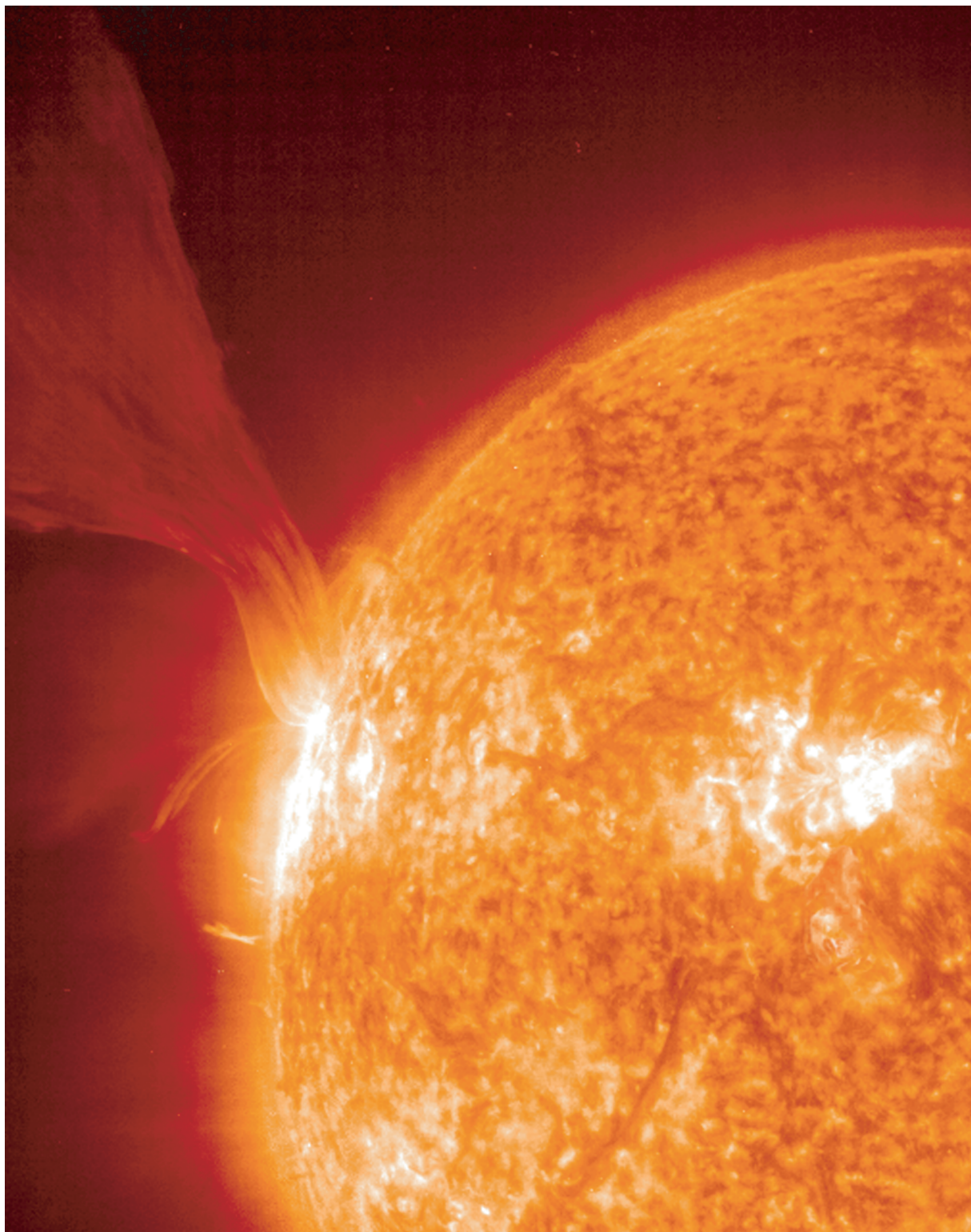


Sandra Lindström och Mattias Waldenvik

Rymdväder - effekter på militära och civila system



TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Systemteknik
172 90 Stockholm

FOI-R--1464--SE

December 2004

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Sandra Lindström och Mattias Waldenvik

Rymdväder - effekter på militära och civila system

Omslagsbild

Bilden visar en solprotuberans fotograferad den 15 maj 2001 av satelliten SOHO. Protuberanser är väldiga moln av relativt kall och tät plasma som uppstår i solens heta korona. Protuberanser kan nå höga höjder över solytan och kan ibland lyfta och lämna solen, varvid materia sprids ut i solsystemet. Bilden är tagen vid våglängden 304 ångström och visar solens kromosfär vid en temperatur på ca 60 000 kelvin. De hetaste områdena ser ut att vara vita medan de mörkare områdena indikerar en lägre temperatur.

Courtesy of SOHO/EIT (Extreme ultraviolet Imaging Telescope) consortium. SOHO is a project of international cooperation between ESA and NASA.

Sammanfattning

Den här rapporten behandlar rymdväder och dess effekter på militära och civila system. Med rymdväder avses förhållanden i solen, solvinden, magnetosfären, jonosfären och termosfären (regioner mellan solen och jorden) som kan påverka prestanda och tillförlitlighet hos rymdbaserade och markbaserade tekniska system samt skulle kunna påverka liv och hälsa hos människor.

Med ordet väder förknippar vi vanligtvis fenomen som vindar, regn, snö och solsken. Rymdväder drivs av solen men rymdvädrets motsvarigheter till jordens väderfenomen är variationer i strömmar av laddade partiklar, variationer i styrkan på elektromagnetiska fält och dess inverkan på kopplingen mellan solen och jorden. Solen sänder ut energi både som elektromagnetisk strålning och som elektriskt laddade partiklar. Partiklarna förs ut från solen mot jorden i den så kallade solvinden. Den elektromagnetiska strålningen rör sig med ljusets hastighet, det tar cirka åtta minuter för den elektromagnetiska strålningen att färdas från solen till jorden. För partiklarna tar det däremot alltifrån ett antal timmar till flera dagar att röra sig från solen till jorden. Strålningen och partiklarna växelverkar med jordens magnetfält och yttre atmosfär (jonosfären). Genom denna växelverkan samlas koncentrationer av energetiska partiklar och det skapas också elektriska strömmar i jonosfärskiktet. Detta ger sedan upphov till geomagnetiska variationer. Partiklarna och magnetfältets variationer inverkar på ett antal olika system och funktioner, några effekter som kan nämnas är:

- Störning på radiovågsutbredning, vilket kan innebära att signaler utsätts för olika reflektionsfenomen, absorptions- och scintillationseffekter i jonosfären.
- Rymdbaserade system påverkas bland annat av olika urladdningseffekter.
- Både rymd- och luftbaserade system kan påverkas av högenergetiska partiklar som penetrerar farkosterna vilket t.ex. ger upphov till fel i elektronikdelar.
- Personal ombord på rymdfarkoster eller flyg kan utsättas för höga strålningsdoser.
- Marksystem kan utsättas för geomagnetiskt inducerade strömmar som resulterar i ett antal tekniska problem.

Det absolut bästa försvaret är kunskap om rymdväder och dess påverkan på människa och materiel; och man har då en möjlighet att skydda sig mot stora påfrestningar. Kunskapen kan även ge t.ex. operatörer möjlighet att utesluta störningar, som kan härröra från mjukvaru- och hårdvarufel eller avsiktliga störningar från en fiende, när den egentliga storkällan är rymdväder. Kunskapen om rymdväder, dess effekter och problemen de skapar är viktig för Försvarsmakten,

oberoende av om de system som svenska trupper använder vid t.ex. internationella insatser är egna eller ägs av någon annan. Intressanta frågor som Försvarsmakten bör ta ställning till är bland annat:

- Vilka är användarna inom Försvarsmakten som påverkas av rymdväder?
- Är dessa användare medvetna om rymdväder och i så fall i vilken grad?

Försvarsmakten rekommenderas att upprätta en enhet från vilken rymdväderläget sprids ut i organisationen till berörda parter. Naturligt bör detta göras från samma ställe som sprider ut väderinformation. Det rekommenderas även att kunskap om rymdväder och dess effekter sprids genom att berörda inom Försvarsmakten deltar i någon form av kurs eller utbildning i rymdväder.

Det europeiska rymdorganet (ESA) siktar på att tillhandahålla en rymdvädertjänst som är oberoende av den rymdvädertjänst som USA idag tillhandahåller. ESA siktar på att tillhandahålla skräddarsydda lösningar efter hur användarens behov och krav är definierade, vilket skiljer sig från tjänsten som USA idag tillhandahåller. Ett par representanter från Sveriges försvarsmyndigheter bör delta i det europeiska arbetet med att utreda möjligheten av en europeisk rymdvädertjänst. Detta skulle kunna göras både i utbildningssyfte och för att knyta kontakter med andra europeiska försvarsmyndigheter, som är engagerade i rymdväderfrågor för försvar och säkerhet.

För system och signaler som påverkas av rymdväder och som inte går att skydda fysiskt får man förlita sig på prognoser och nulägesanalyser. FOI skulle kunna hjälpa Försvarsmakten med att utvärdera tillgängliga rymdvädersverktyg och -modeller på marknaden för Försvarsmaktens bruk. FOI skulle även kunna, om behov finns, utveckla egna verktyg för prognoser och nulägesanalyser.

Innehållsförteckning

Förkortningar	6
1 Inledning	8
2 Definition av rymdväder	9
3 Rymdmiljön	11
3.1 Laddade partiklar och magnetfält	12
3.2 Solvinden	13
3.3 Atmosfären och jonosfären	13
3.4 Växelverkan mellan solvinden och jordens magnetosfär	14
3.5 Solen	14
4 Rymdvädrets effekter	16
4.1 Effekter på radiovågsutbredning	16
4.2 Effekter på rymdbaserade system	21
4.3 Effekter på flygplan, flygpersonal och flygelektronik	23
4.4 Effekter på markbaserade system	24
4.5 Effekter på atmosfären	25
4.6 Rymdskrot och meteoroider	25
5 Hur rymdväder mäts	27
5.1 Rymdväderparametrar	27
5.2 Instrument och sensorer	32
6 Skyddsåtgärder	36
6.1 Fysiska skydd	36
6.2 Prognoser, nulägesanalys och utvärderingsverktyg	36
6.3 Organisationer som tillhandahåller rymdväderprognoser	38
7 Slutsatser och rekommendationer	40
Bilaga A – Begreppsförklaring	42
Bilaga B – Tabellöversikt	44
Bilaga C – Rymdväderlänkar	46
Referenser	47
Dokumentdatablad	49

Förkortningar

AE	Auroral Electrojet
ACE	Advanced Composition Explorer
AFWA	Air Force Weather Agency
AKR	Auroral Kilometric Radiation
AZA	Auroral Zone Absorption
CANOPUS	Canadian Auroral Network for the Open Program Unified Study
DST	Disturbance Storm Time
EIT	Extreme Ultraviolet Imaging Telescope
ELF	Extreme Low Frequency
ESA	European Space Agency
ESD	Electrostatic Discharge
EUV	Extreme Ultra Violet
GEO	Geostationary Orbit
GIC	Geomagnetically Induced Currents
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GPS	Global Positioning System
GTO	Geostationary Transfer Orbit
HF	High Frequency
HST	Hubble Space Telescope
IMAGE	Imager for Magnetopause - to - Aurora Global Exploration
IMF	Interplanetary Magnetic Field
IRF	Institutet för Rymdfysik
ISS	International Space Station
LASCO	Large Angle and Spectrometric Coronagraph

LEO	Low Earth Orbit
LORAN	Long-Range Aid to Navigation
LUF	Lowest Usable Frequency
MEO	Medium Earth Orbit
MIRACLE	Magnetometers - Ionospheric Radars- Allsky Cameras Large Experiment
MSFM	Magnetospheric Specification and Forecasting Model
MUF	Maximum Usable Frequency
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NSWP	National Space Weather Program
OTH	Over The Horizon
PCA	Polar Cap Absorption
PCP	Polar Cap Potential
PEO	Polar Earth Orbit
SAR	Synthetic Aperture Radar
SEC	Space Environment Centre
SEE	Single Event Effects
SEU	Single Event Upsets
SIDC	Solar Influences Data analysis Center
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory
SSN	Smoothed Sunspot Number
SWF	Short Wave Fade
SWOC	Space Weather Operation Center
TEC	Total Electron Content
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
VLf	Very Low Frequency

1 Inledning

FoT-projektet "Rymdtillämpningar för NBF" är ett treårigt projekt från 2003 till 2005 och syftar till kunskapsuppbyggnad kring rymdsystem för Försvarsmaktens behov. Projektet berör tre olika områden varav "Rymdväder och jonosfärmodifiering" är ett av dem. Den här rapporten utgör den del som berör rymdväder. Denna rapport vänder sig främst till personer inom försvarsmyndigheterna som sysslar med kortvågs-, satellit- och ubåtskommunikation samt radionavigeringssystem. Rapporten bör även intressera alla som använder sig av rymdrelaterade tjänster i någon form. Rapporten berör även påverkan på flyg, flygpersonal och markbaserade system såsom elkraftssystem, telekommunikationskablar, pipelines samt järnvägsutrustning.

Tanken är att introducera läsaren till området rymdväder och ge en förståelse för dess effekter på tekniska system och de problem som detta kan ge upphov till. Materialet är till stor del baserat på studier och utredningar som gjorts för det europeiska rymdorganet (ESA). Arbetet baseras även på intryck från konferensen "*Space Weather*", se Lindström [1], och ett studiebesök på ESA angående rymdväder. Information har också inhämtats från rymdvädertjänster i främst USA, Kanada och Australien, se bilaga C.

Rapporten inleds med att begreppet rymdväder definieras i avsnitt 2. Avsnitt 3 beskriver rymdmiljön d.v.s. växelverkan mellan solen, solvinden, magnetosfären, jonosfären och jorden. Avsnitt 4 behandlar rymdvädrets effekter på tekniska system och de problem som rymdväder orsakar. I avsnitt 5 reder vi ut vad det är för parametrar som mäts när man pratar om rymdväder och även vilka instrument som används för att kunna utföra mätningarna. Avsnitt 6 berör skydd mot rymdväder. Avsnittet tar också upp organisationer som tillhandahåller rymdvädertjänster. Rapporten avslutas sedan med avsnitt 7 där vi ger några slutsatser och rekommendationer för framtida arbete på rymdväderområdet.

I bilaga A hittas ett sakregister för ett urval av de vetenskapliga begrepp som används i rapporten. För en beskrivning av grundläggande principer och begrepp samt mer tekniska detaljer när det gäller rymdteknik, satellitbanor m.m. hänvisas läsaren till Ekblad [2]. Bilaga B redovisar en tabell över rymdvädereffekter och rymdväderparametrar. Bilaga C innehåller ett antal relevanta länkar till rymdväderrelaterade sidor på Internet.

2 Definition av rymdväder

Solen sänder ut energi både som elektromagnetisk strålning (radiovågor, infrarött ljus, synligt ljus, UV-ljus och röntgenstrålning) och som elektriskt laddade partiklar (mest protoner och elektroner men också tunga joner), bland annat genom koronamassutkastningar. Partiklarna förs ut från solen mot jorden i den så kallade solvinden. Den elektromagnetiska strålningen rör sig med ljusets hastighet, det tar cirka åtta minuter för den elektromagnetiska strålningen att färdas från solen till jorden. För partiklarna tar det däremot alltifrån ett antal timmar till flera dagar att röra sig från solen till jorden. Strålningen och partiklarna växelverkar sedan med jordens magnetfält och yttre atmosfär (jonosfären). Genom denna växelverkan samlas koncentrationer av energetiska partiklar och det skapas också elektriska strömmar i jonosfärsiktet. Detta ger sedan upphov till geomagnetiska variationer och detta påverkar rymd-, mark- och luftbaserade tekniska system.

I ett försök att hitta en gångbar definition på begreppet "rymdväder" så valde vi att gå tillbaka till 1994 och det då nybildade amerikanska rymdväderprogrammet (NSWP). NSWP består av flera amerikanska statliga organisationer¹ och dess uppgift är att hantera rymdväderfrågor. Enligt Wright [3] beskrivs då rymdväder enligt följande:

Space Weather refers to conditions on the sun and in the solar wind, magnetosphere, ionosphere, and thermosphere that can influence the performance and reliability of space-borne and ground-based technological systems and can endanger human life or health. Adverse conditions in the space environment can cause disruption of satellite operations, communications, navigation, and electric power distribution grids, leading to a variety of socioeconomic losses.

Fritt översatt av författarna: Med rymdväder avses förhållanden i solen, solvinden, magnetosfären, jonosfären och termosfären som kan påverka prestanda och tillförlitlighet hos rymdbaserade och markbaserade tekniska system samt skulle kunna hota liv och hälsa hos människor. Ogynnsamma förhållanden i rymdmiljön kan orsaka avbrott i satellitdrift, kommunikationssystem, navigeringssystem och elektriska kraftledningsnät vilket ger upphov till en mängd socioekonomiska förluster.

Denna definition är bland de mest citerade och därför avser vi att utgå ifrån den i denna rapport. Utöver rymdväder så som det är definierat ovan så bör även hänsyn tas till meteoroider och rymdskrot. Rymdväder som forskningsområde är ett

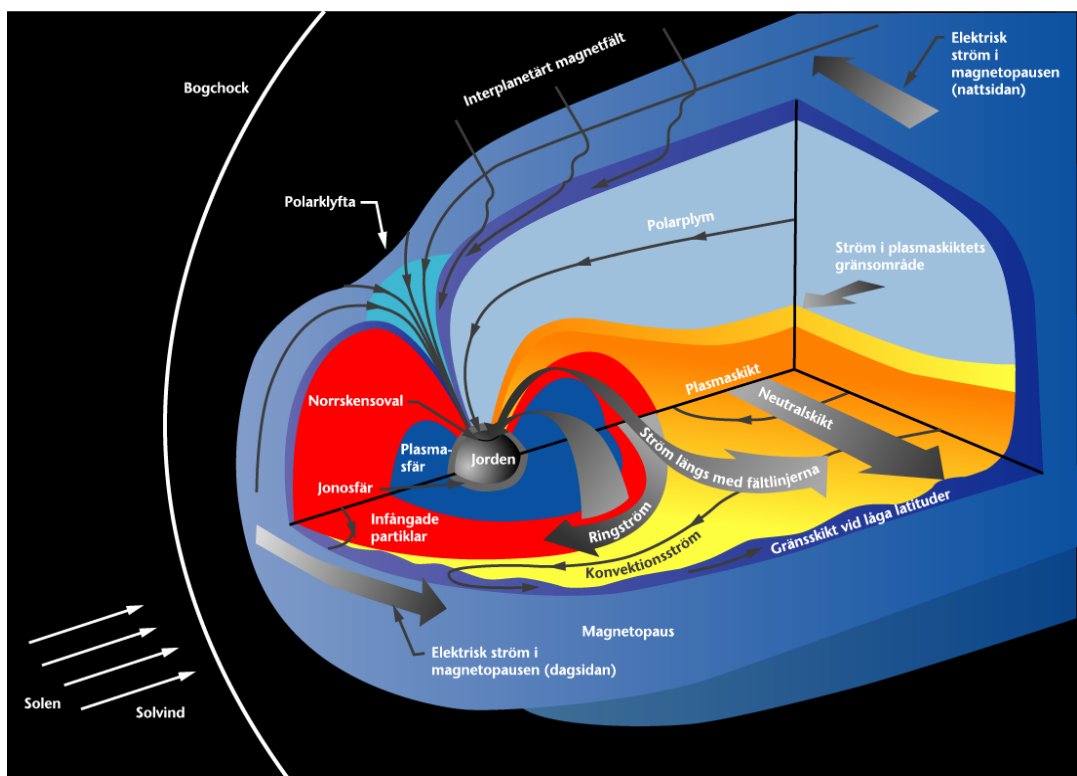
¹ National Science Foundation (NSF), Department of Defence (DOD), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Aeronautics and Space Administration (NASA), Department of Energy (DOE) och Department of Interior (DOI)

första steg till att sammanfoga forskning som berör olika delar av rymdmiljön såsom solforskning, solvindsforskning, magnetosfärforskning, jonosfärforskning och atmosfärforskning i syfte att få en integrerad bild av händelseförloppet från solens utbrott till vad som händer med tekniska system på jorden. Denna samverkan underlättar arbetet med modellutveckling kring rymdmiljöns processer och effekter samt vid rymdväderprognoser och varningar i och med att verktygen blir allt mer effektiva och korrekta.

3 Rymdmiljön

Med ordet väder förknippar vi vanligtvis fenomen som vindar, regn, snö och solsken. Dessa välbekanta fenomen uppkommer genom en rad olika processer som alla har sin grund i den värme som strålar in mot jorden från solen, vår närmaste stjärna. Rymdväder är en annan uppsättning fenomen i gränslandet mellan den atmosfär som omger jorden och det område mellan planeterna som kallas den interplanetära rymden. Även rymdväder drivs av solen men rymdvädrets motsvarigheter till jordens väderfenomen är variationer i strömmar av laddade partiklar, variationer i styrkan på elektromagnetiska fält och dess inverkan på kopplingen mellan solen och jorden.

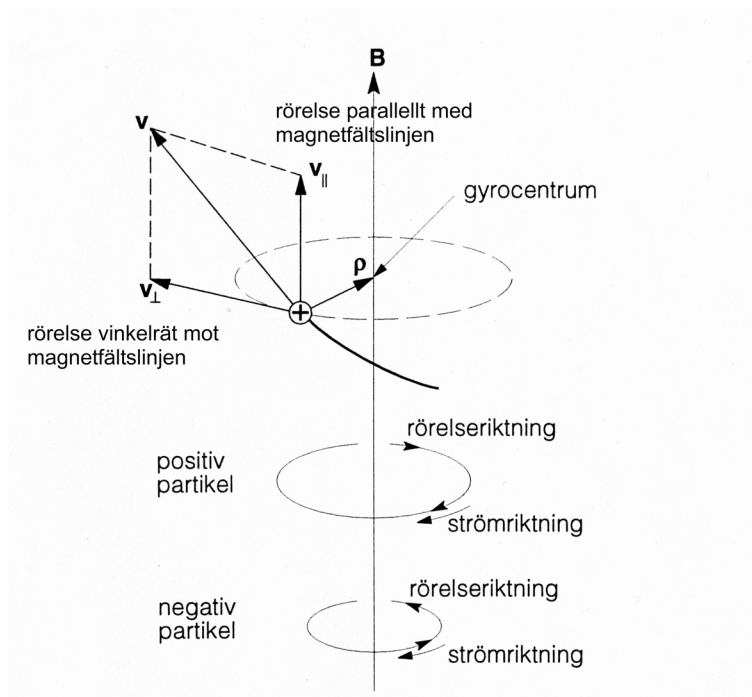
Vi inleder med att i detta avsnitt introducera några enkla fysikaliska fenomen som utgör grunden till rymdvädrets tillkommande. Det kan under läsningen vara en god idé att snegla på Figur 1.



Figur 1. Illustration över jordens magnetfält. Illustratör Jenny Ström, Skilla.

3.1 Laddade partiklar och magnetfält

Vid de höga temperaturer som råder bland annat i solatmosfären, där temperaturen som lägst är ca 4200 kelvin och som högst är ca 2 000 000 kelvin enligt Kivelson och Russel [4], är materian helt eller delvis joniserad. Att materian är joniserad innebär att en eller flera elektroner slitits loss från de atomer eller molekyler som utgör den aktuella materian. Elektroner har en negativ elektrisk laddning. De atomer eller molekyler som blivit av med en eller flera elektroner benämns joner och har en positiv laddning. I t.ex. solatmosfären består mycket av materian av väte. Kärnan i väte består bara av en positivt laddad proton vilket föranleder att man ofta talar om protonstrålning eller protonströmmar istället för strömmar av vätejoner.



Figur 2. Bilden visar rörelsen hos positiva och negativa partiklar i närheten av magnetfältslinjer. Om partikeln har en rörelse både vinkelrätt mot och parallellt med magnetfältslinjen så böjer partikeln av i en spiralformad bana.

Jorden har som bekant ett magnetfält men även solen har ett magnetfält. Om en partikel är elektriskt laddad kommer dess rörelse att påverkas av magnetfältets styrka, riktning och variationer. Om partikeln rör sig vinkelrätt mot magnetfältet kommer fältet att böja den laddade partikelns bana så att den rör sig i en cirkelbana där radien minskar med ökande magnetfältstyrka och ökar med högre partikelenergi, se Figur 2. En laddad partikel som rör sig mot ett område med starkare magnetfält kommer att röra sig med en minskande radie och, om partikelns energi och magnetfältets styrka tillåter, så småningom reflekteras för att istället röra sig bort från det starkare magnetfältet. Rörelser parallellt med magnetfält påverkas däremot inte. En laddad partikel med både en vinkelrät och en parallell rörelsekomponent kommer därför att röra sig i en spiralformad bana

längs med magnetfältet, se Figur 2. Vidare påverkar även variationer i magnetfältet rörelsen hos laddade partiklar. En magnetfältslinje kan illustreras som en linje dragen så att man längs linjen hela tiden följer den riktning dit magnetfältet pekar. Elektriskt laddade partiklar som rör sig längs fältlinjerna i jordens magnetfält och reflekteras mot de starkare fälten kring de magnetiska polerna är inneslutna i vad som brukar benämnas en magnetisk flaska och utgör strålningsbälten i vilka satelliter och andra rymdfarkoster kan utsättas för speciellt höga stråldoser.

3.2 Solvinden

En gas där materien är helt eller delvis är joniserad, d.v.s. sönderdelad i sina elektriskt laddade beståndsdelar, kallas för ett plasma. Universum utgörs nästan helt av materia i plasmatillstånd. Det plasma som ständigt strömmar ut från solen benämns mycket passande solvinden. Solvinden har i normalfallet, vid lugnt rymdväder, en densitet av några få protoner och elektroner per kubikcentimeter. Solvindens hastighet är kring 450 kilometer per sekund och dess temperatur som definieras av den termiska rörelsen hos partiklarna, d.v.s. rörelsen hos partiklar på grund av deras höga energi, har ett värde av ca 100 000 kelvin, se Kivelson och Russel [4]. Eftersom solen har ett magnetfält kommer rörelsen hos de elektriskt laddade partiklarna i solvinden att påverkas. Samtidigt utgör laddade partiklar i rörelse en elektrisk ström och elektriska strömmar ger i sin tur upphov till magnetfält. I solvinden, i denna väv av växelverkan mellan strömmar och magnetfält, finns förutsättningarna för något som brukar benämnas ett infruset magnetfält. När magnetfältet är infruset följer magnetfältlinjerna med plasmat. Om plasmat av någon anledning skulle utsättas för ett yttre tryck och klämmas ihop så kläms även magnetfältlinjerna ihop vilket leder till starkare magnetfält. I neutrala gaser, utan elektriskt laddade partiklar, kan akustiska vågor överföra energi över stora avstånd, t.ex. ljudvågor eller stötvågor från explosioner. På samma sätt kan vågor överföra energi från en punkt till en annan i solvindens plasma. I solvinden är vågorna dock mer komplicerade eftersom det infrusna magnetfältet är så intimt kopplat till plasmats rörelser.

3.3 Atmosfären och jonosfären

På jordytan består atmosfären av den elektriskt neutrala gasblandning som vi vanligtvis kallar luft. Denna gasblandning finns, om än med avtagande täthet med ökad höjd över jordytan, upp till ungefär 100 kilometers höjd. På höjder från ungefär 100 till 800 kilometer är syre den vanligaste beståndsdel, på högre höjder dominerar väte. Solstrålning i UV- och röntgenområdet som infaller mot jordens atmosfär joniserar gasblandningen och absorberas därmed i atmosfären. På väg ned i atmosfären kommer strålningen in i allt tätare atmosfär och avtar därmed på grund av ökad absorption. Någonstans, på ungefär 250 kilometers höjd, antar jonisationen ett maximum i den mening att antalet fria elektroner per volymenhet är störst på den höjden. De joniserade atomerna och molekylerna rekombineras efter en tid med fria elektroner för att åter bilda elektriskt neutrala kombinationer. Jämvikten mellan jonisation och rekombination bestämmer den resulterande jonisationsgraden (andelen jon-elektronpar per neutralgaselement) och elektrontätheten (antalet fria elektroner per volymenhet).

På grund av att olika atomer och molekyler har olika förutsättningar för att joniseras och sedan rekombineras med olika hastigheter joniseras atmosfären i grova drag i olika skikt. Dessa skikt, som tillsammans utgör den så kallade jonosfären, benämns vanligtvis med ökande höjd, D-skiktet, E-skiktet och F-skiktet. Ovanför ungefär 1000 kilometers höjd består atmosfären till övervägande del av joniserad vätgas och de laddade partiklarnas rörelser domineras där i huvudsak av jordens magnetfält varför området benämns magnetosfären. Om rymden varit tom skulle magnetosfären med ett med avståndet från jorden avtagande magnetfält och avtagande täthet i atmosfären ha utgjort jordatmosfärens gräns mot rymden. Nu är inte rymden tom utan någonstans därute växelverkar magnetosfären med solvinden.

3.4 Växelverkan mellan solvinden och jordens magnetosfär

Gränsen mellan solvinden och jordens magnetosfär brukar benämnas magnetopausen och kan definieras som den yta där trycket i solvinden är lika stort som magnetosfärens magnetiska tryck. Jordens magnetosfär hindrar plasmata i solvinden från att tränga ned till jordytan, istället tvingas solvinden runt magnetosfären. Vi har tidigare nämnt att laddade partiklar påverkas av magnetfält och att laddade partiklar i rörelse utgör en elektrisk ström som i sin tur genererar ett magnetfält. Växelverkan mellan solvinden och jordens magnetfält resulterar bland annat i att jordens magnetfält trycks ihop på dagsidan (den sida av magnetosfären som är vänd mot solen) och att magnetfältet dras ut till en lång svans på nattsidan. På dagsidan bildar solvinden en bogvåg, plasmavarianten av bogvågen på uppströmssidan av en sten i strömmande vatten. Om liknelsen med strömmande vatten dras vidare motsvarar svansen i magnetfältet närmast ett bakvatten. Bogvågen på dagsidan manifesteras till exempel som en plötslig ökning i partikeltäthet för en satellit som färdas genom magnetopausen ut i solvinden.

I de områden på gränsytan mellan magnetosfären och solvinden, d.v.s. magnetopausen, där magnetfältet i magnetosfären och det med solvinden medföljande magnetfältet är riktade i rakt motsatt riktning finns det ökad möjlighet för att energi från solvinden kommer in i magnetosfären för att där manifesteras som elektriska strömmar och strålningsbälten. Variationer i solvindens intensitet sammantaget med variationer i solvindens magnetfältsriktning ger variationer i intensiteten i energiöverföringen mellan solvinden och magnetosfären. Dessa variationer kan sammanfattas under begreppet rymdväder.

3.5 Solen

Solens aktivitet varierar över tiden. Antalet solfläckar och solstrålningens intensitet varierar med den så kallade solcykeln där avståndet mellan på varandra följande maxima (eller minima) är ungefär elva år. Andra fenomen kan uppvisa en periodicitet på cirka 27 dagar vilket är relaterat till den tid det tar för solen att rotera ett varv kring sin egen axel. Flares är energiexplosioner från solen som uppstår i samband med uppkomsten av solfläckar. En flare sänder ut röntgenstrålning och partiklar från solen mot jorden och kan bidra till jonisationen i jonosfären. Ett annat fenomen som har stor betydelse för rymdvädet är plötsliga koronamassutkastningar där en klump av plasma med medföljande magnetfält

kastas ut från solatmosfären. Koronamassutkastningar kan innehålla upp emot 1 till 10 miljarder ton massa vilket kan nå jorden på några dagar. Om förhållandena är sådana att detta förtätade plasmamoln kastas ut i en riktning mot jorden och om magnetfältet är orienterat så att det är i motsatt riktning mot magnetosfärens magnetfält på dagsidan så finns förutsättningarna för att ett förhållandevis stort inflöde av energi och partiklar kan ske från solvinden till magnetosfären. Detaljerna för inflödet av energi och partiklar från solvinden till magnetosfären är ett aktivt forskningsområde och är ännu inte helt klarlagda. En lång rad olika processer och tidsförlopp förekommer i den transport av energi och partiklar som sker efter att det ökade tillskottet från solvinden passerat in till magnetosfären. Några av de rymdväderfenomen som följer av eller förstärks av den förhöjda kopplingen mellan en förstärkt solvind och magnetosfärens dagsida är bland annat:

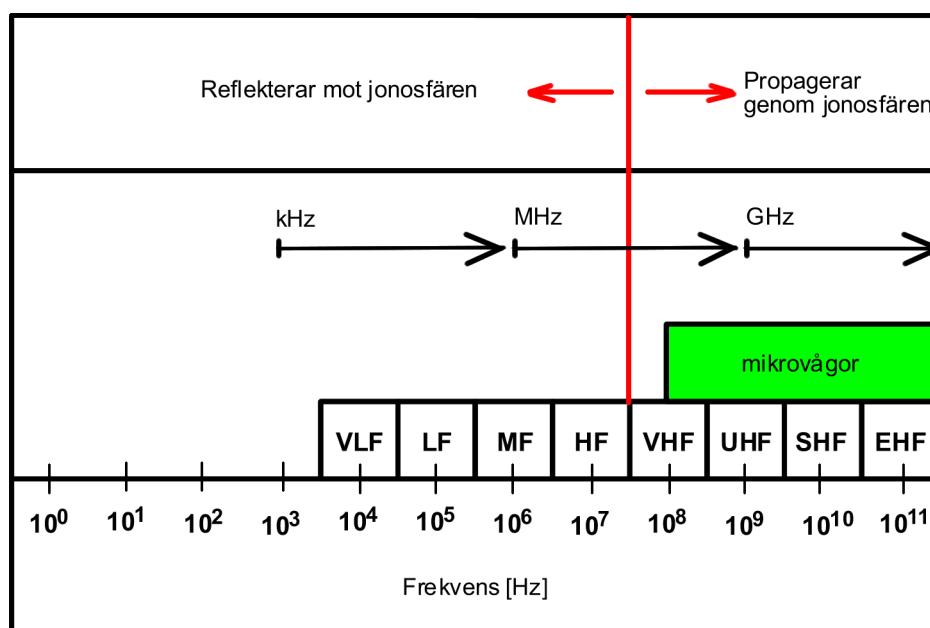
- En ökning av partikeltätheten i de så kallade strålningsbältena eller Van Allen-bältena.
- Magnetiska stormar med fluktuationer i magnetfält från den så kallade ringströmmen som flyter likt en jordens badring i magnetosfären, se Figur 1.
- Ackumulerad energi i magnetosfärens svans som under en så kallad substorm kortsluts i jonosfären vilket orsakar spektakulära norrsken.

4 Rymdvädrets effekter

Rymdväder påverkar ett antal olika system och funktioner t.ex. påverkas satelliter, bemannade och obemannade rymdfarkoster, bäraketer, flygplan, flygpersonal, flygelektronik, radiovågsutbredning, elkraftssystem, nätverk av pipelines samt klimatet. Detta avsnitt beskriver de olika rymdväderparametrarna som ger upphov till olika effekter på ett givet system. Litteratur som ligger till grund för kommande avsnitt 4.1 - 4.6 är bland annat Koskinen et al. [5], Koskinen et al. [6] och Hanslmeier [7].

4.1 Effekter på radiovågsutbredning

Jonosfären sträcker sig från ca 70 till 1000 kilometer över jordens yta och har betydande påverkan på radiovågsutbredning i området. Vid radiofrekvenser lägre än 30 MHz (kortvågskommunikation, radionavigeringssystem) kan radiovågorna reflekteras i jonosfären. Vid dessa frekvenser påverkas signalen av bland annat absorptionseffekter. Vid frekvenser över 30 MHz (GPS, satellitkommunikation, m.m.) penetrerar signalen jonosfären och möjliggör kommunikation mellan rymd och mark. Dessa signaler påverkas även de på sin väg genom jonosfären. Detta illustreras i Figur 3.



Figur 3. Illustration över vilka frekvenser som reflekteras mot jonosfären och vilka som propagerar genom jonosfären.

Med jonosfäriska scintillationer menas snabba slumpmässiga variationer i fas och intensitet hos radiosignaler som passerar genom jonosfären. Scintillationerna beror på oregelbundenheter i jonosfärens plasma, speciellt variationer i elektrondensiteten. Detta fenomen uppstår typiskt för radiosignaler som propagerar genom jonosfären, som t.ex. GPS eller satellitkommunikation. Scintillations-effekter uppstår på höga latituder, runt de polära områdena och runt ekvatorn. De förekommer i högre grad direkt efter skymning och kan då vara i flera timmar. Vid höga latituder sker dock scintillationer under både dagtid och nattetid. Effekterna är ofta relaterade till ett solmaximum. Fenomenet kan även liknas vid hur vi från marken tycker att stjärnor tindrar vilket beror på att partiklar i atmosfären hela tiden är i rörelse.

Enligt Horne [8] så uppger forskare att intresset för rymdväder, när det gäller det amerikanska försvaret, är centrerat kring dess effekter på kortvågskommunikation och kortvågsradar. Studien har också sammanställt de viktigaste rent militära funktionerna som påverkas av rymdväder vilka beskrivs nedan i avsnitt 4.1.1 - 4.1.6.

4.1.1 Kortvågskommunikation

Hörfrekvensradiovågor (HF), vid frekvenser mellan 3 - 30 MHz, används för kommunikation över långa avstånd. Frekvensområdet benämns också kortvåg. Kortvåg används för kommunikation mellan trupper på land och även med flyg på långa avstånd. Kortvågskommunikation är även ett viktigt stödsystem när satellitkommunikation inte fungerar som den skall. Kortvågssignaler används även för att lokalisera sändare d.v.s. det används för positionering av militära enheter, både egna enheter och fientliga enheter, så att t.ex. räddningsoperationer kan utföras.

Användningen av kortvågskommunikation styrs av två parametrar, maximala användbara frekvens (MUF) och lägsta användbara frekvens (LUF). MUF beror av elektrondensiteten i F-lagret och den varierar med tid på dygnet, solcykeln och geomagnetiska stormar. Variationen i reflektionshöjd kan sprida signalen och ändra riktning på signalen som resulterar i degradering av signalen mellan sändare och mottagare. LUF påverkas starkt av flares d.v.s. LUF bestäms av radiovågornas absorption i de lägre D- och E-lagren. Förhöjd jonisation höjer kollisionsfrekvensen vilket ökar absorptionen av radiovågorna. Detta kan resultera i fenomen som borttoning av signalen (SWF) vilket kan pågå från några minuter till flera timmar, se Figur 4. Detta är samma fenomen som gör att vissa radiostationer bara kan lyssnas till nattetid, då absorptionen i D-skiktet är som lägst.

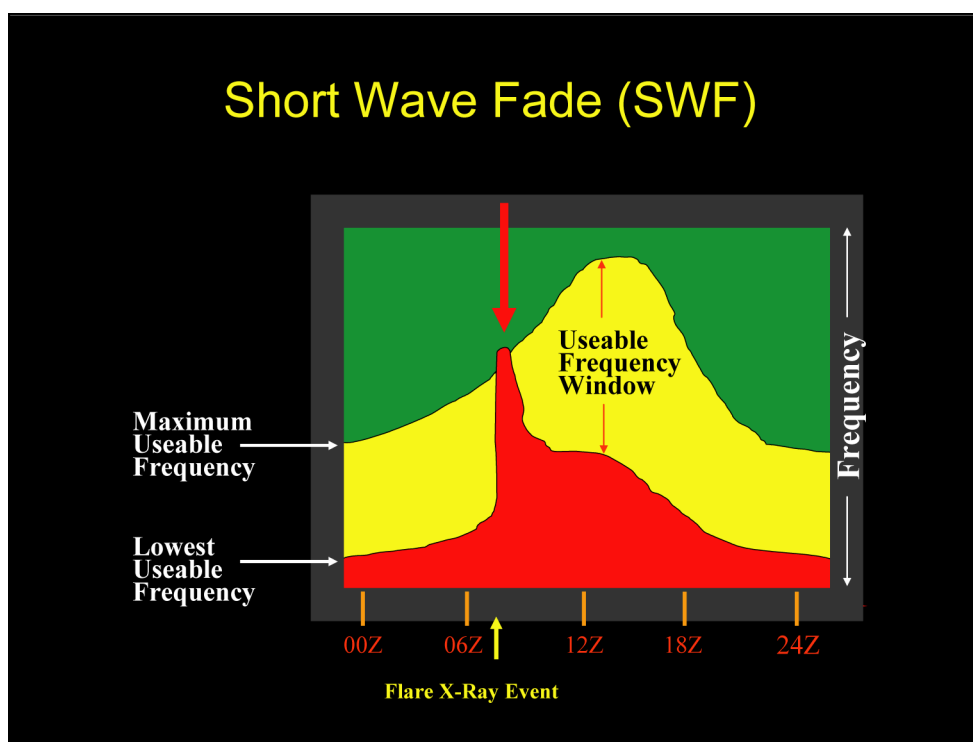
Ett annat fenomen till följd av flares är polarkalottsabsorption (PCA) vilket sker vid höga latituder på grund av att energetiska protoner letat sig ner från solvinden till polarkalotten där de kan hålla sig från dagar upp till veckor. Under denna tid är det svårt att använda kortvågskommunikation vid höga latituder.

Elektroner från polarplymen, se Figur 1, i jordens magnetosfär accelereras mot jorden under geomagnetiska stormar. Elektronerna följer magnetfältslinjerna ner

i polarskensområdet och orsakar där förhöjd jonisation vilket då också påverkar kortvågskommunikation. Detta benämns polarskensabsorption (AZA).

Det som ger upphov till störningar på kortvågskommunikation i jonosfären är sammanfattningsvis:

- Ökad EUV- och röntgenstrålning från flares.
- Energetiska partiklar från solen som penetrerar övre atmosfären.
- Partiklar från magnetosfären vid polarskenslatituder.



Figur 4. Exempel på hur en SWF kan te sig. Det gula området visar frekvensområdet som går att använda för kortvågskommunikation, vid ett flare-utbrott där röntgenstrålning skickas ut kan den lägsta användbara frekvensen öka så till den grad att signalen tonar bort. Courtesy of Space Weather Operations Center at the Air Force Weather Agency – Holoman Solar Observatory.

4.1.2 OTH-radar

OTH-radar *Over the horizon* opererar på höga frekvenser och använder sig av jonosfären för att reflektera signalen över horisonten för att på så sätt detektera mål på långa avstånd. För närvarande finns dessa system i Ryssland, Australien, USA och Storbritannien. En OTH-radar opererar typiskt på 6 - 30 MHz och används för förvarning vid missil- och flygattacker.

Eftersom OTH-radarn använder sig av frekvenser i HF-området påverkas den av jonosfäriska störningar. Signalerna påverkas av plasmainstabiliteter i jonosfären

och då speciellt nära polarklyftan. Plasmainstabiliteter skapar oregelbundenheter längs med jordens magnetfält och detta utgör en källa till brus för en OTH-radar. Plasmainstabiliteter och jonosfäriska oregelbundenheter uppstår ofta vid höga latituder, över ca 60 grader (Stockholm ligger på en latitud på ca 59 grader), i polarskensområdet och över polarklyftan. Stora oregelbundenheter uppstår även vid plasmats gränslinjer vid höga latituder såsom vid: plasmapausen (där plasmafären slutar); norrskensområdet; lågtrycksområdet mellan plasmapausen och polarskensområdet; polarkalotten (området innanför norrskensovalen); samt i polarklyftan, se Figur 1. Oregelbundenheterna ökar signifikant under magnetiska stormar.

4.1.3 Spaning från satellit

En militär organisation som äger egna satelliter ställs självklart inför samma problem som övriga satellitägare när det gäller rymdvädrets effekter på kontroll, manövrering och design av satelliten. Detta beskrivs närmare i avsnitt 4.2.1.

Missiler detekteras med hjälp av satellitsensorer som opererar i det infraröda, optiska eller ultraviolette området. Det är i uppskjutningsfasen som det är lättast att detektera missiler. Signalen måste kunna urskiljas från naturliga strålningskällor såsom emissioner från hydroxid (OH), koldioxid (CO₂) och kväveoxid (NO), därför är missiler lättast att detektera i tre våglängdsområden, där den naturliga strålningen är låg, mellan OH (3,5 mikrometer) och CO₂ (4,3 mikrometer), mellan CO₂ (4,3 mikrometer) och NO (5,3 mikrometer) samt vid våglängder längre än 5,3 mikrometer. Infallande partiklar och uppvärmning från strömmar relaterade till rymdväder ökar den naturliga bakgrundsstrålningen vilket resulterar i att bakgrundsstrålningen även täcker de våglängdsområden där missiler kan upptäckas. Effekten av detta kan hålla i sig upp till timmar efter ett stort rymdväderutbrott. Ett säkert tecken på infallande partiklar är norrsken. Med andra ord reducerar rymdvädereffekter möjligheten till att upptäcka missiluppskjutningar vid höga latituder.

På spaningssatelliter, som självklart används för andra ändamål än upptäckt av missiluppskjutning, påverkas även instrument och sensorer på satelliterna av energetiska partiklar och magnetiska stormar. Exempel på detta är observationer av energetiska partiklar som skapat ljusblixtar i instrumentdetektorer på satelliten SOHO. Ur militär synpunkt skulle dessa effekter kunna tolkas som missiluppskjutningar eller andra fientliga militära aktioner. Genom att använda prognoser för t.ex. partikelflödet skulle falsklarm av denna sort kunna elimineras.

Oregelbundenheter i jonosfären är av betydelse för syntetisk aperturradar (SAR). Oregelbundenheterna påverkar bland annat det totala elektroninnehållet (TEC), vilket i sin tur gör att polarisationen på radarsignalen förändras. Den förlorade informationen kan här återskapas till viss del genom att skapa TEC-kartor med hjälp av GPS-signaler. Användare bör nyttja prognoser för oregelbundenheter i jonosfären och mätningar av TEC. De områden som påverkas mest är vid höga latituder, vid norrskensovalen och vid polarkalotten.

4.1.4 Satellitkommunikation, telemetri och kommando

Satellitoperatörer måste ha god kontakt med satelliten för att kunna övervaka hälsa och status, identifiera anomalier och för att skicka kommandon för kontroll av satelliten samt för kontroll av dess banmanövreringar. Det är viktigt att störningar på dessa telemetri- och kommandolänkar minimeras för hela satellituppdragets överlevnad.

För en användare av satellitkommunikationer som tjänst är det viktigt att kommunikationslänken fungerar och förblir ostörd. Radio- och tevesändningar, mobiltelefoner och trådlös kommunikation är exempel på tjänster som påverkas av oregelbundenheter i jonosfären, scintillationer och radiostrålning från solen.

Absorption är inte ett problem vid satellitkommunikation men däremot skapar brytning och spridning problem. Brytning gör att signalen böjs av medan spridning fördröjer signalen. Ett annat fenomen är Faradayeffekter d.v.s. när en elektromagnetisk signal propagerar genom ett plasma i ett magnetiskt fält så resulterar det i att signaler som från början var planpolariserade roteras vilket påverkar mottagning av signalen. Faradayeffekter påverkar lägre frekvenser mer än högre.

Scintillation som har beskrivits ovan är vad som påverkar satellitkommunikation mest. Lägre frekvenser påverkas mer än högre, VHF som används militärt påverkas betydligt mycket mer än t.ex. frekvenser på C-bandet.

4.1.5 Navigerings och tidsynkroniseringssystem

Satellitnavigeringssystem som t.ex. GPS påverkas av det totala elektroninnehållet (TEC) i jonosfären vilket varierar med bland annat geomagnetiska stormar. Effekterna av TEC är färre för flerbandsmottagare därför att de mäter effekterna i jonosfären på signalen och korrigerar för detta i realtid. Effekterna kan introducera fel med upp till 300 nanosekunder vilket innebär ca 100 meter i positionsfel om ingen kompensering för felet görs.

Scintillationer orsakade av plasmainstabiliteter kan orsaka störningar på satellitnavigeringssystem oavsett om systemet är baserat på en eller flera frekvenser vilket betyder att mottagaren har svårt att låsa på signalen eller att mottagaren visar fel i position. Kraftigare scintillationer, upp till 20 dB, leder till att mottagaren förlorar signalen helt.

Den utbredda användningen av GPS är ett ganska nytt fenomen och har hittills använts under den "snälla" perioden av solens elvaåriga cykel. Detta innebär att det inte är riktigt klarlagt vilka effekter ett solmaximum kommer att ha på användningen av GPS och andra satellitnavigeringssystem.

Radionavigeringssystem såsom LORAN-C påverkas av jonisation i de lägre D- och E-lagren och kan resultera i fas- och amplitudskift i signalen. GPS påverkas ej av detta fenomen.

4.1.6 Ubåtskommunikation på ELF- och VLF-banden

Kommunikation med ubåtar sker oftast på frekvenser i ELF- (30 - 3000 Hz) eller VLF-området (3 - 30 kHz). Anledningen till att så låga frekvenser används är att låga frekvenser har ett större penetrationsdjup i vattnet än vad högre frekvenser har. På detta sätt kan ubåtar ta emot kommunikationssignaler på några tiotals meters djup och slipper gå upp till ytan och riskera att bli upptäckta. ELF- och VLF-signalerna propagerar genom jonosfären och påverkas därmed av förändringar i jonosfären. Förändringarna kan påverka fas och amplitud på signalen, i vissa fall kan signalen utsättas för en fasändring på 180 grader. Signalerna kan också påverkas av förändringar i elektrontäthetsprofilen i de lägre regionerna av jonosfären. Detta gäller speciellt om förändringarna orsakas av:

- Från solen infallande elektroner vid höga latituder.
- Infallande partiklar från magnetosfären.
- Ökad jonisation i de lägre skikten i jonosfären på grund av röntgenstrålning från solen och på grund av gammastrålning från neutronstjärnor.

Röntgenstrålning kan störa ut signaler i upp till flera minuter medan energetiska partiklar från solen kan störa kommunikationssignalerna i upp till flera dagar. Det är känt att gammastrålning kan ändra amplituden på kommunikationssignalerna med upp till 20 dB.

4.2 Effekter på rymdbaserade system

Rymdmiljön i sig är redan från början en fientlig miljö att befinna sig i. Rymdfarkostens bana påverkar i vilken grad rymdfarkosten utsätts för störningar och risker. En rymdfarkost utsätts ständigt för UV-strålning, plasma (elektroner och joner), neutrala partiklar, extra energetiska partiklar, solvinden, rymdskrot och mikrometeoroider. Satellittillverkare har idag en god förståelse för rymdmiljön och vet hur man bör skydda sin satellit mot rymdmiljöns inverkan men när vi pratar om rymdväder så syftar vi på stora eller plötsliga förändringar i dessa parametrar som utsätter satelliten för extrem och oplanerad påverkan.

4.2.1 Satellitsystem

Rymdfarkosturladdning är vad som orsakar flest och störst problem för rymdfarkoster. Balansen mellan laddade partiklar som faller in mot en satellit och som emitteras från en satellit bidrar till två typer av urladdningsproblem:

- Energetiska elektroner och joner som ej penetrerar rymdfarkosten kan bidra till negativa yturladdningar.
- Partiklar med tillräckligt hög energi kan penetrera farkosten och ge upphov till urladdningseffekter inne i satelliten.

Partiklar som bidrar mest till urladdningsproblemen är elektroner med en energi av 10 till 100 keV (elektronvolt). Elektronpopulationen varierar med den magnetosfäriska aktiviteten. Urladdningsproblemen beror i hög grad även på den omgivande plasmadensiteten, speciellt vid låga altituder som i polarskansområ-

det i LEO- och PEO-banor. För att undvika för stor inverkan av dessa effekter kan man mäta ett antal olika parametrar som sedan används för prognoser och analyser, dessa är bland annat:

- Den magnetosfäriska aktiviteten genom att observera solvinden från jorden (hastighet, densitet och interplanetärt magnetfält).
- Elektroner mellan 10 till 100 keV som är huvudorsaken till yturladdningsproblem på höga altituder.
- Elektroner i området 1 till 10 keV som är huvudorsaken till yturladdningsproblem vid lägre altituder.
- Elektronflödet i området 0,3 till 5 MeV som ger upphov till urladdningar inne i en rymdfarkost.

En annan effekt av solens utbrott är *Single-Event Effects* (SEE) vilket i princip består av enstaka partiklar från solen eller kosmisk strålning, med mycket hög energi, ca 10 MeV för protoner och mer för tyngre joner som faller in mot satelliten. Energin är så pass hög att partikeln kan ta sig igenom det yttre skyddet på satelliten och även genom skydd och isolering av elektroniken ombord på satelliten. Partiklarna kan orsaka så kallade *Single-Event Upset* (SEU) och på så sätt åstadkomma felaktiga kommandon eller ge felaktiga data från instrumenten. Felaktiga kommandon kan orsaka allvarliga problem för satelliten. Energetiska partiklar från solen är direkt relaterade till solaktiviteter såsom flares och koronamassutkastningar. Rymdfarkoster som passerar de inre strålningsbältena är väldigt utsatta. Här kan magnetiskt infångade protoner ha energier upp till 100 MeV. SEE:er uppstår sammanfattningsvis av:

- Solprotoner i området 10 MeV till 1 GeV (penetrerande partiklar).
- Infångade joner i området 10 till 100 MeV.
- Kosmisk strålning med energier över 1 GeV.

EUV-strålning bidrar till upphettning och jonisering av neutrala atomer i jordens övre atmosfär. En ökning av EUV-strålning gör att den övre gränsen för den neutrala atmosfären höjs (atmosfären expanderar). Detta bidrar i sin tur till en ökning av "atmosfärmotståndet" för satelliter. Hur mycket satelliten bromsas upp är beroende av tvärsnittsarean på farkosten, hastigheten på satelliten, partikeldensiteten, och en uppbromsningskoefficient (beror på altitud och satellitens materialsammansättning). Det är dock partikeldensiteten i atmosfären som är svår att bestämma därför att den varierar efter vilken dag på året det är, latitud, den lokala tiden och självklart solens samt magnetosfärens aktivitet. Indexet F10,7, se avsnitt 5.1, och EUV är starkt korrelerade till solens aktiva regioner. Aktiva regioner är ofta oförändrade från dag till dag och återkommer från en solrotation till en annan därför tas det hänsyn till just varaktighet och upprepning vid förutsägelser av F10,7. Detta index ger en indikation på hur atmosfärmotståndet förändras och kan ge satellitoperatörer tid att göra höjjusteringar för att undvika för tidigt återinträde i atmosfären. Detta är speciellt viktigt för den internationella rymdstationen (ISS), Hubble-teleskopet (HST) och satelliter i låg bana.

Solcellerna i en satellits solpaneler är dess primära energikälla. Dessa förstörs av energetiska partiklar från solen. Partiklar med tillräckligt hög energi penetrerar det första lagret som skyddar solcellerna men stannar sedan där och tillför energi till cellerna vilket ger upphov till att atomer förflyttar sig i materialet och ger upphov till permanenta skador på solcellerna.

Instrument för optisk avbildning påverkas av att partiklar som protoner eller tunga joner ökar bakgrundsbruset. Instrumenten kan också påverkas av bromsstrålning vilket är infallande elektroners interaktion med materialet.

4.2.2 Bärraketer

Generellt så är effekterna av rymdvädet desamma för bärraketer som för satelliter. Ändå hinner inte bärraketerna störas ut på samma sätt som satelliterna förutom om de under uppskjutningen träffas av högenergetiska partiklar från solen eller om raketen färdas genom strålningsbältena (nära den så kallade *South Atlantic Anomaly*) under en lång tid. Det senare är fallet för uppskjutningar med bärraketen Ariane V till geostationära överfartsbanor (GTO) eller interplanetära banor. Under en uppskjutning med Ariane V har det registrerats SEU:er utan att solen hade ett utbrott med högenergetiska partiklar så antalet SEU:er kan mycket väl öka om solen skulle ha ett utbrott under en uppskjutning. Sannolikheten är dock låg att effekterna skulle innebära fatala fel eftersom bärraketerna ofta har redundanta datorer ombord.

4.2.3 Bemannade rymdfärder

I princip så utsätts astronauter för samma effekter (urladdning och SEE:er) som en satellit när de befinner sig utanför rymdfarkosten på rymdpromenader. Rymddräkten kan då liknas vid en satellitkropp fast med lägre skydd. Oftast försöker man att befinna sig "bakom" satelliten för att alltid vara skyddad mot infallande rymdskrot och meteoroider. När energetiska partiklar från solen slungas ut är astronauter inte tillåtna att lämna rymdfarkosten då detta kan vara dödligt. Jonisation i levande celler leder till förstörelse av DNA och ökar risken för cancerbildning.

Vid interplanetära uppdrag eller månfärder så skyddas astronauterna inte av jordens magnetfält och strålningsflödet blir då mycket högre än vid uppdrag till rymdstationen, ISS. Vid sådana uppdrag bör det finnas bättre skydd vid rymdväderutbrott t.ex. sarkofagliknande kistor som astronauterna kan ta skydd i.

Självklart är prognostisering av rymdväder nödvändigt vid bemannade rymdfärder. Parametrarna som beaktas är desamma som för effekter på rymdfarkoster, men det är här även viktigt att titta på den totala strålningsdosen som astronauterna utsätts för.

4.3 Effekter på flygplan, flygpersonal och flygelektronik

Flyg befinner sig vanligen på höjder under 12 kilometer och här skyddas atmosfären mot den primära kosmiska strålningen. Sekundära partiklar såsom neutroner, mesoner och elektroner utgör däremot ett större hot då de ansamlas och når populationsmaximum på en höjd av 18 kilometer. Vid en höjd på 9 kilo-

meter har partikelstrålningen minskat med en faktor tre, vid havsnivån har partiklarna minskat med en faktor 300. På grund av dessa sekundära partiklar så är strålningsfarorna vid flyghöjder lika som vid låga satellitbanor. Under de senaste tio åren har det påvisats SEE-effekter i flygelektronik, även i system på havsnivå. Vid 18 kilometers höjd kan neutroner genom kärnreaktioner indirekt jonisera materialet i elektroniken. Över 18 kilometer interagerar joner med materialet med jonisation som följd. Problemen förväntas öka med den ökande användningen av mikroelektronik i flygfarkoster.

Även flygpersonal påverkas av de sekundära partiklarna. Vid höjder upp till 18 kilometer är bidraget från joniserande partiklar såsom protoner, elektroner och myoner lika stort som bidraget från neutronernas indirekta jonisering. Över 18 kilometer måste man ta hänsyn även till joner.

Den parameter som är intressant i detta sammanhang är flödet av den kosmiska strålningen.

4.4 Effekter på markbaserade system

Stora elektriska strömmar flyter kontinuerligt i magnetosfären och jonosfären. När förändringar i solvinden når magnetosfären resulterar det i förändringar i dessa strömmar. Störningarna fortplantar sig i det geomagnetiska fältet speciellt till höga latituder vilket ger upphov till norrsken och intensiva jonosfäriska strömmar. Variationerna i magnetosfären och jonosfärens strömmar ses här på jorden som geomagnetiska stormar och enligt Faradays induktionslag innebär en geomagnetisk variation även ett geoelektriskt fält. Existensen av geoelektriska fält antyder att det existerar potentialskillnader mellan olika punkter på jordens yta. Detta ger upphov till geomagnetiskt inducerade strömmar (GIC). Ett exempel på detta är spänningen som ligger över två jordade punkter i två olika transformatorer vilket ger upphov till att det flyter en ström i elledningen mellan de två transformatorerna. Geomagnetiskt inducerade strömmar förekommer även i andra långsträckta ledare såsom pipelines, telekommunikationskablar och järnvägsutrustning.

I elkraftssystem kan GIC resultera i stora strömavbrott vilket har hänt förut. Det mest kända fallet är strömavbrottet i Québec, vilket det går att läsa mer om på "Space Weather Canada" [9]. Under hösten 2003 drabbades även 50 000 av Sydkrafts kunder av strömavbrott i södra Sverige på grund av GIC.

Begravda pipelines utsätts lättare för korrosion om en elektrisk ström leder mellan metallen och den omgivande marken, t.ex. om isoleringen inte är tillräcklig. Geomagnetiskt inducerade strömmar ökar spänningen mellan rör och mark vilken i sin tur troligtvis medför ökad korrosion.

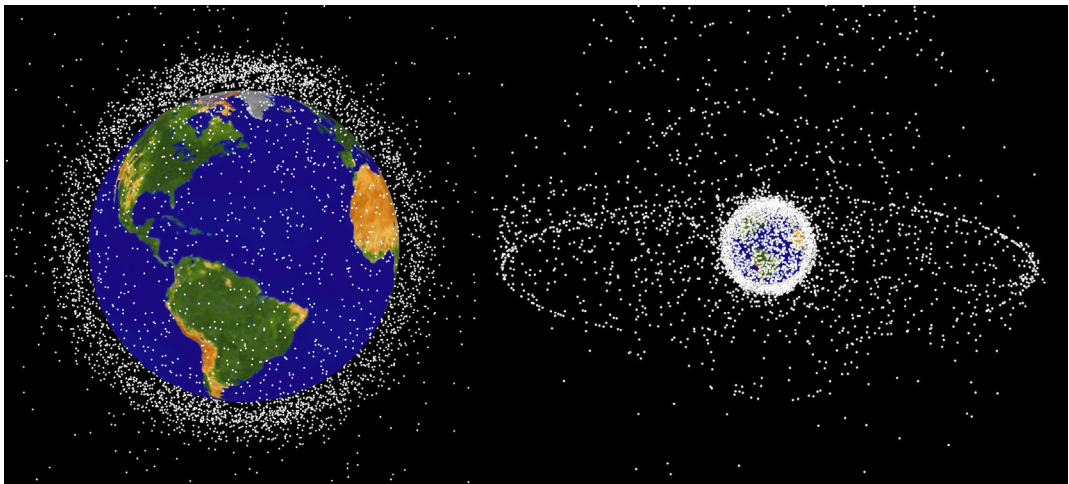
På samma sätt som GIC uppstår i elkraftssystem och pipelines så uppstår dess effekter även i telekablar. Dagens telekabelsystem är dock inte lika känsliga för GIC som de äldre systemen var. Däremot bör inte GIC ignoreras då tekniken blir mer och mer avancerad och därmed möjligen känsligare. Optisk fiber som används för telekommunikation utsätts däremot generellt inte för GIC överhuvudtaget. Telekablar som används för ubåtskommunikation skulle kunna utsättas för GIC och skapa problem. Spänningarna över transatlantiska kabel-

länkar och dylikt övervakas ständigt. GIC kan även skapa oväntade spänningar över järnvägsutrustning som resulterar i att t.ex. trafikljus slår om.

Genom att studera strömmarna i jonosfären kan man övervaka GIC. Detta sker med hjälp av markbaserade magnetometrar. Effekterna är lokala vilket gör att det är viktigt att ha mätutrustning nära systemet. Frekvensområdet för GIC är 0,001 till 0,1 Hz. Eftersom strömmar i jonosfären kommer av magnetosfärisk aktivitet så är det också viktigt att titta på olika magnetosfäriska aktivitetsindex.

4.5 Effekter på atmosfären

Det finns en koppling mellan rymdväder och klimatet på jorden men hur denna koppling fungerar är inte utrett. Det är heller inte klarlagt hur stor inverkan rymdvädet har på det jordiska klimatet. Den starkaste kopplingen härrör från blixurladdningar som rör sig uppåt från åskmoln till jonosfären. Blixurladdningar värmer upp atmosfären och ger upphov till jonisation vilket skapar förändringar i globala elektriska strömmar och jordklimatet.



Figur 5. Bilden till vänster visar jorden och rymdskrot ut till ca 2000 km och bilden till höger visar jorden och omkringflygande rymdskrot ut till ca 36 000 km. Bilden visar objekt som övervakas av NASA, 95 % av objekten är rymdskrot och resten är fungerande satelliter. Courtesy of NASA².

4.6 Rymdskrot och meteoroider

Till rymdväder räknas ibland också rymdskrot och meteoroider eftersom det är något som påverkar oss från rymden. Kollisioner mellan kroppar ute i vårt solsystem skapar små partiklar som benämns meteoroider eller interplanetära dammpartiklar, de har en diameterstorlek på en millimeter eller mindre. Rymdskrot är föremål som människan har placerat i rymden som inte längre tjänar något syfte. Just nu räknar man med att det finns ca 11 000 föremål med en storlek större än 10 centimeter, se Figur 5.

² Orbital Debris Graphics. 1 maj 2004.

<http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/photogallery/beehives.html> (2004-11-17)

Rymdskrot far runt med en hastighet på runt 7 kilometer i sekunden och meteoroider kan ha hastigheter på 30 kilometer i sekunden. Stora föremål eller partiklar kan orsaka förödande fysiska skador på en rymdfarkost, små föremål eller partiklar degraderar däremot instrument och orsakar söndervittring av rymdfarkostens ytor.

5 Hur rymdväder mäts

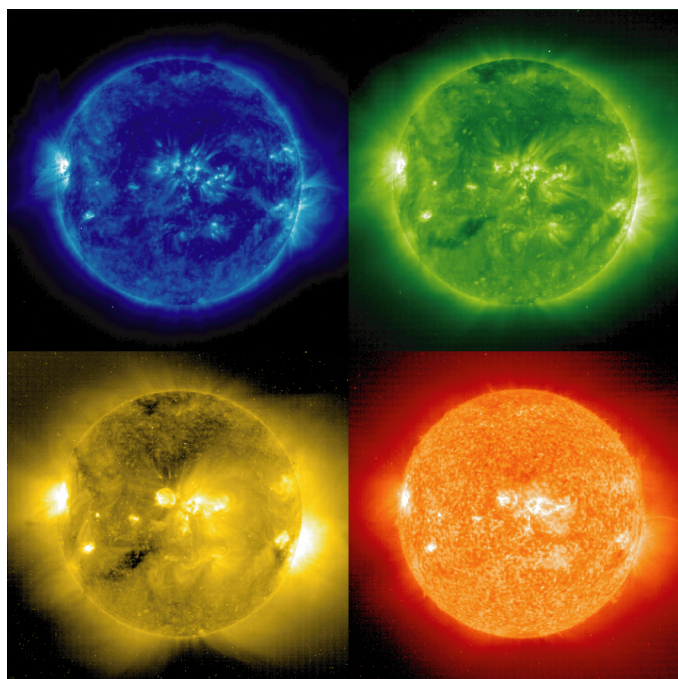
Detta avsnitt beskriver en rad mätbara parametrar som kan fungera som indikatorer för rymdväder. Avsnittet ger också en överblick över de markbaserade och rymdbaserade instrument som används vid mätningarna.

5.1 Rymdväderparametrar

Det finns ett antal intressanta parametrar att titta på när det gäller rymdväder både för att förstå processer från solen till jorden och för att kunna göra prognoser. Nedan följer en lista av parametrar som är definierade i en studie av Murphy och Rodgers [10]. De krav som specificeras i uppräkningslistan nedan utgör kraven för att mätningarna skall kunna ge ett väsentligt bidrag till prognoser för förestående rymdväder.

- Avbildning av solen i våglängdsområdet EUV och röntgen. Dessa bilder kan fås från satelliten SOHOs EUV-instrument (EIT), se Figur 6. För att kunna tolka informationen i bilderna torde vinkelupplösningen ligga på 5 bågsekunder och bilderna bör tas minst en gång i timmen.
- Polarskensbilder tagna från marken. För dessa bilder används CCD-kameror. Kameran ger realtidsinformation om position och intensitet på polarsken. Instrument som finns tillgängliga är t.ex. CANOPUS (kanadensiskt) och MIRACLE (skandinaviskt). En upplösning på 1024×1024 pixlar är lämpligt.
- Polarskenets gräns i riktning mot ekvatorn *auroral equatorward boundary*. Positionen för gränsen härleds från mätningar av infallande elektroner och joner på instrument ombord på polära satelliter. Den bör mätas med en tidsupplösning på en timme. Det kan dock tänkas att avbildning av polarsken, beskrivet ovan, kan vara tillräcklig.
- Flödet av röntgenstrålning. Röntgenstrålning emitteras vid flares och joniserar D-regionen i jonosfären. Ungefär en minuts upplösning krävs för att upptäcka början till en röntgenflare på solen och flarens magnitud. GOES-satelliterna mäter detta i spektralbanden 0,1 - 0,8 nanometer och 0,05 - 0,4 nanometer.
- Ultraviolett strålningsflöde. Denna parameter är viktig för dess effekt på jonosfären och övre atmosfären.
- F10,7 är ett index som beskriver hela solens radiostrålning vid våglängden 10,7 centimeter (ca 2800 MHz) och enheten är $10^{-22} \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{Hz}^{-1}$. Parametern används för uppskattning av solens EUV-strålning. Detta index är relaterat till antalet solfläckar (SSN), se nedan.

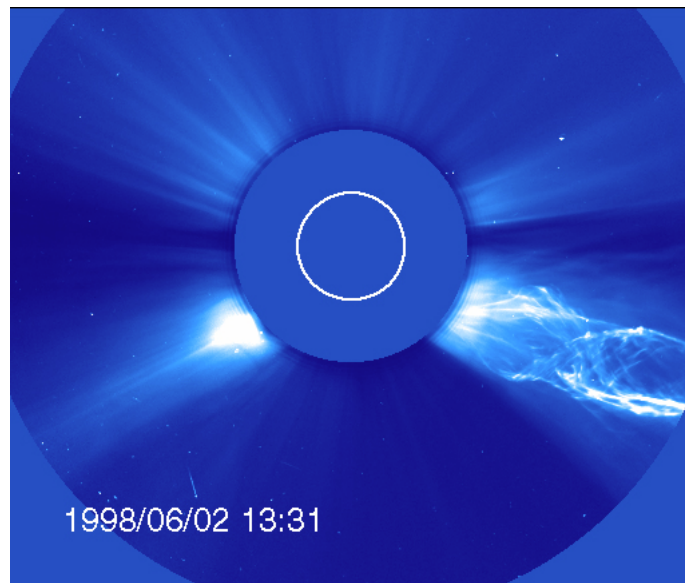
- SSN är ett medelvärde av antalet solfläckar under en månad. Indexet publiceras rutinmässigt av SIDC i Belgien [11].



Figur 6. Ett exempel på hur bilder på solen ser ut med EIT vid fyra olika våglängder (171 ångström, 195 ångström, 284 ångström och 304 ångström). Bilderna är tagna den 20 augusti 2004 inom en timmes intervall. Courtesy of SOHO (ESA & NASA)³.

- Neutroner är en produkt av kosmisk strålning och solprotoner. Mätningar görs med neutrondetektorer på marken. Neutronernas energi ligger mellan några MeV och ca 1 GeV. Mätningar kan även göras ombord på flygplan men dessa mätningar är dock ovanliga idag.
- Kp-index är ett medelvärde av magnetfältstyrka över tre timmar och är en allmän indikator på magnetosfärisk aktivitet. Mätningarna görs från ett stort antal stationer på marken. Upplösningen ligger på tre timmar men indexet är inte tillgängligt i realtid.
- DST-index indikerar stormlika magnetiska störningar och även aktivitet i ringströmmen. Indexet baseras på ett nätverk av geomagnetiska observationer nära ekvatorn och beskriver intensiteten på ringströmmen. Upplösningen ligger på en timme.
- AE-index - detta är ett markbaserat index med en upplösning på en minut. Indexet baseras på mätningar i norrskensområdet med markbaserade magnetometrar. Det är oftast inte tillgängligt i realtid. Indexet kan ersättas med CANOPUS CU och CL index eller med *auroral kilometric radiation* (AKR), se nedan.

³ SOHO EIT synoptic GIF Images. 20 augusti 2004.
http://umbra.nascom.nasa.gov/eit/eit_full_res.html (2004-08-20)

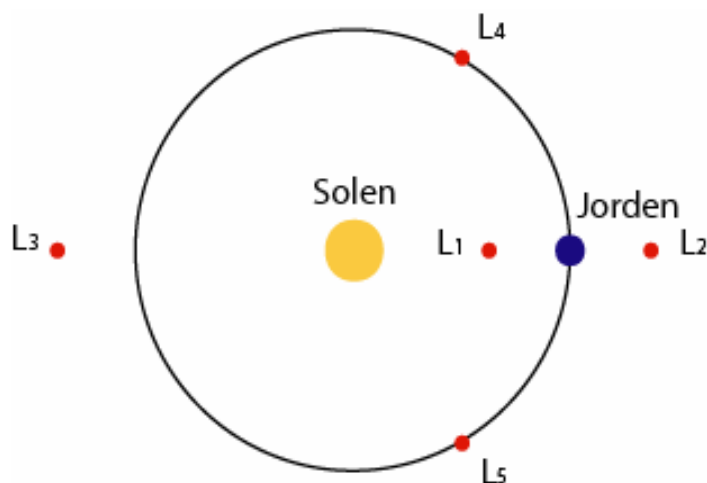


Figur 7. En avbildning av solkronan med LASCO C2 där det klart och tydligt kan ses hur plasmat i en koronamassutkastning har ett spiralformigt utseende. Courtesy of SOHO (ESA & NASA)⁴.

- Avbildning av solens korona i våglängdsområdet synligt ljus eller UV, se Figur 7. Bilderna visar förekomst av koronamassutkastningar och kan fås från instrumentet LASCO ombord på SOHO-satelliten. Vinkelupplösningen på bilderna bör vara minst 11 bågsekunder. En kompletterande teknik är interplanetära radioscintillationer.
- Interplanetära radioscintillationer fungerar som ett komplement till avbildning av kronan för upptäckt av koronamassutkastningar. Denna teknik används också för beräkning av solvindens densitet och hastighet.
- Neutralskiktspotentialen, se neutralskiktsströmmen i Figur 1. Denna parameter är nära relaterad till polarkallottspotentialen (PCP). Fältet kan mätas med elektriska fältmätningar eller jondrifter i jonosfären.
- Jondrift i jonosfären. Denna parameter används för att härleda det elektriska fältet i polarplymen, d.v.s. neutralskiktspotentialen, som nämns ovan och för att härleda potentialen i polarklyftan. För att analysera polarskenskzonen och polarklyftan behövs mätningar ner till ett antal sekunder.
- Solvindens hastighet påverkar den magnetosfäriska aktiviteten. Mätningar görs av energiinnehållet i protonpopulationen och konverteras sedan till en hastighet. Mätningar kan även göras av elektroner. Mätningarna görs bäst från Lagrange-punkten L1, se Figur 8, för att få en oavbruten täckning och ungefär 40 minuters förvarning för magnetosfäriska effekter. Instrumenten måste klara en hastighetsupplösning på minst 10 kilometer i sekunden.

⁴ The Best of SOHO Images. 5 juni 2003. <http://sohowww.nascom.nasa.gov/bestofsoho> (2004-08-10)

- Solvindsdensitet är liksom solvindshastigheten en parameter som beskriver en av drivkrafterna för magnetosfärisk aktivitet. Det krävs mätningar i området 0,1 till 100 partiklar per kubikcentimeter och en noggrannhet på 10 procent eller 0,1 partiklar per kubikcentimeter.



Figur 8. Illustration över de fem Lagrange-punkterna. De fem punkterna är jämviktslägen mellan tre kroppar, i detta fall mellan jorden, solen och en rymdfarkost. SOHO är ett exempel på en rymdfarkost som är utplacerad att röra sig i en bana runt Lagrange-punkten L_1 .

- Jordens magnetfält (B). För att analysera geomagnetiskt inducerade strömmar (GIC) behövs en samplingsfrekvens på 10 sekunder. Mätningar görs av den horisontella intensiteten och även av den totala fältintensiteten av jordens magnetfält, enheten är nanotesla (nT). Riktningen kan även mätas i grader och representeras av deklination och inklinations. Intensiteten på jordens magnetfält ligger mellan 18 000 och 65 000 nanotesla. Riskfyllda GIC orsakas av förändringar i den horisontella komponenten av jordens magnetfält och detta sker på höga latituder. Det krävs en upplösning på ca 10 nanotesla.
- Styrkan och riktningen på det interplanetära magnetfältet (IMF). Det magnetiska fältet är, liksom densiteten och hastigheten för solvinden, en faktor som beskriver förutsättningarna för magnetosfärisk aktivitet. Det är som ovan bäst uppmätt i L_1 -punkten och ger då 40 minuters förvarning om magnetosfäriska effekter. Upplösningen bör ligga runt 5 procent eller 0,1 nanotesla. Mätningarna bör spänna mellan -100 nanotesla och +100 nanotesla. För övervakning av urladdningseffekter av rymdfarkoster behövs medelvärden beräknade med ett intervall mellan en kvart och en timme.
- Mätningar av fältkomponenterna i magnetosfären behövs för att skapa dynamiska magnetosfäriska modeller. Dessa modeller används i sin tur till att beräkna penetrationen av kosmisk strålning och solpartiklar i magnetosfären.
- Den kritiska frekvensen (f_oF_2) i F2-lagret i jonosfären. En elektromagnetisk signal totalreflekteras i jonosfären om frekvensen för signalen är lika stor som

eller lägre än plasmafrekvensen, där plasmafrekvensen beror av plasmats elektrontäthet. Plasmafrekvensen för den maximala elektrontätheten i jonosfären kallas den kritiska frekvensen. Om en signal har högre frekvens än den kritiska frekvensen så propagerar signalen igenom jonosfärlagret. Mätningar av denna parameter görs med en jonosond som är en kombinerad sändare och mottagare på marken. Kraven på temporal upplösning beror på hur snabbt omgivningen förändras men 5 minuter räcker för de flesta applikationer. Mätområdet bör ligga mellan 1 och 30 MHz och det krävs en upplösning på 0,1 MHz.

- Det totala antalet elektroner längs med en signals väg genom jonosfären (TEC), enheten är elektroner per kvadratmeter. TEC används för att bestämma fördröjning och riktningsförändring på radiosignaler i jonosfären. Mätningar utförs från marken men kan också bestämmas från GPS-signaler. En temporal upplösning på 1 timme räcker men i polarskansområdet och vid polarklyftan bör en högre upplösning på ner till 5 minuter användas. Mätningarna bör spänna över området 0 till 50 000 elektroner per kvadratmeter med en upplösning på 1000 elektroner per kvadratmeter.
- "Kalla" joner bidrar till urladdningseffekter av rymdfarkoster i polära banor. För att få en bra uppskattning av dessa behövs bra täckning av polarskensonen d.v.s. bra rumslig och temporal upplösning. Mätningar av den totala jondensiteten är ett krav.
- 10 - 100 keV elektroner - för mätningar i geostationär bana (GEO) krävs en upplösning på 1 timme, för mätningar i elliptiska banor som GTO behövs en tidsupplösning på 1 minut. Noggrannheten i flödet bör ligga på 25 procent.
- 1 - 10 keV elektroner - mätning av elektroner med en energi mellan 1 och 10 keV. Samma mätningar görs som för elektroner med energi mellan 10 och 100 keV.
- >10 MeV joner - en spektralupplösning på 1 GeV krävs. Mätningarna måste utföras i rymden t.ex. i L1-punkten eller i GEO-bana. Mätningarna kan kombineras med mätningar av 100 MeV partiklar eller av galaktisk kosmisk strålning. Tidsupplösningen bör ligga på 1 timme.
- >10 MeV protoner - mätningar krävs i LEO, MEO och GTO. För att kunna skydda en rymdfarkost behövs en tidsupplösning på ett par timmar. För bemannade farkoster behövs dock en tidsupplösning på några minuter.
- >100 MeV joner - mätningar kan göras med ett antal olika instrument, några exempel på instrument är *Solid-State*-detektor (SSD), Cerenkov-detektor och scintillationsspektrometer. Mätningar bör utföras utanför magnetosfären d.v.s. i GEO. Noggrannheten bör ligga på 25 procent.
- Relativistiska elektroner - för urladdningsproblem bör mätningar utföras med 1 timmes intervaller. För uppskattning av doser bör tidsupplösningen vara bättre än så. Mätningar görs i energispannet 0,3 - 5 MeV. För mätningar av partikelflödet krävs 10 procent noggrannhet.

- En skala där atmosfärens tryck- eller densitetsförändringar anges i förhållande till altituden *Atmospheric Scale Height*. För att övervaka strålningsbältena behövs ett samplingsintervall på en dag. Noggrannheten måste ligga på ca 10 kilometer.
- Rymdskrot – föremål som är större än 10 centimeter i LEO och större än 1 meter i GEO kan övervakas med radar. Mindre föremål kräver detektorer i banan. Om partiklar som endast väger några gram eller är större än 1 centimeter träffar en rymdfarkost kan detta orsaka en förlust av farkosten. Partiklar som väger några milligram och är större än 1 millimeter kan fortfarande penetrera en farkost och orsaka inre skador. Mindre partiklar än så kan orsaka ytskador. Mätningar av partiklar i storleken mikrogram är därför viktigt. Det behövs även information om partiklarnas hastighet vid kollision och dess riktning.
- Mikrometeoroider – eftersom hastigheten på dessa är högre än för rymdskrot så är i synnerhet mindre partiklar förödande. Dessa kan också bidra till plasmaeffekter. Partiklar som har en storlek på 0,1 mikrometer eller mer är relevanta att mäta på grund av deras effekter.
- Strålningsdoser ombord rymdfarkoster - samma mätinstrument som används här kan användas för att mäta galaktisk kosmisk strålning och solprotoner. Det finns ett antal instrument att välja på t.ex. *Radiation-sensing Field Effect Transistor* (RadFET) eller scintillationsspektrometer.
- Polarsken orsakas bland annat av energetiska elektroner som faller in mot atmosfären. Dessa elektroner kan under denna process även generera intensiv radiostrålning mellan frekvenserna 100 och 500 kHz. *Auroral kilometric radiation* (AKR) är en indikation på denna polarskensaktivitet och är nära relaterat till AE indexet.
- Interplanetära radioutbrott. För att identifiera interplanetära chocker såsom koronamassutkastningar så detekteras radiovågor i intervallet 0,3 till 3 MHz. Dessa frekvenser penetrerar oftast inte jonosfären och därför måste mätningarna göras i rymden.

För att få en överblick över vilka system och funktioner som påverkas av rymdväder, vilka effekterna är och vilka parametrar som ger upphov till dessa effekter hänvisas läsaren till Tabell 3 i bilaga B.

5.2 Instrument och sensorer

Markbaserade instrument har fördelen av att vara billigare och att de är enklare att underhålla och uppgradera. Det är därför endast motiverat att använda sig av satellitbaserade instrument när det är absolut nödvändigt. Vissa observationer kan dock inte utföras från marken, t.ex. är avbildning i UV- och röntgenområdet omöjligt på grund av absorption i atmosfären vid dessa våglängder. Rymdbaserade instrument kan även ge bättre upplösning och bättre mätkänslighet, exempelvis blir bilder av koronamassutkastningar mycket bättre när de tas i rymden därför att man slipper problem med spridningseffekter i atmosfären. Instrument som arbetar i det optiska- och radiovågsspektrat kan användas både

på marken och i rymden. Optiska instrument inkluderar koronagrafer och H α -teleskop. Radiovågsinstrument inkluderar spektrometrar som mäter på frekvenser mellan MHz och GHz. Dessa instrument skulle dock ge bättre upplösning i mätningarna om de utfördes i rymden i stället för på marken. Det behövs ofta stora nätverk av instrument när de nyttjas på marken.

De operationella rymdbaserade systemen som tillhandahåller rymdväderdata idag är bland annat SOHO som är ett samarbete mellan ESA och NASA, Cluster (ESA), ACE (NASA), GOES (NOAA) och IMAGE (NASA). Dessa system bär med sig en uppsättning av olika instrument vilka beskrivs överskådligt nedan och i Tabell 1. Detta avsnitt är till stor del baserat på dokument av Pick et al. [12] och Coates et al. [13].

Tabell 1. En sammanställning av instrument för rymdväder.

Instrument för rymdväder	
Satellitbaserade	Markbaserade
Koronagraf	Koronagraf
Avbildning av hela solens yta <i>whole disk imager</i>	Magnetograf
Jonspektrometer	H α -avbildning
Röntgenteleskop	Radiospektrograf
Magnetometer	Interplanetära scintillationer
Mätning av elektriskt fält	Neutron och myon detektor
UV-avbildning	Magnetometer
Spektrometer för termiska elektroner	Jonosond
Spektrometer för medelenergetiska elektroner	GPS-mottagare
Spektrometer för medelenergetiska joner	Inkoherent spridningsradar
Partikeldetektor för högenergetiska partiklar	Superdarnradar
Dosimeter	Optisk interferometer
	Riometer

Avbildning av hela solens yta görs i EUV- och röntgenområdet. Ett exempel är instrumentet EIT på SOHO. Figur 6 ger exempel på avbildning vid fyra olika våglängder.

En spektrometer mäter över ett specifikt energi- och densitetsintervall och ger hastighet och även massan på partiklarna man avser att mäta. En noggrann mät-

ning av enskilda spektrallinjer görs med en spektrometer, medan en spektrograf medger upptagning av ett helt spektrum.

Ett röntgenteleskop mäter flödet av röntgenstrålning från solen, ett exempel är SXI på satelliten GOES.

Mätning av elektriskt fält görs med långa antenner som monteras på satelliter. De mäter egenskaper hos plasmat såsom t.ex. jonosfärens elektriska fält. Exempel på sådan utrustning finns på satellitsystemet Cluster.

Med ett UV-teleskop avbildas plasmasfären, se Figur 1, som befinner sig utanför jonosfären. Det är bland annat möjligt att med detta instrument prediktera faskift för t.ex. GPS-signaler. Ett exempel är EUV-instrumentet på satelliten IMAGE.

En partikeldetektor är en utrustning för registrering och mätning av laddade partiklars energi, såsom elektroner och protoner. Partiklarna faller in mot en givare eller sensor vilket ger upphov till en signal, ofta i form av en elektrisk puls.

En dosimeter mäter strålningsdosen från energetiska partiklar. Dosimetern visar absorberad energi per massenhet i ett bestrålat material, t.ex. vävnad. Resultatet anges antingen som absorberad dos per tidsenhet eller som totalt absorberad dos under viss tid.

En koronagraf skapar artificiella solförmörkelser, se Figur 7, genom att blockera den starkt lysande solskivan vilket möjliggör observationer i synligt ljus av solkoronan vid andra tillfällen än vid naturliga solförmörkelser. Koronagrafen LASCO på satelliten SOHO kan bland annat ge data för beräkningar av hastigheten på koronamassutkastningar som rör sig mot jorden. SOHO tar ca 10 bilder per timme.

En magnetograf är ett instrument för automatisk registrering av tidsvariationerna hos ett magnetiskt fält. Instrumentet mäter den splittring av spektrallinjer som uppstår i magnetiska fält på grund av Zeeman-effekten. Data som samlas in före en koronamassutkastning ger en fingervisning om vilken riktning det interplanetära magnetfältet har om koronamassutkastningen når jorden.

H α -avbildning ger information om aktivitet i solens kromosfär genom mätningar av en spektrallinje i väte runt våglängden 6563 ångström. Det är möjligt att med denna metod upptäcka en koronamassutkastning om den startar med aktivitet i filamenten.

En radiospektrograf används för att övervaka chocker i solkoronan och heliosfären. Chockerna kan orsakas av koronamassutkastningar, partikelutbrott eller elektronströmmar. Instrumentet analyserar och registrerar spektrumet av radiovågor.

Neutron- och myon-detektorer mäter kontinuerligt intensiteten i kosmisk strålning på jorden.

Magnetometrar är instrument för mätning av en eller flera komponenter av magnetiskt fält.

Superdarn är ett globalt nätverk av HF- och VHF-radarstationer. Radarsystemet mäter bakåtspridning från oregelbundenheter i jonosfärens E- och F-lager.

Jonosonder används bland annat för att registrera och prediktera den kritiska frekvensen (f_0F2) i F2-lagret i jonosfären, men även det totala elektroninnehållet (TEC) och maximala användbara frekvens (MUF).

GPS-mottagare används för att mäta TEC. Här tittar man bland annat på fasförändringar i radiovågssignaler.

Inkoherent spridningsradar såsom t.ex. EISCAT används för att bestämma olika höjdprofiler i jonosfären som t.ex. elektrondensitet, elektron- och jontemperatur samt jonhastighet. Mätningarna är bland annat viktiga för kalibrering av andra rymdväderinstrument.

Optisk interferometer är ett mätinstrument som med interferometriska metoder bl.a. används för längdmätning samt spektroskopi. Instrumentet tillhandahåller temperatur och vinddata från termosfären och är viktigt för att verifiera mätningar gjorda av rymdbaserade instrument.

En riometer mäter absorptionen av kosmiskt brus i jonosfären och kan t.ex. användas för att prediktera scintillationer.

6 Skyddsåtgärder

Det absolut bästa försvaret är kunskap om rymdväder och dess påverkan på människa och materiel; och man har då en möjlighet att skydda sig mot stora påfrestningar. Kunskapen kan även ge t.ex. operatörer möjlighet att utesluta störningar, som kan härröra från mjukvaru- och hårdvarufel eller avsiktliga störningar från en fiende, när den egentliga storkällan är rymdväder.

6.1 Fysiska skydd

När ett rymdbaserat system väl har skjutits upp är det svårt om inte omöjligt att i efterhand försöka laga delar eller instrument på satelliten. För rymdbaserade system så används därför traditionell och pålitlig teknik, man väljer att använda material och elektronik som har visats sig fungera vid tidigare uppdrag, för att inte drabbas av obehagliga överraskningar. Materialet i den omgivande satellitstrukturen väljs så att det skyddar optimalt mot den fientliga rymdmiljön, elektronik isoleras och man väljer ofta att ha redundanta delar i rymdsystemet.

För övriga system och signaler som påverkas av rymdväder och som inte går att skydda fysiskt får man förlita sig på prognoser och nulägesanalyser.

6.2 Prognoser, nulägesanalys och utvärderingsverktyg

Ett nyttjande av prognoser och nulägesanalyser ger en rad fördelar:

- För kortvågskommunikation kan operatörer t.ex. välja att använda högre frekvenser, som Figur 4 visar, och de kan utesluta vad som tros vara hårdvarufel eller avsiktliga störningar. De skulle även kunna omdirigera kommunikationen eller i vissa fall helt enkelt vänta ut effekterna.
- För en radaroperatör finns möjligheten att tillfälligt använda sig av annan utrustning, utesluta vad som tros vara hårdvarufel, vänta ut effekterna och även utesluta vad som ser ut att vara fientliga aktioner.
- En operatör av satellitkommunikation kan välja att använda andra frekvenser om de finns tillgängliga, utesluta vad som tros vara fel och avsiktliga störningar, vänta med att sända informationen till senare men även öka effekten i sändaren.
- För en navigatör finns möjligheten att använda alternativa navigeringsmetoder, korrigera för positionsfel eller planera viktiga operationer till en säkrare tidpunkt.

- Prognoser kan även ge satellitoperatörer chansen att öka livstiden på en satellit och att utesluta vad som ser ut att vara fientliga aktioner i satellitbilder.

Det finns ett stort urval av modeller och verktyg för prognoser, nulägesanalyser och utvärdering av rymdväder samt dess effekter. Det vore omöjligt att inom ramen för detta projekt identifiera all programvara och dessutom utvärdera vilka programvaror som skulle kunna vara till nytta för Forsvarsmakten. I detta avsnitt redogörs istället för vad som går att prediktera i dagsläget. Detta avsnitt bygger till stor del på rapporten Koskinen et al. [6].

6.2.1 Radiovågsutbredning

Idag är prognoser för jonosfärens elektrondensitet och dess oregelbundenheter rätt bra. Ett prognosverktyg nämndes i Lindström [1], *ITS HF Propagation Software* som används av det amerikanska flygvapnet och går att ladda ner gratis från webben [14], programmet är ämnat för prediktioner relaterat till kortvågskommunikation. En fördel med att använda sig av prognoser för jonosfäriska störningar är att kunna planera för omdirigering av kommunikationslänkar.

Det finns verktyg där kartor över TEC plottas i realtid för GPS-användare och radaroperatörer.

6.2.2 Magnetosfärisk aktivitet

Idag är det svårt att förutsäga magnetosfärisk aktivitet men det går att dra generella slutsatser baserade på magnetosfäriska index såsom Kp, AE och Dst vilket görs rutinmässigt på bland annat IRF i Lund [15].

Den mest avancerade magnetosfärs- och prognosmodellen idag är MSFM vilken är utvecklad för det amerikanska flygvapnet och det finns idag ingen motsvarande europeisk modell.

6.2.3 SEE:er

När en solaktivitet pågår är tiden för prognoser väldigt kort, då energetiska partiklar rör sig mot jorden på endast ett tiotal minuter. Prognoser som baseras på solobservationer är rätt så otillförlitliga, men traditionellt används parametrar såsom:

- SSN och F10,7 som generella solaktivitetsindex.
- Avbildning i optiskt och UV för upptäckt av aktiva områden på solen.
- Avbildning i röntgenområdet (0,05 - 0,8 nanometer) för upptäckt av röntgenstrålning och flares vilket idag upptäcks med hjälp av satelliten GOES.

6.2.4 Uppbromsning av satelliter i den neutrala atmosfären

Densiteten på den neutrala atmosfären vid en altitud på 400 kilometer kan öka med en faktor 10 från ett solminimum till ett solmaximum. Detta kan minska livstiden för en satellit drastiskt om inga åtgärder vidtas. Prognoser som ligger

över en solcykel är tillförlitliga men däremot är prognoser över kortare tidsspann idag inte tillräckliga.

6.2.5 Flygpersonal och flygelektronik

Den kosmiska strålningen har visats vara korrelerad till solcykeln och genom att titta på antalet solfläckar är det möjligt att prediktera hur stor inverkan solen kommer att ha på variationen i den kosmiska strålningen. EU har infört regler för hur stora strålningsdoser flygpersonal får utsättas för. Gravid flygpersonal får inte utsättas för mer än 1 millisievert (Sv) per år. Annan flygpersonal bör endast utsättas för 1 till 6 millisievert per år. Som åtgärd kan flygpersonal bära dosmätare för att kontrollera strålningsdosen.

6.2.6 Markbaserade system

Det finns i princip inga bra prognosmodeller för geomagnetiskt inducerade strömmar (GIC) men däremot så uppstår de största effekterna vid stora magnetosfäriska stormar och därför utfärdas varningar för GIC vid sådana stormar.

6.3 Organisationer som tillhandahåller rymdväderprognoser

Idag är det endast rymdmiljöcentret (SEC), se bilaga C, i USA som tillhandahåller en övergripande rymdvädertjänst på alla områden. De har även ett nära samarbete med det amerikanska flygvapnets rymdvädertjänst som är mer fokuserad på militära tillämpningar.

I Europa har ESA huvudansvaret för ett pilotprojekt om rymdväder som sträcker sig från 2003 till 2005 och fokuserar på att skapa ett nätverk av projekt *Service Development Activities (SDA)* som skall utveckla tjänster och möjligheter anpassat till behovet hos specifika användare. De involverade användarna kommer sedan att bjudas in för att i slutändan utvärdera tjänsterna. Projekten deltar i ett europeiskt nätverk fokuserat på rymdväder kallat *Space Weather European Network (SWENET)*. Detta nätverk skall bland annat utveckla en infrastruktur för distribuering av data och tjänster. Det kommer också att hållas ett antal möten i nätverket. I slutändan skall detta resultera i en bedömning av en europeisk rymdvädertjänst både ur ett ekonomiskt och ur ett nyttoperspektiv. För tillfället bidrar 26 SDA:er till detta arbete, projekten berör markbaserade effekter, jonsfäreffekter, rymd- och flygfarkostrisker samt solindex. Endast 16 av dessa projekt är finansierade av ESA, resten är finansierade på eget håll. Av alla projekt är 10 direkt relaterade till försvar och säkerhet. ESA siktar på att tillhandahålla en rymdvädertjänst som är oberoende av den rymdvädertjänst som USA idag tillhandahåller. ESA siktar på att tillhandahålla skräddarsydda lösningar efter hur användarens behov och krav är definierade, vilket skiljer sig från tjänsten som USA idag tillhandahåller.

COST 724 är ett ramverk för ett europeiskt samarbete där 23 länder och fyra institut deltar, arbetet sträcker sig från 2003 till 2007. Deras mål är att:

- Koordinera europeisk forskning för modellering och prognostisering av rymdväder.

- Ta reda på om nya instrument behövs för att möta kravet på datainsamling m.m.
- Utbilda potentiella användare.
- Samla in erfarenheter från användarna för att förbättra tjänsterna.
- Skapa ett forum för utbyte mellan användare och forskare.
- Sätta standarder för datautbyten.

COST 724 är ett resultat av förstudien till pilotprojektet som nämns ovan och självklart samarbetar de två olika projekten. Några europeiska initiativ som redan tagits redovisas i Tabell 2.

Tabell 2 Sammanställning av fyra europeiska verktyg för analys och prognos av rymdväder.

GEISHA *Geosynchronous Environment for Identification of Satellite Hit Anomalies* - ett verktyg för analys av anomalier som uppstår i satellitsystem efter stora solutbrott, fokus på GEO-bana.

SHAFT *Spacecraft Hazard and Anomaly Forecasting Tool* - ett verktyg för realtidsinformation om rymdstrålningshot.

SEIS *Space Environment Information System* - ett system som integrerar data från NOAA, SOHO, XMM, ENVISAT, INTEGRAL, prognosdata och SEU-databaser som sedan läggs in i ett data-lager. Baserat på detta levererar sedan systemet larm och prognoser.

SAAPS *Spacecraft Anomaly Analysis and Prediction System* - ett system för analys av rymdväderdata och dess relation till anomalier hos satelliter.

7 Slutsatser och rekommendationer

Kunskapen om rymdväder, dess effekter och problemen de skapar är viktig för Försvarsmakten, oberoende av om de system som svenska trupper använder vid t.ex. internationella insatser är egna eller ägs av någon annan. Intressanta frågor som Försvarsmakten bör ta ställning till är bland annat:

- Vilka är användarna inom Försvarsmakten som påverkas av rymdväder?
- Är dessa användare medvetna om rymdväder och i så fall i vilken grad?

Space Weather Operations Center (SWOC) vid det amerikanska flygvapnets väder-tjänst (AFWA) sprider information om rymdväderläget och utbildar personer i flygvapnet, armén, marinen, kustbevakningen och underrättelsemyndigheterna. De sprider även informationen till användare såsom: de som är beroende av precisionsnavigering; radaroperatörer; flygoperatörer på höga höjder; satellitoperatörer; civila kunder; bemannade rymdfärder; elkraftsoperatörer; civila användare av satellit- samt kortvågskommunikation m.m. De utbyter även information med SEC och NOAA. På samma sätt bör rymdväderläget spridas från ett ställe i det svenska försvaret till berörda parter. Naturligt bör detta göras från samma ställe som sprider ut väderinformation.

För att bygga upp en enhet som har kunskap om rymdväder och dess effekter så bör berörda inom Försvarsmakten delta i någon form av kurs i rymdväder. Ett alternativ finns vid Boston University i USA som ger en tvåveckors sommarkurs [16] kallad *Space Weather Phenomena, Consequences, and Modeling*. Ett annat alternativ kunde vara att bjuda in föreläsare att hålla föredrag i Sverige. Vid konferensen "*Space Weather*" i USA knöts en kontakt med ansvarig för *Holloman Solar Observatory*, ett solobservatorium som ägs av det amerikanska flygvapnet. Det är vid detta observatorium som personer inom det amerikanska försvaret utbildas i just rymdväder och dess effekter. Kontaktpersonen tog upp möjligheten att komma till Sverige och hålla föredrag för berörda inom Försvarsmakten om intresse finns.

Det finns en möjlighet att påverka arbetet som utförs på ESA genom att delta i deras arbete ur användarsynpunkt. Detta skulle också ge tillfälle att träffa andra europeiska försvarsmyndigheter och att utbyta erfarenheter och kunskap. Som nämnts tidigare är det åtminstone tio grupper som deltar i arbetet just nu som har en anknytning till säkerhet och försvar. Både FOI och Försvarsmakten skulle kunna delta i detta arbete i någon form.

FOI borde kunna hjälpa Försvarsmakten med att utvärdera tillgängliga rymdvädersverktyg och -modeller på marknaden för Försvarsmaktens bruk. FOI skulle

även kunna, om behov finns, utveckla egna verktyg för prognoser och nulägesanalyser.

Denna rapport ska ses som en förstudie av området rymdväder. Rapporten introducerar läsaren till området rymdväder och vi valde att täcka in effekter på både militära och civila system för att ge en så rättvis bild av ämnet som möjligt. Möjligen kommer rapporten att väcka ett intresse och därav också en önskan om att FOI för Försvarmaktens räkning fördjupar sig inom områden som är direkt försvarsrelaterade.

Bilaga A – Begreppsförklaring

Nedan följer förklaringar av olika begrepp och förkortningar som används i rapporten. Många av begreppen är citerade ur Nationalencyklopedin [17].

Dosekvivalent	Effekt av absorberad dos radioaktiv strålning i en organism särskilt människokroppen.
Elektronvolt	Energienhet med beteckningen eV. En elektronvolt är det tillskott i rörelseenergi som en elektron får då den i vakuum passerar ett potentialfall på en volt.
Filament	Fenomen på solen som uppträder som långa, mörka stråk observerade i monokromatiskt ljus vid H α -linjen eller annan linjestrålning. Ett filament utgör projektionen av en protuberans på solskivan och består av joniserad gas insluten i magnetiska bågar.
Flare	Ljusfenomen på solen orsakat av en eruption i solkoronan.
Geostationär överfartsbana	Tillfällig elliptisk bana som en satellit följer på väg till den geostationära banan, på engelska <i>Geostationary transfer orbit</i> (GTO).
Jonosfär	Den yttersta delen av jordatmosfären i höjdområdet ca 70 - 1000 kilometer, där gasen är delvis joniserad så att det där finns fria elektroner och joner. Gasen är därmed elektriskt ledande, och betydande elektriska strömmar flyter i jonosfären.
Koronamassutkastning	Fenomen på solen, varvid stora mängder materia, 1 till 10 miljarder ton massa, kastas ut i den interplanetära rymden. Materiahastigheten varierar mellan 50 och 2000 kilometer i sekunden.
Magnetosfär	Den närmaste rymden kring jorden vilken domineras av det geomagnetiska fältet.
Meteoroid	Interplanetär kropp som vid inträdet i jordatmosfären ger upphov till en meteor, d.v.s. "stjärnfall".
Norrskensoval	Ovalen som "bildas" på jorden på grund av polarklyftan, på engelska <i>auroral oval</i> .
Plasmasfär	Område i jordens magnetosfär. Den kan ses som en fortsättning av jonosfären.

Polarkalott	Området innanför ovalen ovan som är rätt tomt på plasma, på engelska <i>polar cap</i> .
Polarklyfta	Det trattliknande området där norrskenspartiklarna tar sig ned, på engelska <i>cleft</i> eller <i>cusp</i> .
Polarplym	Område som är i förbindelse med polarkalotten och mynnar ut i svansen samt är rätt tomt på plasma på engelska <i>lobe region</i> , <i>tail lobe</i> eller <i>magnetotail lobe</i> .
Protuberans	Bildning i solens korona av lägre temperatur och högre densitet än omgivningen och som ses vid solranden. Protuberanser kan nå mycket höga höjder över solytan och kan ibland lyfta och lämna solen, varvid materia sprids ut i solsystemet, på engelska <i>protuberance</i> .
Rymdskrot	Delar från satelliter som utan funktion finns i omloppsbana runt jorden, på engelska <i>debris</i> .
Solvind	Den ström av partiklar som ständigt strömmar från solen ut i solsystemet. Solvindens genomsnittliga hastighet vid jordbanan är ca 450 kilometer i sekunden och temperaturen är ca 100 000 kelvin.
South Atlantic Anomaly	Ett område där Van Allen bältet befinner sig närmast jorden.
Termosfär	Yttersta delen av jordens atmosfär då denna indelas i områden med hänsyn till temperaturens variation med höjden.
Van Allen-bältet	Strålningsbälte d.v.s. område med energirika laddade partiklar infångade av jordens magnetfält.

Bilaga B – Tabellöversikt

Tabell 3. Här redovisas vilka system eller funktioner som påverkas av rymdvädrets effekter, vidare vilka dessa effekter är och vilka parametrar som ger upphov till dessa effekter. Tabellen är indelad efter områden och dessa är: interplanetära rymden, magnetosfären, jonosfären, neutrala atmosfären och jordytan. Följande uppgifter har hämtats ur Koskinen et al [5].

Område	System som påverkas	Effekter	Parameter
Interplanetära rymden	Rymdfarkost	SEE, strålningsskador, brus, urladdning	Flöde och sammansättning av laddade partiklar, UV- och röntgenstrålning
		Infallande meteoroider	Massa, hastighet
	Bemannade rymdfärder	Skador på vävnad	Dosekvivalent
Magnetosfären	Rymdfarkost	SEE, strålningsskador, brus, urladdning, strömmar, ESD	Sammansättning och flöde på partiklar
		Rymdskrot och meteoroider	Massa, hastighet, laddning
	Bemannade rymdfärder	Skador på vävnad	Dosekvivalent
Jonosfären	Rymdfarkost	Uppbromsning, bannmättningsstörningar	Densitet, infallande partiklar
		Urladdningar vid höga latituder	Partikelflöde, UV-strålning
	Kommunikation (kortvåg och lägre frekvenser)	Bruten kommunikation eller låg signalstyrka	Elektrondensitet i D-regionen
		Försämrat täckningsområde	Elektrondensitet i E- och F-regionen
		Borttoning av signalen	Elektrondensitet och oregelbundenhet i E- och F-regionen

		Förändring i felfrekvens	Oregelbundenheter i E- och F-regionen
	Kommunikation (VHF och UHF)	Borttoning av signalen, förändring i felfrekvens	Oregelbundenheter i E- och F-regionen
	Navigeringssystem	Spridning, scintillation, svårt att låsa på signalen	TEC, scintillation via standardavvikelsen på signalens effekt och fas
Neutrala atmosfären	Flygplan och flygpersonal	SEE, vävnadsskador	Flöde och spektra på neutroner, joner, elektroner och mesoner. Dosekvivalent
	Bärraketer	SEE	Neutron-, jon-, elektron- och mesonflöde
På jorden	Elkraftsystem	Mättning i transformatorer	GIC, jordmagnetiska fältet
		Förbrukning av reaktiv effekt, elektriska övertoner, spänningsfall, signalbrytning, överhettning, strömavbrott	Geoelektriskt fält
	Gas/olje-pipelines	Spänning mellan mark och rör	GIC
		Störningar på det katodiska skyddet	Spänning mellan mark och rör
		Korrosion	Jordmagnetiska fältet, geoelektriskt fält
	Telekablar	Överspänning	GIC
		Störningar	Spänning mellan jordade noder i ett system, jordmagnetiska fältet, geoelektriska fältet
	Järnvägar	Överspänningar	GIC
		Signaleringsproblem	Jordmagnetiska fältet, geoelektriska fältet
	Geofysiska undersökningar	Störningar	Jordmagnetiska fältet, geoelektriska fältet

Bilaga C – Rymdväderlänkar

Nedan listas ett antal länkar där läsaren kan finna mer information om rymdväder.

International Space Environment Center. <http://ises-spaceweather.org/index.html> (2004-08-20)

Space Environment Center, NOAA, U.S. Dept. of Commerce. <http://www.sec.noaa.gov> (2004-08-20)

Space Weather Canada. 7 juli 2004. <http://www.spaceweather.gc.ca> (2004-08-20)

IPS Radio and Space Services. <http://www.ips.gov.au> (2004-08-20)

ESA Space Weather Site. <http://www.estec.esa.nl/wmwww/wma/spweather> (2004-08-20)

Institutet för rymdfysik Lund. <http://www.lund.irf.se/HeliosHome/irflundsv.html> (2004-08-20)

Space Weather. <http://www.agu.org/journals/sw> (2004-08-20)

The Solar and Heliospheric Observatory. 10 november 2004. <http://sohowww.nascom.nasa.gov> (2004-11-10)

SpaceWeather.com - News and information about meteor showers, solar flares, auroras, and near-Earth asteroids. <http://www.spaceweather.com> (2004-08-20)

Solar and Geomagnetic Activity Forecast. 2 februari 2004. http://www.cls.fr/previsol/index_en.htm (2004-11-19)

National Institute of Information and Communications Technology (NICT) - Space Environment Information Center. 29 oktober 2004. <http://hirweb.crl.go.jp/index.html> (2004-11-29)

Referenser

- [1] Lindström, S. (2004). *Reserapport - Space Weather Week*, Stockholm, FOI. FOI Memo 893
- [2] Ekblad, U. *Elementa om rymdteknik*, Linköping, FOI. Användarrapport. Manuskript, december 2004
- [3] (Red.) Wright, J.M. (Augusti 1995). *The National Space weather Program: Strategic Plan FCM-P30-1995*. URL: <http://www.ofcm.gov/nswp-sp/text/a-cover.htm> (2004-08-20)
- [4] Kivelson, M.G. och Russel, C.T. (1995). *Introduction to Space Physics*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0-521-45714-9
- [5] Koskinen, H; Tanskanen, E; Pirjola, R; Pulkkinen, A; Dyer, C; Rodgers, D; Cannon, P; Mandeville, J. C; Boscher, D. (2001). *Space Weather Effects Catalogue ESWP-FMI-RP-0001*. URL: http://www.estec.esa.nl/wmwww/WMA/spweather/esa_initiatives/spweatherstudies/RAL/ESWS-FMI-RP-0001_2.2.pdf (2004-11-12)
- [6] Koskinen, H; Tanskanen, E; Pirjola, R; Pulkkinen, A; Dyer, C; Rodgers, D; Cannon, P; Mandeville, J. C; Boscher, D. (2001). *Rationale For a European Space Weather Programme ESWS-FMI-RP-0002*. URL: http://www.estec.esa.nl/wmwww/WMA/spweather/esa_initiatives/spweatherstudies/RAL/ESWS-FMI-RP-0002_2.3.pdf (2004-11-25)
- [7] Hanslmeier, A. (2002). *The Sun and Space Weather*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. ISBN 1-4020-0684-5
- [8] Horne, R.B. (27 februari 2001). *Benefits of a Space Weather Programme WP1100*. URL: http://www.estec.esa.nl/wmwww/WMA/spweather/esa_initiatives/spweatherstudies/ALC/wp1100_Benefits_v3.1.pdf (2004-11-03)
- [9] Spaceweather - Geomagnetic Effects on Power Systems. 25 mars 2003. http://www.spaceweather.gc.ca/power_e.shtml (2004-11-17)
- [10] Murphy, L.M. och Rodgers, D.J. (20 april 2001). *European Space Weather Programme System Requirements Definition. ESWP-DER-SR-0001*. URL: http://www.estec.esa.nl/wmwww/WMA/spweather/esa_initiatives/spweatherstudies/RAL/SRD_issue_1.0.pdf (2004-08-20)

- [11] Sunspot and Space Weather Information Pages of the SIDC (Solar Influences Data analysis Center). 6 januari 2004.
<http://sidc.oma.be/index.php3> (2004-10-02)
- [12] Pick, M; Lathuillere, C; Lilensten, J. (2001). *Ground Based Measurements WP 3120*. URL:
http://www.estec.esa.nl/wmwww/WMA/spweather/esa_initiatives/spweatherstudies/ALC/WP3120GroundSegmentNov01.pdf
(2004-12-03)
- [13] Coates, A; Crosby, N; Bentley, B. (2001). *Space Segment - Measurement and System Requirements WP 2200 and 2300 reports*. URL:
http://www.estec.esa.nl/wmwww/WMA/spweather/esa_initiatives/spweatherstudies/ALC/2200_2300_29Nov01.pdf (2004-12-03)
- [14] HF Propagation Models. <http://elbert.its.bldrdoc.gov/hf.html> (2004-11-26)
- [15] Lund Space Weather Center. <http://www.lund.irf.se> (2004-11-25)
- [16] Center for Integrated Space Weather Modeling (CISM) - Summer School. 30 mars 2004.
<http://www.bu.edu/cism/Summer%20School/SummerSchool.html>
(2004-11-29)
- [17] Nationalencyklopedins Internettjänst. <http://www.ne.se> (2004-08-20)

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Systemteknik 172 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1464--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 7. Farkost- och rymdteknik	
	Månad, år December 2004	Projektnummer E6056
	Delområde 71 Obemannade farkoster (FoT 17)	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Sandra Lindström Mattias Waldenvik	Projektledare Lars Høstbeck	
	Godkänd av Monica Dahlén	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Jenny-Ann Malmberg	
Rapportens titel Rymdväder - effekter på militära och civila system		
Sammanfattning (högst 200 ord) Den här rapporten behandlar rymdväder och dess effekter på militära och civila system. Rymdväder påverkar ett antal olika system och funktioner t.ex. påverkas satelliter, bemannade och obemannade rymdfarkoster, bärraketer, flygplan, flygpersonal, flygelektronik, radiovågsutbredning (satellitkommunikation, GPS, kortvågskommunikation, m.fl.), elkraftsystem, nätverk av pipelines och klimatet. Solen sänder ut energi både som elektromagnetisk strålning och som elektriskt laddade partiklar. Partiklarna förs ut från solen mot jorden i den så kallade solvinden. Strålningen och partiklarna växelverkar med jordens magnetfält och jonosfär. Genom denna växelverkan samlas koncentrationer av energetiska partiklar och det skapas också elektriska strömmar i jonosfärsiktet. Detta ger även upphov till geomagnetiska variationer och detta påverkar rymd-, mark- och luftbaserade tekniska system. Kunskapen om rymdväder, dess effekter och problemen de skapar är viktig för Försvarsmakten, oberoende av om de system som svenska trupper använder vid t.ex. internationella insatser är egna eller ägs av någon annan. Intressanta frågor som Försvarsmakten bör ta ställning till är bland annat: Vilka är användarna inom Försvarsmakten som påverkas av rymdväder? Är dessa användare medvetna om rymdväder och i vilken grad?		
Nyckelord rymdväder, sol, flare, koronamassutkastning, solvind, magnetosfär, plasma, jonosfär, radiovågsutbredning, prognos, satellit		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 50 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Systems Technology SE-172 90 Stockholm	Report number, ISRN FOI-R--1464--SE	Report type User report
	Programme Areas 7. Mobility and space technology, incl materials	
	Month year December 2004	Project no. E6056
	Subcategories 71 Unmanned Vehicles	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Sandra Lindström Mattias Waldenvik	Project manager Lars Höstbeck	
	Approved by Monica Dahlén	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Jenny-Ann Malmberg	
Report title (In translation) Space weather - effects on military and civilian systems		
Abstract (not more than 200 words) This report treats space weather and its effects on military and civilian systems. Space weather affect a number of different systems like satellites, unmanned and manned spacecrafts, launch rockets, staff and electronics onboard aircrafts, radio propagation (satellite communication, GPS, HF-communication and so on), power plants, pipelines, and the climate. The Sun emits energy as electromagnetic radiation and as electrically charged particles. The energy is transported towards the Earth with the solar wind. The radiation and the particles then interact with the geomagnetic field and the ionosphere. Because of this interaction the energetic particles produce electric currents in the ionosphere. The currents generate geomagnetic variations that will affect space-, ground-, and air based technological systems. It is important that the Swedish Armed Forces (SWAF) has the knowledge about space weather and its effects. The understanding is important, regardless if the systems that are being used are owned by the SWAF or any other organisation at e.g. international operations. Some interesting issues that the SWAF should address are: Who are the users in the SWAF that are being affected by space weather? Are these users aware of the impacts of space weather?		
Keywords space weather, sun, flare, coronal mass ejection, solarwind, magnetosphere, plasma, ionosphere, radio propagation, prediction, satellite		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 50 p.	
	Price acc. to pricelist	