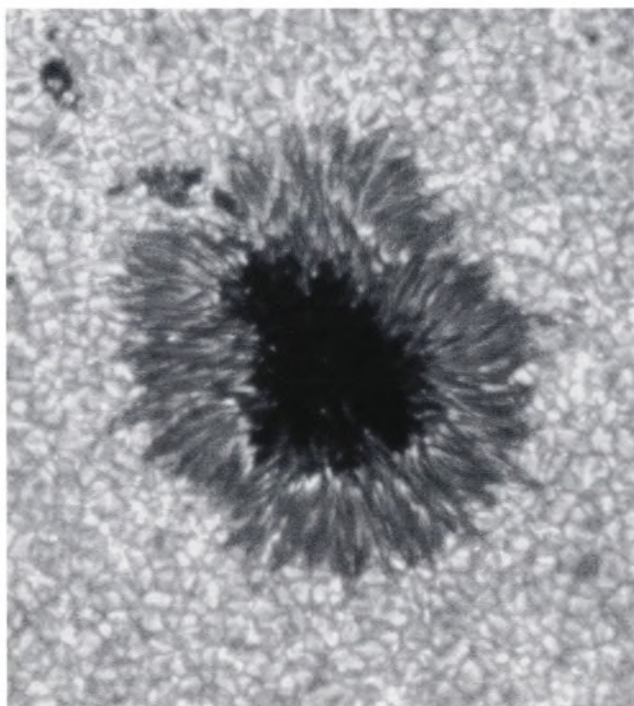


Solens dynamiske rotation

Jørgen Christensen-Dalsgaard, Teoretisk Astrofysik Center, Danmarks Grundforskningsfond, og Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

At Solen roterer om sin akse har været kendt siden starten af det syttende århundrede, ud fra observation af solpletters bevægelse hen over solskiven. Sådanne observationer viser også at Solens rotation ikke er uniform: ved ækvator er rotationsperioden ca. 25 døgn, mens den ved polerne er mere end 30 døgn. Et soldøgns længde afhænger altså af, hvor på Solen man befinder sig! At dette er muligt skyldes naturligvis at Solen er en kugle af gas, der ikke nødvendigvis roterer med samme vinkelhastighed overalt; ikke desto mindre er det interessant at prøve at finde årsagen til denne *differentielle rotation*.



Figur 1. Solplet, observeret fra det svenske solteleskop på La Palma. Uden for solpletten kan man bemærke granulationen: lyse områder af opstigende konvektive elementer omgivet af koldere og mørkere nedsynkende gas.

Interessen skærpes af, at rotationen formodentlig har forbindelse med andre fænomener på Solen. De mest iøjnefaldende fænomener på Solens overflade er *solpletterne*, områder med en diameter på op til 50 000 km der er lidt koldere end resten af soloverfladen og derfor ser mørkere ud (se figur 1). Solpletterne skyldes kraftige magnetfelter, der bryder gennem soloverfladen og reducerer effektiviteten af energitransporten. Antallet af solpletter, og andre magnetiske fænomener på Solen, varierer med en periode på ca. 11 år; det samme gælder forekomsten af magnetiske storme, nordlys og andre fænomener, der skyldes magnetiske effekter på

Solen (se Sven Ove Thimms artikel på bagsiden af dette nummer). De fleste teoretiske modeller antager at disse variationer skyldes en form for "dynamovirksomhed" i Solens ydre dele, i et samspil mellem den differentielle rotation og gasbevægelserne i Solens konvektionszone. For at forstå disse processer er vi derfor nødt til at kende Solens indre rotation.

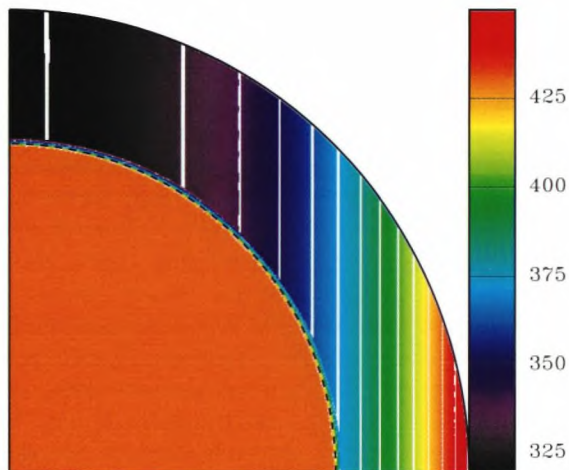
Solens konvektionszone strækker sig over de ydre ca. 27 % af Solens radius. Her sker energitransporten ved at varmere gasmasser stiger til vejrs og koldere gasmasser synker ned. På Solens overflade ses bevægelserne i form af granulationen, varme opstigende områder omgivet af koldere nedsynkende gas, med en udstrækning på ca. 1000 km; større konvektive elementer, den såkaldte supergranulation, kan også ses i bevægelserne på soloverfladen. Detaljerede hydrodynamiske modeller af konvektionen tyder på, at bevægelserne i det indre af konvektionszonen foregår på meget store skalaer, der dog endnu ikke er set afspejlet på Solens overflade. Modellerne bestemmer også en variation i rotationshastigheden, der kan bringes til at stemme overens med den observerede differentielle rotation på Solens overflade. Indtil for nylig har disse modeller forudsagt at rotationen i det indre af konvektionszonen er en funktion af afstanden til rotationsaksen; dette omtales ofte som "rotation på cylinder". Det ville specielt betyde at rotationshastigheden aftog med dybden ved Solens ækvator. En skematisk version af disse modeller er illustreret på figur 2. Her og i det følgende er rotationshastigheden angivet som vinkelhastigheden, eller mere præcist $1/(\text{rotationsperiode})$, målt i nanohertz (nHz); en værdi på 450 nHz svarer til en rotationsperiode på 25,7 døgn.

Denne type numeriske modeller er dog højst usikre: de er helt ude af stand til at opløse bevægelserne på alle de relevante skalaer. Det er derfor af stor betydning at vi inden for de sidste godt 10 år er blevet i stand til at *måle* rotationen i Solens indre. Målingerne viser at der er problemer med modellerne; desuden har vi inden for det sidste år fundet variationer i rotationen i Solens konvektionszone der formodentlig har en, endnu ikke forstået, sammenhæng med variationerne i Solens magnetiske aktivitet.

Helioseismiske undersøgelser af Solens indre

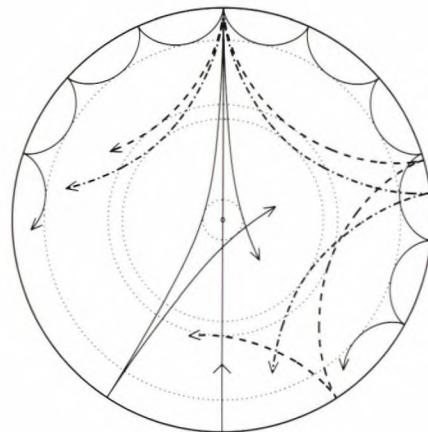
Grundlaget for disse resultater er observationer af svingninger af Solens overflade. Allerede i starten af 60-erne fandt amerikanske forskere de første vidnesbyrd om svingninger i Solens atmosfære, med perioder på omkring fem minutter. Disse blev længe betragtet

som lokale atmosfæriske fænomener; men i 1975 viste den tyske solfysiker Franz Deubner at der var tale om svingninger, der involverer en betragtelig del af Solen. Senere observationer har bekræftet dette, og vi ved nu at solsvingningerne skyldes en overlejring af millionvis af separate svingninger af Solen, på skalaer der rækker fra hele Solens omkreds til nogle få tusinde kilometer. Svingningernes frekvenser har givet os overordentlig detaljeret viden om forholdene i Solens indre. Dette forskningsfelt kendes som *helioseismologi* (af græsk *helios* for Solen; og *seismos* for skælven); for oversigter over helioseismologi, se [1–2].



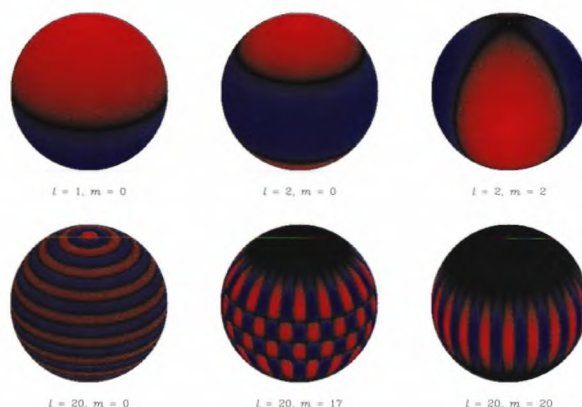
Figur 2. Rotationen i tværsnit af skematisk model af Solen, hvor rotationen er konstant på cylindre i konvektionszonen. Farveskalaen angiver rotations hastigheden i nanohertz (nHz); de hvide kontur-linier er adskilt med 10 nHz. Sammenlign med den faktisk målte rotations hastighed på figur 5.

Svingningerne kan observeres med adskillige forskellige teknikker, men de mest detaljerede resultater er opnået ved målinger af hastighederne af soloverfladen ved hjælp af Doppler-effekten. Der er tale om særdeles små effekter: de højeste amplituder af enkeltsvingninger er på under 0,2 m/sek., svarende til et samlet udsving af soloverfladen på ca. 20 m. Ikke desto mindre har det været muligt at måle dem med meget stor nøjagtighed; de mest følsomme målinger har bestemt svingninger med amplituder helt ned til 1 mm/sek. I de senere år er overordentlig omfattende målinger blevet foretaget i to store internationale projekter: GONG projektet (for Global Oscillations Network Group), der har opstillet 6 observatorier til måling af solsvingninger passende fordelt rundt om på Jorden; og eksperimenter på SoHO satellitten (Solar and Heliospheric Observatory), der laver kontinuerte observationer af Solen fra et punkt mellem Solen og Jorden.



Figur 3. Stråler af lydbølger, der udbreder sig i et tværsnit af Solens indre.

De observerede svingninger er stående lydbølger. Bølgernes udbredelse i Solens indre kan illustreres i en stråle-approksimation som på figur 3. Den er bestemt af variationen i lydhastigheden i Solens indre: lydhastigheden vokser med temperaturen og dermed med dybden under soloverfladen; derfor bliver bølgerne afbøjet og undergår til sidst indre refleksion, inden de bliver sendt tilbage mod soloverfladen. Herved etableres en stående bølge, svarende til svingningen af overfladen. Det er klart fra figuren at der er en sammenhæng mellem svingningens bølgelængde på overfladen, og den dybde, svingningen trænger ind til: svingninger med korte bølgelængder er afgrænset til de ydre dele af Solen, mens svingninger med lange bølgelængder omfatter en stor del af Solen. Da svingninger er observeret med alle bølgelængder, fra de længste til de korteste, får vi derfor information om forholdene overalt i Solen.



Figur 4. Udvalgte kuglefunktioner, der illustrerer svingningernes opførsel på Solens overflade. Graden l og den azimuthale orden m er angivet.

Svingningernes opførsel hen over soloverfladen er bestemt af kuglefunktioner $Y_l^m(\theta, \phi)$, hvor θ er vinkel-

afstanden til rotationsaksen (dvs. 90° —breddegraden), mens ϕ er længdegraden. Nogle eksempler er vist på figur 4. Her er l graden af svingningen, der, groft sagt, bestemmer bølgelængden på soloverfladen som

$$\lambda \sim \frac{2\pi R}{l},$$

hvor R er Solens radius; $l = 0$ svarer til kuglesymmetriske svingninger. Den azimutale orden m bestemmer antallet af nulpunkter, eller *knuder*, for svingningen omkring Solens ækvator; m ligger mellem $-l$ og l . For hvert svingningsmønster karakteriseret ved (l, m) findes et antal svingninger med varierende antal af knuder i den radiale retning, karakteriseret ved den radiale orden n . På Solen observeres svingninger med grader mellem 0 og flere tusinde; det samlede antal observerbare svingninger er derfor mange millioner.

Solsvingninger og Solens rotation

Solens svingningsfrekvenser afhænger oplagt af lydhastigheden i Solens indre. Ved at analysere dem kan man bestemme variationen af lydhastigheden, og dermed få en meget detaljeret test af beregnede solmodeller. Her koncentrerer vi os dog om studier af Solens rotation.

Hvis Solen ikke havde roteret ville svingningsfrekvenserne have været uafhængige af den azimutale orden m . For en ikke-roterende, og dermed kuglesymmetrisk, stjerne har ækvator ingen fysisk betydning, og m , der er knyttet til beliggenheden af ækvator, kan derfor ikke påvirke frekvenserne. Denne situation svarer helt til m -degenerationen af energiniveauerne i et brintatom. Som i brintatomet fører et brud på kuglesymmetrien til at degenerationen hæves. I brintatomet kan det f.eks. ske ved at atomet anbringes i et magnetfelt. For stjernesvingninger er rotationen det vigtigste brud på symmetrien. Herved opstår en opsplitning af frekvenserne efter m , den såkaldte *rotationsopsplitning*.

Den dominerende effekt af rotationen på svingningerne er rent geometrisk. De enkelte svingninger med $m \neq 0$ svarer til løbende bølger på soloverfladen, af formen

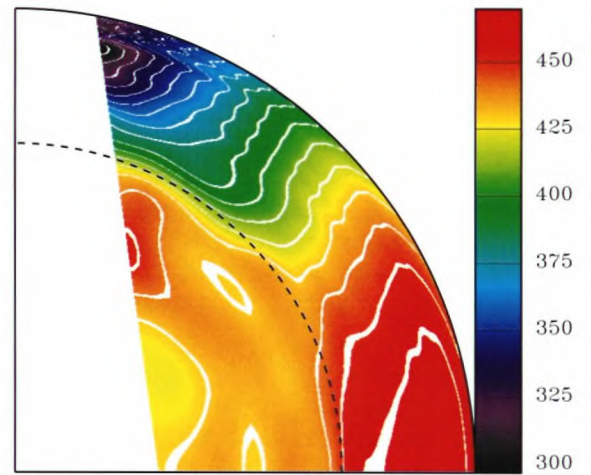
$$P_l^m(\cos \theta) \cos(m\phi - \omega t),$$

hvor P_l^m er en Legendre-funktion, ω er vinkel-frekvensen og t er tiden. Effekten er at de svingningsmønstre, der er illustreret på figur 4, ville se ud som om de roterede i en animeret udgave af figuren. En svingning, der udbreder sig i sammen retning som Solens rotation får dermed en højere frekvens end hvis Solen ikke havde roteret, og en svingning, der udbreder sig modsat rotationen, en lavere frekvens. Mere præcist kan dette udtrykkes ved at skrive frekvensen af en svingning med radial orden n , grad l og azimutal orden m som

$$\omega_{nlm} = \omega_{nl0} + m \langle \Omega \rangle,$$

hvor $\langle \Omega \rangle$ er en passende middelværdi af Solens vinkel-hastighed $\Omega = \Omega(r, \theta)$; denne varierer, som allerede nævnt, med positionen i Solen, her angivet ved vinklen θ til polaksen og afstanden r til Solens centrum.

Den relevante middelværdi strækker sig over de dele af Solen, der er involveret i den betragtede svingning. Som vist på figur 3 kan det være en større eller mindre del af Solens udstrækning i den radiale retning: svingninger med høje grader, og dermed korte bølgelængder, er kun følsomme over for rotationen i de ydre dele af Solen, mens svingninger med lave grader omfatter det meste af Solen. Figur 4 viser en tilsvarende variation af svingningernes udstrækning i bredde: svingninger med lave m dækker det meste af soloverfladen, mens svingninger med $|m| \simeq l$ er koncentreret tæt ved ækvator. Ved observation af rotationsopsplitningen for et stort antal svingninger med forskellig udstrækning i Solen får vi derfor meget varierede middelværdier af Ω ; ud fra disse er det muligt at bestemme rotationens variation med r og θ .



Figur 5. Rotationen i tværsnit af Solen. Farveskalaen angiver rotationshastigheden i nanohertz (nHz); de hvide kontur-linier er adskilt med 10 nHz. I området nær rotationsaksen kan de eksisterende data ikke give en pålidelig bestemmelse af rotationen.

For at finde den præcise relation mellem vinkel-frekvensen og rotationsopsplitningen er en mere detaljeret analyse nødvendig. Den må også tage hensyn til Coriolis-kraften på svingningerne, der dog har en relativt beskeden effekt for de svingninger, der observeres på Solen. Centrifugalkraften kan negligeres, på grund af Solens langsomme rotation: ved ækvator er forholdet mellem centrifugalkraft og tyngdekraft ca. 2×10^{-5} . Resultatet af analysen kan skrives som $\omega_{nlm} = \omega_{nl0} + m\delta\omega_{nlm}$ hvor

$$\delta\omega_{nlm} = \int_0^\pi \int_0^R K_{nlm}(r, \theta) \Omega(r, \theta) r dr d\theta. \quad (1)$$

Her kan *kernerne* $K_{nlm}(r, \theta)$ bestemmes ud fra strukturen af egensvingningerne, som igen kan beregnes ud

fra modeller af Solens struktur. Denne er kendt med stor nøjagtighed ud fra analysen af svingningsfrekvenserne, og vi kan derfor antage at kernerne er kendte. Denne ligning danner udgangspunktet for bestemmelsen af Solens indre rotation ud fra de observerede frekvensop-splitninger.

Invers analyse

Ligning (1) er et typisk eksempel på et inverst problem: vi kender $\delta\omega_{nlm}$ for et stort antal observerede svingninger (n, l, m) og ønsker at bestemme $\Omega(r, \theta)$. Denne type problemer er blevet studeret indgående i geofysikken; men i en bredere forstand er de fleste fysiske målinger af en lignende art: det der måles er et instruments respons på en underliggende fysisk størrelse, og bestemmelsen af denne størrelse kræver korrektion for instrumentets responsfunktion, der i denne sammenhæng svarer til kernerne i ligning (1).

Det er indlysende at bestemmelse af et endeligt (omend stort) antal rotations-opsplitninger ikke kan give en fuldstændig bestemmelse af Ω som funktion af (r, θ) . I praksis må man nøjes med lokaliserede middelværdier af Ω , svarende til at bestemmelsen sker med en endelig opløsning. Samtidig må man også tage hensyn til, at de observerede $\delta\omega_{nlm}$ er behæftet med en måleusikkerhed, der påvirker bestemmelsen af Ω . Formålet med analysen er derfor at opnå den højest mulige opløsning, uden at den propagerede målefejl bliver for stor. Det kræver en omhyggelig afvejning af de parametre, der karakteriserer analysen.

Inden for geofysikken er der udviklet teknikker til behandling af denne type problemer, og de er blevet yderligere forfinet i de helioseismiske anvendelser [3]. Resultatet er en bestemmelse af middelværdier $\bar{\Omega}(r_0, \theta_0)$, der kan udtrykkes som

$$\bar{\Omega}(r_0, \theta_0) = \int_0^\pi \int_0^R \mathcal{K}(r_0, \theta_0, r, \theta) \Omega(r, \theta) r dr d\theta.$$

Her giver *midlingskernerne* $\mathcal{K}(r_0, \theta_0, r, \theta)$ et mål for, hvor godt $\bar{\Omega}(r_0, \theta_0)$ approksimerer værdien af vinkelhastigheden i punktet (r_0, θ_0) . I praksis kan bestemmelsen i Solens konvektionszone lokaliseres inden for nogle få procent af Solens radius eller bedre; i dybere lag bidrager færre svingninger til bestemmelsen, og opløsningen bliver derfor dårligere. Samtidig får man også en bestemmelse af fejlen $\sigma[\bar{\Omega}(r_0, \theta_0)]$ i resultatet.

Analysen er i princippet relativt simpel. I praksis kompliceres den af det meget store antal datapunkter, der skal inkluderes. Blandt andet takket være et frugtbart samarbejde med Datalogisk Institut ved Aarhus Universitet er der blevet udviklet teknikker, der meget effektivt udnytter det inverse problems detaljerede struktur, samt arkitekturen på parallelle computere. Vi er derfor nu i stand til at håndtere selv store datasæt med en begrænset regnetid.

Solens indre rotation

Vi har analyseret data fra både GONG netværket og MDI (Michelson Doppler Imager) instrumentet på SoHO. Resultater fra en længere serie MDI data er vist på figur 5, opnået af Schou *et al.* [3]. Her er rotations-hastigheden $\Omega/(2\pi)$ vist i nHz. Fejlen i bestemmelsen er gennemgående under 1 nHz; de fundne variationer er altså højst signifikante.

Det kan for det første bemærkes at overfladerotationen viser den kendte variation fra ækvator til polerne; men på figur 5 er rotationshastigheden bestemt udelukkende ud fra de observerede svingningsfrekvenser, uden anvendelse af de direkte målinger af overfladerotationen. Den gode overensstemmelse giver dermed en test af inversionsmetodernes pålidelighed. Det er bemærkelsesværdigt at denne variation i rotationen med bredden stort set holder sig uændret i hele området uden for den stiplede cirkel, der markerer bunden af konvektionszonen. Det er specielt klart at opførslen er helt forskellig fra rotation på cylindre, som forudsagt af simple modeller (se figur 2). Ved bunden af konvektionszonen sker der en hurtig ændring til rotationen i de dybere lag; denne er stort set konstant, så langt ind som den foreliggende analyse giver nogenlunde sikre resultater. Rotationen af Solens kerne er stadig ret usikker; analyse af andre observationer tyder dog på, at rotationshastigheden her er konsistent med værdien i resten af området under konvektionszonen.

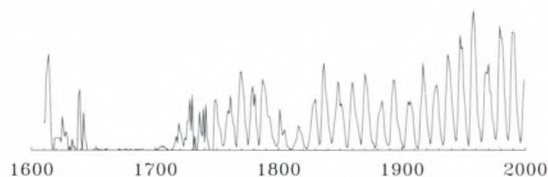
Det er ret indlysende at overgangen ved bunden af konvektionszonen må spille en væsentlig dynamisk rolle. Denne zone kaldes *tachoklinen* (af græsk *tachos* fart; og *klinein* hælde). Udstrækningen af det område, hvor overgangen finder sted, er tæt på opløsningen i inversionen i denne del af Solen, men kan bestemmes til ca. 5 % af Solens radius. I dette område er der derfor en meget kraftig gradient i rotationshastigheden, som ydermere skifter fortegn ved en bredde på omkring 30°.

En nøjere analyse viser andre systematiske variationer i rotationen i konvektionszonen. Konturerne i figur 5 antyder at der er et område tæt ved overfladen hvor vinkelhastigheden vokser med dybden, i hvert fald ved lave breddegrader. Dette er også det område hvor solpletterne er forankret; det har faktisk været kendt et stykke tid at solpletterne roterer lidt hurtigere end Solens overflade. Ved høje breddegrader varierer rotationen tilsyneladende mere med positionen, med indikation af begrænsede områder med hurtigere og langsommere rotation.

Effekter af Solens magnetiske cyklus

Som allerede nævnt varierer antallet af solpletter med en periode på ca. 11 år, dog med betydelige variationer i periodelængde og maksimalt antal fra periode til periode. Denne variation hænger nøje sammen med Solens magnetfelt. Ved solpletminimum har Solen et relativt svagt dipolfelt, nogenlunde svarende til Jordens. Ved solpletmaksimum er feltet helt domineret af de kraftige

felter i solpletterne, og ved det efterfølgende minimum har feltet igen dipolkarakter, men sådan at polerne er vendt om: hvor der før var nordpol er der nu sydpol og omvendt. Tilsvarende variationer i den detaljerede fordeling af magnetfeltet findes i solpletterne ved solpletmaksimum. Det er altså mere korrekt at tale om en 22-årig magnetisk cyklus for Solen.



Figur 6. Mål for antallet af solpletter gennem de sidste 400 år, midlet år for år. Den 11-årige variation er meget tydelig. Bemærk også fraværet af solpletter i perioden 1645–1715.

Variationen i solpletallet er blevet fulgt siden systematiske observationer begyndte tidligt i det syttende århundrede. Resultatet er resumeret i figur 6. I de sidste knapt 300 år er den 11-årige variation i antallet, men med nogen variation i højden af maksimumene, tydelig. Det er slående, at der er meget få solpletter i perioden 1645–1715. Denne periode, det såkaldte *Maunder-minimum*, er blevet studeret meget grundigt og det er påvist at den tilsyneladende mangel på solpletter ikke skyldes mangelfulde observationer. Der er et påfaldende sammenfald mellem denne periode og den *lille istid* hvor klimaet var usædvanligt koldt; det var f.eks. i denne periode at den svenske hær krydsede de tilfrosne danske bælter. Dette sammenfald må naturligvis give anledning til overvejelser om en mulig sammenhæng mellem solaktivitet og Jordens klima; en detaljeret diskussion, med visse politiske overtoner, af dette spændende emne blev givet af Nigel Calder [4].

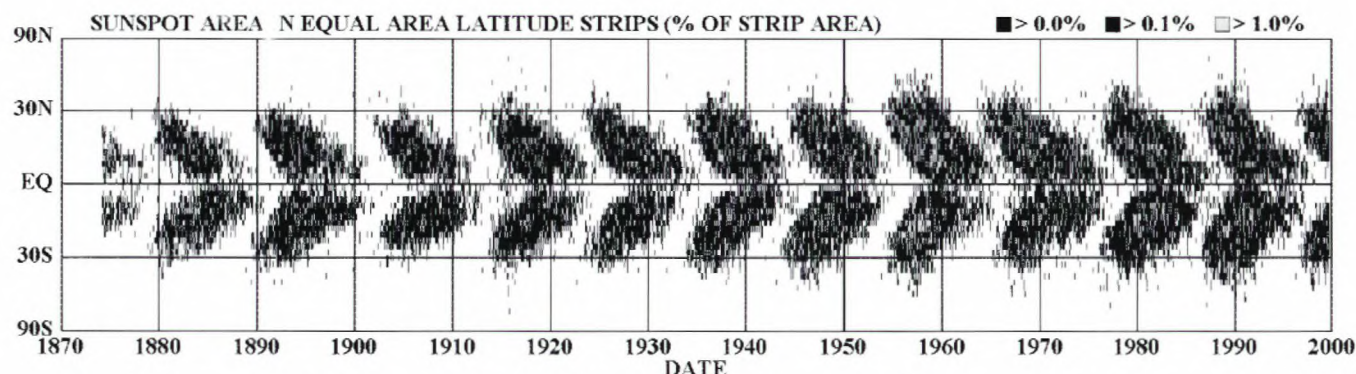
Der er en slående regularitet i forekomsten af pletter på Solen, som illustreret på figur 7: tidligt i den voksende fase af et solpletmaksimum dukker solpletterne

frem ved relativt høje breddegrader, men efterhånden som aktiviteten stiger dannes pletterne tættere og tættere på ækvator. Hermed danner pletterne det såkaldte *sommerfuglediagram*.

Mens variationen på Solens overflade som følge af sol-cyklen er meget velstuderet har det indtil for ganske nylig været et åbent spørgsmål, i hvor høj grad forholdene i det indre ændrer sig. Observation af sådanne ændringer ville naturligvis være meget vigtige for en forståelse af mekanismerne bag variationen i Solens aktivitet. Allerede midt i firserne fandt man at svingningsfrekvenserne ændrer sig i løbet af sol-cyklen: ved solpletmaksimum er frekvenserne op til ca. 0,01 % højere end ved solpletminimum (at så små effekter kan måles illustrerer ganske godt den præcision, som Solens frekvenser kan bestemmes med). Nærmere undersøgelser har dog vist, at disse ændringer er meget kraftigt korreleret med ændringen i magnetfeltet på Solens overflade; der er altså tale om en direkte effekt af de allerede kendte variationer, og frekvensændringerne giver derfor ingen ny information om hvad der foregår i dybere lag under Solens overflade.

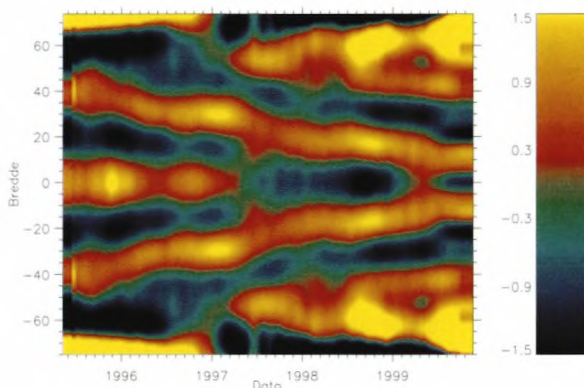
Selv med de meget præcise målinger fra GONG netværket og SoHO satellitten har det ikke været muligt med sikkerhed at finde ændringer i Solens indre *struktur* i forbindelse med sol-cyklen. Derimod har vi inden for det seneste år fundet særdeles interessante variationer i rotationen. Metoden er simpel: dataene analyseres i stykker på 2–3 måneder ad gangen; for hvert segment bestemmes svingningsfrekvenserne, og rotationshastigheden findes ved inversion; den gennemsnitlige rotationshastighed, over alle segmenter og som funktion af (r, θ) , bestemmes; og endelig ser vi på afvigelsen, i de enkelte segmenter, fra denne middelværdi. Disse afvigelser viser meget signifikante variationer med tiden, og med positionen i Solen.

Vi ser først på forholdene relativt tæt ved Solens overflade. Her finder man bælter af lidt hurtigere og langsommere rotation der, som vist på figur 8, gradvist bevæger sig mod Solens ækvator som tiden går [5–6]. Ligheden med solpletternes flytning mod ækva-



Figur 7. Forekomsten af solpletter, som funktion af tiden og breddegraden. Bemærk at pletterne tidligt i den voksende fase af aktiviteten (f.eks. omkring 1885) fortrinsvis findes ved relativt høje breddegrader; området med solpletter flytter mod ækvator efterhånden som cyklen skrider frem.

tor som sol-cyklen skrider frem er ganske påfaldende. Strømninger af denne art på Solens overflade har været kendt siden ca. 1980, fra direkte målinger af rotationshastigheden på Solens overflade; disse overflademålinger har også tilsyneladende vist en sammenhæng mellem områder med hurtig rotation og de bælter, hvor den magnetiske aktivitet er koncentreret. Det nye i de helioseismiske målinger er, at de kan følge strømningerne ned under Solens overflade. Dette viser at bælterne strækker sig over de ydre ca. 8 % af Solens radius, svarende til 1/3 af konvektionszonens dybde eller ca. 60 000 km. Der er altså langt fra tale om "overfladiske" fænomener, og det er sandsynligt at de spiller en væsentlig rolle for solpletternes dynamik og udvikling.

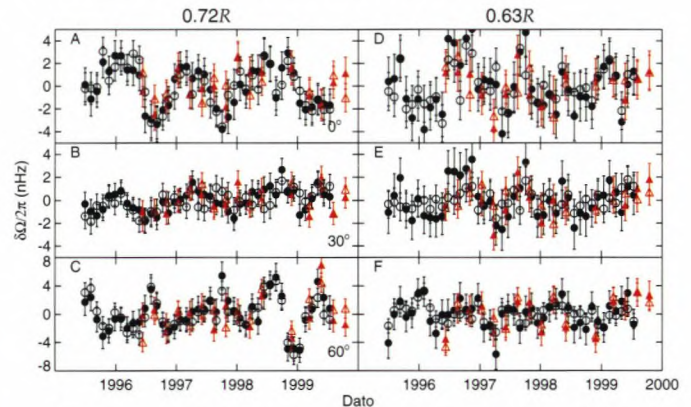


Figur 8. Ændringen i rotationen under Solens overflade, i en dybde på 7 000 km, som funktion af breddegraden og tiden. Røde og gule områder roterer lidt hurtigere end gennemsnitligt, blå og grønne områder lidt langsommere. Bemærk at områderne med hurtig og langsom rotation bevæger sig mod Solens ækvator, i midten af billedet, som tiden går. Farveskalaen til højre angiver afvigelsen i vinkelhastigheden, i nHz; ved Solens ækvator svarer 1,5 nHz til en fart på 7 m/sek.

Mens disse strømninger har været kendt fra overflademålinger kom den anden type variationer som en komplet overraskelse: som vist på figur 9 er der svingninger i rotationshastigheden tæt ved bunden af konvektionszonen og nær Solens ækvator, med en periode på omkring 1,3 år [6–7]. Ved højere breddegrader er der også variationer, omend mindre regelmæssige og med en dominerende periode på ca. 1 år. Det er også påfaldende at den ækvatorielle svingning ses både ved bunden af konvektionszonen, i en afstand på $0,73R$ fra Solens centrum, og i et noget dybere lag. Perioden i disse to lag er den samme, men svingningerne er i modfase. Denne periode var helt uventet; desuden er der ikke før set dynamiske variationer i området under konvektionszonen, hvor forholdene normalt antages at være meget stabile.

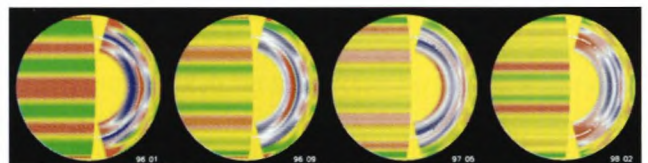
Det er klart at et så uventet resultat bør efterprøves omhyggeligt. Specielt kan forekomsten af en periode på 1 år ved højere breddegrader virke noget mistænkelig, givet at der er periodiciteter på et år i både de

jord- og satellit-baserede observationer. Der er derfor lavet mange forsøg med simulerede data for at undersøge om denne form for variation kan opstå som resultat af systematiske fejl i målingerne. Det har dog ikke været muligt at reproducere resultaterne ad denne vej; desuden ville det være meget svært at forklare at der er glimrende overensstemmelse mellem de helt uafhængige målinger foretaget af GONG netværket og fra SoHO satellitten. Vi har derfor konkluderet at der virkelig er tale om reelle variationer i Solen.



Figur 9. Ændringer i tiden i rotationen, relativt til den gennemsnitlige rotation. Resultater er vist for to afstande fra Solens centrum: til højre ved $0,72R$, svarende til tachoklinen hvor rotationen ændrer sig hurtigt med dybden, til venstre ved $0,63R$, et noget dybere lag i Solen; den øverste række er for Solens ækvator, de følgende for bredder på 30° og 60° . Sorte symboler er for data fra GONG netværket, røde symboler for data fra MDI instrumentet på SoHO satellitten; åbne og lukkede symboler er for to forskellige inversionsmetoder (fra [7]).

En samlet fremstilling af de observerede variationer, på udvalgte tidspunkter, er givet på figur 10. Her er illustreret både bælterne af hurtig og langsom rotation på Solens overflade, og variationerne i Solens indre. Specielt kan det bemærkes, at bælterne kan følges til en betragtelig dybde under overfladen.



Figur 10. Variationer i Solens rotation, relativt til den gennemsnitlige rotation, i fire faser af svingningen. Variationen er vist både på Solens overflade og i et snit gennem Solen. I det indre angiver lysebrune områder hurtig rotation, blå områder langsom rotation, og hvide områder den gennemsnitlige rotation. I den ydre del af Solen er hurtig, gennemsnitlig og langsom rotation vist som henholdsvis røde, gule og grønne områder. (En animeret version af disse billeder kan findes på [6].)

Modeller for Solens rotation

Mens observationerne af Solens indre rotation har gjort store fremskridt i de senere år, kniber det mere med den teoretiske forståelse. Helt overordnet er der næppe tvivl om at både den gennemsnitlige differentielle rotation

og variationerne i rotationen er bestemt af et samspil mellem rotation, konvektion og magnetfelter; disse faktorer må også være ansvarlige for variationerne i Solens magnetiske aktivitet i sol-cyklen. Man kan derfor håbe at bedre observationer af variationerne i rotationen, og en bedre teoretisk forståelse af dem, også kan hjælpe på forståelsen af solcyklen.

Et andet vigtigt aspekt er relationen til rotationen i Solens indre, koblet til konvektionszonen gennem den hurtige variation i rotationen i tachoklinen, og mere overordnet udviklingen i stjerners indre rotation. Observationer har helt klart påvist at for stjerner med masse tæt ved Solens roterer unge stjerner hurtigere end ældre. Der sker altså tilsyneladende et tab af impulsmoment efterhånden som stjernerne ældes. Dette tab kan forklares ved *solvinden*, udstrømningen af gas fra Solens ydre atmosfære, *koronaen*. Gassen er koblet til Solens overflade gennem magnetfelter og er derfor tvunget til at rotere med samme hastighed som Solen, selv i ganske store afstande fra Solen; selv om massen af den udstrømmende gas er meget beskeden medfører den derfor et ganske betragteligt impulsmoment. En model af denne art kan i store træk forklare reduktionen i stjernernes rotationshastighed med alderen. Den viser også at bremsningen af rotationen sker i konvektionszonen, hvor magnetfeltet er forankret. Dermed er det i princippet muligt at området under konvektionszonen fortsat kunne rotere meget hurtigere end overfladen. De helioseismiske undersøgelser viser helt klart at det ikke er tilfældet. Der må altså være mekanismer, der kobler det indre effektivt til konvektionszonen.

Arten af disse mekanismer er endnu meget usikker. Det viser sig dog, stort set ved udelukkelsesmetoden, at de må involvere magnetiske effekter. Selv et ret svagt magnetfelt, der kunne stamme fra Solens dannelse, kan faktisk koble forskellige dele af Solens indre ganske effektivt. Feltet er stærkt bundet til stoffet i Solen, der er overvejende ioniseret og dermed elektrisk ledende. Man kan derfor tænke på magnetfeltlinierne som elastikker der er fastgjort til stoffet og derfor gør modstand hvis forskellige dele af Solens indre roterer med forskellig hastighed. Dermed giver magnetfeltet en effektiv transport af impulsmoment i Solens indre. Detaljerne i denne proces er dog langt fra forstået. Specielt i tachoklinen giver variationen i rotationshastigheden anledning til cirkulation (den såkaldte *Ekman cirkulation*), der kan føre til blanding af stoffet [8].

Rotationen i konvektionszonen varierer, som nævnt, med bredden. Den gennemsnitlige rotation svarer ret nøje til rotationen i det indre; dette kunne tyde på at der er en form for ligevægt hen over grænsen for konvektionszonen. Fordelingen af rotationshastigheden i konvektionszonen er formodentlig bestemt af transporten af impulsmoment på grund af de konvek-tive gasbevægelser, der selv er påvirket af rotation. Dette må have ført til transport af impulsmoment fra polområderne mod ækvator, der dermed er kommet til at rotere hurtigere. Hydrodynamiske modeller af kon-

vektion i roterende systemer antyder at denne type processer kan finde sted. Et problem har været at de sker på relativt små skalaer; dette var tilsyneladende årsagen til at tidlige modeller af Solens roterende konvektionszone, der havde en grov numerisk opløsning, gav resultater der ikke stemte med den observerede fordeling. Beregninger inden for det seneste år, med kraftigt forbedret opløsning, har fundet en rotationsprofil der minder ganske meget om den observerede.

Som allerede nævnt spiller fordelingen af rotation formodentlig en væsentlig rolle for Solens magnetiske cyklus. De eksisterende, såkaldte *dynamomodeller*, for dannelsen og variationen af magnetfeltet antager ofte at den dominerende effekt finder sted i grænselaget under konvektionszonen. Her kan variationen af rotations-hastigheden føre til at magnetfeltet bliver strakt og "viklet rundt" omkring Solens ækvator, hvorved feltet forstærkes. Den såkaldte magnetiske opdrift fører til at feltet bliver ustabil og flyder op igennem konvektionszonen i form af rør af magnetisk fluks. Hvor et sådant rør gennembryder Solens overflade i en bue dannes et solpletpar. På grund af disse effekter svækkes feltet igen, og andre processer fører til gendannelsen af et dipolfelt, som observeret ved solpletminimum. Hermed kan man få i hvert fald en kvalitativ forståelse af Solens aktivitets-cyklus. Modellen har dog visse problemer: blandt andet er det svært at forklare at nogle meget lette stjerner, der ifølge modeller skulle være fuldstændig konvek-tive, stadig udviser magnetisk aktivitet; dette strider naturligvis mod antagelsen om, at grænselaget under konvektionszonen er ansvarligt for forstærknin-gen af feltet.

Hvad betyder variationerne?

Med usikkerheden i modellerne for Solens generelle rotation er det ikke overraskende at vi har meget begrænset forståelse af de observerede variationer, eller deres sammenhæng med de øvrige fænomener i Solen. Det er påfaldende som strømmene af hurtig og langsom rotation nær overfladen minder om solpletternes flytning mod ækvator. Det er derfor et spørgsmål om strømningerne er styret af solpletterne eller omvendt. Givet at strømningerne ses selv under solpletminimum, samt at de omfatter en ret stor del af konvektionszonen, er det måske mest naturligt at antage at strømningerne styrer pletterne. Hvordan dette sker er ukendt, ligesom den mekanisme der fremkalder strømningerne endnu ikke er forstået. Der er dog en interessant mulig analogi i de store planeter Jupiter og Saturn, hvis ydre dele også er domineret af konvektion: her ses en tydelig bæltstruktur i atmosfæren, der kunne være af samme art som bæltene i rotation set på Solen.

Svingningerne i rotationen ved og under bunden af konvektionszonen viser klart at der foregår dynamiske fænomener i dette område. Det er muligt at svingningerne er overvejende magnetiske; grove skøn indikerer at svingninger med den observerede periode på

1,3 år kan opstå med plausible værdier for den relevante komponent af magnetfeltet i dette område. Det er også påfaldende at vi ser oscillerende bevægelser så dybt som $r = 0,63R$. Det er ikke usandsynligt at svingninger i rotationen til denne dybde kunne forårsage andre former for strømninger, der ville føre til blanding af stoffet under konvektionszonen; det kunne have målelige effekter på Solens struktur.

Faktisk har det længe været kendt at en vis blanding i dette område er nødvendig for at forstå et andet problem inden for Solens fysik. Lithium-indholdet i Solens atmosfære, bestemt ud fra spektroskopi, er væsentlig lavere end det oprindelige indhold i solsystemet der ses, f.eks., i meteoriter; på grund af de effektive gasbevægelser må indholdet i hele konvektionszonen være det samme som i atmosfæren. Reduktionen af lithium-indholdet i konvektionszonen skyldes formodentlig kernereaktioner med protoner. Denne reaktion finder kun sted med den fornødne fart ved højere temperaturer end den, der findes i bunden af konvektionszonen. For at forstå reduktionen i indholdet må der derfor være sket en blanding af stoffet under konvektionszonen; modelberegninger har vist at dette kræver en blanding netop til $r \simeq 0,63R$. Selv om den mulige sammenhæng mellem svingningerne i rotationen og en eventuel blanding langt fra er klarlagt er dette et ganske påfaldende sammenfald.

Med disse resultater har vi kun lige taget hul på observationer af Solens dynamiske indre. Det er naturligvis af meget stor interesse at følge variationerne hen over det kommende solplet-maksimum og under den aftagende fase af solaktiviteten. SoHO satellittens aktiviteter er foreløbig finansieret indtil 2004, og rent teknisk fungerer både satellit og instrumenter stadig glimrende. På længere sigt kan man håbe at GONG netværket kan holdes igang gennem en hel solplet-cyklus, eller længere, ligesom der er planer om nye satellitter til erstatning for SoHO. Studier af aktivitetsfænomener og rotation i andre stjerner er også af meget stor interesse, selv om de oplagt aldrig bliver så detaljerede som for Solen. Et stort skridt mod seismiske studier af andre stjerner, inklusive deres rotation, vil blive taget med den kommende danske satellit Rømer omtalt på side 16 i dette nummer. Kombination af sådanne observationer med fortsatte teoretiske undersøgelser vil forhåbentlig give os en bedre forståelse af de komplicerede mekanismer der kontrollerer stjernernes rotation og magnetiske aktivitet.

Referencer:

- [1] J. Harvey (1995), "Helioseismology", *Physics Today*, bind **48**, nr. 10 (okt.), side 32.
- [2] En populær oversigt over helioseismologi, og tilsvarende studier af andre stjerner, er givet på www.obs.aau.dk/helio_outreach/.
- [3] J. Schou *et al.* (1998) "Helioseismic studies of differential rotation in the solar envelope by the Solar Oscillations Investigation using the Michelson Doppler Imager", *Astrophys. J.*, bind **505**, side 390.
- [4] N. Calder (1997) *Den maniske Sol: en revolution i klimaforskningen*, Gyldendal.
- [5] R. Howe, J. Christensen-Dalsgaard, F. Hill, R. W. Komm, R. M. Larsen, J. Schou, M. J. Thompson og J. Toomre (2000) "Deeply penetrating banded zonal flows in the solar convection zone", *Astrophys. J.*, bind **533**, side L163.
- [6] Pressemeddelelser og anden omtale af disse resultater kan findes på www.rummet.dk, samt på soi.Stanford.EDU/press/GONG_MDL03-00/.
- [7] R. Howe, J. Christensen-Dalsgaard, F. Hill, R. W. Komm, R. M. Larsen, J. Schou, M. J. Thompson og J. Toomre (2000) "Dynamic variations at the base of the solar convection zone", *Science*, bind **287**, side 2456. Se også O. D. Gough, *ibid.*, side 2434.
- [8] O. D. Gough og M. E. McIntyre (1998) "Inevitability of a magnetic field in the Sun's radiative interior", *Nature*, bind **394**, side 755.



Jørgen Christensen-Dalsgaard, er forskningsprofessor i helio- og asteroseismologi ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet, samt vicedirektør for Teoretisk Astrofysik Center under Danmarks Grundforskningsfond.