

# Solaktivitet - og klimaændringer



*Krabbetågen er resterne af en supernova, som kan ses i stjernebilledet Tyren. Eksplosionen blev observeret i 1054 af kinesiske astronomer. (Copyright: NASA, ESA; [http://hubblesite.org/gallery/album/entire\\_collection/pr2005037a/](http://hubblesite.org/gallery/album/entire_collection/pr2005037a/))*

*Af Jens Olaf Pepke Pedersen, seniorforsker,  
Institut for Rumforskning og –teknologi,  
Danmarks Tekniske Universitet*

For læsere af et geologisk tidsskrift er det næppe nogen nyhed, at klimaet ændrer sig. Fx er der tydelige spor af flere episoder i Proterozoi-kum, hvor størstedelen af Jordens overflade har ligget begravet under en dybfrossen isørken, og i den anden yderlighed har vi set ekstreme varmeperioder, som den, der fandt

sted på overgangen mellem Paleocæn og Eocæn for omkring 55 millioner år siden. Jorden har således både oplevet – og overlevet – dramatiske klimaændringer.

I år 2000 afsluttede geologen Ján Veizer, der dengang arbejdede på Ruhr-Universitetet i Tyskland samt på Ottawa Universitetet i Canada, et langvarigt forskningsprojekt med en artikel i tidsskriftet Nature, hvor han sammen med sine medarbejdere offentliggjorde resultatet af en undersøgelse af tusindvis af boreprøver fra havbunden, som

tidsmæssigt dækkede hele Fanærozoikum (de sidste omkring 542 millioner år). Prøverne indeholder fossiler af små organismer, der levede i fortidens tropiske oceaner, og som havde opbygget deres skaller ved at optage stoffer fra havvandet. Det har vist sig, at skallernes sammensætning bl.a. afhænger af vandtemperaturen, dengang organismerne var i live, og ved at undersøge isotopsammensætningen i skallerne kunne Veizer konstruere en kurve over havtemperaturen for hele perioden og dermed også tydeliggøre klimaændringerne i fortiden (figuren øverst på næste side). I Prækambrium var livet overvejende mikroskopisk – fossiler

herfra forekommer sjældent, så her er det desværre meget sværere at få informationer om klimaet, men som nævnt i indledningen er der ikke noget der tyder på, at klimaændringerne var mindre voldsomme, snarere tværtimod.

### Cyklus på 139 millioner år

Veizers kurve viste nu, at Jordens temperatur regelmæssigt er skiftet mellem varme (drivhus) og kolde (ishus) perioder, og at denne cyklus i gennemsnit havde en periode på 139 millioner år. Artiklen gav anledning til en intens debat, fordi Veizer gik et skridt videre og sammenlignede sin temperaturkurve med rekonstruktioner af CO<sub>2</sub>-indholdet i fortidens atmosfære. Sammenligningen viste, at der i flere perioder ikke var nogen specielt god overensstemmelse, og det stred med den gængse forklaring om, at CO<sub>2</sub> over geologiske tidsskalaer var styrende for klimaets udvikling.

Fortidens CO<sub>2</sub>-koncentration i atmosfæren kan imidlertid kun bestemmes indirekte med en kombination af geokemiske målinger og modelberegninger, og metoderne er ganske usikre. Der var derfor også mange, der mente, at den oplagte konklusion på Veizers arbejde var, at det var rekonstruktionen af CO<sub>2</sub>-indholdet, som der måtte være noget galt med og ikke klimapåvirkningen fra CO<sub>2</sub>. Desuden kunne Veizer ikke finde en mekanisme i Jordens klimasystem, der lige skulle give en periode på 139 millioner år.

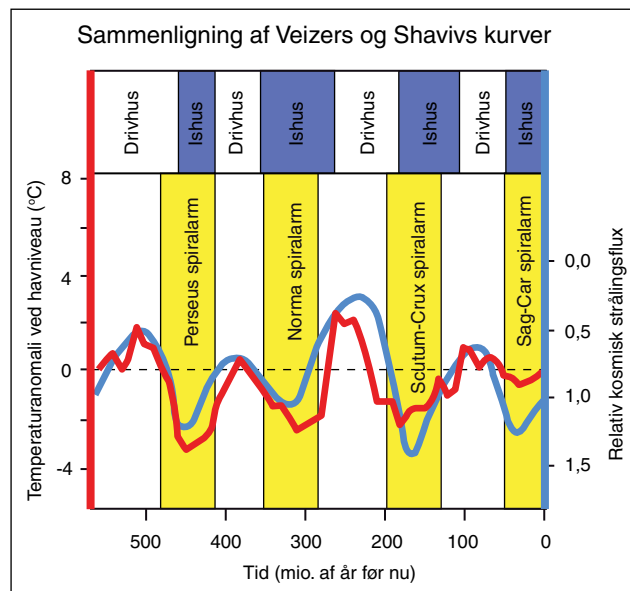
### Kosmisk stråling

Hvis vi derfor for en stund forlader havbundssedimenterne og i stedet stiller os ud og betragter himlen en klar natteime, kan vi se et bånd af stjerner, der strækker sig tværs over himlen. Det er vores galakse, Mælkevejen, som er en forholdsvis flad skive, og hvor vi i øvrigt befinder os omkring en ret beskeden stjerne i udkanten af Mælkevejen.

Mælkevejen består af cirka 100 milliarder stjerner, der alle bevæger sig rundt omkring midten af galaksen. På vej rundt klumper stjernerne sig sammen og spredes igen på en måde, der kan sammenlignes med en bilkø på motorvejen. Når bilerne møder køen, bremser de lidt op og kører langsomt et stykke tid i tæt trafik. Efterhånden som bilerne når frem i køen, kan de sætte farten op igen og køen opløses.

I galaksen fører denne sammenklumpning af stjerner til dannelse af spiralarme, og kigger man på nogle af de andre spiralgalakser i nærheden af Mælkevejen, kan man se, at armene lyser op, fordi de indeholder forholdsvis mange unge stjerner. Stjernedannelsen foregår fortrinsvis i spiralarmene, men mange af de dannede store stjerner lever kun kort tid. Når stjerner i sværvægtsklassen – der har mindst 10 gange så meget masse som Solen – dør, går det ikke stille for sig. Disse tunge stjerner ender deres liv i en kæmpemæssig, spektakulær sprængning, som kaldes en supernovaeksplosion. Når det

*Figuren viser ændringer i overfladetemperaturen i havene (rød kurve) sammenlignet med ændringer i den kosmiske stråling. (Grafik: UVH modificeret efter Henrik Svensmark: Cosmoclimate: a new theory emerges. Astronomy and Geophysics, bind 48, side 1.18-1.24 (2007))*



sker, bliver stof og stråling fra stjernen slynget ud til alle sider med voldsom kraft.

I kølvandet på en supernovaeksplosion bliver der udsendt en strøm af meget energirige partikler, som kaldes for kosmisk stråling. I vores galakse, Mælkevejen, eksploderer supernovaer med ca. 20 års mellemrum. Det betyder, at Jorden og resten af solsystemet bliver udsat for et vedvarende bombardement af energirige partikler. På vej mod Jorden bliver noget af den kosmiske stråling afbøjet af Solens magnetfelt, der fungerer som en slags skjold mod strålingen, men nogle af de energirige partikler rammer Jordens atmosfære.

På vej rundt i Mælkevejen bevæger Jorden sig som nævnt ind og ud af spiralarmene og dermed også gennem områder med høj og lav kosmisk stråling.

### Bemærkelsesværdig opdagelse

For nogle år siden beregnede den israelske astrofysiker, Nir Shaviv, fra universitetet i Jerusalem, Solens bevægelse rundt om galaksen, ligesom han også beregnede, hvordan mængden af kosmisk stråling på Jorden havde varieret gennem Jordens fortid.

Et bemærkelsesværdigt resultat af Shavivs beregning var, at Jorden i gennemsnit passerede en spiralarm med ca. 137 millioner års mellemrum. Shaviv opdagede nu, at hans kurve over den kosmiske stråling på Jorden passede fint med Veizers kurve over temperaturen. Ikke alene var perioden den samme, men kurverne var også i fase.

Det var derfor en nærliggende konklusion, at strålingen må have indflydelse på Jordens klima. Spørgsmålet er imidlertid, hvordan den kosmiske stråling overhovedet kan påvirke klodens klima?

Her havde seniorforsker Henrik Svensmark fra DTU Space allerede givet et muligt svar, nemlig at den kosmiske stråling har betydning fra dannelsen af skyer i Jordens atmosfære.

Teorien tager udgangspunkt i, at den kosmiske stråling ioniserer atomer i atmosfæren, dvs. at de energirige partikler i den kosmiske stråling rammer ind i atomer i atmosfæren og river elektroner løs. I den nederste del af atmosfæren er kosmisk stråling årsag til næsten al ionisering.

Det afgørende element i teorien er, at den ionisering, som den kosmiske stråling forårsager, har betydning for dannelsen af de såkaldte aerosoler i atmosfæren. Aerosoler er små partikler, hvorpå vanddamp i atmosfæren fortætter sig til de små dråber, som skyer består af. Mængden af aerosoler (skykim) i luften påvirker antallet, størrelsen og levetiden af dråberne i en sky.

Dermed knytter teorien en forbindelse imellem kosmisk stråling og et atmosfærisk fænomen – skyer – som har en påviselig indvirkning på Jordens klima. Skyerne påvirker klodens temperatur, især fordi de



**MILJØRÅDGIVNING**  
**JORD & GRUNDVAND**

**Forureningsundersøgelser**  
Jordforureninger  
Grundvandsforureninger  
Indeklima

**Anlægsarbejde**  
Klassificering af jord  
Ændret arealanvendelse  
Myndighedsbehandling

**Geofysik**  
Lokalisering af ledninger og tanke  
Lokalisering af vandkader i bygninger  
Kortlægning af jordlagene

**POUL FALKENBERG ApS**  
MILJØRÅDGIVNING - JORD & GRUNDVAND  
Nordre Strandvej 119A, DK-3150 Hellebæk  
Tlf: +45 48 18 75 66  
www.poulfalkenberg.dk

fungerer som et kølende tæppe, der hindrer solstråling i at nå ned til jordoverfladen og nettoeffekten er derfor en afkølede virkning.

Den fysiske årsagskæde ser altså således ud: Kosmisk stråling → ionisering → dannelse af aerosoler → skabelse af skyer → temperaturvariationer. Jo mere kosmisk stråling, der trænger ind i atmosfæren, jo flere skyer dannes der, og jo mere afkølet bliver jordoverfladen – alt andet lige.

#### Afgørende eksperiment

Denne forklaringsmodel fik en afgørende støtte af et eksperiment, som blev udført ved DTU Space og offentliggjort i 2006. Eksperimentet blev udført i et 7.000 liter stort reaktionskammer, hvor ultraren luft fik tilført små mængder ozon, vanddamp og svovldioxid svarende til de naturlige koncentrationer i luften over oceanerne. Herefter blev blandingen belyst med ultraviolet lys for at simulere solens påvirkning af atmosfæren, hvilket satte kemiske reaktioner i gang i reaktionskammeret, som bl.a. førte til dannelse af svovlsyre. Desuden viste det sig, at der – akkurat som i den naturlige atmosfære – blev dannet aerosoler, som i løbet af nogle timer voksede fra størrelser på få nanometer til 20-30 nanometer. Samtidig kunne mængden af ioner inde i kammeret varieres ved hjælp af ioniserende radioaktive kilder anbragt uden for kammeret, og det viste sig nu, at produktionen af aerosoler afhang af antallet af ioner i kammeret. Eksperimentet påviste dermed en direkte forbindelse mellem den kosmiske stråling og antallet af aerosoler i atmosfæren.

Eksperimentet er senere gentaget ved det fælleseuropæiske forskningscenter CERN uden for Geneve, hvor kammeret blev bestrålet med en partikelstråle fra en af CERNs accelerators for direkte at simulere effekten af de kosmiske stråler.

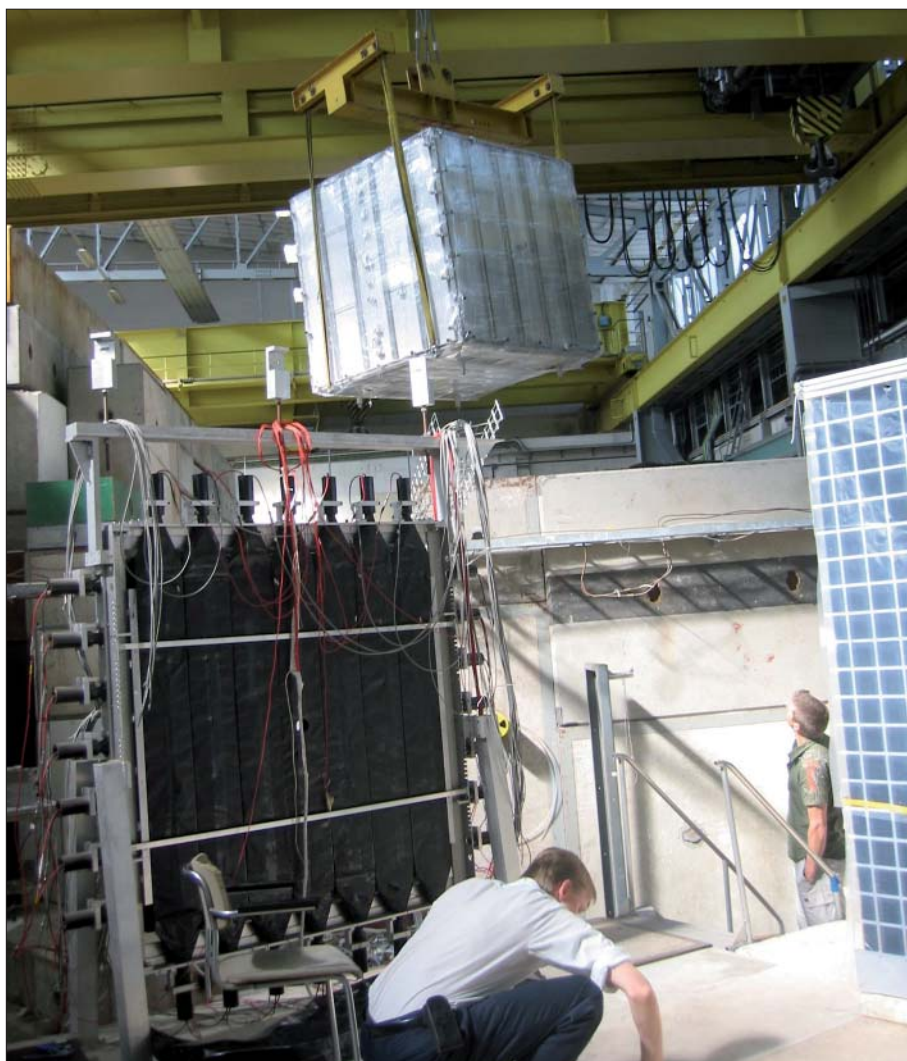
Ved at bruge astronomernes modeller for, hvornår stjernerne i Mælkevejen blev dannet, er det faktisk muligt at udvide Shavivs beregning af den kosmiske stråling helt tilbage til Jordens dannelse for 4,6 milliarder år siden. Dannelsen af stjerner foregår nemlig ikke med konstant hastighed, og kobler man en model for stjerneproduktionen i Mælkevejen med en model for udviklingen i Solens udstråling, kan man beregne, hvordan den kosmiske stråling gennem tiderne har ændret sig på Jorden.

Resultatet viser, at lige efter Jordens dannelse var Solens aktivitet så høj, at den effektivt afskærmede Jorden fra kosmiske stråler. Herefter steg mængden af kosmiske stråler og nåede et maksimum for omkring 2,2 milliarder år siden, hvorefter den faldt for senere at stige igen for omkring en milliard år siden.

Det bemærkelsesværdige er, at denne kurve både passer med de store glaciationer af Jorden og samtidig forklarer det paradoks, at Jordens klima holdt sig varmt



*Eksperimentel opstilling SKY som blev brugt ved DTU Space til at undersøge kosmiske strålers indflydelse på skydannelse. (Foto: Michael Avngaard (2006))*



*SKY II under opstilling ved CERN, Geneve. (Foto: Martin B. Enghoff (2006))*

i lang tid efter dannelsen, selvom Solen på det tidspunkt lyste 30 procent mindre end i dag. Faktisk lyste Solen i starten så svagt, at Jorden burde have været isdækket de første tre milliarder år, og eftersom det tydeligvis ikke har været tilfældet, har forklaringen hidtil været, at der må have været enorme mængder af CO<sub>2</sub> og andre drivhusgasser i atmosfæren, som sørgede for at holde kloden opvarmet.

Shaviv og Veizers undersøgelser tyder på, at to tredjedele af hver hele grad, som temperaturen er faldet eller steget inden for den sidste halve milliard år, skyldes variationer i den kosmiske stråling. Men hvis teorien om den kosmiske strålings indflydelse på jordklodens temperatur viser sig at være korrekt, vil den ikke bare være relevant for vores forståelse af klimaforandringer på geologiske tidsskalaer, men må også fungere på helt korte tidsskalaer.

### Solaktivitetens betydning

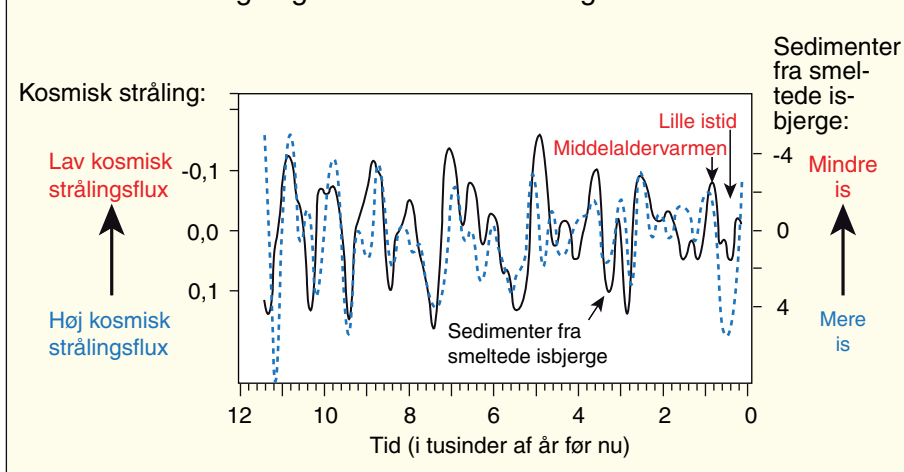
Da de kosmiske partikler er ansvarlige for produktionen af radioaktive isotoper i Jordens atmosfære, bl.a. kulstof-14 og beryllium-10, betyder det, at vi kan bestemme solaktiviteten i fortiden ved at se fordelingen af isotoperne i aflejringer, der kan tidsbestemmes, fx iskerner, sedimenter eller drypsten. Analyser på tidsserier, der strækker sig over mange tusinde år, har vist, et betydeligt fald i solaktiviteten, der ser ud til at gentage sig med en periode på ca. 2.300 år, mens en noget mindre variation gentager sig med en periode på omkring 400 år. Det seneste meget store fald i solaktiviteten fandt sted omkring år 1700, og 400 år tidligere – omkring år 1300 – observerer man et mindre minimum. Den 400-årige periode passer med en oscillation i gasmasserne i Solens yderste lag (konvektionszonen), som har en periode på ca. 420 år, og hvis dette er korrekt, kan man forudsige, at Solens aktivitet vil aftage igen med et nyt minimum omkring år 2100.

Rekonstruktioner af Jordens klima gennem de sidste 10.000 år viser nu, at det har varieret i takt med Solens aktivitet, mens CO<sub>2</sub> indholdet tilsyneladende ikke har ændret sig og dermed ikke kan have givet anledning til klimaændringerne.

Selv i historisk tid har vi eksempler på større klimaændringer, hvor Nordeuropa oplevede en varm periode i den tidlige middelalder fra omkring 1000 til 1300, hvor der fulgte en kold periode, som ligefrem har fået navnet *den lille istid*, fra omkring 1500 til 1800. Igen viser rekonstruktioner af solaktiviteten en overraskende god overensstemmelse med temperaturkurven for den samme periode.

I dag lever vi faktisk i en helt usædvanlig periode, hvor Solens aktivitet er den højeste i 1.000 år. Ironisk nok har FN's klimapanel i sin sidste rapport netop nedskrevet Solens rolle i klimaændringerne betydeligt, mens CO<sub>2</sub> ses som den mest betydningsfulde driv-

## Sammenligning mellem solaktivitet og Jordens klima



Figuren viser en sammenligning mellem solaktivitet (den stiplede blå kurve) udtrykt ved produktionen af kulstof 14 og Jordens klima udtrykt ved mængden af materiale i aflejringer i havbundssedimenter, som menes at stamme fra smeltede isbjerge i Det nordlige Atlanterhav. (Grafik: UVH modificeret efter Bond m.fl. (2001) Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. Science, bind 294: side 2130-2136)

husgas, der har haft stor betydning for Jordens temperaturstigning gennem de sidste 100 år. Efter at Solen har bestemt klimaet gennem de sidste 10.000 år, forekommer det imidlertid ikke sandsynligt, at indflydelsen pludselig skulle ophøre inden for de sidste 100 år, samtidig med at Solens aktivitet er på et maksimum.

### Litteratur:

Jens Olaf Pepke Pedersen: *Stjernerne påvirker vores klima*, *Kvant*, bind 17, nr. 4, side 34-35 (2006)

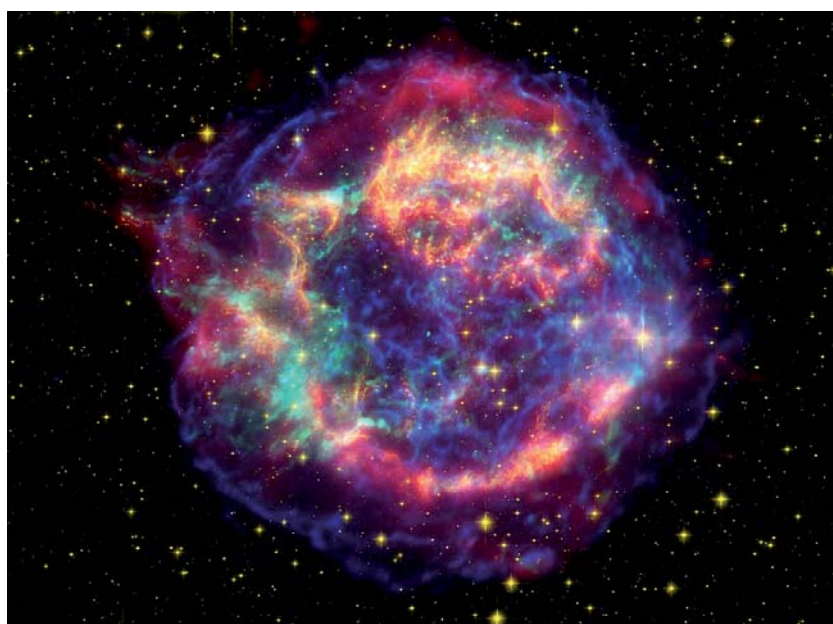
Nir J. Shaviv og Ján Veizer: *Celestial dri-*

*ver of Phanerozoic climate?* *GSA Today*, bind 13, nr. 7, side 4-10 (2003) (Geological Society of America)

Henrik Svensmark: *Cosmoclimatology: a new theory emerges*. *Astronomy and Geophysics*, bind 48, side 1.18-1.24 (2007)

Henrik Svensmark og Nigel Calder: *Klima og kosmos. En ny teori om global opvarmning*. Gads Forlag (2007)

J. Veizer, Y. Godderis og L.M. François: *Evidence for decoupling of atmospheric CO<sub>2</sub> and global climate during the Phanerozoic eon*. *Nature*, bind 408, side 698-701 (2000).



Rester af supernova-eksplosion Cassiopeia A. Lyset fra eksplosionen nåede Jorden i 1667, men på det tidspunkt havde det allerede været undervejs i tusinder af år. I dag ses de ødelagte rester af stjernen som en skal af gasser, der fortsat breder sig ud i rummet. Foto: NASA (billedet er sammensat af materialer fra flere NASA-observatorier).