

Solskælv, en kilde til viden om Solens indre

Jørgen Christensen-Dalsgård

Indledning

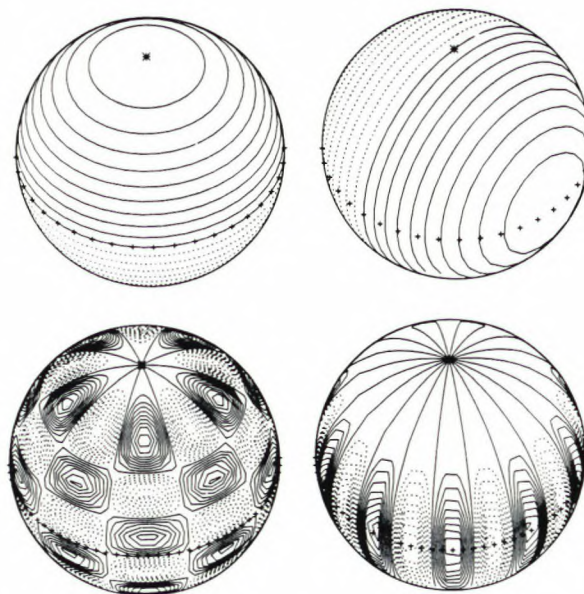
Observationer af Solens overflade viser et væld af komplicerede fænomener. Mange af dem er kontrolleret af kraftige magnetfelter, der varierer over en 11-års cyklus. Andre af Solens fænomener er mindre iøjnefaldende. Det mest slående er måske udsendelsen af en tæt strøm af neutrinoer, elementarpartikler der bliver produceret ved kernereaktioner Solens indre; disse partikler kan detekteres på Jorden, men i et antal der er markant lavere end det teoretisk forudsagte. For at forstå disse fænomener, og bestemme hvor Solens udstrålede energi kommer fra, må vi kende forholdene i Solens indre; herved får vi også en nøgle til forståelse af struktur og udvikling af andre stjerner.

Direkte betragtning af Solen fortæller ikke umiddelbart noget om, hvad der ligger under Solens overflade. En nøjere analyse af lyset fra Solen viser dog meget regelmæssige svingninger af soloverfladen, med perioder fra 3 til 15 minutter. Gennem observation over mange måneder kan svingningernes frekvens måles med stor nøjagtighed. Disse frekvenser er bestemt af forholdene i Solens indre. De kan analyseres med teknikker, der minder meget om de metoder som geofysikere bruger til at studere svingninger fra jordskælv; resultatet er en bestemmelse af lyd hastighed, massefylde og rotationshastighed i Solens indre. Dette forskningsfelt, der er udviklet inden for de sidste 10 – 15 år, kaldes *helioseismologi* (af det græske ord *helios* for Solen).

Eksisterende observationer har allerede givet væsentlig ny viden. Målinger af forholdene nær Solens centrum har stort set forkastet de hidtidige forslag til forklaring af det lave antal observerede neutrinoer ud fra egenskaber ved Solen. Bestemmelse af Solens indre rotation har lagt kraftige bånd på modeller for Solens magnetiske aktivitet. I de kommende år vil nye omfattende eksperimenter give en meget kraftig forbedring af observationerne. Satellitten SOHO, der planlægges opsendt næste år, medbringer tre helioseismiske instrumenter; et af disse vil foretage målinger, der svarer til opstilling af 700 000 seismografer på Solens overflade. SOHO vil blive placeret i en bane hvor Solen kan observeres uden afbrydelser. Med denne satellit vil vi få hidtil uset nøjagtig information om Solens indre. Det vil give ny viden om stjerners udvikling og om de fysiske forhold i stjernernes indre. Fra dansk side har der været aktiv medvirken i udviklingen af disse projekter, specielt i forbindelse med forberedelse af analysen og fortolkningen af observationerne. Danske astrofysikere vil derfor få rig lejlighed til at deltage i arbejdet med de meget omfattende data, der kan forventes inden for de næste par år.

Solsvingninger

Fysisk set er solsvingningerne meget lavfrekvente stående lydbølger. Opførslen af svingningerne hen over Solens overflade udviser bestemte bølgemønstre, svarende til kuglefunktioner Y_l^m , bestemt af graden l (det totale antal knudelinier) og den azimuthale orden m (hvor mange knudelinier der skærer polerne). Figur 1 viser nogle eksempler på sådanne kuglefunktioner. På Solen observeres en lang række forskellige opførsler, fra kuglesymmetriske svingninger, hvor hele overfladen udvider sig eller trækker sig sammen (svarende til $l = 0$) til svingninger med bølgelængder på nogle få tusinde kilometer (og l på flere tusinde).

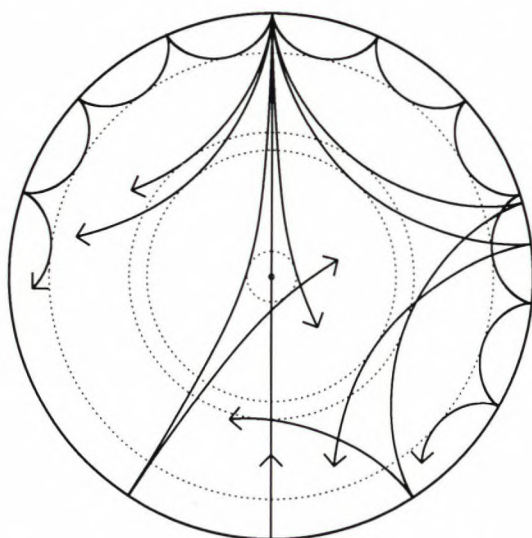


Figur 1. Kuglefunktioner der illustrerer opførslen af enkelte svingninger hen over Solens overflade. Positive udsving er markeret med fuldt optrukne konturer, negative med stiplede. Ækvator er angivet med krydser. de viste eksempler har grad l og orden m givet ved $(l, m) = (1, 0), (1, 1), (10, 5)$ og $(10, 10)$.

Svingningernes frekvenser giver information om Solens indre. For at forstå sammenhængen mellem frekvenserne og Solens struktur må vi betragte svingningernes opførsel. Solsvingningerne er analoge til de stående lydbølger i en orgelpibe. Ligesom orgelpiben har toner med bestemte frekvenser, afhængig af pibens længde, har solsvingningerne bestemte frekvenser, der afhænger af, i hvilket område af Solen svingningen udbreder sig. I Solen, som i orgelpiben, kan forekomme både grundsvingningen og overtoner; disse karakteriseres, for givet l og m , ved den radiale orden n .

I en orgelpibe skabes lyden af bevægelsen af den luft, der bliver blæst ind i piben. Det danner "støj"

med alle frekvenser og dermed bølgelængder; men kun for frekvenser svarende til bølgelængder, der passer til orgelpibens længde, sker der konstruktiv interferens, således at lydbølgen forstærker sig selv og danner en stående bølge. I Solen forekommer der gasbevægelser i de yderste ca 30 procent af Solens radius. Denne såkaldte konvektion, hvor varme gasmasser stiger til vejrs og kold gas synker ned, er ansvarlig for transporten af energi i den ydre del af Solen. Når Solens overflade når konvektionen hastigheder der er sammenlignelige med lydhastigheden; sådanne gasbevægelser er meget effektive til at generere lyd. Lydbølgerne udsendes i alle retninger og med alle frekvenser, men kun bølger med bestemte retninger og frekvenser kan danne stående bølger og bliver dermed til de observerede svingninger.



Figur 2. Udbredelsen af lydbølger i Solen. Da lydhastigheden vokser med dybden, bliver bølgerne afbøjet når de trænger ind i Solen. For en given bølge er der derfor en grænse (markeret med en stiplede cirkel) for hvor dybt bølgen når ind i Solen. En svingning af Solen er en stående bølge af denne art. Figuren viser to bølger, der når ind til lidt forskellig dybde; noget simplificeret udtrykt giver forskellen i de tilsvarende svingningers frekvenser information om det område, der ligger mellem de to tilsvarende stiplede cirkler.

Hvilke svingninger, der kan observeres, er derfor bestemt af udbredelsen af lydbølger i Solen. Her er det afgørende, at lydhastigheden vokser med temperaturen og dermed bliver større når man går ind i Solen. En lydbølge, der starter ved Solens overflade og bevæger sig indad, kommer til områder med højere lydhastighed. Som vist på Figur 2 afbøjes den derved og bliver til sidst vendt rundt og sendt tilbage mod Solens overflade. Her falder lydhastigheden brat, og det fører også til refleksion. Resultatet er, at lydbølgen udbreder sig i hop mellem Solens overflade og et niveau i Solens indre, det såkaldte *vendepunkt*, hvor bølgen bevæger sig vandret. Hvis bølgerne har den rette bølgelængde og frekvens, kan de forstærke hinanden og danne en stående bølge, ganske svarende til den stående bølge i en orgelpibe. Disse stående bølger observeres som svingninger af solover-

fladen.

Vendepunktets dybde afhænger af bølgens oprindelige retning ved Solens overflade: hvis denne retning er meget skrå, når bølgen ikke langt ned inden den bliver vendt om; den vil kun bevæge sig et lille stykke vandret, inden den når tilbage til overfladen, og svarer derfor til en svingning med lille bølgelængde. På den anden side kommer en bølge, der bevæger sig næsten lodret ved overfladen, meget langt ned inden den bliver vendt om, og den bevæger sig langt i vandret retning, inden den vender tilbage til overfladen; den svarer derfor til en svingning med stor bølgelængde. Bølger, der bevæger sig lodret, bliver ikke afbøjet og bevæger sig derfor gennem Solens centrum til overfladen på den modsatte side. De svarer til de kuglesymmetriske svingninger.

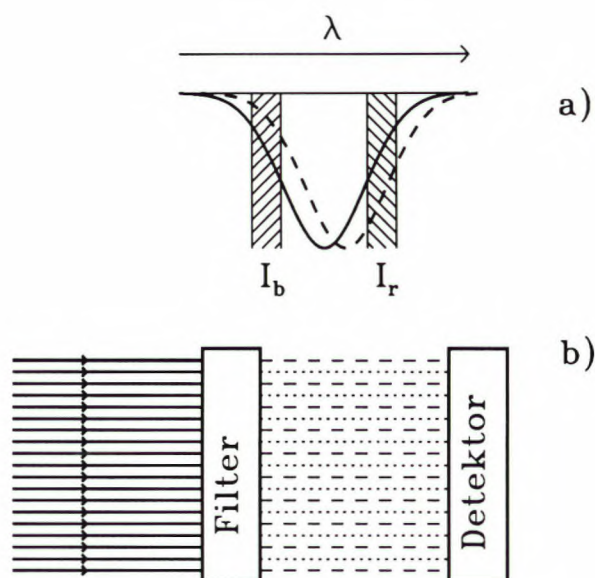
For at forstå princippet i anvendelsen af de målte frekvenser til at bestemme forholdene i Solens indre, kan vi betragte to svingninger, hvis vendepunkter ligger i lidt forskellig dybde (se Figur 2). Den ydre del af Solen er fælles for de to svingninger og påvirker derfor frekvenserne af begge svingninger; men området mellem de to vendepunkter har kun en effekt på den svingning, der trænger dybest ind. Ved at sammenholde frekvenserne af de to svingninger får man altså noget at vide om dette område. Observation af svingninger med vendepunkter, der varierer fra nær Solens overflade til nær centrum, giver derfor information om, hvordan forholdene i Solen afhænger af positionen.

Ud over de stående lydbølger har Solen mulighed for en anden type svingninger, nemlig stående indre tyngdebølger. Bølger er karakteriseret af den kraft, der forsøger at bringe stoffet i ligevægt. For lydbølger er dette den trykkraft, der opstår på grund af lokal kompression eller fortynding af gassen. Tyngdebølger (der ligner bølger på en vandoverflade) forårsager buler i lag med forskellig tæthed, og det er tyngdekraften på stoffet i disse buler der bringer stoffet tilbage mod ligevægt. Tyngdebølgerne vil have perioder der er en størrelsesorden længere end lydbølgerne. Det er endnu usikkert om sådanne svingninger rent faktisk er til stede i Solen; specielt er det uklart hvad der i givet fald skulle sætte dem i gang. Hvis de kan observeres vil det være af stor betydning for helioseismologien; for deres frekvenser er meget følsomme over for forholdene i Solens dybe indre, som kun vanskeligt kan studeres med de indtil nu observerede lydbølger.

Observation af solsvingninger

Svingningerne af Solen kan observeres ved at måle bevægelsen af Solens overflade. Det foregår som oftest i praksis ved hjælp af Doppler-effekten. Det er illustreret skematisk på Figur 3. Solspektret er afbrudt af skarpe mørke spektrallinier, der skyldes, at atomer i solatmosfæren absorberer lys ved bestemte bølgelængder, svarende til overgange mellem energiniveauer i atomerne. Når gassen bevæger sig imod eller væk fra iagttageren, forskydes spektrallinierne mod kortere eller længere bølgelængder. Det er illustreret på figuren, der viser fordelingen

af intensitet i en spektrallinie; den stiplede kurve angiver effekten af en bevægelse væk fra iagttageren. Lyset fra Solen sendes igennem et filter, der skiftevis lader lys fra snævre bølglængdeområder (markeret som skraverede intervaller) på de to sider af en spektrallinie passere. De to lysintensiteter måles i hvert punkt på Solen med et kamera. Forskellen i intensitet ændres, når spektrallinien forskydes, og giver dermed et mål for hastigheden. Ved at optage en lang række hastighedsbilleder af denne art kan man finde ud af, hvordan hastigheden i hvert punkt på Solens overflade varierer med tiden.

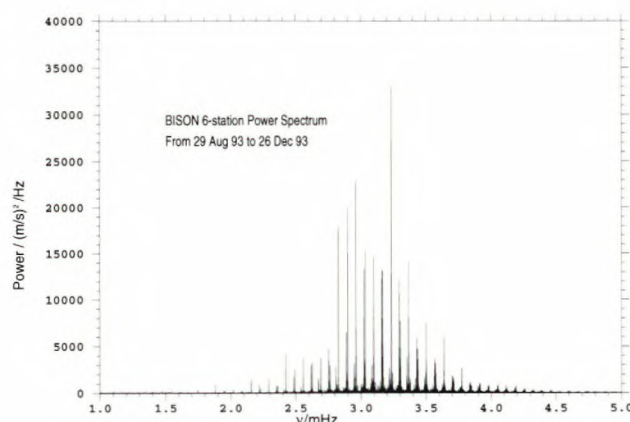


Figur 3. (a) viser princippet i måling af Doppler-hastigheden. Kurverne illustrerer intensitetsfordelingen i en spektrallinie i solspektret, som funktion af bølglængden λ . Når det område, hvor lyset kommer fra, bevæger sig væk fra iagttageren, forskydes spektrallinien til den stiplede kurve. I de to skraverede bølglængdeintervaller måles intensiteterne I_b og I_r . Forskydningen af linien ændrer forholdet $(I_b - I_r)/(I_b + I_r)$; dette forhold er altså et mål for forskydningen og dermed hastigheden. Som vist nedenfor kan målingen foretages ved hjælp af et filter, der skiftevis slipper lys svarende til I_b (stiplede linier) og I_r (prikkede linier) igennem. Lysintensiteten måles af en detektor, der kan bestemme intensiteten samtidigt i et stort antal punkter (i praksis bruges oftest en såkaldt CCD detektor); herved får man den øjeblikkelige hastighed overalt på solskiven.

Det observerede hastighedsbillede indeholder en overlejring af alle de forskellige mulige bevægelsesmønstre, svarende til de forskellige kuglefunktioner, og viser ikke umiddelbart nogen klar struktur. Ved en passende analyse kan man isolere nogle få kuglefunktioner ad gangen. Fourier-analyse af dette signal som funktion af tiden giver derefter et spektrum, hvor de enkelte svingninger kan adskilles og deres frekvenser bestemmes. Figur 4 viser et eksempel på et sådant spektrum, svarende til svingninger med meget lave grader.

De enkelte svingninger har hastigheder op til ca 10

cm/sek, svarende til udsving af soloverfladen på nogle få meter. De mest følsomme målinger har observeret hastigheder på nogle få mm/sek. Det er klart, at observation af så små effekter stiller store krav til den anvendte observationsteknik. Desuden skal de detekterede signaler sammenholdes med, at der i solatmosfæren forekommer hastigheder på flere hundrede m/sek, forårsaget af konvektionen. At svingningerne alligevel kan detekteres skyldes at de er uhyre regelmæssige: deres faser er stabile over uger eller måneder. I modsætning hertil har de andre fænomener en tilfældig natur, både hen over soloverfladen og som funktion af tiden. Ved at kombinere observationer foretaget over hele Solens overflade, og over flere måneder, undertrykker man de tilfældige fænomener, således at svingningerne træder frem.



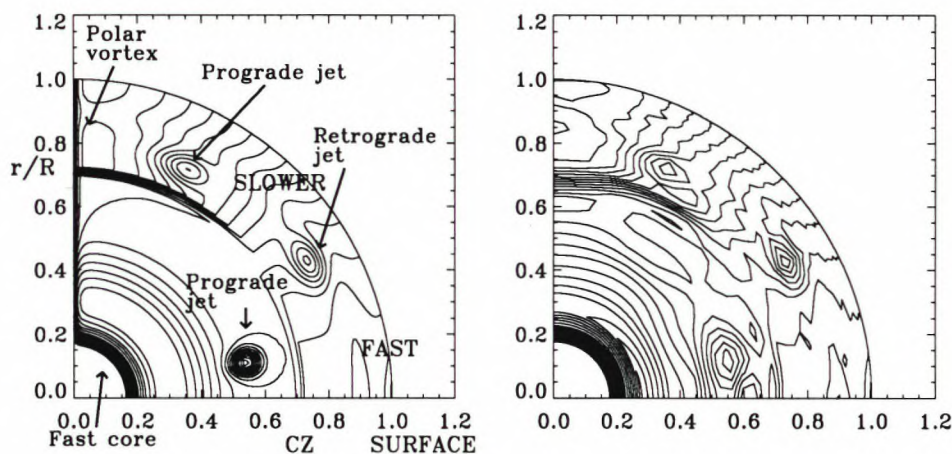
Figur 4. Spektrum af solsvingninger observeret ved hjælp af Doppler-effekten målt i lys fra hele solskiven. Målingerne stammer fra et netværk af observatorier fordelt rundt om Jorden. Hver top svarer til en enkelt svingning.

Afbrydelser i observationerne giver problemer i analyse; hvis der er et hul i observationsserien kan man, groft sagt, ikke afgøre hvor mange gange Solen har svinget i det tidsrum, hvor observationerne var afbrudt, og det giver en ubestemthed i den målte frekvens. Specielt er det et problem at observationer fra et givet sted på Jorden bliver afbrudt når Solen går ned.

Det er også muligt at studere svingningerne ved at observere dem som fluktuationer i lysintensiteten hen over solskiven. Her er effekten igen uhyre lille: hver svingning forårsager variationer i intensiteten af størrelsesordenen nogle få milliontedele. Ikke desto mindre har det været muligt at foretage nøjagtige observationer af denne art, specielt fra Solar Maximum Mission og den russiske Phobos sonde der blev sendt til Mars i 1988.

Hvad kan vi lære af de observerede frekvenser?

Solsvingningerne har givet os mulighed for at tage temperaturen på Solens indre. Uden svingningsobservationerne ville vores information om forholdene i Solen stort set



Figur 5. Test af metoder til bestemmelse af Solens indre rotation. Panel (a) viser en kunstig rotationsprofil i Solens indre, illustreret ved et konturplot i et tværsnit af Solen (kun en fjerdedel af Solen er vist; rotationen kan antages at være symmetrisk omkring ækvator). Konturerne angiver rotationsfrekvensen i nanoHz, valgt sådan at overfladeværdierne svarer til den observerede overfladerotation. I rotationsprofilen er inkluderet en række fænomener, der kunne tænkes at være tilstede i Solen, specielt tre "jets", det vil sige lokaliserede områder med særlig hurtig eller langsom rotation. Ud fra rotationsprofilen kan man beregne svingningsfrekvenser og, for at simulere realistiske observationer, inkludere "støj" beregnet som tilfældige tal med en passende fordeling. Panel (b) viser resultatet af en analyse af sådanne kunstige data, med et støjniveau svarende til hvad man kan forvente, f.eks., fra observationer fra SOHO over ét år.

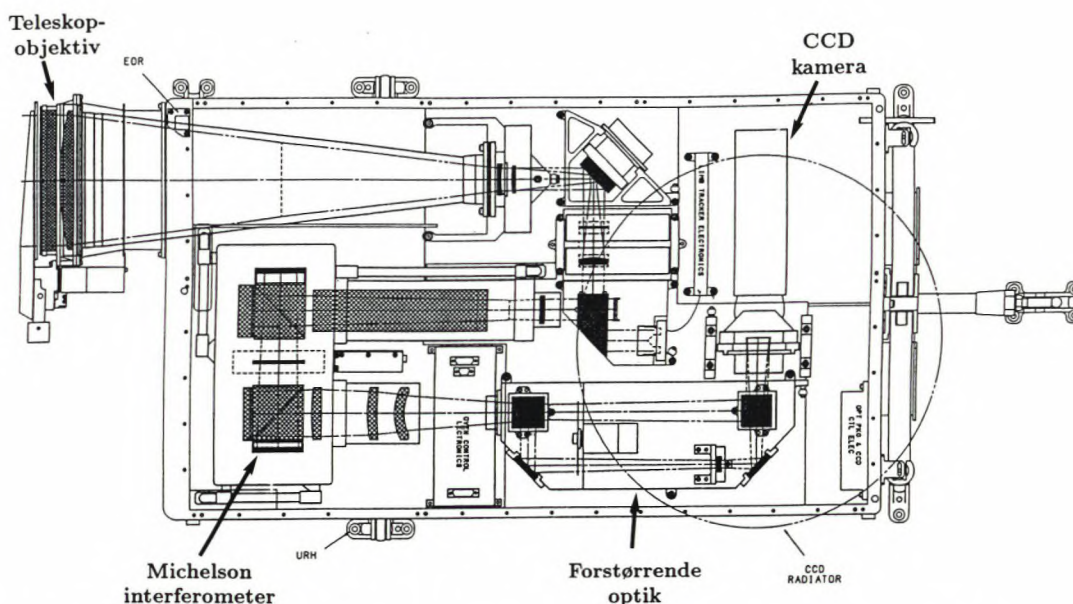
være baseret på teoretiske modeller. Beregningen af en sådan model udnytter, at man ud fra fysikkens love kan finde de betingelser, der må gælde for forholdene i det indre af en stjerne som Solen. Det fører til ligninger, der kan løses numerisk; herved kan man beregne Solens indre struktur og følge dens udvikling fra den blev dannet. Modellen involverer bl.a. beskrivelser af tilstandsligningen for stoffet i Solen, af vekselvirkningen mellem stråling og stof, og af kernereaktioner, der indgår i sammensmeltningen af brint til helium, som er ansvarlig for Solens energiproduktion. Den resulterende solmodel giver en beskrivelse af hvordan f.eks. tryk og temperatur i Solen varierer fra centrum til overfladen. I beregningerne følger man specielt de ændringer i Solens struktur, der skyldes den gradvise omdannelse af brint til helium. Beregningerne siger, at Solen i sin nuværende alder, ca 4.5 milliarder år, har opbrugt omkring halvdelen af den brint, der er til rådighed for kernereaktioner.

Hvis modellen havde været en præcis beskrivelse af Solen, ville dens frekvenser naturligvis have været de samme som de observerede frekvenser. Det er ikke tilfældet; der refter forskelle som ganske vist er små (typisk under 1 procent), men dog langt større end målefejlen. Disse frekvensforskelle, der giver en indikation af fejlene i modellen, kan analyseres med teknikker oprindeligt udviklet i geofysikken. Da de observerede svingninger er stående lydbølger, er deres frekvenser overvejende følsomme over for lydhastigheden i Solens indre. Man kan derfor ud fra forskellene i frekvenser bestemme den korrektion, der skal lægges til modellens lydhastighed, for at få lydhastigheden i Solen. På den

måde er det muligt at bestemme lydhastigheden i det meste af Solens indre med en nøjagtighed på bedre end 0.1 procent. På den anden side viser forskellen, mindre end en procent, at moderne solmodeller er ganske gode. Da der er en nøje sammenhæng mellem lydhastighed og temperatur kan vi også konkludere, at temperaturen i modellen er tæt ved den korrekte temperatur i Solen. Dette er specielt påfaldende, fordi der i modelberegningen ikke er gjort noget forsøg på at tilpasse modellen til svingningsobservationerne. Vi har altså ad rent teoretisk vej, på grundlag af kendt fysik, været i stand til at reproducere forholdene i Solens indre med stor nøjagtighed.

Der er dog stadig forskelle mellem observationer og modeller, og der er derfor ihærdige anstrengelser i gang med at fortolke dem. Disse forskelle må afspejle fejl i de fysiske antagelser, der indgår i modellen. Det er ikke overraskende: i Solen er tryk, massefylde og temperatur så ekstreme at tilsvarende forhold ikke kan reproducere i et laboratorium; vores viden om stoffets egenskaber under disse forhold er derfor mangelfuld. Et vigtigt aspekt ved de helioseismiske undersøgelser er netop at de kan afprøve fysikkens love under forhold, der ikke kan opnås på Jorden. Da der er tale om meget små effekter i de observerede frekvenser, kræver dette dog mere nøjagtige og detaljerede observationer end vi har til rådighed i dag.

Solsvingningernes frekvenser afhænger også af gasbevægelser i Solens indre, herunder Solens rotation. Det er ikke svært at se, at frekvenserne påvirkes af rotationen. Betragt svingningen længst til højre på Figur 1; i en sådan svingning bevæger bølgemønsteret sig rundt om



Figur 6. Skematisk illustration af Michelson Doppler Imager instrumentet, der skal flyve med satellitten SOHO. Lyset kommer ind i instrumentet gennem objektivet øverst til venstre, efter først at have passeret et filter der eliminerer det meste af Solens lys og varme. Efter en refleksion sendes en lille del af lyset til en detektor der sørger for at holde billedet centreret. Resten passerer ind i det egentlige interferometer. Her isoleres den ønskede spektrallinie først. Dernæst definerer interferometret skiftevis de fire spektralområder der benyttes til at bestemme liniens position og dermed Dopplerhastigheden. Efter interferometret går lyset gennem optik der tillader observation af enten hele solskiven eller en del af den. Til slut rammer lyset CCD-kameraet, hvor intensiteten måles.

Solen. Hvis udbredelsen er i samme retning som Solens rotation, vil det se ud som om svingningen går hurtigere end hvis Solen ikke havde roteret, og dermed vil svingningen have en højere frekvens; en svingning, der bevæger sig i den modsatte retning, vil tilsyneladende have en lavere frekvens. Andre gasbevægelser, der fører svingningerne med sig, vil tilsvarende påvirke frekvenserne. Generelt er gasbevægelserne ikke uniforme; deres effekt på frekvensen for en given svingning er så en passende middelværdi, vægtet med svingningens amplitude i de forskellige dele af Solen.

Ved at observere et stort antal svingninger og udnytte svingningernes egenskaber, som beskrevet tidligere (se Figur 2), kan vi bestemme hvordan rotationen varierer med dybden. Det viser sig tilsvarende at være muligt at finde variationen med bredden i Solens indre. For at illustrere de muligheder, som kommende observationer fra SOHO vi give, er det nyttigt at anvende disse teknikker på kunstige data, beregnet for en model for Solens rotation. Da Solen er en kugle af gas kan den rotere med helt forskellige hastigheder i forskellige lag. Desuden kan man forvente at vekselvirkningen med gasstrømningerne i konvektionszonen vil påvirke rotationen. Vi ved fra andre eksempler på roterende konvekter systemer, specielt de store gasplaneter Jupiter og Saturn, at det kan føre til en særdeles kompliceret opførsel. Her betragter vi en model som indeholder sådanne komplikationer, for at undersøge om de vil kunne detekteres ud fra observationer af solsvingningerne. Den antagne rotationsprofil er vist på Figur 5a.

Figur 5b viser resultatet af at analysere frekvenser beregnet for denne profil for ca 200 000 enkelte svingninger; i de beregnede frekvenser er inkluderet "støj", skønnet ud fra de forventede egenskaber ved observationer foretaget, f.eks. fra SOHO. Det er klart at vi faktisk ud fra data af denne kvalitet vil være i stand til at se selv ret fine detaljer i Solens indre rotation.

Instrumenter på SOHO

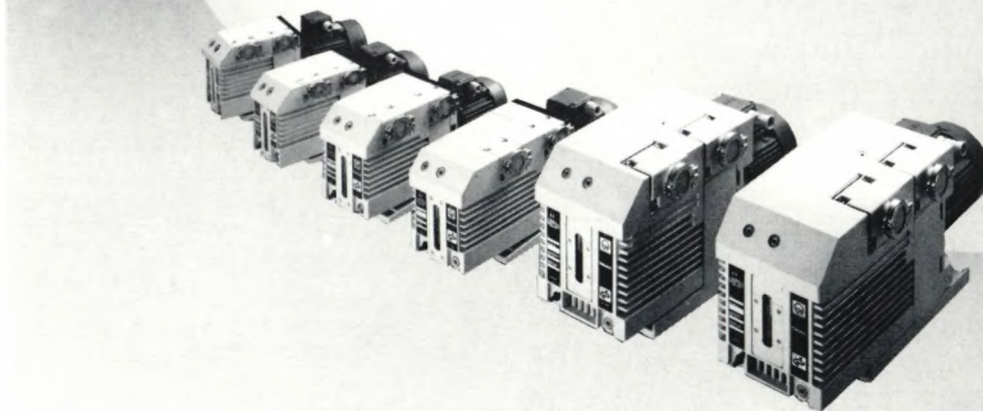
Vi har stort set nået grænsen for, hvad der kan opnåes fra enkelte observatorier på Jordens overflade: turbulensen i Jordens atmosfære forstyrrer observationerne, og observationer fra et enkelt sted på Jorden bliver uundgåeligt afbrudt af at solen går ned, eller, selv hvor det ikke er tilfældet (som f.eks. på Sydpolen hvor der faktisk er foretaget observationer af solsvingninger), af dårligt vejr. Det er muligt at minimalisere problemer med afbrydelser i observationerne ved at kombinere data fra flere forskellige observationssteder. Et ambitiøst projekt i den retning, det såkaldte GONG projekt der involverer seks optimalt fordelte stationer. GONG vil begynde at foretage observationer om ca et år. Selv i disse tilfælde sætter støj fra Jordens atmosfære en grænse for den opnåelige nøjagtighed. Disse problemer kan undgås ved observationer fra en satellit.

Satellitten SOHO (**S**olar and **H**eliospheric Observatory), et fælles projekt for de europæiske og amerikanske rumfartsorganisationer ESA og NASA, skal efter planen opsendes i juli 1995 med en amerikansk Atlas

LEYBOLD *promotes progress –*

CD Werbeagentur, Bonn

171961 11.019.02



with the well-proven rotary vane TRIVAC-B vacuum pump series.
Excellent final vacuum, integrated oil circulatory pump, high level of hydrogen compatibility, and smooth running are the TRIVAC-B pump features.

Interested? Ask your Leybold adviser.

LEYBOLD AG – A Degussa Company



Leybold ApS, Roskildevej 342, 2630 Tåstrup, Tlf. 43 99 64 44

raket. Satellittens bane er i nærheden af det såkaldte L_1 punkt (eller første Langranske punkt) mellem Solen og Jorden, i en afstand af ca 1.5 millioner kilometer fra Jorden, hvor Jordens og Solens tyngdekraft, lidt forenklet, "ophæver hinanden". Herfra er SOHO i stand til at observere Solen uden afbrydelser.

SOHO vil medføre adskillige instrumenter til at studere forholdene i Solens atmosfære og i solvinden, samt tre instrumenter til observation af solsvingninger. Her koncentrerer vi os om disse instrumenter.

GOLF instrumentet (for **G**lobal **O**scillations at **L**ow **F**requency) måler Doppler-hastigheden i lys integreret over solskiven. Det betyder, at observationerne kun er følsomme over for svingninger med meget lave grader ($l \leq 3$); for andre svingninger ophæver områder med positiv og negativ hastighed stort set hinanden. Til gengæld anvender instrumentet en speciel teknik, der definerer bølglængdeintervallerne på en uhyre stabil måde. Den er baseret på spredning af lys på en gas af natrium-damp i et stærkt magnetfelt; magnetfeltet opsplitter linierne i natrium-spektret, på grund af Zeeman effekten, og beliggenheden af disse Zeeman komponenter definerer de to bølglængdeintervaller hvor intensiteterne I_b og I_r bliver målt (se Figur 3). Denne stabilitet tillader måling af svingninger med amplituder helt ned til 1 mm/sek. En tilsvarende teknik blev brugt ved de observationer, der

førte til spektret på Figur 4. Som navnet antyder, er hensigten med instrumentet specielt at observere svingninger med lave frekvenser, ikke mindst at prøve at detektere svingninger svarende til indre tyngdebølger der, som tidligere nævnt, ville give meget præcis information om forholdene i Solens kerne.

SOI-MDI eksperimentet (for **S**olar **O**scillations **I**nvigation – **M**ichelson **D**oppler **I**mager) bruger et Michelson interferometer til at definere bølglængdeintervaller som angivet på Figur 3. Doppler-hastigheden bliver bestemt ved en passende kombination af intensiteten svarende til fire intervaller, og målingen foregår ved skiftevis at måle intensiteten i de fire intervaller. Intensiteten bliver registreret med et kamera, der dækker hele solskiven med en opløsning på 1024×1024 billedelementer. Der er hjørner med på billedet så hvert hastighedsbillede giver ca 700 000 samtidige målinger af hastigheden på Solens overflade. For en geofysiker ville det svare det til at have 700 000 seismografer på jordoverfladen. Den høje opløsning gør det muligt at observere svingninger med grader op til ca $l = 1000$, svarende til en bølglængde for svingningen på soloverfladen på nogle få tusinde kilometer. Disse svingninger er meget svære at observere fra jordoverfladen på grund af lufturoen. – En skitse af instrumentet er vist på Figur 6.

Det er værd at bemærke at dette instrument vil produ-

cere meget store datamængder: et hastighedsbillede med en million billedelementer hvert minut, i to til seks år. Her giver SOHOs placering i L_1 punktet faktisk problemer, da den relativt store afstand til Jorden begrænser data-overførselshastigheden. Det er dog planen at have adgang til NASAs Deep Space Network i en eller flere to-måneders perioder om året; i disse perioder kan den fulde datamængde sendes ned, hvorimod man i den resterende del af tiden må foretage en vis reduktion af data på satellitten.

Som diskuteret tidligere er svingninger med korte bølgelængder fanget nær Solens overflade. Resultaterne fra SOI-MDI vil derfor give meget detaljeret information om strukturen og ikke mindst gasbevægelserne i de ydre dele af Solens konvektionszone.

VIRGO eksperimentet (for Variability of solar IRradiance and Gravity Oscillations) måler Solens udstråling, dels den samlede udstråling, dels delt op på et mindre antal områder passende fordelt hen over solskiven. Som navnet antyder er det håbet at denne type observation vil være mere følsom over for de indre tyngdebølger (på engelsk: gravity oscillations) end Doppler målingerne. Desuden vil observationerne supplere målingerne af Doppler hastigheden og bl.a. give information om svingningernes opførsel i Solens atmosfære.

Det er indlysende at SOHO vil give os et væld af nye oplysninger om vores nærmeste stjerne. Men Solen er kun en enkelt blandt utallige stjerner med mange forskellige egenskaber. Lyset fra andre stjerner er blevet analyseret

på samme måde. Tyngdebølger er blevet observeret i hvide dværge og har ændret vores opfattelse af deres sammensætning. Det nyeste resultat, der har vakt opsigt, er observation af søllignende svingninger i η -Bootis, ca 30 lysår fra Solen. Observation af søllignende svingninger er dog meget krævende, på grund af svingningernes lave amplituder. Selv om det er muligt at observere fra jordoverfladen vil detaljerede data for et større antal stjerner vil kræve rumbaserede observationer. ESA er for tiden i færd med at evaluere satellitprojektet STARS (for Seismic Telescope for Astrophysical Research from Space), der vil foretage omfattende observationer af stjernessvingninger. Resultaterne herfra vil i givet fald kunne give helt ny viden om stjerners udvikling, af stor betydning for brede områder af astrofysikken.



Jørgen Christensen-Dalsgaard er Ph.D fra Cambridge University. Han leder nu Aarhus-afdelingen af Teoretisk Astrofysik Center under Danmarks Grundforskningsfond.

MODERNE VAKUUMTEKNIK TIL FORSKNING OG INDUSTRI



ALCATEL 2-trins pumpers succes giver uændrede priser i 1993.

Type	Kapacitet m ³ h ⁻¹ nominel/Pneurop	Sluttryk hPa (mbar) partial/total/+gasballast	Pris kr. excl. moms
2002	2,0 / 1,7	<2x10 ⁻³ / <5x10 ⁻³ / <2x10 ⁻²	8.075,-
2005	5,4 / 4,8	<1x10 ⁻⁴ / <2x10 ⁻³ / <1x10 ⁻²	12.550,-
2010	9,7 / 8,5	<1x10 ⁻⁴ / <2x10 ⁻³ / <1x10 ⁻²	14.500,-
2015	15,0 / 12,5	<1x10 ⁻⁴ / <2x10 ⁻³ / <1x10 ⁻²	15.850,-
2021	20,7 / 16,5	<1x10 ⁻⁴ / <2x10 ⁻³ / <1x10 ⁻²	19.450,-
2033	35,0 / 30,0	<1x10 ⁻⁴ / <3x10 ⁻³ / <6x10 ⁻³	25.500,-
2063	65,0 / 60,0	<2x10 ⁻⁴ / <3x10 ⁻³ / <6x10 ⁻³	39.650,-
2100	120,0 / 105,0	<2x10 ⁻⁴ / <3x10 ⁻³ / <6x10 ⁻³	83.775,-

* robuste * tryksmurte * støjsvage * indbygningsvenlige * specialudførelser for korrosive gasser * reservedele og service i DK.

ALLE FORMER FOR OLIEFRI & OLIESMURTE ROTATIONSVAKUUMPUMPER • FEDTSMURTE TURBOMOLEKULAR- SPIRO- & HYBRIDPUMPER • DIFFUSIONS- & CRYOPUMPER • VAKUUMMÅLEINSTRUMENTER, VENTILER, HV & UHV FITTINGS • HELIUMLÆKSØGERE & MASSESPEKTROMETRE • SPUTTER- ELEKTRONKANON- & ÆTSEANLÆG • RF & HV STRØMFORSYNINGER • RUSTFRI SPECIALKAMRE & DELE • OMBYGNING AF VAKUUMANLÆG

WENZEL VAKUUM TEKNIK APS NYBROVEJ 283 DK-2800 LYNGBY TLF 45 87 97 35
SHOWROOM, SERVICE, LAGER NYBROVEJ 193 BIL 30 42 63 00 FAX 45 93 32 93