

НАДПРОВІДНІСТЬ — ВІД ГЕЛІЄВИХ ДО КІМНАТНИХ ТЕМПЕРАТУР

*Suum cuiusque rei tempus.
(Кожній справі — свій час.)
/Латинській вислів/*



Вадим Локтев
доктор фіз.-мат. наук,
академік НАН України,
академік-секретар
Відділення фізики і астрономії
НАН України,
м. Київ

Пересічним громадянам, які, навіть не замислюючись над цим, весь час так чи інакше використовують результати наукових пошуків минулих років, важко уявити, наскільки швидкими або, правильніше назвати, прискореними темпами розвивається наука. Досить подумки простежити період в одне-два людських життя, як починаєш усвідомлювати, що багато навколишніх речей існують чи відкриті, встигнувши перетворитися на буденні, відносно недавно, якщо, звичайно, порівнювати з більшими періодами – століттями або часом існування людства. Врешті-решт, самій науці у її сьогодишньому розумінні не більше 350 років, що майже на порядок менше часу встановлення, наприклад, християнства. Тому, зрозуміло, вплив науки на розвиток і добробут людей і країн може тільки посилюватись, що спонукає хоча б на популярному рівні уявляти, які наукові досягнення мають шанс змінити світ у найближчому майбутньому.

Такі прогнози ніколи не втрачали своєї популярності, а особливо актуальними й цікавими для широкої громадськості були приблизно 10 років тому, на початку XXI-го століття, коли кортіло дізнатися, а що готує нам грядуще третє тисячоліття. Тепер же добігає кінця лише його перша декада, і знову відомий науково-популярний часопис "Scientific American" (№6, 2010) оприлюднив черговий список 12-ти наукових подій, від яких може істотно залежати швидкість просуван-

ня землян до вирішення своїх глобальних проблем. Однією з них — і, на думку багатьох експертів, найголовнішою — є *енергетична проблема*, що має два рівноправні складники: забезпечення людей різними видами енергоносіїв за умови їх економного витрачання. Отже, не дивно, що й раніше, задовго до початку нового тисячоліття, й тепер до списку нагальних суспільних очікувань, реалізація яких цілком покладається на вчених, продовжують вносити такі науково-технічні проекти, як будівництво реакторів керованого термоядерного синтезу, або створення штучного Сонця на Землі, і розв'язання проблеми невитратної доставки електричної енергії від її виробника до споживача, для чого треба мати невідомі поки що матеріали (фактично металевої природи) *без електроопору* при — в ідеалі — *нормальних температурах і тиску*¹. Зрозуміло, що переважна більшість питань, які виникають перед фахівцями відповідного профілю, мають суто фундаментальний характер, вимагають, як правило, великих витрат, тому можуть бути вирішені лише при концентрації зусиль не окремих, нехай і передових, країн, а міжнародної наукової спільноти.

Нижче ми зробимо спробу проаналізувати тільки одне з цих питань, а саме: 100-відсоткове енергозаощадження, що спирається на використання таких матеріалів, в яких при розповсюдженні по них електричного струму не відбувається жодних непродуктивних втрат, тобто коефіцієнт їхньої ко-

рисної дії досягає свого максимального можливого значення, рівного 1.

Для цього нагадаю, що стан металів, які при певній температурі починають переносити електричний струм без будь-якого опору, називається *надпровідним*, а самі вони — *надпровідниками*. Є нагода взагалі поговорити про чудове *явище надпровідності* і його перспективи саме тепер, на початку 2011 р., коли виповнюється 100 років з дня відкриття цього вражаючого і одночасно надзвичайно глибокого феномену сучасних фізики і техніки. Треба сказати, що надпровідність як фізичний ефект була абсолютно непередбачувано відкрита голландським фізиком *Х. Камерлінг-Оннесом* в Лейденській лабораторії в процесі систематичних експериментів, що ставили за мету безпосереднє вимірювання електричного опору простих металів — олова, свинцю, ртуті — при максимально низьких температурах. Припускали, що всі ці речовини мають деякий найменший опір, значення якого (звичайно, для кожного металу свого) й треба було отримати. Фактично тим самим перевіряли висунуту німецьким фізиком *П. Друде* гіпотезу про існування в металах електронного газу, за якою опір будь-якого металу визначається саме зіткненнями рухомих електронів з його ґраткою, а точніше коливаннями вузлових атомів (іонів). При цьому залежність частоти зіткнень від температури була невідомою і лише вважали, що вони мають повільно зменшуватись при зниженні останньої¹, як наслідок, мусить падати опір, тобто електрони пересуватимуться крізь ґратку вільніше.

Однак сталося так, що ще до досягнення найнижчої на той час температури — температури 2,2 К (нижчої за -270 С) конденсованого гелію 4Не — речовини, яку в цих експериментах використовували як холодоагент, а точніше, при температурі $T_{кр} = 4,19$ К, що отримала назву *критичної*, опір вимірюваних зразків ртуті після справді доволі довгого плавного зменшення несподівано стрибкоподібно *повністю* зникав, і електрони починали рухатися в просторі ґратки так, начебто її взагалі не існувало. Відповідні повідомлення *Камерлінг-Оннеса* про спостереження ним такої нечуваної аномалії з'явилися в квітні й травні 1911 р., а вже у 1913 р. він як одноосібний автор цього відкриття отримав Нобелівську премію². Цікаво, що у формулюванні сказано: "*за дослідження властивостей речовини при низьких температурах, що спричинило, крім усього іншого, отримання рідкого гелію*". Тобто формально відкриття надпровідності не згадувалося, а отже, премією відзначено не було. Проте, у традиційній Нобелівській лекції *Камерлінг-Оннес* присвятив йому велику увагу, де, власне, *вперше назвав спостережений ефект втрати опору надпровідністю, а відповідні металеві речовини — надпровідниками*. До того ж, як це не дивно, дослідник торкнувся комерційного потенціалу відкритого ним явища і його можливого застосування для промислового у майбутньому виробництва дротів, які утворюють різноманітні мережі, щоб електричний струм в них якнайменше витрачався на тепло і слугував винятково корисним цілям. Проте треба відзначити, що в цілому ця видатна подія фізики, а як продемонструвала історія, й техніки першої половини

XX-го ст. отримала в той час вельми скромний резонанс, якщо до неї підходити з сучасними мірками.

У подальших інтенсивних дослідженнях впродовж майже півстоліття було відкрито і синтезовано багато нових, включаючи штучні, надпровідників, але їхня критична температура ледь перевищувала 20 К, що фактично стримувало їх широке застосування. Ні, там, де цього вимагали якісь певні наукові, виробничі або якісь інші цілі, а кошти не лімітувалися, надпровідники прогнозовано працювали, але про справді відчутне їх проникнення у різні галузі, а головне — в побут людей не йшлося, бо занадто дорогими та громіздкими виявлялися установки охолодження металів до потрібних низьких температур.

Доречно нагадати, що у 30-40-і роки минулого століття фізика низьких температур посідала дуже помітне місце як у всесвітньому масштабі, так і в СРСР, де особливого розмаху вона набула в Україні. Передусім, це було пов'язано з ім'ям *Л.В. Шубнікова*³, який очолював Кріогенну лабораторію Харківського фізико-технічного інституту. Тут вперше в СРСР було отримано рідкий гелій та проводилися всесвітньо відомі дослідження надпровідників. Зокрема, були відкриті надпровідники II-го виду, до яких, як правило, відносяться не прості метали, досліджені *Камерлінгом Оннесом* та його послідовниками, а різноманітні багатокомпонентні сполуки (передусім, сплави) і які тільки і можна, насправді, використовувати у приладах і електромережах. З огляду на це доречно навести наступну історичну деталь: через 2-3 роки після виголошення Нобелівської лекції з висловленим оптимістичним сподіванням на використання надпровідності у практичних цілях *Камерлінг-Оннес* втратив на це будь-яку надію, бо дізнався, наскільки малі магнітні поля її руйнують. І тільки після робіт харківської групи *Шубнікова* з'ясувалося, що таке відбувається лише з металами, які вивчав голландець, і які отримали назву надпровідників I-го роду, а надпровідність відновила свої непогані перспективи як практично важливе явище. І справді, наступне вивчення надпровідників II-го роду довело, що вони спроможні зберігати надпровідний стан з електричним струмом, який, будучи великим, розповсюджується без опору, й у надзвичайно високих магнітних полях. Нарешті, не можу не відмітити, що на феноменологічному рівні фізичну різницю між надпровідниками I-го і II-го роду, описавши їхні основні властивості, пояснили радянські теоретики *Л.Д. Ландау*, *В.Л. Гінзбург* і *О.О. Абрикосов* у своїх працях 1950-53 рр., за що останні двоє також були удостоєні Нобелівської премії 2003 р.

Було зрозуміло, що головною перепоною на шляху якнайширшого застосування явища надпровідності є дуже малі значення критичних температур, але свідомі пошуки нових надпровідних речовин унеможлилювалися тим, що були невідомі чинники, які її зумовлюють. Про останні взагалі не було жодної гадки упродовж кількох десятиліть, бо надпровідність виявилася явищем, справжня природа якого, образно кажучи, виявилася "не по зубам" кільком поколінням найсильніших фізиків світу, включаючи таких геніїв як *А. Ейнштейн*, *Р. Фейнман* або *Л.Д. Ландау*. До пев-

¹Як відомо, в підручниках такі умови інколи зуться кімнатними, проте в перекладі журналу "Світогляд" (№3, 2010), де головним редактором *Я.С. Яківим* перелічена низка згаданих наукових подій, словосполучення "кімнатно-температурна надпровідність" було подане як "низькотемпературна надпровідність", що, звичайно, є неточним навіть не стільки з точки зору формального перекладу, скільки з точки зору проголошення глобальної проблеми людства.

²Не можу обійти увагою таку маловідому деталь: як пізніше з'ясувалося, всі виміри і перше спостереження надпровідності були зроблені асистентом *Камерлінг-Оннеса* — інженером *Г. Холстом*, якому у роботах не тільки не віддячили за допомогу в проведенні експериментів, а й взагалі не згадали. Мабуть, 100 років тому пан професор у європейському університеті міг собі дозволити подібну поведінку, яка не вважалася ані екстраординарною, ані невивчливою до своїх співробітників. Справді, "інші часи — інші нрави".

³На жаль, він зміг пропрацювати лише кілька років, що припали на роки сталінського терору; бо в 1938 р. його було безпідставно заарештовано і страчено у віці 36 років. Така ж доля чекала і на *Л.Д. Ландау*, що теж працював у ХФТІ, але він встиг перебраться до Москви, де хоча і потрапив до тюрми, але завдяки вчасному втручання *П.Л. Капиці* його не знищили, протримавши там "лише" рік.

ного часу, майже півстоліття, незважаючи на значні зусилля, теорія була неспроможна що-небудь сказати про будь-які причини формування надпровідного стану, аж поки 1955 р. не був експериментально відкритий так званий ізотопічний ефект, згідно з яким величина $T_{кр}$ виявилась залежною від маси елементів (ізотопів), що утворюють ґратку того чи іншого металу. Це, в свою чергу, недвозначно свідчило, що ґраткові вузли, а точніше їхні коливання, про які йшлося вище, хоча, певним чином, і відіграють роль ґальм для процесу струмопереносу, породжуючи (разом з дефектами) омичний опір, у надпровідності можуть виявитись конструктивними по суті. Але в чому полягала можлива конструктивність, залишалося загадкою.

На щастя, до вивчення надпровідності приєднався визначний американський теоретик *Дж. Бардін* (між іншим, єдиний у світі фахівець, двічі удостоєний Нобелівської премії за свої дослідження в одній галузі науки, а конкретно: у фізиці твердого тіла), який 1957 р. разом із своїми тоді молодими співробітниками *Л. Купером* і *Р. Шріффером* розробив і опублікував мікроскопічну теорію надпровідності, що не тільки повністю пояснила це явище, а й передбачила низку нових ефектів, спостережених пізніше. Мабуть, основний серед останніх — поява у вихідному неперервному електронному спектрі металів так званої надпровідної щільності, швидке експериментальне відкриття якої підтвердило справедливості основних засад теорії. Вже тоді значний методологічний внесок у неї зробив наш співвітчизник *М.М. Боголюбов*, тому часто цю теорію в науково-навчальній літературі називають *теорією БКШ-Боголюбова*.

Якщо коротко, то в ній було зроблено і доведено абсурдне, на перший погляд, припущення, що спрощено зводилось до наступного: необхідною і достатньою умовою появи надпровідного стану є притягання(!) електронів, яке, здавалось б, прямо суперечило загальновідомому і добре перевіреному закону Кулона. Виявилось, що електрони не тільки розсіюються на вузлах ґратки, а, незважаючи на згадане кулонівське відштовхування, можуть ще й слабко, завдяки саме так званому обміну квантами ґраткових коливань, притягатися один до одного. Наслідком такого притягання є утворення досить стабільних при низьких температурах пар, ідея щодо можливості існування яких була незадовго перед тим одноосібно висунута *Купером*. Саме такі куперівські пари стають носіями заряду, що рухаються без опору в надпровідному стані, бо протидіючи одноелектронному струму ґратковій степені вільності вже задіяні в утворенні пар, тому в першому наближенні не заважають їхньому вільному рухові. Не заважають останньому і дефекти ґратки, тому в підсумку він виявляється абсолютно бездисипативним. Звичайно, збільшення температури відбивається на ньому у спосіб, що сприяє їх руйнації, тому безопірний когерентний рух пар і явище надпровідності в цілому можуть існувати лише при достатньо низьких температурах, межею яких є згадувана критична температура. У найпростішому випадку вона визначається з відомої формули теорії *БКШ-Боголюбова* $T_{кр} \propto \exp(-1/\lambda)$, де λ — безрозмірна константа електрон-ґраткового зв'язку. З неї випливає, що чим він більший, тим більшого значення можна очікувати для $T_{кр}$ того чи іншого матеріалу.

Як тільки механізм формування надпровідного стану став зрозумілим, на пошуки металів і сплавів — природних і штучних — з відносно великими величинами параметру були кинуті як великі науково-технологічні сили, так і значні кошти, проте не тільки кожний градус, а й кожна його десята давалися тільки після титанічних зусиль. До того ж теорія, при звертанні до конкретних (і часто-густо досить складних і з хімічного, й зі структурного поглядів) речовин виявилась неспроможною щодо правильних пе-

редбачень величин λ у них або хоча б слушних порад експериментаторам і технологам щодо того, що і як робити, тому пошук, зазвичай, вівся методом проб і помилок, але більше 22-23 К критичну температуру підняти так і не вдалося.

Такий стан речей все ж не задовольняв дослідників, і 1964 року американець *У. Ліндл* і радянський фізик *В.Л. Гінзбург* незалежно і майже одночасно звернули увагу на те, що, врешті-решт, коливання ґратки не єдині елементарні збудження в металах, з якими електрони можуть взаємодіяти так, щоб в результаті утворити куперівські пари. До таких збуджень були віднесені і деякі інші — зокрема, коливання або намагніченості у магнітних металах. Так звані магнони, або густини самих електронів (відомі плазмові коливання), колективізовані збуджені стани окремих іонів (екситони) тощо. Більш-менш достовірні оцінки показували, що взаємодія електронів з ґраткою не може дати критичної температури, вищої за кілька десятків градусів, але для збуджень електронної природи такого обмеження в принципі не виникає. Можна визнати, що саме з цих робіт почалася ера високотемпературної надпровідності (ВТНП) — принаймні, як дослідницького полігону, на якому відшліфовувалися ідеї, методи і технології отримання нових сполук з єдиною метою отримання якомога вищого значення $T_{кр}$. Певна річ, що це були винятково фундаментальні пошуки, але в них знаходило відображення розуміння тих фізичних і хімічних властивостей матеріалів, які, з одного боку, не суперечать високим критичним температурам, а з іншого, — сприяють їх формуванню. Важливо також, що відповідні експерименти були спрямовані на вирішення нагальної і надзвичайно важливої для людства проблеми — створення максимально енергоощадних матеріалів. Цікаво, що стосовно них один із висновків свідчив на користь низьковимірних сполук, що наперед здавалось майже парадоксальним.

Швейцарські експериментатори *Й. Беднорц* і *А. Мюллер* звернули увагу на оксиди міді, в яких для отримання високої $T_{кр}$ сподівалися використати справді відносно велику електрон-ґраткову взаємодію, й 1986 р. відкрили новий клас надпровідників з температурами, що не на відсотки, а в рази перевищували попередній рекорд. Їм особисто вдалося синтезувати ВТНП сполуку "всього" з $T_{кр} = 35-40$ К, але це був шалений прорив у нову шкалу і нові уявлення про можливі величини критичних параметрів, оскільки температура лише один із них, хоча й найважливіший. Вже на базі їхнього результату, відміченого Нобелівською премією, негайно — 1987 р. — інші дослідники швидко досягли так званих *азотних температур* у діапазоні 90-110 К (оскільки температура 77 К зрідження азоту справді є нижчою). На момент написання цієї статті фіксований максимум критичної температури становить 135 К при нормальному тиску і аж 164 К при високому. Досягнуті значення не можна не визнати досить високими, а з позицій ще недавніх уявлень — вони, без перебільшення, є фантастичними. Тим самим, приблизно 25 років тому почався період експериментального дослідження реальних ВТНП, які, як це не дивно, справді виявились шаруватими сполуками, причому цікавими з погляду фізики не менше, ніж прикладного. Упродовж приблизно 15 років інтенсивність, передусім фундаментальних досліджень ВТНП була настільки потужною, що ситуацію, яка склалася, фахівці називали дослідницьким бумом; тепер за рахунок проведення частини робіт в інженерно-технічних лабораторіях й інколи фірмах потік публікацій дещо впав, але все ж таки залишився стабільно великим. За роки, що минули з моменту їх відкриття, виконано тисячі вимірювань, надруковано

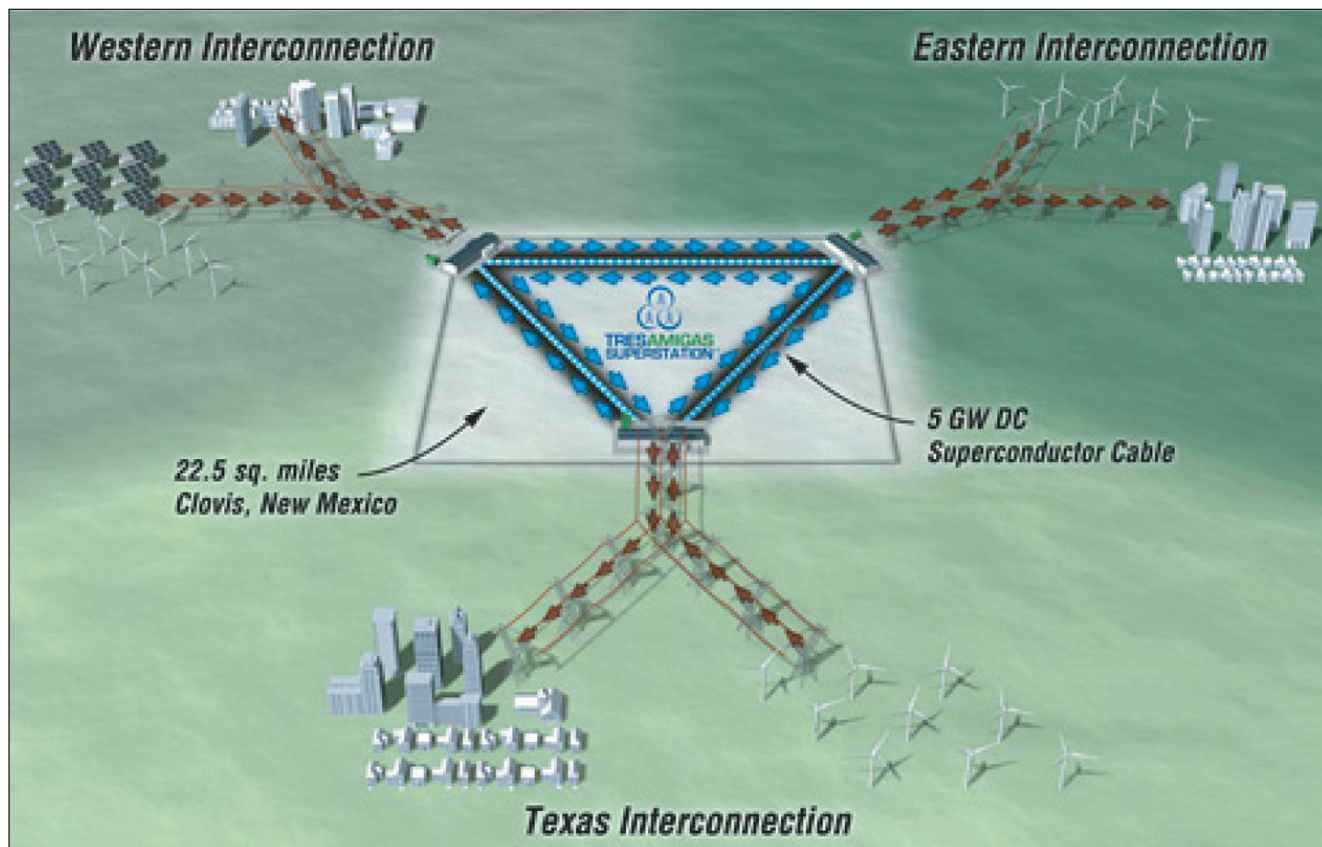


Рис. 1. Схема Tres Amigas Superstation (голубим кольором позначено надпровідний трикутник, що зв'язує три енергосистеми США так, щоб, наприклад, енергія вітру з Заходу могла без перешкод досягти Сходу, або сонячна енергія Півдня прийшла на Північ

десятки тисяч праць, але зрозумілості у фізиці механізму ВТНП як не було, так і нема.

ВТНП як явище виявилось таким, до якого ні експериментальна, ні теоретична фізичні світові спільноти не були підготовлені. Насправді, вихідні сполуки ВТНП — це не метали, а діелектрики, які металізуються лише внаслідок їх гетеровалентного легування, причому і їхні властивості, і сама величина $T_{кр}$ безпосередньо від нього залежать, що вимагає певного узагальнення теорії БКШ-Боголюбова. Зокрема, залежність деяких властивостей ВТНП сполук, а також їх критичної температури від густини носіїв вдалося врахувати через додаткове рівняння, яке вперше було записане київськими теоретиками В.П. Гусиніним, С.Г. Шаповим і автором цих рядків, що дозволило зрозуміти витоки притаманного лише ВТНП явища — формування щільності (на відміну від надпровідної її називають *псевдо-щільністю*) помітно вище за температуру $T_{кр}$, коли самої надпровідності ще немає.

Водночас, можна стверджувати, що у численних пропозиціях щодо природи ВТНП нестачі немає, проте жодна з них все ще не стала загальноприйнятною. Одна з причин гальмування розвитку послідовного аналітичного підходу полягає у тому, що взаємодія між електронами у ВТНП настільки велика, що будь-яка теорія збурень не застосовна для обчислення актуальних надпровідних параметрів, а головне — ці сполуки є твердими і досить крихкими кераміками, а не пластичними, як звичайні метали, матеріалами, що, з іншого боку, викликає неабиякі труднощі при їх застосуванні на практиці. В цьому сенсі занадто оптимістичні прогнози швидкого впровадження конкретних сполук ВТНП, на жаль, не виправдались, але дещо зроблено — не дуже довгі кабелі для електромереж, елементи надпровідних інтерференційних приладів — сквідів тощо.

З власне наукової позиції, все ще нез'ясована природа, або механізм, ВТНП, що, зрозуміло, також стримує синтез відповідних структур, які могли б бути простішими у роботі з ними. Однак, спроби масштабного застосування явища, яке ми розглядаємо, ні на мить не припиняються, скажімо, у США для економнішого внутрішнього перерозподілу електроенергії і розв'язання проблем оптимального електропостачання різних регіонів заплановано 2014 р. ввести до ладу багатокілометрову надпровідну станцію передавання й акумулювання "Tres Amigas" (див. схему на рис. 1), яка матиме форму майже рівностороннього трикутника зі стороною 16 миль і об'єднуватиме зараз практично незалежні Західну, Східну і Техаську генерувальні електромережі цієї країни. Фахівці виходять з тієї відомої обставини, що чим на більші відстані розповсюджується струм, тим істотніше меншає доля витрат на криогенне обладнання, суттєво зростає потужність, і нарешті з'являється вигода від обнуління опору дротів. Іншою родзинкою проекту є розташування цієї станції під землею, що не тільки її додатково здешевлює, а й робить набагато екологічно безпечною і зручнішою в експлуатації.

І все ж, попри наявні об'єктивні труднощі, відкриття ВТНП стало надзвичайно корисним і тому, що прямо спонукало до пошуків надпровідності у тих речовинах, де раніше її можливість не припускали або ігнорували, й результати були синтезовані так звані вуглецеві ВТНП на основі молекул фулерену C_{60} , знайдена надпровідність у давно відомій і непогано вивченій сполуці MgB_2 , а два роки тому надпровідні властивості несподівано встановлені також у сполуках на основі заліза та арсену. Критична температура у всіх перелічених випадках сягає 40-50 K, що, як зазначали, багато років також вважалося недосяжним. Ці відкриття вкрай важливі з погляду вивчення дотепер неві-

домих факторів щодо формування в різних речовинах електронних пар. Річ у тім, що чим би не відрізнялись ці речовини одна від одної, єдине, що їх справді об'єднує, — це існування того чи іншого механізму утворення куперівських пар, і, фактично, мова йде про знаходження такого з них, де б він спрацював при максимально високих температурах. Закономірності виникнення і величина міжелектронного притягання залишаються головною метою переважної більшості сьогоденних, а також майбутніх експериментальних досліджень, спрямованих на збільшення $T_{\text{кр}}$.

Хотілося б окремо зупинитися на ролі та місці українських фізиків у обговорюваному напрямі. Насамперед, необхідно підкреслити, що фізика низьких температур і її розділ — *фізика надпровідності* — завжди посідали вагоме місце у вітчизняній науці. Зокрема, в Україні є спеціалізована установа, Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, у цьому напрямі досліджень працювали і працюють такі корифеї фізики надпровідності, як академіки Герой України *В.Г. Бар'яхтар*, *Б.І. Веркін*, *І.М. Дмитренко*, *Б.Г. Лазарев*, *С.В. Пелетмінський*, *І.К. Янсон*, члени-кореспонденти НАН України *І.О. Кулик*, *О.М. Омелянчук*, *Е.А. Пашицький*, *Т.О. Пріхна*, *С.М. Рябенко*, *І.О. Стасюк*, *В.О. Ямпольський*, професори *О.М. Габович*, *В.П. Галайко*, *В.М. Дмитрієв*, *О.Л. Касаткін*, *В.М. Криворучко*, *В.М. Пан*, *В.М. Свистунов*, *В.В. Чабаненко*, *В.І. Шнирков* і багато-багато інших, чий досягнення значно просунули цей напрям як у фундаментальному, так і в прикладному планах. Нарешті, не можна не згадати, що ще задовго до відкриття ВТНП в Інституті фізики НАН України у відділі академіка *А.Ф. Прихотько* існувала технологічна група під керівництвом *Д.П. Мойсєєва*, головним завданням якої був пошук — головним чином, нестандартних — надпровідних систем, критичні температури яких перевищували б відомі для металів і сплавів. При цьому доречно додати, що вона впритул наблизилася до розуміння перспективності вивчення надпровідності різноманітних оксидів, проте, і це теж відповідає дійсності, мідних серед них не було.

Отже, відкриття ВТНП, будучи істотним успіхом фізичного матеріалознавства, не зняло з порядку денного основне бажання всіх тих, хто професійно займається надпровідністю — винайти хоча б один матеріал, який би був надпровідником саме при нормальних, або, як кажуть, *кімнатних*, умовах. Про синтез саме таких сполук, що вже отримали в науковій літературі назву *КТНП (RTSC — Room Temperature Superconductors)*, йдеться у згаданій вище статті в американському журналі як про одну з подій, що спроможні істотно позначитися на нашому житті. Такому прогнозу важко заперечити, проте його автори цілком справедливо й обережно зазначають — якщо вони взагалі існують. Це так, але не можна при цьому не погодитись, що якою б не виявилась остаточна відповідь на, певною мірою, риторичне запитання щодо існування КТНП, останнє слово залишатиметься за фундаментальною наукою. Ніхто не може бути впевненим, чи можливе їх створення, але надихає та обставина, що жодна принципова заборона на їх існування не проглядається⁴, тому залишається вперто і послідовно шукати. Одне очевидне — це те, що попереду важкий шлях таких же спроб і помилок, проте в разі успіху імена тих — дослідника або цілої команди, — хто досягне омріяної мети, завжди з вдячністю пам'ятатиме людство.

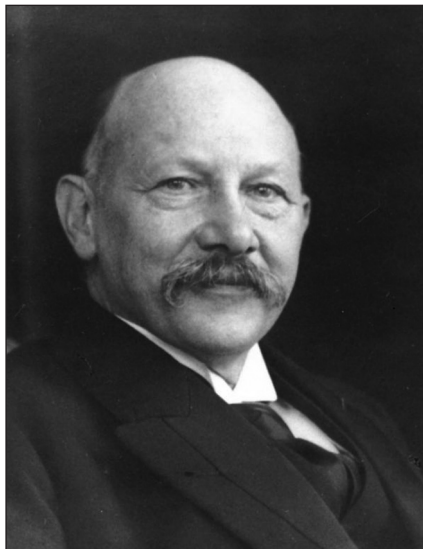
Не треба бути знаним фантастом, щоб зрозуміти, що

надпровідні дроти, які без будь-якого охолодження спроможні переносити електричний струм, особливо якщо йдеться про далекі відстані на відкритому повітрі або під водою, кардинально змінили б ландшафт земної карти енергозбереження, бо тоді місце розташування електростанцій стало б неважливим і могло б обиратися лише з міркувань екологічної безпеки та зручності. З азотними надпровідниками, до яких належать усі відомі ВТНП, цього досягти, звичайно, не вдалося. Так, вони значно здешевіли, зробивши доступнішим використання надпровідників як матеріалів, але все ж не перетворили його на комерційно вигідне, бо азотне охолоджувальне обладнання ніяк не можна назвати дешевим, а якщо і можна, то лише порівняно з гелієвим.

Здавалося б, тема вичерпана і завдання зрозумілі. Проте хотілося б звернути увагу на ще один аспект пошуків КТНП, який пов'язаний з нині широко поставленими нанofізичними і нанотехнологічними дослідженнями. Не боюсь помилитися, стверджуючи, що однією з найважливіших проблем останніх могло би стати створення саме нано-надпровідників з гранично високою критичною температурою, наприклад, чого було б досить, $T_{\text{кр}}=30\text{ К}$ (або близько 300 К). Коли підійти до справи формально, то такі цифри не здаються недосяжними. ВТНП підняло попередній рекорд приблизно у 4–5 разів (за порядком величин від 20 К до 100 К). Тепер же йдеться, якщо віраховувати від наведеної вище рекордної температури близько 150 К, про, грубо кажучи, двійку, якої би вистачило з великим запасом. Але так стверджувати, звичайно, було б формально-примітивно, і задача не здається легкою, а синтез реальних зразків КТНП обіцяє бути дуже важкою з усіх поглядів проблемою.

Оскільки питання ще не визріло, спробую висловити власну позицію. Для отримання притягання між електронами навіть у рамках стандартного підходу БКШ, треба спробувати зрозуміти, структури яких ґраток найбільш придатні (при інших рівних умовах) для формування максимальних значень $T_{\text{кр}}$. Створення ж наперед заданих стабільних ґраток — це одна з найактуальніших проблем фізики і хімії твердого тіла. Для звичайних кристалів щось нове тут вигадати важко, а от що стосується нанооб'єктів, за ними, гадаю, велике майбутнє. Дійсно, можливості провідних нанотехнологів світу зросли настільки, що вони навчилися складати атоми у ґратки по одному. Якщо знати оптимальну рівноважну структуру, яка призводить до формування найбільших $T_{\text{кр}}$, то, напевно, отримання такого інтегрального параметру, яким є критична температура, може виявитись технічною проблемою. Отже, на мою думку, вирощування штучних КТНП сполук — це одночасно створення структур з визначеним спектром, сильною електрон-ґратковою або іншою взаємодією, що призводить до утворення куперівських пар, і металевими властивостями. Складність обговорюваної задачі зумовлена відсутністю так званого малого параметру та необхідністю акуратного врахування міжелектронних кореляцій. Проте, є і полегшувальні обставини: як правило, надпровідність, коли вже вона виникає, малочутлива до тонкощів і чистоти технології порівняно з технологіями вирощування, скажімо, напівпровідникових структур. Це дозволяє сподіватися, що конструюванням нанокристалічних об'єктів можна було б досягти бажаної цілі. Таким чином, можна також використовувати різноманітність структур, які утворюються завдяки спеціальному кристалографічному дизайну і пра-

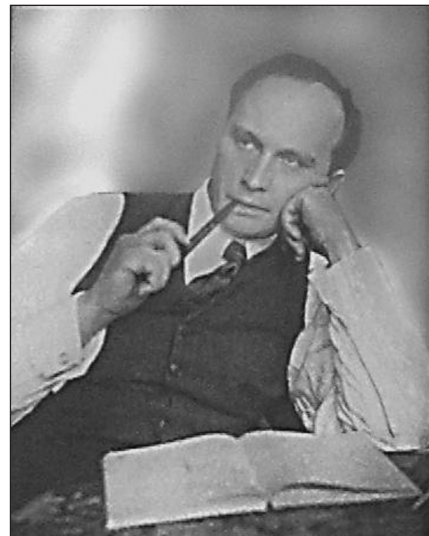
⁴Скажу більше: достовірні оцінки свідчать, що під дією надвисокого тиску, який перетворює молекулярний водневий кристал на одноатомний металевий водень, має відбуватися перехід останнього до надпровідного стану з $T_{\text{кр}}$ порядку 10^3 К , але навряд чи ми станемо свідками воднево-металевих електромереж. Хоча, хто знає?



Гейке Камерлін-Оннес (1853-1926)
видатний нідерландський фізик і хімік,
у 1911 р. відкрив явище надпровідності,
лауреат Нобелівської премії з фізики 1913 р.

правдовувались, і воно справді відчувало б покращання в різних сферах свого буття. Отже, практичні виходи всього того, що винаходиться і вивчається, стають головними для платників податків, які хочуть бачити користь від таких великих капіталовкладень на підтримку ННІ. Тому не викликає подиву, що найближчі 10 років вже отримали в ЗМІ Америки красномовну назву "*Декада застосувань*".

Гадаю, варто також звернути увагу читача і на такий аспект пошуків перспективних систем, що не мають електроопору за нормальних умов, як існування надпровідних властивостей у біологічних структурах живих організмів, які зазвичай можуть функціонувати лише при кімнатних температурах. Відповідні питання зараз жваво обговорюються у науковій літературі, але в повному обсязі ще далеко не з'ясовані і, скоріше за все, вимагають



Лев Васильович Шубніков (1901-1937)
видатний український фізик-експериментатор,
у 1935 р. відкрив надпровідники II-II-го виду,
що знайшли широке застосування в науці і техніці



Лауреати Нобелівської премії, автори моделі надпровідності (БКШ) — Джон Бардін, Леон Куппер, Джон Шріффер

вильному, тобто наперед визначеному, підбору хімічних елементів. З іншого боку, дослідження нанорозмірних надпровідників або провідників з наногранульованою надпровідною структурою могло би бути деяким полігоном для відпрацювання нових нанотехнологічних методів і методик. Бувши виконуваними, дослідження і створення нових нано-надпровідних матеріалів і приладів перебували б у повній відповідності з новітніми найактуальнішими задачами, які стоять перед вченими-фізиками на найближчі 10 років. Вони аргументовано і всебічно сформульовані в Національній нанотехнологічній ініціативі (ННІ), з якою виступив уряд США, готовий на різноманітні роботи цього напрямку виділити з бюджету безпрецедентні кошти у \$12 мільярдів, що порівняно з коштами програми Аполлон, завдяки якій американці здійснили кілька космічних подорожей до Місяця з висадкою екіпажів. Істотно, що ННІ має чітку спрямованість на кінцеві результати, щоб очікування суспільства ви-

окремого аналізу. Єдине не викликає сумнівів: попереду науковців і на цьому напрямі чекає чимало цікавих і складних міждисциплінарних досліджень, які, між іншим, теж із повним правом необхідно відносити до тієї чи іншої науки з додатком "нано" — нанофізики, нанохімії, нанобіохімії тощо.

Завершуючи, ще раз відзначу, що створення реальних КТНП може виявитись одним із пріоритетів ННІ, яка є, багато в чому міждисциплінарною програмою. Її результатів зможуть, насамперед, очікувати в тих країнах, які мають сучасні, добре оснащені лабораторії, зокрема, нанокристалічного фізико-хімічного будівництва. Вони зараз є в США, Японії, а нещодавно така лабораторія, укомплектована за останнім словом наукової техніки і спроможна виконувати експериментальні дослідження в галузі нано-, біої інформаційних наук, включаючи надпровідність, інноваційні покриття, високотехнологічну медицину, водневу енергетику тощо, створена в Росії у Національному науковому центрі "Кур-

чатовський інститут". Було б украй важливо і бажано організувати хоча б один такий науковий підрозділ в Україні, яка завжди була в перших рядах у вивченні науково-технологічних проблем (зокрема, прикладної надпровідності), близьких до практики. Відповідна наукова одиниця могла би стати джерелом красивих когнітивних результатів, генератором "виробництва" нових знань із методів отримання і застосування нових матеріалів, базою для підготовки кваліфікованих спеціалістів, включаючи інженерів, а також вихідною точкою для так званого трансферу технологій.

Справа за "малим" — необхідними розумінням глибини та важливості проблеми і рішеннями владних структур щодо по-справжньому достатніх для організації такої лабораторії коштів. Тільки тоді події, про які яскраво пише "Scientific American", стануть імовірними і сприйматимуться в Україні не як замріяні недосяжні далі, а як реальність, що відбулася.