

DET KONGELIGE DANSKE VIDENSKABERNES SELSKABS PJECESERIE

GRUNDVIDENSKABEN I DAG

24



ALLAN R. MACKINTOSH

FRA KAOS TIL ORDEN –
FASTSTOFFYSIK I DET TYVENDE
ÅRHUNDREDE

UDGIVET AF FOLKEUNIVERSITETET I KØBENHAVN

1980

Redaktion:

professor, dr. phil. MOGENS BLEGVAD
administrator, dr. phil. ERIK DAL
professor H. HØJGAARD JENSEN

ALLAN R. MACKINTOSH, professor i eksperimentel faststoffysik, er født i 1936 i England og blev dr. phil. ved Cambridge Universitet i 1960 på en disputats om metallers elektroniske struktur. Efter seks års ophold på Iowa State University i USA blev han ekstraordinær professor i fysik ved Danmarks tekniske Højskole i 1966 og professor ved Københavns Universitet i 1970. I årene 1971-76 var han direktør for Forsøgsanlæg Risø. I 1977 blev A. R. Mackintosh medlem af Videnskaberne Selskab; endvidere er han medlem af Akademiet for de Tekniske Videnskaber og en række udenlandske videnskabelige selskaber og organisationer. I 1980 blev han valgt til Præsident for det Europæiske Fysiske Selskab. A. R. Mackintosh har været redaktionsmedlem ved flere internationale videnskabelige tidsskrifter. Han er æresdoktor ved Uppsala Universitet.

A. R. Mackintosh har skrevet talrige afhandlinger i udenlandske tidsskrifter om problemer indenfor faststoffysik. Endvidere har han offentliggjort en række mere populære artikler i tidsskrifter og aviser.

*Hæfte 21-25 udgives med støtte fra
Niels Bohr Legatet.*

Forlag:

Folkeuniversitetet i København
Købmagergade 52
1150 København K

Allan R. Mackintosh

FRA KAOS TIL ORDEN – FASTSTOFFYSIK I DET TYVENDE ÅRHUNDREDE

1. De første år

I begyndelsen af dette århundrede var den opnåede viden om faste stoffers struktur og egenskaber stærkt begrænset. Man vidste, at de bestod af et meget stort antal atomer med en indbyrdes afstand på ca. en milliontedel centimeter, men man havde ikke fundet en metode til at bestemme, hvorledes atomerne var arrangeret, skønt krystallernes regelmæssige overflade antydede en slags ordnet struktur. Man vidste også, at mange af de faste stoffers egenskaber, og her især metallerne høje elektriske ledningsevne, skyldtes elektronerne. J. J. Thomson og andre havde i slutningen af sidste århundrede undersøgt adskillige egenskaber ved elektronen, som var den først opdagede elementarpartikel. Man formodede, at elektroner kunne bevæge sig frit i metaller, kolliderede med atomer samt vekselvirke med hinanden gennem elektrisk frastødning. Imidlertid var der ingen forklaring på den store forskel i elektrisk ledningsevne og øvrige egenskaber, som man fandt mellem de forskellige slags faste stoffer, isolatorer, halvledere og metaller

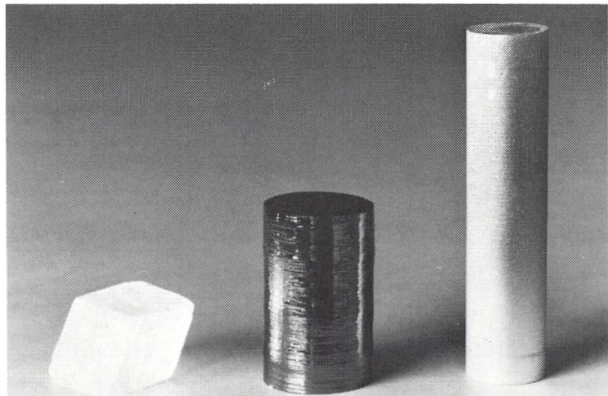


Fig. 1. Enkeltkrystaller af de tre typer af faste stoffer.

Isolatoren calcit er gennemsigtig, men leder ikke elektricitet. Halvlederen silicium er uigennemsigtig og en middel-mådig leder. Metallet aluminium reflekterer lys kraftigt og er en fremragende leder.

STUDIER OVER METALLERNES ELEKTRONTEORI

AFHANDLING FOR DEN FILOSOFISKE
DOKTORGRAD

AF

NIELS BOHR



KØBENHAVN
I KOMMISSION HOS V. THANING & APPEL
TRYKT HOS J. JØRGENSEN & CO. (M. A. HANNOVER)
1911

*Fig. 2. Niels Bohrs doktor-
afhandling – et af pioner-
bidragene til et felt, hvor der
stadig forskes.*

(fig. 1). Isolatorer er ofte gennemsigtige og kan ikke lede elektrisk strøm, halvledere er uigennemsigtige og middelmådige ledere, mens metaller reflekterer lys kraftigt og er fremragende ledere.

Der var således to store problemer ved udarbejdelsen af en teori, som kunne forklare den elektriske ledningsevne hos metallerne; deres struktur var ukendt, og der var ingen udviklet metode til at beregne et enormt antal vekselvirkende elektroners bevægelse. Konfronteret med disse besværligheder gjorde et antal fysikere, og her især P. Drude og H. A. Lorentz, hvad fysikere ofte gør under sådanne omstændigheder: de ignorerede dem. I begyndelsen af dette århundrede konstruerede de en groft oversimplificeret model, hvori både atomerne og kræfterne mellem elektronerne blev negligeret. Denne „fri-elektron“-model var i

stand til at gøre rede for mange af metallernes egenskaber. Især lykkedes det at forklare varmeledning, elektrisk ledning samt lysets refleksion, der skyldes oscillationer i elektrongassen forårsaget af det oscillerende elektriske felt hos lysbølgerne. Imidlertid løb teorien ind i svære vanskeligheder, herunder især problemet med at forklare varmfylden. Den mængde varme, som er nødvendig for at hæve et metals temperatur, blev ved eksperimenter bestemt til at være meget mindre end den teoretisk forudsagte.

En kritisk oversigt over fri-elektron-modellen og et betydningsfuldt bidrag til teorien ydede Niels Bohr i sin doktordisputats udgivet i 1911 (fig. 2). Det er ikke almindeligt kendt, at Niels Bohr begyndte sin karriere som Danmarks første faststoffysiker. Under sit senere ophold i Cambridge prøvede han forgæves at gøre J. J. Thomson interesseret i sit arbejde, men han var handicappet af, at disputatsen var skrevet på dansk. Først i det seneste tiår, hvor den endelig er blevet oversat til engelsk, er originaliteten i Bohrs arbejde indenfor området blevet klar for et større antal videnskabsmænd. Noget skuffet vendte han sin opmærksomhed mod andre fænomener, hvilket var et tab for metallernes fysik, men på langt sigt en stor gevinst for videnskabens fremskridt, bl. a. fordi hans erfaring med teorien for metaller blev ført over i hans arbejde indenfor atomfysik. Skønt Bohr erkendte de eksisterende teories positive træk, var han mere interesseret i at studere fænomener, f.eks. magnetisme hos atomer og faste stoffer, som han kunne indse var uforklarlige indenfor den klassiske fysiks rammer. Han forstod, at en tilfredsstillende teori for stof krævede en ny måde at anskue naturen på.

2. Kvanteteorien for faste stoffer

Vor viden indenfor fysikkens verden forøges gennem et tæt samspil mellem eksperiment og teori. Nye eksperimentelle resultater kræver en udvidelse eller modifikation af eksisterende teorier og giver inspiration til nye ideer, som så må afprøves ved yderligere eksperimenter. Det første store gennembrud for udviklingen af det moderne billede af faste stoffer kom kort efter udgivelsen af Bohrs disputats, da M. von Laue i 1912 viste, at når røntgenstråling med bølgelængder af størrelsesordenen som den typiske afstand mellem atomer i faste stoffer sendes gennem et krystal, spredes (diffrakteres) strålingen på lignende måde, som når sædvanligt lys passerer et gitter. Derved var det vist, at krystallerne faktisk har en ordnet struktur. Snart viste W. H. og W. L. Bragg – far og søn – hvordan denne

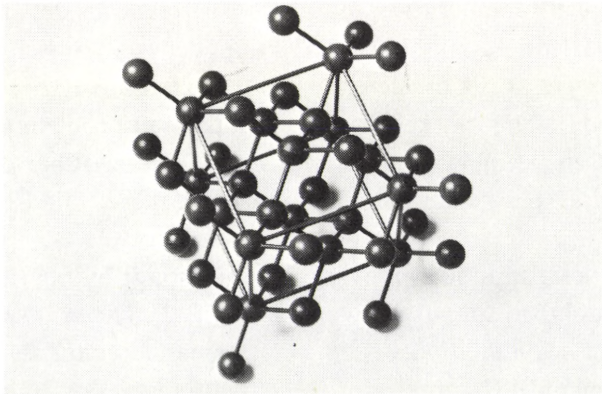


Fig. 3. Siliciums krystalstruktur. De sorte kugler forestiller silicium atomer, og atomerne ved f.eks. hjørnerne på den terningformede enhedscelle har alle identiske omgivelser.

teknik kunne bruges systematisk til at bestemme krystallers struktur, og derved grundlagdes røntgenkrystallografien, en videnskab som trives den dag i dag.

Hvis vi kunne forstørre en del af siliciumkrystallen på fig. 1 100 millioner gange, ville vi se noget, der lignede fig. 3 med atomerne placeret på en ordnet måde i *krystalgitteret*. Krystallers struktur kan selvfølgelig være meget mere kompliceret end siliciumstrukturen, men de har alle et vigtigt fælles træk, nemlig *periodisk symmetri*. Hvis vi starter ud fra et bestemt atom og bevæger os en bestemt afstand, eller et multiplum af denne, i specificerede retninger, så kommer vi til identiske atomer med identiske omgivelser. Det faste stof kan derfor tænkes opbygget af et stort antal identiske *enhedsceller*, hver bestående af et lille antal atomer arrangeret på en bestemt måde. Denne periodicitet i gitteret er den mest karakteristiske mikroskopiske egenskab ved faste stoffer, og det er den, der gør det muligt at reducere det komplekse problem, som elektronernes bevægelse gennem gitteret udgør, til et, som kan løses med god nøjagtighed.

Elektronernes bevægelse kan på grund af deres små masser ikke behandles tilfredsstillende ved brug af klassisk mekanik, og kvanteteorien må benyttes. Lovene angående mikroskopiske partiklers bevægelse blev udviklet i tyverne og adskiller sig radikalt fra Newtons love, som bruges til at bestemme bevægelsen af makroskopiske legemer såsom billardkugler og planeter. De mest bemærkelsesværdige konsekvenser af kvanteteorien stammer fra den kendsgerning, først postuleret af L. de Broglie, at en elektron, eller en hvilken som helst anden lille partikel, kan opføre sig *både* som en bølge *og* en partikel, som illustreret i fig. 4. Under visse omstændigheder har den partiklens egenskaber med en masse m , en hastighed v , bevægelsesmængde mv , og en kinetisk energi på $\frac{1}{2} mv^2$ ganske som i

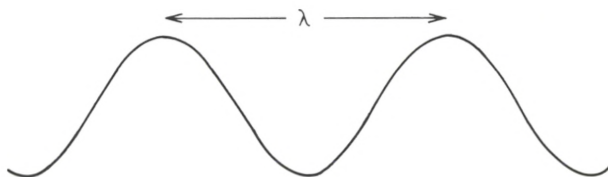
PARTIKEL

$$m \longrightarrow v$$

$$\text{Bevægelsesmængde } p = mv$$

$$\text{Energi } E = \frac{1}{2} mv^2$$

BØLGE



$$\text{Bølgelængde } \lambda = \frac{h}{mv} = \frac{1}{k}$$

$$\text{Energi } E = \frac{h^2 k^2}{2m}$$

Fig. 4. Bølge-partikel-dualismen. En partikel, f. eks. en elektron, kan under visse omstændigheder også opføre sig som en bølge.

klassisk mekanik. Imidlertid kan mange observationer kun forklares ved at antage, at elektronen er en bølge med en bølgelængde λ omvendt proportional med bevægelsesmængden. Proportionalitetsfaktoren h er Plancks konstant, som angiver målestokken for kvantefænomener.

Denne *bølge-partikel-dualisme* indebærer, at elektronens energi generelt set er begrænset til diskrete værdier frem for at kunne variere kontinuert som i klassisk mekanik; dens bevægelse er *kvantiseret*. Elektronbølgerne i et atom eller fast stof må passe ind i omgivelserne, og de tilladte tilstande svarer til veldefinerede energier. Ideen om *tilladte tilstande* med specificerede egenskaber er central for kvanteteorien, hvis navn stammer fra diskontinuiteten i størrelser såsom energi og hastighed. For den klassiske fysik var disse kontinuerte.

En elektron er en punkt-partikel, dvs. uden udstrækning i rummet, mens en bølge strækker sig over et volumen. M. Borns interpretationsregel siger så, at elektronbølgen angiver sandsynligheden for at finde elektronen forskellige steder i det område, som bølgen dækker, og dens position er derfor ikke nøjagtigt bestemt. Faktisk er det ifølge W. Heisenbergs *usikkerhedsprincip* umuligt samtidigt at bestemme en partikels position og hastighed præcist. Det bedste vi kan gøre,

uanset hvor omhyggeligt og genialt en måling udføres, er at fastslå, at elektronen er et eller andet sted indenfor et område af omtrent samme størrelse som dens bølgelængde.

Denne usikkerhed har dybtgående konsekvenser for, hvad der forstås ved identiske partikler i kvanteteorien. Hvis vi betragter to identiske legemers sammenstød, f.eks. billardkugler, så kan vi skelne dem før, under og efter kollisionen. Hvis det går for hurtigt til, at vi kan følge stødforløbet med øjet, kan vi benytte os af hurtige filmsapparater eller snyde ved at sætte et mærke på en af kuglerne. De muligheder har vi imidlertid ikke, når to elektroner kolliderer. Når deres bølger overlapper, kan vi ikke følge deres baner, – det gælder ikke bare i praksis men også principielt – og vi kan ikke afgøre, hvilken der er hvilken efter kollisionen. Således er nogle legemer mere identiske end andre, og begrebet „identitet“ på kvanteteoretisk niveau er mere fundamentalt og har større konsekvenser end i klassisk fysik.

Lad os for eksempel betragte en opstilling med identiske billardkugler. Hvis vi bytter om på to af dem, ser systemet tilsyneladende uændret ud, men ved nøjere betragtning kan vi se, at der er en forskel. Omvendt vil et system med to elektroner ikke bare *se* uændret ud, hvis vi ombytter elektronerne, men det *er* uændret. Det er ikke muligt at skelne systemer, som kun adskiller sig ved, at der er byttet om på elektronerne.

Dette princip har vigtige konsekvenser for elektrongassen i metaller. De termiske egenskaber hos en samling partikler kan beregnes ved brug af statistisk mekanik. Denne baseres på beregning af det antal måder, hvorpå man kan realisere et system med f.eks. givet totalenergi og rumfang. For et system, hvor ombytning af to partikler ikke fører til en ny tilstand, bliver dette antal tydeligvis et andet end for et system, hvor ombytningen ændrer tilstanden. Den statistiske mekanik for kvantegasser med identiske partikler, såsom f.eks. elektroner i et metal, giver derfor helt anderledes resultater end dem, man ville opnå med klassiske gasser, der jo kan betragtes som en samling små billardkugler. Denne forskel illustreres i fig. 5. For en klassisk gas findes antallet af molekyler, der bevæger sig med en given hastighed, ud fra Maxwell-Boltzmann-fordelingen, som er opkaldt efter to store klassiske fysikere. Dette antal bliver større med hastigheden op til en vis værdi, hvorefter det gradvis falder igen. Fordelingen i en kvantegas er helt anderledes. Tænk vi os, at vi opbygger en fri-elektron-gas ved at tilføje en elektron ad gangen, så kan der ifølge W. Paulis *udelukkelsesprincip* kun anbringes én partikel i hver tilstand. Ved lave temperaturer vil hver tilføjede elektron gå

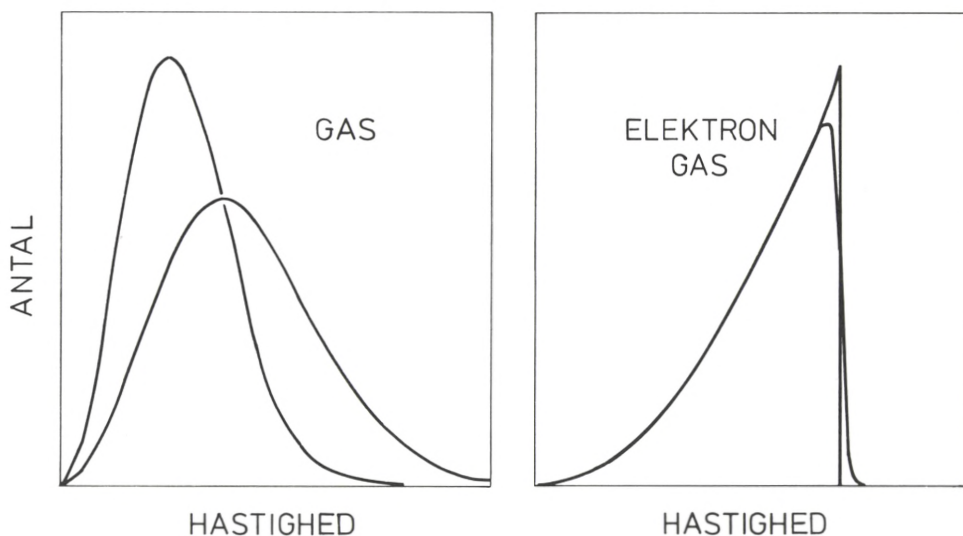


Fig. 5. Antallet af partikler som funktion af hastigheden i en klassisk gas og en kvantegas, i begge tilfælde ved to forskellige temperaturer. Når elektrongassen opvarmes, forøger kun nogle få elektroner deres energi, så varmfylden er meget lille.

ned i den laveste ufyldte energitilstand, således at når vi er færdige, er alle tilstande op til en given energi ved navn Fermi-energien fyldt op, og alle tilstande med større energi er tomme. Hastighedsfordelingen for elektronerne vokser derfor indtil en maksimalværdi, hvorefter den falder brat til nul. Denne fordeling kaldes Fermi-Dirac-fordelingen, opkaldt efter to store kvantefysikere.

Når en klassisk gas opvarmes, stiger alle molekylernes hastighed og dermed også deres energi sådan, som det er illustreret i fig. 5. Omvendt påvirkes kun et lille antal partikler, når en kvantegas opvarmes, nemlig dem med energier tæt ved Fermi-energien. Varmefylden er derfor i overensstemmelse med eksperimenter tilsvarende lavere, hvilket blev vist af A. Sommerfeldt i 1928. Han viste også, at andre svagheder i den klassiske fri-elektronteori kunne fjernes ved at udnytte det faktum, at elektronerne er identiske i den specielle kvanteteoretiske forstand og adlyder udelukkelsesprincippet.

For at kunne forklare, hvorfor elektronerne i et metal på trods af den stærke vekselvirkning med atomerne i krystalgitteret opfører sig, som om de var frie, må vi vende tilbage til elektronbølgerne. Disse bølgers form, og den energi de modsvare, kan beregnes ud fra E. Schrödingers bølge ligning, der indtager den samme plads i kvanteteorien, som Newtons anden lov gør i klassisk mekanik. Det er

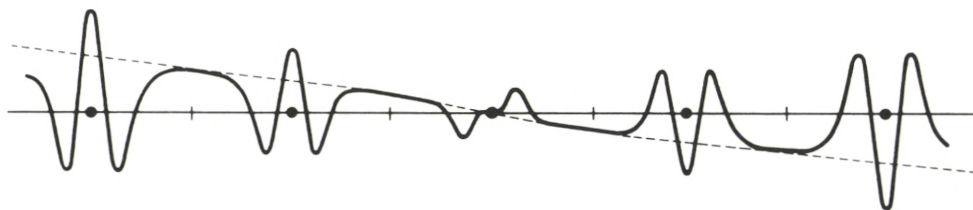


Fig. 6. En elektronbølge i et fast stof. Den frie elektronbølge ændres, så at der opstår kraftige svingninger nær atomerne.

muligt ved brug af krystalgitterets periodiske symmetri at løse Schrödinger-ligningen ved elektroniske regnemaskiners hjælp og derved finde elektronbølgenes form i et fast stof. Disse såkaldte bølgefunktioners udseende vises på fig. 6. De ligner bølgerne for frie elektroner, som er vist i fig. 4, men med den forskel, at de svinger voldsomt i nærheden af atomerne i krystallen. Elektronbølgerne udbreder sig gennem gitteret uden at blive spredt af atomerne. Ved at tilpasse sine bølgefunktioner til gitteret er elektronerne i stand til at bevare deres frihed, og de illustrerer således på en ret usædvanlig måde Engels leveregel: „Frihed er erkendelsen af nødvendighed.“

Den måde, hvorpå elektronernes energi varierer med bølgelængden, kan også beregnes ud fra Schrödinger-ligningen, og resultatet kan ses på fig. 7. Der er to væsentlige afvigelser fra den klassiske relation for en fri partikel mellem energi og hastighed (som er omvendt proportional med bølgelængden), og begge skyldes elektronens bølgenatur. Eftersom elektronbølgerne må tilpasses krystallens grænser, må deres energi principielt være kvantiseret og ikke kontinuert. Men krystallens dimensioner er meget større end elektronernes bølgelængder, så energien er praktisk taget kontinuert, og denne form for kvantisering har sædvanligvis en ubetydelig indflydelse på krystallens egenskaber. På den anden side har den førnævnte tilpasning af elektronbølgerne til gitteret en afgørende indflydelse. Når bølgelængden er nøjagtigt det dobbelte af afstanden mellem atomerne (gitterkonstanten), så kan elektronen spredes kraftigt på nøjagtigt samme måde, som når røntgenstråler Bragg-reflekteres ved bestemmelse af krystallens struktur. Som følge deraf er der to tilstande med samme bølgelængde, men med forskellige energier svarende til, at der er både en reflekteret og en transmitteret bølge. Konsekvensen er et *energigab* – et energi-område, som er forbudt for elektroner. Der er også energigab ved højere energier, som skyldes Bragg-reflektion af elektroner med bølgelængder lig gitterkonstanten eller hele brøkdeler deraf.

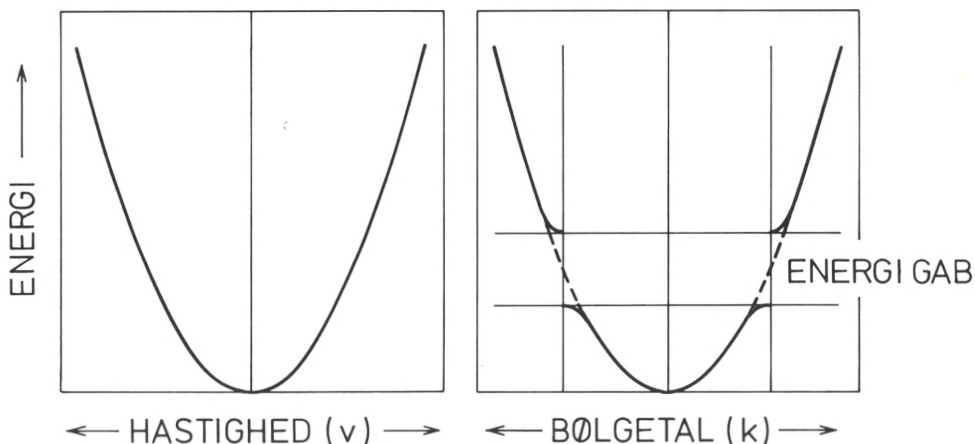


Fig. 7. Sammenhængen mellem energi og hastighed (eller bølgetal $k = 1/\lambda$) for en fri elektron og en elektron i et fast stof. På grund af spredningen af elektroner fra krystalgitteret opstår der gab i energispektret.

Energispektret for elektroner i faste stoffer har derfor form som vist på fig. 8 med områder af skiftevis tilladte og forbudte energier. Intervallerne med tilladte energier kaldes *energibånd*. Forklaringen på isolatorers, halvlederes og metalleres forskellige ledningsevne ved brug af energibåndteorien blev udarbejdet af F. Bloch, A. H. Wilson og andre tidligt i trediverne. Hvert energibånd i det faste stof indeholder to elektrontilstande per enhedscelle af krystallen. Hvis der, som i calcit eller silicium, er et lige antal elektroner i enhedscellens atomer, er det derfor muligt for elektronerne at fylde et helt antal energibånd. En elektrisk spænding forsøger at accelerere elektronerne og derved hæve deres energi. Hvis alle energibåndene er fyldte, som i calcit, kan elektronernes energi ikke forøges af et stationært elektrisk felt, eftersom tilstandene med lidt højere energi enten er forbudte eller fulde. Stoffet er derfor en isolator. Omvendt har et metal som aluminium, hvor der er et ulige antal elektroner per enhedscelle, et halvfyldt bånd, hvori elektronerne opfører sig næsten som en kvantegas af frie elektroner, der kan accelereres af et elektrisk felt og således lede en elektrisk strøm. Det er også muligt for faste stoffer med et lige antal elektroner per atom at opføre sig som et metal, hvis energibåndene overlapper som i f.eks. bly. I en ren krystal af halvlederen silicium forhindrer de fyldte energibånd også elektrisk ledning ved lave temperaturer, men energigabet er så lille, at nogle af elektronerne kan løftes op over det med varme som vist på fig. 8, og silicium er således en moderat leder ved stuetemperatur.

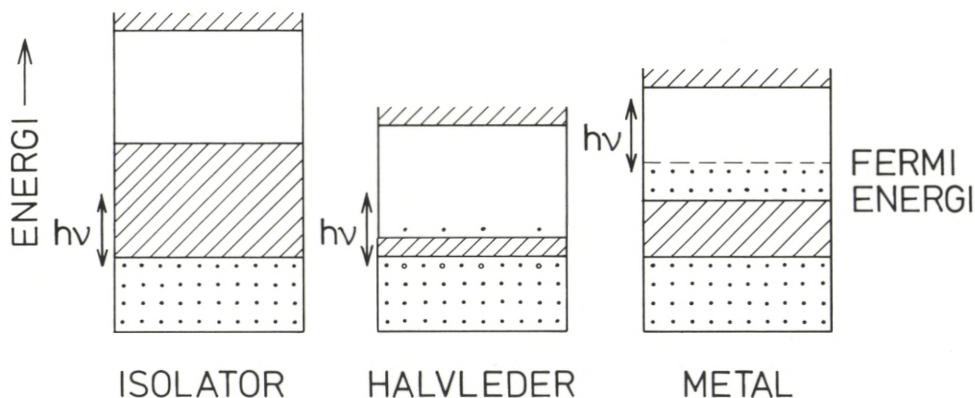


Fig. 8. Energispektret i de tre typer af faste stoffer. I en isolator er energibåndene enten fulde eller tomme og synligt lys kan ikke anslå elektronerne over energigabet. I en halvleder er energigabet så lille, at elektronerne kan anslås enten af varme eller lys. Elektronerne i det delvis fyldte bånd i et metal opfører sig som en elektrongas og kan både lede elektricitet og reflektere og absorbere lys.

De optiske egenskaber hos faste stoffer kan også forklares ud fra båndteorien. Bølge-partikel-dualismen gælder også for lys, som således kan opfattes enten som elektromagnetiske bølger med frekvens ν givet ved lyshastigheden divideret med bølgelængden, eller som en strøm af partikler, der kaldes *fotoner* og har en energi på Plancks konstant h ganget med frekvensen ν . Absorptionen af lys i faste stoffer kan opfattes som indfangning af fotoner, og hvis en elektron fanger en foton, forøges dens energi med $h\nu$. Som vist på fig. 8 har en foton fra synligt lys en frekvens, som er for lille til at løfte en elektron op over energigabet til et tomt højere bånd i en typisk isolator. Det synlige lys kan derfor ikke absorberes, og isolatoren er gennemsigtig. Ved ultraviolet lys, hvor fotonenergien er større, kan isolatorer almindeligvis absorberes kraftigt. Fotoner fra synligt lys kan på den anden side set godt løfte elektroner over energigabet i halvledere fra fyldte til tomme bånd, og lyset absorberes således kraftigt. Halvledere kan dog være gennemsigtige for infrarødt lys, hvor fotonenergien er mindre end energigabets størrelse. Lys reflekteres kraftigt fra metaller af svingninger i den frie elektrongas skabt af lysets oscillerende elektriske felt, ganske som man havde indset i den klassiske fri-elektron-teori. Fotoner, som ikke reflekteres, absorberes ved excitation af elektroner. Dette er således et interessant eksempel på bølge-partikel-dualismen; refleksion forstås lettest ud fra bølge-teorien, mens absorption forklares naturligt ved at betragte lys som partikler.

Eftersom elektronerne ikke spredes på atomerne i det periodiske krystalgitter, kunne man tænke sig, at der ikke ville være nogen modstand mod den elektriske strøm. Imidlertid indeholder alle metaller fremmede atomer i form af urenheder, som ødelægger gitterets periodicitet og derved spreder elektronerne, sådan at der opstår en elektrisk modstand, som er uafhængig af temperaturen. Når et fast stof opvarmes, vibrerer atomerne omkring deres middelpositioner i gitteret, og den periodiske orden ødelægges også derved. Vibrationerne kan beskrives ved gitterbølger eller *fononer*, som de kaldes i partikel-billedet, som spreder elektronerne og derved giver anledning til en modstand, der stiger kraftigt med stigende temperatur.

I mange metaller forsvinder modstanden imidlertid ved meget lave temperaturer, hvilket indebærer, at en elektrisk strøm kan løbe i en ring uden påsat spænding til evig tid. Dette er det fascinerende fænomen, som H. Kammerlingh-Onnes opdagede i 1911, og som kaldes *supraledning*. En fyldestgørende teoretisk forklaring herpå blev først fundet i slutningen af halvtredserne, da J. Bardeen, L. N. Cooper og J. R. Schrieffer viste, at den skyldtes svage vekselvirkninger mellem elektronerne, som var blevet negligeret i den kvantemekaniske fri-elektron-model. Denne vekselvirkning skyldes primært forstyrrelser i gitteret, når en elektron løber gennem det. Forstyrrelsen virker herefter på en anden elektron på en sådan måde, at den tiltrækkes svagt af den første. Resultatet af denne tiltrækning er, at elektronerne kan være svagt bundet til hinanden, nærmest som om de var to partikler i et meget stort molekyle med dimensioner tusindvis af gange større end den interatomare afstand i krystallet. I en supraleder er alle elektronerne knyttet sammen to og to på denne måde, og parrene er koblet således, at de giver anledning til en stærkt organiseret bevægelse i elektrongassen. Hvis en strøm sættes igang, ved at man får denne korrelerede elektrongas til at bevæge sig i et elektrisk felt, så er den yderst stabil. Hvis en enkelt elektron således er i fare for at blive spredt af for eksempel en urenhed, så „samarbejder“ de andre om at bibeholde dens bevægelse, og dermed altså strømmen. Supraledning er derfor et slående eksempel på effektiviteten ved kooperative handlinger i naturen.

Teorien for supraledning var en stor triumf i faststoffysikkens udvikling. Forklaringen på et så subtilt fænomen, som skyldes meget svage vekselvirkninger, kunne kun opnås gennem en dyb forståelse af metallernes natur. Udviklingen af en kvantitativ teori for faste stoffers elektriske egenskaber med basis i løsningen af Schrödingers ligning var en lige så bemærkelsesværdig bedrift. Udviklingen blev startet af J. C. Slater og andre i trediverne og fik et stort skub fremad ved

den stigende brug af hurtige elektroniske regnemaskiner fra slutningen af halvtredserne og fremefter. Det er nu muligt i gunstige tilfælde – som f. eks. for mange metalliske grundstoffers vedkommende – at beregne krystalstrukturen samt elektrongassens fysiske egenskaber udelukkende med udgangspunkt i atomtallet, altså atomkernernes ladning. Sådanne beregninger stemmer normalt overens med eksperimentelle resultater i et omfang, som er overraskende, når man tænker over problemets indviklede beskaffenhed. En skønsom simplificering har således ført os frem til en teori for faste stoffer, som både er kvantitativ og fundamental. Det er altså med udgangspunkt i meget få love og grundsætninger muligt at beregne et større antal detaljerede konsekvenser, som er i overensstemmelse med den måde, naturen rent faktisk opfører sig på.

Teoriens succes med at forklare mange egenskaber hos perfekte krystaller har i de sidste to årtier opmuntret fysikerne til at give sig i lag med det i praksis vigtige problem at forstå de ufuldkomment ordnede faste stoffer. Hos alle faste stoffer forstyrres det periodiske gitter af urenheder, vakancer på grund af manglende atomer, eller af mere komplicerede defekter såsom dislokationer, der involverer en forstyrrelse af et større område i krystallen. Studiet af sådanne gitterdefekter er blevet afgørende forbedret ved fremkomsten af elektronmikroskopet.

Elektroner kan accelereres til energier, hvor deres bølgelængder er meget kortere end bølgelængden af synligt lys, og de kan derved bruges i et mikroskop med betydelig større forstørrelse, end den man finder i et almindeligt optisk mikroskop. Det er derved blevet muligt at iagttage gitterdefekter og deres bevægelse direkte og altså derigennem at undersøge de mikroskopiske faktorer, som bestemmer makroskopiske egenskaber såsom styrke og hårdhed hos metaller og andre bygningsmaterialer, uden hvilke et moderne teknologisk samfund ikke kan fungere.

Der er en gruppe faste stoffer, deriblandt almindeligt vinduesglas, hvis struktur ikke er periodisk men *amorf*. Den teoretiske beskrivelse af elektronernes bevægelse gennem den slags uorden er specielt udfordrende, eftersom man ikke kan foretage de store simplificeringer, som den periodiske symmetri giver anledning til. Fysikere nyder sædvanligvis den slags udfordringer, og i de seneste år er der specielt gennem N. F. Motts anstrengelser blevet gjort betragtelige fremskridt i at forstå den stigende mængde af eksperimentel erfaring, der er blevet tilvejebragt for sådanne amorfe faste stoffer. Ikke bare på grund af deres praktiske anvendelser, men også på grund af, at forklaringen af deres egenskaber er en yderst svær prøve på vor evne til at fremstille en omfattende teori for faste stoffer, kan stu-

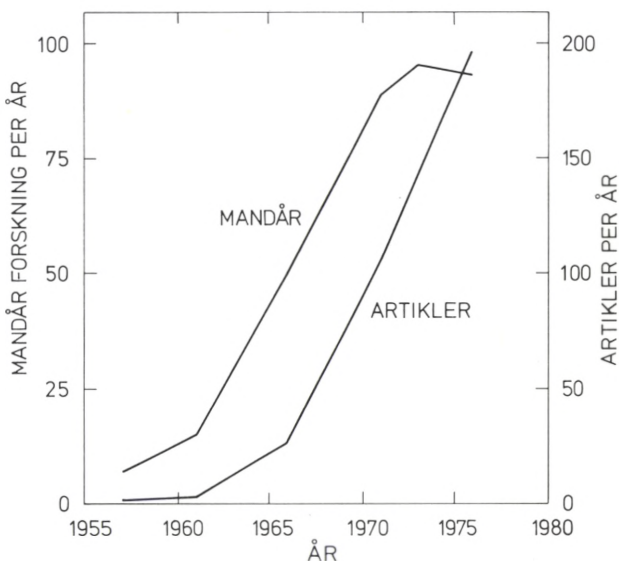


Fig. 9. Udviklingen af faststoffysik i Danmark. Den stærke vækst af ressourcer brugt til forskning reflekteres i udgivelsen af videnskabelige artikler.

diet af uordnede materialer måske betragtes som værende frontlinien for forskningen indenfor faststoffysik.

3. Neutroner og magnetisme

Efter at Niels Bohr forlod faststoffysikken, var der temmelig lille interesse for området i Danmark gennem det næste halve århundrede. Den grundlæggende forståelse, som blev skitseret i det foregående afsnit, for hvordan faste stoffer opfører sig, blev udviklet i andre lande og specielt i England og USA. Imidlertid oplevede faststoffysikken i Danmark en renaissance i begyndelsen af tresserne, og den er siden vokset kraftigt, både hvad angår forskningsbevillinger og opnåede resultater. Denne udvikling fra praktisk taget ingenting illustreres på fig. 9, som er taget fra „Fysisk Forskning i Danmark“, udgivet i 1979 af Dansk Fysisk Selskab. I denne rapport beskrives både den udvikling, som fysikken i Danmark har undergået i løbet af de sidste tyve år, samt de nuværende aktiviteter indenfor faststoffysik og andre områder. Det store antal fænomener, som kan observeres hos faste stoffer, afspejles i de mange forskellige forskningsprojekter, som er påbegyndt gennem tresserne og siden udviklet ved universiteterne i København og Århus, Danmarks tekniske Højskole og Risø. Som eksempel derpå kan vi tage studiet af magnetisme ved brug af neutronspreddning, som er udført på Risø. Dels

er magnetisme en af de vigtigste grene af faststoffysikken, og dels illustrerer eksemplet de nødvendige betingelser for udviklingen af et vellykket forskningsprogram.

Faste stoffers magnetiske egenskaber skyldes primært en af de fundamentale egenskaber ved elektronen, nemlig dens *spin*. Mange elementarpartikler er i besiddelse af et indre impulsmoment, som en spinnende billardkugle, og spinnets er kvantiseret ligesom alle andre mikroskopiske bevægelser. Faktisk har elektronen kun to uafhængige spintilstande. Dens spinnende elektriske ladning giver anledning til et magnetisk moment, således at man kan forestille sig elektronen som en lille magnet, der kan orienteres enten parallelt eller antiparallelt med et ydre magnetisk felt, men ikke i nogen stilling derimellem. Disse to tilstande kaldes ofte „spin-op“ henholdsvis „spin-ned“.

I ledningselektrongassen hos et almindeligt metal såsom aluminium er der et ligeså stort antal elektroner med spin-op som med spin-ned, hvilket bevirker, at deres magnetiske momenter udbalancerer hinanden, og metallet således ikke er magnetisk. Imidlertid er der i specielle tilfælde som f. eks. hos jern en tendens til overvægt af besatte spin-op tilstande, der, når man kommer under en for materialet karakteristisk temperatur kaldet den kritiske temperatur, resulterer i, at der optræder et makroskopisk moment. Sådanne stoffer giver derfor anledning til stærke kræfter i magnetiske felter. Egenskaberne ved sådanne *ferromagnetiske* ledningselektrongasser blev betragtet af E. C. Stoner i begyndelsen af trediverne, kort efter at kvanteteorien for magnetisme hos atomer og faste stoffer var blevet grundlagt af J. H. Van Vleck. Den stærke mikroskopiske kraft, som får elektronernes spin til at stille sig parallelle med hinanden, kaldes „*exchange*“-*vekselvirkningen*. Dens eksistens blev fastslået af W. Heisenberg og P. A. M. Dirac som værende et resultat af identitet på kvanteniveau. Spinnets kan opfattes som et „kvantemærke“. Som konsekvens af det tidligere nævnte udelukkelsesprincip holdes elektroner med samme mærker adskilt, således at energien, som skyldes vekselvirkningen fra deres elektriske ladning, reduceres. Der er derfor altid en tendens hos elektronerne til at stille spinnene parallelle, men dette modvirkes af den resulterende forøgelse af kinetisk energi hos ledningselektrongassen. Kun hvis *exchange*-vekselvirkningen er specielt stærk, som den f. eks. er hos overgangsmetallerne jern, kobolt og nikkel, dannes en ferromagnetisk tilstand ved lave temperaturer.

I tungere grundstoffer kan spinnets hos nogle af de elektroner, som udgør den inderste del af atomet, være uparret, så de har et magnetisk moment, der er loka-

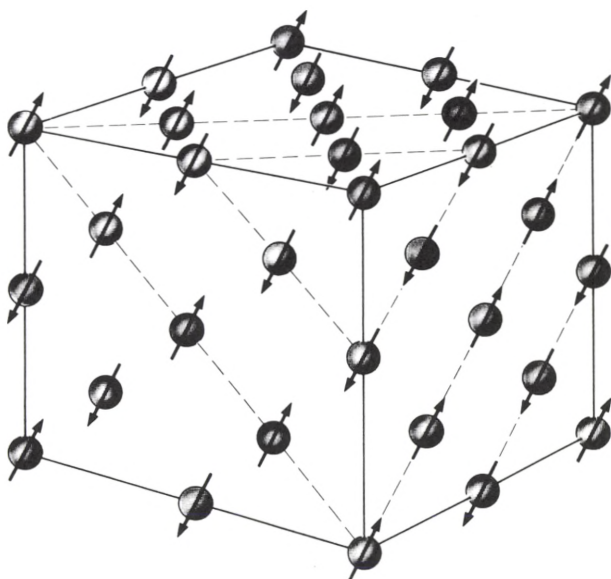


Fig. 10. En typisk antiferromagnetisk struktur. De atomare magnetiske momenter på et bestemt plan er parallelle, mens i naboplanerne peger de i den modsatte retning.

liseret i gitterpunkterne af krystallet. Disse momenter vekselvirker gennem exchange og andre kræfter, og derved danner de en ordnet struktur ved lave temperaturer. Denne ordnede struktur kan være ferromagnetisk med alle momenterne i samme retning, eller den kan være af mere kompliceret art som f. eks. angivet på fig. 10, hvor momenterne i et plan er parallelle, mens de i naboplanerne er modsat rettede. Derved fremkommer en såkaldt *antiferromagnetisk* struktur, hvori det totale moment er nul, og stoffet påvirkes ikke ret meget af et magnetisk felt. Muligheden for antiferromagnetisme i faste stoffer blev foreslået af L. Néel i 1932, og der blev fundet indirekte eksperimentelt bevis for dens eksistens i de efterfølgende år, men antiferromagnetiske strukturer blev ikke grundigt undersøgt før i slutningen af fyrrerne, da C. G. Shull og hans kolleger begyndte deres systematiske neutroddiffraktionseksperimenter.

Neutronen er usædvanligt velegnet for studiet af magnetisme i faste stoffer. Faktisk ville resultatet, hvis faststoffysikere havde fået lov til at designe det perfekte værktøj til dette studium, være blevet noget, der var meget lig denne partikel, som J. Chadwick opdagede i 1932. Da de har den rette masse, vil neutroner, der kommer ud af forskningsreaktorer, have bølgelængder af samme størrelsesorden som den interatomare afstand i faste stoffer, og de kan derfor undergå diffraktion ganske som røntgenstråler. I modsætning til fotonerne i røntgenstrå-

lingen har neutronerne et magnetisk moment, som skyldes spinnet, og dette har netop en passende styrke til at kunne vekselvirke med momenterne i faste stoffer, uden at disse forstyrres for meget. Derigennem kan man ikke bare få oplysning om, hvor atomerne er, men også i hvilken retning deres magnetiske momenter peger, og således kan neutronen bruges til en fuldstændig bestemmelse af den magnetiske struktur. I løbet af de seneste tredive år er tusinder af magnetiske strukturer blevet undersøgt, hvoraf nogle er meget komplicerede. Ganske som røntgenstråling har haft afgørende betydning for andre områder indenfor faststoffysikken, så har neutronen givet anledning til en revolution indenfor magnetismen.

Suezkrisen i 1956 førte for første men på ingen måde sidste gang til afgørelsen om, at Danmark seriøst skulle forberede sig på at bygge atomkraftværker. Som følge deraf oprettedes Forsøgsanlægget Risø, og der blev konstrueret tre reaktorer. DR3 reaktoren, som er den senest opførte, blev bygget med britisk støtte, og den er en modificeret version af PLUTO reaktoren ved Harwell. Den måde, hvorpå den er konstrueret, har vist sig at være usædvanlig gunstig, og DR3 er blevet benyttet effektivt til et utal af formål, indbefattende blandt andet afprøvning af reaktormateriale og brændselselementer, fremstilling af isotoper til medicinsk brug og analyse af stoffer gennem neutron-aktivering. Reaktoren var ikke bygget specielt som en neutronkilde til brug ved spredningseksperimenter, men visse udformninger, som primært var indføjede med afprøvning af materialer for øje, har vist sig at være usædvanlig velegnede til dette formål. Der var bygget rør ind i reaktoren, og ved at placere beholdere med vand tæt ved reaktorens kerne kan meget intense stråler af neutroner, som er relativt uforurenede af andre typer stråling, spredes ud gennem rørene og bruges i eksperimenter.

Gennem tresserne opbyggedes fortræffelige faciliteter for neutronspretnings-eksperimenter af en lille gruppe unge fysikere ved Risø med god teknisk og økonomisk støtte. På det tidspunkt havde neutroindiffraktionsteknikken været kendt i mere end et tiår, og mange vigtige eksperimenter var allerede blevet udført. På trods af at studiet af magnetiske strukturer har udgjort en vigtig del af neutronforskningen ved Risø, hvor mange nye strukturer forøvrigt er blevet opdaget, så bestemte man sig for at koncentrere sig om en anden type eksperimenter, *uelastisk spredning*, som benytter en anden egenskab ved neutronerne fra forskningsreaktorer.

Fotonerne i røntgenstrålingen har energier, som er meget større end de typiske energier i faste stoffer. Det ville f. eks. være nødvendigt at opvarme en gas til ad-

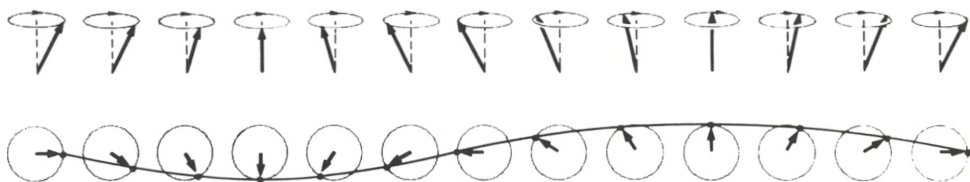


Fig. 11. En spinbølge i et magnetisk stof. De magnetiske momenter roterer med en bestemt frekvens og deres relative retninger danner en bølgestruktur.

skillige millioner grader, før atomernes middelenenergi ville være lig en typisk røntgenstråle-fotons energi. Den energi, som sådan en foton kan modtage, når den spredes fra et fast stof, er således meget lille sammenlignet med dens oprindelige energi, og den er derfor omend ikke umulig så dog meget vanskelig at måle. I diffraktionseksperimenter spredes fotonerne og neutronerne elastisk af det faste stof med ændring af bevægelsesretningen, men med uændret energi. Neutronerne, som kommer ud af en forskningsreaktor, er blevet bremset i vandet, og de har derfor en middelenergi tæt ved den, som vandmolekylerne har. Det er igen omtrent det samme som gitterbølgekvanterne eller *fononerne* i faste stoffer, og hvis en neutron absorberer en fonons energi under spredningen fra det faste stof, så er dens energiændring let at måle. Frekvensen af gitterbølgerne med forskellige bølgelængder svarende til fononenergien kan således måles gennem uelastisk neutronspredding, og man kan derigennem opnå meget detaljerede oplysninger om de interatomare kræfter i faste stoffer som først vist af B. N. Brockhouse i slutningen af halvtredserne.

Fononernes spredning af neutronerne skyldes disses vekselvirkning med atomets kerne. Uelastisk magnetisk spredning kan imidlertid også forekomme gennem vekselvirkning mellem elektronernes og neutronernes spin. En del studier af fononer er blevet udført ved Risø, men de største anstrengelser har været helliget magnetisk spredning, som tillader en måling af momenternes excitationenergi. I en ferromagnet er disse excitationer ganske analoge med gitterbølgerne, og de kaldes *spinbølger*. Det magnetiske moment i en spinbølge afviger fra magnetiseringsretningen og præcesserer omkring denne med en bestemt frekvens, som illustreret på fig. 11. Den relative orientering af momenterne forskellige steder bestemmer bølgelængden. I partikelbilledet kaldes en spinbølge for en *magnon*, og måling af magnonenergi ved uelastisk neutronspredding giver information om de kræfter, der virker på momenterne i faste stoffer. Studierne på Risø af magnoner i forskellige magnetiske strukturer har resulteret i en detaljeret beskrivelse

af de magnetiske vekselvirkninger i et antal faste stoffer og her specielt de sjældne jordarter.

Det er også muligt at studere andre aspekter ved de elementære momenters bevægelser i magnetiske faste stoffer. Uelastisk neutronspreddning måler den såkaldte tidsafhængige parkorrelationsfunktion. Denne funktion er sandsynligheden for, hvis et moment på et givet sted peger i en given retning til et givet tidspunkt, at et andet moment på et andet sted så peger i en anden given retning til en given senere tid. Og den oplysning er netop den, der er nødvendig for f.eks. at forstå de store fluktuationer i momenternes retning, når et magnetisk stof er i nærheden af den kritiske temperatur, hvor magnetisk ordening finder sted, eller for at kunne studere excitationerne af lange kæder af magnetiske atomer, som kan opføre sig som et éndimensionalt system indkapslet i en tredimensional krystal.

Gennem tresserne var DR3 konkurrencedygtig overfor enhver anden reaktor i verden, hvad angik intensiteten i neutronstrålingen, og den blev brugt til mange interessante målinger især på magnetiske systemer. Ved slutningen af årtiet var neutronmetodens styrke imidlertid blevet så åbenlys, at flere forskningsreaktorer med stor intensitet blev bygget i udlandet netop med neutronspreddningseksperimenter for øje. Disse reaktorer har en intensitet af neutroner i kernen, som er betydeligt større end i DR3 – og de var for øvrigt langt dyrere end DR3 at bygge. Med udsigten til at deres faciliteter snart ville være forældede, tog neutronspreddningsgruppen den dristige beslutning at fremstille en kold flydende brintkilde i et af rørene på DR3. I princippet indebærer dette bare en ombytning af vandet i en af spredningsbeholderne med flydende brint, men eftersom flydende brint ikke er ligeså håndterlig som vand, så var det en teknisk set temmelig svær opgave. Det flydende brint bremser neutronerne ned til en energi, som er sammenlignelig med brintmolekylernes, og det svarer til en temperatur på omkring tyve grader over det absolutte nulpunkt. Neutronerne, som kommer ud fra den kolde kilde, har derfor en meget lavere energi og således en længere bølgelængde end de, der kommer fra en konventionel vandspreder, der jo forefindes ved en temperatur noget over stuetemperatur. Sådanne kolde neutroner er særlig velegnede for måling af små energiændringer i faste stoffer såsom de magnetiske excitationer i sjældne jordartssystemer. Den kolde kilde på DR3, som er vist på fig. 12, leverer en stråle af kolde neutroner, som er en størrelsesorden mere intens end den fra vandsprederen, som den erstatter, og den er konkurrencedygtig overfor enhver sådan facilitet i verden.

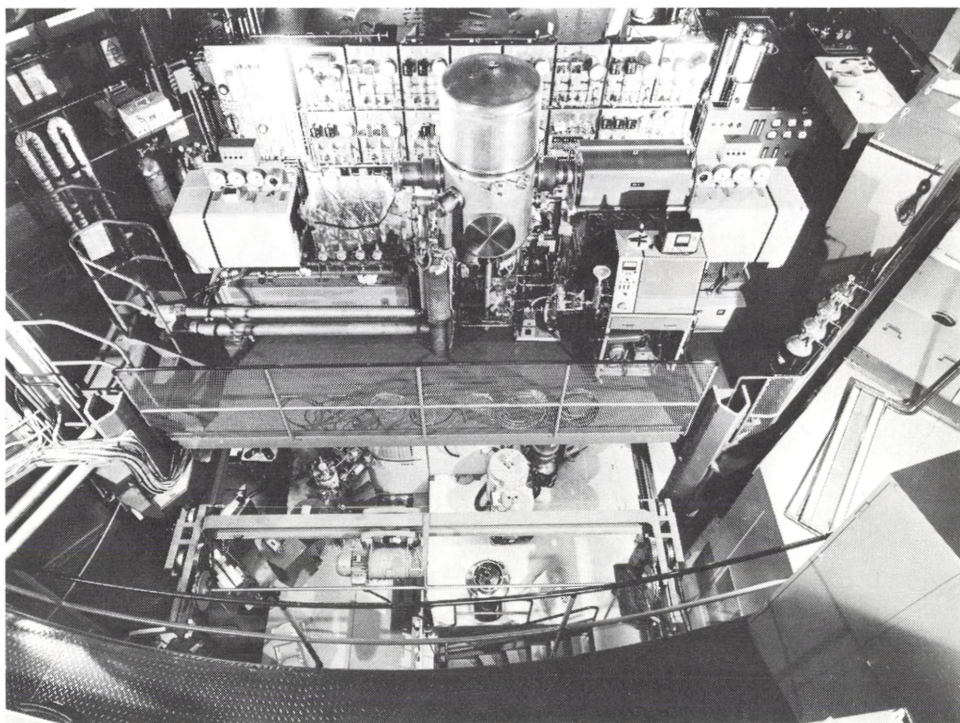


Fig. 12. Den kolde neutronkilde på Risø. Kølemaskinen på den øverste etage producerer flydende brint til en beholder i reaktoren. Neutronerne fra den kolde kilde bruges til spredningseksperimenter med de spektrometre, der ses på den nederste etage.

Udviklingen af forskningsprogrammet indenfor neutronspreddingen på Risø indeholder, når man ser tilbage, et antal bemærkelsesværdige aspekter. DR3's anvendelighed for danske faststoffysikere må betragtes som værende et usædvanligt lykketræf. Selv i tresserne ville anskaffelsen af en så kostbar facilitet til grundforskning dårligt nok være blevet overvejet. Den vigtigste faktor for, at der blev draget fordel deraf, var den kompetence og entusiasme, som den gruppe af unge videnskabsmænd og teknikere, der opbyggede udstyret, besad. Under ledelse af H. Bjerrum Møller, J. Als-Nielsen og O. W. Dietrich tilegnede de sig neutronspreddningsteknikken og udførte nye og fantasifulde eksperimenter. Der blev hurtigt etableret kontakt med det internationale videnskabelige samfund, hvilket specielt var nyttigt på det opbyggende stadium, og som siden er bibeholdt. Der er på nuværende tidspunkt en vedvarende udveksling af både information og viden-

skabsmænd med andre neutronspretningscentre i verden. Økonomisk støtte har ligeledes været tilstrækkelig, omend ikke overdådig. På det tidspunkt, da den nye generation af forskningsreaktorer blev bygget, havde gruppen tilstrækkelig erfaring, færdighed og fleksibilitet til at kunne svare igen med tekniske fornyelser, som satte dem i stand til at bibeholde deres faciliteter på et internationalt konkurrencedygtigt niveau.

Lignende egenskaber karakteriserede også mange andre projekter indenfor faststoffysikken, som blev påbegyndt i tresserne. En betragtning af muligheden for at oprette lignende nye forskningsaktiviteter idag giver imidlertid ikke anledning til optimisme. Talentfulde og begejstrede unge fysikere kommer stadig frem i stort antal i Danmark, men med mangelen på udsigt til en fast stilling indenfor forskningen vender de før eller siden blikket mod andre beskæftigelser. Faldende budgetter gør støtten af nye projekter besværlig, især ved universiteterne. Selv om forskning indenfor faststoffysik i Danmark stadig blomstrer, giver den tvivlsomme udsigt til fornyelse og forandring anledning til bekymring på længere sigt.

4. Tilbageblik

Når man ser tilbage på faststoffysikkens udvikling i det tyvende århundrede, er indtrykket, at der har været tale om en jævn forøgelse af vores viden og forståelse. En mangfoldighed af stadigt mere raffinerede eksperimentelle teknikker og en vedvarende strøm af nye ideer og teorier har ført os til et stade, hvorfra mange faste stoffers opførsel kan forklares med en bemærkelsesværdig nøjagtighed. Ofte forstås egenskaberne hos selv meget udviklede krystaller, der indeholder mange forskellige atomer i komplicerede mønstre. Der er sket mange fejltagelser i tidens løb, og der har været fremsat mange forkerte teorier, men den frie kommunikation mellem videnskabsmænd har sikret, at disse hurtigt er blevet korrigeret, således at det stadige fremskridt ikke har lidt større forstyrrelse.

Hovedlinierne i den teoretiske forståelse af faste stoffer er i det væsentligste fuldendt, men nye fænomener, som udgør en udfordring til teorien, observeres til stadighed, og nye forudsigelser afventer hele tiden eksperimentel eftervisning via nye metoder. Dette samspil mellem eksperiment og teori, som er karakteristisk for naturvidenskaberne, er således særlig udtalt indenfor faststoffysikken. Uden opdagelsen af røntgenstrålerne og deres diffraktion, som tillader bestemmelsen af krystalstrukturer, ville ingen kvantitativ teori for faste stoffer have

kunnet udvikles. Men omvendt ville man uden en sådan teori ikke have tænkt på eksistensen af adskillige af de fænomener, der eksperimentelt kan iagttages.

Området er traditionelt ekletisk og finder både sine ideer og eksperimentelle metoder i andre discipliner. Således tilvejebragte atomfysikken mange redskaber for spektroskopien tilligemed de grundlæggende ideer i kvanteteorien. Blandt andre bidrag fra kernefysikken har neutronen haft en afgørende betydning for studiet af magnetisme, og det mest lovende nye værktøj for studiet af faste stoffer i dag er synchrotronstrålingen fra højenergifysikkens accelleratorer. Et utal af forskellige eksperimenter kan bruges ved undersøgelsen af faste stoffer, og de fleste af dem er af relativt beskedent omfang, så at det stadig er muligt for den enkelte videnskabsmand at fremkomme med vigtige bidrag uden brug af kostbare apparater. I begge disse henseender adskiller faststoffysikken sig fra f. eks. højenergifysikken. Teorien for faste stoffer adskiller sig også fra andre gennem sin alsidighed. Den bruger klassiske, semiklassiske og kvanteteoretiske metoder og indeholder blandt andet elementer af elektromagnetisme, statistisk mekanik og relativitetsteori. Alle disse egenskaber gør studiet af faste stoffer til et på mange måder ideelt træningsområde for unge videnskabsmænd, som har et ønske om at udvikle en alsidig færdighed og lære at arbejde selvstændigt.

Blandt alle områder indenfor fysikken er faststoffysik nok det, der har den mest nære kontakt til teknologien. Revolutionen indenfor elektronik er det mest bemærkelsesværdige eksempel på, hvordan nye materialer og nye måder at bruge dem på præger det moderne samfund – på godt og ondt, men nok mest det førstnævnte. Teknologiske revolutioner er hovedsagelig opstået som følge af videnskabelige fremskridt, i hvert fald i dette århundrede. Afgørende fremskridt skyldes sjældent forbedringer af primitive teknikker, men oftest opfindelse af en helt ny teknisk løsning på gamle problemer. Indenfor centrale områder som f. eks. kommunikation, energi, sundhed og landbrug har erfaring vist, at grundforskning er den væsentligste komponent af fremskridtet. Den tilfældige måde, hvorpå nye opdagelser har påvirket udviklingen, indebærer imidlertid en advarsel mod dem, der tror, det er muligt at sikre praktiske resultater gennem en detaljeret planlægning af grundforskningen, eller som tror, at ethvert problem kan løses gennem umådeholdent forbrug af penge. Teknologiske korstog er sjældent mere vellykkede end de religiøse, og de kan begge tiltrække deltagere af forskellige bevæggrunde. Planlægningen af grundforskningen er altid et dristigt vovestykke, og faren for at styrke det middelmådige frem for det originale er altid til stede. Det synes, at den eneste brugbare fremgangsmåde er at finde frem til en metode,

hvorved man kan udskille det relativt lille antal videnskabsmænd i hver generation, som har evner og mod til at yde originale bidrag til videnskaben, og så give dem passende betingelser og støtte, så det er muligt for dem at udøve deres arbejde.

Naturvidenskabernes indflydelse på den sociale velfærd er et kraftigt argument for at støtte grundforskning, men det er tvivlsomt, om det er det vigtigste. I civilisationens historie har en af de store skabende kræfter hos menneskeheden været vores trang til at forstå universet og vores placering i det. Det er også karakteristisk, at et civiliseret samfund stiller midler til rådighed for de unge mennesker, som er villige til at underkaste sig den nødvendige disciplin for så gennem den frie stræben efter viden at opnå erkendelse af naturen. Et sundt samfund kendetegnes ikke hovedsagelig ved dets materielle velfærd, endskønt en vis velstand er nødvendig for mange af dets fornemste kendetegn, men snarere ved dets åndelige værdier, hvoriblandt friheden til at stille spørgsmål og få svar er den væsentligste.

Fra den enkelte forskers synspunkt er det jævne fremskridt indenfor videnskaben ikke særlig synligt. Stærkt involveret i sit eget forskningsområde, det være sig stort eller lille, stræber han efter at skabe en slags orden i det kaos af kendsgerninger, hypoteser, eksperimenter og teorier, som det indeholder. I sine bestræbelser på at afdække naturens hemmeligheder søger han det, som skabende mennesker ikke kan undvære, nemlig inspiration. Der er således en tendens til at overvurdere den andel i naturvidenskabens fremskridt, som logik og teknik har. Begge dele har selvfølgelig betydning indenfor forskning, men meget af videnskabsmandens arbejde består i at forberede sit sind ved at absorbere al den information, som det er muligt at tilvejebringe indenfor forskningsområdet. Dette gøres ved at læse, diskutere, overveje og derigennem vente på den afgørende hypotese eller det afgørende eksperiment, som gør det muligt at skabe et sammenhængende mønster ud af de forskellige elementer, som er til rådighed. Denne proces er omhyggeligt skjult, når resultaterne endelig offentliggøres, og det er derfor ikke overraskende, at det almindelige billede af den måde, hvorpå videnskaben og videnskabsmændene fungerer, er forvrænget.

Et bemærkelsesværdigt kendetegn ved vores søgen efter videnskabelig sandhed er den tro, som deles af alle skabende videnskabsmænd, men som ikke synes at have nogen logisk retfærdiggørelse: at naturen i bund og grund er enkel. Faststoffysikere bruger avanceret matematik og kompliceret apparatur, og deres videnskabelige artikler er alt andet end enkel læsning, men, som vi har set, så er

grundideerne indenfor området enkle på trods af, at de ved første syn kan virke paradoksale. Bølge-partikel-dualismen, den specielle opfattelse af identitet indenfor kvanteteorien og gittersymmetrien er alle eksempler på de enkle men slagkraftige begreber, hvorpå teorien for faste stoffer hviler. Den tro, som inspirerer den skabende videnskabsmand, blev udtrykt for tre hundrede år siden af en af de største af dem, Isaac Newton: „Truth is ever to be found in simplicity, and not in the multiplicity and confusion of things. He is the God of order and not of confusion. And therefore they that would understand the frame of the world must endeavour to reduce their knowledge to all possible simplicity“ („Sandheden må altid findes i det enkle, ikke i mængden af forvirrende begreber. Gud er for orden, ikke for forvirring. Derfor må de, der vil forstå verden, forsøge at forenkle deres viden mest muligt“).

Litteraturhenvisninger

N. F. Mott: The Solid State (*Scientific American*, 217, 80, 1967).

A. R. Mackintosh: The Fermi Surface of Metals (*Scientific American*, 209, 110, 1963).

H. Ehrenreich: The Electrical Properties of Materials (*Scientific American*, 217, 194, 1967).

Ali Javan: The Optical Properties of Materials (*Scientific American*, 217, 238, 1967).

Fysisk Forskning i Danmark, 1: En Statistisk Kortlægning (Dansk Fysisk Selskab 1979).

Fysisk Forskning i Danmark, 2: Faststoffysik (Dansk Fysisk Selskab 1979).

F. Keffer: The Magnetic Properties of Materials (*Scientific American*, 217, 222, 1967).

A. R. Mackintosh: The Magnetism of Rare-Earth Metals (*Physics Today*, 30, 23, 1977).

Grundvidenskaben i dag er navnet på en række af 30 foredrag, som Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab afholdt i 1976–79. Fremtrædende forskere, hovedsagelig medlemmer af Selskabet, søgte ved at fortælle om udviklingen i den sidste menneskealder inden for de forskellige videnskabsgrene at bidrage til større forståelse af den forskning, der ikke direkte stiler mod praktisk anvendelse, men mod forøget indsigt i sammenhængen i verden.

Pjeceserien bygger på disse foredrag. Fremstillingen er gjort så almen, at de enkelte hæfter kan tjene som udgangspunkt for videre beskæftigelse med de behandlede fag og emner. Hertil hjælper også omfattende litteraturhenvisninger.

Foredragene udgives i 30 hæfter (3 bind). De 20 første er udsendt 1977–80 med titelark i hæfte 10 og 20. Nu foreligger de nedennævnte hæfter, incl. begyndelsen af 3. bind. Prisen incl. 20,25% moms er kr. 13,10, fra nr. 11 dog kr. 14,25. Hæfterne kan købes i boghandelen, eller man kan få dem tilsendt fortløbende og portofrit ved at abonnere hos Folkeuniversitetet i København.

1. Mogens Pihl: Hvad er grundvidenskab?
2. Erling Bjøl: Politik som videnskab.
3. Søren Egerod: Det fjerne Østens sprog – sammenhænge og påvirkninger.
4. C. Møller: Omvæltninger i fysikernes tankesæt i vort århundrede.
5. Arne Noe-Nygaard: Jordens nye ansigt.
6. Olaf Pedersen: De eksakte videnskabers historie.
7. P. Nørregaard Rasmussen: Økonomisk vækst.
8. Erik A. Nielsen: Hvad kan litteraturvidenskaben?
9. Ingmar Bengtson: Musikvidenskab – nu og i fremtiden.
10. Ole Maaløe: Biologiens molekylære grundlag.
11. Bernhard Gomard: Retsvidenskabens opgaver og særpræg.
12. C. Overgaard Nielsen: Økologi som grundvidenskab.
13. Arild Hvidtfeldt: Religionssociologiens plads blandt humaniora.
14. H. H. Ussing: Om årsagerne til elektriske fænomener i levende organismer.
15. Niels Thomsen: Historiske opinionsstudier.
16. I. K. Moustgaard: Psykologien som eksperimentalvidenskab.
17. Werner Fenchel: Om matematikkens begreber og metoder.
18. Arne Strid: Evolution – det moderne syn på tilpasning og artsdannelse.
19. Morten Simonsen: Den biologiske skelnen mellem eget og fremmed.
20. C. Barker Jørgensen: Dyrenes og årstidernes vekslen.
21. Fredrik Barth: Sosialantropologien som grunnvitenskap.
22. C. J. Becker: Hvad sker der i dansk arkæologi?
23. Erik Fischer: Om kunsthistorie.
24. Allan R. Mackintosh: Fra kaos til orden – faststoffysik i det tyvende århundrede.