

Hvorfor findes der høj-temperatur superledning?

Af Kim Lefmann og Niels Hessel Andersen, Afdeling for Materialeforskning, Forskningscenter Risø, Danmarks Tekniske Universitet, og Per Hedegård, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Superledning er et fascinerende fænomen, hvor et materiale pludseligt mister al elektrisk modstand. De mest spektakulære materialer er høj-temperatur superlederne, som egentlig burde være magnetiske isolatorer. Tusindvis af forskere har i de seneste to årtier forsøgt at aflure disse stoffer deres hemmelighed, men problemet er stadig langt fra løst. Vi vil her fortælle lidt om, hvad man ved og ikke ved om disse gådefulde materialer; især hvad eksperimenter med neutronspreddning kan fortælle om sammenhængen mellem magnetisme og superledning.

Superledning er super!

Mange almindelige metaller, som Aluminium og Bly, mister fuldstændig deres elektriske modstand ved meget lave temperaturer; typisk under 10 K (10 grader over det absolutte nulpunkt, som ligger ved $-273,15^\circ\text{C}$). Dette fænomen kaldes superledning. Strøm i en superledende ring kan løbe i årevis uden ændring, hvis temperaturen holdes lav. Superledere frastøder magnetiske felter, så en stærk permanent magnet kan svæve over en superleder så længe den er superledende. Superledere kan derfor have mange spændende anvendelser i dagligdagen som: tabsfri strømkabler, kraftige permanente elektromagneter, kæmpespoler til energilagring, svævende tog, og elektronik til ultrahurtige computere. Det er bare ærgerligt, at temperaturen er nødt til at være så lav.

Høj-temperatur superledere skal være kolde

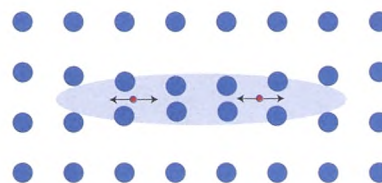
Opdagelsen af de såkaldte høj-temperatur superledere i 1986 indledte en revolution i materialefysik, og inden et år var der fundet adskillige af disse Cu-holdige keramiske materialer. De to opdagere, G. Bednorz og K. A. Müller, blev da også fortjent belønnet med Nobelprisen i 1987, og kort tid efter havde tusindvis af forskere kastet sig over emnet. Hurtigt fandt man materialer, der var superledende ved kvælstofs kogepunkt (77 K), og den højeste superledende overgangstemperatur kom op på 133 K (165 K under højt tryk). Men man har endnu ikke nået det ultimative mål: Materialet, der er superledende ved stuetemperatur ($20^\circ\text{C} = 293\text{ K}$). Faktisk har man slet ikke forstået, hvordan høj-temperatur superledere egentlig virker. Problemet er ofte nævnt blandt de vigtigste uopklarede spørgsmål i fysikken. Måske er man nødt til at løse det for at kunne lave en stuetemperatur superleder – hvis en sådan overhovedet findes.

Fermioner og Bosoner: Enspændere og festaber

Men lad os først se på de almindelige metaller. Den elektriske strøm bæres af elektroner. Grunden til, at der er elektrisk modstand, er, at elektronerne støder ind i urenheder og vibrerende ioner i atomgitteret. Herved overføres der energi til ionerne, som derved bliver varmere, og den tabte energi må tilføres ledningen, hvilket fx sker i kredsløbets batteri, der opretholder en

spændingsforskel mellem ledningens ender. Forholdet mellem spændingen U og den strøm I der løber er som bekendt givet ved Ohms lov: $U/I = R$, hvor R er modstanden. Hvis der ikke er nogen modstand, er der derfor ikke brug for noget batteri for at få en strøm til at løbe. Elektronerne er desuden Fermioner. Det er et kvantefysisk begreb, og Fermioner er karakteriseret ved, at der kun må være én Fermion i hver kvantemekanisk tilstand — Fermioner er altså de ultimative enspændere; de opfører sig alle forskelligt.

I metalliske superledere er elektronerne bundet sammen i såkaldte Cooper-par. Disse par bliver dannet ved hjælp af de elastiske svingninger i krystalgitteret (fononer), som vist i figur 1 [1].



Figur 1. Cooper-par i et superledende metal. En elektron tiltrækker positivt ladede ioner, som så tiltrækker en anden elektron. De to elektroner deles nu om det således dannede "elektriske hul".

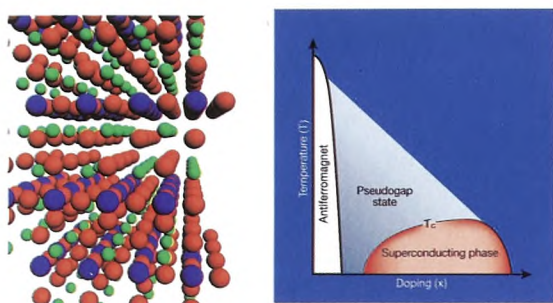
Selvom Cooper-par består af to elektroner, opfører de sig som Bosoner. Bosoner har det lige modsat Fermioner. De har den egenskab, at der godt kan være flere i samme tilstand. Ja faktisk har de en ubændig trang til at gøre det samme, og jo mere des flere Bosoner der allerede gør det samme — de er ultimative "festaber". De kan derfor kondensere i en fælles kvantetilstand, et såkaldt Bosekondensat, men kun hvis temperaturen er tilstrækkelig lav til ikke at bryde parrene. Elektronerne i en superleder støder stadig ind i urenheder og vibrerende ioner, men trangen til at komme "tilbage i geled" i Bosekondensatet er så stor og sker så hurtigt, at de ikke når at aflevere energi og varme ionerne op. Modstanden er forsvundet.

I høj-temperatur superlederne kan man måle, at elektronerne danner Cooper-par som i metallerne. Men hvad der holder de enkelte Cooper-par sammen, er verdens forskere meget uenige om. Nogle hælder til en forklaring i stil med gittersvingninger, selvom "den kritiske temperatur", T_c ser ud til at være alt for høj til at kunne forklares på denne måde. Andre mener, at magnetismen i materialet må spille en rolle. Dette

kan synes at være kontroversielt, fordi superledning og magnetisme normalt ikke “holder af” hinanden. Udover at bære ladning er en elektron også en lille stangmagnet, fordi den spinner omkring sin egen akse. Fænomenet kaldes elektronens “spin”. Cooper-par indeholder nemlig par af elektroner med modsat rettet spin og dermed også modsat rettede magnetiske momenter. Et lokalt magnetisk felt vil derfor søge at bryde parrene.

Doping er nødvendig

Høj-temperatur superledere (HTS) er karakteriseret ved lagdelte strukturer af CuO_2 lag, som danner grundlaget for superledningen. Imellem disse lag findes forskellige typer bindingslag, som holder og stabiliserer strukturen. Et eksempel er $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO), som er vist i figur 2.



Figur 2. Til venstre: Krystalstrukturen af $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$. Kobberatomerne (blå) sidder i CuO_2 lag sammen med iltatomer (røde). La/Sr (grønne) befinder sig mellem CuO_2 lagene. Til højre: Et typisk fasediagram for en høj-temperatur superleder. Ved ingen (eller lav) dotering er materialet en antiferromagnetisk isolator (hvid), mens doteringer mellem ca. 0,05 og 0,25 giver anledning til superledning (rød). Den kritiske temperatur for superledning er langt lavere end den kritiske temperatur for antiferromagnetisme. Imellem de to faser findes en fase, hvis natur stadig ikke er fuldt forstået (lyseblå).

Bindingslagene bidrager også med den nødvendige dotering (“doping” på engelsk) af CuO_2 elektronstrukturen. Høj-temperatur superledning ses nemlig kun i doterede materialer. I udoteret form er HTS magnetiske isolatorer. De danner en antiferromagnetisk fase, hvor spinnene på nabokobberionerne er modsat rettet (jvf. spin-strukturen på de blå Cu-ioner i figur 3). Doteringen foretages oftest ved at fjerne elektroner fra CuO_2 lagene. Dette gør i første omgang magnetismen ustabil, og ved dotering på $x > 0,05$ pr. Cu-atom kommer superledningen. Den optimale dotering (højeste T_c) fås for $x = 0,16$.

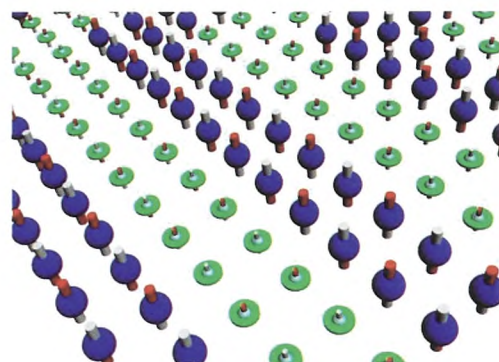
Magnetisme og superledning hører sammen

Man anvender mange forskellige teknikker til at studere superledere. Her skal vi koncentrere os om den vigtige information, som neutronspredning har givet til forståelsen af HTS, og vi skal give eksempler på resultater fra LSCO, som er blevet studeret intensivt på Risø [2].

Neutroddiffraction er specielt velegnet til at bestemme HTS materials krystalstruktur, fordi iltionernes nøjagtige positioner spiller en rolle for su-

perledningen, og disse kan vanskeligt bestemmes med røntgendiffraktion, som omtalt i den indledende artikel.

De vigtigste bidrag fra neutronspredning til forståelsen af HTS materialernes egenskaber kommer imidlertid fra studiet af deres magnetiske egenskaber. Tidligt blev det bestemt, hvordan elektronernes spin er organiseret (antiferromagnetisme — $\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow$) og hvordan de eksiteres og danner såkaldte spin-bølger i de udoterede materialer. Med fremkomsten af større og bedre énkrystaller og nye avancerede neutronspektrometre, som RITA-2, blev det muligt at studere de magnetiske egenskaber af doterede materialer. Her viser eksperimenter med elastisk og lav-energi uelastisk neutronspredning, at der er antiferromagnetisme i CuO_2 planerne, også i den superledende fase for $x > 0,05$, men den har ikke en simpel “op-ned-op-ned” struktur. For nær-optimal dotering, $x > 0,13$, viser eksperimenterne en antiferromagnetisk struktur, som kun gentager sig når man rykker 8 pladser frem i gitteret — i modsætning til 2 pladser i den simple antiferromagnet. Dette kan forklares med den såkaldte “stribemodel”, som er illustreret på figur 3. Eksistensen af statiske ladningsstriber i superledende HTS er eftervist direkte med synkrotron røntgendiffraktion [6].



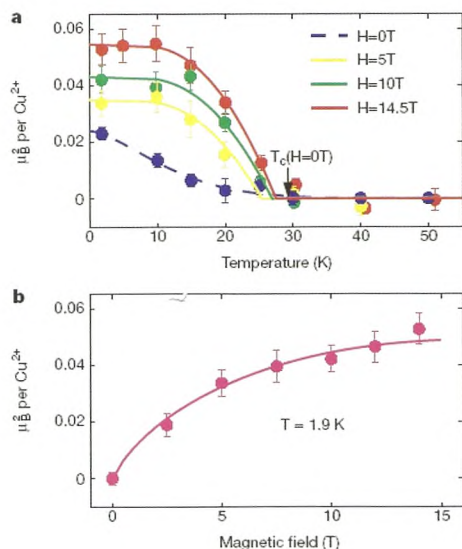
Figur 3. Stribemodel af et enkelt CuO_2 lag. Kun kobberionerne er vist med deres spin som små magneter. “Hullerne”, som fjerner spin fra kobberatomerne og introducerer ekstra ladning er organiseret i striber (grønne) ind imellem velordnede områder med spin. Bemærk at spinnene gentager sig efter 8 pladser i gitteret. Se mere i [5]

I 1990 blev det opdaget på Risø, at LSCO har magnetiske fluktuationer, som også har en periode på 8 gitterpladser [2]. I 1999 opdagede vi endvidere, at der opstår et energi-gab i spin-fluktuationerne (et spin-gab = den mindste energi der er påkrævet for at eksitere spinnene), når materialet bliver superledende [3]. Dette fænomen er stadig uafklaret.

Konkurrerer superledning og magnetisme?

Senere eksperimenter på Risø og i Berlin viste helt overraskende, at periode-8 magnetisme bliver fremkaldt af et ydre magnetisk felt. Man ville ellers forestille sig, at et magnetfelt først og fremmest vil prøve at få alle elektronernes spin til at pege samme vej, men her er der andre kræfter på spil. Det magnetiske felt vil svække superledningen i bestemte områder, hvor det danner magnetiske hvirvelkerner (se artiklen af Asger

B. Abrahamsen i dette nummer af KVANT). Der, hvor superledningen er svækket, kan de magnetiske kræfter udfolde sig frit. Dette antyder, at superledning og magnetisme, som forventet er konkurrenter, og det understøttes af en udregning, der forudsagde den magnetiske ordens afhængighed af magnetfeltets styrke med meget fin overensstemmelse; se figur 4.



Figur 4. Intensiteten af den magnetiske diffraktionstop i underdopet LSCO, $x = 0,10$. (a) Intensitet som funktion af temperatur i forskellige magnetfelter, H . For $H > 0$ er $H = 0$ signalet trukket fra. Bemærk, at $H > 0$ signalet forsvinder ved T_c . (b) Lav-temperatur signalet som funktion af H . Den overlejlrede kurve er en teoretisk forudsigelse. Fra [4].

Det eksperimentelle neutronspretningsarbejde på LSCO er foregået i nært samarbejde med teoretikere. På Niels Bohr Instituttet arbejdes der med en stripe model, hvor Cooper-parrene dannes og bevæger sig i et dynamisk "flodsystem" af striber. Hullerne i striberne (de grønne i figur 3) er i virkeligheden opblandet med og koblet til elektron-spin på ikke dopede Cu-ioner i striberne. Modellen bygger på, at spinnene i "flodsystemet" vekselvirker med spinnene på "flodbredderne" (de blå spin i figur 3) og dermed opnår en effektiv kobling, som overføres til de nærliggende huller. Herved dannes Cooper-par, dvs. Bosoner, som kan kondensere under en vis temperatur. I modsætning til traditionelle metal-liske superledere er der imidlertid klare signaler om, at Cooper-parrene i HTS dannes allerede i "pseudo-gap tilstanden" (se figur 4) inden superledningen indtræffer.

Fremtiden

Som det fremgår venter der fortsat en del arbejde, før HTS er tilfredsstillende forstået. Fremskridtene er stærkt afhængige ikke blot af teoretisk intuition og modelarbejde, men også af nye forbedrede materialer og måleteknikker, som leverer entydige høj-kvalitets data. Da intensiteten fra de magnetiske signaler i superledende HTS er meget svag er ønsket om stadig forbedret instrumentering bydende nødvendig. Måske vil de kommende høj-intensitets neutronkilder (se den

indledende artikel) bane vejen for et gennembrud, som giver den endelige forklaring af HTS.

Litteratur

- [1] P. Hedegård, Forenede Elektroner A/S, Nysyn (1990)
- [2] K. Lefmann *et al.* *J. Low. Temp. Phys.* **135**, 621 (2004)
- [3] B. Lake *et al.*, *Nature* **400**, 43 (1999)
- [4] B. Lake *et al.*, *Science* **291**, 1759 (2001) og *Nature* **415**, 299 (2002)
- [5] Brian Møller Andersen, Ph.D.-afhandling. Kan findes på <http://www.nbi.ku.dk/side25882.htm>
- [6] M. v. Zimmermann *et al.*, *Europhysics Letters* **41**, 629 (1998)



Kim Lefmann (th) og Niels Hessel Andersen (midt) er henholdsvis seniorforsker og forskningsspecialist ved Afdelingen for Materialeforskning, Risø, DTU. Begge er desuden adjungeret professor ved Niels Bohr Institutet, KU. De foretager eksperimentelle studier af HTS, specielt med røntgen- og neutronspretning. Per Hedegård (tv) er professor ved Niels Bohr Institutet, KU, og beskæftiger sig med teoretisk analyse og modelarbejde af HTS.

PFEIFFER VACUUM

Mød Totalleverandøren på DFS årsmøde

Forskeres "One-Stop-Shop"

Massespektrometre: massrange op til 2048 amu

Alt nødvendigt tilbehør: Pumpesystem, In-let system, kammer, ventiler, skueglas, gennemføringer, fittings og tryksensorer

Helium læksøger SmartTest™

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850
efa@pfeiffer-vacuum.dk