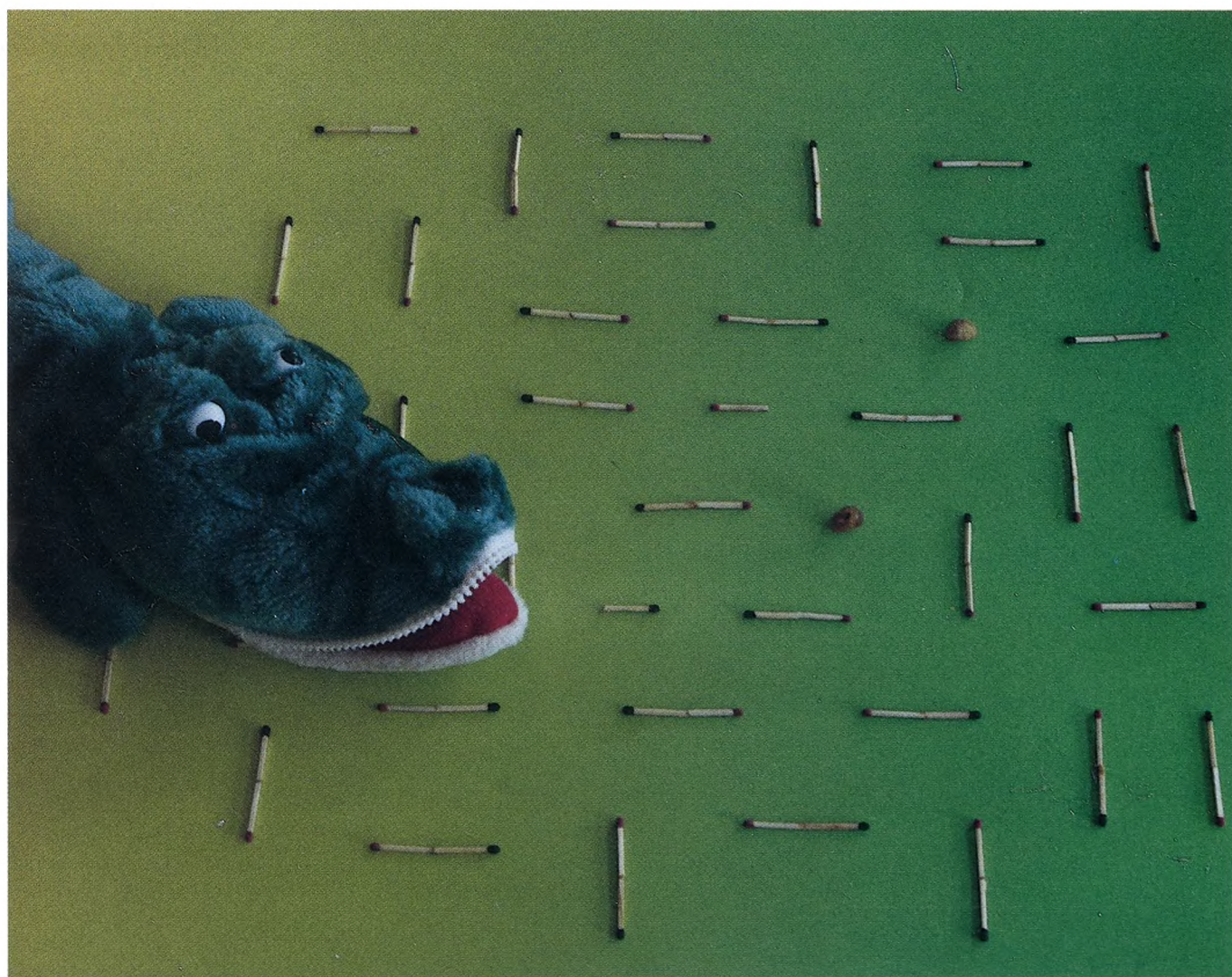


KVANT november 3 1990

Fysisk Tidsskrift

1. årgang



TEMANUMMER: HØJ-TEMPERATUR SUPERLEDNING • GENERELLE EGENSKABER • EN
TEORETISK MODEL • DEN DANSKE INDSATS • ANVENDELSER • TYNDFILMSTEKNOLOGI
• FYSIKLEGESTUEN • BINOMIALKOEFFICIENTER

KVANT

Fysisk Tidsskrift

Det fysiske Institut
Ny Munkegade
Århus Universitet
DK-8000 Århus C

Giro: 5 84 31 46
E-mail: kvant@dfi.aau.dk

Udgives af

Dansk
Fysisk
Selskab



Selskabet for
Naturlærens
Udbredelse



Redaktion

Jørgen Friis Bak (ansv.)

Det naturvidenskabelige fakultet
Århus Universitet

Torsten Freltoft

NKT

Mogens Esrom Larsen

Matematisk Institut
Københavns Universitet

Finn Berg Rasmussen

Fysisk Laboratorium
Københavns Universitet

Ove Østergaard

Silkeborg Amtsgymnasium

KVANT udkommer 4 gange årligt og er
medlemsblad for de udgivende selskaber.
Abonnementspris: 135 kr/år (i Danmark).

Annoncepriser

1/1 side	3000 kr
1/2 side	1600 kr
1/4 side	1000 kr
Farvetillæg	1500 kr

Priserne er excl. moms og gælder for repro-
klart materiale.

Oplag: 1500

Tryk: AKA-print

Indhold:

Sprogrøgt

Finn Berg Rasmussen, redaktionen 1
Hedder det superledning eller supraleddning?

Superlederes generelle egenskaber

Torsten Freltoft 3
Superledning betegner det fænomen at den elektriske modstand helt
forsvinder i visse materialer ved lave temperaturer. Det blev opdaget i
1911, men først i 50'erne blev fænomenet forklaret ved hjælp af de
såkaldte Cooper par. En anden egenskab ved superledere er, at de
skubber en eventuel magnetisk flux ud af deres indre.

Teori for supraleddning

Per Hedegård 7
Høj-temperatur supraleddning i keramiske supraleddere kan ikke umiddel-
bart forklares med den normale teori for supraleddning, baseret på
Cooper par. En teoretisk model baseret på at atomerne i de keramiske
supraleddere danner par ser ud til at forklare mange af de fænomener
man observerer.

Den danske indsats

Torsten Freltoft 13
Det Materialteknologiske Udviklingsprogram (MUP) største ramme-
projekt handler om højtemperatur superledere. Første etape, der afsluttes
til nytår, er netop blevet evalueret af et internationalt panel. Hvad er der
egentlig kommet ud af projektet?

ERASMUS-kursus i Bordeaux

Mette Andersen, Mette Marie-Louise Grage og Trine Møgelberg .. 16
ERASMUS programmet giver studerende ved de højere læreanstalter
mulighed for at deltage i kurser ved andre europæiske universiteter.

De første anvendelser af høj-temperatur superledning.

Jørn Bindslev-Hansen 17
Da høj-temperatur superlederne blev opdaget var der ingen grænse for
de forventninger man stillede til dem. Det har taget nogle år for at få de
første kommercielle anvendelser på gaden - men nu er de her.

Høj-temperatur superledende tyndfilm

Torsten Freltoft 20
De første praktiske anvendelser af keramiske superledere bliver uden
tvivl baseret på tyndfilmskomponenter. I Danmark fremstilles nu
krystallinske tyndfilm, hvor den elektriske strømtæthed kan være op til
 10^7 A/cm² svarende til de bedste resultater i verden.

Fysiklegestue på H.C.Ørsted instituttet

Kristian Pedersen 24
Et laboratorium på H.C.Ørsted instituttet er stillet til rådighed for de
studerendes eksperimenterende fantasi. Laboratoriets udstyr anvendes
også af gymnasieklasser, der besøger instituttet.

Hvorfor er binomialkoefficienter næsten altid lige?

Mogens Esrom Larsen 26

Bog anmeldelse: Fysikkens spor 28

Forsiden

Superledning - eller supraleddning - i keramiske superledere bygger mulig-
vis på at atomerne i materialet danner par. Modellen kan illustreres med en
tændstikmodel, som det sker i Per Hedegårds artikel, men det kan også
gøres med dobbelt-svovlede tændstikker og ravklumper. Dyret er med for
at minde os om at fysik grundlæggende set er en leg med naturen.

(foto: Leif Sarholt-Kristensen)

TEMANUMMER: HØJ-TEMPERATUR SUPERLEDNING

Med dette nummer af KVANT udkommer det første temanummer. De fleste numre af KVANT vil behandle en række emner, men fra tid til anden vil et enkelt emne, med en eller anden form for aktualitet, blive belyst fra flere sider.

Disse temanumre vil blive indledt med en bredt orienterende artikel, der vil give en baggrund for det pågældende emne. Det forventes at der vil være et årligt temanummer.

Superledere leder elektrisk strøm uden modstand. Indtil for få år siden kunne superledning kun forekomme ved meget lave temperaturer, hvor flydende helium skulle bruges som kølemiddel. Derfor var det kostbart og besværligt at arbejde med superledere. Med opdagelsen af de keramiske superledere, blev det muligt at anvende flydende kvælstof som kølemiddel. Forhåbningerne til de nye materialer var - og er - store.

SPROGRØGT

Finn Berg Rasmussen, redaktionen

Temaet for dette nummer af KVANT er superledning; - eller hedder det supraledning? - Inden for de sidste 25 år har mange danske fysikundervisere stillet dette spørgsmål. Svaret fremgår allerede af bladets indholdsfortegnelse: begge betegnelser er stadig i brug blandt danske fysikere.

En af KVANT-redaktionens ambitioner angår bladets sproglige kvalitet. At skrive to forskellige ord for det samme fænomen må betragtes som en uring, og vi valgte da også på et tidligt tidspunkt at gå ind for een betegnelse, "superledning", som den (formodentligt) mest udbredte form, og som den, der havde fremtiden for sig. "Supraledning" blev - troede vi - kun brugt af ældre fysikere, som havde læst megen tysk videnskabelig litteratur. En sproghistorisk kommentar findes i slutningen af Per Hedegårds artikel.

Sprogudviklingen følger - også indenfor et specialområde som fysik - sine egne lovmæssigheder og lader sig i hvert fald ikke styre af beslutninger i KVANT's redaktion. Derfor respekterer vi i et vist omfang forfatteres individuelle stil. I påkommende tilfælde sker det dog ikke uden forsøg på at overbevise vedkommende om, hvad redaktionen anser for at være godt dansk fysik-sprog.

Ikke overraskende har de hyppigste tvivlsspørgsmål at gøre med indflydelsen fra engelsk eller amerikansk. Eet oplagt aspekt er at finde passende danske ord. Skal for eksempel "sputtering" oversættes med "katodeforstøvning", som foreslået fra nogle sider? Det klart danske ord

"sprutning" vil næppe have en chance hos seriøse forfattere. Det kan højst tænkes brugt som mundtligt slang. Et rimeligt gæt er, at "sputtering" vil vinde, ligesom ved mange andre nye foreteelser med udenlandske betegnelser. Tænk bare på "computer" eller "glasnost".

Et andet aspekt er overførsel af engelske/amerikanske sprogkonstruktioner. "Quantum Hall effect" bliver let til "kvante Hall effekt", mens den danske form snarere er "kvantehalleffekt", eller hvis man vil bevare det store "H" i personnavnet Hall: "kvante-Hall-effekt".

Der ligger en stor pædagogisk værdi i et konsekvent og logisk ordvalg. Mange undervisere må have draget et lettelsens suk ved indførelsen af f. eks. "massetæthed" til afløsning af den tidligere, dybt ulogiske betegnelse "massefylde". KVANT-redaktionens politik er derfor også at følge danske standarder og dansk retskrivning i videst muligt omfang.

Imidlertid kan rigoristiske stilkrav undertiden give mærkværdige konsekvenser. Blandt lavtemperaturfysikere vandrer historien om en amerikansk fysiker, der så sig nødsaget til at inddrage sin kat som medforfatter, fordi et tidsskrift forlangte, at han skrev "we" om sig selv, uanset at han var eneforfatter (Phys. Rev. Lett. **35**, 1442 (1975)).

 Spectra-Physics

**Spectra
Diode Labs**

 **LASOTRONIC**

 **uniphase**

 **ANDO**

 **PHOTON
inc.**

 **JOBIN
YVON**

OPHIR

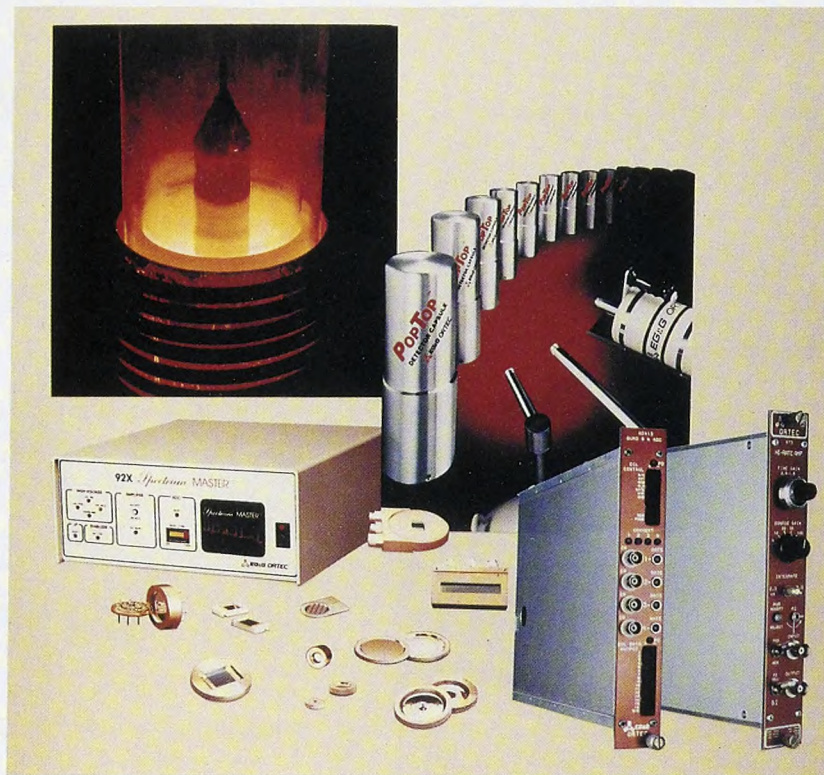
Exciton

burleigh

 **LASER
PHOTONICS**

 **UNITED
DETECTOR
TECHNOLOGY**

 **bbt.
instrumenter**



**TOOLS
of the
TRADE**

- Radiation
- Detection
- Measurement
- Analysis

**EG&G
ORTEC**

**Den danske leverandør
af radioaktivitetsmåle-
udstyr samt laser -
og opto - elektronik
fra de førende
fabrikanter**

 **laser science, inc.**

 **micro-
controlle**

 **EG&G ORTEC**

QUESTEK

 **EG&G
GAMMA SCIENTIFIC**

 **EG&G
FIBER OPTICS**

 **Quanta-Ray**

 **EG&G PRINCETON
APPLIED RESEARCH**

 **PHOTON
CONTROL**

**BBT Instrumenter ApS
Dr. Olgasvej 6
DK-2000 Frederiksberg**

**Telefon 31 19 82 08
Telefax 31 19 87 47
Telex 35 326 bbt dk**

**ELEKTRONIK
ELEKTROMEDICIN
ELEKTROKEMI
FORSKNING
UNDERVISNING**

SUPERLEDERES GENERELLE EGENSKABER

Torsten Freltoft, NKT

Superledning blev første gang iagttaget i 1911 på universitetet i Leiden af den hollandske videnskabsmand Kamerlingh Onnes. Onnes opdagede, at rent kviksølv fuldstændigt taber sin elektriske modstand, når temperaturen er under 4 K. Onnes blev også klar over, at kviksølv ved denne temperatur fremtræder i en ny tilstand, hvor de elektriske egenskaber er meget forskellige fra de hidtil kendte; denne nye tilstand blev kaldt den "superledende tilstand".

Det viste sig hurtigt, at man ved anvendelse af et tilstrækkeligt stærkt magnetfelt eller ved at føre en stærk strøm gennem en prøve kunne ødelægge dennes superledende egenskaber og genoprette dens normale specifikke modstand. Der gik imidlertid mere end 20 år før det blev opdaget, at et superledende metal også er karakteriseret ved usædvanlige *magnetiske* egenskaber helt forskellige fra de egenskaber, der normalt kendetegner metaller.

Indtil 1986 var der fundet superledning i 26 metalliske grundstoffer og i utallige legeringer. Den temperatur T_c , hvor overgangen fra normalt ledende til superledende tilstand sker, afhænger af stoffet. Tabel 1 viser nogle eksempler. I årene siden 1986 er der fundet superledning i en række keramiske materialer: kobberoxider og bismuthoxider med overgangstemperaturer, som er langt større end de tidligere kendte. Tre eksempler herpå er ligeledes vist i Tabel 1.

Tabel 1 Eksempler på superledende grundstoffer, legeringer og oxider.

Grundstoffer	T_c (K)	Legeringer	T_c (K)
Al	1.2	Nb ₃ Sn	18
Hg	4.2	Nb ₃ Ge	23
In	3.4	Oxider	T_c (K)
Nb	9.3	YBa ₂ Cu ₃ O ₇	92
Pb	7.2	Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110
Sn	3.7	Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	122

Teoretisk forstod man ikke superledning før sidst i 50'erne, hvor Bardeen, Cooper og Schrieffer fremsatte en teori (nu kendt som BCS-teorien), der giver en forklaring på fænomenet. Teorien er baseret på en kvantemekanisk behandling af elektronerne og gittersvingningerne (fononerne) i metaller, men en detaljeret gennemgang af denne teori ville blive for omfattende i denne sammenhæng. Derfor gives kun en kort fremstilling med henblik på at forklare de begreber og parametre, som er vigtige for at diskutere

superledning. Grundlæggende teoretiske aspekter omtales mere indgående i Per Hedegårds artikel i dette nummer af KVANT.

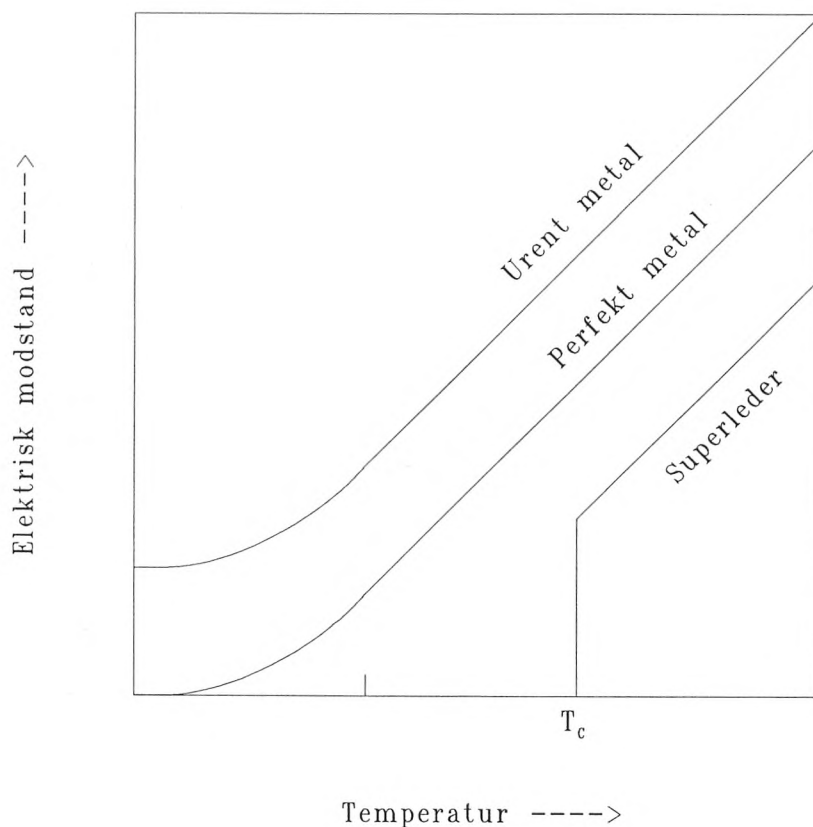
Et mikroskopisk billede

Når en elektrisk strøm føres gennem et normalt metal, undergår elektronerne til stadighed elektronspredningsprocesser som følge af den gensidige vekselvirkning mellem elektronerne og enten urenheder eller krystallernes gittersvingninger (fononerne). Spredningen er generelt uelastisk og forårsager derfor tab af energi (varme) til omgivelserne, og elektrisk modstand opstår. I et helt ideelt, rent og perfekt metal ville elektronspredningen alene foregå ved hjælp af gittersvingninger. Her ville modstanden forsvinde helt, når temperaturen nærmer sig nul. Fononerne "fryses ud" ved lave temperaturer. I alle virkelige, normaltledende metaller bliver der imidlertid en restmodstand tilbage ved lave temperaturer. Restmodstandens størrelse afhænger blandt andet af metallens renhed. I figur 1 vises skematisk den specifikke modstand som funktion af temperaturen for et helt rent, et urent og et superledende metal.

Ved høje temperaturer vil en superleder opføre sig som et almindeligt metal. Ved afkøling under en vis temperatur T_c overgår elektronerne til den superledende fase. T_c kaldes den kritiske temperatur eller overgangstemperaturen. I den superledende fase vil elektronerne parvis kredse om hinanden og danne danne par, de såkaldte "Cooper par". Parret har en karakteristisk udstrækning, ξ , kohærenslængden. Derfor vil ξ også være den typiske tykkelse af et eventuelt overgangslag mellem et superledende og et normalt domæne i et materiale. I tabel 2 vises værdier af ξ for forskellige typer superledere. ξ er normalt meget større end udstrækningen af de fejl, der begrænser ledningsevnen, for eksempel omfanget af gitterdeformationer eller størrelsen af forurenende atomer.

Cooper parrenes eksistens kan forklares ud fra kvantemekanikken, som det forklares i den følgende artikel. Kvantemekanisk set beskrives en partikel eller et partikelsystem ved at det er i en givet tilstand, der kan beskrives ved en bølgefunktion. Elektroner, protoner, neutroner har den egenskab at der kun kan være én partikel i en givet tilstand, som angivet af Paulis udelukkelses princip. Disse partikler kaldes under et for fermioner.

Andre partikler er bosoner, og der er ingen begrænsning på hvor mange af disse der kan være i den samme tilstand. To fermioner kan knytte sig sammen og blive til en boson - det sker blandt andet med elektron-parret i et Cooper par. Når temperaturen kommer ned under T_c vil Cooper parrene have i en tilstand, hvor de har mindre energi end de enkelte elektroner. Dette betyder, at der er en energimængde, som skal tilføres for igen at skille elektronparret ad. Energigabet, betegnet 2Δ , kan betragtes som en bin-



Figur 1. Den elektriske modstand som funktion af temperaturen for et urent, et perfekt og et superledende metal.

dingsenergi mellem elektronerne i parret. Δ afhænger af temperaturen som vist i figur 2.

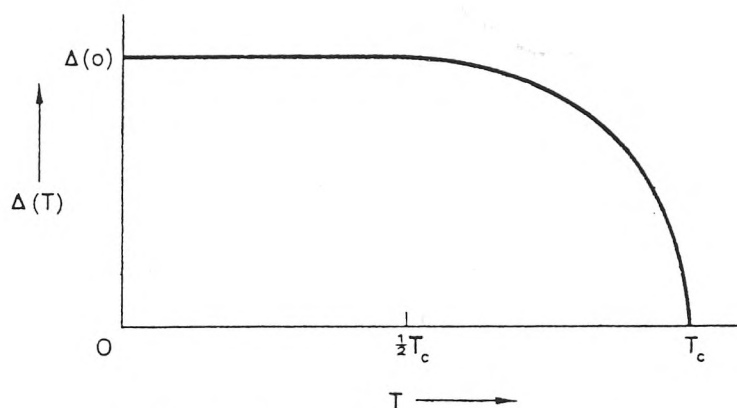
Som det kan ses af figuren, når Δ en næsten konstant værdi $\Delta(0)$ omkring $0.75T_c$. For at opnå stabile betingelser er det derfor ved de fleste anvendelser vigtigt, at den temperatur, man arbejder med, er lavere end den ovenfor anførte temperatur.

BCS teorien forudsiger en simpel sammenhæng mellem $\Delta(0)$ og den kritiske temperatur:

$$2\Delta(0) = 3.5kT_c,$$

hvor k er Boltzman konstanten. Hvis det antages, at relationen også gælder for de nye oxid superledere med kritiske temperaturer på omkring 100K, betyder det, at de har energigab, der svarer til foton bølglængder omkring $5 \mu\text{m}$ (det infrarøde område). Dette gør dem blandt andet til potentielle kandidater for anvendelser som detektorer for infrarød stråling. Det betyder også, at de til elektroniske anvendelser i princippet kan fungere ved langt højere frekvenser end traditionelle superledere - potentielt helt op i THz området ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$).

Δ kan blandt andet måles ved at iagttage infrarød absorbtion i materialet. I den superledende tilstand vil



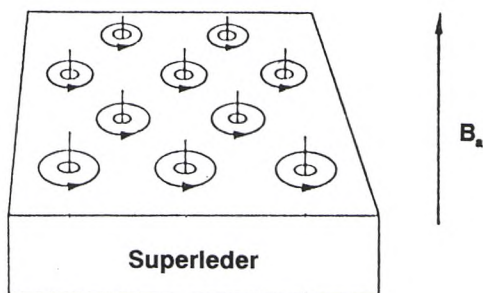
Figur 2. Variation af energigabet Δ som funktion af temperaturen.

fotoner med energi over 2Δ kunne opløse Cooper par, mens fotoner med lavere energier ikke kan. Man observerer derfor en kant eller et trin i absorptionskurven ved passage af energien 2Δ . Δ kan også findes ved iagttagelse af den kvantemekaniske tunneffekt eller ved varmfyldemålinger.

I den superledende tilstand er Cooper parrene låst sammen i en fælles kollektiv kvantetilstand, hvor de alle har samme translatoriske hastighed, v . Derfor er det kun muligt at påvirke en elektron, d.v.s. tage energi fra den, ved at bryde et par. Dette kræver imidlertid en energi på 2Δ , som må tages enten fra elektronens kinetiske energi eller fra gittersvingningerne. Elektronernes kinetiske energi er direkte forbundet med strømtætheden, j ; derfor nås en øvre grænse for j , benævnt j_c , når den elektroniske kinetiske energi er lig 2Δ . Da Δ afhænger af temperaturen, vil j_c også afhænge af temperaturen. Typiske j_c værdier for $T = 0$ vises i tabel 2.

Magnetiske egenskaber

Superledere har også meget usædvanlige magnetiske egenskaber: Et metal i den superledende tilstand tillader aldrig eksistensen af magnetisk flux i sit indre. Dette betyder, at inden i et superledende metal, er den magnetiske induktion B altid lig 0. Superlederen siges at være en perfekt diamagnet. Dette betegnes også som Meissner effekten opkaldt efter Meissner og Ochsenfeld, der først opdagede fænomenet i 1933. Da superledere på denne måde "frastøder" magnetfelter, kan en permanent magnet svæve i luften over en superledende prøve. Dette er en meget enkel måde at demonstrere Meissner effekten på. Man kan betragte Meissner effekten som en virkning af skærmstrømme, der løber langs overfladen af superlederen og danner et magnetfelt, som nøjagtigt udligner og derfor fjerner det påtrykte felt. Dette er forskelligt fra en perfekt leder, som ville omgive sig med skærmstrømme, alene for at opretholde de indre feltforhold.

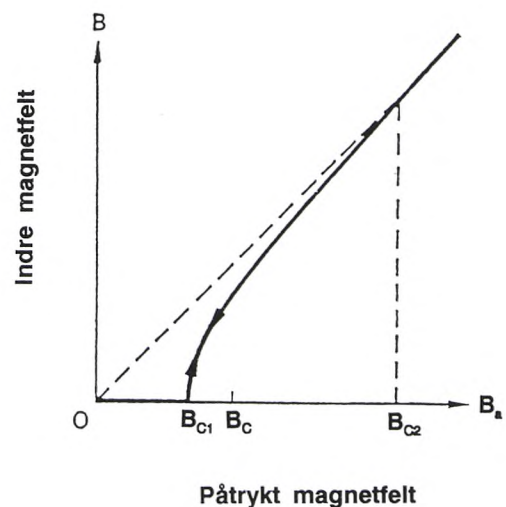


Figur 3. Fluxkerner i en Type II superleder med en påtrykt magnetfelt $B_a > B_{c1}$.

Betragt et metal, som bliver påtrykt et ydre magnetfelt, B_a , i den superledende tilstand. Udenfor superlederen er den magnetiske fluxtæthed derfor B_a , og inde i superlederen er $B = 0$ som anført ovenfor. Af elektrodynamiske årsager (Maxwell's ligninger) ændres B ikke diskontinuerligt på

overfladen, og derfor er der i overfladen af superlederen et tyndt lag, hvor skærmstrømmene løber, og som feltet trænger delvist igennem. Tykkelsen af dette lag hedder London indtrængningsdybden, λ , efter de to engelske videnskabsmænd, F. og H. London, som i 1935 forudsagde tilstedeværelsen af denne. Typiske værdier for λ vises i tabel 2.

Det koster en energi svarende til den magnetiske feltenergi ved den anvendte feltstyrke i det superledende volumen for at udelukke det magnetiske felt. Hvis denne energi overstiger den totale kondensationsenergi, 2Δ , i alle Cooper parrene i volumenet, vil parrene deles og derved lade det magnetiske felt trænge ind; dvs. superledningsevnen er ødelagt. Dette antyder eksistensen af et kritisk felt, B_c , over hvilket et superledende metal vender tilbage til normaltilstanden.



Figur 4. Det gennemsnitlige indre magnetfelt som funktion af det påtrykte felt i en type II superleder.

Dette enkle billede kan anvendes ved de fleste superledende metalliske grundstoffer, hvor $\xi > \lambda$. ξ er, som omtalt ovenfor, den korteste afstand, indenfor hvilken materialet kan skifte fra superledende til normal tilstand. Disse stoffer benævnes Type I superledere. I mange superledende legeringer og i de keramiske superledere er $\xi < \lambda$ (se tabel 2), og der er derfor ikke brug for noget stort volumen for at skabe en tynd kerne i normal tilstand gennem superlederen. Derfor kan disse materialer, der kaldes Type II superledere, tillade, at flux trænger ind i deres indre ved at skabe en tynd kerne af radius ξ ; denne kerne vil være i normal tilstand (se Figur 3). Det kræver anvendelse af en vis (lav) feltstyrke, før fluxkerner dannes. Dette kaldes det lavere kritiske magnetfelt, B_{c1} , og for anvendelser lavere end B_{c1} opfører Type II superledere sig som Type I. Hvis $B_a > B_{c1}$ dannes fluxkerner, indtil superlederen ved en eller anden høj feltstyrke fyldes fuldstændigt med fluxkerner (normal tilstand), og der ikke er noget superledende volumen tilbage. Ved dette øvre kritiske

Tabel 2 Typiske parameter værdier for superledere.

Kategori	Max T_c K	ξ nm	2Δ meV	j_c A/cm ²	B_{c1} T	B_{c2} T	λ nm
Lav T_c type I	7.2	1000	2	$10^{4*})$	0.01-0.1		50
Lav T_c type II	23	10	6	10^7	0.01	10	50
Høj T_c bulk	125	1	35	10^3	0.01	(100)	100
Høj T_c film	120	1	35	10^6	0.01	100	100
*) j_c for en type I superleder afhænger af geometrien.							

magnetfelt, B_{c2} , er hele materialet således i normal tilstand. Typiske værdier for de omtalte parametre vises i tabel 2, og figur 4 viser fluxtætheden B inde i materialet som funktion af det påtrykte magnetfelt B_a .

På grund af den kvantemekaniske natur af den superledende fase vil den fluxmængde, der går gennem et normal område omkranset af en superleder, være kvantiseret til et helt antal *fluxkvanter*. Fluxkvantet kaldes Φ_0 , og $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \cdot 10^{-15}$ Weber (h og e er henholdsvis Planck's konstant og elektronladningen). I en type II superleder vil de ovenfor nævnte fluxkerner i normal tilstanden, der gennemtrænger superlederen ved påtrykte felter mellem B_{c1} og B_{c2} netop, indeholde ét fluxkvant hver.

Dette kan forklares på følgende måde. Da $\xi < \lambda$, er energiomkostningen ved at bryde Cooper par i kernen

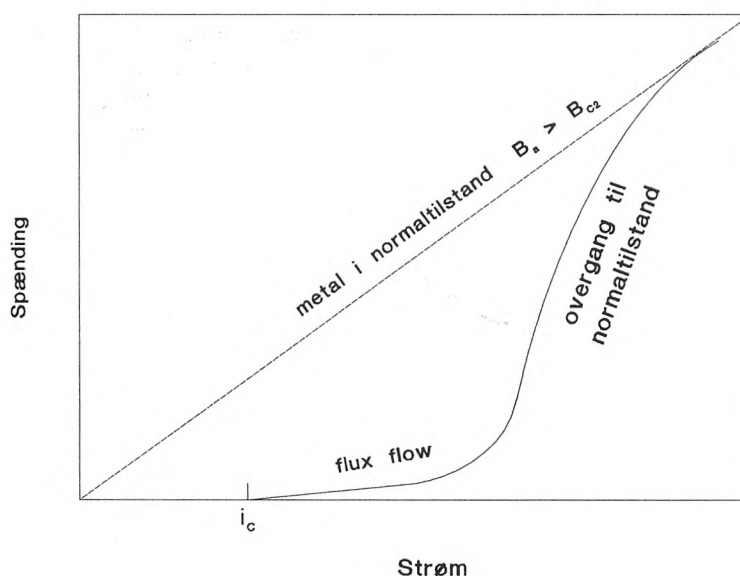
mindre end besparelsen i feltenergi. En type II superleder vil derfor søge at fordele den indtrængende magnetiske flux i så mange fluxkerner som muligt. Fluxkvantiseringen sætter imidlertid en nedre grænse for fluxen i en kerne, sådan at hver fluxkerne i en type II superleder netop indeholder ét fluxkvant.

Hver fluxkerne har omtrentligt et tværsnitsareal på $\pi \xi^2$. Det øvre kritiske felt B_{c2} nås, når kernerne fylder hele materialet. Man har altså

$$B_{c2} \approx n \pi \xi^2,$$

hvor n er antal fluxkerner pr. arealenhed.

Fluxkvanterne genereres af konstante strømhvirvler omkring kernen. Hvirvelstrømmene fra forskellige flux-



Figur 5. I-V kurve for Type II superledere med påtrykt magnetfelt mellem B_{c1} og B_{c2} .

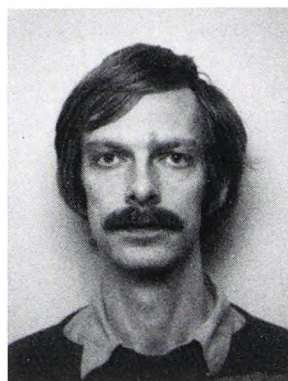
kerner påvirker gensidigt hinanden, og som en konsekvens heraf frastøder to fluxkerner hinanden. Kernerne er derfor ikke tilfældigt fordelt, men danner sædvanligvis et hexagonalt gitter, der kaldes fluxgitteret (Figur 3). Termisk inducerede vibrationer kan i visse tilfælde bryde fluxgitteret ved temperaturer lavere end den kritiske temperatur. Man kan betragte dette som en slags "smeltning".

Pinning

Som nævnt ovenfor nedbrydes superledningsevnen hvis en strømtæthed større end j_c passerer gennem prøven. Samtidigt vides det, at enhver strømbevægelse vil skabe et magnetfelt og derfor, da flux kun er tilladeligt inden for overfladelaget, λ , kan strømmen kun løbe i dette tynde lag. Det blev nævnt ovenfor, hvorledes Meissner effekten kan betragtes som om superlederen opretter skærmstrømme ved overfladen. Dette medfører nu en sammenhæng mellem den kritiske strømtæthed, j_c og B_c på følgende måde: B_c nås, når de skærmstrømme, der anvendes til at udligne feltet, overstiger j_c . Hvis en transportstrøm passerer gennem superlederen, mens et ydre magnetfelt påtrykkes, reduceres den effektive kritiske transportstrøm med den styrke, der kræves for at afskærme feltet. Dette gælder dog kun for Type I superledere. De kritiske strømstyrker observeret i Type II superledere er generelt meget lavere end forventet, hvis man sætter dem i forhold til de meget høje øvre kritiske feltstyrker, der er fundet for disse materialer (se tabel 2). Denne afvigelse finder sin oprindelse i fluxkernernes opførsel. Når en strøm passer gennem en Type II superleder, hvor fluxkerner er til stede, vil der på hver strømhvirvel virke en Lorentzkraft vinkelret på både transportstrømmen og på fluxlinien. Hvis intet hindrer dem, vil fluxlinierne bevæge sig i retning af Lorentzkraften. Denne bevægelse viser sig imidlertid at være viskøs, det vil sige, at der er en gnidningskraft, der modsætter sig deres bevægelse. Der må derfor udføres et arbejde for at opretholde bevægelsen, og et sådan arbejde kan kun blive udført af transportstrømmen, hvilket medfører et spændingsfald i materialet; prøven udviser modstand. Figur 5 viser I-V kurven skematisk for type II superledere med påtrykt magnetfelt mellem B_{c1} og B_{c2} .

Det er muligt at begrænse energitabet, der opstår på grund af fluxlinie bevægelserne. Urenheder og uregelmæssigheder i superlederen har en tendens til at fastholde fluxlinierne. Dette betyder, at en højere Lorentzkraft (d.v.s. en højere transportstrøm) er nødvendig, før fluxbevægelsen starter, og derfor bliver j_c højere. Specielt hvis fluxlinierne er fastfrosne i et fluxgitter, behøver man kun forholdsvis få, men stærke pinning centre for at fastholde hele gitteret. Det har på denne måde været muligt at trimme Nb_3Sn tråde til at føre mere end 10^7 A/cm² selv i felter på flere Tesla ved 4.2 K. For de nye keramiske superledere er problemerne omkring en kontrol af flux pinning endnu ikke løst, men forsøg har vist, at blandt andet neutron strålings beskadigelse af keramiske superledere har kunnet øge den kritiske strøm i høje magnetfelter.

I denne artikel har vi forsøgt at give en basal introduktion til de parametre og fænomener, der er vigtige indenfor superledning - og specielt for anvendelser baseret på superlederes strømbærende egenskaber. En mere detaljeret introduktion til en teoretisk behandling af superledning findes i Per Hedegårds artikel senere i dette nummer, og en kort introduktion til elektroniske anvendelser gives i Jørn Bindslev Hansens artikel.



Torsten Freltoft Civilingeniør fra Danmarks Tekniske Højskole (1983). Afgangsprøve ved fysikafdelingen, RISØ, hvor han også gennemførte licentiatarbejdet indenfor småvinkel neutronspredning i fraktale strukturer. Efter to års ophold i neutron gruppen på Brookhaven National Laboratory, New York, blev han i 1988 ansat ved NKT's koncernudviklingscenter, hvor han er projektleder for virksomhedens aktiviteter indenfor højtemperatur superledning.

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 supralednings-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 iskristallen bevæge sig stift i den retning, som den bliver skubbet. Energien, som man overfører, vil forblive som kinetisk energi af hele kristallen 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 iskystal. Denne kollektive bevægelse af elektronerne manifesterer sig for eksempel i at der ikke er nogen varme-afsættelse i ledningen, det vil sige ifølge ovenstående formel at modstanden $R = 0$. Nu er det jo sådan at en terning laves 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 simple 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. Erstatte 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 af 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 brøkdelen af alle partiklerne sætte sig i samme tilstand, nemlig den med lavest

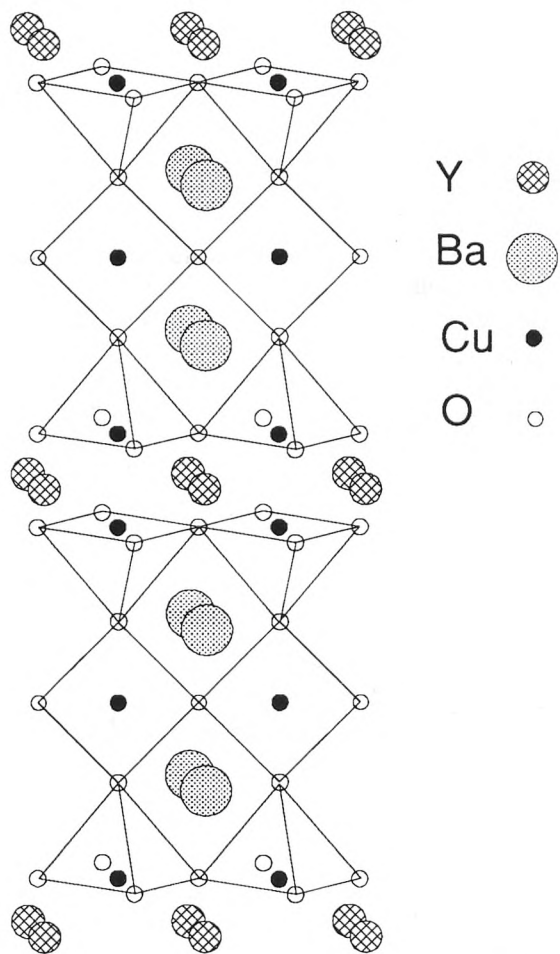
energi. Hvis denne tilstand så oven i købet var en bølge, der interfererede sig gennem materialet fra den ene ende til den anden, så havde man en supraleder. London kunne også vise, at hvis man påtrykte et magnetfelt, så ville den resulterende bølge give anledning til en strøm og et dertil hørende magnetfelt, 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 beskæftiget 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 elementar-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 ubestemtheden 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: $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

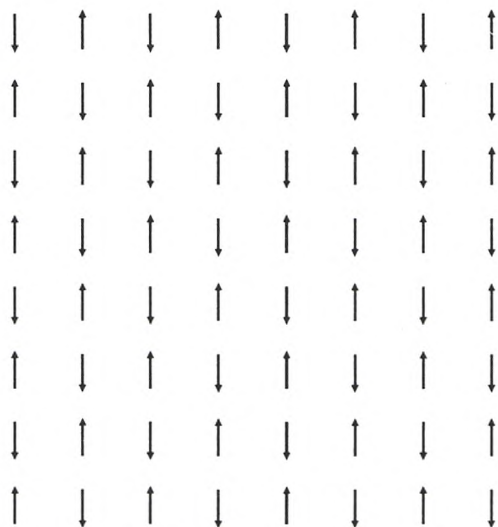
at den orden som kendetegner alle "stive" systemer, ikke nødvendigvis er en rumlig orden, som for eksempel is, men snarere en orden i energi, nemlig derved at alle Cooper-parrene er i samme laveste energitilstand.

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

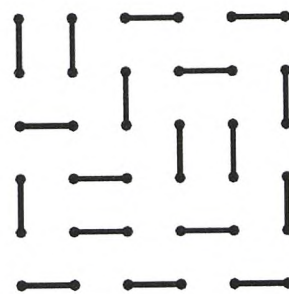
de mest slående eksempler på dette er at rene stoffer, det vil sige stoffer med en kemisk sammensætning, der følger den såkaldt støkiometriske kemiske formel (f.eks. La_2CuO_4 i stedet for $\text{La}_{1.8}\text{Ba}_{0.2}\text{CuO}_4$), er magnetiske isolatorer; ikke sædvanlige magneter men *anti-ferro-magneter*. Dette vil jeg forklare lidt nærmere, for heri skal man sikkert søge den endelige forklaring på stoffernes supraledeende 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 positivt ladede og dermed frastøder hinanden, og det ovenikøbet særlig kraftigt på især kobber. Et hul kan



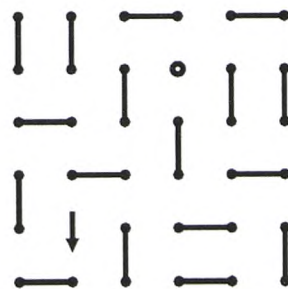
Figur 2. Spinkonfiguration for en antiferromagnet.

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 hveranden spin peger opad og hveranden peger nedad. Se figur 2. Dette er præcis, hvad man finder i supralederne.



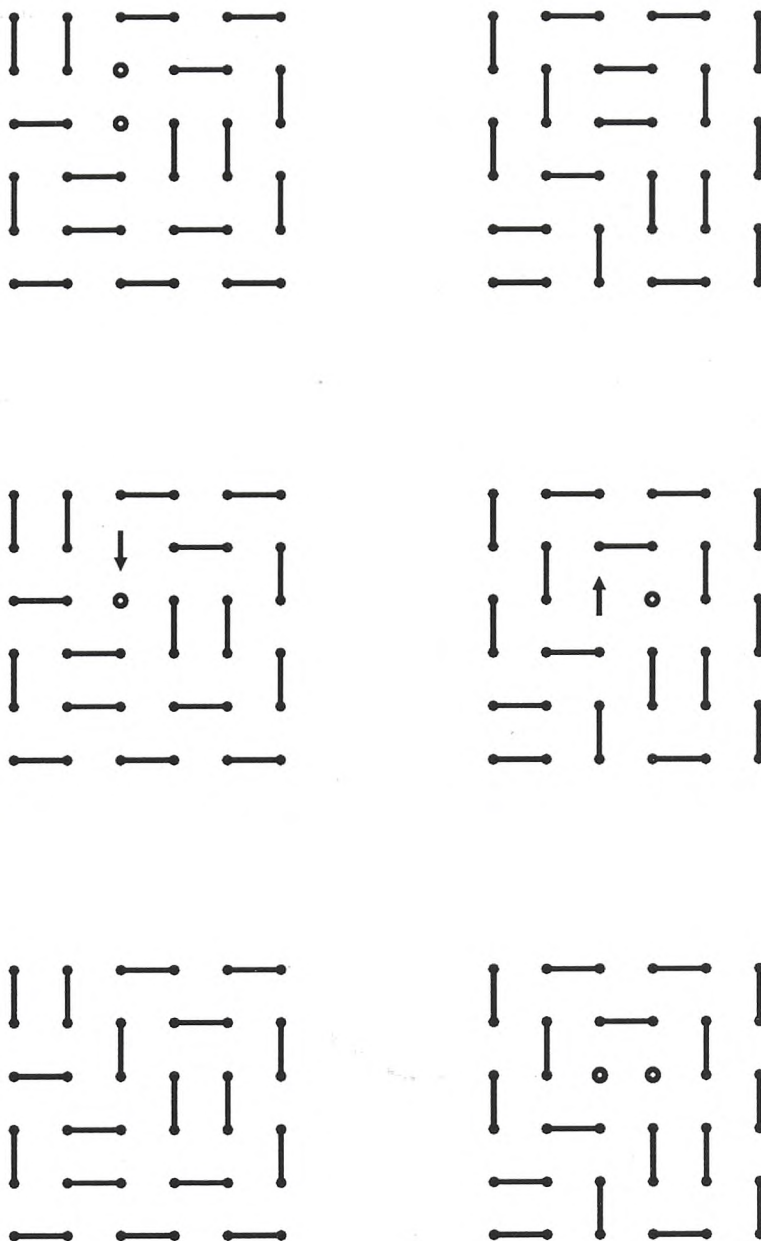
Figur 4. De to kvasipartikler i RVB tilstanden. Den ladede partikel, *holonen*, kan ses nederst i figuren. Når der løber en strøm i laget, betyder det at holonerne bevæger sig. Den anden type partikel, *spinonen*, har ingen ladning men derimod et spin. Den kan ses i det øverste højre hjørne. En ganske almindelig elektron har både ladning og spin. Hvis man fjerner en elektron fra CuO_2 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 supralejdningsegenskaben, 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 supralejdning. 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 supralejdning.

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 *supraledning* 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 *superledning* 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 *supraconductivity*. Først efter krigen, hvor amerikansk fysik begynder at dominere, vil man se London og Bloch bruge *superconductivity*. 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 *supraconductivity* 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.

HØJ-TEMPERATUR SUPERLEDNING - DEN DANSKE INDSATS

Torsten Freltoft, NKT

Efter opdagelsen af de keramiske superledere i slutningen af 1986 var der også i Danmark stor interesse for at arbejde med udviklingen og forståelsen af de nye materialer. Der var allerede fra begyndelsen lagt op til, at indsatsen skulle være *koordineret*, og man dannede et koordinationsudvalg med repræsentanter fra de mest interesserede institutioner og virksomheder. Som talsmand for udvalget valgtes Sektionsleder Mourits Nielsen, Fysikafdelingen, RISØ. Efter en hastebevilling givet af Statens Naturvidenskabelige Forskningsråd og Industri & Handelsstyrelsen til projektet i 1988 blev superlederprojektet i 1989 til et rammeprogram indenfor Det Materiale teknologiske Udviklingsprogram, og koordinationsudvalget fortsatte som styregruppe for rammebevillingen. Endvidere er der givet betydelig støtte til superleder forskningen fra de to danske el-forsyningselskaber ELSAM og ELKRAFT.

I alt ti offentlige institutter samt to private firmaer har deltaget aktivt i projektet. Det relativt store antal deltagende offentlige laboratorier afspejler dels den store interesse, som højtemperatur superledning har blandt danske forskere, dels at det har været en nødvendighed for at kunne udnytte et tilstrækkeligt bredt udvalg af eksperimentelle teknikker. Tabellen angiver de deltagende parter samt de *hovedaktiviteter* eller faciliteter, de hver har bidraget med.

For at samordne indsatsen og øge samarbejdet indenfor de forskellige hovedaktiviteter er der oprettet tre arbejdsgrupper:

- 1: Kemi og materialer
Syntese af materialer og pulverteknologi samt komponenter baseret på disse.
- 2: Fysik
Teoretisk arbejde samt elektriske, magnetiske og strukturelle aspekter.
- 3: Film
Tyndfilm produktion og komponenter. Deponeringsteknikker: laser forstøvning, sputtering og MBE teknologi.

I det følgende gives et kort overblik af arbejdet og resultaterne indenfor hver af disse arbejdsgrupper, og til sidst kikker vi nærmere på evalueringsrapporten. I en separat artikel beskrives i større detalje et af hovedresultaterne indenfor projektet, nemlig fremstillingen af krystallinske superledende tyndfilm med kritiske strømtætheder op til 10^7 A/cm² målt ved flydende kvælstofs temperatur, 77 K.

Kemi/materiale gruppen.

Formålet har her været at udvikle *pålidelige* metoder til produktion af høj-kvalitets pulver af de forskellige superledende materialer. Materialerne har hovedsageligt været anvendt til targets for tyndfilm-deponering, superledende

Tabel I Deltagere og hovedaktiviteter i rammeprogrammet for højtemperatur superledning.

Deltager	Hovedaktiviteter
HCØ	
Fysisk Laboratorium	Grundlæggende teori Ion-bestråling
Kemisk Lab. IV	MBE film teknik
NORDITA	
DTH	
Fysisk Lab. I	Superledende film og komponenter
Fysisk Lab. III	Magnetiske og elektriske egenskaber
Lab. for Tekn. Fysik	Elektronmikrosopi (TEM)
Kemisk Lab. B	Struktur kemi, Røntgen analyser
Inst.f. Mineralindustri	Keramik teknologi, pulverfremstilling
RISØ	
Fysikafdelingen	Neutron og røntgen diffraktion Neutron bestråling
Aarhus Universitet	
	Faststof kemi Krystal dyrkning
Haldor Topsøe A/S	
	Bulk superledere Varmepresning Smelte-texturering Superledende tråde
NKT A/S	
	Tyndfilm, laser forstøvning Tyndfilmslitografi Superledende tråde

tråde, strøm begrænsere samt til studier af processer, der kan orientere mikrokristallerne i et pulver. I begyndelsen af projektet kastede de fleste af de deltagende institutter og virksomheder sig ud i materialefremstilling, men i de sidste par år har aktiviteterne været koordineret, så pulverudvikling varetages af IMI og HTAS.

Superledende tråde er fremstillet på NKT ved at fylde sølvør med superledende pulver og derefter trække og valse sølvørret, så det superledende pulver komprimeres, og derved fremstilles et langt fleksibelt bånd. For at skabe elektrisk kontakt mellem de enkelte superledende korn må

båndet sintres ved temperaturer omkring 900 °C, hvorefter hele båndet er superledende. Til gengæld taber tråden sin fleksibilitet ved varmebehandlingen. Med denne metode er der opnået kritiske strømtætheder i nærheden af 1000 A/cm² målt ved 77 Kelvin. Dette er af samme størrelsesorden som de strømme, man almindeligvis kan sende gennem en kobbertråd. De opnåede resultater er derfor ikke umiddelbart anvendelige til praktiske formål. Her kræves strømtætheder, der er 10 til 100 gange større, for at det kan betale sig at udnytte superledere frem for normale metaller.

Problemet ligger i korngrænserne. Der, hvor to korn er smeltet sammen under sintringen, skabes generelt kun et "svagt led" med stærkt reducerede strømbærende egenskaber sammenlignet med den kritiske strøm i et enkelt krystalkorn. Forsøg i Amerika har vist, at orienteringen af krystalkornene her spiller en afgørende rolle. Hvis to korn, der er orienteret ens (eller næsten ens) i forhold til hinanden, sintres sammen, vil korngrænsen kunne bære en høj strøm. Til gengæld fås meget dårlige strømbærende egenskaber for sammen-sintrede korn med forskellige orienteringer. Hemmeligheden er altså, at få krystalkornene orienteret i forhold til hinanden, enten mens tråden formgives (trækning og valsning eller smedning) eller under varmebehandlingen. Der bruges derfor megen tid på at studere processer, der kan formidle en sådan orientering. Foreløbig er det ikke lykkedes at udvikle nogen tilstrækkelig effektiv orienteringsteknik i Danmark, men et enkelt firma i Japan, Sumitomo Electric Industries, og et konsortium med det italienske Pirelli i spidsen har hver for sig offentliggjort resultater med kritiske strømtætheder op til 40.000 A/cm², så der er stadig mulighed for, at de keramiske superledere har en fremtid indenfor højstrømsanvendelser.

Fysik gruppen.

Indenfor fysik gruppen har en lang række karakteriseringsopgaver været løst, såsom måling af elektriske modstandskurver, susceptibilitet, magnetisering, krystalstruktur og orientering (textur), elektron mikroskopering (SEM, TEM), grundstofanalyse (EDX), mikrobølgetab osv. På grund af den meget brede sammensætning af deltagere i rammeprogrammet har eksperimentel ekspertise været til rådighed på næsten alle områder.

Det er samtidig i fysik gruppen, de mest grundforskningsprægede aktiviteter er foregået. Det gælder f.eks. teoretisk arbejde med en mikroskopisk teori om elektronstrukturen i de nye materialer baseret på den såkaldte *Resonating Valence Bond* (RVB) model. Herom kan der læses i Per Hedegårds artikel andetsteds i dette nummer af KVANT. Iøvrigt er der på NORDITA foretaget meget omfattende computer simuleringer af flux liniers opførsel i to dimensionelle flux gitre. Der er her opdaget nye sammenhænge mellem flux gitterets elastiske egenskaber og urenheder i materialet.

Af grundlæggende eksperimentelt arbejde kan nævnes studier udført på RISØ af reaktionskinetikken samt bestemmelse af fase diagrammet og reaktionshastighederne i YBa₂Cu₃O_{6+x}. Her har også de antiferromagnetiske korrelationer i samme materiale været studeret i samarbejde med udenlandske forskere.

Film gruppen.

Det er indenfor tyndfilmsarbejdet, at nogle af de mest bemærkelsesværdige resultater er opnået. Det drejer sig om fremstilling af krystallinske (epitaxielle) tyndfilm af YBa₂Cu₃O₇ med kritiske strømtætheder omkring 10⁷ A/cm² målt ved 77 Kelvin. Filmene fremstilles på NKT med en ny teknik kaldet laser forstøvning, og resultaterne ligger på linie med de allerbedste i verden. Der er således i Danmark mulighed for at være med i en tidlig teknologisk udnyttelse af de keramiske superledere baseret på disse film. NKT's tyndfilmsarbejde er beskrevet i en selvstændig artikel, og konkrete anvendelsesmuligheder er behandlet i Jørn Bindslev Hansens artikel her i bladet.

Det øvrige tyndfilmsarbejde har hovedsageligt omfattet karakterisering af NKT-filmene samt udvikling af velegnede litografiske processer og andre metoder til dannelsen af de basiselementer, der er nødvendige for udvikling af egentlige tyndfilmskomponenter. Det drejer sig bl.a. om superledende baner, multilag, mikrostrips, superledende kryds og Josephson mikrobroer. Et eksempel på en Josephson mikrobro er fremstillet på HCØ med ion-bestråling af en indsnævring i en superledende bane.

Hvad kom der så ud af evalueringen ?

Et fortsat nationalt program for høj-temperatur superledning må være baseret dels på den internationale udvikling og dels på de resultater og den ekspertise, der er opnået i de første tre år. Arbejdet i denne periode har været evalueret af et internationalt panel nedsat af forskningsrådene, og evalueringsrapporten er netop afleveret.

Rapporten er opbygget, så hvert deltagende laboratorium er evalueret separat, og der er til slut afsnit, der evaluerer samarbejde og koordination samt de teknologiske perspektiver. Evalueringen er gennemgående positiv og fremhæver mange solide indsatser, der har præget det meste af arbejdet.

Graden af koordination i projektet har været passende i forhold til den måde, hvorpå styregruppen har valgt at organisere arbejdet. Organisationen har været baseret på afholdelse af fælles- og emnemøder, fordeling af fællesudgifter samt årlige forhandlinger om budgettet. En mere diktatorisk ledelse ville selvfølgelig have kunnet fremme koordinationen.

Programmet skønnes at have vigtige teknologiske elementer for tyndfilmsanvendelser og på komponentområdet. Arbejdet med materialeudvikling og tråde er også lovende, især hvis det kan fokuseres mere præcist samtidigt med, at det akademiske engagement øges indenfor dette område.

Ialt konkluderes det derfor, at det for Danmark er værdifuldt at *fortsætte* et nationalt program indenfor høj temperatur superledere. Det vurderes, at programmet kunne beskæres med op til 30%, hvis man til gengæld kun satser på et snævrere område, f.eks. udviklingen af tyndfilm. Programmet kunne dog med megen fordel fortsætte på det nuværende niveau eller højere, og derved stadig omfatte udvikling af bulk anvendelser.

ERASMUS-kursus i Bordeaux.

Tre fysikstuderende fra København, Mette Andersen, Mette Marie-Louise Grage og Trine Møgelberg, deltog i dagene 10-28 september i et intensivt ERASMUS-kursus i Bordeaux, arrangeret i fællesskab af universiteterne i Belfast, Bielefeld, Bordeaux, Bruxelles, Durham, Frankfurt, København, Madrid, Paris og Rom. Her fortæller de lidt om hvordan det var at deltage:

I de fleste andre europæiske lande varer sommerferien indtil den 1. oktober, så mens vores medstuderende startede på det nye semester tog vi på sommerskole i Bordeaux. Denne var et 3-ugers kursus i atomare og molekylære vekselvirkninger arrangeret under det europæiske ERASMUS-program.

Kurset var sammensat af ti universiteter fra forskellige EF-lande, hvorfra såvel professorer som studerende kom. Hovedemnerne omhandlede forskellige typer af kollisioner, startende med potentialspredning, hvorefter vi trinvis gjorde beskrivelsen af det man spreder på (target) mere detaljeret. Herunder kom vi ind på elektron-atom-, atom-atom- og molekyle-spredning. Udover dette hørte vi lidt om atomers vekselvirkning med elektromagnetiske felter, noget om klynger samt en lille smule om kvantekemi. Kurset afsluttedes med et par forelæsninger om eksperimentelt arbejde og i forbindelse med disse blev vi vist rundt på nogle laboratorier. Som en god og nyttig illustration til teorien var der udarbejdet en del computerprogrammer, som var aldeles fremragende.

Selve opholdet blev finansieret af ERASMUS-projektet og transporten fik vi danskere dækket af Konsul Axel Nielsens Mindelegat.

På kurset var vi 33 studerende, hvoraf de fleste andre var igang med deres Ph.D.-studier. Vi var allesammen indlogeret på det samme kollegium, hvilket var udemærket med hensyn til kontakten os imellem. Ved at tale med de andre og med de professorer, som underviste på kurset, fik vi indblik i, hvad der foregår på fysikinstitutter rundt omkring i Europa. Dette er af stor værdi for os, idet vi står for at skulle vælge, hvordan vi vil sammensætte anden del af vores studier. Bortset fra det rent faglige fandt vi også ud af andre sjove forskelle landene imellem under lange natlige samtaler.

Af sociale arrangementer var der fra ledelsens side hyret en bus til en strandudflugt. Ellers klarede vi selv diverse ture til Bordeaux by, som for øvrigt er ganske hyggelig. Apropos kontakten til de andre deltagere vil vi om en måneds tid få besøg af to englændere, som vil tage et smut til København, når de nu alligevel skal til en konference i Århus.

Kurset var såvel fagligt som kulturelt og socialt virkelig inspirerende og udbytterigt. Vi ville da ikke være blege for at gøre noget lignende igen. Desuden regner vi med at det vil være et godt kort at have på hånden, når vi nu søger om at komme til udlandet for at læse i et år.

Mette, Mette og Trine
Fysikstuderende ved Københavns Universitet.



DE FØRSTE ANVENDELSER AF HØJ-TEMPERATUR SUPRALEDERE

Jørn Bindslev Hansen, Danmarks Tekniske Højskole

Baggrund

Igennem de sidste 20 år har lav-temperatur supraledere (niobium og niobium-forbindelser) fundet stigende kommerciel anvendelse såvel inden for stærkstrømsteknik: spoler, som inden for elektronik: følsomme magnetometre (SQUID's - se forklaring i boks på næste side). Desuden bruges niobium til radiofrekvens-resonatorer i de store partikel-acceleratorer og til højfrekvens-detektorer i radio-teleskoper.

Da de keramiske supraleedende cuprater La-Ba-Cu-O (Bednorz og Müller) og Y-Ba-Cu-O (Chu et al) blev opdaget i 1986-87, blev der brugt store ord om de tekniske vidundere, som disse materialer kunne frembringe. Fysikere sammenlignede med tæmningen af ilden og opfindelsen af hjulet og den elektriske pære. Magnetisk svævende tog mellem København og Paris og supraleedende stærkstrøms-kabler blev nu rentable. Begejstringen smittede. En husejer, som stod over for at skulle trække nye ledninger i sin ejendom, ringede og spurgte, om han skulle lægge almindelig kobberledning, eller om han burde vente indtil han kunne købe de nye supraleedende ledninger.

Med fire års afstand til opdagelsen af høj-temperatur supraleddning er det muligt at få et bedre overblik over mulighederne for tekniske anvendelser. Det følgende er en personlig vurdering af de materialetekniske problemer og perspektiverne for anvendelserne.

Materialeegenskaber

Siden 1986 er der publiceret mere end 12000 artikler om høj-temperatur supraleedere. Der er indtil nu fundet i al fald fem familier af oxider, som med rimelig kan betegnes som høj-temperatur supraleedere. Der er fire grupper af kobberoxider og en gruppe af bismutoxider. Overgangstemperaturerne ligger mellem 20 og 130 Kelvin med kobberoxiderne (doterede cuprater) i toppen. Selv i normaltstanden (f.eks. over overgangstemperaturen) er materialernes elektriske og magnetiske egenskaber eksotiske (to-dimensionelle, antiferromagnetiske, konstant temperaturkoefficient for restitivitet). Som noget ganske usædvanligt kan materialerne ved øget dotering ændres fra at være isolatorer over halvledere til supraleedere. Teoretikerne er på sporet af beskrivelsen for den normale tilstand i materialerne, men endnu langt fra at forstå supraleddningen. Udviklingen af nye endnu bedre materialer foregår derfor for en stor del i blinde.

De keramiske egenskaber medfører en række materialetekniske problemer: høj-temperatur supraleederne er hårde og sprøde (de er ikke duktile), de kan ikke loddess, og overfladen er ikke kemisk stabil overfor ilt. Et ændret iltindhold kan betyde, at supraleddningen forsvinder. Nogle af materialerne indeholder barium og reagerer også med vand og

kuldioxid. Herudover er de typisk stærkt anisotrope på grund af deres to-dimensionale opbygning, således at de supraleedende egenskaber afhænger kritisk af kvaliteten og orienteringen af krystalstrukturen. I keramisk, polykrystallinsk form hænger materialerne derfor meget dårligt sammen rent elektrisk. Orienterede krystaller med en vis overfladebeskyttelse er klart den ideelle form.

Alt i alt medfører disse egenskaber, at det har vist sig at være endog overordentligt vanskeligt at fremstille brugbare polykrystallinske elektriske komponenter af materialerne. Således er udviklingen af polykrystallinske tråde og bånd gået meget langsommere end ventet. Alligevel er der grund til en vis optimisme: den maksimale spændingsløse strømtæthed (den kritiske strømtæthed), som begrænses af korngrænserne, ligger nu over $5 \cdot 10^4$ A/cm² for de bedste tråde ved 77 K (i realistisk magnetfelt). En forbedring med en faktor 10 er tilstrækkelig til at gøre trådene interessante til stærkstrømsanvendelser (spoler, generatorer, strømskinner, kabler). Der er grund til at tro, at det vil lykkes i løbet af de næste 3-5 år. I Danmark arbejder NKT A/S og Haldor Topsøe A/S med disse problemer, bl.a. støttet af ELSAM, ELKRAFT og Industri- og Handelsstyrelsen.

Epitaksielle tyndfilm er tynde lag af ensrettede krystaller dyrket på krystallinske substrater (med passende gitterstruktur og udvidelseskoefficient). Sådanne tyndfilm af høj-temperatur supraleedere fremstilles nu rutinemæssigt verden over ved flere forskellige groningsmetoder, i Danmark på NKT A/S ved hjælp af laser-forstøvning. Ved 77 K ligger den nuværende verdensrekord for kritisk strømtæthed, J_c , på 10^7 A/cm², og NKT's tyndfilm hører til blandt de bedste ($J_c(77K) = 4 \cdot 10^6$). Andre fremstillingsmetoder som sputtering, fordampning (molekylær-stråle-epitaksi, MBE) og kemisk krystaldyrkning fra dampfaser (CVD) giver også gode epitaksielle tyndfilm. Sputtering og MBE bruges også her i landet (Forskningscenter Risø, H.C. Ørsted Institutet og Danmarks Tekniske Højskole). Økonomisk støttes den danske tyndfilmsindsats af de statslige forskningsråd SNF og STVF, Industri- og Handelsstyrelsen, ELSAM, Bdr. Hartmanns Fond, Dannins Fond og Fisker og Nielsens Fond.

Anvendelser af tyndfilm

På nuværende tidspunkt er de epitaksielle tyndfilm klart den bedste formgivning for de kendte høj-temperatur supraleedere. Som det fremgår af ovenstående, er fremstillingsmetoderne de samme som inden for halvleder-forskning og -industri. Det er derfor epitaksielle tyndfilm, der ligger til grund for de første anvendelser: mikrobølgekomponenter og magnetometre (SQUID's = Superconducting Quantum Interference Device). Heraf er førstnævnte i form af tyndfilms-filtre og -resonatorer blevet udbudt kommercielt inden

JOSEPHSON-EFFEKTEN

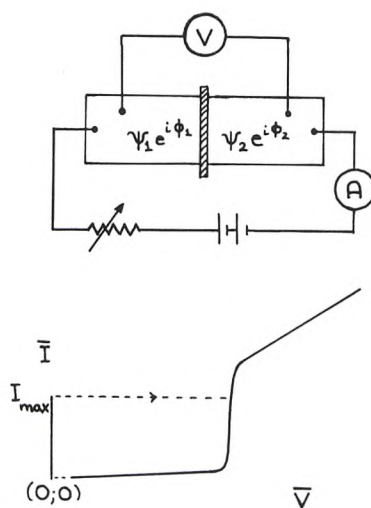
Den kvantemekaniske tunneffekt spiller en stor rolle i atom- og faststof-fysikken. Den beskriver passagen af partikler gennem områder af rummet, som de ifølge den klassiske fysik ikke kan passere. Det kan for eksempel være elektroners bevægelse gennem tynde isolerende lag (tunnel-barrierer), der forstås som et udslag af elektronens bølgeegenskaber, idet en del af elektronernes bølgefunktion udbreder sig til barrierens anden side og dermed giver en vis sandsynlighed for at elektronen kan optræde der.

Tunneffekt udnyttes i Josephson overgangen (eller på engelsk: Josephson junction), den fundamentale supraleedende elektriske komponent, der indgår som den aktive komponent i al supraleedende elektronik. En Josephson overgang består af to supraleedere adskilt af et mikroskopisk lille område, hvor supraleedningen er svækket eller helt undertrykt (f.eks. et 2 nm tyndt isolatorlag), som vist på figuren.

I 1962 forudsagde Brian Josephson, at supraleedende Cooperpar kan trænge gennem en tynd barriere mellem to supraleedere med stort set samme sandsynlighed som enkelt elektroner. Denne kohærente tunneffekt, som kort tid efter blev observeret af Philip W. Anderson og John M. Rowell, ses som en betragtelig spændingsløs tunnelstrøm (en superstrøm) mellem de to supraleedende områder.

I hvert område er Cooperparrene kvantemekanisk set beskrevet ved en bølgefunktion. Interferens mellem de to bølgefunktioner giver sig udtryk i superstrømmen $I_s = I_{\max} \sin \delta\phi$ gennem tunnel-overgangen, hvor $\delta\phi$ er faseforskellen mellem de to bølgefunktioner. Den maksimale strøm $I_{\max}$ afhænger af de supraleedende materialer, af geometrien og af temperaturen.

Hvis den påtrykte strøm overstiger $I_{\max}$ bæres en del af strømmen som en Ohmsk strøm, der medfører et spændingsfald V over Josephson overgangen. Superstrømmen vil da oscillere med frekvensen $\omega_J = 2eV/\hbar$, Josephson-frekvensen, som typisk ligger i mikrobølgeområdet ($2e/h = 484 \text{ GHz/mV}$). Denne frekvens svarer til den Bohrske frekvensbetingelse for udsendelse eller modtagelse af fotoner i en proces, hvor en partikel (et Cooperpar) med ladningen $2e$ gennemløber spændingsfaldet V .

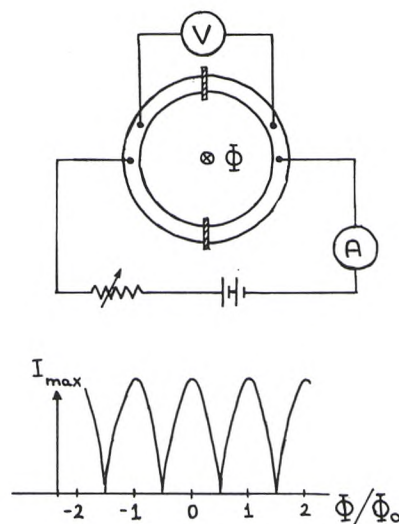


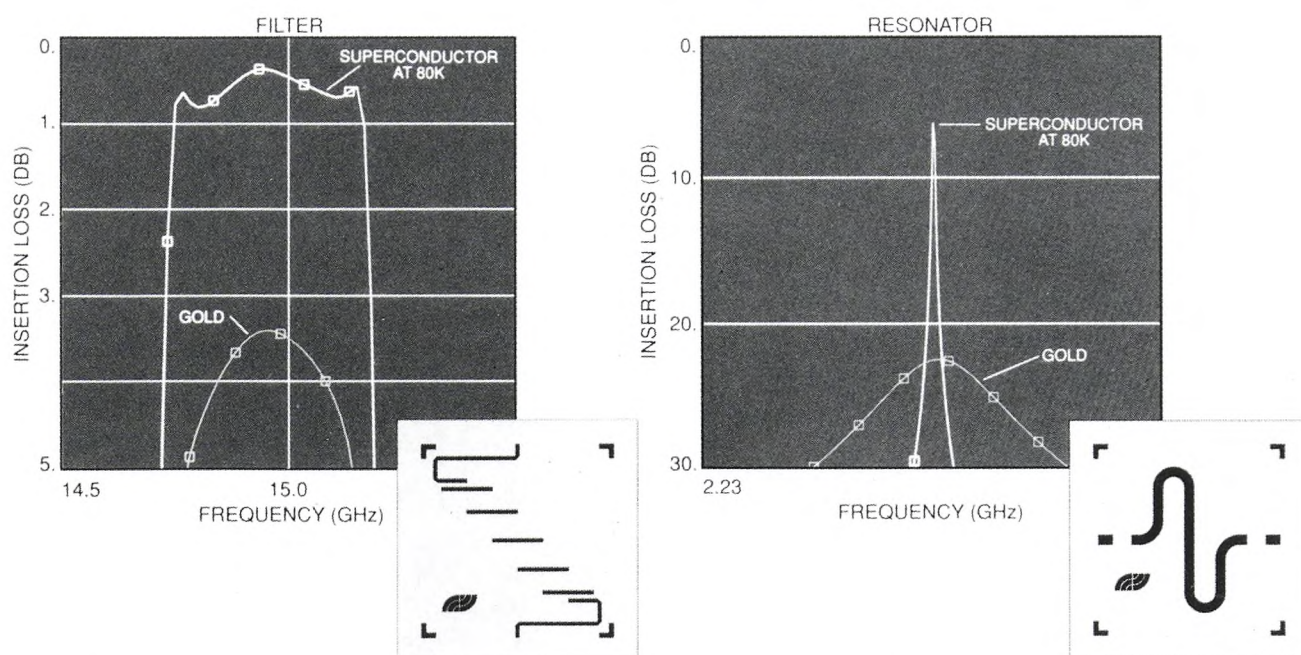
SQUID

På baggrund af Josephson-effekten kan man konstruere et meget præcist magnetometer baseret på den såkaldte SQUID, Superconducting QUantum Interference Device.

Som vist i figuren består en SQUID af en supraleedende ring med en eller flere Josephson overgange. Interferensen mellem en magnetisk fluks Φ og faseforskellen(e) over Josephson overgangene medfører, at den maksimale ydre spændingsløse strøm, der kan overføres til ringen, varierer periodisk med Φ med perioden $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \text{ fWb} = 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ Vs}$, flukskvantet.

SQUID'en er derfor en ultrafølsom flukssensor, som danner basis for meget følsomme elektriske målinger. Følsomheden for energi rækker helt ned til kvantegrænsen.





Figur 1. Frekvenskarakteristikken for de første kommercielle anvendelser af høj-temperatur supraleedere. Firmaet "Superconductor Technologies" fra Kalifornien tilbyder filtre og resonator tyndfilmskredse som vist her.

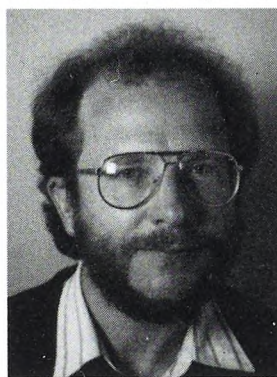
for det sidste halve år, se figur. Til kompakte mikrobølgekredse i området fra 1 GHz til 100 GHz er det afgørende at reducere overfladetabet i ledermaterialet. Her har de epitaksielle høj-temperatur tyndfilmskredse ved 77 K 30-100 gange mindre tab end kobberkredse ved samme temperatur. Et godhedstal på over 10.000 kan opnås. Dette kan som nævnt udnyttes i filtre og resonatorer. De gode højfrekvens-egenskaber er også vigtige for hurtige transmissionslinier, f.eks. computere ("interconnects"), hvor miniaturiseringen ned til 0.25 mikrometer ledningsbredde vil medføre store problemer med parasitiske modstande i normale metaller som kobber og aluminium. Hybride halvleder-superleder kredse er under udvikling.

Prototyper af følsomme SQUID-magnetometre er fremstillet af flere laboratorier, f.eks. IBM og Hitachi. De udviser nu ca. 10^3 gange for stor lavfrekvens-støj ($1/f$ fluks-støj) til at være konkurrencedygtige over for lavtemperatur niobium-SQUIDs, men deres ydeevne forbedres til stadighed med stormskridt (faktor 10^4 i løbet af de sidste to år) i takt med fremstillingen af epitaksielle tyndfilm med bedre og bedre strømbærende egenskaber. De bedste høj-temperatur supraleedende magnetometre har i dag i området over 1 kHz samme følsomhed som de tilsvarende kommercielle lav-temperatur SQUIDs, ca. 10^{-2} pT/(Hz) $^{1/2}$. Til medicinske formål er et håndbåret 77 K magnetometer en attraktiv anvendelse (magnetocardiografi).

Sammenfatning

Mange materiale- og lavtemperatur-fysikere drømte i mange år om supraleddning ved flydende kvælstoftemperatur (77 K). Drømmen blev til virkelighed i 1987, men de keramiske supraleedere viser sig at være vanskelige at tæmme. De tilhører gruppen af "odd materials". I polykrystallinsk form

f.eks. til tråd og bånd begrænser korngrænserne den kritiske strømtæthed og et længerevarende udviklingsarbejde forudses. Der er gjort afgørende fremskridt indenfor fremstillingen af teknisk anvendelig epitaksial tyndfilm til brug i mikroelektronik. Disse orienterede krystallinske tynde lag kan nu fremstilles på en lag række underliggende substrater (silicium, safir, magnesiumoxid, lantanaluminat, zirkonia, strontiumtitanat). De første tyndfilmskredse er til salg, og mange flere vil følge i de kommende år ikke mindst i form af hybride halvleder-supraleeder komponenter og i form af følsomme magnetometre. Parallelt med denne udvikling arbejdes der på højtryk verden over for at forklare og forudsige høj-temperatur supraleddning og på at finde endnu flere spændende nye supraleedere.



Jørn Bindslev Hansen Lic.scient. i 1981 fra Københavns Universitet. Lektor ved Fysisk Laboratorium I på Danmarks Tekniske Højskole.

HØJ-TEMPERATUR SUPERLEDENDE TYNDFILM.

Torsten Freltoft, NKT

De første praktiske anvendelser af keramiske superledere bliver uden tvivl baseret på tyndfilmskomponenter. I Danmark fremstilles nu krystallinske tyndfilm, hvor den elektriske strømtæthed kan være op til 10^7 A/cm² svarende til de bedste resultater i verden.

Et af hovedresultaterne fra det igangværende rammeprogram for høj-temperatur superledersforskning i Danmark er fremstillingen af høj-kvalitets YBa₂Cu₃O₇ tyndfilm. Filmene fremstilles i NKT's koncernudviklingscenter og kan danne basis for en tidlig teknologisk udnyttelse af de nye materialer som beskrevet i Jørn Bindslev Hansens artikel her i bladet.

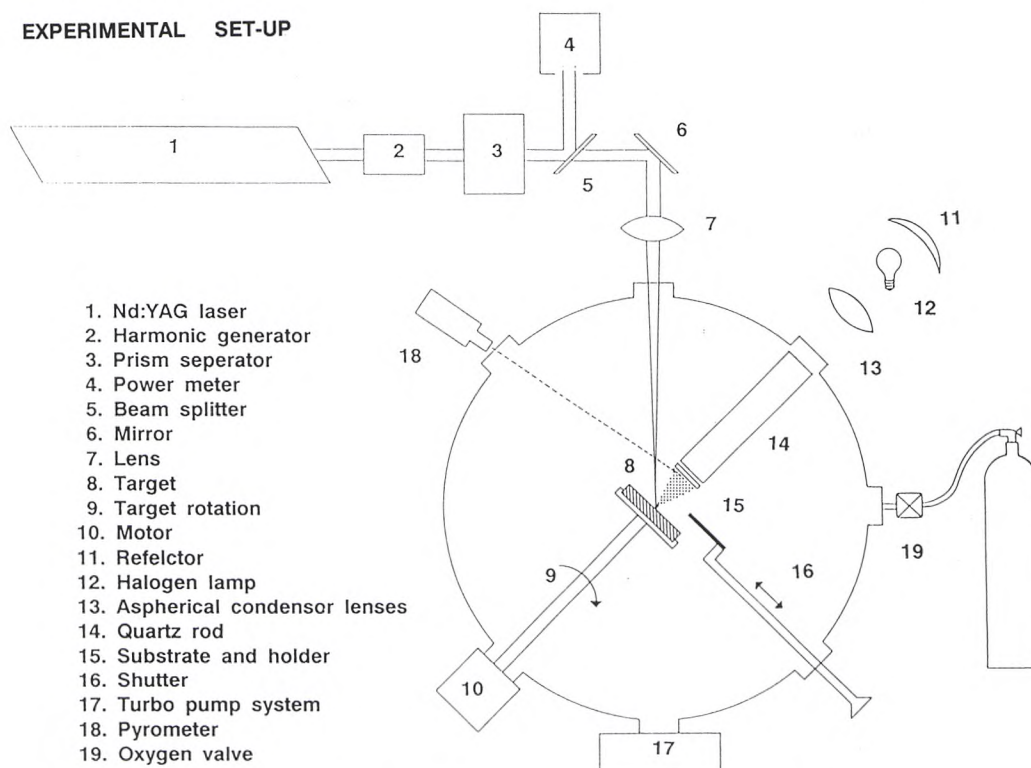
Den teknik, der anvendes til fremstilling af de superledende tyndfilm, kaldes laserforstøvning (engelsk: Laser ablation). Da det er en ny deponeringsteknik med anvendelsesmuligheder i mange andre sammenhænge end for superledere, vil jeg benytte lejligheden til at beskrive teknikken. Metoden går i sin enkelthed ud på at lade strålen fra en ultrahøj-effekt laser ramme et materiale (target), således at atomer på materialets overflade løsriveres. Overfor target anbringes et substrat, hvorpå de løsrevne atomer opfanges, og der dannes en tynd film af det pågældende

materiale. En principskitse er vist på figur 1. Figur 5 i slutningen af artiklen viser et farvefoto taget under deponeringen, hvor de løsrevne eksiterede atomer ses som et lysende plasma. Processen foregår i vakuum eller ved lavt tryk af en passende gasart, således at de løsrevne atomer ikke bremses eller forurenes på vejen mellem target og substrat.

Metoden har den fordel fremfor traditionelle tyndfilmsteknikker såsom sputtering og fordampning, at den umiddelbart er støkiometrisk, det vil sige den reproducerer targets sammensætning på substratet. Dette er en stor fordel eksempelvis ved fremstilling af tyndfilm i høj-T_c materialer, der indeholder op til seks forskellige grundstoffer. En anden fordel er muligheden for at have en passende baggrundsgas til stede under deponeringen ved tryk helt op til 10 mbar. Dette kan udnyttes til stabilisering af en mulig "flygtig" bestanddel af filmen, for eksempel iltindholdet i de keramiske superledere.

Laserforstøvningsfaciliteten hos NKT.

Deponeringsanlægget som vist på figur 1 er opbygget med en kortpulset Nd-YAG laser, hvis grundbølglængde på 1064 nm deles med tre til 355 nm (frekvensen tre-dobles)



Figur 1. Principskitse af laserforstøvningssystemet hos NKT.

ved hjælp af ulineære optiske krystaller. Ved 355 nm kan der opnås laserpulser med en pulsenergi på cirka 60 mJ og en pulslængde på cirka 5 ns. Bølgelængder i det ultraviolette område er mere egnede end grundbølgelængden (infrarød). Dette skyldes den højere fotonenergi, hvorved man opnår en mere effektiv ionisering af de løsrevne atomer, samtidig med at absorptionen af UV-stråling i target foregår i et tyndere lag, hvorved termiske effekter reduceres. Ved fokusering af laserstrålen til 4 mm², som er den normalt anvendte pletstørrelse, fås således en spidseffekttæthed på 300 MW/cm². Vakuumsystemet er designet til et basisvakuum bedre end 10⁻⁶ mbar og er udstyret med regulerbar ventil til automatisk kontrol af oxygentrykket. Endvidere er der udviklet et system til opvarmning af substratet til max. 950 °C. Princippet er her, at en halogenlampe placeret udenfor kammeret, hvor den kan køles effektivt, fokuseres umiddelbart på enden af en kvartsstav (bølgeleder), der leder lyset hen på substratholderen (se figur 1). Temperaturen måles med et termoelement anbragt i substratholderen og kontrolleres via et servokredsløb. For at opnå en homogen deponering på hele substratoverfladen scannes laserstrålen på target over et område svarende til substratets areal. Dette sker ved at vippe indkoplingsspejlet (6), der styres automatisk med to motoriserede mikrometerskruer.

De bedste YBa₂Cu₃O₇ tyndfilm fås ved deponering i cirka 1 mbar ren ilt, ved substrattemperaturen 750 °C og med en spidseffekttæthed omkring 300 MW/cm² i laserpletten. Efter deponeringen øges iltrykket til 1 atm, og filmen afkøles langsomt (-10 °C pr. min).

Karakterisering af de superledende tyndfilm.

Tyndfilmene er karakteriseret på en lang række områder, herunder elektrisk (kritisk temperatur, kritisk strøm, mikrobølge overflademodstand¹), magnetisk (AC susceptibilitet), strukturelt (Røntgen tekstur analyse²), kemisk, morfologisk (scanning elektron mikroskopi) m.m. Det vil føre for vidt her at beskrive alle de foretagne målinger, så her nævnes kun de vigtigste resultater. I figur 2 vises modstanden og den kritiske strøm (standard 4-punkt måling) som funktion af temperaturen for en 10 µm bred, 0,2 µm tyk og 1000 µm lang stribe af YBa₂Cu₃O₇ deponeret på et LaAlO₃ substrat. Som det ses, er den kritiske temperatur T_c = 90 Kelvin, og ved 77 Kelvin er den kriti-

ske strøm 160 mA svarende til en kritisk strømtæthed j_c ≈ 8·10⁶ A/cm² for denne film. Tilsvarende strømtætheder er bestemt ved måling af AC susceptibilitet i stærke elektromagnetiske felter.

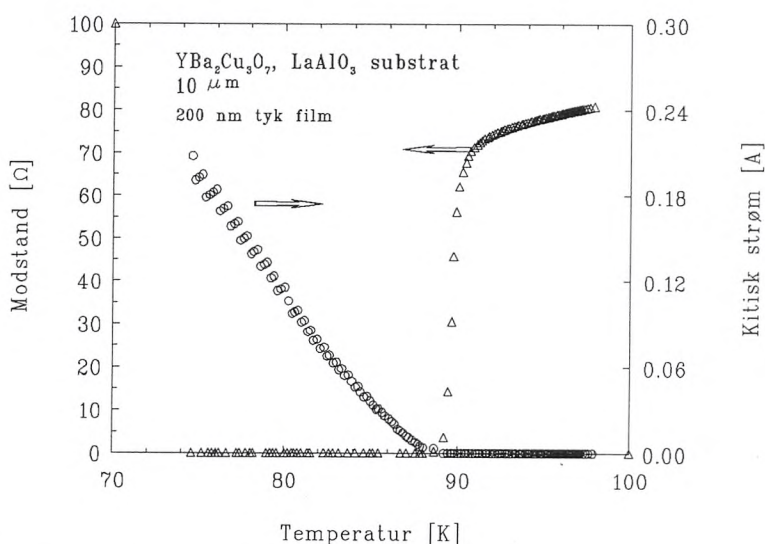
En anden væsentlig karakterisering er foretaget af Rasmus Kromann, Fysikafdelingen RISØ, der har bestemt texturen i de superledende film, det vil sige fordelingen af krystalorienteringer. For film med høje kritiske strømtætheder findes, at strukturen er fuldstændig i overensstemmelse med det underliggende substrat. Det betyder, at kun én krystalorientering (og den spejlede) er til stede i filmen.

Mønstertegning.

Det er af stor vigtighed at kunne "formgive" sine tyndfilm, det vil sige fjerne dele af filmen, så det tilbageblevne materiale danner et eller andet mønster afhængigt af anvendelsen. Det er i reglen nødvendigt, at mønsteret dannes med en opløsning på omkring 10 µm, hvilket ikke er helt trivielt. Fra halvleder-teknologien kendes metoder, der især er baseret på litografiske processer. De første forsøg med formgivning af YBa₂Cu₃O₇ på MgO substrater blev udført med en traditionel fotoresist-baseret litografisk proces på Fysisk Laboratorium I, DTH, hvor fosforsyre blev anvendt som ætsemiddel.

Forsøgene har givet gode resultater, men metoden er lidt tung, og filmen udsættes nødvendigvis for en del kemisk påvirkning fra fotoresist, ætsevæske og opløsningsmidler.

Alternative litografiske metoder er derfor under udvikling. Det drejer sig hovedsageligt om to processer. Den



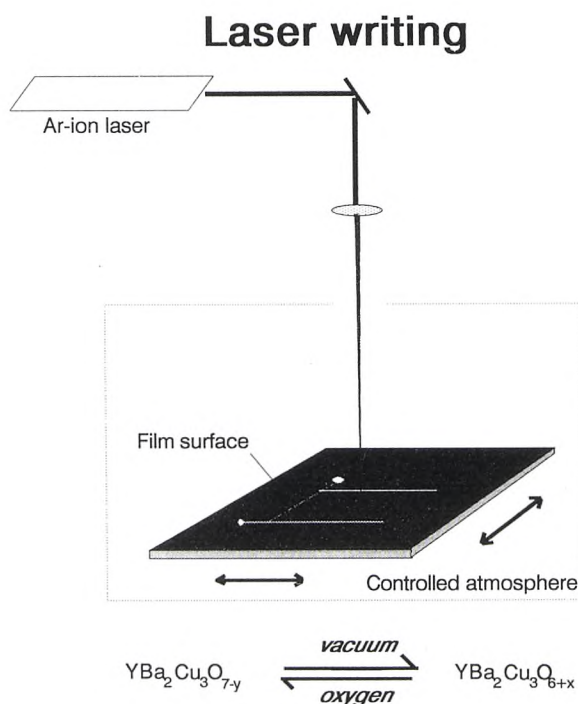
Figur 2. Måling af den elektriske modstand (trekanter) og den kritiske strøm (cirkler) som funktion af temperaturen for en 10 µm bred, 0,2 µm tyk og 1000 µm lang tyndfilmsstribe af YBa₂Cu₃O₇ på enkeltkrystallinsk LaAlO₃ substrat. Den kritiske strømtæthed ved T=77 K er cirka 8·10⁶ A/cm² for denne film.

¹ Overflademodstand ved 35 GHz er målt af Claus Schelde Jacobsen, Fysisk Laboratorium III, DTH.

² Røntgen tekstur analyser er foretaget af Rasmus Kromann, Fysikafdelingen, RISØ.

ene kaldes *laserforstøvningslitografi*, og den udnytter de samme høj-effekt laserpulser, som blev anvendt ved depatering af filmen. Men ved mønstertegningen rettes laserstrålen mod den færdige film anbragt bag en metalmaske, som dækker over de områder, der ikke ønskes fjernet. Ved denne metode begrænses den litografiske opløsning foreløbigt af metalmasken; denne er for øjeblikket cirka 10 μm . Ved overgang til siliciummasker forventes opløsningen at kunne forbedres til 2-3 μm , hvor den begrænses af kantdiffraktion.

Den anden alternative litografiske proces kaldes *lasertegning*, og den udnytter de keramiske superlederes kritiske afhængighed af iltindholdet. For $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ gælder, at iltindholdet kan ændres kontinuert fra $x \approx 0$ til $x \approx 1$. For små x værdier haves den kendte superledende fase med $T_c \approx 92$ K. Ved iltindhold lavere en $\text{O}_{6.5}$ ($x > 0.5$) mister materialet sine superledende egenskaber og bliver en antiferromagnetisk isolator.



Figur 3. Principskitse for lasertegningsprocessen. En laserstråle fokuseres på overfladen af en superledende tyndfilm. Laserstrålen forårsager en lokal opvarmning af filmen, hvorved ilt diffunderer enten ud af eller ind i filmen afhængig af den tilstedeværende atmosfære.

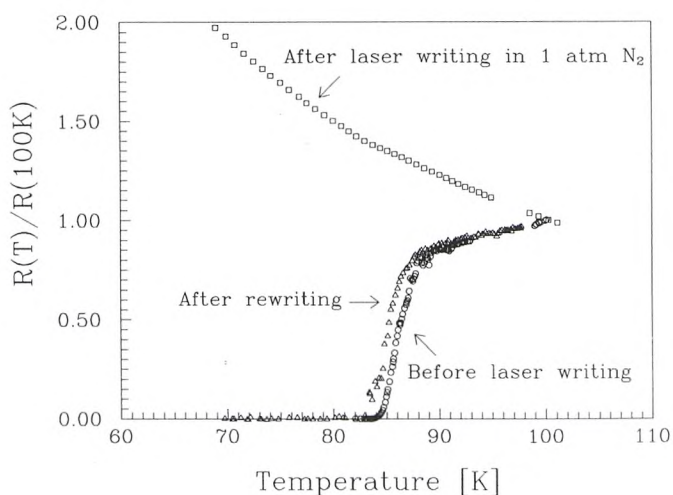
Ved at anbringe en superledende film ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) i en ædelgas og fokusere en CW-laser (Continuous Wave) på overfladen af filmen, kan filmen i det eksponerede område opvarmes lokalt, så ilt diffunderer ud. Herved efterlades et område, der har et iltindhold lavere end $\text{O}_{6.5}$ og derved *ikke* er superledende. Ved at bevæge laserstrålen hen over filmen "tegnes" således et mønster, der tilsyneladende har halvledende egenskaber (stigende elektrisk modstand med faldende temperatur). En principskitse er vist i figur 3, mens

figur 6 i slutningen af artiklen viser et fotografi af cellen, hvori processen foregår. Processen har den umiddelbare fordel, at filmoverfladen forbliver intakt, og skarpe ætsekanter undgås. Endvidere er processen reversibel, hvilket vil sige at et ikke-superledende område igen kan gøres superledende ved at gentage processen, men nu med filmen anbragt i en ren ilt atmosfære. På figur 4 er vist den elektriske modstand som funktion af temperaturen for en 50 μm bred stribe før lasertegning, efter tegning i ren kvælstof samt efter "reparation" ved tegning i ren ilt.

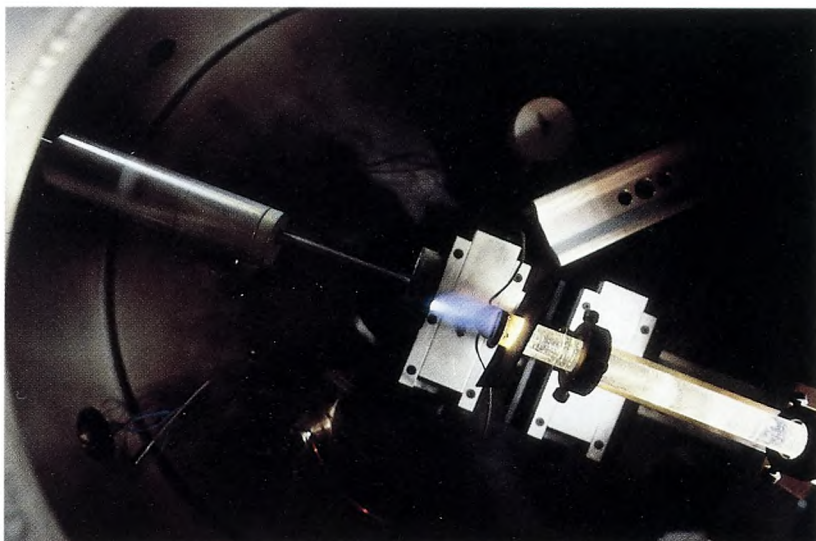
Metoden forventes også at kunne udnyttes til fremstilling af Josephson mikrobroer til brug i for eksempel SQUIDs. Her kræves to såkaldte "svage led", der tænkes frembragt ved først at afbryde forbindelsen i en superledende ring ved lasertegning i kvælstof, hvorefter afbrydelserne *delvist* repareres ved tegning i ilt. NKT arbejder for øjeblikket på at demonstrere anvendeligheden af denne idé.

Planer for fremtiden.

For at kunne danne mønstre med endnu bedre opløsning, end hvad der er muligt ved brug af lasere eller fotolitografi, opbygges netop her i efteråret en facilitet til elektronstråle litografi på NKT. Med denne facilitet forventes det at kunne danne mønstre med en opløsning, der er omkring ti gange bedre end for de lysbaserede processer. Den forbedrede opløsning skal bl.a. bruges til at danne indsnævninger i en superledende bane, der er så små som muligt. Herved håber vi på, kontrollerbart at kunne fremstille grundlaget for Josephson mikrobroer i form af svage led i de nye materialer.



Figur 4. Den elektriske modstand som funktion af temperaturen for en 50 μm bred stribe. Før lasertegning (cirkler) ses den superledende overgang ved omkring $T = 85$ K. Efter lasertegning på tværs af striben i kvælstof atmosfære (kvadrater) ses ingen superledende overgang, mens den sidste kurve (trekanter) viser de genetablerede superledende egenskaber efter filmen er (næsten) "repareret" ved lasertegning i ren ilt.

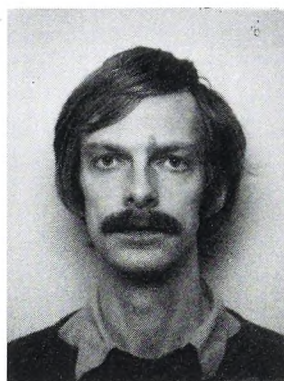


Figur 5. Billede af laserforstøvningsprocessen, der foregår midt i billedet. De løse atomer ses som et lysende plasma. Prøven sidder på en roterende gennemføring til venstre, og nederst til højre ses kvartstaven, der leder varmen fra halogenlampen ind til substratet. Laserlyset kommer ind øverst til højre, men ses ikke, da de er ultraviolette.

Udover at fremstille SQUIDs til brug ved meget følsomme magnetfeltmålinger, for eksempel inden for biomedicin, er det planen også at udvikle forskellige passive mikrobølgekomponenter som for eksempel filtre, resonatorer, delay-lines, antenner. Ved brug af superledere kølet til 77 K kan herved opnås komponenter med mere idéelle egenskaber end ved anvendelse af normale metaller. Det kan der læses mere om i Jørn Bindslev Hansens artikel tidligere i dette nummer af KVANT.



Figur 6. Billedet viser den eksperimentelle opstilling til lasertegning. Laserlyset kommer ned fra oven og fokuseres med mikroskopobjektivet. Midt i billedet ligger de superledende film (sort) på en hvid teflonblok. Nederst ses motordrev til bevægelse af filmen i laserstrålen.



Torsten Freltoft Civilingeniør fra Danmarks Tekniske Højskole (1983). Afgangsprøve ved fysikafdelingen, RISØ, hvor han også gennemførte licentiatarbejdet indenfor småvinkel neutronspredning i fraktale strukturer. Efter to års ophold i neutrongruppen på Brookhaven National Laboratory, New York, blev han i 1988 ansat ved NKT's koncernudviklingscenter, hvor han er projektleder for virksomhedens aktiviteter indenfor højtemperatur superledning.

FYSIKLEGESTUE PÅ H.C. ØRSTED INSTITUTTET.

Kristian Pedersen, Niels Bohr Institutet

Fysikundervisningen ved Københavns Universitet har i høj grad altid været teoretisk orienteret. Fysikkens teorier præsenteres kompakt og elegant i nogle abstrakte matematiske formler som kridtstøv på en tavle. Den dybere forståelse af disse får man imidlertid først, når man selv har fået syn for sagen i laboratoriet, det vil sige fået fingrene i klemme, brændt håret, fået stød og så videre. Man behøver ikke nødvendigvis lave flere timers systematiske målinger for at indse hovedprincipperne; mangt og meget kan forstås kvalitativt ved at man blot selv har set, hørt, følt eller lugtet noget fysik.

Denne mulighed for at udføre uforpligtende småforsøg på kvalitativt plan har ikke tidligere været til stede. Dels er det mere eksperimentelle arbejde lavt prioriteret, og dels er det lagt inden for den obligatoriske undervisnings meget faste rammer. For at råde bod på dette, er vi en gruppe fysikstuderende fra Fysisk Laboratorium på H.C. Ørsted Institutet, der siden november 1988 har arbejdet på at få oprettet en "fysiklegestue" på H.C. Ørsted Institutet. D.v.s. et laboratorium indrettet med diverse apparater og dimser, som frit kan benyttes af de fysikstuderende. Fysiklegestuen blev en realitet i september 1989 efter velvillig assistance fra Fysisk Laboratorium, Niels Bohr Institutet og forskellige andre institutter og private virksomheder. Vi har dels modtaget mange apparater fra disse institutioner og dels fået penge fra Niels Bohr Institutet, Fysisk Central Institut og Københavns Universitets Almene Fond - i alt cirka kr. 100.000,-.



Figur 1. Drengen står på en drejeskive, der kan dreje næsten uden gnidning. Når omdrejningsaksen på det roterende cykelhjul, han holder i hånden, drejes, vil dreng + cykelhjul rotere rundt med drejskiven, jævnfør impulsmomentsætningen.



Figur 2. Den store sorte drejeskive sættes i rotation. Lægges en stålkugle forsigtigt på den roterende drejeskive, kan den rotere i en cirkel rundt på drejskiven set fra laboratoriesystemet.

I denne fysiklegestue forefindes diverse apparater, som fysikstuderende frit kan benytte i legestuens daglige åbningstid kl. 10 til kl. 15. Det drejer sig om f.eks. luftpudebord, luftpudeskinne, roterende skive, gyro, cykelhjul, fjederkanon, laser, linser, oscilloskoper, strømforsyninger, boltesprænger og meget, meget mere. Det er således meningen, at man i legestuen skal kunne få et mere personligt forhold til fysikkens abstrakte formler under helt uforpligtende forhold. Her skal man kunne hente inspiration til læsningen derhjemme ved den grønne lampe, og her skal der være mulighed for, at man kan få styret sin nysgerrighed ved at lege med de forskellige apparater. Idéen med legestuen er således at få vakt den naturlige nyfikenhed, som alle mennesker er i besiddelse af, og her igennem opnå ny erkendelse. Denne filosofi er jo drivkraften bag al forskning: Galilei gik og legede med at smide forskellige kugler ud fra det skæve tårn i Pisa, Müller & co i Schweiz morede sig med at "bage" forskellige keramiske "kager" for at finde en høj-temperatur supraleder. Forskning udspringer således af målrettet leg med apparater og idéer.

For at lette brugen af legestuen er der en ældre studerende til stede 1 time om dagen fra kl. 11 til kl. 12. Denne "legeonkel" virker som vejleder, inspirator, teknisk hjælper m.v. i det omfang vedkommende bliver opfordret til det af de besøgende.

I løbet af det sidste års tid har vi også haft folkeskole- og gymnasieklasser på besøg i legestuen. Vi har lavet illustrative småforsøg med roterende cykelhjul, flydende kvælstof, luftpudebord, pneumatisk fyrtøj m.v. Reaktionen

hos de besøgende klasser har været utroligt positive. Vi har haft besøg af alt fra børnehaveklasser til 3.g'ere, og vi fortsætter naturligvis frem over med at "lade de små børn komme til os". På grund af det ret store arbejde, der er med disse besøg, ser vi os nødsaget til at tage betaling for det. Prisen er for tiden kr. 100,- pr. 8 besøgende pr. time, og vi modtager besøg stort set hele året rundt. Interesserede er meget velkomne til at kontakte os og aftale nærmere.

Legestuen har også aktiviteter, der rækker ud over skolebørnenes rækker. Vi har efterhånden lavet det til en tradition i påskeferien og efterårsferien at slæbe en masse apparater ind i Studenterhuset i Købmagergade ved siden af Rundetårn midt i København, hvor hvem som helst fra gaden så kan komme ind at se og prøve noget fysik. Vi bestræber os på at lave opstillinger, som folk selv kan pille ved, og samtidig at udarbejde nogle illustrerende plancher. Arrangementerne har været overordentligt succesrige, idet vi har fået folk af alle slags i tale og givet dem et indtryk af, at fysik ikke kun er forbeholdt ældre distræte gråhårede herrer, men i allerhøjeste grad handler om dagligdags fænomener. Desuden har vi planer om måske at lave udfarende shows på folkeskoler, gymnasier, festivaller, markeder med videre; allesammen steder hvor vi kan være med til at rokke lidt ved den gængse opfattelse af fysik.



Figur 3. Når vi laver shows i Studenterhuset, har vi et par spektakulære forsøg ude foran huset til at lokke folk nærmere med. F.eks. lynkøling af blomster, bananer m.m. i flydende kvælstof. Ved -200°C bliver blomster skøre som glas og splintrer så let som ingenting.

Endelig er vi på det seneste også begyndt at kigge ud over Danmarks grænser. I starten af september var vi nogle studerende fra Københavns Universitet, der med støtte fra Dansk Fysisk Selskab deltog i European Physical Society's 8. konference i Amsterdam (ca. 1500 deltagende fysikere og fysikstuderende). Her præsenterede vi en poster om legestuen, som gav os en aldeles overvældende respons: Over 30 fysikstuderende og fysikere fra det meste af verden viste så stor interesse for legestuen, at de ville have tilsendt materiale om vores aktiviteter. Tillige modtog vi en til lejligheden indstiftet pris til opmuntring af vores arbejde med legestuen af European Physical Society. Interessen for legestuen har således overgået vores allervildeste forestillinger.

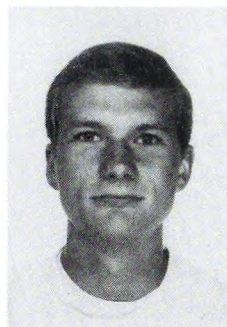
Vi er derfor i øjeblikket i fuld gang med at informere om legestuen i udlandet og skabe kontakter med andre, som kunne tænke sig at lave lignende legestuer rundt omkring i verden.

De oprindelige idéer om en fysiklegestue har således i løbet af det seneste års tid udviklet sig til andet og mere end blot etableringen af et konkret laboratorium med en masse udstyr. Det primære i legestuetanken, nemlig at menneskets nysgerrighed er drivkraften for opnåelse af ny erkendelse gennem uforpligtende leg, har vi set holder også uden for universitetets tykke mure. Vi håber i hvert fald, at vi kan være med til at pirre folks naturlige nysgerrighed og ad den vej give et lidt mere nuanceret billede af fysikken. Om ikke andet har vi det selv mægtigt sjovt!

Da vi fortløbende udvikler vores legestue med nye forsøg, er vi meget interesserede i at høre forslag til illustrative småforsøg, som kan realiseres uden de store omkostninger. Vi er naturligvis også rede til give yderligere oplysninger om os selv, og de forsøg vi går og laver for skoleklasser og for besøgende i Studenterhuset. Alle råd, kommentarer og sympatierklæringer er mere end velkomne!

Fysiklegestuens adresse:

Fysiklegestuen
Fysisk Laboratorium S 13
H.C. Ørstedts Instituttet
Universitetsparken 5
2100 København Ø.



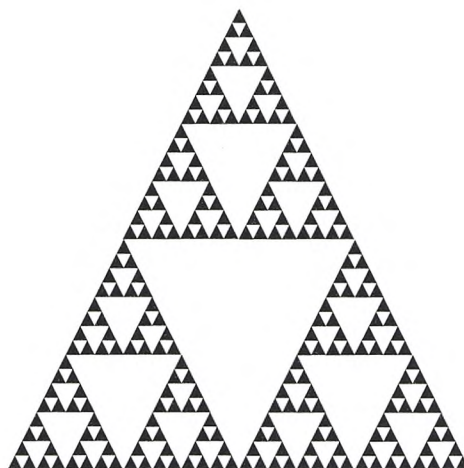
Kristian Pedersen Specialestuderende i astrofysik på Niels Bohr Instituttet på 6. studieår.

HVORFOR ER BINOMIALKOEFFICIENTER NÆSTEN ALTID LIGE?

Mogens Esrom Larsen, Matematisk Institut, Københavns Universitet

Early exceptions eclipse eventual essentials.

Richard K. Guy.



Figur 16. Sierpinski's net.

Sierpinski's net er dannet ved, at vi først har fjernet den fjerdedel, der selv er en trekant på spidsen i midten af figuren. Tilbage bliver nu tre ens trekanten, der alle er retvendte. Vi gentager nu processen på hver af de tre trekanten og fjerner altså nu tre trekanten på spidsen, ialt $\frac{3}{16}$ af den oprindelige trekant. Således fortsættes i det uendelige, en proces, der er blevet berømt under overskriften "fraktal" i de senere år.

Et godt spørgsmål er, hvor stor en del af trekanten har vi fjernet? Det er klart, at vi ikke har fjernet hele trekanten, hvis vi kun fjerner det indre af hver af trekanten på spidsen. Der bliver et smukt netværk tilbage. Men det samlede areale af de fjernede trekanten er stort, nemlig

$$\frac{1}{4} + \frac{3}{16} + \frac{9}{64} + \dots + \frac{1}{4} \left(\frac{3}{4}\right)^n + \dots = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{1 - \frac{3}{4}} = 1$$

Med andre ord, de fjernede trekanten fylder i virkeligheden hele den oprindelige trekant ud. Tilbage er kun maskerne i et net.

Denne simple iagttagelse har en forbløffende anvendelse på binomialkoefficienter.

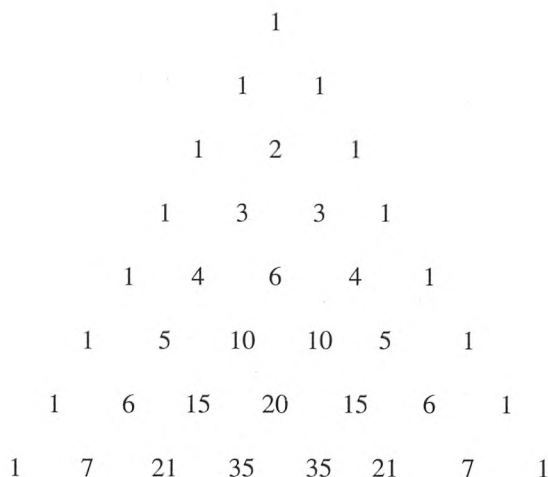
Binomialkoefficienten er antallet af måder, hvorpå vi kan udtage k elementer af en mængde på n elementer, og skrives: $\binom{n}{k}$.

Det kan man angive en formel for, men vi har kun brug for den simple rekursionsformel,

$$\binom{n+1}{k} = \binom{n}{k-1} + \binom{n}{k}$$

Denne formel er i virkeligheden indlysende. Når vi skal udtage de k elementer af mængden med $n+1$ elementer, vælger vi at iagttage et bestemt af disse. Enten bliver dette taget ud, og så kan de resterende $k-1$ udtages af de resterende n elementer på $\binom{n}{k-1}$ måder, eller dette element bliver ikke taget ud, og så skal vi udtage de k elementer af de resterende n elementer, og det kan gøres på $\binom{n}{k}$ måder. Summen af de to er samtlige måder.

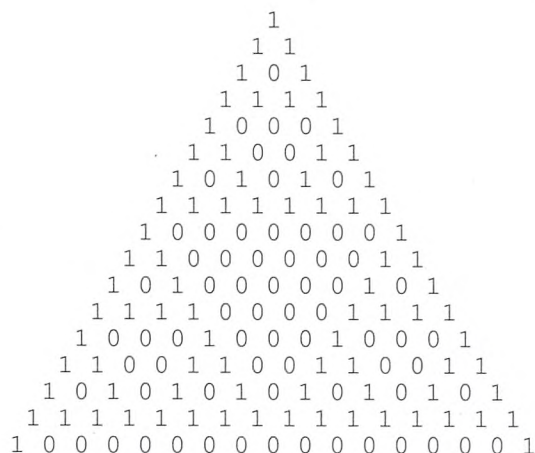
Når vi derfor starter med at udtage 0 af n på 1 måde, og n af n på 1 måde, så kan vi finde samtlige binomialkoefficienter ved successivt at lægge naboer sammen. Dette mønster kaldes Pascal's trekant efter den franske matematiker og filosof, Blaise Pascal (1623-1662):



Vi stiller os nu det spørgsmål, hvor ofte er en binomialkoefficient lige, og hvor ofte er den ulige? Ovenfor er der 27 ulige og 9 lige. Men det er jo ikke nogen repræsentativ stikprøve, vi har jo valgt at se på det øverste lille hjørne af en uendelig trekant.

Hvis vi gentager Pascals trekant med angivelsen 1 for et ulige tal og 0 for et lige, får vi et mønster. Og rekursionsformlen gælder stadig, hvis vi modificerer den med regnereglen $1+1=0$. Vi ser nu, at vi repeterer et mønster, hvor der jævnlgt optræder hele rækker af 1'taller efterfulgt af en række med 1'taller i hver ende og 0'er imellem. Og vi ser, hvorledes et 1'tal giver skrå kanter af 1'taller, der indrammer trekanter af 0'er. Disse to fænomener optræder, hver gang n antager formerne $n=2^m-1$ henholdsvis $n=2^m$.

Hvis vi gør status og normaliserer trekanten, hver gang vi er et skridt fra den næste potens af 2, ser vi, at vi finder skridtene i processen, der danner Sierpinski's net.



Men det betyder jo, at det mønster, der dannes af 0'er, fylder relativt mere og mere for i grænsen at fylde det hele, mens 1-tallerne bliver til det omtalte net. Med andre ord, i modsætning til den statistiske antydning er sandsynligheden for, at en tilfældig binomialkoefficient er ulige, lig med 0, mens sandsynligheden for, at den er lige, er lig med 1.

Referencer

1. Richard K. Guy, *Strong Law of Small Numbers*, American Mathematical Monthly **95** (1988)
2. Ian Stewart, *Game, Set & Math - Enigmas and Conundrums* -, Basil Blackwell, Oxford, 1989
3. Marta Sved, *Divisibility - With Visibility*, Mathematical Intelligencer **10**, 56 (1988)



Mogens Esrom Larsen er ansat ved Københavns Universitets matematiske institut som lektor uden særlige kvalifikationer.

BOGANMELDELSE

Fysikkens spor

Claus Christensen, Carsten Clausen og Bjørn Felsager

Gyldendals Forlag, ISBN 87-01 08354-6

240 s., pris 198,00 kr

Fysik er vel nok det fag i gymnasiet, der er undergået de største ændringer som følge af gymnasireformen. Herefter er faget obligatorisk de første to år for alle elever på den matematiske linje, og i 3.g kan fysik vælges som et højt-niveaufag.

En så radikal ændring af fysiks pensum er selvfølgelig en udfordring for lærebogsforfattere, og der er da også flere lærebogssystemer på markedet med forskellige bud på, hvordan pensum kan fortolkes. De ovennævnte forfattere har valgt at koncentrere sig om det høje niveau, og lad det være sagt med det samme: de er kommet vældig godt fra denne opgave.

Som nævnt er "Fysikkens spor" skrevet med henblik på undervisningen på højt niveau og dækker derfor det kerne-stof, der hører til her: periodiske bevægelser, homogene kraftfelter, stød, gravitation, elektriske og magnetiske felter, gaslovene, kernefysik, subnukleare partikler og kosmologi. Der bygges altså videre på fagindholdet fra obligatorisk niveau. Det forudsættes ikke, at man samtidig har matematik på højt niveau, hvorfor integralregningen ikke kan anvendes som hjælpemiddel.

Bogen falder naturligt i to dele med hovedoverskrifterne: vekselvirkninger og byggesten. Til hvert af bogens 22 kapitler er der knyttet en række aktiviteter. Det kan være opgaver, forslag til eksperimenter eller simuleringer på en datamat. Derudover er uddybnings- og specielle eksempler sat i tospaltede bokse. "Fysikkens spor" indeholder desuden en række to-siders perspektiverende opslag skrevet af danske fysikere. Disse opslag giver et fint indblik i, hvad fysikken står for i dag.

"Fysikkens spor" virker ualmindeligt indbydende, og der er vel ikke tidligere på dansk udgivet en fysikbog med et så fint layout. Bogen er fyldt med farvebilleder, tegninger og figurer, der er anbragt, så de på bedste måde understøtter teksten.

Et andet særkende ved bogen er den indsigt, den giver i fysikkens nuværende stade. I den forbindelse er der inddraget dele af relativitetsteorien og kvantefysikken, som man normalt ikke ser behandlet i gymnasiefysikbøger. Men dette "avancerede" stof er anvendt på en sådan måde, at det ikke forstyrrer tilegnelsen af det obligatoriske stof. desuden gør det bogen spændende og udfordrende for de elever, der ønsker at gå lidt videre. De ovenfor nævnte bidrag fra danske fysikere er meget velskrevne, og det er imponerende, hvor meget de har fået med på to sider.

Selvom denne anmeldelse er rettet mod et forum, der omfatter flere end fysiklærere i gymnasiet, vil jeg dog ikke undlade at komme med et par kritiske kommentarer af mere pædagogisk art:

Bogens opgaver og eksempler virker velvalgte, men man kan undre sig over, at forfatterne ikke har udarbejdet en facitliste til de egentlige beregningsopgaver. Desuden kunne der godt have været nogle flere gennemregnede eksempler til at understøtte den teoretiske gennemgang. Og en sidste indvending: der mangler en fyldig litteraturliste. Når bogen nu er så appetitvækkende, vil mange af bogens brugere sikkert føle behov for at få fat i uddybende litteratur.

En lærebog er selvfølgelig først og fremmest et hjælpemiddel i den daglige undervisning, men den er også et vindue, gennem hvilket fysikere og andre fysikinteresserede kan få et indblik i, hvordan gymnasiet forvalter opgaven med at transformere et videnskabsfag til et skolefag. I "Fysikkens spor" er denne opgave løst på fortrinlig vis, og bogen anbefales derfor til alle, der i det daglige, pædagogisk eller videnskabeligt, beskæftiger sig med faget fysik.

Ove Østergaard, Silkeborg Amtsgymnasium

Vi er to piger fra henholdsvis Sønderborg og Kalundborg gymnasium, som netop har afsluttet 2.g efter den nye ordning. Som deltagere på sommerkurset Sorødagene 90 stiftede vi bekendtskab med denne nyudkomne fysikbog beregnet til undervisning i fysik på højt niveau i 3.g. Vi har her prøvet at vurdere bogen på grundlag af et hurtigt studium og har forsøgt at give en så grundig kritik, som det er os muligt på trods af, at vi ikke har erfaringer med den i en undervisningssituation.

Det forekommer os at bogen så absolut er anbefalelses-værdig. Sproget i bogen bliver holdt på et sådant niveau, at man ikke farer vild i unødvendige eller tvetydige ordkaskader. Også gammelt stof bliver repeteret, så alle har de samme forudsætninger for at kaste sig ud i det nye pensum. Og hvis man ønsker det, giver bogen mulighed for at fordybe sig i emnerne ud over det obligatoriske.

Ofte får man slynget formler i hovedet uden en egentlig baggrund til forståelsen af disse. I denne bog gøres der op med det gamle mønster. Der gives en omfattende forklaring ved udledelsen af formlerne, og samtidig sørges der for, at eleven med få siders mellemrum kan checke sin forståelse af det læste ved hjælp af relevante opgaver. Ligeledes er det lykkedes med rig illustrering og spredt humor at vække læserens interesse for emnet og fremme forståelsen.

I bogen er der indlæg skrevet af danske fysikere. Udover at være dybdegående og interessante giver de en fornemmelse af, hvad fysikken står for i dag og skaber inspiration til videregående studier inden for området.

Som tidligere nævnt har vi ikke erfaringer med bogen i undervisning, men ud fra vores bedømmelsesgrundlag mener vi, at "Fysikkens spor" er en vellykket bog.

Anna-Karina Runberg

Sine R. Jensen

Vejledning for forfattere

Redaktionen af KVANT modtager meget gerne artikler fra læserne. Indholdet af artiklerne bør være forståelig for personer med interesse for fysik - således at en god gymnasieelev vil få noget ud af at læse artiklen. Det gør ikke noget at der optræder enkelte (og enkle) formler i teksten. Illustrationer til artiklerne er meget velkomne.

Det er håbet at der vil komme en række rubrikker - der er allerede en debatside, som er åben for indlæg om alt hvad der rører sig om fysik. Bladet vil også bringe meddelelser fra Dansk Fysisk Selskab og Selskabet for Naturlærens Udbredelse, ligesom omtale af arrangementer, der kan have interesse for fysikinteresserede vil blive bragt. Da der kun kommer fire numre om året (se planlagte udgivelsestidspunkter nederst på denne side) skal der gives meddelelse om et givet arrangement i god tid, hvis det skal kunne komme med i bladet.

Redaktionen vil også stræbe efter at kunne bringe korte notitser med friske nyheder og anmeldelser af bøger af interesse for fysikere.

Vejledning i udformning af artikler til KVANT

For at lette produktionen modtages artikler helst på elektronisk facon. Det kan enten være som elektronisk post til e-mail adressen

kvant@dfi.aau.dk

eller på en DOS-formateret diskette, der sendes til

KVANT

Det fysiske Institut

Ny Munkegade

8000 Århus C

eller afleveres til et redaktionsmedlem sammen med eventuelle figurer, og - *meget vigtigt* - et billede og en præsentation af forfatteren, i stil med de præsentationer, der findes i slutningen af hver artikel i dette nummer.

Debat

Debatsiderne er åbne for indlæg om emner der har med fysik at gøre. De første to indlæg har handlet om forsknings- og undervisningspolitik, men der er mange andre emner der kan tages op.

Korte bemærkninger til en forhåbentlig interessant debat er også velkomne. Debatindlæg sendes til redaktionen.

Teksten kan enten være skrevet i WordPerfect eller med T_EX eller som en ren ASCII-fil. Hvis det ikke er muligt at aflevere teksten i et af disse formater, kan en papirudgave af artiklen naturligvis anvendes.

Formler og specielle symboler kan indsættes i teksten med WordPerfect eller T_EX. De modtages dog også gerne på papir.

Illustrationer og billeder til artiklerne afleveres separat - det er (endnu) en kvalitetsmæssig fordel at indsætte disse i artiklen på sædvanlig facon. Undlad venligst at afsætte plads til dem i teksten, men placer figurforklaringen til sidst eller for sig selv.

Tabeller og opstillinger ønskes enten i WordPerfect format eller som opstillinger med tabulatorer. Brug ikke for megen energi på at lave "snedige" opstillinger med linier og lignende.

- Overskriften skrives med store bogstaver.
- Forfatternavne skrives med kursiv.
- Afsnitsoverskrifter skrives med fed skrift.
- Der er ingen tomme linier mellem afsnit, men de indledes med en indrykning (tabulering).
- Referencer anføres i teksten med et løftet ciffer, og anføres til sidst i artiklen med nummer, forfatter, artikel (eventuelt bind-nummer med fed skrift), sidetal og årstal i parentes.
- Husk et billede og en kort præsentation af forfatteren.

Tidsfrister

Korte notitser og meddelelser til nummer 4, 1990, der vil udkomme i december, skal være indsendt senest den 1. december.

Fremover er produktionsplanen at der vil udkomme et nummer i månederne februar, maj, august og november. Artikler til disse numre skal være afleveret senest den 1. januar, 1. april, 1. juli og 1. oktober.

Abonnement på KVANT

koster 135 kr for en årgang og vil blive opkrævet pr. giro. Nye abonnenter vil modtage eventuelle tidligere numre af den løbende årgang. Medlemmer af Dansk Fysisk Selskab og Selskabet for Naturlærens Udbredelse vil modtage bladet som et medlemsblad.

Abonnement tegnes ved at skrive til

KVANT, c/o Det fysiske Institut, Ny Munkegade, 8000 Århus C

Dansk Fysisk Selskabs faststofsektion

afholder

emnemøde i høj-temperatur superledning

tirsdag den 4. december 1990 (9.00-16.15)
på Danmarks Tekniske Højskole, bygn. 101A, mødelokale 1, Lyngby.

Deltagere inviteres til at indsende abstracts for postersession inden 29. november til Mads Peter Sørensen, Lab. for Anvendt Mat. Fys., Danmarks Tekniske Højskole, bygn. 303, 2800 Lyngby. Der skal benyttes samme abstract format, som ved faststofsektionens forårsmøde.

Nærmere oplysninger kan fås hos Mads Peter Sørensen, Tlf: 45 93 12 22 lok. 3094 (direkte kald), Fax: 42 88 22 39, E-mail: AMFMPS at VM.UNI-C.DK.

Program:

- 9.00-10.00 *G. Sawatzky, University of Groningen, Holland.*
Electronic Structure of High-Tc Superconductors - Fermi Liquid or Not?
- 10.00-10.30 *P. Hedegård, H.C. Ørsted Institutet, Københavns Universitet.*
Phenomenology of Bose Spin and Fermi Hole Systems.
- 10.30-10.45 Pause
- 10.45-11.15 *H.J. Jensen, NORDITA, Københavns Universitet.*
Two Dimensional Vortex Fluctuations in the Non-Linear Current-Voltage Characteristics for High Temperature Superconductors.
- 11.15-11.45 *M. Levinsen, H.C. Ørsted Institutet, Københavns Universitet.*
High-Tc Superconducting Weak Links.
- 11.45-12.15 *C.S. Jacobsen, Fys. Lab. III, DTH, Lyngby.*
Infrared Properties of Oriented YBCO Thin Films.
- 12.15-13.00 Frokost
- 13.00-14.00 Postersession
- 14.00-14.30 *H. Svensmark, NORDITA, Københavns Universitet.*
Superconducting Vortex-Line Configurations in Materials with Twin Boundaries.
- 14.30-15.00 *N.H. Andersen, Forsøgsanlæg RISØ, Roskilde.*
The Phases of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ for Varying x and Temperature Studied by Neutron Scattering.
- 15.00-15.15 Pause
- 15.15-15.45 *T. Freltoft, NKT Research Center, København.*
Laser Ablation, a Novel Deposition Technique.
- 15.45-16.15 *P. Vase, NKT Research Center, København.*
Laser Lithography and Electrical Characterization of YBCO Thin Films.

Organisatorer: J.B. Hansen, P. Hedegård og M.P. Sørensen.