

Hvis man skal forstå forskellen på en glas og en væske er det ikke nok at vide, hvordan atomerne sidder placeret, man skal også vide hvordan de bevæger sig. Det kræver, at man kan studere glas og væske på den rigtige længdeskala og på den rigtige tidsskala. En teknik kaldet uelastisk neutronspreddning er helt unik til det formål.

# Et tidsmikroskop

## - oplev verden på et nanosekund

Når man kigger på verden, opdager man noget forskelligt alt efter, hvilken længdeskala man ser på. Valget af længdeskala er derfor helt fundamentalt i ethvert naturvidenskabeligt studie, og det sætter rammerne for, hvad vi kan undersøge. I praksis vælges længdeskalaen for et studie ofte, når man vælger, hvilken måleteknik man vil bruge. Fx kan en lineal måle noget, der er nogle centimeter langt, mens den egner sig dårligt til at måle afstande på mange kilometer eller få mikrometer. En fuldstændig beskrivelse af et system kræver typisk, at systemet studeres på mange længdeskalaer, og derfor må man bruge forskellige metoder. Et elektronmikroskop kan ikke fortælle noget om, hvor stort arealet af Amazonas er, og satellitfotoer kan ikke fortælle noget om, hvordan planternes grønkorn er opbygget.

Tid spiller en tilsvarende rolle: Man ser noget forskelligt alt efter, hvilken tidsskala man studerer et fænomen på. Den simpleste måde at ændre tidsskala er ved at vise film i forskellige hastigheder. Hvis man vil se, om der er offside i fodbold, bruger man slowmotion, men hvis man vil se en plante vokse, må man i stedet lave et time-lapse, hvor en måneds film vises i løbet af et par minutter.

### Længder og tid i materialeforskningen

Hvis vi indskrænker os til materialeforskning er der stadig mange længdeskalaer på spil. Der er fx kemiske bindinger på Ångstrømskalaen (0,000000001 m eller 0,1 nanometer (nm)). Der er krystalitter og biologiske celler, som er mikrometer store. Og der er lufthuller, revner eller andre uregelmæssigheder på millimeterskalaen. Hvis hårdheden, holdbarhe-

den og elasticiteten af eksempelvis træ, asfalt eller en kage skal beskrives og forstås fuldstændigt, er man derfor nødt til at dække skalaer fra 0,1 nm til 1 cm, og det kræver mange forskellige måleteknikker.

Når det, der skal måles, ikke er en struktur, men en bevægelse eller en ændring i strukturen, skal der bruges nogle andre redskaber. De fleste metoder til at måle ændringer går essentielt ud på, at man måler den samme størrelse med et bestemt tidsinterval. Man laver altså en slags film af det, der foregår.

I ethvert givent studie skal man altså bruge både den rigtige tidsskala og den rigtige længdeskala. For fx at undersøge, om arealet af Amazonas vokser eller bliver mindre, skal man studere på en længdeskala i omegnen af 100 kilometer og på en tidsskala, der er omkring et par år. Man får ikke svaret ved at filme ét enkelt træ i fem år for at se, om det bliver fældet eller ej – her er tidsskalaen rigtig, men længdeskalaen forkert, for selvom dette ene træ stadig står der, kan resten af skoven jo være forsvundet. Det hjælper heller ikke at lave en satellitfotofilm af en times varighed – så er længdeskalaen rigtig, men tidsskalaen forkert. Det rigtige valg er at lave en satellitfotofilm, hvor der bliver taget et billede hver måned i løbet af nogle år. Det virker måske simpelt nok at vælge længde- og tidsskala i dette eksempel, men hvis man forsker i endnu ukendte fænomener, kan man let komme til at kigge det helt forkerte "sted" på tids- eller længdeskalaen.

Der er ikke en én-til-én-sammenhæng mellem, hvad der er den relevante tidsskala og længdeskala,

#### Forfatterne



Kristine Niss, lektor  
kniss@ruc.dk



Henriette Wase Hansen,  
ph.d.-studerende  
hwase@ruc.dk

Begge ved forskningscentret Glas og Tid, NSM, RUC



## Længde- og tidsskalaer

For at studere et givet fænomen skal man studere verden ved en bestemt længdeskala og en bestemt tidsskala. Det er illustreret i diagrammet med længde på x-aksen og tid på y-aksen (bemærk, at skalaen er logaritmisk).

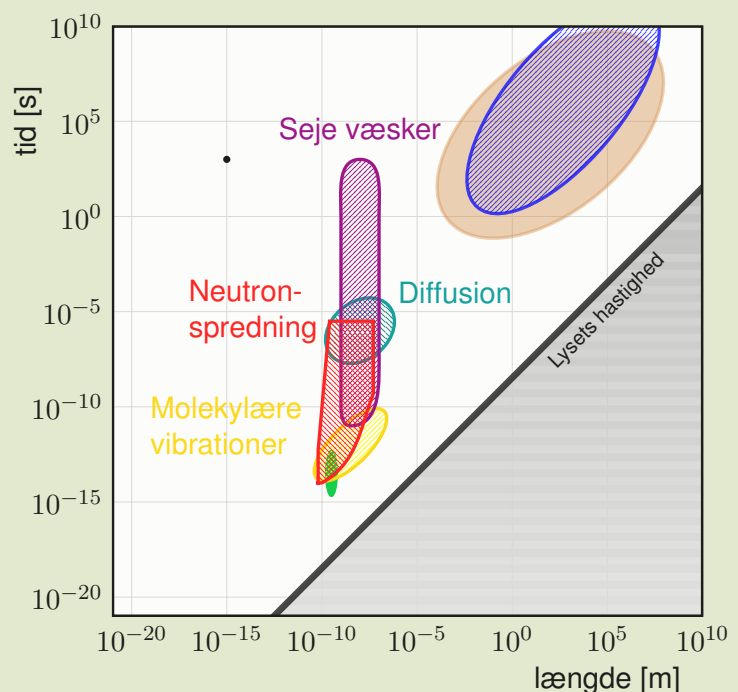
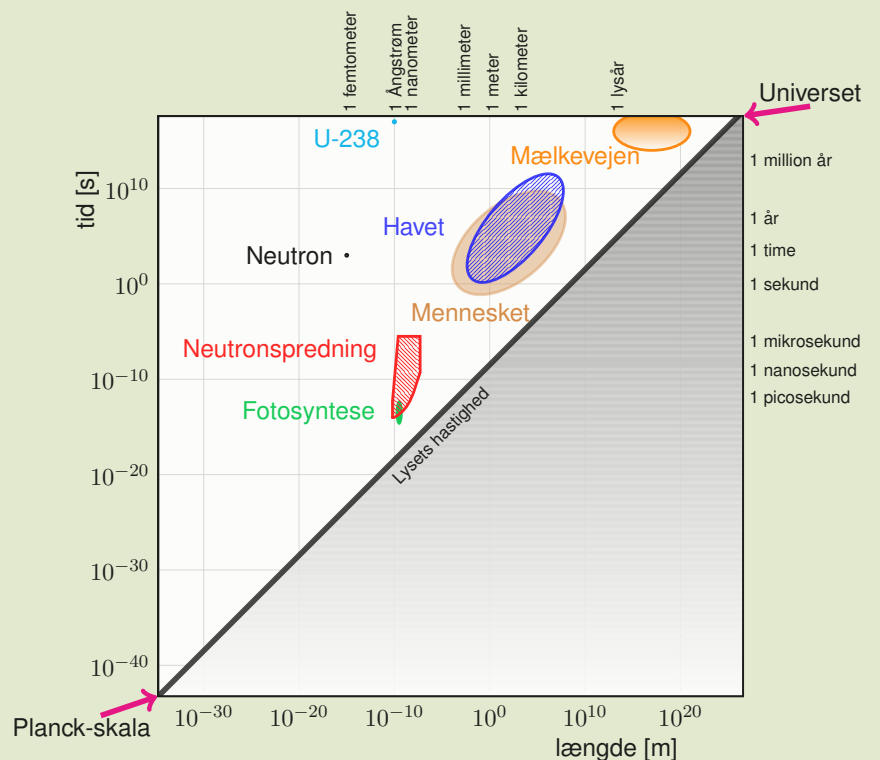
Figurens øverste højre hjørne er den længste tid, man kender, og det største man ved noget om: universets alder og det synlige univers' størrelse. I det nederste venstre hjørne ses det mindste, kvantemekanikken tillader: Planck-længden og Planck-tiden. Man ved ikke meget om, hvad der findes på disse ultramikroskopiske skalaer.

Lysets hastighed, som benævnes  $c$ , bliver til en ret linje med hældning én i denne figur. Den nederste højre halvdel af figuren er et "forbudt område", fordi intet kan bevæge sig hurtigere end lysets hastighed.

For de fleste ting er det lidt en smagssag, hvor man præcis vil placere dem på figuren. Vi har fx valgt, at menneskets længste tid er 100 år, mens den korteste er 0,01 sekund, som er den korteste tid, vi kan sanse uden teknisk hjælp. På figuren ses, at mennesket og havet "lever" på ca. samme tids- og længdeskala, mens mælkevejen er meget langsommere og større, og fotosyntesen er meget mindre og hurtigere. Som eksempler på meget små ting, der ændrer sig meget langsomt, har vi indtegnet uran-isotopen 238, et atom, som har en meget lang halveringstid, der er næsten lige så lang som universets alder. Den frie neutron er også indtegnet; den henfalder i løbet af ca. et kvarter.

Neutronspreddning kan "se" ting, der i længde og tid ligger inden for det røde område. I den nederste version af figuren har vi zoomet ind på dette område. Vi har samtidig indtegnet nogle af de forskellige atomare og molekylære processer. Som man kan se, er der et kæmpe overlap, mellem det neutroner "ser", og det område, som er vigtigt for at forstå atomer og molekylers strukturer og bevægelser. Derfor er neutronspreddning en meget vigtig teknik.

Det lille område illustrerer bevægelser i glasdannende væsker. Bevægelserne strækker sig over et stort område på tidsskalaen, mens det ikke fylder ret meget på længdeaksen. Denne udstrækning over tid kombineret med en snæver længdeskala er en af grundene til, at glasdannende væsker er et udfordrende og spændende grundvidenskabeligt forskningsområde. Vi mangler en fundamental forståelse af, hvorfor molekylerne bliver så langsomme, uden det involverer strukturer over store længder.

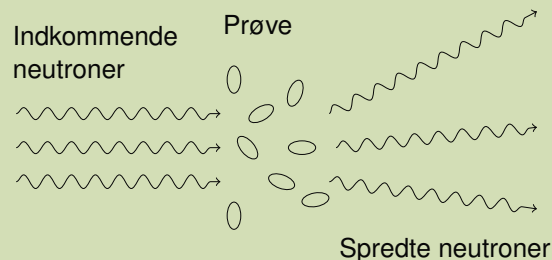


## Uelastisk neutronspreddning

I neutronspreddningseksperimenter sender man en stråle af neutroner ind på en prøve, fx en væske. Neutronerne støder sammen med atomkernerne i prøven. Stødet kan enten være elastisk eller uelastisk. Hvis stødet er elastisk, og der ikke bliver overført energi, kan man få information om, hvor atomerne er: strukturel information. Hvis stødet er uelastisk, og der er overførsel af energi, kan man få information om atomernes bevægelser: dynamikken.

Ved uelastisk neutronspreddning kan man sige, at man sætter atomerne i prøven i bevægelse. Man kan sætte gang i forskellige bevægelser ved at vælge forskellige bølgelængder af neutronerne, fordi bølgelængden og energien hænger sammen. Ved at vælge forskellige bølgelængder eller energier kan man både lære noget om små bevægelser, der kun kræver lidt energi at sætte i gang, og større bevægelser, der kræver meget energi at sætte i gang.

En neutrons bølgelængde er typisk i størrelsesordenen 1 Ångstrøm. Det svarer til en energi på ca. 1 kJ/mol. I neutronspreddning bliver energien ved hjælp af Plancks konstant målt i frekvens, altså pr. sekund. Det betyder, at ligesom der



er en særlig længdeskala, vi kan bruge neutronerne til at studere, er der en særlig tidsskala, som vi kan bruge neutronerne til at se. Den tidsskala hænger sammen med energien og bølgelængden på neutronen. En energi på 1 kJ/mol svarer til, at neutronerne kan se atomerne bevæge sig med en frekvens i terahertz (tusind milliarder bevægelser pr. sekund). Eller sagt på en anden måde: Neutronerne kan se atomernes bevægelser, som kun tager tusind milliardtedele af et sekund.

men ofte er det sådan, at ændringerne i store ting er langsomme, mens ændringerne i små ting er hurtige.

### Uelastisk neutronspreddning – et tidsmikroskop

Når man ser på ændringer af strukturer i materialer, kan man også i nogen grad bruge teknikken med at filme, men hvis man virkelig vil studere de fundamentale bevægelser af atomer og molekyler er filmemetoden ofte ubrugelig, fordi det ikke er muligt at tage billeder eller måle hurtigt nok. Med neutronspreddning kan vi se tider, der er meget korte. Det er det, vi mener med titlen “Tidsmikroskop”. Neutronerne zoomer så at sige tidsligt ind på verden og viser noget, der foregår så hurtigt, at det aldrig ville kunne registreres med vores sanser. Vores sanser gør, at vi kan registrere ting ned til en hundrededel af et sekund. Med neutroner kan vi imidlertid studere bevægelser, der sker helt ned til en tusindedel af en milliardtedel af et sekund, som også hedder et picosekund ( $10^{-12}$ ). Det er ufatteligt kort tid.

Neutronspreddning giver både tidslig og stedslig information, men ligesom andre teknikker kan neutronspreddning kun sige noget om ting på en

bestemt skala i både tid og sted. Det fantastiske er, at det område, der kan undersøges med neutronspreddning, har kæmpe overlap med det område, som er væsentligt for at forstå atomer og molekylers strukturer og bevægelse i materialer, flydende stoffer, biologiske systemer osv.

### Seje væsker og glas

Vores forskning handler om glas og glassdannende væsker. Med “glas” mener vi noget meget mere generelt, end man gør i daglig tale. På fysikersprog er glas alle mulige faste stoffer, der ikke er krystallinske. Man siger nogle gange, at glas er en slags væske. Det er både lidt rigtigt og helt forkert. Hvis man kigger på atomernes placering i stoffet, så ligner glas præcis en væske. Atomerne ligger huller til bulter i modsætning til i normale krystallinske, faste stoffer, hvor atomerne sidder i et fint gitter. Forskellen på en glas og en væske ligger ene og alene i, hvordan atomerne bevæger sig i forhold til hinanden. I en væske fiser de rundt på må og få, mens de i en glas sidder fast og vibrerer lidt.

Glas dannes ved at køle en væske ned til en bestemt temperatur, som afhænger af det konkrete materiale. Lige over denne temperatur er væsken meget sej.

Det vil sige, den flyder som en væske, men det går virkelig langsomt. Når stoffet er i denne tilstand – altså den seje væske – sker der noget interessant med dynamikken. Den spreder sig ud som en slags vifte, og der foregår bevægelser på rigtig mange tidsskalaer. Det helt særlige er, at de relevante længdeskalaer ikke strækker sig over et ret stort spænd. De mindste længder er ca. 1 nm, altså størrelsen af et lille molekyle. Den længste relevante længdeskala er 100 nm, og hvis man opbevarer væsken i en æske, der er 100 nm x 100 nm x 100 nm, vil den opføre sig præcis, som hvis man havde den i en mælkekarton. På den måde spiller længdeskalaen en mindre rolle. På den tidslige akse strækker dynamikken sig samtidig enormt meget ud. Der sker vibrationer med en svingningstid på blot nogle få picosekunder, mens atomernes placering i forhold til hinanden, den mikroskopiske struktur, ændres i løbet af flere timer. Det er de langsomme strukturelle ændringer, som fører til, at væsken kan flyde, omend sejt og langsomt.

### Hurtige bevægelser styrer de langsomme

Vores og andres forskning viser meget overraskende, at de hurtige og langsomme bevægelser hænger sammen. Vi har målt molekyllernes hurtige (pico-til nanosekund) bevægelser med neutronspreddning ved forskellige temperaturer og tryk. Bagefter

har vi målt de langsomme strukturelle ændringer ved de samme temperaturer og tryk, og det viser sig, at de hurtige bevægelser tilsyneladende har helt afgørende betydning for, hvordan væsken flyder i løbet af den næste time. De langsomme strukturelle ændringer, som fører til, at væsken flyder, er tusind milliarder gange langsommere end de hurtige bevægelser målt med neutronspreddning. Det svarer altså til, at det, der sker i løbet af et minut, er styrende for, hvad der sker de næste par millioner år. Umiddelbart lyder det helt urimeligt, men vi tror, at det skyldes, at de langsomme ændringer ikke er kontinuerte. Der sker altså ikke hele tiden noget meget langsomt, i stedet er det sjældne, små hurtige ændringer, som styrer selv de meget langsomme ændringer.

Der er stadig mange ting, vi ikke forstår omkring de seje væsker og glas, og der ligger meget forskning forude. Forskningen handler både om de dybe grundlæggende spørgsmål, og om hvordan glasformen kan give nye muligheder i alt fra medicinalindustri til vejbelægning. Det meste af det, der skal undersøges, er knyttet til bevægelser og ændringer i væsken, og noget tyder altså på, at særligt de hurtige ændringer er meget vigtige. Derfor er uelastisk neutronspreddning en helt central teknik i vores arbejde. ■

### Videre læsning

Glas – den fjerde tilstandsform. Aktuell Naturvidenskab nr. 2/2006. f

Blogindlæg v. Kristine Niss om hvorfor glasformen er vigtig for medicinalindustrien: [hvidenskab.dk/blog/glas-fysik-og-fremtidens-medicin](http://hvidenskab.dk/blog/glas-fysik-og-fremtidens-medicin)

Artikel om hvordan glasforskning har betydning for udvikling af bedre asfalt der kan reducere CO<sub>2</sub>-udledningen: [videnskab.dk/kultursamfund/bedre-asfalt-skal-reducere-co2-udledningen](http://videnskab.dk/kultursamfund/bedre-asfalt-skal-reducere-co2-udledningen)

Link til virkelig fin animation af længdeskalaer af Cary og Michael Huang, "The Scale of the Universe": [htwins.net/scale2](http://htwins.net/scale2)

---

### Annonce: