

Neutroner – Hvad kan de bruges til?

Af Niels Hessel Andersen, Afdelingen for Materialeforskning, Forskningscenter Risø, Danmarks Tekniske Universitet, Bente Lebech, Afdelingen for Materialeforskning, Forskningscenter Risø og Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet, Kim Lefmann, Afdelingen for Materialeforskning, Forskningscenter Risø, Danmarks Tekniske Universitet, og Kell Mortensen, Afdelingen for Polymerforskning, Forskningscenter Risø, Danmarks Tekniske Universitet

Neutroner er neutrale partikler, som sammen med protoner og elektroner udgør atomernes grundlæggende byggestene. Deres egenskaber gør dem velegnede til undersøgelser af faste stoffers strukturelle og fysiske egenskaber. I denne artikel redegøres for neutroners egenskaber til spredningsforsøg, herunder deres fordele og ulemper i forhold til røntgenspredning. Vi giver en historisk gennemgang af den danske og internationale udvikling som oplæg til de efterfølgende artikler i dette nummer af KVANT.

Grundlæggende egenskaber og principper

Opdagelsen af neutronen dateres tilbage til begyndelsen af 1930'erne. Her observerede den tyske fysiker Walther Bothe, at der udsendtes en gennemtrængende stråling, når energirige alfa-partikler fra polonium ramte beryllium. Bothe mente, at der kunne være tale om gammastråling. Kort tid efter viste ægteparret Irene og Frederic Joliot-Curie i Paris, at den udsendte stråling frembragte en meget intens protonstråling, når den ramte materialer med et stort brintindhold. En detaljeret analyse af deres data viste, at der næppe var tale om gammstråling, og i 1932 gennemførte den engelske fysiker James Chadwick en række forsøg, der klart modbeviste hypotesen om gammastråling. Han foreslog, at den ukendte stråling bestod af neutrale partikler med omtrent samme masse som protonen og gav dem derfor navnet neutroner. Neutroner er ikke elementarpartikler. I fri form henfalder neutronen til

en proton under udsendelse af en elektron og en anti-neutrino med en halveringstid på ca. 15 minutter. Den har spin lig med en halv ($S = \frac{1}{2}$) og er derfor en Fermion partikel med et magnetisk moment.

Sammen med protoner og elektroner udgør neutroner de grundlæggende byggestene i atomer. Opdagelsen af neutronen var derfor en afgørende brik i arbejdet med at forstå atomkernernes opbygning, systematikken i det periodiske system, og den inspirerede til identifikation af yderligere subatomare partikler. Den forståelse, som herefter blev opbygget, har været helt afgørende for udviklingen af fissionsbaserede kernekraftværker og for fremtidens forventede fusionsreaktorer. Mindre flatterende er selvfølgelig muligheden for fremstilling af kernevåben. Som vi skal se i dette nummer af KVANT, bidrager neutroner også afgørende til forståelsen af faste og væskeformige stoffers grundlæggende egenskaber.

Boks 1: Illustration af krystalstruktur og reciprok gitter

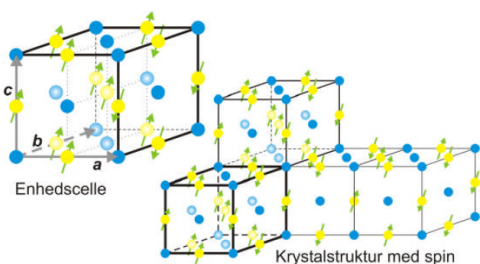
Direkte rum:

Periodisk arrangement af enhedsceller beskrevet med gittervektorer:

$$\mathbf{R} = n_1\mathbf{a} + n_2\mathbf{b} + n_3\mathbf{c}, \quad n_1, n_2, n_3 \in \mathbb{N}$$

Enhedscellerne indeholder flere atomer ●●. Nogle af dem kan have et magnetisk moment 🌀.

Krystalstruktur:



Krystalstrukturen er en tre dimensional gentagelse af mange enhedsceller.

Reciprok rum:

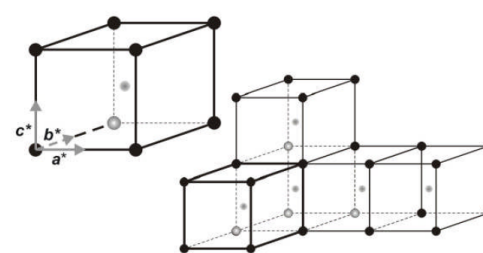
Reciproke gittervektorer defineret ved:

$$\mathbf{a}^* = 2\pi(\mathbf{b} \times \mathbf{c})/V_0, \quad \mathbf{b}^* = 2\pi(\mathbf{c} \times \mathbf{a})/V_0 \\ \mathbf{c}^* = 2\pi(\mathbf{a} \times \mathbf{b})/V_0, \quad V_0 = \mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{c})$$

Det reciproke gitter defineres ved:

$$\boldsymbol{\tau} = h\mathbf{a}^* + k\mathbf{b}^* + l\mathbf{c}^*, \quad h, k, l \in \mathbb{N}.$$

Reciprok gitter:



De grå og sorte gitterpunkter repræsenterer normaler til krystalplaner (jævnfør Boks 2), og deres størrelse er et mål for intensiteten af spredningen.

Boks 2: Grundlæggende principper for neutronspreddning

Illustrationerne er for et to dimensionalt gitter.

Neutronen har bølgekarakter:

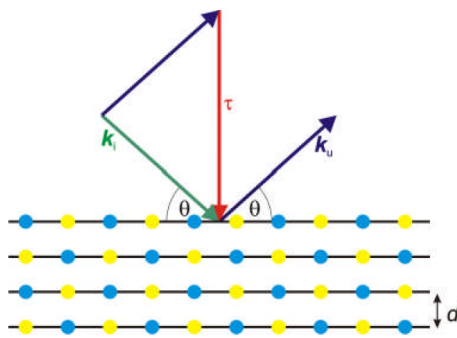
Bølgetalsvektor: \mathbf{k} , impuls: $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$, bølgelængde: $\lambda = 2\pi/k$ og energi: $E(\mathbf{k}) = \hbar^2 k^2 / (2M)$.

Elastisk neutronspreddning (Diffraktion):

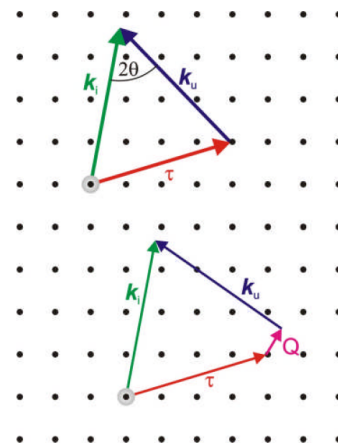
Bragg's lov: $n\lambda = 2d \cdot \sin(\theta)$.

Bragg's lov i reciprokt rum: $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{q} \equiv \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_u$, $\boldsymbol{\tau}$ = reciprok gittervektor, $k_i = k_u$, $\boldsymbol{\tau} = 2\pi/d$.

Direkte rum:



Reciprokt rum:



Uelastisk neutronspreddning:

Energioverførsel, $E(\mathbf{Q})$, til ekscitationen:

$$E(\mathbf{Q}) = \hbar\omega = \hbar^2(k_i^2 - k_u^2) / (2M).$$

M er neutronmassen og ω er frekvensen af ekscitationen.

Impulsbevarelse: $\mathbf{q} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{Q} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_u$.

I krystallinske materialer måles eksitations bølgetalsvektoren \mathbf{Q} altid relativt til reciprokke gittervektorer $\boldsymbol{\tau}$.

Diffraktion

Neutroner kan optræde som både partikler og bølger og kan derfor i lighed med røntgenstråler anvendes til diffraktionseksperimenter. Grundlæggende giver sådanne eksperimenter oplysninger om atomare afstande i materialer, fordi de spredte bølger fra et atom i materialet interfererer med bølgerne fra alle de andre atomer. For krystallinske materialer sidder atomerne i et periodisk gitter (se Boks 1). Den stråling, der spredes, når et parallelt strålebundt rammer et sådant periodisk atom-gitter, kommer ud i veldefinerede retninger og med intensiteter, som samlet giver information om atomernes placering. De mulige retninger for den spredte stråling er godt beskrevet ved Bragg's lov, som er illustreret øverst til venstre i Boks 2, hvor de indkommende og spredte neutronbølger enten er defineret ved deres bølgelængde og retning, eller – ækvivalent – ved deres bølgetalsvektorer, der er vektorer i det reciprokke rum (jævnfør Boks 2 øverst til højre). Strukturelle studier er dog ikke begrænset til velordnede krystallinske materialer. Interferens mellem bølger spredt fra for eksempel amorfe faste materialer eller proteiner i vandig opløsning giver ligeledes strukturel indsigt.

Hvorfor neutroner?

Sammenlignet med røntgenstrålingen fra konventionelle røntgen-generatorer og ikke mindst fra moderne

synkrotronbaserede kilder, er intensiteten fra alle neutronkilder imidlertid umådelig lille. Dette skyldes dels kravet om en kontrolleret fissions- eller spallationsproces (se Boks 3), dels at neutronerne er neutrale og derfor er vanskelige at styre i bestemte retninger. Neutroner produceret fra radioaktive kilder ved naturlig fission er derfor slet ikke tilstrækkeligt intense til moderne neutronspreddning. Kun forskningsreaktorer, som den nu lukkede DR3 reaktor på Forskningscenter Risø, eller accelerator baserede spallationsanlæg er brugbare kilder. Sådanne store anlæg er meget dyre både at etablere og drive.

På denne baggrund er det åbenlyst at spørge: *Hvorfor anvender man så neutroner til diffraktionsforsøg?* Hertil er der selvfølgelig mange og vigtige årsager. For det første: Neutroner er ladningsneutrale og har derfor stor gennemtrængningsevne i de fleste materialer, bortset fra dem som indeholder neutronabsorberende isotoper. Gennemtrængningsevnen kan være flere centimeter, og derfor kan man studere massive emners egenskaber endog under varierende ydre betingelser f.eks. i kryostatere med magnetfelter, ovne, trykceller og rheometre. En anden vigtig egenskab ved neutronstråling skyldes, at neutronerne vekselvirker med atomkernerne, og spredningstværsnittet varierer på en usystematisk måde gennem det periodiske system, i modsætning til røntgenstråling, hvor spredningstværsnittet afhænger systematisk af atomernes elektronladning.

Derfor kan neutroner se positioner af lette atomer, som f.eks. brint, på baggrund af tunge atomer, noget der er næsten umuligt med røntgenstråling. Da neutron tværsnittet samtidig er afhængig af den valgte isotop, kan kontrastforholdene ændres på en systematisk måde. Dette forhold belyses i flere af artiklerne i dette nummer af KVANT. En tredje betydningsfuld egenskab er knyttet til neutroners spin og dermed til deres magnetiske moment, som via dipolvekselvirkning med elektroners magnetiske moment i atomernes ufyldte skaller giver oplysning om magnetiske strukturer og egenskaber.

Uelastisk neutronspreddning

En fjerde og meget afgørende egenskab ved neutroner sammenlignet med røntgenstråle fotoner er relationen mellem bølgelængde og energi. De elementære ekscitationer i faste stoffer er termiske og har derfor energier i det samme område som neutroner med bølgelængder i Ångstrøm området. Når neutronen vekselvirker med disse ekscitationer i materialet, kan den miste eller vinde energi, der er sammenlignelig med dens egen energi, som ligger i meV området (jævnfør Boks 2 nederst). Derved er det muligt at bestemme relationen mellem energi og impuls af gittersvingninger, såkaldte fononer, og af spinbølger, også kaldet magnoner, som udbreder sig i forskellige retninger i materialet. På samme måde som fononer fortæller om atomernes korrelerede afvigelse fra deres ligevægtsposition, beskriver magnoner, hvorledes den korrelerede afvigelse fra perfekt magnetisk orden udbreder sig gennem materialet. Fra disse målinger

kan man bestemme de mikroskopiske elastiske og magnetiske vekselvirkninger mellem ioner og deres eventuelle magnetiske momenter. At røntgenstråling er svær at bruge til dette formål skyldes, at røntgenfotoner har energier i keV området. Energioverførsler i meV området kan derfor vanskeligt opløses i praksis.

Neutronkilder, spektrometre og detektorer

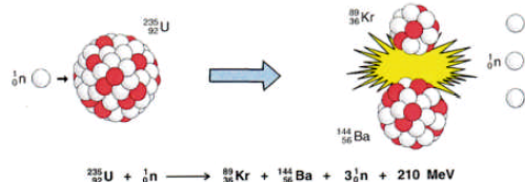
Som omtalt ovenfor foretages neutronspreddning kun ved store anlæg, hvoraf der findes to typer (se Boks 3):

1. Forskningsreaktorer: neutronerne produceres ved en kontrolleret fissionsproces baseret på ^{235}U
2. Såkaldte spallationsanlæg: tunge grundstoffer, f.eks. bly eller kviksølv, bombarderes med pulser af protoner i MeV området, som sønderdeler atomkernen under udsendelse af neutroner.

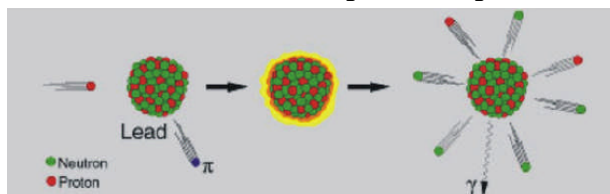
For at være praktisk anvendelige til spredningsforsøg skal neutronerne have energier i meV området. Da neutronerne udelukkende produceres via kernereaktioner og derfor bliver udsendt med energier i MeV området, skal de nedbremses (modereres). Nu til dags anvendes primært vand eller kold brintgas under tryk (ca. 15 bar og 40 K) til at producere henholdsvis termiske og kolde neutroner (jævnfør breddeopgave 27, side 34). Modereres neutronerne fuldstændigt vil de blive udsendt med energier beskrevet ved en Maxwell fordeling svarende til moderatorens temperatur. Det vil sige med maksimum intensitet for bølgelængder omkring 1 Å og 2,5 Å for henholdsvis termiske og kolde neutroner.

Boks 3: Neutronkilder

Forskningsreaktor: Fissions proces



Accelerator baseret kilde: Spallations proces



ILL i Grenoble: Verdens mest intense reaktorbaserede neutronkilde



Ringen i baggrunden er ESRF synkrotronen

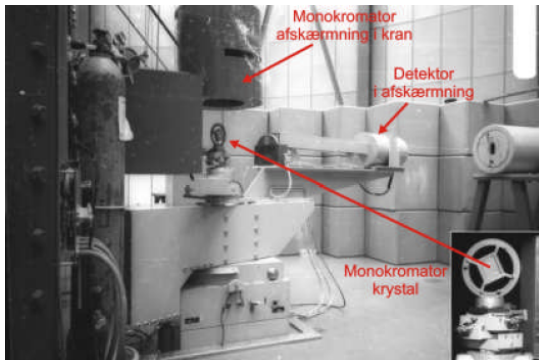
SNS under opbygning ved Oak Ridge National Laboratory i USA



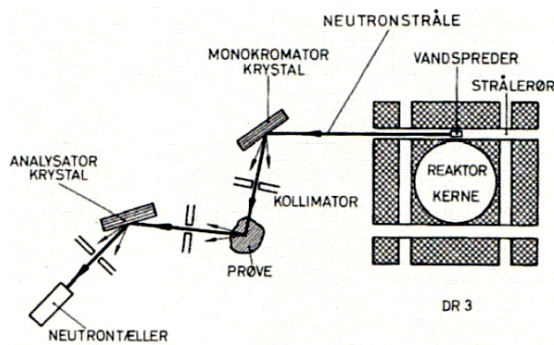
SNS bliver verdens mest intense spallations neutronkilde

Boks 4: Fortid

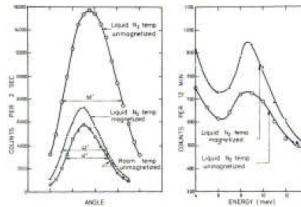
En-akse spektrometer ved DR2 anno 1959



Skematisk opbygning af et tre-akse neutron spektrometer og strålerør i DR3

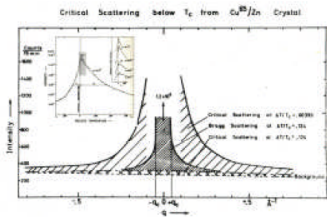


Nogle tidlige resultater fra DR3

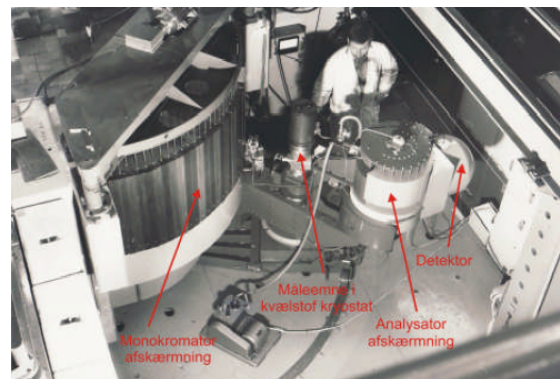


Den første magnon i et sjældent jordartsmetal blev målt på Risø [2].

Skaleringslove og kritisk spredning i beta messing [3].



Tre-akse spektrometer ved DR3 anno 1969



Reaktor- og spallationsbaserede anlæg har hver deres fordele. Forskningsreaktorer udsender en konstant strøm af neutroner, hvorfra en bestemt bølgelængde sædvanligvis udvælges ved Bragg diffraktion i en monokromator krystal. I Boks 4 nederst er vist en principskitse og et gammelt foto af et såkaldt tre-akse spektrometer. Analysator krystallen kan anvendes til at udvælge neutroner med samme energi som valgt af monokromatoren, dvs. til elastisk spredning (diffraktion) eller med en anden energi til uelastisk spredning. Fotoet til venstre i Boks 5 viser et moderne tre-akse spektrometer, RITA-2, som er udviklet på Risø, men overført til neutronkilden SINQ ved Paul Scherrer Institutet (PSI) i Svejs. Risø har også overført små-vinkel neutronspretnings instrumentet, SANS-2 (Boks 5 til højre). Da spallationkilderne er pulsede, kan man ved hjælp af komplicerede chopper- og detektor-systemer anvende tidsstrukturen til at bestemme hastighederne af de udsendte og spredte neutroner. På denne måde kan man udnytte mange af spallationskildernes neutroner og således opnå en høj intensitet og informationsmængde. Forskningsreaktorer har dog også fordele, specielt til forsøg der benytter lavenergetiske neutroner, som f.eks. SANS.

Da neutroner er neutrale kan de ikke detekteres direkte med elektronik. Sædvanligvis anvendes derfor detektorer, der er baseret på indfangning af neutroner i atomkerner, f.eks. ^3He , der efterfølgende udsender ladninger, som kan detekteres på normal vis (Geiger Müller detektor).

Danmarks internationale placering

Danmark har været centralt placeret i udvikling og anvendelse af neutronspretning indenfor fysik, kemi og materialeforskning gennem aktiviteter omkring Risø's forskningsreaktor DR3. Reaktoren blev oprindeligt indkøbt til studier af reaktorteknologi med henblik på udvikling af kernekraft. Selv om DR3 var en middelfluks reaktor med en termisk effekt på 10 MW (ILL reaktoren i Grenoble er på 58 MW) viste den sig hurtigt at være yderst konkurrencedygtig til neutronspretningsforsøg. Aktiviteterne startede kort tid efter Risø's oprettelse i slutningen af 1950'erne, da forskere på Risø under ledelse af den fremsynede kerneforsker Otto Kofoed-Hansen erkendte, at et guldåb, DR3 reaktoren, var landet i deres hænder. På det tidspunkt var dansk faststoffysik endnu i sin vorden, mens kernefysik var en

veletableret og livskraftig naturvidenskabelig aktivitet. Derfor blev et af de første eksperimenter, der udnyttede neutronstrålerne fra DR3 reaktoren, da også "Neutronlevetidsforsøget". Denne dristige satsning for at måle en fundamental fysisk konstant blev udført i samarbejde med amerikanske forskere. Eksperimentet strakte sig over mere end ti år og fastslog en neutron halveringstid på ca. 11 minutter [1, side 197].

Omtrent samtidigt begyndte en lille gruppe forskere og teknikere at bygge et én-akse instrument kaldet "krystalspektrometer" (se Boks 4), der skulle bruges til at måle materialers evne til at indfange neutroner. Første mål var at bestemme neutrontværsnittet for isotopen ^3He , der skulle bruges som tælle gas i detektoren til "Neutronlevetidsforsøget". Konstruktionen startede helt fra bunden, og alle komponenter var hjemmelavede. De første kvartalsrapporter fortæller, hvordan man omhyggeligt checkede præcision og reproducerbarhed af aksebevægelse og andet. Dette var begyndelsen til det, der senere blev et af kendetegnene for Risø's neutronspretningsforskning: konstruktion, videreudvikling og fornyelse af avanceret målrettet instrumentering.

1960'erne og 1970'erne var en blomstringstid for de faststoffysiske aktiviteter omkring DR3. Nye idéer til eksperimenter og instrumenter blev fostret og modnet i et livligt samspil mellem danske og udenlandske forskere. Et stort netværk af verdenskendte forskere kom ofte og gentagne gange til Risø og var gennem undervisning og inspiration med til at sætte dansk faststoffysik på verdenskortet. Den første "bibel" om teoretisk neutronspretning [4] blev således færdiggjort under et tre måneders gæstefold på Risø. Blandt de væsentligste forskningsresultater, der kan knyttes til pioneraktiviteterne ved DR3, skal her nævnes to (se [1, p. 470] og Boks 4). Det ene var detaljerede undersøgelser af spinbølger og magnetisk orden i sjældne jordartsmetaller. Disse har givet betydningsfuld viden om, hvorfor metaller og legeringer i magnetisk henseende opfører sig på så mange forskellige måder. Denne viden har dannet grundlaget for udviklingen af de stærkeste kendte permanente magneter, som indeholder den sjældne jordart neodymium i en legering med jern og bor. Det andet var banebrydende og meget præcise eksperimentelle studier af faseovergange og kritiske fænomener i faste stoffer. De udgør en væsentlig del af fundamentet for udviklingen af renormalisations gruppeteori og var med til at berede vejen for K. Wilsons Nobelpris i 1982. Disse to forskningsfelter blev nærmest synonyme med Risø's neutronspretningsaktiviteter langt op i 1980'erne.

En væsentlig årsag til den positive udvikling af de faststoffysiske aktiviteter omkring DR3 i de første år var naturligvis gode forskningsbudgetter, men succesen var også betinget af et målrettet samarbejde mellem eksperimentale fysikere, teoretikere og instrumentbygere, som udnyttede Risø's velfungerende infrastruktur til at opnå de bedst tænkelige resultater. Risø's pionerindsats markeredes f.eks. ved, at man som de

første forsynede neutronspretningsinstrumenter med individuelle computere (PDP-8, en 8 kbyte maskine) på et tidspunkt, hvor andre valgte centrale computere med de ulemper, som datidens hyppige computernedbrud medførte. Risø var også blandt de første, der optimerede neutronfluksen på måleemnet ved at installere fokuserende grafit monokromatorer på alle relevante instrumenter. Et år brugte man næsten hele budgettet til at gennemføre dette. Den kolde neutronkilde, der kom i drift i 1975 og blev fornyet i 1995, spillede også en vigtig rolle i arbejdet med at gøre DR3 konkurrencedygtig med højfluks reaktorerne på Brookhaven, Oak Ridge og Grenoble.

I slutningen af 1970'erne kom der fokus på brugen af synkrotronstråling til røntgenspretning. Disse nye kraftige røntgenkilder gav muligheder for at udforske ny fysik og bidrog til at udvikle en ny generation af instrumenter til både røntgen- og neutronspretning. Udviklingen af avanceret neutron instrumentering blev baseret dels på Risø's tekniske ekspertise, dels på metoder til at simulere hvorledes neutroner opfører sig i et spektrometer fra kilde til detektor. Simuleringsmetoden, som er udviklet på Risø i 1997, kaldes McStas og anvendes således til at gennemføre virtuelle eksperimenter. McStas er fortsat verdens førende på området og anvendes i stadig stigende grad til design af ny instrumentering og fortolkning af målte data.

I løbet af 1980'erne udviklede neutronspretningsaktiviteterne ved DR3 sig hovedsagelig som samarbejdsprojekter indenfor basal faststoffysik, men også områder indenfor materialeforskning, såsom undersøgelser af tekstur i metaller og in-situ studier af indre spændinger, blev perfektioneret. Aktiviteterne indenfor basal faststoffysik var centreret i Neutronhuset, som er placeret uden for reaktorhallen og blev forsynet med neutroner fra Risø's kolde neutronkilde gennem en neutronkanal med avanceret neutronoptik. Herved sikrede man en lav baggrund for spredningsforsøgene og øgede dermed mulighederne for at observere svage signaler. I reaktorhallen og Neutronhuset var installeret tre tre-aksesspektrometre, tre to-aksesspektrometre og SANS, som var aktive indtil den endelige nedlukning af DR3 den 28. september 2000. En af aktiviteterne i Neutronhuset var det finsk-tysk-danske samarbejdsprojekt om at bestemme den kernemagnetiske orden i kobber under 50 nano Kelvin. Det var et ambitiøst projekt, der involverede eksperter i at frembringe ultralave temperaturer samt dygtige neutronspredere og teoretiske fysikere. Det var samtidigt hårdt arbejde med mange timers forberedelse og korte perioder til dataindsamling, men eksperimentet blev en succes, og resultaterne er internationalt anerkendte. En anden aktivitet i Neutronhuset var et svensk-dansk samarbejdsprojekt, der resulterede i opbygningen af Risø's småvinkelspretnings instrument (SANS-2 i Boks 5), der i tidens løb har været brugt effektivt og innovativt med banebrydende resultater indenfor såvel neutron optik som forskningsfelter rækkende fra magnetisme og superledning til polymerer og biologi.

Boks 5: Nutid

RITA-2 spektrometret med 15 tesla magnet



SANS-2 instrumentet



De dansk byggede spektrometre ved SINQ neutronspallationskilden på PSI i Svejts. Nogle nye resultater fra disse spektrometre er beskrevet i de efterfølgende artikler

Nutid

Danmark har fastholdt kompetencen inden for neutronspredning, og aktiviteterne er udbredte både geografisk og emnemæssigt, som det fremgår af de efterfølgende specialartikler. I foreningen af danske neutronspredere, DANSSK, er der nu 145 registrerede medlemmer, hvoraf ca. 70 deltager i neutronspredningsforsøg ved en række udenlandske faciliteter. Som omtalt har Risø overført de to avancerede spektrometre, RITA-2 og SANS-2, til PSI og har på dette grundlag opnået en kontrakt om prioriteret adgang i op til 20 uger om året på hvert af disse instrumenter. Denne enestående mulighed er åben for alle danske neutronspredere. Da Forskningsrådet for Natur og Univers dækker rejse og opholdsudgifter gennem instrumentcentret DANSCATT har danske neutronspredere fortsat gode muligheder for at anvende denne betydningsfulde teknik til deres forskning.

I de seneste årtier er en række ældre neutronbaserede anlæg blevet nedlagt, men nye er også undervejs eller sat i funktion. Som omtalt i Boks 3 er ILL i Grenoble den mest intense reaktorbaserede neutronkilde. En ny højfluks forskningsreaktor, FRM-II, er for nylig opstartet på Münchens Tekniske Universitet i Tyskland. Den termiske fluks af neutroner fra FRM-II er omkring halvdelen af ILL's, den kolde fluks lidt bedre, men da mange instrumenter og neutronoptikken er nyere, er der adskillige steder mere fluks for brugerne. Australien (ANSTO) og Kina (CARR) bidrager også med nye reaktor baserede neutronkilder. Verdens kraftigste spallationskilde er indtil videre ISIS i England, men næste generation spallationskilder: Spallation Neutron Source (SNS) ved Oak Ridge i USA og JPARC nær Tokyo i Japan er under indkøring og vil give en afgørende forøgelse af fluksen ved en faktor 5-10 i forhold til ISIS. SNS laver allerede nu eksperimenter med reduceret effekt og lav frekvens og ventes at modtage brugere i løbet af efteråret 2008. Her deltager Kemisk Institut ved Aarhus Universitet i opbygningen af et diffraktometer.

JPARC planlægger at starte eksperimenter i 2009-2010.

I Europa er der gennemført et omfattende udredningsarbejde med henblik på at etablere verdens mest intense spallationskilde, European Spallation Source (ESS), som er baseret på lange pulser og effektivt vil være en størrelsesorden bedre end SNS. Det tekniske udredningsarbejde, som blev afsluttet i 2003, har været ledet af Kurt Clausen fra Danmark. Beslutningen om at bygge ESS er endnu ikke taget, men der er en hastig udvikling. ESS er prioriteret af EU's forum for forskningsinfrastruktur, ESFRI, og der er stærke initiativer i Spanien, Ungarn og Sverige, som sigter mod at opføre ESS. I Sverige arbejdes mod en placering i Lund. Den svenske regering har netop bevilget 3,4 milliarder svenske kroner til projektet, som forventes at koste ca. det tredobbelte. Opførelsen af ESS vil skabe helt nye muligheder for neutronspredning til materialeforskning. Fra en dansk synsvinkel vil en placering i Lund selvfølgelig være mest attraktiv, men det vigtigste er, at ESS bliver bygget.

Litteratur

- [1] Til samfundets tarv – Forskningscenter Risø's Historie. H. Nielsen, red., K. Nielsen, F. Petersen, H.S. Jensen. Risø 1998. ISBN 87-550-2380-0.
- [2] H. Bjerrum Møller, P.A. Mogensen (Lindgård), J.C. Gylden Houmann og A. Kowalska, Symposium on Inelastic Scattering of Neutrons by Condensed Systems BNL940 (C-45) 1965; H. Bjerrum Møller, J.C. Gylden Houmann og A.R. Mackintosh, *Phys. Rev. Lett.* **19**, 312 (1967).
- [3] J. Als-Nielsen, *Phys. Rev.* **185**, 664 (1969). *Risø Report No. 196*, Dr. Phil. afhandling, 81 pp.
- [4] W. Marshall og S. W. Lovesey, *Theory of Thermal Neutron Scattering*. Oxford at the Clarendon Press (1971), 599 pp.

Forfatterne til denne indledningsartikel er præsenteret under specialartiklerne.