

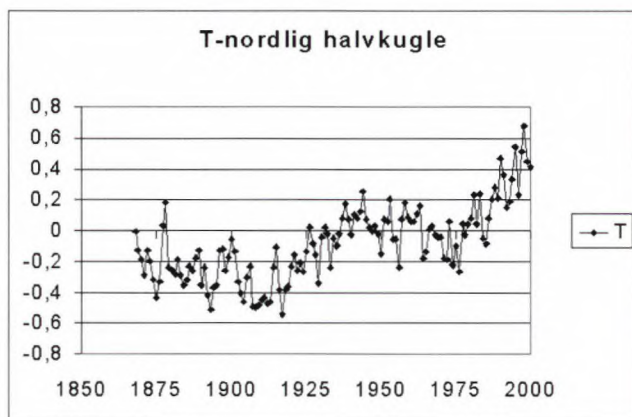
Solaktivitet og klimaændringer

Sven Ove Thimm, Hjørring Gymnasium.

Indledning

Det sidste årti har, bl.a. på grund af Jordens stigende temperatur (figur 1), været præget af en omfattende debat om Jordens klima og muligheden for menneskeskabt påvirkning fra udledning af drivhusgasser, en temperaturstigning som måske også helt eller delvist kan skyldes naturlige variationer. Med til disse hører ekstern påvirkning fra solaktiviteten, hvor fokus i Danmark har ligget på arbejdet af K. Lassen, E. Friis-Christensen og H. Svensmark. Internationalt har der været tale om en kraftigt forøget forskning indenfor dette område.

Det følgende er et forsøg på at give en kortfattet oversigt over nogle af de mekanismer, hvormed solaktiviteten kan tænkes at påvirke Jordens klima. Der vil ikke her blive redegjort for den historiske udvikling af sol-klima forskningen, men den er beskrevet i [1].



Figur 1. Den nordlige halvkugles temperaturanomali (afvigelse fra 1961–90 middelværdi) fra 1868 til 2000, uden udglatning. Tegnet med data fra Hadley Centre (www.met-office.gov.uk/research/hadleycentre/obsdata/globaltemperature.html).

Solaktivitet

For mange er solaktivitet synonymt med den karakteristiske 11-årige variation af antallet af solpletter, som beskrives ved hjælp af relativtallet, der udregnes ved at gange antallet af solpletgrupper med 10 og addere det samlede antal pletter (se bagsiden af Kvant 2-2000). Solaktivitet er dog et langt mere komplekst fænomen, der skyldes magnetfelter, som vedligeholdes og forstærkes af en dynamovirkning i Solens yderste dele i forbindelse med såvel konvektion som den differentielle rotation (se artiklen i Kvant 2-2000 af Jørgen Christensen-Dalsgaard og Kvant 3-2000 af Jesper Munk Jensen).

Dynamoen bevirker lokalt meget kraftige magnetfelter i langsgående bånd ved en breddegrad på ca. 30 grader, hvor magnetiske dipoler bryder frem i fotosfæren som en kæde af aktive områder med solpletter og fakler, ledsaget af øget UV-stråling fra atmosfæren ovenover (se figur 2). I løbet af den 11-årige periode bevæger disse bånd sig mod ækvator, som nås sidst i perioden. Næste periodes solpletter kan da sommetider allerede ses dukke op ved højere breddegrader.

Set udefra har Solen et generelt dipolfelt som fra en stangmagnet, samt kraftige, lukkede fluxrør fra de aktive områder. Solvinden, som er en strøm af ladede partikler (mest protoner og elektroner) fører noget af feltet ud i rummet omkring Solen (heliosfæren), så der også bliver åbne feltlinier. Heliosfæren kan, især ved solaktivitetsmaksimum, have en meget kompliceret struktur, med områder hvor magnetfeltet har forskellig styrke og retning.

Der forsvinder hele tiden magnetisk flux, bl.a. fører solvinden magnetisk flux ud i heliosfæren, og der sker en omfattende magnetisk "reconnection" i den indre korona, som derved får en temperatur på mange millioner grader. Af og til er energiudladningerne meget kraftige og vi ser en såkaldt "flare". Især over aktive områder opvarmes koronaen meget, hvilket kan ses som lyse områder i UV-lys på billedet fra SOHO, der også viser magnetiske fluxrør i den indre korona.

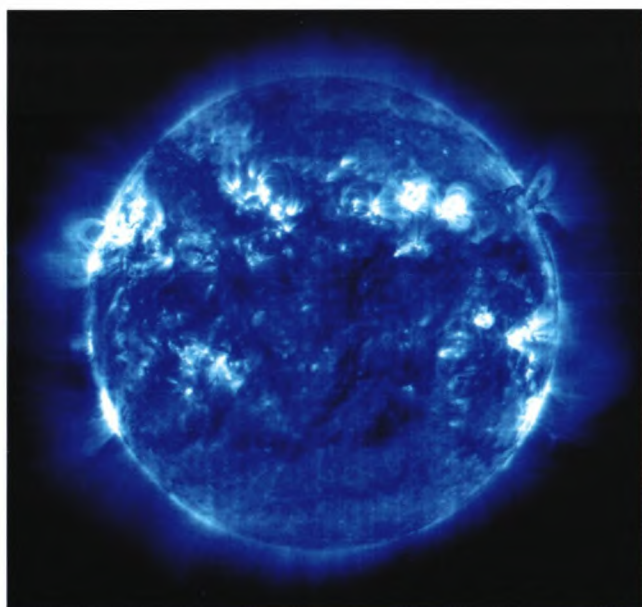
Det interplanetare magnetfelt ved Jorden varierer en del, men er mest af størrelsesordenen 5–10 nT. Til sammenligning er feltstyrken i Jordens magnetosfære under rolige forhold omkring 100 nT i en afstand af ca. 6 jordradier (målt af satellitter i den geostationære bane). Solens totale åbne flux er ca. 5×10^{14} Wb og er tilsyneladende vokset kraftigt indenfor de sidste 100 år [2]. Den lukkede flux er ca. dobbelt så stor ved solpletminimum, men op til 10 gange så stor ved maksimum. Den åbne flux varier ca. 2×10^{14} Wb mellem maksimum og minimum [3].

På grund af de høje temperaturer vil partikler i koronaen udvise en stor grad af ionisation (H og He nærmest fuldstændigt), og de vil derfor have svært ved at slippe væk fra lukkede magnetfelter, og der kan blive opsamlet ganske meget stof i den indre korona. Denne ustabile situation kan i forbindelse med de ovenfor nævnte ændringer af magnetfeltet bevirke at en stor mængde plasma bliver slynget ud i heliosfæren i form af en CME ("Coronal Mass Ejection"), der breder sig som en chockbølge gennem heliosfæren, hvilket f.eks. kan give sig til kende på Jorden ved forstyrrelser af magnetfeltet ("solstorm"), der bl.a. kan udløse kraftige nordlys.

Indikatorer for solaktivitet

Relativtallet (R) bestemmes dagligt og har som indikator den styrke, at det findes som en uafbrudt tidsserie over de sidste 300 år.

Den kraftige opvarmning af atmosfæren over de aktive områder giver sig udslag i udsendelse af radiostråling i dm området. Historisk er det blevet fluxen ved 10,7 cm (2800 MHz) der er blevet standardmålingen, og der måles også her daglige værdier. Når man midler over flere måneder følger R og 10,7 cm fluxen stort set hinanden.



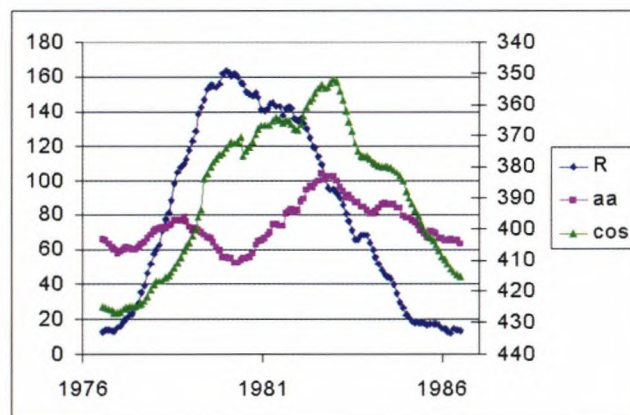
Figur 2. Solen taget i ekstrem UV-stråling (171 Å) af SOHO satellitten (ESA/NASA) den 6. januar 2001.

Forstyrrelserne af Jordens magnetfelt beskrives ved forskellige indices, bl.a Ap, som er et mål for hvor store variationer (i nT) der forekommer over et 3 timers interval. Det beregnes ud fra målinger fra 13 stationer, fordelt over Jorden, men på nogenlunde samme geomagnetiske breddegrad som Danmark; p står for "planetary". Aa indekset måles fra kun to stationer, der ligger antipodalt i forhold til Jordens magnetfelt (England og Australien). Aa har været bestemt siden 1868 [4]. Den ovenfor nævnte styrkelse af det interplanetare magnetfelt er netop fundet ud fra aa-indexet. Solstorme er ikke blevet hyppigere, men det stærkere magnetfelt har gjort stormenes virkning kraftigere [5]. R og aa (og Ap) følges dog ikke helt ad, bl.a på grund af at vekselvirkningen mellem heliosfæren og Jordens magnetfelt er meget afhængig af lokale forhold, ikke mindst retningen af det interplanetare magnetfeltet.

Jorden bliver bombaderet af ladede partikler, og betegnelsen kosmisk stråling har historisk været brugt også om højenergetiske partikler fra Solen, SEP ("Solar Energetic Particles"), men bruges nu mest om de "ægte" kosmiske partikler ude fra universet, GCR ("Galactic Cosmic Rays"). Partikelenergiene er meget varierende,

men for SEP er den typiske størrelsesorden MeV, mens det for GCR er GeV. Solen udsender flest SEP når den er aktiv, mens GCR fluxen er lavest ved høj solaktivitet, idet heliosfærens magnetfelt afskærmer Jorden. Fluxen af den kosmiske stråling bliver derfor også en indikator for solaktiviteten. Afbøjningen af GCR sker både langt ude i heliosfæren som en konsekvens af dennes generelle tilstand, og lige omkring Jorden, hvilket påvirkes af solstorme ("Forbush decreases").

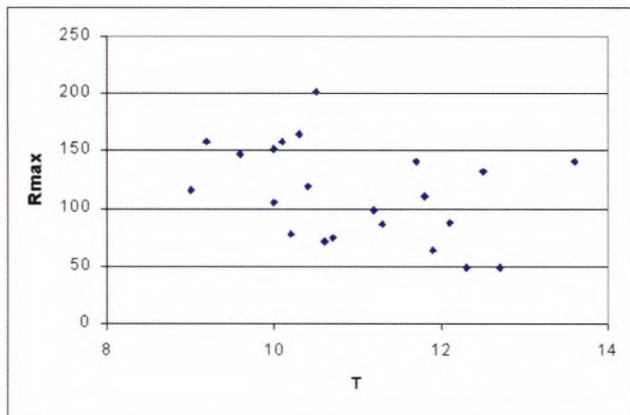
Vil man følge solaktiviteten over længere tid bruges middelværdier over måneder, år, årtier osv. En graf over nogle af disse indikatorer for cyklus 21 ses på figur 3, hvor den indbyrdes manglende korrelation er tydelig.



Figur 3. Solcyklus nr. 21. Venstre skala: Relativtal (R) og aa-index (gange med 3). Højre skala: kosmisk stråling, målt ved hjælp af fluxen af de neutroner som dannes når de højenergetiske partikler kolliderer med atmosfærens kerner (Climax tal i 1000/time). 13 måneders glidende middelværdier, tegnet med data fra SIDC (sidc.oma.be/index.php3) og NOAA (www.ngdc.noaa.gov).

En anden indikator for langtidsvariationer er periodelængden, der ikke er nøjagtig 11 år, men svinger med et par år, således at den aktive sol har kortere perioder end den sløve. Det var denne indikator, der blev sammenlignet med den nordlige halvkugles overfladetemperaturer af E. Friis-Christensen og K. Lassen i 1991 [6]. En forlængelse af analysen til også at omfatte 1990'erne viser dog knap så god korrelation [7].

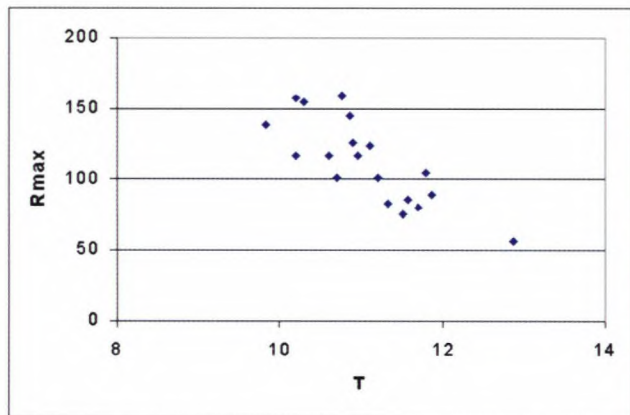
Sammenhængen mellem periodelængden og solaktiviteten er dog ikke nogen fast regel, kun en tendens, som det f.eks kan ses ved at sammenligne periodelængden med det maksimale relativtal (figur 4). Tendensen bliver tydeligere, hvis man sammenligner periodelængden med højden af den følgende cyklus, og endnu tydeligere, hvis man midler over flere cykler (figur 5). Periodelængden er således kun en grov indikator for solaktiviteten, når vi betragter mange årtier, og korrelationen mellem periodelængde og solaktivitet skal muligvis søges i plasmafysikken, hvor tingene går hurtigere i et stærkt magnetfelt. Korte perioder er simpelthen tegn på stærkere magnetfelter i Solen.



Figur 4. Sammenhængen mellem periodelængden T (min) og den tilhørende maksimale værdi af det udglattede relativtal (Rmax) for de sidste 22 cykler. Tegnet med data fra SIDC.

Betegnelsen “solaktivitet” dækker altså over en række fænomener, der alle har et tilfælles: Magnetfeltet. De aktive områders solpletter og fakler dannes, hvor særligt stærke magnetfelter gennembryder fotosfæren. Magnetfelter leverer energi til at opvarme koronaen, især over aktive områder, hvilket bevirker øget kortbølget stråling (UV og røntgen). Magnetfelter styrer soludbrud (flares og CMEer) og regulerer solvinden. Styrken af magnetfeltet i heliosfæren bestemmer påvirkningen af Jordens magnetfelt, og afbøjningen af den kosmiske stråling.

Da solaktivitet således er et komplekst fænomen kan ingen af de ovennævnte indikatorer siges at repræsentere solaktiviteten, men de skal alle betragtes som proxyer i en eller anden forstand!



Figur 5. Som fig 3, men periodelængden sammenlignes nu med højden af den følgende cyklus, og der beregnes glidende middeltal over 3 perioder.

Mekanismer til påvirkning af jordens klima

Vi kan her skelne mellem to typer. Den første er en direkte påvirkning fra observerbare overfladefænomener på Solen, såsom lysstyrkevariationer og UV-strålingen, og disse må forventes at følge størrelsen af relativtal-

let (eller 10,7 cm fluxen). Den anden type er indirekte påvirkninger fra solvinden og det interplanetare magnetfelt, såsom kosmisk stråling og atmosfærisk elektricitet, som er afhængige af forholdene i heliosfæren.

Lysstyrkevariationer

Solstrålingens samlede intensitet i Jordens afstand kaldes “solarkonstanten”, og har en værdi på 1366 Wm^{-2} , hvilket svarer til et gennemsnit på 342 W per m^2 jordoverflade, idet Jordens overfladeareal er 4 gange så stort som tværsnitsarealet. Da Jordens albedo (refleksion) gennemsnitlig er ca. 30% giver det en absorption på ca. 239 Wm^{-2} .

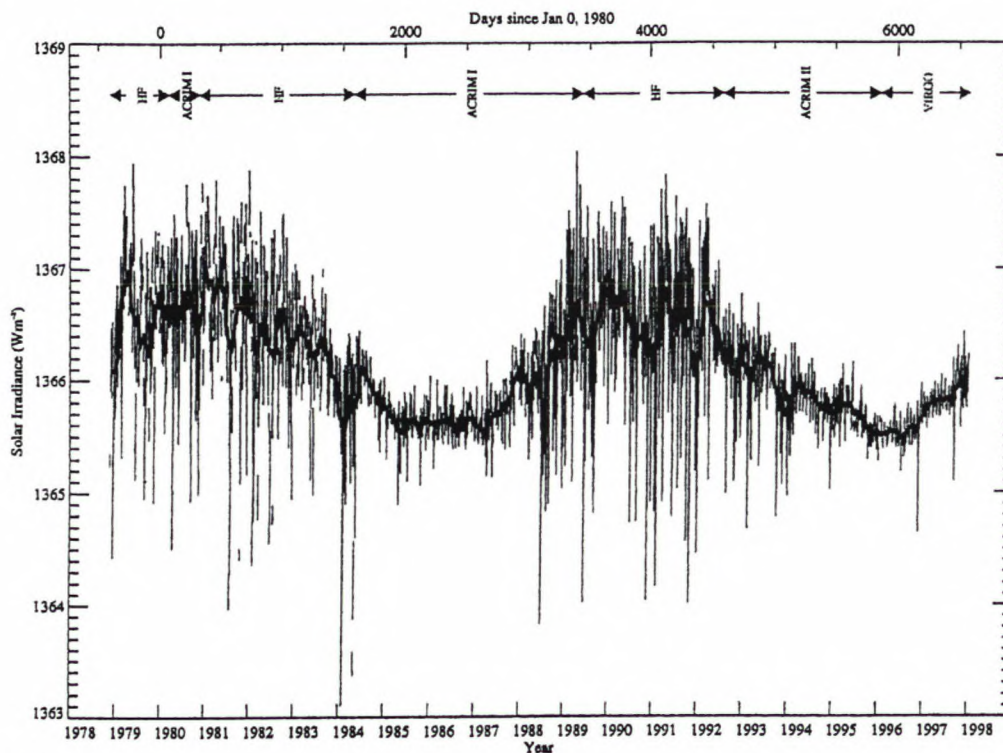
Alene navnet “solarkonstanten” indikerer, at man har betragtet den som en konstant størrelse, og en præcis måling har historisk været et stort problem[1]. Den seneste værdi skyldes målinger fra satellitter, og som så mange andre steder ved absolutte målinger er kalibrering et problem. Det må dog anses som en kendsgerning at solarkonstanten indefor en solpletperiode varierer ca. 0,1% (figur 6).

Figuren viser også at intensiteten er størst ved solpletmaksimum, skønt man kunne mene det modsatte med de mørke solpletter. Store pletgrupper kan da også over nogle dage give et fald i solarkonstanten, der dog lang opvejes af strålingen fra bl.a. de lyse fakkeldområder, samt den forøgede UV stråling. Det bemærkes i øvrigt, at selv om den gennemsnitlige variation fra min til max kun er på ca. 1 Wm^{-2} kan dag til dag variationerne ved den aktive sol komme helt op på ca. 4 Wm^{-2} , så man kan sige, at solen “blinker” en del ved solpletmaksimum. En variation af solarkonstanten på f.eks. $1,2 \text{ Wm}^{-2}$ giver dog kun en forcering på $0,3 \text{ Wm}^{-2}$ af klimaet.

Et er dog cyklusvariationer, men en egentlig klimapåvirkning kræver en længerevarende tendens. Forsøg på at vurdere langtidstendensen i solarkonstanten ud fra relativtal mm tyder på variationer af størrelsesordenen 0,2–0,4%, hvis vi betragter situationen over århundreder [9]. Det kræver dog tilsyneladende en stigning af størrelsesordenen 0,5% hvis ændring af Solens lysstyrke skal kunne forklare det meste af de sidste par hundrede års globale temperaturstigning, hvilket måske heller ikke er helt umuligt, hvis man sammenligner med sol lignende stjerner [10].

UV-stråling

Skønt størrelsesordenen for variation af den samlede strålingsflux fra Solen som nævnt kun er ca. 0,1%, er variationerne i UV området meget større (fra et par procent i blød UV til 100% i hård UV). Dette har stor betydning for ionisationen af Jordens øvre atmosfære, fra stratosfæren og op, der reagerer mere eller mindre øjeblikkeligt på ændringer i Solens UV stråling. K. Labitzke og H. van Loon har i en årrække beskæftiget sig med forholdene i stratosfæren, hvor absorptionen af UV i ozon giver en stor korrelation med den 11-årige cyklus, og for ca. 10 år siden fremkom det op-



Figur 6. Solarkonstanten over en 20-årig periode. Sammensat ved hjælp af data fra flere satellitter [8].

sigtsvækkende resultat, at vintertemperaturen i stratosfæren over nordpolen korrelerer henholdsvis antikorrelerer med 10,7 cm fluxen, afhængig af om QBO blæser fra vest henholdsvis øst. QBO ("Quasi-Biennial Oscillation") er en kraftig vind, der blæser i den nedre stratosfære over ækvator og skifter retning med en periode på 28 måneder. Når solaktivitetens indflydelse på forholdene over nordpolen afhænger af forholdene over ækvator, skyldes det, at retningen af QBO kan betragtes som indikator for den generelle cirkulation i den øvre atmosfære.

Senere har K. Labitzke og H. van Loon foretaget omfattende studier over den globale kobling mellem solaktiviteten og stratosfæren, f.eks. beskrevet ved trykfordelingen (figur 7), der viser størst korrelation i det subtropisk højtryksområde [11]. Mere om stratosfæren i [12].

Kan dette påvirke forholdene i troposfæren? D. Shindell m.fl. har ved klimamodelberegninger vist at forholdene i stratosfæren kan påvirke den meridionale cirkulation i troposfæren [13]. Opskriften er i grove træk følgende: øget opvarmning af stratosfæren ved høj solaktivitet giver kraftigere Hadley cirkulation, hvilket styrker de subtropiske højtryk. Dette medfører en ændring af den globale cirkulation, bl.a. skubbes de tempererede lavtryk længere nordpå. Dette ændrer i sig selv ikke den globale middeltemperatur, men kan forandre skydækket, hvilket kan ændre Jordens albedo.

Kosmisk stråling og skydække

Kosmisk stråling ioniserer luften, hvilket kan have ind-

flydelse på antallet af aerosoler, der virker som kondensationskerner ved dannelsen af vanddråber. En øget flux af kosmisk stråling vil derfor kunne føre til øget skydannelse, hvilket er den mekanisme, der blev foreslået af Eigil Friis-Christensen og Henrik Svensmark i 1997 [14]. Kosmisk stråling (GCR) kan på grund af den meget høje energi trænge ned til den nedre del af atmosfæren og påvirke skydannelsen her, selv ved lavere breddegrader. Dette er i modsætning til SEP der afskærmes af Jordens magnetfelt og derfor mest trænger ned ved højere breddegrader.

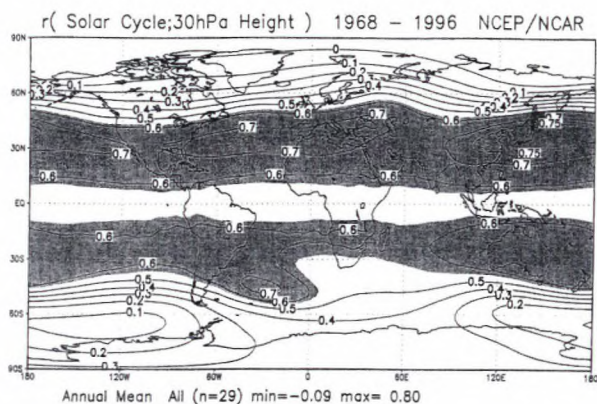
Skyer har stor betydning for klimaet, idet de spiller en rolle både for albedoen og for atmosfærens opacitet (absorptionsevne). Desuden er den med skydannelsen forbundne latente varme en vigtig del af energiudvekslingen i atmosfæren. Skønt disse forhold, ligesom de mikrofysiske skydannelsesprocesser, ikke er særligt godt kendte, tyder alt dog på at høje, tynde skyer giver en opvarmning og tykke skyer, især lave, en afkøling. Den samlede globale forcing fra de forskellige skytyper er vurderet til at være negativ med en størrelsesorden på $25\text{--}30 \text{ Wm}^{-2}$, hvoraf lave skyer bidrager med ca. halvdelen [17].

Selv om det er solaktiviteten, der afbøjer den kosmiske stråling, følges de ikke helt ad, som det fremgår af figur 3. Svensmark har vist, at det netop er den kosmiske stråling og ikke 10,7 cm fluxen der korrelerer med skydækket (figur 8), og at det også er den størrelse, der korrelerer bedst med den globale temperatur [15].

Det har fra flere sider været rejst en del kritik af den oprindelige undersøgelse, dels af at de anvendte data fra

flere forskellige satellitter ikke var ensartede, og at de kun var fra havområder og for bestemte breddegrader, og at der ikke var skelnet mellem forskellige skytyper, der virker på hver sin måde, dels af tvivl om hvorvidt mekanismen for skydannelsen overhovedet virkede i tilstrækkelig grad, se f.eks [16].

I et senere arbejde af Nigel Marsh og Henrik Svensmark arbejdes der konsekvent med et datasæt fra ISCCP (International Satellite Cloud Project), som er baseret på infrarøde målinger fra skytoppe. Derved kan der skelnes mellem højderne af de forskellige skyer, og det vises at det netop er de lave skyer, der korrelerer med den kosmiske stråling (figur 9). Hvis den ændring af skydækket på ca. 2%, som kan ses på figur 8, primært skyldes ændringer i de lavere skyer, vil disse, da de udgør ca. 27% af alle skyer, ændres med 7%, hvilket så vil give en forcering på $1,2 \text{ Wm}^2$ [17].



Figur 7. Korrelationskoefficienter for sammenhængen mellem de årlige gennemsnit af solaktiviteten (10,7 cm fluxen) og 30 hPa højden for perioden 1968-1996. Toningen er for at fremhæve geografisk placering af de høje værdier [11].

En egentlig klimaforcering opstår selvfølgelig kun hvis der er en længerevarende tendens. En rekonstruktion af mængden af lave skyer (figur 10) viser en svagt voksende tendens fra ca. 1960-1975 og en stor aftagende tendens fra 1975-1995 [17].

Korrelationen mellem kosmisk stråling og skydækket kan eventuelt også være en sekundær effekt, der skyldes at den ovennævnte aerosoldannelse påvirker atmosfærens opacitet, hvilket giver en ændring i den absorberede energimængde og derved temperaturen. Dette ændrer trykfordelingen i atmosfæren og derfor cirkulationen. En ændret cirkulation kan, som tidligere nævnt, give en ændret skydannelse, der i øvrigt kan være breddegradsafhængig, fordi SEP også giver et bidrag til ionisationen ved høje breddegrader [18]. En god oversigt over vekselvirkningen mellem atmosfæren og den kosmiske stråling findes i [19].

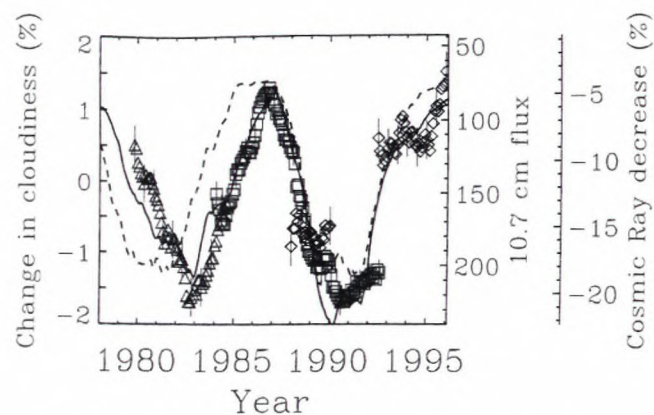
Atmosfærisk elektricitet

Jordens atmosfære udgør et omfattende elektrisk strømsystem med ionosfæren og jordoverfladen som ækvipotentiaflader på grund af deres gode ledningsevne. Kredsløbet opstår ved at kraftige tordenskyer

transporterer positive ladninger opad, hvilket giver ionosfæren et positivt potential i forhold til jordoverfladen. I den rolige atmosfære er der da en strøm nedad med en strømtæthed af størrelsesordenen 2 pAm^{-2} . Da troperne genererer de fleste tordenvejr er der i ionosfæren en strøm fra ækvator mod polerne. Kredsløbet kan illustreres ved figur 11 fra [21], der i øvrigt giver en god oversigt over emnet.

Strømmen mellem disse flader er i høj grad influeret af solaktiviteten, idet ioniseringen fra den kosmiske stråling forbedrer atmosfærens ledningsevne. Brian Tinsley har beskæftiget sig en del med dette emne [20], idet den ændrede strøm påvirker atmosfærens dynamik, bl.a fordi skyer har en lavere ledningsevne, hvorved en øget strømstyrke betyder ophobning af positiv ladning foroven (og negativ forneden), hvilket kan influere dannelsen af iskrystaller i toppen af skyen.

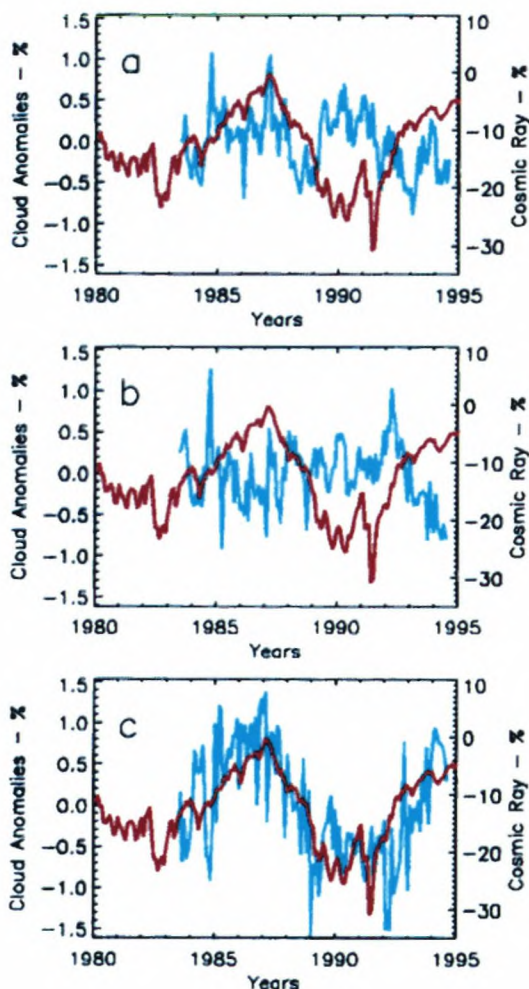
Geomagnetiske forstyrrelser kan tænkes at influere den atmosfæriske cirkulation på andre måder, f.eks ved at ændre ionosfærens potential, induktion af elektriske strømme i havet osv, og der er lavet talrige undersøgelser af korrelationer mellem solaktivitet og vejr/klima ad den vej, dog uden at kunne sætte tal på en egentlig klimaforcering. Muligvis spiller elektriske og magnetiske effekter en større rolle for vejr og klima, end man hidtil har forestillet sig, og atmosfærisk elektricitet skal tænkes hele vejen op, hvad også Thomas Allins artikel om "Feer og Elve" i Kvant 3-2000 vidner om.



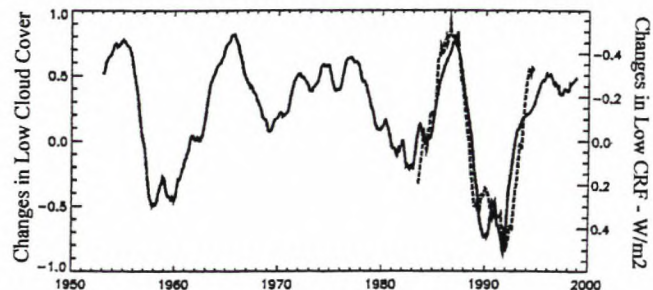
Figur 8. Sammenhængen mellem 10,7 cm fluxen (stiplet), kosmisk stråling (relativ fald i neutronflux, fuldt optrukket) og relativ ændring i det "globale" skydække for cyklus 21 og 22 (3- og 4-kanter for forskellige satellitter) [15].

Konklusion

Som det ses er der flere mekanismer, der kan bidrage til at give solaktiviteten indflydelse på udviklingen af Jordens klima, og den samlede effekt af disse ser også ud til muligvis at kunne give en forcering af klimaet af mindst samme størrelsesorden som den øgede CO2 mængde.



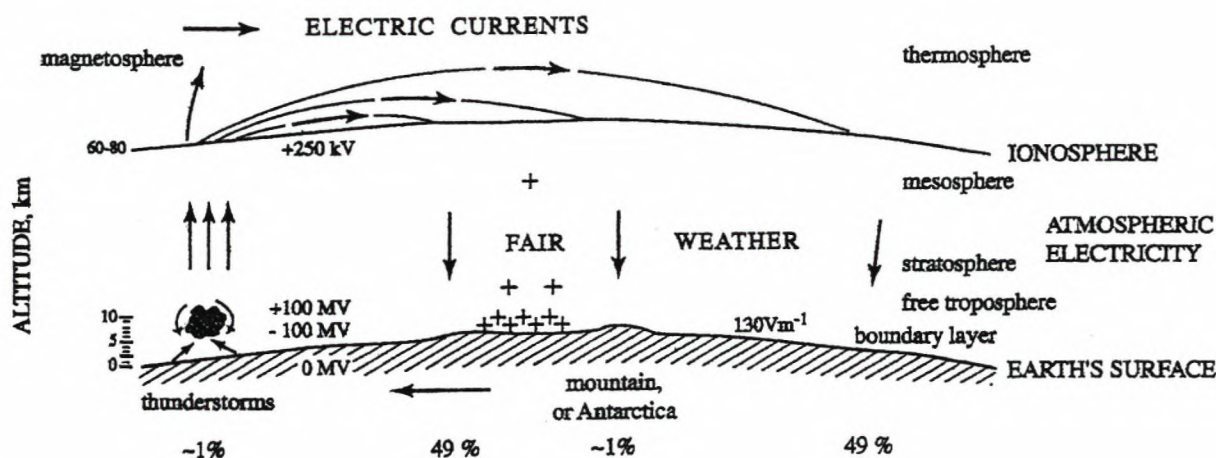
Figur 9. Månedlige anomalier af globalt skydække (blå) for henholdsvis høje skyer (>6,5 km)(a), mellemhøje skyer (b) og lave skyer (<3,2 km) (c) sammenlignet med den kosmiske stråling givet ved fald i neutronfluxen (rød) [17].



Figur 10. Rekonstruktion af mængden af lave skyer for de sidste 50 år ud fra ud fra den kosmiske strålingsflux (udglattede månedsmiddeltal). Til sammenligning er angivet målinger af det lave skydække (punkteret) [17].

Det er her nødvendigt at gøre sig klart, at solaktivitet er et komplekst fænomen, og at de enkelte mekanismer ikke følges helt ad; indikatorerne for de forskellige sider af solaktiviteten korrelerer i hvert tilfælde ikke særlig godt indbyrdes (figur 3), hvilket også kan ses på figur 12, der viser at skønt relativtallet var større i 50'erne end i 90'erne, var dette ikke tilfældet for de geomagnetiske forstyrrelser (aa), og fluxen af den kosmiske stråling aftager markant mere i sidstnævnte periode. En del forskere har ment at stigningen i den globale temperatur muligvis nok kan forklares ved stigning i solaktivitet i det meste af 1900-tallet, men ikke i de sidste par årtier. Dette er måske ikke helt korrekt, hvis det er den kosmiske stråling, der udgør hovedmekanismen for temperaturstigningen, som det ses af figur 12.

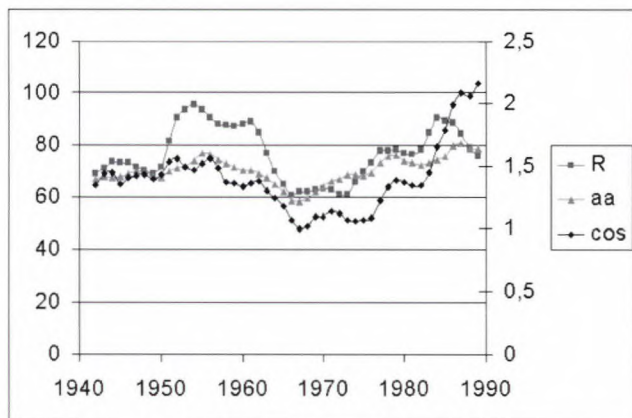
Det er ikke den 11-årige periode, der ses i de globale klimadata (men der er talrige eksempler på korrelationer lokalt i afgrænsede data) hvilket også kan illustreres af figur 1, der jo ikke følger den 11-årige cyklus.



Figur 11. Skitse af atmosfærens elektriske kredsløb [21].

Den globale sammenhæng kommer først frem ved langtidstendenser. Dette kan delvis skyldes den manglende korrelation mellem mekanismerne indbyrdes, hvor variationer af solarkonstanten følger overfladefænomener på Solen, mens variationer af skydækket følger den kosmiske stråling, hvilket udtværer signalet fra solaktiviteten. Vigtigere er dog nok at Jordens kaotiske atmosfære har en vis reaktionstid og sine egne interne oscillationer med varigheder på år og årtier, som solaktiviteten skal spille sammen med.

Vi har altså at gøre med meget komplicerede forhold, hvor ikke mindst skyer spiller en meget stor rolle, og det er f.eks. ud fra målinger af jordskin på Månen blevet godtgjort, at store ændringer i skymønsteret har en indflydelse på Jordens gennemsnitlige albedo [22].



Figur 12. 11-års glidende middelværdier af R, aa og den kosmiske strålingsfluks. Data som for fig 2, dog er kosmisk stråling angivet ved relativ aftagen (%) for ionisationskammermålingerne fra [15]. Disse data går længere tilbage end Climax neutronmonitor data og viser højenergidelen af den kosmiske stråling.

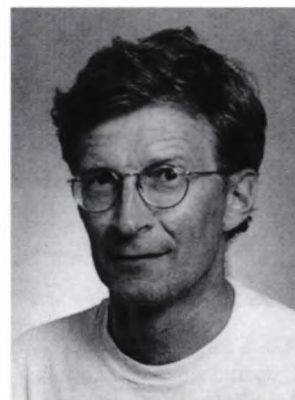
Der vil sikkert gå en del tid endnu, før man med nogenlunde sikkerhed kan besvare spørgsmålet om hvor store klimaændringer der er menneskeskabte, og hvor meget der er naturligt. Den nuværende cyklus tegner imidlertid til at blive den næstlaveste i over et halvt århundrede, så måske er solaktiviteten på vej ned! Hvis det er tilfældet, vil de næste årtiers globale temperaturudvikling give en del af svaret.

Referencer:

- [1] D. Hoyt og K. Schatten (1997) "The Role of the Sun in Climate Change", Oxford University Press.
- [2] M. Lockwood, R. Stamper og M. Wild (1999) "A doubling of the Sun's coronal magnetic field during the past 100 years", Nature, 3 juni, side 437.
- [3] Y. Wang, J. Lean og N. R. Sheeley (2000) "The long-term variation of the Sun's open magnetic flux", Geophys.Res.Lett. 15 februar, side 505.
- [4] www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23
- [5] Susanne Vennerstrøm (2000) "Long-term rise in geomagnetic activity-A close connection between quiet days and storms", Geophys.Res.Lett., 1. januar, side 69.

- [6] E. Friis-Christensen og K. Lassen (1991) "Length of the Solar Cycle: An Indicator of Solar Activity Closely Associated with Climate", Science, bind 254, side 698.
- [7] P.Thejll/K.Lassen: "Solar forcing of the Northern hemisphere land air temperature: New data" Journ. Atm. Solar-Terr. Phys. 1 Sep 2000, vol 62 p 1207
- [8] J.M.Pap/C.Fröhlich: "Total solar irradiance variations" J. Atm. Solar-Terr. Phys. Vol 61 1999 p 15
- [9] M.Fligge/S.K.Solanki: "The solar spectral irradiance since 1700" Geo. Res. Lett. July 15 2000 p 2157
- [10] W.Soon/S.Posmentier/S.Baliunas: "Inference of solar irradiance variability from terrestrial temperature changes, 1880-1993: An astrophysical application of the sun-climate connection" Astrophys. J. Dec 1 1996 p 891
- [11] H. van Loon/K.Labitzke: "The signal of the 11-year solar cycle in the global stratosphere" J.Atm.Solar-Terr.Phys 61 1999 p 53
- [12] K.Labitzke/H. van Loon: "The Stratosphere" Springer 1999
- [13] D.Shindell et al: "Solar Cycle Variability, Ozone and Climate" Science April 9 1999 p 305
- [14] H.Svensmark/E.Friis-Christensen: "Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage-a missing link in solar-climate relationships" J.Atm Solar-Terr Phys. Vol 59 no 11 p 1225
- [15] Henrik Svensmark: "Influence of Cosmic Rays on Earth's Climate" Phys. Rev. Lett. 81 1998 p 5027
- [16] J.Atm Solar-Terr. Phys vol 62,2000: Kommentarer fra T.Stockflet Jørgensen/Aksel Walløe Hansen på p 73 med svar fra H.Svensmark og E.Friis-Christensen på p 79
- [17] N.Marsh/H.Svensmark: "Cosmic rays, clouds, and climate" Space Science Reviews, preprint fra www.dsri.dk/hsv
- [18] S.Veretenenko/M.Pudovkin: "Latitudinal dependence of helio/geophysical effects on the solar radiation input to the lower atmosphere" J. Atm. Solar-Terr. Phys. vol 62 2000 p 567
- [19] G.Bazilevskaya/M.Kraiev/V.Makhmutov: "Effects of cosmic rays on the Earth's environment" J. Atm. Solar-Terr. Phys 62 2000 p 1577
- [20] Tinsley: "Correlations of atmospheric dynamics with solar-wind induced changes of air-earth current density into cloud" J. Geophys. Research Dec 27 1996 p 29701
- [21] M.Rycroft/S.Israelsson/C.Price: "The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change" J. Atm Solar-Terr. Phys vol 62 2000 p 1563
- [22] P.R.Goode et al: "Earthshine Observations of the Earth's Reflectance" Geophys. Res. Lett. Vol 28 no 9 (May 1, 2001) p 1671. (se også www.bbso.njit.edu/Research/EarthShine/)

En god oversigt findes i Proceedings fra konferencen "The Solar Cycle and Terrestrial Climate" på Tenerife i september 2000. Kan købes hos ESA som SP-463.



Sven Ove Thimm er leder af Solsektionen i Astronomisk Selskab. Lektor på Hjørring Gymnasium med Fysik, Astronomi, Matematik og Naturfag.