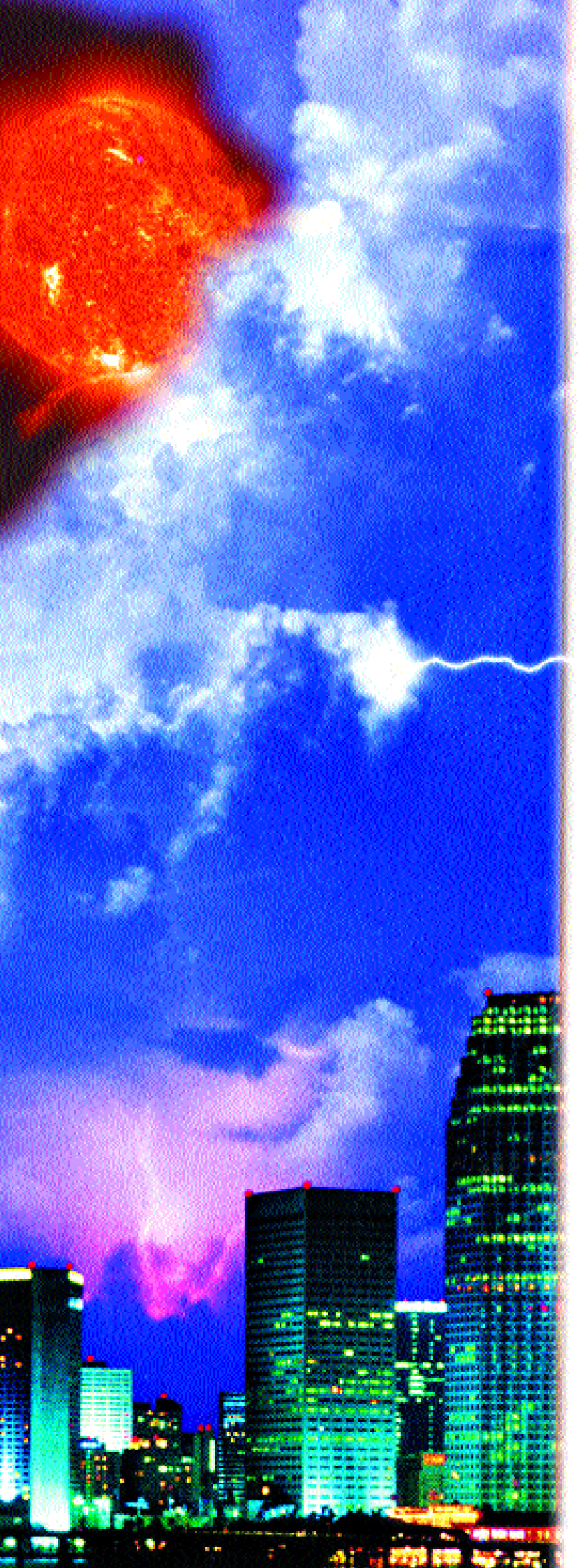


En varmere verden

Hvor my

Gjennomsnittstemperaturen på Jorden har steget med vel en halv grad de siste 150 årene. Denne økningen faller både sammen med en økning i menneskeskapte klimagasser og en økning i Solens aktivitetsnivå.

AV PÅL BREKKE

Menneskelig aktivitet, spesielt forbrenning av olje, kull og gass, gjør at mengden av såkalte drivhusgasser i atmosfæren øker. Det samme gjør bekymringen for et varmere klima og stigende havnivå.

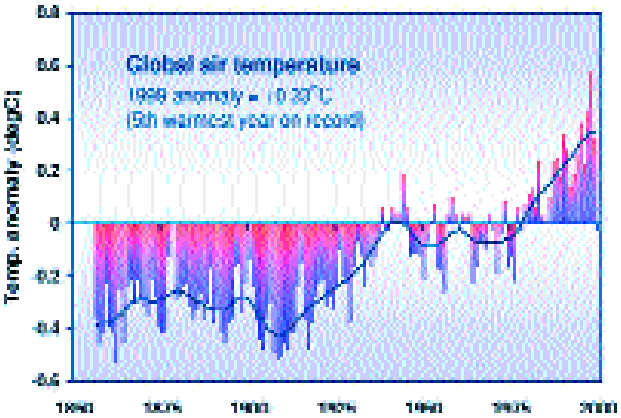
Samtidig vet vi i dag at Solens aktivitet varierer over perioder på noen tiår og hundreår. I denne situasjonen er koblingen mellom Solen og klimaendringer i dag blitt et meget kontroversielt forskningsfelt.

Ser vi nærmere på Jordens «feberkurve», kan vi merke oss at temperaturøkningen har kommet i to ulike perioder. Temperaturen steg jevnt og trutt i perioden fra 1900 til 1940 for så å avta noe igjen frem til ca. 1970. Deretter har temperaturen steget frem til i dag. De senere årene har tilsynelatende vært de varmeste siden målingene tok til for 150 år siden.

Det meste av de menneskeskapte utslippene av klimagasser har funnet sted etter 1940. Derfor er det årsaken til de siste 30 års temperaturøkning som er gjenstand for størst diskusjon.

Solen *har* betydning

Når man skal vurdere Solens innvirkning på Jordens klima, er det naturlig å starte med den totale energiutstrålingen.



Figur 1. Globalt temperaturavvik for perioden 1860 til 2000. Kilde: Hadley Centre for Climate Prediction and Research.

ye betyr Solen?

Man finner da at Solen er en meget stabil stjerne. Den totale utstrålingen fra Solen har trolig økt med høyst 0,6% siden 1850. Dette er for lite til å kunne forklare *hele* den observerte temperaturøkningen.

På 1970- og 1980-tallet forsøkte forskerne også å finne en overbevisende samvariasjon mellom den totale solutstrålingen og mer kortvarige variasjoner i Jordens temperaturkurve. Men uten å lykkes særlig godt.

I 1991 publiserte imidlertid de to danske forskerne Eigil Friis-Christensen og Knud Lassen en slående god sammenheng mellom varigheten av periodene i solaktiviteten (dvs. tiden mellom to påfølgende solsykler) og de globale temperaturendringene som er målt de siste 150 årene (figur 1). De hadde imidlertid ingen fysisk forklaring på dette.

Siden den tilnærmede økningen i totalutstråling fra Solen ikke ser ut til å kunne forklare *hele* temperaturstigningen de siste hundre år, og man samtidig så en slik påfallende god samvariasjon, begynte man å søke etter andre mekanismer der Solen kan påvirke klimaet. Disse nye funnene ble imidlertid møtt med stor skepsis fra mange fremtredende klimaforskere. De mente det måtte være utslipp av drivhusgasser som var hovedårsaken til klimaendringene de siste 150 årene.

Nylig ble en oppdatert versjon av solsykluskurven lagt frem. Denne viser at solsykluslengden ikke lenger følger den fortsatt økende temperaturkurven. Enkelte forskere har brukt dette som bevis for at den tidligere gode samvariasjonen må ha vært en tilfeldighet, og at iallfall de seneste tiårenes klimaendringer stort sett er menneskeskapte.

Mangelen på samvariasjon de siste 20 årene kan selvfølgelig bety at vi nå ser et klart menneskeskapt signal i temperaturøkningen. Men det kan også bety at solsykluslengden ikke gir et fullstendig bilde av variasjonen i solaktiviteten. En annen mulighet er at den kraftige økningen i målt bakketemperatur er overestimert.

De variasjoner i solaktiviteten som har betydning for Jordens klima er:

- Forandringer i Solens *totale* energiutstråling,
- Forandringer i mengden *ultrafiolett* stråling og
- Forandringer i Solens *magnetfelt* og partikkelstrøm

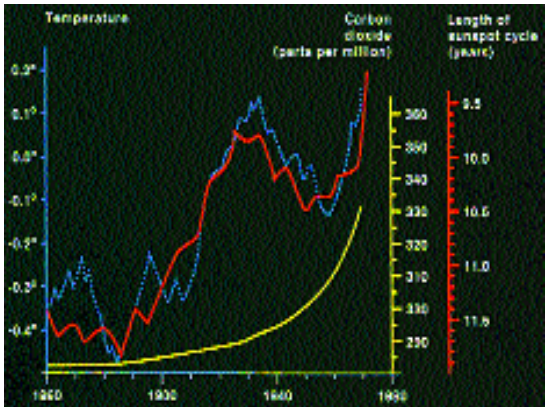
Disse skal vi nå se litt nærmere på.

Solens totale energiutstråling.

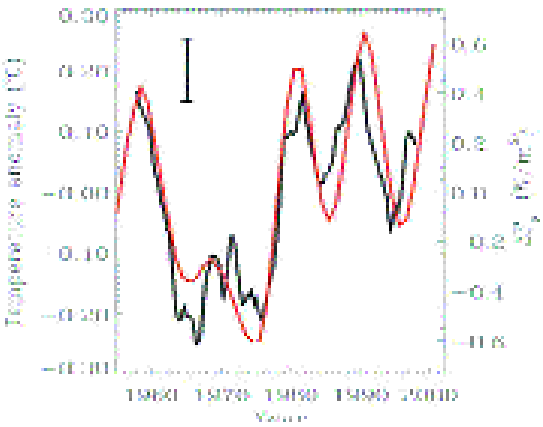
Det synes ganske opplagt at Jordens klima endres når Solens totale utstråling varierer. Man har i de siste 20 årene målt denne variasjonen ved hjelp av satellitter utenfor Jordens atmosfære. Solens totale utstråling i det synlige spektralområdet varierer lite, typisk bare 0,1%, over en solsyklus. Det er imidlertid den langsiktige tendensen som er viktig.

Ved hjelp av ulike rekonstruksjoner av solaktiviteten, anslås det at utstrålingen har økt med 0,2-0,6% siden 1850. En slik økning vil varme opp landjorden og ikke minst havmassene. I dagens klimamodeller benyttes en langtidsøkning i Solens utstråling på 0,2%. Denne effekten kan ha bidratt med mer enn 50% av temperaturøkningen fram til 1950.

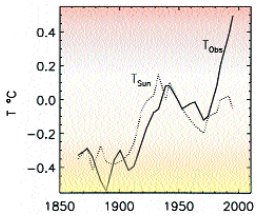
Det finnes imidlertid indikasjoner på at Solens aktivitetsnivå ikke har steget like raskt de siste 20 årene. Man antar derfor at økning i Solens utstråling i denne perioden bare har bidratt med ca. 20% av den observerte temperaturøkningen målt ved bakken.



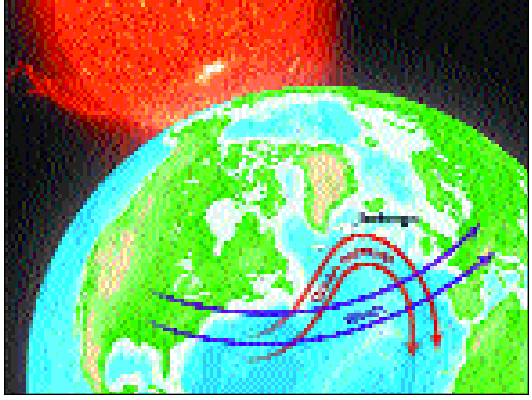
Figur 2a. Samvariasjon mellom varighet i periodene i solaktiviteten (rød kurve) og den globale oppvarming (blå kurve). Den gule kurven viser økningen i atmosfærens CO_2-innhold.



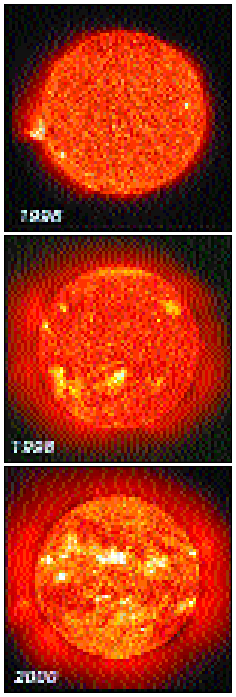
Figur 2b. En oppdatert versjon av figur 2 viser at solsykluslengden ikke stiger like raskt som den globale temperaturen de siste 10-15 år.



Figur 2c. Temperaturmålinger i troposfæren målt med ballonger og satellitter de siste 40 år, sammenlignet med rekonstruert solutstråling. Kilde: Henrik Svensmark.



Figur 3a. Den nordatlantiske svingningen (NAO, North Atlantic Oscillation) er et atmosfærisk fenomen som er med på å bestemme styrken på vestavindsbeltet over Nord-Atlanteren og inn over Europa, og kontrollerer dermed klimaet i disse områdene. Klimamodeller indikerer at variasjon i UV-strålingen fra Solen er med på å kontrollere den atmosfæriske sirkulasjonen. En sterkere sol gir sterkere vestlige vinder og et varmere klima for oss.



Figur 3b. Solen observert med EIT-instrumentet på romsonden SOHO i perioden 1996-2000. Bildene er tatt med spesielle filtre som bare slipper gjennom ultrafiolett stråling. De viser Solens varme atmosfære som har en temperatur på ca. 70 000 °C. Man ser tydelig flere lyse områder (aktive områder) i år 2000, som er nær solmaksimum, enn i 1996, som er nær solminimum. Solen sendte ut ca. åtte ganger mer UV-stråling i år 2000 enn i 1996.

Her bør det nevnes at det er en pågående diskusjon om temperaturen de siste 20 årene virkelig har steget så mye som bakkemålingene antyder. Sterkt voksende byer nær og omkring målestasjonene fører til lokale temperaturøkninger. Disse forstyrrer målinger som benyttes i beregninger av global temperatur. Globale satellittmålinger og ballongmålinger av troposfæretemperaturen viser bare en beskjeden oppvarming. Denne varierer også i takt med solsyklusen.

Ultrafiolett stråling

Solen sender ut elektromagnetisk stråling ved alle bølgelengder. Selv om de korteste bølgelengdene (ultrafiolett og røntgen) bare utgjør 2% av totalenergien fra Solen, er variasjonene her betydelig større enn i den synlige delen av spekteret. I synlig lys er de sykliske variasjonene ca. 0,1%, mens man i ultrafiolett lys kan måle opptil 100 ganger økning i strålingsfluksen.

Når elektromagnetisk stråling trenger inn i Jordens øvre atmosfære, blir forskjellige bølgelengder av strålingen absorbert i ulike lag. Den absorberte energien påvirker temperatur, kjemi og strømningsmønstre i disse lagene. Dette er trolig med og bestemmer strukturen videre nedover i atmosfæren. Disse effektene vil også påvirke sirkulasjonssystemene og ozonkonsentrasjonen.

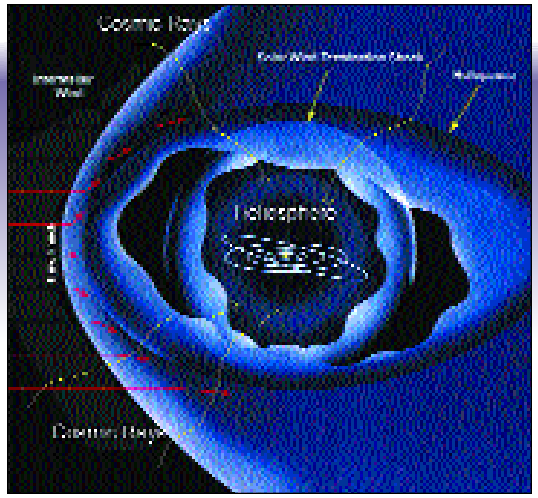
Den delen av Solens utstråling som er involvert i dannelse og nedbryting av ozon, har økt med omkring 3% de siste 150 årene. Dette er 10 ganger mer enn de målte variasjonene i totalutstrålingen. Økningen på 3% har trolig ført til en langtidsvirkning i ozonmengden og dermed en klimatisk effekt siden ozon også virker som en drivhusgass. Ozonmengden påvirkes altså ikke bare av menneskeskapte forhold, men sannsynligvis også av naturlige variasjoner i Solens ultrafiolette utstråling.

Magnetfelt og partikkelstrøm (solvinden)

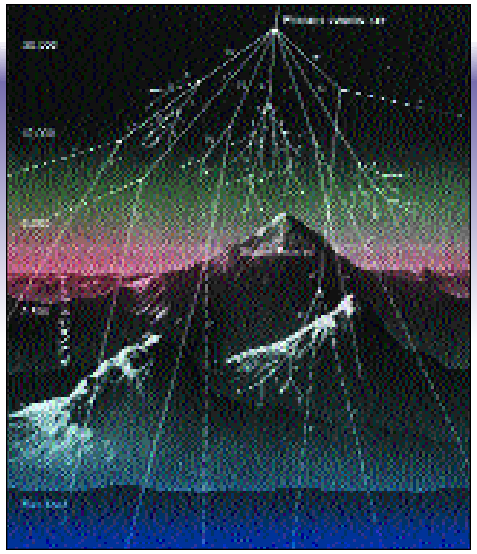
Som de fleste andre stjerner mister Solen stadig masse ved en utoverrettet «vind» av tynn, varm gass. Styrken på denne *solvinden* endrer seg i takt med solaktiviteten. Enkelte ganger slynges det ut partikler (protoner) med høy energi som vekselvirker med Jordens atmosfære. Slike protonskurer varer i et par dager, og partiklene kan skade både satellitter og mennesker som befinner seg i rommet.

Nylige undersøkelser viser at disse partiklene også river i stykker molekyler i jordatmosfæren, og at de resulterende frie atomene reagerer med ozonmolekyler som så ødelegges. Man har målt kraftige reduksjoner i mengden ozon like etter slike solstormer, og at denne reduksjonen holder seg i mange uker. Igjen registrerer man naturlige variasjoner i ozonlaget i tillegg til den menneskapte påvirkningen.

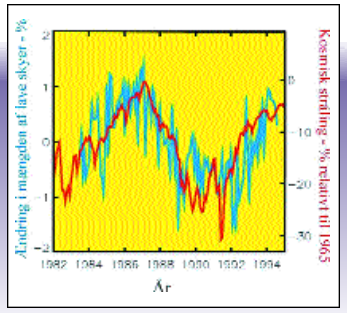
Solens magnetfelt kontrollerer mengden kosmiske partikler som kan trenge inn i vårt solsystem. Det har lenge vært kjent at den kosmiske partikkelfluksen som trenger inn i jordatmosfæren, er sterkt knyttet til solaktiviteten. Dette henger dels sammen med at Solens magnetiske felter «skjermer» Jorden mer effektivt mot



Figur 4a. Solens magnetfelt virker som en beskyttelse og kontrollerer mengden av kosmiske stråler som kommer inn i Solsystemet. I perioder med høy solaktivitet kommer færre kosmiske stråler inn i jordatmosfæren.



Figur 4b. De energirike kosmiske strålene kolliderer med og påvirker molekylene flere ganger på sin vei ned i Jordens atmosfære.



Figur 4c. Mengden skyer (blå kurve) og kosmisk stråling (rød kurve) viser en oppsiktsvekkende samvariasjon. Kilde: Henrik Svensmark.

innfallende kosmiske partikler når aktiviteten er høy enn når den er lav. Altså: Høy solaktivitet betyr at færre kosmiske partikler ned til oss.

Slående samvariasjon

I 1996 presenterte de danske forskerne Henrik Svensmark og Eigil Friis-Christensen en svært oppsiktsvekkende studie. Den var basert på satellittmålinger av den globale andelen skyer og målinger av kosmisk innstråling i jordatmosfæren. Skymengden viste en meget god samvariasjon med mengden av kosmisk stråling. Kanskje var man på sporet av enda en mekanisme som kunne påvirke klimaet?

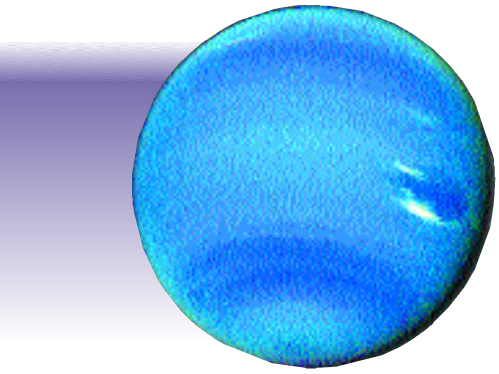
Nyere og bedre observasjoner av skyer viser at det bare er de lave skyene som ser ut til å variere med solaktiviteten. Norske forskere har foreslått at det er variasjoner i Solens UV-stråling som gir opphav til variasjonen i de lave skyene og ikke kosmisk stråling. De siste resultatene ser imidlertid ut til å favorisere kosmisk stråling.

Både forskningsresultater og faktiske målinger fra fly tyder i dag på at de inntrengende kosmiske partiklene er opphav til tallrike sekundære partikler, som i sin tur stimulerer til dannelse av skyer. Skyer influerer på hvor mye energi som reflekteres tilbake til verdensrommet, og hvor mye som trenger inn i vår atmosfære og kommer ned til bakken.

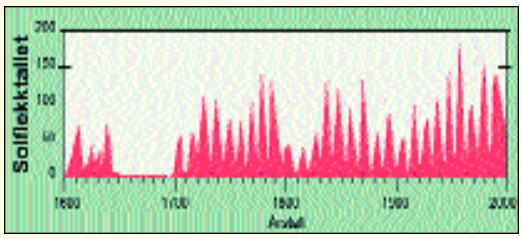
Det generelle aktivitetsnivået til Solen er i dag mye høyere enn for hundre år siden. Faktisk har Solens åpne magnetfelt økt med hele 230% siden 1900 og 41% siden 1964. Dette har gitt en reduksjon i mengden kosmisk stråling på hele 15%.

Dette kan ha ført til at andelen lave skyer er betydelig mindre nå enn tidligere. Det vil igjen bety mer innstråling fra Solen og dermed en økt varmeeffekt. Denne effekten kan, sammen med økningen i totalutstråling på 0,2 % de siste 150 år, forklare det meste av den globale oppvarmingen som er observert i samme periode. Solens aktivitet økte også fram til midten av 80-tallet slik en vesentlig del av oppvarmingen fram til da kan skyldes Solen.

Det er også andre momenter som taler for at skymengden kan drives av solaktivitet. Lysstyrken til



Figur 4d. Mye tyder på at også skymengden på Neptun varierer i takt med utbredelsen av Solens magnetfelt.



Solflekkenes antall og utbredelse på solskiven varierer syklisk med en gjennomsnittlig periode på 11 år. Kurven angir solflekktallet fra observasjoner med teleskoper siden ca. 1700 og viser at styrken av de enkelte solflekksykler varierer. I perioden ca. 1645-1715 var det nesten ingen solflekker.

Solflekker og solsyklus

Siden Galileo Galilei tok teleskopet i bruk på begynnelsen av 1600-tallet, er det jevnlig observert detaljer på Solens overflate. De mest framtredende strukturene er *solflekker*; mørke områder på Solens overflate. De dannes når magnetfeltene like under overflaten «vris» og bryter gjennom.

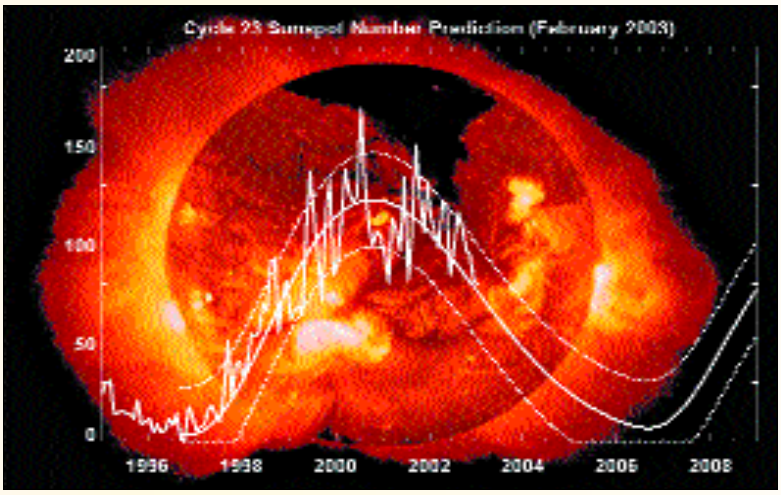
Den unge tyskeren Heinrich Schwabe påviste i 1843 at antallet flekker varierer med en periode på omkring elleve år. Under solmaksimum er det mange flekker på Solen, mens det under solminimum er få. Dette gjør at man ved å observere antall flekker, får et bilde av Solens aktivitet.

Man skulle forvente at Solens totale utstråling vil variere i takt med arealet av flekker som dekker solskiven, slik at strålingen totalt sett blir noe *svakere* når Solen har mange og store flekker. Men på grunn av tilleggsstrålingen fra de lysere områdene omkring solflekkene, *faklene*, vil Solen faktisk kunne stråle noe *sterkere* når det er mange «mørke» flekker på overflaten.

Solaktiviteten omfatter også økt konsentrasjon av magnetfelt, eksplosive utbrudd, kraftige lysbluss og energirike skurer av gass som slynges ut i det interplanetariske rommet.

Et solart utbrudd medfører ofte at «solskyene», dvs. store mengder av korona-gass og magnetiske felter, slynges utover og vekk fra Solen. Slike utbrudd kan romme mer enn ti milliarder tonn gass, som med en fart på over fem millioner kilometer i timen kan forårsake dramatiske effekter på Jorden. Det flotte nordlyset er et resultat av at slike gassskyer treffer Jordens magnetfelt, men skyene kan også påvirke kraftforsyning, satellittkontroll, navigering og globale telekommunikasjonssystemer (se *Astronomi* 4/2000 side 16-23).

I tillegg til perioden på 11 år, ser man også tydelige forandringer i aktivitetsnivået over perioder på 80-90 år og 200 år. Det er slike langtidsendringer som er av størst interesse for klimaendringer. Variasjoner i klimatiske forhold på grunn av 11-årssyklusen kan også observeres, men eventuelle temperaturendringer vil dempes betydelig på grunn av den termiske tregheten i havmassene. Det er likevel observert svingninger i havtemperaturen i takt med den 11-årige solsyklusen.



Solflekktallets variasjon i inneværende solsyklus.

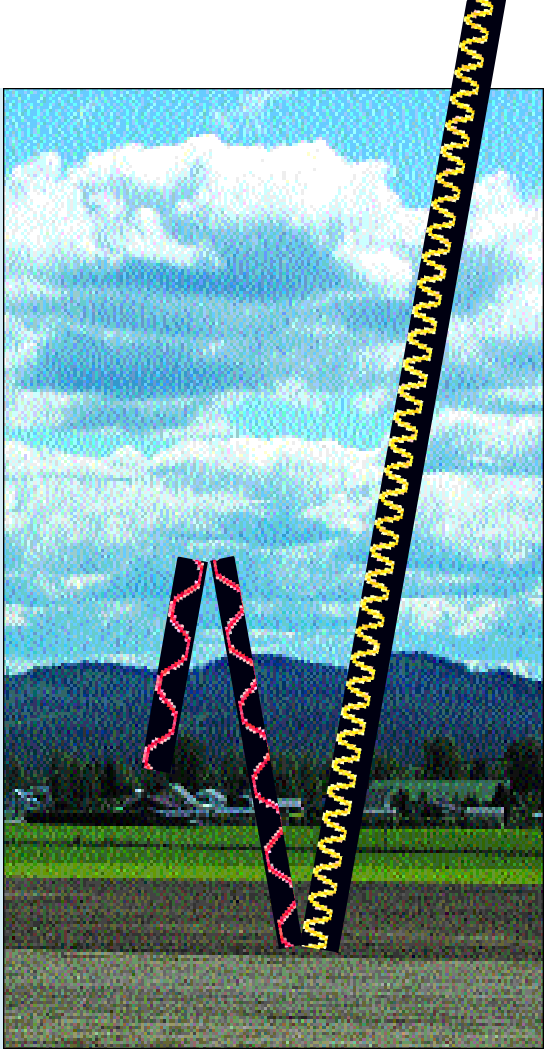
Drivhuseffekten

Enkelte naturlig forekommende gasser i Jordens atmosfære fungerer omtrent på samme måte som glasstaket i et drivhus: De slipper solstrålene inn, men holder på mye av varmen.

I dag fører drivhuseffekten i vår atmosfære til en midlere global temperatur på 14° C. Uten drivhuseffekten ville likevektstemperaturen på jordoverflaten vært ca. 33 grader lavere, altså -19°C. Liv på Jorden, slik vi i dag kjenner, ville altså vært umulig uten drivhuseffekt.

Drivhuseffekten er altså en både naturlig og – iallfall for oss – livsviktig egenskap ved Jordens atmosfære. En forandring i enten innstrålingen fra Solen, i andelen som reflekteres tilbake til verdensrommet, eller i atmosfærens evne til å absorbere infrarød tilbakestråling vil forårsake endringer i likevektstemperaturen. Det vil si at både naturlige og menneskeskapte effekter forandrer temperaturen på Jorden.

De to viktigste drivhusgassene som fanger tilbakestråling er vanndamp (H_2O) og karbondioksid (CO_2). Vanndamp står for det meste av absorbsjonen, mens CO_2 bidrar med ca. 5%. Mesteparten av karbondioksidet kommer fra naturlige kilder som havet og vulkaner.



Drivhuseffekten er en naturlig effekt som opprettholder en levelig temperatur på Jorden. Både naturlige (Solen, vulkaner) og menneskeskapte effekter kan føre til variasjoner i drivhuseffekten.

planeten Neptun varierer f.eks. i takt med solaktiviteten. Skyene på Neptun består for det meste av frossen metan slik at planeten reflekterer det meste av sollyset. Siden 1973 viser observasjoner at lysstyrken varierer med omkring 3% i fase med solaktiviteten, og at Neptun lyser sterkest når Solen er lite aktiv.

Egenskapene til skyene på Neptun ser dermed ut til å være knyttet til mengden kosmiske partikler på samme måte som skyene på Jorden. En har også målt mengden skyer som dekker Jorden ved å studere «jordskinnet», altså mengden lys som reflekteres tilbake fra den mørke delen av Månen. Disse målingene støtter også opp om at skymengden følger solaktiviteten.

Foto: Trond Erik Hillestad

Pål Brekke er er utdannet dr. scient ved Universitetet i Oslo og arbeider i dag for Den europeiske romorganisasjonen (ESA) ved NASA GSFC. Han er også nestleder for SOHO-prosjektet.

Er klimavariasjonene menneskeskapte eller naturlige?

Etter min mening kan vi i dag ikke med sikkerhet si om den globale oppvarmingen som er målt de siste 30 årene er dominert av menneskeskapte klimagasser eller om det er Solen som gir det største bidraget. Menneskeskapte klimavariasjoner kan vanskelig estimeres før man klarer å kvantifisere bidrag fra naturlige effekter slik som Solen og vulkaner.

Vulkaner spyr ut store mengder støv som gir en avkjølende effekt, mens Solen har gitt en oppvarmende effekt de siste 150 år. Store vulkanutbrudd som El Chichon (1982) og Pinatubo (1991) førte til målbare reduksjoner i global temperatur som varte et par år etter utbruddene. På samme måte vil naturlige atmosfæriske forstyrrelser som El Niño føre til globale variasjoner i temperatur. Slike naturlige påvirkninger gjør det vanskelig å bestemme hvor store de menneskeskapte effektene er.

Klimaet vil også i fremtiden styres av både menneskeskapte og naturlige variasjoner. Solaktiviteten kan fortsette å øke, men den kan også flate ut og faktisk avta. De fleste solforskerne tror at det siste er mest sannsynlig for de neste 50-100 årene. Dette vil i så fall kunne kompensere for en del av en eventuell oppvarming fra menneskeskapte klimagasser.

Det gjenstår mye forskning før man kan si noe mer sikkert både om Solens innvirkning på klimaet og i hvor stor grad menneskeskapte klimagasser kan føre til klimaendringer. Man trenger satellitter som kan overvåke Solen over lang tid, og man må samtidig forbedre metodene man har i dag har for å overvåke de ulike klimaparametrene på Jorden. ◊

Cortesy: Arts Museums of San Francisco

Detalj fra maleriet «Winther Scene with Frozen Canal» av Aert van der Neer.

På skøyter på Themsen

Mange forsøk er blitt gjort på å koble Solen til klimavariasjoner på Jorden. Allerede i 1796 hevdet den berømte astronomen William Herschel å ha funnet en sammenheng mellom antall solflekker og prisen på korn. Herschel mente dette hang sammen med vekstforhold og klima.

Det best kjente eksempelet på en slik sammenheng fra «nyere tid» er det såkalte Maunder-minimumet. oppkalt etter briten E.W. Maunder. Han oppdaget fenomenet da han studerte gamle fortegnelser over solflekker omkring 1890. I en periode på hele 70 år, fra 1645 til 1715, ble det observert svært få solflekker.

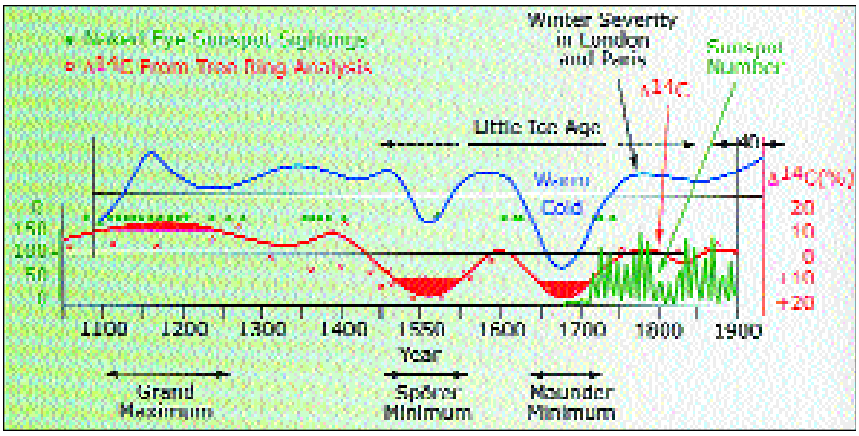
Fagfolk diskuterte lenge om mangelen på solflekker var reell eller om skyldtes mangelfulle observasjoner. På 1970-tallet ble de historiske dataene gått nærmere etter i sømmene. Samtidig ble det gjennomført undersøkelser av karbon-14 i årringer på trær. Undersøkelsene bekreftet at Solen virkelig må ha vært lite aktiv i denne perioden – som for øvrig faller ganske nøyaktig sammen med den lange regjeringstiden til den franske «solkongen» Ludvig 14 («Staten, det er meg»!).

Mer interessant er det at denne perioden også var usedvanlig kald – så kald at den er blitt kjent som «den lille istid». Malerier fra denne perioden viser f.eks. folk som går på skøyter på Themsen. Den slående sammenhengen mellom lav solaktivitet og kaldt klima ble bl.a. påpekt i en artikkel av J. Eddy og var medvirkende til at sammenhengen mellom solaktivitet og klima for alvor ble gjenstand for undersøkelser på 1970-tallet.

Den lille istid er ikke et enestående fenomen. Ved å studere radioaktive isotoper har forskere nå slått fast at uvanlig høy solaktivitet i tidsrommet 900-1200 falt sammen med en varm klimatisk periode på Jorden. Varmen førte blant annet til at isen på Grønland trakk seg tilbake. De klimatiske forholdene gjorde det mulig for vikingene å bosette seg der og dyrke jorda. Hvete ble faktisk eksportert til Norge! Senere falt middeltemperaturen igjen, isen trakk ned mot havet, og de nye beboerne ble fordrevet.

Man antok at forklaringen lå i at Solens utstråling varierte og kunne forårsake klimaendringer. Det pågår en vitenskapelig debatt om hvorvidt dette var en varm periode over hele Jorden eller om den bare var lokalisert til Europa og Grønland. Flere forskningsresultater tyder imidlertid på at en slik varmeperiode har funnet sted også mange andre steder i verden, både i Kina, Nord-Amerika, Sibir, Sør-Afrika, Argentina og på New Zealand.

Vintrene i Europa var usedvanlig harde i årene 1645-1715. Antall solflekker var svært lavt i den samme perioden. Det foregår en debatt om hvorvidt temperaturnedgangen kun gjaldt Europa, men mange forskere mener at den kan spores også på andre kontinenter.



Ill.: J. Eddy