно згадати хронологію відкриттів у галузі надпровідності, що тісно пов'язана з квантовою механікою, а також привернути увагу до помітної ролі, яку відіграв у них Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України (ФТІНТ). І хоча багатьом фізикам повторення відомих фактів щодо розвитку надпровідності може видаватися зайвим, ця стаття розрахована на більш широкий науковий загал, тому для повноти картини варто спочатку зробити невеликий екскурс у передісторію робіт цьогорічних нобелівських лауреатів, а вже потім розглянути їхній зміст і значення.

Усі обговорювані тут експерименти зроблено на надпровідних пристроях. А як відомо, надпровідність — явище суто квантове і колективне, яке без квантової механіки зрозуміти не можна. Основна ідея, що уможливила мікроскопічний опис надпровідності, — це утворення парних станів електронів завдяки слабкому ефективному притягання між ними в надпровіднику під час обміну фононами, що на початку 1950-х років теоретично показали Герберт Фреліх (H. Fröhlich) [3] і Леон Купер (Leon N. Cooper) [4]. Це двоелектронне утворення є бозоном з цілим спіном, на відміну від фермі-частинок (електронів), що його складають. Такі бозони мають тенденцію до об'єднання в єдине ціле — надпровідний бозе-конденсат, усі частинки якого перебувають на одному енергетичному рівні і який описується єдиною хвильовою функцією. На основі цієї концепції в 1957 р. Джон Бардін (John Bardeen), Леон Купер (Leon N. Cooper) і Джон Роберт Шріффер (John Robert Schrieffer) сформулювали теорію [5], так звану теорію БКШ, яка розглядає вже багато-частинкову взаємодію, за що їх у 1972 р. було удостоєно Нобелівської премії з фізики.

Наступна важлива віха на цьому шляху — це теоретичне передбачення в 1962 р. молодим британським дослідником, випускником Кембриджа Браяном Джозефсоном (Brian Josephson) двох своїх знаменитих ефектів [6] (Нобелівська премія з фізики 1973 р.).

¹ The Nobel Prize in Physics 2025. Press release. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/press-release/>

² Scientific background to the Nobel Prize in Physics 2025. <https://surl.lu/onoqnc>

³ Наприклад, див. First reactions. Telephone interview with John Clarke, October 2025. <https://surl.lt/hmxzzf>

Стаціонарний ефект Джозефсона, який полягає в протіканні *надпровідного* струму через тонкий тунельний діелектричний проміжок, несподівано виявив велику щільність надструму, сумірну зі щільністю одностинкового струму для такого самого бар'єра, що свідчило про корельоване тунелювання куперівських пар як єдиної частинки. Мовою теоретичної фізики це означає, що ймовірність тунелювання корельованої пари електронів пропорційна матричному елементу тунельного гамільтоніана, а не його квадрату, як було б у випадку некорельованих електронів. Експериментально цей ефект наступного року підтвердили Філіп Андерсон (Philip W. Anderson) і Джон Ровелл (John M. Rowell) на тунельному контакті олово-свинець [7] (хоча й інші дослідники, зокрема норвежець Айвар Джаєвер, або, як ще вимовляють його ім'я і прізвище, Івар Євер (Ivar Giaever), і Ганс Майсснер (Hans Meissner), спостерігали це явище раніше на контактах надпровідник-оксид-надпровідник і надпровідник-нормальний метал-надпровідник відповідно). Завдяки цьому ефекту фаза хвильової функції надпровідного конденсату перетворилася з теоретичного концепту на фізично вимірювану величину (хоча й усе ще класичну), оскільки, згідно з розрахунком Джозефсона, надпровідний струм I_s через тунельний контакт пропорційний синусу різниці фаз φ у двох його надпровідних масивних «берегах»: $I_s = I_c \sin \varphi$. У контексті подальшого обговорення ефекту макроскопічного квантового тунелювання зауважимо, що тут теоретично розглядається ймовірність тунелювання окремих куперівських пар, які все ще є мікроскопічними об'єктами.

Другий, нестаціонарний, ефект Джозефсона меншою мірою стосується предмета нашого обговорення, хоча він, мабуть, є важливішим для практичних застосувань. До того ж саме з цього ефекту почалося багаторічне залучення тоді ще дуже молодого ФТІНТу до великої світової науки про надпровідність.

Власне, нестаціонарний ефект полягає у виникненні змінного струму через тунельний контакт двох надпровідників, якщо прикласти до нього постійну напругу (це нормально

звучить для теоретиків, але експериментатори скривляться, оскільки постійну напругу задати на надпровідному контакті в експерименті не можна — вона виникне зі збільшенням постійного струму через нього, вищого за критичний струм I_c). Частота коливань f струму строго пропорційна постійній напрузі V , а коефіцієнт пропорційності дорівнює відношенню фундаментальних констант — подвоєного заряду електрона $2e$ та сталої Планка h , що становить близько 483,6 МГц/мкВ:

$$f = \frac{2e}{h} V.$$

Очевидно, що змінний струм у диполі, яким є джозефсонівський контакт, приведе до електромагнітного випромінювання від цієї антени, але потужність такого надвисокочастотного (НВЧ) випромінювання у простір, навіть за умови узгодження імпедансів контакту та лінії передачі, буде дуже малою і вимірюватиметься піко- чи навіть фемтоватами.

Непряме експериментальне підтвердження другого ефекту Джозефсона не забарилося і з'явилося у вигляді так званих індукованих сходинок Шاپіро на вольт-амперних характеристиках контакту, що виникають у разі його опромінення зовнішнім НВЧ-полем унаслідок змішування з внутрішніми джозефсонівськими коливаннями [8]. Проте інтерес все ж таки становило безпосереднє детектування такого випромінювання. Зважаючи на його малу потужність ($\sim 10^{-12}$ Вт), експеримент з «упіймання» джозефсонівського випромінювання був складним. У цих перегонах за пріоритет уперед вирвалася команда вчених із ФТІНТу у складі Ігоря Кіндратовича Янсона, Ігоря Михайловича Дмитренка та Володимира Михайловича Свистунова. У 1965 р. вони опублікували свою роботу [9] буквально на два місяці раніше, ніж вийшла друком стаття американської групи [10]. Причому харків'янам це вдалося навіть попри те, що в конкурентів була набагато краща й чутливіша апаратура. Надалі І.К. Янсон очолив відділ тунельної мікроскопії і у співпраці з теоретиками розвинув метод мікроконтактної спектроскопії

[11]. Саме тому пізніше відділ отримав відповідну цьому методу назву і наразі продовжує працювати за цією тематикою.

Слід зазначити, що завдяки організаторському таланту фундатора і першого директора ФТІНТу Бориса Ієреміївича Веркіна під час створення інституту в 1960 р. до його колективу увійшло багато молодих талановитих науковців, які потім зробили гідний внесок у світову науку. У цьому стислому огляді історії фізики слабкої надпровідності (майбутньої надпровідної електроніки) ми лише побіжно згадаємо окремі успіхи вчених ФТІНТу, але весь перелік досягнень, звісно, набагато більший.

Один із прикладів — загальновизнана теорія ефекту Джозефсона в мікромісточках, які самі по собі вже є мезоскопічними системами, тобто проміжною ланкою між мікро- і макросвітом. Цю теорію, відому у світі як КО-1 і КО-2, для двох випадків руху електронів — балістичного («чисті» містки) і дифузійного («брудні» містки), розвинули Ігор Орестович Кулик та Олександр Миколайович Омелянчук [12, 13]. Загальне визнання здобула також експериментально-теоретична монографія І.О. Кулика і І.К. Янсона «Ефект Джозефсона в надпровідних тунельних структурах» [14].

Наступним важливим кроком у розвитку так званої слабкої надпровідності, що пов'язує її з Нобелівською премією 2025 р., були два винаходи. У 1964 р. група дослідників з Ford Research Labs розробила надпровідний квантовий інтерферометр постійного струму з двома контактами Джозефсона (ПС НКВІД, або dc SQUID) [15], а потім, у 1967 р., — одноконтактний височастотний інтерферометр (ВЧ НКВІД, або rf SQUID) [16]. Ці прилади на довгі роки стали «золотим стандартом» у фізиці і техніці надпровідності й уможливили проведення найчутливіших вимірювань слабких магнітних полів у лабораторних експериментах та в практичних застосуваннях для потреб медицини, геофізики тощо, а тепер лягли в основу створення надпровідних кубітів, які безпосередньо стосуються обговорюваної теми. І вже в 1967 р. у ФТІНТі було створено перший

в СРСР ПС НКВІД (С.І. Бондаренко, І.М. Дмитренко).

Щодо ВЧ НКВІДу, який являє собою невеликий, розміром у кілька десятків мікронів, надпровідний контур (кільце), що замикає контакт Джозефсона, то він безпосередньо пов'язує прямою пропорційністю різницю фаз φ надпровідного параметра порядку (хвильової функції надпровідного конденсату) на кінцях джозефсонівського контакту з магнітним потоком Φ , що пронизує кільце: $\varphi = \Phi / \Phi_0$, де Φ_0 — так званий квант магнітного потоку. Цей потік (а тому й фазу) можна легко виміряти класичними методами.

Як ми вже згадували, свого часу Е. Леггетт припустив можливість тунелювання квантових станів як єдиного цілого в макроскопічних системах [1], розглядаючи НКВІД як таку систему. З точки зору радіофізики, будь-який електропровідний об'єкт можна розглядати як антену у вигляді електричного або магнітного диполя, який може ефективно випромінювати або поглинати електромагнітне випромінювання, якщо його розмір є близьким до половини довжини хвилі. Зі зменшенням антени її ефективність дуже швидко спадає, тому мікрочастинки майже не взаємодіють з фотонами. Натомість макроскопічні системи принципово відрізняються від мікроскопічних об'єктів тим, що вони, завдяки своєму відносно великому розміру, сильно пов'язані з електромагнітним шумовим оточенням, переважно теплового походження. Взаємодія з цим шумовим резервуаром призводить до дисипації енергії системи, яка руйнує когерентність можливих макроскопічних квантових станів. Це зумовило введення нових понять до квантової механіки, яка спочатку не передбачала дисипації, а оперувала лише оборотними процесами. Вивчаючи процес тунелювання макроскопічних станів, Е. Леггетт заклав основи опису дисипативних квантових процесів у макроскопічних системах [17, 18].

Імовірність тунелювання в цьому разі залежить від величини дисипації енергії, що виражається певним узагальненим коефіцієнтом тертя. Е. Леггетт зі співавторами при-

ділив особливу увагу НКВІДу із захопленням у його контурі магнітним потоком як макроскопічний квантовий змінний, побачивши в ньому найбільш перспективну систему для експериментальної перевірки теорії. Згасання в макроскопічній квантовій системі спричиняє розпад когерентних станів, що зумовлює одну з найскладніших проблем, з якою стикаються експериментатори, — проблему ізоляції квантової системи від електромагнітного оточення. Проте можна виміряти середню частоту розпадів, залежну від температури. Ця частота перестає змінюватися зі зниженням температури, коли розпади, спричинені термічними флуктуаціями, «вимерзають» і стають помітними квантові розпади, спричинені макроскопічним квантовим тунелюванням (МКТ).

Кілька різних дослідницьких груп у своїх експериментах пішли саме цим шляхом, намагаючись зафіксувати процес МКТ у НКВІДах. Серед них були й співробітники ФТІНТу Георгій Миронович Цой і Володимир Іванович Шнирков, які під керівництвом Ігоря Михайловича Дмитренка вже в 1981 р. спостерігали МКТ у надпровідному кільці ВЧ НКВІДу [19], ґрунтуючись на згаданих вище роботах Е. Леггетта [1, 17, 18], а також на дослідженні Ю.М. Іванченка і Л.А. Зільбермана [2]. Дещо пізніше до них приєднався талановитий фізик Віктор Олексійович Хлус, надавши цим експериментам теоретичну підтримку. Їхню спільну роботу [20], опубліковану у вітчизняному журналі «Фізика низьких температур», цитують цьогорічні нобелівські лауреати у своїй «ключовій» статті [21], яку ми розберемо нижче і порівнюємо різні експериментальні підходи.

У роботах [19, 20] було показано, що за досить низьких температур (0,5 K) частота спонтанної зміни магнітного стану кільця не залежить від температури, що може свідчити про тунелювання магнітного потоку (або фази на джозефсонівському контакті), яке відображає тотожну поведінку великої кількості корельованих частинок як єдиного цілого з макроскопічно великою сумарною масою.

Слід зазначити, що згадана вище проблема ізоляції від зовнішнього оточення потребувала

від дослідників не лише дуже ретельного конструювання фільтрів, екранів, ліній передачі та електроніки, а й проведення експериментів вночі, коли не працювали телецентр і громадський електротранспорт, що створювали зайві перешкоди. Лише в цей нічний період можна було впродовж кількох годин накопичувати статистичні дані вимірювань.

Дослідників, які спостерігали явище МКТ, загалом було чимало (найбільш відомі роботи [22—25]). Найчастіше вони використовували дві надпровідні макроскопічні системи: кільце НКВІДу, в якому тунелював магнітний потік у кільці, та відокремлений джозефсонівський контакт. Обидва підходи мали свої плюси і мінуси. Так, одноконтактний ВЧ НКВІД у гістерезисному режимі має два або більше локальних мінімумів потенціальної енергії (ям) залежно від внутрішнього магнітного потоку. За допомогою зовнішнього потоку можна змінювати форму потенціалу, керуючи тим самим висотою потенціального бар'єра між сусідніми ямами. Можна підібрати таку невелику висоту (точніше, площу) бар'єра, за якої реалізується досить велика частота розпадів квантових станів кільця (тобто змінення магнітного потоку) завдяки тунелюванню потоку між ямами, а не внаслідок теплових флуктуацій. Безсумнівна перевага одноконтактного ВЧ НКВІД перед одиничним контактом — це бездисипативність цих переходів, оскільки в разі тунелювання фази джозефсонівський контакт у кільці не переходить у резистивний стан, а отже, не виділяє тепло, зберігаючи потрібну для експерименту низьку температуру. Саме так проводили ці роботи й у ФТІНТі.

Цьогорічні нобелівські лауреати знали про ці попередні експерименти, але обрали варіант із джозефсонівським контактом, який має згаданий вище недолік. Однак, як побачимо далі, це був свідомий вибір, який дозволив остаточно вирішити проблему МКТ. Згадаємо, що, згідно з роботою Джозефсона, потенціал тунельного контакту періодично залежить від різниці фаз хвильової функції конденсату на ньому. Якщо пропустити струм, потенціал нахилиється і набуває вигляду «пральної дошки»

з локальними мінімумами, висоту бар'єра між якими можна регулювати за допомогою сили струму. Кожний перехід з однієї ями до іншої супроводжується коротким імпульсом напруги, а отже, дисипацією енергії в тепло.

У своєму головному експерименті [21] Джон Кларк і Джон Мартініс охолоджували джозефсонівський контакт з критичним струмом близько $10\text{ }\mu\text{A}$ до температури $\sim 20\text{ mK}$ і пропускали крізь нього короткі мілісекундні імпульси струму, трохи меншого за критичний, вимірюючи частоту імпульсів напруги, що виникали впродовж цього імпульсу. Ця частота, яка відповідала частоті між'ямних переходів, перебувала в межах 10^{-2} — 10^{-6} c^{-1} . Стабільність амплітуди імпульсу мала бути дуже високою, оскільки висота бар'єра експоненційно залежить від різниці між амплітудою імпульсу та критичним струмом. За такої низької температури теплова константа охолодження всієї конструкції зі зразком була такою великою (або «довгою», оскільки вона має розмірність часу), що термалізація (охолодження) відбувалася не швидко — навіть короткі імпульси доводилося подавати з малою частотою повтору 4—20 імпульсів за секунду. Протягом дії кожного з цих імпульсів струму вимірювали частоту імпульсів напруги, які відповідали спонтанним переходам до сусідньої потенціальної ями. Для надійної статистики слід було накопичити 10^5 — 10^6 імпульсів напруги.

Щоб створити необхідні умови, обмежені теретичними розрахунками, спочатку потрібно було виготовити тунельний контакт з чітко заданими параметрами: критичним струмом, ємністю та нормальним опором. Далі необхідно було вирішити згадану вище проблему ізоляції від зовнішніх перешкод, для чого крім подвійного пермалоевого магнітного екрана дослідникам довелося змонтувати серію звичайних RC-фільтрів-атенюаторів та розробити новий тип широкосмугових фільтрів для захисту від теплового фону — порошкові коаксіальні фільтри. Без перебільшення експериментальна установка вийшла справжнім витвором мистецтва. Можна сказати, що в підготовці та успішному проведенні робіт була немала за-



Фото: University of California, Berkeley

Джон Кларк (John Clarke) —

британський фізик-експериментатор, почесний професор Каліфорнійського університету в Берклі (США).

Народився 10 лютого 1942 р. в Кембриджі (Велика Британія). Навчався на факультеті природничих наук у Коледжі Христа в Кембриджі, де в 1964 р. здобув ступінь бакалавра з фізики, потім працював у Королівській науковій лабораторії Монда при Кембриджському університеті. Ступінь PhD здобув у 1968 р. у Дарвін-коледжі, де його науковим керівником був відомий фізик Браян Піппард (Brian Pippard). Згодом Дж. Кларк неодноразово зазначав, що найбільший вплив на його формування як вченого справили інші, старший за нього, учень Б. Піппарда нобелівський лауреат (1973) Браян Джозефсон (Brian Josephson), який у 1962 р. передбачив ефект Джозефсона. Потім Дж. Кларк як постдок переїхав до Каліфорнійського університету в Берклі, де відтоді й працював протягом усієї своєї академічної кар'єри на посадах асистента (1969), доцента (1971), професора фізики (1973—2010).

Наукові інтереси Дж. Кларка стосуються надпровідності та надпровідної електроніки, зокрема розроблення надпровідних квантових інтерференційних пристроїв (НКВІДів), які є надчутливими детекторами магнітного потоку. Займався застосуваннями НКВІДів, налаштованих як підсилювачі з обмеженим квантовим шумом, для зчитування надпровідних кубітів, нових схем для наднизькочастотного ЯМР та магнітно-резонансної томографії, а також для пошуку аксіона як можливого компонента темної матерії.

Джон Кларк — член Американського фізичного товариства (1985), Лондонського королівського товариства (1986), Національної академії наук США (2012), Американської академії наук та мистецтв (2015), Американського філософського товариства (2017). Його нагороджено премією Джозефа Ф. Кітлі за досягнення у вимірювальній науці (1998), премією Комстока НАН США (1999), медаллю Х'юза (2004), меморіальною премією Оллі В. Лоунасама (2004), квантовою премією Міцїуса (2021).

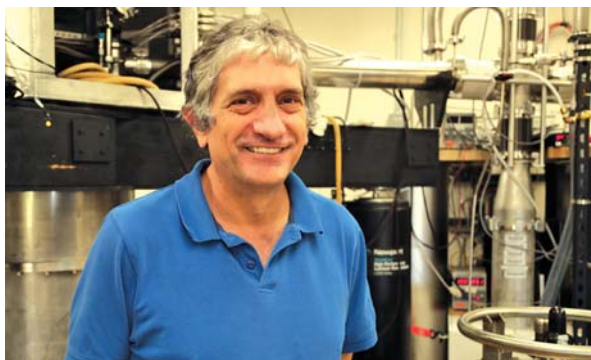


Фото: WIRED

Джон Метью Мартініс (John Matthew Martinis) — американський фізик-експериментатор, професор Каліфорнійського університету в Санта-Барбарі (США).

Народився 1958 р. у м. Сан-Педро в Каліфорнії. Його батько, етнічний хорват, іммігрував до США, рятуючись від комуністичного режиму Югославії.

Дж. Мартініс закінчив Каліфорнійський університет в Берклі, де здобув ступінь бакалавра з фізики в 1980 р. і ступінь PhD в 1987 р. Його науковим керівником був Джон Кларк. Потім проходив стажування у Франції в Комісаріаті з атомної енергії в Сакле, згодом працював у відділі електромагнітних технологій Національного інституту стандартів і технологій США, де займався розробленням НКВІДів. З 2002 р. почав працювати з кубітами на контакті Джозефсона з метою створення першого квантового комп'ютера. Розроблений ним квантовий пристрій у 2010 р. журнал «Science» відзначив як прорив року. У 2004 р. перейшов до Каліфорнійського університету в Санта-Барбарі, де до 2017 р. очолював кафедру Ворстера з експериментальної фізики.

У 2014 р. лабораторія квантового штучного інтелекту компанії Google (Google Quantum AI) уклала з командою Дж. Мартініса угоду про створення квантового комп'ютера з використанням надпровідних кубітів. У жовтні 2019 р. в журналі «Nature» вийшла стаття, в якій група Мартініса розповіла, як їм вдалося вперше досягти квантової переваги за допомогою квантового комп'ютера з 53 кубітами. У квітні 2020 р. Дж. Мартініс звільнився з Google після того, як його перевели на посаду консультанта. Потім переїхав до Австралії, приєднавшись до стартапу з квантових обчислень Silicon Quantum Computing. У 2022 р. заснував компанію Qolab, яка має на меті поліпити когерентність у надпровідних кубітах для забезпечення надійнішої роботи та відмовостійкості квантових обчислень.

Джон Мартініс — лауреат меморіальної премії Фріца Лондона (2014) і премії Джона Стюарта Белла за дослідження фундаментальних питань квантової механіки та їх застосувань (2021).

слуга Джона Мартініса з його майстерністю як фізика-експериментатора.

Тут варто пояснити, чому ця робота стала історичним *experimentum crucis* у питанні МКТ. Річ у тім, що в інших експериментах вихід частоти між'ямних переходів «на полицку» зі зниженням температури вважали доказом досягнення квантового режиму. Проте незалежність частоти переходів від температури можна пояснити не лише цим, а й фоновим шумом, який не вдалося остаточно подолати. Тому, незважаючи на якісний збіг з теорією, цей результат не був однозначним, хоча й міг свідчити про МКТ. Джон Кларк і Джон Мартініс спромоглися виміряти з достатньою точністю незалежними класичними методами необхідні для теорії параметри системи: критичний струм джозефсонівського контакту, його електричну ємність і, головне, величину втрат, тобто дисипацію в системі. Вибір на користь одиничного джозефсонівського контакту полегшував ці прямі вимірювання, а тому давав перевагу над іншими підходами. Після цього вже не потрібно було підганяти якісь коефіцієнти, оскільки порівняння з теорією було зроблено кількісно, і результати щодо частоти переходів чисельно збігалися з теоретичними розрахунками.

Отже, експеримент продемонстрував, що макроскопічний ступінь свободи (різниця фаз на джозефсонівському контакті, пов'язана з усім багаточастинковим надпровідним конденсатом) підпорядковується законам квантової механіки. Подальші експерименти з поглинанням НВЧ-випромінювання (мікрохвильова спектроскопія) довели наявність дискретних квантованих рівнів енергії в цій макроскопічній системі [26]. Загалом це й дало підстави Нобелівському комітету присудити цьогогорічну премію Джону Кларку, Джону Мартінісу та Мішелю Деворе за відкриття макроскопічного квантового тунелювання та квантування енергії в електричному колі.

Наступний етап на шляху подолання труднощів практичного приборкання ефектів квантової фізики був пов'язаний з більш тонким, але надзвичайно важливим явищем — суперпозицією квантових станів, яка є ще дивовижнішою

квантовою властивістю у випадку макроскопічних систем. Вона означає одночасне перебування системи у двох і більше станах та відкриває можливості для конструювання принципово нового елемента зберігання інформації — кубіта, а також для подальших операцій з цією квантовою інформацією. Однак для того щоб ці можливості могли реалізуватися, потрібно зменшити дисипацію в макроскопічній квантовій системі на два-три порядки величини, що багато хто вважав неможливим, на відміну від МКТ. Дослідникам з ФТІНТу вдалося спостерігати це явище раніше за інших [27, 28], але, як це часто буває в науці, світовий пріоритет закріпився за іншими вченими.

Хотів би навести уривок зі спогадів В.І. Шниркова (з його люб'язного дозволу) про Г.М. Цоя для книги, написаної його дружиною. «На мій погляд, найкращі результати досліджень Георгія Мироновича Цоя в галузі НКВІДів отримано ним у 1981—1983 рр., коли він вивчав макроскопічне квантове тунелювання (МКТ), спостерігав макроскопічне резонансне тунелювання (МРТ) та макроскопічну квантову інтерференцію (МКІ) (1983—1984), а також відкрив та вивчив (1985—1991) явище когерентної суперпозиції квантових станів макроскопічних квантових осциляторів (або явище макроскопічної квантової когерентності, МКК). У 2000-х роках такі макроскопічні квантові когерентні стани було названо надпровідними кубітами (квантовими бітами). На жаль, протягом кількох років після публікації наших результатів про відкриття МКК вони піддавалися критиці з боку деяких теоретиків з Москви та Харкова, які на той час не розуміли всіх складних властивостей когерентних квантових систем. Таким чином, наші результати, що свідчать про відкриття кубітів, було опубліковано тільки в працях конференцій... Досить повну теорію фізичних процесів, що лежать в основі поточкових кубітів, експериментально виявлених нами у 1985—1991 рр., було створено лише через 15—20 років».

Отже, концепції надпровідних кубітів — фазового, зарядового [29] і поточкового [30], згідно з офіційним поглядом, виникли в 1999 р. і



Фото: Yale University

Мішель Деворе (Michel Devoret) —

французький фізик, професор Каліфорнійського університету в Санта-Барбарі, почесний професор прикладної фізики Єльського університету, головний науковий співробітник компанії Google Quantum AI.

Народився у Франції, в Парижі, в 1953 р. Закінчив Вищу національну школу телекомунікацій (ENST) в Парижі зі ступенем інженера з телекомунікацій. Ступінь магістра з квантової оптики здобув в Університеті Орсе, у 1976 р. захистив дисертацію в Лабораторії молекулярної фотофізики в CNRS, а в 1982 р. здобув ступінь доктора з фізики конденсованих станів у Центрі досліджень атомної енергії в Сакле. У 1982—1984 рр. працював як постдок у групі Джона Кларка в Каліфорнійському університеті в Берклі. Потім повернувся до Франції, заснував групу Quantronics у лабораторії Orme des Merisiers при Комісаріаті з атомної енергії в Сакле, де займався вимірюванням часу проходження тунелювання, винайшов електронний насос, розробив новий тип кубіта (квантроній). У 2002 р. став професором Єльського університету, де разом з іншими співробітниками розробив ще один тип надпровідного зарядового кубіта — трансмон. У 2009 р. брав участь у створенні особливого типу поточкового кубіта — флюксонію. З 2007 по 2013 р. працював у Колеж де Франс. У 2023 р. його було призначено головним науковцем з апаратного забезпечення в Google Quantum AI. У 2024 р. перейшов до Каліфорнійського університету в Санта-Барбарі на посаду професора фізики.

Мішель Деворе — член Американської академії наук і мистецтв (2003), Французької академії наук (2007), Національної академії наук США (2023). У 2008 р. його було посвячено в лицарі ордена Почесного легіону. Має багато наукових відзнак, зокрема його нагороджено премією Ампера Французької академії наук (1991), премією Декарта—Гюйгенса Королівської нідерландської академії мистецтв і наук (1995), премією Europhysics-Agilent Європейського фізичного товариства (2004), премією Джона Стюарта Белла (2013), Меморіальною премією Фріца Лондона (2014), Меморіальною премією Оллі В. Лоунасмаа (2016), квантовою премією Міцціуса (2021), премією Комстока з фізики НАН США (2024).

заклали підґрунтя для подальшого бурхливого розвитку квантової інженерії з потенційними і вже працюючими застосуваннями у вигляді квантових комп'ютерів, починаючи з продукції фірми D-wave, яка успішно виробляє спрощений варіант квантового комп'ютера, що використовує метод квантового відпалу, і до цілої низки квантових процесорів від Google, IBM та інших компаній, квантового захищеного зв'язку (який також успішно розробляють у багатьох країнах) і швидше гіпотетичних квантових радарів. Стало можливим говорити про квантову електродинаміку ланцюгів (cQED) та алгоритми квантових обчислень. У 2014 р. компанія Google Quantum AI Lab запросила до себе Джона Мартініса зі його командою, запропонувавши їм багатомільйонний контракт на створення надпровідного квантового комп'ютера. У 2019 р. вони продемонстрували процесор Sycamore на 53 кубітах з квантовою перевагою над класичними комп'ютерами, але в 2020 р. Дж. Мартініс змушений був піти з компанії через конфлікт з керівництвом. У 2022 р. він заснував свою приватну компанію Qolab, яка займається квантовим комп'ютингом на базі напівпровідникових чипів.

Слід зазначити, що й сьогодні, в цей важкий воєнний час, вчені ФТІНТу не стоять осторонь головних наукових тенденцій, зокрема й у квантовій фізиці. Так, кубітну тематику успішно розвиває група молодих теоретиків під керівництвом доктора фізико-математичних наук С.М. Шевченка, вже два роки успішно працює Харківський квантовий семінар, запо-

чаткований спільно з ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут», на якому з лекціями виступають відомі світові вчені, зокрема й нобелівські лауреати. Останніми роками експериментальні завдання в цій галузі ускладнилися — те, що вчора було високим досягненням, сьогодні стає майже рутиною. Проведення експериментів тепер потребує більш точного і високовартісного обладнання: необхідні наднизькі мілікельвінові температури, охолоджувачі підсилювачі з квантово обмеженою чутливістю, різне технологічне обладнання, чисті кімнати, специфічні матеріали. В очікуванні змін на краще, зокрема на достатнє фінансування, наші експериментатори шукають можливості застосувати свої знання та реалізувати свої ідеї в спільних міжнародних проєктах.

XXI століття часто називають квантовим, оскільки бурхливий розвиток технологій разом з успіхами теоретичної і експериментальної фізики в цій галузі дали змогу впроваджувати квантові ідеї в реальні конструкції й нові способи оброблення інформації. Тому Нобелівський комітет відзначив не лише видатні досягнення з фундаментальної фізики, а й ту велику роль, яку вони відіграють у змінненні повсякденного життя людства. Приємно усвідомлювати, що вчені ФТІНТу і взагалі українські науковці були серед перших, хто прокладав цей шлях.

Автор висловлює щирі подяку В.І. Шниркову за надані матеріали та плідне обговорення тексту статті.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Leggett A.J. Prospects in ultralow temperature physics. *J. Phys. Colloques*. 1978. **39**(C6): 1264—1269.
<https://doi.org/10.1051/jphyscol:19786555>
2. Ivanchenko Yu.M., Zil'berman L.A. The Josephson effect in small tunnel contacts. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1968. **55**(6): 2395 [*Sov. Phys. JETP*. 1969. **28**(6): 1272].
3. Fröhlich H. Theory of the superconducting state. I. The ground state at the absolute zero of temperature. *Phys. Rev.* 1950. **79**: 845. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.79.845>
4. Cooper L.N. Bound electron pairs in a degenerate Fermi gas. *Phys. Rev.* 1956. **104**: 1189.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.104.1189>
5. Bardeen J., Cooper L.N., Schrieffer J.R. Theory of superconductivity. *Phys. Rev.* 1957. **108**: 1175.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.1175>
6. Josephson B.D. Possible new effects in superconductive tunnelling. *Phys. Lett.* 1962. **1**(7): 25.
[https://doi.org/10.1016/0031-9163\(62\)91369-0](https://doi.org/10.1016/0031-9163(62)91369-0)
7. Anderson P.W., Rowell J.M. Probable observation of the Josephson superconducting tunneling effect. *Phys. Rev. Lett.* 1963. **10**: 230. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.10.230>
8. Shapiro S. Josephson currents in superconducting tunneling: the effect of microwaves and other observations. *Phys. Rev. Lett.* 1963. **11**: 80. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.11.80>
9. Yanson I.K., Svistunov V.M., Dmitrenko I.M. Experimental observation of the tunnel effect for Cooper pairs with the emission of photons. *Sov. Phys. JETP*. 1965. **21**: 650.
10. Langenberg D.N., Scalapino D.J., Taylor B.N., Eck R.E. Investigation of microwave radiation emitted by Josephson junctions. *Phys. Rev. Lett.* 1965. **15**: 294 [Erratum. *Phys. Rev. Lett.* 1965. **15**: 842].
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.15.294>
11. Naidyuk Yu.G., Yanson I.K. *Point-Contact Spectroscopy*. Springer Series in Solid-State Sciences. Vol. 145. New York: Springer, 2005. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6205-1>
12. Kulik I.O., Omel'yanchuk A.N. Properties of superconducting microbridges in the pure limit. *Sov. J. Low Temp. Phys.* 1977. **3**(7): 459. <https://doi.org/10.1063/10.0029534>
[Кулик И.О., Омелячук А.Н. Свойства сверхпроводящих микромостиков в чистом пределе. *Фізика низьких температур*. 1977. Т. 3, № 7. С. 945—948.]
13. Kulik I.O., Omel'yanchuk A.N. Josephson effect in superconductive bridges: microscopic theory. *Sov. J. Low Temp. Phys.* 1978. **4**(3): 142. <https://doi.org/10.1063/10.0029644>
[Кулик И.О., Омелячук А.Н. Эффект Джозефсона в сверхпроводящих мостиках: микроскопическая теория. *Фізика низьких температур*. 1978. Т. 4, № 3. С. 296—311.]
14. Kulik I.O., Yanson I.K. *Josephson Effect in Superconducting Tunneling Structures*. John Wiley & Sons, 1972.
[Кулик И.О., Янсон И.К. *Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах*. Москва: Наука, 1970.]
15. Jaklevic R.C., Lambe J., Silver A.H., Mercereau J.E. Quantum interference effects in Josephson tunneling. *Phys. Rev. Lett.* 1964. **12**: 159. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.12.159>
16. Silver A.H., Zimmerman J.E. Quantum states and transitions in weakly connected superconducting rings. *Phys. Rev.* 1967. **157**: 317. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.157.317>
17. Caldeira A.O., Leggett A.J. Influence of dissipation on quantum tunneling in macroscopic systems. *Phys. Rev. Lett.* 1981. **46**: 211. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.46.211>
18. Caldeira A.O., Leggett A.J. Influence of damping on quantum interference: an exactly soluble model. *Phys. Rev. A*. 1985. **31**: 1059. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.31.1059>
19. Dmitrenko I.M., Tsoi G.M., Shnyrkov V.I. Macroscopic quantum tunneling in a system with dissipation. *Sov. J. Low Temp. Phys.* 1982. **8**(6): 330. <https://doi.org/10.1063/10.0030726>
[Дмитренко И.М., Цой Г.М., Шнырков В.И. Макроскопическое квантовое тунелирование в системе с диссипацией. *Фізика низьких температур*. 1982. Т. 8, № 6. С. 660—663.]
20. Dmitrenko I.M., Khlus V.A., Tsoi G.M., Shnyrkov V.I. Study of quantum decays of metastable current states in rf SQUIDs. *Sov. J. Low Temp. Phys.* 1985. **11**(2): 77. <https://doi.org/10.1063/10.0031246>
[Дмитренко И.М., Хлус В.А., Цой Г.М., Шнырков В.И. Исследование квантовых распадов метастабильных токовых состояний в ВЧ скивдах. *Фізика низьких температур*. 1985. Т. 11, № 2. С. 146—160.]
21. Martinis J.M., Devoret M.H., Clarke J. Experimental tests for the quantum behavior of a macroscopic degree of freedom: the phase difference across a Josephson junction. *Phys. Rev. B*. 1987. **35**: 4682.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.35.4682>

22. Voss R.F., Webb R.A. Macroscopic quantum tunneling in 1- μm Nb Josephson junctions. *Phys. Rev. Lett.* 1981. **47**: 265. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.47.265>
23. Jackel L.D., Gordon J.P., Hu E.L., Howard R.E., Fetter L.A., Tennant D.M., Epworth R.W., Kurkijarvi J. Decay of the zero-voltage state in small-area, high-current-density Josephson junctions. *Phys. Rev. Lett.* 1981. **47**: 697. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.47.697>
24. Prance R.J., Long A.P., Clarke T.D., Widom A., Mutton J.E., Sacco J., Potts M.W., Megaloudis G., Goodall F. Macroscopic quantum electrodynamic effects in a superconducting ring containing a Josephson weak link. *Nature*. 1981. **289**: 543. <https://doi.org/10.1038/289543a0>
25. den Boer W., de Bruyn Ouboter R. Flux transition mechanisms in superconducting loops closed with a low capacitance point contact. *Physica B+C*. 1980. **98**(3): 185. [https://doi.org/10.1016/0378-4363\(80\)90075-3](https://doi.org/10.1016/0378-4363(80)90075-3)
26. Martinis J.M., Devoret M.H., Clarke J. Energy-level quantization in the zero-voltage state of a current-biased Josephson junction. *Phys. Rev. Lett.* 1985. **55**: 1543. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.1543>
27. Dmitrenko I.M., Tsoi G.M., Shnyrkov V.I. Quantum decay of metastable current states of a superconducting interferometer. In: *Quantum metrology and fundamental physical constants*: Proc. 2nd All-USSR meeting, NPO VNIIM, Leningrad, 1985. P. 81. http://www.ilt.kharkov.ua/bvi/structure/d16/pdf/1985/Quantum_decay-Leningrad-1985.pdf
28. Shnyrkov V.I., Tsoi G.M., Konotop D.A., Dmitrenko I.M. Anomalous behaviour of RF-SQUIDS with S-c-S contacts of small area. In: *Single-Electron Tunneling and Mesoscopic Devices*. Proc. of the 4th Int. Conf. SQUID'91 (Sessions on SET and Mesoscopic Devices), Fed. Rep. of Germany, Berlin (June 18—21, 1991). P. 211—217. https://doi.org/10.1007/978-3-642-77274-0_24
29. Nakamura Y., Pashkin Yu.A., Tsai J.S. Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box. *Nature*. 1999. **398**: 786. <https://doi.org/10.1038/19718>
30. Orlando T.P., Mooij J.E., Tian L., van der Wal C.H., Levitov L.S., Lloyd S., Mazo J.J. Superconducting persistent-current qubit. *Phys. Rev. B*. 1999. **60**: 15398. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.60.15398>

Oleh G. Turutanov

*B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
Comenius University, Bratislava, Slovakia*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8673-136X>

NOBEL PRIZE AND THE CONTRIBUTION OF UKRAINIAN SCIENTISTS TO THE UNDERSTANDING OF QUANTUM PHENOMENA, IN PARTICULAR THE BEHAVIOR OF MACROSCOPIC QUANTUM SYSTEMS

Nobel Prize in Physics 2025

The Nobel Prize in Physics 2025 has been awarded to three researchers: British John Clarke, American John Martinis, and French Michel Devoret for “the discovery of macroscopic quantum mechanical tunnelling and energy quantisation in an electric circuit”. As noted in a press release from the Nobel Committee, “this year’s Nobel Prize laureates conducted experiments with an electrical circuit in which they demonstrated both quantum mechanical tunnelling and quantised energy levels in a system big enough to be held in the hand.” Their achievements “have provided opportunities for developing the next generation of quantum technology, including quantum cryptography, quantum computers, and quantum sensors”. The article shows in a historical context the role of earlier research by various scientists, including employees of the B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the NAS of Ukraine, who obtained pioneering results in this field.

Keywords: Nobel Prize in Physics 2025, John Clarke, John Martinis, Michel Devoret, macroscopic quantum tunneling, quantum technologies.

Cite this article: Turutanov O.G. Nobel Prize and the contribution of Ukrainian scientists to the understanding of quantum phenomena, in particular the behavior of macroscopic quantum systems (Nobel Prize in Physics 2025). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2025. (12): 20—30. <https://doi.org/10.15407/visn2025.12.020>