

Vejrforudsigelser i det ydre rum

Hans Pécseli, Fysisk Institut, Universitetet i Oslo

Ovenstående titel berører i virkeligheden to spørgsmål; for det første er begrebet vejrforudsigelse veldefineret i daglig tale; de fleste forbinder vel vejrkort, TV meteorologer og lignende med begrebet, og det er rimeligt at spørge om, i hvilket omfang, hvis overhovedet, betegnelsen kan anvendes på forhold i rummet. Et andet, og underforstået spørgsmål er selvfølgelig om det er noget vi behøver at interessere os for. I håb om at fastholde opmærksomheden for det følgende er det måske rimeligt allerede i udgangspunktet kort at svare bekræftende på begge spørgsmål: Selvom partikkeltætheden i Jordens ydre rum er relativt lille, er det også her muligt at tale om blæst, kraftige forstyrrelser og sågar storme. Disse forhold er typisk lokaliseret til afstande af nogle jordradier over jordoverfladen, og det hører til sjældenhederne, at de har en umiddelbart målelig konsekvens for forhold på Jorden. Det kunne derfor ventes, at mulige skadevirkninger kunne ignoreres, fordi de ikke var så hyppige. For et moderne industrialiseret samfund vil imidlertid selv sjældent forekommende uheld kunne få vidstrakte følgevirkninger. En konsekvensanalyse af uheld vil typisk multiplicere sandsynligheden for et uheld med et mål for dets konsekvenser, og dette produkt kan blive stort selv for sjældne uheld. Specielt uheldige vejrforhold i det ydre rum udgør en risiko for forhold på Jorden, som ikke kan ignoreres. For eksempel kan disse fænomener foranledige variationer i Jordens magnetfelt, hvorved der kan induceres uønskede strømme i elektriske højspændingsnet med udfald i strømforsyningen til følge.

Det må dernæst tilføjes, at mange af de omtalte forstyrrelser ofte er lokaliserede til områder, som kan give kraftige forstyrrelser på satellitter. Da moderne kommunikation og navigation i høj grad er afhængig af sådanne satellitter, kan det forventes, at forhold i det ydre rum er af betydning også for vor dagligdag. Korrekte vejrforudsigelser er i dag kritisk afhængige af meteorologiske satellitter, og disse oplysninger kan for visse erhverv, fiskeri fx, være livsvigtige.

Jordens magnetosfære

Det geomagnetiske felt kan i Jordens nærhed med en ganske god nøjagtighed beskrives som et magnetisk dipolfelt. For større afstande, typisk 5–10 jordradier, modificeres dette felt på grund af tilstedeværelsen af et plasma, den såkaldte solvind¹. Dette plasma kan betragtes som en gas bestående af frie elektroner og ioner, som kontinuert fordampes fra soloverfladen. Solvinden drives bort fra Solen af gradienten i trykket, men holdes tilbage af Solens tyngdefelt. Da denne tyngdekraft aftager med kvadratet på afstanden fra solens centrum, kan der opstå en situation, hvor trykkræfterne dominerer for store

afstande. Plasmaet kan da opnå en energi, der overstiger indfangningsenergien i solens tyngdefelt. Disse forhold kan beskrives ved en simplificeret model^{2,3}, hvor det antages, at forholdene er stationære og kuglesymmetriske. Massefluxen gennem en kugleflade med centrum i solcenteret må da være konstant, uafhængig af den aktuelle kugleskals radius r , eller med andre ord

$$4\pi r^2 \rho V = \text{const}, \quad (1)$$

hvor ρ er massetætheden af solvinden og V dens hastighed i den radiale retning. Newtons 2. lov giver for dette tilfælde

$$-\frac{dP}{dr} - \rho \frac{M_{\odot} G}{r^2} = \rho V \frac{dV}{dr}, \quad (2)$$

hvor $M_{\odot}$ er solmassen og G er gravitationskonstanten. Venstre side af (2) er summen af de lokale kraftpåvirkninger, der skyldes gradienten i trykket og Solens tiltrækning, mens højre siden udtrykker den acceleration et volumenelement af solvinden udsættes for ved sin radiale bevægelse.



optilas

*Optilas Danmark, den lokale internationale
leverandør med specialer indenfor:*

Optik og lasere til forskning og industri

Continuum, Inc. - Corion Corp. - CVI Laser Corp. - Ion Laser Technology, Inc. - Labsphere, Inc. - Laservision - Optical Surfaces Ltd. - Physical Optics Corp. - Research Electro Optics - Santa Fe Laser Co. - Synrad, Inc. - m.fl.



Spektroskopisk udstyr

Chromex, Inc. - McPherson Milton Roy - Photek Ltd. m.fl.



Elektronik

Directed Energy, Inc. - Maxwell Laboratories, Inc. - Quantum Design, Inc. - Stanford Research Systems, Inc. - Trek, Inc. - m. fl.

Optilas Danmark

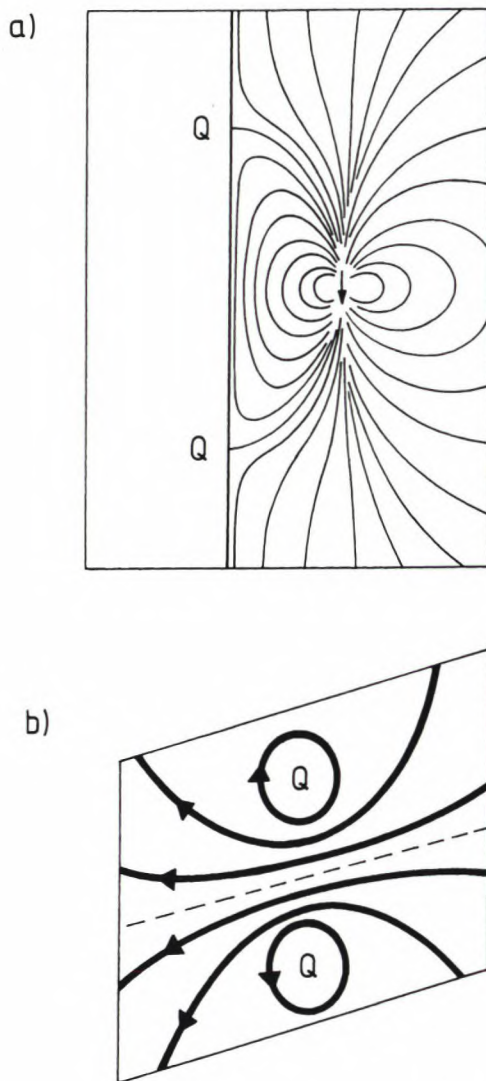
Billedvej 2

DK-2100 København Ø

Telefon: 3543 0133

Fax: 3543 8334

E-mail: optilas@inet.uni-c.dk



Figur 1. Et dipolfelt deformeres af en ideel leder som vist i a). Lederen antages at fylde halvrummet til venstre i figuren. I figur b) skitseres de inducerede overfladestrømme, som giver anledning til deformationen af dipolfeltet. Fladestrømtætheden varierer kontinuert hen over fladen; for nemheds skyld er kun enkelte strømbaner vist. Bemærk de to magnetiske nulpunkter på lederens overflade, mærket Q , som omslutes af overfladestrømmen. Gennem disse to punkter er der speciel simpel forbindelse til magnetosfæren fra solvinden.

Det antages nu, at udtrykket for en idealgas kan anvendes for trykket, i.e. $P = \kappa T n$ givet ved partikeltætheden af plasmaet $n \equiv \rho/m$, og at forholdene er isoterme med temperatur T , hvor Boltzmann's konstant κ er indført. Indsættes tætheden ρ fra (1) i (2) fås

$$\frac{1}{V} \left(\frac{V^2}{C_s^2} - 1 \right) \frac{dV}{dr} = \frac{1}{r} \left(2 - \frac{M_\odot G}{r C_s^2} \right), \quad (3)$$

hvor den isoterme lydshastighed $C_s = \sqrt{\kappa T/m}$ er indført. Ligning (3) har løsninger, hvor hastigheden V vokser monotont med radius r og bliver supersonisk, $V > C_s$, ved en kritisk afstand $r_c \equiv M_\odot G/2 C_s^2$. Denne løsning er aktuel for solvinden, og man finder $r_c \sim 2R_\odot$, hvor $R_\odot$ er Solens radius. ($R_\odot \approx 700 \cdot 10^3$ km, dvs. næsten

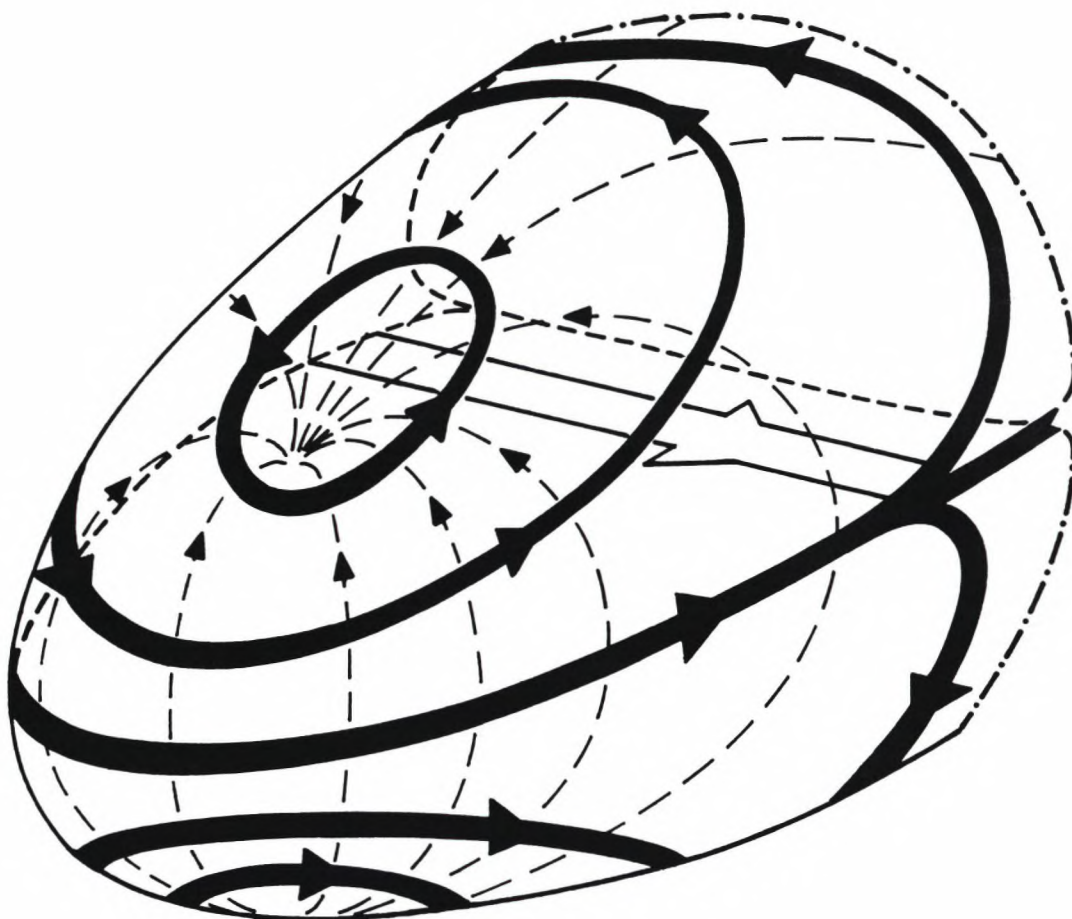
110 gange Jordens radius.) Udledningen her giver en korrekt beskrivelse af de faktiske forhold, og de fleste simplificerende antagelser kan udelades på bekostning af noget mere regnearbejde. Den matematiske beskrivelse af udstrømningsforholdene, der er skitserede, har en interessant analogi til en Laval-dyse².

Selvom partikeltætheden er lille, $n \approx 5 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3}$ ved 1 AU ("astronomical unit", en afstand fra Solens centrum svarende til jordbanens middelfradius, $1 \text{ AU} \approx 150 \cdot 10^6 \text{ km}$), er ladningsbærerne frit bevægelige, og solvindsplasmaet er karakteriseret ved en høj elektrisk ledningsevne, som i det relevante parameterområde er sammenlignelig med ledningsevnen for rent kobber.

Solvindens påvirkning af Jordens magnetfelt kan illustreres ved det simple eksempel givet på figur 1. Plasmaet repræsenteres her ved et ideelt ledende medium, hvor inducerede overfladestrømme i pladen giver anledning til en modifikation af det magnetiske felt som vist. Jordens magnetfelt trykkes sammen og deformeres kraftigt på den side, der vender mod lederen. Strømsystemet vist på figur 1b giver at kraft på dipolen, som skubber den bort fra den ideelle leder. Det kan vises, at den kraft, hvormed lederen må presses mod den magnetiske dipol er omvendt proportional med fjerde rod af afstanden mellem leder og dipol. Selvom figuren er stærkt idealiseret, indeholder den de vigtigste elementer af en mere detaljeret beskrivelse. For at retfærdiggøre dette synspunkt betragtes nogle af modellens begrænsninger: i) solvinden er en god men ikke ideel leder, og ii) da plasmaet er i gasfase, kan den ikke korrekt repræsenteres ved en fast væg.

En endelig ledningsevne vil give anledning til at det magnetiske felt forplanter sig ind i lederen. Så længe denne proces er langsom, kan den beskrives som en simpel diffusionsproces, hvor en lokal diffusionshastighed er proportional med resistiviteten $1/\sigma$ og den lokale gradient i magnetfeltet. Magnetfeltdiffusionen bringer til sidst feltet tilbage til den oprindelige dipolstruktur, som om der slet ikke var nogen leder til stede. Imidlertid modvirkes denne proces af strømningen i solvinden, som hele tiden bringer nyt plasma forbi Jorden. På figur 1 svarer dette til en bevægelse af lederen med konstant hastighed parallelt med grænsefladen.

Når et medie strømmer gennem et magnetfelt, induceres der elektriske felter med en intensitet proportional med strømningshastigheden U . Disse elektriske felter giver anledning til strømme, som skaber et nyt magnetfelt. Afbildes det resulterende magnetiske vektorfelt, vil det se ud som om magnetfeltlinierne "trækkes med" af strømningen, og kan dermed afvige markant fra den simple dipolstruktur. Den relative betydning af konvektions hastigheden og diffusionshastigheden på det magnetiske feltbillede måles ved et dimensionsløst magnetisk Reynold's tal $R_m \equiv \mu_0 \sigma L U$, hvor L er en karakteristisk længdeskala og U en typisk hastighed, mens μ_0 er vacuum permeabiliteten, se også boks. For store R_m er magnetfeltdiffusionens betydning forsvindende, mens på den anden side er konvektionen uden betydning for små R_m . Som et



Figur 2. Skematisk illustration af strømsystemerne ved Jordens magnetopause. Fladestrømtætheden varierer kontinuert hen over fladen; for nemheds skyld er også her kun enkelte strømkanaler vist. Figuren kan opfattes som en generalisering af figur 1b. Magnetfeltlinier er indikeret ved stiplede strek. Den neutrale fladestrøm er vist i hvidt på tværs af magnetosfæren bag Jorden.

regneeksempel, der er relevant for magnetosfæreforhold, betragtes $L \approx 10^3$ m, $U \approx 10^5$ m/s, og $\sigma \approx 5 \cdot 10^6$ S/m, hvilket giver $R_m \approx 6 \cdot 10^8 \gg 1$, det vil sige at i dette tilfælde kan vi forvente kraftige afvigelser fra det simple dipolfelt.

Som konklusion, vil figur 1 forblive kvalitativt korrekt, selv for et materiale med endelig ledningsevne forudsat at strømningshastigheden af mediet er stor. Resultatet bliver i det aktuelle tilfælde et grænselag med stærkt inhomogent magnetfelt som skiller solvinden og Jordens ionosfære. Grænselaget har form som en stående chockfront, der virker som en beskyttende kappe, der skærmer mod et bombardement af hurtige solpartikler, som ved specielt voldsom solaktivitet opnår relativistiske energier. Chockfronten selv har ikke form som den plane væg, der var skitseret på figur 1; siden solvindspasmaet er i gasfase, vil grænselaget folde sig rundt om Jordens magnetfelt, på samme måde som en ledende væske flyder rundt om en stærk magnet, som nedsænkes i væsken (hvis eksperimentet udføres i kviksølv, er resultatet dog skuffende; i dette tilfælde er ledningsevnen for dårlig, selv for meget rent kviksølv). En realistisk fremstilling af Jordens magne-

tosfære er forsøgt på figur 4, side 23 og strømsystemet ved magnetopausen er illustreret på figur 2. Det ses, hvorledes Jordens magnetfelt danner en kavititet i solvinden. Kaviteten er dog ikke et vakuum; dele af Jordens nære og fjerne omegn indeholder et ionosfærisk plasma.

Solvinden gennemtrænges af et svagt magnetfelt fra Solen. Dette felt har en intensitet af ca. 5 nT i en afstand af 1 AU fra Solen. Dette magnetfelt kan gennem magnetopausen koble til Jordens magnetfelt, ved at magnetfeltlinier kan skabe direkte forbindelse fra solvinden og ind i Jordmagnetosfæren. De topologiske forhold omkring denne kobling er imidlertid stærkt variable; Jordens magnetfelt har en fast polaritet, mens Solens kan skifte retning inden for bestemte sektorer, hvis udstrækning blandt andet afhænger af solaktiviteten. Koblingen mellem de to magnetfeltssystemer er specielt kraftig, når den lokale polaritet af Solens magnetfelt er modsat Jordens.

Forholdene i Jordens ionosfære

Den neutrale komponent af Jordens atmosfære aftager med højden over jordoverfladen, se figur 5. De øverste lag af denne atmosfære ioniseres af ultraviolet stråling fra Solen,

samtidig med at det meste af denne stråling absorberes. Denne ioniserede gas, et plasma, udgør Jordens ionosfære. Ionosfærens tæthed aftager hurtigt med højden på grund af den aftagende neutralitet, som bevirker, at der bliver få partikler at ionisere i store højder. På den anden side aftager plasmataetheden kraftigt for højder under ca. 90 km, da det meste af den ultraviolette stråling er absorberet over dette område. Denne nære ionosfære i højdeområdet over 90 km kan detekteres ved radarspredning og ved hjælp af instrumenterede raketter og satellitter.

Satellitmålinger har vist, at der, for højder over cirka 1400 km målt ved ækvator, findes en forøget koncentration af energirige partikler, de såkaldte strålingsbælter. En vigtig kilde til partikler i strålingsbælterne er neutroner, der bevæger sig upåvirket af magnetfeltet indtil de henfalder til elektron-proton par, som derefter er indfanget af Jordens magnetfelt. Ved henfaldet frigøres en energi på cirka 780 keV. De fleste af disse neutroner er sekundærpartikler produceret ved den kosmiske strålings vekselvirkning med Jordens atmosfære³.

Elektronerne og protonerne spirallerer omkring magnetfeltlinier og kan opfattes som små ringstrømme, eller magnetiske dipoler, som er påvirket af en kraft proportional med gradienten af det lokale magnetfelt, med retning mod den svage feltstyrke. Da magnetfeltet er kraftigst ved Jordens poler, se for eksempel figur 4, side 23, vil de fleste partikler blive reflekteret her og være indfanget mellem Jordens to magnetpoler, i princippet vilkårlig længe. Man taler om indfangning mellem to "magnetiske spejle". En global forstyrrelse af det magnetiske felt vil imidlertid medføre en tilsvarende forstyrrelse af partikelfordelingen i strålingsbælterne, hvorved en del af de ladede partikler undslipper de magnetiske spejlfelter. Jordens strålingsbælter består af energirige partikler, men tæthederne er relativt lave, omkring 10^6 m^{-3} .

Partikkeltæthederne i Jordens magnetosfære er således stærkt varierende både i tid og rum. Det kan imidlertid siges generelt, at tilstedeværelsen af frie ladningsbærere tillader lokale strømsystemer i tillæg til de strømme, der flyder i grænselaget mellem solvinden og magnetosfæren. Disse strømsystemer bidrager også til ændringer af det globale magnetfeltsbillede. På figur 2 vises specielt den neutrale fladestrøm ("neutral sheet current"), som flyder på tværs af magnetosfæren på jordens natside i symmetriplanet, hvor magnetfeltet er svagt. Denne strøm bidrager til en kraftig deformation af magnetfeltet, så det får form af en langstrakt hale ("magnetotail"), i stedet for et felt, der er nær et dipolfelt, se figur 4, side 23.

Forstyrrelser i magnetosfæren

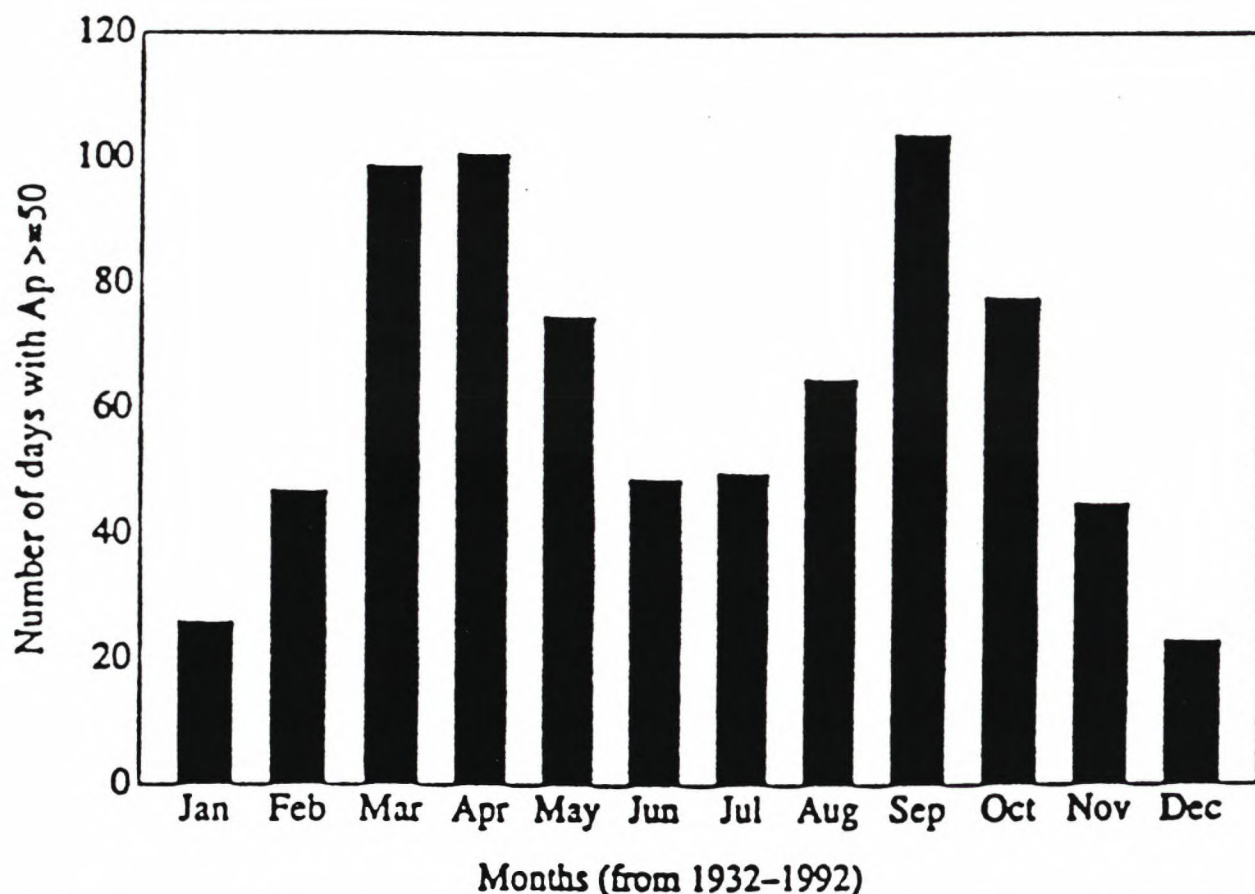
Jordens magnetfelt er overlejret en fluktuerende komponent, selv under normale forhold. For eksempel giver friktionen mellem den strømmende solvind og det stationære plasma, som er indfanget i Jordens magnetfelt, ofte anledning til ustabile forhold (Kelvin-Helmholtz instabilitet) og der genereres lavfrekvente fluktuationer, som giver anledning til målbare magnetiske forstyrrelser på

Jorden¹. Magnetiske pulsationer, micropulsationer, kan være regelmæssige eller uregelmæssige. Hver type kan optræde med perioder fra 1 til 10^3 sekunder. Disse magnetfeltsfluktuationer kan opfattes som magneto-hydrodynamiske bølger (ofte kaldet Alfvén bølger, se boks), som kan forplante sig i Jordens magnetosfære. Specielt kan der opstå stående bølger mellem Jordens magnetiske poler.

Selv hvis fluktuationer, der skyldes ustabile forhold var eliminerede, ville magnetfeltet på Jorden have en døgnrytme, der skyldes, at Jordens magnetiske akse ikke er sammenfaldende med omdrejningsaksen, med et drejet en vinkel på omtrent 11° . Som konsekvens af dette svinger den magnetiske hale ("magneto-tail"), se figur 4, side 23, med denne døgnrytme.

De før nævnte forstyrrelser er observerbare, men de giver ikke anledning til specielt dramatiske hændelser. Den stående magnetosfæriske chockfront omkring Jordens solside kan imidlertid sættes i kraftig bevægelse af "kast" i solvinden, der kan skyldes en forøgelse af enten hastigheden eller plasmataetheden i korte perioder, svarende til at den ledende væg på figur 1 presses kraftigere mod dipolen. Sådanne hændelser forekommer ofte, især i perioder med høj solaktivitet, hvor man skelner mellem flere forskellige hændelser; fx "solar flares", "coronal holes" og "coronal mass ejection (CME)", hvor en observation af CME vises i figur 6 side 26. Den samlede frigjorte energi i forbindelse med "solar flares" og CME kan være yderst varierende. Normalt ligger de aktuelle energier i området 10^{22} – 10^{25} J, altoverskueligt i form af kinetisk energi. Til sammenligning er Norges energiforbrug 10^{15} – 10^{16} J/døgn.

CME vil ofte give anledning til en chockfront i solvinden, og hvis en sådan front rammer jordmagnetosfæren, kan der opstå magnetiske storme, som manifesterer sig ved kraftige globale magnetiske forstyrrelser med op til et døgn varighed. Det kraftigt varierende magnetfelt (der er jævnlige tale om flere % relativ variation) kan ved jordoverfladen inducere elektriske felter, som kan forårsage alvorlige uheld^{4,5}. Selvom Jordens magnetfelt er svagt, kun cirka $50 \mu\text{T}$ ved polerne, og fluktuationerne langsomme, så kan der alligevel induceres uacceptabelt store strømme i et højspændingsnet på grund af dets store udstrækning. Den inducerede strøm i en lukket ledningskreds er lig den tidsafledede af dens omsluttede magnetfeltsflux divideret med kredsens samlede modstand. Modstanden øges proportionalt med ledningens længde, mens den omsluttede flux øges med kvadratet på længden, så et net med en stor udstrækning kan få induceret store strømme. Illustrer et højspændingsnet ved en kobberleder med 20 mm diameter, lukket i en ring med en radius på 500 km, vil en 1 Hz fluktuation på $\sim 2\%$ i Jordens magnetfelt inducere en strøm på ~ 80 A og strømstyrker væsentlig større end dette er blevet målt. Følgevirkningerne kan i ekstreme tilfælde være alvorlige. For eksempel faldt hele ledningsnettet for Hydro Quebec i Canada ud i 9 timer i forbindelse med en usædvanlig kraftig geomagnetisk storm 13. marts 1989.



Figur 3. Det såkaldte A_p index er et mål for den globale geomagnetiske aktivitet. På figuren vises en oversigt over tilfælde med $A_p \geq 50$ for årene 1932 til 1992 fordelt på måned⁴. Figuren viser en iøjenfaldende årstidsvariation forbundet med den varierende vinkel mellem Jordens og Solens magnetfelt.

Uheldet berørte 6 mill. forbrugere.

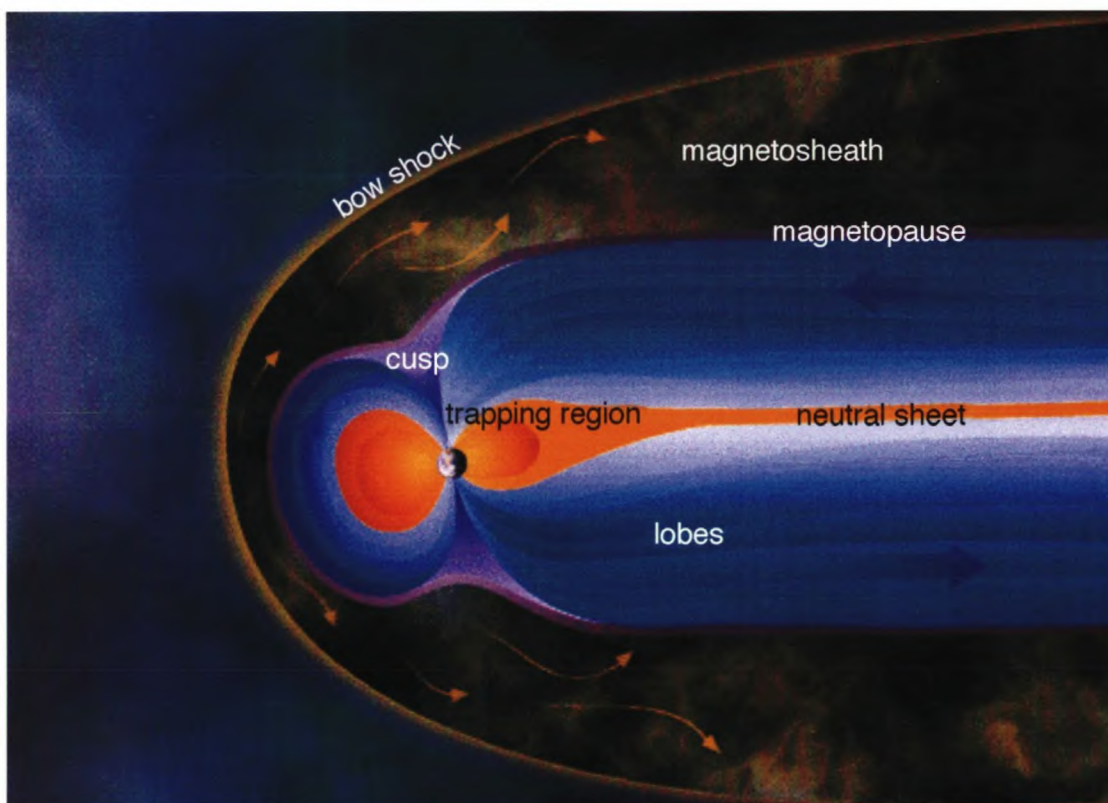
Man har indført et såkaldt A_p index som udtryk for geomagnetisk aktivitet. (A -et indikerer, at der er tale om en dagsmiddel, hvor et alternativ er en 3 timers middel, K -indekset. p -et henviser til, at der er tale om en global middelværdi, "planet-wide average". Der findes en mængde af sådanne index, hvor udvalgte geografiske områder vægtes specielt.) Det kan anføres at $A_p \geq 50$ er udtryk for en kraftig geomagnetisk storm. For at illustrere problemets omfang vises i figur 3 en optælling af det samlede antal stormdage fordelt på årets måneder i perioden januar 1932 til december 1992. Det fremgår, at man i denne 60 årige periode kunne forvente mere end én alvorlig magnetisk storm i hver af henved halvdelen af årets måneder.

Også andre former for forstyrrelser er kendte: De inducerede strømme vides at give anledning til forøget korrosion af lange rørledninger. Strømmene er lavfrekvente, i det mindste i sammenligning med vekselspændingsfrekvenser på 50 eller 60 Hz, og der er ved flere lejligheder observeret en strøm-bias i elektriske krafttransformatorer, som medfører uønsket opvarmning af transformator-kernen og en ofte uacceptabel harmonisk generering på grund af mætningsfænomener i jernkernen.

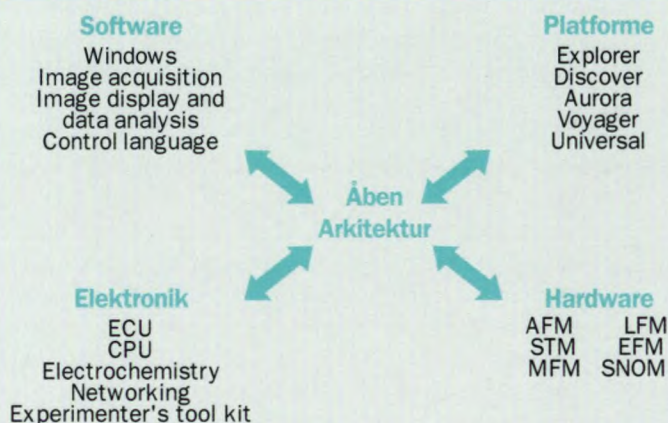
Disse og andre ledsagefænomener ved magnetosfæriske storme medfører store tab og udgifter, selvom størrelsen af de aktuelle tab er vanskelig at specificere. Forholdene, der er beskrevet her, er aktuelle især for den nordlige halvkugle, fx i Canada og nordlige Skandinavien. På den sydlige halvkugle er de tilsvarende områder stort set dækket af vand.

Forstyrrelser af satellitter

De kraftigste magnetosfæriske og ionosfæriske forstyrrelser er lokaliserede i områder, hvor der befinder sig mange kommercielle satellitter. Geostationære satellitter, med en omløbstid på 24 timer (mere nøjagtigt 23 timer og 56 minutter), befinder sig for eksempel over ækvator i en afstand $6.6 R_E$ fra Jordens centrum, hvor $R_E \approx 6.38 \cdot 10^3$ km er jordradien. Afstanden fra Jordens centrum til magnetopausen i retning mod Solen er under normale forhold $\sim 10 R_E$. Satellitter designet til normale forhold i denne afstand kan imidlertid lide varig skade, hvis magnetosfæren trykkes kraftigt sammen i forbindelse med voldsom solaktivitet. Ved sådanne forhold kan satellitten pludselig befinde sig i solvinden, hvor plasmatætheden kan være mærkbart større end i strålingsbælterne. I dette område kan instrumenterne og



Figur 4. Realistisk illustration af Jordens magnetosfære. Bemærk den langstrakte hale på Jordens natside.



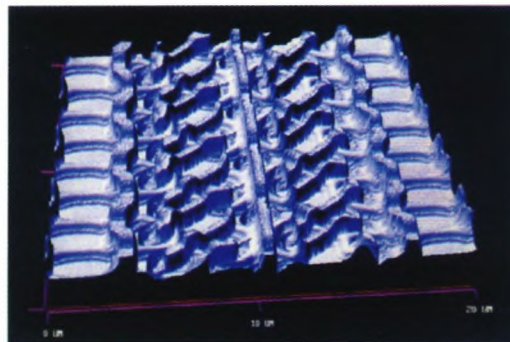
TopoMetrix er en af de førende producenter af **Scanning Probe Microscopes** i Silicon Valley, USA. **TopoMetrix** har været på forkant med udviklingen lige siden starten.

Flexibilitet er nøgleordet blandt ingeniørerne hos **TopoMetrix**. Det modulære design gør det muligt for brugeren at tilpasse software og hardware til egne nutidige og fremtidige behov. Dette indebærer en optimal udnyttelse af investeringen.

Fordele ved SPM: Mulighed for af se prøver ned til atomar størrelse. 3D-forstørrelse. Kan arbejde under vakuum, atmosfærisk tryk og i væsker. Ved SPM kræves der ingen forberedelse af prøverne.

Anvendelses områder: Biologiske undersøgelser under fysiologiske betingelser. Udvikling af mikroelektronik, elektrokemiske undersøgelser af materialer i deres oprindelige miljø. Materialeforskning, hvor der ses på fibre, ultraflade overflader, evaluering af overfladebehandling, etc.

**AFM
billede af
multilags
semi-
conductor
taget
med
TopoMetrix
Voyager.**



E-mail: dkbuchol@ibmmail.com

Buch & Holm A/S

Marielundvej 36 - 2730 Herlev ☎ 42 91 75 11 Fax 44 92 31 00

solpanelerne udsættes for direkte bestråling af de energirige partikler (ofte med relativistiske hastigheder), som ledsager en voldsom solaktivitet. Det er muligt, at det er den heraf følgende elektrostatiske opladning af dele af satellitten, der er årsag til de problemer, som kan opstå. I begyndelsen af 1997 ophørte fx en kommunikationssatellit med at fungere i forbindelse med et sådant soludbrud, og den kunne ikke senere genaktiveres. Prisen på en sådan satellit er omtrent 400 mio. \$.

En rutinemæssig justering af satellitters retning består i at tilpasse en strøm gennem en strømkreds ombord på satellitten. Satellitten får da et drejningsmoment gennem vekselvirkningen mellem Jordens magnetfelt og den magnetiske dipol, som er ækvivalent med strømsløjfen. Under intense geomagnetiske forstyrrelser kan magnetopausen imidlertid, som nævnt før, krydse satellittens bane, således at den pludselig befinder sig i et magnetfelt af anden styrke og anden retning end det, der blev antaget ved planlægningen af korrektionen i dens retning. (I værste tilfælde kan magnetfeltets retning være den modsatte af det, der blev antaget.) Som konsekvens kan satellitten få en anden orientering end den tilsigtede, og for eksempel kan solpanelernes belysning derved blive uhensigtsmæssig og satellittens antenner rettet forkert. Dette specielle eksempel fremhæver igen betydningen af pålidelige og forudsigelige magnetfelt modeller.

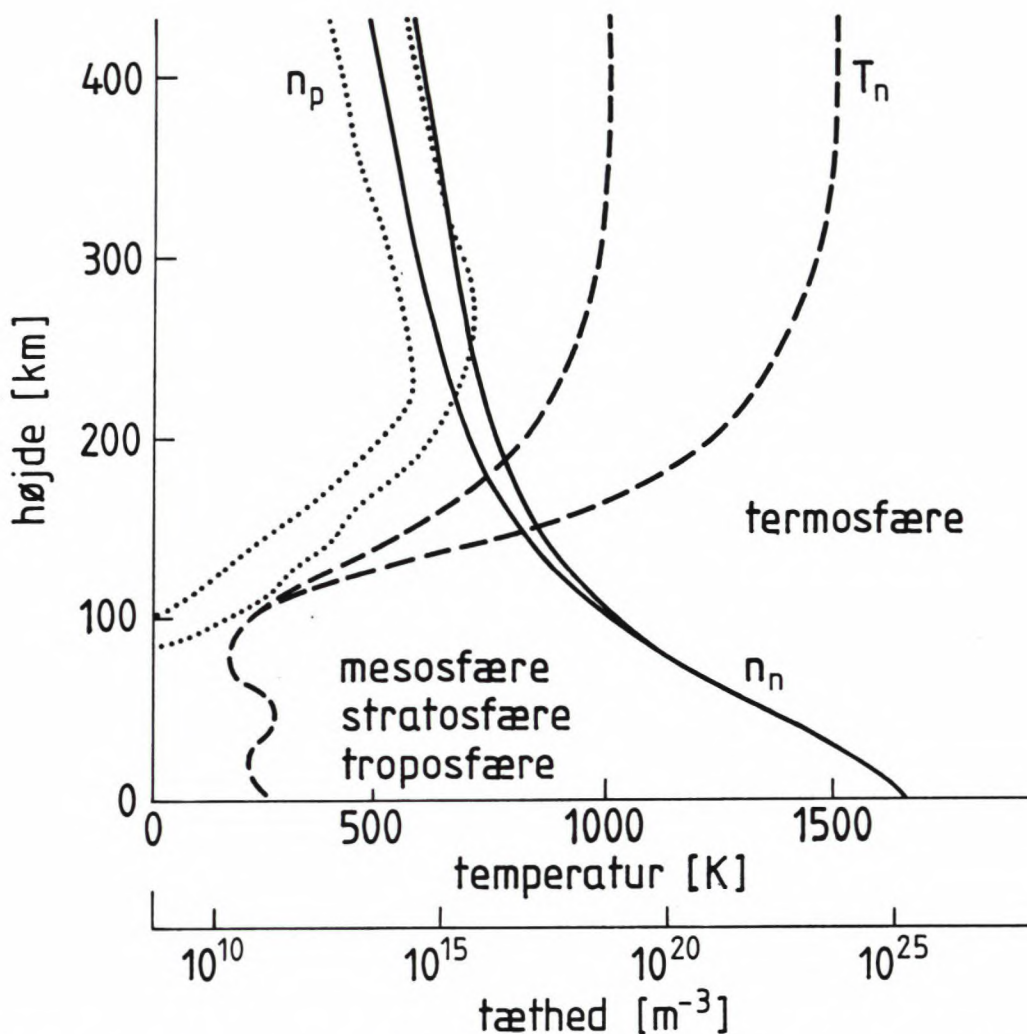
Forstyrrelser nærmere Jorden har en noget anden karakter end i den ydre magnetosfære. I afstande 600–800 km over Jorden, hvor de fleste jordobservations-satellitter befinder sig, er det friktionen med den tynde rest-atmosfære, der er afgørende for satellitlevetiden⁶. Der er her kun yderst sjældent tale om dramatiske påvirkninger. Konsekvensen af luftmodstanden er imidlertid yderst reel; rumteleskopet HUBBLE, som ideelt befinder sig i en afstand af ~ 600 km over jorden, daler for eksempel cirka 10 km/år på grund af denne friktion, og det har allerede én gang været nødvendigt at accelerere det op til en højere bane. Dette skete i forbindelse med den meget omtalte reparation af det optiske system. Tilsvarende forhold gør sig gældende for meteorologiske satellitter, som fx måler bølgehøjder på havene ved μ -bølgereflektion. For bølgehøjder op til 25 m er målenøjagtigheden $\sim 10\%$, hvilket opnås ved en analyse af det samlede refleksionsmønster, hvoraf hele bølgeformen aflæses. Kapillarbølgerne indeholder desuden information om vindretningen, som derfor også kan bestemmes. For disse målinger er et kendskab til satellittens absolutte position med nogle meters nøjagtighed tilstrækkelig. Imidlertid er en *absolut* bestemmelse af havniveauet af stor betydning for klimatiske modeller, fx for isafsmeltningen ved polerne, og i denne forbindelse er en nøjagtighed på ± 10 cm (sic!) i baneberegningen ønskelig. Lignede overvejelser gør sig gældende for bestemmelse af kontinentaldriften ved hjælp af satellitmålinger. En sådan præcision kræver ekstremt gode banemodeller, og dermed tilsvarende gode atmosfæremodeller, og opnås ved, at interpolere mellem satellitpositioner (fx for ESA's ERS satellitter) målt med

op til en uges mellemrum. En egentlig forudsigelse af en senere position ud fra en måling er noget mere usikker, og unøjagtigheden kan let blive omkring 1 m på en uges tid, men selv dette sætter ekstreme krav til atmosfæremodellernes nøjagtighed. Magnetosfæriske storme repræsenterer et usikkerhedsmoment for disse modeller, idet de ændrer den øvre ionosfæres tæthed og sammensætning på en ikke forudsigelig måde. I mange numeriske modeller har man indført fænomenologiske korrektionsfaktorer for disse ændringer, men i tilfælde, hvor disse ikke er tilstrækkelige, må den aktuelle, nye, satellitposition måles eller bestemmes på anden måde. Disse problemer er især af betydning for satellitter i polare baner, hvor forstyrrelser er hyppigst. Disse satellitbaner er netop nu blevet specielt vigtige, blandt andet i forbindelse med olieeftersøgningen i arktiske områder.

Positionsbestemmelse af objekter i kredsløb omkring Jorden er også vigtig i forbindelse med det katalog på over 20.000 satellitfragmenter og andre fremmedlegemer, som hidtil er registrerede i baner omkring Jorden. Alene deres store antal udgør en belastning på regnekapaciteten ved baneberegningerne. Positions og afstandsbedømmelse med den ønskede nøjagtighed ved laser- og μ -bølgemetoder er ikke i sig selv noget problem. Sådanne korrektioner er uundgåelige, og bliver først et problem, hvis de nødvendige målinger skal foretages ofte til løbende banekorrektioner. Jo bedre atmosfæremodeller man råder over des færre sådanne målinger er nødvendige.

Den øvre ionosfæres sammensætning og tæthed og den deraf følgende friktion, som satellitter udsættes for, er varierende på flere forskellige tidsskalaer. En vigtig variationsperiode er Solens 11 årige cyklus, som er tidsintervallet mellem to maxima af solmagnetfeltets intensitet (med ændret polaritet). En vigtig koblingsmekanisme fra Solen til atmosfærens sammensætning⁶ er forbindelse variationen i den ekstreme ultraviolette stråling (EUV), som giver variationer i energiafsættelsen i Jordens termosfære i højdeområdet omkring 150 km, se figur 5. Ændringer i termosfæren medfører så variationer i atmosfæreparametrene i andre højdeområder. Kendskabet til atmosfærens tæthed og sammensætning er yderst vigtig for baneberegninger, måske lige så vigtig som kendskabet til variationerne i det lokale tyngdefelt når satellitterne bevæger sig over varierende terræn, bjergkæder og havområder.

Den regelmæssige variation af atmosfæreparametrene er kendt og kan i princippet indbygges i modeller, i det mindste med en acceptabel nøjagtighed. Imidlertid giver magnetiske storme, som nævnt, anledning til pludselige, og kun vanskeligt forudsigelige ændringer i ionosfæretætheden. Dette forårsages antageligt af kraftig lokal opvarmning af polarområdernes ionosfære dels gennem precipitation af energirige partikler (overvejende elektroner) fra magnetosfæren, og dels gennem Joule'sk opvarmning ved dissipation af elektriske felter, der også har deres oprindelse i magnetosfæren⁶. Det kan være instruktivt at diskutere nogle af de detaljerede fysiske mekanismer bag nogle sådanne processer. Som illus-

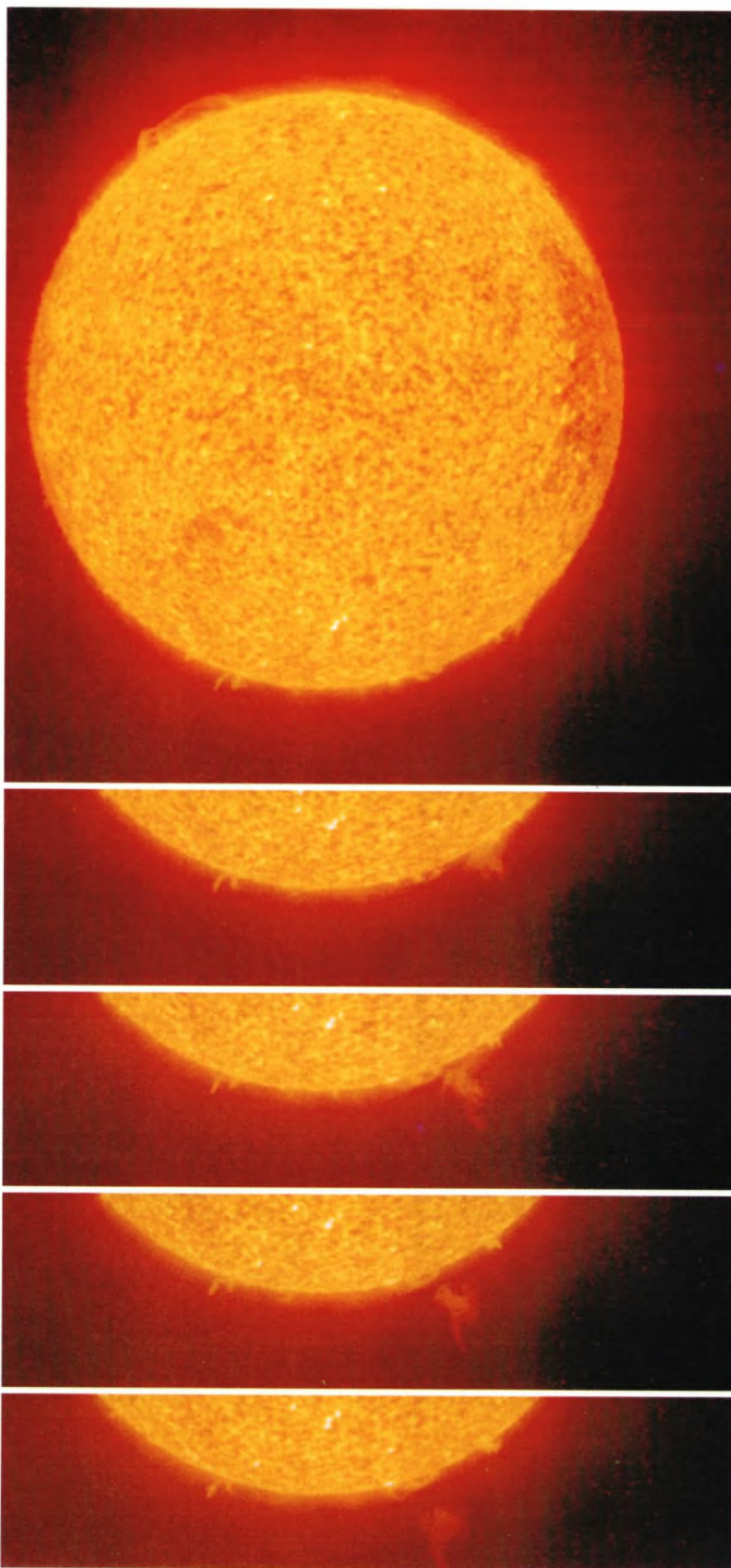


Figur 5. Højdevariation af neutraltætheden, n_n , vist fuldt optrukket, og plasmataetheden, n_p , vist med punkteret streg, begge i semilogaritmisk afbildning. Temperaturvariationen af den neutrale komponent, T_n , er vist stiplet på lineær skala. I alle tre tilfælde er variationsområdet af de pågældende parametre angivet ved to kurver. Endelig er visse standardbetegnelser for udvalgte højdeområder (troposfære etc.) også anført. Nordlys og sydllys observeres oftest i højdeområdet 100–200 km.

tration betragtes de såkaldte magnetiske substorme, som ofte optræder i forbindelse med de egentlige magnetiske storme, men har en noget kortere varighed, typisk ~ 1 time; flere substorme kan optræde inden for en magnetisk storm (selvom en substorm dog også kan optræde ved moderat geomagnetisk aktivitet). Disse substormes vekselvirkning med ionosfæren er lokaliseret primært til nordlyszonerne. Ved mekanismer, som endnu ikke er fuldt forståede, sker en pludselig ændring i den neutrale fladestrøm ("neutral sheet current"), se figur 2. Ofte kan strømbanen helt afbrydes. Det lokale magnetfelt nærmer sig da det simple Jordmagnetiske dipolfelt på Jordens natside. Som konsekvens ændres både magnetfeltets retning og intensitet. Det tidsvarierende magnetfelt inducerer et elektrisk felt som har en komponent langs det magnetiske felt. Derfor accelereres ladede partikler fra plasmaet i magnetosfærens natside i retning mod Jorden ionosfære. Da ledningsevnen i det tynde magnetosfæriske plasma er stor, ligesom i solvinden, er nedbremsningen af disse hurtige partikler

forsvindende, indtil de når områder med stigende neutraltæthed. Her giver de blandt andet anledning til nordlys ("sydllys" i Antarktis). De hurtige partikler afsætter deres energi i den øvre ionosfære, og den resulterende opvarmning giver anledning til en ekspansion af disse øvre lag af ionosfæren med en deraf følgende formindskning af partikkeltætheden. Lige så vigtigt for påvirkningen af satellitter er det antageligt, at tilstedeværelsen af et større antal frie ladningsbærere bidrager til en ændring af ionosfærens kemiske sammensætning med en deraf følgende ændring i viskositeten.

Korrekte forudsigelser af kraftige magnetosfæriske og atmosfæriske forstyrrelser er ikke i sig selv tilstrækkelige til, at uheldige følgevirkninger kan undgås. Forude ligger et stort udviklingsarbejde af blandt andet sikkerhedsudstyr for satellitter, som kan aktiveres fra Jorden for at begrænse eller helt undgå skader.



Figur 6. Observation af "coronal mass ejection" (CME) fra Solen observeret via satellit. CME observeres lettest når det sker på solranden, som her i nederste højre del. En karakteristisk længdeskala for den observerede CME er $30 \cdot 10^3 \text{ km} \approx 5 R_E$. Tidsintervallet mellem billederne er omtrent 20 minutter. Forekomsten af CME, og solaktiviteten generelt, har en 11 årig periode, den såkaldte solcyklus, som også observeres ved solpletaktiviteten. Ved maximum i Solens cyklus kan der opstå forstyrrelser af varierende intensitet næsten hver dag (men ikke nødvendigvis *alle* dage) i en måned, mens det ved solminimum stadig er usædvanligt, hvis en hel måned forløber uden forstyrrelser⁴.

Konklusion

Det er oplagt, at de store økonomiske udgifter og andre omkostninger der kan være konsekvensen af kraftige forstyrrelser af Jordens magnetsystem har medført en øget opmærksomhed omkring overvågning af solaktiviteten og forsøg på forudsigelser af magnetiske forstyrrelser. Erfaringsmæssigt viser det sig, at det ikke er tvungende nødvendigt at forstå et fænomen for at kunne forudsige det, og en vigtig aktivitet består i at opstille fænomenologiske modeller baseret på et omfattende observationsmateriale, hvorfra man kan forudsige magnetosfæriske forstyrrelser. Modellernes begyndelsesbetingelser tages fra observationer af solaktivitet, og modelligningerne løses numerisk, mens løsningerne opdateres og kalibreres løbende ved observationer. Selvom mange af disse modeller er helt eller delvis empiriske, har de vist sig effektive for forudsigelser om magnetisk aktivitet på Jorden på kort sigt. Modellerne indeholder ofte i tillæg en forudsigelse af schockfronters forløb, variationerne i solvindparametre m. v., for store områder i vort nære verdensrum. Det er imidlertid ikke altid umiddelbart indlysende, hvad man helt specifikt ønsker at forudsige. Et ideelt mål kunne være en forudsigelse af geomagnetiske index som A_p nævnt før, og der er gjort nogle fremskridt i så henseende⁴. Observationer i solvinden gør det i dag muligt at komme med nøjagtige varsler om forøget geomagnetisk aktivitet nogle timer, måske en dag, i forvejen. For flere dages forvarsler øges fejlraten.

Forsøget på at opnå en detaljeret forståelse af sammenhængen mellem solaktivitet og magnetiske forstyrrelser er af ældre dato og stammer tilbage til tiden, hvor solvinden blev opdaget. De første forestillinger om tilstedeværelsen af en solvind blev formulerede omkring århundredeskiftet, men blev først præciserede omkring

1950, blandt andet efter grundige studier af komethaler, hvis dannelse og acceleration netop skyldes solvinden. En lang række af instrumenterede satellitter har bidraget til den øgende forståelse af det komplicerede dynamiske system, som udgøres af Jordens ionosfære og magnetosfære. SOHO satellitten, opsendt sidst i 1995, har vist sig at være et særdeles værdifuldt værktøj ved indsamlingen af data for solaktiviteten, og det er for nylig (medio 1997) besluttet at forlænge projektet med yderligere 5 år. Det er imidlertid klart, at vejrforudsigelserne i Jordens nære verdensrum ikke på langt sigt kan baseres på forskningssatellitter som SOHO, som alle har en begrænset levetid, og desuden i sig selv repræsenterer en væsentlig investering. Målet med arbejdet er at opnå en så grundig forståelse af koblingen og vekselvirkningen mellem solvinden og jordmagnetosfæren, at forudsigelser og analyser kan baseres på observationer fra Jorden.

Ud over forvarsling af mulige forstyrrelser giver overvågningen af solvinden og Jordens magnetosfære også værdifulde oplysninger om ionosfæren og magnetosfæren ved magnetiserede planeter i en mere generel forstand. Solen og planeterne i vort solsystem udmærker sig ikke i nogen nævneværdig grad i astronomisk og astrofysisk sammenhæng, udover ved at være tilgængelige for målinger og i visse sammenhænge endog for aktive eksperimenter. Den opnåede information om vort eget solsystem kan anvendes også på magnetosfæreforhold i anden og mere generel sammenhæng, og kan bidrage til en dybere forståelse af andre sol- og planetsystemer, hvorfra detaljerede data ikke umiddelbart er tilgængelige.

Forfatteren takker Kåre Aksnes og Marit Øyeroset for værdifulde kommentarer. Liv Larssen ved Nordlysobservatoriet i Tromsø har ydet stor hjælp ved tegningen af de sort-hvide figurer. En tak også til V.O.Jensen for kommentarer til en tidligere version af manuskriptet.

Boks: Magnetohydrodynamik

Den simpleste beskrivelse af den dynamiske opførsel af et magnetiseret plasma er baseret på de magneto hydrodynamiske (MHD) ligninger. Den simpleste udledning er baseret på kontinuitetsligningen

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho + \nabla \cdot (V\rho) = 0, \quad (4)$$

og Navier-Stokes ligningen

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t}V + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla P + J \times B, \quad (5)$$

hvor det sædvanlige kraftled, gradienten af trykket, er kompletteret med $J \times B$ -kraften og eventuelt også tyngdekraften $\rho g(r)$ som i (2). Et viskositetsled kan have betydning i nogle tilfælde, men det er udeladt her. Da et plasma er en god leder, kan man gå ud fra at variationer i ladningstætheden, og de dermed forbundne elektriske kræfter, hurtigt jævnes ud af store strømme, således

at et elektrisk kraftbidrag i (5) kan udelades. De elektriske felter, som har betydning for MHD-beskrivelsen, skyldes således ikke ladningsophobninger men induceres af tidsvarierende magnetiske felter, i.e.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial}{\partial t}B. \quad (6)$$

Da MHD-beskrivelsen kun er gyldig for langsomme variationer kan Maxwell's forskydningstrøm udelades i $\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \partial E / \partial t$, da den er lille sammenlignet med strøm bidraget. Magnetfeltets intensitet bestemmes altså ud fra strømtætheden ved Ampères lov

$$\nabla \times B = \mu_0 J. \quad (7)$$

Ohm's lov optræder på formen

$$J = \sigma(E + V \times B), \quad (8)$$

hvor andet led i parantesen repræsenterer det elektriske felt, som induceres ved plasmaets bevægelse.

Kombineres (6), (7) og (8) fås en modificeret diffusionsligning af formen

$$\frac{\partial}{\partial t} B = \frac{1}{\mu_0 \sigma} \nabla^2 B + \nabla \times (V \times B). \quad (9)$$

Den relative betydning af de to led på venstre side måles ved det magnetiske Reynolds tal, R_m , introduceret i teksten. Ved små hastigheder, V , fås en ren diffusionsligning, og en diffusionshastighed kan defineres som $(1/\mu_0 \sigma) B'/B$, hvor B her kan fortolkes som den dominerende magnetfeltskomponent og $'$ antyder differentiation med hensyn til koordinaten i den retning i rummet, hvor dette felt varierer hurtigst.

Et vigtigt specialtilfælde er grænsetilfældet, hvor det magnetiske Reynold's tal, R_m , er meget stort. Her kan man antage, at $\sigma \approx \infty$. Ud fra simple fysiske krav forventes det, at strømstyrken er endelig for endelige elektriske felter, hvilket giver den simple relation

$$E + V \times B = 0. \quad (10)$$

Endelig kan ligningerne simplificeres ved, at antage at plasmabevægelsen er usammentrykkelig. Dette er forsvarligt for lave hastigheder V , dvs. små Mach tal.

Ligningssystemet sluttes med en tilstandsligning, det vil sige en relation mellem trykket P og tætheden ρ

$$P = f(\rho). \quad (11)$$

Den matematiske form for f afhænger af problemets art, fx er det rimeligt at antage isoterme forhold, $f = \text{const } \rho$,

når det er *statiske* løsninger, man ønsker at behandle. Alternativt, for *dynamiske* forhold antages som regel adiabatiske forløb, $f = \text{const } \rho^\gamma$, hvor $\gamma = c_p/c_v$ er forholdet mellem varmekapaciteterne for konstant tryk og konstant volumen. Det er vigtigt at fremhæve, at den før omtalte antagelse om usammentrykkelighed er ækvivalent med en tilstandsligning, idet den medfører en relation mellem ∇P og ρ , J og B gennem (5).

Selvom de bygger på en række simplificerende antagelser, har MHD-ligningerne været studeret grundigt i analysen af astrofysiske forhold. Her skal blot nævnes, at for forhold med konstant plasmataethed, $\rho = \rho_0 = \text{const}$, og homogent magnetfelt $B_0 = \text{const}$, fx i z -aksens retning, kan en simpel løsning findes som $B = B_0 + B_1$ med $B_1 = \tilde{B} \exp[i(\omega t - kz)] + \tilde{B}^* \exp[-i(\omega t - kz)]$, hvor $B_1 \perp B_0$ og $\tilde{V} = -\tilde{B}(k/\omega)B_0/(\mu_0 \rho_0)$, såfremt $(\omega/k)^2 = B_0^2/(\mu_0 \rho_0) \equiv V_A^2$. Her er V_A den såkaldte Alfvén hastighed. Disse specielle løsninger kaldes som regel cirkulært polariserede Alfvén bølger. Bemærk at det drejer sig om eksakte løsninger til ligningerne, idet de problematiske ikke-lineære led forsvinder for de antagede fysiske forhold.

De angivne løsninger gælder for specielle antagelser om magnetfelt og plasmataethed. De mere generelle forhold, som dem der er aktuelle for eksempel for Jordens magnetosfære, tillader ikke eksakte analytiske løsninger. Disse forhold kræver numeriske analyser af de magneto-hydrodynamiske ligninger, et studium der i praksis kan være overordentlig kompliceret og tidskrævende.

Referencer:

- 1) E. Ungstrup, *Jordens magnetosfære*, Naturens Verden, 121–136 (1983). Letlæselig oversigtsartikel.
- 2) A. J. Dessler, *Solar wind and interplanetary magnetic field*, Rev. of Geophys. **5**, 1–41 (1967). Klassisk oversigtsartikel, ikke så let læst.
- 3) G. K. Parks, *Physics of Space Plasmas* (Addison-Wesley, 1991). Ofte anvendt lærebog, der blandt andet indeholder diskussion af grundlæggende forhold omkring solvinden og dens vekselvirkning med Jordens magnetosfære.
- 4) J. A. Joselyn, *Geomagnetic activity forecasting; the state of the art*, Rev. of Geophys. **33**, 383–401 (1995). Oversigtsartikel rettet især mod forståelse af geomagnetiske indeks som A_p nævnt i teksten. Nogle forkundskaber om solfysik er en fordel, men ikke absolut nødvendige. Artiklen indeholder et stort reference materiale.
- 5) N. C. Maynard, *Space weather prediction*, Rev. of Geophys. Suppl. 547–557 (1995). En noget komprimeret oversigtsartikel.
- 6) R. L. Walterscheid, *Solar cycle effects on the upper atmosphere: implications for satellite drag*, J. Spacecraft **26**, 439–444 (1989). Teknisk præget oversigtsartikel rettet specielt mod satellitforhold.
- 7) V. O. Jensen, *Magnetfelter er spændingstilstande i rummet*, KVANT **6**, 1–10 (1995).



Hans Pécseli er professor ved Fysisk Institut, Universitetet i Oslo, samt adjungeret professor ved Universitetet i Tromsø. Se iøvrigt internetadressen: www.fys.uio.no/plasma/index.html