

## 6. AVARUUSSÄÄ

### Johdanto

Sään vaihtelut kuuluvat tuttuihin arkipäivän kokemuksiin. Sade, auringonpaiste, pilvet, tuuli, lumi ja jää liittyvät päivästä toiseen tapahtuviin muutoksiin säätilassa, mutta myös vuodenaikojen tuomiin sään vaihteluihin. Meillä on myös jonkinlainen kouluajoilta mieleen jäänyt käsitys siitä, mistä nämä ilmiöt johtuvat: tuuli on ilman liikettä ja pilvet tiivistynyttä vesihöyryä. Veden kiertokulku luonnossa on ainakin hämärästi tuttu. Mutta mikä panee ilman liikkeelle ja miksi toiset pilvet satavat ja toiset eivät? Ilmaston muutokset on jo vaikeampi hahmottaa ainakin jos pidämme kiinni sen ilmatieteellisestä määritelmästä, jonka mukaan ilmastollisia muutoksia tarkastellaan aina 30 vuoden jaksoissa. Lapsuuden kesät olivat aina aurinkoisia ja talvet lumisia, mutta riittääkö tällainen subjektiivinen muistikuva todistamaan ilmaston muutoksesta? Joka tapauksessa tunnemme, että säät muuttuvat myös pitempien aikojen puitteissa.

Taivaalla on myös ilmiöitä, joita emme mitenkään arkikokemuksella pysty selittämään. Mistä tulevat ja mikä aiheuttaa syysiltoina ja alkukevään tummina öinä taivaalla leiskuvat revontulet? Mistä tulee niiden kalvan kelmeä tai punainen väri? Sekä revontulet että sääilmiöt saavat käyttövoimansa Auringon säteilystä. Edellinen Auringon lähettämistä sähköisistä hiukkasista, niin sanotusta aurinkotuulesta, jälkimmäinen siitä Auringon säteilyenergiasta, jonka aistimme valona. Revontulien syntysijat sijaitsevat ilmakehän ylärajoilla noin 100 km korkeudesta ylöspäin. Siellä vallitsee lähes avaruuden olosuhteet ilman ollessa äärimmäisen ohutta. Revontulien valoleikki on osa laajempaa ilmiömaailmaa, josta käytetään nimeä avaruussää. Maapallon lähiavaruudessa ilmakehässä on sähköisesti varattuja hiukkasia, joiden liikkeisiin vaikuttavat sähköiset ja magneettiset voimat ja Auringon säteilymuutokset eli Auringon aktiivisuus.

Avaruussää käsitteenä on suhteellisen uusi, noin 20 vuotta sitten käyttöön otettu. Siihen liittyvät ilmiöt maapallon lähiavaruudessa ovat ikivanhoja kuten säätapahtumatkin maapallolla. Niitä on ollut yhtä kauan kuin maapallo nykymuodossaan on ollut olemassa,

siis joitain miljardeja vuosia. Avaruussähän on kiinnitetty huomiota sen vuoksi, että avaruuteen lähetettyjen laitteiden määrä kasvaa nopeasti. Tällaisia ovat muun muassa tietoliikenne- ja tutkimussatelliitit ja miehityt avaruuslennot, jotka kaikki ovat alttiita avaruussäähäiriöille ja ne voivat ääritapauksissa vaurioitua vakavasti niistä. Avaruuden kautta tapahtuva viesti- ja radioliikenne on myös riippuvainen avaruussäätaloista, ilmiö jonka esimerkiksi radioamatöörit hyvin tuntevat. Avaruussään vaikutukset yltävät myös maanpinnalle. Sähköä johtavat teknologiset järjestelmät kuten valtakunnallista laajuutta olevat sähköverkot ja maakaasuputket reagoivat avaruussään muutoksiin. Niihin syntyy sähkövirtoja, jotka pahimmillaan voivat aiheuttaa suuria vahinkoja. Myös satelliittipaikannus (mm. GPS) ja matkapuhelinverkot oireilevat voimakkaiden avaruussäähäiriöiden aikana.

Avaruussäähäiriöiden aiheuttamat viat teknologisissa järjestelmissä eivät ole uusi ongelma. Jo niinkin varhain kuin 1840-luvulla, jolloin ensimmäiset lankalennättimet otettiin käyttöön, havaittiin niissä toimintahäiriöitä voimakkaiden revontulien yhteydessä.

Tunnetuin tällainen vahinkotapaus sattui maaliskuussa 1989, jolloin avaruussäämyrsky rikkoi sähköverkon muuntajia ja Kanadassa Qubecin osavaltiossa tapahtui suuri sähkökatkos. Sähköverkko oli pois päältä kymmenisen tuntia ja miljoonat ihmiset joutuivat siitä kärsimään. Vahingot olivat miljoonia dollareita. Vastaavia, mutta haittavaikutuksiltaan pienempiä, häiriötä on ollut sen jälkeenkin. Maaliskuun tapahtuman jälkeen tiedemiehet kiinnostuivat selvittämään kysymystä siitä miten avaruussäähäiriö syntyy pitkän tapahtumasarjan ketjuna Auringosta Maahan. Häiriöille alttiiden teknologisten järjestelmien ylläpidon kannalta tärkeä tieto on voidaanko avaruussäätaloita ja niiden vahinkovoimaa ennustaa, jotta herkät laitteet voitaisiin ajoissa suojata avaruussmyrskyjen vaikutuksilta.

Avaruussään osailmiöitä kuten revontulet ja Maan magneettikentän häiriöitä on havaittu ja tutkittu nykyaikaisessa mielessä jo 1800-luvulta lähtien osana maapallon geofysikaalista tutkimusta. Modernin avaruussäätutkimuksen juuret ovat siis kaukana menneisyydessä. Sellainen avaruussään keskeinen osatekijä kuin "magneettinen myrsky"

ristittiin aivan 1800-luvun alussa. Suomessa Ilmatieteen laitos aloitti toimintansa vuonna 1838. Sen tutkimus- ja havainto-ohjelmassa oli selvittää Maan magneettikentän vaihteluiden ja meteorologisten ilmiöiden välisiä yhteyksiä sekä näiden molempien riippuvuutta Auringon säteilystä. Tutkimusohjelma oli osa 1800-luvun tiedeyhteisön kansainvälistä toimintaa. Tämän päivän terminologian mukaan silloinen ohjelma olisi luokiteltu avaruussäätutkimukseksi.

Pitkien havaintosarjojen hyödyntäminen avaruussäätötilan hitaiden muutoksien tutkimuksessa antaa arvokasta tietoa miten avaruusilmaston on muuttunut vuosikymmenestä toiseen. Ovatko avaruussäähäiriöt yleistymässä vai vähentymässä? Näin saadaan tietoa myös itse Auringon säteilytoiminnan hitaista muutoksista.

Avaruussään vaikutus pääasiassa rajoittuu maapallon lähiavaruuteen kauas tavallisen sään vaikutusalueesta. Toisaalta voimakkaat avaruussäemyrskyt tuntuvat myös niissä ilmakehän kerroksissa, joissa ihmiset elävät. Kysymys vaikuttaako avaruussää jokapäiväiseen säähän on mielenkiintoinen kysymys. Siinä pyritään saamaan selville onko Auringon aktiivisuustapahtumilla vaikutusta maapallon säähän ja ilmastoon. Aihe liittyy myös käynnissä olevaan ilmastonmuutoskeskusteluun ja kasvihuoneilmaston voimistumiseen. Mikä osuus Auringon säteilytuottojen vaihteluilla on ilmakehää lämpötilaa muuttavana tekijänä on vielä selvittämättä.

Avaruussää on erittäin monimutkainen Aurinko-Maa kokonaisuuden vuorovaikutusilmiö. Sen ymmärtämiseksi tarvitaan laaja satelliittien ja maanpintahavaintojen verkosto sekä tietokonesimulaatioita ja -malleja. Avaruussääennusteita varten on havaintojen välityksen oltava reaaliaikaista avaruudesta ja maanpinnalta ja kaikkia havaintuloksia on voitava nopeasti yhdistää kokonaistilanteen hahmottamiseksi. Avaruussääennusteiden tarkkuus ja luotettavuus on kaukana tavanomaisten sääennusteiden tasosta. Tosin hallittava ilmiömaailmakin on paljon monimutkaisempi kahden taivaankappaleen - Auringon ja Maan - nopeasti muuttuva kokonaisuus.

*"We are seeing our satellite and communication systems becoming more susceptible to damage by space weather, and the risk is growing. With new observations, numerical simulations and predictive models, scientists now are making progress toward dealing with space weather." - Dr. Daniel Baker, University of Colorado, USA.*

Aurinko energialähteenä

Koska avaruussäätelmiöiden perimmäinen aiheuttaja on Aurinko on hyvä ensin antaa lyhyt kuvaus aurinkokuntamme keskuskappaleesta.

Aurinko on suhteessa maailmankaikkeuden muihin tähtiin varsin keskinkertainen niin kooltaan kuin säteilyvoimakkuudeltaankin. Ikänsä puolesta se on myös keski-ikäinen; takana on 4,5 miljardia vuotta ja samanverran aikaa on edessä. Maapalloon ja aurinkokunnan muihin planeettoihin verrattuna Aurinko on kooltaan aivan ylivoimaisen iso ja massiivinen. Sen massa on noin 330 000 kertaa Maan massa ja halkaisija noin 110 kertaa suurempi kuin Maalla eli noin 1,5 miljoonaa kilometriä. Aurinkokunnan massasta yli 90 % kuuluu Auringolle. Auringon (keski)tiheys on vain hieman suurempi kuin vedellä, 1,4 grammaa kuutisenttimetriä kohden. Aurinko siis koostuu keveistä aineista. 99 % Auringosta on vetyä ja heliumia, jotka ovat maailmankaikkeuden keveimmät ja yleisimmät alkuaineet.

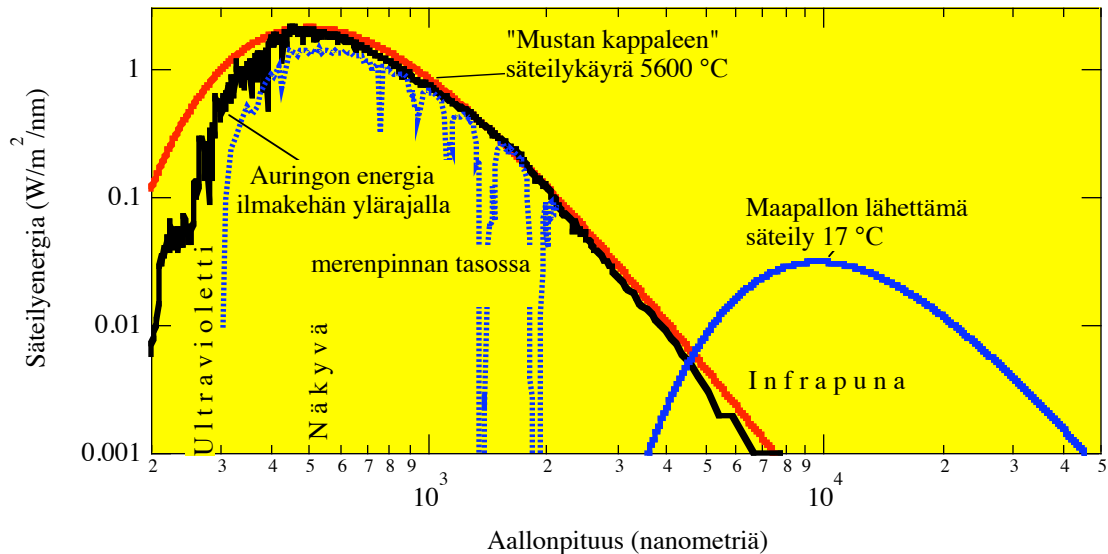
Maan ja Auringon välinen keskietäisyys on noin 150 miljoonaa kilometriä. Maa kiertää Aurinkoa pitkin ellipsimäistä rataa siten, että sen etäisyys vaihtelee Auringosta 147 ja 152 miljoonan kilometrin välillä. Tällä etäisyyden vaihtelulla on merkitystä maapallon ilmaston hitailla vaihteluilla jääkaudesta toiseen.

Auringon energian tuotto tapahtuu sen ytimessä suunnilleen säteen neljänneksen kokoisessa tilassa. Energia syntyy ydinreaktion (fuusioreaktio) kautta, jossa vetyatomit yhtyvät raskaammiksi heliumatomeiksi ja samalla vapautuu energiaa. Aurinko on siis jättimäinen vetypommi, mutta se tuottaa ydinenergiaa hallitusti, ei äkillisesti räjähtäen kuten ihmisten tekemät ydinlataukset. Aurinko polttaa ydinreaktioissaan joka sekunti

noin 600 miljoonaa tonnia vetyä, josta 4 miljoonaa tonnia muuttuu säteilyksi, loput heliumiksi. Einsteinin kuuluisan kaavan  $E = mc^2$  ( $m$  on energiaksi muuttuva massa ja  $c$  valon nopeus 300 000 km/s) avulla voidaan laskea, että säteilyenergia vapautuu noin  $3,86 \times 10^{26}$  watin teholla eli 388 miljoonaa triljoonaa wattia. Auringossa riittää polttoainetta yllin kyllin: vain noin 5 % vetyvarastosta on tähän mennessä poltettu. Energiapula ei siis vaivaa. Auringon pinnalla vallitsee noin 6000 °C asteen lämpötila, mutta ytimessä, missä ydinreaktori toimii, on suunnilleen 15 miljoonan asteen kuumuus.

Auringon lähettämä sähkömagneettinen säteily on voimakkainta näkyvän valon alueella (kts. Kuva 6.1) ja se on heikompaan spektrin lyhyt- ja pitkäaaltoisella alueella. Auringon sähkömagneettisen säteilyn kokonaismäärä laskettuna yhteen kaikkien aallonpituuksien osalta on noin  $4 \times 10^{26}$  wattia. Vielä maapallon kohdalla riittää jokaiselle neliömetrille keskimäärin noin 1365 wattia. Tätä lukua kutsutaan aurinkovakioksi. Luku on maapallon ilmakehäsystemin ja elollisen luonnon tärkeä perussuure, koska se antaa Auringon säteilystä riippuvien järjestelmien energiasyötön ylärajan. Auringosta maapallolle tulevan säteilyn kokonaismäärä on suunnilleen 170 petawattia (petawatti on  $10^{15}$  W). Auringosta tulevan säteilyn määrää on seurattu jatkuvasti satelliittimittauksilla 1970-luvulta lähtien. Havainnot osoittavat, ettei aurinkovakio oikeastaan ole vakio millään aikavälillä ja siksi sitä kutsutaankin alan uudemmassa kirjallisuudessa Auringon kokonaissäteilyksi tai irradianssiksi (Total Solar Irradiance, lyh. TSI). Terminä aurinkovakio on kuitenkin vielä laajassa käytössä, vaikka se ilmaisuna on hieman epätarkka.

Kaikkea Auringon lähettämää säteilyä ei saada käyttöön, sillä noin 35 % Auringon energiasta heijastuu maapallon ilmakehästä ja pilvikerrostumista takaisin avaruuteen, 18 % imeytyy ilmakehään ja 47 % pääsee maanpintaan asti. Ilmakehä päästää ja pidättää Auringon säteilyä eri tavalla säteilyn aallonpituudesta riippuen. Myös ilmakehän eri kerrokset imevät eri tavalla Auringon säteilyä. Esimerkiksi yläilmakehän otsoni imee itseensä lähes kaiken biologisille toiminnoille vaarallisen lyhytaaltosäteilyn (UV) 200-300 nm alueella. Ilmakehän vesihöyry on myös tehokas säteilyn vähentäjä infrapuna-alueella (kts. Kuva 6.1).

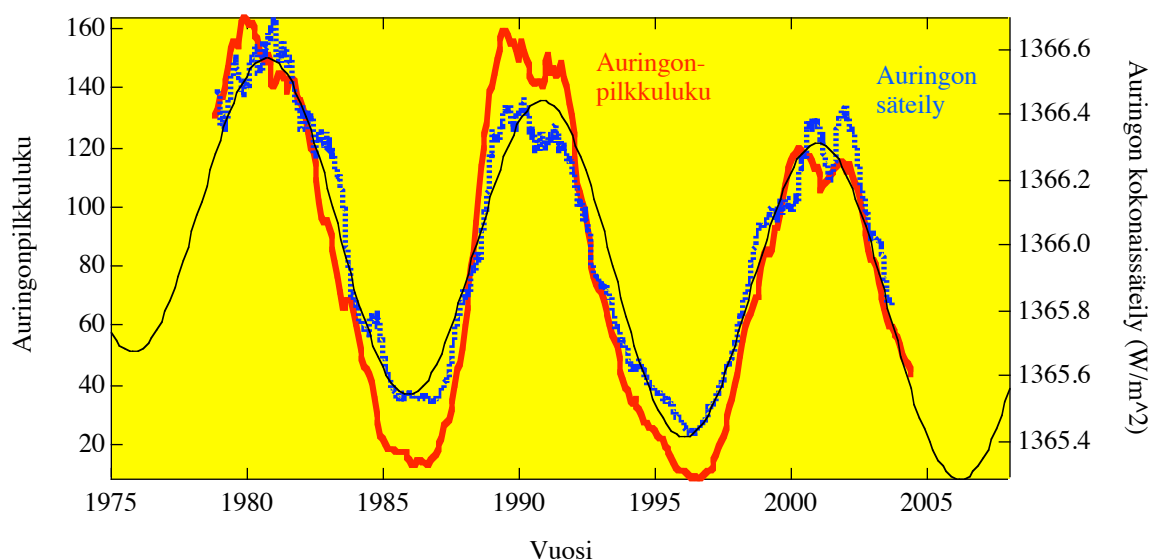


Kuva 6.1. Auringon sähkömagneettisen säteilyn säteilyenergia aallonpituuden funktiona (käyrät vasemmalla). Ylinä Auringon lähettämän säteilyn teoreettinen jakauma (ns. "mustan kappaleen" säteilykäyrä). Musta: Auringon havaittu säteily ilmakehän ulkorajalla. Sininen katkoviiva: Auringon säteily maanpinnalla merenpinnan tasossa. Säteily on voimakkainta näkyvän valion alueella aallonpituudella n. 500 nm. Ilmakehä (lähinnä otsonikerros) imee lähes kaiken lyhytaaltosäteilyn (UV) aallonpituusalueelta 100 -300 nm. Vesihöyry tietyillä aallonpituusalueilla estää lähes kaiken tulevan säteilyn. Maapallo säteilee saamansa energian infrapunäsäteilyinä (sininen käyrä oikealla), joka imeytyy ilmakehän hiilidioksidiin ja muihin kasvihuonekaasuihin. Tästä aiheutuu ilmakehän alaosan lämpiämistä, joka tunnetaan kasvihuoneilmionä.

Maapallon ilmakehä toimii kasvihuoneen tavoin. Se päästää Auringon säteilyn lävitseen, mutta pitää osan lämmöstä sisällä. Tätä ilmiötä kutsutaan kasvihuoneilmiöksi. Jos kasvihuoneilmiötä ei olisi, maapallon keskilämpötila olisi  $-18\text{ °C}$ , kun se nyt on  $+15\text{ °C}$ . Kasvihuoneilmiö on luonnollinen asia, ja se pitää maapallon lämpötilan elämälle suotuisana. Ihminen kuitenkin voimistaa kasvihuoneilmiötä päästämällä ilmakehään lisää kasvihuonekaasuja, mikä lämmittää maapalloa. Ihmisen aiheuttamista kasvihuonepäästöistä tärkein on hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ), jonka pitoisuus on muutamassa sadassa vuodessa kasvanut yli 30 %. Hiilidioksidin pitoisuus ilmakehässä on noin 0,038 %, mikä on korkein arvo ainakin 400 000 vuoteen (sitä aikaisemmilta ajoilta ei ole luotettavia mittaustuloksia). Elämme tässä suhteessa poikkeuksellista aikaa. Kuinka paljon ilmaston muutoksessa on Auringon säteilyn aiheuttamaa tai muiden luonnollisten tekijöiden syytä on vilkkaan keskustelun kohteena kaiken aikaa.

Avaruussääilmiöiden kannalta aurinkovakio ei ole keskeinen suure, koska se pysyy kuitenkin suhteellisen vakiona ja sen mukana tuleva teho imeytyy avaruussääilmiöiden kannalta epäolennaisiin ilmakehän kerroksiin. Satelliittimittaukset osoittavat, että

aurinkovakio vaihtelee auringonpilkkujakson aikana pikkujen maksimista minimiin noin  $1 \text{ W/m}^2$  eli alle promillen itse vakiosta. Lyhytaikaisesti, muutamien viikkojen ajan, muutokset voivat olla  $3\text{-}4 \text{ W/m}^2$  suurten pilkkuryhmien varjostaessa Auringon säteilyä. Avaruussääilmiöiden ja niiden seurannaistapahtumien kannalta olennaisempaa on lyhytaaltoalueelta (röntgen, UV) tuleva säteily ja hiukkastuotot ja niiden muutokset.



Kuva 6.2. Auringon kokonaissäteily (sininen) satelliittimittausten mukaan 1978-2003 ja auringonpilkkuluvut (punainen). Musta käyrä on säteilyn tilastollinen syklinen vaihtelu, joka ennustaa seuraavan säteilyminimin olevan vuonna 2006. (Säteilytiedot: NGDC/NOAA; auringonpilkkut: *SIDC*)

### Auringonpilkkut

Auringonpilkkut ovat tummia läiskiä Auringon pinnalla, joiden pinta-ala usein ylittää moninkertaisesti maapallon koon. Auringonpilkkuja ja niiden määrän vaihtelua on havaittu jo 1600-luvun alusta lähtien. Kuuluisa tähtitieteilijä Galileo Galilei teki niistä ensimmäiset tieteelliset havainnot kaukoputkellaan vuonna 1612. Tieteelle kesti kuitenkin satoja vuosia ennenkuin pilkkujen todellinen luonne saatiin selvitettyä. Ne ovat Auringon magneettikentän voimakkaita keskuksia, joissa magneettikentän voimakkuus on tavallisesti tuhansia kertoja suurempi kuin Maan magneettikenttä. Magneettikenttä on

niin voimakas, että se estää aurinkomaterian liikkeen pilkun kohdalla. Näin syvältä kumpuava kuumempi aines ei pääse pinnalle, joten se jäähtyy. Pilkussa lämpötila on noin 1000 °C alempi kuin sen ympäristössä. Lämpötilaerosta johtuen pilkku näyttää tummalta.



Kuva 6.3. Auringonpilkkuja 4.7.2005. Vaikka kuvan tilanne on enää noin kahden vuoden päässä auringonpilkkujen esiintymisen minimiajankohdasta, Auringossa voi lyhyinä aikoina esiintyä silti runsaastikin pilkkuja. Auringon vasemmalla laidalla olevassa pilkkuryhmässä tapahtui roihupurkaus 7.7., jonka aiheuttama avaruussäämyrsky havaittiin maapallolla 10.7. Siihen liittyvä magneettinen myrsky oli voimakkuudeltaan keskitasoa. (Kuva: *SOHO/MDI*).

Auringonpilkkujen elinikä vaihtelee muutamasta päivästä muutamaa kuukausiin. Varsin hyvin tunnettu ominaisuus auringonpilkuilla on niiden jaksollinen esiintyminen.

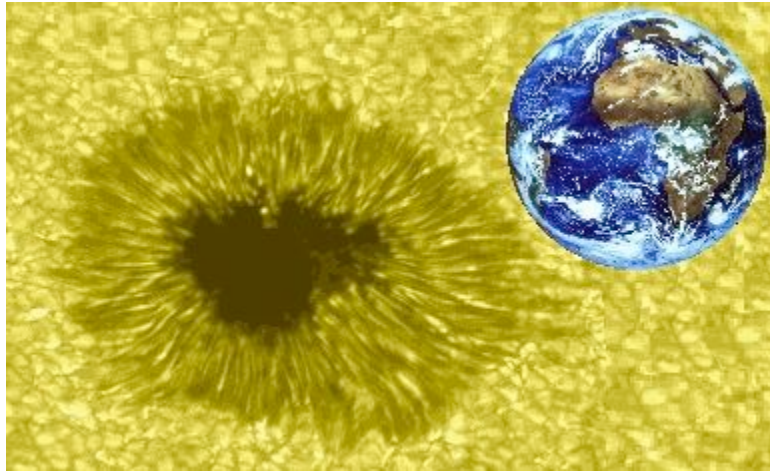
Pilkkujen määrä vaihtelee 11-vuoden jaksossa. Ilmiön havaitsi 1840-luvulla saksalainen H. Schwabe\*. Jakson pituus ei kuitenkaan ole aina sama, vaan se vaihtelee. Viimeksi kuluneiden noin 400 vuoden aikana pisin jakso on ollut havaintojen mukaan kestoltaan 15 vuotta ja lyhin 8,5 vuotta, keskimäärin kuitenkin 11,0 vuotta. Pilkkujakson kesto on hiljalleen lyhentymässä, vaikkakin v. 2008 päättynyt jakso (23) oli pituudeltaan keskiarvoa noin 0,5 vuotta enemmän. 1900-luvun pilkkujaksot ovat keskimäärin olleet puoli vuotta lyhempiä kuin tunnettujen 36 pilkkujakson keskiarvo 400 vuoden ajalta. Pilkkujaksot on numeroitu mielivaltaisesti siten, että pilkkujakso No. 1 alkaa vuonna 1755. Nyt elämme

---

\* *Heinrich Schwabe* (1789-1875) saksalainen apteekkari ja amatööritähtitieteilijä.

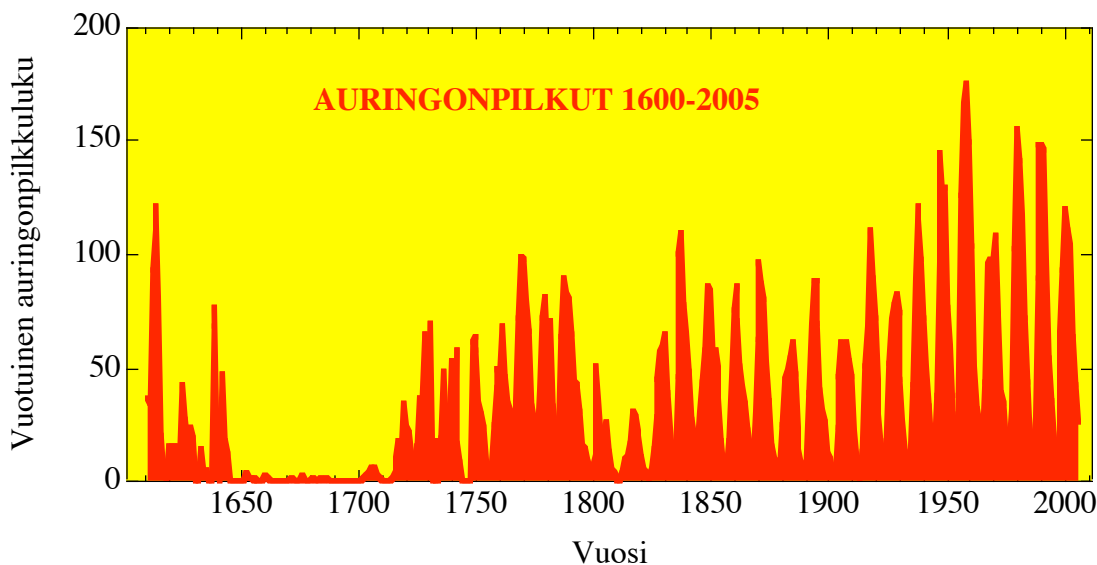


jaksoa No. 23, joka alkoi vuonna 1996 ja se päättyi alkuvuodesta 2008. Pilkkujaksossa on kaksi eri vaihetta: nousukausi, jolloin pilkkujen määrä kasvaa vuodesta toiseen ja laskukausi, jolloin niiden määrä vähenee. Nousukausi kestää keskimäärin 3-4 vuotta ja laskukausi 7-8 vuotta. Näin siis v. 2008 alkanut kausi maksimoitunee suunnilleen vuosina 2011-2012.



Kuva 6.4. Lähikuva auringonpilkkusta (ylhäällä). Pilkun koko on usein suurempi kuin maapallon läpimitta. Vasemmalla maapallo mittakaavana. Pilkussa on tumma keskus (umbra) ja vaaleampi reunaosa (penumbra). (Kuva: University of Arizona, USA).

Auringonpilkkujen määrää luonnehtii erityinen auringonpilkkuluku ( $R$ ), joka perustuu eri tähtitieteellisissä observatorioissa tehtyihin havaintoihin. Luku on verrannollinen pilkkujen ja pilkkuryhmien määrään siten että  $R = k(10g + n)$ , missä luku  $k$  on korjauskerroin eri havaintopaikoille,  $g$  pilkkuryhmien määrä ja  $n$  yksittäisten pilkkujen lukumäärä. Nyrkkisääntönä pätee, että jakamalla pilkkuluku 15:sta, niin saa arvion Auringon näkyvällä puolella olevien pilkkujen määrästä. Kuvassa 6.5 on auringonpilkkulukujen vuosikeskiarvot 1600-2005. Suurin huippuarvo (201) saavutettiin pilkkujaksolla 19 vuonna 1957. Keskimäärin pilkkumaksimin arvo on ollut 113. Viimeisin maksimi (2000) nousi vähän yli keskiarvon lukuun 121. Auringonpilkkujen maksimiarvolla, jakson kestolla, ja nousuajalla minimistä maksimiin on tiettyjä säännönmukaisuuksia. Mitä suurempi on pilkkumaksimi sitä nopeammin pilkkujen määrä kohoaa minimistä huippuarvoonsa, jolloin myös jakson kestosta tulee lyhyempi.



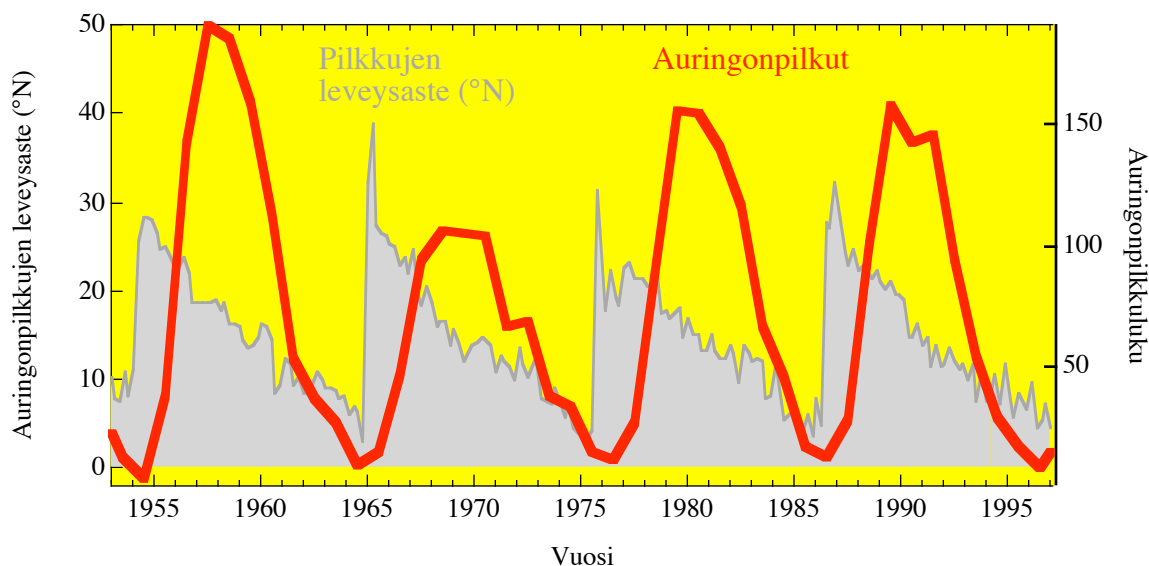
Kuva 6.5. Auringonpilkkujen vuosiarvot 1600-2005. Pilkkujen määrä vaihtelee 11-vuoden jaksossa, mutta mukana on myös pitempia jaksollisuuksia. Noin 50 vuoden ajan 1600-luvun puolivälistä eteenpäin pilkkuja oli poikkeuksellisin niukasti. Aikakautta kutsutaan Maunderin pilkkuminimiksi. Toinen vähäisten pilkkujen kausi oli 1800-luvun alussa. Siitä käytetään nimitystä Daltonin minimi. (Pilkkuluvut: *SIDC*).

Pilkkuluku määriteltiin 1800-luvun puolivälistä sen mukaan miten Sveitsissä Zürichin observatoriossa niitä havaittiin. Luvun kehitti observatorion johtaja Rudolf Wolf (1816-1893). Myöhemmin pilkkuluvun määrittelyyn osallistui muitakin observatorioita, joiden tulokset normitettiin Zürichin havaintojen mukaan. Näin saatua lukua kutsutaan nimellä Zürichin auringonpilkkuluku ( $R_z$ ). Siitä on olemassa päiväarvot aina vuoteen 1980, jolloin Zürichissa tehtävät määrittelyt siirrettiin Belgiaan Brysselin kuninkaalliselle observatoriolle, jossa toimii kansainvälinen auringonpilkkuindeksien keskus. Pilkkuluku koki samalla myös nimenmuutoksen; nyt se on kansainvälinen auringonpilkkuluku (International Sunspot Number,  $R_I$ ). Pilkkuluvuista on internetissä ([www.sidc.oma.be](http://www.sidc.oma.be)) saatavilla päivä- kuukausi- ja vuosikohtaisia lukuarvoja. Tavallisimmin niistä käytetään 12 kuukauden liukuvaa keskiarvoa. Sen mukaan määritetään myös pilkkumaksimin ja -minimin ajankohta.

Auringonpilkkujen sarja ulottuu aina vuoteen 1610, mutta tarkimmat tiedot ovat noin vuodesta 1850, jolloin Wolf aloitti niiden systemaattisen kokoamisen. Käytössä on myös muita auringonpilkkuluja. Yhdysvalloissa tuotetaan oma pilkkuluku (American sunspot number) samalla periaatteella kuin virallinen kansainvälinen pilkkuluku, mutta hieman

eri havaintoaineistoista. Näin saadun lukusarjan pilkkuluvut ovat keskimäärin 25 % alempia kuin viralliset lukemat. Luotettavin pilkkusarja on 1990-luvulla tuotettu niin sanottu ryhmäauringonpilkkuluku, jossa lähteenä on käytetty alkuperäisiä pilkkuhavaintoja 1600-luvulta lähtien ja korjattu Wolfin havaintosarjojen virheellisyyksiä.

Pilkkujen tarkempi analyysi paljastaa, että ne esiintyvät usein magneettisina pareina (dipoli), joissa on magneettiset navat, pohjoismagnetismia ( $N$ ) ja etelämagnetismia ( $S$ ). Pillkkujen magneettiset kenttäviivat muodostavat silmukan, joka lähtee  $N$ -navalta ja päättyy  $S$ -navalle. Silmukka on taas Auringon pinnalla lettimäisesti punoutuneiden kenttäviivakimppujen pullistuma. Pilkkuparia kutsutaan  $\beta$ -tyypin pilkuksi. Tunnetaan myös  $\alpha$ -pilku, jossa on vain joko  $N$ - tai  $S$ -napa. Magneettiset navat ovat vastakkaista polariteettia eri pallonpuoliskoilla. Pilkut eivät sijaitse missä tahansa Auringon pinnalla, vaan ekvaattorin tuntumassa leveysasteilla  $3^\circ - 30^\circ$ . Pilkkujen määrä pallonpuoliskoittain ei kuitenkaan ole symmetrinen, vaan usein jommalla kummalla pallonpuoliskolla niitä on enemmän. Historiallisista auringonpilkkuhavainnoista tiedetään, että esimerkiksi 25 vuoden aikana vuodesta 1678 vuoteen 1702, Auringon pohjoisella pallonpuoliskolla ei havaittu pilkkuja lainkaan.



Kuva 6.6. Auringonpilkkujen esiintymisen leveysaste (harmaa varjostus) Auringon pohjoisella pallonpuoliskolla (N) neljän auringonpilkkujakson (punainen viiva) aikana. Uuden pilkkujakso alkaessa auringonpilkkujen minimissä, pilkut esiintyvät keskileveysasteilla, mistä ne pilkkujakson vanhetessa siirtyvät lähemmäs ekvaattoria. Näin tapahtuu symmetrisesti molemmilla pallonpuoliskoilla. Aineisto: auringonpilkkujen leveysasteet: Pentti Pulkkinen/SA; pilkut: SIDC.

Pilkkujen magneettikenttään liittyy mielenkiintoinen ominaisuus: magneettikentän napaisuus vaihtuu suurin piirtein pilkkumaksimin aikoihin. Tällöin pilkkuparissa N- ja S- navat vaihtavat paikkaa. Magneettikentän napaisuuden käänöksillä on siten 22 vuoden jakso, mitä kutsutaan Halen\* jaksoksi. Pilkkujen esiintymisen alueet muuttuvat myös pilkkujakson aikana. Jakson alkaessa pilkut sijaitsevat korkeammilla leveysasteilla, mutta uudet pilkut ilmaantuvat jakson vanhetessa lähempänä ekvaattoria. Näin Auringon pinnalla voi samanaikaisesti olla kahden pilkkujakson pilkkuja jopa 4-5 vuoden ajan.

Fysikaalisesti ajatellen auringonpilkkujen lukumäärä on verrannollinen Auringon magneettivuohon alhaisilla leveysasteilla. Pilkkumäärien vaihtelu antaa mahdollisuuden rekonstruoida Auringon magneettikentän muutoksia eripituisina ajanjaksoina aina päivistä kymmeneen ja satoihin vuosiin.

Auringonpilkkujen esiintymisien jaksollisuudet

Kuvassa 6.5 on esitetty auringonpilkkulukujen vuosiarvot 1600-luvun alusta lähtien. Siinä on näkyvä selvästi 11-vuotinen vaihtelu, mutta mukana on myös pitempia jaksoja. Jaksoista tunnetaan Gleissbergin\*\* jakso (noin 88 vuotta) ja de Vriesin\*\*\* jakso (noin 200 vuotta).

#### Auringon tunnetut aktiivisuussyklit

<i>Jakson nimi</i>	<i>Tyypillinen kesto</i>
Schwabe	11,0 v
Hale	2 x 11,0
Gleissberg	88
de Vries	200
<u>Hallstatt</u>	<u>2000</u>

\* *George E. Hale* (1868-1938). Amerikkalainen tähtitieteilijä, joka tutki erityisesti auringonpilkkujen magneettikenttiä

\*\* *Wolfgang Gleissberg* (1903-1986) saksalainen tähtitieteilijä. Tutki Auringon aktiivisuuden jaksollisuuksia.

\*\*\* *Hessel de Vries* (1916-1959) hollantilainen radiologi, joka kehitti 1950-luvulla hiili-14 isotoopin käyttöä radioaktiivisissa iänmäärittelyissä.

Toisaalta täytyy muistaa, että kyseessä ei ole matemaattisen tarkoista jaksoista kuten säännöllinen siniaalto, vaan keskiarvo vaihtelevista kestoista.

Mielenkiintoinen vähäpilkkuinen kausi on ollut 1600-luvun puolivälistä 1700-luvun alkuun (1645-1715). Tällöin yli puolen vuosisadan aikana auringonpilkkut katosivat lähes kokonaan. Kyseisen kauden toi tutkijoiden tietoisuuteen amerikkalainen tähtitieteilijä J. Eddy 1970-luvulla, vaikka 1800-luvun aurinkotutkijat olivat selvillä pilkkujen vähäisyydestä 1600-luvulla. Havainto vain oli unohtunut. Englantilainen tähtitieteilijä E. Maunder tutki auringonpilkkujen esiintymisien vaihteluja 1890-luvulla ja huomasi pilkkumäärien vähäisyyden nimensä mukaisesti ristityllä ajanjaksolla. Vastaavia vähäpilkkuisia kausia tunnetaan viimeisen 2000 vuoden ajalta muitakin kuten oheinen taulukko ja Kuva 6.7 osoittaa.

Tiedot auringonpilkuista perustuvat suoriin tähtitieteellisiin havaintoihin suunnilleen vuodesta 1600 eteenpäin. Sitä varhaisemmat luvut on johdettu Auringon aktiivisuutta välillisesti kuvaavista suureista. Tällaisia ovat mm. revontulihavainnot ja erilaisten radioaktiivisten isotooppien pitoisuuksien vaihtelut puiden vuosilustoissa (hiili-14) ja jääkerrostumissa (beryllium-10). Näin päästään ajassa taaksepäin yli 10 000 vuotta. Kuvassa x on osa tällaista rekonstruktiota. Olennaista kuvassa on, että nykyinen Auringon aktiivisuustaso (laskettuna suunnilleen 10 vuoden keskiarvosta) on poikkeuksellisen korkea. Tutkijoiden mukaan se on 1900-luvun puolivälin jälkeen korkeampi kuin kertaakaan noin 11 000 vuoteen. Auringon aktiivisuuden rekonstruoititkimukset eivät ole kuitenkaan lopullisia. Joidenkin tulosten mukaan 1200-luvulla ja 1700-luvun lopulla Auringon aktiivisuus oli samaa tasoa kuin nykyäänkin. Esimerkiksi revontulia havaittiin silloin aikalaisdokumenttien mukaan poikkeuksellisen runsaasti.

Auringon aktiivisuuden hitaita muutoksia käsittelevässä kirjallisuudessa yleensä vain pitkäkestoiset minimikaudet on nimetty, mutta niiden väliin jäävät maksimikaudet ovat

yleensä vailla nimeä. Poikkeuksen tekee Oortin ja Wolfin minimien välinen korkeamman aktiivisuuden kausi, joka tunnetaan nimellä "keskiajan maksimi" (n. 1100-1250).

### Auringon aktiivisuuden pitkät minimikaudet

*Kauden nimi\* Ajankohta vuosina A.D. (noin)*

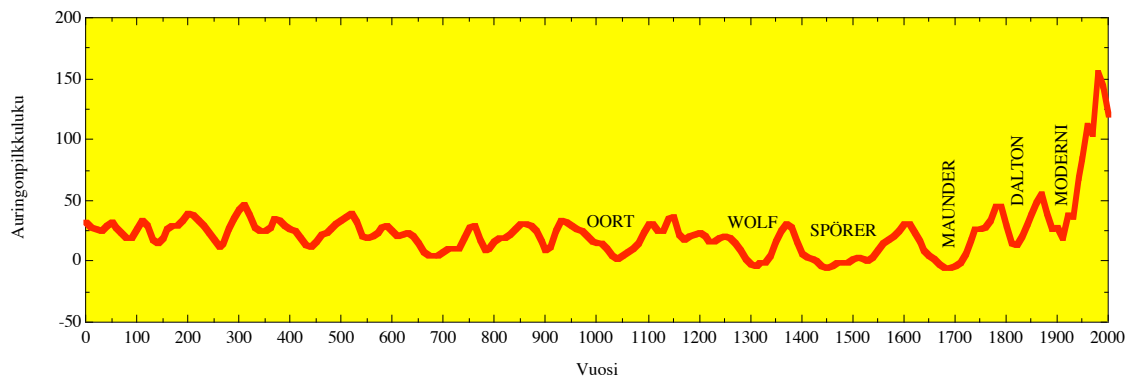
Oort 1010-1050

Wolf 1280-1340

Spörer 1420-1530

Maunder 1645-1715

Dalton 1795-1823



Kuva 6.7. Auringonpilkkujen rekonstruointi ajanlaskun alusta. Oort, Wolf, Spörer, Maunder, Dalton ja moderni tarkoittavat Auringon aktiivisuuden alhaisen tason kausia. Ne on nimetty alan tunnettujen tutkijoiden mukaan. Viimeisimmällä kaudella (moderni) ei ole omaa nimeään. Rekonstruointi perustuu puiden vuosilustoista otettujen näytteiden C-14 analyysiin (mukailtu julkaisusta Solanki et al., 2004, Nature 431, 1084-1087; Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years).

Auringonpilkkujen määrä kertoo myös kuinka paljon Auringon kokonaissäteily muuttuu. Pilkkujen määrän ollessa huipussaan Aurinko säteilee vähän enemmän (n. 0.1 % 11-vuotisessa jaksollisuudessa) kuin vähäpilkkuisena aikana. Pitkien minimikausien aikoina maapallo on siten vastaanottanut vähemmän Auringon säteilyä kuin muina aikoina. Maapallon lähiavaruudessa avaruussään vaihtelut ovat olleet silloin vähäisempää, mikä on näkynyt mm. revontulien esiintymisen harvinaistumisena. Esimerkiksi Maunderin ja

\* Jan H. Oort (1900-1992). Hollantilainen radioastronomi.

Rudolf Wolf (1816-1893). Sveitsiläinen tähtitieteilijä.

Gustav Spörer (1822-1895). Saksalainen tähtitieteilijä.

Edward Maunder (1851-1928). Englantilainen tähtitieteilijä.

John Dalton (1766-1844). Englantilainen kemisti ja nykyaikaisen atomimallin pioneeri.

Daltonin minimin aikoihin ei Keski-Euroopassa havaittu revontulia vuosikymmeniin, minkä puutteen monet aikalaistutkijat olivat panneet merkille.

Auringonpilkkujen kohdalla Auringon säteily on heikompaa kuin niiden ympäristössä. Säteilyvajeen korvaavat pilkkujen ympäristön aktiivisissa alueissa sijaitsevat kirkkaat fakulat, joiden vaikutus lisää aurinkovakiota noin  $2 \text{ W/m}^2$ . Nettotulos on, että aurinkovakio on noin  $1 \text{ W/m}^2$  suurempi pilkkumaksimissa kuin minimissä (Kuva x). Fakuloiden voimakas magneettikenttä saa niissä olevan plasman hehkumaan. Kuinka paljon Auringon lähettämä kokonaissäteily vaihtelee, riippuu Auringon pinnalla vallitsevasta magneettikentästä ja sen muutoksista.

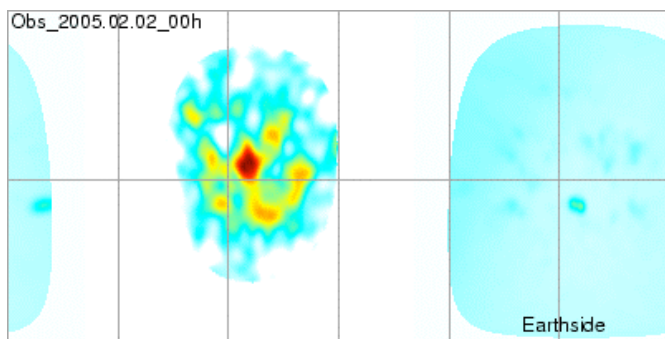
Auringonpilkkuluvun ohella Auringon aktiivisuutta mitataan myös radiotaajuuksilla. Auringon lähettämän radiosäteily ( $F_{10.7}$ ), jonka aallonpituus on 10 cm seuraa voimakkuudeltaan tarkkaan itse auringonpilkkulukuja. Tämän mittayksikön etuna on, että se voidaan määrittää myös pilvisellä säällä. Etuna on myös mitan objektiivisuus verrattuna auringonpilkkulukuun, joka kuitenkin perustuu kaukoputkilla tehtyihin silmämääräisiin pilkkuhavaintoihin.

Nykyaikainen aurinkotutkimus antaa mahdollisuuden havaita auringonpilkkuja myös Auringon Maahan näkymättömältä puolelta. Havainnot perustuvat Auringon pintamaterian noin 5 minuutin jaksoisiin värähtelyihin, jotka etenevät pinnalla, tunkeutuvat Auringon sisäosiin heijastuen takaisin pinnalle. Suuret auringonpilkut häiritsevät aaltojen kulkua ja näistä tiedoista voidaan päätellä pilkkujen sijainti vähän samaan tapaan kuin geologit ja geofyysikot hyödyntävät maanjäristusaaltojen kulkuaikoja ja -suuntia, kun tutkitaan maaperän rakennetta ja paikannetaan maanjärityksiä. Tutkimusmenetelmästä käytetäänkin nimitystä helioseismiikka (Kuva 6.8).

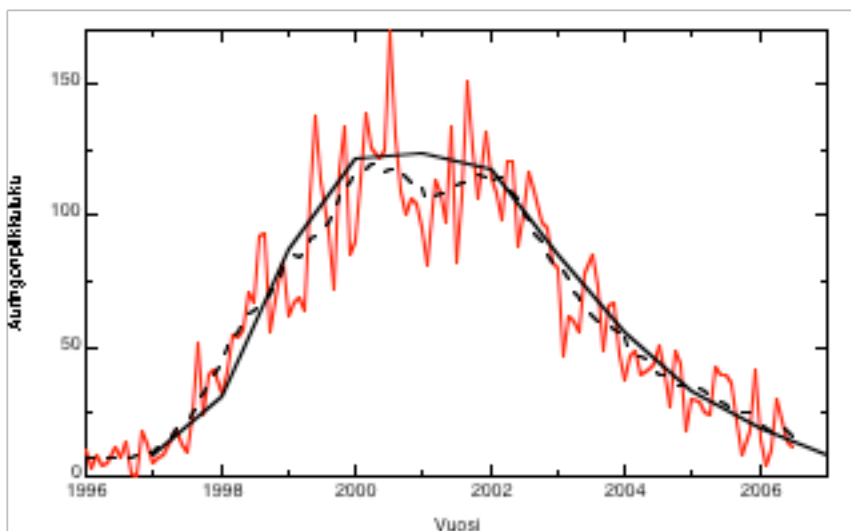
Auringonpilkut jaksolla 23

Nyt käynnissä oleva auringonpilkkujakso (23) alkoi lokakuussa 1996, kun alkuhetkenä pidetään auringonpilkkujen minimiesiintymistä laskettuna kuukausiarvojen 12 kk

tasoitetuista keskiarvoista. Minimiiä vastaava auringonpilkkuluku oli silloin 8. Vastaavasti pilkkujen esiintymisen maksimijankohta oli huhtikuussa 2000.



Kuva 6.8. *SOHO*-aluksessa toimiva MDI-luotain (Michelson-Doppler Imager) on kuvannut Auringon Maahan näkymättömältä puolelta ryhmän auringonpilkkuja (puna-oranssinen alue kuvan keskellä) 2.2.2005. Oikealla ja vasemmalla sinisellä on Auringon Maahan näkyvä alue. Kuva on eräänlainen kaikuluotauskuva, jossa äänen sijasta käytetään aaltolähteenä Auringon pinnan värähtelyjä. (Kuva: *SOHO/MDI*)



Kuva. 6.9. Auringonpilkkujen kuukausiarvot 1996-2006 (punainen), 12 kuukauden tasoitettut arvot (katkoviiva) ja 10 edellisen pilkkujakson keskiarvo (musta). Auringonpilkuilla oli maksimi vuonna 2000. Kuukausiarvoissa havaitaan sivumaksimi vuonna 2001. Pilkkujen minimiaika sijoittuu vuosiin 2006-07.

Nousuaika minimistä maksimiin kesti siten noin 3,5 vuotta, mikä on yli vuoden keskimääräistä arvoa lyhyempi. Maksimia vastaava pilkkuluku oli 121, mikä on viimeksi kuluneiden 10 pilkkujakson keskimääräistä maksimiarvoa hieman korkeampi (Kuva 6.9). Kun pilkkulukuja tarkastellaan kuukausiarvosta toiseen, niin niissä on enemmän hajontaa kuin tasoitetuissa arvoissa. Suurin yksittäinen kuukausikeskiarvo (170) saavutettiin



heinäkuussa 2000. Tämän jälkeen kuukausiarvot kääntyivät laskuun, kuten Kuvasta 6.9 nähdään, mutta kohosivat jälleen korkealle (151) hieman yli vuoden jälkeen. Näin tarkasteltuna auringonpilkkujakso näyttäytyy kaksihuippuiselta, mikä onkin varsin yleinen piirre lähes kaikille pilkkujaksoille. Kahden paikallisen maksimin välistä aluetta kutsutaan alan kirjallisuudessa ilmiön keksijän mukaan Gnevyshev<sup>\*</sup> aukoksi, jolloin myös avaruussähköhäiriöt (mm. magneettimyrskyt) ovat vähäisempiä.

Kesään 2006 mennessä kuukausittaiset tasoitetut pilkkuluvut ovat tulleet alas noin 100 pilkkulukuyksikköä, mikä ennakoii lähestyvää pilkkuminimiä, jonka arvioidaan olevan käsillä vuoden 2008 alkupuolella. Tähän viittaa myös auringonpilkkujen "nollapäivien" tiheämpi esiintyminen. Uuden pilkkujakson merkki on se, että pilkkuparissa magneettisten napojen paikka vaihtuu. Tällainen napaisuuden vaihto havaittiin tammikuussa 2008, mitä on siis pidettävä uuden pilkkukauden 24 alkusignaalina.

Päättynyt pilkkujakso (23) on siis pilkkumäärillä mitattuna ollut varsin keskinkertainen. Auringonpilkkujen maksimiluku jäi kuitenkin noin kolmanneksen alemmas kuin kahden edellisen pilkkujakson vastaavat luvut. Kestoltaan se saavuttanee noin 11,5 vuoden pituuden, joka on hieman yli pitkän ajan keskiarvon.

Auringonpilkkuhavaintojen mukaan viimeksi kuluneiden noin 400 vuoden aikana suurimmat pilkkuluvut todennettiin vuonna 1957, jolloin vuosikeskiarvo ylsi lukemaan 190 ja suurin päiväärvo oli 355, jolloin Auringossa on yhtäaika ollut näkyvissä yli 20 pilkkua.

#### Auringon hiukkassäteily

Jo kauan on tiedetty Auringon sähkömagneettisen säteilyn olemassaolo ja vaikutukset, mutta vasta 1900-luvun alussa esitettiin ajatus siitä, että Auringosta lähtisi myös sähköisesti varattuja hiukkasia. Varhaiset satelliittimittaukset 1960-luvulla vahvistivat mittauksilla sen, että Auringosta todella sinkoutuu avaruuteen sähköisesti varattuja

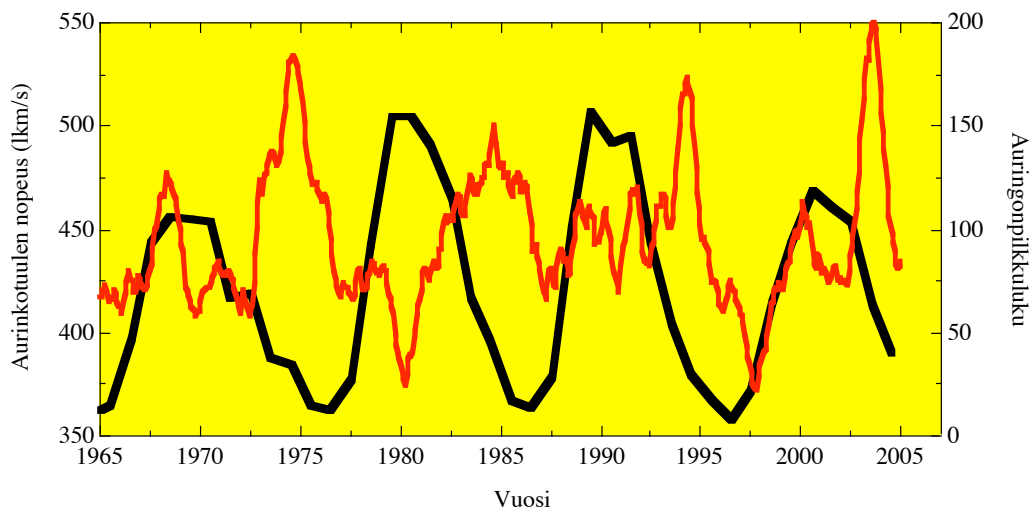
---

<sup>\*</sup> *Mstislav N. Gnevyshev* (1914-1992). Venäläinen astrofyysikko.

partikkeleita, pääasiassa elektroneja ( $e$ ) ja protoneja ( $p$ ). Tätä hiukkasvirtaa kutsutaan aurinkotuuleksi. Se saa alkunsa Auringon ilmakehän uloimmasta osasta, koronasta. Aurinko ei kykene painovoimallaan pitämään koossa kaikkea koronassa olevaa kuumaa materiaa, vaan uloimmat osat pakenevat avaruuteen. Näin planeettainvälinen avaruus ei ole tyhjiö, vaan on täyttynyt aurinkotuulen aineksesta, joka on plasmamuodossa, ts. kokonaisuudessaan sähköisesti neutraali, vaikkakin johtaa hyvin sähköä. Aurinkotuulen plasmalla on eräs tärkeä ominaisuus, että se kuljettaa mukanaan osaa Auringon magneettikentästä.

Aurinkotuulen ominaisuudet, esimerkiksi sen nopeus ja tiheys vaihtelevat suuresti Auringon aktiivisuustilasta riippuen. Maapallon etäisyydellä Auringosta aurinkotuulen nopeuden vaihteluväli on 200 - 1000 km/s ja tiheyden 0,5 - 100 hiukkasta/cm<sup>3</sup>. Aurinkotuuli on kuumaa, sen lämpötila on tyypillisesti 100 000 °C. Energiavuo, jonka aurinkotuuli kuljettaa mukanaan on Maan etäisyydellä Auringosta tyypillisesti 0,003 W/m<sup>2</sup>, mikä Auringon kokonaissäteilytehoon (aurinkovakioon) verrattuna on mitättömän vähän.

Aurinkotuuli puhaltaa kaikkiin suuntiin, mutta se on nopeinta korkeilla leveysasteilla (> ± 30°) ja hitainta ekvaattorin tuntumassa. Poistumisnopeutta säätelee Auringon magneettikenttä. Jos kenttäviivojen rakenne on "avoin" eli viivat jatkuvat Auringosta pois päin, tämä mahdollistaa aurinkotuulen hiukkasten poistumisen kenttäviivojen suunnassa ilman että magneettiset voimat ovat liikettä estämässä. Avoimien kenttäviivojen alueelta aurinkotuuli puhaltaa nopeimmin kuin "suljettujen" viivojen alueilta. Suljetut kenttäviivat muodostavat silmukoita, jotka nousevat Auringon pinnalta ja palaavat takaisin. Hiukkaset ovat tällaisessa silmukassa vankina poukkoillen sen toisesta päästä toiseen. Suljettujen kenttäviivojen alueilta aurinkotuuli pakenee vain, jos kenttäviivat katkeavat jonkin Auringon aktiivisuustapahtuman johdosta. Aurinkotuulen nopeus on pienin suljettujen viivojen alueilta.



Kuva 6.10. Aurinkotuulen keskinopeus vuodessa (ohut musta) ja auringonpilkkujen vuosiarvot (paksu musta). Aurinkotuulen nopeus on suurimmillaan pilkkujen vähenevällä kaudella, jolloin Auringon magneettikentän rakenne on avoin. Nopeus on keskimäärin hitain pilkkumaksimin tuntumassa magneettikentän geometrian ollessa suljetumpi. (Aineistot: OMNIWEB aurinkotuuli, *SIDC* auringonpilkkuluvut).

Auringon magneettikentän rakenne, suljettujen ja avoimien kenttäviivojen alueiden laajuudet vaihtelevat 11-vuotisen pilkkujakson aikana suuresti ja siten myös aurinkotuulen nopeus. Auringon aktiivisuuden ollessa alhaisimmillaan pilkkuminimin aikoihin, Auringon magneettikentän rakenne on yksinkertaisimmillaan muistuttaen kaksinapaista dipolikenttää. Sitä hallitsee napa-alueilta alemmille leveysasteille ulottuvia (korona) aukkoja, joista virtaa avaruuteen nopeita aurinkotuulen hiukkasia. Aukkomainen rakenne voi pysyä vakaana kuukausia eli usean Auringon kierroksen ajan (27 vrk), jolloin keskimääräinen tuulen nopeus pysyy korkealla (kts. Kuva 6.10). Pitkäikäisen korona-aukon tullessa yhden auringonvuorokauden jälkeen uudelleen esille Auringon maapallon puoleiselle puoliskolle, se aiheuttaa avaruussäähäiriöitä maapallolla. Tyypillinen piirre onkin pilkkulukujen laskevalla kaudella avaruussäähäiriöiden voimistuminen 27 vuorokauden välein.

Ennen avaruuskauden alkua 1930- ja 1940-luvuilla ei korona-aukkoja tunnettu vielä lainkaan, ihmetystä herätti avaruussäähäiriöiden (magneettisten myrskyjen) esiintyminen 27 vrk jaksoissa, vaikka Auringossa ei aktiivisia pilkkuja ollut lainkaan. Vallitseva tulkintamalli avaruussäähäiriöille oli, että ne aina liittyvät optisesti havaittaviin

auringonpilkkuihin. Tuntemattomia häiriölähteitä nimitettiin *M*-alueiksi (*M* niin kuin Mysterious), jotka 1960- ja 1970-luvuilla tehdyissä satelliittikuvauksissa oastiin yhdistää koronan aukkoihin.

Avaruussääilmiöiden kannalta merkittävät Auringon lyhytkestoiset purkaukset saavat voimansa magneettikentän muutoksista. Tällaisia ovat mm. flaret eli roihupurkaukset, protuberanssit ja voimakkaimpana ilmiönä koronan laaja-alaiset massapurkaukset (*CME*; Coronal Mass Ejections).

Flaret ovat tunnetuimpia ja tutkituimpia Auringon aktiivisuustapahtumia. Flare on äkillinen kirkastuma Auringon aktiivisessa alueessa, joka voi kestää muutamasta sekunnista tunteihin. Suurimmat flaret luokitellaan lähettämänsä säteilyenergian mukaan kymmenportaisiin *A*-, *B*-, *C*-, *M*- ja *X*-luokkiin. Esimerkiksi *X10*-luokan flaren säteilyteho on yksi promille (1 ‰) Auringon emittoimasta kokonaissäteilystä, siis varsin vähäinen energiatuoton kokonaisuuteen suhteutettuna. Toisaalta ihmisen käyttämiin energiamääriin kyseessä on valtava energiasuihku. Kyseessä on suunnilleen 1000-kertaa säteilytehoa maapallolle kuin koko Suomessa käytettyjen kaikkien energiamuotojen teho (noin 40 GW). Näin voimakkaita purkauksia tapahtuu auringonpilkkujakson aikana muutamia. Kuluvan auringonpilkkujakson (1996-2005) aikana niitä on havaittu kolme kertaa.

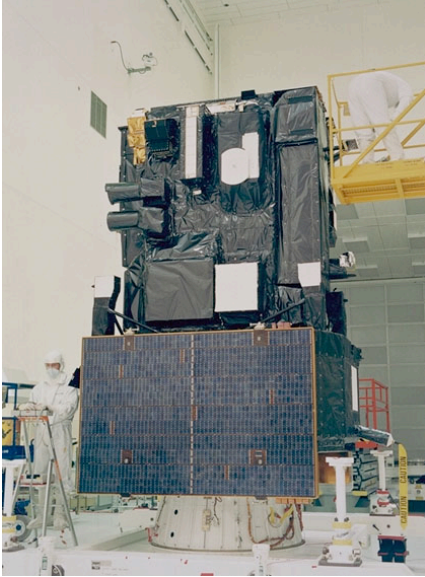
Olosuhteet flare- ja *CME*:n ilmiön tapahtumiseksi alkavat tavallisesti protuberanssista, joka on holvimainen magneettikentän ja siihen varastoituneen plasman rakennelma. Suurimmat protuberanssikaaret ovat pituudeltaan jopa 50 kertaa maapallon halkaisija. Magneettisten kenttäviivojen katketessa ja kytkeytyessä uudelleen (rekonnektio) siirtyy magneettikentästä suuria määriä energiaa plasmaan, joka lähtee räjähdyksenomaisesti liikkeelle. Rekonnektio on todennäköisin sellaisten pilkkujen ympäristössä, joiden magneettikentän rakenne on monimutkaisempi ( $\beta$ - $\gamma$ - tyyppiä) kuin tavallisen pilkkuparin kaarimaiset kenttäviivamuodot. Avaruuteen sinkoutuu suuria määriä korkeaenergaisia hiukkasia ja voimakasta sähkömagneettista säteilyä. Voimakkaimmissa purkauksissa avaruuteen lähtee miljardeja tonneja Auringon materiaa nopeudella, joka on useita

miljoonia kilometrejä tunnissa. Purkauskielekkeet voivat olla kooltaan koko Auringon laajuisia. Voimakkaimmat avaruussäihäiriöt maapallolla aiheutuvat koronan massapurkauksista (kts. Kuva 6.11). Jos purkauskohta on Maasta katsottuna Auringon kiekon laidalla, eivät sen hiukkaset välttämättä osu maapallolle lainkaan. Suurimmat avaruussäihäiriövaikutukset on niillä purkauksilla, jotka tapahtuvat Auringon keskimeridiaanin kohdalla ja siitä hieman länteen.

Rekonnektio plasman kiihdyttäjänä on tärkeä ilmiö myös maapallon lähiavaruudessa, magnetosfäärissä, missä revontulia aiheuttavat sähköiset hiukkaset saavat tarvittavan liike-energian rekonnektion kautta.

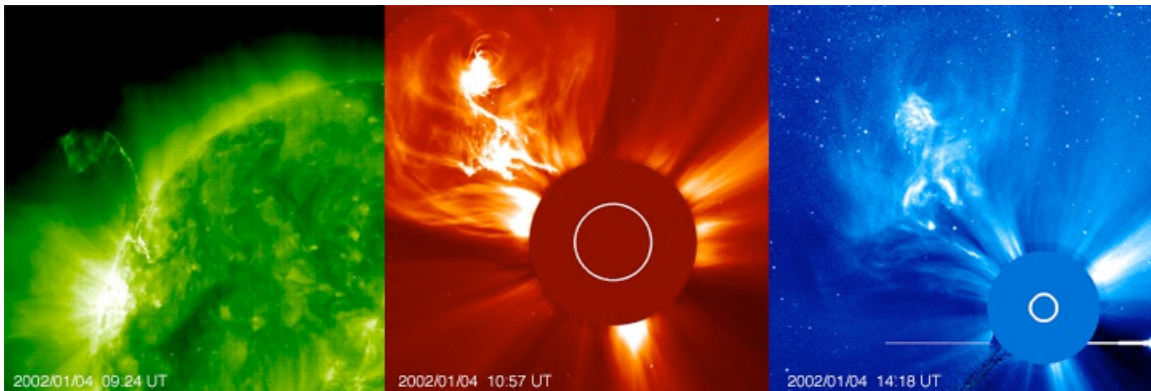
Roihupurkausten liittyminen maapallolla tapahtuviin magneettisiin myrskyihin uumoiltiin jo 1800-luvun puolivälissä, mutta lopullinen vahvistus siihen saatiin vasta satelliitti-aikaudella. *CME*:n havaitseminen on vaikeaa, koska Auringosta itsessään lähtevä valo on kirkkaampi. Avaruudessa toimivat satelliitit, kuten esimerkiksi *SOHO*, joka tarkkailee Aurinkoa erityisellä koronagrafiksi kutsutulla optisella laitteella (*LASCO*), joka synnyttää keinotekoisen auringonpimennyksen laitteen sensoriin, jolloin *CME*:n valohohto voidaan kuvata paremmin. Kuvassa 6.11 on esimerkkinä 4.1.2002 sattunut harvinaisen komea *CME*, jota on edeltänyt voimakas roihupurkaus. Tässä tapauksessa *CME*:n purkautumissuunta ei ollut kohti maapalloa eikä se aiheuttanut suuria avaruussäihäiriöitä.

---



Euroopan ja Yhdysvaltain avaruusjärjestöjen (*ESA, NASA*) yhteistyön tulos: Aurinkoa tutkiva *SOHO* (Solar Heliospheric Observatory) -luotain. Se on ollut toiminnassa joulukuusta 1995 lähtien. Kuvassa luotain on viimeisissä testeissä Matra Marconi avaruuskeskuksessa Ranskassa. Luotain pysyy Auringon ja Maan suhteen samassa paikassa (ns. Lagrangen L1-piste), mikä mahdollistaa Auringon jatkuvan tarkkailun vakioetäisyydeltä (noin 1 500 000 km). *SOHO*:ssa on tusinan verran erilaista Auringon aktiivisuutta ja hiukkas-purkauksia havainnoivaa laitetta. Eräs niistä on *LASCO* Large Angle and Spectrometric Coronagraph), joka kuvaa erityisesti Auringon roihupurkauksia ja koronan massa-purkauksia. *SOHO*:ssa on myös Turun yliopiston avaruustutkimus-laboratorion johdolla valmistettu *ERNE*-hiukkasilmaisim.

Kuva: *ESA/NASA*



Kuva 6.11. Auringon roihupurkaus (vasemmalla) ja siitä kehittynyt koronan massapurkaus eli *CME* (kaksi oikean puolimmaista kuvaa) *SOHO/LASCO*-instrumentilla havaittuna. Ilmiö tapahtui 4.1.2002 ja se kesti ainakin 4 tuntia. Pyöreä kiekko on laitteen optista sensoria auringonsäteilyltä suojaava levy. Sen keskellä oleva ympyrärengas kuvaa minkä kokoisena Auringon kiekko havaittaisiin satelliitista. *CME*-materiaa lähtee Auringosta kuvan vasemmasat yläkulmasta. Muut valosuihkut ovat Auringosta lähtevää tavallista hiukkasvirtaa. (Kuva: *ESA/NASA*)

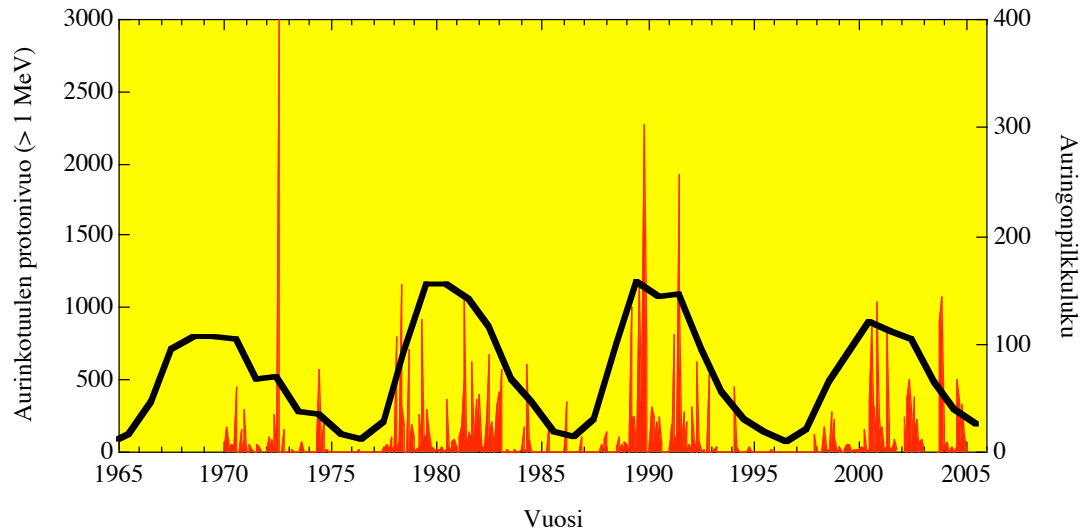
Kuva 6.12 esittää Auringon emittoiman korkeaenergiaisten protonien vuon kolmen auringonpilkkujakson aikana (1970-2004). Olennaista kuvassa on se, että energiset hiukkasvirrat esiintyvät erillisinä jaksoina, episodeina, joiden kesto on muutamasta kuukaudesta noin vuoteen. Väliaikoina on rauhallisempaa. Pilkkujakson aikana yleensä ensimmäinen voimakas purkauskausi sattuu vähän ennen pilkkumaksimia, mutta pilkku-maksimin tuntumassa, noin 1-2 vuoden aikana on Auringon aktiivisuustaso alhainen. Esimerkiksi pilkkujaksolla 21, joka huipentui vuonna 1980, aktiivisuus laski silloin alemmaksi kuin yleensä on vallalla pilkkuminimin aikana. Laskevalla pilkku-kaudella aktiivisuus taas lisääntyy. Näin Auringon aktiivisuuselämä on kaksijakoinen. Laskukaudella aktiivisuus-episodeja voi olla useita, tavallisimmin kaksi tai kolme. Auringon aktiivisuus pysyy itse asiassa melko korkealla tasolla, vaikka pilkkumäärät ovat lähellä minimiään. Hiljaisin kausi aktiivisuudessa on noin vuosi pilkkuminimin molemmin puolin.

Auringon aktiivisuus ja suuret purkaukset eivät suoraviivaisesti seuraa auringonpilkkujen määrää. Voimakkaita energiapurkauksia voi olla kaikkina pilkkujakson vuosina, vaikkakin suurimmat aktiivisuusilmiöt sattuvat korkeiden pilkkulukujen kausiin. Aktiivisuusilmiöt esiintyvä usein jaksoina, joiden välissä Aurinko säteilee rauhallisemmin jopa vuosia. Usein tällainen rauhallinen episodi sattuu auringonpilkkujen maksimiaikaan. Avaruussään kannalta auringonpilkkujakson nouseva ja laskeva kausi ovat aktiivisuuspurkauksien luonteen kannalta erilaisia. Jos esimerkiksi auringonpilkkujen sijaan Auringon aktiivisuussykliä seurattaisiin aurinkotuulen keskinopeuden suhteen, aktiivisuusmaksimit sattuisivat lähelle pilkkuminimiä ja pilkkumaksimin aikana olisi hiljaisempaa. Auringon aktiivisuussykli seuraa Auringon magneettikentän evoluutiota, josta osa ilmenee auringonpilkkujen määrän vaihteluna.

### Kosminen säteily

Aurinkokunnan ulkopuolelta Linnunradan tähdistä (mm. supernovaräjähdyksissä) saapuu maapallolle tasaisena virtana erittäin korkeaenergiaisia hiukkasia niin sanotun kosmisen säteilyn muodossa. Pääosa siitä muodostuu protoneista ja heliumatomien ytimistä. Aurinkokunnan ulkopuolella kosminen säteily on suhteellisen vakio, mutta törmätessään

aurinkotuulen plasmaan ja magneettikenttään, säteily siroaa pois suunnastaan ja maapallolle saapuu vähemmän kosmisiä hiukkasia. Milloin Auringosta virtaa tavallista enemmän plasmaa aurinkotuulen mukana, maanpinnalla havaittavassa kosmisessa



Kuva 6.12. Auringosta emittoituvien korkeaaneristen protonien (energia  $> 1$  MeV) vuo kuukausikeskiarvoina (pystyviivat) ja auringonpilkkuluku (musta viiva) 1970-2005. Hiukkaskvirta Auringosta on voimakkaimmillaan pilkkujen nousukaudella ja laskukaudella, mutta pilkkumaksimin tuntumasa hiukkaskvirta on heikompi.

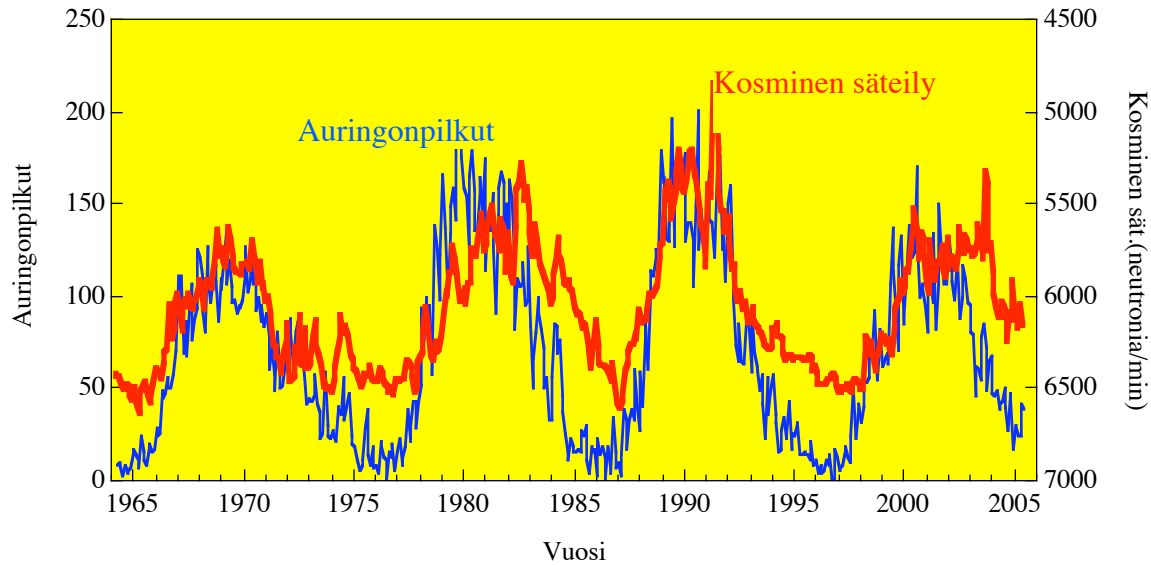
säteilyssä mitataan vähenemä, ns. Forbushin\* kato, joka voi suurimmillaan olla noin 10 % kosmisen säteilyn normaalitasosta.

Aurinkotuulen kosmista säteilyä sirottava vaikutus on voimakkaimmillaan auringonpilkkujen maksimiaikoina ja heikoin pilkkujen minimissä. Näin maapallolle saapuvassa kosmisen säteilyn voimakkuudessa on tuttu 11-vuotinen jaksollisuus.

---

\* *Scott E. Forbush* (1904-1984) yhdysvaltalainen fyysikko, joka tutki kosmisen säteilyn intensiteetin vaihteluja 1930-luvulla





Kuva 6.13. Kosmisen säteilyn mittauksia Oulun yliopiston neutronimonitorilla 1964-2005 (punainen). Säteilyn intensiteetti kasvaa alaspäin. Auringonpilkkut (sininen). Runsaiden auringonpilkkujen aikaan kosminen säteily on heikompaa aurinkotuulen estäessä kosmisen säteilyn pääsyä maapallolle. Rauhallisen Auringon aikana tilanne on päinvastainen. (Lähteet: Kosminen säteily: Oulun yliopiston kosmisen säteilyn havaintoasema; <http://cosmicrays oulu.fi/>; Auringonpilkkut *SIDC*)

Maan pinnalla ei havaita suoraan kosmisen säteilyn hiukkasia, vaan näiden ja ilmakehän molekyyliden kanssa tapahtuneiden hiukkastörmäyksen tuotteita eli sekundäärisiä hiukkasia. Kosmisen säteilyn vaikutus nähdään ilmakehässä muun muassa hiili-14 ja beryllium-10 isotooppien pitoisuuksien vaihteluina. Näitä isotooppeja tavataan erilaisista biologisista alkuperää olevista aineista (esim. puiden vuosilustot) ja muista luonnon tuottamista kerrostumista (jäätiköt ja merisedimentit) jopa kymmenien tuhansien vuosien ajoilta. Isotooppipitoisuuksien vaihteluista voidaan päätellä epäsuorasti miten voimakas aurinkotuulen kosmiseltä säteilyltä suojaava vaikutus on ollut menneinä aikoina ja siten saadaan tietoa itse Auringon aktiivisuuden pitkäaikaisista muutoksista. Kuvan x tiedot Auringon aktiivisuuden vaihteluista viimeisen 2000 vuoden ajalta on johdettu beryllium-10 pitoisuuksista.

Kosmisen säteilyn törmäyksissä ilmakehän molekyyliden kanssa syntyy uusia hiukkasia kuten maanpäällisissä hiukkaskiihdyttimissä. Yleisimmät sekundäärihiukkaset ovat neutroni, myoni ja pioni, jotka ovat lyhytikäisiä alkeishiukkasia. Osa näistä hiukkasista (noin 1 %) yltää maan päälle, mutta suurin hiukkastiheys tavataan noin 15 km korkeudella. Eräiden hypoteesien mukaan korkeanaergiat hiukkaset voivat aiheuttaa

ilmakehän molekyylien ionisaatiota. Lisääntynyt ionitiheys voi johtaa pilvisyyden kasvuun. Näin on mahdollista, että maapallon pilvisyys olisi kosmisen säteilyn vaikutuksen alaista ja sitä ohjaisi Auringon aktiivisuuden 11-vuotinen jaksollisuus. Jos tällainen tapahtumaketju on todellinen, merkitsee se sitä, että maapallon ilmaston muutoksissa on kosminen komponentti.

### Maan magneettikenttä ja magnetosfääri

Maapalloa ympäröi magneettikenttä, joka saa alkunsa Maan uumenissa noin 3000 km syvyydessä. Siellä on Maan sula kuuma sähköä johtava ydin, jonka kiertovirtauksista syntyy magneettikenttä dynamoperiaatteella. Myös Auringon magneettikentän ajatellaan syntyvän samalla tavalla. Siinä siis mekaaninen liike-energia (ydinnesteen liike) muuntuu sähkövirroiksi ja siitä magneettikentiksi. Maapallon tapauksessa ytimessä kiertävät sähkövirrat ovat giga-ampeerien ( $10^9$  A) suuruusluokkaa.

Maan magneettikentän muoto on säännöllinen ja se muistuttaa Maan keksipisteeseen asetetun sauvamagneetin dipolikenttää kaksine napoineen. Magneetin akseli on vähän (noin  $11^\circ$ ) kallellaan maapallon pyörimisakselin navoista, pohjoisnavasta ja etelänavasta. Magneettikentän voimakkuus on suurin navoilla (noin  $60 \mu\text{T}$ ) ja heikoin päiväntasaajalla (noin  $30 \mu\text{T}$ ). Maan kenttä on siis varsin vähäinen verrattuna esimerkiksi auringonpilkkujen kenttiin, jotka voivat helposti olla tuhat kertaa voimakkaampia.

Maan sisäsyntyinen kenttä muuttuu kaiken aikaa, mutta hitaasti. Magneettikenttä on kokonaisuutena heikkenemässä noin promille vuosivauhtia. Verrattuna avaruussäiliöiden nopeaan vaihtelevuuteen Maan magneettikentän hitaalla muutoksella ei ole merkitystä. Magneettikentän heikkenemisellä, jos se jatkuu samanlaisena, on merkitystä vasta satojen tai tuhansien vuosien kuluttua. Silloin magneettikentän muoto ja voimakkuus on olennaisesti erilainen kuin tänään ja siten myös Auringosta tulevat hiukkaset kokisivat erilaisen magneettisen vaikutuksen ja hiukkasten aiheuttamat ilmiöt olisivat olennaisesti toisenlaisia ja eri paikoissa kuin nykyisen magneettikentän vallitessa.

Maan magneettikenttä kokee samanlaisen käännöstapahtuman kuin Auringossakin tapahtuu 11-vuoden välein. Maapallon tapauksessa napaisuuden vaihdos ilmenee kuitenkin äärettömän paljon harvemmin, keskimäärin muutamia kertoja miljoonassa vuodessa. Tutkijat uskovat, että napaisuudenvaihtoprosessi on käynnissä, koska tietyillä alueilla maapallon ytimessä magneettikentän suunta on vaihtunut vastakkaiseksi. Magneettiset navatkin ovat poikkeuksellisen voimakkaassa liikkeessä, mikä viittaa siihen, että maapallon magneettikentän yleinen rakenne on nopeassa muutostilassa. Täytyy kuitenkin muistaa, että puhuttaessa Maan peruskentän muutosten yhteydessä ilmiön "nopeudesta" sillä tarkoitetaan vuosikymmenien, vuosisatojen ja vuosituhansien kestoista ilmiöistä.

Vielä 1920-luvulla tutkijat uskoivat, että dipolikenttä jatkuu kauas avaruuteen heiketen vähitellen. Magnetosfääritutkimuksen pioneeri S. Chapman\* kollegoineen esitti 1930-luvulla, että Auringosta lähtevät varatut partikkelit voivat muokata dipolikenttää olennaisesti. Heidän teoreettisille tutkimuksilleen saatiin vahvistus vasta 1950-luvulla alkaneista satelliittihavainnoista.

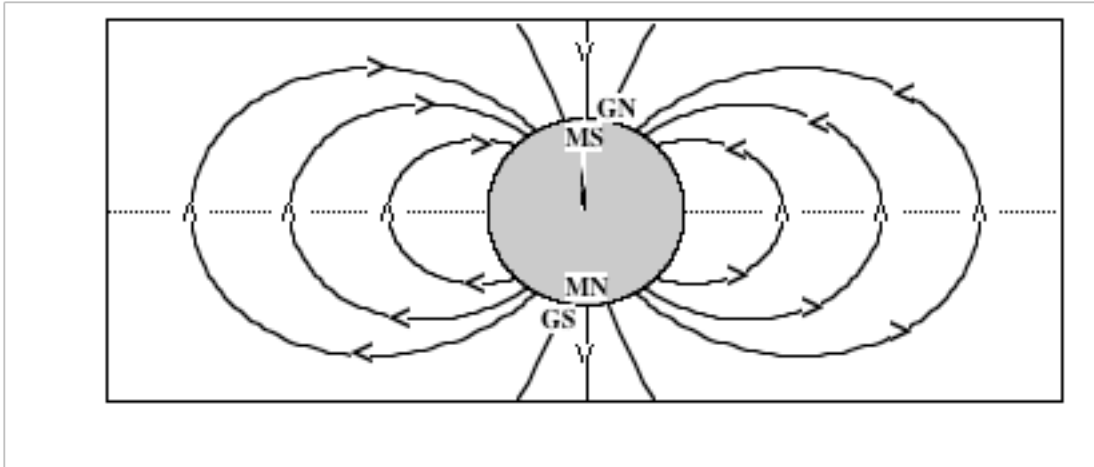
Maan dipolikenttä heikkenee verrannollisena etäisyyden kolmanteen potenssiin, kun etäisyys lasketaan Maan keskipisteestä. Muutamien kymmenientuhansien kilometrien korkeudella magneettikenttä on enää noin tuhannesosa tai vähemmän maanpinnalla vaikuttavasta magneettikentästä. Aurinkotuulen painevaikutus magneettikenttään on suuri ja muokkaa magneettikentän muotoa. Lisäksi aurinkotuulen mukanaan kuljettama magneettikenttä on voimakkuudeltaan samaa suuruusluokkaa kuin Maan oma kenttä.

Aurinkotuulen kannalta Maan magneettikenttä on virtauseste kuin kivet vuolaasti virtaavassa purossa. Tuuli muovaa maapallon magneettikenttää magnetosfääriksi\*, jolla on rajattu ulkopinta. Sen auringonpuoleinen pinta on tyypillisesti 40 000 - 65 000 km (7 - 10 Maan säteen) etäisyydellä Maasta. Yöpuolella magnetosfääri venyy

---

\* *Sidney Chapman* (1888-1970) englantilainen fyysikko, joka tutki mm. magnetosfäärin rakennetta ja ilmakehän fotokemiallisia reaktioita. Hänen kaasuseostutkimuksiaan hyödynnettiin ensimmäisen atomipommin valmistuksessa vuonna 1945.

\* Termin otti käyttöön amerikkalainen fyysikko *Thomas Gold* (1920-2004) vuonna 1959.



Kuva 6.14. Maapallon dipolikentän kenttäviivoja (soikion muotoiset viivat). Harmaa kiekko kuvaa maapalloa. Väkäset näyttävät niiden suunnan, joka eteläiseltä pallonpuoliskolta kohti pohjoista. Magneettisilla navoilla (MS, MN) magneettikenttä on pystysuorassa. Dipolin akselin suunta poikkeaa Maan pyörimisakselin suunnasta (GN, GS). Aurinkotuulen vaikutuksesta dipolikenttä muuttuu muotoaan kaukana avaruudessa 40 000 km - 60 000 km etäisyydellä (kts. Kuva 6.15).

aurinkotuulen vaikutuksesta pitkäksi pyrstömäiseksi rakenteeksi, joka ulottuu ainakin Kuun etäisyydelle Maasta. Magnetosfääri muodostaa aurinkotuuleen ikäänkuin valtaisan noin miljoona kilometriä pitkän onkalon. Se suojaa maapallon ilmakehää aurinkotuulen kuluttavalta vaikutukselta, koska vain osa aurinkotuulesta pääsee magnetosfäärin sisäpuolelle. Esimerkiksi Marsissa, jossa ei ole magneettikenttää, ilmakehä on ohentunut hyvin vähäiseksi aurinkotuulen puhallusvaikutuksesta.

Kuvassa 6.15 on kaavio magnetosfäärin rakenteesta. Lähimpänä Aurinkoa on iskurintama, joka kohdalla aurinkotuulen hiukkaset joutuvat Maan magneettikentän vaikutuksen kohteeksi. Kyseessä on samankaltainen ilmiö kuin ylääänien nopeudella lentävien lentokoneiden synnyttämä paineaalto. Iskurintaman jälkeen on pyörteinen välivyöhyke, missä aurinkotuulen nopeus laskee. Tämän jälkeen tulee varsinainen magnetosfäärin rajapinta, magnetopausi, jonka sisäpuolelle rajoittuu Maan magneettikenttä. Magnetopausin paikka muuttuu riippuen aurinkotuulen aiheuttamasta paineesta. Tuulen puhaltaessa Auringon hiukkaspurkauksen vaikutuksesta tavallista kovempaa, rajapinta lähenee Maata. Suurten avaruussäämyrskyjen aikana, kuten esimerkiksi loka/marraskuussa 2003, magnetopausi painuu noin puoleen normaalista etäisyydestään eli geostationaaristen satelliittien ratojen sisäpuolelle. Itse asiassa magnetosfääri ei ole

koskaan tasapainotilassa, vaan sen muoto ja koko muuttuu jatkuvasti aurinkotuulen painevaikutuksesta.

Magnetopausissa on kaksi onkaloa (cusp), jotka sijaitsevat napa-alueilla missä magneettikenttä on lähes pystysuorassa. Onkaloiden kautta aurinkotuulen plasmaa pääsee virtaamaan magnetosfääriin. Plasmaa joutuu myös magnetosfääriin pyrstöosaan ekvaattoritasossa sijaitsevaan plasmalevyyn. Sieltä ovat pääosin peräisin revontulia sytyttävät hiukkaset.

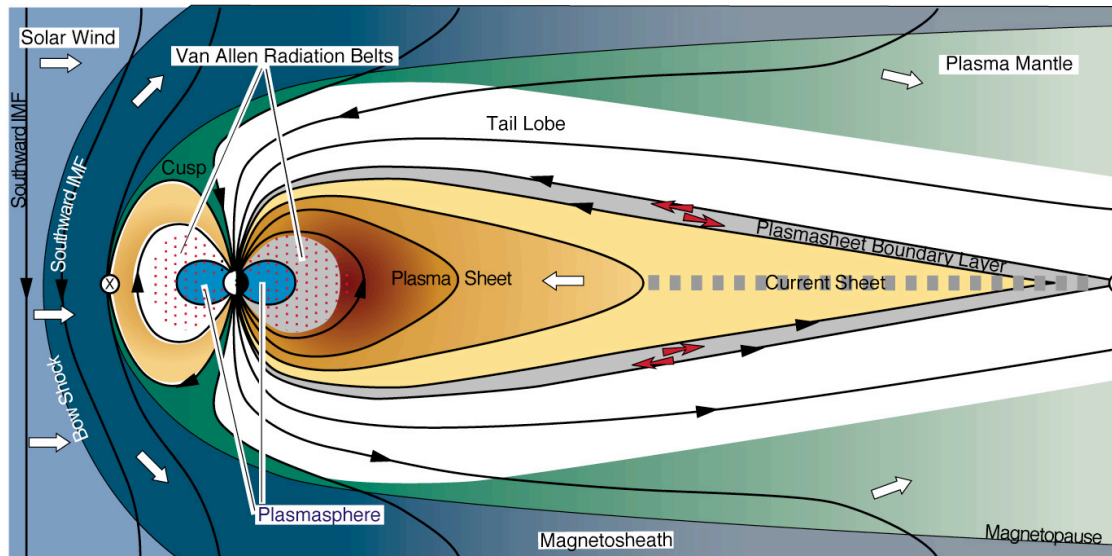
Osa magnetosfääriin tunkeutuneista hiukkasista joutuu Maan magneettikentän kaappaamiksi ja poukkoilevat pohjoisen ja eteläläisen pallonpuoliskon väliä kenttäviivoja kiertäviä spiraaliratoja pitkin (van Allenin vyöhykkeet). Samalla hiukkaset kiertävät maapalloa siten, että protonit kulkeutuvat idästä länteen ja elektronit toiseen suuntaan muodostaen maapallon ympärille rengasvirran noin 4-5 Maan säteen etäisyydelle.

Aurinkotuulen magneettikentän (*IMF*; Interplanetary Magnetic Field) ja maapallon magneettikentänväliset kytkennät ekvaattoritason magnetopausissa säätelevät avaruussäätilmiöiden voimakkuutta. Milloin *IMF* on vastakkainen (kohti etelää) Maan kentän suunnan kanssa, kytkeytyvät ne toisiinsa. Silloin avautuu hiukkasille reitti magnetosfääriin sisään ja se alkaa latautua hiukkasista ja siihen kertyy energiaa. Plasmalevyn epästabiliin vaiheen aikana varastoituneet hiukkaset joutuvat nopeaan liikkeeseen ja syöksyvät kenttäviivoja pitkin kohti magneettista napa-aluetta. Energiaisten hiukkasten ja ilmakehän molekyylien välisissä törmäyksissä syntyy revontulivaloa molempia magneettisia napoja kiertävillä vyöhykkeillä eli revontuliovaaleilla noin 23° etäisyydellä navoista.

Ilmakehän kerrokset - otsoni

Maapallon ilmakehä jaetaan tavallisesti erilaisiin kerroksiin. Yleensä jakoperusteena käytetään sellaisia fysikaalisia tekijöitä, joiden vaikutukset muuttavat ilmakehän tilaa. Tällaisia ovat esimerkiksi lämpötila ja paine, jotka määräävät alailmakehän liikkeitä.

Avaruussäässä, missä sähköiset ja magneettiset voimat ovat määrääviä, olennainen tekijä on ilmahiuksien ionisaatio, koska sähkömagneettiset voimat vaikuttavat

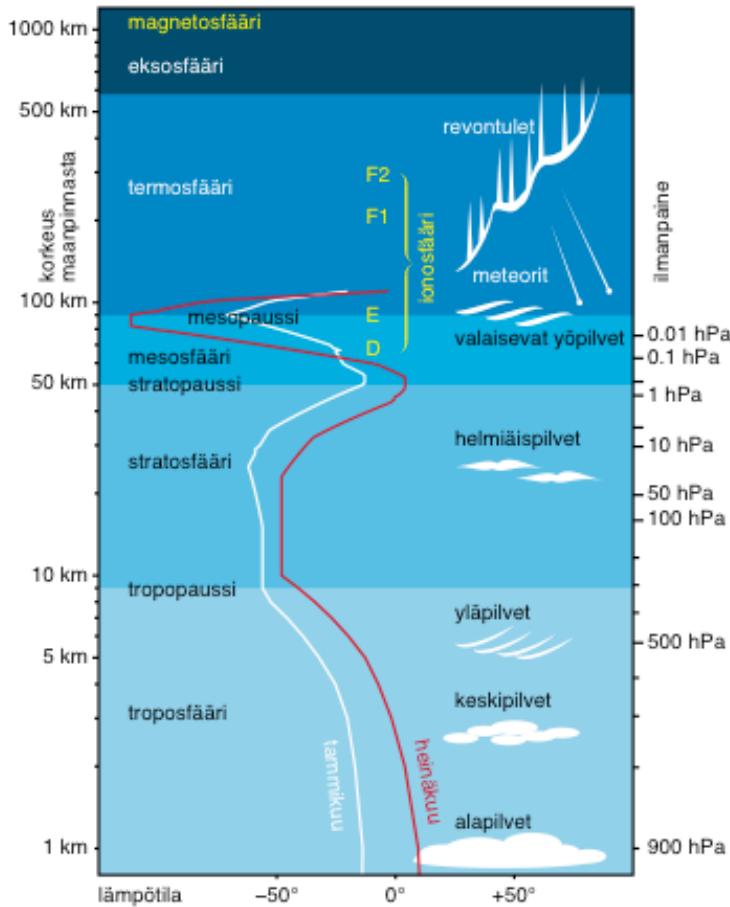


Kuva 6.15. Kaavakuviota maapallon magnetosfäärin eri alueista. Valkoiset nuolet vasemmalla kuvaavat aurinkotuulta (Solar Wind). Musta nuoli kärki alaspäin tuulivektoreiden vieressä on aurinkotuulen mukanaan kuljettama planetaarinen magneettikenttä (IMF). Aurinkotuulen paine muoaa magnetosfääriä siten, että päiväpuolella (vasemmalla) kenttäviivat litistyvät ja yöpuolella (oikealla) ne venyvät pyrstömäiseksi muodostelmaksi. Magneettikenttä aivan maapallon läheisyydessä (n. 20 000 km saakka) muistuttaa säännöllistä ja symmetristä dipolikenttää (kts. Kuva 6.14) soikionmuotoisine kenttäviivakuvioineen. Punaisilla pisteillä maapallon ympärillä on kuvattu korkeaenergiaisten hiukkasten vyöhykettä (van Allenin vyöhyke). IMF:n ja maapallon magneettikentän rekonnektio tapahtuu magnetopausissa X:llä merkityssä kohdassa. Rekonnektiossa suuria määriä aurinkotuulen hiukkasplasmaa pääsee magnetosfäärin sisäpuolelle. Osa niistä ajautuu pyrstöön plasmalevyyn, missä tapahtuu aika ajoin uusi rekonnektio, joka kiihdyttää plasman nopeaan liikkeeseen aiheuttaen magneettisia häiriöitä ja revontulia napa-seuduilla.

ionisoituneisiin hiukkasiin. Avaruussäätöilmiöiden kannalta olennainen kerrosjako on: neutraali-ilmakehä (0 - 80 km), ionosfääri (80 - 1000 km) ja magnetosfääri (1000 km -). Lämpötilan perusteella neutraali-ilmakehän kerrokset alhaalta ylöspäin ovat: troposfääri (0 - 12 km), stratosfääri (12 - 50 km) ja mesosfääri (50 - 80 km). Kerrosten välissä on ohut vaihtumisalue (tropopausi, stratopausi ja mesopausi), jossa lämpötilan pystysuunnassa tapahtuva muutosnopeus vaihtuu.

\* James A. Van Allen (1914-2006) amerikkalainen fyysikko. Keksi säteilyvyöhykkeet Explorer-satelliitin havainnoista vuonna 1958.

Lämpötila laskee troposfäärin yläosassa suunnilleen lukemille  $-50 - -60^{\circ}\text{C}$ . Tropopausin yläpuolella stratosfäärin alaosassa lämpötila pysyy suunnilleen samana, mutta yläosassa lämpötila on suunnilleen sama kuin maanpinnalla. Lämpiyminen johtuu otsonikerroksesta, joka imee itseensä Auringon ultraviolettisäteilyä ( $UV$ ). Otsonia on



Kuva 6.16. Ilmakehän pystyrakenne kerroksineen lämpötilan mukaan jaoteltuna. Punainen käyrää osoittaa lämpötilan vaihtelut eri korkeuksilla. Lämpötila laskee tropo- ja mesosfäärissä, mutta nousee stratosfäärissä. Nousu aiheutuu otsonista. Mesosfäärin yläpuolista kerrosta kutsutaan termosfääriksi, jossa lämpötila kasvaa nopeasti tuhansiin asteisiin. Ilma on siellä kuitenkin niin harvaa, ettei mitään lämmittävää vaikutusta sieltä voi levitä.

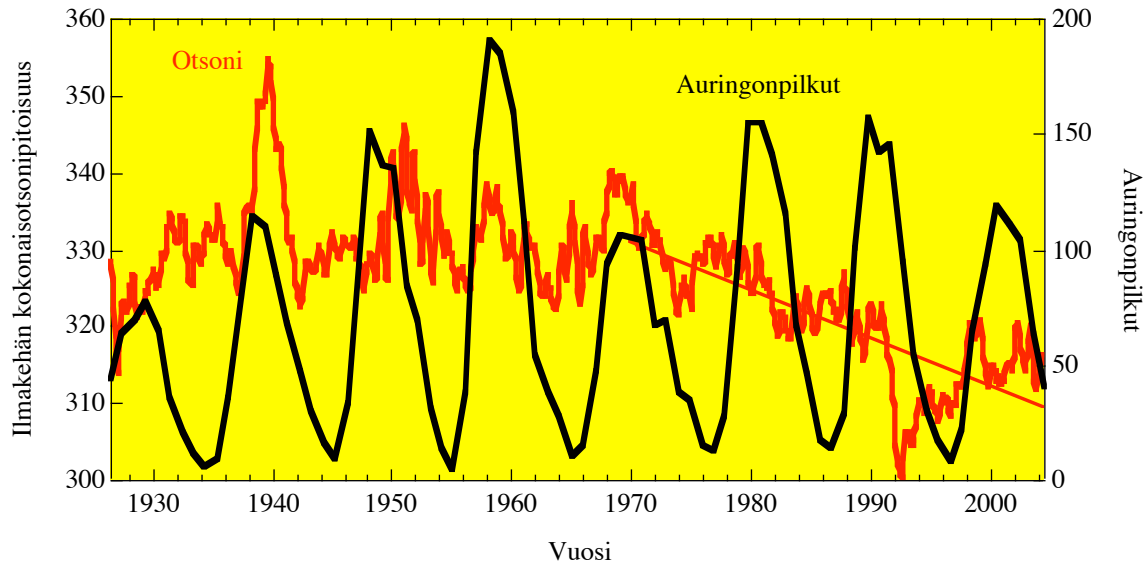
eniten korkeusalueella 25 - 50 km. Stratosfäärissä otsonia on vähän. Maanpinnalle tuotuna kaikki otsoni tuottaisi vain noin 3 mm paksuisen kerroksen.

Otsoni on hapen kolmiatominen muoto ( $O_3$ ). Sen muodostumisessa ensin  $UV$ -säteily (aallonpituus noin 200 nm) hajottaa normaaleja kaksiatomisia happimolekyylejä ( $O_2$ ) atomimuotoon ( $O$ ). Vapaat atomit liittyvät happimolekyyleihin muodostaen otsonia.  $O_3$

imee tehokkaasti lähes kaiken *UV*-säteilyn aallonpituusalueelta 250 - 300 nm, mikä on biologiselle elämälle elinehto, koska tältä aallonpituuskaistalta tuleva *UV*-säteily on erittäin haitallista eloperäiselle luonnolle. Otsonipitoisuuksien seuraaminen on siten tärkeää. Tehokkain monitorointimuoto on mittaukset satelliiteista, jolloin otsonipitoisuudet saadaan nopeasti selville kaikilta leveysasteilta. Mittauksia on tehty jo 1970-luvulta lähtien ja tulokset osoittavat otsonin vähenevän noin 8 % vuosikymmenessä. Eräs uusimpia otsonia havainnoivista satelliiteista on *NASA*:n *EOS-Aura*, joka laukaistiin kiertoradalleen vuonna 2004. Mukana luotaimessa on suomalaistakin havaintoteknikkaa. Otsonin maanpintamittauksia tehdään luotauspaloilla ja laser-tutkilla Suomessa Ilmatieteen laitoksen Lapin ilmatieteellisessä tutkimuskeskuksessa Sodankylässä, missä myös vastaanotetaan ilmakehäsatelliittien havaintoja.

Otsonimäärät stratosfäärissä vaihtelevat paitsi luonnollisista syistä niin myös ihmisen oman toiminnan kautta. Erilaisissa kylmälaitteissa käytetyt kaasut (kauppanimikkeeltään freonit ja *CFC*-yhdisteet) joutuessaan hitaassa (noin 5 vuotta) kiertoliikkeessä stratosfääriin, käynnistävät siellä fotokemiallisia reaktioita, jotka tuhoavat otsonia. Puhutaan otsoniaukoista tai otsonikerroksen ohentumasta, jotka ovat voimakkaimmillaan napa-alueiden yläpuolella pohjoisella ja eteläisellä pallonpuoliskolla. Ilmiö havaittiin 1980-luvun alussa Etelämantereen yläpuolella. Vuonna 1987 teollisuusmaat sopivat *CFC*-päästöjen vähentämisestä ja lopettamisesta. Merkkejä otsonipitoisuuden palautumisesta ennalleen odotetaan lähivuosikymmeninä. Toinen ihmiskunnan ilmakehän tasapainoa muuttava tekijä on kasvihuonekaasujen lisääntyneet päästöt, joiden vaikutuksesta maanpinnalla lämpötila kohoaa, mutta stratosfäärissä kylmenee. Lämpötilan lasku nopeuttaa otsonia tuhoavia prosesseja, joka hidastaa otsonikerroksen paluuta normaalitilaan freonipäästöjen vähennyttä.





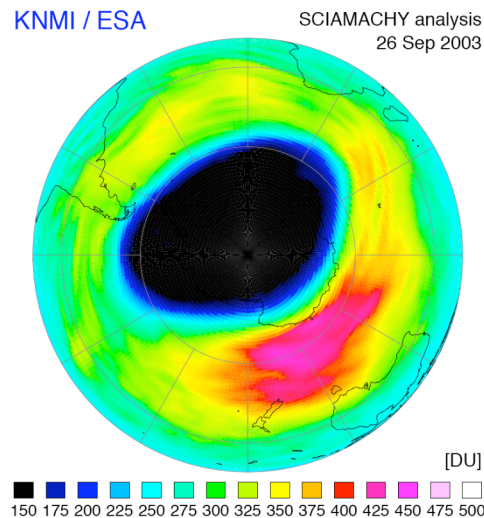
Kuva 6.17. Ilmakehän kokonaisotsonipitoisuus Arosan (Sveitsi) observatorion havaintojen mukaan (punainen käyrä). Otsoniarvoista on tasoitettu vuotuinen vaihtelu pois. Otsonipitoisuus ilmaistaan dobsonina ( $DU$ ;  $300\text{ DU} = 3\text{ mm}$  kerros maanpinnalla). Otsonimäärässä on tapahtunut selvää vähenemistä 1970-luvulta lähtien kuten punainen trendiviiva paljastaa. Otsonimäärin vaikuttaa myös Auringon aktiivisuus voimistuneen  $UV$ -säteilyn tuottajana. Otsonin tuotto on suurinta auringonpilkkujen maksimivuosien tuntumassa.

Otsonikadon seurauksena Auringon haitallinen  $UV$ - säteily on voimistunut erityisesti Euroopan yllä. Viimeisten kahden vuosikymmenen aikana se on voimistunut Euroopassa noin 20 %.

Avaruussää vaikuttaa otsonin määrään. Auringonpilkkujen ollessa huippulukemissa Auringon  $UV$ -säteilyn tuotto on voimakkaampaa kuin muulloin. Arvioidaan, että tuolloin otsonin määrä stratosfäärissä kasvaa 1-2 %. Kuvassa x on Arosan otsoniobservatorion mittauksia 1920-luvulta lähtien. Siitä voi havaita kuinka otsonimäärässä on suunnilleen auringonpilkkujen maksimikohdissa pieni nousu, vaikka yleinen otsonipitoisuus lähti laskuun 1970-luvulla. Aivan viime vuosina on kokonaisotsonissa havaittu pientä nousua pitkään jatkuneen laskun jälkeen. Nousu on tulkittu merkiksi otsonikerroksen toipumisesta freonipäästöjen vähennyttyä olennaisesti 1990-luvulla. Toisen tulkinnan mukaan nousu on tilapäistä ja liittyy auringonpilkkumaksimiin ja siitä johtuvaan otsonia lisäävien ultraviolettisäteilyn kasvuun. Miten otsonikerros tulee päästörajoituksiin reagoimaan jää vielä nähtäväksi.

Voimakkaiden hiukkaspurkauksien aikana ilmakehän otsoni korkeusalueella 35 - 60 km voi laskea kymmeniä prosentteja ja kestää kuukausia ennenkuin pitoisuudet palaavat ennalleen. Tällainen ilmiö havaittiin Envisat-ympäristösatelliitin *GOMOS*-otsonilaitteella "Halloween"-avaruussäämyrskyn aikana loka/marraskuussa 2003. Toinen alkaneen 2000-luvun poikkeuksellisen suuri avaruussäämyrsky sattui 14.7.2000 juuri Ranskan kansallispäivänä, jota vietetään Bastiljin linnoituksen valloituksen muistoksi. Tämän yhteensattuman vuoksi myrskyä on siitä lähtien kutsuttu nimellä "Bastilji"-myrsky. Myrskyn yhteydessä havaittiin voimakas protonipurkaus, joka tuotti mesosfääriin runsaasti typen oksideja ( $NO$ ,  $NO_2$  eli niin sanottuja  $NO_x$ -yhdisteitä) ja vedyn oksideja ( $H$ ,  $HO$ ,  $HO_2$ ), jotka tuhoavat tehokkaasti otsonia. Arvioitiin, että 70 % mesosfäärin otsonista hävisi viikoiksi myrskyn vaikutuksesta ja 9 % ylästratosfäärin otsonista. Kokonaisotsonissa muutokset jäivät kuitenkin alle prosenttiin.

Ilmatieteen laitos mittaa stratosfäärin otsonia ja siihen vaikuttavia tekijöitä sekä Auringon *UV*-säteilyä Suomessa Sodankylässä ja Etelämantereella. Tutkimuksessa käytetään lisäksi hyväksi satelliittimittauksia, maailmanlaajuisia sääaineistoja sekä ilmakehän fysiikkaa ja kemiaa kuvaavia tietokonemalleja. Tutkimusta tehdään paljolti kansainvälisenä yhteistyönä. Tavoitteena on ymmärtää muun muassa ihmistoiminnan



Kuva 6.18. Otsoniaukko Etelämantereen yllä 26.9.2003 *ESA*:n *Envisat*-satelliitin mittausten mukaan. Väriasteikko ilmoittaa otsonipitoisuuden dobsoneina (kts. s. x). Normaaliarvot ovat vaaleanvihreällä alueella. Tummassa aukossa otsonipitoisuus on pudonnut alle puoleen normaalista tasosta. (Kuva: *KNMI/ESA*)

ja luontaisten tekijöiden vaikutuksia otsonikerrokseen ja auringon *UV*-säteilyyn menneisyydessä, nyt ja tulevaisuudessa. Erityisinä kiinnostuksen kohteina ovat muun muassa otsonikadon vaikutukset *UV*-säteilyyn, otsonikadon ja ilmastonmuutosten yhteydet sekä uuden sukupolven satelliittimittausten hyödyntäminen tutkimuksessa.

Otsonikato on tietystä mielessä samankaltainen ilmiökokonaisuus kuin kasvihuoneilmiön vahvistumisesta aiheutuva ilmaston muutos. Molemmissa on ihmisen toiminnalla olennainen osuus, mutta mukana vaikuttavina tekijöinä ovat myös ilmakehän omat sisäsyntyiset prosessit. Lisäksi kummassakin on muutoksia, jotka riippuvat Auringon sekä lyhytaikaisesta että pitkäkestoisesta säteilyaktiivisuudesta. Näin sekä otsonikato että ilmastonmuutos ovat osittain avaruussään ja avaruusilmaston tuotteita. Auringon osuuden tarkkaa määrää ei vielä tunneta ja se myös vaihtelee tarkasteltaessa eripituisia ajanjaksoja. Otsonikato kytkeytyy suoraan kasvihuonekaasujen määrän kasvuun. Kasvihuoneiteorian mukaan yläilmakehän (stratosfääri) tulee jäähtyä alailmakehän lämmetessä kasvihuoneilmiön voimistumisen myötä. Jäähtyminen kiihdyttää otsonikatoa tuhoavia reaktioita otsonia vähentävästi.

### Ionosfääri

Magnetosfäärin lisäksi toinen merkittävä avaruussäätilmiöiden näyttämö maapallon lähiavaruudessa on ionosfääri. Siellä ilmakehän atomit ja molekyylit ovat merkittävässä määrin ionisoituneet Auringon lyhytaaltosäteilyn tai hiukkassäteilyn vaikutuksesta.

Ionosfäärin olemassaolo havaittiin ensimmäisissä radiolähetysten kokeiluissa aivan 1900-luvun alussa. Marconin<sup>\*</sup> onnistui lähettää sähkötystä Englannista Newfoundlandiin

---

<sup>\*</sup> *Guglielmo Marconi* (1874-1937) italialainen keksijä ja liikemies. Sai ensimmäisenä radiolähetysten Atlantin yli. Hänelle myönnettiin Nobel-palkinto vuonna 1909 "ansioista langattoman lennättimen kehittämisessä".

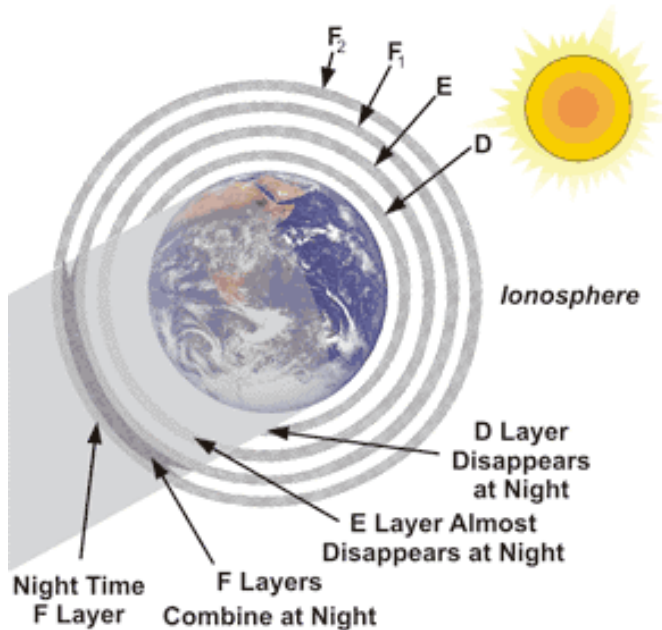


Kuva 6.19. Otsoniluotauspallo lähdössä mittausmatkalleen Sodankylässä (Kuva: IL).

Kanadaan vuonna 1901. Miten suoraviivaisesti etenevä radioaalto oli voinut kulkea niin kauas horisontin taakse? Selitykseksi esittiin, että ilmakehän yläosassa täytyy olla sähköä johtava kerros, joka heijastaa radioaallot takaisin maahan. 1900-luvun alussa tarkentui kuva ionosfääristä, jossa on vapaita elektroneja tietyllä korkeudella. Tuohon aikaan ionosfääriä kutsuttiin kerroksen löytäjien mukaan Kennellyn-Heavisiden\*\* kerrokseksi.

---

\*\* *Arthur Kennelly* (1861-1939). Amerikkalainen tutkija. Toimi Thomas Edisonin assistenttina. *Oliver Heaviside* (1850-1925). Englantilainen fyysikko ja matemaatikko.

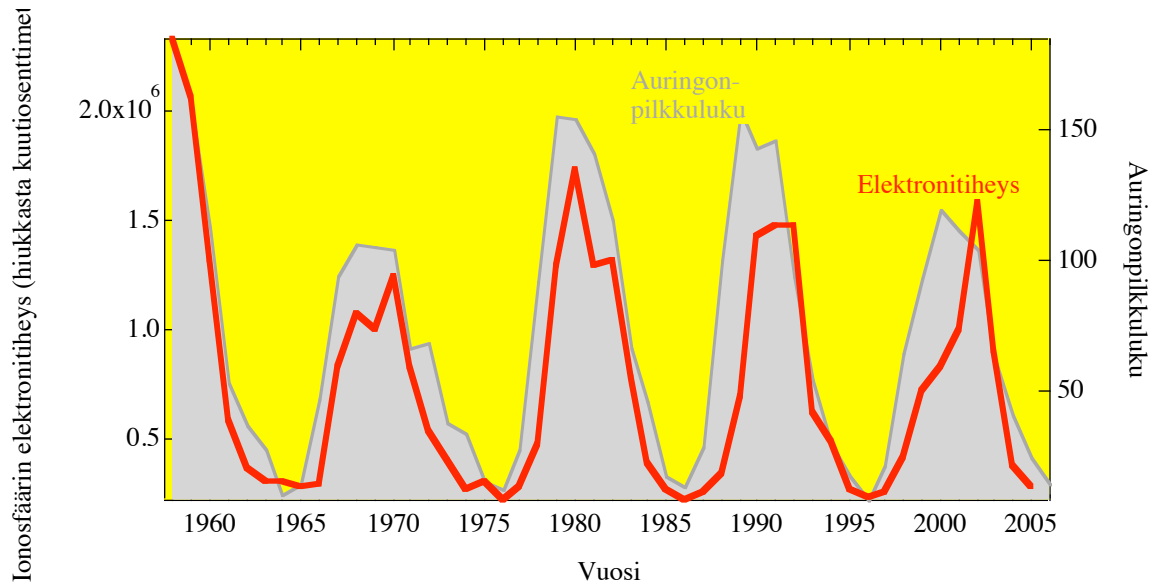


Kuva 6.20. Ionosfäärin kerrosrakenne. Ilmakehän ionisaatio tapahtuu Auringon lyhytaaltoisen säteilyn vaikutuksesta. Ionitiheys ei kasva tasaisesti korkeuden mukana, vaan siinä esiintyy tihentyymiä tietyillä korkeuksilla. Alin tihentymä on *D*-kerros ja se sijaitsee noin 60 - 90 km korkeudella. Sitä seuraa *E*-kerros noin 100 - 160 km korkeudella. Ylimpänä on *F*-kerros (300 - 1000 km), joka jakautuu kahteen osakerrokseen ( $F_1$  ja  $F_2$ ). Ionosfäärin ionisoitumisen määrä on suurimmillaan maapallon päiväpuolella. Vastakkaisella puolella alemmat kerrokset palautuvat neutraalitilaan yön ajaksi.

Ionosfääritutkimuksen uraauurtaja oli brittiläinen fyysikko E. V. Appleton<sup>\*</sup>, joka kehitti erityisesti ionosfäärin tutkimusta radioaaltoja hyväksikäyttäen. Ionosfäärin kerrosten nimet ovat Appletonilta peräisin. Alunperin ajateltiin, että kerroksia on maanpinnalta lähtien, joista alin nimettiin kirjaimella *A*, seuraava *B*:llä jne. Mittaukset osoittivat kuitenkin, että radioaaltojen etenemisen kannalta merkittävää ionisaatiota tavataan vasta *D*-kerroksen korkeudella. Siellä ionisaatio syntyy "kovan" röntgensäteilyn vaikutuksesta (aallonpituus noin 1 nm). *E*-kerroksen ionisoitumiseen vaikuttaa eniten "pehmeä" röntgensäteily (1-10 nm) ja *F*-kerrokseen *UV*-säteily (10 - 100 nm).

Radioaaltomenetelmässä lähetetään ionosondiksi kutsutulla laitteella radiosignaali joko suoraan ylöspäin tai viistossa kulmassa. Signaali heijastuu jokaiselle taajuudelle ominaiselta korkeudelta. Mitä korkeampi taajuus, sitä ylempää heijastus saadaan kunnes signaali läpäisee koko ionosfäärin taajuuden ylittäessä kriittisen arvon. Ionosondilla

<sup>\*</sup> Sir Edward V. Appleton (1892-1965). Brittiläinen fyysikko ja ionosfääritutkimuksen pioneeri 1920-luvulla. Sai fysiikan Nobel-palkinnon vuonna 1947.



Kuva 6.21. Ionosfäärin *F*-kerroksen suurin elektronitiheys Sodankylän geofysiikan observatorion ionosondihavaintojen mukaan 1958-2005. Harmaa alue kuvaa auringonpilkkujen vaihtelua.

saadaan tieto heijastuskorkeudesta ja siellä vallitseva ionisaatio elektronitiheytenä.

Taajuus, joka läpäisee *D*-kerroksen on noin 4 MHz, *E*-kerroksen 5 MHz ja *F*-kerroksen 6-10 MHz. Taajuudet riippuvat kuitenkin paljon Auringon aktiivisuuden tilasta ja auringonpilkkujakson vaiheesta.

Radioaallot sähkömagneettisena säteilynä käyttäytyy väliaineessa kulkiessaan samalla tavalla kuin näkyvä valo. Valon taipuminen väliaineesta toiseen siirryttäessä riippuu niiden taitekertoimien suhteesta. Se voi taipua, taittua, sirota tai heijastua riippuen väliaineen optisista ominaisuuksista. Radioaaltojen vastaaviin ominaisuuksiin vaikuttaa ionosfäärin taitekerroin, joka määräytyy elektronitiheydestä. Korkeataajuisien radioaaltojen etenemisen vaikuttaa myös maanpinnan sähkönjohtavuus aallon etenemisreitillä ja neutraali-ilmakehän aaltoja häiritsevät ominaisuudet.

Perinteellisiä ionosondeja käytetään edelleen seuraamaan ionosfäärin tilaa avaruussään vaihteluissa. Suomessa tällainen laite on Sodankylän geofysiikan observatoriossa, jossa se on toiminut yhtäjaksoisesti vuodesta 1957 lähtien (Kuva 6.21.). Moderneimmissa laiteissa yhdistetään kaksi tutkaa luotaamaan samaa aluetta, jolloin Doppler-periaatteella

saadaan selville myös heijastuskohdassa tapahtuva hiukkasten liikenopeus. Eurooppalaisen yhteistyönä toimii *EISCAT*-järjestön (European Incoherent Scatter Organization) sirontatutkajärjestelmä, jossa on kolme vastaanottoantennia. Yksi niistä on Oulun yliopiston Sodankylän geofysiikan observatoriossa. Järjestelmä on ollut käytössä 1980-luvun alusta lähtien. *EISCAT*-tutkassa käytettävät taajuudet verrattuna perinteisiin ionosondeihin ovat satakertaisia. Tällöin suurin osa radiosignaalista läpäisee ionosfäärin, mutta pieni osa säteilytehosta siroaa takaisin. Palannut signaali on heikko, joten sen havaitsemiseen tarvitaan kookas antenni (Kuva 6.22).



Kuva 6.22. *EISCAT*-järjestelmään kuuluva ionosfääritutkan vastaanottoantenni Sodankylän geofysiikan observatoriossa. Peilin halkaisija on noin 30 m. Yhdessä kahden muun antennin (Tromssa ja Kiiruna) kanssa synkronissa saadaan elektronien kolmiulotteinen liike selville heijastuskohdassa monen muun ionosfäärin avaruussäätötilaa luonnehtivan fysikaalisen suuren lisäksi. (Kuva: *SGO*).

Laitekokonaisuus on teknisesti vaativa, mutta antaa tutkimuksen kohteena olevasta ionosfäärin alueesta aikaisempaa huomattavasti tarkempaa tietoa sekä ajallisesti että paikallisesti.

Ionosfäärin vapaiden ionien ja elektronien määrä vaihtelee voimakkaasti vuorokauden aikana. Maapallon päiväpuolella elektronitiheys on suurempi kuin yöaikana, jolloin Auringon säteilyn ionisaatiovaikutusta ei ole. Ero päivä- ja yöionosfäärin elektronitiheydessä on noin kymmenkertainen. Yöllä ionosfäärin alemmissa kerroksissa ionisaatio häviää, koska hiukkaset törmäävät riittävän usein ja ionit neutralisoituvat. Ylemmissä kerroksissa (kuten  $F$ ) hiukkasia on niin harvassa, että merkittävää ionisaatiota säilyy myös yön aikana. Ionosfäärin tila riippuu myös olennaisesti sekä Auringon lyhytaikaisesta aktiivisuudesta että auringonpilkkujakson vaiheesta. Kuvassa 6.21 on esitetty ionosfäärin elektronitiheyden vaihtelu auringonpilkkujakson aikana. Siitä nähdään, että elektronitiheys voi muuttua jopa nelinkertaiseksi pilkkumaksimissa verrattuna pilkkuminimin aikaan. Ionosfäärin elektronitiheyden vaihtelua Auringon säteilytoiminnan säätelemänä voidaan verrata neutraali-ilmakehän lämpötilaan. Kun elektroneja ja ioneja on enemmän, ionosfäärissä vallitseva avaruussää on kuumaa. Aurinkopilkkujakson aikana tapahtuvaa ionisaation hitaampaa vaihtelua vuodesta toiseen voidaan pitää avaruusilmaston muutoksena. Se ilmenee ionosfäärin ilmaston syklisenä vaihteluna 11-vuoden jaksoissa. Toisaalta uusimmat tutkimukset viittaavat siihen, että ionosfäärissä on käynnissä myös maapallon laajuinen hidas muutos, jonka tuloksena esimerkiksi  $F$ -kerros laskeutuu tietyillä alueilla hitaasti. Laskeuma on noin 4 km kymmenessä vuodessa pääteltyä Sodankylän kohta 50 vuotta kestäneistä havainnoista. Muutos voidaan tulkita siten, että ionosfääri jäähtyy ja tiivistyy. Eräs selitys tähän voisi olla käynnissä oleva kasvihuoneilmaston voimistuminen, johon liittyy ylimmän ilmakehän lämpötilan lasku kuten esimerkiksi stratosfäärissä on jo havaittu.

Ionosfäärin fysikaalista tilaa tutkitaan mm. radioaalto menetelmillä. Radioaaltoja (lyhyet, keskipitkät ja pitkät aallot) käytetään paljon kommunikaation välittäjänä paikasta toiseen ionosfäärin heijastusominaisuuksia hyödyntäen. Sopivissa heijastus ja taittumisolosuhteissa radioaallot kiertävät toiselle puolelle maapalloa mahdollistaen yhteydenpitoa kymmenientuhansien kilometrien etäisyydelle. Radioaaltojen käyttäytyminen ionosfäärin ollessa perustilassaan rauhallisen Auringon aikaan vuorokauden eri tunteina tunnetaan melko hyvin. Toisaalta ionosfäärin ollessa suurten avaruussämyrskyjen aiheuttamana häiriöisessä tilassa radioliikenne on vaikeuksissa ja yhteydenpito



etterin kautta voi katketa kokonaan pitkiksi ajoiksi. Toisaalta yllättävät paikalliset ionisaatiotihentymät voivat mahdollistaa radioteitse pidettävää yhteyttä alueille, joihin se avaruussään rauhallisina aikoina ei ole lainkaan mahdollista.

Pitkät ja keskipitkät radioaallot (2000 - 1000 m) etenevät maanpinnan ja ionosfäärin *D*- ja *E*-kerroksen välisessä 70-100 km korkeassa aaltoputkessa. Päivällä kauskantoiset yhteydet eivät ole mahdollisia *D*-kerroksen aiheuttaman vaimentumisen takia. Yöllä ei siellä ole radioaaltoja heijastavaa ionisaatiota, joten ne heijastuvat korkeammalta *E*- tai *F*-kerroksesta mahdollistaen yhteydenpidon ja radiokuuluvuuden päiväsaikaa huomattavasti kauemmas. Suomessa esimerkiksi kuuluvat Keski-Euroopan keskipitkät radiolähetykset vain iltaisin ja öisin. *ULA*-alueen lähetyksissä taajuudet ovat korkeimpia ja ne eivät (yleensä) heijastu ionosfääristä vaan läpäisevät sen kadoten avaruuteen. Kuuluvuus rajoittuu siten suunnilleen lähetysantennin näköhorisontin sisäpuolelle.

Yksittäiset purkaukset (esim. flare) Auringossa voi aiheuttaa ionisaation valtavaa kasvua lyhyessä ajassa. Flare-purkauksessa vapautuu suuria määriä ionisoivaa säteilyä aina röntgenalueelta lähtien. Purkauksen vapauttama sähkömagneettinen säteily saapuu maapallolle valon nopeudella eli noin 8 minuutissa. Purkaukseen liittyvä plasmahiukkaset saapuvat yleensä vähintään vuorokautta myöhemmin hiukkasten kiitäessä jopa nopeudella 1000 km/s. Tällaisen purkauksen yhteydessä syntyy myös lähes valon nopeudella kiitäviä protoneja, jotka saapuvat maapallolle noin neljänneksessä purkauksen alusta. Protonit aiheuttavat *PCA*:ksi (Polar Cap Absorption) kutsutun avaruussäähäiriön ionisoimalla voimakkaasti *D*-kerrosta koko napa-alueilla. Siitä aiheutuu kuuluvuuden täydellinen katoaminen lyhyiden ja keskipitkien radioaaltojen alueella. Heikompi häiriöilmiö on *SID* (Sudden Ionospheric Disturbances), joka aiheutuu Auringosta purskahtaneesta röntgen-säteilyryöpystä. Niiden ionisoiva vaikutus lisää *D*-kerroksen elektronitiheyttä Auringon valaisemalla alueella ja häiritsee radioliikennettä lyhyillä aaltoalueilla, mutta parantaa kuuluvuutta pitkien aaltojen osalta, kun yhteydenpitoa ylläpidetään mannertenvälisessä liikenteessä.

Auringosta lähtee radiosäteilyä gigahertsitaajuuksilla, jotka ovat samoja kuin mitä käytetään mm. matkapuhelimissa. Äärimmäisten voimakkaiden auringon aktiivisuuspurkauksien aikana (esim. loka/marraskuussa 2003) on huomattu, että matkapuhelmien tukiasemat kokevat haamusoittoja, jotka aiheutuvat gigahertsitasoisista solaarista radiopulsseista.

Maapallonlaajuinen paikannusjärjestelmä *GPS* (Global Positioning System) perustuu noin satelliittien (24 kpl noin 25 000 km korkeudella) lähettämien signaalien kuluaikoihin satelliitin ja *GPS*-vastaanottimen välillä. Signaalin kuluaikaan vaikuttavat monet tekijä, joista ionosfäärin osuus on tärkein. Satelliittisignaali taipuu kohdatessaan elektronitiheydeltään vaihtelevia kerroksia matkallaan maa-asemalle. Näin kuluaika myös muuttuu, mikä vaikuttaa paikannustarkkuuteen. Myös signaalin voimakkuus vaihtelee ionosfäärin häiriötilasta riippuen. Paikannusvirhe voi olla metreistä kymmeniin metreihin. Tästä ongelmasta päästään osittain eroon, kun paikanmäärittämiseen käytetään kahta eri taajuutta, joilla on erilaiset ionosfääriviiveet. Erotus kertoo kuinka paljon signaalien reitillä on ollut elektroneja ja tätä tietoa voidaan käyttää korjaamaan paikannustarkkuutta. Käyttämällä kaikkien 24 satelliittien signaaleja voidaan myös monitoroida ionosfäärin kokonaiselektronihyettä (*TOC*; Total Electron Content) eri paikoissa. Kokonaan virheestä ei päästä eroon, ei edes ns. differentiaalisessa paikannuksessakaan. Ainoa tapa vähentää virhetoimintoja on välttää kommunikointia pahojen avaruussäähäiriöiden aikana. Viime vuosina esimerkiksi "Bastilji"- ja "Halloween" -avaruussäähämyrskyn aikoina (14.7.2000 ja 29. - 30.10. 2003) tuottivat maapallonlaajuisesti *GPS*-signaaleihin häiriöitä ja paikannustiedon saaminen oli pahoin viivästynyt.