



БІОЛОГІЧНА чи існує НАДПРОВІДНІСТЬ?

*Ви обриваєте дрони –
Та струм продовжує текти.*
Із сучасної
української поезії

У 1911 році нідерландський фізик Г. Камерлінг-Оннес відкрив нове явище: *при температурі рідкого гелію $T \approx 4.3$, питомий опір ртуті стрибком зменшувався до нуля і виникав надпровідний стан: без зовнішнього джерела струм по провіднику міг протікати як завжди довго.*

З цієї події розпочалась повна драматизму історія досліджень надпровідності – одного з найдивовижніших фізичних явищ. Багато років його природа залишалась незрозумілою. Пройшло не одне десятиліття, знадобилися зусилля кількох поколінь фізиків, щоб розкрити його механізм. Надзвичайну важливість цього відкриття підтверджує той факт, що Г. Камерлінг-Оннесу, а згодом і американським вченим Дж. Бардіну, Л. Куперу та Дж. Шріфферу, які пояснили це явище, було присуджено Нобелівські премії з фізики.

Проте історія на цьому не закінчилась. 1986 рік, коли було відкрито так звану високотемпературну надпровідність, ознаменував початок нової ери у дослідженнях цього явища. Перспектива енергетичної та технологічної революції



Г. Камерлінг-Оннес (1853–1926)

сприяла залученню до роботи тисяч наукових закладів по всьому світу. В лексикон увійшло словосполучення «надпровідний бум». Однак сподівання на швидкий прорив та легкі гроші не виправдалися. Досі принципів питання теорії та використання високотемпературних надпровідників залишаються без відповіді.

Про надпровідність написано сотні монографій та десятки тисяч наукових статей. Існує чимало науково-популярних публікацій, розрахованих на різний рівень підготовки читача. У цьому нарисі мова піде про одне з маловідомих відгалужень фізики надпровідності, а саме – спроби теоретичного обґрунтування та експериментального підтвердження існу-

вання надпровідного стану в живих системах.

У науках, що традиційно вивчають Живе, існує чимало означень, які запозичені із лексикону сучасної фізики. Причини тому можуть бути різними: спільність проявів, схожість математичних моделей, зручність формального опису тощо. Іноді за яскравим фізичним терміном приховане емоційне ставлення до явища, яке не піддається простому поясненню.

Біологічна надпровідність – це більше, ніж зручний термін. Заповітною мрією дослідників надпровідності з моменту її відкриття завжди було знаходження речовин, які переходять у надпровідний стан при якомога більш високих температурах, бо рідкий гелій занадто дорогий. Як «задача мінімум» розглядалося досягнення температури відносно дешевого рідкого азоту ~ 80 K, а як «максимум» – кімнатних (а також і фізіологічних) температур. Існування «живої надпровідності» гарно вписалося в деякі умоглядні гіпотези щодо орієнтування птахів у магнітному полі Землі, розповсюдження нервового імпульсу тощо.

Вперше припущення про можливість надпровідного стану у великих органічних молекулах, що виникає за кімнатної температури, висловив у 50-х роках XX ст. англійський фізик

Ф. Лондон – один із розробників *макроскопічної електродинаміки надпровідників*. Незважаючи на великий авторитет вченого, його ідея викликала скептичне ставлення наукової спільноти. І підстави для того були цілком слушними. Аби зрозуміти суть справи, необхідно розглянути – хоча б і дуже спрощено – мікроскопічний механізм формування надпровідного стану.

Пояснення фізичної природи надпровідності базується на трьох фундаментальних положеннях.

Перше: надпровідність – суто квантове явище і тому вимагає для свого опису залучення квантової механіки, в рамках якої система описується за допомогою хвильової функції. Ця функція є розв'язком рівняння **Шредингера** і визначає енергію, що відповідає тому або іншому стану системи.

Друге: надпровідність – це колективне явище. Певний квантовий стан формує не одна частинка (електрон, атом чи молекула), а величезний колектив частинок, який можна описати єдиною хвильовою функцією. Поведінка такого колективу характеризується високою синхронізованістю у часі і просторі, або когерентністю (лат. *cohaerentia* – зв'язок, зчеплення).

У надпровідності є близький родич – надплинність – ще один яскравий приклад квантового колективного явища. Якщо гелій охолодити нижче температури зрідження, він втрачає в'язкість, тобто рідина рухається без тертя. Аби зрозуміти, у чому полягає зв'язок квантової фізики із рухом без тертя, скористаємось аналогією з атомом водню. Добре відомо, що атом водню складається з важкого позитивно зарядженого ядра, навколо якого обертається легкий негативно заряджений електрон. Однак, обер-

тання електрона довкола ядра по орбіті суперечить законам класичної фізики, оскільки рух зарядженої частинки по колу (тобто, з прискоренням) мав би супроводжуватись випромінюванням електромагнітних хвиль, і, відповідно, втратою енергії.

Славетний **датський фізик Н. Бор** висловив припущення, що електрони в атомі можуть знаходитись не будь-де, а лише в певних квантових станах. Кожному стану відповідає своя стаціонарна орбіта. Поглинання чи випромінювання енергії атомом можливе лише при переходах електронів з одного стану (орбіти) в інший, що лежать вище чи нижче по енергії. Отже, можна сказати, що електрони по орбіті «рухаються без тертя».

Повернімось до квантової рідини. Нехай у неї є найнижчий по енергії стан, який називається основним, а також інші – збуджені – що розташовуються вище по енергіях. Якщо різниця енергій між основним та збудженим станом мала, рідина може легко приймати та віддавати будь-яку енергію, а отже, її рух супроводжується тертям. Якщо ж збуджені стани відділені від основного деяким інтервалом (який називають енергетичною щільною), можливий рух без тертя. Щільна заважає переходити рідині у вищий енергетичний стан.

Цілком природними можна вважати спроби пояснити надпровідність як надплинність своєрідної «електронної рідини». Однак виявилось, що зробити це не так просто, оскільки на заваді стоїть **третє фундаментальне положення**.

Виявляється, що усі частинки у мікросвіті підкоряються певній статистичній, а побутовою мовою – правилам поведінки в

колективі. Ці правила залежать від власного механічного моменту або спіну частинки. На жаль, простої аналогії цій квантовій характеристиці в оточуючому нас світі немає. Дуже умовно про спін можна казати, як про характеристику обертання частинки навколо своєї осі.

Спін мікрочастинок може набувати цілих або напівцілих значень. Одиницею вимірювання спіну є *стала Планка* ($h = 1.05 \cdot 10^{-31}$ Дж с). Якщо частинка має цілий спін: 0, h , $2h$..., вона називається **Бозе-частинкою**, на честь індійського фізика **Ш. Бозе**. Частинки з напівцілим спіном ($h/2$, $3h/2$...) називають **Фермі-частинками**, на честь італійського фізика **Е. Фермі**. Властивості Бозе- та Фермі-частинок суттєво відрізняються.

Спін атомів гелію дорівнює нулю, тому рідкий гелій є Бозе-рідиною. Фундаментальна властивість Бозе-частинок – намагання зайняти один стан, тобто, усі частинки начебто притягуються одна до одної (Рис.1-а). В результаті, для Бозе-рідини природним є існування колективного стану, який може призвести до руху без тертя – надплинності.

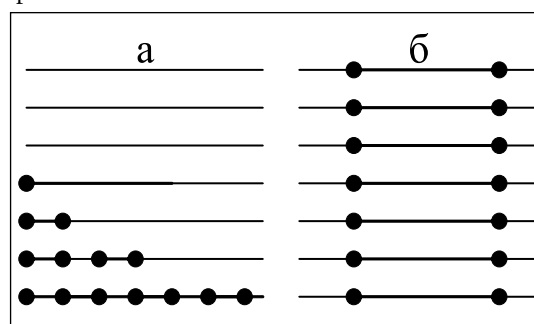


Рис.1. Розподіл Бозе- та Фермі-частинок за квантовими станами. Бозе-частинки (а) тяжіють до єдиного колективу, і за низької температури здатні заповнити один найнижчий енергетичний рівень. Фермі-частинки (б) за будь-якої умови рівномірно розподіляються енергетичними рівнями: на кожному з них одночасно може знаходитися лише по дві частинки з протилежними спінами

Для Фермі-частинок (до яких належать електрони) ситуація виявляється протилежною: Фермі-частинки не можуть мати однакові характеристики. Це фундаментальне правило називають **принципом Паулі**, на честь швейцарського фізика, який його відкрив. Наслідком принципу Паулі є те, що Фермі-частинки начебто намагаються відштовхнутися одна від одної. Відповідно, утворення спільного колективу з таких частинок уявляється проблематичним (Рис.1-б).

Єдиний можливий шлях – це якимось чином створити з електронів Бозе-частинки, тобто, зв'язати їх у пари, щоб сумарний спин дорівнював 0 або $\hbar$. Відшукати відповідний механізм виявилось непросто. **Як примусити однойменно заряджені частинки притягуватися?**

Однак зусиллями багатьох дослідників врешті вдалося розв'язати і цю складну задачу. Виявилось, що пояснення слід шукати у взаємодії електронів з кристалічною решіткою.

Стисло цей механізм можна уявити так (Рис. 2). Електрон, що рухається крізь решітку, своїм не-

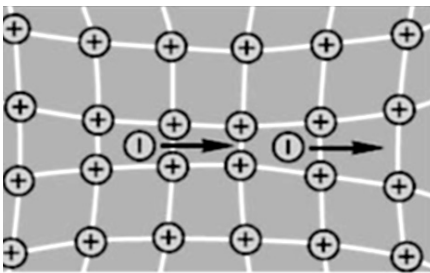
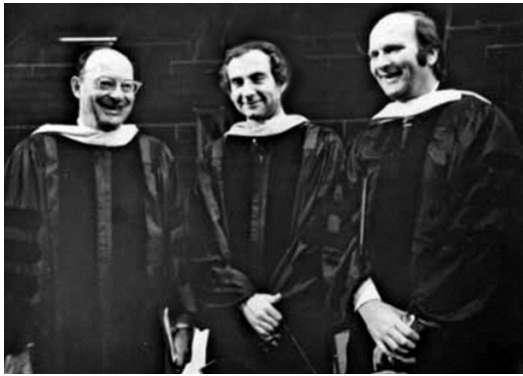


Рис. 2. До пояснення механізму спарювання електронів за Бардіном, Купером та Шріффером

гативним зарядом притягує позитивно заряджені іони, що розташовані у вузлах. Однак іони значно важчі за електрон. Тому виникає ситуація: електрон вже давно пройшов, а іони лише встигли підтягнутися до відповідного місця. Тобто, у цьому міс-



Дж. Бардін, Л. Купер, Дж. Шріффер – Нобелівські лауреати з фізики

ці утворився невеликий надлишковий позитивний заряд, і другий електрон, що рухається поблизу, відчує це і притягнеться туди. Таким чином, кристалічна решітка сприяє слабкому притягуванню між електронами. Відповідним чином утворена пара електронів називається **куперівською парою**, на честь одного з розробників мікроскопічної теорії надпровідності Л. Купера.

В квантовій фізиці поведінка кристалічної решітки описується у термінах збуджень квазічастинок – **фононів** – які є елементарними пружними хвилями решітки. Відповідно, описаний механізм утворення пар називають **фононним**. Умовою його реалізації є дуже низька температура, оскільки навіть незначні теплові коливання решітки призводять до неможливості утворення пар. Саме це і пояснює скептичне ставлення більшості вчених до терміну «**біологічна надпровідність**».

В 60-х роках, завдяки публікаціям професора Стенфордського університету **У. Літтла** в провідних наукових журналах «Physical Review», «Scientific America» та «Успехи Физических Наук», тема біологічної надпровідності знову привернула до себе увагу наукової спільноти.

У своїй статті з красномовною назвою «**Надпровідність за кімнатної температури**» У.Літтл, зокрема, зазначав: «Як і Ф.Лондон, я був уражений надзвичайною стійкістю надпровідного стану; в мене виникла думка, що якщо Природа хоче

зберегти інформацію, наприклад, у генетичному коді живого об'єкта від руйнівної дії тепла чи інших зовнішніх впливів, то принципи, що лежать в основі явища надпровідності, виявляються цілком придатними для цієї

мети. Маючи на увазі неповторну винахідливість Природи у таких речах, я подумав про те, що було б корисно з'ясувати, чи не можуть виявлятися надпровідні стани у великих органічних молекулах, побудованих вздовж основних ланцюгів генетичних молекул дезоксирибонуклеїнової кислоти (ДНК)».

Головна ідея У.Літтла полягала у тому, що для формування куперівської пари необхідно знайти «посередника» – квазічастинку, яка могла б за конкретних умов забезпечити притягування двох однойменно заряджених електронів.

Як ми вже з'ясували, за дуже низької температури таким посередником виступає фонон. Але ж квантова фізика твердого тіла, крім фононів, використовує ще чимало типів квазічастинок – це **полярони, ексітони, магнони** тощо. І кожна з цих квазічастинок може розглядатись як потенційний претендент на роль того самого «посередника», який би забезпечив надпровідний стан при більш високій температурі.

Розрахунки показали, що конкретна модель, запропонована У.Літтлом, виявилась неефективною. Однак відтоді до пошуків нефононних механізмів спарювання електронів долучилися й інші вчені.

(Далі буде)

А.В. Якунов,

кандидат фізико-математичних наук, кафедра оптики фізичного факультету КНУ імені Тараса Шевченка