

Magnetoelektriske materialer finder vejen til fremtidens IT

I magnetoelektriske materialer er magnetiske og elektriske egenskaber sammenkoblede på en måde, der er interessant i forbindelse med fx udvikling af fremtidens harddiske. At forstå de magnetoelektriske materialer i detalje er dog en grundvidenskabelig og materialekemisk udfordring.

Intidens computere lagrer man information på to forskellige måder. På en harddisk lagrer man informationen *magnetisk*. Det sker ved brug af mikroskopiske stangmagneter, som kan vendes i to forskellige retninger svarende til de logiske nulle og et-taller alle computere bruger til at arbejde information. Magnetisk lagring er permanent og kræver ingen strøm for at blive opretholdt. Til gengæld tager det relativt lang tid at skrive og læse information på denne måde. Læse- og skrivehastigheden kan øges væsentligt, hvis information lagres *elektrisk*. Det kan man gøre ved at fylde beholdere, såkaldte kondensatorer, op med elektrisk ladning. Fyldte og tomme beholdere repræsenterer da et-taller og nulle. Sådan foregår informationslagring i de RAM-enheder, der sidder i alle computere. At læse og skrive information foregår nu lynhurtigt, men elektrisk ladning er flygtig: Slukker man for kredsløbene, taber man sin information. En hukommelsesteknologi, der kombinerer RAM-enhedens læse- og skrivehastighed med den magnetiske lagrings permanente karakter, ville derfor med ét slag kunne fjerne én af de store flaskehalse i moderne computerteknologi.

Informationslagring er blot en af mange mulige anvendelser af de såkaldte *magnetoelektriske* materialer, hvor de elektriske og magnetiske egenskaber er sammenvævede og vekselvirker med hinanden. En sådan kobling har nogle usædvanlige konsekvenser. Fx kan man påvirke et materiale med et ydre magnetfelt og derved ændre dets elektriske egenskaber, eller man kan påvirke et materiale med et ydre elektrisk felt og ændre dets magnetiske egenska-

ber. Sådanne "håndtag" på elektriske og magnetiske egenskaber giver oplagte muligheder for ny teknologi. Andre eksempler på mulige anvendelser af magnetoelektriske materialer er meget præcise sensorer og hukommelseenheder med 4 logiske tilstande (0, 1, 2 og 3) bestemt af den magnetiske og den elektriske tilstand.

Før det teknologiske potentiale kan forløses er det dog nødvendigt at forstå og katalogisere de mulige mikroskopiske mekanismer bag den magnetoelektriske kobling. Til dette grundvidenskabelige formål er neutronspredning et afgørende værktøj, da det er essentielt at have information om sammenhængen mellem krystalstruktur på den ene side og magnetisk struktur og dynamik på den anden. Netop studiet af magnetisme er iblandt neutroners specifikke styrker.

Elektrisk og magnetisk polarisation

Materialers magnetiske og elektriske egenskaber afhænger i meget høj grad af, hvordan atomerne i materialet sidder i forhold til hinanden. For at et krystallinsk materiale kan udvise en *elektrisk polarisation*, er det nødvendigt, at de positivt ladede ioner i krystalstrukturen forskyder sig i forhold til de negativt ladede ioner. Det giver i så fald materialet en elektrisk plus-pol og en minus-pol ligesom i et batteri.

Magnetisk polarisation er det, de fleste forstår ved magnetisme, og som vi fx anvender, når vi sætter indkøbsbilleden fast på køleskabsdøren. De magneter, der finder anvendelse hér, er såkaldte *ferromagneter*. På atomart plan skyldes ferromagnetisme (og

Forfatterne



Rasmus Toft-Petersen, Instrument-ansvarlig Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Tyskland
rasmus.toft-petersen@helmholtz-berlin.de



Ellen Fogh, ph.d.-studerende Institut for Fysik, DTU
elfogh@fysik.dtu.dk



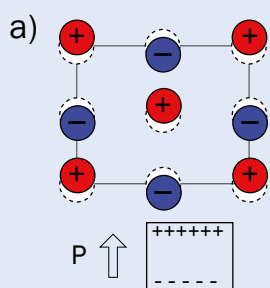
Niels Bech Christensen, seniorforsker, Institut for Fysik, DTU.
nbch@fysik.dtu.dk



Forsigtigt nedsænkes en krystal af det magnetoelektriske materiale LiCoPO_4 i en 15 Tesla magnet på det dansk-byggede RITA-II tre-akse spektrometer, som står på Paul Scherrer Institutet i Schweiz. Neutronerne kommer ud af den grønne cylinder til højre, og detekteres i den gule analysatortank til venstre.

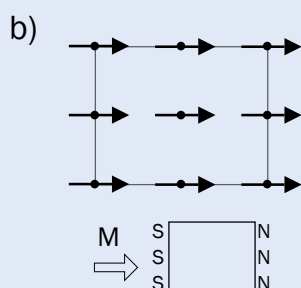
Foto: Katrine Sejling Haaning

Elektrisk polarisation samt magnetisering



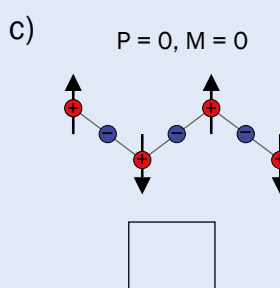
Elektrisk polarisation

a) Når de negativt (blå) og positivt ladede (røde) ioner forskydes sig i forhold til hinanden, opstår der en elektrisk polarisation, P , vist med den hvide pil. Den lille kasse viser den overordnede ladningsfordeling.

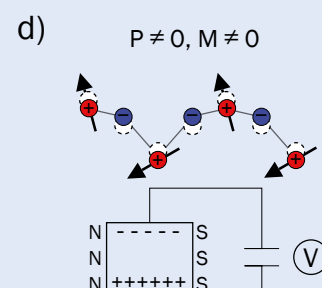


Magnetisering

b) Når ionernes spin peger i samme retning har materialet en magnetisering, M , dvs. det har en magnetisk nordpol og en sydpol.

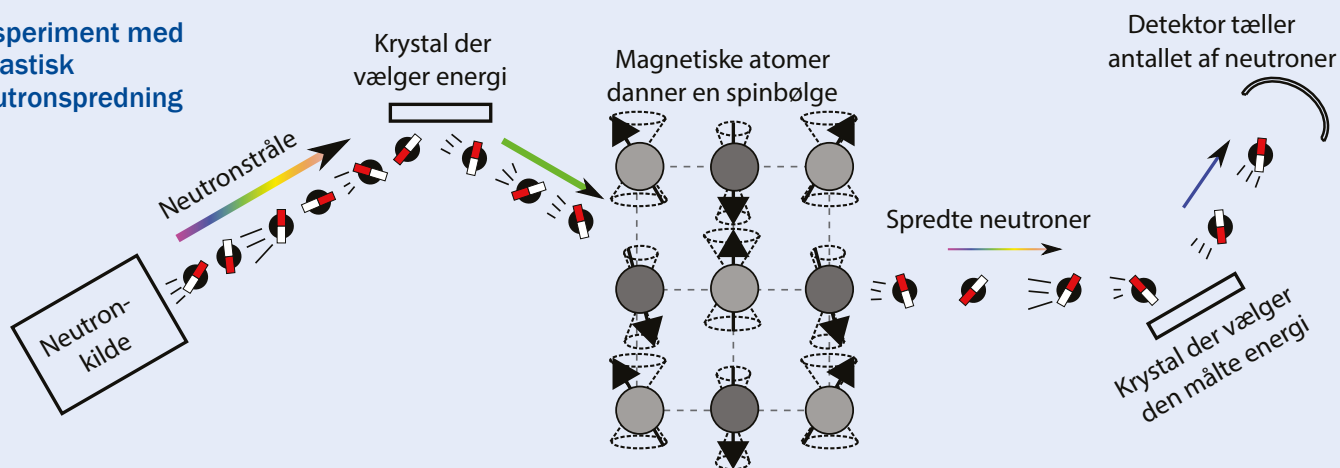


c) Når man ikke påvirker det magnetoelektriske materiale med et ydre magnet- eller elektrisk felt er både den elektriske polarisering og magnetiseringen nul.



d) Hvis man derimod påtrykker fx et elektrisk felt bliver begge disse størrelser forskellige fra nul.

Eksperiment med uelastisk neutronspredding



Figuren viser et eksperiment med såkaldt uelastisk neutronspredding: En neutronkilde producerer en stråle af neutroner med forskellige energier. Med en særlig krystal udvælges neutroner med én bestemt energi og sendes imod prøven. Inde i prøven vekselvirker neutronernes spin (vist som små stangmagneter) med de exchange-koblede

atomare spins (vist med pile hvis retning varierer i en spinbølge-tilstand) hvilket ændrer neutronernes retning og energi. Neutroner med en energi, der udvælges vha en anden krystal, sendes endelig til en detektor. På den måde kan man finde forskellen i energi på de indkommende og spredte neutroner.

de mere komplicerede former for magnetisme, som ofte findes i magnetoelektriske materialer), at visse atomer i det periodiske system danner magnetiske ioner, når de indgår i kemiske forbindelser. Vi kan tænke på magnetiske ioner som små stangmagneter med en nord- og en sydpol i analogi med jordens magnetiske poler. Ofte angives en magnetisk ion med en lille pil (kaldet et *spin*), der peger fra den magnetiske sydpol til den magnetiske nordpol.

Exchange-vekselvirkninger og magnetisk struktur

Når to sådanne ioner sidder i nærheden af hinanden aktiveres en pudsigt kvantemekanisk vekselvirkning kaldet *exchange*, som har den effekt, at de relative orienteringer af ionernes spin bliver gensidigt afhængige. Fokuserer vi fx på to nabo-atomer i et jernkrystal, kan disse vinde energi, hvis spinnene peger i samme retning. Det samme vil gælde for *alle* nabo-par, så netto-effekten af exchange-vekselvirkningen i jern er, at alle spin gerne vil være parallelle. Magnetfelterne fra hver af de atomare stangmagneter adderer derfor op til et makroskopisk magnetfelt, som vi kan bruge til at fæstne en magnet til en køleskabsdør eller til at gemme information på en harddisk.

I andre materialer giver exchange-vekselvirkninger anledning til langt mere komplicerede strukturer, der ikke nødvendigvis resulterer i et makroskopisk magnetfelt, og derfor kræver mere sofistikerede detektionsteknikker. Fx findes der *antiferromagneter*, hvor alle nabo-spins er antiparallelle, eller *spiral-strukturer*, hvor de atomare magneter danner strukturer, der mest af alt minder om den velkendte DNA-helix. Neutroner er følsomme over-

for sådanne strukturer, idet de spredes på en måde, der er en præcis signatur af, hvordan retningen og styrken af magnetfeltet fra de atomare spins varierer på atomar skala. Det forhold sætter os i stand til fuldkommen at bestemme materialers magnetiske struktur med neutronspredding.

Atomernes placering er altafgørende

Alt dette kan dog kun lade sig gøre, når spinnene har fundet sig til rette i en ordnet struktur, men for en given styrke af exchange-vekselvirkningerne sker dette kun under den såkaldte *magnetiske ordningstemperatur*, som vi her kalder T_O . For temperaturer, der er højere end T_O roterer spinnene rundt i alle retninger uafhængigt af hinanden. Størrelsen af T_O er bestemt af styrken af exchange-vekselvirkningerne, og disse afhænger på afgørende vis af den indbygdes placering af atomerne, dvs. af krystalstrukturen. Denne magnetiske orden har afgørende betydning for den magnetoelektriske mekanisme.

Ved at lægge et elektrisk felt på et magnetoelektrisk materiale ændres atomernes indbygdes placering. Dermed ændres vekselvirkningerne imellem magnetiske ioner, og det kan give anledning til ændringer i den magnetiske struktur. Denne ændring i strukturen kan være at alle spinnene drejer i samme retning og producerer en magnetisering af materialet – præcis som i jern. Sådant kan man kontrollere magnetiske egenskaber på elektrisk vis.

Selv når fysikerne har identificeret sammenhængen mellem krystalstruktur og magnetisk struktur, resterer der dog et praktisk problem: Den magnetoelektriske effekt er kun til stede for temperaturer under T_O , som i et givet materiale kan være langt

under stuetemperatur. En afgørende materialekemisk udfordring med henblik på teknologisk udnyttelse i fremtidens elektronik er derfor at identificere materialer, hvor exchange-vekselvirkningerne er så stærke, at den magnetoelektriske effekt er til stede ved stuetemperatur. Med andre ord er det ikke nok at kende krystalstruktur og magnetisk struktur. Det er også nødvendigt at kunne måle styrken af exchange-vekselvirkningerne. Men hvordan finder man disse?

Her kommer neutronspreddning virkelig til sin ret, da neutronerne har netop den rette energi til at anslå magnetiske bølger i perfekt ordnede spingitter: På grund af exchange-vekselvirkningerne vil en drejning af ét spin bort fra dets foretrukne retning forplante sig til nabo-spinnene, hvorved en såkaldt *spinbølge* udbreder sig i materialet i analogi med en bølge på en guitarstreng. Sammenhængen imellem bølgelængden (tonen) og energien af spinbølger giver information om vekselvirkningerne i selv meget komplekse systemer af magnetiske ioner, og kan som noget helt unikt måles direkte ved hjælp af en teknik kaldet uelastisk neutronspreddning. Her findes bølgens energi som forskellen mellem energien af de indkommende og spredte neutroner. Med styrken af exchange-vekselvirkningerne som sidste brik i puslespillet kan man opnå en udtømmende forståelse af de mekanismer, der på atomart niveau ligger bag magnetoelektriske materialers egenskaber.

Udsigt til gennembrud

Men præcis hér, hvor neutronspreddning giver os information, der ikke er tilgængelig med nogen andre eksperimentelle teknikker, afslører den også sin største svaghed: Der er ikke nok neutroner! Sandsynligheden for at anslå en spinbølge er så lille, at kun én ud af omkring hundrede millioner neutroner får æren. Konsekvensen er, at de observerede signaler er svage, og at der derfor kan være potentielt afgørende detaljer, som drukner i støjen. Den manglende følsomhed overfor detaljer har været en flaskehals i forhold til at forstå de magnetoelektriske materialer til bunds og dermed for at kunne anvende dem til teknologiske formål.

European Spallation Source (ESS) i Lund vil give os adgang til enorme neutronintensiteter, og kombineret med nye forbedrede instrumenter vil det uden tvivl føre til afgørende gennembrud. Danske og schweiziske forskere samarbejder om at konstruere et instrument, CAMEA, der specifikt er designet til studier af spinbølger og vibrationer af krystalgitteret. Flere andre instrumenter vil tillade detaljerede studier af magnetiske strukturer. Der er derfor rige muligheder for, at danske fysikere og syntese-kemikere vil kunne udnytte den geografiske nærhed til ESS og bidrage afgørende til udviklingen af magnetoelektriske materialer, der kan finde vej til fremtidens harddiske. ■

Videre læsning...

Tre tigerspring for materialeforskningen. *Aktuel Naturvidenskab* nr. 1/2015

Mere om uelastisk neutronspreddning: *Et tidsmikroskop: Aktuel Naturvidenskab* nr. 1/2015