

## 5. GEOMAGNEETTISET AIKAVAIHTELUT OBSERVATORIO- REKISTERÖINTIEN MUKAAN

### 5.1 Magneettisista observatorioista

Geomagneettisten observatorioiden tehtävänä on tallentaa maapallon magneettikentän aikavaihtelut kaikilla taajuuksilla. Ulkoisista syistä johtuvat (aurion aktiivisuus) vaihtelut (avaruussään magneettinen komponentti) ionosfääristä ja magnetosfääristä. Vaihteluiden tyypilliset kestot ovat 1 s - 1 v. Sisäisistä syistä johtuvat vaihtelut (sekulaarimuutos); 1v - 100000 v ja enemmän. Taltiotavan vaihtelun spektri on laaja. Observatoriahavaintoja on suunnilleen 400 vuoden ajalta, mutta modernissa mielessä noin 150 vuotta. Geomagneettiset ilmiöt ovat globaalista laajuutta, joten tarvitaan koko maapallon kattava havaintoverkko. Observatorioissa tapahtuva magneettikentän rekisteröintien tulee olla jatkuvia ja aikasarjojen homogeenisia. Satelliittimittaukset eivät vielä korvaa maanpinnalla tehtyjä observatoriahavaintoja. Satelliittien elinikä on kohtalaisen lyhyt, korkeintaan 10 vuotta. Observatoriotoiminta on pitkäkestoista geofysikaalisen perusaineiston tuottamista.

Määritelmiä:

### Observatorio

- \* **Pysyvästi miehitetty havaintoasema. Ylläpito- ja huoltohenkilökuntaa saatavilla minimiviiveellä. Työntekijöinä myös alan tieteellisesti koulutettuja asiantuntijoita**
- \* **Rekisteröinnit jatkuvia (> kymmeniä vuosia) ja katkottomia (kaksoisrekisteröinti)**
- \* **Rekisteröinnit kontrolloituja ja laitekalibraatiot aina tiedossa eli metadata on hyvin hallinnassa**
- \* **Datan laatu on korkeatasoista ja havaintosarjat homogeenisia**

**Geomagneettisen observatorion erityisvaatimuksia:**

**- Ei sähkömagneettista "saastetta"**

ympäristössä  
- Magnetometrilukemat kontrolloituun  
absoluuttitasoon

## Havaintoasema

- \* Vain tilapäisesti miehitetty
- \* Toiminta ajallisesti rajattu
- \* Rekisteröinneissä usein aukkoja
- \* Kalibrointiongelmia automaattiasemilla
- \* Datan laatu yleensä heikompi kuin  
observatorioissa

## Geofysiikan observatoriot Suomessa

**ENNEN:**

### Helsingin yliopisto

**Magneettis-meteorologinen observatorio (1838-1881)**

**Päähavaintokohteet:**

- \* Geomagnetismi
- \* Meteorologia

### Suomen Tiedeseura

**Magneettis-meteorologinen observatorio (1881-1917)**

**Sodankylän polaarivuoden observatorio (1882-1884)**

### Suomalainen Tiedeakatemia

**Sodankylän geofysiikan observatorio (1914-1997)**

**Päähavaintokohteet:**

- \* **Geomagnetismi**
- \* **Ilmasähkö/maavirrat**
- \* **Revontulet**
- \* **Ionosfäärimittaukset**
- \* **Seismiset rekisteröinnit**

**Geofysiikan observatoriot Suomessa - 2****NYT:****Ilmatieteen laitos****Nurmijärven geofysiikan observatorio (1953)****Päähavaintokohteet:**

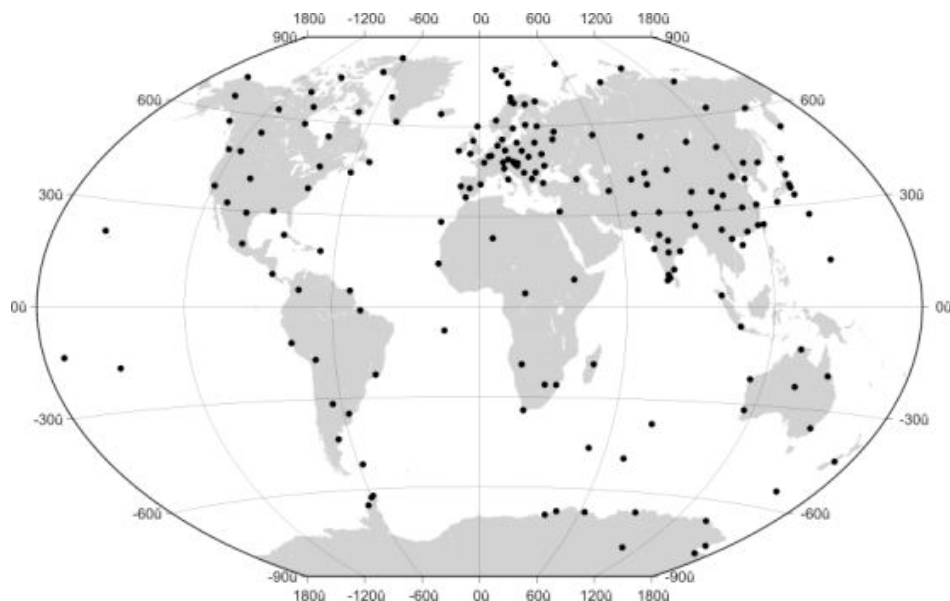
- \* **Geomagnetismi (IMAGE, PI-status, 6 asemaa Suomessa)**
- \* **Meteorologia**
- \* **Ilmanlaatu- ja radioaktiivisuushavainnot**

**Sodankylän ilmatieteellinen observatorio (1949)****Jokioisten ilmatieteellinen observatorio (1957)****Oulun yliopisto****Geofysiikan observatorio (1985-1997)****Sodankylän geofysiikan observatorio (1997-)****(SGO 20 + EISCAT 5)****Päähavaintokohteet:**

- \* **Geomagnetismi**
- \* **Ionosfääri (EISCAT, riometrit)**
- \* **Seismologia**
- \* **Magnetotelluriikka**
- \* **Kosminen säteily**

Maan magneettikentän pitkäaikaisia vaihteluja tietyllä paikalla seurataan geomagneettisissa observatorioissa. Ensimmäiset observatoriot perustettiin jo 1800-luvun alussa Greenwichiin ja Pariisiin. Kuuluisin 1800-luvun alkukymmenien observatorio oli Göttingen, joka oli kaikkien observatorioiden esikuva C.F.Gaussin kehittämine standardirekisteröintimenetelmineen. Suomen ensimmäinen magneettinen observatorio aloitti mittauksensa yhdessä meteorologisten havaintojen kanssa 1844. Viime vuosisadan observointimenetelmä oli seurata vaakatasossa tai pystytasossa vapaasti kääntyvän magneetin liikkeitä ulkoisessa geomagneettisessa kentässä. Magneettien liikkeet havaittiin kaukoputkella visuaalisesti, koska automaattisia rekisteröintimenetelmiä ei ollut vielä kehitetty. 1850-luvulla konstruointiin ensimmäiset valokuvaukseen perustuva magnetometri, jossa havaitseva ihmisilmä kaukoputken takaa oli korvattu valoherkällä filmillä. Tällaiset laitteet olivat kuitenkin kalliita ja ne yleistyivät laajempaan käyttöön vasta tällä vuosisadalla. Valokuvausrekisteröinnit ovat vielä yleisesti käytössä, mutta modernimmat observatoriot ovat korvanneet ne digitaalisilla magnetometreillä, jotka tuottavat magneettikentän rekisteröintiarvoja suoraan tietokoneelle.

Maapallolla on tällä hetkellä toiminnassa noin 150 magneettista observatoriota, joista kaksi on Suomessa: Nurmijärven ja Sodankylän geofysiikan observatoriot. Näistä edellinen on toiminut yhtäjaksoisesti vuodesta 1953 ja jälkimmäinen vuodesta 1913 (lukuunottamatta vuoden taukoa 1944-1945, kun observatorio tuhoutui Lapin sodassa). Nurmijärven observatorio on osa Ilmatieteen laitoksen yleistä havaintojärjestelmää ja Sodankylän observatorio on taas Oulun yliopiston erillislaitos.



Kuva 5.0. Magneettiset observatoriot maapallolla v. 2005.

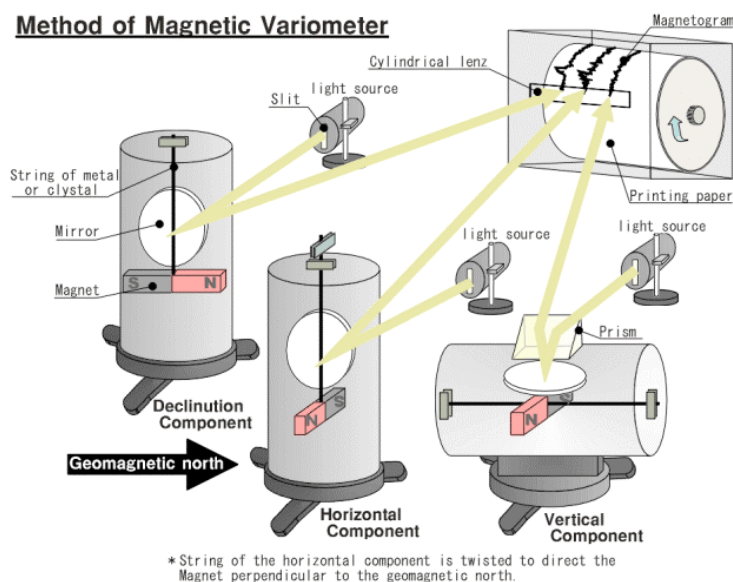
Gaussin kehittämä magneetteihin perustuva observatoriomagnetometri, ns. variometri, rekisteröi vain kentän vaihteluja tietyn perustason (kantaviivan) suhteen, ei sen absoluuttista arvoa. Kuva 5.1 havainnollistaa yksinkertaista valokuvaukseen perustuvaa magnetogrammia. Siinä valonsäde ohjataan peiliin, joka on kiinnitetty Maan magneettikentän vaihtelujen vaikutuksesta kääntyvään magneettiin. Peilistä valonsäde ohjautuu valokuvapaperille, joka on hitaasti pyörivän (1 kierros/vrk) sylinterin ympärillä. Magneetin suunnanmuutokset näkyvät vastaavina vaihteluina valokuvapaperiin valottu-  
massa. Kääntyvän magneetin vieressä on kiinteä peili, josta heijastunut valonsäde piirtää valokuvapaperille (magnetogrammi) suoran viivan, ns. kantaviivan.

Magnetogrammille piirtyvä magneettikenttää kuvaavasta käyrästä ei suoraan saada itse magneettikentän arvoa. Variometristä tunnetaan tarkasti sen herkkyys ( $\epsilon$ ), so. kuinka monta nT vastaa 1 mm pystysuora muutos magnetogrammilla. Kentän arvon selville saamiseksi täytyy variometrin läheisyydessä suorittaa magneettikentän absoluuttiarvoja tuottavalla magnetometrillä kentän mittaus (olkoon esim.  $D$ ) ja määrittää mittaushetkeä vastaava kohta magnetogrammin käyrältä ja mitata sen etäisyys kantaviivasta ( $y$ ). Silloin kantaviivan taso ( $D_0$ ) vastaa kentän yksiköissä arvoa

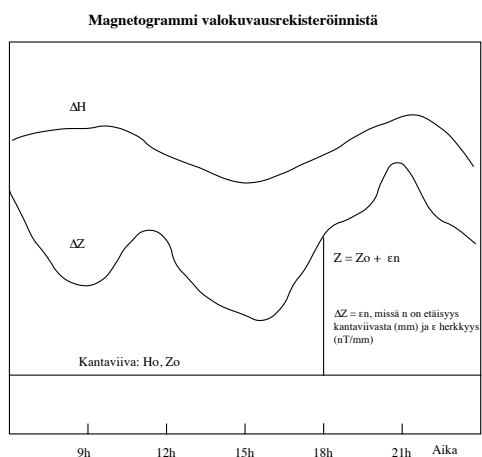
$$D_0 = D - \epsilon y .$$

Jonain myöhempanä hetkenä kentän arvo voidaan määrittää suoraan grammista:  $D = D_0 + \epsilon y'$  edellyttäen, että kantaviivan taso ei muutu. Yleensä kantaviivan tason mittauksia (absoluuttimittauksia) tehdään säännöllisesti pari kertaa kuukaudessa.

Kullekin magneettikentän kolmelle komponentille on oma magneettinsa. Yleensä rekisteröidään  $D$ ,  $H$  ja  $Z$ -komponentteja tai  $X$ ,  $Y$  ja  $Z$ .



Kuva 5.1 Kaavakuva (yllä) observatorion magneettisesta variometrissä.

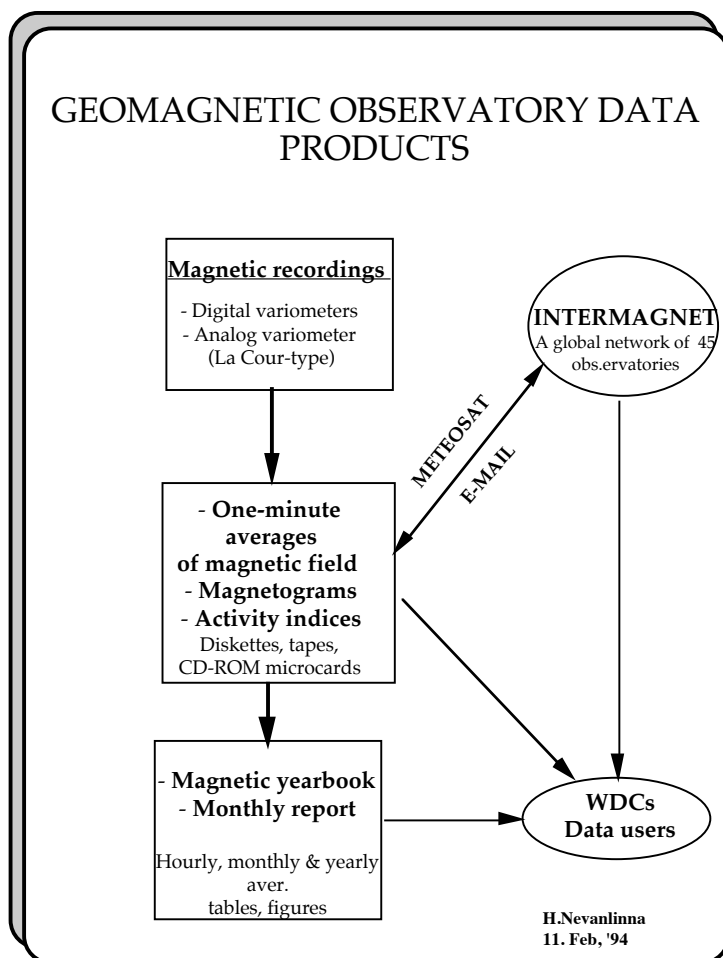


Kuva 5.1 (jatk.). Variometrin tuottama magnetogrammi antaa magneettikentän vaihtelun vuorokauden aikana. Rekisteröintijälki on poikkeama ( $\Delta H$ ,  $\Delta Z$ ) ns. kantaviivasta, joka on vaakasuora viiva grammien alaosassa. Ns. absoluuttimittauksella (eri laitteella) määrätään kantaviivan magneettikentän arvo, jolloin rekisteröintijälki voidaan kiinnittää absoluuttiasteikkoon, kun tunnetaan laitteen herkkyys ( $\epsilon$ ).

Magneettisen observatorion tehtävänä on tuottaa jatkuvia 3-komponenttisia magneettikenttärekisteröintejä mahdollisimman laajoilla aikavaihteluilla. Nykyään tiedot magneettikentästä tallennetaan 1-10 sekunnin välein. Kansainväliseen käyttöön toimitetaan havainnoista minuuttikeskiarvot. Ne kerätään kansainvälisiin datakeskuksiin (WDC = World Data Center), joka toimittaa niistä erilaisia yhdistettyjä tietokantoja, jotka ovat saatavissa eri medioiden kautta, esim. CD-ROM, internet (FTP, WWW). Observatoriot julkaisevat rekisteröintuloksiansa yhteenvetoja taulukoiden ja kuvioiden muodossa kerran vuodessa ns. vuosikirjana. Analogiset magneettiset rekisteröinnit arkistoidaan pysyväisesti varmuuskopioihin ja grammit mikro-korteille. Nykyään tosin aniharva observatorio tuottaa rekisteröinti-aineistonsa analogisessa grammimuodossa.

Observatorioiden pitkäaikaisia vuodesta toiseen kestäviä magneettikenttärekisteröintejä tarvitaan sekulaarimuutoksen määrittämiseen. Tällaisia tietoja tarvitaan magneettisten mallien (esim. IGRF) perusaineistojen päivitykseen. Tieteellisessä mielessä niillä on käyttöä tutkittaessa Maan nesteytimen liikkeitä ja virtauksia. Itse asiassa sekulaarimuutos on ainoa maanpäällinen signaali nesteytimessä tapahtuvista muutoksista.

Kuvissa 5.3 ja 5.4 on yhteenveto Suomen magneettisten observatorioiden ja automaattisten kenttäasemien tuottamista havaintoaineistoista.



Kuva 5.2. Magneettisen observatorion "tuotteita". Observatoriossa (esim. Nurmijärvi) rekisteröidään jatkuvasti magneettikentän komponentteja (yleensä X, Y ja Z) suoraan tietokoneella käsiteltävään digitaalimuotoon. Digitaalirekisteröinnit ovat tyypillisesti 1-10 sekunnin välein tehtyjä mittauksia, joista lasketaan minuuttikeskiarvoja. Ne on sidottu absoluuttitasoon. Tiedot kerätään levykkeille, jotka toimitetaan datakeskuksiin (WDC). Reaaliaikaiset minuuttiarvot lähetetään Nurmijärveltä satelliittitelemetrian kautta METEOSAT:iin, josta ne kootaan INTERMAGNET verkkoon. Tiedot noin 45 observatorion rekisteröinneistä on saatavissa GIN (Geomagnetic Information Node)-asemilta (esim. Edinburgh). Lopulliset rekisteröintiaineistot lähetetään kerran vuodessa WDC:iin ja yhteenvedot tuloksista julkaistaan vuosikirjan muodossa. Siinä on tuntikeskiarvoja, kuukausikeskiarvoja jne.

INTERMAGNET-järjestön logo ja magneettiset observatoriot, jotka lähettävät rekisteröintinsä INTERMAGNET-verkkoon

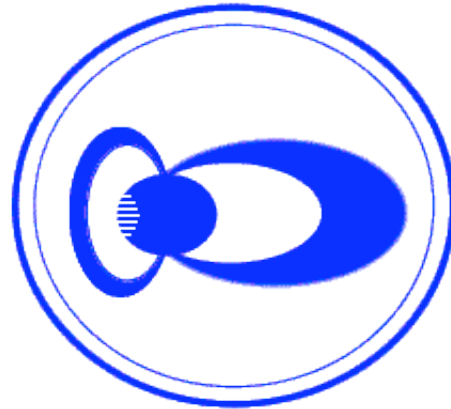


BIENVENIDA  
TERVETULOA

ようこそ  
ようこそ

ROM  
TALOFA

VELKOMMEN  
ISTEN HOZTA!  
VÍTEJTE



WELCOME

Добро  
пожаловать

WILLKOMMEN  
NAMASKAR

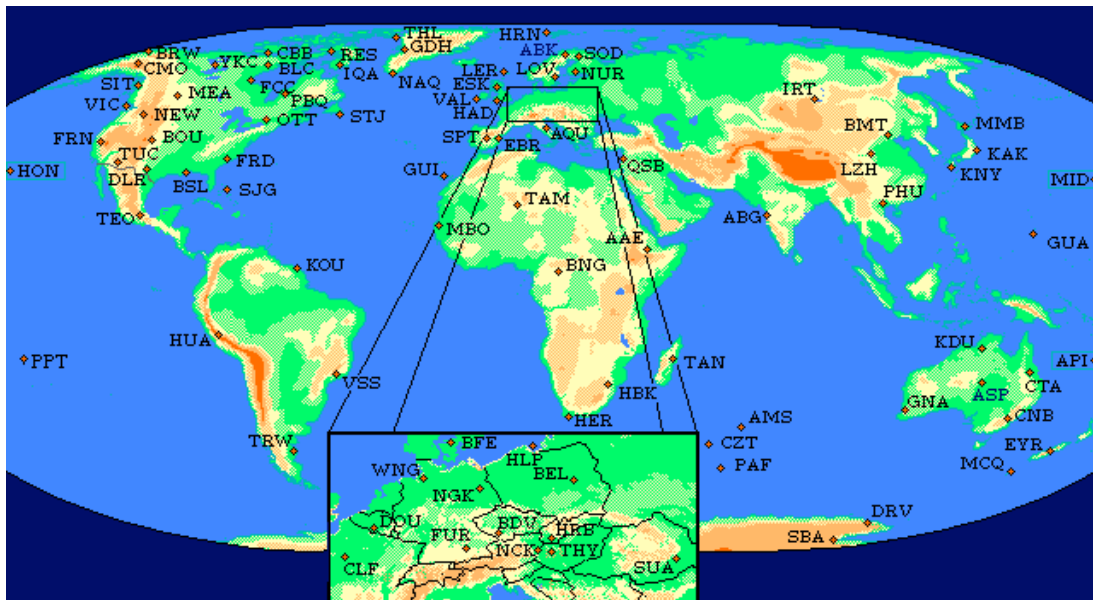
VÍTAJTE  
BEM VINDO

歡迎

WITAMY  
KINH CHAO

አንኳን ደህና ማለ!

VÄLKOMMEN  
BIENVENUE



**Helsinki, Nurmijärvi & Sodankylä**  
Tietoja magneettikenttävektorista  $\mathbf{B}(t)$ ,  $\partial\mathbf{B}/\partial t$ :

Digitaalimuodossa levykkeillä (+DAT, CD-ROM, ftp,  
WWW) saatavissa:

- 150 vuoden aineisto (Helsinki 1844-1911 & Sodankylä 1913-& Nurmijärvi 1953-) **tuntikeskiarvot** 1844-1994
- 10 vuoden aineisto (Nurmijärvi & Sodankylä & 6 autom. magnetometriasemaa (EISCAT/IMAGE) Lapissa) **minuuttikeskiarvot** 1982-1994
- 4 vuoden aineisto (Nurmijärvi & Sodankylä) **10 sec keskiarvot** 1991 – jatkuu
  - 3 vuoden aineisto (IMAGE-magn.metriketju 8 asemaa lat. 60°-70°N) **20 /10 sec keskiarvot** 1992- jatkuu

Nurmijärvi & Sodankylä:  
 flux-gate magnetometrit (DMI), <2 nT  
 absoluuttitasossa X, Y, Z, tall. int.  $\Delta t = 10$  sec., res.  
 $\Delta B \approx 0.1$  nT  
 kenttärekisteröintivalmius, magn.metrien  
 kalibrointilaitteisto

Kuva 5.3. Yhteenvedo saatavilla olevien Helsingin, Sodankylän ja Nurmijärven magneettisista aineistoista sekä IMAGE-magnetometriketjun rekisteröinneistä.

## Geomagnetismin tehtäväkokonaisuus Ilmatieteen laitoksessa

- 1°. Magneettisia aineistoja tuottavien laitekokonaisuuksien (observatorio ja automaattiasemat) jatkuva ylläpito, huolto ja kehitys
- 2°. Tuotettujen aineistojen muokkaus, verifiointi, tallennus ja levitys eri medioiden kautta tiedeyhteisöihin ja muille datan käyttäjille
- 3°. Magneettisista aineistoista tehtävä tutkimustyö:
  - \* Maan magneettikenttä ja sen muutokset (sekulaarimuutos) sekä niiden soveltaminen kiinteän maan geofysiikkaan
    - \* Aurinko-maa vuorovaikutusilmiöt maapallon lähiavaruudessa (magneto- & ionosfääri)
    - \* Avaruussää ja -ilmasto
- 4°. Tutkimustuloksista ja muista toiminnallisista saavutuksista tiedottaminen ja yleisölle suunnatut tieteen popularisoinnit

### NURMIJÄRVEN GEOFYSIIKAN OBSERVATORIO

- \* Perustettiin vuonna 1952 magneettiseksi observatorioksi. Ensimmäinen täysi havaintovuosi 1953. On yksi maapallon noin 150:stä observatoriosta toinen Suomessa (OY:n Sodankylän observatorio)
- \* Jatkaa Helsingin Kaisaniemen (1844-1912) ja Ilmalan (Pasila) (1912-1954) magneettisten observatorioiden havainto-ohjelmaa
- \* Observatorio kuuluu Ilmatieteen laitoksen havaintopalvelu -ohjelman alaisuuteen havaintoverkot -ryhmässä



Kuvas 5.4. MIRACLE/IMAGE-havaintoverkko. Punaisella merkityillä paikoilla on automaattinen magnetometri ja revontulikamera, jos täplän keskellä on valkoinen piste.

*Mikä MIRACLE on?*

*MIRACLE (Magnetometers - Ionospheric Radars - Allsky Cameras Large Experiment) on mittalaiteverkko, johon kuuluu magnetometrejä, ionosfääritutkia, ja revontulikameroita. MIRACLEn asemia on Suomessa, Ruotsissa, Kuolan niemimaalla ja Huippuvuorilla. Verkko kattaa Skandinavian alueella leveyspiirit keskileveysasteilta aina revontulivyöhykkeen pohjoispuolelle, magneettisen navan läheisyyteen saakka. Pituuspiirisuunnassa kattavuus on noin kaksi tuntia magneettista paikallisaikaa (eli noin 30 astetta).*

*MIRACLEn eri instrumenttien erotuskyvyt poikkeavat hiukan toisistaan, mutta mittalaiteverkko on suunniteltu havainnoimaan erityisesti mesoskaalan ilmiöitä, joiden mittakaavat vaihtelevat muutamasta kymmenestä tuhanteen kilometriin.*

*Normaalimittauksissa revontulikamera- ja tutkahavainnot tehdään kolmesti ja magneettikenttähavainnot kuudesti minuutissa. MIRACLEa ylläpidetään kansainvälisenä yhteistyönä, ja hankkeen koordinoivastuu on Ilmatieteen laitoksella.*

*Mitä MIRACLElla voidaan tehdä?*

*MIRACLEn havainnot käytetään mm. revontulialimyrskyjen elektrodynamiikan tutkimuksessa. Alimyrskyyn liittyvän sähkövirtajärjestelmän ionosfääriosuus on pituuspiirisuunnassa tyypillisesti n. 500 km:n pituinen. Alimyrskyyn alkuvaiheeseen tai "vajaamittaisiin" alimyrskyihin (engl. pseudo-breakup) liittyvät revontulimuodot mahtuvat yhden revontulikameran näkökenttään (halkaisija n. 600 km). Laajemman mittakaavan ilmiöitä tutkittaessa MIRACLEa voidaan käyttää suurennuslasina, joka satelliittikuvien tueksi antaa tarkempia havainnot esim. laajenevan alimyrskyalueen eturintamasta.*

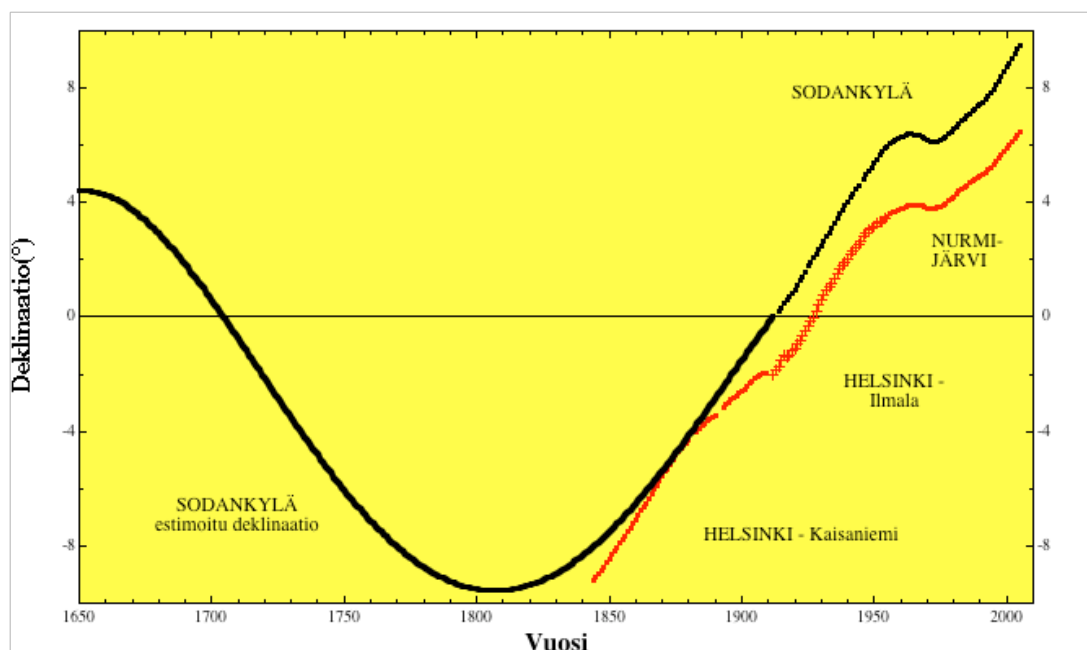
*International Solar Terrestrial Physics program (ISTP) on kansainvälinen yhteistyöohjelma, joka tutkii aurinkotuuli - ionosfääri - magnetosfääri - vuorovaikutusilmiöitä. ISTP:llä on useita satelliitteja Maan lähiavaruudessa tarkkailemassa vuorovaikutusilmiöiden kannalta tärkeitä avainalueita, esim. Maan ja*

*Auringon välistä aurinkotuulta, magnetosfäärin pyrstöä ja revontulivyöhykkeitä. MIRACLEn havainnot ionosfäärin tilanteesta helpottavat satelliittihavaintojen tulkintaa, sillä useat magnetosfäärin prosessit kytkeytyvät jollain tavoin ionosfääriin.*

*ISTP:n myötä tutkijat ovat vähitellen pääsemässä yhteisymmärrykseen alimyrskyn kehittymisestä globaalissa mittakaavassa, joten Euroopan Avaruusjärjestön Cluster II-satelliittihanke keskittyy mesoskaalan ilmiöihin. Neljän identtisen satelliitin muodostama ryväs mahdollistaa ensimmäistä kertaa kolmiulotteisten, nopeasti ajassa vaihtelevien ilmiöiden tarkan havainnoinnin, sillä ajalliset ja avaruudelliset muutokset voidaan erotella toisistaan.*

*Cluster-satelliittien monitoroimaa magnetosfäärin aluetta vastaava ionosfäärialue on usein MIRACLE havaintoalueen kokoluokkaa. Näin ollen MIRACLEn ja Clusterin yhteishavainnot avaavat tutkijoille aivan uudenlaisia mahdollisuuksia tutkia esim. Maan magnetosfäärin reunakerrosten dynamiikkaa ja siihen liittyviä revontuli-ilmiöitä (päiväpuolen revontulia).*

#### Magneettikentän vaihteluja - sisäsyntyinen

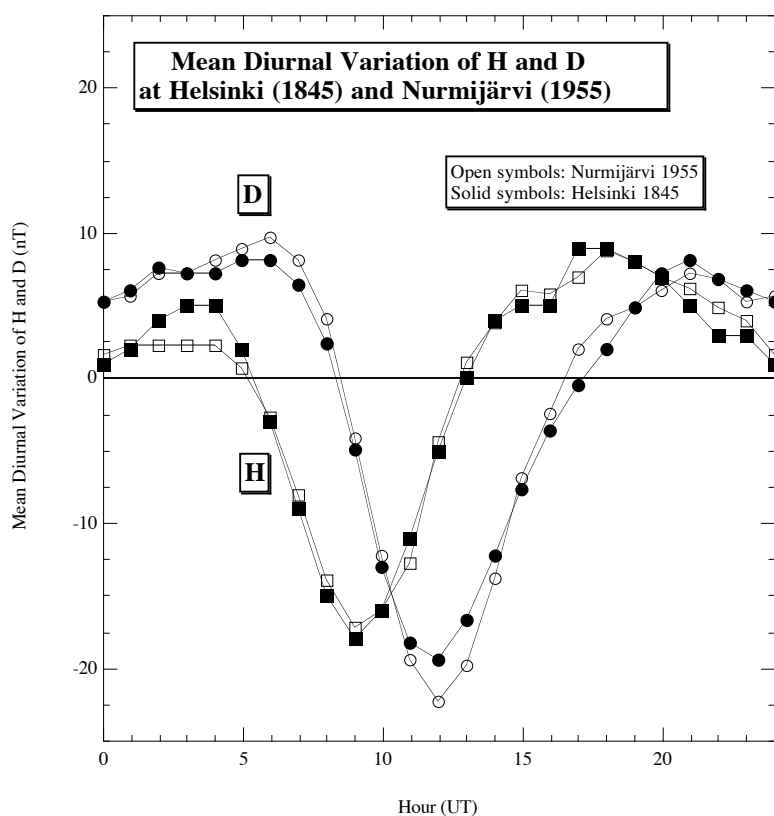


Keltapohjainen kuva yllä näyttää Suomen magneettisten observatorioiden rekisteröimän sekulaarimuutoksen deklinaation osalta. Observatoriotasoiset rekisteröinnit aloitettiin Kaisaniemessä Helsingin magneettisessa observatoriossa v. 1844. Havainnot tehtiin 6 kertaa tunnissa, myöhemmin kerran (kts. monistetta "Perustietoa geomagnetismista"). Havaintoja jatkettiin vuoteen 1912 saakka lähes katkeamattomana sarjana. Mittaukset siirrettiin Pasilan Ilmala-observatorioon, koska Kaisaniemessä sähköraitiotieliikenne häiritsi herkkiä magneettisia laitteita. Kokonaan magnetismille omistettu observatorio perustettiin Nurmijärvelle jatkamaan havaintoja v. 1953. Näin on käytettävissä noin 160 vuoden havaintosarja sekulaarimuutoksesta. Kyseessä on Suomen oloissa eräs pisimmistä melko yhtenäisestä geofysikaalisesta havaintosarjasta. Sitä täydentää Sodankylän geofysiikan observatorion havainnot vuodesta 1913 lähtien. Helsingin, Pasilan, Nurmijärven ja Sodankylän observatorioiden deklinaation vuosikeskiarvot on kuvaan merkitty pisteillä ja rasteilla.

Suomen alueelta tunnetaan siellä täällä tehtyjä deklinaatiomittauksia aina 1600-luvulta lähtien yhteensä noin parisataa. Lähinnä erantomittauksia on tehty rannikko-seuduilla merenkulun tarpeisiin. Kun nämä hajanaiset havainnot pakotetaan ajasta (t) ja paikasta (lat, lon) riippuvaan polynomikuvaajaan, saadaan siitä arvioitua kohtalaisella tarkkuudella erannon jakautuminen Suomessa eri paikoissa ennen varsinaisia observatoriomittauksia. Kuvassa mustalla plotattu viiva kuvaa tästä polynomista laskettua deklinaatiota Sodankylän observatorion koordinaateilla. Näin saadaan käsitys deklinaation aikamuutoksesta melkein 400 vuoden ajanaksolta. Muutos on ollut samansuuntainen kaikkialla Suomessa. Eranto oli läntisimmillään 1800-luvun alussa, vajaa 10 astetta pohjoisesta itään. Erannon vuotuinen sekulaarimuutos oli 1800-luvulla noin 0.15 astetta itään. Deklinaation 0-tilanne saavutettiin 1800- ja 1900-lukujen taitteessa. Satojen vuosen mittakaavassa kuvan deklinaatiovaihtelu edustaa sekulaarimuutosta, jonka arvioitu aallonpituus on noin 500 vuotta. Erannon vaihtelussa on myös nopeampia piirteitä kuten esimerkiksi 1960- 1970-lukujen taitteessa ollut muutaman vuoden heilahdus. Tänä aikana deklinaation muutos kääntyi noin 5 vuoden ajaksi negatiiviseksi, kunn se koko 1800- ja 1900-lukujen aikana muutoin on ollut positiivinen eli kasvu on tapahtunut itään päin.

Magneettikentän ulkoisia vaihteluja - vuorokausivaihtelu

Kuvassa 5.3. on esimerkki geomagneettisen kentän vuorokausivaihtelusta Helsingin ja Nurmijärven observatorioiden rekisteröinneistä. Siinä on deklinaation ja horisontaalikomponentin keskimääräinen vaihtelu yhden vuoden ajalta. Nähdään, että tyypillisesti D:n (muutettuna kentän yksiköiksi) vaihteluväli on noin 20-30 nT, siis suuruusluokaltaan samanlainen kuin vuotuinen sekulaarimuutos tyypillisesti. Päiväaikaan deklinaation ääriarvo sattuu n. 9 UT (klo. 11 paikallista aikaa) H:n kohdalla vastaava kellon aika on 12 UT (klo. 14 paikallista aikaa). Vastaavanlaiset vuorokautiset vaihtelut havaitaan muiltakin observatoriosta, mutta eri leveysasteilla vuorokautinen kulku ja sen amplitudi vaihtelevat kuvion 5.4 mukaisesti

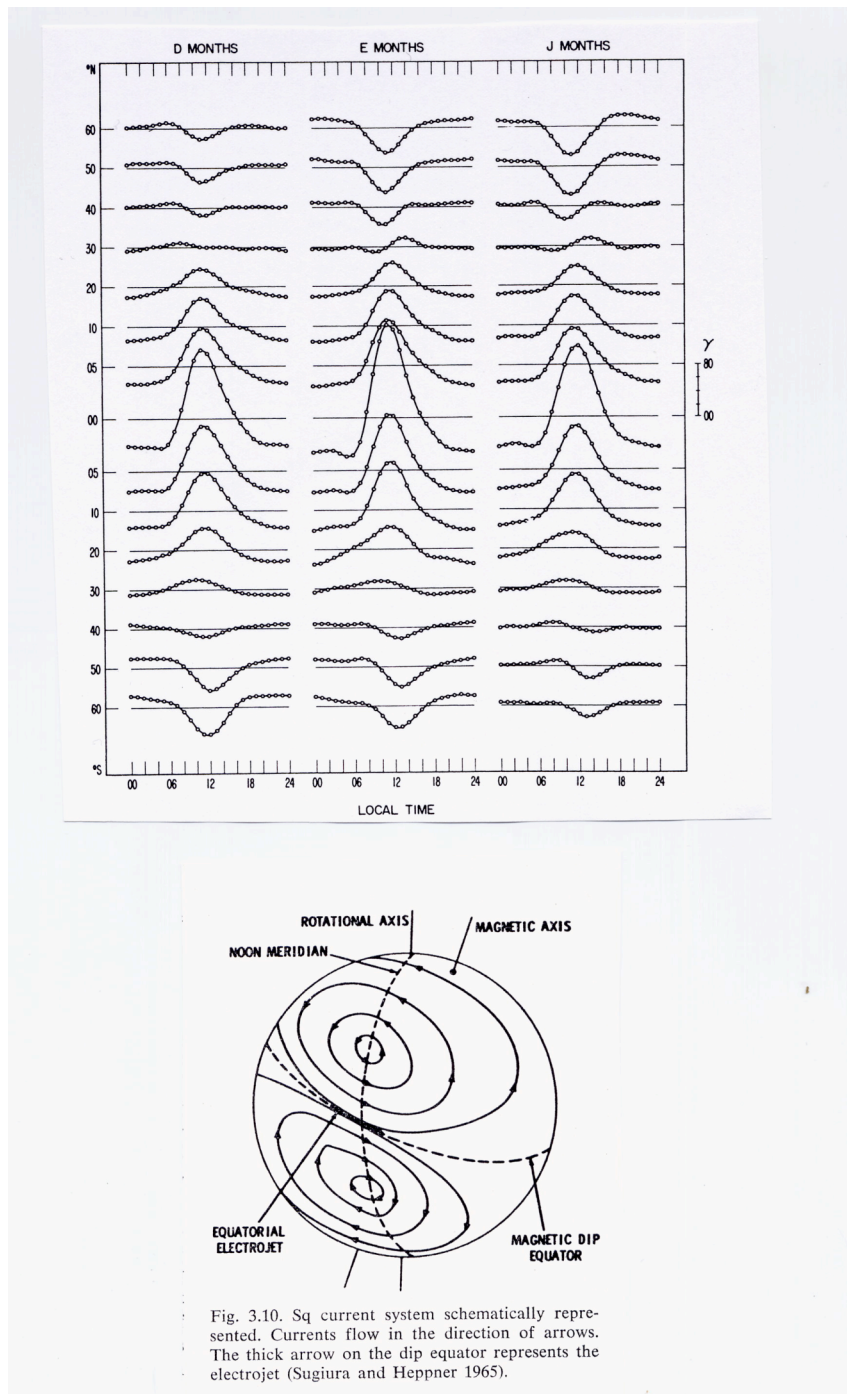


Kuva 5.3. Deklinaation ja horisontaalikomponentin keskimääräinen vuorokautinen vaihtelu Helsingin ja Nurmijärven observatorioiden rekisteröintien mukaan.

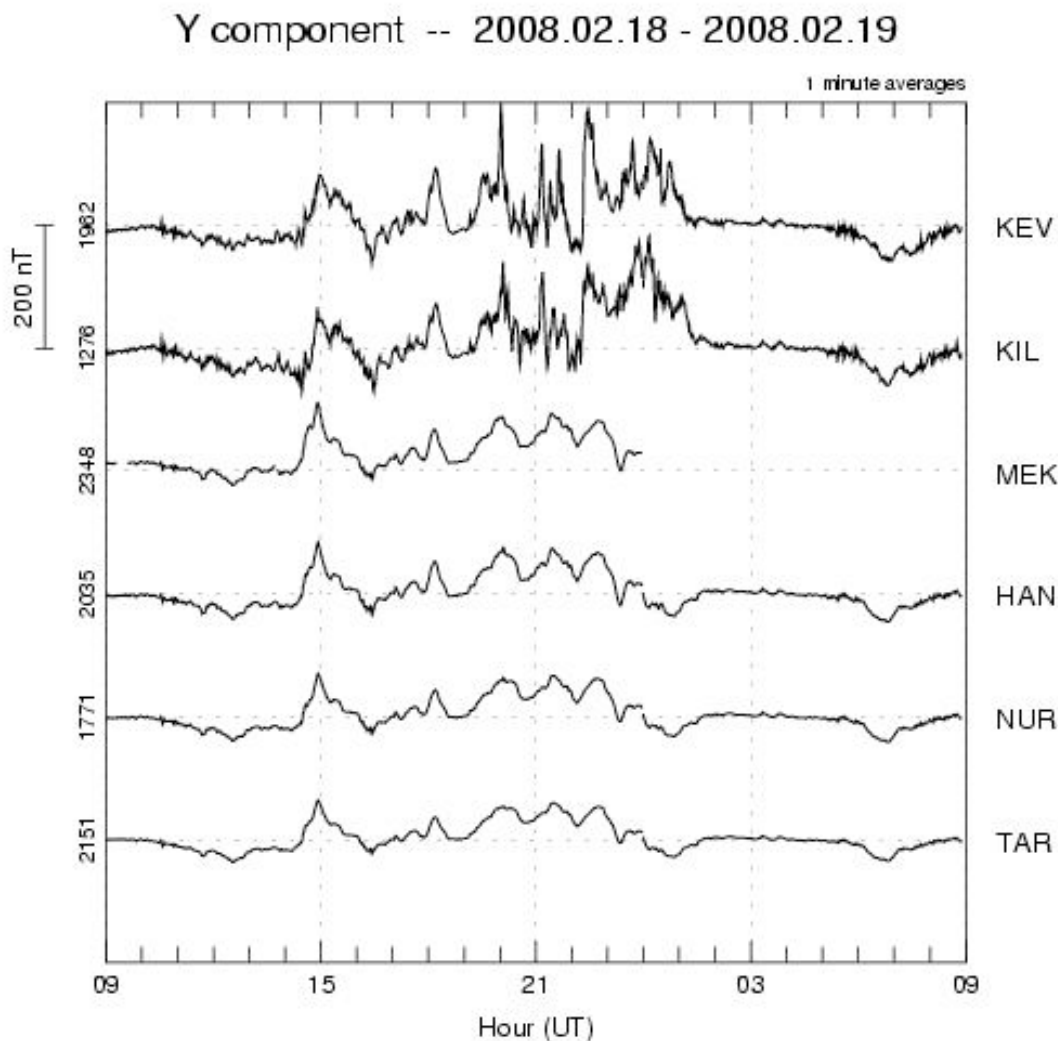
Säännöllinen vuorokausivaihtelu aiheutuu maapallon ionosfäärin sähkövirroista. Ionosfääri syntyy Maan ilmakehään n. 100 - 300 km korkeudelle, missä auringon ultravioletti säteily ionisoi ilmmolekyylejä. Ionisoituneet ilmmassat ovat alati liikkeessä maan magneettikentän vaikutuspiirissä. Silloin syntyy induktioperiaatteella ionosfääriin voimakkaita, jopa 100 000 A suuruisia, sähkövirtoja kuvion 5.4. alaosan



mukaisesti. Pohjoiselle ja eteläiselle pallonpuoliskolle muodostuu virtapyörre, joka on voimakkain aina sillä kohtaa missä auringon säteily on runsaimmillaan, siis keskipäivällä. Virtapyörteissä sähkövirran suunta on vastakkainen eri pallonpuoliskoilla ja pohjoisen talven aikaan eteläinen virtapyörre on voimakkaampi, koska siellä on silloin kesä ja auringon säteily on voimakkaampaa. Virtapyörteiden maksimit ovat lähellä ekvaattoria, missä auringon säteilyn ionisoiva vaikutus on suurimmillaan. Öiseen aikaan, jolloin auringon ionisoiva säteily ei ole vaikuttamassa, sähkövirrat ovat heikompia, mutta kokonaan ne eivät häviä silloinkaan. Sähkövirrat synnyttävät magneettikentän, joka maanpinnalla vaihtelee sen mukaan millä kohtaa virtapyörteen alla havaitsija on ja mihin kellonaikaan. Kuvan 5.4 yläosassa nähdään kuinka vuorokautinen magneettikenttävaihtelu muuttuu eri leveysasteilla. Vaihtelun laajuus on suurimmillaan lähellä päiväntasaajaa ja pienimmillään korkeilla leveysasteilla noudattaen auringon maksimikorkeuskulman vaihtelua. Vuorokausivaihtelu muuttuu myös vuodenaikojen mukana siten, että kesällä vaihtelu on laajimmillaan ja talvella minimissä auringon säteilyn ollessa vähäisintä.



Kuva 5.4 Magneettikentän keskimääräinen vuorokautinen vaihtelu eri leveysasteilla horisontaalikomponentin osalta (ylempi kuvio). Vaaka-akselilla on kellonaika. Alemmassa kuvassa on periaatepiirros kuinka vuorokausivaihtelun aiheuttaja ionosfäärin sähkövirrat syntyvät. Ionisoituneiden ilmassojen liike maan magneettikentässä synnyttää induktioperiaatteella suuria sähkövirtoja n. 200 - 300 km, joiden aiheuttama magneettikenttä havaitaan maanpinnalla.



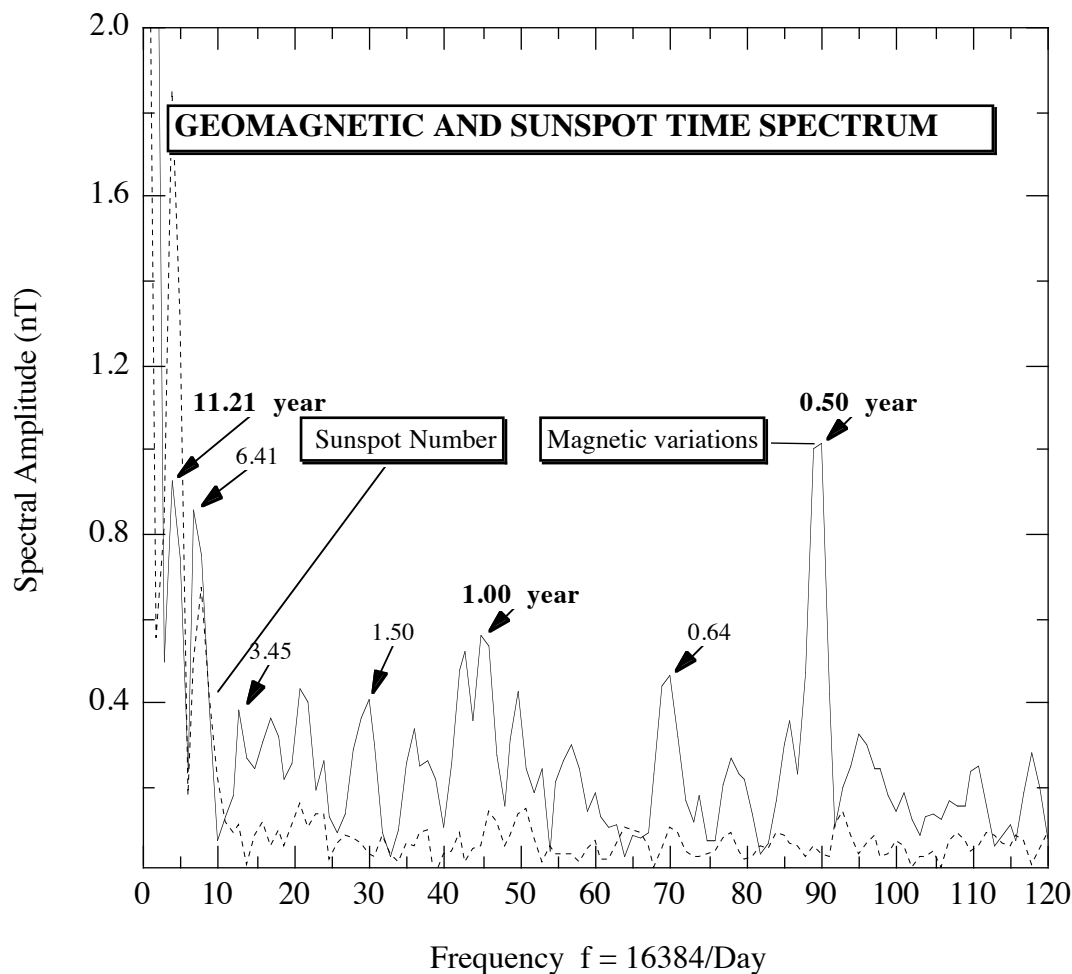
Kuva 5.6. Esimerkki IMAGE-magnetometriverkon rekisteröinneistä 18.-19.2.2008. Aseamt ovat pohjoisesta etelään Kevo (KEV), Kilpisjärvi (KIL), Mekrijärvi (MEK), Hankasalmi (HAN), Nurmijärvi (NUR) ja Tartto (TAR). Kyseessä on itäkomponentti (Y). Magneettikentässä on ollut revontuliaalueella (KEV, KIL) lievää aktiivisuutta, mikä on näkynyt magneettikentän häiriöinä. Vaihtelujen perusmuoto on suunnilleen samanlainen koko havaintoalueella. (<http://www.ava.fmi.fi/image/realtime/UT/>).

## 5.2 Magneettikentän nopeat muutokset - geomagneettinen "sää"

Edellä on puhuttu Maan sisältä aiheutuvan hyvin hitaasti muuttuvan magneettikentän ominaisuuksia. Jos tarkasteltava aikaväli valitaan huomattavasti lyhyemmäksi, esim. kuukauden mittaiseksi, havaitaan, että Maan magneettikentässä on paitsi säännöllinen vuorokausivaihtelu niin myös epäsäännöllisiä muutoksia, joiden kesto vaihtelee muutamasta sekunnista kymmeneen tunteihin. Päivästä toiseen

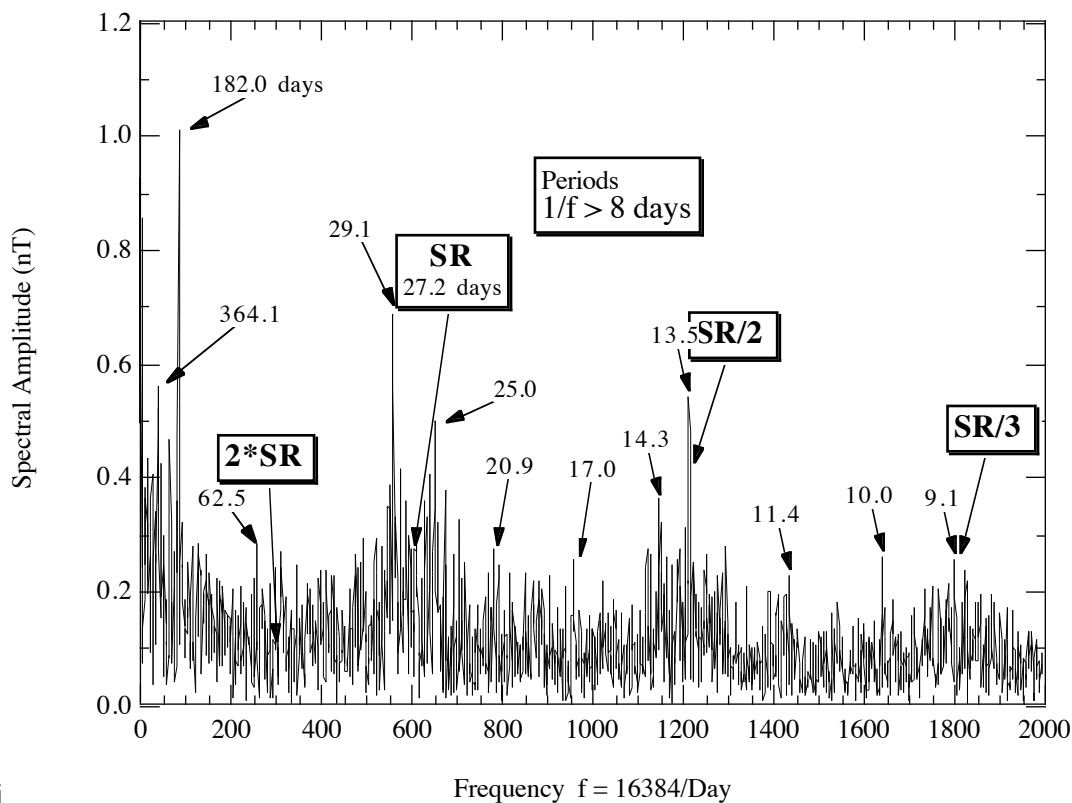
tapahtuvia kentän muutoksia voidaan kutsua geomagneettiseksi säätilaksi tai avaruussääksi (Space Weather), joka voi olla rauhallinen, häiriöinen tai myrskyinen riippuen kentän vaihtelujen nopeudesta ja amplitudista. Yleensä puhutaan magneettisesta aktiivisuudesta, jolla ymmärretään magneettikentän muutoksien poikkeamia keskimääräisestä vaihtelusta. Magneettisen myrskyn aikana kenttävoimakkuus voi muutaman tunnin aikana vaihdella kymmeniä prosentteja ja kompassineulan suunta kääntyä useita asteita normaaleista lukemistaan. Ilmakehän sääilmiöiden primäärisenä energialähteenä on auringon säteily. Alailmakehään, maahan ja valtameriin absorboituva säteily on energialtaan vakio, ainakin nykytietämyksen mukaan. Näin ollen sään ja ilmaston vaihtelut aiheutuvat ilmakehän sisäisestä dynamiikasta eivät auringon energiantuoton vaihteluista. Auringon säteilyenergian muutosten, auringonpilkkujen jne. mahdollinen vaikutus säähän ja ilmastoon on ollut tutkimuksen kohteena jo kauan Aiheesta kirjoitetaan jatkuvasti alan tieteellisissä julkaisuissa, mutta toistaiseksi ei ole voitu sitovasti osoittaa minkäänlaista korrelaatiota auringon aktiivisuuden ja sääilmiöiden välillä.

Tilanne on kokonaan toinen geomagneettisen säätilan ja avaruussään osalta. Sen häiriöt ja myrskyt ovat yksinomaan auringon aiheuttamia. Auringon nopeasti vaihteleva korkeaenerginen ultravioletti- ja röntgensäteily ionisoi ilmakehän molekyyleja n. 100 km korkeudelta ylöspäin, jonne syntyy ionosfääriksi kutsuttu sähköä johtava vapaita elektroneja ja ioneja sisältävä kerros. Auringon säteilyaktiivisuuden vaihdellessa, myös ionosfäärin sähkövirrat muuttuvat aiheuttaen maanpinnalla vastaavia magneettikentän muutoksia. Ionosfäärin elektronitiheyden ym. fysikaalisten ominaisuuksien äkilliset muutokset riippuvat lähes täysin auringon aktiivisuudesta. Samoin auringonpilkkujen esiintymisen tunnettu 11-vuotinen jaksollisuus havaitaan selvästi sekä ionosfäärin ominaisuuksien jaksollisuutena että myös geomagneettisen kentän samanpituisena aaltoiluna kuten kuvasta 5.5 voidaan nähdä.



Kuva 5.5a. Geomagneettinen aikaspektri lyhytaikaisten vaihteluiden osalta, jolloin aiheuttajana ovat maanpinnan ulkopuoliset lähteet (external variation) noin puolesta vuodesta 11 vuotiseen auringonpilkkujaksoon. Numerot osoittavat spektriipiikkien kohdalla niiden aallonpituuden ( $= 1/f$ ,  $f$  on taajuus) vuosissa ilmoitettuna. Tyypillisiä voimakkaita jaksollisuuksia ovat auringonpilkkujaksoon sidottu 11.2 v aalto, vuosiaalto (1.00 v) ja puolivuotinen jakso (0.5 v). Katkoviiva osoittaa auringonpilkkujen määrän vaihtelun.

Magneettikentän puolivuotinen jaksollisuus (Semiannual Wave) aiheutuu Maan magneettisen akselin kallistuskulmasta maapallon kiertoradan tason suhteen. Magneettista häiriöisyyttä aiheuttavat aurinkotuulihiukkaset pääsevät magnetosfäärin sisään paremmin kevät- ja syyspäivän tasauksen aikoihin ja huonommin kesä- ja talvipäivän seisauksen tuntumassa. Kuvassa 5.5a näkyvät muut spektriipiikit (0.64 ja 1.50 v) ovat todennäköisesti spektrianalyysin tuottamia. "Ylimääräisiä" piikkejä syntyy myös, jos tiettyä dominoivaa aallonpituutta moduloidaan jollain toisella aallolla.



Kuva 5.5b. Geomagneettinen aikasppektri lyhytaikaisten vaihteluiden osalta, jolloin aiheuttajana ovat maanpinnan ulkopuoliset lähteet (external variation) jaksoltaan  $> 8$  päivää. Numerot osoittavat spektriipiikkien kohdalla niiden aallonpituuden ( $= 1/f$ ,  $f$  on taajuus) päivissä ilmoitettuna. Tyypillisiä voimakkaita jaksollisuuksia ovat vuosiaalto (364.1 d), auringon pyörähdysaikaan (SR = Solar Rotation) 27 d liittyvä jaksollisuus, joka spektrianalyysissä hajoaa moneksi piikiksi (esim. 29.1 d ja 25.0 d). SR-jaksollisuuden ensimmäimen aliharmoninen jakso 13.5 d on todettu olevan ositain todellinen ja liittyy auringon aktiivisuuteen.

### 5.3 Avaruussään häiriöindeksit

Kuten edellisestä luvusta käy ilmi, avaruussään häiriöiden eräs keskeinen mitta on magneettikentän vaihtelu. Tavalliselle maallikolle kuitenkin magneettikenttä on hieman hämärä fysikaalinen käsite, ja yleensä aiheesta kiinnostuneilla ei ole selkeää käsitystä siitä minkä suuruiset magneettikentän arvot ja vaihtelut ovat normaaleja.

Geomagneettisten häiriöiden voimakkuutta luonnehditaan erilaisilla indekseillä eli aktiivisuusluvuilla. Mitä suurempi indeksin arvo, sitä suuremmasta avaruussäähäiriöstä on kyse.

Indeksit ovat lukuja, jotka kuvaavat magneettisen häiriöisyyden astetta tietyllä aikavälillä (esim. 1 tunti, 1 vrk, 1 kk jne). Aktiivisuusluvut määritetään magneettisten observatorioiden (kuten Ilmatieteen laitoksen Nurmijärven observatorion) jatkuvista magneettikenttärekisteröinneistä. Globaali-indeksillä tarkoitetaan aktiivisuuslukua, joka on määritetty maantieteellisesti mahdollisimman kattavasta observatorioverkosta ja joka siis kuvaa geomagneettisen kentän häiriöisyyttä maailmanlaajuisesti.

Yleisin magneettikentän häiriöisyyttä mittaava indeksi on  $K$ -indeksi, joka kuvaa magneettikentän poikkeamaa (amplitudi) rauhallisesta perustilasta. Indeksien symboli tulee saksankielisen termin "Kennziffer" (tunnusluku) alkukirjaimesta. Sen laskentamenetelmän kehitti J. Bartels 1930-luvulla. Siinä magneettisissa observatorioissa rekisteröity magneettikentän vaihtelu luokitellaan kymmenportaisella asteikolla 0,...,9. Indeksien arvot 0 ja 1 vastaavat magneettikentän perustilaa, josta käytetään englanninkielistä nimitystä "Quiet". Lukuihin 2 ja 3 liittyvät muutokset kertovat kohonneesta häiriötasosta ("Unsettled").  $K = 4$  kuvaa aktiivisesti muuttuvaa magneettikenttää ("Active"),  $K = 5$  on magneettisen myrskyn alaraja ("Minor Magnetic Storm"), kun  $K = 6$ , kyseessä on suuri magneettinen myrsky ("Major Magnetic Storm") ja jos vallitsee  $K = 7$ , käynnissä on ankara magneettinen myrsky ("Severe Magnetic Storm"). Ylimmät indeksien arvot 8 ja 9 on varattu magneettisille hirmumyrskyille ("Giant Magnetic Storm").  $K$ -indeksi on normitettu siten, että se ottaa huomioon sen, että magneettiset myrskyt ovat voimakkaampia korkeilla leveysasteilla ( $> 60^\circ$  N, S) kuin keskileveysasteilla ja päiväntasaajan seudulla. Jokaisella observatoriolla on amplitudimittansa eri  $K$ :n arvoille. Mitta valitaan siten, että kukin observatorio saa saman jakauman eri  $K$ -arvoja auringonpilkkujakson aikana, jolloin  $K$ -arvoista saadaan myös maapallonlaajuisen magneettisen avaruussäähäiriön mittaindeksi, josta käytetään symbolia  $Kp$  ( $p$  tulee sanasta "planetaarinen").

Nurmijärven observatoriossa magneettinen myrsky saa arvon 9, jos kolmen tunnin aikana suurin muutos on ollut vähintään 750 nT. Sodankylässä, jossa häiriöisyyden taso on keskimäärin korkeampi, samaan lukuun vaaditaan kaksi kertaa suurempi häiriö (1500 nT).

Radioamatöörit ja DX-kuuntelijat kautta koko maapallon ovat kiinnostuneita avaruussäätiedoista ja -ennusteista, koska "radiokelit" ovat voimakkaasti riippuvaisia vallitsevasta avaruussäättilasta. Suomen radioamatööriliitto ([www.sral.fi](http://www.sral.fi)) välittää mm. tekstitelevisiion välityksellä internetistä poimittuja päivittäisiä avaruussäätietoja. Radioamatöörien yhteisössä laajassa käytössä ovat avaruussään tunnusluvut: "Solar flux", "A-indeksi" ja "K-indeksi", joista annetaan päivittäin uudet lukemat. Tiedot ovat peräisin NOAA:sta Yhdysvalloista. Näistä ensimmäinen on Auringon 2.8 gigahertsin taajuudella säteilemä tehovo, joka luonnehtii Auringon yleistä aktiivisuustasoa ja on verrannollinen maapallon ionosfäärin tiheyteen. Säteilyä mitataan Kanadassa sijaitsevassa astrofysikaalisessa observatoriossa. Säteilyvuon mittana on sfu (Solar Flux Unit);  $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$ . Auringon ollessa aivan pilkuton "Solar Flux" on noin 70 sfu ja aktiivisessa tilanteessa se voi olla yli 300 sfu. "Solar flux" seuraa varsin tarkkaan päivittäisen auringonpilkkuluvun vaihtelua. Lyhytaaltoalueella tapahtuva yhteydenpito on sitä parempi mitä korkeampi "Solar flux" on.

A- ja K-indeksit kertovat Maan magneettikentän häiriöisyyden tasosta. A kuvaa koko maapallon yhden päivän magneettikentän myrskyisyyden luvulla, joka saa arvot 0–400. Luku saadaan useiden geomagneettisten observatorioiden rekisteröinneistä eri puolilla maapalloa. K-indeksi saa uuden arvon (0,1,...,9) aina kolmen tunnin välein. Se perustuu USA:n keskusobservatorion magneettikentän havaintoihin Fredericksburgissa Arizonassa. A-luku luonnehtii avaruussäättilan magneettikentän yleistä häiriöisyyden tasoa päivästä toiseen. Se on likiarvo viralliselle Ak-luvulle. K-luku kertoo tarkemmin vallitsevasta avaruussäättilän kulumisen vuorokauden aikana. Mitä suurempia arvoja A ja K saavat, sitä myrskyisämpi on avaruussäättila ja lyhytaaltoyhteydet huonoja. NOAA:n toimittama K-indeksi antaa tietoa siitä, miten avaruussäättila on muuttumassa Pohjois-Amerikan alueella. Samaan aikaan Euroopassa avaruussäättila saattaa olla aivan toisenlainen. Suuria eroja on myös pohjois-eteläsuunnassa. Siksi kotimaisten radioamatöörien kannattaisi hyödyntää ajankohtaisia K-arvoja (tai vastaavia lukuja) eurooppalaisista observatorioista, joista saadut tiedot kuvaavat paremmin radiokuuluvuuden paikallisolosuhteita. Tällaisia tietoja saa mm. Suomesta Sodankylän ja Nurmijärven observatorioista.



Suurin osa (noin 80 %) kaikista päivistä auringonpilkkujakson aikana on magneettikentän häiriöisyyden kannalta rauhallisia kuten allaolevasta taulukosta voi päätellä. Myrskypäiviä on alle 10 % eli keskimäärin 40 vuosittain. Kuten aikaisemmin on jo todettu, myrskyaktiiviteetti ei kuitenkaan jakaudu tasaisesti auringonpilkkujakson eri vuosille, vaan nousevassa ja laskevassa pilkkujakson vaiheessa esiintyy erisuuruisia myrskyjä Auringon yleisestä aktiivisuudesta riippuen.

Kolmen tunnin jaksoissa tapahtuvan magneettisen avaruussäähäiriön lisäksi käytetään koko päivän häiriöisyyden tasoa kuvaavaa lukua, jota merkitään symbolilla *Ak*. Se määräytyy tietyn laskukaavan mukaan vuorokauden kahdeksasta *K*-luvusta.

Magneettisten häiriöiden luokittelu aktiivisuusindeksin mukaan ja häiriöpäivien lukumäärä auringonpilkkujaksoa (11 v) kohden Nurmijärven observatorion havaintojen mukaan

<i>K</i> -indeksi	<i>Ak</i> -luku	Magneettinen häiriöaste	Likim. osuus päivistä auringonpilkkujakson aikana
0, 1	0–10	rauhallinen (Quiet)	56 %
2, 3	11–19	melko rauhallinen (Unsettled)	28
4	20–29	aktiivinen (Active)	9
5	30–49	pieni magn. myrsky (Minor Storm)	5
6	50–99	suuri magn. myrsky (Major Storm)	1
7	100–199	ankara magn. myrsky (Severe Storm)	<1
8, 9	200–400	magn. hirmumyrsky (Giant Storm)	< 1

Aktiivisuusluvuilla on merkitystä arvioitaessa tietyn havaintokauden magneettista avaruussäähäiriöisyyttä. Laskemalla päivä-, kuukausi- ja vuosikohtaisia aktiivisuuslukuja saadaan tietoa miten avaruussäähäiriöt jakautuvat eri jaksoille, ja onko niissä havaittavissa pitkän aikajakson kehitystä. Aktiivisuusluvuista saadaan myös välillisesti tietoa aurinkotuulen ja itse Auringon ominaisuuksista.

#### 5.4 Magneettiset myrskyt eli avaruussäämyrskyt

Magneettinen avaruussäämyrsky\* alkaa, kun Auringossa tapahtuneen hiukkaspurkauksen plasmapiilvi törmää aurinkotuulen mukana Maan magnetosfääriin ulkoreunaan noin 10 Maan säteen etäisyydellä. Tavallisesti voimakkaan purkauksen alusta törmäykseen magnetosfääriin kestää 1–2 vuorokautta hiukkasten kiitäessä 4–5 miljoonaa kilometriä tunnissa. Nopein tunnettu saapumisaika oli elokuussa 1972 tapahtuneessa avaruussäämyrskyssä, jonka matka Maahan kesti vain 14 tuntia. Törmäyksen voimasta magnetosfääri supistuu päiväpuolelta. Tällöin magnetopausi voi siirtyä puolta lähemmäksi (5 Maan sädettä) maanpintaa, mikä maanpinnalla havaitaan magnetometreillä äkillisenä magneettikentän voimistumisena (10–100 nT) muutaman minuutin ajan. Ilmiöstä käytetään nimitystä SSC (Sudden Storm Commencement eli äkillinen myrskyn alkumerkki) ja se havaitaan samaan aikaan kaikkialla maapalloa (kuva 5.6). Joskus myös flare-purkauksesta lähtevä voimakas röntgensäteilypulssi havaitaan maanpinnalla magneettikenttärekisteröinneissä äkillisenä hyppäyksenä magneettikentän lukemissa. Se kertoo myrskystä, joka on tulossa maapallolle lähipäivinä.

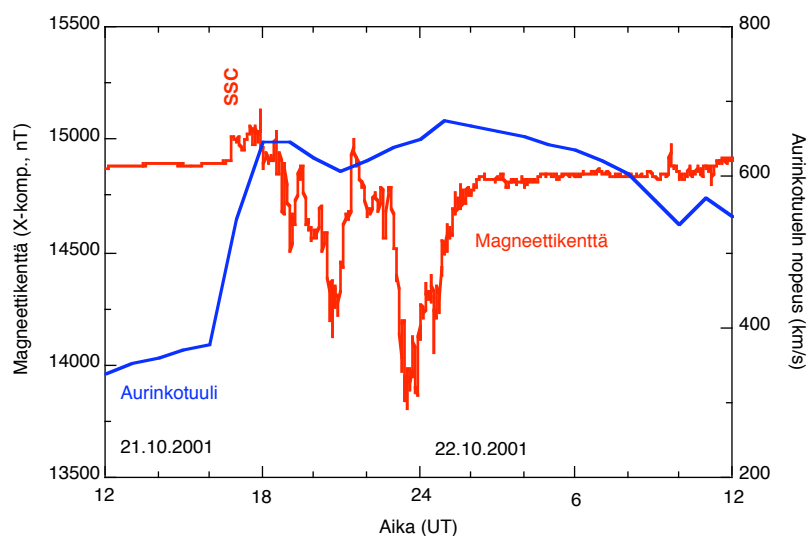
SSC:n esiintyminen on siis varma merkki alkavasta magneettimyrskystä, jonka voimakkaimmat vaiheet ilmaantuvat yleensä vasta muutamia tunteja tämän jälkeen. Myrskyn alkaminen nähdään hieman aikaisemmin aurinkotuulta monitoroivista satelliiteista. Tällaisia ovat mm. Soho- ja ACE-alukset, jotka tähyilevät Aurinkoa suunnilleen 1.5 miljoonan kilometrin etäisyydellä maapallosta. Ne havaitsevat plasman tihentymän ja äkillisen aurinkotuulen nopeuden kasvun suunnilleen puoli tuntia ennen kuin maanpintarekisteröinneissä näkyy magneettikentän SSC. Tämä on tärkeä tieto, koska se antaa tietyn suoja-ajan varautua tulevan magneettimyrskyn aiheuttamiin mahdollisiin haittoihin.

Mikäli hiukkastörmäyksen sattuessa magnetosfääriin rajapinnalla aurinkotuulen mukanaan kuljettama magneettikenttä (IMF) ja Maan kenttä ovat vastakkaisuuntaiset, kentät kumoavat toisensa, jolloin hiukkasille avautuu ikkuna, mistä ne tunkeutuvat magnetosfääriin sisätiloihin. Jos magneettikentät ovat yhdensuuntaiset, avaruussäämyrskystä kehittyä heikompi. Tavallisesti

---

\* Käytetään myös nimitystä magneettinen myrsky. Käsitteen otti käyttöön kuuluisa saksalainen luonnontutkija ja magneetikko Alexander von Humboldt (1769–1859) jo vuonna 1805. Lähtökohtana olivat havainnot kompassin magneetista, joka heilahtelee magneettisen myrskyn vallitessa edestakaisin kuin tuuliviiri tavallisen myrskyn vaikutuksesta.

magneettimyrskystä erotetaan kolme päävaihetta: alku-, pää- ja palautumisvaihe. Alkuvaiheen aikana magneettikenttä vaihtelee nopeasti ja epäsäännöllisesti, mutta itse kentän muutokset eivät vielä ole merkittävän suuria. Vaihe kestää muutamia tunteja. Päävaiheessa magneettikentän vaakakomponentti (H-komponentti) alkaa heiketä nopeasti, ja myrskyn voimakkuudesta riippuen heikentyä voi olla jopa kolmanneksen rauhallisen kentän tasosta (noin 5000 nT Suomen leveysasteilla). Palautumisvaiheen aikana H kasvaa myrskyä edeltävään tasoonsa. Koko myrsky kestää 2–10 tuntia. Päävaiheen aikana matalilla leveysasteilla havaittava magneettikentän voimakkuuden pudotus johtuu magnetosfäärin laaja-alaisesta sähkövirrasta, ns. rengasvirrasta, joka kiertyy maapallon ympärille noin 4–5 Maan säteen etäisyydellä (25 000–30 000 km) ja jossa hiukkasten aiheuttama sähkövirta kulkee idästä länteen aiheuttaen pohjois–eteläsuuntaisen magneettikentän. Rengasvirta on olemassa myös Auringon ollessa rauhallinen, mutta magneettimyrskyn aikana se voimistuu olennaisesti. Sähkövirran voimakkuus renkaassa voi ylittää miljoonan ampeeria.



Kuva 5.6. Auringossa tapahtui 19.10.2001 voimakas koronan massapurkaus. Sen synnyttämä aurinkotuulen shokkiaalto iskeytyi magnetosfäärin ulkopintaan 21.10. noin klo 17 (UT) aiheuttaen äkillisen magneettikentän kasvun, joka nähtiin kaikkialla maapalloa. Kuvassa (punainen käyrä) Nurmijärven observatorion magneettikenttärekisteröinti (pohjoiskomponentti X). Hieman ennen (30 min) törmäystä aurinkotuulen ominaisuuksia mittaava Soho-alus havaitsi aurinkotuulen nopeudessa (sininen käyrä) äkillisen noin 50 % nopeuden kasvun. Kuvan myrsky oli Nurmijärven yli 50 vuoden rekisteröintitilastoissa sijaluvulla 25 voimakkaiden myrskyjen tilastoissa.

Rengasvirran voimakkuutta mitataan erityisellä indeksillä (*Dst* eli Disturbance Storm Time), joka lasketaan neljän keskileveysasteen ja ekvaattorialueen magneettisen observatorion rekisteröinneistä. Voimakkaimpien myrskyjen aikana rengasvirran

aiheuttama magneettikentän pudotus on 400–500 nT eli noin prosentin luokkaa maapallon pysyvän kentän arvosta.

Magneettisen myrskyn päävaiheen aikana korkeilla leveysasteilla esiintyy hetkellisiä puuskia, joiden kesto vaihtelee muutamasta minuutista muutamaan tuntiin. Niistä käytetään nimitystä alimyrsky,\* ja ne vaikuttavat voimakkaimmin napaseuduilla. Alimyrskyjen yhteydessä taivaalla havaitaan kirkkaita ja nopeasti muotoaan muuttavia revontulia. Napaseuduille keskittyy silloin voimakkaita sähkövirtoja, jotka kulkevat kaukaa magnetosfääristä ionosfääriin suhteellisen lähelle (100–120 km) maanpintaa, jolloin niiden magneettiset häiriövaikutukset ovat suuria. Sähkövirrat, elektrojetit, kiertävät magneettisia napoja. Ne ovat suurimmillaan miljoonia ampeereja. Alimyrskyn voimakkuuden vaihtelua säätelee aurinkotuulen mukanaan kuljettama interplanetaarinen magneettikenttä, jonka polariteetin muutokset sulkevat tai avaavat hiukkasinjektioille magnetosfäärin portin magnetopaussissa.

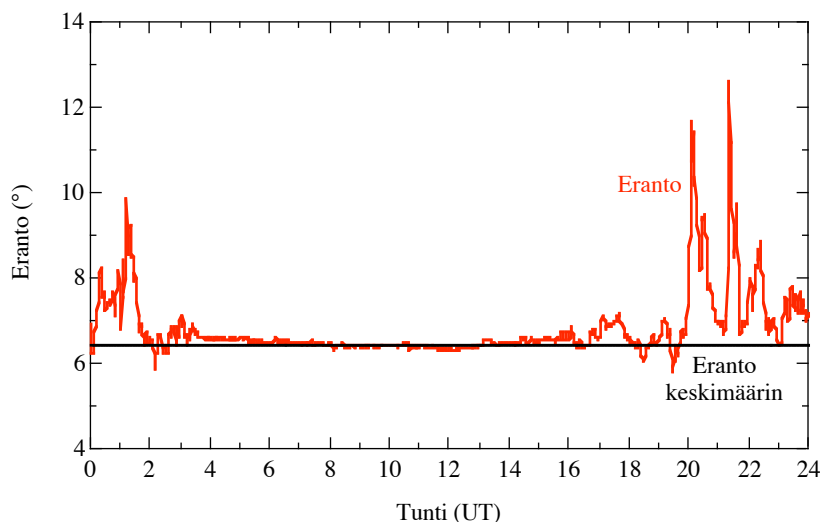
Magneettisen myrskyn päävaiheen jälkeen seuraa palautumisvaihe, jonka aikana magneettiset häiriöt vähitellen pienenevät ja magneettikenttä kokonaisuudessaan palaa normaalitilaan. Rengasvirta heikkenee ja alimyrskytoiminta hiipuu. Vaihe kestää useita tunteja riippuen siitä kuinka suuresta hiukkasryöpytyksestä on ollut kyse.

Kuva 5.7 näyttää kompassineulan suunnan vaihtelun suuren magneettisen myrskyn aikana. Esimerkkitapauksena on Halloween-myrsky lokakuussa 2003 Ilmatieteen laitoksen Nurmijärven aiheutuivat magnetosfäärin kenttäviivojen suuntaisista sähkövirroista lähellä ionosfääriä, jolloin eranto muutaman tunnin aikana heilahteli yli 5 kulma-astetta kuten tapahtui aamuyöllä ja illalla 30.10. Tavallisen kompassinkäyttäjän kannalta ei näillä muutoksilla ole kovin suurta käytännön merkitystä, koska kompassin neula heilahtelee paljon muutenkin veneen keikkuessa tai suunnistajan kädenliikkeiden mukana. Käytännön merkitystä kompassin häiriöillä ja yleensä magneettikentän rajuilla suunnan muutoksilla magneettimyrskyn aikana on silloin, kun tehdään tarkkoja magneettikentän mittauksia. Tällaisia ovat esimerkiksi lentokoneesta tehtävät aeromagneettiset kartoitukset geologisissa tutkimuksissa.

---

\* Käsitteen ottivat käyttöön 1960-luvun alussa S. Chapman (1888–1970) ja Syun-Ichi Akasofu (1930-). Näistä jälkimmäinen on modernin magnetosfääritutkimuksen uranuurtaja.

Suurten magneettimyrskyjen aikana mitattava geologista alkuperää oleva magneettikenttä häviää voimakkaasti vaihtelevan magneettimyrskyn alle ja haluttu geologinen mittaustieto jää saamatta.



Kuva 5.7. Magneettikentän erannon muutos ns. Halloween-avaruussäämyrskyn aikana 30.10.2003 Nurmijärven geofysiikan observatorion rekisteröintien mukaan. Myrskyssä oli kaksi vaihetta (klo 0–3 ja 19–24 UT), joiden välissä oli rauhallisempi välivaihe. Suurimmat erannon muutokset olivat yli 6 astetta yli erannon keskimääräisen arvon, joka on merkitty mustalla vaakaviivalla. Näin suuria poikkeamia havaitaan äärimmäisen harvoin, 1–2 kertaa auringonpilkkujakson aikana. Suurimmat vaihtelut ylittivät rauhallisen ajan muutokset noin 100-kertaisesti.

Pohjanmeren öljynporauslautoilla poranreiän etenemistä seurataan magneettikentän suuntatiedon avulla poraan kiinnitetyn magnetometrin avulla. Jo muutaman kymmenesosa-asteen suuruiset virheet vievät reiän väärään suuntaan. Näin voi tapahtua jo suhteellisen heikkojen magneettimyrskyjen aikana. Virhe on mahdollista korjata, jos magneettikentän muutoksia seurataan porausalueen lähistöllä. Magneettikentän mittaustuloksista voidaan virhe laskennallisesti poistaa. Pohjanmeren öljynporausyhtiölle tällaista jatkuvaa avaruussäätöpalvelua toimittaa Ison-Britannian Geologian tutkimuskeskus.

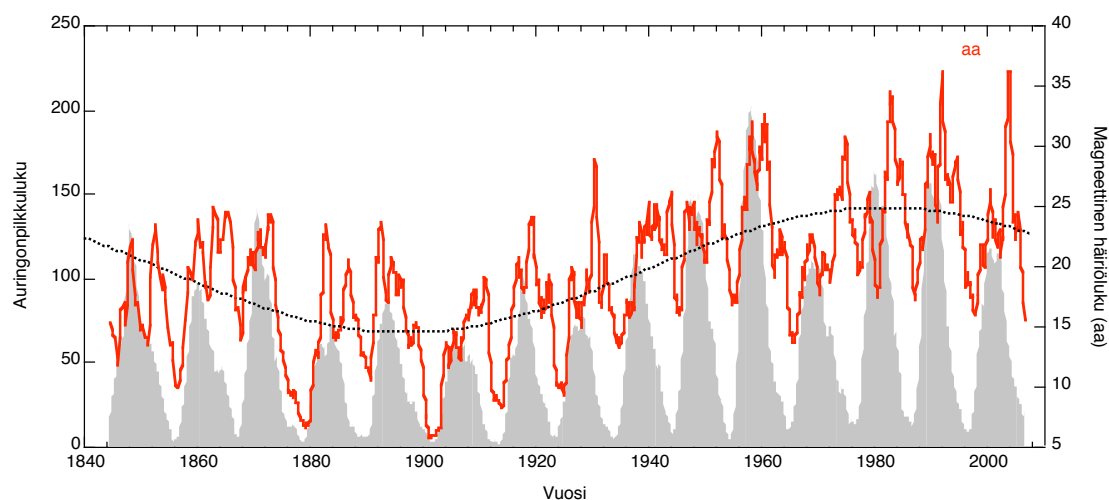
*Ak*-indeksin kaltainen pisin ajallisesti yhtenäinen aktiivisuuslukusarja on *aa*-indeksi. Se alkaa 1.1.1868 ja jatkuu edelleen. Indeksien arvot lasketaan kahden magneettisen observatorion havainnoista. Toinen sijaitsee Englannissa ja toinen maapallon vastakkaisella puolella Australiassa. Molemmat observatoriot edustavat Maan magneettikenttävaihteluiden rekisteröinneissä pisimpiä yhtäjaksoisia havaintojaksoja 1800-luvun puolivälistä lähtien. *aa*-sarjaa on täydennetty ajanjaksolle 1.7.1844–

31.12.1867 Helsingin magneettis-meteorologisen observatorion havainnoista lasketulla (ekvivalentti) *aa*-indekseillä. Näin on käytössä yli 160 vuotta kattava sarja suhteellisen homogeenisia aktiivisuuslukuja, jotka kuvaavat kolmen tunnin jaksoissa magneettista häiriöisyyttä ja siten välillisesti Auringon aktiivisuutta. Kuvassa 5.8 on *aa*-indeksin kuukausiarvoista laskettu tasoitettu vuosikeskiarvo. Tyypillistä on ollut, että magneettinen häiriöisyys on kasvanut koko 1900-luvun, mikä näkyy huippuarvojen suurenemisesta. Itse asiassa *aa*-luvun vuositaso on parhaillaan suurimmillaan sitten 1800-luvun. Tämä kertoo sen, että Auringon keskimääräinen aktiviteetti on nykyisin poikkeuksellisen korkea. Syksyllä 2003 häiriöisyyden keskimääräinen taso liukuvana vuosikeskiarvona oli korkeampi kuin koskaan 160 vuoden aikana, jolloin havaintotietoja on kerätty. Voidaan sanoa, että avaruusilmaston magneettinen häiriöisyys heikkeni lievästi 1800-luvun puolivälin jälkeen vuosisadan vaihteeseen saakka ja kasvoi sitten merkittävästi 1900-luvun puoliväliin. Sen jälkeenkin kasvua on ollut, mutta selvästi hitaampaa. Havaittu häiriöisyyden heilahtelu liittyy Auringon aktiivisuuden pitkiin Gleissbergin ja de Vriesin jaksollisuuksiin (noin 90 ja 200 vuotta). Kehitys näyttää menevän kohti Auringon aktiivisuuden hiljaisempia kausia tulevina vuosikymmeninä. Se merkitsee myös "lauhempaa" avaruusilmastoa, jolloin avaruussäähäiriöt esiintyvät harvemmin ja heikompina kuin mihin viime vuosikymmeninä on totuttu. Tässä täytyy kuitenkin muistaa, että tällainen avaruusilmastollinen ennuste perustuu vain Auringon aktiivisuuden tunnettuun tilastolliseen käyttäytymiseen ja siten todellisuus voi näyttäytyä toisenlaisena.

Kuten kuvasta 5.8 voidaan havaita, magneettinen häiriöisyys noudattaa samanlaista 11 vuoden jaksollisuutta kuin itse auringonpilkkutkin. Yleissääntönä pätee, että mitä suurempi auringonpilkkujen maksimiarvo on, sitä suurempi on myös magneettikentän häiriöisyys keskimäärin. Auringonpilkkujen suurimmat määrät sattuivat 1950-luvun loppupuolelle, jolloin magneettisia myrskyjä esiintyi keskimääräistä enemmän ja niiden voimakkuus oli myös huippuluokkaa. Lähemmin tarkasteltuna häiriöisyydessäkin havaitaan hiljaisempi vaihe (1–2 vuotta) – Gnevyshevin aukko – pian ilkkumaksimin ajankohdan jälkeen. Näin magneettinen häiriöisyys auringonpilkkujakson aikana on tyypillisesti kaksihuippuinen. Erityisen selvästi tämä kaksijakoisuus on havaittavissa auringonpilkkujakson 21 aikana, jolloin pilkku-

maksimin jälkeen (v. 1980) magneettinen häiriöisyys putosi muutaman vuoden ajaksi alhaisemmalle tasolle kuin mitä häiriöisyys oli edellisen pilkkuminimin aikana vuonna 1976 (kuva 5.8).

Kuva 5.8 ja taulukko sivulla 171 osoittavat magneettisten supermyrskyjen esiintymiset 160 vuoden ajalta. Tiedot perustuvat magneettikentän *aa*-indeksiin. Yksittäisten myrskyjen esiintyminenkin noudattaa pääpiirteissään auringonpilkkujaksoa. Myrskytuheus on suurimmillaan pilkkujen esiintymisen maksimivuosien tuntumassa ja pienimmillään pilkkujen määrän ollessa vähäisimmillään. Sellaisten pilkkujaksojen aikana, jolloin pilkkujen lukumäärät ovat olleet huippulukemissa, suuria magneettisia myrskyjä on ollut muita jaksoja enemmän. Eniten suurmyrskyjä on sattunut pilkkujakson 19 aikana 1950-luvun lopulla. 160-vuoden tilastojen 25 suurimmasta myrskystä viisi on sattunut kyseisen pilkkujakson aikana. Tilastoykkönen sijoittuu kuitenkin lähes sata vuotta aikaisemmalle ajalle elokuulle 1859, vaikka 1800-luvun puoliväli ei muuten ollut Auringon aktiivisuuden ja magneettisten myrskyjen suhteen poikkeuksellista aikaa. Poikkeusmyrskyjä sattui myös vuonna 1903 ja 1909, jolloin varsin heikon auringonpilkkujakson aikaan sattui tilastojen 6. ja 8. suurimmat myrskyt. Matalankin pilkkumaksimin auringonpilkkujakso voi tuottaa suuria magneettisia myrskyjä. Näin Auringon aktiivisuus ei ääritapauksissa ole koskaan tilastojen mukainen. "Poikkeus vahvistaa säännön" koskee helmikuussa 1986 riehunutta tilastojen 20. suurinta myrskyä, joka sijoittui vain muutaman kuukauden päähän pilkkujakson 22 minimistä.



Kuva 5.8. Magneettisen avaruussäätöindeksin (*aa*) vuosivaihtelu 1844–2006 (punainen) ja auringonpilkkut (harmaa). Avaruussäätöhäiriöt seuraavat auringonpilkkujen 11-vuotista rytmisyyttä, mutta

niissä on tiettyä ajallisesti lyhytkestoisempaa vaihtelua. Tyypillistä häiriöisyydelle on, että siinä esiintyy kaksi huippua pilkkumaksimin molemmin puolin, ja että laskevan pilkkujakson aikana sattuva häiriöisyysmaksimi on usein suurempi. Aivan pilkkumaksimin aikaan häiriöisyys voi laskea minimikauden tasolle kuten tapahtui pilkkumaksimivuonna 1979-80. Musta käyrä edustaa magneettisen häiriöisyyden pitkäaikaista tilastollista vaihtelua.

Kansainvälistä avaruussään tutkimusta ja ennustamista inspiroinut magneettinen myrsky 13.3.1989 sijoittuu tilastoissa sijalle 4. Halloween- ja Bastilji-myrskyt sijoille 12 ja 35. Mille sijalle kukin myrsky tilastoissa asettuu riippuu tietysti millä mittayksiköllä myrskyn voimakkuutta on arvioitu. Jos mittana käytetään esimerkiksi *Dst*-indeksiä, sijoitukset hieman muuttuvat. Tällöin esimerkiksi 13.3.1989 tapahtunut myrsky nousee kultamitalilla ykkössijalle.

Magneettisessa häiriöisyydessä on myös vuotuinen vaihtelu, joka ei riipu Auringon aktiivisuudesta, vaan ilmiö johtuu Maan magneetikentän akselin suunnasta aurinkotuulen suunnan suhteen. Avaruussäähäiriöiden vuodenaikavaihtelussa on kaksi huippua ja kaksi minimiä. Huiput ovat keväällä ja syksyllä heti kevät- ja syyspäiväntasauksien jälkeen, vastaavasti minimit ovat kesällä ja talvella kesäpäivän- ja talvipäivänseisauksien tuntumassa. Tasauspäivinä Maan magneettinen akseli on eniten kohtisuorassa aurinkotuulen mukanaan kuljettaman magneetikentän kanssa, jolloin magneetikenttien uudelleenkytkytyminen on suurimmillaan ja jolloin magneettisia häiriöitä aiheuttavia hiukkasia pääsee muita vuodenaikoja helpommin

#### **Kaikkien aikojen avaruussäämyrsky**

Syyskuun 2. päivänä 1859 maapalloa ravisutteli rajuin avaruussäämyrsky yli 150 vuoden aikana. Sen sytyttämiä revontulia ihailtiin aina tropiikkia myöten, mikä on äärimmäisen harvinaista. Lennätinlinjat olivat käyttökelvottomia tuntikausia (muita sähkölaitteita ei tuolloin juuri ollutkaan). Tutkijat arvioivat, että samansuuruinen myrsky tänä päivänä aiheuttaisi sähkönsiirtoverkoille ja satelliiteille tuntuvia häiriöitä ja vaurioita.

Englannin Kuninkaallisen tähtitieteellisen seuran sihteeri Richard Carrington (1826–1875) teki Lontoossa 1.9.1859 kaukoputkellaan rutiinihavaintoja Auringosta. Hänen kiinnostuksensa kohteena oli jättikokoinen auringonpilkku, josta Carrington laati tarkan piirroksen. Auringonpilkkujakson maksimiin oli aikaa vajaa puoli vuotta. Pilkun läpimitta oli noin 100 000 km eli melkein 10 kertaa Maan halkaisija.



Täsmälleen kello 11.15 GMT Carrington näki voimakkaan kirkastumisen lasilevyllä projisoimassaan auringonpilkukuvassa. Nauhamainen valokaari loisti suunnilleen viisi minuuttia päivänvalon kirkkaudella.

Carringtonin onneksi saman ilmiön oli pannut merkille kaukoputkellaan myös lontoolainen tähtitieteilijä Richard Hodgson (1804–1872), muutoin Carrington olisi voinut pitää havaintoaan näköharhana. Kyseessä oli tähtitieteen historian ensimmäinen dokumentoitu havainto Auringon roihupurkauksesta eli flaresta.

Carrington vertasi havaintoaan Lontoossa toimivan Kewin observatorion magneettikentän rekisteröinteihin. Siellä oli tuon ajan harvoja automaattisia valokuvaukseen perustuvia geomagneettisia rekisteröintilaitteita eli magnetometrejä. Rekisteröintijäljestä Carrington huomasi, että samaan aikaan auringonpilkun kirkastumisen kanssa oli magneettikentässä noin tunnin kestänyt häiriö. Nykytermein sitä kutsutaan nimellä "Solar Flare Effect", joka syntyy flaren lyhytaaltoisen UV- ja röntgensäteilyn ionisoidessa päiväpuolen ionosfääriä. Lisääntynyt ionisaatio aiheuttaa magneettikenttään häiriöpulssein.

Flare-ilmiön tiedetään ennakoivan tulevaa avaruussäämyrskyä, jonka syynä on Auringosta avaruuteen syöksähtävä plasmapiilvi, ainakin 1000–2000 kilometriä sekunnissa kiitävä aurinkotuulen raju puuska. Carringtonin ja Hodgsonin havaitsemasta roihupurkauksesta kului noin 17 tuntia syyskuun 2. päivän puolelle, jolloin käynnistyi maapallonlaajuinen magneettinen hirmumyrsky. Revontulia paloi tropiikkia myöten Kravun ja Kauriin kääntöpiirien sisäpuolella. Näin alhaisten leveysasteiden revontulia ei ole havaittu vuoden 1859 myrskyn jälkeen kuin ehkä kerran myöhemmin, vuonna 1872.

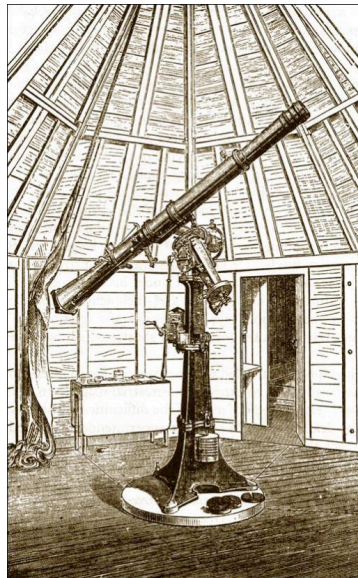
Magneettinen myrsky rekisteröitiin myös Suomessa Helsingin magneettisessa observatoriossa (sittemmin Ilmatieteen laitos) Kaisaniemessä. Magneettikentän vaihtelut olivat kuitenkin niin valtavia, että rekisteröintilaitteista ei saatu enää lukemia, mikä oli poikkeuksellista jo vuonna 1844 alkaneissa magneettikentän havainnoissa.

Tarkempi analyysi vuoden 1859 myrskystä osoittaa, että siinä oli itse asiassa kaksi toisiinsa kietoutunutta peräkkäistä myrskyä, joista jälkimmäiseen liittyvän flaren Carrington ja Hodgson havaitsivat. Myrskyn ensimmäisen vaiheen poikkeuksellisia revontulia nähtiin elokuun 28. päivä Välimerta myöten, mutta toinen näytös nelisen päivää myöhemmin tarjosi vielä mahtavammat tulet taivaalle.

Carringtonin esimies, Kewin observatorion johtaja Balfour Stewart (1828–1887), yhdisti Carringtonin havaitseman flaren ja siitä aiheutuneen välittömän magneettisen häiriön ja puolitoista vuorokautta myöhemmin alkaneen magneettisen suurmyrskyn ilmiöt rohkeasti yhteen: kyseessä ovat Auringon suoran toiminnan aiheuttamat ilmiöt. Carrington ei itse rohjennut moiseen johtopäätökseen, vaan kirjoitti Kuninkaalliselle tähtitieteelliselle seuralle osoitetun raporttinsa lopuksi: "One swallow does not

make a summer". Tällä hän tarkoitti sitä, että tarvitaan lisää samankaltaisia havaintoja ennenkuin voidaan varmistaa väitetyt yhteydet Aurinkoon.

Carringtonin flare-havainto oli kuitenkin melkoinen onnenkantamoinen, sillä koko 1800-luvun jälkimmäisen puoliskon aikana ei havaittu kuin kymmenkunta flaretapausta eikä niihin liittynyt merkittäviä magneettisia häiriöitä eikä revontulia. Auringon aktiivisuuden välittäjää, aurinkotuulta, ei tunnettu lainkaan. Hiukkasteoria Auringon purkauksien ja revontulien syynä esitettiin vasta melkein puoli vuosisataa myöhemmin. Brittiläisen tiedeyhteisön suuri auktoriteetti lordi Kelvin asettui kiivaasti ja koko arvovalloillaan vastustamaan Auringon väitettyä osuutta suurten magneettisten myrskyjen aiheuttajana. Vasta 1930-luvulla, melkein 80 vuotta Carringtonin flare-havainnosta, voitiin radioluotauksilla varmentaa flaren aiheuttama ionisaation kasvu ionosfäärissä.

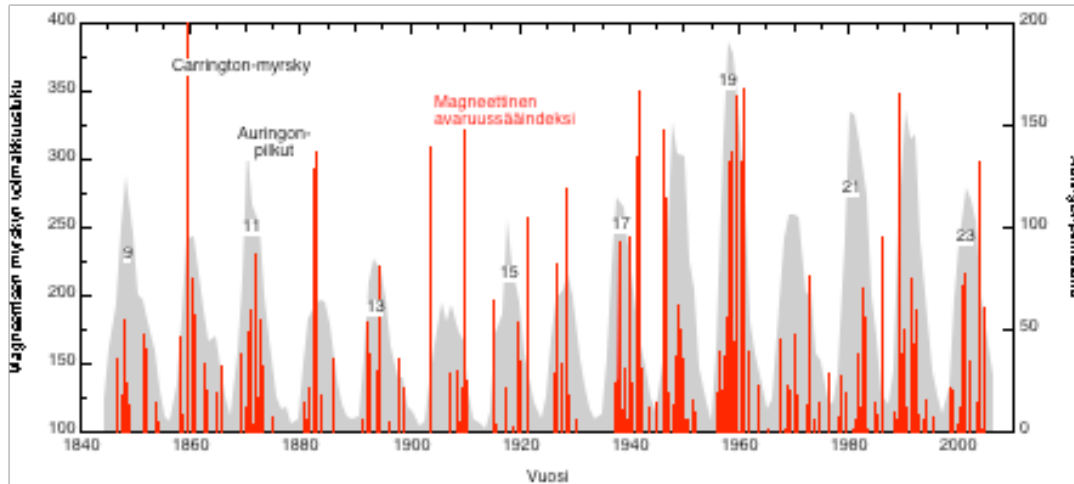


Kuva 5.9. Richard Carringtonin Auringon tarkkailuun käyttämä kaukoputki Kewin observatoriossa Englannissa. (Kuva: H.C. King)

magnetosfäärin sisäpuolelle. Tasauspäivinä magneettikenttien suunnat poikkevat enemmän ja siten häiriöitäkin on vähemmän. Graafisesti tämä vaihtelu nähdään kuvasta 5.11.

Suurimpienkin magneettisten myrskyjen esiintyminen noudattaa pääpiirteissään magneettikentän häiriöisyyden yleistä vuodenaikajakaumaa, mutta heinäkuu ja marraskuu esiintyvät myrskyn ajankohtana tilastollisesti liian usein. Tätä poikkeamaa

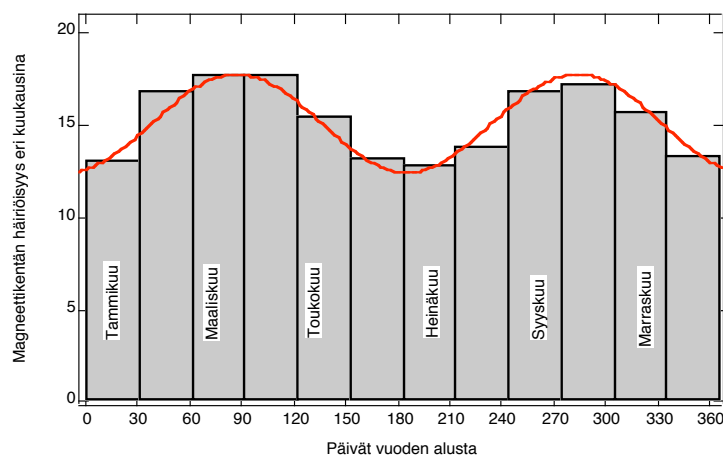
on paljon tutkittu ja sen takana saattaa olla jokin toistaiseksi selvittämätön mekanismi, joka säätelee myrskyn vahvistumista magnetosfäärissä.



Kuva 5.10. Ankarien magneettisten myrskyjen ( $aa > 100$ ) esiintymispäivät 1844–2005 (punaiset pystyviivat). Viivan korkeus kertoo kuinka suuresta myrskystä on ollut kyse. Auringonpilkit ovat harmaalla. Numerot ovat auringonpilkkujakson järjestyslukuja. Tarkastelukauden suurin myrsky sattui 29.8.–4.9.1859. Eniten suuria myrskyjä on ollut pilkkujaksolla 19, jolloin myös auringonpilkkuluvut olivat huipussaan.

#### 5.4 Avaruussää ja revontulet

Auringon aktiivisuuspurkaukset ja niistä aiheutuvat avaruussäätöilmiöt maapallon lähiavaruudessa voidaan havaita vain erikoislaitteilla joko satelliiteilla tai maan pinnalla tapahtuvilla rekisteröinneillä seuraamalla esimerkiksi Maan magneettikentän vaihteluita. Ilmiöiden visualisointi tapahtuu joko avaruusluotaimien ottamien kuvien kautta itse Auringon aktiivisuusilmiöistä tai sitten erilaisten havaintolaitteiden rekisteröintien tuottamista numerosarjoista, jotka antavat tietoja mitattavan avaruussäähäiriön aikavaihteluista. Toisin on avaruussäätöilmiöistä revontulien laita, koska ne voidaan havaita ihmissilmin ilman minkäänlaisia apuvälineitä. Revontulet ovat luonnon tarjoama avaruussäätökokonaisuuteen kuuluva valonäytelmä, missä esiintymislava on ionosfäärissä 100 km korkeudesta alkaen aina 1000 km saakka.



Kuva 5.11. Harmaat pilarit: Magneettisten avaruussäähäiriöiden keskimääräinen voimakkuus eri kuukausina. Häiriöt ovat tilastollisesti suurimpia maaliskuu-huhtikuussa ja syys-lokakuussa, ja pienimmillään kesäkuussa ja joulukuussa. Punainen käyrä: häiriöisyyden teoreettinen jakauma.

25 suurinta magneettista myrskyä aikavälillä 1844-2005 magneettisen avaruussäähäiriöindeksin (*aa*) mukaan.

Sija	Päivämäärä	<i>aa</i> (maksimi 400)
1.	03.09.1859	400
2.	13.11.1960	352
3.	18.09.1941	350
4.	13.03.1989	348
5.	15.07.1959	347
6.	25.09.1909	329
7.	28.03.1946	322
8.	31.10.1903	308
9.	08.07.1958	305
10.	20.11.1882	305
11.	01.04.1960	299
12.	29.10.2003	299
13.	11.02.1958	298
14.	17.04.1882	292
15.	08.07.1928	278
16.	22.09.1946	272
17.	17.11.1882	263
18.	15.05.1921	257
19.	01.03.1941	250
20.	08.02.1986	244
21.	25.03.1940	242
22.	22.02.1938	240
23.	30.10.2003	230
24.	04.02.1872	230
25.	20.11.2003	228

## Lisätekstiä Lukuun 5:

### Tilastoja geomagneettisista myrskyistä 163 vuoden ajalta (1844-2006) H. Nevanlinna

Ilmatieteen laitos, Helsinki, heikki.nevanlinna@fmi.fi

#### 1. JOHDANTO

Geomagneettisella myrskyllä tarkoitetaan maapallon magneettikentän häiriötilaa, jossa magneettikentän aikamuutokset poikkeavat suuresti normaalista vaihtelusta. Myrskyjen syynä ovat auringosta purkautuvat hiukkaset, jotka kulkeutuvat aurinkotuulen mukana maapallon magneetti- ja ionikehiin. Hiukkasten aikaansaamat sähkövirrat aiheuttavat nopeita muutoksia maapallon magneettikentässä. Tyypillinen revontulialueen magneettinen myrsky kestää muutaman tunnin, mutta myrskytila voi jatkua jopa useita vuorokausia. Myrskyn aikana magneettikenttä vaihtelee äärimmäisissä tapauksissa  $\pm 5000$  nT, mikä on noin 10 % Suomessa vallitsevasta maapallon perusmagneettikentästä. Kentän aikamuutokset ovat suurimmillaan  $\pm 20$  nT/s.

Magneettikentän aikavaihteluja rekisteröidään magneettisissa observatorioissa, kuten Ilmatieteen laitoksen Nurmijärven observatoriossa tai automaattiasemilla, kuten Fennoskandian alueen IMAGE-magnetometriverkolla. Magneettiset observatoriot ovat magneetti-kentän havainnoimisessa pitkäkestoista toimintaa; Nurmijärven observatorio on ollut rekisteröimässä vuodesta 1953 lähtien. Pitkät aikasarjat antavat arvokasta geofysikaalista tietoa magneettikentän hitaista (sekulaarisista) muutoksista, jotka kertovat fysikaalisten olosuhteiden muutoksista maapallon ytimessä, missä pääkenttä syntyy. Magneettisten myrskyjen ja yleensä geomagneettisen häiriöisyyden seuraaminen antaa puolestaan tietoa itse auringon hiukkastuottojen (aurinkotuuli) ja magneettikentän hitaista vaihteluista.

Säännölliset magneettikentän rekisteröinnit aloitettiin 1830- ja 1840-luvuilla, kun kiinnostus maapallon magneettikentän olemuksesta oli saanut uutta vauhtia sähkö-

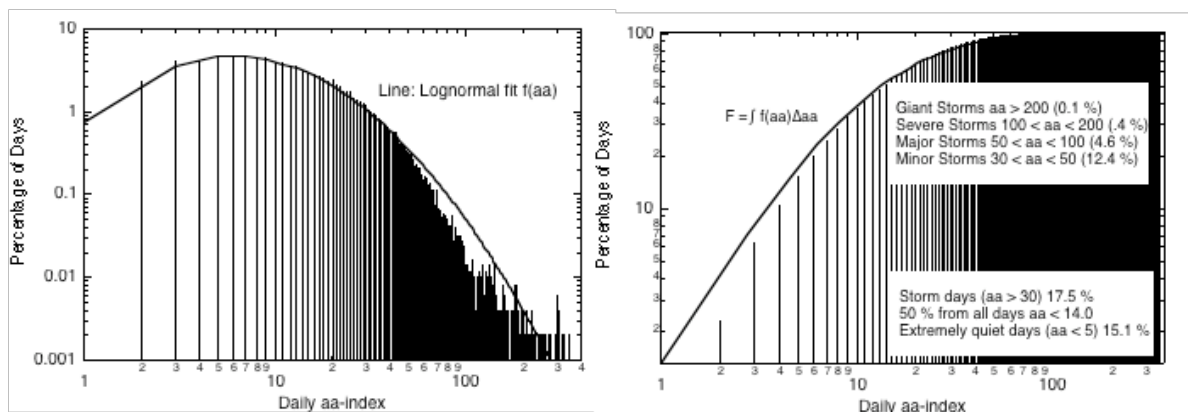
magnetismin yleisten lainalaisuuksien keksimisen myötä 1820-luvulla. Maapallon magneettikentän syitä haettiin sähkömagnetismin paradigmojen kautta. Suomeen magnetismin tutkimus tuli varhain (Nevanlinna, 2005). Ensimmäinen täysimittainen magneettis-meteorologinen observatorio aloitti rekisteröinnit vuonna 1844, jolloin maapallolla oli toiminnassa alle 20 vastaavanlaista observatoriota (nykyisin niitä on noin 150) (Nevanlinna, 2004). Helsingissä magneettikentän muutoksia seurattiin visuaalisten rekisteröintien avulla. Havaintoja tehtiin aluksi 6 kertaa tunnissa (1844-1856), myöhemmin kerran tunnissa (1856-1897). Havaintokohteena olivat magneettikentän suunta (deklinaatio,  $D$ ), sekä vaaka- ja pystysuora voimakkuus ( $H$  ja  $Z$ ). Magneettisia mittauksia tehtiin säännöllisesti aina vuoteen 1912 saakka, jolloin ne jouduttiin lopettamaan sähköraitiotieliikenteen aiheuttamien häiriöiden vuoksi.

Helsingin havaintosarja on tieteellisesti arvokas, koska 1800-luvulta ei ole kovin paljon säilynyt yhtä korkeatasoisia ja homogeenisia havaintoaineistoja. Helsingin aineisto on nykyisin digitaalisessa muodossa (noin 2 000 000 lukemaa), joten se soveltuu hyvin erilaisten tilastollisten tarkastelujen materiaaliksi. Moderneista observatoriorekisteröinneistä johdetaan rutiininomaisesti erilaisia tunnuslukuja (indeksejä), jotka luonnehtivat geomagneettisen kentän häiriöisyyden suuruutta tietyssä aikavälissä, yleensä 3 tunnin välein tai harvemmin. Näin saadaan diskreetti lukujono, joka asteikolla 0, 1, ..., 9 kertoo aikavälin magneettisen häiriöisyyden ns.  $K$ -indeksin muodossa. Luvuista voidaan laskea (tietyn normituksen jälkeen) myös päiväkohtaisia lukemia, jolloin kuhunkin päivään liitetään luku, joka kertoo magneettisen häiriöisyyden (aktiivisuuden). Eräs tällainen on  $Ak$ -indeksi, joka saa arvot 0 - 400; mitä suurempi luku sitä suurempi on magneettikentän häiriöisyys. Helsingin observatorioaineistosta on laskettu indeksialgoritmia soveltaen 3 tunnin ja vuorokautiset aktiivisuusluvut ( $K$ - ja  $Ak$ -indeksit) ajanjaksolle 1844-1897 (Nevanlinna and Kataja, 1993, Nevanlinna, 2004). Toinen 1800-luvulla alkanut magneettinen havaintosarja perustuu Greenwichin ja Melbournen observatorioiden yhdistettyihin havaintoihin ja niistä johdettuihin  $K$ -indeksiperheen aktiivisuuslukuihin ( $aa$ -indeksi). Tämä sarja alkaa vuodesta 1868 ja jatkuu nykypäivään. Kun siihen yhdistetään Helsingin (1844-1867) indeksisarja, saadaan yli 160 vuotta pitkä havaintosarja, joka on pisin käytettävissä oleva magneettikentän häiriöisyyden aineisto.

## 2. AKTIIVISUUSTILASTOJA

160 vuoden tilastoissa magneettisia myrskypäiviä on hieman alle viidennes. Yli puolet päivistä on luokiteltu magneettisesti rauhallisiksi (Kuva 1). Magneettiset myrskyt yhdessä revontulien kanssa liittyvät maapallon lähiavaruuden avaruussähän ja hitaampien muutosten osalta avaruusilmastoon. Auringon aktiivisuuden 11-vuotinen jakso säätelee avaruussään vaihteluja kuten Kuvasta 2 nähdään. Siinä (ylempi kuvio) on kuvattuna auringonpilkkuluku ja päivittäinen aktiivisuusindeksi *aa* (365 vrk tasoituksella). Kuvasta voi päätellä, että magneettinen aktiivisuus seuraa varsin tarkasti auringonpilkkulukuja kuitenkin siten, että aktiivisuuden minimi sattuu keskimäärin yhtä vuotta myöhemmin kuin pilkkujen esiintymisen minimivuosi. Aktiivisuusminimistä kestää seuraavaan pilkkumaksimiin keskimäärin 3,5 vuotta. Mielenkiintoinen piirre aktiivisuuden vuodesta toiseen tapahtuvassa kehityksessä on, että aktiivisuushuiput ovat 1900-luvulla voimistuneet auringonpilkkujen suurimpien arvojen mukana. Näin keskimääräinen avaruusilmasto on ollut kasvavan häiriöisyyden tilassa viime vuosisadalla aina 1950-luvun loppuun asti. Sen jälkeenkin aktiivisuuden trendi on ollut kasvava, mutta olennaisesti hitaampi. Koko 163 vuoden havaintosarjan suurin (tasoitettu) arvo (36) saavutettiin vuonna 2003 (kts.myös Kuva 3). Samana vuonna rekisteröitiin ennätysmäärä (vuodesta 1993) alimyrskytapauksia (Tanskanen et al., 2005). Aktiivisuuden kasvun oletetaan liittyvän aurinkotuulen mukana kulkevan magneettikentän hitaaseen vahvistumiseen 1900-luvun aikana (mm. Lockwood et al., 1999). 1900-luvun revontulitilastoissa näkyy samanlainen kasvava kehityskulku vuosittaisissa revontuliöiden lukumäärissä (Nevanlinna and Pulkkinen, 2001; Nevanlinna, 2004).

Kuva 2 (alempi) näyttää suurimmat yksittäiset myrskypäivät, joita on alle 0,5 % tarkastelujakson kaikista päivistä. Selvästi eniten voimakkaita magneettisia myrskyjä on esiintynyt auringonpilkkujakson 19 aikana. Kuitenkin suurin yksittäinen myrsky sattui elo-syyskuun taitteessa 1859 (Nevanlinna, 2006). Voimakkaat magneettiset myrskyt esiintyvät yleensä hiukan ennen pilkkumaksimia tai pilkkujakson laskevalla kaudella muutaman kerran episodin



Kuva 1. *aa*-indeksin päiväärojen lognormaalinen tiheys- (vasen) ja kertymäfunktio (oikea) (1868-2006). Myrskyt jaetaan neljään voimakkuusluokkaan: Minor, Major, Severe ja Giant.

omaisina tapahtumina. Poikkeuksena on kuitenkin helmikuussa 1986 sattunut Giant-luokan ( $aa = 244$ ) myrsky, joka osui melko tarkkaan jakson 21 pilkkuminimiin. Vaikka suurimmat magneettiset myrskyt ajoittuvat auringonpilkkujaksoihin, joiden maksimilukemat ovat suuria, on tästäkin säännöstä monta poikkeusta. Matalien pilkkumaksimien jaksoilla 12 ja 14 esiintyi useita äärimmäisen voimakkaita magneettisia myrskyjä, kuten esimerkiksi vuonna 1882 (I Polaarivuoden aikana), 1903 ja 1909, jotka sijoittuvat myrskyjen voimakkuustilastoissa kärkipäähän.

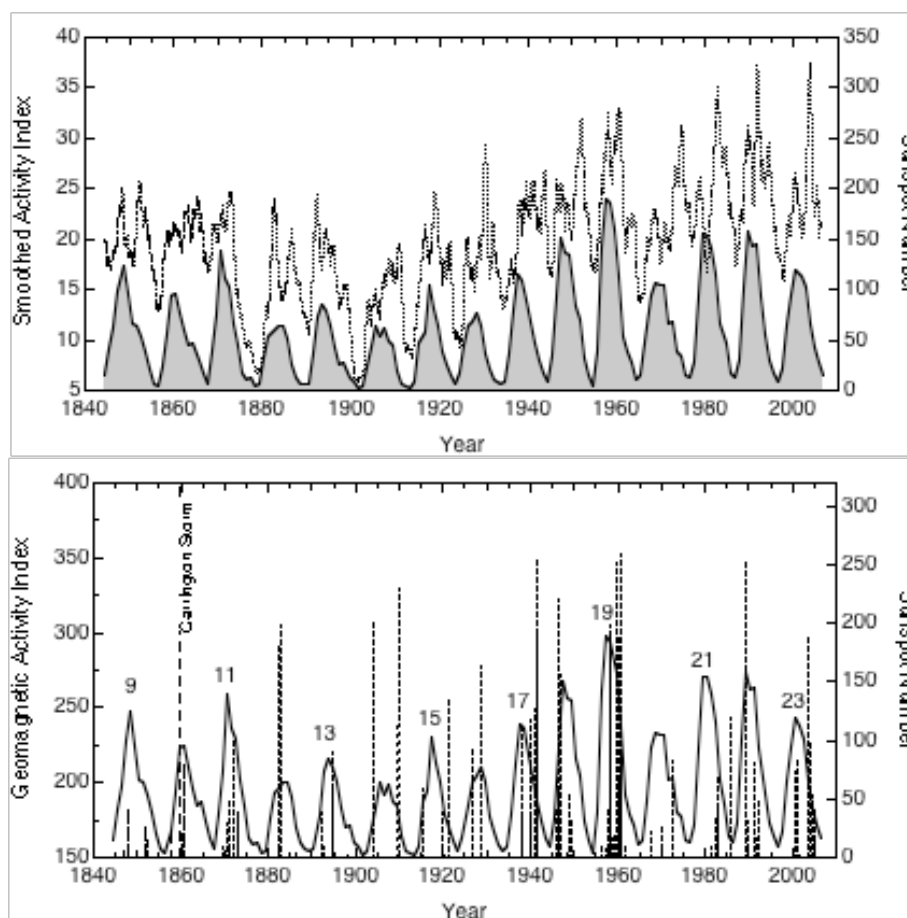
2000-luvun toistaiseksi suurin magneettinen myrsky oli loka-marraskuun vaihteessa 2003. Se tunnetaan avaruussäätä käsittelevässä kirjallisuudessa tapahtumapäivänsä mukaan "Halloween"-myrskynä (esim. Nevanlinna, 2006). Toiseksi suurin myrsky tunnetaan nimellä "Bastiljin" myrsky (15.7.2000). Sen aikana nähtiin mm. Helsingissä keskikesän revontulia, joita ei ole koskaan aiemmin raportoitu.

Kuvassa 3 nähdään nyt kohtaan päättyvän auringonpilkkujakson (23) aikana mitattu magneettinen aktiivisuus ( $aa$ ) ja auringonpilkkuluvut. Magneettinen aktiivisuus on esiintynyt jakson aikana kolmihuippuisena jakaumana, missä lokaalimaksimit ovat olleet vuonna 2000, 2003 ja 2005. Näistä keskimäinen on suurin. Tällainen monihuippuinen aktiivisuusjakauma on varsin tyypillinen kaikille pilkkujaksoille. Erityisesti pilkkumaksimin jälkeinen aktiivisuushuippu on yleensä koko jakson voimakkain. Laskevan pilkkujakson aikana esiintyvät magneettiset myrskyt ovat yleensä rekursiivisia (toistuvia) likimain auringon ekvaattorialueen pyörähdyksajan 27



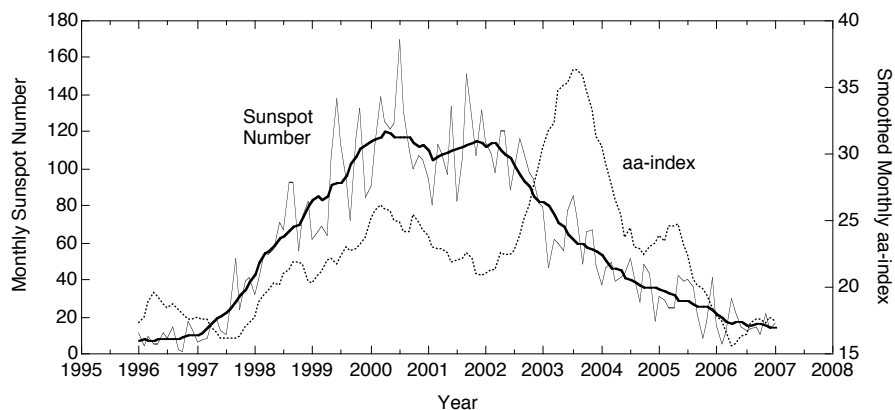
vrk välein. Myrskyt liittyvät korona-aukoista purkautuvan aurinkotuulen nopeisiin virtauksiin.

Auringonpilkkujakso 23 edustaa pilkkuluvultaan suunnilleen 15 aikaisemman pilkkujakson keskiarvoa. Jakson kesto näyttää jäävän hieman alle 11 vuoden mittaiseksi, mikä sekin on lähellä pitkän ajan keskiarvoa. Pilkkuluvun maksimi jäi edellistä jaksoa (22) selvästi pienemmäksi 121 vs. 156, mutta keskimääräinen magneettinen aktiivisuus oli molempien jaksojen aikana suunnilleen sama (25 ja 24), ja selvästi korkeampi kuin koko tarkastelukauden keskiarvo 20.



Kuva 2. Yläpaneli: Magneettisen aktiivisuusluvun ( $aa$ ) 365-päivän tasoitettut arvot (katkoviiva) ja auringonpilkkuluvun vuosi-arvot (tummennettu alue).

Alapaneli: Pystykatkoviiva: Suurimmat yksittäiset myrskypäivät ( $aa$ :n päivää  $> 150$ ) ja auringonpilkkuluvut.

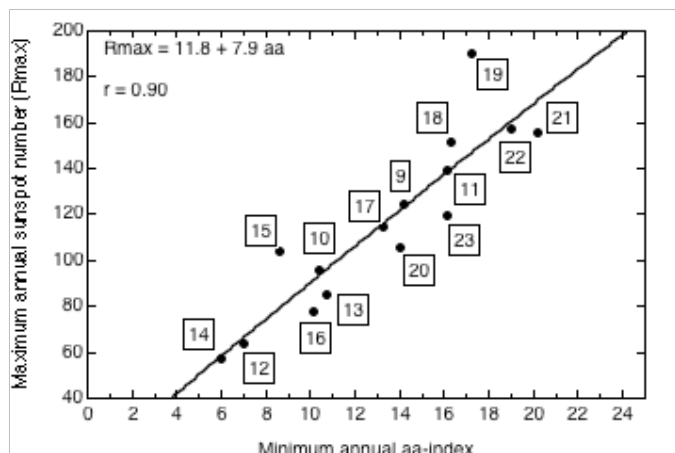


Kuva 3. Magneettisen aktiivisuusindeksin 13-kuukauden tasoitetut kuukausiarvot (katkoviiva) pilkkujakson 23 aikana. Ohuempi murtoviiva edustaa auringonpilkkuluvun tasoittamatonta vaihtelua ja paksumpi viiva sen 13 kk suodatettua arvoa.

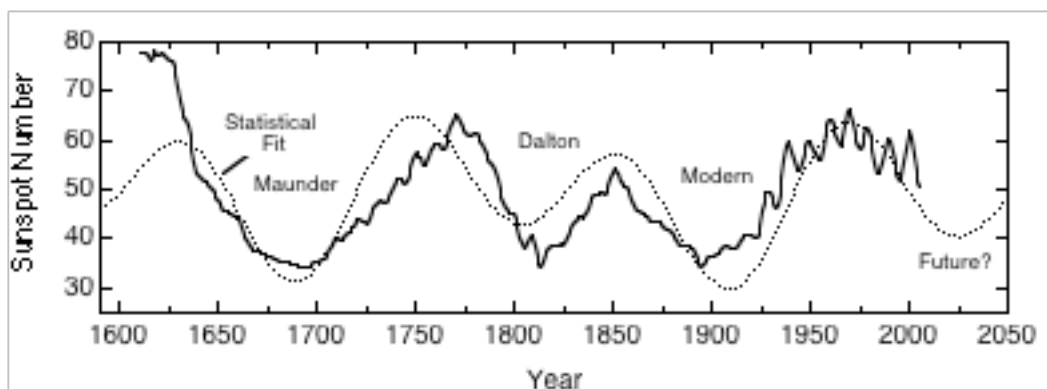
### 3. MAGNEETTISEN AKTIIVISUUDEN TULEVA KEHITYS 2000-LUVULLA

Auringonpilkkujen esiintymistiheys pilkkujakson aikana liittyy auringon laaja-alaisen magneettikentän evoluutioon. Pilkkukauden laskevalla kaudella muodostuva magneettikenttä antaa viitteitä siitä kuinka korkeaksi seuraavan pilkkukauden maksimilukemat kehittyvät. Tämä tieto antaa mahdollisuuden ennustaa tulevan pilkkumaksimin voimakkuuden useita vuosia etukäteen (Precursory Method; mm. Hathaway and Wilson, 2006). Tiedolla on tärkeä merkitys, koska samalla saadaan arvio tulevan pilkkukauden aikana todennäköisesti odotettavissa olevien avaruussähköhäiriöiden ja -myrskyjen voimakkuuksien ylärajasta. Eräs yksinkertainen sääntö sanoo, että auringonpilkkujakson aikana magneettikentän häiriöisyyden vuosikeskiarvojen minimi on verrannollinen seuraavaan pilkkumaksimiin. Tätä havainnollistaa Kuva 4. Siinä on magneettisen aktiivisuuden minimiarvot 15 auringonpilkkujakson (jaksot 9 - 23) ajalta. Lineaarinen riippuvuus aktiivisuuden minimin ja pilkkuluvun maksimin välillä on hyvä, sillä korrelaatiokerroin  $r = 0,90$ . Tämän mukaan seuraavan jakson (24) pilkkumaksimi on  $124 \pm 30$ , mikä on siis vain hiukan suurempi kuin jakson 23 maksimipilkkuluku. Toisaalta toiset tutkijat, hieman erilaisilla menetelmillä, ovat saaneet jakson 24 maksimiksi arvoja, jotka vaihtelevat 75 ja 180 välillä (mm. Hathaway and Wilson, 2006). Prekursorimenetelmä, huolimatta hyvästä korrelaatiosta aikaisempien jaksosten suhteen, ei kuitenkaan anna yksittäisen pilkkujakson osalta luotettavia tuloksia. Ennustettaessa jakson 23

huippuarvoja tällä menetelmällä saatiin tulokseksi  $155 \pm 30$ , mikä oli siis toteutunutta arvoa olennaisesti suurempi.



Kuva 4. Auringonpilkkuluvun maksimin riippuvaisuus edellisen pilkkujakson magneettisen aktiivisuuden minimiarvosta (vuosikeskiarvoissa) 15 viimeksi kuluneiden auringonpilkkujakson aikana (jaksot 9-23).



Kuva 5. Yhtenäinen viiva: Auringonpilkkujen hitaat vaihtelut, kun niiden 11-vuotinen vaihtelu on suodatettu pois. Katkoviiva on tilastollinen sovitus, joka on pilkkujen esiintymisten pitkien jaksollisuuksien (Gleissbergin ja de Vriesin jaksot) superpositio. Nimet Maunder, Dalton ja Modern viittaavat auringonpilkkujen esiintymisten pitkäkestoisiin minimikausiin. Ennusteen mukaan noin vuonna 2020 on seuraavan pitkän minimikauden (Future) syvin vaihe.

Toinen tilastollinen menetelmä, joka antaa arvioita auringonpilkkujen tulevista huippumääristä perustuu tilastolliseen havaintoon siitä, että auringon aktiivisuudessa on 11-vuotisen jaksollisuuden lisäksi myös pitempiä jaksoja. Gleissbergin nimellä tunnetaan aktiivisuuden 80 - 90 vuoden jaksollisuus ja de Vriesin mukaan noin 200 vuoden jaksollisuus. Vielä pitempiäkin jaksoja tunnetaan eräistä auringon aktiivisuutta kuvastavista epäsuorista (proksi) aineistoista. Kuvassa 5 on esimerkki Gleissbergin ja de Vriesin jaksollisuuksien mukaan lasketusta auringon

pitkääikäisestä aktiivisuudesta, kun 11-vuotinen jaksollisuus suodatetaan pois. Kuvasta nähdään selvästi auringonpilkkujen suuret minimikaudet 1600-luvun lopulla (Maunder), 1800-luvun alussa (Dalton) ja 1900-luvun alussa (Moderni). Tilastollinen ennuste antaa seuraavan pitkän minimikauden esiintymiselle arvion vuoden 2020 tuntumaan eli jakso 25 edustaisi siten heikkoa auringonpilkkumaksimia. Auringon magneettikentän analysointiin perustavalla menetelmällä on saatu samansuuntaisia arvioita (Dikpati et al., 2006).

## LOPUKSI

Auringon aktiivisuudesta tietoja antavia geofysikaalisia havaintoja ovat mm. geomagneettiset mittaukset, joita on systemaattisesti tehty 1840-luvulta alkaen useissa observatorioissa eri puolilla maapalloa. Helsingin magneettisen observatorion rekisteröinnit (1844-1897) ovat antaneet merkittävän lisän auringon aktiivisuusvaihtelujen tutkimuksille, kuten tässä tutkimuksessa on esimerkinomaisesti tuotu esille. Suomen Polaarivuosien (1882-1883 ja 1932-1933) magneettiset havainnot on saatettu myös digitaaliseen muotoon (Nevanlinna, 1999). Helsingin ohella vastaavanlaista magneettista havaintomateriaalia 1800-luvulta on olemassa ainakin Pietarin ja Oslon observatorioissa. Greenwichin observatorion varhaisimmat rekisteröinnit 1840-luvulta eteenpäin ovat myös hyödyntämättä. Vanhojen aineistojen käyttöönotto on suuritöinen ja aikaa vievä operaatio, mutta niistä saatava tieteellinen hyöty olisi merkittävä luotaessa ja varmennettaessa auringon toimintaa ja maapallon revontulialueen magneettisia häiriöitä kuvaavia indeksisarjoja.

## LÄHTEET

- Dikpati M., et al., 2006. Predicting the strength of solar cycle 24 using a flux-transport dynamo-based tool. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L05102, doi:10.1029/2005GL025221.
- Hathaway, D.H. and Wilson, R.M., 2006. Geomagnetic activity indicates large amplitude for sunspot cycle 24. *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi: 10.1029/2006GL27053.
- Lockwood, M., et al., 1999. A doubling of the Sun's coronal magnetic field during the past 100 years. *Nature*, 399, 437-439.
- Nevanlinna, H., 1999. Geomagnetic observations at Sodankylä during the first international polar year (1882-1883). *Geophysica*, 35 15-22.
- " ---, 2004. Results of the Helsinki magnetic observatory 1844-1912. *Ann. Geophys.*, 22, 1691-1704.

- " ---, 2004. Historical space climate data from Finland: Compilation and analysis. *Solar Phys.*, 224, 395-405.
- " ---, 2005. Founding Father of Finnish Geomagnetic Research. *Transaction of AGU, EOS*, 86, 325-327.
- " ---, 2006. A study of the great geomagnetic storm of 1859: Comparisons with other storms in the 19th century. *Adv. Space Res.*, 38, 180-187.
- " ---, 2006. Avaruussää - Auringosta tuulee. *Ursan julk.* No.102.
- " --- and Kataja, E., 1993. An extension of the geomagnetic activity index series *aa* from two solar cycles (1844-1868). *Geophys. Res. Lett.*, 20, 2703-2706.
- " --- and Pulkkinen, T.I., 2001. Auroral observations in Finland - Results from all-sky cameras 1973-1997. *Journ. Geophys. Res.*, 106, 8109-8118.
- Tanskanen, E.I., et al., 2005. Magnetospheric substorms are strongly modulated by interplanetary high-speed streams. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16104, doi: 10.1029/2005GL023318.