



БІОЛОГІЧНА чи існує НАДПРОВІДНІСТЬ?

(Закінчення.
Початок у №2-3 2010)

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

Нова ера у дослідженнях розпочалась у жовтні 1986 року, коли австрійські фізики **Г. Беднорц** та **К. Мюллер** повідомили про «*ймовірне спостереження надпровідності*» при температурі 30°К. Обережність висловлювань авторів пояснюється просто: могло йтися про сенсаційне відкриття, значення якого важко переоцінити – високотемпературну надпровідність. Результат австрійських вчених не лише відтворили, а й швидко перевершили: протягом наступних кількох років було знайдено багато сполук, у яких температура переходу до надпровідного стану була вищою, ніж у рідкого азоту.

Головною особливістю нових надпровідних матеріалів було те, що усі вони належали до керамік, а отже – при температурах, вищих за критичну, майже не проводили струм, оскільки були ізоляторами. Фоновий механізм спарювання електронів у таких матеріалах не працював. Що ж тоді примушує електрони, яких у кераміках у вільному стані дуже мало, шукати собі пару? Ідеї **У. Літтла** одразу набули актуальності і з

суто теоретичної площини перейшли в практичну.

Оригінальний механізм спарювання електронів при високій температурі запропонував наш видатний співвітчизник академік **А.С. Давидов**. У № 4 журналу «Країна знань» за 2009 рік у статті «*Цунамі у білковій молекулі*» йшлося про нелінійні коливальні збудження у молекулярних системах, які назвали *солітонами* і які виявились здатними ефективно переносити енергію пружної деформації вздовж спіральних білкових молекул. А.С. Давидов показав, що солітони не лише переносять енергію по довгих молекулах, а ще й ефективно транспортують по них електричні заряди, чого вимагають деякі біологічні процеси, зокрема, фотосинтез, клітинкове дихання, ферментативна активність тощо.

Нагадаємо, що у довгому молекулярному ланцюгу за певних умов може утворитися усамітнена пружна хвиля, яка здатна рухатись вздовж ланцюга без втрат енергії. У білкових молекулах роль складових ланок грають пептидні групи, які внаслідок несиметричного розподілу електричних зарядів мають значний дипольний момент. Така сильно поляризована ділянка молекули утворює своєрідну пастку — «*потенцій-*

ну яму», у яку може потрапити зовнішній електрон. Заряджена частинка буде переміщуватися вздовж ланцюга разом з усамітненою пружною деформацією — солітоном. *Зв'язану систему солітон + електрон назвали «електросолітоном»*. Це утворення вже само по собі містить ознаки надпровідного стану, оскільки заряд рухається без розсіювання на кристалічній ґратці, тобто – без втрат енергії.



Рис.3 Електросолітон можна уподібнити спортсмену-сюрфінгісту, який рухається на спеціальній дошці разом із хвилею

Виявилось, що ознаки надпровідності можуть бути ще більш суттєвими. Ланцюжок пептидних груп здатний утримувати не лише один, а й два електрони з протилежними спінами. Причому, утримувати пару навіть легше, оскільки другий електрон поглиблює потенціальну яму. Завдяки більшій стійкості саме «*бісолітону*» приписують головну роль у біологічних

процесах, які зв'язані з переносом електронів від донорних молекул до акцепторних через молекулярні структури.

Вчені досить швидко знайшли можливість застосувати солітонний механізм для пояснення високотемпературної надпровідності в кераміках. Очевидно, що *бісолітон* – це *бозе-частинка*. Розрахунки показали, що при концентраціях, вищих за деяке критичне значення, бісолітони утворюють *бозе-конденсат* – колективний стан з періодичним розташуванням бісолітонів, що рухаються як єдине ціле без опору. Хоча остаточна картина залишається нез'ясованою, на сьогодні бісолітони вважаються одними з ймовірних претендентів на роль носіїв струму у високотемпературних надпровідниках.

Повернімось до білкових молекул. Отже, в білках існує необхідна умова виникнення надпровідності – два електрони, зв'язані у «куперівську» пару (з огляду на автора відповідного механізму, її доречніше було б назвати «давидівською»). Однак, існування такої пари – ще не означає існування надпровідності у класичному розумінні. Головна проблема – яким чином і за яких умов може утворитись бозе-конденсат? Для керамік такі умови знайдено, для біологічних молекул – поки що ні.

Фізикам-теоретикам є надчим поміркувати. Стимулом для цього можуть бути результати спеціально поставлених експериментів, достовірність яких підтверджується високим рівнем відповідних наукових публікацій.

Спробуємо з'ясувати: які експерименти могли б свідчити на користь існування надпровідності у живих системах? Проходження струму вздовж молекулярного ланцюжка зафіксувати дуже важко, враховуючи і мізерну величину самого струму, і мікроскопічні масштаби систе-

ми. Але явище надпровідності цікаве не лише наявністю нульового опору. Надпровідники виявляють й інші незвичайні властивості, зокрема, магнітні.

Нагадаємо, що магнітні властивості речовини характеризуються магнітною проникністю μ , яка визначає знак та силу взаємодії із зовнішнім магнітним полем. За величиною магнітної проникності речовини поділяються на пара- ($\mu > 0$), діа- ($\mu < 0$) та феромагнетики ($\mu \approx 0$). У природних діамagnetиків (цинк, ртуть, кремній, вісмут, графіт) $10^{-7} \leq \mu \leq 10^{-4}$, і вони ледь помітно послаблюють магнітне поле усередині себе. Це явище можна зафіксувати лише за допомогою чутливих приладів.

Натомість, з об'єму надпровідника зовнішнє магнітне поле виштовхується повністю (*ефект Мейснера*). Тому надпровідник вважається ідеальним діамagnetиком.

Ще більш дивним явищем є так зване квантування магнітного потоку: магнітний потік, створений контуром з надпровідним струмом, може набувати лише певних значень, кратних елементарному магнітному потоку

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ А} \cdot \text{м}^2,$$

де e – заряд електрона, h – стала Планка.

Але і це ще не все. Система з двох надпровідників, розділених тонким шаром ізолятора демонструє дивовижні явища (так звані, *стаціонарний та нестаціонарний ефекти Джозефсона*¹), аналогів яких немає у природі. Розглянемо їх детальніше.

¹ Відзначимо, що англійський фізик Брайан Джозефсон, чийм ім'ям названо теоретично передбачені ним ефекти, – один з наймолодших лауреатів Нобелівської премії. Він отримав її у 36 років. Останні роки Б.Джозефсон активно вивчає можливості застосування квантової механіки до опису процесу мислення.

В межах кожної з надпровідних областей колектив заряджених частинок описується єдиною хвильовою функцією, яку прийнято позначати грецькою літерою ψ («psi»). Вираз $(\Psi(x))^2 \cdot dx$ має фізичний зміст ймовірності знаходження частинки в інтервалі dx . Хвильова функція не обмежена лише об'ємом надпровідника, а дещо виходить за його межі. Якщо дві надпровідні області знаходяться достатньо близько одна від одної, відповідні хвильові функції можуть перекриватися (Рис.4).

Два надпровідники, розділені тонким шаром ізолятора, називають джозефсонівським контактом. З огляду на фізичний зміст хвильової функції впливає, що заряджена частинка (точніше – куперівська пара електронів) має деяку ймовірність опинитись у сусідньому надпровіднику. А перенесення заряду з однієї області в іншу означає ні що інше як протікання струму. Отже, через джозефсонівський контакт може протікати струм за відсутності різниці потенціалів. Описане явище носить назву стаціонарного ефекту Джозефсона.

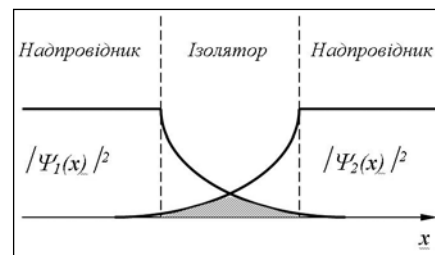


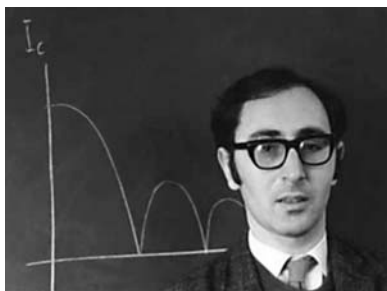
Рис.4 Джозефсонівський контакт. Заштрихована ділянка визначає область простору, де хвильові функції перекриваються

При наявності на контакті різниці потенціалів протікання струму супроводжується випромінюванням або поглинанням електромагнітних хвиль. Це явище пояснюється з міркувань закону збереження енергії: переходячи з одної надпровідної об-

ласті в другу пару електронів повинна «скинути» або «запозичити» енергію, що дорівнює енергії потенційного бар'єру. Зв'язок між частотою випромінювання n та різницею потенціалів u на контакті називається **співвідношенням Джозефсона**:

$$2eU = \hbar n.$$

Зауважимо, що нестаціонарний ефект Джозефсона застосовується для вимірювань електричних та магнітних величин з великою точністю.



Лауреат Нобелівської премії з фізики Брайан Джозефсон

Зусилля експериментаторів були спрямовані на пошуки саме побічних проявів надпровідності. Вражаючих успіхів на цьому шляху досяг англійський радіофізик **Сіріл Сміт** з університету містечка Солфорд, що на півдні Англії.

Як це часто буває у фізиці, знайти відправну точку допоміг випадок. С. Сміт займався вимірюванням діелектричної проникності біологічних рідин для потреб медичної діагностики. У водних розчинів деяких білків, зокрема, лізоциму, діелектрична проникність трохи відрізнялась від очікуваної. Для повноти картини і збільшення точності підрахунків у тих самих розчинів було поміряно й магнітну проникність.

На великий подив дослідника за певних концентрацій розчини поводити себе як діаманетики. Пояснити цю аномалію наявністю у біологічних молекулах якихось природних діаманітних домішок було неможливо. С. Сміт висловив над-

звичайно сміливу гіпотезу про існування у розчинах лізоциму та деяких інших білків мікрообластей з ознаками надпровідного стану. За його словами, схожа картина мала б місце, якби мікроскопічні краплинки ртуті помістили у рідкий гелій.

Протягом наступних років англійському фізику вдалося знайти ще кілька експериментальних підтверджень для свого припущення. Зокрема, залежність швидкості розмноження бактерій від індукції зовнішнього магнітного поля нагадувала сходи. Ширина сходів була приблизно однаковою, і, з урахуванням розмірів бактерії, відповідала величині магнітного потоку порядку $2 \cdot 10^{-15} \text{ Å}^2$ (!). Саме це спонукало С. Сміта вельми обережно висловитись про спостереження ним квантування магнітного потоку, що нібито відбувається біля деяких біологічних молекул.

Ці дослідження неабияк зацікавили вчених, і у наступні роки експерименти за методикою С. Сміта було відтворено у різних умовах. На жаль, однозначних результатів вони не виявили, і розмови про можливе існування надпровідності у біологічних об'єктах поступово вщухли.

Усі заспокоїлись, окрім самого С. Сміта, який був впевнений у правильності своїх висновків. Вченому знадобилось майже 10 років для проведення, як він вважав, вирішального експерименту.

С. Сміт здійснив операцію, яка за масштабами аніскільки не поступається роботі легендарного тультського Лівші, що підкував блоху. Англійський радіофізик примудрився приєднати до живої дріжджової клітини, не травмувавши її (нагадаємо, розміри клітини – кілька мікрометрів), електроди та виконати електричні вимірювання під час клітинного поділу.

Перше, що було відзначено: у момент брунькування (тобто, утворення нового організму з виростів тіла материнського організму) клітина генерує змінний електричний струм з частотою близько 10 МГц.

У самому факті такої генерації немає чогось дивного чи загадкового. Під час поділу відбувається розділення цитоплазми, мембрани, інших клітинних компонентів, що супроводжується перерозподілом електричного заряду. Це, в свою чергу, зумовлює певні збурення та коливання електричного поля навколо клітини. Викликає подив те, що випромінювання клітини має цілком певну частоту і нагадує радіосигнал.

Також було знято вольт-амперну характеристику: залежність струму через клітину від різниці потенціалів на електродах. Виявилось, що ця залежність також нагадувала сходи, тобто, закон Ома для живої клітини не працював! Найдивовижніший результат було отримано вже після аналізу отриманих даних: зв'язок між частотою електричного сигналу n та шириною сходинки на вольт-амперній характеристиці ΔU визначався співвідношенням Джозефсона (!!!). Можна було б вважати цей збіг чистісінькою випадковістю, якби не разюча схожість вольт-амперних характеристик класичного Джозефсонівського контакту та дріжджової клітини (Рис.5-а, 5-б).

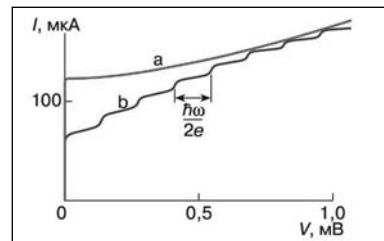


Рис.5-а Вольт-амперні характеристики джозефсонівського контакту: а – без зовнішнього високочастотного електромагнітного поля, б – поле включене

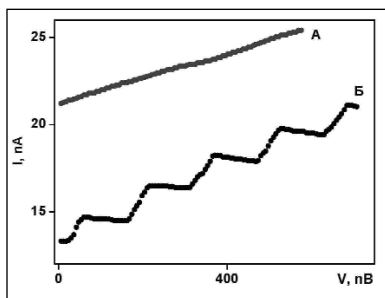


Рис.5–6 Вольт–амперні характеристики дріжджової клітини в середній фазі циклу (а) та під час поділу (б). Зі статті С.Сміта в журналі Physica Scripta за 1989 р.

Результати експериментів Сіріла Сміта могли б викликати у науковому світі гучну сенсацію, але сталося по-іншому.

У 1992 році автору цієї статті пощастило поспілкуватися з англійським вченим, коли той приїздив на міжнародну наукову конференцію у Київ. Серед інших тем йшлося й про біологічну надпровідність. Доктор С.Сміт висловив жаль з того приводу, що до його гіпотези мало хто дослухався до 1986 року, бо майже ніхто не вірив у високотемпературну надпровідність. А після відкриття Беднорца і Мюллера в неї одразу ж повірили та кинулись наввипередки досліджувати надпровідні кераміки.

До експериментів з дріжджами, як-то кажуть, руки досі не дійшли, хоча у сучасній фізичній лабораторії за наяв-

ності кваліфікованих інженерів відтворити (чи спростувати) результати С.Сміта було б неважко. Тим більше, що вчений сам зацікавлений у такій перевірці і готовий поділитися усіма тонкощами експерименту.

Насамкінець повернімось до питання, яке винесене у назву статті: «Чи існує біологічна надпровідність?». Остаточну відповідь на нього мають дати лише подальші дослідження. Зазначимо, що останнім часом в оглядових статтях та монографіях, присвячених високотемпературній надпровідності, проблема надпровідності у живих системах обговорюється все жвавіше, і це вселяє оптимізм.

P.S. Свіжа інформація по темі (мовою оригіналу)

(<http://ban-samoilenko.narod.ru/questions/fauna/075.htm>)

Возможна ли в живой природе сверхпроводимость?

Бионикам удалось выяснить, что разыскивая пищу, самку или ориентируясь в пространстве, насекомые зачастую используют инфракрасную радиацию, принимая её с помощью волосков и щетинок, соединённых со специальными чувствительными клетками. Эта система одновременно является резона-

тором, детектором и излучателем. А для передачи энергии в этой системе должны быть конструкции, подобные волноводам, поперечные размеры которых сопоставимы с размерами длины волны инфракрасного излучения. А для передачи насекомые применяют волноводные щелевые антенны, где передаваемая энергия излучается через специальный раструб.

Исследования при помощи электронного микроскопа подтвердили эту мысль. В щетинках и усиках действительно были обнаружены отверстия, расположенные вдоль одной линии. Всё это напоминало волновод. Расчёты показали, что материал волновода для выполнения своих функций должен обладать сверхпроводящими свойствами!

Так что не исключено, что мы по подсказке природы сможем воссоздать высокотемпературную сверхпроводимость, даже при температурах, не намного превышающих комнатную.

А.В. Якунов,

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

ЗАДАЧІ ДЛЯ КМІТЛИВИХ

2009 рік був оголошений Міжнародним роком астрономії. Цікаво було спостерігати на ювілейних заходах, як по-різному ставляться до цієї давньої науки школярі. Пропонуємо вам декілька задач про орбітальний рух, які потребують від вас не тільки знань, а й кмітливості, і вміння аналізувати.

6.1. Коли земляни швидше рухаються навколо Сонця — опівночі чи опівдні?

6.2. Коли Земля швидше обертається навколо Сонця — взимку чи влітку?

6.3. Астрономи встановили, що швидкості окремих частин кільця Сатурна не пропорційні їхнім відстаням до осі обертання. До якого висновку про структуру кільця повинні були прийти вчені?

6.4. Сонце притягує Місяць вдвічі сильніше, ніж Земля. Чому ж тоді Місяць — супутник Землі, а не самостійна планета?

6.5. Чи можуть планета та її супутни рухатися по еліптичній орбіті рівномірно?