

Romvær – prosesser og effekter

Knut Svenes

Forsvarets forskningsinstitutt/Norwegian Defence Research Establishment (FFI)

5. juni 2009

FFI-rapport 2009/01071

1104

P: ISBN 978-82-464-1594-9

E: ISBN 978-82-464-1595-6

Emneord

Romvær

Rommet – Utnytting

Romfart – Økonomiske virkninger

Romfart – Navigasjon

Romforskning

Godkjent av

Richard Olsen

Prosjektleder

Johnny Bardal

Avdelingssjef

Sammendrag

Romvær er et begrep som dekker en rekke prosesser i jordens nære verdensrom. Felles for disse er at de alle er knyttet til vekselvirkningen mellom solen og jorden, og at de kan innvirke på en rekke teknologiske systemer som er av vital interesse i en moderne samfunnsstruktur. Denne rapporten gir en innføring i de fysiske prosessene, deres opphav i forskjellige solvariasjoner og deres rolle i avsetningen av energi gjennom sol-jord systemet. Deretter blir de mangeartete teknologiske konsekvensene av disse prosessene gjennomgått. Her blir det spesielt lagt vekt på de effekter som kan slå ut, helt eller delvis, samfunnskritiske systemer. I tillegg gis det en kort beskrivelse av varslingsystemer som allerede finnes på området, samt foreliggende planer for oppbygging av en egen uavhengig europeisk romværtjeneste.

English summary

Space weather is a concept which covers a series of processes in near Earth space. All of these processes have in common the fact that they are linked to the interaction between the sun and Earth, and that they can influence on several technological systems which are essential to a modern society. This report gives an introduction to these processes, their origin in various solar activities and their function in how energy is dissipated throughout the sun-Earth system. Furthermore, the extensive technological consequences of these processes are discussed. In particular, the effects which have the potential to knock out partly or completely critical systems will be emphasized. Finally, a short description of already available prediction capabilities and plans for the configuration of an independent European space weather service will be given.

Innhold

	Forord	6
1	Innledning	7
2	Bakgrunn	7
3	Fysiske prosesser	10
3.1	Solen	10
3.2	Solvinden	15
3.3	Magnetosfæren	15
3.4	Jonosfæren	17
3.5	Vekselvirkningen mellom solvinden, magnetosfæren og jonosfæren	19
4	Romværeffekter	21
4.1	Ressurser i rommet	22
4.2	Ressurser på bakken	23
4.3	Signalforstyrrelser	24
5	Prediksjoner	29
6	Situasjonsinformasjon i rommet	33
7	Konklusjon	36
	Referanser	38
	Noen sentrale webadresser	38
	Akronymliste	39

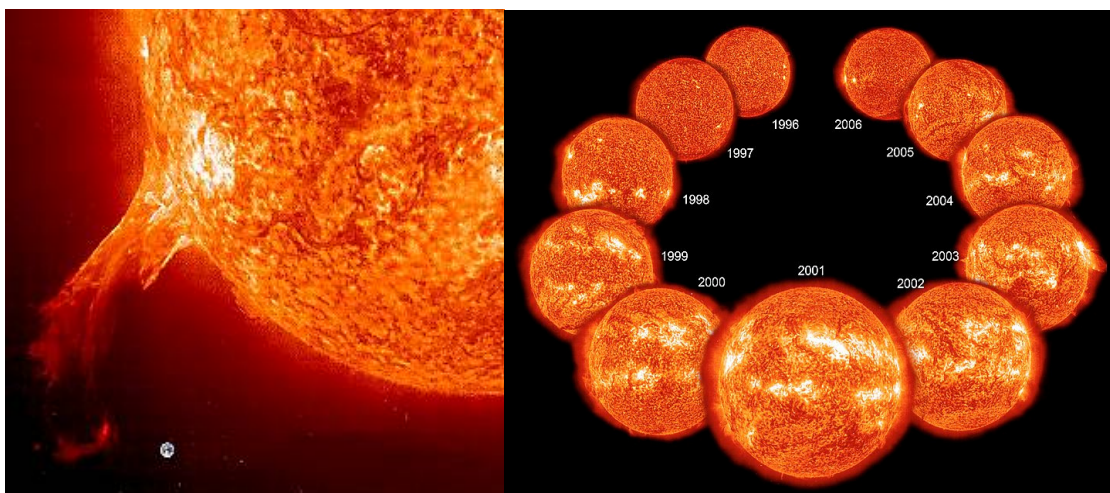
Forord

Denne rapporten gir en innføring i begrepet romvær, samt i en del praktiske konsekvenser av prosessene som dekkes av dette. Rapporten er en del av utredningsarbeidet under FFIs INNOSAT-prosjekt.

1 Innledning

Vår sol er i realiteten en meget stabil stjerne som i store trekk knapt har endret seg over den perioden menneskene har observert den. Imidlertid gir kjernereaksjonene som opprettholder solens energiproduksjon opphav til konveksjonsprosesser nær overflaten som i sin tur påvirker energioverføringen fra solen til jordens nære verdensrom (se Figur 1.1 til høyre). Disse variasjonene gir opphav til endringer i vekselvirkningen med jorden som vil kunne utgjøre signifikante trusler mot de av våre teknologier som baserer seg på et eller flere romsegment

Slike lokale prosesser på soloverflaten, som f. eks. såkalte "Coronal Mass Ejections" (CME) eller "Solar Proton Events" (SPE) samt variasjoner i kortbølget stråling som UV eller Røntgen-stråling påvirker fysiske forhold i vårt nære verdensrom på en måte som får direkte konsekvenser for oss fordi utviklingen av flere moderne teknologiske systemer nå fordrer virksomhet i rommet. Systematiske undersøkelser av disse effektene kalles derfor gjerne romværstudier. Dette er en analogi til atmosfæriske værstudier, og hensikten er også den samme, nemlig å kunne predikere framtidige tilstander som vil kunne influere på den menneskelige aktiviteten.



Figur 1.1 Til venstre illustreres størrelsesforholdet mellom jorden og solen (1:109 i diameter). Legg merke til hvor liten jorden blir i forhold til en typisk protuberans (eksplosjon på soloverflaten). Til høyre vises variasjoner i overflaten sett i euv (extreme ultra violet) over en solsyklus. Legg særlig merke til de aktive (hvite) regionene rundt solmaksimum.

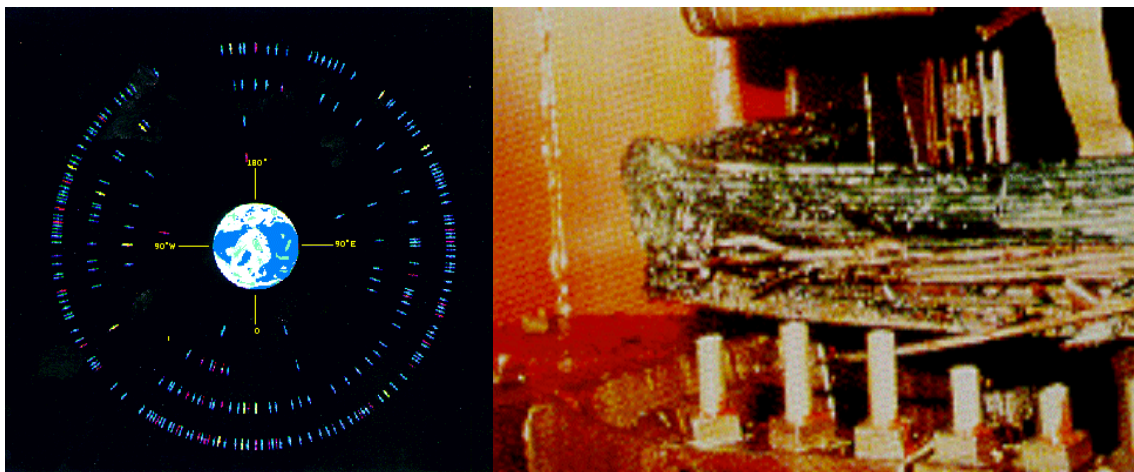
2 Bakgrunn

Det er nå over 50 år siden den første satellitt Sputnik-1 ble skutt opp fra Sovjetunionen. Dette var et teknologisk gjennombrudd som og ga startskuddet for en enorm satsing på romteknologi i vesten. I første omgang gjaldt dette særlig USA, men mot slutten av forrige århundre kom også

Europa sterkt med sitt autonome romfartsprogram organisert i ESA (European Space Agency). Senere fulgte store nasjoner som Japan, Kina, India og Canada opp med egne programmer.

I dag er satellitteknologien modnet, og også mindre nasjoner som Sverige og Danmark har nå betydelig egen ekspertise innen romfart. Norge er også på vei inn blant disse i og med at det planlegges både en egen skipsovervåkningssatellitt og en kommunikasjonssatellitt for forsvaret. Derfor oppstår det også et eget norsk behov for å beskytte disse verdiene, noe som i sin tur krever en egen trusselvurdering siden dette jo er et nytt område for oss.

I Figur 2.1 er det til venstre illustrert den sterke utnyttelsesgraden av plasser i geostasjonær bane, som er en viktig ressurs for kommunikasjonssatellitter. At disse satellittene kan påvirkes av romværprosesser er kanskje intuitivt, men at også bakkeutstyr som transformatorer er utsatt kan kanskje virke mer overraskende. Bildet til høyre i Figur 2.1 viser restene av en transformator i New Jersey som ble ødelagt under en ekstrem geomagnetisk storm 13. mars 1989. (Den samme stormen slo ut kraftdistribusjonssystemet i Québec-området i flere timer. [1])



Figur 2.1 Til venstre vises utnyttelsesgraden av geostasjonær bane, og til høyre sees restene av en transformator i New Jersey som ble ødelagt under en geomagnetisk storm 13. mars 1989.

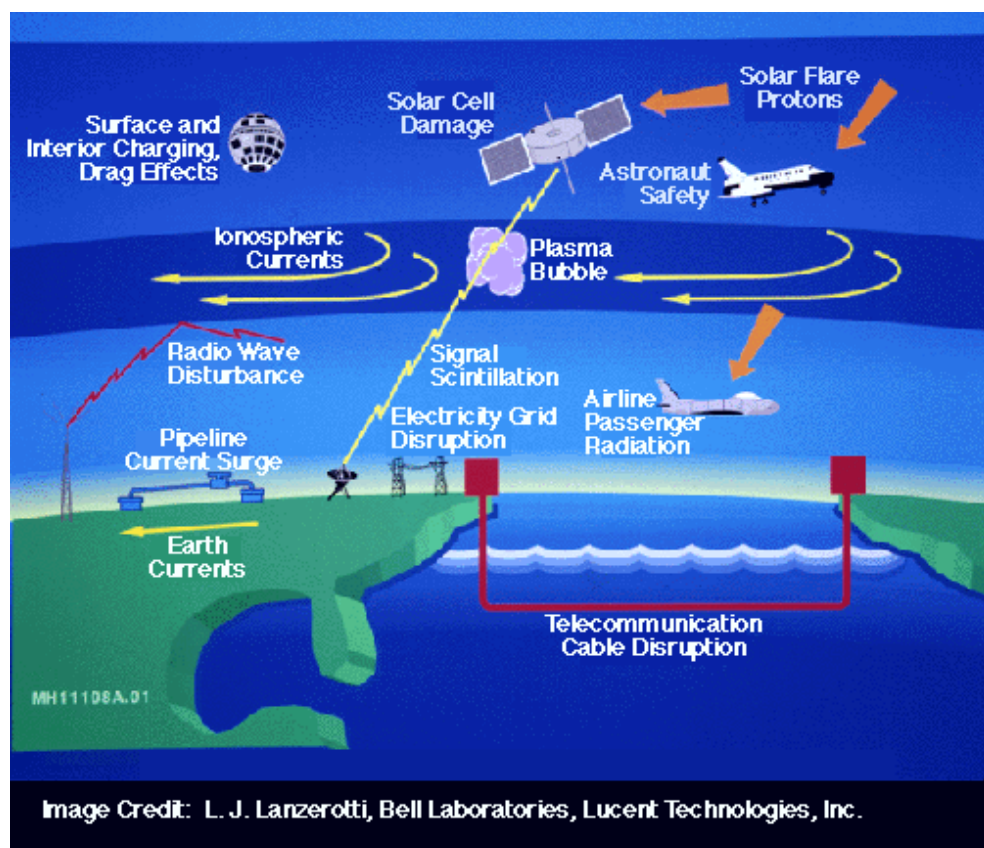
Energiooverføringen fra solen til jorden foregår i en kjede av koblede prosesser som hver for seg kan influere på høyst forskjellige teknologier. Dette gjelder ikke bare de systemer som er avhengige av et eller flere romsegment, men også systemer på bakken som er følsom for stråling eller såkalte geomagnetiske induerte strømmer. Derfor kan det her være på sin plass å påpeke kort hvilke typer infrastruktur av både sivil og militær karakter som faktisk kan påvirkes av forskjellige romværprosesser:

- **Satellittplattformer:** Høyenergi stråling kan ødelegge sensitiv elektronikk og degradere solcellepaneler eller sensorer, romskrot kan utgjøre en kollisjonsrisiko, variasjoner i UV-stråling kan degradere baner under omlag 500 km og solstormer kan øke kreftrisikoen for astronauter.

- **Signalforvrengning:** Jonosfæredynamikk kan degradere og forsinke signaler i kommunikasjonssystemer fra HF til L-bånd, GNSS-motagere (GPS, Glonass) kan bli utsatt for interferens av forsterket radioemisjon fra solen, noe som også gjelder for mobiltelefoner. Ikke minst kan radarer også forstyrres av variasjoner i jonosfærisk refleksivitet.
- **Luftfart:** Høyenergi stråling kan forstyrre sensitiv elektronikk og utgjøre en øket kreftrisiko for besetningen og til en viss grad passasjerer, og kommunikasjonssystemer og GPS-styring kan utsettes for signalforvrengning.
- **Energidistribusjon:** Geomagnetisk induerte strømmer kan overbelaste kraftlinjer og medføre øket korrosjon på olje- og gassrørledninger, og magnetisk styring av bor og seismisk kartleggingsutstyr kan også forstyrres av geomagnetiske strømmer.
- **Elektronisk bakkeutstyr:** Kosmisk stråling kan tenkes å påvirke andre systemer som signalanlegg og miniaturiserte computere i f. eks. biler og tog.

Som skematisk framstilt i Figur 2.2 står altså mye av den stadig voksende infrastruktur et moderne samfunn er avhengig av i fare for å kunne bli negativt påvirket av solaktivitet.

Det er et viktig bakteppe når vi nå nettopp er gått inn i den stigende delen av solsyklus 24.



Figur 2.2 Mosaikk av teknologiske effekter som alle kan tilbakeføres til solstormer.

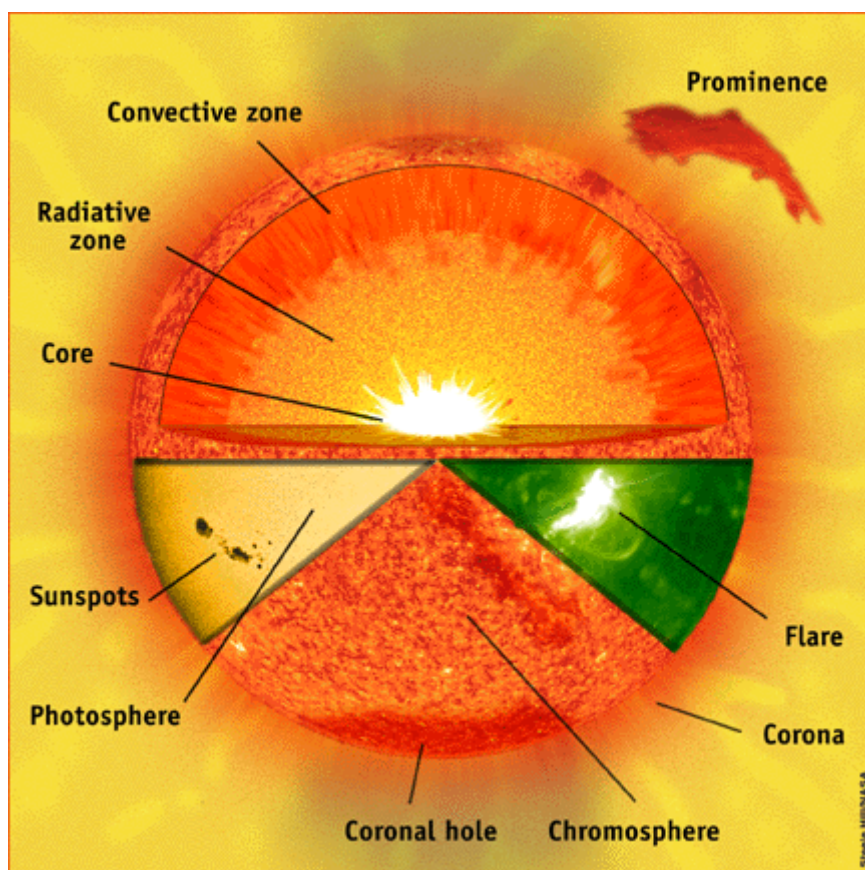
3 Fysiske prosesser

For å kunne diskutere romværeffekter på et tilstrekkelig grunnlag er det først nødvendig med en kort innføring i de relevant fysiske prosesser som er basis for all forståelse av disse fenomenene.

3.1 Solen

Solen er kilden til alt liv på kloden, og den tilfører vår planet energi på en gjennomsnittlig rate av 1.4 kW/m^2 i form av elektromagnetisk stråling for det meste i den synlige delen av spektrum. I tillegg kommer solvinden og i perioder en del høyenergi partikler, men den totale effekten av disse er mye mindre. Solen har også et sterkt magnetisk felt som varierer på flere tidsskalaer, men den mest dominerende er en 11-års syklus som også gjenspeiles i solflekkesyklusen.

Solens overflatetemperatur er omlag 5800 K, og bestanddelene (etter masse) er 74% hydrogen, 24%-25% helium og resten er sporstoffer. I Figur 3.1 vises den strukturelle oppbygningen av solen sammen med noen tilhørende overflatefenomen [2], [3], [4].



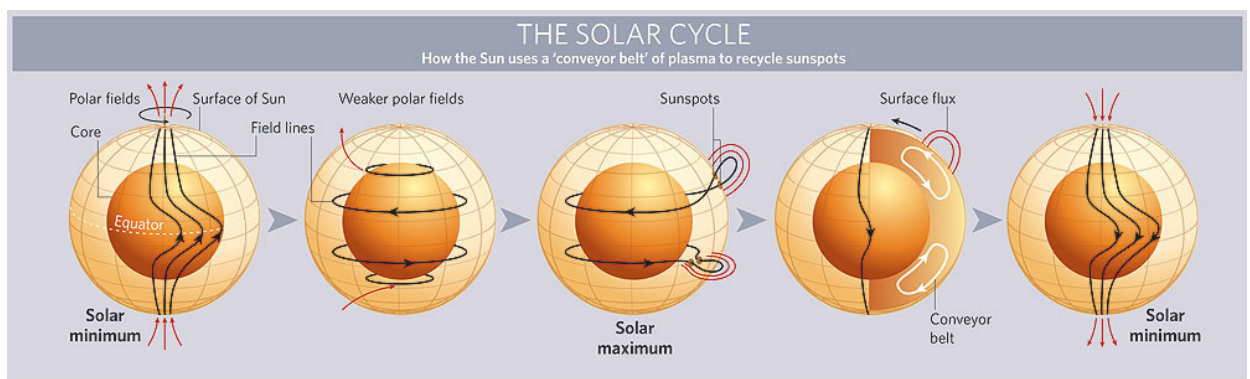
Figur 3.1 Solens struktur og de forskjellige hovedelementenes relasjon til hverandre.

Kort oppsummert kan man si følgende om den sentrale oppdelingen av solen:

- **Kjernen:** $<0.2 R_s$ hvor fusjonsprosesser omdanner hydrogen til helium samt frigjør energi. Mesteparten av denne energien transporteres bort av gammastråling.

- **Radiativ sone:** $<0.7 R_s$ hvor energi transporteres gjennom i form av absorpsjon og reemisjon av elektromagnetisk stråling.
- **Konveksjonssonen:** utenfor den radiative sonen er det kaldt nok til at energitransporten foregår ved konveksjon. Den turbulente ytre delen av denne konveksjonen genererer solens magnetfelt og deriblant de magnetiske strukturene som kan observeres i forbindelse med granuler (lyse varme områder) og solflekker (mørke kalde områder).
- **Fotosfæren:** utgjør solens synlige overflate. Overgangssone som bare er noen få hundrede kilometer tykk.
- **Kromosfæren:** omtrent 10.000 km tykt gjennomsiktig lag hvor temperaturen begynner å øke i forhold til fotosfæren.
- **Korona:** er den ytre delen av solens atmosfære som går direkte over i solvinden. Den er mye tynnere enn de underliggende lagene, men temperaturen kommer til gjengjeld opp i 3 MK (for protoner). Denne er bare synlig fra jorden under solformørkelser.

Mange av de energetiske overflatefenomenene, som flares (prominences), SPE, og CME, kan knyttes til rekonfigurasjoner av lokale magnetfeltstrukturer i kromosfæren eller fotosfæren. Derfor er solaktivitet nøye knyttet til 11-års variasjoner i den magnetiske aktiviteten. I Figur 3.2 er hovedelementene i denne aktiviteten skissert.

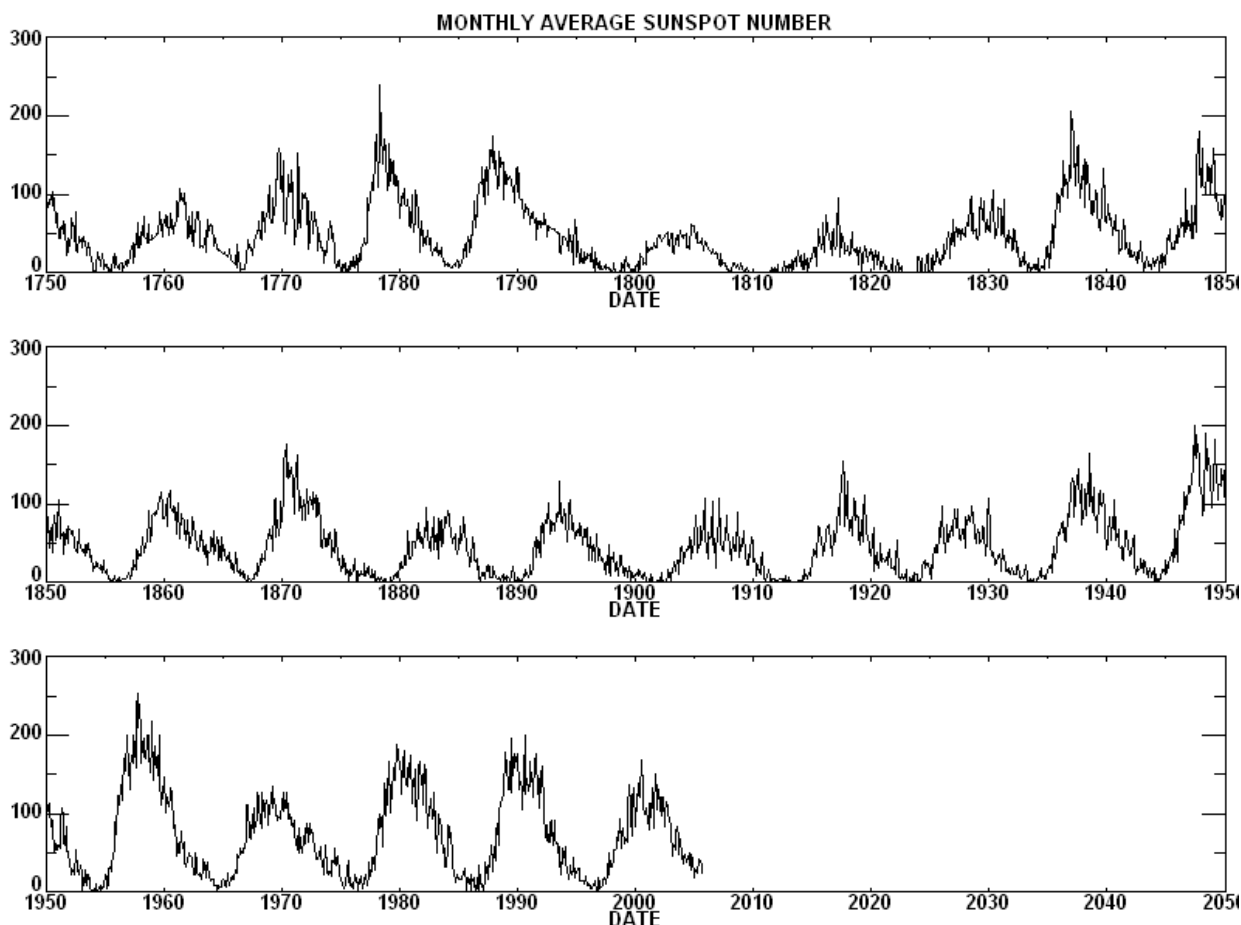


Figur 3.2 Skjematisk framstilling av endringene i solens magnetfelt (dipolen snur).

Ved solminimum er magnetfeltet orientert mest mulig i polar retning, men dette endrer seg utover i syklusen fordi man får en øket plasmtransport mot ekvator som også drar med seg magnetfluks. Dette, sammen med solens differensielle rotasjon, gir opphav til de kompliserte magnetfeltstrukturene som observeres i forbindelse med store solflekkonstellasjoner ved solmaksimum. Når denne transporten igjen avtar gjenvinnes den polare strukturen av magnetfeltet, men denne gangen har feltet motsatt polarisasjon.

Siden solflekker egentlig er kalde områder hvor plasma synker ned i konveksjonssonen (varmt plasma kommer opp i lyse områder som kalles granuler), vil solens aktivitetssyklus gjenspeiles i antall solflekker som til en hver tid kan observeres. Disse har vært systematisk observert siden syttenhundredetallet og har fått navn etter den britiske amatørastromen Carrington som oppdaget den differensielle solrotasjonen. Fram til i dag har vi vært gjennom 23 slike sykler som illustrert i Figur 3.3, hvor det månedlige gjennomsnittlige solflekketallet er plottet.

Som en ser, varierer solflekketallet ganske betydelig fra syklus til syklus, og dette betyr i sin tur at aktiviteten ved solmaksimum også kan variere en god del mellom syklene. Årsakene til dette må søkes i langtidsvariasjoner av dynamofunksjonen i konveksjonssonen, men fysikken her er ikke fullt ut forstått ennå. Siden det ennå bare foreligger korte observasjonsserier av solen fra

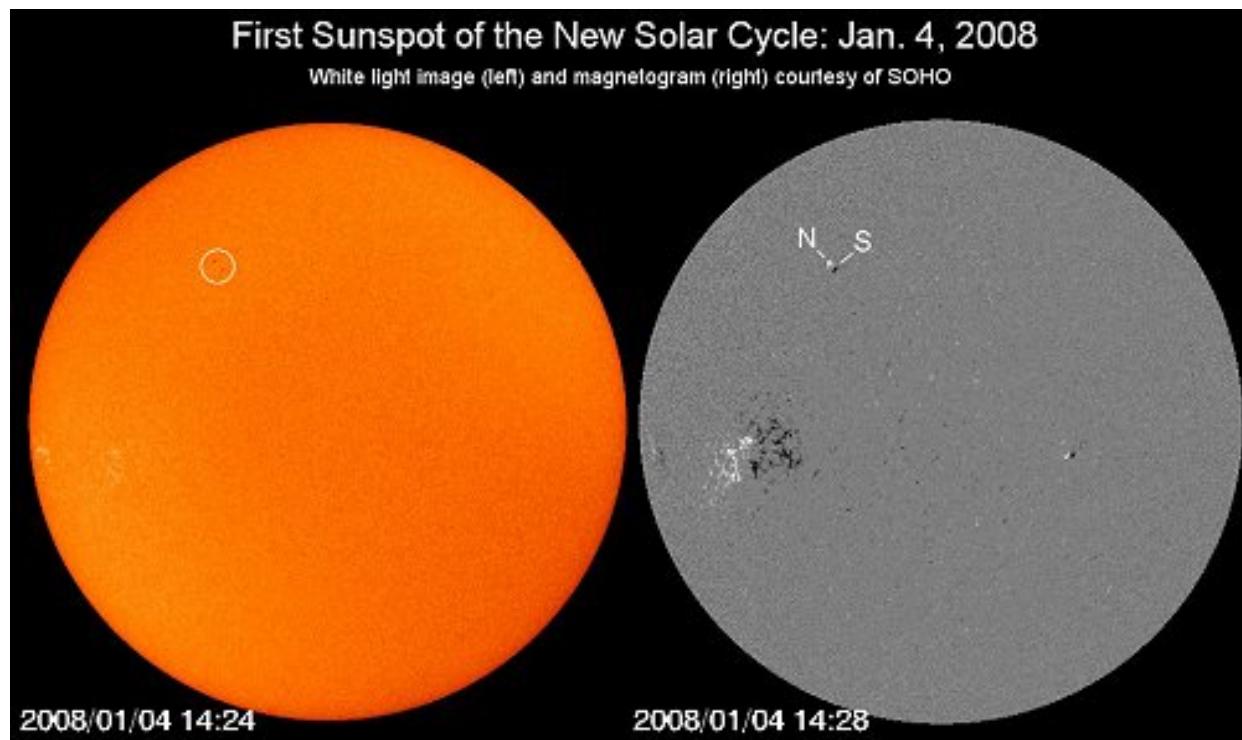


Figur 3.3 Månedlig gjennomsnittlig solflekketall siden starten av de systematiske observasjonene.

satellitter, kan solaktiviteten kanskje også endre seg på flere tidsskalaer som det ennå ikke er mulig å fastslå.

Vi har nettopp gått inn i Carrington-syklus nummer 24 (offisielt fra 4. januar 2008) som illustrert i Figur 3.4 hvor bilder fra SOHO-satellitten vises. Ved starten av en syklus observeres solflekkene alltid på høye bredder, og blir så observert stadig nærmere ekvator etter hvert som syklusen skrider fram. Basert på observasjoner fra SOHO-satellitten av det såkalte ”plasmtransportbeltet” i konveksjonssonen er det prediktert minst like sterk solaktivitet i syklus 24 som det ble observert i syklus 23 (flere veldig sterke solstormer forekom i denne perioden). Imidlertid må det påpekes at også prediksjoner som tyder på mindre aktivitet foreligger (basert på mer statistiske metoder). Denne situasjonen gjenspeiler bare at den fysiske forståelsen av solaktivitet ennå ikke har modnet tilstrekkelig.

I løpet av solsyklusen varierer den totale utsendte strålingsenergien med mindre en 1%, noe som gjør den synlige delen av spekteret meget stabilt. Den mer kortbølgete strålingen varierer atskillig mer, og f. eks. UV-stråling øker med en faktor 2 mot solmaksimum. I tillegg øker da også solens utsending av både CME og energetiske partikler dramatisk. Ofte er det disse elementene som gir



Figur 3.4 Den første solflekken observert på høye breddegrader innvarsler starten av Carrington-syklus 24 og starten på en ny periode med økende solaktivitet.

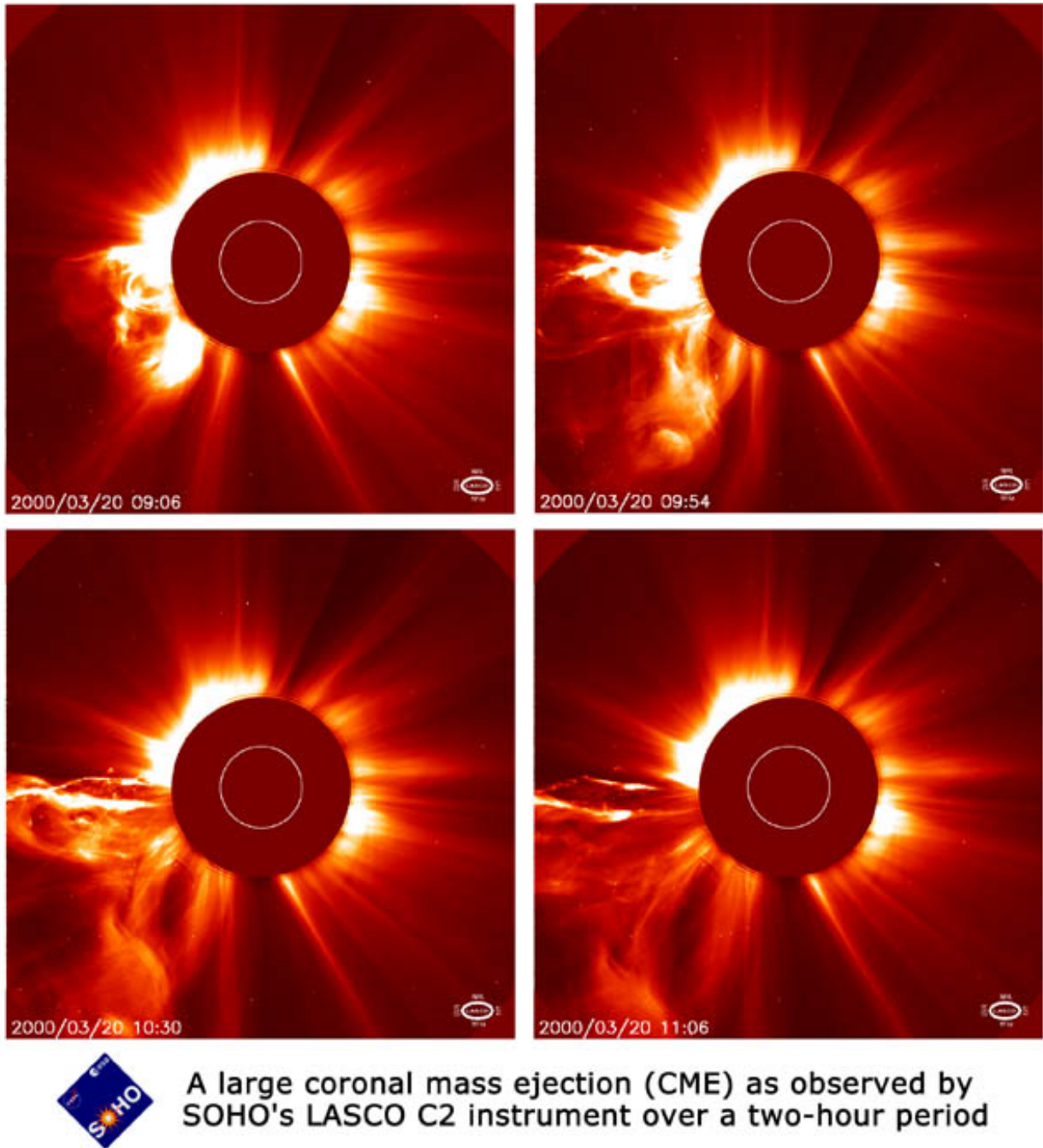
opphav til de mest betydelige romværeffektene. Hovedsakelig finnes det tre empiriske kategorier av slike fenomen.

Flare - Eksplosjon nær soloverflaten som gir opphav til stråling over hele spekteret samt akselererer ladete partikler til meget høye energier. Når slike eksplosjoner observeres mot solranden kalles det en protuberans. Effekt av UV- og Røntgen-strålingen fra disse utbruddene kan påvirke jonosfæren og dermed kommunikasjonssystemer i betydelig grad.

CME (Coronal Mass Ejection) - Plasmasky som frigjøres fra soloverflaten i forbindelse med rekonfigurering av magnetfeltet der. Utviklingen av dette fenomenet er illustrert i figur 3.5 som viser en totimers tidsserie fra SOHO-satellitten. Magnetfeltenergi konverteres her til kinetisk energi som transporterer bort både masse og magnetisk fluks i en identifiserbar struktur (til venstre på bildene). Når så denne plasmaskyen når jorden og vekselvirker med magnetosfæren utløses ofte sterke geomagnetiske stormer.

Koronahull - Områder med åpen magnetisk fluks som gir opphav til den hurtige solvinden (finnes bare i polområdene ved solar minimum, men også nærmere ekvator ved maksimum). Den hurtige solvinden presser magnetosfæren sammen og utløser dermed ofte geomagnetisk stormer.

Koronahullene opprettholder sin identitet over lang tid og gir derfor opphav til regulært forekommende geomagnetisk stormer. Perioden på disse blir da lik solens synodiske rotasjonsperiode på vel 27 dager.



Figur 3.5 Serie av UV-bilder, tatt fra SOHO-satellitten, som viser utvikling av en typisk CME.

Det er verd å merke seg at effekten av disse fenomenene når jorden på tre forskjellige tidsskalaer. Strålingen tar i underkant av ni minutter, og er den mest umiddelbare konsekvensen. Alle disse fenomenene kan imidlertid også generere sjokkfronter i koronaen eller solvinden og kan således assosieres med partikkel akselerasjonsprosesser. Dette gir igjen opphav til såkalte SPE hvor

protoner kan akselereres til meget høye energier (10-100 MeV). Disse partiklene kan trenge seg dypt ned i atmosfæren ved polområdene og gi opphav til Polar Cap Absorption (PCA) som gjerne medfører HF-utfall. I tillegg kan slik høyenergi partikkelstråling være en trussel mot satellittelektronikk og til og med astronauter. Dette skjer etter omlag en time. Til slutt når også selve sjokkfrontene fram etter et par dager, og gir ofte opphav til geomagnetiske stormer gjennom vekselvirkning med magnetosfæren.

3.2 Solvinden

Solens korona er som nevnt veldig varm og har derfor et ganske høyt trykk som egentlig bare har sitt mottrykk i det meget tynne interstellare medium. Disse to regionene knyttes derfor sammen av en kontinuerlig ekspansjon eller utstrømning fra koronaen. Denne utstrømningen vekk fra solen kalles solvinden, og den påvirker hele solsystemet til utenfor Plutos bane hvor det dannes et termineringsjokk mot den interstellare vinden.

Solvinden er supersonisk (det vil at strømningshastigheten er høyere enn joneses termiske hastighet), og siden den også har en meget høy ledningsevne, medfører dette at magnetisk fluks blir så tett knyttet til omgivende plasmapopulasjonen at den blir transportert med strømmingen. I realiteten betyr dette at solvinden også drar med seg solens magnetfeltlinjer gjennom hele solsystemet. På grunn av solens rotasjon vil vinkelen mellom retningen av magnetfeltet og synsretningen mot solen være omtrent 45° i gjennomsnitt ved jorden. Dette har som vi skal se en signifikant betydning for hvordan solvinden vekselvirker med jordens magnetosfære.

Normalt er solvindhastigheten i området 300-600 km/s, men solvindkomponenter som har sin opprinnelse i koronahull kan meget vel oppnå hastigheter i området 800-1000 km/s eller i enkelte tilfeller enda høyere. Tettheten ved jorden varierer i området $1-10 \text{ cm}^{-3}$, og den totale styrken av magnetfeltet er rundt 10 nT med komponenter som varierer en god del. Hovedsakelig består solvinden av protoner og elektroner, men en liten prosentdel helium kan også forekomme.

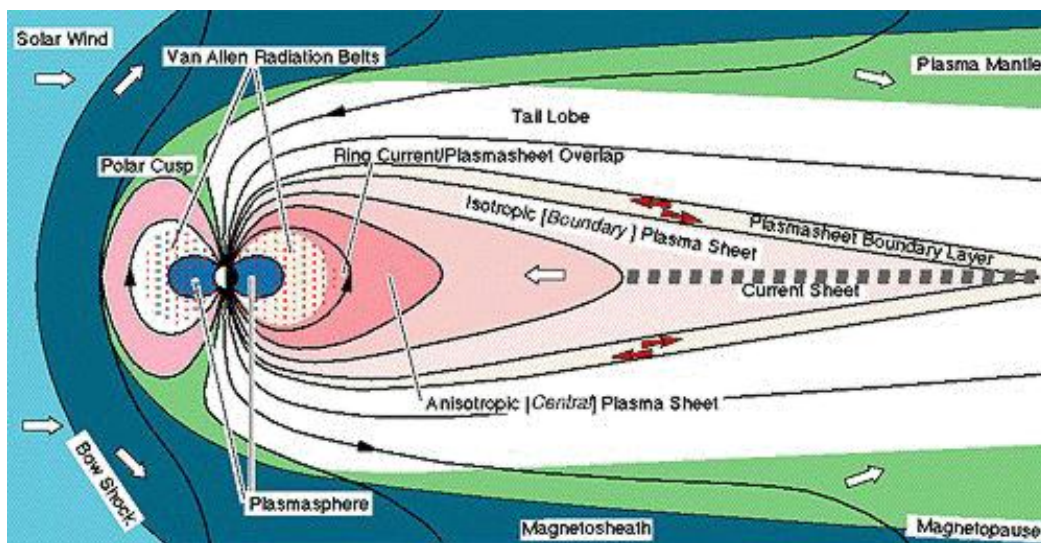
Alle disse verdiene er representative for solvinden ved 1 AU, dvs. ved jordens bane. Siden solvinden er supersonisk vil det oppstå en sjokkfront når denne møter jordens magnetfelt. Dette kalles "bowshock" og opptrer gjerne 5-10 jordradier fra magnetopausen som danner grensen mellom solvinden og jordens magnetosfære. Området mellom kalles "magnetosheath", og her omdannes noe av solvindens rettete energi til termisk energi. Dermed er plasmapopulasjonen her noe tettere og har høyere temperatur enn i den uforstyrrede solvinden.

3.3 Magnetosfæren

Den delen av jordens nære verdensrom som er dominert av planetens eget magnetfelt kalles magnetosfæren. Dette er en region som er involvert i overføring av både energi og masse fra solvinden til atmosfæren. Dette betyr at magnetosfæren er koblet både til solvinden og jonosfæren. Kilden til plasmaet er enten solvinden (generelt tynt og energetisk) eller atmosfæren (generelt tykt og kaldt). Variasjoner i begge disse kildene har i siste instans solen som sin energikilde. Den dynamiske reaksjonen på variasjoner i energigjennomstrømningen i systemet

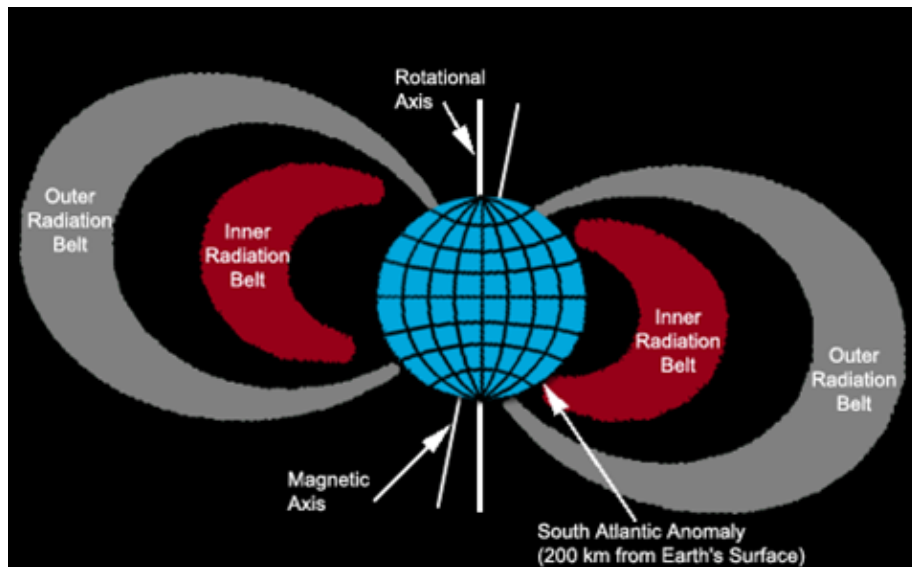
kalles geomagnetisk aktivitet, og denne styrer den lokale tilstanden i hele magnetosfæren. En skjematisk oversikt over magnetosfæren er gitt i Figur 3.6, som viser den gjennomsnittlige konfigurasjonen av de forskjellige definerbare strukturene der.

Typisk er avstanden mellom magnetopausen og jorden ca. 10 jordradier, men denne avstanden kan variere flere jordradier avhengig av solvindtrykket. Den store asymmetrien mellom dag og nattsiden kommer av vekselvirkningen mellom jordens eget magnetfeltet og magnetfeltet i den utstrømmende solvinden. Den magnetiske halestrukturen som blir resultatet av dette kan strekke seg over flere hundrede jordradier.



Figur 3.6 Skjematisk oversikt som viser de forskjellige strukturene i magnetosfæren.

Fra et romværperspektiv er også de prominente van Allens strålingsbelter viktige. Figur 3.7 viser en skisse av disse. Som en ser fins det to distinkte belter som består av energetisk ladete partikler i semistabile baner på lukkede magnetfeltlinjer. Beltene oppstår fordi dipolstrukturen i jordens magnetfelt fungerer som et speil som reflekterer partiklene fram og tilbake, og beltene intensitet er et resultat av balansen mellom partikkelkilder og tapsprosesser over tid.



Figur 3.7 Skjematisk framstilling av van Allens strålingsbelter.

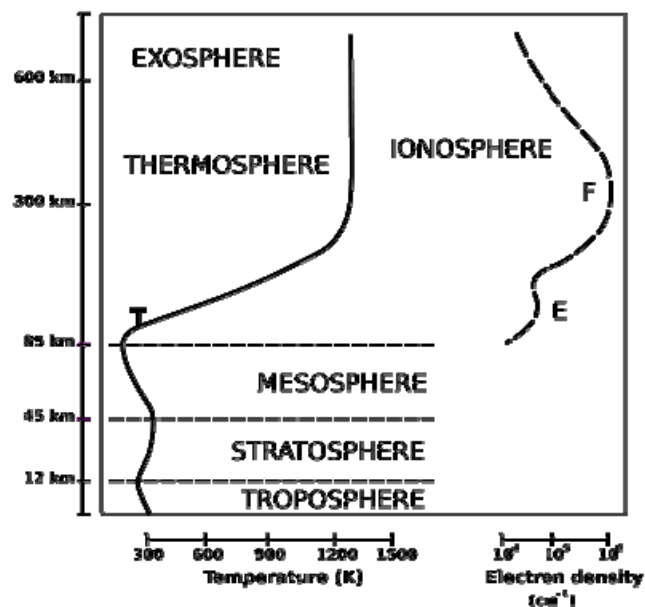
Det indre beltet består av protoner med energier på opptil over 100 MeV samt elektroner med energier på flere hundre keV i området 700-10000 km over jorden. De mest energetiske protonene stammer fra beta-decay av atmosfæriske atomer som blir truffet av kosmisk stråling. Resten er et resultat av radiell plasmadiffusjon i forbindelse med geomagnetisk aktivitet. På grunn av vinkelen mellom rotasjonsaksen og dipolaksen er beltene usymmetrisk om jordkloden, og det området hvor beltene kommer nærmest jordoverflaten kalles det søratlantiske anomali. Konsekvensen er at det vil være en strålingsrisiko i dette området også for lavbane satellitter.

Det ytre beltet strekker seg fra 3 til 7 jordradier (fra jordens sentrum) og er mest intens omkring 4 til 5 jordradier som er i det området hvor GPS- og Galileo-satellittene har sine baner. Også geostasjonær bane blir omsluttet av det ytre strålingsbeltet. Dette består av energetisk elektroner (0.1-10 MeV) som for det meste diffunderer radielt inn fra plasmasheet (se Figur 3.6) eller blir akselerert lokalt av elektromagnetiske bølger. (Joner blir tapt til atmosfæren umiddelbart pga. den store gyroradien.)

Vekselvirkninger mellom de fangete partiklene og elektromagnetiske bølger kan også føre til avtagning av intensitet i strålingsbeltene fordi partiklenes bevegelse kan bli mer feltlinjerettet og dermed lettere tapes ved kollisjoner med atmosfæren på lave høyder. På grunn av slike variable prosesser er det ytre strålingsbeltet mye mer dynamisk enn det indre.

3.4 Jonosfæren

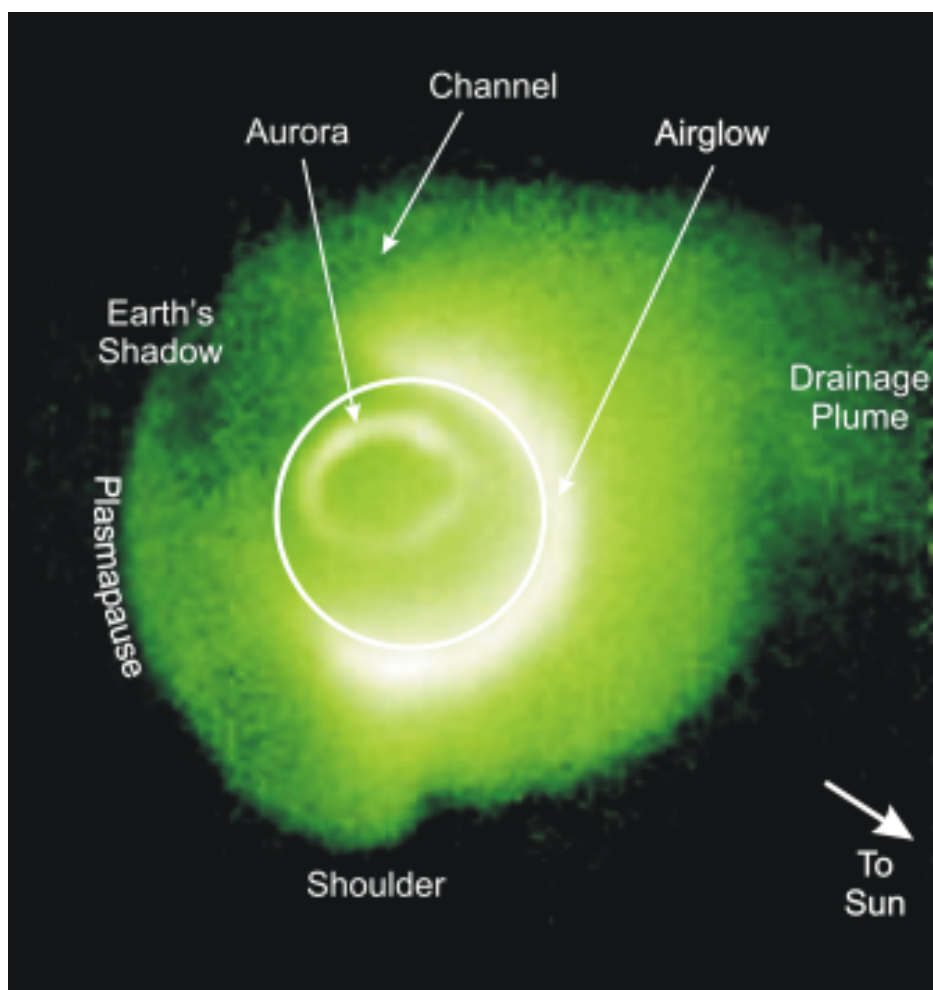
Jordens atmosfære blir kontinuerlig jonisert av solens UV-stråling, og i høyder hvor rekombinasjonsraten er for liten til å fjerne den ioniserte gassen vil det danne seg ioniserte lag som har fellesbetegnelsen jonosfæren. Dette er illustrert i Figur 3.8 som viser de historiske E- og F-lagene, som er viktig for HF radiokommunikasjon, sammen med lagdelingen av den nøytrale atmosfæren. Her bør det dog bemerkes at den nøytrale tettheten framdeles er mye større enn den joniserte i hele dette høydeområdet.



Figur 3.8 Skjematisk oversikt over den nøytrale og den ioniserte delen av atmosfæren.

Lokal plasmatetthet varierer som funksjon av tid på døgnet, årstid og solsyklus. Disse sammenhengene skyldes variasjoner i solens UV-stråling. Gradienter i plasmatetthet kan oppstå både som følge av partikkelnedbør og plasmadrift som er knyttet til geomagnetisk aktivitet. Dette kan ha effekt på signalgangen helt opp i L-båndet.

Utenfor den regulære jonosfæren finnes på lavere bredder et annet område, som består av relativt tett og kaldt plasma, som stammer fra jonosfærisk utstrømning på høye bredder (polvinden). Dette området kalles plasmasfæren og kan gjenfinnes i omtrent samme del av rommet som strålingsbeltene. Dette er illustrert i Figur 3.9 som også viser dynamikken i plasmasfæren under geomagnetiske forstyrrelser.



Figur 3.9 Plasmafæren avbildet fra IMAGE- satellitten ved hjelp av flere forskjellige teknikker.

Både jonosfæren og plasmafæren knyttes i perioder (under nordlysutbrudd) til magnetosfæren via strømmer langs de magnetiske feltlinjene ved høye bredder (kalt Birkelandstrømmer).

3.5 Vekselvirkningen mellom solvinden, magnetosfæren og jonosfæren

Som tidligere nevnt er det i realiteten tre klasser med dynamisk aktivitet på solen som kan påvirke jorden og dens nære verdensrom. Flares gir opphav til øket UV og Røntgen-stråling som først og fremst påvirker jonosfæren av den øvre atmosfæren. Noe av denne stråling kan imidlertid trenge helt ned til bakkenivå. Flares opptrer både uavhengig og samtidig med SPE, som kan medføre at store flukser av energetiske partikler trenger ned i den polare atmosfæren hvor jordens magnetfelt gir dårligere beskyttelse. Slike hendelser kan da gi opphav til alvorlige forstyrrelse av radiotrafikk i HF-området siden plasmalag genereres i lavere høyder enn vanlig.

Den hurtige solvinden med opphav i koronahull vil med jevne mellomrom (følger solrotasjonen) presse magnetosfæren sammen siden trykket i solvinden da blir høyere enn vanlig. Dette fører i sin tur ofte til såkalte geomagnetiske substormer. I virkeligheten utgjør dette en rekke sammenhengende prosesser som alle har sitt opphav i en rekonfigurasjon av strømsystemene i

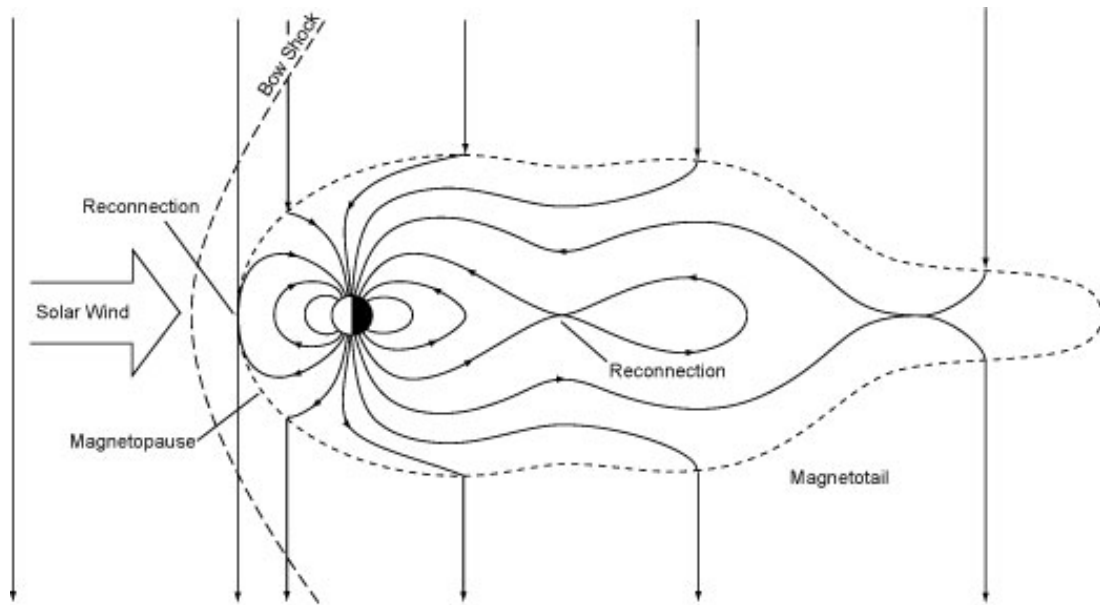
magnetosfæren grunnet variasjoner i balansen med solvinden. Inkludert i disse er partikkelnedbør i polområdene (nord- og sørls), endringer i strålingsbeltene og romlige variasjoner i magnetosfæreplasmaet.

Til slutt har vi ikke minst CME som gir opphove til såkalte interplanetære skyer, det vil si distinkte plasmaintegrasjoner i solvinden i form av endret plasmastrømning og magnetfelt, som ofte kan omslutte jorden og dens magnetosfære i dagevis. Dette er kanskje den mest intense form for vekselvirkning som i tillegg til substormer også gir opphove til kraftige geomagnetiske stormer.

En geomagnetisk storm skiller seg fra en substorm først og fremst ved at dette er et globalt fenomen, mens en substorm kan være veldig lokal og av kort varighet (størrelsesorden time). Stormer varer gjerne i flere dager og gir også opphav til mye mer omfattende effekter. (Dog bør det nevnes at slike storskalaeffekter i noen tilfeller kan knyttes til flares og koronahull hvis disse gir opphove til tilstrekkelig store sjokk.)

I denne sammenheng er det viktig å se på den temporære magnetiske sammenkoblingen mellom solvinden og magnetosfæren (reconnection, se Figur 3.10). Som tidligere nevnt dras solens magnetfelt med solvinden, og hvis dette er søroverrettet blir vekselvirkningen ekstra effektiv.

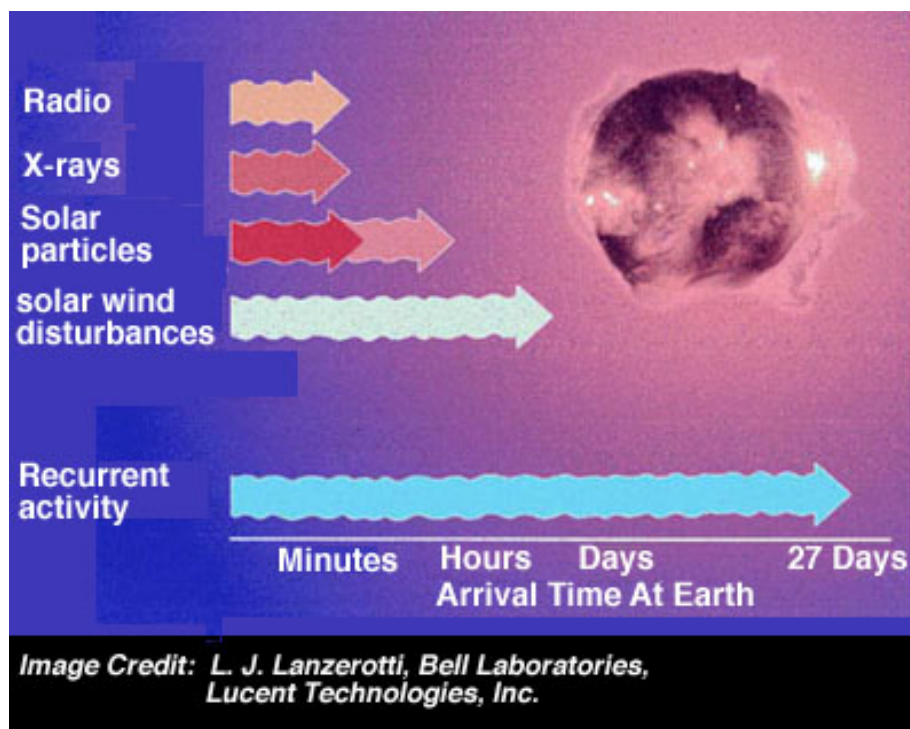
Dette fordi jordens magnetfelt på dagsiden da er motsatt rettet av solvindens og disse nesten kansellerer hverandre i et lite område. Under slike omstendigheter kan magnetfeltlinjer fra solen kobles sammen med magnetfeltlinjer fra jorden, og solvinden vil så dra disse nye feltlinjene over fra dagsiden til nattsiden. Her vil samme type situasjon oppstå hvor motsatt rettede feltlinjer i magnetosfæren medfører en frakobling slik at magnetfeltlinjer fra solen og jorden igjen blir atskilt. Her blir samtidig opplagret magnetisk energi konvertert til kinetisk og elektromagnetisk energi som siden dissiperes i jonosfæren og den indre magnetosfæren (blant annet via nordlys-nedbør og endringer av strålingsbeltene). Relaksjon av magnetfeltlinjene fører så fluks tilbake til dagsiden igjen og avslutter dermed denne meget effektive energioverføringszyklusen [3], [4].



Figur 3.10 Skjematisk framstilling av vekselvirkning mellom magnetosfæren og solvinden.

4 Romværeffekter

De fysiske prosessene beskrevet i forrige kapittel gir opphav til en rekke forskjellige effekter både i jordens atmosfære og nære verdensrom så vel som på teknologiske systemer. Med unntak av koronahull, som gir opphav til regulære forstyrrelser med solrotasjonen, er disse sol-utbruddene bare predikterbare i statistisk forstand. I tillegg blir energien overført via tre forskjellige bærere med sine egne tidskonstanter som illustrert i Figur 4.1 nedenfor.



Figur 4.1 De viktigste energibærere og tidskonstanter i sol-jord forstyrrelser.

Elektromagnetisk stråling vil nå jorden på i overkant av 8 minutter, og de største variasjonene vil opptre i UV- og Røntgen-området. Denne strålingen vil først og fremst påvirke den øvre atmosfæren og forandre dens kjemiske sammensetning og øke joniseringsgraden. Høyenergi partikler vil ta omtrent en time lenger, og ved polområdene trenger de dypt ned i atmosfæren. Her vil de gi opphav til såkalt PCA, dvs. HF-utfall som opptrer pga. sterkt øket jonisering. I tillegg vil dette utgjøre en strålingsrisiko mot polkryssende flyruter så vel som en direkte trussel mot romfartøy utenfor magnetosfæren. Plasmaforstyrrelser i solvinden vil ha to til tre dagers forsinkelse og overfører energi ved sammenkobling av magnetfeltlinjer som forklart i kapittel 3.5. Dette kan gi opphav til en rekke interne prosesser i magnetosfæren som nordlysnedbør, oppbygning av strålingsbelter, samt plasmadrifter i magnethalen, som etter hvert dissiperer den overførte energien helt ned i atmosfæren.

Som nevnt i kapittel 2 vil mange teknologiske systemer påvirkes av forskjellige aspekter av disse prosessene. Det kan derfor være nyttig å gi en samlet oversikt over de viktigste truslene som både sivile og militære systemer står ovenfor.

4.1 Ressurser i rommet

Satellitter utgjør i dag et sentralt element i mange viktige og omfattende teknologiske systemer. Disse kan i hovedsak igjen deles inn i tre typer ut fra deres banekaraktistikker.

Geostasjonære satellitter: Dette er stort sett kommunikasjonssatellitter. Som tidligere nevnt er denne banen i utkanten av det ytre strålingsbeltet, og satellitter her vil derfor bli utsatt for fluksøkninger av disse energirike partiklene i forbindelse med øket geomagnetisk aktivitet. Dessuten kan magnetopausen i ekstreme tilfeller skyves innenfor geostasjonær bane, og da vil satellittene være sårbar for høyenergi partikler direkte fra solen. Slike høyenergi partikler vil kunne sette satellitter ut av spill først og fremst ved å ødelegge kritisk elektronikk. I tillegg vil også disse satellittene bli utsatt for større flukser av lavenergi partikler fra plasmaskjiktet under geomagnetiske stormer, og dermed kunne bli differensielt oppladet. Dette kan være skadelig for instrumentering eller medføre ekstra degradering av solcellepaneler. Alle disse truslene kan i praksis forkorte satellittens levetid betydelig.

Globale navigasjonssatellitter: Disse systemene, som GPS, Galileo og Glonas, består alle av satellitter i baner som ligger nært område med maksimum fluks i det ytre strålingsbeltet. Dette er bestemt av ønsket om at flere satellitter må kunne sees samtidig fra så mange områder på jorden som mulig. Som tidligere nevnt er fluksene her ytterst variable, så beskyttelse av elektronikk reduseres egentlig til et statistisk spørsmål. Derfor trenger man alltid en ekstra satellitt i hvert banepan for å kunne oppfylle dekningskravene. Det bør også påpekes at under oppskytningsprosedyren vil romfartøy i såkalt Geostationary Transfer Orbit (GTO), som har perige på 500 km og apoge i geostasjonær bane, bli utsatt for denne samme strålingsrisikoen.

Lav jordbane (polare) satellitter: Dette er mange typer jordobservasjonssatellitter og meteorologiske satellitter, samt andre former for overvåkningsatellitter, forskningssatellitter,

romstasjonen og romfergen. Den største strålingstrusselen for disse er det søratlantiske anomali samt noe ved passering av nordlysovalen og under SPE over polkalotten. Den viktigste utfordringen for disse satellittene er snarere bandedegradering (for baner under 500 km) i forbindelse med solsyklusvariasjoner av bakgrunnstettheten.

Det er verdt å legge merke til at i denne sammenheng regnes høyenergi partikler som elektroner og joner med energi over omtrent 1 MeV, og disse finnes først og fremst på lukkede feltlinjer i strålingsbeltene eller under SPE i polområdene. Skadene herfra skyldes energiavsetning inne i materialet enten i form av akkumulerte doser eller direkte treff i kretser fra enkelt partikler. Man kan beskytte sensitive områder med ekstra metall, men siden partiklene som regel har et bredt energispektrum er det alltid en viss mulighet for gjennomtrengning.

Partikler med energi i keV-området samles normalt opp på forskjellige overflater, og hvis disse ikke utgjør et hele i form av en ekvipotensialflate, vil differensiell oppladning oppstå. Dette kan kortslutte instrumentering eller erodere elementer som solcellepaneler. Derfor er det viktig at romfartøy har så ledende overflate som mulig eller, hvor eksterne spenninger er uunngåelig, minimalisere strømmer fra omliggende plasma så langt råd er. Denne klassen av partikler finnes først og fremst i plasmasykket eller i nordlyssonen.

Til slutt kan det bemerkes at degradering av lav jordbane skyldes energitap fra friksjon mot eventuell restatmosfære. Tettheten av denne i en gitt høyde vil variere med solsyklusen og være noe større (faktor 2-3) ved solmaksimum enn minimum. For banehøyder under 500 km er dette et forhold som må vektlegges.

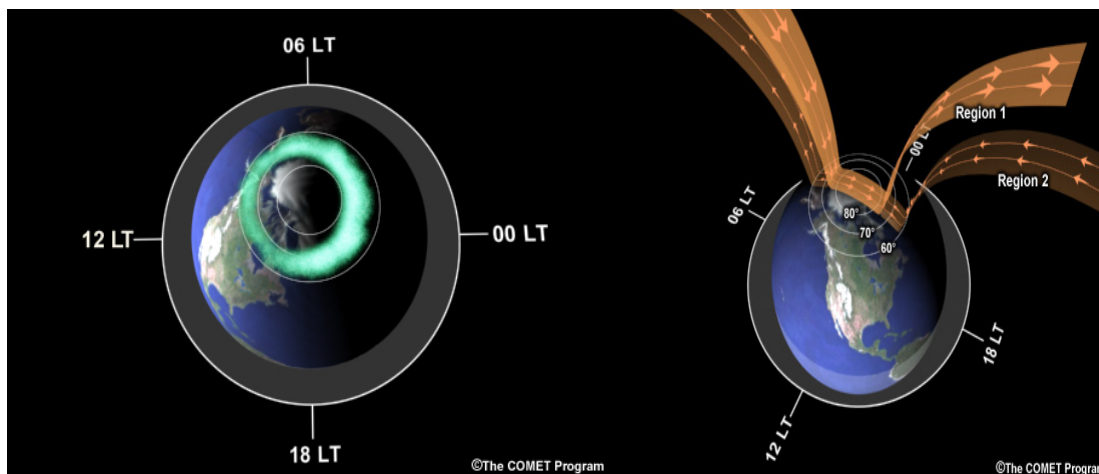
4.2 Ressurser på bakken

Romværeffekter kan til og med gjøre seg gjeldende i troposfæren og på bakkenivå via energetiske partikler og induserte felter. Dermed kan, kanskje noe overraskende, også teknologiske systemer som ikke inneholder romplattformer rammes.

Flytrafikk: Høyenergi partikler som trenger langt nok ned i atmosfæren vil utgjøre en liten men signifikant kreftrisiko for flymannskap. Som tidligere nevnt skjer dette først og fremst i polare områder siden de åpne magnetfeltlinjene her gir dårligere beskyttelse mot SPE. Dermed kan denne strålingsfluksen gi opphav til årlige akkumulerte doser, som kommer i konflikt med EU's regelverk, for mannskap som ferdes regulert på polare flyruter.

Magnetisk styring: Både under oljeleting og selve boringen benyttes magnetometere i styringssystemene. Dette krever selvsagt et stabilt magnetfelt, men her vil en kunne oppleve signifikante avvik under perioder med høy geomagnetisk aktivitet. Under nordlysutbrudd dannes det nemlig omfattende strømsystemer i jonosfæren som i sin tur generer variasjoner i det geomagnetiske feltet. Dette er følgelig også et fenomen som først og fremst forekommer på høye breddegrader.

Energidistribusjon: De samme jonsfæriske strømmer inducerer også elektriske felt på bakkenivå. Disse kan i sin tur influere på forskjellige former for energidistribusjon. Olje- og gassrørledninger forspennes vanligvis negativt i forhold til jord slik at krepstrømmer ikke skal medføre øket korrosjon av ledningene, men det induerte elektriske feltet kan bli stort nok til å overstyre dette og dermed korte ned rørenes levetid. Slike induerte felt kan også innvirke på strømmettet ved å induere spenninger som kan overbelaste lokale segment ofte i form av å overbelaste transformatorer. Slike fenomener opptrer gjerne i nordlyssonen (se Figur 4.2), og de har til og med fått sitt eget engelske akronym GIC (Geomagnetically Induced Currents).



Figur 4.2 Nordlysovalen (venstre) og tilhørende strømsystem (høyre) overlatt Nord-Amerika.

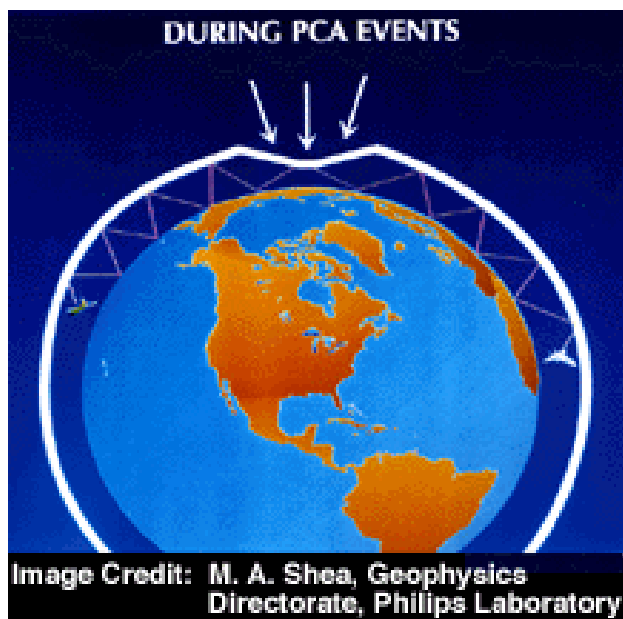
Som en ser fra figur 16 er nordlysovalen sentret om den geomagnetiske pol og strekker seg omlag 2500 km i alle retninger fra denne under normale forhold. For tiden befinner den nordlige geomagnetiske polen seg vest av Grønland og beveger seg i retning Sibir. Under sterkt forstyrrede forhold kan ovalen utvide seg betydelig. Nordlys kan følgelig opptre over hele området mellom 50° og 80°, med større sannsynlighet lengre nord. Dette betyr at hele Scandinavia ofte befinner seg under nordlysovalen.

4.3 Signalforstyrrelser

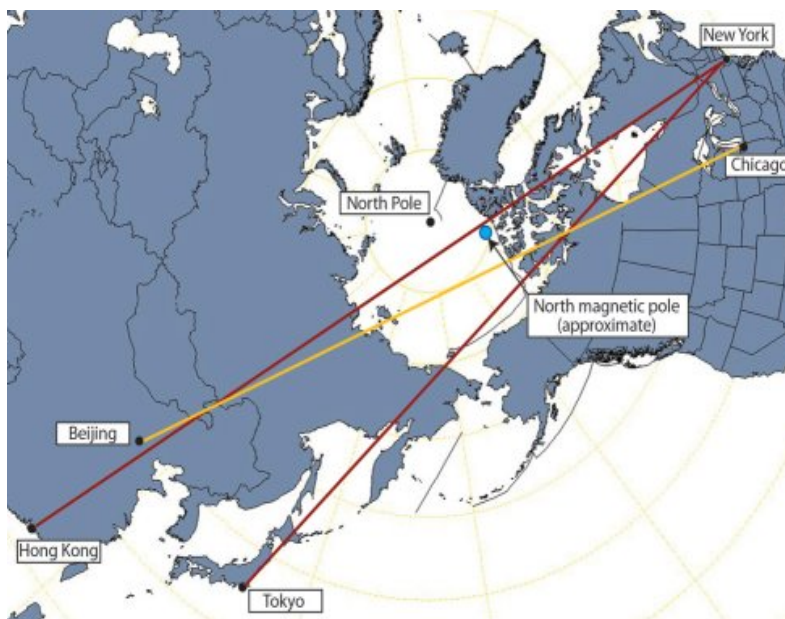
De fleste av dagens teknologiske systemer er knyttet sammen i nettverk, og alle som inneholder minst en romkomponent er avhengig av elektromagnetisk signalgang gjennom jonsfæren. Derfor vil jonsfæreforstyrrelser utgjøre en egen romværtrussel ved sin påvirkning på disse signalene. Dette vil være tilfelle for både HF, VHF og L-bånd på forskjellige måter.

Kommunikasjon i HF-båndet (3-30 MHz) baserer seg på refleksjon via jonsfæren, som illustrert i Figur 4.3, for å oppnå langdistanse linker. Hvis så plasmattettheten i en gitt høyde endrer seg vil dette forstyrre, eller i verste tilfelle umuliggjøre, kommunikasjon på mange frekvenser. Den mest ekstreme formen av dette er de såkalte PCA som skyldes at høyenergi partikler fra solutbrudd trenger dypt ned i atmosfæren og joniserer denne. Transpolar HF-kommunikasjon kan under slike forhold settes ut av spill i flere dager. Som illustrert i Figur 4.4 kan dette også virke inn på

kommersiell flytrafikk i polområdene siden all nødvendig bakke-kommunikasjon som regel skjer i HF-båndet.



Figur 4.3 Illustrasjon av hvordan jonsfære-dynamikk påvirker HF-kommunikasjon.



Figur 4.4 Noen viktige kommersielle flyruter over polkalotten relatert til geomagnetisk pol.

I en del sammenhenger brukes fortsatt HF-kommunikasjon i forsvaret, og selv om nye automatiske modem har gjort det lettere å håndtere en del av disse problemene, er dette forhold som framdeles kan være relevante.

Elektromagnetiske bølger reflekteres fra jonsfæren fordi deres frekvenser er lavere enn egensvinger i jonsfæreplasmaet. Disse egenfrekvensene er proporsjonal med elektrontettheten,

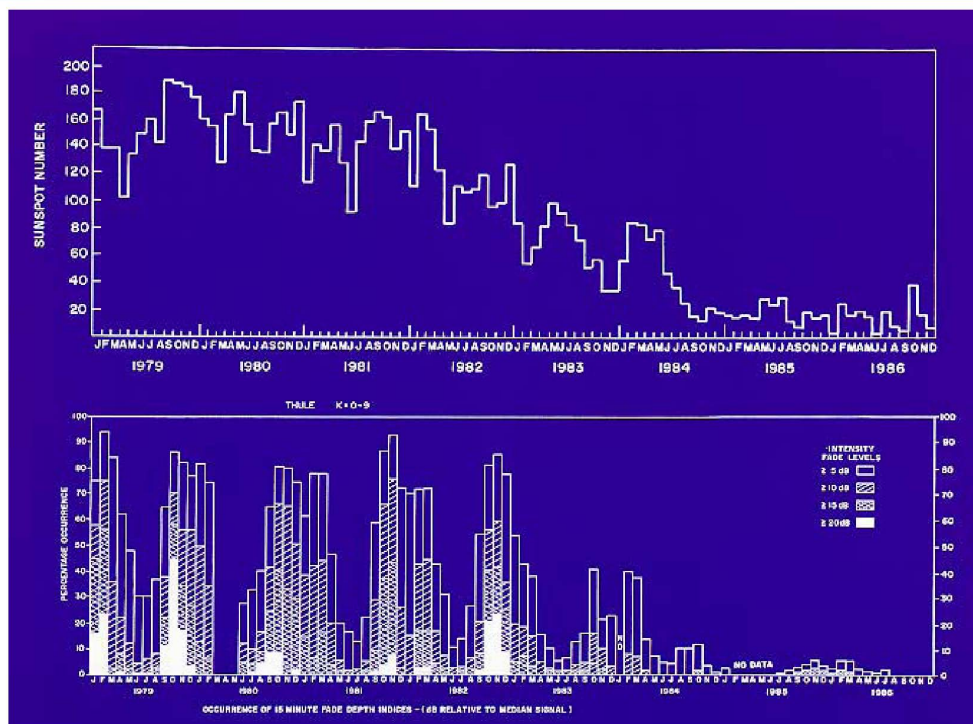
og når derfor sitt maksimum nettopp i HF-båndet. For kommunikasjonsbånd på høyere frekvenser er ikke refleksjon et problem, men andre former for vekselvirkninger med bakgrunnsplasmaet er framdeles en aktuell problemstilling.

Kommunikasjon i VHF-båndet (30-300 MHz) har høy nok frekvens til å gå gjennom jonosfæren, men blir påvirket av Faraday rotasjon (polariseringstap) og irregulariteter som gir opphav til scintillasjon (signalforvrengning). Dette er viktige aspekt f. eks. for satellittmottak av AIS-signaler på 160 MHz, men kan også brukes til en form for retningsdiskriminering i forhold til det geomagnetiske feltet. Det er også verdt å merke seg at den nye Multi-Rolle Radioen (MRR) vil operere i den nederste delen av dette båndet.

Scintillasjon er hurtige variasjoner i amplitude og fase som kan medføre tap av transmittert informasjon. Dette fenomenet har sitt opphav i tetthetsvariasjoner av mediet signalet går gjennom. Det oppstår derfor i forstyrrede områder av jonosfæren. Siden jonosfæreforstyrrelser varierer med solsyklusen vil scintillasjon også gjøre det, som vist i eksempelet i Figur 4.5 under.



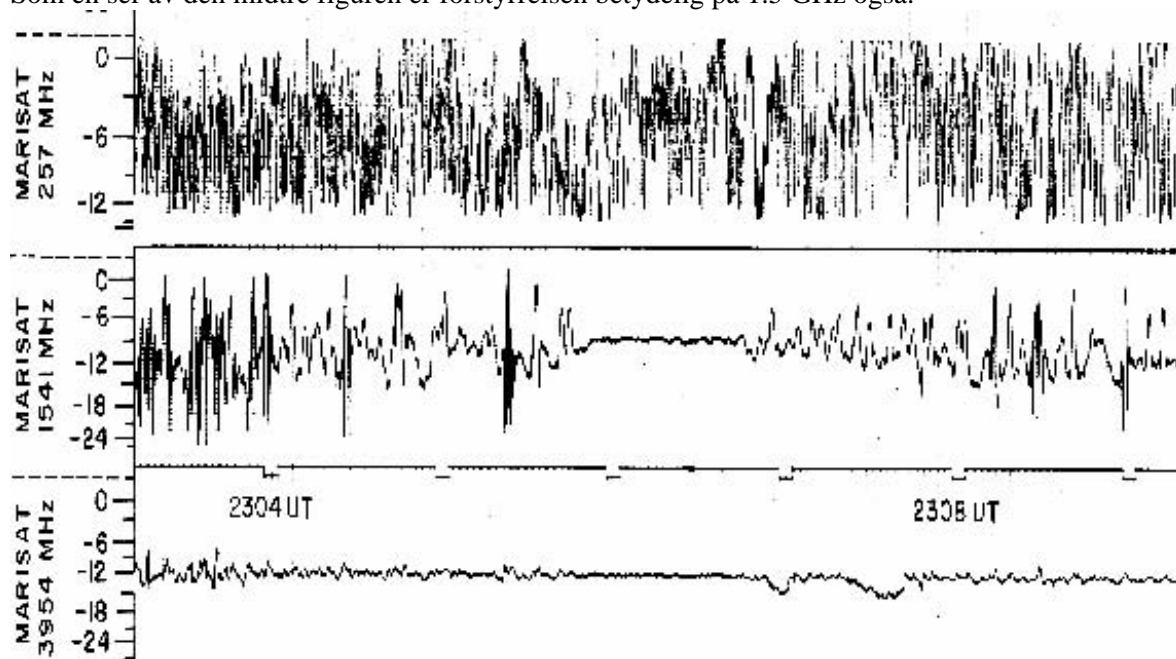
Polar Cap Scintillation Variation with Solar Cycle (250 MHz)



Figur 4.5 Solsyklusvariasjon av scintillasjonsperioder i X-bånd på høye breddegrader [5].

Her sees det at hyppigheten av forskjellige perioder med signalfading opptrer veldig godt korrelert med solflekketallet. Disse data er tatt i løpet av den nedadgående fasen av solsyklus 21 på høye bredder (Thule, Grønland). Den anvendte frekvensen er 250 MHz i dette tilfellet.

Ved bruk av enda høyere frekvenser vil disse effektene bli mindre, men i et viktig spektralområde som L-båndet er scintillasjon framdeles et signifikant problem. Dette er illustrert i Figur 4.6 som viser forstyrrelser samtidig på tre forskjellige frekvenser (nemlig X-bånd, L-bånd og S-bånd). Som en ser av den midtre figuren er forstyrrelsen betydelig på 1.5 GHz også.



Figur 4.6 Jonosfærisk scintillasjon på forskjellige frekvenser, nemlig 257 MHz, 1541 MHz og 3954 MHz. Disse data er fra Ascension Island og er tatt opp under solflekk maksimum [6].

Som kjent er L-bånd (området 1-2 GHz) et viktig kommunikasjonsbånd som inneholder frekvenser avsatt til både GPS og Galileo, så vel som til NATO link-16, samt for telefoni (Iridium og GSM). Geostasjonære satellitter har også gjerne downlink i dette båndet.

Jonosfæreforstyrrelser som gir opphav til slik scintillasjon i L-båndet må forårsake variasjoner i plasmattetthet på størrelsesorden noen få hundre meter. Slike småskala variasjoner kan bare oppstå i forbindelse med partikkelnedbør eller kollaps (tidsutvikling) av større plasmastrukturer. Derfor opptrer også scintillasjon først og fremst over polkalotten og nordlyssonen, samt nær magnetisk ekvator hvor regulære fysiske prosesser nettopp skaper slike plasmairregulariteter.

I begge disse tilfellene blir storskala plasmastrukturer først dannet gjennom lokale fysiske prosesser. Ved høye bredder skjer dette hovedsakelig ved at plasma fra solvinden blir ledet ned i jonosfæren på dagsiden under temporær sammenkobling av magnetfelt linjer (såkalt magnetisk reconnection, se pkt. 3.5). Under videre påvirkning av disse feltlinjenes bevegelser vil så plasmastrukturene bevege seg mot nattsiden gjennom det lokale jonosfæreplasmaet og vekselvirke med dette. Dermed oppstår instabiliteter som i sin tur genererer småskala plasmairregulariteter. På lave bredder vil geometrien påvirke plasmabevegelsen ved at elektriske felt på tvers av terminatoren (forskjellig konduktivitet på hver side), og dermed også normalt på de

lokale geomagnetiske feltlinjene, fører til at tett kaldt plasma beveges oppover inn i et tynnere plasma. Dermed oppstår igjen instabiliteter som fører til dannelsen av plasmairregulariteter.

Selv om de detaljerte fysiske prosessene er forskjellige i de to tilfellene, er sluttresultatet likevel det samme. Plasmaet i jonsfæren vil uansett kunne få store tetthetsvariasjoner over så små skalaer at selv signaler i L-båndet vil bli sterkt påvirket. Dette vil i sin tur føre til korte perioder med forstyrrelser. Selvsagt er dette problematisk for all kommunikasjon, men det er verd å merke seg at dette vil kunne få en spesiell effekt for satellittbaserte posisjoneringssystemer i form av mindre nøyaktighet.

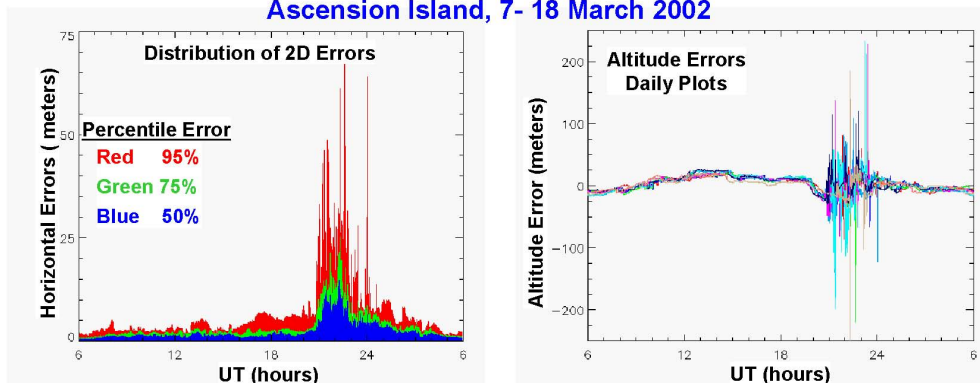
Dette er illustrert i Figur 4.7, hvor unøyaktigheter i posisjonering basert på GPS-signaler er plottet under en periode med sterk scintillasjon i L-båndet. Disse testresultatene er hentet fra Ascension Island (i Sør-Atlanteren), og de er tatt opp like etter toppen av forrige solflekksyklus.



Characteristic Errors and Nightly Occurrence Patterns



Ashtech Z-12 GPS Receiver Ascension Island, 7- 18 March 2002



- Largest errors occur during period of most severe L-band scintillation, 21:00 to 23:30 UT (~20:00 to 22:30 LT)
- Receivers commonly experienced outages during scintillation periods
- Strong scintillation occurred on 11 of 12 nights during campaign

Scintillation-induced errors occur routinely in the early evening

Figur 4.7 Illustrasjon av unøyaktigheter i posisjon basert på GPS-signaler som følge av ekvatoriale plasmairregulariteter. Testresultatene er hentet fra Ascension Island [5].

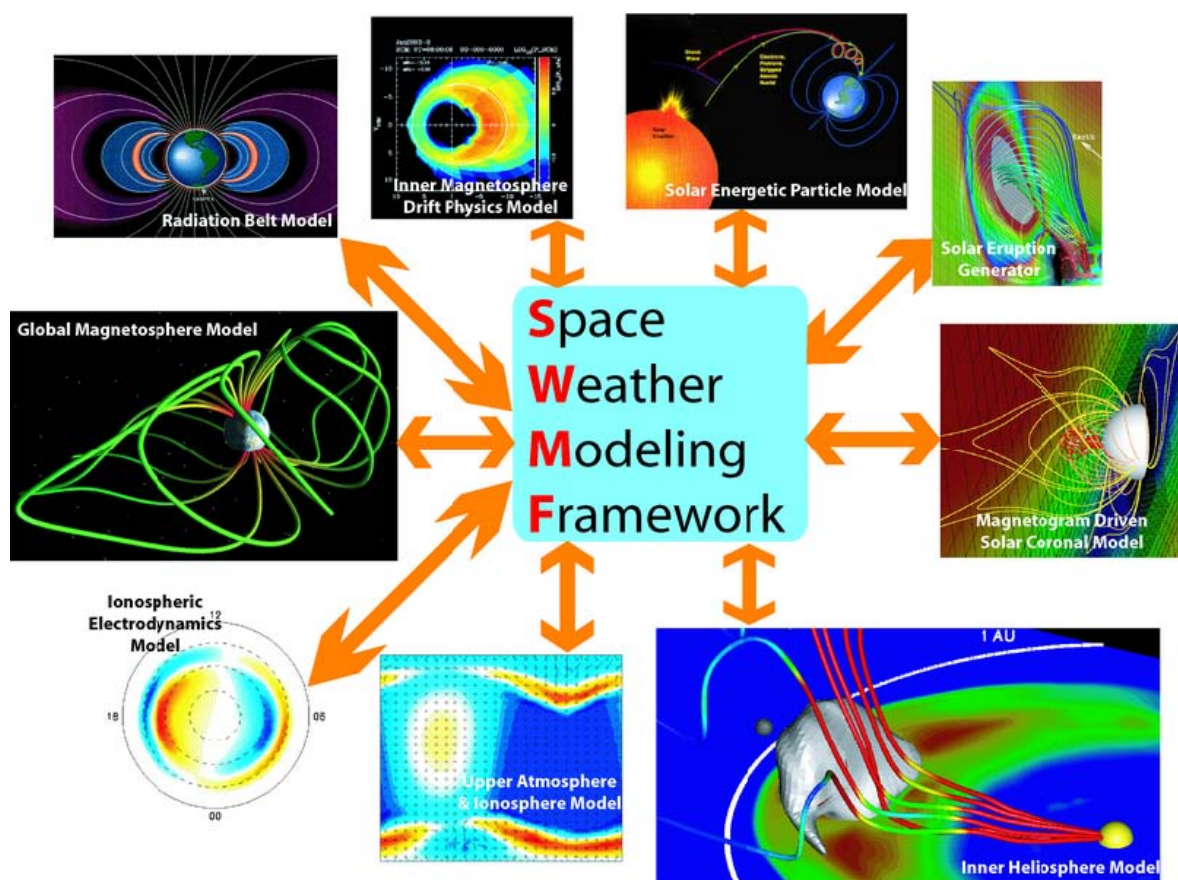
Legg spesielt merke til at usikkerhet i høydebestemmelsen (~100 m) er atskillig større enn i planet (titalls meter). Dette vil altså være et spesielt problem i forbindelse med flyging, men også svært nøyaktig posisjonering vil lide under slike forhold.

Siden interessen er økende for de store havområdene i nord, hvor bakkebaserte forsterkningsnettverk vanskelig kan plasseres, vil bruk av satellittposisjoneringssystemer kanskje i større grad måtte legges til perioder med liten sannsynlighet for plasmaforstyrrelser. Dette krever i sin tur bedre forståelse av og evne til å prediktere slike scintillasjonsperioder. I tider med økende krav til nøyaktighet og tilgjengelighet vil dette også kunne få betydning for militær aktivitet.

5 Prediksjoner

Det framgår allerede av kapittel 3 at romværet vi observerer er et resultat av en lang kjede av prosesser som har sitt utgangspunkt på solen. For å kunne prediktere dette romværet på linje med vanlig vær, må altså hver enkelt av disse prosessene samt vekselvirkningen mellom dem kunne modelleres. Her gjenstår det imidlertid enda en god del arbeid.

En skjematisk framstilling av de kjedede prosessene som inngår i vekselvirkningen mellom solen og vårt nære verdensrom er illustrert i Figur 5.1, som viser et formalisert rammeverk (SPWF) for romværmodellering. Som en ser, kan hele denne kjeden deles opp i ni separate modeller av varierende grad av modenhet, og rammeverket består videre av et sett med empiriske regler for hvordan energi og moment overføres mellom de forskjellige elementene. Ved å bygge ut hele denne modellen numerisk kan hendelser følges helt fra solen og ned i vår egen atmosfære. Imidlertid går dette ennå ikke noe særlig fort enn sann tid, og noen av elementene er for grove til at totalprediksjon blir veldig god.



Figur 5.1 Skjematisk oversikt av elementer som må inngå i en fullstendig romværmodell [7].

Derfor bygger dagens praktiske romværvarsler på en kombinasjon av observasjonsdrevne modellelementer og empirisk erfaring omtrent som ved tidlige værmeldinger. I dag er den viktigste institusjonen for slike varsler er det amerikanske SWPC (Space Weather Prediction Center) som er underlagt NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) i Boulder, Colorado. Deres hjemmeside er vist i Figur 5.2 under. Herfra er det linker videre til alle typer romværvarsler og dataprodukter som er i daglig bruk på dette området.



Figur 5.2 Hjemmesiden til Space Weather Prediction Center i Boulder, Colorado, USA.

Til tross for potensialet for videre utvikling av varslene er man nå likevel kommet så langt at de er av signifikant betydning for mange operatører. At ansvaret for SWPC nå ligger under NOAA betyr at området må regnes som operasjonelt og ikke lenger eksperimentelt (da ville det ha ligget under NASA, som likevel bidrar mye ved å operere satellitter som står for data-innsamling). Faktisk har SWPC nå omlag 50 ansatte (hvor av flere er militære), og vel 20 forskningsstipendiater er også tilknyttet. I tillegg kommer det faktum at en god del av modellutviklingen skjer i universitetsmiljøer.

Det bør her påpekes at ikke bare drar SWPC på alle NASA's og NOAA's ressurser for å kunne gjøre sine prediksjoner, men det amerikanske luftforsvaret er også tungt involvert. Faktisk har den militære interessen for romværprediksjoner vært helt avgjørende for at amerikanerne i dag er verdensledende på dette området. Dette bunner selvfølgelig i det amerikanske forsvarets omfattende bruk og dermed også avhengighet av rommet.

Dette senteret i Boulder er del av 11 slike regionale varslingssentre som samarbeider i paraplyorganisasjonen ISES (International Space Environment Service). Sentrenes beliggenhet er vist i

Figur 5.3, og samarbeidsformen er i stor grad basert på utveksling av data. De enkelte sentrenes hovedoppgave er imidlertid å utarbeide lokale varsler. Bortsett fra i Boulder er det da snakk om utvalgte varsler som er spesifikke for lokale interesser. For eksempel er vårt nærmeste senter i Lund engasjert i et prototype prosjekt for å lage en varslingstjeneste for GIC-hendelse. Lengst bort har man i Sydney spesialisert seg på HF-varsler siden dette framdeles er av betydning i et stort og spredt bebodd land.



Figur 5.3 Beliggenheten av de 11 regionale varslingssettene under ISES.

I tillegg til prediksjon av fysiske prosesser inngår modellering av disse prosessenes konkrete effekter på de forskjellige teknologiene i en fullstendig behandling av romværeffekter. Dette omfatter modellering av forventede strålingsdoser både på astronauter og elektronikk, erosjon av solcellepaneler, mikropartikkel flukser og banedegradering. Slike modeller har tidligere blitt utviklet innen de store romfartsorganisasjonene, og i USA er det framdeles NASA's feltcentre som er ansvarlige for de forskjellige elementene. I Europa er dette blitt organisert innenfor rammene av SPENVIS (Space Environment Information System). Denne organisasjonen har sitt sete i Belgia, og vedlikeholder og utvikler ESA's databaser og modeller (se Figur 5.4).

Slike modeller er viktige under planleggingsfasen av et hvert satellittprosjekt. Egenskaper ved banen har stor betydning for valg av elektronikk (og dermed produksjonskostnader), levetid for solcellepaneler (og dermed levetid for hele romfartøyet), kommunikasjonssystemer (og dermed datarater) og ikke minst kostnader ved oppskyting. Under utviklingen av AISSat-1 hadde derfor FFI god nytte av SPENVIS for eksempel under estimering av sannsynlige strålingsdoser.

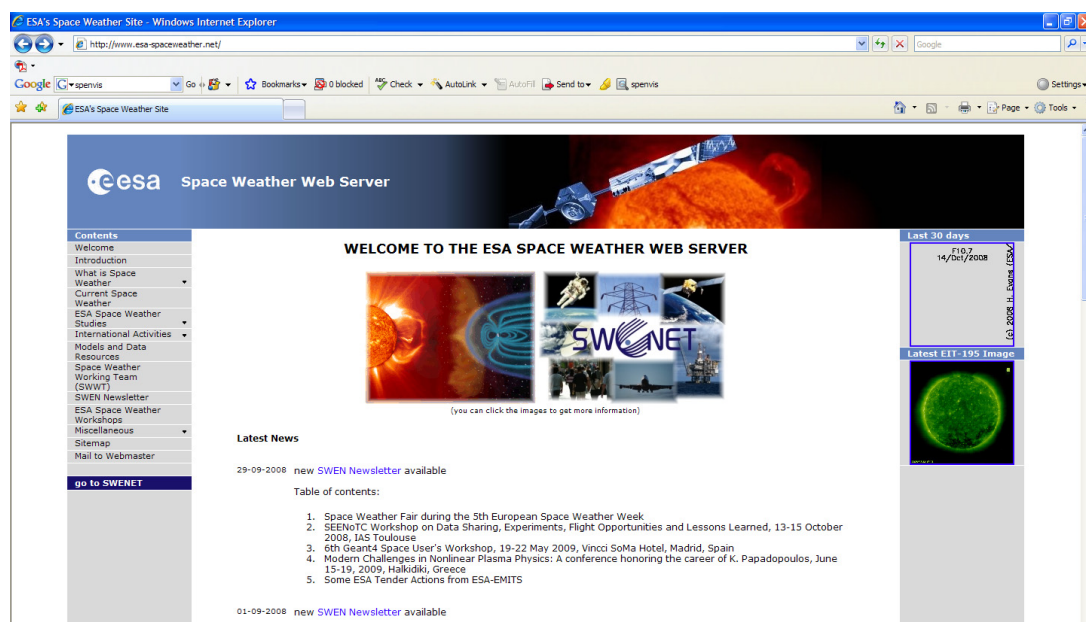
Fra Figur 5.3 kan en se at det for tiden finnes fem forskjellige varslingssettene i Europa. I tillegg finnes det også noe relevant aktivitet i andre nasjonale organisasjoner i de forskjellige landene. ESA har derfor også ambisjoner om å samle disse aktivitetene for så å utvikle en uavhengig

europæisk kapasitet for romværprediksjoner. Dette innebærer både en fullstendig evne til å modellere alle aspekter av sol-jord vekselvirkningen, samt å kunne gjennomføre alle nødvendige observasjoner som trengs til varslene.



Figur 5.4 Hjemmesiden til SPENVIS inneholder en rekke modeller som er meget nyttig under planleggingen av nye satellittprosjekter. Bruk krever bare registrering og ingen avgifter.

Dette arbeidet er allerede påbegynt ved at ESA står ansvarlig for nettverking og integrering av den europeiske virksomheten som alt finnes her. Til dette formålet er det laget en portal, hvis hjemmeside er vist i figur 5.5, som gir et samlet utgangspunkt for disse tjenestene. Her er det også linker til forskjellige utredninger med formål om å vurdere mulighetene for utvikle et fullstendig autonomt program. Dette krever imidlertid et relativt omfattende romsegment for å dekke alle nødvendige observasjoner. Sannsynligvis vil dette i sin tur kreve et kostnadsnivå som for tiden ikke er realistisk. Derfor må stadig nye veier til kostnadsdeling evalueres.



Figur 5.5 Hjemmesiden til ESA's portal for romværsvarsler og linker til alt utredningsarbeid.

En mulig måte å gjøre dette på er å utnytte felles europeisk infrastruktur til bruk i lignende systemer. For tiden jobbes det derfor med å inkorporere de framtidige planene for romværsvarsler i en felles europeisk sikkerhetstenkning. Dette vil bli nærmere redegjort i neste kapittel.

6 Situasjonsinformasjon i rommet

Siden et moderne samfunn er avhengig av infrastruktur i rommet på mange felter, vil det selvfølgelig også være viktig å beskytte disse ressursene. I denne sammenheng er romværsvarsler et viktig verktøy sammen med for eksempel evnen til å overvåke romskrot. For å gjøre en mest mulig systematisk tilnærming på dette området framlegges det derfor et overordnet initiativ til neste ministermøte i ESA (november 2008). Dette er et forslag til et felles europeisk program kalt SSA (Space Situational Awareness) som bør startes innen rammen av ESA's virksomhet.

Hensikten med dette programmet vil være å til en hver tid gi så god situasjonsinformasjon fra rommet som mulig. For å oppnå dette er programmet delt inn i fire tema:

- Deteksjon og sporing av satellitter og romskrot i bane rundt jorden
- Avbildning av slike objekter
- Overvåking og varsling av romvær
- Overvåking og varsling av NEO (Near Earth Objects)

På alle disse feltene er i dag den europeiske egenevne nokså begrenset, men det synes å være en politisk vilje til å oppnå større uavhengighet etter hvert. I første omgang er tanken å utnytte allerede eksisterende nasjonale ressurser ved hjelp av nettverking og integrasjon. Dernest er planen å bygge opp et dedikert system av sensorer og datasentre. Som illustrert i Figur 6.1 vil denne strukturen kunne være felles for alle fire tema.

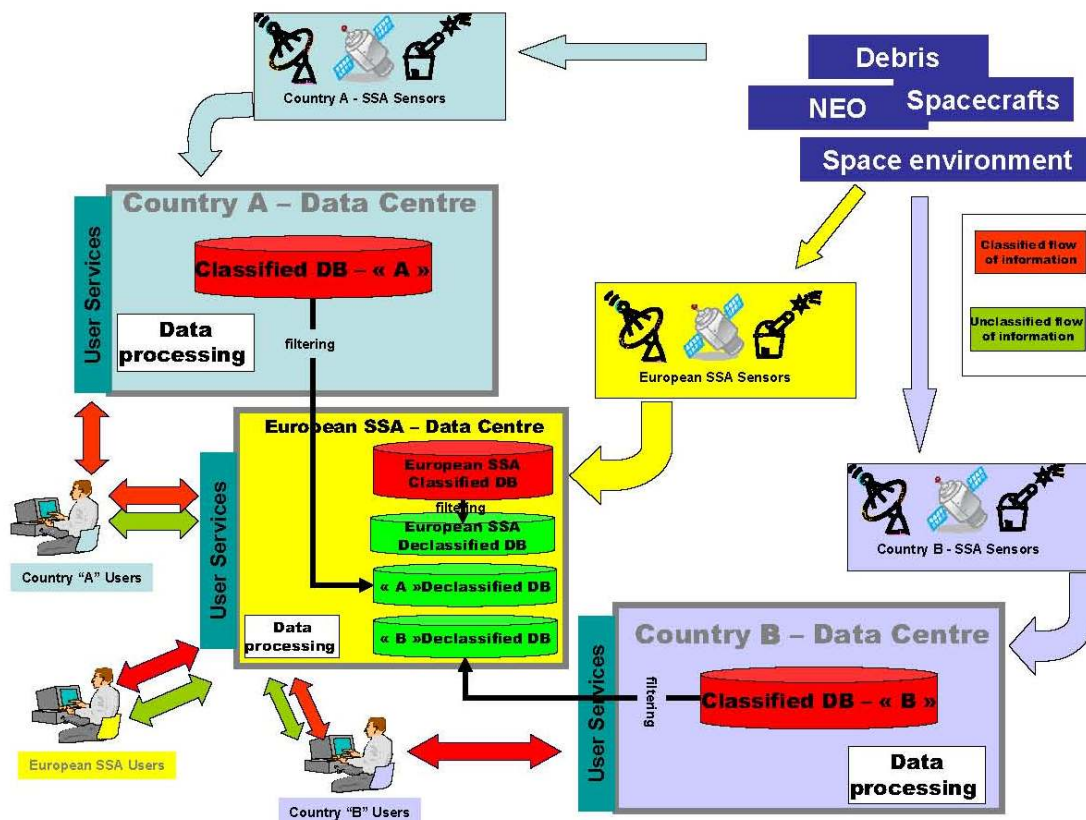
Det kan være norske nasjonale interesser og muligheter innen alle fire ovennevnte tema, men i denne sammenheng skal vi kun fokusere på romværaspektet. Selv om Norge har få innbyggere, har vi dog store områder å overvåke ikke minst til havs. I tillegg er dette ressursrike områder som ligger på så høye breddegrader at romværeffekter uten tvil vil bli et problem i flere sammenhenger. Her kan vi liste opp en rekke berørte systemer:

- **NORGE HAR NÅ EGNE SATELLITER**
 - SATCOM for Forsvaret (Operativ fra 2012)
 - AISSat-1 (Egen havovervåkning, skytes opp i 2009)
 - TSS (Thor II, III og V i bane + oppskytning av Thor VI i 2009)

- **NORGE HAR EGNE JORDSTASJONER**
 - Nedlesning både i Arktisk og Antarktisk
 - Galileo-stasjon i Antarktisk
 - Operasjon fra fastlandet

- **NORGE HAR STOR AKTIVITET PÅ HØYE BREDDEGRADER**
 - Navigasjon og Posisjonering (nordlyssonen og polkalotten)
 - Kommunikasjon (nordlyssonen og polkalotten)
 - Overvåkning (Barentshavet samt nordvest- og nordøstpassasjen framover)

- **NORGE DELTAGER I MANGE ESA-PROGRAM**
 - Jordobservasjon
 - Miljøovervåkning
 - Forskning



Figur 6.1 Flytskjema som viser hvordan et fullstendig europeisk nettverk for situasjonsinformasjon i rommet kan bygges opp. Dette systemet kan også benyttes til romværværsler [8].

I realiteten betyr alt dette at effekter av romværprosesser opptrer innen ansvarsområdet til mange sivile myndighetsorganer. Dette dreier seg om Kystverket (AISSat-1), Luftfartsverket (flyvning på GPS og/eller Galileo signaler samt høyenergipartikler på polruter), Kartverket (ansvarlig for å modellere effekten av jonsfæren), NVE (kraftdistribusjonsnett), Oljedirektoratet (borestyring, posisjonering og helikoptertrafikk) og Post- og Teletilsynet (satellittkommunikasjon). Hvor vidt alle disse institusjonene faktisk er seg bevisst problemstillingen, er vel mer uklart. Det er mulig at det er nødvendig å gå inn med en god del informasjon her.

I tillegg er det en noen private selskap som bli stilt ovenfor de samme problemstillingene, f. eks. innen oljebransjen eller lufttransport. Her er det litt varierende bevissthet omkring romvær, men i noen tilfeller er det ganske bra. Selskap som Fugro og Seatex har allerede vært til stede under Romsenterets orientering om temaet. Alt dette tilsier at det bør være klare norske interesser også i romværdelen av SSA.

Derfor har Romsenteret meldt Norge inn som deltager i programmet med et bidrag på 2.2 € over programperioden (2009-2011). Dette utgjør altså nærmere 20 MKr over en treårs periode til norske aktører. De mest aktuelle bruksområdene for disse midlene vil være deltagelse i team som

skal utrede ulike aspekter ved etablering av et uavhengig europeisk SSA-program samt utføre inkrementelle forbedringer i eller demonstrasjoner av norske elementer i et slikt program. Et minstenivå for FFI her vil da være å holde seg orientert om og eventuelt komme med innspill til den norske aktiviteten.

7 Konklusjon

Som det framgår av den tidligere diskusjonen foreligger det nå solid dokumentasjon på at den kjede av koblede prosesser som inngår i energioverføringen fra solen til jorden hver for seg kan influere på høyst forskjellige teknologier. Dette gjelder ikke bare de systemer som er avhengige av et eller flere romsegment, men også systemer på baken som er følsom for stråling eller såkalte geomagnetiske induerte strømmer. Her følger en kort oppsummering av de teknologier som påvirkes av romvær:

- **Satellittplattformer:** Høyenergi stråling kan ødelegge sensitiv elektronikk og degradere solcellepaneler eller sensorer, romskrot kan utgjøre en kollisjonsrisiko, variasjoner i UV-stråling kan degradere baner under omlag 500 km og solstormer kan øke kreftrisikoen for astronauter.
- **Signalforvrengning:** Jonosfæredynamikk kan degradere og forsinke signaler i kommunikasjonssystemer fra HF til L-bånd, GNSS-motagere kan bli utsatt for interferens av forsterket radioemisjon fra solen, noe som også gjelder for mobiltelefoner, og ikke minst kan radarer forstyrres av variasjoner i jonosfærisk refleksivitet.
- **Luftfart:** Høyenergi stråling kan forstyrre sensitiv elektronikk og utgjøre en øket kreftrisiko for besetningen og til en viss grad passasjerer, og kommunikasjonssystemer og GPS-styring kan utsettes for signalforvrengning.
- **Energidistribusjon:** Geomagnetisk induerte strømmer kan overbelaste kraftlinjer og medføre øket korrosjon på olje- og gassrørledninger, og magnetisk styring av bor og seismisk kartleggingsutstyr kan også forstyrres av geomagnetiske strømmer.
- **Elektronisk bakkeutstyr:** Kosmisk stråling kan tenkes å påvirke andre systemer som signalanlegg og miniatyriserte computere i f. eks. biler og tog.

Som en ser av dette står altså mye av den stadig voksende infrastruktur, både på sivilt og militært område, et moderne samfunn er avhengig av i fare for å kunne bli sterkt negativt påvirket av solaktivitet.

I Europa anerkjennes nå alvorret i denne problemstillingen ved at romvær blir tatt med i det nye Space Situational Awareness (SSA) programmet som er ESA's bidrag til å beskytte samfunnskritisk infrastruktur både i rommet og på bakken. Tradisjonelt har jo ESA utelukkende hatt sivile formål, men siden mye moderne teknologi ofte har både et sivilt og et militært formål er vel dette nå i ferd med å endre seg. Dermed følges det opp etter allerede eksisterende amerikanske program under NOAA på den sivile siden og under Air Force på den militære siden.

Av ovenstående grunner kan det følgelig sluttet at romværet også vil kunne influere på mye av virksomheten innen Forsvaret. Dette ikke minst fordi det nettverkbaserte forsvaret vil sette nye krav til fleksibel og robust kommunikasjon. I tillegg kommer også sannsynligheten for økte krav til nøyaktig posisjonering. Sist, men ikke minst, vil det antagelig bli aktuelt å operere egne satellitter. Derfor er det viktig at Forsvaret følger med i, og så langt råd er, støtter norske interesser innen feltet. Det er vel også rimelig at FFI inntar en ledende rolle her.

Siden vi nå går inn i den stigende delen av solsyklus 24, kan det være et opportunt tidspunkt for instituttet til å begynne å skaffe seg sitt eget praktiske erfaringsgrunnlag på dette området for å være bedre rustet til også her å kunne bistå Forsvaret med velfundert rådgivning. I tillegg bør det legges vekt på å kartlegge de mest umiddelbare militære behov på feltet. Et slikt arbeid kan synes å passe inn under INNOSAT-paraplyen siden det da vil være mulig å oppnå synergi-effekter med allerede pågående virksomhet her.

Konkret kan dette dreie seg om to aspekter ved AISSat-1, som jo vil være i bane allerede fra høsten av. For det første vil selve AIS-signalet, som liggerer i VHF-området, bli påvirket av jonosfæriske forstyrrelser. En vurdering av dette vil da kunne bli en del av den analysen av mottatte signaler som likevel vil måtte gjøres for å verifisere selve satellittkonseptet.

Dernest bør vi benytte det faktum at satellitten har en GPS-mottager ombord. Ved å sammenligne posisjonsbestemmelser fra denne med en passende plassert mottaker på bakken, vil en kunne isolere jonosfærens bidrag som feilkilde. Samtidig vil vi kunne få førstehånds kunnskap om effekten av romværforstyrrelser på denne viktige teknologien. Dette vil så igjen kunne gi grunnlag for å vurdere robusthet av systemet på høye breddegrader.

I tillegg vil denne typer analyser også gi erfaring med å utnytte ESA's Space Situational Awareness program som ble vedtatt igangsatt på ministermøtet høsten 2008. Denne tjenesten, som vil kunne bli et viktig skadeforebyggende verktøy, kommer til å bygges ytterligere ut mot det neste forventede solmaksimum rundt 2012.

Referanser

- [1] Czech, P, S Chano, H Huynh and A Dutil (1992): The Hydro-Quebec system blackout of 13 March 1989; system response to geomagnetic disturbance, Proc. Geomagnetically Induced Currents Conference, California, Nov 8-10, 1989, EPRI TR-100450.
- [2] Wikipedia om solen: <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>.
- [3] Introduction to Space Physics (Eds: M G Kivelson and C T Russell), Cambridge University Press, 1995.
- [4] Parks, G K (1995), Physics of Space Plasmas – an Introduction, Addison-Wesley Publishing Company.
- [5] Groves, K (2004): Monitoring Ionospheric Scintillation with GPS, Colloquium on Atmospheric Remote Sensing Using the Global Positioning System, 20. June – 2. July, 2004, Boulder, Colorado, USA.
http://www.cosmic.ucar.edu/colloquium_2004/presentations/Groves_23Jun04.pdf.
- [6] Basu, S, K M Groves, Su Basu and P J Sultan (2002): Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: current status and future plans, J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 64, 1745-1754.
- [7] Tóth, G, I V Sokolov, T I Gombosi, D R Chesney, C R Clauer, D L De Zeeuw, K C Hansen, K J Kane, W B Manchester, R C Oehmke, K G Powell, A J Ridley, I I Roussev, Q F Stout, O Volberg, R A Wolf, S Sazykin, A Chan, B Yu, and J Kóta (2005): Space Weather Modeling Framework: A new tool for the space science community, J. Geophys. Res, doi:10.1029/2005JA011126.
- [8] Draft Declaration on the Space Situational Awareness (SSA) Program, ESA, 2008.

Noen sentrale webadresser

Space Weather Prediction Center: <http://www.swpc.noaa.gov/>

International Space Environment Service: <http://www.ises-spaceweather.org/>

ESA Space Weather Web Server: <http://www.esa-spaceweather.net/>

Space Environment Information System: <http://www.spennis.oma.be/>

Space Weather Today: <http://www.spaceweather.com/>

Space Weather Center: <http://www.spaceweathercenter.org/>

SOHO hjemmeside: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

Wikipedia om solen: <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>

Akronymliste

AIS	-	Automated Information System
AU	-	Astronomical Unit
CME	-	Coronal Mass Ejection
ESA	-	European Space Agency
EU	-	European Union
GIC	-	Geomagnetically Induced Current
GNSS	-	Global Navigational Satellite System
GPS	-	Global Positioning System
GSM	-	Global System for Mobile
GTO	-	Geostationary Transfer Orbit
HF	-	High Frequency
ISES	-	International Space Environment Service
MRR	-	Multi-Rolle Radio
NASA	-	National Aeronautic and Space Agency
NATO	-	North Atlantic Treaty Organization
NEO	-	Near Earth Objects
NOAA	-	National Oceanographic and Atmospheric Administration
NVE	-	Norsk Vassdrag og Elektrisitetsvesen
PCA	-	Polar Cap Absorption
SPE	-	Solar Proton Event
SWPC	-	Solar Weather Prediction Center
SPENVIS	-	Space Environment Information System
SSA	-	Space Situational Awareness
SWMF	-	Space Weather Modelling Framework
(E)UV	-	(Extreme) Ultra Violet
VHF	-	Very High Frequency