

SÄRTRYCK UR:

KOSMOS

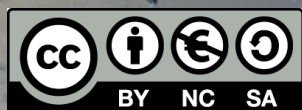
PLANETEN JORDEN

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2018



VINDEN FRÅN SOLEN

© GABRIELLA STENBERG WIESER



Artikeln publiceras under Creative Commons-licensen CC BY-NC-SA 4.0
För bildmaterial med källhänvisning
gäller samma upphovsrättsliga
regler som för källan.

f SVENSKA
FYSIKER
SAMFUNDET

**Gabriella Stenberg Wieser**

är teknisk doktor i rymdfysik. Hon arbetar som forskare vid Institutet för rymdfysik i Kiruna. I sin forskning använder hon satellitmätningar för att studera hur solvinden växelverkar med omgivningarna kring planeterna Mars och Venus och kring kometen Churyumov-Gerasimenko. Dessutom arbetar hon med förberedelser inför den expedition rymdsonden JUICE ska göra till Jupiter. Gabriella har också under de senaste åren medverkat i TV-programmet Fråga Lund.

Från solen strömmar laddade partiklar i ett ständigt flöde som omsluter vår planet, och som sveper med sig dess magnetfält i en oupphörlig kosmisk dans. Gabriella Stenberg Wieser skriver här om det komplexa växelspelet mellan denna solvind och jordens magnetfält, och om de fenomen som blir följden – såväl de spektakulärt färgsprakande som de potentiellt samhällsfarliga.

Norrskén över Lapporten.

Foto: Hans Nilsson

Vinden från solen

Människan insåg tidigt att solen är en förutsättning för att livet ska frodas på jorden. Många historiska kulturer dyrkade solen, som förser jorden med ljus och värme. Det dröjde dock ända till 1950-talet innan man på allvar började misstänka att det är mer än elektromagnetisk strålning som når oss från solen. Solen ansågs bara kunna påverka jorden via gravitationen och det fanns inget sätt att förklara varför man observerade en korrelation mellan fenomen på solen, som solfläckar och solutbrott, och störningar av jordens magnetfält. Noggranna observationer av kometer spädde på mysteriet. Kometerna visade sig, förutom en dammsvans, ha ytterligare en svans som hela tiden var riktad bort ifrån solen.

Den svenske nobelpristagaren Hannes Alfvén var en av dem som funderade på kometerna och insåg att det måste komma en ström av laddade partiklar från solen. För att förklara kometsvansarnas riktning måste kometerernas atmosfärer växelverka med ett partikelflöde från solen. Sidney Chapman förslog att solens atmosfär sträckte sig ända ut till jordens omloppsbana men var övertygad om att atmosfären var statisk och att det inte existerade något partikelflöde. Det var Eugene Parker som, efter en hel del besvär, lyckades publicera beräkningar som visade att solens atmosfär inte alls är statisk utan att en kontinuerlig solvind strömmar ut från stjärnan. I början var det dock inte särskilt många som trodde på honom.

När rymdåldern inleddes under slutet av 50-talet och de första satelliterna sköts upp kunde emellertid Parkers teorier bekräftas. Den första konstgjorda satelliten i omloppsbana, Sputnik 1, nådde som högst drygt 900 km över jordytan och kom aldrig ut i solvinden. Men ganska snart skickades satelliter iväg längre ut. I den rymdkapplöpning som nu startade satsade man tidigt på att ta sig till månen. 1959 gjordes de första mätningarna av solvinden

med den sovjetiska rymdsonden Luna 1. De följdes upp av observationer från Luna 2 och Luna 3. De ryska månsönderna hade med sig en typ av partikelinstrument som kallas *Faraday cup* och som mäter jonflöden. Från dessa mätningar kunde man dock inte uppskatta hastigheten och riktningen på partikelflödet.

Den amerikanska sonden Mariner II, utsänd för att utforska Venus 1962, kunde på sin väg kontinuerligt observera solvinden, och visade att den finns där hela tiden även om hastigheten varierar. Under de 104 dagar som Mariner II:s mätningar pågick varierade solvindshastigheten oftast mellan 400–700 km/s, men kunde ibland nå hela 1250 km/s.

Vad är solvinden?

Solvinden kan betraktas som en förlängning av solens expanderande atmosfär. I koronan, det yttersta lagret av solens atmosfär, är temperaturerna någon miljon grader samtidigt som tätheten börjar avta. Gasen är därför nästan fullt joniserad, det vill säga, atomerna har tappat minst en av sina elektroner och gasen består av en blandning av positivt laddade atomkärnor och fria elektroner. En sådan joniserad gas brukar kallas för plasma. Plasmata strömmar radiellt ut från solen på grund av tryckskillnaden mellan solens atmosfär och yttre rymden. I en dynamisk process, där det termiska trycket i koronan och solens gravitation har betydelse, accelereras solvinden till överljudsart. Strömningshastigheten vid jordbanan varierar vanligen mellan 300–800 km/s. Man brukar prata om att det finns en långsam solvind med hastigheter på 300–500 km/s och en snabb solvind med hastigheter 600–800 km/s. Solvindsplasmat består i båda fallen mest av protoner (vätekärnor) och elektroner, men ungefär 4 % är dubbeljoniserat helium, där heliumatomerna förlorat båda sina elektroner. Solvinden består alltså av samma beståndsdelar som solen själv.

Typ av solvind	Densitet (antal/cm ³)	Hastighet (km/s)	Partikelslag
Snabb solvind	1-7	300-500	H ⁺ , He ²⁺ , e ⁻
Långsam solvind	7-15	600-800	H ⁺ , He ²⁺ , e ⁻

Magnetiskt fält: 1-10 nT, 45 grader från solriktningen			

Tabell 1: Solvindens egenskaper vid jordbanan.

När solvinden rör sig bort från solen drar den med sig solens magnetfält. Inom plasmafysiken säger man att magnetfältet är ”infruset” i plasmata. Partiklarna rör sig radiellt ut från solen, men magnetfältet är förankrat i solen samtidigt som solen roterar runt sin egen axel. Solvindens magnetiska fält, eller det interplanetära magnetfältet som det också kallas, får därför en spiralform när det följer med plasmata ut i solsystemet. Figur 1 på nästa sida visar hur det går till, och solvindens egenskaper sammanfattas i tabell 1. Figur 1 ger intrycket att det interplanetära magnetfältet är helt plant och saknar en nord-syd komponent. Så är inte fallet, och faktum är att just denna komponent av solvindens magnetfält kommer att visa sig vara viktig. Dess riktning varierar hela tiden och spelar roll för vad som inträffar då solvinden når jorden.

Infruset magnetfält

Det var den svenske nobelpristagaren Hannes Alfvén som införde begreppet infruset magnetfält. Laddade partiklar har lätt för att röra sig parallellt med magnetfältet eftersom det inte finns någon kraft som påverkar dem i den riktningen. Konduktiviteten (dvs. ledningsförmågan) längs magnetfältet kan därför ofta betraktas som oändlig. Då en laddad partikel däremot försöker att röra sig vinkelrätt mot magnetfältet påverkas den av Lorentz-kraften

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

där q är partikelns laddning, $\mathbf{v}$ dess hastighet och $\mathbf{B}$ den magnetiska flödestätheten. Lorentz-kraften får partikeln att röra sig i en cirkel eller i en spiral (om den har en hastighet parallellt med magnetfältet). Cirkelns radie (gyroradien) ges av

$$r_G = \frac{mv_{\perp}}{|q|B}$$

där m är partikelns massa och $v_{\perp}$ dess hastighet vinkelrätt mot magnetfältet. Frekvensen med vilken partikeln snurrar runt (gyrofrekvensen) är

$$f = \frac{|q|B}{2\pi m}$$

Man kan visa att om konduktiviteten är tillräckligt hög och om magnetfältet är nästan konstant över ett avstånd motsvarande en gyroradie och heller inte ändrar sig mycket under en gyroperiod (dvs. den tid det tar för en partikel i plasmata att snurra ett varv runt en fältlinje), så är magnetfältet infruset i plasmata. Ett plasmapakete rör sig då tillsammans med en viss fältlinje. Fältlinjen och plasmapakete kan betraktas som bundna till varandra.

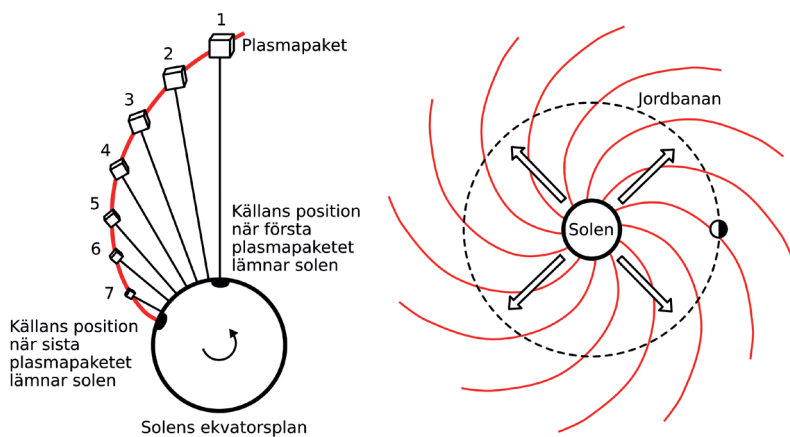


BILD: MARTIN WIESER

Figur 1: Protonerna och elektronerna i solvinden rör sig radiellt ut från solen. De drar med sig magnetfältet ut i solsystemet. Bilden till vänster visar hur ett antal plasmapaket (protoner och elektroner) drar med sig en magnetfältlinje ut från solen. Paket nummer 1 sänds ut först och eftersom solen roterar medan plasmapaketerna sänds ut blir magnetfältlinjen spiralformad. Bilden till höger visar hur magnetfältet ser ut i solens ekvatorsplan. Vid jordbanan är vinkeln mellan den radiella riktningen och magnetfältet ungefär 45 grader.

Jordens magnetosfär

Även jorden har som bekant ett magnetfält, som alstras av elektriska strömmar i jordens inre. Jordens magnetfält är ganska likt magnetfältet runt en stavmagnet – det är ett så kallat dipolfält, med den magnetiska sydpolen inte så långt från den geografiska nordpolen och den magnetiska nordpolen i närheten av den geografiska sydpolen. Vid jordytan varierar den magnetiska flödestätheten mellan 25 000 nT och 65 000 nT. Vid ekvatorn är magnetfältet parallellt med jordytan medan det nära de magnetiska polerna är vinkelrätt mot ytan. De magnetiska polerna ligger inte still utan har genom historien flyttat på sig och det kan ibland gå ganska snabbt. Under de senaste två hundra åren har den magnetiska polen på norra halvklotet rört sig åt nordväst. Magnetfältet har också bytt polaritet genom historien så att nordpol blivit sydpol och tvärtom. Det sker inte särskilt ofta men geologiska fynd visar att det händer med ojämn intervall på hundratusentals år eller ännu längre.

Så vad händer då när solvinden når jorden och möter dess magnetfält? Solvindens densitet är så låg att kollisioner mellan dess partiklar är mycket sällsynta. Däremot känner de väl av jor-

dens magnetiska fält. Det blir ett hinder för solvindspartiklarna som tvingas vika av och röra sig i banor så att de undviker jordens starka magnetfält. Solvinden rör sig med överljudsart vilket gör att det skapas en stationär chockvåg där solvinden bromsas in och värms upp innan den når fram till *magnetopausen*, dvs. gränsskiktet mellan solvinden och det område som domineras av jordens magnetfält.

Var finns magnetopausen?

Man kan göra en enkel uppskattning av hur långt bort från jorden magnetopausen är genom att anta att det råder tryckbalans där. Det finns tre olika tryckkomponenter som vi måste ta hänsyn till: ett dynamiskt tryck från partikelflödet, ett magnetiskt tryck från solvindens och jordens magnetiska fält och ett termiskt tryck från partiklarnas temperatur. I solvinden dominerar det dynamiska trycket så de andra två termerna kan försummas. I jordens magnetosfär dominerar det magnetiska trycket. Vi får en tryckbalanskvation som ser ut så här:

$$\frac{\rho_{SV} v_{SV}^2}{2} = \frac{B_{MP}^2}{2\mu_0}$$

där ρ_{SV} och v_{SV} är solvindens massdensitet respektive hastighet, och där B_{MP} är magnetfältets flödestäthet vid magnetopausen. ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m är bara en konstant.) Vi vet att jordens magnetfält är ett dipolfält, vilket innebär att den magnetiska flödestätheten i ekvatorsplanet på ett avstånd r från jordens centrum ges av

$$B = B_0 \left(\frac{R_J}{r} \right)^3$$

Här är $B_0 = 31\,200$ nT den magnetiska flödestätheten vid ekvatorn vid jordytan, och $R_J = 6371$ km är jordens radie.

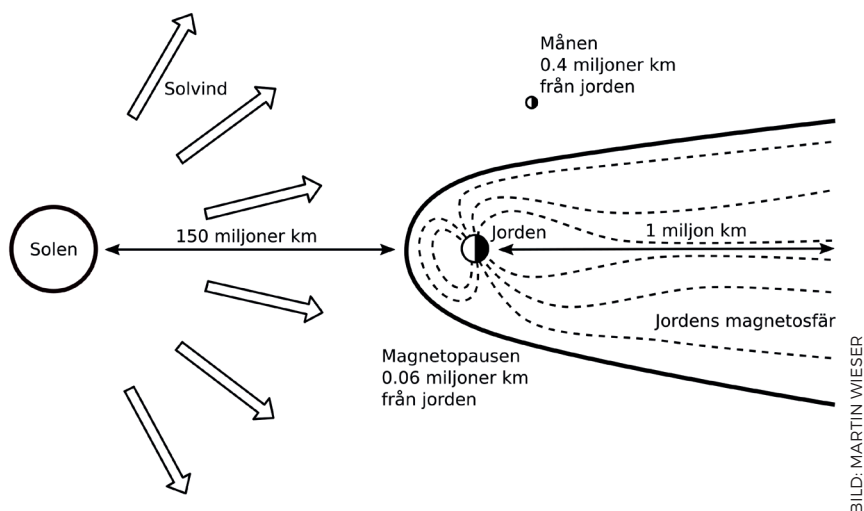
Insättning i uttrycket ovan ger

$$\frac{\rho_{SV} v_{SV}^2}{2} = \frac{B_0^2}{2\mu_0} \left(\frac{R_J}{r_{MP}} \right)^6$$

Om vi löser ut r_{MP} , som är avståndet till magnetopausen, får vi

$$r_{MP} = R_J \left(\frac{B_0^2}{\mu_0 \rho_{SV} v_{SV}^2} \right)^{1/6}$$

Låt oss sätta in typiska solvindsvärden: om $v_{SV} = 450$ km/s och $\rho_{SV} = 8,35 \cdot 10^{-21}$ kg/m³ (vilket är protonmassan multiplicerad med 5 cm⁻³) får vi $r_{MP} \approx 9$ jordradier. Det blir inte alldeles rätt eftersom solvinden trycker ihop jordens magnetfält så att flödestätheten vid magnetopausen blir större än för ett dipolfält, men det är ändå en bra uppskattning.



Figur 2: Solvinden möter jordens magnetfält och en magnetosfär uppstår kring jorden. Magnetosfären är inte sfärisk utan utdragen till en lång svans på den sida av jorden som vetter bort från solen. Gränsskiktet mellan solvindsplasmata och det område som domineras av jordens magnetiska fält kallas för magnetopausen. Magnetosfären är fylld med plasma som kommer både från jonosfären och från solvinden.

BILD: MARTIN WIESER

Magnetopausen befinner sig ungefär 9 jordradier ut från jordens centrum (se sidorutan) och omsluter alltså det område som domineras av jordens magnetiska fält. Vi kallar det området för magnetosfären även om det inte har en särskilt sfärisk form – på grund av solvinden dras magnetosfären ut till en lång magnet-svans på nattsidan av jorden, se figur 2. Jordens magnetosfär är full av plasma (dvs. laddade partiklar) som kommer både från solvinden och från den övre joniserade delen av jordens atmosfär (jonosfären).

Det finns mycket att upptäcka i magnetosfären. Den har en komplex struktur med avgränsade områden där plasmat har olika egenskaper, till exempel i fråga om densitet, sammansättning och temperatur, och gränserna mellan de olika områdena är ofta både tunna och skarpa. Energi omsätts också hela tiden i magnetosfären. Lagrad energi kan på kort tid frigöras och ge upphov till kraftiga störningar i magnetfältet vid jordytan och fascinerande norrskensskådespel, något vi ska återkomma till längre fram. All den här strukturen och dynamiken är möjlig tack vare den energi som överförs till magnetosfären från solvinden.

Samspelet mellan solvinden och magnetosfären

Solljuset – den elektromagnetiska strålningen – tillför energi till jorden som gör livet möjligt. Energin från solen driver bland annat luftströmarna i atmosfären och gör att temperaturen är sådan att vatten existerar i flytande form.

Solvinden överför energi till jordens magnetosfär och driver många processer i rymden nära jorden. Ett sätt för solvinden att växelverka med jordens magnetosfär är genom magnetisk omkoppling (på engelska *reconnection*). Lite förenklat kan man säga att två områden med motriktade magnetiska fält kan kopplas ihop så att magnetfältstopologin förändras och plasma kan överföras från det ena området till det andra. En skiss av processen visas i figur 3. Magnetisk omkoppling kan ske på dagsidan av jordens magnetosfär. Processen är som mest effektiv om magnetfältet i solvinden är motriktat jordens magnetiska fält vid magnetosfärens nos, alltså den del som är närmast solen. Jordens magnetiska fält är där riktat mot norr, och om solvindens fält är sydriktat växelverkar solvinden effektivt med jordens magnetosfär. Hur mycket energi som solvinden kan överföra beror därför på hur solvindens magnetiska fält är riktat, men också på hur mycket energi som solvinden bär med sig, och på hur stor den yta är där solvinden och jorden kan växelverka. Den yta där solvinden växelverkar med magnetosfären kan uppskattas som tvärsnittsarean av jordens magnetosfär. Den effektiva tvärsnittsarean varierar eftersom den beror på hur stor magnetosfären är, och som vi såg i sidorutan tidigare styrs det av solvindens dynamiska tryck.

Energiinflödet från solvinden kan uppskattas som

$$\epsilon = \frac{4\pi}{\mu_0} v_{SV} B_{SV}^2 \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)^4 A$$

där v_{SV} är solvindens hastighet, B_{SV} är den magnetiska flödestätheten i solvinden och θ är vinkeln mellan solvindens magnetfält och jordens magnetfält vid nosen på magnetopausen. Den area som är tillgänglig för växelverkan beskrivs av A . ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m är en konstant.) Ekvationen är bara en enkel modell och tar exempelvis inte hänsyn till att den magnetiska dipolaxeln lutar, vilket ger variationer i energiinflödet.

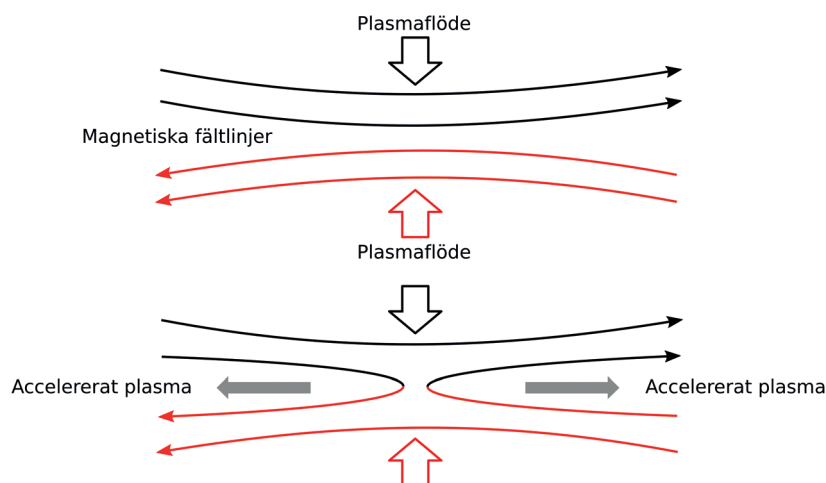


BILD: MARTIN WIESER

Figur 3: Magnetisk omkoppling börjar med två områden med motriktade magnetiska fält. Plasmata i de två områdena flödar in mot gränsskiktet (övre bilden). I ett litet område kopplas magnetfältlinjerna om så att topologin ändras och de båda områdena sitter ihop magnetiskt. I det begränsade område där själva omkopplingen sker är magnetfältet inte längre inburet i plasmata. De nyskapade magnetfältlinjerna är som synes kraftigt böjda och kommer att sträva efter att rätta ut sig. När de gör det accelererar de samtidigt de partiklar som befinner sig på fältlinjerna (nedre bilden).

Om vi approximerar tvärsnittsarean med en cirkulär skiva med radien 9 jordradier får vi $A \approx 1,03 \cdot 10^{16} \text{ m}^2$. (9 jordradier var ju avståndet från jordens centrum till magnetopausen som vi beräknade i sidorutan ovan.) Om vi sedan väljer typiska värden på solvindshastigheten (450 km/s) och solvindens magnetiska fält (5 nT) får vi

$$\epsilon \approx \frac{4\pi}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot (450 \cdot 10^3) \cdot (5 \cdot 10^{-9})^2 \cdot \left(\sin \frac{90}{2}\right)^4 \cdot (1,03 \cdot 10^{16}) \approx 290 \text{ GW}$$

där vi antagit att vinkeln $\theta = 90^\circ$, det vill säga att solvindens magnetiska fält är vinkelrätt mot jordens magnetiska fält längst fram på magnetosfären. Energiinflödet ökar till strax över 1100 GW om riktningen på solvindens magnetfält är motriktat jordens, som i det ideala fallet i figur 3.

Vi kan jämföra med hur mycket energi som når jorden i form av solljus. Solstrålningen vid jordbanan är 1360 W/m^2 men ungefär en tredjedel av det reflekteras direkt tillbaka ut i rymden. Kvar är ungefär 1000 W/m^2 över en träffyta med storleken πR_J^2 ,

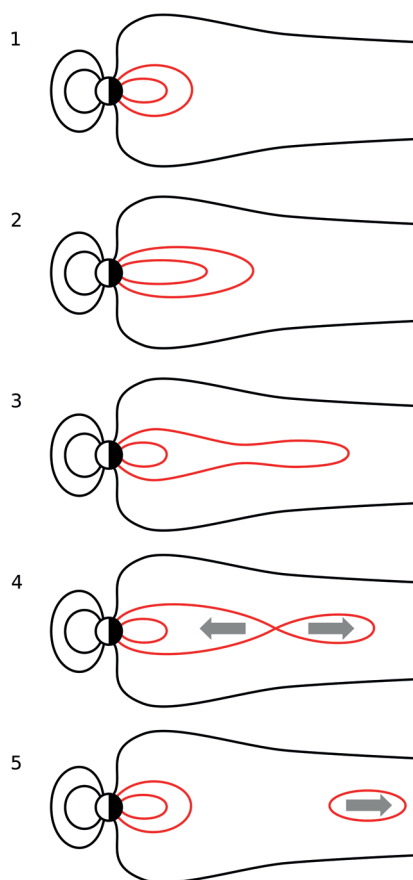
där $R_j = 6371$ km är jordens radie. Energin som jorden får ta emot är då nästan 130 000 000 GW. Den energi som kommer med solvinden är alltså några hundra tusen gånger mindre än vad solljuset ger. Trots det finns det, som vi strax ska se, många anledningar att se närmare på vad solvindsenergin får för konsekvenser.

Energin som tillförs via solvinden driver olika processer i magnetosfären, men energin behöver inte användas genast. Magnetosfären kan lagra energi under en viss tid för att sedan snabbt frigöra den och skapa ett ljusstarkt och dynamiskt norrsken.

När solvindens magnetfält vrider sig så att det får en sydriktad komponent ökar energiinflödet som vi har sett. Magnetfältlinjer som kommer från jorden kopplas ihop med magnetfältlinjer i solvinden, men solvindsplasmat utanför magnetosfären fortsätter sin rörelse bort från solen. Eftersom magnetfältet är infruset i plasmat drar solvinden med sig hela den omkopplade magnetfältlinjen i sin rörelse. På detta sätt flyttar solvinden magnetiskt flöde från dagsidan till nattsidan av jordens magnetosfär där energin kan lagras en viss tid i magnetsvansen. Då magnetsvansen byggs på med magnetiskt flöde dras den inre delen av svansen ut och blir tunnare, se figur 4 på nästa sida. Man brukar likna det vid en slangbella eller ett gummiband: energi lagras i gummibandet då det sträcks.

Magnetsvansen kan dock inte lagra hur mycket energi som helst utan när en punkt då energin snabbt frigörs. Det sker genom att magnetisk omkoppling plötsligt äger rum på ett avstånd av kanske 15–30 jordradier från jorden i magnetsvansen. Den magnetiska omkopplingen ger upphov till magnetfältlinjer som är slutna på ett enkelt sätt, det vill säga inte längre är anslutna till solvindens magnetiska fält. Precis som när man släpper ett utsträckt gummiband eller avfyrar slangbellen vill magnetfältlinjerna inte behålla sin utsträckt form. Det spända gummibandet återtar sin naturliga form när man släpper det. På samma sätt återtar magnetsvansen snabbt sin naturliga form, där magnetfältet är mer dipollikt nära jorden. Eftersom den totala energin är bevarad måste den energi som tidigare fanns lagrad i det uttänjda magnetfältet ta vägen någonstans. En del av den energin används till att accelerera de laddade partiklar som finns i mitten av magnetsvansen. De dras med av magnetfältet när det återgår till en mer dipollik form och fortsätter ner mot jordens atmosfär.

På mellan en till två jordradier över jordytan träffar de lad-



Figur 4: En substorms olika faser. Energi kan lagras i magnetsvansen, vars inre delar sträcks ut och blir tunnare (1-3). Vid någon tidpunkt startar magnetisk omkoppling (4) och en del plasma i svansen accelereras mot jorden samtidigt som magnetfältet antar en mer dipollik form. En del av plasmat i svansen försvinner i stället ut i solvinden (5).

BILD: MARTIN WIESER

dade partiklarna på ett elektriskt fält parallellt med magnetfältlinjerna som kan accelerera elektroner till energier på flera kiloelektronvolt. Det elektriska fältet självt är svårt att mäta direkt, men de första svenska forskningssatelliterna, Viking och Freja, observerade tydligt effekterna av det i form av accelererade partiklar både ovanför och nedanför området där det elektriska fältet finns. Det elektriska fältet och de partiklar som accelereras är en del av en stor strömkrets i magnetosfären som brukar kallas norrskensströmkretsen. Man kan säga att generatören sitter i magnetsvansen och driver strömmen längs magnetfältlinjerna ner i jonosfären där strömkretsen sluts.

När elektronerna, som accelereras av det elektriska fältet, brakar in i atmosfären uppstår starka och varierande norrskensformationer kring de båda magnetiska polerna, vilket vi återkommer till senare.

All lagrad energi går dock inte åt till att skapa norrsken. En stor del lämnar jorden som tappar en bit av sin magnetsvans vid den magnetiska omkopplingen, som framgår av figur 4. Svansen återskapas när solvindens partiklar och magnetfält fortsätter att strömma mot jorden. Händelseförloppet som just beskrivits kallas för en *substorm*. Under ett dygn inträffar normalt en eller flera sådana substormar på jorden.

En substorm noteras på jordytan genom att det lokala magnetfältet, framför allt i polarområdena, ändrar riktning och flödestäthet. Det är de starka strömmarna i jonosfären som är orsaken till förändringarna, eftersom elektriska strömmar ger upphov till magnetiska fält. Ett intensivt och variabelt norrsken är också ett tecken på att en substorm har inletts. Substormsbegreppet myntades från början för att beskriva olika faser i ett norrskensutbrott. Kopplingen till solvinden och processerna i jordens magnetosfär gjordes långt senare. En substorm varar ett par timmar, men den mest intensiva fasen – då norrskenet är som mest spektakulärt på himlen – brukar vara över på 10–30 minuter. Ibland kan det dock komma flera substormar tätt efter varandra.

Norrsken

I Sverige förekommer norrsken oftast i nordliga trakter och i dessa områden finns många tankar och berättelser om fenomenet. Många gånger betraktades norrskenet med stor respekt och någonting man måste handskas försiktigt med. I vissa kulturer ansågs det vara en hemvist för döda, speciellt för dem som dött för tidigt eller på ett våldsamt sätt.

Längre söderut är norrsken mer ovanligt, så man kan tänka sig att det skapade stor uppståndelse när det någon gång dök upp på himlen. Det är svårt att i efterhand veta säkert, men det finns textpassager i bibeln som har tolkats som beskrivningar av dramatiska norrskensskådespel.

I Sverige bedrevs norrskenforskning faktiskt redan på 1700-talet. Anders Celsius och Olof Hiorter studerade hur en kompassnål rör sig, och kunde visa att det finns ett samband mellan norrsken och variationer i jordens magnetiska fält.

Idag vet vi att norrsken orsakas av att laddade partiklar rör sig längs magnetfältlinjerna ner mot atmosfären. Det parallella elektriska fältet på flera tusen kilometers höjd, som nämndes tidigare, accelererar partiklarna till höga energier och det konvergerande

magnetfältet styr ner dem mot ett begränsat område. På 100–200 km höjd blir atmosfären så tät att de accelererade partiklarna börjar kollidera med atomerna och molekylerna där. Det är oftast elektroner med hög energi som orsakar norrsken men det finns protonnorrsken också. Vid kollisionerna överförs en del av energin hos den framrusande partikeln till atomen eller molekylerna. Den får då mer energi än den brukar ha; man säger att den exciteras. För att bli av med energin och återgå till sitt grundtillstånd sänder atomen eller molekylerna ut ljus (ett ljuskvantum). Det är det ljuset som vi ser som norrsken.

Under en substorm är det partiklar som befinner sig nära den punkt där den magnetiska omkopplingen sker som rör sig mot jorden. Partiklarna följer i huvudsak de magnetiska fältlinjerna och dessa korsar jordytan på relativt hög latitud. För att det ska bli norrsken måste partiklarna också få mer energi av det parallella elektriska fältet, så det är bara vid fältlinjer där det elektriska fältet finns som norrskenet syns. Det fungerar på samma sätt på södra halvklotet, så det finns sydsken också. Om man vill kan man använda det allmänna uttrycket polarsken. Många tror att polarsken är som vanligast vid polerna, men det är inte sant. Polarsken är vanligast i en oval kring respektive magnetiska pol. (Det är framför allt magnetosfärens icke-symmetriska form som gör att det blir en oval och inte en cirkel.) Det finns polarsken på dagsidan också, men det ser man inte med blotta ögat eftersom det är för ljust då. Partiklarna som orsakar polarsken på dagsidan kommer inte från magnetsvansen utan har tagit sig in i magnetosfären nära de magnetiska polerna där magnetfältet liknar en tratt.

Redan i mitten av 1800-talet förstod man att norrskensljuset måste komma från en lysande gas av något slag. Anders Ångström mätte spektrum från norrsken. Han kunde konstatera att det vanligaste gulgröna norrskensljuset (se figur 5) hade våglängden 557,7 nanometer men han kunde inte komma på vilken gas som gav upphov till ljuset.

Inte förrän på 1920-talet löstes mysteriet. Det är exciterade syreatomer i atmosfären som orsakar det gulgröna skenet när de återgår till sitt grundtillstånd. Den övergång som sker – det hopp mellan olika energinivåer i syreatomen som elektronen gör – är en så kallad förbjuden övergång; en exciterad atom stannar i genomsnitt hela 0,74 sekunder i sitt exciterade tillstånd. Under den tiden hinner en atom i vanliga fall kollidera med någon annan atom och



FOTO: HANS NILSSON

Figur 5: Norrsköld. Det typiska gulgröna ljuset sänds ut av syreatomer som exciterats på 100 km höjd ovanför marken.

göra sig av med energin i kollisionen. Därför ser man inte övergången vid försök i laboratorium. Högt upp i atmosfären däremot är tätheten så låg att atomerna inte hinner krocka med någon annan partikel inom 0,74 sekunder och de flesta exciterade syreatomerna kommer att sända ut det gulgröna ljuset.

Ännu högre upp i atmosfären kan rött norrskönsljus skapas. Det är också syreatomer som exciteras och även här rör det sig om en förbjuden övergång. Medellivslängden för atomerna i detta exciterade tillstånd är hela 110 sekunder, så atmosfären måste vara väldigt tunn för att den här övergången ska ske.

På lägre höjder ger kollisioner med kvävemolekyler också upphov till ett rött ljus. Där sker övergången direkt. Ibland kan man se gröna norrskönsbågar med en röd underkant. Då har de accelererade partiklarna trängt ner så djupt i atmosfären att den förbjudna övergången inte längre inträffar, utan i stället är det övergången hos kvävemolekylerna som dominerar.

Jordens atmosfär flyr

Norrskenet är en påtaglig effekt av att solvindens energi omsätts i magnetosfären, och man anade tidigt ett samband mellan händelser på solen och spektakulära norrsken. En mer obemärkt konsekvens av inflödet av solljus och solvindsenergi är atmosfärsflykt: vår atmosfär sipprar långsamt ut i rymden.

Flykthastigheten från jorden är 11,2 km/s. De atomer och molekyler i atmosfären som når den hastigheten kan försvinna ut i rymden förutsatt att de inte kolliderar med någon annan atom eller molekyl på vägen. På höjder större än 500 km över jordytan är densiteten så låg att det inte längre sker några kollisioner mellan partiklarna. Härifrån kan atomer med tillräckligt hög energi försvinna ut, och eftersom det alltid finns atomer med hög energi även om medelenergin inte är så hög, är det ständigt lite av atmosfären som ger sig iväg. Det är enklare för lättare atomer att komma upp i flykthastigheten. För en proton motsvarar 11,2 km/s en energi på 0,65 eV (eller $1,05 \cdot 10^{-19}$ J) medan det för en syreatom betyder 10 eV (eller $1,7 \cdot 10^{-18}$ J).

I den yttre atmosfären (från 80 km höjd) är en stor del av partiklarna laddade. De har joniserats av den ultraviolette strålningen från solen och området kallas för jonosfären. Jonerna i jonosfären har hastigheter långt under flykthastigheten, men trots det har det visat sig att en del av dem flödar upp längs magnetfältlinjerna och att joner från jonosfären utgör en stor del av det plasma som finns i magnetosfären ända ut i magnetsvansen. Ibland når de så höga hastigheter att de kan lämna magnetosfären och försvinna vidare ut i rymden.

Ett sätt för jonerna i magnetosfären att erhålla de höga energier som krävs för detta är genom våg-partikelväxelverkan, där energin ursprungligen kommer från solvinden. Det finns många intressanta typer av elektromagnetiska vågrörelser i magnetosfären. En vågtyp som kan överföra energi till positivt laddade joner kallas *joncyklotronvågor*. En jon som placeras i ett statiskt magnetfält rör sig i en cirkel, eller en spiral längs fältlinjerna, när den påverkas av Lorentz-kraften

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

där q är partikelns laddning, $\mathbf{B}$ är magnetfältets flödestäthet och $\mathbf{v}$ är partikelns hastighet. Spiralrörelsens rotationsfrekvens f ges av

$$f = \frac{|q|B}{2\pi m}$$

där m är partikelns massa. Joncyklotronvågor är en vågtyp där vågens elektriska fält är vinkelrätt mot magnetfältslinjen. Det elektriska fältet ändrar också riktning hela tiden och vrider sig runt magnetfältslinjen åt samma håll som en positivt laddad jon snurrar. Om det elektriska fältet snurrar lika fort som jonen ser jonen alltid ett elektriskt fält som är riktat åt samma håll som den är på väg. Jonen accelereras då väldigt snabbt av det elektriska fältet och energi överförs från vågen till jonen. Det här är ett exempel på hur energin från solvinden används i flera steg. Solvindsenergin används först för att accelerera elektroner som kan generera joncyklotronvågor. Vågorna i sin tur överför sin energi till joner som ibland får så hög energi att de kan lämna jordens magnetosfär.

Det är svårt att mäta exakt hur mycket atmosfär jorden förlorar. En uppskattning är att det varje sekund försvinner i storleksordningen 10^{26} väteatomer tillsammans med ungefär lika många vätejoner och omkring $4 \cdot 10^{25}$ syrejoner. Det kan låta mycket; nämnda syremängd innebär till exempel att ungefär 1 kg syre lämnar jorden varje sekund. Dessbättre utgör jordens atmosfär totalt hela $5 \cdot 10^{18}$ kg, så det skulle ändå ta väldigt lång tid att tömma den om utflödet inte är högre än vad det är idag.

Atmosfärsflykten är alltså inget problem för jorden idag, men det är intressant att fundera på hur det var tidigare i solsystemets historia. Det har föreslagits att endast planeter med egna magnetfält kommer att utveckla miljöer som är lämpliga för liv. Jordens magnetfält stoppar solvinden på ett avstånd på ungefär 10 jordradier, som vi såg tidigare, och solvindens partiklar kan därmed inte direkt påverka vår atmosfär. Vårt magnetfält verkar fungera som en skyddande sköld mot solvinden.

Men det har visat sig att det inte är så enkelt. Venus och Mars, våra grannplaneter i rymden, saknar egna magnetiska fält och solvinden växelverkar därför på ett mer direkt sätt med deras atmosfärer. Man har argumenterat för att det är solvindens erosion i frånvaro av ett skyddande magnetfält som lett till att Mars atmosfär är så tunn idag. Det låter som en rimlig tanke, men hur förklarar man då att Venus, som också saknar ett eget magnetfält, har en tjock atmosfär med liknande sammansättning som atmosfären kring Mars? Satellitmätningar har dessutom visat att utflödet av

atmosfär från både Mars och Venus är ungefär lika stort som det från jorden. Vårt magnetfält verkar inte ge oss så stort skydd mot solvinden som vi kanske föreställt oss.

Förklaringen är troligtvis att magnetiserade och omagnetiserade planeter förlorar sina atmosfärer på helt olika sätt. Saknar planeten ett eget magnetfält kommer solvinden lättare åt atmosfären direkt. Ett eget magnetfält innebär i stället en stor magnetosfär med en stor tvärsnittsarea, där solvinden kan överföra energi – energi som i ett senare skede kan resultera i partikelacceleration och utflöde av partiklar till rymden. Det är i vilket fall som helst fascinerande att atmosfärsförlusten är så lika för flera av solsystemets objekt (se tabell 2).

	Jorden	Venus	Mars
Utflöde av joner (per sekund)	10^{26} (H^+) $4 \cdot 10^{25}$ (O^+)	10^{25} (H^+, O^+)	10^{25} (H^+, O^+)
Utflöde av neutral gas (per sekund)	10^{26} (H)	$4 \cdot 10^{25}$ (H)	10^{26} (H)

Tabell 2: Uppskattat utflöde av partiklar från olika planeter.

Geomagnetiska stormar – ett hot?

Redan innan solvinden upptäcktes kopplades fenomen på solen samman med störningar i jordens magnetfält. Vid månadsskiftet augusti–september 1859 observerade Richard Carrington massvis med solfläckar och en enorm soleruption. Ett knappt dygn senare noterades väldiga störningar av jordens magnetiska fält. Starka norrsken siktades mycket längre söderut än normalt och telegrafsystem slutade att fungera. Jorden hade drabbats av en stor geomagnetisk storm, och händelserna på solytan misstänktes ha betydelse även om man vid den tidpunkten inte förstod hur sambandet fungerade.

En geomagnetisk storm orsakas av att det sker en så kallad *koronamassutkastning* på solen. Det kan liknas vid en explosion på solytan där enorma mängder partiklar (mest protoner och elektroner) tillsammans med magnetfält slungas ut i rymden. Om riktningen på koronamassutkastningen är sådan att den träffar jorden är sannolikheten mycket stor att den utlöser en geomagnetisk storm. Risken ökar om magnetfältet i massutkastningen är sydriktat så att magnetisk omkoppling sker på magnetosfärens dagsida, och dess energi därmed kan överföras till magnetosfären på ett

effektivt sätt. Hastigheten hos en koronamassutkastning varierar och det tar 1–5 dagar för den röra sig från solen till jorden. Koronamassutkastningar är ett relativt nyupptäckt fenomen. Den första direkta observationen gjordes inte förrän 1971, men nu anser man att de utgör den huvudsakliga orsaken till geomagnetiska stormar. De uppstår ofta i samband med soleruptioner, och troligtvis var det vad som hände i september 1859.

Begreppet geomagnetisk storm är besläktat med begreppet substorm och användningen av orden flyter ibland samman. Men medan en substorm orsakas av det kontinuerliga solvindsfödet på det sätt vi såg tidigare, så orsakas en geomagnetisk storm alltså av en mer exceptionell händelse: en koronamassutkastning som gör att ovanligt mycket energi och partiklar överförs från solvinden till jorden under en längre tid. Dessa stormar leder till stora störningar i jordens magnetiska fält. Under en geomagnetisk storm kan polarsken ofta observeras mycket närmare ekvatorn än normalt, och de kan också ställa till med en hel del problem för elektriska system och elektronik. Intresset för geomagnetiska stormar har därför ökat allteftersom vårt samhälle blivit mer beroende av teknik. Vi pratar ibland om rymdväder och menar då förhållandena i jordens magnetosfär och speciellt risken för störningar i tekniska system.

Både satelliter och system på marken kan ta skada av en geomagnetisk storm. Datorer, solceller och mätinstrument ombord på satelliter kan skadas av själva partikelflödet, som även innebär en dödlig fara för astronauter om de inte kan ta skydd någonstans. Den risken var man faktiskt inte medveten om då månfärderna ägde rum. Dessbättre hade man tur och lyckades undgå den geomagnetiska storm som ägde rum i augusti 1972 mellan Apollo 16 och Apollo 17. Om astronauterna hade varit oskyddade på månytan när partikelflödet kom hade de troligtvis drabbats av mycket allvarliga problem.

Tack vare jordens magnetfält når de kraftiga partikelflödena dock aldrig ner till jordytan, utan här är det framför allt elnätet som det finns skäl att oroa sig över. Många har hört talas om rymdovädret som gjorde hela Quebec i Kanada strömlöst 1989, och om det som orsakade elavbrottet i Malmö 2003. Listan över tekniska system som skulle påverkas idag kan dock göras mycket längre än då, och inkluderar till exempel kommunikations- och positionssystem, pipelines och signalsystem för järnvägar.

Problemet i Kanada var de långa elledningarna och även i Malmö var det en elledning som slogs ut. Det som ger problem på marken är de snabba variationerna i det magnetiska fältet, som i sin tur orsakas av snabba ändringar i de elektriska strömmar som flyter i jonosfären. Ändringarna i magnetfältet inducerar ett elektriskt fält som driver strömmar längs jordytan. Strömmarna letar sig förstås fram till alla elektriskt ledande material som finns i närheten och många av dem är just våra känsliga elektriska system. Långa elledningar är särskilt utsatta.

Risken finns att de geomagnetiska stormar vi upplevt hittills bara är små, orsakade av relativt obetydliga solutbrott och att mycket mer omfattande händelser på solen är att vänta. Den stora geomagnetiska stormen 1859 inträffade innan vi gjort oss beroende av fungerande GPS-system och mobiltelefoner, och den skulle ha orsakat betydligt större skador om den inträffat idag. Studier av iskärnor tyder på att ännu mycket kraftfullare solutbrott inträffade för 1000 år sedan. Ingen vet hur vanliga sådana extremt kraftiga utbrott är eller när nästa kommer att inträffa.

Idag finns åtminstone en medvetenhet om att rymdvädret påverkar vårt samhälle. Vi vet att den energi som kommer med solvinden kan ge oss bekymmer om vi inte är förberedda. Men solvinden ger oss också fascinerande och fantasieggande norrsken att bara njuta av. ❖

För vidare läsning

Wolfgang Baumjohann och Rudolf Treumann, *Basic Space Plasma Physics*, Imperial College Press (2012).

C. T. Russell, J. G. Luhmann och R. J. Strangeway, *Space Physics: An Introduction*, Cambridge University Press (2016).

Ingrid Sandahl, *Norrsken. Budbärare från rymden*, Atlantis (1998).

George K. Parks, *Characterizing Space Plasmas. A Data Driven Approach*, Springer (2018).

