TEORI FOR SUPRALEDNING

Per Hedegård, Fysisk Laboratorium, Københavns Universitet

Hvorfor er visse metaller supraledende? Det simpleste svar på dette spørgsmål er at metallets elektroner "fryser"! Dette svar blev givet allerede kort tid efter opdagelsen af selve supraledningens-fænomenet i starten af vort århundrede. Jeg vil her forsøge at forklare, hvorfor dette svar faktisk er korrekt, og i hvilken forstand man skal forstå at elektroner fryser.

Tænk for eksempel på det mere velkendte fænomen, hvor vand fryser til is. Over 0°C er vandet i den *uordnede* væskefase, under 0°C er det i den mere *ordnede* isfase, hvor vandmolekylerne sidder på en ganske bestemt måde i forhold til hinanden. Hvis man nu for eksempel med en pind skubber til en lille del af vandet i væskefasen, så vil kun relativt få molekyler i den umiddelbare nærhed af forstyrrelsen blive påvirket, og en eventuel energioverførsel vil meget hurtigt fordele sig tilfældigt på de enkelte molekyler, det vil sige blive til varme. Gør man derimod det samme ved en isterning, det vil sige skubber til den med en pind, så vil hele iskrystallen bevæge sig stift i den retning, som den bliver skubbet. Energien, som man overfører, vil forblive som kinetisk energi af hele krystallen og ikke blive til varme. Man taler om at der ikke er nogen energi-dissipation. Noget fuldstændigt tilsvarende sker der i en supraleder. Da man ikke så let kan påvirke elektroner med en pind, udnytter man at elektronerne er ladede partikler og derfor vil påvirkes af en elektrisk spænding. Påvirker man en elektrisk ledning i den ikke supraledende fase med en spændingspuls, vil den derved opståede elektriske strøm lynhurtigt forsvinde og ledningen vil være blevet en lille smule varmere. Faktisk kan den afsatte effekt beregnes ud fra den velkendte formel $P = V \cdot I = R \cdot I^2$, hvor V er spændingen, I er strømmen og R er modstanden i ledningen. Er ledningen derimod i den supraledende fase, så vil den inducerede strøm fortsætte i det uendelige (i alt fald i en lukket ledning), og der vil ikke afsættes nogen varme. Grunden hertil er, at elektronsystemet er blevet *stift* og bevæger sig kollektivt gennem ledningen på samme måde som vandmolekylerne bevæger sig kollektivt og ordnet i en iskrystal. Denne kollektive bevægelse af elektronerne manifesterer sig for eksempel i at der ikke er nogen varmeafsættelse i ledningen, det vil sige ifølge ovenstående formel at modstanden $R = 0$. Nu er det jo sådan at en terning lavet af jern opfører sig på fuldstændig samme måde som isterningen, når man udfører det nævnte eksperiment (hvis man ser bort fra trivielle forskelle som at en isterning vejer mindre end en lige så stor jernterning). Denne *universalitet* har at gøre med at alle stoffer der fryser går fra en rumligt uordnet fase ved høje temperaturer til en rumligt ordnet (eventuelt krystallinsk) fase ved lave temperaturer. Noget tilsvarende gælder for overgangen til den supraledende fase. For alle supraledere er modstanden lig nul, et magnetfelt vil blive skubbet ud af enhver supraleder (Meissner-effekten), og så videre.

Denne stivhed, der ledsager enhver faseovergang er jo klart nok ikke hele forklaringen. For eksempel vil man jo gerne kunne beregne ved hvilken temperatur vandet fryser til is, hvordan vandmolekylerne sidder i forhold til hinanden og en lang række andre spørgsmål. Disse spørgsmål er langt fra alle besvarede for det meget velkendte system, som vand udgør. I supralederen var det i over 50 år efter opdagelsen af fænomenet oven i købet sådan, at man end ikke forstod hvilken slags orden, elektronsystemet har. Dette problem blev dog løst i 1950'erne og man fandt endog en forklaring på , hvorfor denne orden opstår. Stadig var man dog ikke i stand til for eksempel at beregne, ved hvilken temperatur et givet metal overgår til den supraledende fase. Helt galt står det til for de nyligt opdagede såkaldt høj-temperatur supraledere. For disse materialer står det klart, at den forklaring, der gælder for de gamle lav-temperatur supraledere, ikke kan bruges! Jeg vil i det følgende nærmere prøve at beskrive, hvordan elektronerne opfører sig i en supraleder, hvilken orden der opstår, og hvad forklaringen på lav-temperatur supraledning er. Endelig vil jeg beskrive, hvordan situationen er for forståelsen af høj-temperatur supralederne nu knapt 4 år efter opdagelsen.

Kvanteteorien

Kvanteteorien spiller en altafgørende rolle i forståelsen af supraledning, så det er nødvendigt først at forklare de grundlæggende principper i en kvantemekanisk beskrivelse af faste stoffer. To begreber er helt centrale i den forbindelse, nemlig *partikel-bølge dualitet* og *Kvante-statistik.*

Partikel-bølge dualitet

For at forstå det første begreb, nemlig partikel-bølge dualiteten, er det nyttigt at tænke over, hvordan en elektron finder vej gennem et fast stof. Lad os tænke os at atomerne i det faste stof er arrangeret i et velordnet gitter, hvad de ofte er. Hvis en elektron skulle opfattes som en klassisk partikel, altså som noget svarende til en meget lille billardkugle, så er det meget svært at forstå, at den på nogen måde skulle kunne finde vej gennem stoffet fra den ene ende til den anden, hvad de jo tilsyneladende gør i virkeligheden. Kun i de ganske specielle retninger i hvilke atomerne er stablede, vil det være muligt for elektronerne at passere. Og den mulighed vil endda også hurtigt blive ødelagt, hvis en procentdel af atomerne ikke sidder på deres plads i gitteret, eller hvis gitteratomerne vibrerer frem og tilbage, hvilket er uundgåeligt, hvis temperaturen er blot en smule højere end det absolutte nulpunkt. I forrige århundrede forsøgte fysikere faktisk at beregne modstanden i metaller ud fra sådan en model. Det viste sig at for at kunne forklare den observerede modstand, måtte elektronerne kun støde ind i hvert

tusinde atom (eller endnu færre jo lavere temperaturen er), hvilket er absurd.

Med opdagelsen af kvanteteorien i midten af 20'erne ændrede billedet sig imidlertid. Man forstod nu at elektroner faktisk også kan opføre sig som bølger. En bølge vil ikke have noget problem med at løbe igennem et velordnet gitter, på grund af at bølger kan danne konstruktiv interferens. Selv hvis der er fejl i gitteret (ikke for mange), i form af atomer, der ikke sidder på deres plads eller fremmede atomer, vil en bølge kunne slippe igennem. Sådanne elektron-bølger i faste stoffer kaldes Bloch bølger efter den tyske fysiker Felix Bloch. Da Bloch havde fundet sine bølger, var problemet med forståelsen af elektrisk modstand pludselig vendt helt på hovedet. Ifølge teorien skulle modstanden nu være meget lille, eventuelt nul, og den teoretiske udfordring bestod nu i at forklare, hvorfor modstanden er så stor!

For at forstå dette, er det nyttigt at tænke på et simplere interferens-fænomen. Tænk på det velkendte eksperiment, hvor man belyser en plade med to huller. Bag pladen vil der dannes et karakteristisk interferensmønster, der skyldes at lyset har bølgenatur. Lukker man et af hullerne vil interferensen forsvinde, og man vil se en plet bag det hul, der ikke blev lukket, fuldstændig som man ville forvente, hvis lyset bestod af små partikler. Erstatter man nu de to huller med to små lommelamper, der udsender lys i præcis samme retning, som før da hullerne stod åbne, så vil man bare se to pletter, hvor der før var et interferensmønster. Dette sidste skyldes, at lysbølger også har en fase, og hvis ikke lyset består af bølger, der alle har den samme fase, så får man ikke konstruktiv interferens, og lyset vil opføre sig som partikler. Så selvom lommelamperne tilsyneladende fungerer, således at de lader lyset passere uforstyrret gennem hullerne, så er der alligevel sket en forandring. Fasen af de lysbølger, som lommelamperne udsender er fulstændig tilfældig og overhovedet ikke korreleret med fasen af de lysbølger, der bevæger sig ind mod pladen. Lad os nu vende tilbage til problemet med elektrisk modstand. Ved enhver endelig temperatur vil atomerne i et fast stof vibrere en smule og derved ødelægge den perfekte krystalorden. Spredes en elektronbølge mod sådant forskudt atom og udveksler en smule energi med atomet, så vil bølgens fase blive ændret med en ukontrollabel værdi og elektronbølgen kan ikke længere interferere konstruktivt, men er bundet til at opføre sig som en klassisk partikel. Man kan nu forstå , hvorfor modstanden er meget temperatur-afhængig, fordi jo lavere temperaturen er, jo mindre er den termiske bevægelse af atomerne, jo færre gange vil elektronbølgen miste sin fase, og jo bedre vil den interferere sig konstruktivt gennem materialet.

Kvante-statistik

Hidtil har vi kun diskuteret, hvordan en enkelt elektron opfører sig i et fast stof. Nu er der jo ofte op til flere elektroner pr. atom i stoffet, så det er meget nødvendigt at forstå, hvordan flere elektroner fungerer sammen. Dette er emnet for det andet punkt, der er nævnt ovenfor, nemlig kvante-statistik. Det er en helt fundamental naturlov at enhver elementarpartikel (elektron, quark, neutrino, foton, W^+, Z, osv.) er enten en såkaldt *fermion* eller en *boson*. Fermion-familien omfatter bl. a. elektroner, protoner, neutroner, quarker. Det er alle partikler, som vi forestiller os som små hårde kugler. Dette skyldes den afgørende, ja faktisk den definerende egenskab ved disse partikler: *To fermioner kan ikke være i samme kvantetilstand.* Denne meget vigtige lov kaldes også *Pauli-princippet* efter den tyske fysiker Wolfgang Pauli, der opdagede loven i 1924. Dette betyder blandt andet, at to fermioner ikke kan opholde sig på samme sted, hvilket jo også er en egenskab, der deles af klassiske hårde billardkugler.

Kvantetilstandene for elektronerne i et atom er de kendte Bohr-orbitaler. Disse har næsten alle forskellig energi. I grundtilstanden, som er den tilstand et atom befinder sig i ved lave temperaturer, er alle de laveste tilstande fyldt med hver en elektron. I et fast stof er kvantetilstandene for elektronerne de ovenfor nævnte Bloch-orbitaler eller Bloch-bølger. De har form som bølger, der udbreder sig over hele materialet. Det er nu sådan at de bølger, som har den længste bølgelængde har den laveste energi. Ved lave temperaturer er alle Bloch-bølgerne med bølgelængder længere end den såkaldte Fermi-bølgelængde fyldt op med elektroner. Pauli-princippet har den meget vigtige konsekvens, at det tilsyneladende håbløse problem, der består i teoretisk at beskrive de 10^{23} elektroners opførsel i et fast stof, faktisk er mulig. Lettelsen er at man faktisk kan glemme alt om de elektroner, der har bølgelængder en lille smule længere end Fermi-bølgelængden. De er nemlig frosset fast i deres tilstand og kan ikke ændre sig. Thi, skulle de ændre deres tilstand måtte det jo på grund af Pauli-princippet blive til en tilstand, der ikke allerede er besat at en elektron i forvejen, hvilket ville kræve en endelig energi, som ikke er til rådighed med mindre temperaturen er meget høj. Som et eksempel kan nævnes, at for almindelige metaller, svarer energien af en elektron med Fermi-bølgelængden til en temperatur på ca. 100.000°C.

Den anden fundamentale familie af elementarpartikler, nemlig bosonerne, har det lige omvendt. Hvor fermionerne for alt i verden skal undgå at være i samme tilstand, så vil bosonerne derimod foretrække at være i samme tilstand. Vi tænker til dagligt ikke på disse partikler som partikler, men snarere som bølger. Den mest almindelige boson er fotonen, den slags partikel som lys består af. Nu er det sådan at ved almindelige forhold, hvor lys udsendes fra glødelamper, der har en høj temperatur, så vil fotonerne eller lyspartiklerne ikke være i samme tilstand, de vil ikke have samme bølgelængde og fase. Under særlige forhold er det dog muligt at få rigtig mange fotoner ind i samme kvantetilstand, hvorved man kan opnå særligt interessante effekter. Dette er faktisk princippet i laseren, hvor alle fotonerne har samme bølgelængde og fase.

Bose-kondensation

Den tyske fysiker Frits London fik allerede i trediverne den ide at man kunne forklare supraledning, hvis de elektrisk ladede partikler var bosoner. Hvis nemlig temperaturen var tilstrækkelig lav, så ville en stor brøkdel af alle partiklerne sætte sig i samme tilstand, nemlig den med lavest

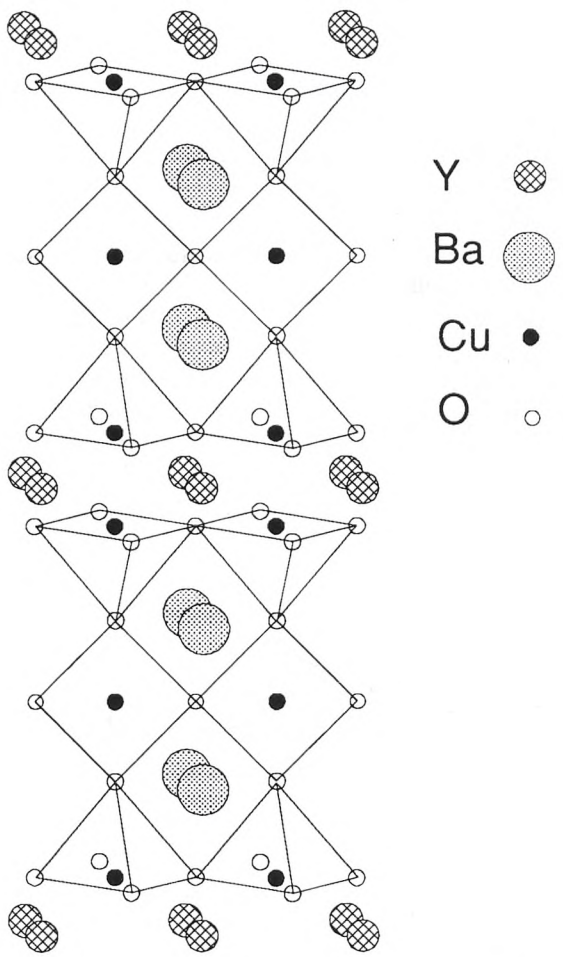
energi. Hvis denne tilstand så oven i købet var en bølge, der interfererede sig gennem materialet fra den ene ende til den anden, så havde man en supraleder. London kunne også vise, at hvis man påtrykte et magnetfelt, så ville den resulterende bølge give anledning til en strøm og et dertil hørende magnetfelt, der præcist ophæver det påtrykte. Dette forklarer Meissnereffekten. Problemet var blot, at man godt kendte de elektrisk ladede partikler, nemlig elektronerne, og de er fermioner, så det så ikke ud til at Londons ide havde noget med virkeligheden at gøre. Der skulle gå endnu godt tyve år inden problemet endelig skulle finde sin løsning.

BCS-teorien

I 1957 kom så omsider gennembruddet. Amerikaneren John Bardeen, der længe havde beskægtiget sig med teorien for supraledning, besluttede sig for at foretage et fornyet angreb på problemet. Han allierede sig med sin student Bob Schrieffer og den unge elemantar-partikel-fysiker Leon Cooper. John Bardeen er en sand kæmpe i efterkrigstidens fysik. Han fik ikke mindre end *to* Nobelpriser. Den første for den teoretiske beskrivelse af en af grundpillerne i den moderne civilisation, nemlig transistoren, og den anden for den endelige forklaring på supraledning.

Cooper fandt ret hurtigt ud af, at to elektroner kunne forblive bundet til hinanden, hvis de tiltrak hinanden med selv en meget svag kraft. Det havde man hidtil ment var umulig, thi hvis to partikler skulle være velbestemte i rummet (nemlig i nærheden af hinanden), så ville deres kinetiske energi gå op på grund af Heisenbergs ubestemthedsrelationer, der siger at jo mere velbestemt en partikel er i rummet jo større er ubestemheden i dens hastighed. Dette gamle argument gælder imidlertid kun, hvis der ikke er andre partikler til stede. I et metal derimod er der masser af elektroner tilstede, og det var nu Coopers pointe, at to elektroner faktisk godt kunne parre sig på grund af en svag tiltrækkende kraft. Nu er elektroner negativt ladede og frastøder derfor hinanden, så hvor skulle en *tiltrækkende* kraft komme fra ? En sådan havde Bardeen kendt i mange år fra sit tidligere arbejde. Hvis nemlig en elektron bevæger sig gennem et fast stof, så vil de positivt ladede atomer, den kommer i nærheden af, tiltrækkes til elektronen. Atomerne er så meget tungere end elektronen at inden de får bevæget sig henimod den, så er den løbet videre i sin bane. Atomerne er dog kommet i bevægelse og der vil derfor opstå et ''spor'' af positiv ladning fra de bevægede positive atomer langs elektronens bane. En anden elektron vil nu følge sig tiltrukket af dette spor og følge efter den første elektron i så tilpas afstand at den ikke bliver frastødt af sin makkers negative ladning. Mekanismen er i sandhed godt fundet på af Vorherre ! Sådanne par af elektroner er siden blevet kaldt for *Cooper-par*.

Nu forstod Bardeen, Cooper og Schrieffer virkelig, at de havde fat i den lange ende, thi de vidste meget godt, at *to sammenbundne fermioner tilsammen udgør en boson* og at Londons gamle ideer om Bose-kondensation ville fungere. I løbet af kort tid fik de skrevet deres ideer ned på matematisk form og var stort set i stand til at forklare alle de kendte eksperimenter på supraledere. Det var også nu klart,



Figur 1. Strukturen af en højtemperatursuperleder: $YBa_2Cu_3O_7$.

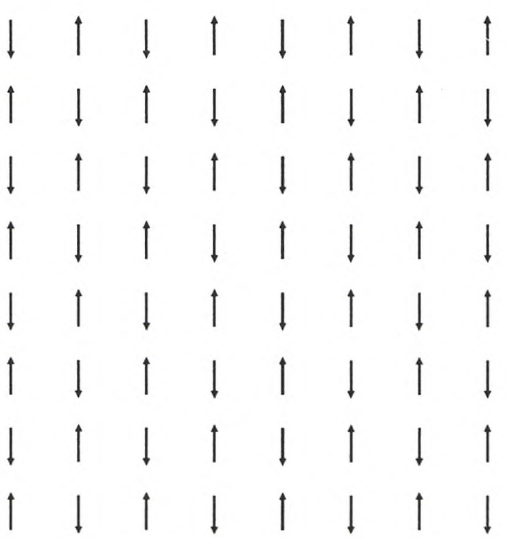
at den orden som kendetegner alle ''stive'' systemer, ikke nødvendigvis er en rumlig orden, som for eksempel is, men snarere en orden i energi, nemlig derved at alle Cooper--parrene er i samme laveste energitilstand.

Kobber-oxiderne?

Efter at have gennemgået de teoretiske ideer bag vor hidtidige forståelse af supraledning, vender vi os mod de nye materialer, der har overgangstemperaturer til den supraledende fase (T_c), der er op til 5 gange højere end de hidtil kendte. Lad mig først slå fast, at der ikke er noget i Londons og Bardeen, Cooper og Schrieffers generelle teori, der forhindrer høje overgangstemperaturer, faktisk er visse stjerner (de såkaldte neutron stjerner) en stor suppe af supraledende materiale med overgangstemperaturer, der er 100 milliarder grader Celsius. Det, der især er afgørende for T_c's størrelse, er styrken af den kraft, hvormed de to partikler i Cooper-parret er tiltrukket hinanden. Problemet i forbindelse med kobber-oxiderne er at mekanismen, der involverer gitteratomernes bevægelse, ikke virker! Argumenterne herfor er mangfoldige (men dog langt fra alment anerkendt af folk, der arbejder i feltet). I det hele taget har den konventionelle teori for metaller vanskeligheder med at forklare alle mulige andre egenskaber for disse stoffer. Et af

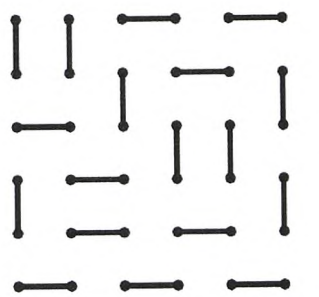
de mest slående eksempler på dette er at rene stoffer, det vil sige stoffer med en kemisk sammensætning, der følger den såkaldt støkiometriske kemiske formel (f.eks. La_2CuO_4 i stedet for $La_{1.8}Ba_{0.2}CuO_4$), er magnetiske isolatorer; ikke sædvanlige magneter men *anti-ferro-magneter*. Dette vil jeg forklare lidt nærmere, for heri skal man sikkert søge den endelige forklaring på stoffernes supraledende egenskaber. Det er jo sådan her, som i andre af livets forhold, at hvis flere ting går galt, så er det ikke unaturligt at forestille sig, at der er en fælles årsag.

Som vist i figur 1, er atomerne arrangeret således, at der er CuO_2 lag med kobberatomer i et kvadratisk gitter og med iltatomer på alle forbindelseslinier mellem to kobberatomer. Resten af atomerne er placeret imellem disse lag på måder, der varierer fra materiale til materiale. Pauli-princippet er helt afgørende for at skabe sig et overblik over, hvordan elektronerne opfører sig i sådan en situation. Det viser sig at de elektroner, der har bølgelængder i nærheden af Fermi-bølgelængden, alle bevæger sig i CuO_2-lagene. Kobberatomerne i disse lag har alle en næsten lukket *d*-skal. I det støkiometriske tilfælde mangler der præcis én elektron på hvert kobberatom (alle ilt-atomerne har fuldstændig fyldte skaller og spiller derfor heller ingen rolle). Det er nu lettere at regne med huller (manglende elektroner) i kobberatomerne end med rigtige elektroner. Man kan vise i kvantemekanikken at et hul har præcis de samme egenskaber som en elektron, bortset fra at ladningen er positiv i stedet for negativ. Endvidere er det sådan, at der ikke kan være to huller på samme kobberatom. Dette skyldes at huller er postivt ladede og dermed frastøder hinanden, og det ovenikøbet særlig kraftigt på især kobber. Et hul kan



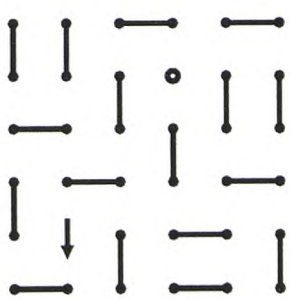
Figur 2. Spinkonfiguration for en antiferromagnet.

altså ikke bevæge sig, thi gjorde det ville der opstå kobberatomer, der har mere end et hul på sig. Da hullerne er de partikler, der skal bære en eventuel strøm, følger at materialet er en isolator, hvad man da også observerer tydeligt rent eksperimentelt!



Figur 3. Et billede af *RVB* tilstanden. En linie i figuren forbinder to kobberatomer. I hver ende af linien er der et spin. Spinnene er således arrangeret, at det totale impulsmoment for de to spin er 0.

Bortset fra ladning har en elektron (og dermed et hul) en anden egenskab, som er altafgørende når man diskuterer magnetisme, og det er det såkaldte *spin*. Enhver elektron snurrer rundt om sin egen akse, hvilket giver anledning til magnetisme, idet, som Hans Christian Ørsted fandt i forrige århundrede, giver en ladet partikels bevægelse anledning til et magnetfelt. Omdrejningshastigheden kan ikke være hvad som helst. Faktisk kan den kun antage én værdi, nemlig den der svarer til at impulsmomentet er lig med Plancks konstant $\hbar$. Man plejer at tegne elektronens spin, som en lille pil, der angiver retningen af omdrejningsaksen. I de velkendte permanente magneter, såsom jern, peger alle disse pile, eller spin, i samme retning, og man får et resulterende makroskopisk magnetfelt. En lige så velordnet magnetisk tilstand, der blot ikke har makroskopiske konsekvenser, finder man i antiferromagneterne, hvor hverandet spin peger opad og hverandet peger nedad. Se figur 2. Dette er præcis, hvad man finder i supralederne.

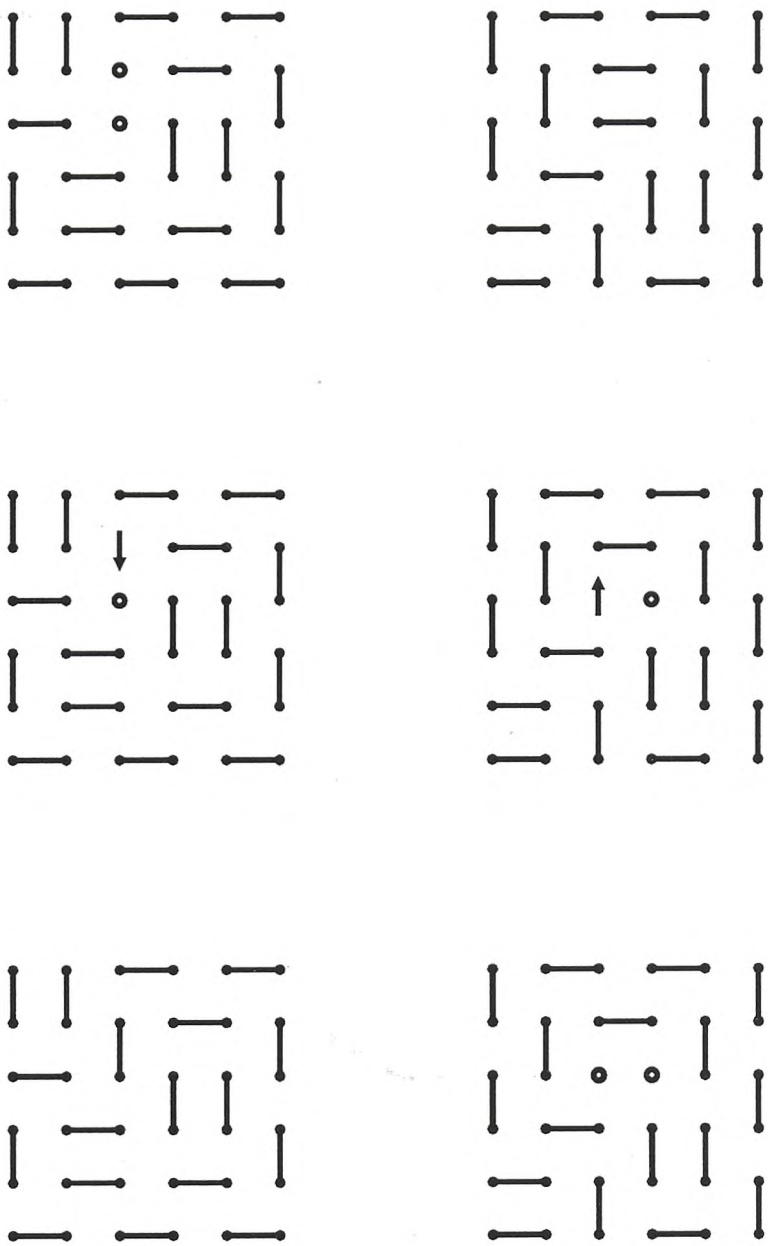


Figur 4. De to *kvasipartikler* i *RVB* tilstanden. Den ladede partikel, *holonen*, kan ses nederst i figuren. Når der løber en strøm i laget, betyder det at holonerne bevæger sig. Den anden type partikel, *spinonen*, har ingen ladning men derimod et spin. Den kan ses i det øverste højre hjørne. En ganske almindelig elektron har både ladning og spin. Hvis man fjerner en elektron fra CuO2 planen, vil man ødelægge en af linierne, og derved skabe en spinon i den ene ende og en holon i den anden. Disse to partikler kan nu bevæge sig uafhængigt af hinanden. Man har altså ud af én partikel (elektronen) skabt to (holon+spinon). Denne grundlæggende egenskab ved *RVB* tilstanden kan forklare mange af kobberoxidernes mærkelige egenskaber.

Der er altså en tendens for spinnene på to nabo-kobberatomer til at pege i modsat retning. Der findes dog en anden måde at arrangere spinnene på, hvor systemet også drager den fulde fordel af den energigevinst, der består i at to nabospin peger i modsat retning. Jeg har illustreret det på figur 3. Her har jeg kun angivet spinnene på kobberatomerne. Med en linie, der forbinder to nabo-spin, er angivet en konfiguration, hvor et af spinnene drejer den ene vej rundt og det andet drejer modsat, således at parrets totale impulsmoment er nul! Den nye grundtilstand for supralederne består nu i en superposition af alle mulige måder at parre spinnene på. Tilstanden kaldes på engelsk for *the Resonating Valence Bond state* forkortet *RVB*.

Hvis man nu rent kemisk erstatter nogle af lanthanatomerne med f. eks. bariumatomer, så vil der dannes kobberatomer, der har mere end ét hul fordi barium har en valenselektron færre end lanthan. Man kan vise at kobberatomer med to huller ikke har noget spin, og et sådant kobberatom vil fremstå som en positivt ladet partikel uden spin. Man kan se sådan et kobberatom i det nederste venstre hjørne af figur 4. Dette ekstra hul, som man kalder en *holon*, har ingen problemer med at bevæge sig rundt i materialet, som derfor nu er blevet til et metal, der kan lede strøm. I det modsatte hjørne af samme figur er der en anden partikel, nemlig en *spinon*. En spinon er ikke andet end et uparret spin, med andre ord et spin, som ikke deltager i nogle af linierne. Man kan danne to sådanne spinoner ved at bryde et par, men det koster energi, så ved lave temperaturer er der ikke ret mange spinoner.

Lad os nu forestille os at en elektron vil bevæge sig fra et CuO_2 lag til det næste. Situation er illustreret i figur 5. De to nabolag er tegnet ved siden af hinanden. I det nederste billede er der to holoner i det ene lag. I det næste billede har én elektron bevæget sig fra det ene lag til det andet. Derved er der brudt et spin-par i det lag, som elektronen forlod og der er dannet en spinon i begge lagene, samtidig har en holon bevæget sig i modsat retning af elektronen. Men det koster energi at skabe spinoner, og den energi kan kun komme fra de termiske bevægelser i stoffet, med andre ord fra varme. Man kan derfor slutte at ved lave temperaturer kan elektroner *ikke* bevæge sig fra lag til lag. Dette resultat er også meget tydeligt eksperimentelt: Den elektriske modstand for strømme der bevæger sig fra lag til lag stiger kraftigt når temperaturen sænkes! Modstanden for strømme, der bevæger sig i lagene falder derimod, når temperaturen sænkes. En sådan opførsel har man aldrig før set i noget som helst stof, så sammen med supraledningsegenskaben, gør denne egenskab disse materialer til noget helt unikt. Filosofien er, at disse to egenskaber er tæt forbundne, hvad jeg nu vil forklare.



Figur 5. En mulig mekanisme, der kan forklare supraledning. Figuren viser to nabolag i tre situationer. Øverst er der to holoner i et af lagene. I midten har en elektron bevæget sig fra laget til højre over i laget til venstre, og har derved skabt en holon og en spinon i begge lagene. Nederst har endnu en elektron bevæget sig fra højre til venstre. De to spinoner i begge lag har parret sig og er forsvundet. Nettoresultatet er en flytning af de to holoner fra det ene lag til det andet uden at det har kostet energi. Se i teksten, hvordan dette kan give supraledning.

I figur 5 har jeg tegnet to holoner i det ene lag. Den ene holon hopper fra det ene lag til det næste, hvilket koster energi, som vi lige har set. Men denne energi kan vi få tilbage, hvis en anden holon i nærheden hopper umiddelbart efter. Så vil man nemlig få to uparrede spin i hvert lag, og de kan parre sig og derved frigive den "lånte" energi. Vi har nu opnået at *par* af holoner frit kan bevæge sig fra lag til lag, men kun hvis de er i nærheden af hinanden. Det kan derfor betale sig for holonerne at være tæt på hinanden. Dette er jo netop den tiltrækkende kraft, som er nødvendig for at den gamle teori for supraledning (BCS) kan komme til at virke! Cooperparrene er altså par af holoner, der bevæger sig fra lag til lag i supralederen.

I de seneste måneder er der kommet yderligere eksperimentel støtte til sådan en forklaring til supraledningen i kobberoxiderne. Man kan nemlig nu ad kunstig vej bygge supraledere, hvor man kan variere afstanden mellem CuO_2-lagene fra nogle få Ångstrøm til mange tusinde Ångstrøm. (Størrelsen af et atom er ca. 1 Ångstrøm). I disse kunstige materialer falder T_c ganske rigtigt meget kraftigt jo længere der er mellem lagene. Dette er præcist, hvad man vil forvente i *RVB*-teorien, hvorimod man i en mere konventionel teori forventer at T_c skulle være nogenlunde uafhængig af disse afstande.

Konklusion

De ideer jeg har beskrevet i denne artikel er naturligvis ikke den fulde og hele sandhed om høj-T_c supralederne. Folk har foreslået mange andre modeller, men de fleste af dem tenderer til kun at forklare det ene fænomen de er designede til at forklare. For eksempel findes der et hav af teorier for supraledningsfænomenet, men kun et fåtal kan forklare det elementære faktum at materialerne er isolatorer i de støkiometriske forbindelser. Den teori, jeg har beskrevet, er unik i den forstand, at den forsøger at forklare alle de sære fænomener, som disse materialer udviser, på en gang, og her er supra-lednings-egenskaben ikke engang den mest spektakulære. Teorien har dog et ganske alvorligt problem, som overhovedet ikke har noget med videnskab at gøre. Dens ophavsmand er P. W. Anderson fra Princeton. Anderson har siden krigen været den dominerende kraft i teoretisk faststoffysik og han fik Nobelprisen i 1976 for sit arbejde med at forstå uordnede systemer kvantemekanisk. Han er dog en temmelig kontroversiel person, der ikke viger tilbage for at fortælle andre mennesker at de har taget fejl, og det ofte på en noget arrogant facon. Det har betydet at ganske mange uvilkårligt reagerer negativt på hans ideer, uanset at der ikke er solide faglige argumenter imod. Personligt finder jeg hans ideer meget meget fascinerende, og de er interessante uafhængigt af, om de har med de nye materialer at gøre eller ej.

Sprogligt addendum

Jeg har i ovenstående artikel brugt termen *supra*ledning om det fænomen, som Kammerling Onnes opdagede i 1911. Dette er i modsætning til, hvad der er blevet gængs sprogbrug i de senere år, hvor man siger og skriver *super*ledning på dansk. Der findes ikke nogen sprogteoretisk grund til at bruge enten det ene eller det andet ord. På latin udtrykker *super* og *supra* stort set det samme. Forskellen skal snarere søges i forskelle mellem engelsk og tysk tradition. På tysk kaldes fænomenet *supraleitfähigkeit* og da vi i Danmark i begyndelsen af århundredet hovedsageligt orienterede os mod Tyskland, var det naturligt at bruge ordet supraledning. Hvis man studerer nogle af de store tyske fysikere, finder man at Frits London og Felix Bloch, der begge emigrerede først til England og siden til USA, i deres engelsksprogede afhandlinger fra 1930'erne bruger *supra*conductivity. Først efter krigen, hvor amerikansk fysik begynder at dominere, vil man se London og Bloch bruge *super*conductivity. Man kunne nu tro, at *supra* forstavelsen kun brugtes af tyskere på engelsk, men hos nogle af de absolut mest britiske blandt fysikere, nemlig Sir N. F. Mott og H. Jones, finder vi *supra*conductivity i deres bog *Theory of the Properties of Metals and Alloys* fra 1936. Noget tyder altså på, at man i England i 1940'erne gennemlevede en periode, hvor man skiftede fra *supra* til *super*, præcis som vi gør det nu i Danmark i disse årtier.



Per Hedegård er født i 1956. Er for tiden adjunkt ved Fysisk Laboratorium på Københavns Universitet, hvor han arbejder med teoretisk faststoffysik.