

Seismiske undersøgelser af solpletter

Jesper Munk Jensen, Teoretisk Astrofysik Center, Dammarks Grundforskningsfond, og Geologisk Institut, Aarhus Universitet

I sidste nummer af KVANT beskrev Jørgen Christensen-Dalsgaard, hvorledes man ved hjælp af helioseismologi er blevet i stand til at undersøge Solens indre. Han viste resultater, der beskrev Solens indre rotation, og hvorledes ændringer i denne kunne hænge sammen med Solens magnetiske cyklus (denne artikel bliver herefter omtalt som JCD). De metoder, der blev beskrevet, brugte målinger af Solens egensvingningsfrekvenser som data. Disse datas globale natur gør det umuligt at opløse fænomener der er meget lokaliserede i Solen. I løbet af halvfemserne er der dukket flere forskellige metoder op, der gør det muligt at undersøge mere lokale fænomener såsom solpletter, konvektionsstrømme og nord-syd-gående strømme i Solens indre. Disse metoder er blevet kendt som lokal helioseismiske metoder og omfatter bl.a. helioseismisk tomografi og helioseismisk holografi [1]. Begge disse metoder gør det muligt at undersøge solpletter på helt nye måder, og kan dermed hjælpe til en bedre forståelse af disse fænomener. Solpletter er, som beskrevet i JCD, vigtige for forståelsen af Solens dynamiske indre, og kan muligvis også have en direkte indflydelse på Jordens klima. Derudover findes der andre mere voldsomme fænomener, der også stammer fra Solens magnetiske aktivitet. Nogle magnetisk aktive områder udvikler sig til voldsomme flares eller CME (Coronal Mass Ejection). Disse begivenheder kan være så voldsomme at satellitter kan gå tabt og strømforsyninger på Jorden blive påvirket. De kan også give anledning til ekstra smukt nordlys på Jorden som beskrevet af Sven Ove Thimm i sidste nummer af KVANT. Derfor er en bedre forståelse af disse fænomener og en mulig forudsigelse af dem af stor interesse.

Helioseismisk tomografi

Helioseismisk tomografi minder metodemæssigt om medicinsk tomografi, hvor man ved hjælp af forskellige målinger kan rekonstruere et snit gennem hjernen. For at kunne lave en tomografisk rekonstruktion af forholdene i Solen er det nødvendigt at være i stand til at måle løbetider for bølger, der udbreder sig i Solens indre [2]. Figur 3 i JCD viser strålebaner for forskellige lydbølger der udbreder sig i Solens indre. Løbetiderne for disse bølger kan beregnes ved at sammenligne de observerede svingningsmønstre i forskellige punkter på Solens overflade. Hvis et svingningsmønster, der er observeret i et punkt, senere gentager sig i et andet punkt, giver tidsforskydningen mellem disse to svingningsmønstre bølgens løbetid mellem de to punkter [3]. Mere præcist gøres dette ved at udregne kryds-

korrelationen mellem svingningsmønstrene som:

$$\Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \tau) = \int_0^T f(\mathbf{r}_1, t) f(\mathbf{r}_2, t + \tau) dt \quad (1)$$

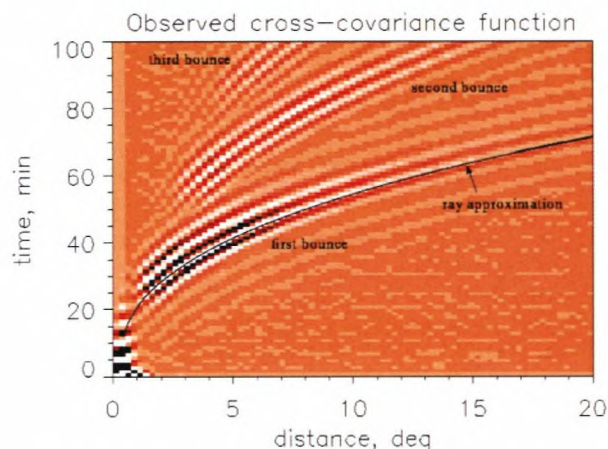
hvor $\mathbf{r}_1$ og $\mathbf{r}_2$ er to punkter på Solens overflade, $f(\mathbf{r}, t)$ er det observerede svingningsmønster i $\mathbf{r}$, t er tiden, T er den totale observationstid og τ er tidsforskydningen mellem de to signaler. Disse kryds-korrelationer giver såkaldte solseismogrammer der minder meget om de seismogrammer man kender fra målinger af jordskælv. Et eksempel på et sådant solseismogram er vist i figur 1. Dette solseismogram er beregnet ved at summere over punkter med samme indbyrdes afstand for at forbedre signal-støj forholdet. I seismogrammet ses tre rygge hvor den første svarer til den refrakterede bølge og de to næste til bølger, der er blevet reflekteret henholdsvis en og to gange ved overfladen.

Selseismogrammet i figur 1 er midlet over hele solskiven, hvilket vil sige at mere lokale strukturer er midlet væk. Seismogrammet skulle således stemme fint overens med de modeller man har for Solens indre struktur. Dette er illustreret ved at der er vist en løbetidskurve beregnet i stråleapproximationen for en standard solmodel. Denne løbetidskurve stemmer fint overens med den refrakterede bølge. Man kan ved at se på afvigelser fra denne standard løbetidskurve undersøge afvigelser fra standard solmodellen såsom strømme og anomale lydhastighedsvariationer. Ved at måle løbetidsafvigelser for bølger der bevæger sig hver sin vej langs en strålebane er det muligt at separere effekten af strømninger og lydhastighedsvariationer. Middelværdien af løbetidsafvigelserne vil kun være følsom overfor lydhastighedsvariationer, mens differencen vil være følsom over for strømninger. For middelværdien af afvigelserne fåes

$$\overline{\Delta\tau}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \frac{1}{2}(\Delta\tau^+ + \Delta\tau^-) = \int_{\Gamma_0} \frac{\delta c}{c_0^2} ds \quad (2)$$

hvor integralet er et kurveintegral langs Γ_0 , der er den strålebane der forbinder $\mathbf{r}_1$ og $\mathbf{r}_2$ i referencemodellen. Desuden er δc lydhastighedsperturbationen og c_0 er en standardmodel for lydhastigheden. Endelig er $\Delta\tau^+$ og $\Delta\tau^-$ løbetidsvariationerne for bølger der løber i modsatte retninger langs Γ_0 . Ligesom ligning (1) fra JCD er ligning (2) et eksempel på et inverst problem. Vi kender $\overline{\Delta\tau}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ for mange forskellige konfigurationer af $\mathbf{r}_1$ og $\mathbf{r}_2$, og ønsker ud fra disse at bestemme δc . Dette kan gøres ved hjælp af såkaldte inverse metoder, der er kendte fra geofysikken. Disse metoder gør det

muligt at opstille den model, der bedst tilfredsstiller data samtidigt med, at det er en fysisk rimelig model.



Figur 1. Solseismogram der viser ankomsten af den refrakterede bølge samt bølger der er blevet reflekteret en og to gange ved overfladen (fra [4]).

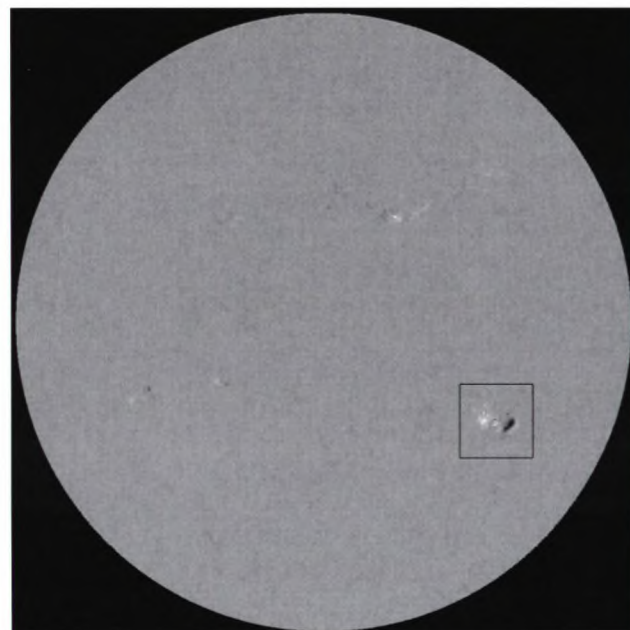
Lydshastighedsvariationer under solpletter

De ovenfor beskrevne metoder er blevet brugt til at undersøge lydshastighedsstrukturer under solpletter. Hvis der er et magnetfelt til stede i Solens indre kan vi forvente en relativ lydshastighedsperturbation på

$$\frac{\delta c}{c} = \frac{B^2}{4\pi p} \quad (3)$$

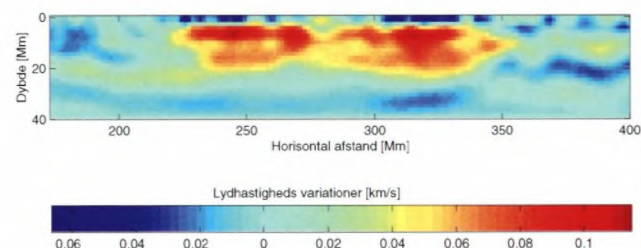
hvor B er magnetfeltstyrken og p er trykket. En solplet forventes derfor at påvirke de målte løbetider, og det er muligt ud fra lydshastighedsvariationerne at sige noget om magnetfeltet i solpletten. I figur 2 er afbildet et magnetogram der viser de aktive områder på Solen. Der ses både lyse og mørke områder, der svarer til områder med modsat magnetisk polaritet. I de lyse områder bryder magnetfeltlinierne op gennem soloverfladen, mens de i de mørke områder dykker tilbage under overfladen. Området, der er markeret i nederste højre hjørne, er et område, hvor der er målt løbetider ved hjælp af den ovenfor nævnte korrelationsmetode og 8 timers data fra SOHO satellitten. Disse løbetider er så blevet inverteret, og en del af resultatet er vist i figur 3 som et tværsnit gennem det aktive område [5].

Her ses, at der under solpletter findes lydshastighedsstrukturer, der strækker sig ned til 20.000 km under Solens overflade. Dette stemmer godt overens med at strukturerne skyldes et magnetfelt med konstant styrke. Den relative lydshastighedsperturbation på grund af et sådant magnetfelt vil ifølge ligning (3) blive mindre med dybden eftersom trykket stiger. Den relative lydshastighedsperturbation vil således på et tidspunkt blive for lille til at kunne observeres, selv om magnetfeltet stadig er tilstede. Forhåbentlig vil forbedringer i måle- og analyse-metoder gøre det muligt at følge magnetfelterne endnu dybere. Vi ser på figur 3 at lydshastighedsvariationerne under begge



Figur 2. Magnetogram optaget den 16 Januar 1998 med MDI instrumentet ombord på SOHO satellitten. Det aktive område, der er blevet undersøgt, er markeret med en sort kasse

solpletter er positive, selvom figur 2 viser at de har forskellig polaritet. Dette svarer til at det kun er styrken af magnetfeltet der indgår i ligning (3), mens fortegnet ikke spiller nogen rolle. Det er altså ikke muligt at opløse om feltlinierne bryder op gennem overfladen eller dykker ned igennem den. Håbet er at i fremtiden vil lignende metoder være i stand til at kunne se aktive regioner, inden de dukker op til overfladen og det vil så være muligt at kunne advare mod kraftige udbrud fra Solen i bedre tid.

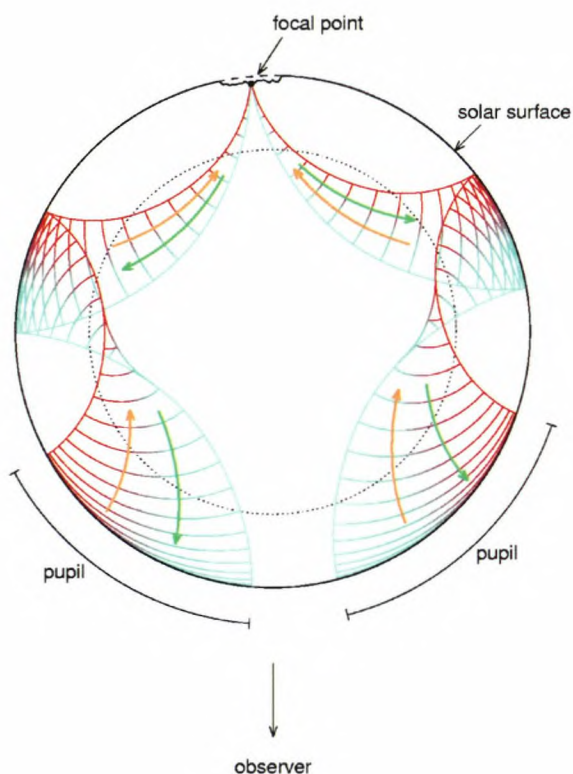


Figur 3. Tværsnit ved konstant breddegrad gennem det aktive område, der er markeret i figur 2. Afstande er i Megameter og farvekoden viser lydshastighedsvariationer i km/sek.

Helioseismisk holografi

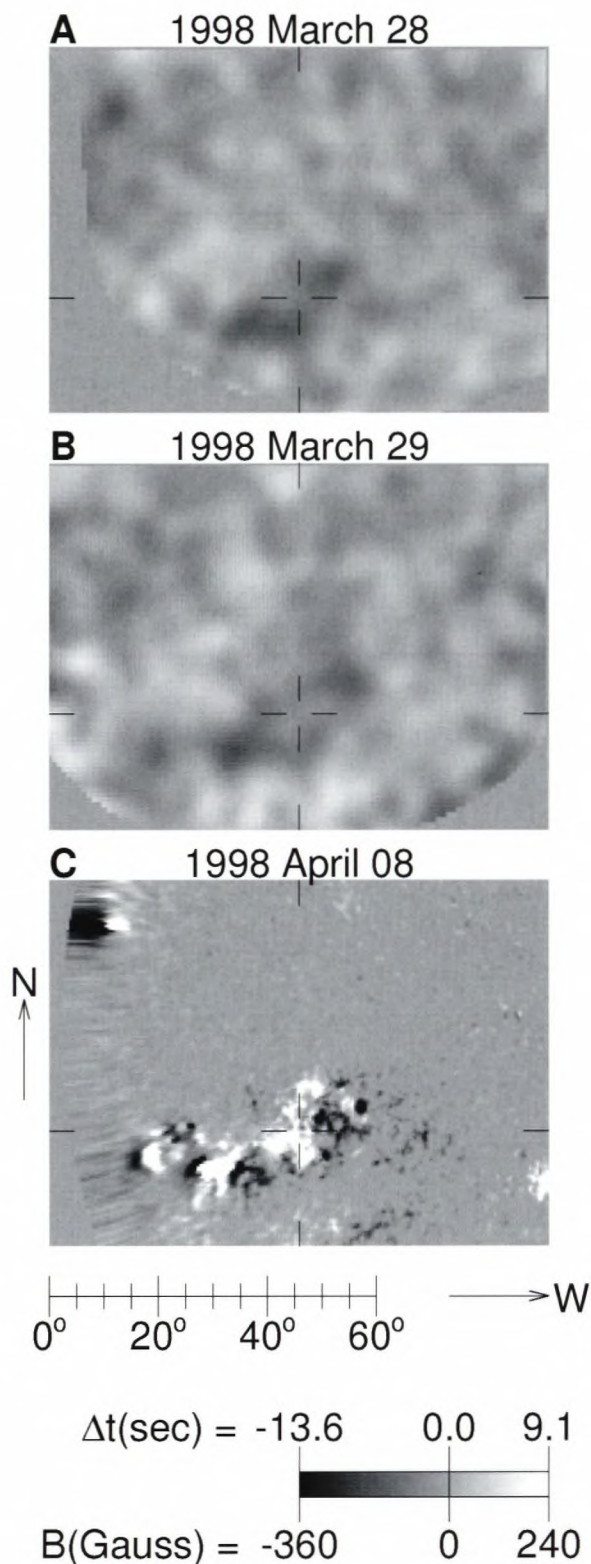
En anden lokal helioseismisk metode er helioseismisk holografi, der har fået sit navn, fordi den minder om den måde, hvorpå øjet fungerer [6]. Metoden går ud på at føre de svingningsmønstre, der observeres ved overfladen tilbage til et fælles fokuspunkt. De svingningsmønstre, der bruges, kommer alle typisk fra et ringformet område på overfladen af Solen der kaldes pupillen. Fokuspunktet befinder sig i midten af området under soloverfladen eller evt. på den anden side af Solen. Ud fra viden om lydbølgernes udbredelse er det

så muligt at beregne et mål for det udgående bølgefelt fra fokuspunktet, kaldet egressionen. Ligeledes er det muligt at beregne et mål for det indkommende bølgefelt i fokuspunktet, kaldet ingressionen. I figur 4 er vist løbebaner for bølger, der bruges til beregning af egressionen (repræsenteret ved de grønne pile) og ingressionen (repræsenteret ved de gule pile) for et fokuspunkt på Solens bagside. En eventuel løbetidsperturbation, Δt , der skyldes en lydhastighedsanomali i fokuspunktet, kan så findes ved at korrelere egressionen og ingressionen og dermed finde en mulig tidsforskydelse mellem de to.



Figur 4. Strålegange for de bølger der er blevet brugt til at undersøge solens bagside for solpletter (gengivet med tilladelse fra [7]). ©American Association for the Advancement of Science

Ved hjælp af helioseismisk holografi lykkedes det for C. Lindsey og D. C. Braun at observerede et aktivt område på Solens bagside [7]. Dette resultat blev omtalt i sidste nummers KVANT-nyheder. De brugte 24 timers tidsserier af SOHO data til lave helioseismisk holografi på Solens bagside, ved hjælp af den konfiguration, der er illustreret i figur 4. Ved at flytte pupillen rundt kunne de flytte fokuspunktet og således afsøge hele Solens bagside. Herved var det muligt at lave et billede af et aktivt område på Solens bagside mere end en uge før området var synligt på forsiden. Figur 5A viser dette billede, hvor det aktive område viser sig med en løbetidsanomali på ca. 6 sek. På figur 5B ses resultatet af at gentage beregningerne 24 timer senere. Det aktive område har nu flyttet sig et stykke, der svarer til



Figur 5. A og B: Billeder af løbetidsperturbationen, Δt , på solens bagside med 24 timers mellemrum. C: Magnetogram der viser den aktive region, efter den er dukket frem på den synlige side af Solen (fra NSO/Kitt Peak observatoriet). Sigtekornene i billederne følger Solens rotation. Alle billeder er Postel projektioner centeret på sigtekornet (gengivet med tilladelse fra [7]). ©American Association for the Advancement of Science

Solens rotation. Figur 5C viser et magnetogram af den aktive region 10 dage senere, efter at den er dukket frem på Solens forside. Det ses, at den aktive region viser sig præcist, hvor lydhastighedsanomalien blev fundet på bagsiden.

Evnen til at se kraftige aktive områder inden de dukker op på Solen forside, kan gøre det muligt at varsle magnetiske storme endnu tidligere, end man kan i dag. Dette kan få betydning for astronauter og kommunikationssatellitter, da disse er følsomme overfor meget kraftige magnetiske storme.

Fremtiden

Med fremkomsten af de nye lokal helioseismiske metoder er det blevet muligt at lave mere detaljerede studier af strukturer og dynamik i Solens konvektionszone, end det tidligere har været. Studiet af solpletter er blandt de mest lovende anvendelsesområder for disse nye teknikker, og forhåbentlig kan de medføre en øget forståelse af den magnetiske aktivitet i Solen. Begge de metoder, der er blevet omtalt her i artiklen, har potentialet til ikke blot at øge forståelsen af Solens indre, men også hjælpe med at forudsige de magnetiske storme, der kan være til gene for bl.a. rumfarten.

Referencer:

- [1] For en gennemgang af de forskellige lokal helioseismiske metoder se T. Duvall (1998) "Recent results and theoretical

advances in local helioseismology. I: *Structure and Dynamics of the Interior of the Sun and Sun-like Stars*, ESA SP-418, side 581.

- [2] A. G. Kosovichev (1996) "Tomographic imaging of the Sun's interior", *Astrophys. J.*, bind 461, side L55.
 [3] T. L. Duvall m.fl. (1993) "Time-distance helioseismology", *Nature*, bind 362, side 430.
 [4] T. L. Duvall m.fl. (1997) "Time-Distance Helioseismology with the MDI instrument: Initial results", *Solarphysics*, bind 170, side 63.
 [5] Korrelationsanalyse er udført af Tom Duvall ved Stanford universitet, mens den inverse analyse er udført af forfatteren.
 [6] C. Lindsey og D.C. Braun (1997) "Helioseismic Holography", *Astrophys. J.*, bind 485, side 895.
 [7] C. Lindsey og D.C. Braun (2000) "Seismic Images of the Far Side of the Sun", *Science*, bind 287, side 1799.



Jesper Munk Jensen, er Ph.D. studerende ved Teoretisk Astrofysik Center i Aarhus i samarbejde med Geofysisk Afdeling under Geologisk Institut, Aarhus universitet. Han arbejder med anvendelsen af geofysiske metoder til at lave tomografiske rekonstruktioner af forholdene i Solen konvektions zone.

KUPON (kan fotokopieres). Se vejledningen side 30.

Navn: _____
 Stilling: _____
 Adresse: _____
 Postnr. og by: _____
 Telefon: _____
 E-mail: _____

Jeg er ☐ under uddannelse ☐ pensionist

Jeg ønsker

- ☐ abonnement på Kvant
☐ medlemsskab af AS
☐ medlemsskab af DFS
☐ medlemsskab af DGF
☐ medlemsskab af SNU

Ved DFS-medlemsskab: Angiv evt. ønske om tilknytning til sektionerne for:

- ☐ atomfysik
☐ faststoffysik
☐ uddannelse og undervisning
☐ netværk for kvinder i fysik (KIF)



Sendes ufrankeret
 Modtageren
 betaler portoen

KVANT
Ørsted Laboratoriet
Universitetsparken 5
+++ 1385 +++
2100 København Ø