

Solen i udbrud

Michael J.D. Linden-Vørnle, Tycho Brahe Planetarium, og Jens Olaf Pepke Pedersen, Dansk Rumforskningsinstitut.

Solen har i løbet af efteråret været ekstremt aktiv med en serie meget voldsomme udbrud. Rekord blev sat den 4. november med det kraftigste soludbrud, der nogensinde er blevet registreret.

Energimængderne, der blev frigivet ved disse begivenheder, var enorme – som at detonere milliarder af kernevåben på samme tid. Under udbruddene kastede Solen vældige byger af elektrisk ladede partikler ud i rummet – såkaldte koronale masseudkastninger. Efter ca. et døgn rejse fra Solen ramte dele af disse byger Jordens beskyttende skjold: Jordens magnetfelt. Sammenstødet med partiklerne fra Solen skabte meget voldsomme forstyrrelser i Jordens magnetfelt – en såkaldt geomagnetisk storm – der gav anledning til kraftig nordlysaktivitet mange steder på kloden, bl.a. i Danmark. Ved den seneste storm den 20. november var det i USA muligt at se nordlys i alle stater undtagen Hawaii. I Europa kunne nordlyset ved denne lejlighed ses helt nede ved Middelhavet – i Italien og Grækenland.

Soludbrud og geomagnetiske storme kan dog også have mere ubehagelige virkninger som nedbrud af strømforsyning, forstyrrelser i radiokommunikation og ødelæggelse af satellitter. Nogle flyselskaber valgte derfor at lægge deres transatlantiske ruter sydligere end normalt for at undgå nordpolsområdet, hvor forstyrrelserne var ekstra stærke. En strømafbrydelse, der om aftenen den 30. oktober ramte 50.000 husstande i Malmø, var formodentlig et resultat af stormen, som på dette tidspunkt var meget intens. To japanske satellitter blev tilsyneladende også ramt af følgerne af et af de kraftige soludbrud. Den ene satellit, Midori II, var kun ti måneder tidligere blevet opsendt for at overvåge forandringer i Jordens klima, ændringer i ozonlaget og globale miljøændringer. Missionen var planlagt til at vare mindst tre år, men fik altså en brat afslutning. Heldigvis klarede den danske Ørsted-satellit rumstormene i fin stil.

Store solpletter

Nye undersøgelser viser, at Solen er mere aktiv nu, end den har været i mange år. Et mål for aktiviteten er antallet af solpletter, som er "små", mørke områder på Solens overflade. Når Solen er meget aktiv, er der mange solpletter, mens der er færre, når Solen er faldet

til ro.

Solpletterne er områder på Solens overflade, hvor temperaturen er ca. 1.500°C lavere end de normale 5.500°C, hvilket får dem til at se mørke ud. Den lavere temperatur skyldes, at Solens magnetfelt "snører" sig sammen, hvorved den varme gas bliver skubbet til side.



Figur 1. Nordlys fotograferet natten mellem den 29. og 30. oktober 2003 i Risskov ved Århus. Foto: © Henrik Nordvig.

Solpletter blev første gang observeret i 1610 efter, at Galileo Galilei begyndte at studere Solen med sin kikkert. Rapporter fra datidens astronomer viser, at der blev observeret meget få solpletter fra omkring 1645 til 1715. Denne periode, hvor Solen var meget rolig, har fået navnet "Maunder Minimum" efter astronomen E. W. Maunder.

Fortsættes inde i bladet side 14.

Fortsat fra bagsiden

Dette minimum var sammenfaldende med "den lille is-tid", hvor Jorden gennemgik en usædvanlig kold periode. Sammenhængen mellem Solens aktivitet og Jordens klima er et aktivt forskningsområde bl.a. på Dansk Rumforskningsinstitut.

Vi har således observationer af Solens aktivitet gennem de sidste 400 år, og det har vist sig, at aktiviteten bl.a. varierer med en meget karakteristisk periode på ca. 11 år, således at der ca. hvert 11. år er mange solpletter. Aktiviteten kan udtrykkes ved *solplettallet*, R , der dog ikke direkte er antallet af solpletter, men en størrelse, der beregnes ud fra formlen:

$$R = k \times (10 \times g + s), \quad (1)$$

hvor g er antallet af solpletgrupper, s er det samlede antal pletter i alle grupper og k er en konstant, der angiver observationernes "effektivitet". Denne konstant er et tal mellem 0 og 1.

Hvis der på Solen er fem grupper ($g = 5$), det samlede antal pletter i disse grupper er 87 ($s = 87$) og observationernes effektivitet vurderes til at være 86% ($k = 0,86$), så finder man et solplettal på $R = 0,86 \times (10 \times 5 + 87) = 118$. Omkring maksimum er solplettallet, R , typisk omkring 200, mens det under solpletminimum er tæt på 0.

Hver gang en solpletgruppe dukker op på solskiven tildeles den et nummer i en fortløbende række. Solpletgruppen, der udløste rekord-udbruddet den 4. november, betegnes således nr. 486. Denne nummerering blev påbegyndt i 1972, og har siden rundet 10.000. Normalt udelades dog de første to cifre således, at 486 i virkeligheden er nr. 10.486. Grupperne betegnes også AR for "Active Region" – f.eks. AR486.

Udbruddenes effekt på Jorden afhænger meget af, om eventuelt udslynget materiale har retning mod Jorden eller ej. Således fandt det gigantiske udbrud den 4. november sted lige da AR486 var ved at forsvinde ved Solens vestlige rand. Udkastet materiale fra udbruddet havde således ikke retning direkte mod Jorden og skabte kun beskedne forstyrrelser i Jordens magnetfelt.

Solpletterne følger Solens rotation, og da Solen ved ækvator har en omløbstid på ca. 25 dage, dukkede gruppen igen frem ved Solens østlige rand knapt to uger senere – omkring den 20. november. Når solpletgrupper på denne måde dukker op igen opstår der gerne lidt forvirring omkring nummereringen, fordi man ikke holder fast i det oprindelige nummer, men tildeler et nyt. AR486 kendes således også som AR508. Levetiden af solpletterne kan variere fra få timer og til flere måneder og meget tyder på, at AR488 (a.k.a. AR507) igen dukker frem på solskiven i slutningen af december, hvor den så igen vil få et nyt nummer.

Boks 1. Afstanden til Solen

Da Jordens bane om Solen har form som en ellipse, varierer afstanden mellem de to himmellegemer. Den er mindst i begyndelsen af januar (147,1 mio. km) og størst i begyndelsen af juli (152,1 mio. km).

Middelafstanden er 149,6 mio. km. Denne afstand kaldes også en 'Astronomisk Enhed' (forkortes AU efter den engelske betegnelse 'Astronomical Unit') og bruges til at angive afstande i rummet.

Forskellen på fem mio. km mellem januar og juli er årsag til, at det sollys vi modtager i juli er omkring 7% mindre intenst end i januar. For os der bor på den nordlige halvkugle er Solen således længst væk om sommeren, altså når vi har det varmest.

Årstiderne bestemmes imidlertid hovedsageligt af jordaksens hældning på $23,5^\circ$ i forhold til Jordens bane omkring Solen. Når det er sommer på den nordlige halvkugle, hælder jordaksen mod Solen, således at solstrålerne falder mere stejlt på den nordlige halvkugle (Solen står højere på himlen) og dermed varmer mere effektivt.

Et halvt år senere er den modsatte situation aktuell og det er sommer på den sydlige halvkugle. Selvom sollyset er 7% mindre intensivt, når vi har sommer nordpå, har vi alligevel i gennemsnit varmere somre end på den sydlige halvkugle. Det skyldes, at den nordlige halvkugle er mere dækket af landjord, som er lettere at opvarme end oceanerne.

Jordens afstand fra Solen betyder, at strålingen fra et soludbrud kan ses godt 8 minutter efter eksplosionen, mens de mest energirige partikler ankommer 10-15 minutter senere.

Soludbrud

At der kan samles så store energimængder i magnetfeltet omkring de store solpletgrupper skyldes populært sagt lokale sammensnøringer af magnetfeltet. Magnetfelterne frembringes af elektriske strømme, som dannes ved bevægelsen af Solens varme, ioniserede gasser. Magnetfelterne kan sammenlignes med elastikker, som kan strækkes, snoes og foldes omkring sig selv. Derved ophobes enorme mængder energi, der – nærmest som en spændt elastik – kan udløses i de voldsomme soludbrud, der også betegnes med det engelske udtryk "flares". Den enorme energi, der frigives, kommer ud i form af elektromagnetisk stråling (gamma- og røntgenstråling), energetiske partikler (elektroner og protoner) samt masseudkastninger.

Flares inddeles i forskellige klasser afhængigt af, hvor intens røntgenstråling de producerer. De svageste betegnes "B", de lidt kraftigere "C", moderat kraftige "M" og meget kraftige for "X". Desuden underinddeles

flares med tal fra 1-9 – f.eks. en M2-klasse flare.

Der findes ikke flere bogstaver i denne inddeling. Hvis en flare er kraftigere end X9 fortsættes inddelingen med tal (X10, X11, X12 osv). Således var den flare, der blev målt den 4. november, en X28-klasse begivenhed, mens det kraftigste udbrud indtil da var klassificeret som X20.

Store masseudkastninger

I forbindelse med flares opstår som nævnt ofte store udslyngninger af stof (op mod 1×10^{13} kg) kaldet "koronale masseudkastninger" (forkortes CME efter den engelske betegnelse "Coronal Mass Ejections").

Da masseudkastningerne kan give de voldsomme effekter på Jorden, er der stor interesse for at kunne forudsige, hvornår udslynget stof fra et soludbrud ankommer til Jorden. Udbruddene forlader typisk Solen med meget forskellige hastigheder, men typisk i intervallet 20–2.000 km/s. Med en model udviklet af forskere ved Catholic University of America og NASA's Goddard Space Flight Center er det muligt at forudsige ankomsten af det udslyngede stof med ca. 12 timers nøjagtighed.

Modellen anvender data fra den fælles ESA/NASA satellit SOHO samt NASA's WIND satellit, og ved hjælp af data fra tidligere satellitmissioner har man både fået bekræftet modellen og gjort den mere præcis.

Solvinden spiller ind

Problemet med at forudsige, hvornår udslynget stof fra et soludbrud når Jorden hænger i hovedsagen sammen med stoffets vekselvirkning med den konstante strøm af elektrisk ladede partikler fra Solen – den såkaldte solvind.

Allerede i 1859 havde Richard Carrington observeret, at der var sammenhæng mellem soludbrud og magnetiske storme på Jorden. Selvom han ikke kunne forklare hvorfor, var det et tidligt indicium på eksistensen af solvinden.

I begyndelsen af 1900-tallet havde den norske fysiker Kristian Birkeland den opfattelse, at nordlys kunne være udløst af en partikelstrøm fra Solen, men hans ideer blev ikke taget alvorligt. Samme skæbne overgik den tyske fysiker Ludwig Biermann, som for at forklare retningen på komethaler også antog, at der fandtes en partikelstrøm fra Solen. Astronomerne havde forinden bemærket, at kometernes haler ikke pegede præcist væk fra solen, men dannede en lille vinkel, og Biermann forklarede i 1951 den lille afbøjning som et resultat af en bevægelse af kometen i en strøm af partikler fra Solen. Begrebet "solvind" blev indført af Eugene Parker i 1959 samtidig med at han fremsatte en magnetisk-hydrodynamisk teori for at beskrive solvinden. Kort efter blev solvinden eksperimentelt påvist af sovjetiske og amerikanske rumsonder.

Den del af solvinden, der strømmer fra Solens ækvatoregne, har i middel en hastighed på ca. 350 km/s.

Hvis en CME starter med en højere hastighed, vil den langsomt blive bremset ned til solvindens hastighed, mens en masseudkastning, der starter med en lavere hastighed vil blive accelereret op.

Boks 2. Solvinden – hastighed og tæthed

Udover det lys der kommer fra Solen, er der også en konstant strøm af elektrisk ladede partikler, som kaldes solvinden.

Denne partikelstrøm karakteriseres ved partiklernes hastighed og tætheden af partikler udtrykt som antallet af protoner pr. cm^3 . Under normale forhold har solvinden fra Solens ækvator en hastighed på ca. 350 km/s og en tæthed på to protoner pr. cm^3 . Ved Solens poler strømmer solvinden dog med en langt større hastighed (ca. 700-800 km/s).

I Solens meget varme atmosfære, koronaen, kan der pga. magnetiske forstyrrelser opstå huller, hvorfra strømmen af partikler er meget hurtigere. En sådan hurtig strøm af partikler vil indhente de partikler, der tidligere er blevet udsendt fra Solen og derved forårsage en ophobning af partikler, der i sidste ende danner en chok-bølge. Når en sådan bølge passerer Jorden, vil den påvirke Jordens magnetfelt med bla. øget chance for nordlys til følge.

Solvindens hastighed og tæthed måles bl.a. af den amerikanske satellit Advanced Composition Explorer (ACE), som befinder sig i en afstand på 1,5 mio. km fra Jorden i retning mod Solen i en bane omkring ét af de såkaldte Lagrange-punkter (særligt stabile punkter i Solens og Jordens fælles tyngdefelt).

Forstyrrelser i Jordens magnetfelt kan beskrives med et K_p -indeks, der med et tal mellem 0 og 9 angiver, hvor meget den vandrette del af Jordens magnetfelt er forstyrret. F.eks. betyder et K_p -indeks på 4 en aktiv storm, $K_p=5$ betegner en mindre storm og værdier herover en kraftig storm. Chancen for at se nordlys øges derfor med K_p -indekset.

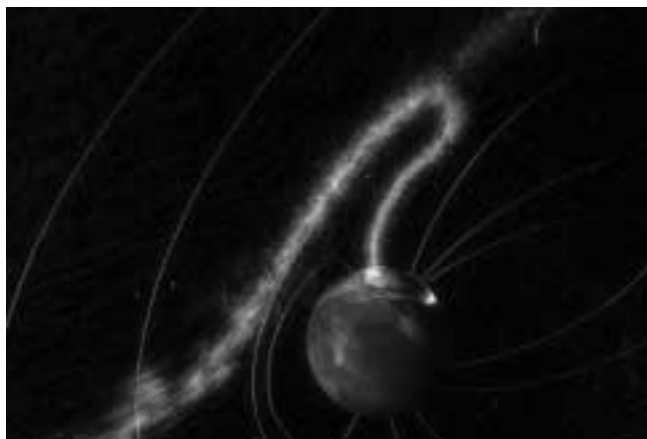
Jordens magnetfelt

Jordens magnetfelt virker som en beskyttende skærm mod solvinden. Området omkring Jorden, hvori Jordens magnetfelt dominerer, kaldes Jordens magnetosfære, og styrken er normalt tilstrækkelig stor til at den kan holde solvinden i en afstand af ca. ti jordradier på "vindsiden" – dvs. den side af Jorden, der vender mod Solen og altså ligger i dagslys. På den modsatte side strækker Jordens magnetfelt sig langt ud i en hale, hvor partikeltætheden er lav. Grænsen mellem magnetosfæren og solvinden kaldes magnetopausen, og på grund af de høje hastigheder i solvinden, giver kollisionen mellem solvinden og magnetosfæren anledning til en

chokbølge i solvinden.

Når Jordens magnetfelt er uforstyrret, går de magnetiske feltlinier ubrudte fra Jordens magnetiske nordpol og til den magnetiske sydpol. Jordens magnetiske nordpol ligger i virkeligheden i Antarktis i nærheden af den geografiske sydpol, mens den magnetiske sydpol (som man af historiske årsager kalder for "magnetisk nord") ligger i nærheden af Grønland. I øvrigt er Jordens magnetfelt langt mere komplekst end en simpel dipol, således at en kompasnål ikke peger direkte mod magnetisk nord. Man kommer dog alligevel til dertil ved at følge kompasset, men ikke nødvendigvis ad den mest direkte vej. Da de magnetiske feltlinier går fra nordpol til sydpol betyder det, Jordens magnetfelt normalt er nordrettet.

Når Jordens magnetfelt kommer i kontakt med magnetfeltet fra solvinden kan der opstå områder, hvor de magnetiske feltlinier har modsat retning, og her kan feltlinierne "revne" og gendannes igen, således at ladede partikler i solvinden nu forbindes til områderne nær Jorden via den samme feltlinie. Allerede i 1961 foreslog Jim Dungey fra Imperial College i London, at det giver den største effekt, hvis magnetfeltet fra solvinden er rettet mod syd og altså modsat Jordens feltlinier. Resultatet af mødet mellem de to felter kan altså blive revner eller åbninger, hvorigennem solvindens partikler kan strømme og bindes til Jordens magnetfelt. Via elektromagnetisk vekselvirkning overføres solvindens kinetiske energi dermed til elektromagnetisk energi og varme i området omkring Jorden.



Figur 2. Revner i Jordens magnetfelt gør det muligt for energirige partikler fra Solen at strømme ind. Ill.: NASA.

At revnerne virkelig findes, blev første gang registreret i 1979 af satellitten International Sun Earth Explorer (ISEE). Da den imidlertid hurtigt fløj igennem revnerne, var det ikke muligt at sige noget om deres levetid, men nu har helt nye observationer med NASA's IMAGE satellit og ESA's Cluster mission (som består af fire identiske satellitter, der flyver i formation) afsløret, at store revner kan eksistere i adskillige timer.

IMAGE ("Imager for Magnetopause to Au-

rorra Global Exploration") observerede et særligt nordlysfænomen, der kaldes "proton nordlys". Det opstår, når ioner rammer den øvre atmosfære og får den til at udsende ultraviolet lys, som ikke kan ses med øjet. Samtidig med at IMAGE observerede dette nordlys, passerede ESA's Cluster satellitter forbi. De kunne registrere, at der var en indstrømning af ioner, der hvor IMAGE kunne se det ultraviolette nordlys, og da det ultraviolette nordlys blev observeret i mere end ni timer, må revnen have været åben i samme tidsrum. Ud fra målingerne fra IMAGE og Cluster kan man vurdere, at revnen har været dobbelt så stor som Jorden ved yderkanten af magnetfeltet, mens den tæt på Jorden har haft en størrelse svarende til arealet af Sverige.

Solaktivitet i fortiden og fremtiden

På grund af solvinden strækker Solens indflydelse sig ud over et stort område – heliosfæren – som omslutter hele solsystemet. Det magnetiske felt, der følger med de ladede partikler i solvinden, beskytter solsystemets planeter mod indtrængen af ladede partikler fra det interstellare rum. Derimod vil støv, neutrale partikler, samt meget energirige kosmiske stråler trænge ind i heliosfæren. Kosmiske stråler er atomkerner samt elektroner, som formodentlig stammer fra supernovaeksplosioner i fjerne egne af vores galakse. Når de støder på magnetfeltet i heliosfæren mister de energi, mens de trænger ind i solsystemet. Det betyder, at intensiteten af de kosmiske stråler aftager ind mod Solen samt at intensiteten varierer med solens aktivitet, således at der er færre kosmiske partikler, der rammer Jorden, ved solmaksimum end ved solminimum.

De kosmiske partikler er ansvarlige for produktionen af radioaktive isotoper i Jordens atmosfære, bl.a. kulstof-14 og beryllium-10, og det betyder, at vi kan bestemme solaktiviteten i fortiden ved at se fordelingen af isotoperne i aflejringer, der kan tidsbestemmes, f.eks. iskerner, sedimenter eller drypsten. Nye analyser af sådanne tidsserier har vist, at Solen siden 1940 har været mere aktiv, end den har været i de forløbne 1.150 år, så vi lever i en tid med en meget usædvanlig Sol. Andre analyser af tidsserier, der strækker sig over mange tusinde år, har vist, at et betydeligt fald i solaktiviteten i stil med Maunder Minimum 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. Maunder Minimum fandt som nævnt på bagsiden sted omkring år 1700, og 400 år tidligere – omkring år 1300 – observerer man det såkaldte Wolf Minimum. Den 400-årige periode er konsistent med oscillation i Solens konvektive zone, 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.

Tiden vil vise, om denne forudsigelse holder stik, men indtil da skulle der fortsat være rigtig mange muligheder for flere flotte nordlysbilleder.