Supercomputere og Astrofysik

Åke Nordlund Astronomisk Observatorium, NBI, Københavns Universitet

Fysikkens paradigmer

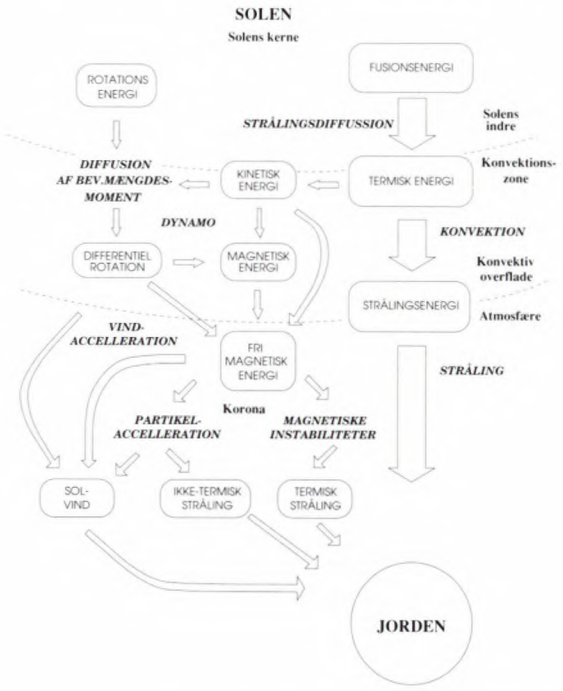
Det er vigtigt at være klar over, at fysikkens *paradigmer* (forklaringsmodeller; for tiden populære "kæpheste") hænger nøje sammen med hvad for nogen værktøjer der til enhver tid står fysikken til rådighed. Værktøjerne bestemmer hvilken slags forklaringsmodeller man kan opstille og faktisk teste; afprøvning af en model forudsætter jo at den er "beregningsbar". Den Newtonske mekanik, f.eks., blev muliggjort med udviklingen af differentialanalysen, og den oprindelige udvikling af feltteori og kvantemekanik var tæt knyttet til matematikkens udvikling i slutningen af 1800-tallet og begyndelsen af 1900-tallet. Idag påvirkes udviklingen indenfor f.eks. kaosteori, fluid mekanik, og astrofysik kraftigt af udviklingen indenfor computerteknologi og dertil hørende numeriske metoder. Meget af fremtidens udvikling indenfor fysik kan forventes at hænge sammen med den videre udvikling af bl.a. massivt parallelle supercomputere, som vil gøre det muligt at angribe problemer der endnu ligger udenfor grænsen for det praktisk håndterbare (i USA ofte benævnt "Grand Challenges").

I nogle tilfælde kan supercomputere bruges til direkte at finde svar på komplicerede problemer, f.eks. beregning af numeriske løsninger på komplicerede ligningssystemer, hvor løsningen er et direkte svar på et relevant fysisk spørgsmål. Oftere bruges supercomputere imidlertid på en måde som minder om laboratorieeksperimenter, eller om observationer af komplicerede fysiske systemer. På basis af kendte fysiske principper kan man konstruere numeriske modeller af komplicerede fysiske systemer. Numeriske eksperimenter ("simulationer") udført med sådanne modeller kan bruges på samme måde som laboratorieeksperimenter, nemlig som idégrundlag for en kvalitativ forståelse af det fysiske system, og til afprøvning af teorier opstillet på basis af en sådan forståelse.

En væsentlig årsag til at supercomputersimuleringer har vist sig så frugtbare, er at realistiske fysiske systemer som regel *er* meget komplicerede, i den forstand at de opviser en kaotisk opførsel. Dette forbavser måske den "klassiske" fysiker mere end almindelige mennesker. Hverdagen er fuld af kaotiske fænomener som vejr og vind, strømmende vand, eller det politisk / økonomiske system. Kun få systemer opviser den enkelhed og regelmæssighed, som karakteriserer den traditionelle fysik.

Computersimuleringer og Astrofysik

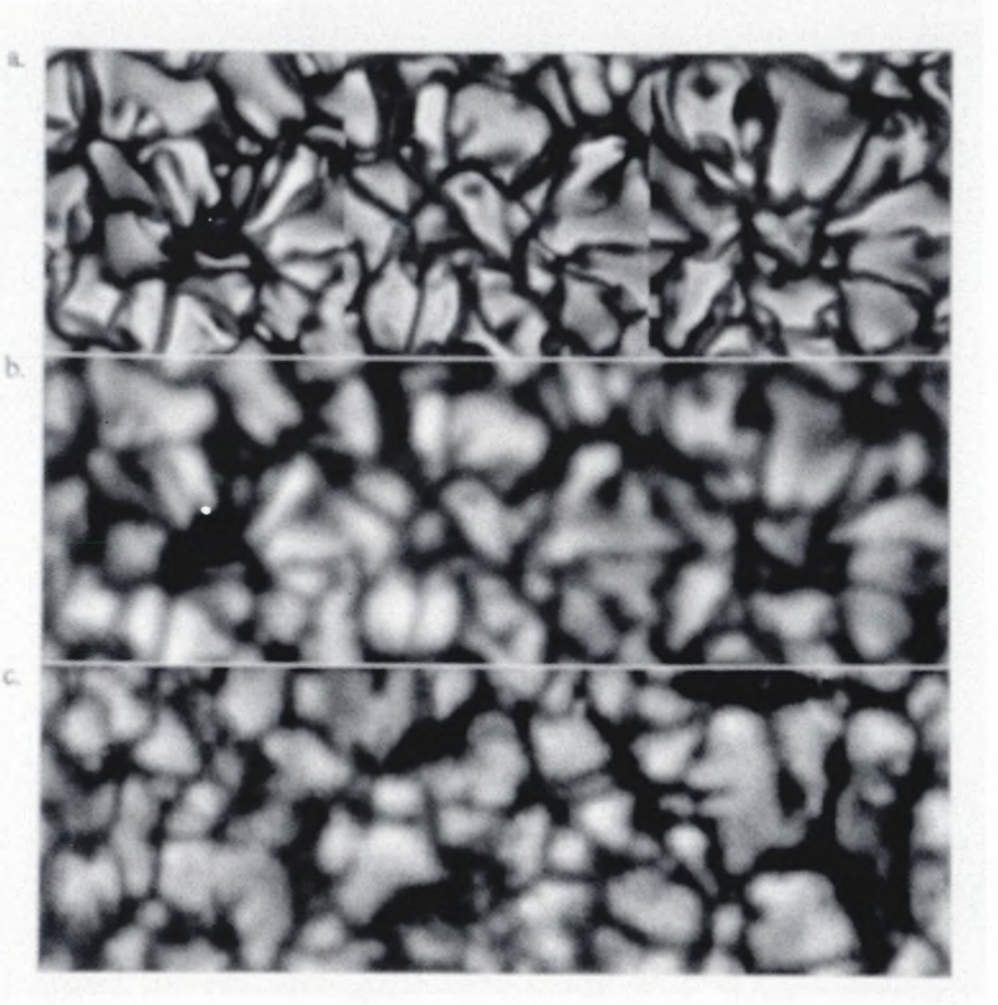
Også indenfor astrofysikken er virkeligheden ofte langt mere kompliceret end der kan tages højde for med enkle, analytiske modeller. Detaljerede observationer af astrofysiske systemer fra jordens nærmeste omgivelse (magnetosfæren), til stjerner (som f.eks. solen), det interstellare rum, og galakser og galaksekerner, viser komplicerede strukturer i rum og tid.



Figur 1. Blokdiagram, der viser sammenhængen mellem energiformer (blok), omdannelsesprocesser og energitransport (kursivt) mellem solens forskellige lag (fed skrift). Diagrammet er skematisk, og viser f.eks. ikke realistiske forhold mellem de forskellige energiformer.

Væsentlige årsager hertil er, at den gas som de fleste astrofysiske systemer er opbygget af, er elektrisk ledende og desuden meget turbulent; d.v.s., at udglattende processer først kan gøre sig gældende på en meget lille skala. En konsekvens af at gassen er elektrisk ledende er, at der der spontant kan dannes magnetfelter. Gassens tilstand karakteriseres derfor ikke kun af hastighed, tæthed og temperatur, men også af magnetiske og elektriske felter. Muligheden for at udføre numeriske simuleringer er afgørende for vores forståelse af sådanne systemer. De numeriske resultater erstatter her de manglende muligheder for detaljerede observationer; vi kan ikke "kikke ind" i en stjernes indre, og vi lever ikke længe nok til at studere en galakses dynamiske udvikling.

Hvordan ville det være at prøve på at forstå Jordens vejrsystem, alene udfra oplysninger om jordens tyngdekraft og rotation, middeltemperatur, lufttryk ved overfladen, og luftens omtrentlige sammensætning? Med



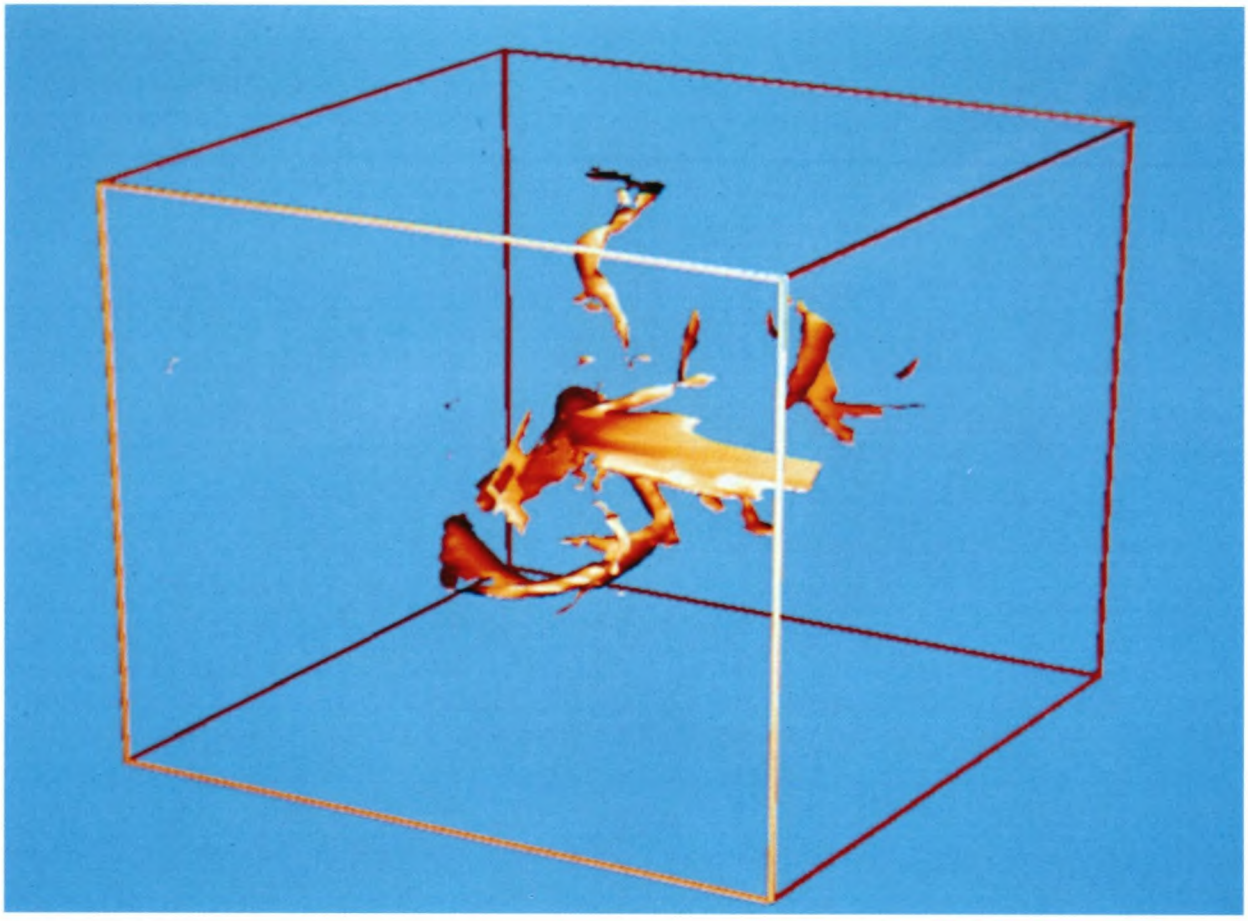
Figur 2. En sammenligning af syntetiske billeder fra en supercomputersimulering med et billede af solens overflade fra det svenske solobservatorium på La Palma. **a.** Tre syntetiske billeder fra en 3D simulering med opløsning $125 \times 125 \times 105$ er lagt ved siden af hinanden, for at danne et billede svarende til et område af størrelse 18.000×6.000 km. De syntetiske billeder viser lysintensitet på modellens overflade ved en bølgelængde af 6300 Ångstrøm. **b.** viser de samme tre syntetiske billeder, med udglattende effekter svarende til teleskopets størrelse og lufturo i jordens atmosfære. Herved udglattes også overgangen mellem de tre delbilleder, som herefter kan sammenlignes med det observerede billede (**c**).

udgangspunkt i disse ting kan man kun komme frem til nogle ganske generelle slutninger om jordens atmosfære; dens trykskalahøjde, omtrentlige temperaturfordeling, og (hvis man var i besiddelse af et skarpt intellekt og tilstrækkelig tid), noget om den overordnede luftcirkulation.

Med udgangspunkt i detaljerede vejr- og klimaobservationer har man en langt bedre chance for at forstå jordens vejrsystem og klima. Med "observationer" af strukturer og udviklingsforløb fra detaljerede computersimuleringer har man ligeledes en langt bedre chance for at forstå komplicerede astrofysiske plasmafænomener. Og ligesom vejrkort og animeringer af satellitobservationer hjælper gevaldigt når vejret skal forklares, så er billeder og videoanimeringer fra supercomputersimuleringer en stor hjælp, når astrofysiske plasmafænomener skal forklares for ikke-eksperter.

Med computersimuleringer kan man skabe et syntetisk observations- og illustrationsmateriale, der faktisk ofte har større præcision og detaljerigdom end man normalt kan regne med fra observationer. Begrænsningen ligger i den *faktiske* detaljerigdom, som er langt større i virkeligheden, selv om mulighederne for at registrere disse detaljer kan begrænse *observationernes* detaljerigdom. Computersimuleringer kan observeres "eksakt", og på måder som ofte savner sidestykke indenfor f.eks. laboratorieeksperimenter eller astronomiske observationer.

Det afgørende for om computersimuleringen kan bruges til at forstå et fænomen er, om den numeriske detaljerigdom er stor nok til, at simuleringen indeholder kvalitativt rigtige strukturer og forløb. Virkelighedens strukturer har langt flere detaljer, men for både virkeligheden og simuleringen gælder, at de små detaljer alligevel ikke er de samme i forskellige observationsserier. Lav-



Figur 3. En visualisering af magnetfeltet i en simulering af dynamoeffekt i en konvektionszone med rotation. Billedet viser den del af rummet, hvor magnetfeltet er større end 50% af dets maksimumsværdi.

og høj-tryk, varm- og kold-fronter, jetstrømme og andre fænomener forekommer på ethvert vejrkort, men aldrig i eksakt det samme mønster. Computersimuleringer fungerer i denne sammenhæng ligesom observationsserier fra virkeligheden; ingen simulering ligner en anden i de små detaljer, men de samme kvalitative fænomener kommer igen i næsten ethvert eksperiment.

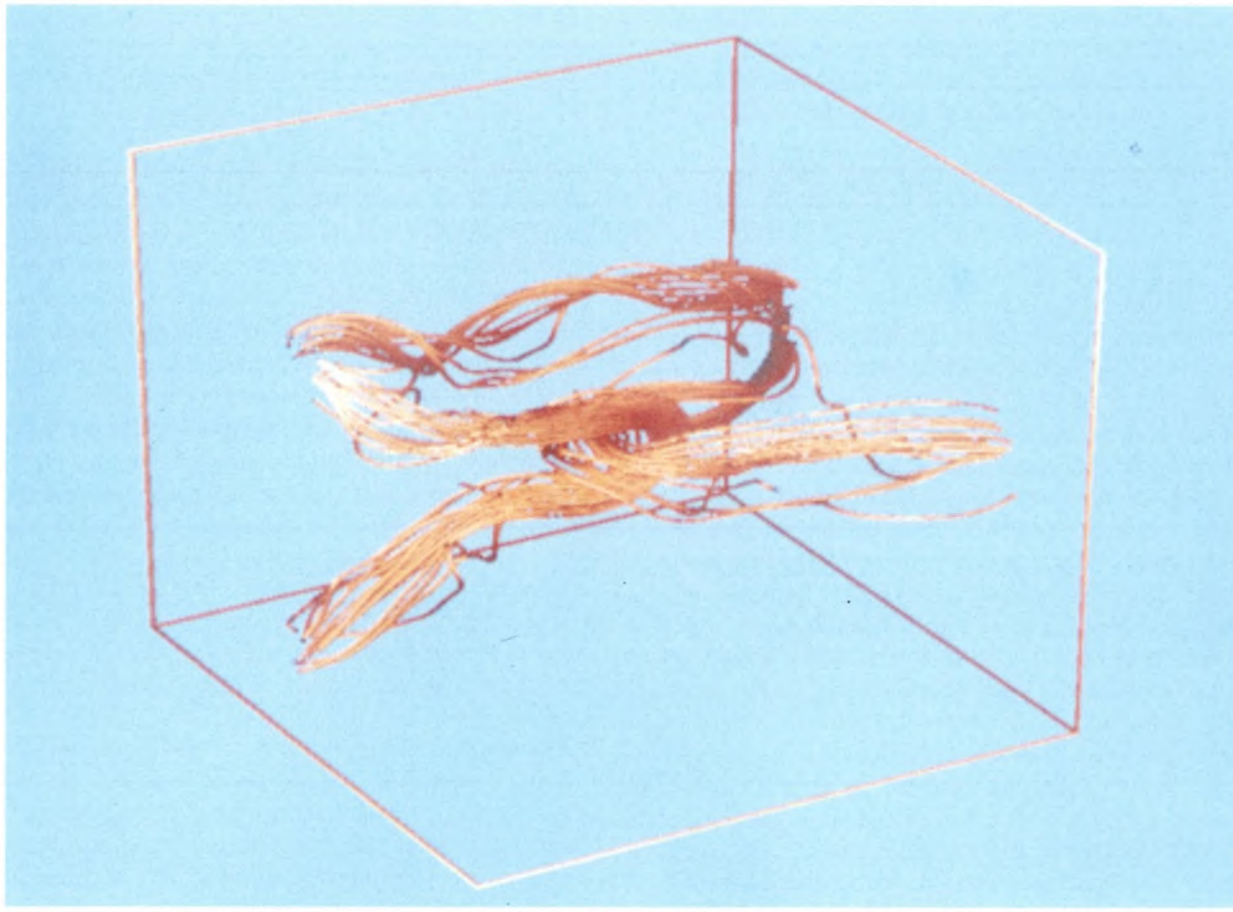
Solen som astrofysisk plasmalaboratorium

Af flere årsager er solen et højst interessant objekt for studier af astrofysiske plasmafænomener. Dens afstand er lille nok til, at vi kan se detaljer på dens overflade. Disse detaljer er af en passende størrelse, sådan at de karakteristiske tidsskalaer er sekunder, minutter, timer, dage, eller måneder. Gastætheden er høj nok til (i hvert fald under overfladen og tæt ved overfladen), at man kan bruge en *kontinuumsmodel*; det er ikke nødvendigt at arbejde med en partikelbeskrivelse af gassen. Der forekommer et væld af interessante plasmafænomener; de fleste betinget af forekomsten af en zone med turbulent konvektion (varmestrømning) og et kompliceret magnetfelt. Nogle af disse fænomener har desuden en mærkbar, til tider endog dramatisk, indflydelse på jordiske forhold.

Indirekte evidens viser, at andre stjerner er ligeså komplicerede. De fleste andre astrofysiske systemer karakteriseres også af turbulens og magnetfelter. Her er vores muligheder for observation af detaljer i rum og tid dog ikke nær så gode, og solen indtager derfor en særstilling som "prototype"; et astrofysisk plasmalaboratorium med stadigt pågående, spontane eksperimenter.

Figur 1 viser i et blokdiagram nogle af de vigtigste fænomener på energiens vej fra solens indre ud til solens overflade, og videre ud i rummet, hvor jorden påvirkes af de forskellige former for energi som solen udsender.

Energien dannes ved termonukleare processer i solens kerne, og siver ved strålingsdiffusion langsomt ud mod solens *konvektionszone*, der omfatter de yderste 30% af solens radius. Her foregår varmetransporten ved materialebevægelse; varm gas stiger, i løbet af nogle uger, op til solens overflade, hvor den afkøles og atter synker ned mod konvektionszonens bund. Kombinationen af den turbulens, som dannes i konvektionszonen, og solens rotation (et levn fra solens fødsel udfra en roterende skive af gas) danner forudsætninger for en *dynamo proces*, hvor der spontant dannes et magnetfelt. Det måske mest kendte tegn på tilstedeværelsen af et magnetfelt er *solpletterne*,



Figur 4. En visualisering af udvalgte feltlinier fra en simulering (opløsning 88^3) af et plasma med feltlinier forankrede i væggene til højre og venstre i billedet. Feltet er periodisk i de andre to retninger.

relativt små mørke områder hvor magnetfeltet er stærkt nok til at undertrykke den normale energitransport, og som derfor er mørkere (koldere). Andre observationer (f.eks. i røntgenområdet) viser, at der er magnetfelter tilstede over hele solen, og at magnetfeltets fortegn og intensitet forandres med en periode på ca. 22 år. Under solens overflade er den magnetiske energi lille i forhold til gassens energi, men ovenover solens overflade dominerer den magnetiske energi. Magnetfeltet deformeres hele tiden af de materielle bevægelser, som derved overfører mekanisk energi til magnetisk energi.

I dette system kan ligevægt kun opretholdes hvis magnetisk energi atter transformeres til kinetisk og/eller termisk energi. Dette sker i form af en fordeling af magnetiske udladninger; nogle få og sjældne med meget høj energi, andre og langt flere med lav energi og på en lille skala. Det viser sig empirisk, at fordelingen af magnetisk energiudladning følger en enkel (potens-) lov. En konsekvens af disse udladninger er, at nogle af de ladede partikler accellereres til meget høje energier. En del af af de accellererede partikler bremses og energien omdannes til røntgenstråling, hvorimod andre når ud i solvinden, hvor endnu en lille del rammer jordens magnetosfære. "Solvinden" består af en meget tynd gas med meget høj hastighed (op til flere hundrede kilometer per sekund). Gassen accelereres dels af den stærke varme (nogle millioner grader) i solens korona, dels direkte af magnetisk-hydrodynamiske processer. Solvinden rammer jordens *magnetosfære*, et område, som domineres af jordens magnetfelt, og som danner en beskyttende "kokon" om Jorden. I polarområdet er denne kokon åben, og grænselaget mellem solvinden og magnetosfæren kobler direkte ned til jordatmosfærens øvre lag (ionosfæren), hvilket bl.a. fører til dannelsen af nordlys.

Variationer i det magnetiske aktivitetsniveau på solen fører til forandringer i balancen mellem solvinden og magnetosfæren. Kraftige udbrud på solen fører til *magnetiske storme* i jordens magnetosfære, som kan have ret dramatiske effekter. I 1989 var der en kraftig magnetisk storm, under hvilken nordlys kunne ses helt ned til 40. breddegrad. Den medførte voldsomme forstyrrelser i radiokommunikation, og magnetisk induktion i kraftledninger, som bl.a. medførte strømsvigt for 6 millioner canadiere i 9 timer. Til trods for at kun en meget lille del af solens stråling udsendes som andet end varme, kan man altså på jorden registrere tydelige spor af solens magnetiske

aktivitet. Der er også en endnu ikke forstået forbindelse til jordens klima, hvor visse indikatorer tydeligt viser den ovennævnte 22 års periode. Man har i Australien fundet gamle sedimenter, som viser at solen har haft en lignende opførsel, med stort set samme periode i meget lang tid.

Den slags potenslove, som altså bl.a. karakteriserer energiudladninger i solens magnetfelt, har vist sig at være typiske for mange kaotiske fænomener i naturen. Fordelingen af jordskælvs størrelse, fordelingen af skred i de små sandbunker man leger med i laboratorier for at lære noget om kaos, ja sågar visse af det økonomiske markeds indikatorer viser sig at følge sådanne potenslove. Vi taler her om fordelinger over tid, men det viser sig også, at f.eks. fordelingen af magnetfelt over solens overflade følger lignende love, og at dette tyder på at magnetfeltet er *fraktalt*; d.v.s., at de samme slags magnetfeltsmønstre går igen på skalaer fra de største, til de mindste. Denne fraktale fordeling skyldes sandsynligvis, at magnetfeltet hele tiden deformeres af den turbulente kon- vektion i solens konvektionszone. Ved hjælp af supercomputersimuleringer forstår man nu kvalitativt de faktorer, som kontrollerer denne turbulente konvektion (Stein & Nordlund 1989; Spruit, Nordlund & Title 1990). En af de vigtigste er den meget store forskel mellem gastætheden ved solens overflade, hvor al afkøling foregår, og gastætheden i det indre af solen, hvor den fra overfladen afkølede gas nødvendigvis udgør en meget lille brøkdel. Den lave temperatur ved overfladen medfører, at gastætheden her aftager meget hurtigt med højden. Det fører til, at den opadstigende, varme gas ekspanderer hurtigt og at det meste af den til enhver tid opadstigende gas aldrig når at stige længere end ca. én tæthedsskalahøjde. Den typiske skala for bevægelsen er derfor, på enhver dybde, nogle få skalahøjder (også horisontalt). Figur 2 viser observationer og simuleringer af turbulente konvektionsceller ved solens overflade. Disse celler er fra nogle få hundrede til nogle få tusinde kilometer store. De dybere liggende celler er større, og der eksisterer derfor et hierarki af konvektive skalaer, som er i stand til at deformere det magnetfelt, som også er til stede i konvektionszonen.

Dette er et godt eksempel på forholdet mellem virkelighed, observationer og simulationer. Som der ses af Figur 2 er den numeriske detaljerigdom større end den observerede, selv om det her drejer sig om observationer fra et excellent instrument, med avanceret elektronik til udvælgelse af de bedste af tusinder af billeder med varierende indflydelse fra lufturo. Omvendt er virkelighedens detaljerigdom langt større end den numeriske; den turbulente struktur fortsætter ned til en skala, der sandsynligvis er ca. een million gange mindre end figurens.

Det er måske værd at påpege, at solens tilsyneladende jævnt lysende overflade faktisk består af et cellemønster hvor de lyse områder er ca. dobbelt så lyse som de mørke. Supercomputersimuleringerne viser også, at dette cellemønster er et meget tyndt overfladefænomen, og at der under overfladen dannes tynde, kolde og kraftigt roterende filamenter; en slags "op og ned–vendte tornadoer".

Ved hjælp af supercomputersimuleringer er vi nu også i stand til at studere denne vekselvirkning mellem magnetfelt og turbulent konvektion, og kan prøve at forstå de *dynamomekanismer* som skaber og forstærker magnetfeltet (Nordlund et al. 1992). Figur 3 viser en 3D visualisering af magnetfeltet i en model af en turbulent konvektionszone. Da man ved, at stjerners rotation er helt afgørende for niveauet af magnetisk aktivitet, er modellen konstrueret med et roterende koordinatsystem, hvilket medfører at den konvektive bevægelse får en roterende komponent. Man kan i figuren se, at dette fører til dannelsen af spiralformede magnetfeltsstrukturer. Disse dannes rundt omkring filamenter af roterende, kold gas fra overfladen. Dynamoeffekten opstår, fordi den kolde gas er i stand til at transportere magnetfeltet ned mod bunden af konvektionszonen, til trods for at et magnetfelt har en naturlig tendens til at flyde op til overfladen. Den roterende bevægelse bevirker, at magnetfeltet foldes sammen til gradvist kraftigere magnetfeltsstrukturer, indtil de magnetiske kræfter er i stand til at bremse udviklingen.

Ved hjælp af supercomputersimuleringer prøver vi også at forstå, hvordan udviklingen i det af magnetisk energi dominerede område ovenover overfladen (koronaen) kan føre til de tidligere omtalte kraftige magnetiske udladninger. Feltlinier i koronaen er forankret i den turbulente konvektionszone. Vores hypotese er, at dette medfører en mekanisk deformering af magnetfeltet, som igen medfører en fraktal, overkritisk fordeling af fri magnetisk energi i koronaen (Nordlund & Galsgaard 1992). Vi er nu ifærd med, bl.a. ved hjælp af den nye massivt parallelle supercomputer CM-200 ved UNI•C i Lyngby, at opbygge computermodeller med tilstrækkelig numerisk opløsning til at kunne afprøve denne hypotese.

Figur 4 viser en 3D visualisering af magnetfeltet fra et af CM-200 eksperimenterne. Vektorfeltet er her vist ved at visualisere udvalgte feltlinier i tre dimensioner, hvor dybdefornemmelsen fremkommer ved hjælp af en syntetisk belysningseffekt. Indtrykket svarer nogenlunde til en effekten af en diffus lyskilde placeret ved siden af betragteren, hvor større afstand fører til mørkere objekter, og hvor der ikke dannes skygger.

Man ser i midten af billedet, hvordan bundter af feltlinier, forankrede i henholdsvis venstre og højre "væg", er flettede om hinanden. Denne "knude" kan kun skæres over ved at magnetisk energi ødelægges, og energien i stedet for omdannes til termisk eller kinetisk (bevægelses-) energi.

Figuren er et godt eksempel på, at man fra supercomputersimuleringer kan lave "observationer" af en ny type. Det ville ikke være muligt fra laboratorieeksperimenter direkte, at lave denne slags figur; heller ikke at måle magnetfelt eller hastighedsfelt i tre dimensioner så nøjagtigt, at man kunne fremstille figuren fra observerede data. Da den tidslige udvikling af såvel hastighedsfelt som magnetfelt hænger intimt sammen med systemets *topologi*, d.v.s., med hvordan feltlinierne binder forskellige områder af rummet sammen, er visualisering afgørende for forståelsen af de dynamiske sammenhænge.

Referencer:

1) "Topology of Convection Beneath the Solar Surface", Stein R.F, Nordlund,Å., *Astrophys. J.* **342**, L95-L98 (1989)

2) "Solar Convection", Spruit, H.C., Nordlund,Å., Title, A., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **28**, 263-302 (1990)

3) "Dynamo Action in Stratified Convection with Overshoot", Nordlund,Å., Brandenburg, A., Jennings, R.L., Rieutord, M, Roukolainen, J., Stein, R.F., Touminen, I., *Astrophys. J.* **392**, 647-652 (1992)

4) Nordlund,Å., Galsgaard, K., "Large Scale Simulations", *American Institute of Physics Conference Proceedings*, **267**, 13-23, (1992)

Åke Nordlund er lektor ved Astronomisk Observatorium,NBI. Han er filosofie doktor i teoretisk fysik fra Stockholms Universitet, og kom til Danmark som NORDITA stipendiat i 1975. Han har været "visiting scientist" ved en lang række amerikanske observatorier. Hans hovedinteresse er forskellige aspekter af struktur og kaos indenfor astrofysik.