Solens innvirkning på Jordens klima

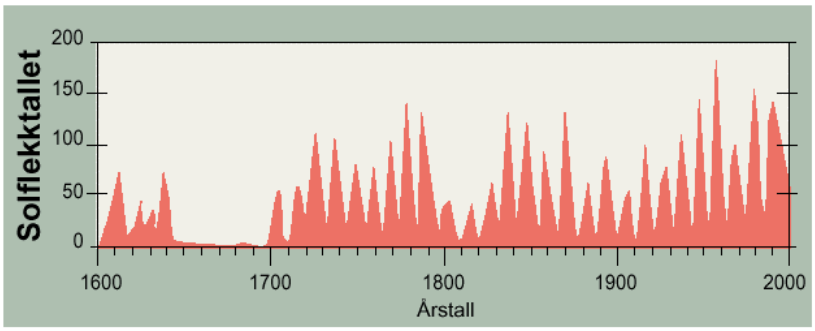
P. Brekke
European Space Agency

I et astronomisk perspektiv er Solen en ganske alminnelig stjerne. Men den er samtidig forutsetningen for alt liv på vår planet. Fotosyntesen i plantene er avhengig av sollys, og dannelse av all næring og fossilt brennstoff skyldes energi fra Solen. Solen driver værsystemer, opprettholder havstrømmer og påvirker muligens også mengden skyer i jordatmosfæren. Det er derfor nærliggende å anta at den også kan påvirke globale klimaendringer

BAKGRUNN

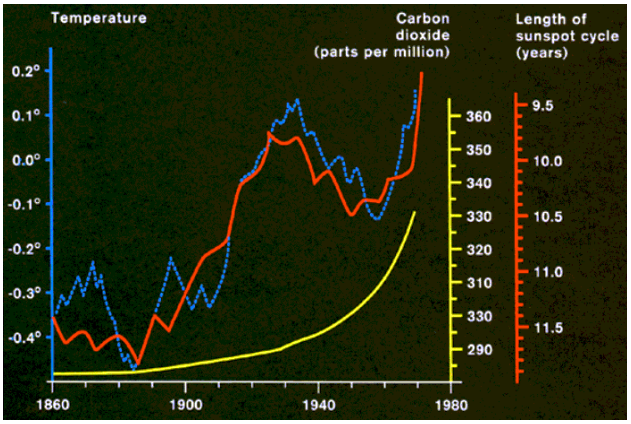
Opp gjennom årene har man gjort en rekke forsøk på å koble ulike aspekter ved variasjoner i Solens aktivitetsnivå til klimavariasjoner på Jorden. Allerede i 1796 hevdet William Herschel at han hadde funnet en sammenheng mellom antall solflekker og prisen på korn, noe han mente hang sammen med vekstforhold og klima.

Det var imidlertid først på 1970- tallet at problemstillingen for alvor ble gjenstand for undersøkelser. J. Eddy påpekte en slående sammenheng mellom en kald periode på Jorden rundt 1700 tallet ("den lille istid") og en sammenfallende periode med uvanlig lav solaktivitet, kalt *Maunder minimum*. Videre kunne man ved å studere radioaktive isotoper fastslå 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 vikingenes 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.



Solflekkenes antall og utbredelse på solskiven (angitt ved Wolfs solflekktall) 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 med tiden. De tidligste observasjoner av Galileo og den tyske jesuitterpresten Christoph Scheiner (ca. 1610) er tegnet inn. I perioden ca. 1645-1715, Maunder minimum, var det nesten ingen solflekker. Maunder minimum faller sammen med en kjølig periode i bl.a. Europa.

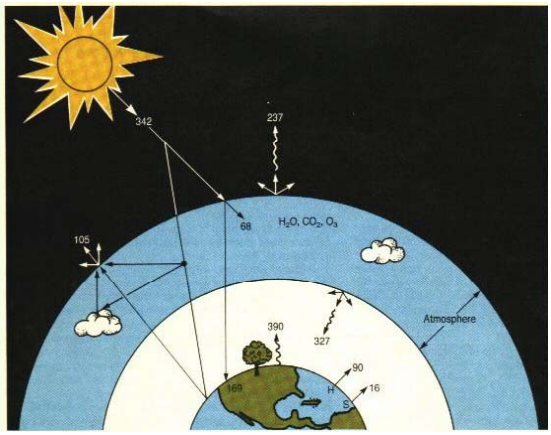
Som følge av økt utslipp av drivhusgasser i de senere år, har bekymringen for menneskeskapte klimaendringer blitt større. Det har ført til at koblingen mellom Solen og klimaendringer har blitt et meget kontroversielt forskningsfelt. I 1991 fant de to danske forskerne Eigil Friis-Christensen og Knud Lassen en slående god korrelasjon mellom varigheten av periodene i solaktiviteten (dvs. tiden mellom to påfølgende solsykler) og den globale oppvarmingen som er målt de siste 150 årene (fig. 1). De fant at varigheten av en aktivitetsperiode også følger den registrerte nedgangen i temperatur etter 1950 meget godt, en tendens som man har forsøkt å begrunne ved en avkjølingseffekt som kan skyldes økning av aerosoler i atmosfæren. Friis-Christensen og Lassen hadde imidlertid ingen fysisk forklaring på den tilsynelatende sammenhengen mellom periodelengden i solaktiviteten og den globale temperaturen.



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

Sollignende stjerner oppviser også aktivitet og perioder i aktiviteten fra sju år til 20 år, eller lengre. Enkelte stjerner er betydelig mer aktive enn Solen. Man har målt at aktiviteten avtar med økende lengde på perioden, noe som tyder på at solsykluslengden synes å være knyttet til Solens aktivitetsnivå. Siden den tilnærmede forandringen i totalutstrålingen fra Solen ikke ser ut til å kunne forklare hele temperaturstigningen de siste 100 år, og at man samtidig så en slik påfallende god korrelasjon, 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 år.

Drivhuseffekten. Enkelte natrulige gasser i Jordens atmosfære fungerer omtrent på samme måte som glasstaket over 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 -19°C og liv på Jorden slik vi i dag kjenner ville vært umulig.. De to viktigste absorberende "drivhusgassene" som fanger tilbakestråling er vanndamp (H_2O) og karbondioksid (CO_2). Vanndamp står for over 90 % av absorbsjonen mens CO_2 bidrar med ca. 5 %, hvorav det meste kommer fra naturlige kilder som havet og vulkaner. Med andre ord er "drivhuseffekten" en naturlig og livsviktig egenskap ved vår atmosfære. En forandring i enten innstrålingen fra Solen, i andelen som reflekteres tilbake til verdensrommet, eller i atmosfærens evne til å absorbere innfrarød tilbakestråling vil forårsake endringer i likevektstemperaturen. Det vil si at både naturlige og menneskeskapte effekter forandre temperaturen paa Jorden.

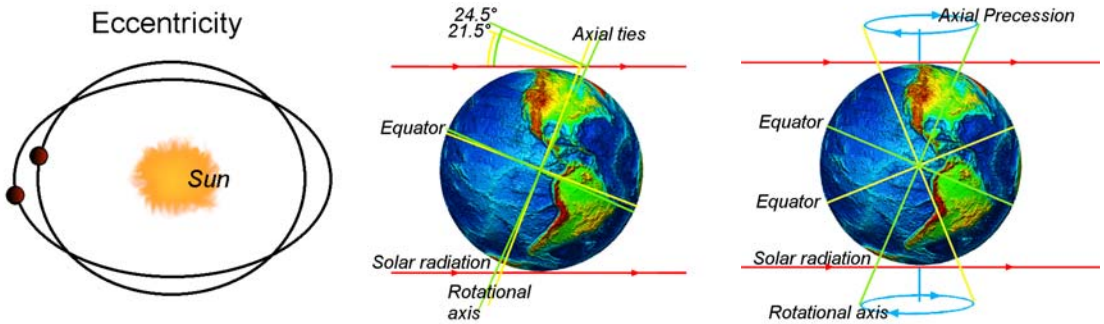


Drivhuseffekten er en naturlig effekt som opprettholder en levelig temperatur på Jorden. Både naturlige (solen, vulkaner) og menneskeskapte effekter kan føre til variasjoner i drivhuseffekten.

KLIMAVARIASJONER GJENNOM TIDENE

Innstrålingen fra Solen varierer med tiden både på grunn av endringer på selve Solen og fordi jordbanen og retningen på Jordens egen rotasjonsakse gjennomløper periodiske forandringer. Jordbanen er svakt elliptisk, hvilket medfører at Jordens avstand til Solen varierer med 3,34 % i løpet av et kretsløp. Det medfører en gjentagende årlig variasjon i innstrålingen på 6,7 %, der Jordens avstand er minst om vinteren og størst om sommeren. Gravitasjonsmessige påvirkninger fra Solen, Månen og fra planeter fører til svake endringer i jordbanens form (eksentrisitet), som gjentar seg med en periode på omkring 100 000 år (fig. 2a). I tillegg vil polaksens helning i forhold til baneplanet, som i dag er 23,5 grader, fluktuere mellom 21,5 og 24,5 grader, med en periode på 41 000 år (fig. 2b). Den tredje og siste variable er dreiningen av polaksen, en såkalt presesjonsbevegelse, som varierer periodisk med en periode fra 19 000 år til 23 000 år (fig. 2c). Denne presesjonsbevegelsen medfører videre at årstidene flytter seg i forhold til Jordens posisjon i banen omkring Solen.

Solens innstråling varierer pga. forandringer i jordbanen og retningen til jordaksen



Jordens bane rundt Solen varierer med en periode på 100 000 år.

Polaksens helning i forhold til baneplanet varierer mellom 21,5° og 24,5°, med en periode på 41 000 år.

Polaksen dreier rundt (presesjonsbevegelse) med en periode fra 19 000 år til 23 000 år.

Den jugoslaviske matematikeren M. Milankovitsj videreførte tidligere arbeider til den franske matematikeren J. Adhemar og den skotske fysikeren J. Croll. Han viste i 1920-årene at den kombinerte effekten av de periodiske forandringene i jordbanen og jordaksens helning, ville føre til regelmessige variasjoner i innstrålingen fra Solen. Denne astronomiske effekten gir store regionale variasjoner over tid, for eksempel vil sommerinnstrålingen på våre breddegrader variere med opptil 20 %. På den annen side er den årlige middelinnstrålingen over hele jordkloden bare omkring 0,1 %.

Det hersker liten tvil om at forhold knyttet til Solen har forårsaket 10 betydelige perioder med istider og varmere mellomperioder på forskjellige steder på kloden i løpet av de siste 800 000 år. Ved å ta ut borekjerner fra avsetninger på havbunnen og analysere disse, kan paleoklimatologene bestemme endringer i klimaet de siste 800 000 år. Slike målinger viser klimautslag med en periode på omkring 100 000 år, og i tillegg store svingninger med perioder på 41 000 år, 23 000 år og 19 000 år. Dette er i godt samsvar med Milankovitsjs beregninger. De store klimaendringene synes å skje meget raskt, på tross av at innstrålingen endrer seg forholdsvis jevnt.

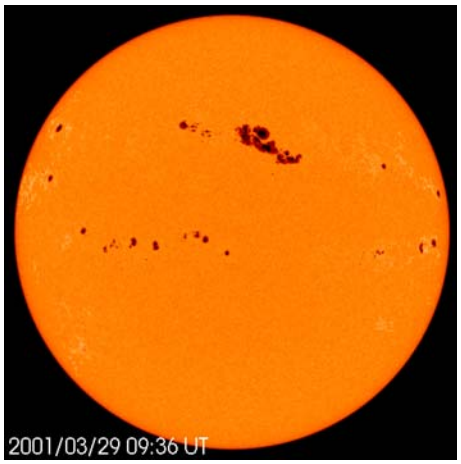
Man har på ingen måte full innsikt i alle mekanismer og kompliserte vekselvirkninger mellom solar innstråling, geologisk aktivitet, havene og vår atmosfære, som inngår i klimaendringene. Paleoklimatologene viser at vi har et følsomt klimasystem. Dagens klimadebatt dreier seg om klimaendringer på betydelig kortere tidsskalaer, men for å forstå disse er det nødvendig også å forstå de langsiktige klimaendringer som i overveiende grad involverer Solen.

SOLEN LYSER STADIG STERKERE

Solens luminositet, dvs. dens totale utstråling, avhenger av hvor mye hydrogen som forvandles til helium per tidsenhet i dens indre. Forbrenningshastigheten bestemmes av temperatur og gasstrykk i kjernen. På grunn av den gradvis økende relative mengde helium i Solens kjerne, øker temperaturen svakt, hvilket igjen fører til økt forbrenning og derved økt utstråling. Beregninger viser at Solens lysstyrke har økt med nær 30 % siden den var nydannet for minst 4,5 milliarder år siden. I løpet av noen hundre år utgjør dette selvsagt meget små endringer i strålingsfluksen.

Den aktive Solen

Siden Galileo Galilei og hans samtidige tok teleskopet i bruk på begynnelsen av 1600-tallet, har man jevnlig kunnet observere detaljer på Solens overflate. De mest fremtredende strukturene er *solflekker* som man ser som mørke områder på Solens overflate. De dannes når magnetfeltene like under overflaten vris og bryter igjennom. Den unge tyskeren Heinrich Schwabe påviste i 1843 at antallet flekker varierte med en periode på omkring elleve år. Under solmaksimum er det mange flekker på Solen, under solminimum, få. Dette gjør at man ved å observere antall flekker, får et bilde av Solens aktivitet.



En enormt stor solflekkgruppe var synlig på solskiven 29. mars 2001. Den hadde en utstrekning 13 ganger Jordens diameter (over 170 000 km) og var synlig med det blotte øyet. Bildet er observert fra MDI - instrumentet på SOHO- satellitten (ESA-NASA).

Man skulle forvente at Solens totale utstråling vil variere i takt med arealet av flekker som dekker solskiven, slik at strålingen skulle bli noe svakere når Solen har mange og store flekker. Men på grunn av tilleggsstrålingen fra de lysere områdene omkring solflekkene, *fakler*, vil Solen faktisk kunne stråle noe sterkere når det er mange "mørke" flekker på overflaten enn når det er få eller ingen flekker.

Solaktivitet omfatter økt konsentrasjon av magnetfelt, eksplosive utbrudd, kraftige lysbluss og energirike skurer av gass som slynges ut i det interplanetariske rom. Et solart utbrudd medfører ofte at "solskyene", store mengder av korona-gass og magnetiske felter, slynges utover og vekk fra Solen. Slike utbrudd kan romme mer en 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 gasskyer treffer Jordens magnetfelt, men skyene kan også påvirke kraftforsyning, satellittkontroll, navigering og globale telekommunikasjonssystemer.

I tillegg til perioden på elleve år, ser man også tydelige forandringer i aktivitetsnivået over perioder på 80-90 år og 200 år. Det er slike langtidsvariasjoner som er av betydning for klimavariasjoner på Jorden fordi variasjoner over en 11-års periode vanligvis er for kort til å føre til større temperaturendringer. Det skyldes at det meste av Jorden er dekker av hav, og det tar lang tid å varme opp de store mengdene med vann.

VARIASJONER I SOLAKTIVITET

De viktigste årsaker til at variasjoner i solaktivitet kan bidra til klimaendringer på Jorden er:

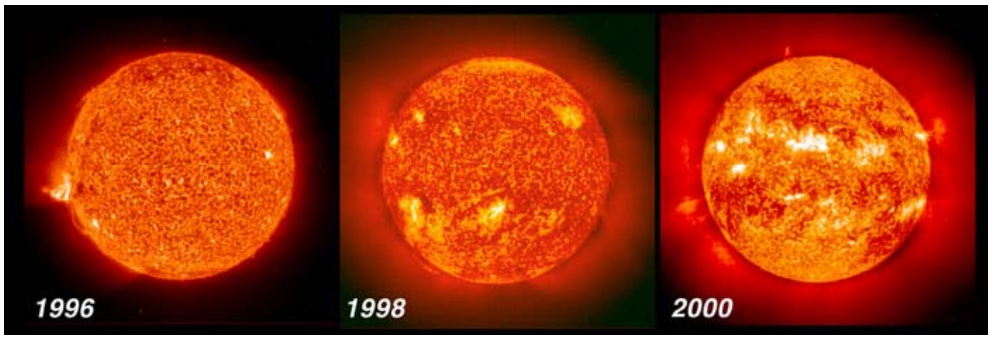
- Forandringer i Solens totale energiutstråling,
- forandringer i mengden ultrafiolett stråling og
- forandringer i Solens magnetfelt og partikkelstrøm

Forandringer i Solens energiutstråling. Det synes opplagt et Jordens klima endres når Solens totale utstråling varierer. Man har i de siste 20 årene målt variasjonen i utstrålingen ved hjelp av satellitter utenfor Jordens atmosfære. Solens totale utstråling i det synlige spektralområdet varierer forholdsvis lite (0,1 %) over en solsyklus. Det er imidlertid den langsiktige tendensen som er viktig. En økning på 0,2 – 0,6 % siden 1850 er estimert ved hjelp av ulike rekonstrusjoner av solaktiviteten tilbake i tid. En slik økning vil varme opp bakken og ikke minst havmassene. I dagens klimamodeller benyttes en langtidsøkning i Solens utstråling på 0,2 %. Basert på denne verdien har man konkludert med at Solen via en slik mekanisme kan ha bidratt til mer enn 50 % av temperaturøkningen frem til 1950.

Det er imidlertid indikasjoner på at Solens aktivitetsnivå ikke har steget like raskt de siste 20 årene, og man antar derfor at Solen bare kan ha bidratt med ca. 25 % av den observerte temperaturøkningen målt ved bakken. Her bør det nevnes at det er en pågående vitenskapelig 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 av troposfæretemperaturen i nevnte periode viser bare en beskjeden oppvarming og sykliske variasjoner med solsyklusen.

Forandringer i mengden ultrafiolett stråling. Solen sender ut elektromagnetisk stråling på alle bølgelengder. Selv om de korteste bølgelengdene (ultrafiolett og røntgen) bare utgjør 2 % av totalenergien fra Solen, er variasjonene betydelig større enn i den synlige delen av spekteret der de sykliske variasjone er ca. 0,1%. Man kan her, avhengig av bølgelengden, måle opptil 100 ganger økning i strålingsfluksen.



Solen observert med EIT-instrumentet på SOHO i perioden 1996-2000. Bildene er tatt med spesielle filtre som bare slipper gjennom ultrafiolett stråling og viser Solens varme atmosfære (ca. 70 000 ^{o}C). Man ser tydelig flere lyse områder (aktive områder) i år 2000, som er nær solmaksimum, enn i 1996, som er nær solminimum. Solen sender ut ca 8 ganger mer UV stråling i år 2000 enn i 1996.

Elektromagnetisk stråling og partikler fra Solen trenger inn i Jordens øvre atmosfære, og forskjellige bølgelengder av strålingen blir absorbert i ulike lag. Den absorberte energien påvirker temperatur, kjemi og strømningsmønstre i disse lagene, og forholdene er trolig med og bestemmer strukturen videre nedover i atmosfæren. Disse effektene vil videre blant annet influere på sirkulasjonssystemene og ozonkonsentrasjonen.

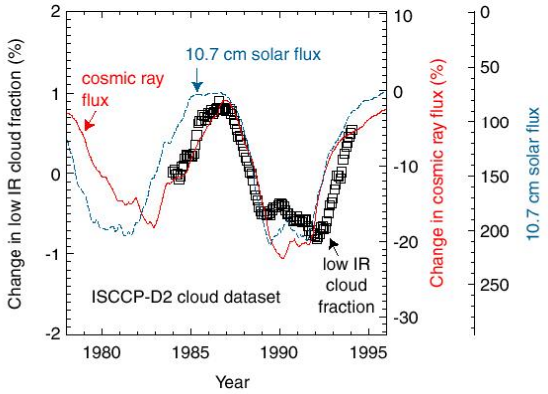
Den delen av Solens utstråling som er involvert i dannelse og nedbryting av ozon, har økt med omkring 3 % de siste 150 år. Dette er 10 ganger kraftigere økning enn de målte variasjonene i totalustrålingen. En økning av den ultrafiolette strålingen på 3 % vil mest sannsynlig ha ført til en langtidsvirkning, også i mengden ozon og dermed en klimatisk effekt, siden ozon også virker som en drivhusgass. I tillegg til menneskeskapte variasjoner i ozonmengden er det derfor mest sannsynlig også naturlige variasjoner.

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

Solens magnetfelt har den egenskapen at det 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 innfallende kosmiske partikler når aktiviteten er høy enn når den er lav.

I 1996 ble det presentert svært oppsiktsvekkende resultater basert på studier av globale målinger av andelen skyer og målinger av kosmisk innstråling. Observasjonene fra satellitter av mengden skyer som dekker Jorden viste en frapperende god korrelasjon med mengden av kosmisk stråling. Kanskje var man på sporet av en mekanisme som kunne forklare hvordan Solen, i tillegg til mulige effekter fra variasjon i strålingen, kan påvirke dannelse av skyer? Nyere og bedre observasjoner av skyer viser at det bare er de lave skyene som ser ut til å variere med solaktiviteten. Forskningsresultater tyder i dag på at de inntrengende kosmiske partiklene vil være opphav til tallrike sekundære partikler, som i sin tur stimulerer til dannelse av skyer. Solen kan dermed influere 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 100 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 %, noe som 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. Tilnærming av en slik effekt 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.



Variasjon i megnden skyer og kosmisk stråling viser en oppsiktsvekkende god korrelasjon (kilde: H. Svensmark)

Det er også andre momenter som taler for at skymengden kan drives av solaktivitet. Lysstyrken til planeten Neptun varierer også i takt med solaktiviteten; det samme gjør mengden kosmisk stråling. Skyene på Neptun består for det meste av frossent metan slik at planeten reflekterer det meste av sollyset. Siden 1973 viser observasjoner at lysstyrken varierer med omkring 3 % i fase med solaktiviteten der 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.

ER KLIMAVARIASJONENE MENNESKESKAPTE ELLER NATURLIGE?

Man kan i dag ikke med sikkerhet si om den globale oppvarmingen man har 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 kvantifiserer 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.

Klimaet i fremtiden vil styres både av menneskeskapte og naturlige variasjoner. Solaktiviteten kan fortsette og øke, men den kan også flate ut og faktisk avta. Det siste er nok det mest sannsynlige de neste 50-100 år. En slik effekt vil 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 samtidig forbedre metodene man har i dag har for å overvåke de ulike klimaparametrene på Jorden. Det er videre viktig med en tverrfaglig forskningsmessig innsats for å sikre best mulig faktagrunnlag for de politiske beslutninger om klimaforebyggende tiltak som fattes.

Skulle den nå vise seg at det ikke er økningen i CO_2-innholdet i atmosfæren som er hoveddrivkraften til klimaendringene, men snarere Solen, så er det meget viktig å påpeke at det er mange andre grunner til å redusere energiforbruk, bilkjøring og annet som gir skadelige utslipp. Vi står overfor en rekke miljøproblemer som kanskje har kommet litt i skyggen av den kraftige fokuseringen på klimagasser og da særlig CO_2