

9

PÅ JAGT EFTER NYE SUPERLEDERE

Af
BRIAN MØLLER ANDERSEN
LEKTOR, PH.D.
NIELS BOHR INSTITUTET,
KØBENHAVNS UNIVERSITET

MODTAGET
CARLSBERGFONDETS
DISTINGUISHED ASSOCIATE
PROFESSOR FELLOWSHIP
TIL PROJEKTET
*SUPERCONDUCTIVITY OF
NEW MATERIALS*

Tænk dig en verden hvor man kan transportere strøm helt uden modstand, og hvor man kan oplagre energi i super-batterier helt uden tab. Hvis der fandtes superledende materialer ved temperaturer behagelige for mennesker, ville denne revolution være en realitet. Jagten er derfor sat ind på at finde nye superledere med denne (samt andre) eftertragtede egenskaber.

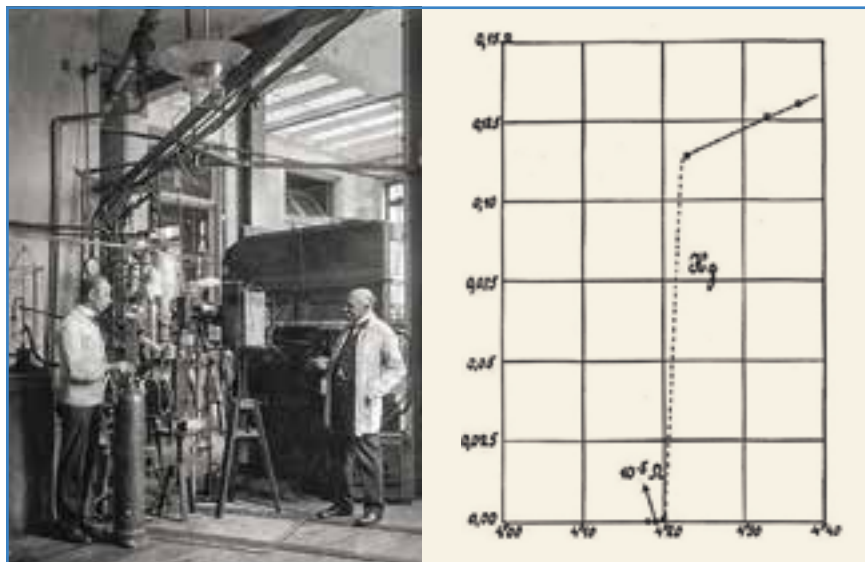
Lidt historie om fænomenet superledning

Den 8. april 1911 opdagede en forskningsgruppe ledet af Professor Heike Kamerlingh Onnes noget virkelig besynderligt i deres laboratorium i Leiden, Holland. Der havde de forinden formået at lave flydende helium, som kunne bruges til at nedkøle metaller til hidtil uset lave temperaturer, og da de målte modstanden gennem en ledning bestående af kviksølv nedsænktes i den flydende helium, observerede de at modstanden fuldstændig forsvandt ved 4.16 Kelvin, dvs. -269 grader Celcius. Årsagen var ikke en simpel kortslutning i det elektriske kredsløb, og modstanden var ikke bare meget lille, men virkelig umålelig lille. Som Onnes selv sagde det: "Mercury has passed into a new state, which on account of its extraordinary electrical properties may be called the superconductive state."¹ At modstanden fuldstændig forsvandt var ikke bare en banebrydende opdagelse, men faktisk i direkte modstrid med en af datidens store fysikere, Lord Kelvin, som havde forudsagt at ved de laveste temperaturer ville elektronerne "ligge helt stille", hvorfor modstanden måtte blive uendelig stor.

Onnes' opdagelse blev startskuddet til cirka 50 års ørkenvandring hvor de bedste fysikere, bl.a. Niels Bohr og Albert Einstein, prøvede at forklare det nye fænomen.² Det var først med forståelsen af mange-partikel kvantemekanik at man i 1957 opnåede en mikroskopisk forståelse for superledning³ som kan forklare ikke bare nul-modstanden, men også mange af de andre fascinerende egenskaber ved superledende materialer såsom fluxkvantisering og levitation (se Figur 2). En afgørende ingrediens i opnåelsen af den superledende fase er elektron par-dannelse, dvs. at elektronerne danner par to og to som alle sammen er med til at forme en helt ny kvantemekanisk tilstand lig den man kender fra Bosekondensater. Det er naturligvis provokerende at elektronerne kan danne sådanne par, fordi de frastøder hinanden (samme ladning), og det er netop genialiteten ved den superledende fase at den formår at "lime" elektroner sammen på trods af denne frastødning. Man taler om at det at forstå mekanismen bag superledning, er identisk med at finde denne "lim".

En verden med (uden) superledere

Hvorfor er vores hjem ikke spækket med superledere og smarte gadgets baseret på de usædvanlige elektromagnetiske egenskaber ved superledere? Og hvorfor sparer verden ikke enorme mængder energi ved at undgå friktion og ledningstab i superledende kabler? Problemet er at den superledende tilstand indtræffer ved så lave temperaturer som



Figur 1.

Til venstre: Gerrit Jan Flim (til venstre) og Heike Kamerlingh Onnes stående i deres laboratorium i Leiden, Holland i ca. 1920. Til højre: modstanden som funktion af temperatur gennem en ledning bestående af kviksølv Hg. Bemærk overgangen til nul modstand ved ca. 4.2 K.

Figur 2.

Superledere hader magnetfelter. Derfor opretter superlederen (svævende disk) overfladestrømme i materialet som præcist modsvarende det eksterne magnetfelt den føler fra den underliggende magnet. Disse to modsatte felter frastøder hinanden ligesom når man prøver at sætte to magnetiske nordpoler mod hinanden. Resultatet er at superlederen svæver (leviterer) oven på magneten.



Potentialet ved at have fuldstændig friktionsløse strøm kredse er så stort at der stadig forskes intenst i at opdagelse helt nye superledende materialer med endnu større anvendelsesmuligheder.



“
Vi har endnu ikke forstået hvorfor visse lovende materialer er superledende, og har dermed heller ikke noget solidt grundlag for at forudsige hvordan man øger deres superledende egenskaber.
 ”

den gør, og at det derfor kræver kraftig og vedvarende nedkøling at opretholde den superledende tilstand. Heldigvis har man har i dag opdaget mange nye superledere, og den såkaldte overgangstemperatur er steget fra Onnes' 4 K til ca. 160 K. Men altså stadig meget koldt med ca. -100 grader Celcius. Derfor bruges superledere hovedsageligt kun i forskningslaboratorier til frembringelse og måling af magnetfelter. Undtagelser inkluderer MRI-scanning på hospitaler, høj-hastighedstog (Maglev tog), mikrobølgefiltre samt store strømførende ledninger i eksempelvis kraftværker og partikelacceleratorer. Potentialet ved at have fuldstændig friktionsløse strømkredse er imidlertid så stort at der stadig forskes intenst i at finde helt nye superledende materialer med endnu større anvendelsesmuligheder. Uheldigvis er den eksperimentelle del af denne forskning baseret på trial-and-error og derfor en form for "moderne alkymi" hvor man leder efter nye superledere baseret på intuition og erfaring. Faktisk er alle superledere til dags dato opdaget ved tilfældigheder.⁴

Nye superledere ved højere temperaturer

Den type superledning som Onnes' team opdagede i 1911, finder sted i gode metaller og er forstået både eksperimentelt og teoretisk. Der findes imidlertid i dag helt nye former for superledning som opstår fra isolerende materialer med specielle magnetiske egenskaber. Netop sådanne superledere har exceptionel høj overgangstemperatur og giver dermed håb om at kunne superlede ved stuetemperatur. Problemet er imidlertid at vi ikke endnu har forstået hvorfor disse materialer overhovedet er superledende (hvad er deres "lim"), og dermed heller ikke har noget solidt grundlag for at forudsige hvordan man forbedrer deres superledende egenskaber.

Dette spørgsmål, altså hvad der skaber superledning i disse nye superledere, ligger til grund for en stor del af forskningen i min gruppe på Niels Bohr

“
Vi har for nyligt i tæt samarbejde med eksperimentelle grupper formuleret en kvantitativ teori for den superledende fase i nye typer superledere.
 ”

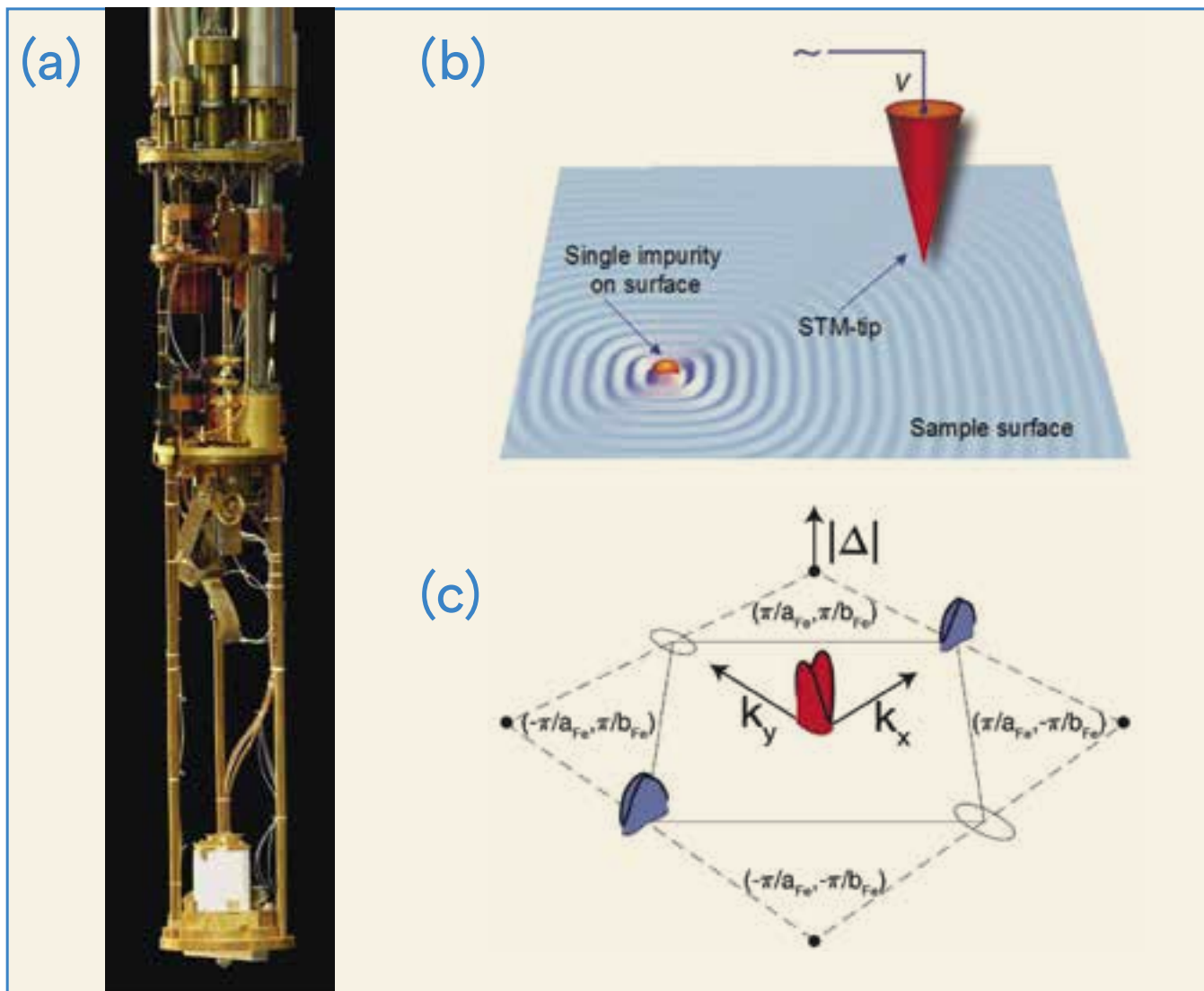
Institutet sponsoreret til dels af Carlsbergfondet. Vi har for nyligt i samarbejde med eksperimentelle grupper formuleret en kvantitativ teori for den superledende fase i de såkaldte jern-baserede superledere, se Figur 3.⁵ I denne teori er det magnetiske fluktuationer der "limer" elektronerne sammen og dermed forårsager superledningen, hvor det i traditionelle superledende materialer er gittervibrationer i krystallen som "limer elektronerne sammen" i den superledende fase. Næste skridt bliver at teste teorien på andre materialer og identificere den vigtigste egenskab som giver anledning til superledningen. Vi har også brug for at forstå hvordan vi kan booste denne egenskab. Derefter kan vi måske forudsige nye superledere med netop sådanne favorable egenskaber som kunne være kandidater til nye høj-temperatur superledere.

Nye superledere med topologiske faser

Alle materialer er karakteriseret ved en forskellig elektronisk struktur der beskriver hvordan elektronerne bevæger sig i faste stoffer. Fra elektronstrukturen kan man f.eks. bestemme om et stof er en isolator, en halvleder eller et metal. Der findes imidlertid også nyligt opdagede såkaldte topologiske materialer hvor den elektroniske båndstruktur besidder nogle meget robuste "knuder" som ikke kan bindes op ved simple påvirkninger af materialet. Disse "knuder" giver anledning til unikke overfladetilstande, som for nyligt er observeret eksperimentelt f.eks. via STM-eksperimenter.⁶ Disse overfladetilstande beskriver elektronbevægelser i overfladen af materialet, hvor de kun kan bevæge sig i bestemte retninger afhængig af deres spin.

Superledere kan også være topologiske, og deres overfladetilstande består af helt specielle partikler, Majorana-fermioner. Sådanne Majorana-fermioner er eftertragtede på grund af deres yderst usædvanlige statistiske egenskaber, som gør dem brugbare til kvanteberegninger. Eksempelvis bruger Microsoft betydelige midler til netop at lave kvantecomputere baseret på topologisk superledning og dertilhørende manipulering af Majorana-fermioner.

Desværre er topologiske superledere meget sjældne og ikke nemme at komme i nærheden af. Med støtte fra Carlsbergfondet arbejder vi ihærdigt på at forudsige nye topologiske superledere. Det viser sig nemlig at topologisk superledning burde eksistere i bestemte heliske magneter i samspil med en superledende fase. Der er ikke mange materialer som både er magnetiske og superledende, men visse jern-baserede superledere har vist sig specielle i denne henseende og burde være et eksempel på topologisk superledning. Jagten er derfor gået ind på



teoretisk at afdække samt eksperimentelt identificere sådanne eksotiske superledere og deres tilhørende Majorana-partikler.

Noter

- 1 H. Kamerlingh Onnes, KNAW Proceedings 13 II 1274 (1911).
- 2 J. Schmalian, *Failed theories of superconductivity*, Mod. Phys. Lett. B, 24, 2679 (2010).
- 3 J. Bardeen, L.N. Cooper and J.R. Schrieffer, *Theory of Superconductivity*, Physical Review 108 1175-1204 (1957).
- 4 Per Fridtjof Dahl, *Superconductivity, its Historical Roots and Development from Mercury to the Ceramic Oxides*, American Inst. of Physics, (New York 1992).
- 5 P.O. Sprau, A. Kostin, A. Kreisel, A.E. Böhmer, V. Taufour, P.C. Canfield, P. J. Hirschfeld, B.M. Andersen, and J.C. Seamus Davis, *Discovery of orbital-selective Cooper pairing in FeSe*. Science, 357 75-80 (2017).
- 6 Sangjun Jeon, Yonglong Xie, Jian Li, Zhijun Wang, B. Andrei Bernevig, Ali Yazdani, *Distinguishing a Majorana zero mode using spin resolved measurements*, Science 358, 772, (2017).

Figur 3.

(a) Et kig ind i en såkaldt scanning tip microscope (STM), hvor man kan måle elektronstrukturen på overflader af materialer med sub-atomar præcision. (b) Princippet bag elektroninterferens er at elektronerne ved spredning fra urenheder og andre perturbationer på overfladen genererer "ringe i vandet" som kan opfanges af STM tippen. Bølgelængden af disse "elektronbølger" og deres afhængighed f.eks. af spændingsforskellen mellem tip og superleder afslører superlederens dybeste hemmeligheder. (c) Fra målinger af elektroninterferens kan vi udlede den såkaldte gap-struktur af superlederen, som fortæller os om dens rumlige og energetiske struktur. Denne er unik og kan gennem teoretiske studier afsløre selve mekanismen bag superledning, dvs. hvad det er der "limer" elektronerne sammen i den superledende fase.