

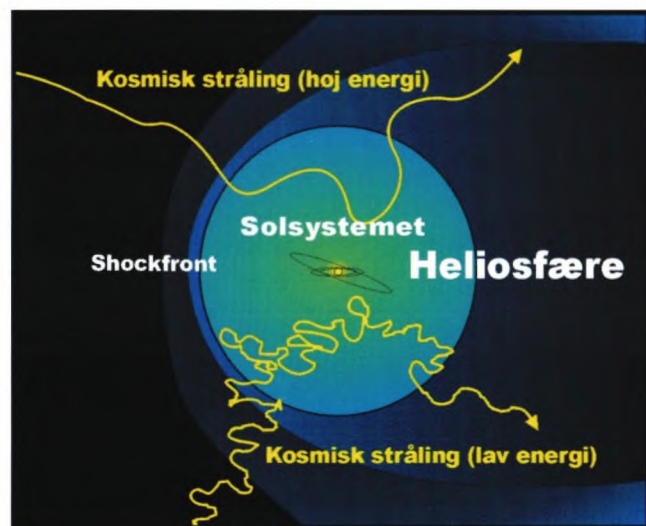
# Kosmisk stråling og Jordens skydække

## – Solens indflydelse på Jordens klima

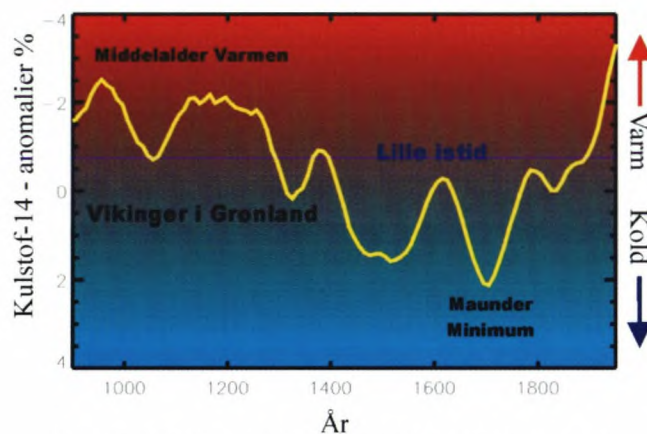
Henrik Svensmark, Dansk Rumforskningsinstitut.

Gennem de sidste hundrede år er Jordens overfladetemperatur steget med ca. 0.7°C. Samtidig har afbrændingen af fossile brændstoffer fået koncentrationen af drivhusgasser, især kuldioxid (CO<sub>2</sub>), til at stige i atmosfæren. Dette har affødt en bekymring for, at den registrerede klimaændring er skabt af mennesker. Men Jordens klima har altid været underkastet variationer, og for at bestemme den menneskelige indflydelse er det nødvendigt først at forstå de naturlige årsager til, at klimaet forandrer sig.

En af disse årsager er den tilsyneladende sammenhæng mellem solaktivitet og Jordens klima. Spekulationer om en sammenhæng mellem Solens aktivitet og Jordens klima har eksisteret gennem næsten 200 år. Indtil nu har man ikke kunnet finde en acceptabel fysisk forklaring på denne sammenhæng, der derfor stadig mødes med skepsis og tilskrives tilfældigheder. Men nye resultater baseret på satellitobservationer af Jordens



**Figur 1.** Heliosfæren – Solen og planetsystemet ses i billedets midte. Fra Solen blæser til stadighed en solvind bestående af ladede partikler. Denne vind fører Solens magnetfelt hele vejen ud i heliosfæren, hvor det danner et varierende skjold mod den energirige galaktiske kosmiske stråling, der muligvis har indflydelse på Jordens skydække. To forskellige baner af kosmisk stråling er skitseret. En med høj energi og en med lav energi. På grund af solsystemets bevægelse gennem rummet dannes en chockfront på grænsefladen til det interstellare medie. Kuglefladen der omslutter solsystemet viser solvindens overgang fra hastigheder hurtigere end lyden til hastigheder langsommere end lyden.



**Figur 2.** Ændringen i dannelsen af kulstof-14 gennem de sidste 1000 år. Grafen viser variationer som er af længere varighed end ca. 50 år. Bemærk grafen for kulstof-14 er vendt på hovedet.

skydække peger på skyerne som den mulige forbindelse mellem variationer i solaktiviteten og ændringer i Jordens klima, og dermed som den faktor, der kan give en fysisk forklaring.

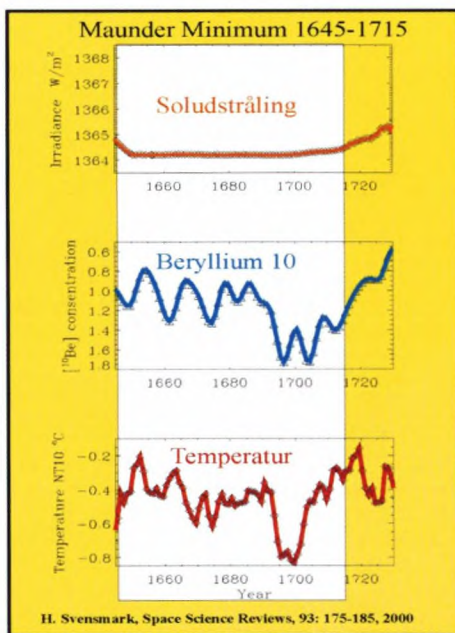
### Solaktivitet

Det er påvist, at Solens udstråling varierer med den ca. 11-årige solpletcyklus. Imidlertid viser satellitobservationer, at Solens udstråling gennem de sidste to solpletcykler kun har varieret ganske lidt. Soludstrålingen er gennemsnitlig ca. 0.1% større ved solpletmaksimum end ved solpletminimum. Dette skyldes, at særligt lysende områder på Solen, kaldet fakler og "plages", mere end kompenserer for de mørke solpletter. Beregninger af soludstrålingens variation gennem det sidste århundrede giver en gennemsnitlig stigning på ca. 0.3 watt pr. kvadratmeter hvilket er for lidt til at forklare de observerede temperaturvariationer (se også Sven Ove Thimms artikel i Kvant nr. 4 side 3).

Ændringer i Solens aktivitet har også indflydelse på andet end den totale udstråling. Ud over udsendelsen af lys udsender Solen således også en strøm af partikler der kaldes solvinden. Solens magnetfelt bæres af solvinden, som hermed skaber et kæmpemæssigt dråbeformet område omkring Solen. Dette område kaldes heliosfæren, og er i sin form og sine egenskaber påvirket af aktiviteten på Solens overflade.

Endvidere tilflyder der heliosfæren fra vores galakse et konstant bombardement af meget energirige partikler, bestående hovedsageligt af positivt ladede hy-

drogen atomer og et mindre antal tungere grundstoffer. Dette bombardement af partikler kaldes den kosmiske stråling. Den kosmiske stråling opstår, når kæmpestjerner i mælkevejen går til grunde i supernova-eksplosioner. Når disse kæmpestjerner eksploderer, slynges det yderste lag af stjernen væk under en enorm energiudladning. I vores Mælkevej sker der i gennemsnit en supernova-eksplosion hvert 25. år. Siden 1935 har man målt intensiteten af den kosmiske stråling der når frem til Jorden. Ud fra disse målinger er det blevet klarlagt, at den kosmiske stråling varierer med solaktiviteten. Når der er mange solpletter og dermed høj solaktivitet, formindskes intensiteten af den kosmiske stråling, og når der er lav solaktivitet, forøges intensiteten. Dette skyldes solvinden og det tilhørende magnetfelt. Når solvinden og magnetfelt tiltager i styrke, er heliosfæren bedre i stand til at skærme mod den kosmiske stråling, men når solaktiviteten er lav, formindskes Solens magnetfelt og dermed dens evne til at skærme mod den energirige kosmiske stråling.

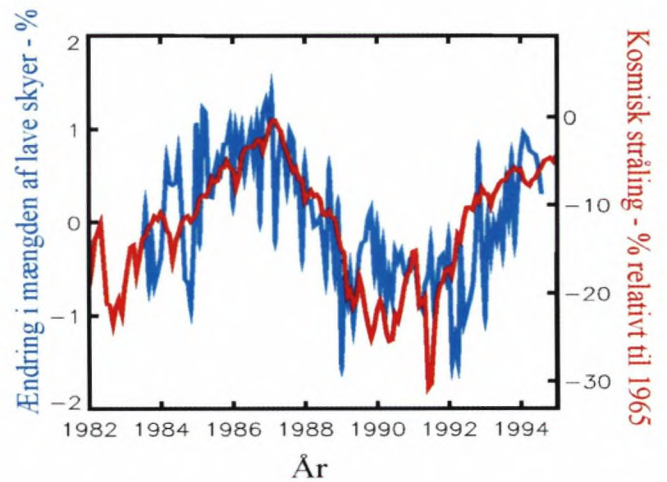


**Figur 3.** Øverst: Rekonstrueret soludstråling gennem Maunder perioden 1645–1715. Midt: Ændringer i beryllium-10 koncentrationen målt i iskerner fra Grønland. (Beryllium-10 dannes i Jordens atmosfære af kosmisk stråling. Bemærk grafen for Beryllium er vendt på hovedet). Nederst: Rekonstrueret temperatur for den Nordlige halvkugle gennem Maunder minimum perioden.

### Solaktivitet og Jordens klima

Når den energirige kosmiske stråling kolliderer med atomkerner i Jordens atmosfære dannes der nye grundstoffer. Et af disse kosmogenet dannede grundstoffer er kulstof-14. Denne kulstofisotop giver information om Solens aktivitet gennem tiderne. Det skyldes, at ændringer i solaktiviteten, og dermed den kosmiske stråling, har indflydelse på, hvor meget kulstof-14 der

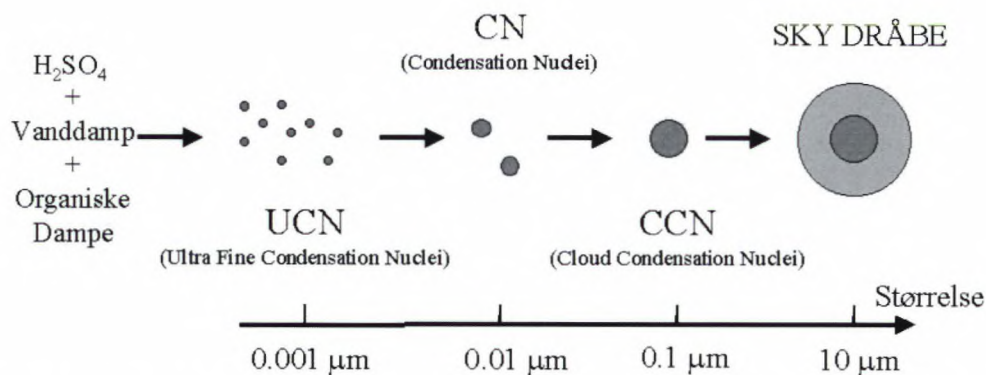
dannes i atmosfæren. Jo større solaktivitet des mindre kosmisk stråling, og dermed lavere produktion af kulstof-14 der, oplagres i organisk materiale som f.eks. træ. Ved at måle hvor meget kulstof-14 der er i en given årring i en træstamme, kan Solens aktivitet på tidspunktet for årringens dannelse aflæses.



**Figur 4.** Statistisk sammenhæng mellem ændring i mængden af lave skyer og kosmisk stråling gennem den seneste solplet periode. Forskellige typer af skyer påvirker hver især strålingsbalancen forskelligt. Lave skyer køler atmosfæren, mens høje tynde skyer varmer. Den samlede indflydelse af skyer er en køling af Jordens atmosfære.

Variationer i solaktiviteten langt tilbage i tiden kan således aflæses i træer. Figur 2 viser ændringerne i kulstof-14 koncentrationen gennem de sidste 1000 år. Fra år 1000–1300 dannedes ikke så meget kulstof-14, og man må antage at solaktiviteten har været høj. Denne periode som stort set dækker vikingetiden var en varm periode, hvor blandt andre Erik den Røde omkring år 985 sejlede til Grønland og bosatte sig. Her dyrkede vikingerne korn og holdt køer og får. I træ fra 1300-tallet kan aflæses en stigning i kulstof-14 koncentrationen, hvilket afspejler et fald i Solens aktivitet. Klimaet blev koldere og denne periode kaldes den lille istid (1300–1850). Denne klimaændring gav store problemer for vikingerne i Grønland, og de sidste uddør omkring 1450. I den lille istid var perioden fra 1645 til 1715 specielt kold. Perioden kaldes Maunder minimum og er karakteriseret ved, at der næsten ingen solpletter blev observeret.

Figur 3 giver et eksempel på klimaforandringer der tilsyneladende antyder, at det er partikel-strålingen fra vores Mælkevej der har indflydelse på Jordens klima. Den øverste graf er en rekonstruktion af Solens udstråling i Maunder minimum perioden. Grafen viser at der ikke er megen variation i Solens udstråling, og afspejler hermed også de meget få solpletter der blev observeret i denne periode. Derimod viser beryllium-10 grafen at Solens magnetiske aktivitet varierede i gennem denne periode. Ud over 11 års svingninger ses en markant forøgelse i beryllium koncentrationen



**Figur 5.** Dannelse og vækst af nye aerosoler fra svovlsyre-, vand-, og organiske dampe. Fra venstre mod højre ses overgangen fra gas til partikel efterfulgt af den efterfølgende dannelse af større partikler. Først når aerosolerne er vokset til  $0,1 \mu\text{m}$  kan de fungere som skykondensations kerner, og dermed påvirke skydannelsen ( $1 \mu\text{m}$  er 1 milliontedel meter).

omkring 1690 som varer indtil omkring 1710. Det er tankevækkende at temperatur forløbet, nederste graf i figur 4, minder meget om ændringerne i beryllium-10 grafen oven over. De laveste temperaturer gennem de sidste 1000 år målt netop i årtiet 1690–1700.

Gennem de sidste hundrede år er solaktiviteten steget til det højeste man har observeret i de sidste 700 år. Nye resultater opnået ved at sammenholde satellitmålinger af solvinden med observationer af forstyrrelser i Jordens magnetiske felt, har vist, at Solens magnetfelt er blevet fordoblet gennem de sidste hundrede år. Disse observationer sammenholdt med flere andre tyder på (se f.eks. [1]), at ændringer i Solens aktivitet påvirker Jordens klima.

### Forbindelsen til Jordens skydække

Men hvordan kan partikler fra verdensrummet påvirke Jordens energibalance? En åbenlys mulighed er at betragte atmosfærens gennemskinnelighed som kan ændres gennem Jordens skydække. Skyer dækker i gennemsnit 65% af Jordens overflade og forårsager en køling af atmosfæren med 17 til 35 watt pr. kvadratmeter. De har således stor betydning for Jordens energibalance. Og hvis skyerne påvirkes af variationerne i den kosmiske stråling vil Jordens strålingsbalance og dermed Jordens temperatur kunne ændres effektivt. Denne formodede sammenhæng underbygges af satellitobservationer taget af Jordens skydække gennem den seneste solplet cyklus. Figur 4 viser, hvorledes ændringer i mængden af skyer lavere end 3 km følger variationerne i den kosmiske stråling.

En vigtig forudsætning for dannelsen af skyer i atmosfæren er tilstedeværelsen af små støvkorn kaldet aerosoler. Aerosoler er luftbårne faste eller flydende partikler, i størrelser fra  $0,001 \mu\text{m}$  til omkring  $10 \mu\text{m}$ . Når aerosolerne opnår en størrelse på ca.  $0,1 \mu\text{m}$  kan de fungere som skykondensationskerner (CCN) og er der tilstrækkelig med overmættet vanddamp vil CCN aktiveres og blive til skydråber. Disse luftbårne par-

tikler har deres oprindelse enten fra Jordens overfladen, eller fra atmosfæren hvor de dannes ved både kemiske reaktioner og gennem kollisioner, se figur 5. De fleste aerosoler fjernes fra atmosfæren ved regn.

At Jordens strålingsbalance er meget følsom over for ændringer i antallet af skykondensationskerner kan illustreres ved følgende simple beregning: Det antages, at tykkelsen og vandindholdet af en sky er konstant. Dermed er skyens optiske tykkelse  $\tau$  proportional med  $\tau \propto Nr^2$  (det geometriske areal af dråberne), hvor  $N$  er dråbe koncentrationen og  $r$  er middeleradius af dråberne. Eftersom  $N \propto r^{-3}$  (vandindholdet og tykkelsen af skyen er konstant) fås at  $\tau \propto N^{1/3}$ . Differentieres dette udtryk fås

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{1}{3} \frac{\Delta N}{N}. \quad (1)$$

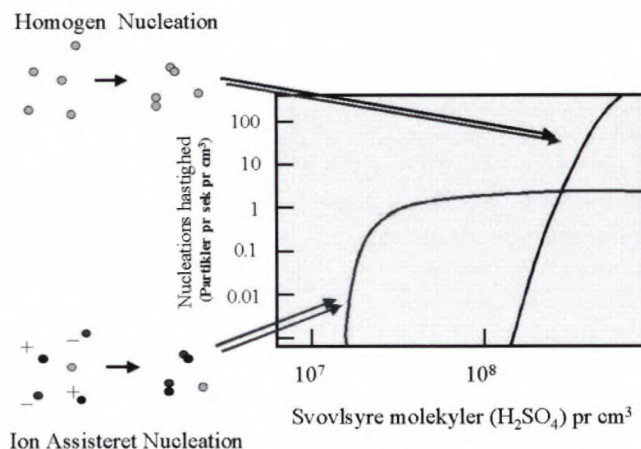
Albedoen eller refleksionen,  $A$ , er den del af den indkomne stråling der tilbagereflekteres. For spredning af sollys i skyer gælder det at

$$A \approx \frac{\tau}{\tau + 6,7}. \quad (2)$$

Ved at differentiere ovenstående ligning og efterfølgende indsætte den øverste ligning fås

$$\frac{\Delta A}{\Delta N} = \frac{A(1-A)}{3N}. \quad (3)$$

For fastholdt dråbekoncentration  $N$  ses det at ovenstående udtryk har maximum for  $A = 0,5$ . Fastholdes albedoen derimod varierer udtrykket som  $1/N$ . Marine stratocumulus skyer har p.g.a. deres store hyppighed og udstrækning over havet, stor indflydelse på Jordens strålingsbudget. For disse skyer er det ikke ualmindeligt med en albedo på omkring 0,5 og en dråbetæthed på omkring 50–100 pr.  $\text{cm}^3$ . Ændring på bare 1 CCN pr.  $\text{cm}^3$  betyder således en variation på ca. 0,5–0,25 % i skyens albedo, hvilket illustrerer hvor følsom skyers strålingsegenskaber er over for ændringer i antallet af CCN. (For en gennemsnitlig indkommende solstråling



**Figur 6.** Skematisk illustration af Homogen Nucleation og Ion Assisteret Nucleation. Grafen viser at ionassisteret nucleation, via indflydelsen af ladninger, er i stand til at danne nye aerosoler ved lavere koncentrationer af svovlsyre end homogen nucleation. Svovlsyredampe dannes naturligt over havet og er en af de vigtigste dampe ved dannelse af nye aerosoler. Typisk er koncentrationen af svovlsyredampene over havet for lav til at homogen nucleation kan forklare den observerede aerosoldannelse. Grafen er baseret på computerberegninger og ikke på eksperimentelle resultater.

på  $343 \text{ W/m}^2$  betyder det at omkring  $0,5 \text{ W/m}^2$  mindre effekt når ned til jordens overflade).

Hermed er billedet af, hvordan Solen kan påvirke Jordens klima, klart. (1) Den kosmiske stråling er årsag til næsten al ionisation i den nederste del af atmosfæren, og netop ionisationen udviser en stor følsomhed overfor ændringer i solaktiviteten. (2) Ioner i atmosfæren har betydning for dannelsen af aerosoler. (3) Aerosoler påvirker skyernes mikrofysik og dermed deres indflydelse på Jordens strålingsbalance. Selvom dannelsen af nye aerosoler i atmosfæren og fysikken bag er ikke velforstået, er der meget der tyder på at ioner er af meget stor betydning. Gennem computerberegninger har amerikanske aerosolforskere fra University of California, Los Angeles, for nylig vist at ionassisteret dannelse af nye aerosoler er den dominerende mekanisme over havet i den nederste del af atmosfæren, se figur 6. At effekten er størst netop er i den nederste del af atmosfæren passer godt med satellitobservationerne af de lave skyer (figur 4).

Selvom computerberegninger viser at ioner kan have indflydelse på aerosoldannelsen kan det på ingen måde bruges som bevis for, at den kosmiske stråling har indflydelse på skydannelsen. Dette skyldes at computermodellerne indeholder meget simplificerede antagelser, og at mange af delprocesserne kun er indirekte beskrevet. Der er derfor planer om at undersøge ioners betydning for aerosoldannelsen eksperimentelt.

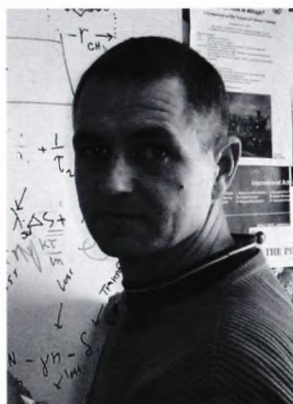
Viser det sig at aerosol dannelsen og derigennem Jordens skydække påvirkes af den kosmiske stråling, betyder det, at processer i universet påvirker os direkte. Forhåbentlig for vi et svar indenfor den næste par år.

#### Referencer:

- [1] E. Friis-Christensen og K. Lassen (1991) Science, bind **254**, side 698.

- [2] J. A. Eddy (1976) "The Maunder minimum", Science, bind **192**, side 1189.
- [3] H. Svensmark og E. Friis-Christensen (1997) "Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships", J. Atmos. Solar-Terr. Phys., bind **59**, side 1225–1232.
- [4] H. Svensmark (1998) "Influence of cosmic rays on Earth's climate", Phys. Rev. Lett., bind **81**, side 5027.
- [5] H. Svensmark, (2000) Space Science Reviews, bind **93**, side 175.
- [6] N. Marsh og H. Svensmark (2000) "Cosmic rays and low cloud properties", Phys. Rev. Lett. bind **85**, side 5004.
- [7] F. Raes og A. Janssens (1985) "Ion-induced aerosol formation in a  $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{SO}_4$  system", J. Aerosol Sci., bind **16**, side 217.
- [8] R. Turco, J.-K. Zhao og F. Yu (1998) "A new source of tropospheric aerosols: ion-ion recombination", Geophys. Res. Lett., bind **25**, side 635.
- [9] F. Yu og R. Turco (2000) "Ultra fine aerosol formation by ion-mediated nucleation", Geophys. Res. Lett., bind **27**, side 883.

Litteratur om den historiske sammenhæng mellem solaktivitet og Jordens klima kan f.eks. findes i [1-2], om kosmisk stråling og Jordens skydække i [3-6] og om dannelsen af aerosoler og betydningen af ioner i [7-9].



Henrik Svensmark er ansat på Dansk Rumforskningsinstitut, hvor han arbejder med solsystemets fysik.