

Грудінін Д.Ю., Русаков В.Ф.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський проспект, 37, Київ,
email: dmygryk@gmail.com*

ЕВОЛЮЦІЯ ТЕОРЕТИЧНИХ УЯВЛЕНЬ ПРО НАДПРОВІДНІСТЬ

Анотація. В роботі розглянуто еволюцію фізики надпровідності від відкриття явища до сучасного стану. Акцентовано увагу на основних досягненнях, які привели до розуміння природи явища і можливості його використання як у наукових дослідженнях, так і практичному застосуванні.

Abstract. This paper examines the evolution of superconductivity physics from the discovery of the phenomenon to the present day. The main achievements that led to the understanding of the nature of the phenomenon and the possibility of its use in both scientific research and practical application are emphasized.

Ключові слова: низькі температури, надпровідність, надпровідник, змішаний стан надпровідника, теорія БКШ, вихор Абрикосова, критичне магнітне поле, критичний струм.

Keywords: low temperatures, superconductivity, superconductor, mixed state of superconductor, BCS theory, Abrikosov's vortex, critical magnetic field, critical current.

Енергетична проблема є однією з найактуальніших для людства, тому розвиток енергоощадних технологій набуває пріоритетного значення. Явище надпровідності полягає у зникненні електричного опору в провіднику під час протікання струму за певних умов. Використання надпровідників може зробити суттєвий внесок в енергозбереження, оскільки дозволяє звести втрати електроенергії до 1–2%. Саме цим зумовлюється висока актуальність проблеми надпровідності.

Метою даної роботи є аналіз еволюції теоретичного вивчення цього унікального фізичного явища.

Після відкриття надпровідності у 1911 році голландським вченим Г. Камерлінг-Оннесом [1], протягом наступних 20–30 років було досягнуто значних експериментальних успіхів у дослідженні цього явища. Проте для цілеспрямованого пошуку матеріалів, здатних до надпровідності, необхідним

було розуміння фізичних принципів цього явища: виникла потреба у створенні теорії надпровідності.

При подальшому дослідженні надпровідників з'ясувалося, що вони мають цікаві фізичні властивості. Зокрема, магнітний і надпровідний стани провідника несумісні. Так, якщо провідник знаходиться у надпровідному стані, то магнітне поле (до певної величини напруженості, яке називається критичним магнітним полем, H_c) в нього не проникає; а при охолодженні зразка у магнітному полі, після його переходу у надпровідний стан, магнітне поле виштовхується з нього. Цей ефект був відкритий В. Мейснером і Р. Оксенфельдом у 1933 році. Теоретичне пояснення було дано братами Ф. Лондоном і Х. Лондоном [2]. Отримані ними у 1935 році рівняння (рівняння Лондонів) встановлюють зв'язок між струмом та магнітним полем у надпровідниках. Вони дали перші задовільні пояснення ефекту Мейснера. З них випливає висновок про існування незатухаючих струмів поблизу поверхні надпровідника, які створюють внутрішнє магнітне поле, що спрямоване протилежно до зовнішнього, прикладеного магнітного поля, і компенсує його. Крім того, було з'ясовано, що коли струм, що протікає по надпровіднику, перевищує певне значення (воно називається критичним струмом, J_c), то надпровідний стан також руйнується – ефект Сілсбі. Це відбувається, оскільки струм створює магнітне поле, яке при досягненні критичного значення руйнує надпровідний стан.

Л.Д. Ландау першим увів трактування надпровідності як надплинності електронної рідини у металах у 1941 році. У 1950 році В.Л. Гінзбургом і Л.Д. Ландау була запропонована феноменологічна теорія, яка отримала назву теорії надпровідності Гінзбурга–Ландау [3]. Теорія містила параметри, які підлягали незалежному визначенню.

Мікроскопічна теорія була запропонована у 1957 році американськими фізиками Д. Бардіним, Л. Купером і Д.Р. Шріффером (БКШ-теорія). В її основу була покладена ідея Л. Купера [4], що за рахунок взаємодії з іонами за певних умов між електронами може виникнути притягування, в результаті якого електрони об'єднуються у так звані куперівські пари, які починають поводитися як бозони і перестають зіштовхуватися з іонами решітки. В результаті їхньої конденсації з'являється надпровідність. Ще однією особливістю надпровідного стану є наявність енергетичної щілини у спектрі елементарних збуджень носіїв, що робить надпровідний стан до певних температур стійким до теплових збурень.

Історично, БКШ-теорія була першим поясненням зникнення опору провідників при низьких температурах, виходячи з квантово-механічних

принципів. Сьогодні вона переважає у поясненнях низькотемпературної надпровідності (НТНП). Під час створення теорії було враховано квантові властивості руху електронів у кристалічній ґратці. Ефективне притягування може виникати лише між тими електронами, енергії яких відрізняються від енергії Фермі не більше ніж на величину енергії Дебая. Можна сказати, що ефект надпровідності є проявом квантових властивостей електронів на макроскопічному рівні. Автори теорії отримали за неї Нобелівську премію з фізики за 1972 рік.

Попри значні успіхи, теорія БКШ не пояснила існування змішаного стану надпровідників (Шубніковської фази). Заслуга у розв'язанні цієї задачі належить А.А. Абрикосову, який, базуючись на роботах Л.В. Шубнікова і на теорії Гінзбурга–Ландау, у 1957 році [5] запропонував розглядати входження магнітного поля у надпровідник, без руйнування надпровідного стану, у вигляді магнітних вихорів (вихорів Абрикосова), осердя яких знаходиться у нормальному стані і містить магнітне поле, а по периметру течуть вихрові струми, що його екранують і не пропускають в об'єм надпровідника. Абрикосов увів поняття надпровідників I і II роду. Абрикосов, Гінзбург та Лепетт отримали Нобелівську премію у 2003 році.

Теорія БКШ, як вже сказано, добре пояснювала НТНП, але при розгляді високотемпературної надпровідності (ВТНП) виникли значні проблеми. Класичний куперівський механізм спарювання електронів тут не працює у повному обсязі. Це, напевно, пов'язано зі специфічною, шаруватою структурою ВТНП. Сьогодні, хоч пройшло вже майже 40 років від відкриття ВТНП, немає єдиної теорії, яка б її пояснювала. Запропоновано декілька механізмів, серед яких – спін-флуктуаційний механізм: спарювання електронів відбувається за рахунок спінових флуктуацій.

Отже, попри відсутність наразі єдиної загальноприйнятої теорії надпровідності, постійно з'являються нові гіпотези, що пояснюють окремі аспекти цього складного явища. Кожна з них робить свій внесок у формування майбутньої узагальненої теоретичної моделі. Імовірно, така теорія не ґрунтуватиметься на одному універсальному принципі, як, наприклад, теорія БКШ, а стане комплексом взаємопов'язаних моделей, об'єднаних спільною методологічною основою.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Kamerlingh Onnes, H. (1911). *Communications Leiden* (pp. 81–83). University of

Leiden.

[2] London, F., & London, H. (1935). The electromagnetic equations of the superconductor. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A – Mathematical and Physical Sciences*, 149(866), 71–88. <https://doi.org/10.1098/rspa.1935.0048>

[3] Гинзбург, В. Л., и Ландау, Л. Д. (1950). К теории сверхпроводимости. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 20(12), 1064–1082.

[4] Cooper, L. N. (1956). Bound electron pairs in a degenerate Fermi gas. *Physical Review*, 104(4), 1189–1190. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.104.1189>

[5] Абрикосов, А. А. (1957). О магнитных свойствах сверхпроводников второй группы. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 32(6), 1442–1452.