

Vor magnetiske sol

Af Søren Bertil Fabricius Dorch, Syddansk Universitet og Sven Ove Thimm, Hjørring Gymnasium

Solen kan være meget aktiv med voldsomme udbrud. Til andre tider sløv og rolig. Hvad er egentlig solaktivitet, hvordan opstår de store variationer, og hvad kan vi forvente i den nære fremtid?

Solen er som bekendt en enorm kugle af "gas" (70 % hydrogen og 28 % helium), som i det indre består af et plasma af fuldstændigt ioniserede atomer. I centrum, hvor temperaturen er $15,7 \cdot 10^6$ K, produceres energi ved fusionsprocesser, der transporteres relativt langsomt ud som fotoner. Cirka tre-fjerdedele af vejen ud til Solens "kølige" overflade starter en konvektionszone, fordi atomer begynder at rekombinere, hvilket medfører større absorptionsevne, så fotonerne ikke mere kan klare transporten af energi alene. Stoffet bliver turbulent og konvektion opstår, hvilket observeres på overfladen som en grynet struktur, granulation. Temperaturen er dog stadig høj nok til, at atomer hele tiden ioniseres, for senere igen at rekombinere. I dette turbulente mix af atomer og ioner, og deres elektriske og magnetiske felter, foregår de processer, vi kalder "solkaktivitet".



Figur 1. Solen i synligt lys den 23-10-2013. Figur 5 og 7 er fra samme dato [1].



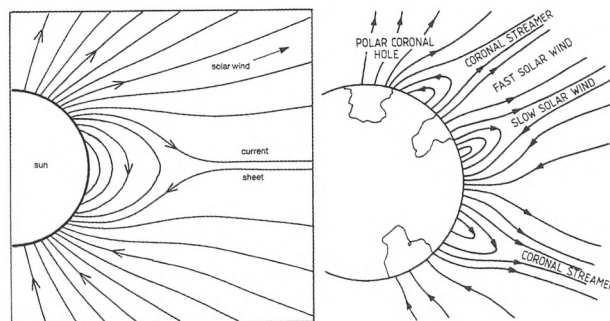
Figur 2. Ved en total solformørkelse, som her i august 1999 [2], bliver koronaen synlig.

Magnetfelt og solaktivitet

Den solskive, vi ser på himlen, kaldes fotosfæren (se figur 1); den er ikke en egentlig fysisk overflade, men

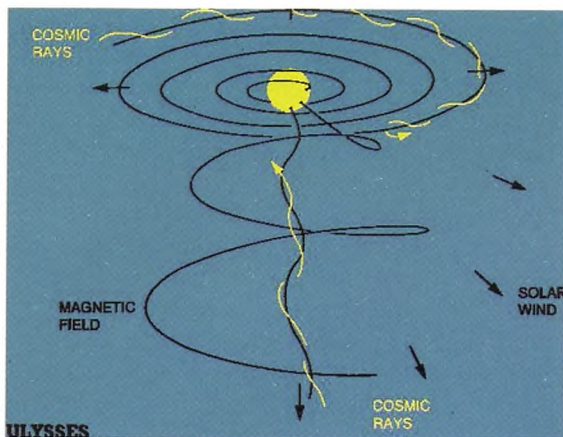
lyset kommer fra et område med en tykkelse på nogle få hundrede km. Under en total solformørkelse kan man se et tyndt lag ovenover fotosfæren, kromosfæren, med en flot rødlig farve, som også er farven på de protuberanser, der rager ud i koronaen, der ses som en glorie af lysende gas (se figur 2).

Temperaturen aftager op gennem fotosfæren og når et minimum på ca. 4000 K, hvorefter den stiger lidt i kromosfæren, for så pludseligt at stige voldsomt til flere millioner grader i koronaen, hvilket bevirker en høj grad af ionisering af stoffet og en ekspansion af plasmaet ud i Solsystemet som en "solvind". Protuberanser er fortætninger af stof, der holdes på plads af magnetfelterne, og de har en temperatur, der er tilstrækkelig lav til, at en del af koronaens brint også optræder på atomar form. Spektralfordelingen for fotosfæren følger med god tilnærmelse en Planck-kurve med $T_{\text{eff}} = 5770$ K, men lysets passage gennem koldere lag af fotosfæren sikrer dannelse af utallige absorptionslinjer, der giver os informationer om de fysiske forhold, herunder styrken af magnetfeltet ved hjælp af Zeeman-effekten.



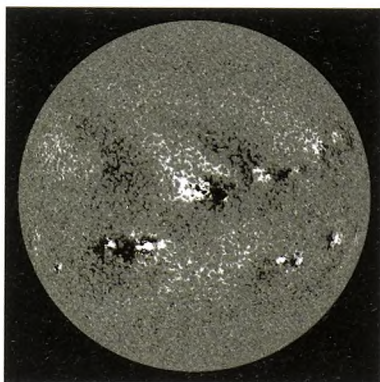
Figur 3. Det interplanetariske magnetfelt ("Interplanetary Magnetic Field"), forkortet IMF, ved henholdsvis lav [3] og høj [4] solaktivitet.

Solens magnetfelt består både af lokale, lukkede felter og af et stort åbent felt, der i gennemsnit er et dipolfelt; feltet breder sig ud i Solsystemet som et interplanetarisk magnetfelt (IMF, se figur 3) med spiralform på grund af Solens rotation (Parker-spiralen, se figur 4). Feltstyrken ved Jordens afstand har typisk en størrelse på 5 nT, men variationerne er store. I et lag ved overgangen mellem de to områder med modsat rettet felt induceres en strøm i solvindens ioner. Dette lag er ikke så pænt som på den hosstående figur, men bugter sig ofte op og ned, så Solens rotation får IMF til ofte at skifte retning ved Jorden, hvilket bevirker geomagnetiske forstyrrelser.



Figur 4. Parker-spiralen [5].

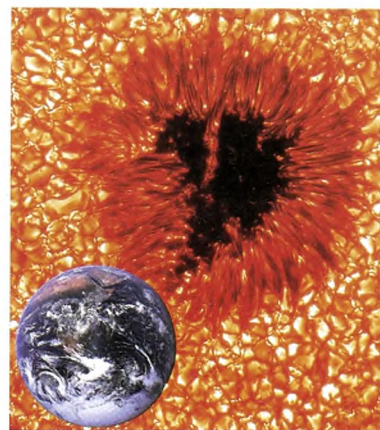
Det åbne magnetfelt hænger sammen med solvinden. På grund af Lorentz-kraften kan en ladet partikel ikke bevæge sig på tværs af et tilstrækkeligt stærkt magnetfelt, men udfører en cirkelbevægelse eller spiralbevægelse omkring en feltlinje. Et stærkt og lukket magnetfelt vil således kunne fastholde et plasma i en "magnetisk flaske". Hvis omvendt plasmaet dominerer, vil det kunne fastfryse magnetfeltet og føre det med sig. Et populær visualisering er at betragte en magnetisk feltlinje som en elastik, der kan trækkes med plasmaet. Ved Jorden "blæser" solvinden typisk med en hastighed på 400 km/sek. Tætheden er dog nu kun nogle få partikler pr. cm^3 . Ofte ses områder med stor lysstyrke i koronaen nær Solen, hvilket skyldes, at stærke, lukkede magnetfelter kan opsamle en stor mængde plasma. Hvor feltet er åbent, vil partiklerne kunne strømme ud med stor hastighed (700-800 km/s), og stoftætheden udtyndes.



Figur 5. Magnetogram. Hvid er positiv og sort negativ polaritet [1].

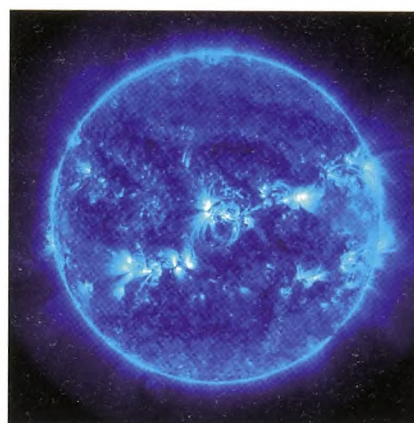
Et overblik over magnetfelterne på Solens overflade ses på et "salt og peber"-magnetogram (se figur 5), hvor "salt" er positiv polaritet (magnetisk nordpol) og sort "peber" er negativ. Vi vil bruge disse gloser for ikke at forveksle med geografiske stedsbetegnelser. Det meste af overfladen er dækket af svage, diffuse felter, men i flere områder er der kraftige dipolære koncentrationer. Det er de stærke, lukkede felter (0,2-0,4 T), hvor der dannes solpletter, da magnetfelterne hæmmer energitransport ved konvektion, sådan at temperaturen falder. Bemærk, at polariteten af dipolerne er den samme for

alle dipoler på henholdsvis den nordlige og sydlige halvkugle, men forskellig på de to halvkugler. Solpletterne består af en mørk umbra, omgivet af en lysere penumbra (se figur 6). Magnetfeltet er lodret i umbraen, men bøjer stærkt ved kanten og er næsten vandret i penumbraen. Omkring solpletterne ses ofte lyse områder i fotosfæren, som kaldes "fakler". Den kraftige magnetiske aktivitet bevirker en generel opvarmning af atmosfæren ovenover solpletterne, hvilket også fører til en kraftig stråling i UV lys. Generelt benævnes sådanne områder på Solen derfor "aktive områder".



Figur 6. Nærbillede af solplet med Jorden indsat som målestok. Fra det svenske solteleskop på La Palma [6].

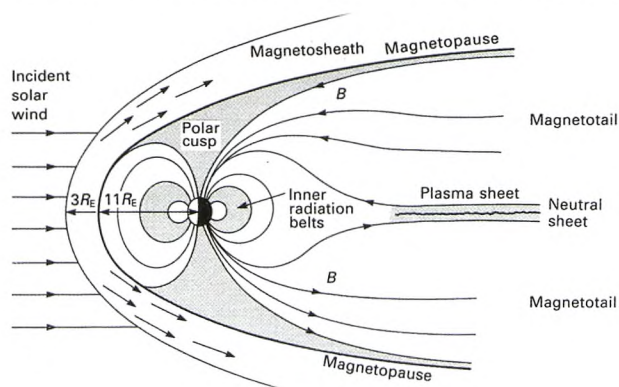
Overfladen er højst dynamisk, således at modsat rettede magnetfelter kan mødes og udligne hinanden, hvilket frigør den magnetiske energi (magnetisk "reconnection") i et udbrud (en "flare"), der medfører udsendelse af stråling i hele det elektromagnetiske spektrum og kraftig acceleration af ladede partikler, især protoner, der ofte vil kunne nå Jorden på få timer. Sammenbrud af magnetfeltet vil også kunne betyde, at en stor opsamling af stof i koronaen ikke mere kan fastholdes og bliver slynget ud i rummet sammen med sit fastfrosne magnetfelt (en koronal masseudkastning, CME). Da en CME bevæger sig meget hurtigere end den almindelige solvind, vil der danne sig en chokbølge i rummet, der kan nå Jorden på få døgn. Utallige små flares ("nanoflares") kan også være årsagen til den høje temperatur af koronaen. Varmen fra fotosfæren med sine kun 6000 K kan jo ikke gøre det.



Figur 7. Solen i ekstrem UV (17,1 nm). Kunstigt pålagt farve [1].

Satellitter, fx SOHO, har givet mulighed for at studere Solen i UV, bl.a. fra ioniserede jernatomer ved overgangen mellem kromosfæren og koronaen (se figur 7). Excitering sker ved hjælp af energirige elektroner fra de aktive områder, der vil følge de magnetiske feltlinjer, som derved bliver synlige som løkker, analogt til synliggørelsen af magnetfeltet omkring en stangmagnet ved hjælp af jernspåner. Også flares kan forårsage flotte løkker.

Jordens magnetfelt beskytter os mod solvinden, og vekselvirkningen danner en magnetisk "boble" omkring Jorden (se figur 8), hvor magnetfeltet virker som et "skjold" mod solvinden. En del ladede partikler fra solvinden siver dog ind og danner et strømlag analogt til IMF. Forstyrrelser af magnetfeltet, ikke mindst fra CME'er, kan bevirke magnetisk "reconnection" her og accelerere partikler, som følger magnetfeltlinjerne ned til Jorden og danner nordlys. Solvinden og magnetfeltet fortsætter langt ud i rummet hinsides planeterne og danner en magnetisk boble, "heliosfæren", i det interstellare rum, som rækker langt ud forbi planetsystemet.



Figur 8. Jordens magnetosfære [7].

Solens dynamo

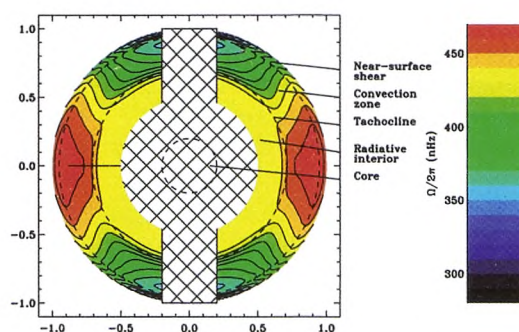
Solens magnetiske aktivitet vidner om en kompliceret kobling mellem plasmaets bevægelser og magnetfeltet såvel under som på og over overfladen, og i hele heliosfæren. Der eksisterer ikke i dag en gængs konsensusmodel, som ud fra basale fysiske principper giver en teoretisk forklaring på alle – eller blot de fleste observerede aspekter af Solens dynamo (men se fx [8], [9] og [10]).

Generelt kan man sige, at det er energien i plasmaets bevægelser, der fødes ind i magnetfeltet. Den kinetiske energi i Solens konvektion og rotation bindes op i magnetisk energi, der i sidste ende frigives som kinetisk energi af partikler i soludbrud og magnetisk flux, der føres ud i heliosfæren via solvinden. Koblingen mellem plasma og magnetfelt er tovejs. I Solens indre er plasmaet stærkest og magnetfeltet er bundet til rotationen og konvektionen. Ved overfladen styrer magnetfeltet plasmaet og frembringer solpletter, protuberanser og flotte løkker. Ude i heliosfæren fører plasmaet i form af solvinden igen magnetfeltet med sig.

En almindelig dynamo, som vi også kender den fra et kraftværk, eller en cykel eller bil, frembringer elektrisk energi ved hjælp af variationer i et magnetfelt.

I en astrofysisk dynamo bliver magnetfeltet forstærket og kan ændre de bevægelser, der har forstærket det. Astrofysiske dynamoer findes overalt i universet, lige fra planeter til stjerner, galakser og til skiver omkring sorte huller. Teorien for elektromagnetismen er gammel og velforstået, men det er detaljerne i Solens dynamo til gengæld ikke. Selvom en elektrisk strøm kan frembringe et magnetfelt, så kan plasmabevægelser ikke umiddelbart, da plasmaet gennemsnitligt er elektrisk neutralt. Hvis der derimod er et svagt magnetfelt i plasmaet i forvejen, så kan dette felt frembringe elektriske strømme i plasmaet ved hjælp af induktion (Faradays lov). Disse strømme kan så til gengæld forstærke magnetfeltet ved hjælp af energi fra de turbulente plasmabevægelser.

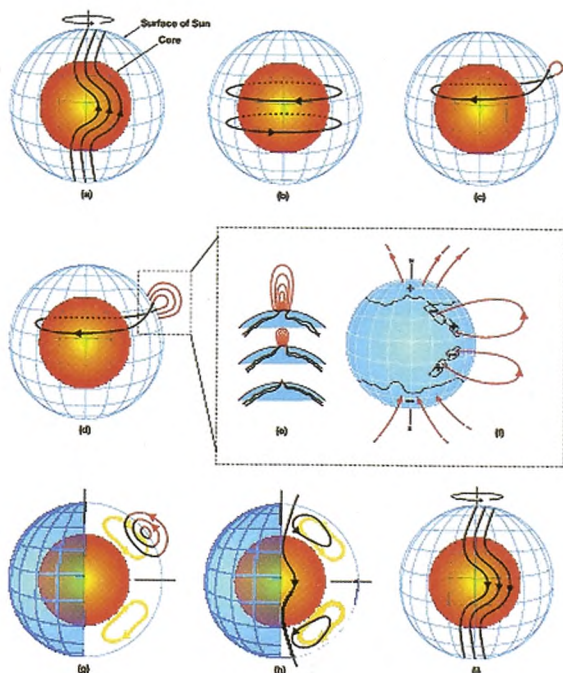
Solen roterer differentielt, sådan at ækvatorområdet roterer hurtigere end højere breddegrader. Dette har været kendt længe ud fra observation af solpletter. Helioseismologien har givet muligheder for at studere bevægelser i Solens indre, som har vist, at denne forskel eksisterer i hele konvektionszonen, mens den indre zone med strålingstransport roterer som ét legeme. Overgangen mellem de to zoner kaldes "tachocline" (se figur 9).



Figur 9. Solens indre rotationstider. Rød ved ækvator svarer til 25,2 døgn, og orange ved 30 graders bredde svarer til 26,6 døgn, hvilket er den samme som for strålingszonen [11].

Området nær tachocline er formentlig essentielt for Solens dynamo. Forestil dig et relativt svagt og primært nord-syd rettet felt (poloidalt felt). Da dette felt er bundet til et plasma, der roterer hurtigere ved ækvator, vil det blive snoet om Solen som om en gigantisk spole (toroidalt felt, figur 10). Sammen skaber rotationen og konvektionen et relativt stærkt magnetfelt (mange gange stærkere end fx Jordens). Her kan også det tidligere anvendte billede af magnetfeltlinjer som elastikker, der trækkes rundt, bruges.

Resultatet bliver et forholdsvis fragmenteret magnetfelt, et netværk af øst-vest rettede fluxrør, der har form som lange magnetiske pølser, fyldt med plasma. Da der er trykligevægt mellem plasmaet i de magnetiske fluxrør og plasmaet udenfor, og da magnetfeltet også udøver et tryk, bliver tætheden af plasmaet i rørene mindre end udenfor. Rørene bliver derfor lettere end omgivelserne og vil flyde opad og bryde gennem fotosfæren som en række dipoler, hvilket også forklarer hvorfor alle solpletter på den samme solhalvdel har samme magnetiske polaritet.



Figur 10. Udviklingen af Solens indre magnetfelt i løbet af en solpletperiode. Solens overflade er blå og strålingszonen orange [12].

Under opstigningen vil Corioliskraften dreje fluxrøret lidt, så solpletgrupperne får en tendens til at pege mod ækvator, idet den bageste polaritet vil være lidt nærmere polen end den forreste. Ud over de omtalte bevægelser i konvektionszonen finder der også en meridional (mod polerne) bevægelse i overfladen sted, med tilbagestrømning mod ækvator i dybet. Denne strømning kan medtage den magnetiske flux, og da den dipol, der har modsat polaritet af Solens pol ved starten af en solpletcyklus, er nærmest ved polerne, kan dette medvirke til et skift i polernes polaritet.

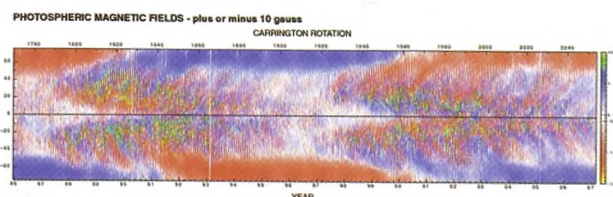
Den beskrevne dynamo vil være periodisk. Når den toroidale magnetiske aktivitet er "brændt ud", har vi så magnetfelterne ved polerne tilbage, som har den nye polaritet, der giver et nyt poloidalt felt, og en ny cyklus kan begynde.

I strålingszonen er plasmaet stabilt og flyder ikke opad. Magnetisk plasma kan så sige "gemme sig" lige under tachocline. Plasmabevægelser er i stand til at "skyde ned" fra konvektionszonen og hente "gemt" magnetfelt. Dette er en mulig forklaring på hvordan magnetfeltet forankres nær bunden af konvektionszonen og ikke forsvinder ud af Solen.

Den variable sol

Variationerne i Solens magnetfelt giver sig tydeligst til kende ved den kendte, 11-årige solpletcyklus, hvor antallet af solpletter stiger og aftager. Mængden af solpletter beskrives for det meste ved "relativtallet" R , se boks. De enkelte perioder er givet et nummer. Vi er i øjeblikket i gang med nr. 24 [14]. Pletterne dukker først op ved høje breddegrader (ca. 30° - 40°), for i løbet af cyklen at bevæge sig ned mod ækvator. Magnetisk set er der tale om en 22-årig periode, da den magnetiske polaritet skifter cirka hvert 11. år. I begyndelsen

af perioden har den forreste plet i forhold til Solens rotation samme polaritet som polen på den pågældende halvkugle, men observationer viser, at polariteten af Solens nord- og sydpol skifter omkring solpletmaksimum. Dog ikke nødvendigvis samtidig (se figur 11). Det ses, at ved maksimum af cyklus 22 (starten af 1990) skifter nordpolen fra negativ til positiv polaritet. Skiftet ved sydpolen sker først i midten af 1991. Fra 40° nord kan man fra 1988-1989 se en skrå drift af positiv polaritet nordpå, som når 60° ved skiftet. Tilsvarende ved sydpolen. I henholdsvis starten af og i løbet af år 2000 sker så det omvendte skift ved maksimum af cyklus 23.



Figur 11. Målt magnetfelt på Solens overflade mellem breddegrad -75 til $+75$ fra 1986 til 2007. Blå er positiv polaritet og rød er negativ. Over 60° er der kun én polaritet, men under 40° er farven grumset på grund af dipolerne ved solpletterne [13].

Indikatorer for solmagnetisme:

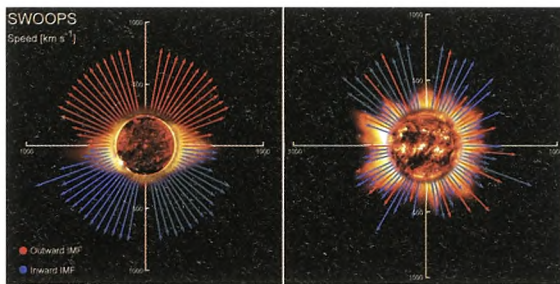
Relativtallet R er et mål for mængden af solpletter, og udregnes ved at gange antallet af magnetiske dipolgrupper med 10 og addere antallet af enkeltpletter [14]. Relativtallet er derfor en indikator for styrken af den lukkede magnetiske flux i fotosfæren.

aa-indekset er et mål for geomagnetiske forstyrrelser målt ved jordoverfladen fra to målestationer i henholdsvis England og Australien (antipodalt i forhold til Jordens magnetfelt). Da disse forstyrrelser, der har været systematisk målt siden 1868, stammer fra variationer af IMF ved Jorden, er aa-indekset således en indikator for Solens åbne magnetiske flux i Jordens baneplan.

GCR ("Galactic Cosmic Rays") kan komme til os fra alle retninger, og bliver derved en indikator for forholdene i hele heliosfæren (effekter fra Mælkevejens magnetfelt kan negligeres over de 10.000 år vi ser på her).

Da de tre indikatorer således er mål for forskellige sider af solmagnetismen, vil der kunne være forskelle mellem dem over korte tidsskalaer. Da de imidlertid alle siger noget generelt om Solens dynamo, er forskellene ikke store ved middeltal over længere perioder.

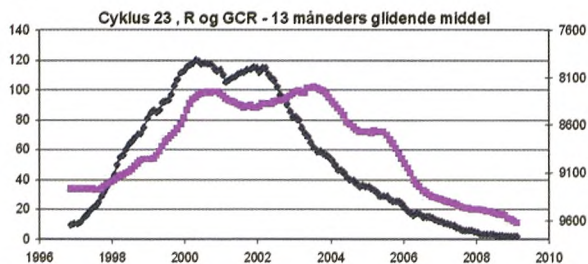
Det er hele IMF der skal skifte, og forholdene omkring solpletmaksimum er yderst komplicerede. Som nævnt har Solen differentiell rotation, således at "fodpunkterne" for IMF ikke bevæger sig lige hurtigt. Yderligere har solvinden jo forskellige hastigheder, så Parker-spiralen bevæger sig ikke lige hurtigt udad i alle retninger (se figur 12). CME fører også magnetisk flux ud og kan sikkert også bidrage til skiftet i IMF.



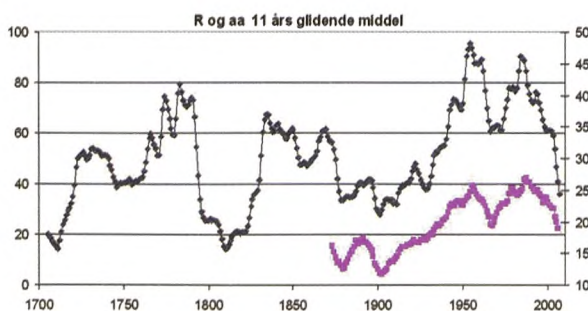
Figur 12. Målinger af retningen af IMF og solvindens hastighed ved henholdsvis minimal og maksimal solaktivitet fra Ulysses satellitten, der har bevæget sig i en bane næsten vinkelret på Solens ækvator i en afstand, der varierede fra 1,3 AE til 5,4 AE. Pilenes længde er et mål for solvindens hastighed, og rød er områder med positiv magnetisk polaritet. Et foto af Solen i UV er indsat og viser tydeligt de aktive områder ved høj aktivitet [15].

Et mål for heliosfærens tilstand (styrken af IMF, antal CME osv.) er geomagnetiske forstyrrelser givet ved et *aa*-indeks og fluxen af kosmisk stråling fra verdensrummet, GCR ("Galactic Cosmic Rays"), mest protoner og heliumkerner med en energi i GeV området, som danner en kaskade af partikler ved at smadre atomkerner i den øvre atmosfære. Mange af disse er neutroner, som ikke vekselvirker meget med atmosfærens atomer. De kan derfor detekteres ved jordoverfladen. En aktiv sol forhindrer mange GCR i at nå frem til Jorden.

I figur 13 sammenlignes relativtallet for cyklus nr. 23 med GCR-fluxen. Bemærk forskydningen mellem *R* og GCR, hvilket er almindeligt ved overgange fra ulige til lige cyklus-numre.



Figur 13. Relativtal (blå, venstre skala) og GCR flux (lilla, højre skala), tællinger pr time med neutron monitor. Bemærk at GCR skalaen er vendt om, da høj solaktivitet giver lav GCR flux. Grafen viser 13-måneders glidende middeltal. Tiden angiver årenes starttidspunkt, og punkterne er angivet i midtpunkter af tidsintervallerne. Tegnet med data fra henholdsvis [16] og [17].

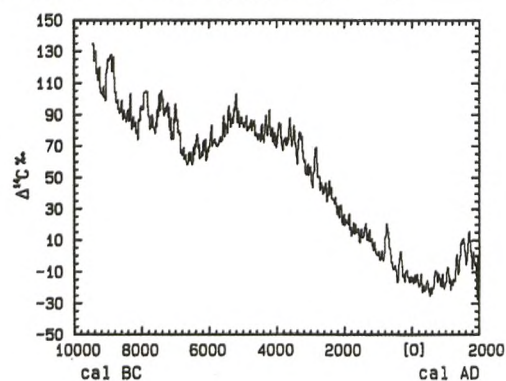


Figur 14. Relativtal (blå, venstre skala) siden 1700 og *aa*-indeks (lilla, højre skala) siden 1868. 11-års glidende middeltal for årlige middeltal. Årstallet er midten af tidsintervallerne. Grafer tegnet med data fra [16] og [18].

Langtidsvariationer i antallet af solpletter og heliosfærens tilstand ses lettest ved at udglatte relativtallet over 11-årige perioder, hvilket tydeligt viser den 80-100 årige Gleissberg periode (se figur 14). Det ses, at der i langtidsendenserne er god overensstemmelse mellem *R* og *aa*. Indekset *aa* kan bruges til vurderinger af størrelsen af den åbne magnetiske flux, som har en størrelsesorden på omkring $5 \cdot 10^{14}$ Wb, og den viste stigning i 1900-tallet svarer til en fordobling. Den lukkede flux varierer stærkt mellem maksimum og minimum, og er ved maksimum op til 10 gange større end den åbne.

Proxy-indikatorer: Rekonstruktion af fortidens solaktivitet

Hvis vi vil følge variationer i solaktivitet længere tilbage end observationerne af solpletter, må vi bruge proxy indikatorer, dvs. effekter af datidens solaktivitet, som kan måles i dag. En af de bedste i den forbindelse er ^{14}C , som dannes af den kosmiske stråling. Denne radioaktive isotop med en halveringstid på 5730 år, optages i alle levende planter i form af CO_2 , og er allerede velstuderet af arkæologer, som er stærkt generet af den varierende produktion, som de må korrigere for. For os er netop disse korrektioner interessante, da de afhænger både af Jordens magnetfelt, som giver den største variation, og af heliosfærens tilstand. Datidens relative forekomst af ^{14}C , $\Delta^{14}\text{C}$, findes ved at udtage prøver fra træringe. Her skal man tage hensyn til isotopfraktionering, idet optaget af kulstof i biologisk materiale er masseafhængig (se figur 15).



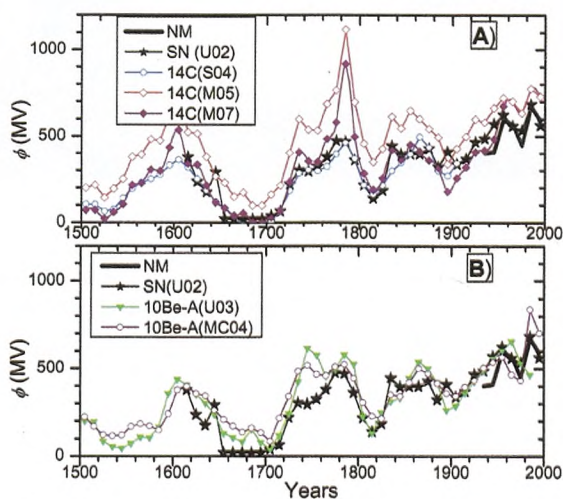
Figur 15. ^{14}C indholdet i træ på de angivne tidspunkter fra de sidste knap 12.000 år, der er fundet ud fra målinger af ^{14}C indhold i træringe [19]: De store ændringer over årtusinder skyldes variationer af Jordens magnetfelt, mens de mange små toppe og dale skyldes solaktiviteten. Bemærk at høj $\Delta^{14}\text{C}$ er forbundet med en lav solaktivitet.

Det er lang fra trivielt at vurdere tilstanden i heliosfæren ud fra ^{14}C data. Det kræver kendskab til kulstofkredsløbet i biosfæren og oceanerne. Desuden er sammenligning med nutidige målinger af ^{14}C produktion forstyrret af atomprøvesprængningerne og tilførsel af ^{14}C fattigt kulstof fra afbrænding af fossilt brændsel. For at beskrive forholdene i heliosfæren må man også kende mekanismerne til modulation af den kosmiske stråling, som igen afhænger af hvilke partikler der er tale om og deres energispektrum. Ved minimal solaktivitet er magnetfeltet ret simpelt og partiklerne kan

spiralere ind langs feltlinjerne (se figur 4). Da partiklerne er positivt ladede, vil de yderligere, på grund af magnetfeltets spiralform, opleve en drift ind mod polerne og ud langs strømlaget, når Solens nordpol har positiv polaritet, og omvendt når polariteten er negativ. Da adgangen langs det urolige strømlag er mere besværlig end over polerne, vil GCR fluxen vokse langsommere op i sidstnævnte situation, hvilket netop er tilfældet ved ulige-lige overgange (se figur 13).

Reduktionen af GCR ved høj solaktivitet fremkommer primært ved en udadrettet diffusion, der skyldes at den voldsomme aktivitet på Solen skaber små uregelmæssigheder i IMF, som breder sig ud gennem heliosfæren. Protoner med mere end nogle få GeV bliver stort set ikke moduleret, da den store gyroradius ikke gør sådanne partikler så påvirkelige af små lokale fluktuationer i magnetfeltet.

For at beskrive tilstanden i heliosfæren bruges oftest modulationspotentialet, Φ , som er et mål for en GCR partikels energitab per ladning undervejs ind gennem heliosfæren. I en "simpel" teoretisk model kan den beregnes ud fra magnetfeltets styrke og "krøllethed", solvindens hastighed samt heliosfærens størrelse. Sidstnævnte afhænger også af solvinden og magnetfeltet, som afgør, hvor meget heliosfæren kan presses ud i det interstellare område. Selv om heliosfæren ofte er mere kompliceret end den simple model, bruges Φ generelt som indikator for modulationen af GCR i heliosfæren. Eksperimentelt findes Φ ud fra målinger af GCR på Jorden og modeller for GCR udenfor heliosfæren. Sidstnævnte kan selvfølgelig være noget usikre, men forholdene derude kan i det mindste regnes konstante indenfor de tidsrum vi taler om her.

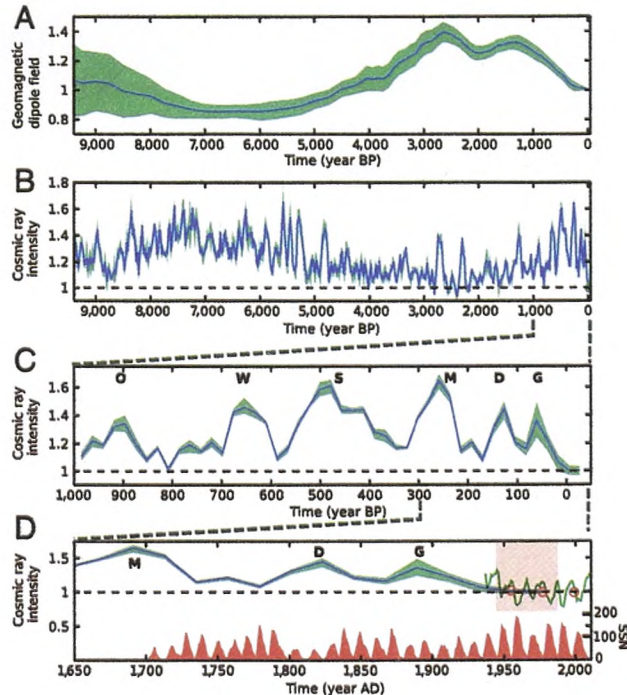


Figur 16. Modulationspotentialet for de sidste 500 år. Bemærk at høje værdier af Φ svarer til høj solaktivitet (få GCR). Øverste figur er for ^{14}C og nederste for ^{10}Be data. Stjerne angiver beregninger ud fra relativtallet og sort streg ud fra neutron monitor data [20].

En anden isotop der er almindeligt anvendt er ^{10}Be , som har en meget lang halveringstid ($1,37 \cdot 10^6$ år). Denne isotop undersøges mest ved aflejringer i iskerner. Ulempen ved den er, at stoffet ikke forekommer i atmosfæren, da det er et metal. Når den dannes, vil den

typisk binde sig til aerosoler og på et tidspunkt falde ned, ofte i forbindelse med nedbør. I iskerner måler man det absolutte indhold i antal isotoper med ^{10}Be -kerner' per gram is, hvilket gør koncentrationen afhængig af mængden af nedbør, og dermed af ændringer i klimaet. Flere har gjort forsøg på rekonstruktion af solaktiviteten gennem de sidste 500 år, hvor man delvist har kunnet sammenligne med relativtallet, se fx [20] og [21]. Figur 16 viser eksempler. Selv om overensstemmelsen indbyrdes og med antal solpletter stort set er rimelig, er der også enkelte meget store afvigelser, hvilket kan ses som et tegn på vanskelighederne ved metoderne.

Muligheden for at se på solaktivitetens udvikling er af ret ny dato. Startskuddet blev givet af John Eddy, der publicerede en artikel i Science i 1976 under titlen "The Maunder Minimum", hvor han som en af de første bruger ^{14}C til at vurdere solaktiviteten [22]. Det kraftige minimum i sidste halvdel af 1600-tallet opkaldte han efter den engelske astronom E. Walter Maunder, der i 1894 udgav en omfattende artikel om denne mangel på solpletter, delvist på baggrund af arbejde af den tyske astronom Gustav Spörer, der så fik et minimum omkring år 1500 opkaldt efter sig. Før Maunder-minimum fra 1650 til lidt efter 1700 var man begyndt at observere solpletter med kikkert, så disse observationer bekræfter mangelen på pletter i denne lange periode. Hvor kraftigt Spörer-minimum var, er derimod overladt til proxy-data.



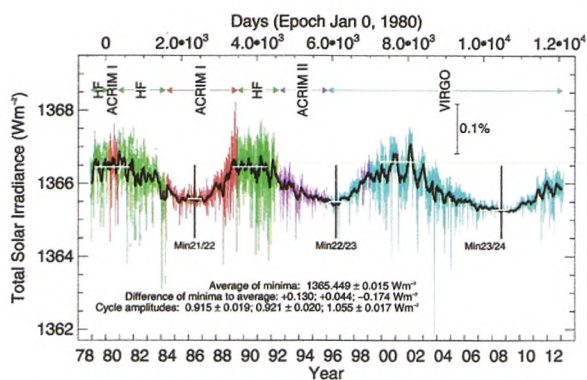
Figur 17. PSA analyse for de sidste 9000 år af GCR fluxen, som er angivet i relative enheder. Bemærk at høje værdier på disse grafer svarer til lav solaktivitet. De normalt anvendte navne på minimaene er angivet, fx Maunder (M), Dalton (D), Gleissberg (G). Ved de 3 første figurer er tiden angivet "before present", som i denne forbindelse er 1950 [23].

Rekonstruktioner over årtusinder må naturligvis, jf. ovennævnte, være behæftede med stor usikkerhed. En lovende metode er PSA analysen ("Primary Signal Analysis"), som er baseret på såvel ^{14}C i træringe som

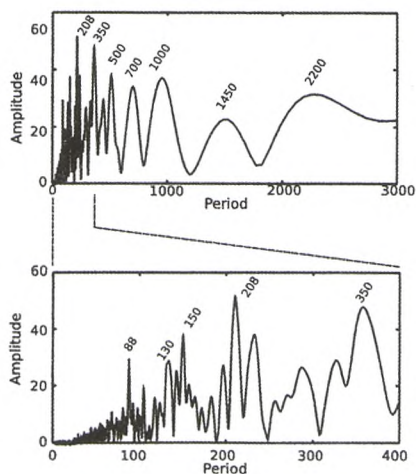
^{10}Be fra både Grønland og Antarktis. Signaler, der er fælles for alle datasæt, antages at hidrøre fra virkningen af Jordens magnetfelt og heliosfæren. En model for udviklingen af Jordens dipolfelt giver så Φ . Et eksempel på en sådan rekonstruktion findes på figur 17.

Solens fremtidige aktivitet?

Hvad er årsagen til de store variationer i solaktiviteten og hvad bringer fremtiden? Det handler ikke blot om at se flotte nordlys eller observere spændende solpletter. I rumalderen er den praktiske betydning stor. Kraftige soludbrud kan sætte vigtige satellitter ud af spillet og være direkte livsfarlige for astronauter. Ligeledes kan solaktiviteten have indflydelse på Jordens klima, både via UV strålingen og en indvirkning på skydannelse fra GCR [24]. Det er via satellitmålinger også påvist, at intensiteten af den totale solstråling varierer med solaktiviteten og er størst ved solpletmaksimum. Dog er variationen lille, og gennemsnittet over flere cykler har været konstant, men målingerne med satellitter har kun fundet sted i få årtier i en periode med høj aktivitet. Imidlertid har det langvarige minimum mellem cyklus nr. 23 og 24, samt den lille størrelse af cyklus nr. 24, tilsyneladende givet et fald (se figur 18). Det er ikke stort, men det kan godt tænkes, at en langvarig mangel på aktivitet, som ved Maunder-minimum, kan have bevirket en kraftig reduktion af solstrålingen.

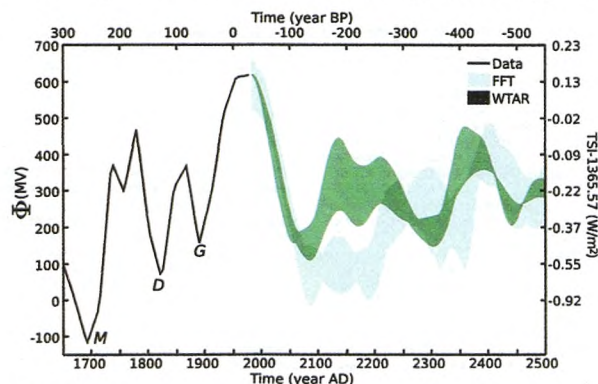


Figur 18. "Solarkonstantens" udvikling over de sidste 34 år, målt ud fra data fra forskellige satellitter. Figur af Claus Fröhlich hentet fra [25].

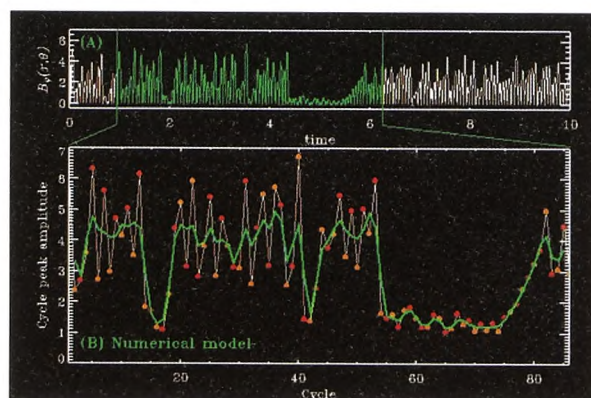


Figur 19. Fourieranalyse af solaktivitetens variationer ud fra ^{14}C og ^{10}Be [26].

Forståelsen af dynamoen er som nævnt ikke god nok til en egentlig beregning af fremtidens magnetfelt. Hvis dynamoen er rent kaotisk er der jo ikke noget at gøre, men meget tyder på en del periodicitet, så nogle forskere har vovet pelsen. Man kan gå rent empirisk frem. Nogle tusinde år er jo forsvindende i forhold til Solens alder, så hvis man laver en Fourier-analyse af variationerne fundet ved hjælp af ^{14}C og ^{10}Be data (se figur 19) og antager, at perioderne vil være tilsvarende fremover, giver det en 500-års forudsigelse (se figur 20).



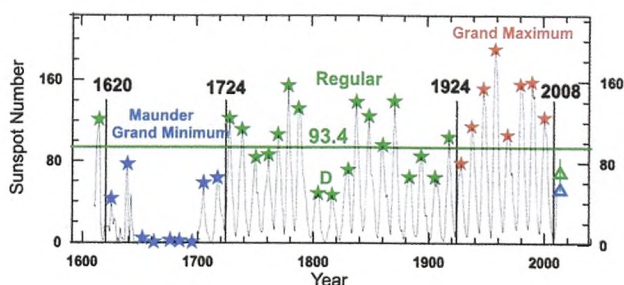
Figur 20. Modulationspotential over 800 år, hvoraf de sidste 500 er fremtid. Den negative værdi af Φ i Maunder-minimum (M) er selvfølgelig ikke fysisk set fornuftig, men må ses som konsekvens af usikkerheden i den lange databehandlingsvej fra $\Delta^{14}\text{C}$ til Φ [26].



Figur 21. Amplituden af et magnetfelt ved en simulation af en periodisk-kaotisk variation [27].

Mere fysisk kan man prøve at se på Solens dynamo, som jo ud af et poloidalt magnetfelt frembringer et toroidalt, som forstærkes i konvektionszonen, stiger op og frembringer solpletter, driver mod polerne og frembringer et nyt poloidalt felt osv. En dynamomodel bør altså vise et periodisk magnetfelt, og styrken af det nye poloidale felt må afhænge af det toroidale felt, som afhang af det tidligere poloidale felt. Modellen vil altså have en iterativ natur. I kaosteori har man undersøgt sådanne systemer, som viser, at perioder med regelmæssige svingninger pludseligt kan afløses af perioder med kaotisk adfærd, hvor fx amplituderne bliver kraftigt dæmpede. Et eksempel på beregninger af et magnetfelt ud fra et forsimplet sæt differential-ligninger, som beskriver den tidligere omtalte kobling mellem plasma og magnetfelt, hvor der netop er taget hensyn til differentiell rotation og meridional transport af magnetisk flux, ses på figur 21.

Ser man på de sidste 400 års solaktivitet (se figur 22) ligner det jo en del. Man bruger at dele op i perioder med henholdsvis normal (regular), meget lav (grand minima) og meget stor (grand maxima) aktivitet. Sidstnævnte reproduceres dog ikke så godt af modellen beskrevet ovenfor. Antallet af solpletter afhænger af styrken af det toroidale felt, som i henhold til ovennævnte overvejelser bør afhænge af styrken af det forudgående poloidale, dvs. styrken af IMF ved solpletminimum. Da *aa*-indekset er et mål for styrken af IMF, bør der altså være en korrelation mellem *aa* ved minimum og størrelsen af *R* ved det efterfølgende maximum. Analyse af denne sammenhæng fører til en formodning om, at vi nu har bevæget os fra et Grand Maximum til en Regular periode, og med en max *R* for cyklus nr. 24 på kun omkring 60 (se figur 22). Der bliver altså solpletter at observere i den nærmeste fremtid, men ikke noget der ligner sidste del af 1900-tallet. Forudsigelsen af en fremtid "på det jævne" er også i god overensstemmelse med figur 20.



Figur 22. 400 års relativt solaktivitet. Trekanterne til højre er et forsøg på at forudsige cyklus 24 [28].

Måske er der variationer med meget længere perioder end den 2200-2300 års Hallstatt-cyklus, som kan være interessante ved studier over geologiske tidsskalaer, men de kræver data over en meget lang periode, hvilket kan være svært at finde her på Jorden. En nærliggende mulighed er studiet af sollignende stjerner på forskellige udviklingstrin, hvilket mange også er gået i gang med, så måske kan vi få ny viden om vor magnetiske sol på den måde.

Litteratur

- [1] SDAC, <http://umbra.nascom.nasa.gov/sdac.html>.
- [2] Luc Viatour, <http://www.lucnix.be>.
- [3] Kenneth J.H. Phillips, Guide to the Sun. Cambridge University Press 1992.
- [4] Asgeir Brekke, Physics of the Upper Polar Atmosphere. Wiley 1997.
- [5] Ulysses NASA, <http://ulysses.jpl.nasa.gov>.
- [6] Institutet för Solfysik, <http://www.solarphysics.kva.se>.
- [7] Malcolm S. Longair, High Energy Astrophysics, vol 1. Cambridge University Press 1997.
- [8] Paul Charbonneau (2010), Dynamo Models of the Solar Cycle, *Living Rev. Solar Phys.* 7 2010, 3: <http://www.livingreviews.org/lrsp-2010-3>.
- [9] Guenther Ruediger (2008), Scholarpedia, 3(1): 3444 doi:10.4249/scholarpedia.3444.
- [10] Axel Brandenburg (2007), Scholarpedia, 2(3):2309 doi:10.4249/scholarpedia.2309.
- [11] Rachel Howe (2009), Solar Interior Rotation and its Variation, <http://solarphysics.livingreviews.org>.
- [12] High Altitude Observatory, <http://www2.hao.ucar.edu>.
- [13] Mt. Wilson Observatory, <http://obs.astro.ucla.edu>.
- [14] Sven Ove Thimm (2013), Solen i 2012, KVANT nr. 2, maj 2013.
- [15] Ulysses ESA, <http://sci.esa.int/ulysses>.
- [16] SIDC, <http://sidc.oma.be>.
- [17] Moscow Neutron Monitor, <http://cr0.izmiran.rssi.ru/mosc/main.htm>.
- [18] Solar-Terrestrial Physics Division, NOAA, <http://www.ngdc.noaa.gov/stp>.
- [19] Stuiver og Reimer (1993), Extended ^{14}C data base and revised calib 3.0 ^{14}C age calibration program. *Radiocarbon*, Vol 35, No 1 1993.
- [20] Usoskin (2013), A History of Solar Activity over Millenia, <http://solarphysics.livingreviews.org>.
- [21] McCracken, Beer, Steinhilber og Abreu (2013), The Heliosphere in Time, *Space Sci. Rev.* 2013 176:59-71.
- [22] John A. Eddy (1976), The Maunder Minimum, *Science* 18, June 1976, Vol 192, NO 4245.
- [23] Steinhilber et al (2012), 9400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings, <http://www.pnas.org/content/109/16/5967>.
- [24] Jens Olaf Pepke Pedersen (2011), Solaktivitet og klimaændringer, KVANT nr. 4, december 2011.
- [25] PMOD-WRC (World Radiation Center), <http://pmodwrc.ch>.
- [26] Steinhilber, Beer (2013), Prediction of solar activity for the next 500 years, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* vol 118 p. 1-7, 2013.
- [27] Paul Charbonneau, Flux transport dynamos, <http://scholarpedia.org>.
- [28] De Jager, Duhau (2012), Sudden transitions and grand variations in the solar dynamo, past and future (*Journ. Space Weather Space Clim.* 2, 2012, A07).



Søren Bertil Fabricius Dorch er bibliotekschef ved Syddansk Universitet. Han er astrofysiker med ph.d.-grad fra Københavns Universitet og har speciale i Solens Dynamo og stjerners magnetisme.



Sven Ove Thimm er cand.scient fra Århus Universitet og underviser i fysik og astronomi på Hjørring Gymnasium. Han er specielt interesseret i Solen og sol-jord fysik og er leder af Solsektionen i Astronomisk Selskab.