



#### ЛОКТЄВ

**Вадим Михайлович** — академік НАН України, академік-секретар Відділення фізики і астрономії НАН України

## ПРОВІДНА ЗОРЯ

### Доповідь з нагоди вручення Золотої медалі ім. В.І. Вернадського НАН України

---

Вельмишановний Борисе Євгеновичу!

Високоповажні члени Академії, шановні друзі!

1. Дозвольте розпочати свій виступ із сердечної подяки, насамперед Борису Євгеновичу, членам експертної комісії і членам Президії, які прийняли рішення про присудження мені цієї високої нагороди. Не буду приховувати, це надзвичайно приємно, бо подібне визнання глибоко зворушує і стимулює до подальшої праці. Водночас зізнаюся, мені важко погодитися з нагородним формулюванням щодо моїх видатних заслуг. Щоб пояснити, дозвольте без будь-яких аналогій процитувати слова Євгена Оскаровича Патона, який на одному зі своїх ювілеїв заявив: «Дійсно, працював багато і напружено, але нічого екстраординарного не зробив, і слова про мої видатні наукові та інженерні здобутки є сильним перебільшенням». Проте історія засвідчила, що Євген Оскарович свій внесок у науку, м'яко кажучи, трохи недооцінював, а от про цьогорічних лауреатів Золотої медалі ім. В.І. Вернадського зі свідомою відвертістю мушу сказати, що насправді видатними досягненнями вирізняється лише Олексій Олексійович Абрикосов, оскільки відкриття вихорів було проривним і суттєво змінило уявлення про явище надпровідності та її можливості. Фахівці знали про це давно, і присудження йому Нобелівської премії лише підкреслило глибину і важливість його результатів. Я ж, як пересічний український фізик, просто робив свою справу, робив не один, тому не можу сьогодні не згадати своїх колег, внесок яких у вивчення та застосування цього явища є без перебільшень видатним і всесвітньо визнаним.

Про Лева Васильовича Шубнікова вже йшлося, і мені хотілося б добрим словом згадати його співавтора і послідовника, багаторічного патріарха української фізики низьких температур академіка Бориса Георгійовича Лазарева з Харківського фізико-технічного інституту, а також представників його школи, співробітників дочірньої установи — Фізико-технічного ін-

ституту низьких температур, а саме, академіка Ігоря Михайловича Дмитренка і його видатного учня академіка Ігоря Кіндратовича Янсона. Усі вони харків'яни і, на жаль, уже пішли з життя. У Києві в Інституті металофізики в галузі надпровідності працював всесвітньо відомий фахівець Володимир Михайлович Пан. Я не буду перелічувати українських фізиків, хто активно працює тепер над цією проблемою, але все ж таки назву прізвища моїх співавторів, без внеску яких навряд чи можна було б говорити про мій власний доробок. Це академік Віктор Григорович Бар'яхтар, члени-кореспонденти Валерій Павлович Гусинін і Ернест Анатолійович Пашицький, доктори наук Юрій Борисович Гайдідей, Едуард Володимирович Горбар, Михайло Олексійович Іванов, Юрій Генеківич Погорелов, Юрій Вікторович Скрипник та Сергій Геннадійович Шарапов. І, звісно, не можу не згадати моїх учителів і великих ентузіастів саме високотемпературної надпровідності — академіків Антоніну Федорівну Прихотько і Олександра Сергійовича Давидова.

2. Нещодавно світ відзначав 100 років з часу, як Х. Камерлінг-Оннес відкрив явище надпровідності у ртуті за температури 4,2 К. Якби речовини могли переходити у надпровідний стан за більш високих температур, це змінило б ландшафт усієї енергетики. Однак виявилось, що підвищення критичної температури — це надскладна проблема. За кожний градус точилася жорстока боротьба, зростання відбувалося надзвичайно повільно. За більш ніж півстоліття ледь вдалося перетнути межу в 20 К, що відповідає температурі кипіння водню, однак і це досягнення вже істотно здешевлювало витрати на виробництво кріостатів та іншого низькотемпературного обладнання, оскільки саме їх дорожнеча не виправдовувала використання цього явища для майже будь-яких потреб.

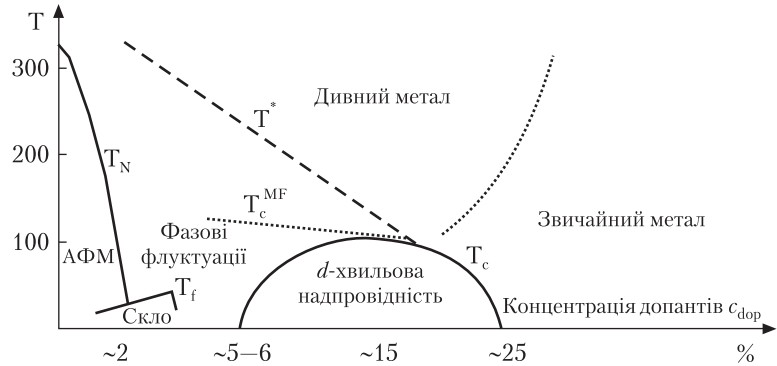
Найвидатніші фізики і матеріалознавці усього світу приділяли велику увагу вирішенню цієї проблеми. Так, наукова школа Віталія Лазаровича Гінзбурга виголошувала пошук відповідних речовин як одну з провідних цілей людства. Поширювалася думка, що абсолютно

всі нові речовини, де б і як вони не були отримані чи синтезовані, слід обов'язково перевіряти на дві властивості — канцерогенність і надпровідність. Раптом вони виявляться або небезпечними, або надпровідними за високої температури.

Поступово робота з пошуку таких речовин почала здаватися настільки безперспективною, що навіть той самий Гінзбург висував обережне припущення, що є якась, поки що невідома, причина, через яку природа обмежує критичну температуру. І ось, весною 1986 р. два швейцарські дослідники Алекс Мюллер і Йоханнес Беднорц раптом повідомили світову спільноту про матеріал, критична температура якого була одразу на 12 К вищою за рекордну на той час. Це було як грім з ясного неба, і впродовж буквально кількох тижнів було синтезовано сполуку цього ж сімейства з критичною температурою ще вдвічі більшою, а потім ще вищою, і ще. За 5–6 років рекорд досяг приблизно 165 К. Тепер, навпаки, вже немає сумнівів, що і це не межа. І сьогодні, через майже три десятиліття після відкриття високотемпературної надпровідності, її з повним правом вважають однією з найбільш вражаючих наукових подій ХХ ст.

3. Здавалося б, проблему розв'язано, але фахівці багато чого ще не розуміли. Що ж було дивного? Якщо коротко, все! Високотемпературними надпровідниками виявилися речовини, від яких ніхто нічого подібного не чекав. Спробую пояснити чому. У фізиці, як і в інших науках, співіснують окремі напрями досліджень, які, хоча й перетинаються, часто розвиваються незалежно і породжують певні інтуїтивні уявлення або догми. Наприклад, у фізиці металів і сплавів вважалося, що у напівпровідниках або тим більше діелектриках немає сенсу сподіватися на надпровідність. Магнітні кристали також не розглядали як претендентів на прояв надпровідних властивостей, оскільки надпровідність «не любить» нічого магнітного. Низьковимірні або просторово неоднорідні кристали теж не сприяють надпровідності, бо для них характерні сильні флуктуації, а, як відомо, флуктуації будь-якого параметра проти порядку, в тому числі надпровідного.

**Рис. 1.** Фазова діаграма купратів. Облaсті концентрацій:  $c < 2\%$  — антиферромагнітний діелектрик;  $c = 1,5\text{—}4\%$  — низькотемпературної спін-скляної фази;  $c \sim 5\%$  — концентрація переходу діелектрик—метал;  $5\% \leq c \leq 25\%$  — надпровідного металу з анізотропним параметром порядку і розвинутими антиферромагнітними флуктуаціями;  $c > 25\%$  — нормального ненадпровідного металу



Відкриті речовини, які переходили у надпровідний стан за таких високих температур, стали одкровенням, оскільки були об'єктами, що аж ніяк не належали до металів і сплавів. Крім того, вони були сильно магнітними і шаруватими або певною мірою низьковимірними, оскільки, наприклад, анізотропія провідності вздовж і поперек шарів сягала 100 тисяч. Нові речовини належали до групи мідних оксидів — купратів. Це взагалі кераміка, аналогічна речовинам, з яких роблять посуд чи горщики для квітів. Перші досліджувані купрати були трикомпонентними, потім чотири-, п'ятикомпонентними, містили різні метали, але всі вони обов'язково мали у своєму складі парамагнітну мідь і кисень. Материнські сполуки були магнітними діелектриками, а металами ставали лише при збагаченні їх додатковими елементами — донорами або акцепторами. Останні неминуче призводили до просторової неупорядкованості середовищ цих систем з дуже малою густиною носіїв, набагато меншою, ніж у звичних металах. Повторю, ці фактори вважали несприятливими для прояву надпровідних властивостей.

І ще один факт, який викликав здивування, — не лише надпровідні, а й практично усі властивості цих речовин залежали від густини носіїв, тобто від кількості внесених атомів, що спричинюють металізацію вихідних діелектриків.

На рис. 1 ви бачите умисно спрощену мною фазову діаграму купратів у змінних температура — концентрація носіїв, які вносяться в систему завдяки допуванню, або, що звичніше для фізики напівпровідників, легуванню. За малих

концентрацій купрати є магнітними діелектриками, тобто ніякого струму не переносять, потім поступово далекий магнітний порядок втрачається і перетворюється на так званий короткосяжний, і лише тоді з'являється провідність, а отже, і надпровідність, температура якої описує певний купол. Інакше кажучи, критична температура спочатку зростає, а потім, досягнувши досить високого максимуму, спадає, поки (що й досі залишається дивним) не зникає взагалі. На сьогодні ще не всі ділянки цієї діаграми мають остаточну інтерпретацію і їх активно продовжують вивчати в усіх країнах, де ведуть фізичні дослідження.

4. Таке багатство особливостей неможливо вивчити одночасно, тому було сформульовано обмежене завдання — дослідити зміну властивостей купратів у міру насичення їх допантами, що й визначило напрям роботи нашої групи приблизно на 10 років. Почали, звісно, з діелектричного стану і переходу діелектрик—метал. А це означає, що спершу ми вивчили недоповані сполуки і описали характер їх основного стану, найнижчі збудження, поведінку в магнітних полях тощо.

На наступному етапі потрібно було зрозуміти, що відбувається з далеким магнітним порядком, як виникає провідність та які її особливості. Оразу постало питання, а що саме відбувається, коли в систему вносять допант, тобто той додатковий хімічний елемент, завдяки якому в системі виникає рухомий заряд? На той час, 1987 р., швидко набувала популярності картина, запропонована видатним американським теоретиком і нобелівським лауреатом Філіпом Ан-

дерсоном, який оголосив анафему поширеній у теорії металів так званій зонній теорії, оскільки вона передбачала для недопованих купратів металічний стан, а його не спостерігали. Андерсон застосував іншу модель, де носії народжувалися на іонах міді і взаємодіяли настільки сильно, що їх рух припинявся. Здавалося, інакше не може бути, бо сама по собі мідь — метал з високою провідністю. Щоб уявити, чому взаємодія може заважати руху, думаю, підійде такий усім відомий образ: гра п'ятнадцять, коли кожна фішечка може рухатися лише за наявності хоча б одного пустого місця. Якщо такого немає і фішок 16, що відповідає відсутності допантів, пересування стає неможливим.

Вирішивши розібратися, що відбувається, ми розглянули потенціали іонізації та кулонівські взаємодії наявних у купратах іонів і швидко дійшли висновку, що носіям набагато вигідніше займати кисневі стани, хоча кисень зовсім не метал. Поки ми готували цей результат до публікації, у США встигла вийти схожа робота, і тепер відповідна картина зветься моделлю Емері. Однак ми розглянули трохи багатшу модель з урахуванням усіх актуальних мідних станів і здобули «втішний приз». Ми помітили, що коли ці стани враховувати послідовно, кисневі носії можуть обмінюватися відповідними мідними збудженнями електронної природи, і такий, специфічний саме для купратів, механізм спарювання тепер зветься механізмом Гайдідея—Локтева—Вебера, тому що незалежно від нас, хоча й трохи пізніше, його розглянув також німецький дослідник Вернер Вебер (W. Weber).

Зауважу, що формування стабільних пар з однойменних зарядів, що ніби суперечить закону Кулона, в теорії надпровідності є ключовим моментом, і механізм їх непрямого притягання завдяки обміну звуковими хвилями, або фононами, було відкрито творцями цієї теорії Дж. Бардіном, Л. Купером і Р. Шріффером. Теорія БКШ належить до геніальних досягнень наукової думки, а наш механізм є одним із різновидів так званих нефононних механізмів.

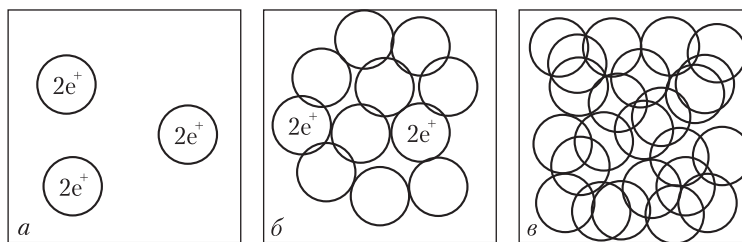
Проте я трохи забіг уперед, тому що для опису еволюції магнітних властивостей було

важливо, що кожний новий носій займає саме кисневі стани. При цьому, осівши на них, він перебуває у кулонівському полі того допанта, який його породив. Це означало, що у кожній площині народжувалася випадкова підсистема центрів із симетрією гантелей, які «відчують» один одного, обмінюючись збудженнями основного кристала. А оскільки така непряма взаємодія, як функція відстані і кута, є знакомзмінною, система неупорядкованих допованих спінів утворює скло, температура замерзання якого виявляється пропорційною концентрації, що невдовзі й було підтверджено в експерименті. Поява скляної фази неминуче призводить до домішкового розмиття енергії низькочастотних магнітних збуджень, унаслідок чого система втрачає далекий спіновий порядок, що теж і якісно, і кількісно задовольняло спостереження.

5. Ну добре, а що ж відбувається далі, якщо продовжувати додавати допанти, тим самим збільшуючи концентрацію носіїв? По-перше, з'ясувалося, що доповані високотемпературні купрати за жодних умов не можуть перетворитися на звичайні метали. Це легко зрозуміти, якщо збагнути, що допанти грають подвійну роль — постачальників носіїв і водночас центрів локалізації тих самих носіїв. Дійсно, гранична енергія носіїв у струмонесучих площинах зростає пропорційно густині носіїв, а довжина вільного пробігу — кореню квадратному з неї. У результаті умова гарної провідності, яка практично без винятків має місце навіть у брудних металах, у допованих купратах є завжди невиконуваною, тому їх і назвали поганими металами (*bad metals*). У таких, особливо низьковимірних, металах з'являється розмірний параметр — енергія локалізації, яка перешкоджає вільному руху носіїв. З іншого боку, кожний локалізований носій є квантовим об'єктом і тому, як кажуть, «розмазаний» по певній області. Коли такі області починають перетинатися, відбувається металізація системи, але зі збереженням її досить значного опору, який визначається невикорінними процесами розсіяння.

Тим не менш, умова існування рухливих носіїв усе ж таки досягається.

**Рис. 2.** Схема стану системи при переході від малих до великих концентрацій; *a* — бозе-ейнштейнівська конденсація локальних пар, малі густини носіїв,  $\mu < 0$ , пари існують як окремі утворення; *б* — кросоверна область (проміжний випадок),  $\mu = 0$ ; *в* — надпровідність за теорією БКШ—Боголюбова, великі густини носіїв,  $\mu > 0$ , куперівські пари



Не зупинятимуся на поясненні, чому такий висновок не є тотожним для надпровідних параметрів, а лише зауважу, що на відміну від провідності надпровідність існує у скінченному діапазоні концентрацій допантів, принаймні у двовимірній моделі.

Знаючи особливості металізації поганого металу, можна було поставити загальну задачу про його надпровідні властивості. Запропонована нами модель містила всі ключові складові — вільні носії, так зване пряме, або незапізнююче, притягання, непряме (запізнююче) і, нарешті, наявність допантів. Наявні методи дозволяють отримати необхідні рівняння. Навіть для випадку нульової температури їх три. Одне — на параметр надпровідного порядку — відтворює відоме і єдине в теорії БКШ—Боголюбова, а два можна вважати новими. Якщо третє певною мірою очевидне і тривіальне, то друге — на хімічний потенціал — суттєве і є актуальним в області концентрацій, яку стандартна теорія не зачіпає. Причому розвинутий нами підхід цілком природно вводив відсутній у теорії БКШ розмірний параметр — енергію двочастинкового стану, який завжди формується у двовимірних і квазидвовимірних системах і практично виключений у звичайних тривимірних. Можна сказати й інакше: в теорії з'явився масштаб, що визначав області малих і великих густин носіїв.

Дивно, але наведена самоузгоджена і доволі складна система має аналітичний розв'язок, зміст якого дуже простий і прозорий. При цьому і параметр порядку, і хімічний потенціал визначаються енергією цього двочастинкового стану, а також, зрозуміло, концентрацією. Для незапізнюючого притягання параметр порядку, а отже, і температура переходу, з допунням

повільно зростає, а для запізнюючого — спочатку зростає, а потім виходить на значення, яке відповідає теорії БКШ. Що стосується хімічного потенціалу, то за малих концентрацій він навіть може бути від'ємним, що у стандартній теорії взагалі виключено.

Особливо яскраво це видно з рис. 2, де на якісному рівні схематично показано, що відбувається у системі при неперервному переході від малих концентрацій, коли енергія Фермі менша за енергію зв'язаного стану і пари існують як окремі утворення, до великих концентрацій. Саме першим відповідає від'ємний хімпотенціал, який зростає разом з концентрацією. В околі нуля пари починають перетинатися, а з подальшим ростом допунням хімпотенціал і енергія Фермі зрівнюються і пари перетворюються на куперівські. Останнє відповідає випадку звичайних металів і, очевидно, теорії БКШ.

6. Наступна проблема полягала у визначенні, чи є і за яких умов надпровідність у низьковимірних ізотропних системах, оскільки для них існує низка заборон, зокрема відома математикам нерівність Боголюбова, а також більш відома фізикам теорема Мерміна—Вагнера—Хоенберга і того ж Боголюбова про неможливість формування однорідного порядку в таких системах за скінченних температур, оскільки параметр порядку зазнає сильних флуктуацій. Тут треба було правильно ввести змінні і знову отримати необхідні рівняння. Навіть знехтувавши розсіянням на допантах, ми отримали систему трьох самоузгоджених рівнянь — два відповідали попереднім на параметри порядку і хімпотенціал, але для випадку скінченної температури, а от третє певною мірою постулювалося на основі фізичної аналогії зі спіновими системами, де є температура уповільнення



схожих на надпровідні фазових флуктуацій, за якої їх кореляції починають спадати степеневу, а не експоненціально. Проте у цьому разі сама «константа» взаємодії потребувала розрахунку і в результаті виявилася залежною від усіх значимих параметрів — температури, хімпотенціалу і надпровідного параметра порядку.

Температура переходу за малих концентрацій змінюється повільно, але з'являється ще одна — температура появи зв'язаних станів, або пар носіїв. Їх формування відбувається завдяки видаванню одиночних зарядів, а отже, число станів в околі поверхні Фермі зменшується, визначаючи появу зародка надпровідної щілини, названого псевдощілиною, оскільки повна щілина формується лише у надпровідному стані. О.О. Абрикосов назвав псевдощілину найбільш вражаючою особливістю, притаманною високотемпературним надпровідникам. З наших розрахунків також впливало, що канонічне співвідношення теорії БКШ, яке є числом близьким до 3, у ВТНП теж порушується і стає залежним від зразка з конкретним вмістом допантів. На експерименті вдалося досягти чисел до 8–12, що зайвий раз демонструє відмінність сімейства купратів від традиційних металічних систем.

7. Підсумовуючи, могу констатувати, що українські дослідники розробили теорію надпровідності, в якій густина носіїв, зобов'язаних своєю появою допунанню, є ключовим параметром і в якій допанти відіграють подвійну роль. Раніше значення обох цих факторів до кінця не усвідомлювали. Однак у жодному разі я не мав на меті скласти враження, що викладене є

послідовною закінченою теорією високотемпературних надпровідників. Скоріше, можна говорити, що стали більш-менш зрозумілими їхні основні особливості і окреслено шляхи до їх опису. З одного боку, наведений підхід досить загальний, а з іншого — спирається на конкретні характеристики ВТНП-систем із сімейства купратів. Скажімо, для допованих фулеритів — молекулярних кристалів з молекул фулерену, надпровідність яких (кристалів) ми теж вивчали, вона напряду не підходить, але і фулерити вдалося послідовно описати. Кілька років тому було відкрито системи з досить великими критичними температурами, що містять залізо. Для них багато чого можна використати з цієї теорії, але в конкретиці описи все ж таки різняться. Можливо, в цьому і полягає робота фізика-теоретика — знаходити відмінність і подібність, чим одночасно і збагачувати знання, і узагальнювати їх.

На завершення дещо пафосно скажу: фізика надпровідності є одним із небагатьох напрямів фізики, який має *провідну зорю*, тобто завдання, зрозуміле навіть людям, далеким від науки. Це пошук речовин, температура переходу яких у надпровідний стан була б на рівні кімнатної. Уже виник термін *кімнатнотемпературна надпровідність*, і сьогодні немає людини, яка б знала, як цього досягти, як і немає людини, яка б висловила з приводу цього принципові заперечення. Тому хотілося б вірити, що ця омріяна задача має розв'язок, і він виявиться «по зубах» наступним поколінням дослідників, зокрема наших, на яких ми всі заждалися.

Щиро дякую за увагу і терпіння.