

RAPORTTEJA
RAPPORTER
REPORTS

No. 2004:4

AURINGON AKTIIVISUUS JA MAAPALLON
LÄMPÖTILAN VAIHTELUT 1856-2003

Heikki Nevanlinna

Ilmatieteen laitos
Meteorologiska institutet
Finnish Meteorological Institute

Helsinki 2004

ISBN 951-697-596-8
ISSN 0782-6079

Edita
Helsinki 2004
© Ilmatieteen laitos



ILMATIETEEN LAITOS

Julkaisun sarja, numero ja raporttikoodi
Raportteja No. 2004:4Julkaisija Ilmatieteen laitos, Vuorikatu 24
PL 503, 00101 Helsinki

Julkaisu-aika 24.8.2004

Tekijä(t) Heikki Nevanlinna

Projektin nimi

Toimeksiantaja

Nimeke Auringon aktiivisuus ja maapallon lämpötilavaihtelut 1856-2003

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan maapallon globaalilämpötilan vuosivaihteluja 1856-2003 (Hadley-keskuksen tietokannasta) ja niiden korrelaatioita Auringon aktiivisuuteen. Auringon aktiivisuusmittana käytetään auringonpilkkulukua (R), maapallon magneettikentän häiriöisyysindeksiä (aa) ja kosmisen säteilyn intensiteettiä. Satelliittimittaukset antavat aurinkovakion muutokselle pilkkuminimistä pilkkumaksimiin noin 1 W/m^2 kasvun, mikä ei aiheuta merkittävää lämpötilan muutosta maapallolla. Vuodesta toiseen tapahtuvassa lämpötilan muutoksessa on erittäin vähän Auringon aktiivisuuden vaikutukseen viittaavaa korrelaatiota. Jos lämpötila-arvot ja aktiivisuusluvut tasoitetaan auringonpilkkujakson kestolla (11 v), korrelaatio paranee huomattavasti koko tarkastelukauden osalta. Toisaalta, jos tarkastelukausi (1856-2003) jaetaan eri osiin, niin korrelaatio vaihtelee suuresti osasta toiseen. Suurin positiivinen korrelaatio Auringon aktiivisuuden ja lämpötilan kasvun kanssa sattuu aikavälille (noin) 1925-1970. Korrelaatio kääntyy negatiiviseksi 1980-luvulla. Kaikki korrelaatiot ovat korkeampia käytettäessä Auringon aktiivisuusmittana geomagneettisen kentän häiriöindeksiä aa. Tilastollinen tarkastelu ei luonnollisesti todista korrelaatioiden fysikaalisesta syy-seuraussuhteesta mitään. Jos aikavälillä (noin) 1925-1970 vallitseva positiivinen korrelaatio Auringon aktiivisuuden ja lämpötilan kasvun välillä tulkitaan Auringon todelliseksi vaikutukseksi, niin 1970-luvulta lähtien selitys ei enää päde, koska globaalilämpötila kasvaa, mutta Auringon aktiivisuus, useilla toisistaan riippumattomilla indekseillä mitattuna, pienenee. Auringon irradianssin muutokset selittävät 1900-luvun alkukymmeninä tapahtuneesta lämpötilan kohoamisesta noin 10 %, mutta ei lainkaan vuoden 1970 jälkeistä kasvua. Muut ilmakehän lämpötilaan vaikuttavat tekijät (mm. kasvihuoneilmaston voimistuminen) dominoivat lämpötilan kasvua 1970-luvulta eteenpäin. Tulivuoripurkaukset näkyvät globaalilämpötilassa muutamien vuosien mittaisina lämpötilan laskuina. Maapallon lämpötilan hitaissa sekulaarisissa muutoksissa (>> 11 v) Auringon säteilymuutoksilla on todennäköisesti merkittävä osuus (20 - 60 %).

Svensmarkin (2000) ja muiden tanskalaistutkijoiden esittämä hypoteesi siitä, että kasvihuoneilmaston voimistuminen aiheuttama lämpötilan kasvu selittyisi Auringon aktiivisuudella ja sen vaikutuksesta lisääntyneellä pilvisyydellä, on osoittautumassa epäuskottavaksi. Samansuuntaisia vaikutusmekanismeja Auringon aktiivisuuden ja sääilmiöiden välille esitettiin jo 1950-luvulla, mutta vailla tilastollista varmuutta ja toimivaa fysikaalista selitysmekanismia kiinnostus aihepiiriin laantui 1970-luvulla noustakseen uuteen kasvuun parikymmentä vuotta myöhemmin.

Julkaisijayksikkö

Tutkimus ja kehitys/Avaruus ja yläilmakehä

Luokitus (UDK) 5231.31, 551.524, 523.98, 523.9
551.525Asiasanat Auringon aktiivisuus,
maapallo, ilmakehä, lämpötila

ISSN ja avainnimeke 0782-6079 Raportteja - Ilmatieteen laitos

ISBN 951-697-596-8

Kieli Suomi

Myynti

Ilmatieteen laitos / Kirjasto
PL 503, 00101 Helsinki

Sivumäärä 47

Lisätietoja

Hinta 10 eur

Sisällysluettelo

		Sivu
	Tiivistelmä	3
1	Johdanto	5
	1.1 Mihin suuntaan lämpötila kehittyy?	6
	1.2 Auringon aktiivisuuden vaikutus ilmakehässä	8
	1.3 Tutkimuksen tavoite	12
2	Auringonpilkkuluvut	13
3	Avaruussään magneettinen häiriöindeksi aa	16
4	Globaalilämpötila ja auringonpilkut	17
5	Globaalilämpötila ja magneettinen häiriöindeksi aa	19
6	Globaalilämpötilan kasvu, hiilidioksidi ja tulivuoritoiminta	20
7	Muita korrelaatioita: NAO ja SOI	23
8	Auringon irradianssin muutokset ja maapallon lämpötila	24
9	Auringon magneettivuo ja sen geofektiivisyys	28
10	Kuinka paljon Auringon aktiivisuus vaikuttaa sääilmiöihin?	32
11	Johtopäätöksiä	39
12	Viittauksia	41

1. Johdanto

Maapallon ilmakehän keskilämpötila maanpinnan läheisyydessä (1.5 m) kasvoi 1900-luvulla noin 0.6 ± 0.2 °C (Jones et al., 1999; IPCC, 2001). Kasvu tapahtui kahdessa "aallossa" siten, että ensimmäinen nousuvaihe kesti vuodet (noin) 1910-1940 ja jälkimmäinen vuodesta (noin) 1970 eteenpäin. Näiden väliin jäi noin 30 vuoden mittainen kausi, jolloin maapallon lämpötila hieman laski.

Samaan aikaan maapallon antropogeenistä alkuperää oleva hiilidioksidipitoisuus kasvoi noin 20 % ja muut ihmiskunnan tuottamat kasvihuonekaasut vielä enemmän. Ilman sameus on ainakin paikallisesti kasvanut teollisuuden aerosolipäästöistä johtuen. Lisäksi viime vuosisadalla maapallon ilmakehään purkautui tulivuorista tuhkaa ja muuta vulkaanista alkuperää olevaa ainesta. Suuria tulivuorten purkauksia, joiden vaikutukset havaittiin maailmanlaajuisesti, tapahtui ainakin viisi kertaa. Auringon säteilyvaikutuksissa on ollut myös vaihtelua, sekä sähkömagneettisen säteilyn että hiukkasemissioiden kautta, jotka vaikuttavat ilmakehän lämpötalouteen joko suoraan tai välillisten mekanismien kautta. Auringon aktiivisuuden taso 1900-luvun puolivälin jälkeen on ollut korkein noin tuhanteen vuoteen (Usoskin & Mursula, 2003). Ilmakehän ja valtamerien välillä on vuorovaikutusmekanismeja, joiden tuloksena ilmastolliset olot heilahtelevat voimakkaasti pääosin ulkoisista pakotteista riippumatta. Eräs tällainen ilmiö on ENSO (esim. Karttunen et al., 1998; Rinne et al., 1998).

Mikä on ihmisen toiminnan osuus maapallon lämpötilan kasvussa ja kasvihuoneilmiön vahvistumisessa ja mikä taas luonnollisten tekijöiden (Auringon aktiivisuus, tulivuoret jne.) aiheuttamaa, on ollut vilkkaan keskustelun kohteena jo vuosikymmeniä. Enemmistö alan tutkijoista pitää ihmiskunnan vaikutusta suurempana ja kasvavana. Samalle kannalle on päätynyt Kansainvälinen hallitusten välinen ilmastopaneeli (IPCC, 2001), jonka mukaan antropogeeninen "sormenjälki" näkyy maapallon ilmaston muutoksessa. Yleinen käsitys on että 1900-luvulla tapahtuneista lämpötilan kasvuvaiheista ensimmäinen vuosisadan alkupuolella tapahtunut muutos on enimmäkseen luonnollisten tekijöiden aiheuttama, mutta vuosisadan lopulla tapahtunut toinen vaihe on pääosin ihmisen aiheuttaman kasvihuoneilmiön voimistumisesta johtuva lämpötilan kasvua (esim. IPCC, 2001; Stott et al., 2003).

1.1 Mihin suuntaan lämpötila kehittyy?

Tietävästi ensimmäisen kerran globaaliin lämpötilan nousuun kiinnitettiin huomiota 1930-luvulla. Amerikkalainen tutkija G. Callendar esitti vuonna 1938 lämpötilamittausten analyysin, jonka mukaan aikavälillä 1890-1935 maapallon lämpötila on noussut noin 0.5 °C. Siihen aikaan ilmastotutkijat olivat yleisesti sitä mieltä, että kyseessä on vain ilmaston luonnollinen vaihtelu ja lämpötilan kasvu kääntyy ennemmin tai myöhemmin laskuun. Callendar selitti lämpötilan nousun S. Arrheniuksen vuonna 1896 esittämän teoriolla, missä fossiilisten polttoaineiden tuottamat hiilidioksidipäästöt voimistavat ilmakehän kasvihuoneilmiötä ja aiheuttavat siten lämpötilan nousun ilmakehässä (Arrhenius, 1896; Callendar, 1938). Kiinnostus lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden välisistä yhteyksistä laimeni, koska maapallon lämpötila kääntyi laskuun 1940-luvulla. 1900-luvun alkukymmeninä monet tutkijat kuitenkin vahvistivat Callendarin tuloksen maapallon lämpenemisestä. Lisäksi havaittiin arktisten alueiden jäiden ohentumista. Syyksi arveltiin hiilidioksidin määrän kasvu ja Auringon säteilyn vaihtelu. Toisaalta eräät tutkijat asettivat havaitun lämpötilanousu kokonaan kyseenalaiseksi ja johtuvan pääasiassa niin sanotusta "kaupunkiefektistä" tai "lämpösaarekkeesta", argumentti, jota vieläkin ilmastoskeptikot käyttävät, vaikka lämpötilasarjoista tällaiset epähomogeenisuudet on luotettavasti poistettavissa (Heino, 1994; IPCC, 2001) ja lämpötilan nousua havaittiin myös asemilla kaukana asutuskeskuksien ulkopuolella.

Maapallon lämpötilan viileneminen 1940-1960-luvuilla askarrutti tutkijoita: miksi kasvava hiilidioksidipitoisuus ei näy ilmakehän lämpötilassa? Hiilidioksidipitoisuuksia alettiin systemaattisesti ja luotettavasti mitata 1950-luvulla (Keeling, 1960). Lämpötilan laskun arveltiin johtuvan lisääntyneestä aerosolipitoisuudesta tulivuorien purkauskaasuista, Auringon aktiivisuudesta tai ilmakehän luonnollisista jaksollisista vaihteluista (Mitchell, 1961). USA:n kansallisen tiedeakatemian asettama tutkimusryhmä päätteli, että maapallon viileneminen aiheutuu Milankovichin jaksollisuuksiksi nimitetyistä muutoksista maapallon kiertoradan muodossa ja pyörimisakselin kallistuskulmassa (Eronen, 1991; Paillard, 2001; Koivisto, 2004). Teorian mukaan astronominen ilmastomuutos kompensoi ihmiskunnan aiheuttamista hiilidioksidipääs-

töistä aiheutuvan ilmaston lämpenemisen (Mitchell, 1972). Nykyinen käsitys kuitenkin korostaa sitä, että astronomiset tekijät vaikuttavat tuhansien vuosien aikajänteellä, kun taas antropogeenisten tekijöiden aiheuttama ilmastonmuutos näkyy jo muutaman kymmenen vuoden aikavälillä.

Japanin ilmatieteellinen laitos lähetti kyselyn maailman ilmatieteellisiin laitoksiin vuonna 1973. Siinä tiedusteltiin alan asiantuntijoiden mielipidettä siitä, mihin suuntaan ilmaston kehitys on menossa. Enemmistö oli ilmaston hitaan kylmenemisen kannalla (Lamb, 1977), vaikkakin maapallon tietyissä osissa ilmaston kehitys oli päinvastainen kuin joillain muilla alueilla.

1980-luvun alussa oli varmistunut, että maapallon lämpötila on noussut noin 0.2 °C sitten vuoden 1960 (Jones, 1986). Silloin jo ennustettiin, että vuoteen 2000 mennessä maapallon ilmakehässä havaitaan voimakas kasvihuoneilmiön vahvistuminen. Sen esilletuloa on hidastanut Auringon aktiivisuuden vaikutukset, tulivuorista aiheutuneet aerosolipulssit ja teollisuuden päästöistä johtuva ilman sameutuminen.

IPCC:n raportin mukaan maapallon pintalämpö maa- ja merialueilla on noussut 1900-luvun alusta lähtien noin 0.6 °C (IPCC, 2001; kts. myös Jones et al., 1999). Viime vuosikymmenien aikana erityisesti vuorokauden ääriämpötilat ovat kaventuneet, mikä sopii kasvihuoneilmiön voimistumisesta aiheutuvaan lämpötilamuutokseen. Stratosfäärin havaittu kylmeneminen on myös sopusoinnussa kasvihuoneteorian kanssa (IPCC, 2001). Suorien lämpötilahavaintojen lisäksi tutkijat ovat koonneet ja huolellisesti analysoineet monia proksiaineistoja (mm. puiden vuosilustojen kasvuvaihtelut), joiden avulla on voitu rekonstruoida maapallon lämpötilakehitys noin 1000 vuoden ajalta (Mann et al., 1998; Crowley, 2000). Näiden analyysien mukaan 1900-luku oli lämpimin vuosisata 1000 vuoteen ja 1990-luku saman ajanjakson lämpimin vuosikymmen pohjoisella pallonpuoliskolla.

1.2 Auringon aktiivisuuden vaikutus ilmakehässä

Etsittäessä yhteyksiä Auringon aktiivisuuden ja maapallon ilmastollisten olojen välille perinteinen lähestymistapa on ollut verrata jotain Auringon aktiivisuusparametria (yleensä auringonpilkkulukua) tiettyyn ilmastolliseen muuttujaan tietyllä aikavälillä. Kyseessä on siis puhdas tilastollinen analyysi, missä ilmakehän fysiikka sivuutetaan tyystin. Implisiittisenä oletuksena on, että mitä korkeampi auringonpilkkuluku, sitä suuremmat ovat sen vaikutukset maapallon keskilämpötilaan. Tilastollinen lähtökohta on tietysti äärimmäisen rajoitettu, koska se supistaa ilmastonmuutoksen ainoaksi syyksi Auringon aktiivisuuden unohtaen kaikki muut fysikaaliset tekijät, jotka ovat vaikuttamassa lämpötilan vaihteluihin. Auringonpilkkuluvun riippuvuutta esim. Auringon säteilyintensiteetista ei tilastollisessa tarkastelussa hyödynnetä yleensä lainkaan (esim. asettamalla joitain reunaehtoja sille kuinka suuret lämpötilan muutokset ovat ylipäättään mahdollista selittää Auringon säteilymuutoksilla muutaman kymmenen vuoden aikaskaalassa).

Auringon pilkkujen lukumäärän säännöllisen vaihtelun liittäminen maapallon säähän ja ilmastoon ulottuu ajallisesti paljon kauemmaksi kuin viime vuosikymmeninä tehdyt tutkimukset Auringon aktiivisuuden vaikutuksista ilmastoon. Tietävästi ensimmäinen tällainen tutkimus on vuodelta 1801. Sen teki kuuluisa englantilainen tähtitieteilijä ja planeetta Uranuksen löytäjä W. Herschel (1738-1822). Hän piti Aurinkoa muuttuvana tähtenä, jonka muuttuvaisuuden merkkinä on auringonpilkkujen vaihteleva määrä. Kaikki mikä Auringossa muuttuu, vaikuttaa myös maapallon oloihin, erityisesti säähän ja ilmastoon, ajateltiin (Herschel, 1801). Tämän ajattelutavan mukaan myös Ilmatieteen laitoksen ensimmäinen johtaja J.J. Nervander (1805-1848) teki tutkimuksiaan Auringon vaikutuksista maapallon lämpötilaoloihin. Tutkimalla Pariisin ja Innsbruckin observatorioiden pitkiä havaintosarjoja, hän havaitsi lämpötilassa 27 vuorokauden jaksollisuuden, jonka Nervander tulkitsi Auringon pyörähdysaikaan (27.26 vrk) liittyväksi häiriöksi maapallon lämpötilassa (Simojoki, 1978). Alan tiedemiespiireissä tulos otettiin vastaan innostuneesti, koska sen uskottiin todistavan tieteelle uudenlaisesta yhteydestä Auringon ja ilmakehän muutosten välillä.

Auringonpilkkujen esiintymisen 11-vuotisen jaksollisuuden löytyminen 1840-luvulla herätti suurta huomiota. Pian havaittiin, että revontulien esiintymistiheyden vuodesta toiseen tapahtuvat muutokset ja maapallon magneettikentän nopeat muutokset, magneettiset myrskyt, liittyvät myös auringonpilkkujen 11-vuotiseen rytmiiikkaan. Koska revontulien ja magneettisten myrskyjen katsottiin ilmentävän muutoksia ilmakehässä, oli luonnollista etsiä jaksollisuuksia myös ilmakehän muista parametreista kuten lämpötilasta ja sademääristä jne. 1800-luvun jälkimmäiseen puoliskoon tultaessa tällaisia riippuvaisuussuhteita oli erilaisista tilastoista saatu paljon. Kuuluisin 1800-luvun auringonpilkkujen ja ilmastomuutosten välisten yhteyksien tutkija oli W. Köppen (1846-1940), joka tunnetaan paremmin maapallon ilmastovyöhykkeiden luokitteluisaan. Hänen mukaansa lämpötilan pitkät havaintosarjat eri puolilta maapalloa osoittavat, että auringonpilkkujen 11-vuotisessa jaksollisuudessa lämpötila on alhaisin pilkkumaksimien aikaan ja korkein pilkkuminimissä lämpötila-amplitudin ollessa noin 0.2 °C (Köppen, 1873). Tulosta pidettiin aivan kiistattomana osoituksena Auringon jaksollisten toimintojen vaikutuksesta maapallon ilmastoon. Se mainitaan (eräiden muiden vastaavien havaintojen (mm. ukkosfrekvenssi) ohella) 1800-luvun lopun ja 1900-luvun alun meteorologian oppikirjoissa (esim. Hann, 1915; kts. myös Melander, 1931; Angervo, 1948). Vanhoissa oppikirjoissa ja julkaisuissa esiintyy tämän tutkimusaiheen yhteydessä jopa käsite "Köppenin laki", jolla tarkoitettiin auringonpilkkujen 11-vuotisessa esiintymisessä maapallon lämpötilan minimin ja auringonpilkkujen maksimin yhteyttä ikäänkuin varmana tosiasiana. Suomalainen meteorologian tutkija O. V. Johansson (1878-1956) julkaisi laajan tutkimuksen lämpötilan auringonpilkkujakson mukaisista vaihteluista ja selityksiä siihen, miksi lämpötilan minimi on hieman yllättäen Auringon säteilymaksimien aikana (Johansson, 1905). Selityksenä oli, että pilkkumaksimien aikana sateisuus kasvaa, mikä taas laskee lämpötilaa. Jos saman analyysin tekee nykyaikaisesta aineistosta (esim. Kuvan 2 mukaisesta globaalilämpötilan vaihteluista 1856-2003), niin tulokseksi saa, etteivät auringonpilkkujen maksimivuotien lämpötilat poikkea tilastollisesti merkittävästi minimivuotien lämpötilasta.

1800- ja 1900-luvun alkupuolella katsottiin yleisesti, että Auringon aktiivisuuden vaihtelut, lähinnä auringonpilkkujen esiintymisen 11-vuotisen jaksollisuuden kautta, näkyy tietyissä ilmastoparametreissa, mutta vain suhteellisen heikosti. Tosin tilastolliset tulokset Auringon vaikutuksista olivat ristiriitaisia ja saadut korrelaatiot eivät ol-

leet pysyviä, kun aikasarjaa jatkettiin pitemmille aikaväleille. Osittain tämä johtuu epähomogeenisistä havaintosarjoista, mutta enemmän siitä, että tutkimuskohteiksi valituilla ilmastollisilla suureilla ei ole fysikaalista syy-yhteyttä Auringon aktiivisuuden kanssa. Syytä Auringon aktiivisuuden vaikutuksiin haettiin tavallisesti aurinkovakion muutoksista. Varmuutta ei asiaan saatu, koska maan pinnalta tehdyt Auringon säteilymittaukset olivat erittäin epätarkkoja määritettäessä aurinkovakion arvoa ilmakehän ulkorajalle (mm. Kondratyev & Nikolsky, 1970). Tulokset antoivat jopa 15 % vaihtelun aurinkovakiolle auringonpilkkujakson aikana (Nevanlinna, 1974), mikä on yli satakertainen nykyään oikeana pidettävälle arvolle.

Luotettavaa tietoa aurinkovakion muutoksista on saatu satelliittimittauksista 1970-luvun lopulta lähtien. Mittausten perusteella tiedetään, ettei aurinkovakio ole muuttunut vajaan kolmen auringonpilkkujakson aikana kuin alle promillen pilkkumini- mistä pilkkumaksimiin. Auringon välittömät energiavaihtelut (aikaskaalassa päivistä muutama vuoteen), joilla voisi olla merkitystä maapallon ilmakehän dynamiikkaan, ovat vähäisiä. Väitettyjen Auringon aktiivisuuden ja sääilmiöiden välisten korrelaatioiden selittämiseksi onkin keksitty suuri joukko erilaisia epäsuoria mekanismeja (kts. Kuva 14). Tällaisia ovat muun muassa kosmisen säteilyn vaikutus maapallon pilvisyyden vaihteluun, joka kontrolloisi lämpötilaa maapallolla (esim. Friis-Christensen & Lassen, 1991; Thjell & Lassen, 2000; Svensmark, 2000; Marsh & Svensmark, 2003), mutta nämä vaikutusmekanismit ovat vailla sitovaa empiiristä ja teoreettista vahvistusta. Lisäksi samoista aineistoista on voitu tehdä aivan vastakkaisia tulkintoja (esim. Kernthaler et al., 1999; Wagner et al., 2001, myös Nevanlinna, 2001b, 2002). Ei ole siten vaikea yhtyä IPCC:n loppuyhteenvetoon kosmisen säteilyn vaikutuksista pilvien muodostumiseen: "... *At present there is insufficient evidence to confirm that cloud cover responds to solar variability. ...*" (IPCC, 2001).

Auringon osuus viimeisen 150 vuoden aikana tapahtuneessa lämpötilan nousussa vaihtelee eri tutkijoiden mukaan 10 - 30 % siten, että sen osuus on suurempi viime vuosisadan alkupuolella, mutta loppuvuosikymmeninä antropogeeniset syyt dominoivat ja Auringon vaikutus on pienenevässä (Lean, 2001; Solanki & Krivova, 2003).

1800-luvulla Auringon aktiivisuuden vaikutusten tutkimus ilmakehän ilmiöihin otti tutkimusmenetelmät tähtitieteestä ja taivaanmekaniikasta, jotka olivat hallitsevia luonnontieteitä 1800-luvun alkukymmeninä. Havaitsevassa tähtitieteessä ja planeettojen liikkeiden tutkimuksessa eräs valtametodi oli jaksollisten muutoksien tutkiminen. Katsottiin, että havainnoista jaksollisten muutosten löytyminen on merkki uudesta ilmiöstä avaruudessa. Tästä saatiinkin loistava tulos, kun planeetta Neptunus löydettiin ratalaskujen ennustamasta paikasta vuonna 1846 (Heiskanen, 1948). Samaa menetelmää sovellettiin myös meteorologiaan ja Auringon vaikutuksien tutkimukseen: eristämällä havaintosarjoista harmonisen analyysin avulla (Fourier-kertoimien laskeminen sini- ja kosiniaalloille, kts. esim. Chapman & Bartels, 1940) eripituisia jaksoja uskottiin niiden säännönmukaisuuden ja pysyvyyden todistavan uusien ilmiöiden olemassaolosta ilmakehän liikkeissä ja ominaisuuksissa. Lähestymistapa oli siis täysin tilastollinen.

Samanlaisten jaksollisuuksien löytyminen eri aikasarjoista voi tietysti merkitä sitä, että kyseiset havaintosarjat kuvaavat saman jaksollisen ilmiön vaikutuksia. Korrelaatioiden olemassaolo tarjoaa lähtökohdan ilmiöiden syvällisempään fysikaaliseen tarkasteluun ja syy-seuraussuhteiden analyysiin, mihin 1800-luvun vasta alkuaikasteella olleella meteorologisella tietämyksellä ei kuitenkaan ollut juuri mahdollisuuksia.

1800-luvun tähtitieteen mukaan tärkein avaruudessa vaikuttava kaukovoima on Newtonin gravitaatiovoima, joka vaikuttaa planeettojen liikkeisiin. Auringonpilkkuja pidettiin tuohon aikaan pilvien kaltaisina muodostelmina Auringon "ilmakehässä". Niiden säännöllisiä liikkeitä sääteli planeettojen vetovoima. Tärkein tällainen gravitaatiovaikuttaja on Jupiter, planeetoista suurin. Lisäuskottavuutta saatiin siitä, että Jupiterin kiertoaika Auringon ympäri on lähes sama kuin auringonpilkkujen keskimääräinen esiintymisjakso 11.8 vuotta (esim. Heiskanen, 1948; Johnson, 1950; Gribbin & Plagemann, 1977). (Tosin auringonpilkkujakson pituus on lyhentymässä ja se on nyt 11.0 vuotta viimeisen 400 vuoden keskiarvona, kts. Mursula & Ulich, 1998). Auringonpilkkujen syntymekanismi Auringossa vaikuttavien sisäsyntyisten magneto-hydrodynaamisten prosessien tuloksena on ymmärretty jo 1950-luvulta lähtien varsin hyvin (esim. Schrijver & Zwaan, 2000; Ossendrijver, 2003). Kuitenkin ilmastonmuutoskysymyksiä harrastavien maallikkojen keskuudessa ja niin sanottujen ilmasto-

skeptikkojen piirissä elää sitkeänä täysin epäfysikaalinen käsitys Jupiterin osuudesta auringonpilkkuja säätelevänä tekijänä. Aihe on ollut esillä myös Ilmatieteen laitoksella, missä meteorologi V. Laulaja (1916-1995) tutki 1960- ja 1970-luvuilla Kuun ja muiden taivaankappaleiden gravitaatiovoimien jaksollisuuksien vaikutuksia maapallon ilmakehän matalapainejärjestelmien liikkeisiin (Laulaja, 1971, 1972). Tällainen 1800-luvun newtoniaanisen taivaanmekaniikan leimaaman ajattelutavan korostaminen kaikissa geofysikaalisissa prosesseissa ja jaksollisten ilmiöiden painottaminen tuntuu hieman rajoittuneelta nykytietämyksen valossa, kun todennäköisempiäkin ja fysikaalisesti paremmin ymmärrettyjä vaikuttavia tekijöitä on olemassa runsaasti.

1.3 Tutkimuksen tavoite

Tässä kirjoituksessa tarkastelen eräitä Auringon aktiivisuusilmiöitä ja niiden tilastollisia korrelaatioita maapallon globaalilämpötilan vaihteluihin aikavälillä 1856-2003, jolloin luotettavia mittarilukemia lämpötilasta on tarjolla maapallon laajuisesti.

Olen käyttänyt maapallon lämpötilatietoja (vuosikeskiarvoja) ajalta 1856-2003. Ne perustuvat Hadley-keskuksen keräämiin lämpötilatietoihin ja jotka ovat pääasiassa myös IPCC:n lämpötilatietojen lähteenä (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>). Niitä on pidettävä luotettavimpina mahdollisina pintalämpötiladatoina mitä tällaisiin tutkimuksiin on tarjolla (kts. esim. Jones et al., 1999; Parker et al., 2004). Lämpötilatiedot antavat vuotuisen lämpötila-anomalian (ΔT) kummallekin pallonpuoliskolle normaalikauden 1961-1990 suhteen. Lisäksi olen käyttänyt myös lämpötilan rekonstruktioita aikavälille 1000-1980 (mm. Crowley, 2000).

Auringon aktiivisuuden mittana on käytetty muun muassa auringonpilkkulukua (R) SIDC:n (Solar Index Data Center) tietokannoista (<http://sidc.oma.be/index.php3>) sekä aa-indeksiä (vuodet 1868-2004: BGS, Edinburgh; <http://www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/aaindex.html>, vuodet 1844-1867 kts. Nevanlinna, 2004). Auringon kokonaisuusäteilydatat ovat peräisin NOAA/NGDC:n internet-sivuilta (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_IRRADIANCE).

Erinomainen tietolähde tutkimuksen aihepiiriin on IPCC:n raportti ja siinä erityisesti luvut 2 (Observed climate variability and change), 6 (Radiative forcing of climate change) ja 12 (Detection of climate change and attribution of causes) (IPCC, 2001; www.ipcc.ch). Hyvä lähde on myös www-artikkeli (<http://www.aip.org/history/climate/>), jonka on julkaissut American Institute of Physics. Se on myös ilmestynyt lyhennettynä kirjana (Weart, 2003).

Tutkimuksen metodiikka on pääasiassa tilastollinen, joten saadut tulokset ja niiden tulkinta, fysikaalisten reunaehtojen ollessa hyvin vajavaisia, ovat juuri niin rajallisia kuin johdannon alussa todettiin.

2. Auringonpilkkuluvut

Auringonpilkut ovat Auringon pinnalla havaittavia tummia läiskiä, joiden läpimitta vaihtelee tyypillisesti 3000 km ja 100 000 km välillä ja elinikä muutamasta päivästä kuukausiin. Suuret pilkut elävät pitempään. Fysikaalisesti auringonpilkku on Auringon magneettikentän tiivistymä, missä magneettiset kenttäviivakimput nousevat Auringon pinnasta. Magneettivuon tiheys pilkuissa on yleensä 3 - 4 kG (= 0.3 - 0.4 T) eli lähes 10 000 kertaa voimakkaampi kuin maapallon magneettikenttä ($\approx 50 \mu\text{T}$). Auringon pintamateriaalin konvektioliike on voimakkaan magneettikentän vuoksi estynyt, joten pilkun kohdalla plasma jäähtyy noin 1000 °C ympäristöönsä alempaan lämpötilaan. Lämpötilakonstrastista johtuen pilkkualue näyttää visuaalisesti tummalta. Pilkut syntyvät Auringon aktiivisille alueille, joissa tapahtuu äkillisiä hiukkaspurkauksia (esim. flaret) magneettikentän rekonnektioissa (Solanki, 2003). Aktiivisen alueen hiukkasemissiot ja muu säteily välittävät Auringon aktiivisuuden maapallon lähiavaruuteen aiheuttaen siellä erilaisia häiriöitä ja geomagneettisia myrskyjä. Pilkut itsessään eivät tuota hiukkaspurkauksia. Ne vähentävät Auringon sähkömagneettista kokonaissäteilyä.

Ajallisesti pisin Auringon aktiivisuusmitta on auringonpilkkuluku (R), josta on saatavissa suoria havaintoja 1600-luvun alusta lähtien. Pilkkuluku on tietyllä tavalla normitettu suure, joka on verrannollinen visuaalisesti havaittujen auringonpilkkujen lukumäärään. Auringonpilkkulukua objektiivisempi indeksi on niin sanottu F10.7-

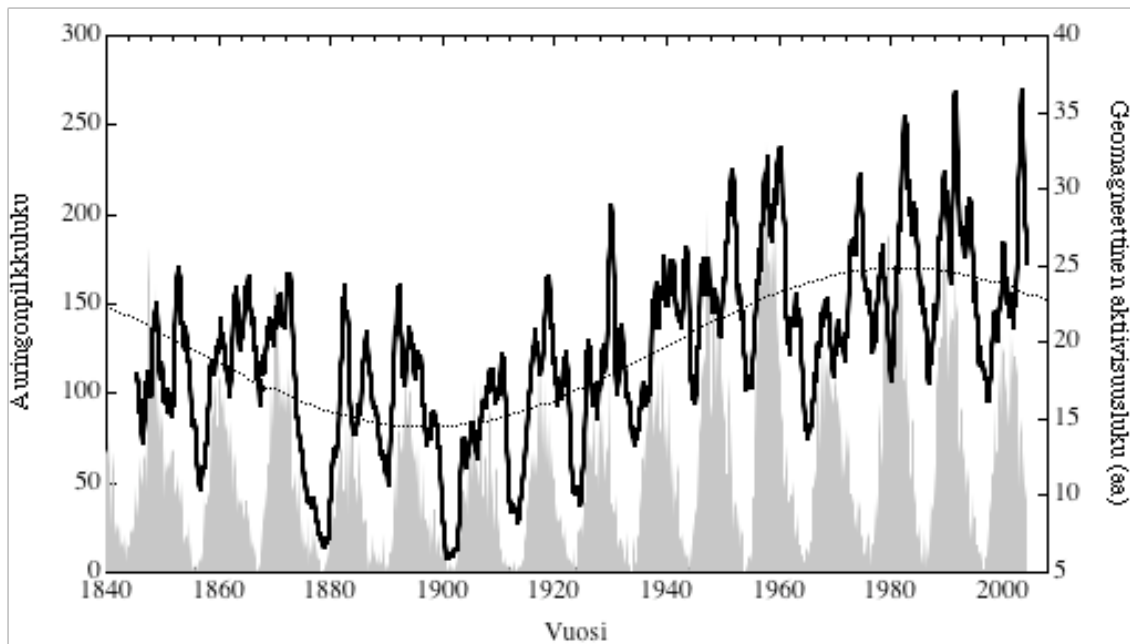
luku, joka mittaa Auringon emittoiman radiosäteilyn intensiteettiä 10.7 cm aallonpituudella. Näitä lukuja on saatavilla vuodesta 1947 lähtien. Auringonpilkkuluku ja F10.7 korreloivat erittäin hyvin keskenään, kun $R < 30$ (esim. Murdin, 2001).

Vanhin pilkkusarja on peräisin 1800-luvulta, jolloin Rudolf Wolf (1816-1893) kokosi pilkkutiedot eri lähteistä ja määritteli ns. auringonpilkkuluvun pilkkujen kaukoputkihavainnoista, joita tehtiin systemaattisesti vuodesta 1848 eteenpäin (Waldmeier, 1960; McKinnon, 1987). Wolf rekonstruoi pilkkuluvut 1700-luvun alkuun käyttäen eri lähteitä, mutta myös interpoloimalla puuttuvia aikavälejä saadakseen mahdollisimman yhtenäisen havaintosarjan. Wolfin pilkkusarjan kriittinen evaluaatio on todennut, että pilkkuluvut ovat tarkkuudeltaan erittäin epäluotettavia vuosilta 1700-1748, melko epäluotettavia 1749-1817, kohtalaisia 1818-1848 ja luotettavia sen jälkeen. Pilkkuluvut ennen vuotta 1700 on rekonstruoinut Eddy (1980).

Wolfin luvuista käytetään myös nimitystä Zürichin pilkkuluku (Rz), koska pilkkuhavainnot koottiin Zürichin observatoriossa aina vuoteen 1980 saakka. Nykyään pilkkuluvusta käytetään nimitystä Kansainvälinen auringonpilkkuluku (RI), joka lasketaan Brysselissä sijaitsevassa aurinkoindexien keskuksessa (SIDC; [http://sidc.oma.be /index.php3](http://sidc.oma.be/index.php3)). Yhä enemmän Wolfin lukujen sijasta käytetään niin sanottua ryhmäauringonpilkkulukua (Group Sunspot Number; Rg), joka on alkuperäisdatoista tehty revisioitu versio Wolfin luvuista (Hoyt & Schatten, 1998). Rg antaa Wolfin luvuista melko paljon poikkeavia arvoja ajanjaksolle 1700-1850, mutta niitä pidetään luotettavimpina. Lisäksi Rg tarkoittaa Maunderin minimin (n. 1645-1710) ja sitä edeltävän kauden aikaista Auringon aktiivisuusvaihtelua, mistä Wolfin lukuja ei ole lainkaan käytettävissä.

Auringonpilkkulukuihin perustuvissa tutkimuksissa näkee usein käytettävän pilkkulukuja, jotka perustuvat amerikkalaisen tutkijan D.J. Schoven (1955) tutkimuksiin. Hänen pilkkulukusarjansa alkaa vuodesta 649 e.Kr. ja päättyy vuoteen 2000. Sarjan Wolfin lukujen ekstrapolaatio ajassa taaksepäin ja eteenpäin (noin vuodesta 1955) perustuu lähinnä auringonpilkkujakson tilastolliseen kestoan ja antaa siten täysin epäluotettavia pilkkulukuja havaintojakson ulkopuolelle.

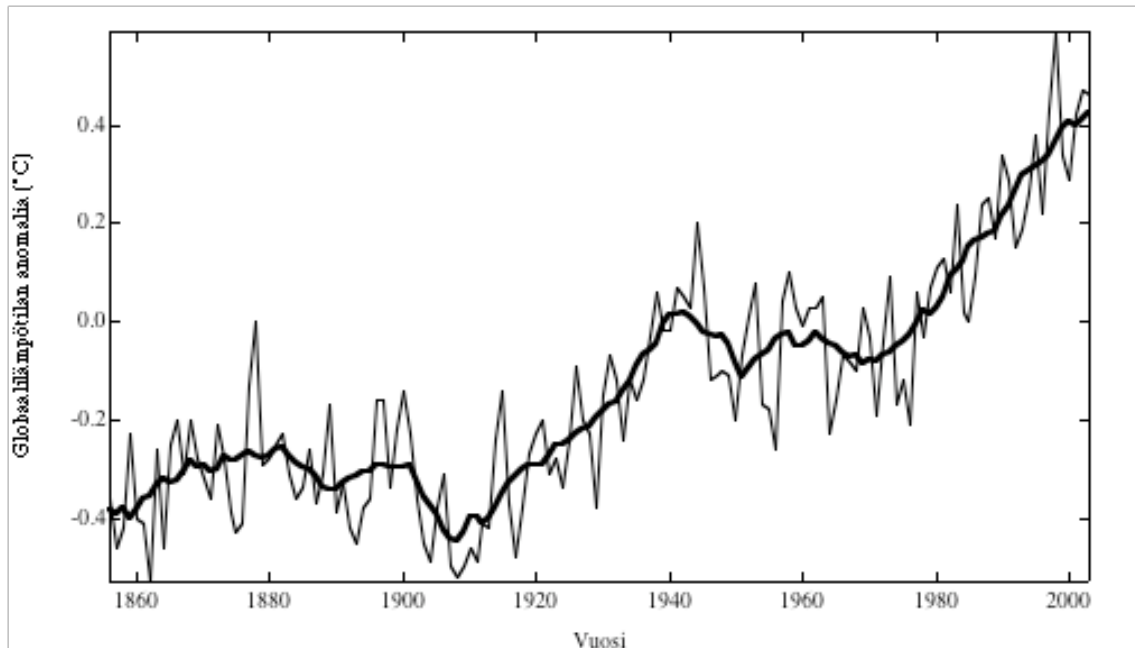
Auringonpilkkuluvut (R, Rz, RI, Rg) ovat itse asiassa varsin huonoja ja epätarkkoja Auringon aktiivisuuden mittoja. Auringon aktiivisuus (hiukkasemissiot yms.) on varsin erilainen pilkkujen nousukaudella verrattuna laskukauteen. Nousukaudella Auringon aktiivisuus on transienttia, mitä luonnehtii voimakkaat ja äkilliset flare-tyyppiset purkaukset. Niiden määrä kasvaa pilkkujen määrän noustessa kohti huippua. Laskukaudella Auringon aktiivisuutta hallitsee korona-aukoista virtaava nopea aurinkotuuli, jolloin maapallolla havaitaan pitkäkestoista (useita päiviä) häiriötason nousua. Tyypillistä on myös häiriöiden toistuvuus Auringon pyörähdysajan (27 d) jaksoissa, jolloin sama aktiivinen alue uudelleen aiheuttaa häiriöitä maapallon avaruussähän. Olennaista Auringon 11-vuotiselle aktiivisuussyklille on vielä se, että aktiivisuus putoaa muutamaksi vuodeksi heti pilkkumaksimin jälkeen (1-2 v), kuten Kuvan 1 aa-indeksien käyttäytymisestä voi päätellä.



Kuva 1. Lihavoitu käyrä: geomagneettinen aktiivisuusindeksi (aa) 1844-2003.
Katkoviiva: magneettisen aktiivisuuden pitkäaikaisvaihtelun tilastollinen vaihtelu.
Harmaa alue: auringonpilkkuluku (R).

Auringonpilkkuluvuilla on pilkkujakson aikana yksi maksimi, mutta aa:ssa niitä on tyypillisesti kaksi pilkkujen maksimijankohdan molemmin puolin. Pilkkuja voi olla silloin edelleenkin runsaasti, mutta Auringon säteilytoiminta ja hiukkasemissiot ovat vähäisiä. Tyypillinen tällainen tilanne sattui vuoden 1979 pilkkumaksimin aikana, jolloin vuosina 1980-81 Auringon häiriöaktiivisuus laski alle seuraavan minimin tason (Kuva 1) noustakseen sen jälkeen uuteen maksimiin. Auringon aktiivisuussykli on

kaksihuippuinen. Ensimmäinen aktiivisuusmaksimi sattuu lähellä auringonpilkkujen maksimivuotta ja toinen 3-4 vuotta tämän jälkeen. Jälkimmäinen aktiivisuuskuippu on yleensä keskimääräiseltä voimakkuudeltaan suurempi kuin edellinen. Tämä havaitaan esimerkiksi nyt käynnissä olevassa jaksossa (#23). Keskimääräinen geomagneettinen häiriöaktiivisuus maapallolla oli vuosina 2003-2004, 3-4 vuotta maksimin jälkeen, noin 50 % korkeampi kuin pilkkumäärien maksimin aikoihin vuosina 2000-2001.



Kuva 2. Hadley-keskuksen ilmastotietokannasta saatu maapallon globaalilämpötilan anomalia normaalikauden 1961-1990 suhteen ajanjaksolla 1856-2003. Ohut viiva edustaa korjaamattomia vuosiarvoja ja paksu 11-vuoden tasoituksella suodatettuja.

3. Avaruussään magneettinen häiriöindeksi aa

Auringon geofektiivistä vaikutusta koko maapallolla kuvaa maan magneettikentän häiriöisyydestä lasketut tunnusluvut, jotka kuvaavat avaruussäähäiriöiden voimakkuutta. Ne perustuvat geomagneettisten observatorioiden rekisteröinteihin. Tunnusluvut eli aktiivisuusindeksit lasketaan yleensä 3 tunnin jaksoissa ja niistä muodostetaan päivä-, kuukausi ja vuosikeskiarvoja, jotka kertovat Auringon aktiivisuuden vaikutusten vaihtelusta, avaruussäätä, eri pituisina aikaväleinä. Pisin tällainen aktiivisuusindeksisarja tunnetaan lyhenteellä aa (Menvielle & Berthelier, 1991). Se alkaa vuodesta 1868. aa-sarja perustuu kahden magneettisen observatorion havaintoihin. Toinen observatorioista on Englannissa, toinen Australiassa. Ilmatieteen laitoksen vanhoista magneettisista havainnoista aa-sarjaa on voitu jatkaa ajassa vielä taaksepäin aina vuoteen 1844 saakka (Nevanlinna, 2004). Näin on käytettävissä 160 vuotta pitkä

havaintosarja Auringon aktiivisuuden eli avaruusilmaston hitaiden muutosten tutkimuksia varten (Kts. Kuva 1.).

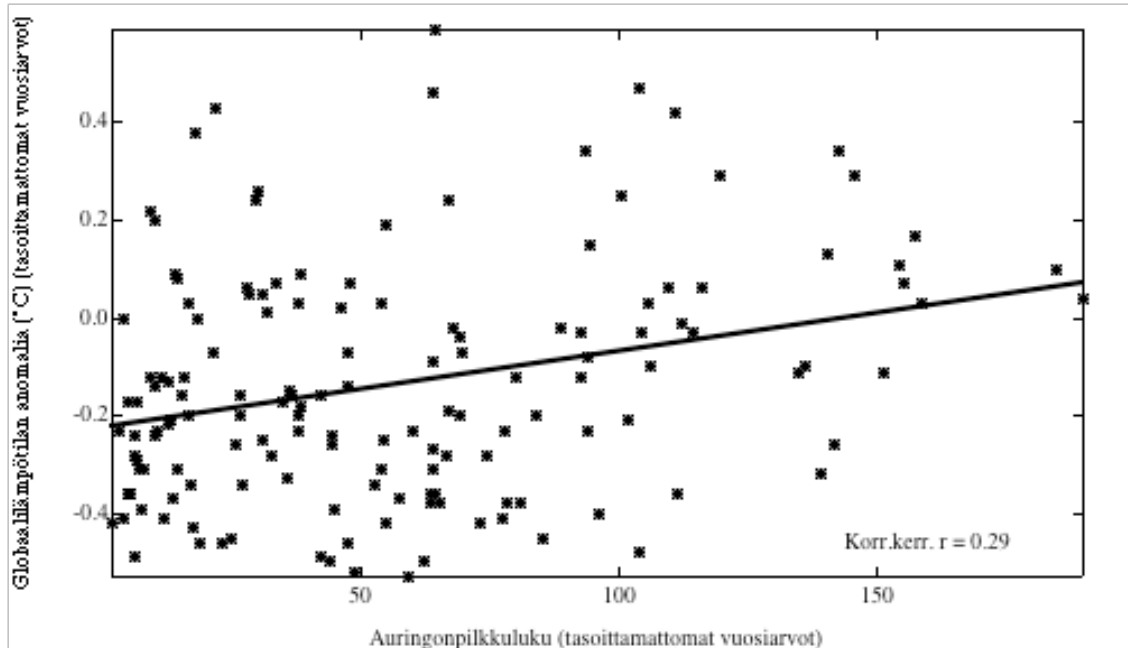
Kaikki R:n vaihtelut eivät aiheuta maapallon avaruussäähän muutoksia Auringon aktiivisuuspurkauksien suuntautuessa maapallolta pois päin. aa-indeksin laita on toisin: kaikki muutokset aa:ssa kertovat välillisesti Auringon aktiivisuuden vaihteluiden vaikutuksesta maapallon avaruussäätilaan. aa ja R korreloivat keskenään hyvin, mutta aa seuraa Auringon toimintaa paremmin kuin R, erityisesti pilkkujen laskukaudella, jolloin korona-aukkoihin liittyvät aktiiviteettiepisodit eivät saa alkuaan lainkaan auringonpilkkualueilta.

4. Globaalilämpötila ja auringonpilkkut

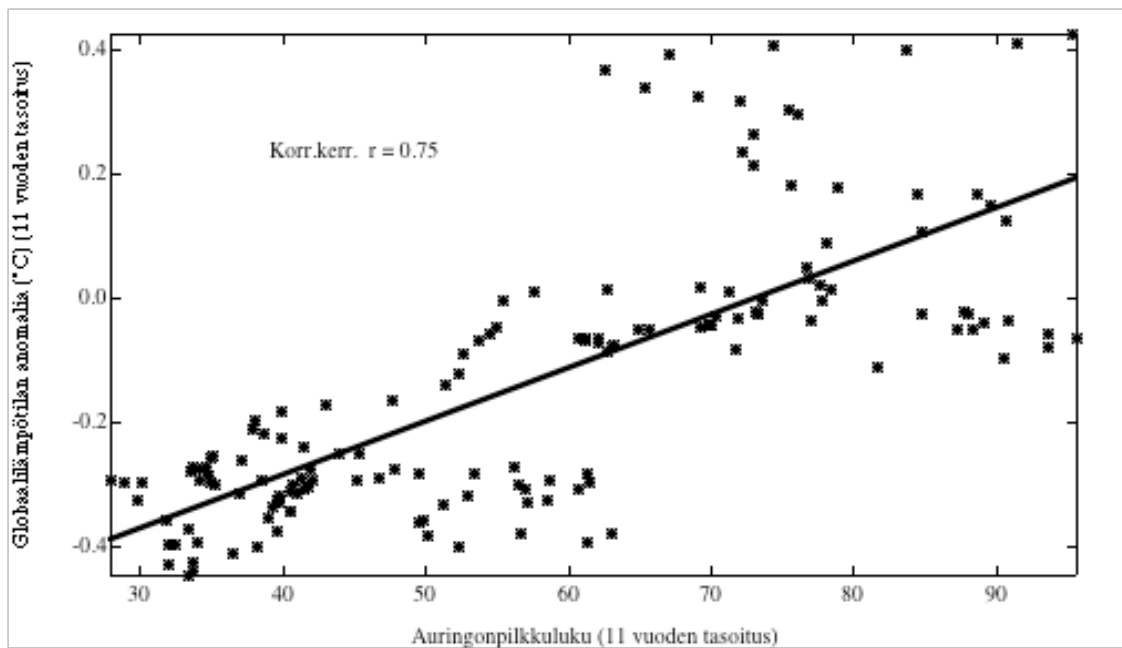
Kuvassa 2 on lämpötila-anomalian vuosikeskiarvot (vertailukauden 1961-1990 suhteen) 1856-2003 ilman tasoitusta ja 11-vuoden suodatuksella. Siitä nähdään, että globaalilämpötila 1900-luvulla on noussut kahdessa vaiheessa: ensin 1910-1940, jonka jälkeen lämpötila laski noin vuoteen 1970 saakka ja sitten on tapahtunut nopea nousu. Kummankin nousun aikana lämpötilan kasvu on ollut suunnilleen 0.4 °C. 1800-luvun lopulla lämpötila pysyi suunnilleen samana tai laski hieman.

Kuvassa 3. on lämpötila-anomalian (ΔT) riippuvuus auringonpilkkuluvusta (R). Näiden välinen lineaarinen korrelaatio on heikko, +0.29, mikä viittaa siihen, ettei ainakaan auringonpilkkuluvulla mitattuna vuodesta toiseen tapahtuvassa lämpötilan vaihtelussa ole juurikaan solaariperäistä vaikuttajaa. Korrelaatio on laskettu "nolla-viiveellä" eli lämpötila ja auringonpilkkuluku ovat samalta vuodelta. Mikään muu viive ei kuitenkaan paranna korrelaatiota.

Kuvan 3 korrelaatio paranee merkittävästi, jos auringonpilkkulukuja tasoitetaan 11 vuoden suodatuksella (Kuva 4). Tällöin jäljelle jää pitkäkestoisempi (> 11 v) vaihtelu. Lineaarinen korrelaatio koko jaksolle 1856-2003 on nyt 0.75. Toisaalta kuvan lähempi tarkastelu paljastaa, että lämpötilan ja auringonpilkkuluvun välinen riippuvuus vaihtelee tarkastelujakson aikana paljon. Näiden erojen tarkempi analyysi on tehty Kuvassa 6.



Kuva 3. Maapallon globaalilämpötilan anomalia (ΔT) ja vuotuinen auringonpilkkuluku (R) 1856-2003. Luvut ovat tasoittamattomia vuosikeskiarvoja. Lineaarinen korrelaatiokerroin ΔT vs. R on 0.29.

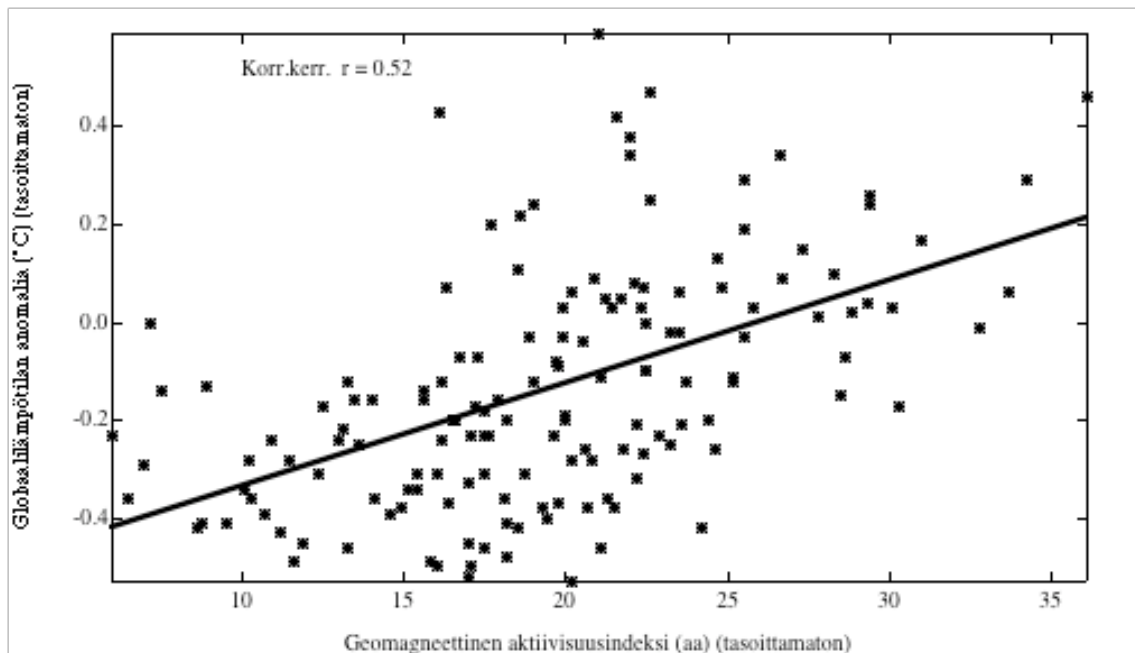


Kuva 4. ΔT vs. R, kun molempia lukuja on tasoitettu 11 vuoden yli (vrt. Kuva 6)

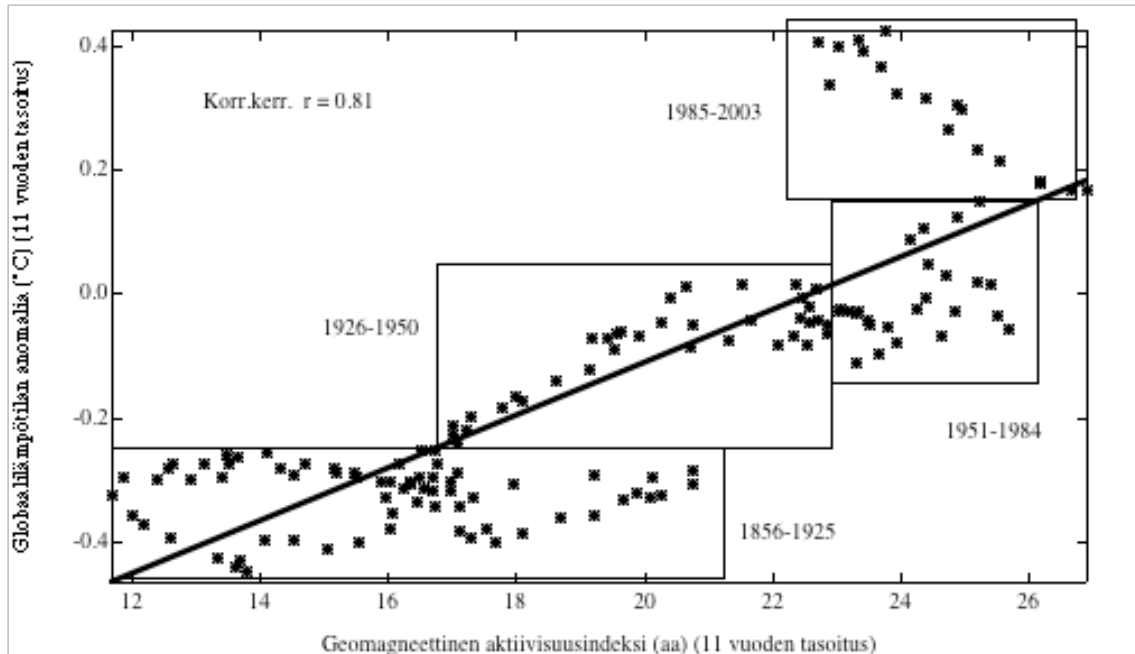
5. Globaalilämpötila ja magneettinen häiriöindeksi aa

Kuvia 3 ja 4 vastaavat kuviot geomagneettiselle aktiivisuusindeksille aa on Kuvissa 5 ja 6. Tasoittamattomat aa-luvut korreloivat lämpötila-anomaliaan kertoimella 0.52 eli mitä voimakkaammin häiriintyneessä tilassa on maapalloa ympäröivä avaruussääjärjestelmä (aa:lla mitattuna) sitä korkeampi on lämpötila-anomalia. Kohtalaisen alhainen korrelaatiokerroin osoittaa kuitenkin sen (varsin ilmeisen tosiasian), että lämpötilan vuodesta toiseen tapahtuvassa vaihtelussa on muita ja voimakkaammin vaikuttavia tekijöitä kuin Auringon kontrolloimat avaruussään vaihtelut.

Kuvassa 6 on ΔT vs. aa, kun molempia lukuja on tasoitettu 11 vuoden yli. Korrelaatio paranee selvästi ja on nyt 0.81. Toisaalta kuviosta näkyy selvästi, että lämpötila-anomalian ja aa-indeksin välinen riippuvuussuhde vaihtelee suuresti tarkastelukauden 1856-2003 aikana. Jakson alkupuolella suunnilleen vuosina 1856-1925 Auringon aktiivisuus (aa:lla mitattuna) muuttuu paljon, mutta lämpötila ei muutu juuri lainkaan. Sitä seuraavalla kaudella, 1926-1950 lämpötila kasvaa melko lineaarisesti magneettisen aktiivisuuden kasvaessa. Ajanjaksolla 1951-1984 lämpötila pysyttelee lähes vakiona vaikka geomagneettinen aktiivisuus on korkea. Viimeisen jakson, 1985-2003, aikana lämpötila kasvaa voimakkaasti vaikka aktiivisuus pienenee.



Kuva 5. ΔT vs. aa 1856-2003. Lineaarinen korrelaatio on selvästi parempi kuin Kuvassa 3 auringonpilkkuluvulle.

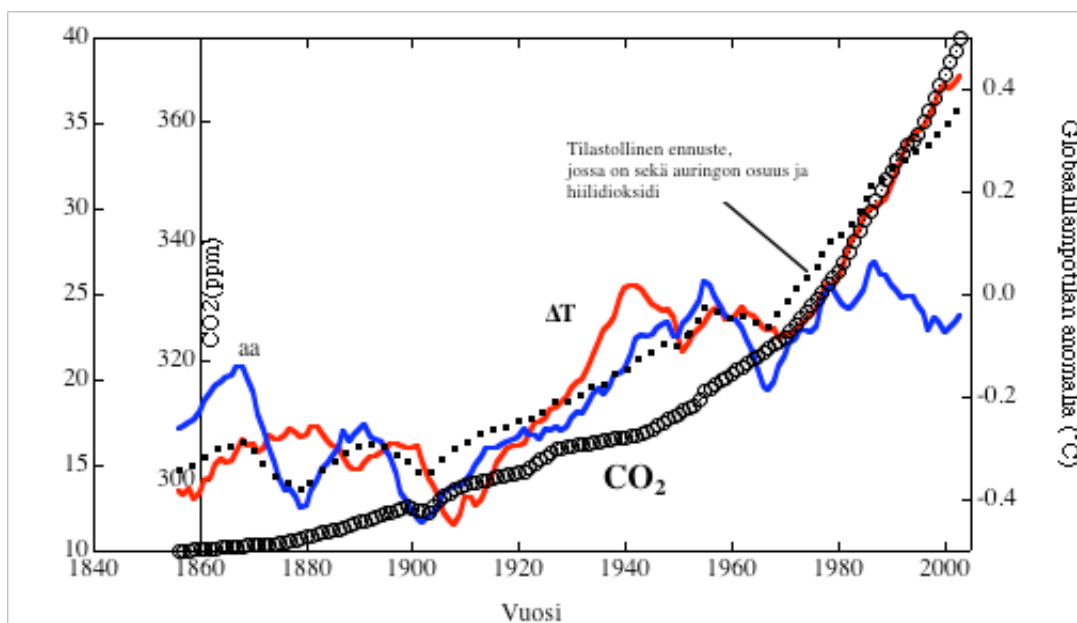


Kuva 6. ΔT vs. aa-indeksi 1856-2003. Lineaarinen korrelaatio koko jaksolle on korkea, mutta jaettuna alajaksoihin korrelaatio vaihtelee suuresti positiivisen, negatiivisen ja ei-korrelaatiota tilanteiden välillä, mikä viittaa siihen, että Auringon aktiivisuus (aa:lla mitattuna) ei kovin vahvasti vaikuta lämpötilan muutoksiin maapallolla kuin korkeintaan ajoittain.

Tässä tapauksessa alkuperäinen oletamus, että lämpötilan nousu ja geomagneettinen aktiivisuus ovat positiivisesti korreloituneita, on kääntynyt päinvastaiseksi. Näistä eri jaksoista voitane päätellä, että lämpötila-anomalian muutoksissa on piirteitä, jotka voidaan tulkita Auringon aktiivisuuden vaikutukseksi, mutta sen osuus vaihtelee suuresti tarkastelukauden eri osissa. Auringon aktiivisuus kontrolloi siten vain vähäistä osaa lämpötilan muutoksissa ja vaihteluihin on siten muita tekijöitä kuin Aurinko.

6. Globaalilämpötilan kasvu, hiilidioksidi ja tulivuoritoiminta

Ilmakehän kasvihuoneilmiön vahvistumisessa hiilidioksidin osuus on vesihöyryn jälkeen merkittävin. Sen pitoisuus on tällä hetkellä noin 30 % korkeampi kuin koskaan noin 400 000 vuoteen (IPCC, 2001). Kuvassa 7 nähdään hiilidioksidin pitoisuus aikavälillä 1856-2003. Miten hiilidioksidi vaikuttaa ilmakehän lämpötilaan on monimutkainen prosessi, mutta tässä tarkastelussa riippuvuutta tarkastellaan vain tilastollisesti, missä lämpötila-anomalia (ΔT) johtuu vain kahdesta tekijästä: Auringon aktiivisuudesta, jota mitataan aa-indeksillä ja hiilidioksidipitoisuuden (CO_2) kasvusta seuraavasti:



Kuva 7. Sininen: geomagneettinen aktiivisuus (aa). Punainen: lämpötila-anomalia (ΔT). Palloviiva: ilmakehän hiilidioksidipitoisuus (CO_2). Pisteiviiva: lämpötilan kasvu yksinkertaisen regressiomallin tuloksena (kts. yhtälö 1).

$$\Delta T = k_0 + k_1 \text{ aa} + k_2 \text{ CO}_2 \quad (1)$$

missä k_0 , k_1 ja k_2 ovat regressiokertoimia. Tulos on kuvassa 7. Nähdään, että lämpötilan aikavaihtelu kuvautuu varsin hyvin regressioyhtälöllä. Edelleen voidaan havaita, että regressiokäyrä seuraa Auringon aktiivisuuden (aa) vaihteluja jonkin 1960-luvulle, mutta nykyaikaa kohden tultaessa CO_2 dominoi lämpötilan kasvua Auringon aktiivisuuden kasvun lähes pysähtyttyä. Lämpötilan varianssista hiilidioksidi selittää 62 % koko tarkastelukaudelle 1856-2003.

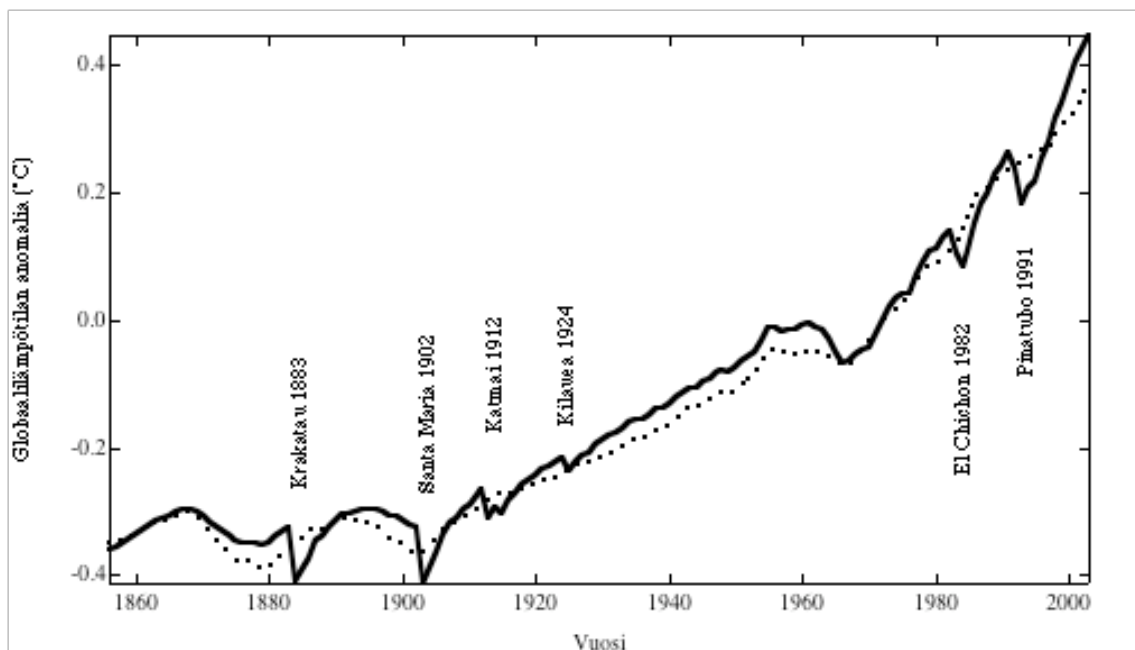
Regressiotarkastelu ei luonnollisestikaan "todista" sitä, että CO_2 olisi suoraan syyppää lämpötilan nousuun kuten kuva 7 näyttää. Hyvä yhteensopivuus kertoo vain sen, että lämpötilan kasvussa on tilastollisesti vahva korrelaatio hiilidioksidipitoisuuden kasvuun 1970-luvulta eteenpäin. Kvantitatiiviset ilmastomallit, joissa on mukana sekä luonnolliset lämpötilan muutokset (Auringon aktiivisuus, tulivuoritoiminta ja ilmakehä-valtamerikytkennät) että antropogeeniset tekijät (kasvihuonekaasut, aerosolit) osoittavat selkeästi, että viime vuosikymmenien nopea lämpötilan kasvu ei ole selitettävissä ilmakehän luonnollisella vaihtelulla. Paras yhteensopivuus lämpötila-

havaintojen ja mallilaskujen välille saadaan, kun huomioidaan sekä luonnolliset että ihmisen aiheuttamat tekijät (IPCC, 2001; Stott et al., 2000; Rinne, 2001).

Suuret tulivuortenpurkaukset aiheuttavat globaalilämpötilan laskua, mutta vain lyhyeksi ajaksi kuten Kuva 8 osoittaa (vrt. myös Kuva 16). Siinä regressiomalliin (1) otettu mukaan ilmakehän VDI-luku (Volcanic Dust Index; <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/pubs/crowley.html>), eli

$$\Delta T = k_0 + k_1 \text{aa} + k_2 \text{CO}_2 + k_3 \text{VDI} \quad (2)$$

VDI-luku mittaa tulivuorten purkauksien aiheuttamaa ilmakehän pölypitoisuutta, joka laskee maapallon lämpötilaa. Lämpötilan muutoksia aiheuttavat myös kaasussa olevat rikkiyhdisteet, jotka muuttavat maapallon albedoa. Tulivuorien vaikutus näkyy kuitenkin vain muutaman vuoden mittaisena lämpötilan putoamisena noin 0.1 °C. Maapallon globaalilämpötilaan vaikuttaneita suuria tulivuoren purkauksia tapahtui viime vuosisadalla kuusi kertaa.

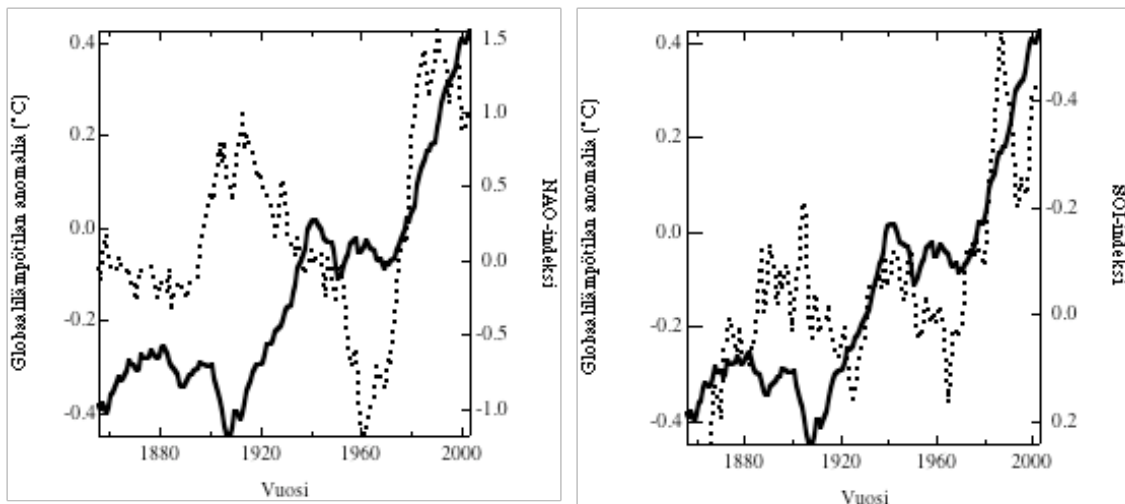


Kuva 8. Tulivuoritoiminnan vaikutus globaalilämpötilaan. Katkoviiva on laskettu lämpötila, kun regressioyhtälöön (1) otetaan mukaan vain hiilidioksidin pitoisuus ja Auringon aktiivisuus (vrt. Kuva 7). Yhtenäisessä viivassa on mukana myös tulivuoripöly (2), jota luonnehtii VD-indeksi (Volcanic Dust). Kuvaan on merkitty suuret tulivuortenpurkaukset.

7. Muita korrelaatioita: NAO ja SOI

Valtameri-ilmakehä vuorovaikutusta luonnehtivat esimerkiksi NAO- ja SOI-indeksit (North Atlantic Oscillation & El Nino Southern Oscillation eli ENSO). Näistä indekseistä SOI (Eteläinen heilahdusindeksi) seuraa paremmin globaalilämpötilan muutoksia kuin NAO, kun tasoitus tehdään 21 vuoden yli (kts. Kuva 9). SOI:n tasoitetut arvot ovat muuttuneet 1900-luvulla kahdessa vaiheessa kuten globaalilämpötilakin. Eteläisessä heilahduksessa positiiviset SOI-arvot vastaavat La Nina-tilannetta ja negatiiviset El Nino-vaihetta. Mitään ilmeistä korrelaatiota ei ole SOI- ja NAO-indeksien ja Auringon aktiivisuusarvojen (R_{aa}) välillä 11-vuoden tai sitä lyhyemmän vaihtelun osalla.

Miten globaalilämpötilan muutokset ja ENSO-ilmio riippuvat fysikaalisesti toisistaan, ei tällaisessa korrelaatiotarkastelussa tuli esille. Tiedetään, että El Nino-vaiheessa itäisen Tyynen Valtameren pintavesi lämpiyä laajoilla alueilla. Vuodesta toiseen tapahtuvassa SOI-indeksin muutoksissa pienenevät SOI-arvot vastaavat positiivista muutosta globaalilämpötilassa. SOI:n pitkäaikaiskehitys on menossa tilanteisiin, joissa El Nino on dominoiva.



Kuva 9. Vasen: globaalilämpötilan anomalia (vrt. Kuva 2 & 7) ja NAO-indeksi (katkoviiva). Oikea: globaalilämpötilan anomalia ja SOI-indeksi (katkoviiva) (huom. käänteinen akseli). Molemmat indeksit on suodatettu 21 vuoden tasoituksella ja lämpötila 11-vuoden tasoituksella.

Onko NAO- ja ENSO-ilmiöiden hitaissa vaihteluissa osaselitys siihen, miksi 1940-1970 maapallon lämpötila kääntyi laskuun, kuten muun muassa Schlesinger & Ramankutty (1994) ovat esittäneet? Kysymys menee tämän tutkimuksen aiheen ulkopuolelle.

8. Auringon irradianssin muutokset ja maapallon lämpötila

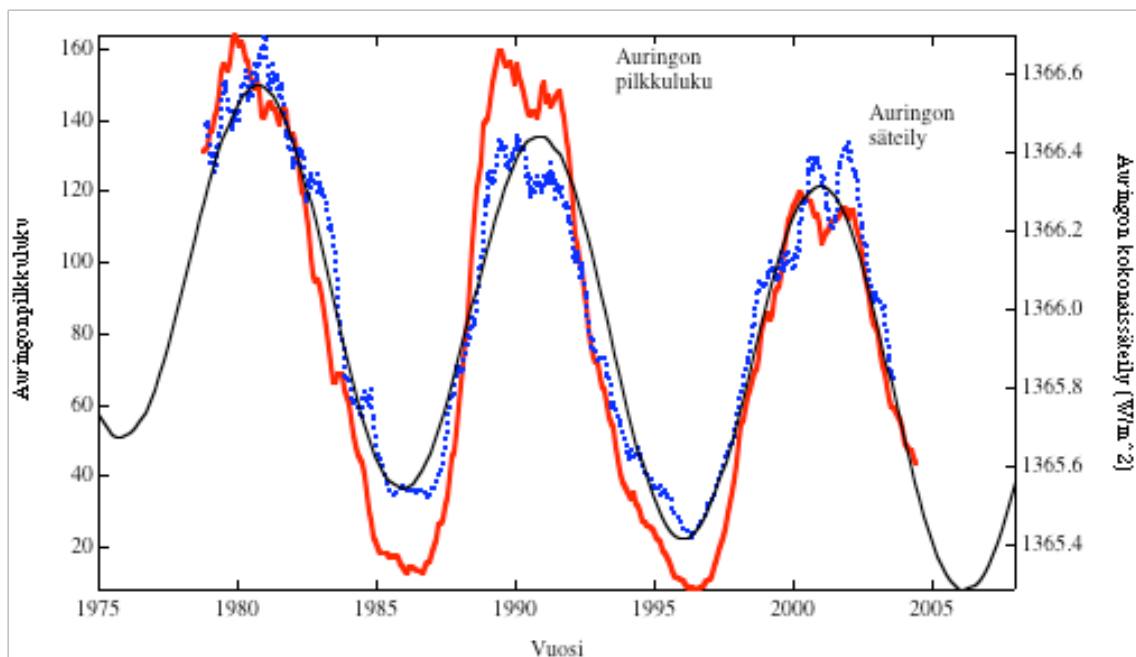
Intuitiivisesti yksinkertaisin selitys maapallon kokonaislämpötilan vaihteluille on Auringon säteilyn muutokset. Jos aurinkovakio ($S = 1340 \text{ W/m}^2$) muuttuu Auringon oman toiminnan kautta, vaikuttaa se maapallon ilmakehän säteilylämpötilaan. Jos aurinkovakio muuttuu $\Delta S/S = 1 \%$, niin maapallon säteilylämpötilan muutos (ΔT) Stefan-Boltzmannin lain mukaan on $0.25T(\Delta S/S) \approx 0.75 \text{ }^\circ\text{C}$, jos säteilylämpötila on 300 K ja muuttuneen säteilylämpötilan kerrannaisvaikutukset ja pilvisyyden aiheuttama albedo jätetään huomioon ottamatta. Tällainen muutos Auringossa vastaisi koko havaittua lämpötilan nousua ilmakehässä. Havaitut muutokset aurinkovakiassa ovat kuitenkin vain alle kymmenesosa tästä.

Kuten aikaisemmin on todettu, ei vuodesta toiseen tapahtuvassa lämpötilan vaihtelussa ole todettavissa Auringon aktiivisuuden vaikutusta. Pitempien aikojen kuluessa, auringonpilkkujakson mittaisissa aikaväleissä Auringon säteily muuttuu. Siitä on esimerkki Kuvassa 10, jossa on Auringon kokonaisirradianssi (Total Solar Irradiance; TSI) satelliittimittauksista aikaväliltä 1978-2003, siis melkein kolmen auringonpilkkujakson ajalta. TSI tarkoittaa Auringon lähettämää sähkömagneettista tehoa ilmakehän ulkopuolella integroituna säteilyspektrin kaikkien aallonpituuksien yli. Kuvan datat ovat peräisin NOAA:n internet-sivuilta. Säteilydatat on annettu päiväarvoina ja ne perustuvat neljän eri satelliitin eri aikoina tekemien mittauksien yhdistelmään (kts. esim. Fröhlich & Lean, 1978; Fröhlich, 2000; Solanki & Krivova, 2003). Kuvan 10 TSI-arvot vastaavat vuosikeskiarvoja. TSI seuraa auringonpilkkujen vaihtelua siten, että Aurinko säteilee pilkkujen maksimiaikoina noin promillen verran enemmän kuin pilkkuminimissä. Tehon yksiköissä tämä ero on noin 1 W/m^2 . Auringon irradianssissa on havaittavissa pilkkujaksosta toiseen laskeva trendi, joka on noin 0.3 W/m^2 neljännesvuosisadan aikana. Säteilyhuippujen lasku seuraa suurinpiirtein vastaavien auringonpilkkumaksimien pienenemistä. Willson (1997) on saanut irra-

dianssin trendille pienen nousun 1978-1995, mutta hänen käyttämänsä aineisto on rajoitetumpi kuin Kuvassa 10 ja osa osa-aikasarjojen korjauksista on puutteellisia (Solanki & Krivova, 2003).

Auringon säteilyn satelliittimittausten aikana noin 25 vuoden kuluessa, maapallon globaalilämpötila on kasvanut noin $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, joten auringon kokonaissäteilyn muutoksella ei voida lainkaan tätä kasvua selittää. Auringon kokonaissäteilykäyrä voidaan erilaisista proksitiedoista rekonstruoida kauas menneisyyteen ainakin 1000 vuoden päähän (kts. esim. Mann et al., 1998, 1999; Crowley, 2000).

Kuvassa 10 on Auringon kokonaisirradianssin rekonstruktio ajalla 1850-2000 NOAA:n ilmastotiedoista. Havaitaan, että TSI seuraa globaalilämpötilaa suunnilleen samalla tavalla kuin geomagneettinen häiriöindeksi aa Kuvassa 7. Lineaarinen korrelaatiokerroin (aa vs. TSI) 11-vuoden tasoitetuissa arvoissa on 0.92. Korrelaatio TSI:n ja lämpötilan välillä on hyvä suunnilleen vuoteen 1970, jonka jälkeen TSI:n kasvu pysähtyy, mutta lämpötila jatkaa kasvuaan.



Kuva 10. Sininen: Auringon kokonaisirradianssi (TSI) satelliittimittauksista (1978-2003) tasoitettuna päiväarvoista 365 päivän yli.
Punainen: Auringonpilkkuluvun tasoitetut (12 kk) kuukausiarvot.
Musta: Irradianssin tilastollinen syklinen vaihtelu (periodi 10.1 v) lisättyä lineaarisella trendillä ($-0.01\text{ W/m}^2/\text{v}$). Ennusteen mukaan seuraava säteilyminimi on helmikuussa 2006 (kts. myös Lean, 2001 ja Douglass & Clader, 2002).

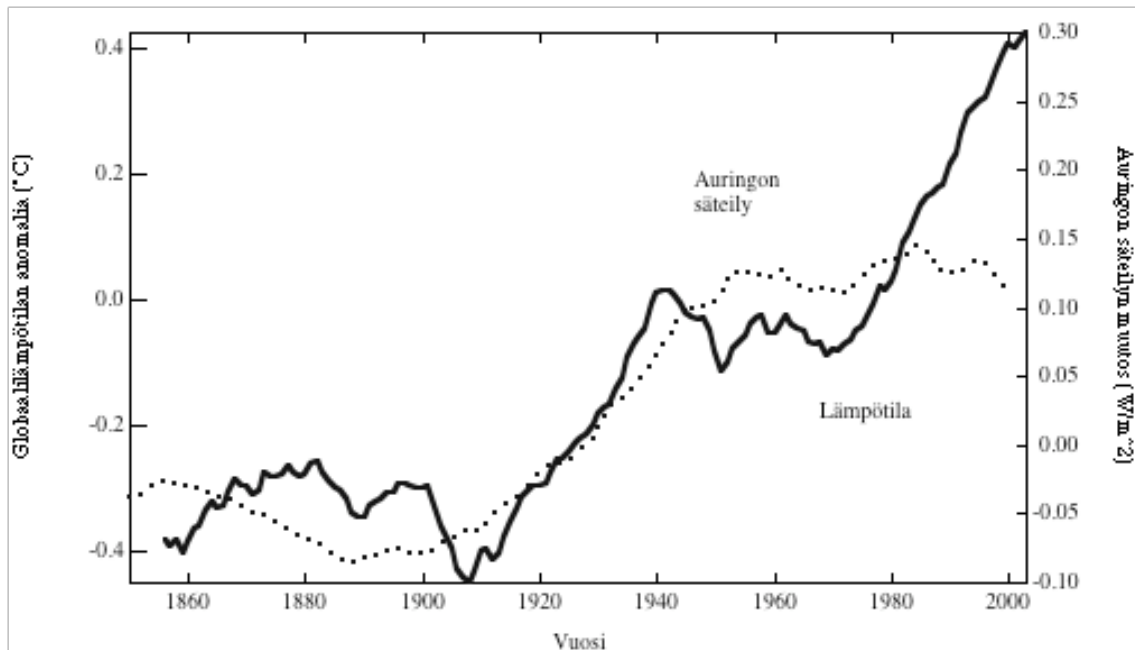
Miten paljon sitten Auringon säteily voi muuttaa ilmakehän lämpötilaa maanpinnan tasolla? Auringon säteilypakotteen aiheuttama lämpötilan muutos (ΔT_s) on (kts. esim. Lean & Rind, 1998; Douglass & Clader, 2002)

$$\Delta T_s = \lambda \Delta F_s, \quad (3)$$

missä λ on ilmaston herkkyysparametri ja ΔF_s Auringon säteilyn (TSI) muutos. Herkkyysparametri on johdettu kokeellisesti ilmastomalleista ja se sisältää kosteus- ja pilvisyysolosuhteiden muutokset. Sille on annettu keskimääräinen arvo $0.6 \text{ }^\circ\text{C/W/m}^2$. Tarkastelussa täytyy ottaa huomioon myös keskimääräinen albedo ($\alpha = 0.30$) ja geometrinen korjauskerroin ($1/4$), joka muuttaa ilmakehän ulkorajalle saapuvan säteilytehon maapallon pinta-alayksikköä kohden, joten siis on voimassa

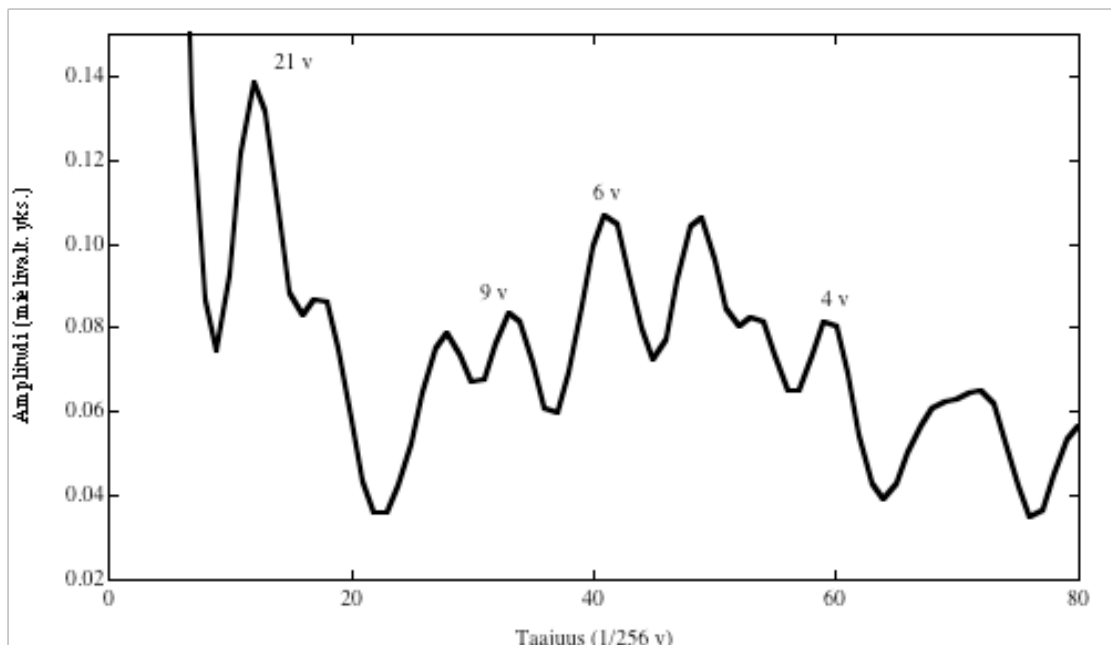
$$\Delta T_s = 0.25 (1 - \alpha) \lambda \Delta F_s \approx 0.11 \Delta F_s \quad (3.1)$$

Auringonpilkkuminimistä maksimiin tapahtuva irradianssin muutos (1 W/m^2) tuottaa siis lämpötilan muutokseksi $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$. Viime vuosisadan alkupuolella (1900-1940) havaittu lämpötilan noususta ($0.4 \text{ }^\circ\text{C}$) selittyisi tämän laskelman mukaan noin 10 % Auringon TSI:n aiheuttamaksi. Aurinkopilkkujakson mukainen lämpötilavaihtelu



Kuva 11. Yhtenäinen viiva: Maapallon globaalilämpötilan anomalia (11-vuoden tasoitus)
Katkoviiva: Auringon kokonaisirradianssin (TSI) muutos (11-vuoden tasoitus).

vaikuttaa melko suurelta. Toisaalta lämpötilan aikaspektrissä ei näy 11-vuoden jaksollisuutta (Kuva 12), vaan huiput ovat 21 vuoden ja 4-6 vuoden kohdalla. Näin siis joko herkkyysparametri 11-vuotisen vaihtelun kohdalla on liian suuri tai Auringon 11-vuotiseen jaksollisuuteen kytketty ilmakehän lämpötilan vaihtelu peittyy muiden lämpötilavariaatioiden alle.



Kuva 12. Maapallon globaalilämpötilan taajuusspektri (1856-2003).

Kuvan 12 lämpötilaspektrin 21 vuoden aalto on lähes samanpituisen kuin auringonpilkkujakson kaksoisjakso (Halen jakso) 22 v. Halen jakso on sama kuin Auringon magneettikentän napaisuudenvaihtoperiodi. Peräkkäisistä auringonpilkkujaksoista toinen on aina hieman voimakkaampi, joten maapallolla havaitaan silloin hieman keskimääräistä enemmän aurinkoperäisiä häiriöitä (magneettisia myrskyjä ja revontulia) (Russell & Mulligan, 1995). Wilson (1998) on havainnut tämän saman jakson Irlannin Armaghin observatorion 160 vuotta kattavasta lämpötilasarjasta ja on tulkinut sen Halen jaksollisuudeksi ilmakehässä. Hänen mukaansa kuitenkin vain 8 % lämpötilan varianssista selittyisi Auringon aktiivisuudesta. Todennäköisempää kuitenkin on, että lämpötilavaihtelussa esiintyvä 21 v jaksollisuus liittyy ilmakehän omaan sisäiseen dynamiikkaan ja mahdollisesti ilmakehä-valtamerikytkentöihin.

Auringon aktiivisuus oli erittäin alhainen ns. Maunderin minimin aikana (noin 1645-1710). Maapallon lämpötilan arvellaan nousseen Maunderin minimistä nykyaikaan

noin $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Irradianssirekonstruktioiden mukaan Auringon säteilymuutos on samana aikana ollut 0.7 W/m^2 , mikä tuottaa lämpötilan muutokseksi noin 0.12°C . Näin siis Auringon kokonaissäteilyn muutokset eivät selitä pitkän ajanjakson lämpötilan noususta kuin enintään vajaan viidenneksen.

Auringonpilkkujakson aikana Auringon lähettämä lyhytaaltosäteily muuttuu voimakkaasti ja yksittäisissä Auringon purkauksissa lyhytaaltosäteily (esim. UV) voi moninkertaistua. Lyhytaaltainen säteily imeytyy ilmakehän yläkerrokseen korkeusvälille 15 km – 30 km. Auringon UV-säteily kontrolloi stratosfäärin otsonin muodostumisprosesseja. Lyhytaaltosäteilyn transienttimuutoksien maapallon ilmakehään tuoma lisäenergia verrattuna itse aurinkovakioon on kuitenkin häviävän pieni, alle 1 % suurimmillaankin. Näin maapallon saama lisäenergia ei suoranaisesti voi muuttaa sääoloja alailmakehässä, jonne ei lisäsäteilyä tule juuri lainkaan. Voimakkaiden Auringon roihu- tai koronamassapurkauksien tuloksena on havaittu jopa 10 % otsonin vähentymistä, mutta se, onko aurinkoperäisellä otsonivaihtelulla merkitystä maapallon säätapahtumiin, on vielä selvittämättä (Düch, 1979; Shindell et al., 1999). Satelliittimittauksista tiedetään, että ilmakehän kokonaisotsonipitoisuus muuttuu noin 2 % auringonpilkkujakson aikana, ja tämä vaihtelu on otettu huomioon eräissä ilmastomalleissa (GCM; Haigh, 1999). Stratosfäärin lämpötila tropopaussista noin 25 km korkeuteen vaihtelee auringonpilkkujakson mukaisesti koko maapallolla (Loon & Labitzke, 1999).

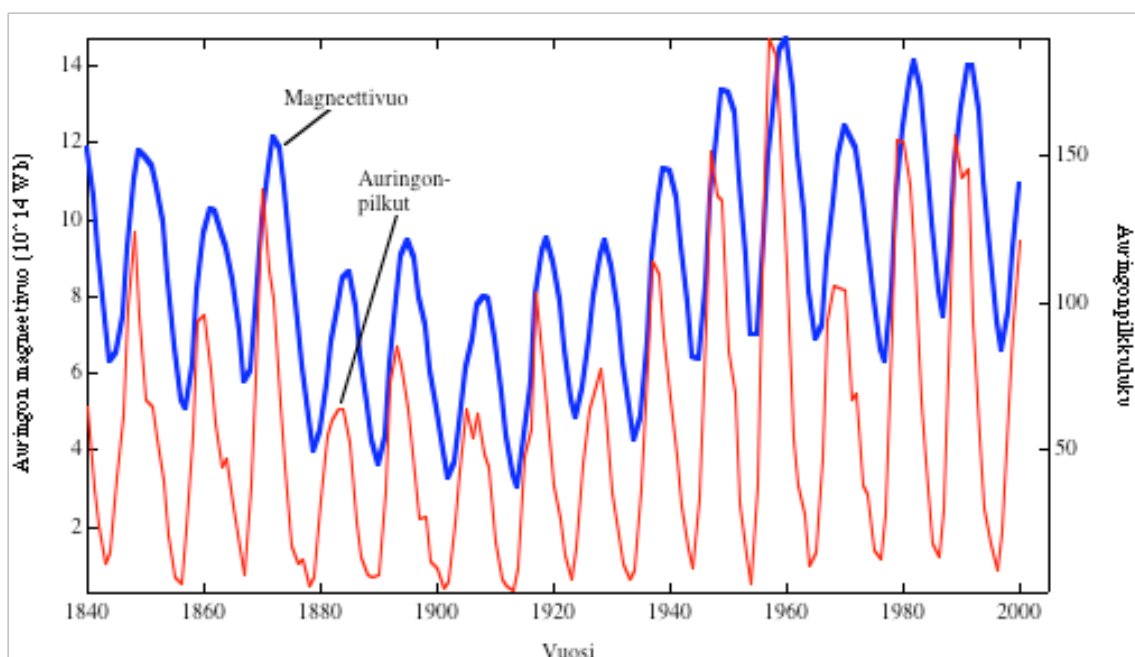
9. Auringon magneettivuo ja sen geofektiivisyys

Auringon magneettikenttä syntyy Auringon sisäosissa tapahtuvan dynamoprosessin tuottamana. Osa magneettikentästä jää toroidimaiseen tai multipolimutoon kiinnittyneenä Auringon materiaan, osa kulkeutuu aurinkotuulen mukana avoimien kenttäviivojen muodossa planeettojen väliseen avaruuteen muodostaen sinne interplaneetaarisen magneettikentän (IMF). Auringon magneettikenttä keskittyy voimakkaimmin aktiivisiin alueisiin (fakulat) ja auringonpilkkuihin.

Auringon lähettämän sähkömagneettisen säteilyn muutoksia vuodesta toiseen tapahtuvassa vaihtelussa kontrolloi lähes täysin Auringon pintakerroksen magneettikenttä

(Krivova et al., 2003). Auringon pilkkujen voimakas magneettikenttä estää plasman konvektioliikkeen pilkun kohdalla, joten lämpötila laskee ja pienentää Auringon emittoimaa kokonaissäteilyä. Pilkkujen ympäristössä on kirkkaita fakuloita, joissa magneettikenttä kuumentaa plasmaa 300 - 400 °C ympäristöä korkeammalle. Pilkkujen aiheuttaman säteilyn pienenemisen korvaa fakuloiden voimakkaampi säteily siten, että pilkkumaksimissa Aurinko säteilee voimakkaammin kuin minimissä. Auringon magneettikentän kenttäviivojen geometria ja sen aikamuutokset säätelevät Auringon säteilyvoimakkuutta auringonpilkkujakson aikana (vrt. Kuva 10). Olennainen parametri tässä on magneettivuoto, jonka vaihteluista voidaan Auringon säteilyn vaihtelut mallintaa (Solanki et al., 2000; kts. myös Nevanlinna, 2001a).

Kuvassa 13 on Auringon magneettivuon vaihtelu, joka seuraa auringonpilkkujen määrän muutoksia. Auringonpilkkujen määrä on lähes nolla pilkkuminimissä, mutta vuoarvot jäävät minimissäkkin suhteellisen korkealle, noin 50 % huippuarvoista. Se johtuu siitä, että Auringon magneettikentässä on kenttää ylläpitäviä prosesseja, jotka toimivat pitemmällä aikavälillä kuin pilkkuihin kiinnittynyt magneettikenttä. Magneettivuon maksimit ja minimi sattuivat noin kaksi vuotta myöhemmin kuin auringonpilkkujen lukumäärän vastaavat ääriarvokohdat.



Kuva 13. Sininen: Auringon magneettivuoto Solanki et al. (2000) mallista laskettuna. Punainen: auringonpilkkut

Interplanetaarinen magneettikenttä (IMF) kulkeutuu aurinkotuulen mukana maapallon magnetosfäärin vaikutuspiiriin. Kuinka aurinkotuuli pääsee vaikuttamaan magnetosfäärissä riippuu olennaisesti IMF:n suunnasta siten, että sen ollessa maapallon magneettisen akselin pohjois-etelä - suunnassa (= IMF_z) eli "alaspäin" vaikutus on suurimmillaan. Tällöin aurinkotuulen hiukkaset pääsevät magnetosfäärin sisäpuolelle ja aiheuttavat suuria häiriöitä maapallon magneettikenttään. Mitä voimakkaampi on IMF_z sitä suurempia ovat magneettiset häiriöt ja myrskyt. Myrskyjen intensiteettiin ja yleensä aurinkotuulen maapallosysteemiin syöttämään energiamäärään vaikuttavat myös aurinkotuulen nopeus ja hiukkastiheys, mutta tärkein on IMF_z (esim. Koskinen, 2001).

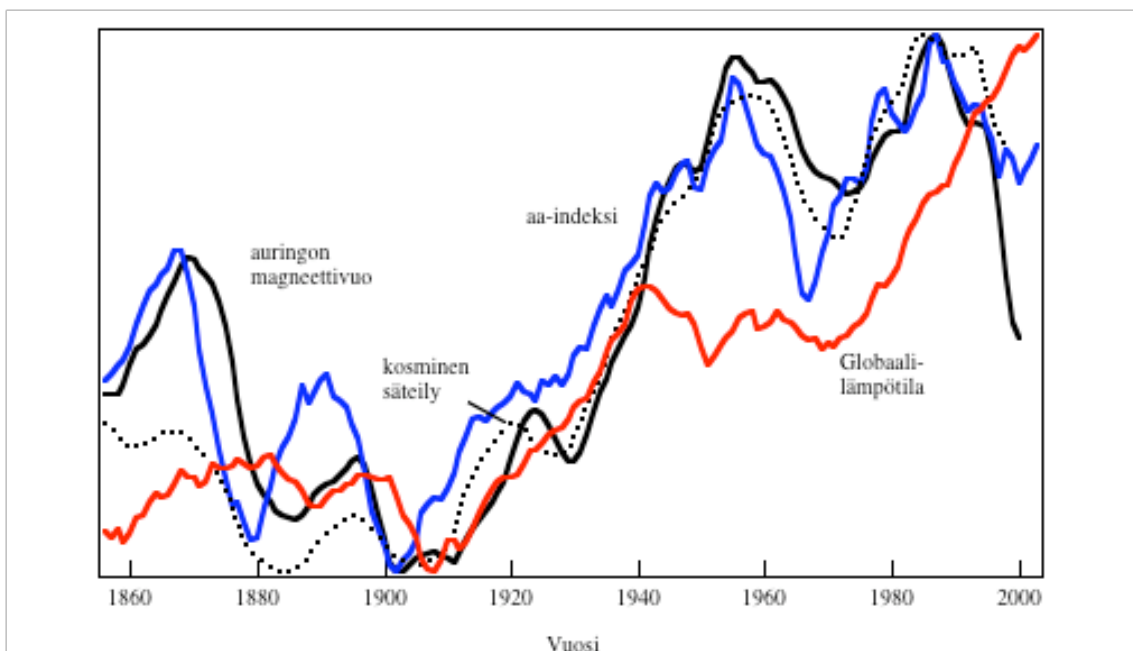
Kuten kuvista 1, 7 ja 14 nähdään, maapallon magneettikentän häiriöiden voimakkuutta kuvaava indeksi (aa) on kasvanut 1900-luvun alusta vuosisadan puoliväliin. Tämä merkitsee siis sitä, että samana aikana IMF_z on kasvanut noin kaksinkertaiseksi (Lockwood et al., 1999; Stamper et al., 1999). aa-indeksin pitkän aikavälin muutokset siis kertovat Auringon magneettikentän (avoimien kenttäviivojen) vaihteluista.

Avaruudesta saapuva kosminen säteily on myös liitetty maapallon lämpötilan vaihteluihin (Marsh & Svensmark, 2000; Svensmark, 2000). Kosmisen säteilyn pitkän aikavälin vaihtelu on Kuvassa 14. Kosmisen säteilyn rekonstruktio perustuu kosmogeenisien isotoopin (¹⁰Be) vaihteluihin Grönlannin jäätikkökairauksista (Beer et al., 1990; datat on saatavissa osoitteesta: <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/pubs/crowley.html>).

Svensmarkin hypoteesina on, että korkeaenerginen kosminen säteily aiheuttaa ionisaatiota ilmakehässä. Ionisoituneet hiukkaset käynnistävät reaktioita, jotka lisäävät ilmakehään kondensaatioytimiä, jolloin pilvisyys lisääntyy ja se vaikuttaa lämpötilaan. Näin pilvisyyden määrän vaihtelujen kautta maapallon lämpötilan pitäisi seurata kosmisen säteilyn vaihtelua. Auringon toiminta tulee tähän mukaan sen kautta, että kosmisen säteilyn intensiteetti, joka aurinkokunnan ulkopuolella on jaksenkin vakio, vaihtelee Auringon aktiivisuustilasta riippuen. Aurinkotuulen mukana kulkeva interplanetaarinen magneettikenttä sirottaa kosmisen säteilyn hiukkasia sitä enemmän mitä voimakkaampi kenttä on, jolloin maapallolle kohdistuu kosmista

säteilyä vähemmän. Magneettikenttä on voimakkaimmillaan auringonpilkkujen maksimiaikoina, jolloin siis havaitaan maapallolla kosmisen säteilyn minimi. Näin auringonpilkkujen ja kosmisen säteilyn välillä on käänteinen relaatio.

Kuten Kuvasta 14 nähdään, Auringon magneettivuon, kosmisen säteilyn voimakkuus ja maapallon magneettinen häiriöisyys (aa-indeksi) korreloivat keskenään varsin hyvin (11-vuoden suodatus) viimeksi kuluneiden noin 150 vuoden aikana. Korrelaatio globaalilämpötilan muutoksen kanssa on kohtalainen 1960-luvulle saakka, mutta sen jälkeen lämpötila kasvaa voimakkaasti, mutta Auringon aktiivisuutta kuvaavat parametrit kääntyvät laskuun tai ovat ainakin suunnilleen vakiotasolla.



Kuva 14. Musta: Auringon magneettivuo. Pisteviiva: kosmisen säteilyn voimakkuus. Sininen: magneettinen häiriöindeksi aa. Punainen: globaalilämpötila
Kaikki suureet on tasoitettu 11-vuoden suodattimella. Kuvan selkeyden vuoksi pystyasteikot on jätetty pois.

Kuten jo aiemmin on todettu globaalilämpötilan vaihtelut 1800-luvun lopulla ja 1900-luvun alkukymmeninä voidaan tulkita osittain Auringon aktiivisuuden aiheuttamaksi. Jos katsotaan maapallon lämpötilamuutosten aiheutuvan Auringon kokonaissäteilyn muutoksesta, niin säteilyn muutosten fysikaalisena aiheuttajana on Auringon magneettivuon hidas vaihtelu, joka säätelee Auringon irradianssia. Kuten luvussa 8 todettiin, niin kuitenkin vain 10 % lämpötilan noususta selittyisi Auringon kokonaissäteilyn kasvulla.

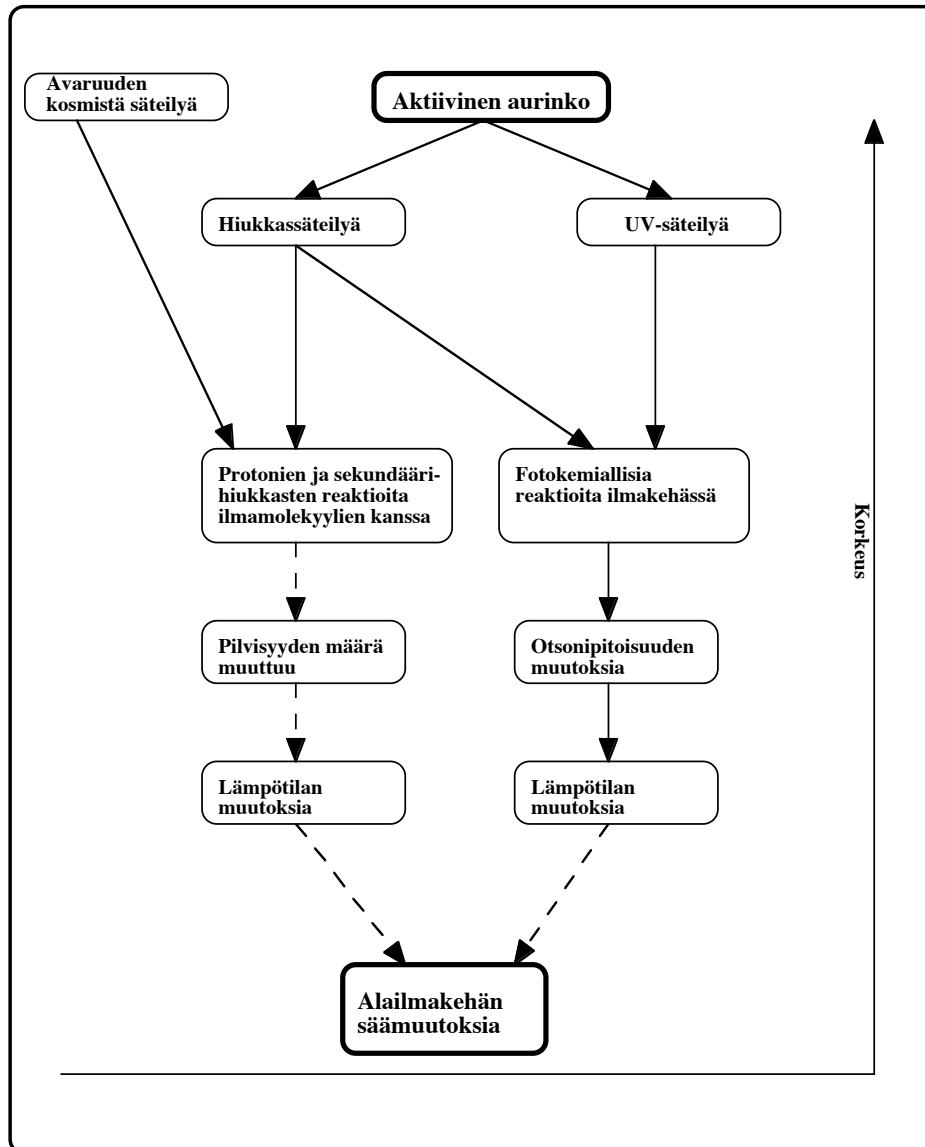
Kuvassa 15 on esitetty kaaviokuva erilaisista epäsuorista mekanismeista, jotka selittäisivät Auringon aktiivisuuden ja tiettyjen neutraali-ilmakehän ilmiöiden välisiä yhteyksiä.

10. Kuinka paljon Auringon aktiivisuus vaikuttaa sääilmiöihin?

Tämän tutkimuksen tekijä laati 30 vuotta sitten aiheeltaan samankaltaisen tutkielman otsikolla "Auringon aktiivisuuden vaikutus sääilmiöihin" (Nevanlinna, 1974), joka perustui lähinnä 1950-1970 - luvuilla kirjoitettuihin julkaisuihin Auringon aktiivisuuden vaikutuksista ilmakehässä. Mitä olennaisesti uusia tuloksia on aihepiiristä saatu 30:ssa vuodessa? Aiheesta voisi kirjoittaa laajaltikin, mutta tässä yhteydessä otan esille vain yhden: merkittävimpiä ovat olleet havaintotulokset Aurinkoa ja aurinkotuulta monitoroivista satelliiteista 1970-luvun lopulta lähtien. Esimerkiksi aurinkovakion vaihtelu tunnetaan nyt luotettavasti jo kolmen auringonpilkkujakson ajalta, mistä 1970-luvun alussa ja sitä ennen ei ollut juuri mitään varmuutta mittaustulosten redukoinnin epävarmuudesta johtuen. Haettaessa fysikaalisia vaikutusmekanismeja Auringon aktiivisuuden ja sääilmiöiden välille luotettava tieto aurinkovakion vaihteluista on tietysti tärkeä reunaehto tätä vuorovaikutusta simuloiville tietokone-malleille.

1970-luvun alussa ei käyty nykyisen kaltaista laajamittaista keskustelua ilmastonmuutoksen syistä ja onko ihminen omalla toimillaan siihen syypää vai onko kaikki vain Auringon vaikutusta. Auringon aktiivisuuden ja sääilmiöiden välinen yhteys kiinnosti sellaisenaan tutkimuskohteena, joka oli aikaisemmin leimattu täysin kyseenalaiseksi kvasitieteeksi ristiriitaisten tulosten vuoksi. Nykyisessä kasvihuoneilmastonmuutoksessa on Auringon säteilymuutoksilla oma osuutensa, vaikka kasvihuonekaasujen osuus dominoi (esim. Andronova & Schlesinger, 2000; Solanki & Krivova, 2003). Auringolla on menneisyydessä ennen teollistumisen aikakautta (muutaman sadan vuoden aikavälillä) ollut tärkeä osuus maapallon lämpötilavaihteluiden hitaissa muutoksissa muiden luonnollisten tekijöiden ohella (esim. Mann et al., 1998, 1999).

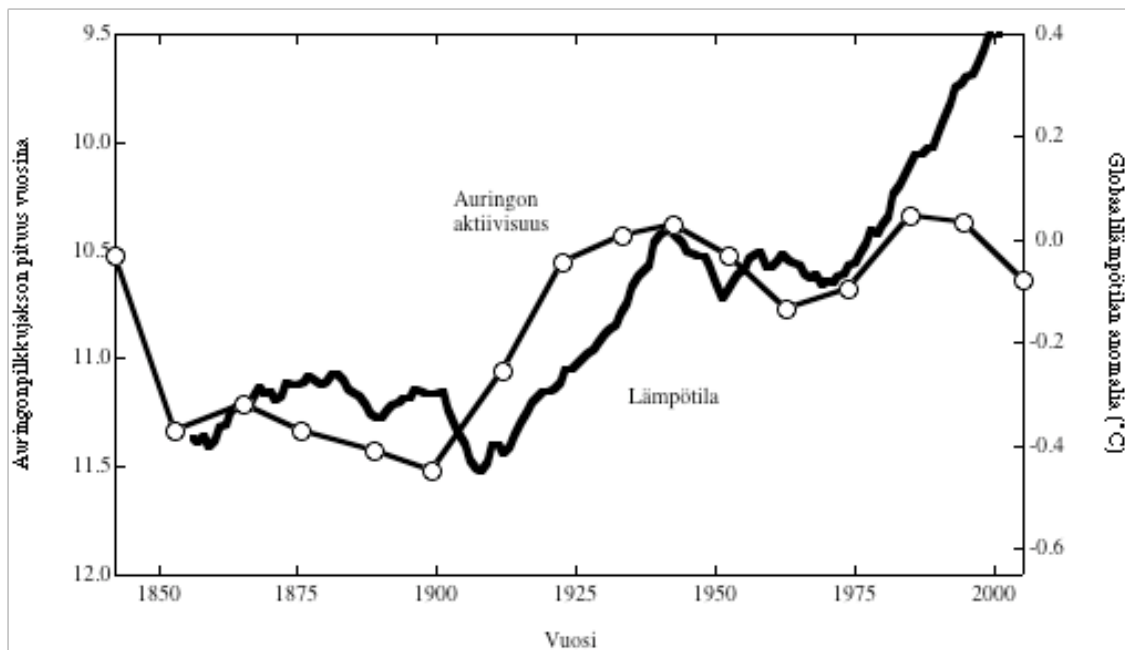
1970-luvun alussa suurta huomiota herätti tutkimustulos, jonka mukaan Alaskan - Aleuttien alueella syntyneet syklonit ajanjaksolla 1964-1971 kehittyivät olennaisesti



Kuva 15. Auringon aktiivisuuden oletettuja vaikutusmekanismeja maapallon ilmakehässä. Katkoviivalla on merkitty vaikutusketjuja, joiden olemassaolo on vain hypoteettinen.

voimakkaimmiksi, jos niiden syntymähetkellä vallitsi Auringon aktiivisuudesta johtuva geomagneettinen häiriötila (Woodbridge, 1971; Roberts & Olson, 1973). Samaa aihetta olivat tutkineet jo 1950-luvun lopulla Woodbridge et al. (1956, 1959). Oliko sittenkin Auringon aktiivisuudella vaikutusta ilmakehän dynamiikkaan? Käytävissä oli aivan uutta satelliittitietoa Auringon aktiivisuudesta, jonka avulla toivottiin saatavan lisävalaistusta ikivanhaan kysymykseen Auringon säteilymuutosten vaikutuksesta ilmakehään. Myöhemmin saatiin jopa tulos, että koko pohjoisen pallon-

puoliskon ilmakehän pyörteisyys (vortisiteetti) tietyllä painepinnalla riippuu Auringon aktiivisuuden tilasta (Wilcox et al., 1973). Syyksi väitettyjen matalapaineiden voimistumiseen haettiin pilvisyyden muutoksista, joita aiheuttaisi kosmisen säteilyn ja Auringon korkeaenergistien hiukkasten tuottama ionisaatio ylätroposfäärissä. Siis suunnilleen samalla mekanismilla kuin Svensmark (2000) 25 vuotta myöhemmin. Kosmisen säteilyn ja pilvisyyden välinen mahdollinen yhteys oli esitetty jo 1950-luvulla (Ney, 1959), joten mistään uudesta vaikutusmekanismiehdokkaasta ei tässäkään ole kysymys.



Kuva 16. Palloviiva: Auringon aktiivisuus mitattuna auringonpilkkujakson keston (pilkkuminimien välinen aika) mukaan ja tasoitettuna painotetulla 5-pisteen (1-2-2-2-1) suodattimella, joka on sama kuin Friis-Christensenin & Lassenin (1991) käyttämä. (Huom. käänteinen asteikko). Pilkkujaksojen kestot ovat verkkolähteestä: ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS/maxmin.new

Yhtenäinen viiva: globaalilämpötilan anomalia (11-vuoden tasoitus)

Kosmisen säteilyn vaikutuksesta pilvisyyteen kehkeytyi laaja julkaisujen sarja (esim. Bandeen & Maran, 1975), mutta myöhemmin havaittiin, kun havaintojen aikasarjaa pidennettiin, ettei korrelaatiota enää tullutkaan väitettyjen ilmiöiden välille (esim. Shapiro, 1976; Molnar, 1981). Vähitellen kiinnostus tähän erityiskysymykseen laantui. Jälleen kerran oli törmätty siihen samaan ongelmaan, mihin lähes kaikki aikaisemmat ja myöhemmät tilastolliset tutkimukset Auringon aktiivisuuden ja ilmakehän ilmiöiden välillä ovat kaatuneet: korrelaation pysymättömyyteen. Tietyllä aikavälillä väitettyjen ilmiöiden välillä on tilastollisesti mitattuna hyvä korrelaatio, mutta aikavälillä laajennettaessa korrelaatio katoaa, koska todellista fysikaalista syy-seuraus-

suhdetta ei olekaan. Tämän saman huomion on sattuvasti todennut Geller (1989): "... *Without a plausible mechanism, it is much more likely that we are seeing physically unrelated, though correlated, internal variations in the Sun and internal variations in the atmosphere or ocean-atmosphere system. ...*" Viimeisin ja tunnetuin esimerkki tästä on 1990-luvulla paljon kohua herättänyt tutkimus, jonka mukaan maapallon lämpötilavaihtelut vuodesta 1850 vuoteen 1980 selittyvät auringonpilkkujakson pituuden muutoksilla tilastollisesti erinomaisesti (Friis-Christensen & Lassen, 1991). Selityksenä oli, että mitä lyhyempi auringonpilkkujakso on sitä aktiivisempi on Aurinko ja silloin myös maapallo vastaanottaa enemmän säteilyä ja lämpenee (kts. myös Ulich, 2000). Kun tätä korrelaatiosarjaa jatkettiin 2000-luvulle asti, huomattiin, ettei korrelaatio enää pätenykään: Auringon aktiivisuus kääntyi laskuun, mutta lämpötila jatkoi kasvuaan (Thjell & Lassen, 2000) (Kts. Kuva 11 ja 16). Tutkijoiden mukaan antropogeeniset tekijät selittävät lämpötilan kasvun paremmin kuin Auringon aktiivisuus. Svensmarkin (2000) kosmisen säteilyn ja pilvisyyden väliselle riippuvuudelle on käymässä samoin: kun aikasarjaa laajennetaan, korrelaatio huononee (Kristjansson et al., 2002; Kristjansson & Kristiansen, 2000).

Tänä päivänä käytävässä ilmastonmuutosdebatissa niin sanotut ilmastoskeptikot esittävät yhtenäisen väitettä, ettei mitään ihmisen aiheuttamaa kasvihuoneilmiön voimistumista ole olemassakaan, vaan kaikki muutos on luonnollista ja siihen suurimpana syyllisenä Aurinko ja sen säteilyvaihtelut lisättynä kosmisen säteilyn vaikutuksilla. Samat argumentit Auringon vaikutuksista on, kuten tässäkin kirjoituksessa tulee esille, esitetty jo vuosikymmeniä sitten.

Skeptikkojen kansainvälisen yhteisön kirjoituksia voi lukea internetistä, missä niitä on runsaasti tarjolla. Tosin "itsekustanteisina" verkkojulkaisuina niiden tieteellinen relevanssi jää epävarmaksi ja uskottavuutta vaille. Suurimpaan osaan skeptikoista pätee varsin oikeaan osuva luonnehdinta, että he ovat "*over-optimistic or naive amateurs working in isolation and without adequate criticism of either data or results*" (Lamb, 1977). Skeptikkojen motiiveja ovat myös sattuvasti analysoineet Rinne (2003) ja Korhola (2004).

Gellerin (1989) kommentti sopii hyvin myös niihin tutkimuksiin, joissa planeettojen aiheuttamat vetovoimavaikutukset liitetään auringonpilkkujen 11-vuotiseen esiintymiseen. Planeettojen vetovoimavaikutukset kiinnostivat tutkijoita ja alan harrastajia 1970-luvun lopulla, kun lähestymässä oli vuoden 1982 planeettakonjunktio, jolloin kaikki planeetat olivat asettumassa suunnilleen samalle suoralle samalla puolella Aurinkoa. Planeettojen aiheuttamat vuoksi- ja luodevoimien ennustettiin aktivoivan maapallolla geodynaamisia ilmiöitä (mm. maanjäristyksiä) (Gribbin & Plagemann, 1977). Wood (1973, 1975) laski, että planeettojen yhteenlaskettu vuoksi- ja luodevoima noudattaa likimain auringonpilkkujen 11-vuotista jaksollisuutta viimeisen noin 200 vuoden aikana ja väitti, että auringonpilkkujen synty johtuu vetovoimavaikutuksista. Kyseessä ei kuitenkaan voi olla kuin kahden suunnilleen samanjaksoisen ilmiön ajoittaisesta yhteensopivuudesta, koska Woodin ennusteet auringonpilkkujen maksimi- ja minimivuosista ovat jo 3-5 vuotta virheellisiä 1970-luvulta eteenpäin.

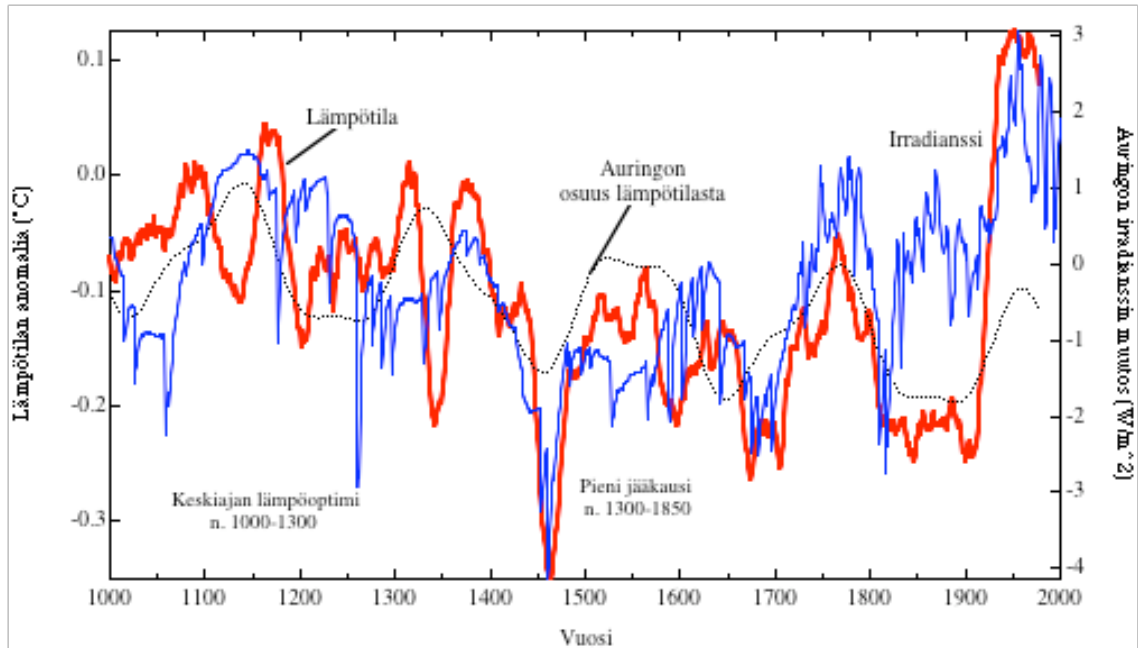
Usein esitetään väite, että niin sanottu Pieni jääkausi (noin 1350-1850; IPCC, 2001; Burroughs, 2001) maapallolla on aiheutunut alentuneesta Auringon säteilystä. Pienen jääkauden kylmin jakso sattui Auringon aktiivisuuden Maunderin kauden minimiin noin 1645-1710. Samoin niin sanottu Keskiajan lämpöoptimi, 1000-luvulta 1300-luvulle, on liitetty kohonneeseen Auringon aktiivisuuden tasoon (vrt. Kuva 17). Toisaalta maapallon lämpötilakehityksen rekonstruoinnit viimeksi kuluneen 1000 vuoden ajalta eivät tuo esille sellaisia lämpötilan heilahduksia, jotka vastaisivat suuruudeltaan nyt käynnissä olevaa lämpötilan kasvua (Mann et al., 1999; Crowley, 2000; IPCC, 2001). Mann & Jones (2003) simuloivat lämpötilan vaihtelua proksiaineistoista noin 2000 vuotta ajassa taaksepäin. Heidän saamansa tuloksen mukaan ennen nykyistä lämpötilahuippua lähinnä korkeimmat lämpötilat saavutettiin aikavälillä 800 - 1400, joka pitää sisällään Keskiajan lämpöoptimikauden.

Sekä Pieni jääkausi että Keskiajan lämpöoptimi eivät myöskään ole mitenkään yksiselitteisesti globaaleja ilmiöitä, vaan ajallisesti ja paikallisesti erilaisia (Burroughs, 2001). Kuvan 17 mukaan Keskiajan lämpöoptimi näyttää olevan lämpötilan vaihtelujen osalta yhtenäisempi kuin Pieni jääkausi, jonka aikana on sekä poikkeuksellisen lämpimiä että kylmiä episodeja. Mikä näissä lämpötila-anomaliaissa on Auringon osuutta ja mikä luonnollista variaatiota, on vielä lopullisesti selvittämättä. Tietokone-

simulaatiot viittaavat kuitenkin vahvasti siihen, että esim. Maunderin minimin aikainen lämpötilan lasku Euroopassa seuraa NAO-ilmion poikkeuksellista vaihtelua 1645-1715, mutta Auringon aktiivisuuden ja vulkanismin mukaanotto antaa parempia tuloksia (esim. Fischer-Bruns et al., 2002). Tämä käy ilmi myös Kuvasta 17, jossa on maapallon lämpötilan rekonstruktio ajalle 1000-1980 (Mann et al., 1999) ja Auringon säteilyn muutos, missä on myös mukana suurten tulivuoripurkauksien aiheuttama säteilyn heikkeneminen (Crowley, 2000) (vrt. myös Kuva 8). Auringon säteilyn rekonstruktio perustuu pääasiassa kosmogeenisen isotoopin ^{10}Be vaihteluihin. Auringon nettosäteily saadaan, kun Kuvassa 16 irradianssi kerrotaan tekijällä $0.25(1 - \alpha) \approx 0.18$ (vrt. yhtälö 3.1).

Kuten Kuvasta 16 voidaan havaita niin ilmeistä on, että Auringon säteilyn muutoksilla on olennainen osuus pitkäaikaisissa lämpötilan vaihteluissa. Auringonpilkkujen esiintymisfrekvensseistä ja Auringon aktiivisuuden proksitiedoista (esim. ^{10}Be -vaihtelut ja revontulien esiintymistilastot, kts. esim. Silverman, 1983) tiedetään, että Auringon aktiivisuudella on auringonpilkkujakson lisäksi muitakin pysyviä jaksollisuuksia. Tällaisia ovat esim. Gleissbergin jaksollisuus (Gleissberg, 1965; Usoskin & Mursula, 2003), jonka kesto on 60-120 vuotta ja keskiarvona pidetään 90 vuotta. Toinen sekulaarinen vaihtelujakso on de Vriesin jakso, kestoltaan 200-210 vuotta. (Usoskin & Mursula, 2003). Kuvassa 16 on näiden kahden jaksollisuuden (90 v. ja 210 v.) aiheuttama tilastollinen sovitus maapallon lämpötilaan aikavälille 1000-1980. Sovitus seuraa kohtalaisen hyvin lämpötilan vaihtelua ja noin 15 % lämpötilan varianssista voidaan selittää pelkästään Auringon aktiivisuuden de Vriesin ja Gleissbergin jaksoilla. Sovituksessa on mukana lineaarinen osuus ($\approx 0,01 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{v}$), joka kuvaa Milankovichin astronomisen ilmastonmuutosteorian mukaista maapallon lämpötilan hidasta jäähtymistä. Se voidaan havaita myös Mann et al. (1999) lämpötilarekonstruktiossa (Kuva 17).

Korrelaatio irradianssin ja lämpötilan välillä on 0.55 koko tuhatvuotiskaudella. Esim. Crowley (2000) on arvioinut, että maksimissaan Auringon säteilymuutokset yhdessä tulivuoritoiminnan kanssa selittävät esiteollisen ajan (ennen vuotta 1850) lämpötilan -muutoksista 60 %.



Kuva 17. Punainen: maapallon lämpötilan rekonstruktio vuosille 1000-1980 (Mann et al., 1999) (22-vuoden tasoint) Sininen: Auringon irradianssin rekonstruktio vuosille 1000-2000 (Crowley, 2000). Mukana on myös suurten tulivuortenpurkauksien aiheuttama säteilyn pieneneminen

Katkoviiva: tilastollinen approksimaatio Auringon aktiivisuuden aiheuttamasta lämpötilan vaihtelusta, kun aktiivisuudeksi otetaan de Vriesin (periodi 210 v.) ja Gleissbergin (90 v.) jaksollisuuksien superpositio lisättyinä lineaarisella muutoksella ($-0.01^{\circ}\text{C}/100\text{v}$)

Kuvan 17 lämpötilarekonstruktioista (Mann et al., 1998, 1999) on usein käytetty nimitystä "Hockeystick", koska sen muoto muistuttaa aika-akselille asetettua jääkiekkomailaa: alaspäin viettävä varsi vuosille noin 1000-1900 ja viistosti ylöspäin kääntyvä mailan lapa kuvaa 1900-luvun lämpötilan nousua. Lämpötilarekonstruointia on kritisoitu ja väitetty jopa täysin virheelliseksi tosin varsin kevein perustein (McIntyre & McKittrick, 2003). Toisaalta useat vastaavat muut rekonstruoinnit samalle ajanjaksolle (esim. Jones et al., 2001; Crowley, 2000) osoittavat samanlaista vaihtelua kuin Mann et al. (1998, 1999) saama tulos, joten lämpötilan "Hockeystick"-käyrää on pidettävä pääosin oikeana ainakin niin paljon kuin proksiaineistoista on fysikaalisesti perustellusti pääteltävissä.

11. Johtopäätöksiä

* Satelliittimittauksista kolmen viimeksikuluneen auringonpilkkujakson ajalta tiedetään, että aurinkovakio kasvaa pilkkuminimistä pilkkumaksimiin noin $1 \text{ W}/\text{m}^2$, joka vastaa maapallon lämpötilan muutosta $< 0.1^{\circ}\text{C}$. Aurinkovakiossa ei ole samana

aikana ollut merkittävää systemaattista kasvua, joten Auringon irradianssin muutokset eivät selitä samana aikana havaittua maapallon lämpötilan kasvua

* Auringonpilkkujakson (11 v) yli tasoitetuissa lämpötiloissa on vaihtelua, joka voidaan tulkita aurinkoperäiseksi varsinkin aikavälillä (noin) 1925-1970, mutta sen osuus vaihtelee tarkastelukauden eri osissa eri tavalla, mikä viittaa ilmakehän muiden fysikaalisten prosessien (esim. kasvihuoneilmion voimistuminen viime vuosikymmenien osalta) suurempaan vaikutukseen. 1900-luvun alussa tapahtuneessa lämpötilan nousussa on noin 10 % aurinkoperäinen osuus, jos lämpötilan kasvu tulkitaan Auringon irradianssin noususta johtuvaksi

* Lämpötilan kasvu (noin) vuodesta 1970 korreloituu vahvasti hiilidioksidipitoisuuden kasvuun

* Auringonpilkkuluvuilla mitattuna vuodesta toiseen tapahtuvassa globaalilämpötilan muutoksissa ei ole aurinkoperäistä vaikutusta ajanjaksolla 1856-2003

* Maapallon globaalilämpötila on kasvanut 1970-luvun alusta lähtien, vaikka Auringon aktiivisuus on kääntynyt laskuun yli 20 vuotta sitten

* Svensmarkin (2000) ja muiden tanskalaistutkijoiden (esim. Marsh & Svensmark, 2000) esittämä hypoteesi siitä, että kasvihuoneilmion voimistumisen aiheuttama lämpötilan kasvu selittyisi Auringon aktiivisuudella (muuttuva kosminen säteily) ja sen vaikutuksesta lisääntyneellä pilvisyydellä, on osoittautumassa epäuskottavaksi. Samansuuntaisia vaikutusmekanismeja Auringon aktiivisuuden ja sääilmiöiden välille esitettiin jo 1950-luvulla. Auringon aktiivisuuden aiheuttamiksi väitetty matalapaineiden voimistuminen yhden auringonpilkkujakson aikana 1960-luvulla osoittautui myöhemmästä aineistosta tilastollisesti pysymättömäksi. Kiinnostus aihepiiriin laantui 1970-luvun loppuun mennessä kasvaakseen uudelleen noin kaksi auringonpilkkujaksoa myöhemmin 1990-luvun alussa (Friis-Christensen & Lassen, 1991)

* Auringon aktiivisuuden osuus maapallon lämpötilan hitaissa sekulaarisissa muutoksissa (90 - 200 v) on merkittävä. Todennäköisesti sen osuus on selvästi suurempi kuin 20 %. Ylärajana on pidettävä arvoa 60 % (Crowley, 2000).

* Suuret tulivuorten purkaukset (esim. Pinatubo 1991) aiheuttavat globaalilämpötilaan noin 0.1 °C pudotuksen 1-2 vuoden ajaksi, jonka jälkeen lämpötilakehitys palaa ennalleen

* Magneettinen häiriöindeksi a_a mittaa maapallolle saapuvan aurinkoperäisten häiriöiden määrää tarkemmin kuin perinteinen auringonpilkkuluku (R) varsinkin pilkkujen maksimivuosina ja niiden laskevalla kaudella

12. Viittauksia

- American Institute of Physics, 2003. The Discovery of Global Warming.
<http://www.aip.org/history/climate/>.
- Andronova, N.G. and Schlesinger, M.E., 2000. Causes of global temperature changes during the 19th and 20th centuries. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 2137-2140.
- Angervo, J.M., 1948. Sääopin perusteet, WSOY, 457 s.
- Arrhenius, S., 1896. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine* 41, 237-76.
- Bandeen, W.R. and Maran, S.P., 1975. Possible relationships between solar activity and meteorological phenomena. Proceedings of a symposium held at Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, Nov. 7-8, 1973. NASA SP-366, 263 p.
- Beer, et al., 1990. Use of ^{10}Be in polar ice to trace the 11-cycle of solar activity. *Nature*, 347, 164-166.
- Burroughs, W.J., 2001. Climate change. Cambridge Univ. Press, 298 p.
- Callendar, G.S., 1938. The artificial production of carbon dioxide and its influence on climate. *Quart. J. Roy. Meteor. Society* 64, 223-40.
- Chapman, S. and Bartels, J., 1940. Geomagnetism, Vol. I & II. Oxford, Clarendon Press.
- Crowley, T. J., 2000. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 289, 270-277.
- Douglass, D.H. and Clader, B.D., 2002. Climate sensitivity of the Earth to solar irradiance. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 101029/2002GL015345.
- Dütsch, H.U., 1979. The search for solar-ozone relationships. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 41, 771-785
- Eddy, J.A., 1980. The ancient sun. New York, Pergamon.
- Eronen, M., 1991. Jääkausien jäljillä. URSA.
- Fischer-Bruns, I., Cubasch, U., von Storch, H., Zorita, E., González-Rouco, F., and Luterbacher J., 2002. Modelling the Late Maunder Minimum with a 3-dimensional Ocean-Atmosphere GCM. *CLIVAR Exchanges*, 25, 59-61.
- Friis-Christensen, E. and Lassen, K., 1991. Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate. *Science*, 254, 698-700.

- Fröhlich, C. and Lean J., 1988. The Sun's total irradiance, trend, and related climate change since 1976. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 4377-4380.
- Geller, M.A., 1989. Variations without forcing. *Nature*, 342, 15-16.
- Gleissberg, W., 1965. The eighty-year solar cycle in auroral frequency numbers. *J. Brit. Astron. Ass.*, 75, 227-240.
- Gribbin, J. and Plagemann, S., 1977. *The Jupiter effect*. Fontana, 156 p.
- Haigh, J., 1999. Modelling the impact of solar variability on climate. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 61, 63-72.
- Hann, J., 1915. *Lehrbuch der Meteorologie*. Leipzig.
- Heino, R., 1994. Climate in Finland during the period of meteorological observations. *Finn. Met. Inst. Contributions*, 12, 209 p.
- Heiskanen, V.A., 1948. *Tähtitiede I & II*. WSOY.
- Herschel, W., 1801. Observations tending to investigate the nature of the Sun. *Phil. Trans. of the Royal Soc. of London* 265, 265-318.
- Hoyt, D. V. and Schatten, K. H., 1998. Group Sunspot Numbers: A new solar activity reconstruction. *Solar Physics*, 181, 491-512.
- IPCC, 2001. *Climate change 2001. The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 881pp. (kts. myös www.ipcc.ch).
- Johansson, O.J., 1905. Über die Zusammenhang der meteorologischen Erscheinungen mit Sonnenfleckenperioden. *Meteor. Zeitschrift*. 145-159
- Johnson, M.O., 1950. *Cycles in weather and solar activity*. Pacific Press, USA, 224 p.
- Jones, P.D., et al., 1986. Global temperature variations between 1861 and 1984. *Nature* 322, 430-434.
- Jones, P.D., New, M., Parker, D.E., Martin, S., and Rigor, I.G., 1999. Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Rev. Geophys.*, 37, 173-199.
- Jones, P.D., Osborn, T.J., and Briffa, K.B., 2001. The evolution of the climate over the last Millennium. *The Holocene*, 8, 662-667.
- Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff, E. ja Manner O., 1998. *Ilmakehä ja sää*. URSA, 365 s.
- Keeling, C. D. , 1960. The concentration and isotopic abundances of carbon

- dioxide in the atmosphere. *Tellus* 12, 200-203.
- Kernthaler, S.C., Toumi, R., and Haigh, J.D., 1999. Some doubts concerning a link between cosmic ray fluxes and global cloudiness. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 863-865.
- Koivisto, M. (toim.), 2004. *Jääkaudet*. WSOY, 233 s.
- Kondratyev, K.Ya., and G.A. Nikolsky, 1970. Solar radiation and solar activity. *Quarterly J. Royal Met. Soc.*, 96, 509-22.
- Korhola, A., 2004. Miksi ilmastonmuutos herättää niin suurta keskustelua? *TIEDE* 4/2004, 39.
- Koskinen, H., 2001. Johdatus plasmafysiikkaan ja sen avaruussovelluksiin. *Limes*, 256 s.
- Kristjansson, J.E. and Kristiansen, J., 2000. Is there a cosmic ray signal in recent variations in global cloudiness and cloud radiative forcing? *J. Geophys. Res.*, 105, 11851-11863.
- Kristjansson, J.E., Staple, A., Kristiansen, J., and Kaas, E., 2002. A new look at possible connections between solar activity, clouds and climate. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 2107-2110.
- Krivova, N.A., Solanki, S.K., Fligge, M., and Unruh, Y.C., 2003. Reconstruction of solar irradiance variations in cycle 23: Is solar surface magnetism the cause? *Astr. Astrophys.*, 399, L1-L4.
- Köppen, W., 1873. Über mehjährige Perioden der Witterung, insbesondere über die 11jährige Periode der Temperature. *Zeitschrift Meteor.*, VIII, 241-248.
- Lamb, H. H., 1977. *Climatic History and the Future*. Princeton Univ. Press.
- Laulaja, V., 1971. Eräitä paleoklimatologiaan liittyviä geofysikaalisia ongelmia. V *Geofysiikan päivät*, Oulu, s. 9-27.
- Laulaja, V., 1972. *Jääkaudet Suomessa. Mitä Missä Milloin* 1973, 87-91.
- Lean, J.L., 2001. Solar irradiance and climate forcing near future. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 4119-4122.
- Lean, J.L. and Rind, D., 1998. Climate forcing by changing solar radiation. *J. Climate*, 11, 3069-3094.
- Lockwood, M., Stamper, R. and Wild, M.N., 1999. A doubling of the Sun's coronal magnetic field during the past 100 years. *Nature*, 399, 437-439.
- Loon, H. van and Labitzke, K., 1999. The signal of the 11-year solar cycle in the

- global stratosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 61, 53-61.
- Mann, M. E., Bradley, R. S. and Hughes, M., 1998. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, 392, 779-787
- Mann, M.E., Bradley, R.S., and Hughes, M.K., 1999. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 759-763.
- Mann, M.E. and Jones, P. D., 2003. Global surface temperatures over the past two millennia. *Geophys. Res. Lett.*, 30, doi:10.1029/2003GL017814.
- Marsh, N.D. and Svensmark, H., 2000. Low cloud properties influenced by cosmic rays. *Phys. Rev. Lett.*, 85, 5004-5007.
- Marsh, N.D. and Svensmark, H., 2003. Galactic cosmic ray and El Nino-Southern oscillation trends in International Satellite Cloud Climatology Project D2 low-cloud properties. *J. Geophys. Res.*, 108, doi10.1029/2001JD001264.
- McIntyre, S. and McKittrick, R., 2003. Corrections to the Mann et al. (1998) proxy data base and northern hemispheric average temperature series. *Energy & Environment*, 14, 751-771.
- McKinnon, J.A., 1987. Sunspot numbers: 1610-1985. WDC-A. Report UAG-95.
- Melander, G., 1931. Nykyajan sääoppi. WSOY, 492 s.
- Menvielle, M. and Berthelier, A., 1991. The *K*-derived planetary indices: Description and availability. *Rev. Geophys.*, 29, 413-432.
- Mitchell, J. M., 1961. Recent secular changes of global temperature. *Annals of the New York Academy of Sciences* 95, 235-50.
- Mitchell, J. M., 1972. The natural breakdown of the present interglacial and its possible intervention by human activities. *Quaternary Res.*, 2, 436-45.
- Molnar, G., 1981. A survey of possible effects of long-lasting absence of solar activity on climate and some speculations on possible mechanisms. *Clim. Change*, 3, 189-203.
- Murdin, P. (Ed.), 2001. *Encyclopedia of astronomy and astrophysics*. Inst. of Physics Publ., Vols. 1-4.
- Mursula, K. and Ulich, T., 1998. A new method to determine the solar cycle length. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1837-1840.
- Nevanlinna, H., 1974. Auringon aktiivisuuden vaikutus sääilmiöihin. Ilmatieteen laitos, Tutkimusseloste No. 52, 41 s.

- Nevanlinna, H., 2001a. Auringon magneettikenttä ja sen geofektiivisyys. XX Geofysiikan päivät, Helsinki, s. 141-146.
- Nevanlinna, 2001b. Aurinko ei selitä lämpenemistä. TIEDE 8/2001, 53-55.
- Nevanlinna, H., 2002. Perustietoa geomagnetismista. Ilmatieteen laitos, geofysikaalisia julkaisuja, 53, 115 s.
- Nevanlinna, H., 2004. Results of the Helsinki magnetic observatory 1844-1912. *Ann. Geophys.*, 22, 1691-1704.
- Ney, E.P., 1959. Cosmic radiations and the weather. *Nature*, 183, 451-452.
- Ossendrijver, M., 2003. The solar dynamo. *Astr. Astrophys.*, 11, 287-367.
- Paillard, D., 2001. Glacial cycles: Toward a new paradigm. *Rev. Geophys.*, 39, 325-346.
- Parker, D.E., Alexander, L.V. and Kennedy, J., 2004. Global and regional climate in 2003. *Weather*, 59, 145-152.
- Rinne, J., Koistinen, J. ja Saltikoff, E. (toim.), 1998. Suomalainen sääkirja. Yhtyneet kuvalehdet, 253 s.
- Rinne, J. 2001. Kasvihuoneilmiö: tarua vai totta? Tiede ja elämä (toim. J. Rydman), s. 71-77, Tieteellisten Seurain Valtuuskunta.
- Rinne, J. 2003. Miksi julkisuudessa ollaan niin eri mieltä ilmastonmuutoksesta? Tieteessä tapahtuu, 2/2003, 38-43.
- Roberts, W.O. and Olson, R.H., 1973. Geomagnetic storms and wintertime 300-mb trough development in the North Pacific - North America area. *Journ. Atm. Sci.*, 30, 135-140.
- Russell, C.T. and Mulligan, T., 1995. The 22-year variation of geomagnetic activity: Implications for the polar magnetic field of the Sun. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 3287-3288.
- Schlesinger, M.E. and Ramankutty, N., 1994. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. *Nature*, 367, 723-726.
- Schöve, D. J., 1955. The Sunspot Cycle 649 BC to AD 2000. *J. Geophys. Res.* 60, 127-146.
- Schrijver, C.J. and Zwaan, C., 2000. Solar and stellar magnetic activity. Cambridge Univ. Press, 384 p.
- Shapiro, R., 1976. Solar magnetic sector structure and terrestrial atmospheric vorticity. *Journ. Atm. Sci.*, 33, 865-870.

- Shindell, D., Rind, D., Balachandran, N., Lean, J., and Lonergan, P., 1999. Solar cycle variability, ozone and climate. *Science*, 284, 305-308.
- Silverman, S. M., The visual aurora as a predictor of solar activity, *J. Geophys. Res.*, 88, 8123-8128, 1983.
- Simojoki H., 1978. The history of geophysics in Finland 1828-1918. *Societas Scientarium Fennica, Helsinki*, 157 p.
- Solanki, S.K., 2003. Sunspots: An overview. *Astr. Astrophys.*, 11, 153-286.
- Solanki, S.K. and Krivova, N.A., 2003. Can solar variability explain global warming since 1970? *J. Geophys. Res.*, 108, doi: 10.1029/2002JA009753.
- Solanki, S.K., Schüssler, M. and Fligge, M., 2000. Evolution of the Sun's large-scale magnetic field since the Maunder minimum. *Nature*, 408, 445-447.
- Stamper, R., Lockwood, M. and Wild, M. N., 1999. Solar causes of the long-term increase in geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, 104, 28325 - 28345.
- Stott, P.A., Tett, S.F.B., Jones, G.S, Allen, M.R., Mitchell, J.F.B., and Jenkins, G.J., 2000. External control of twentieth century temperature variations by natural and anthropogenic forcings. *Science*, 15, 2133-2137.
- Stott P.A., Jones, G.S., and Mitchell, J.F., 2003. Do models underestimate the solar contribution to recent climate change? *J. Climate*, 16, 4079-4093.
- Svensmark, H., 2000. Cosmic rays and Earth's climate, *Space Sci. Rev.*, 93, 161-170.
- Thejll, P. and Lassen, K., 2000. Solar forcing of the Northern hemisphere land air temperature: New data. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 62, 1207-1213.
- Ulich, T., 2000. Solar variability and long-term trends in the ionosphere. *Sodankylä Geophys. Obs. Publ.*, No. 87.
- Usoskin, I.G. and Mursula, K., 2003. Long-term solar cycle evolution: Review of recent developments. *Solar Phys.*, 218, 319-343.
- Wagner, G., Livingstone, D.M., Masarik, J., Muscheler, R., and Beer, J., 2001. Some results relevant to the discussion of a possible link between cosmic rays and the Earth's climate. *J. Geophys. Res.*, 106, 3381-3388.
- Waldmeier, M., 1960. The sunspot-activity in the years 1610-1960. *Swiss Federal Observatory, Zürich, Switzerland*.
- Weart, S.R., 2003. The discovery of global warming. *Univ. Press, Cambridge*, 221 p.
- Wilcox, J.M., Scherrer, P., Svalgaard, L., Roberts, W.O., Olson, R., and Jenne, R.,

1973. Solar magnetic sector structure: Relation to circulation of the Earth's atmosphere. *Science*, 180, 185-187.
- Willson, R.C., 1997. Total solar irradiance trend during solar cycles 21 and 22. *Science*, 277, 1963-1965.
- Wilson, R.M., 1998. Evidence for solar-cycle forcing and secular variation in the Armagh observatory temperature record (1844-1992). *J. Geophys. Res.*, 103, 11159-11171.
- Wood, K.D., 1972. Sunspots and planets. *Nature*, 240, 91-93.
- Wood, R.M., 1975. Comparison of sunspot periods with planetary synodic period resonances. *Nature*, 255, 312-313.
- Woodbridge, D.D., 1971. Comparison of geomagnetic storms and trough development at solar maximum and minimum. *Plan. Space Sci.*, 19, 821-826.
- Woodbridge, D.D., Pohrte, T.W., and McDonald, N.J., 1958. A possible relationship of geomagnetic disturbances to 300 mb trough development. *Journ. Met.*, 15, 247- 248.
- Woodbridge, D.D., Pohrte, T.W., and McDonald, N.J., 1959. An apparent relationship between geomagnetic disturbances and changes in atmospheric circulation at 300 mb. *J. Geophys. Res.*, 64, 331-342.

RAPORTTEJA — RAPPORTER — REPORTS

- 1986:
1. Savolainen, Anna Liisa et al., 1986. Radioaktiivisten aineiden kulkeutuminen Tshernobylin ydinvoimalaonnettomuuden aikana. Väliaikainen raportti. 39 s.
 2. Savolainen, Anna Liisa et al., 1986. Dispersion of radioactive release following the Chernobyl nuclear power plant accident. Interim report. 44 p.
 3. Ahti, Kari, 1986. Rakennussääpalvelukokeilu 1985-1986. Väliraportti Helsingin ympäristön talvikokeilusta 18.11.-13.3.1986. 26 s.
 4. Korhonen, Ossi, 1986. Pintatuulen vertailumittauksia lentoasemilla. 38 s.
- 1987:
1. Karppinen, Ari et al., 1987. Description and application of a system for calculating radiation doses due to long range transport of radioactive releases. 50 p.
 2. Venäläinen, Ari, 1987. Ilmastohavaintoihin perustuva arvio jyrksinturpeen tuotantoedellytyksistä Suomessa. 35 s.
 3. Kukkonen, Jaakko ja Savolainen, Anna Liisa, 1987. Myrkyllisten kaasujen päästöt ja leviäminen onnettomuustilanteissa. 172 s.
 4. Nordlund, Göran ja Rantakrans, Erkki, 1987. Matemaattisfysikaalisten ilmanlaadun arviointimallien luotettavuus. 29 s.
 5. Ahti, Kari, 1987. Rakennussäätutkimuksen loppuraportti. 45 s.
 6. Hakola, Hannele et al., 1987. Otsonin vaihteluista Suomessa yhden vuoden havaintoaineiston valossa. 64 s.
 7. Tammelin, Bengt ja Erkiö, Eero, 1987. Energialaskennan säätiedot – suomalainen testivuosi. 108 s.
- 1988:
1. Eerola, Kalle, 1988. Havaintojen merkityksestä numeerisessa säänennustuksessa. 36 s.

2. Fredrikson, Liisa, 1988. Tunturisääprojekti 1986-1987. Loppuraportti. 31 s.
 3. Salmi, Timo and Joffre, Sylvain, 1988. Airborne pollutant measurements over the Baltic Sea: meteorological interpretation. 55 p.
 4. Hongisto, Marke, Wallin, Markku ja Kaila, Juhani, 1988. Rikkipäästöjen vähentämistoimenpiteiden taloudellisesti tehokas valinta. 80 s.
 5. Elomaa, Esko et al., 1988. Ilmatieteen laitoksen automaattisten merisääasemien käyttövarmuuden parantaminen. 55 s.
 6. Venäläinen, Ari ja Nordlund, Anneli, 1988. Kasvukauden ilmastotiedotteen sisältö ja käyttö. 63 s.
 7. Nieminen, Rauno, 1988. Numeeristen paine- ja korkeuskenttäennusteiden objektiivinen verifiointisysteemi sekä sen antamia tuloksia vuosilta 1985 ja 1986. 35 s.
- 1989: 1. Ilvessalo, Pekko, 1989. Yksittäisestä piipusta ilmaan pääsevien epäpuhtauksien suurimpien tuntipitoisuuksien arviointimenetelmä. 21 s.
- 1992: 1. Mhita, M.S. and Venäläinen, Ari, 1991. The variability of rainfall in Tanzania. 32 p.
2. Anttila, Pia (toim.), 1992. Rikki- ja typpilaskeuman kehitys Suomessa 1980-1990. 28 s.
- 1993: 1. Hongisto, Marke ja Valtanen Kalevi, 1993. Rikin ja typen yhdisteiden kaukokulkeutumismallin kehittäminen HIRLAM-sääennustemallin yhteyteen. 49 s.
2. Karlsson, Vuokko, 1993. Kansalliset rikkidioksidin analyysivertailut 1979 - 1991. 27 s.
- 1994: 1. Komulainen, Marja-Leena, 1995. Myrsky Itämerellä 28.9.1994. Säätilan kehitys Pohjois-Itämerellä M/S Estonian onnettomuusyönä. 42 s.
2. Komulainen, Marja-Leena, 1995. The Baltic Sea Storm on 28.9.1994. An investigation into the weather situation which developed in the northern Baltic at the time of the accident to m/s Estonia. 42 p.

- 1995: 1. Aurela, Mika, 1995. Mikrometeorologiset vuomittausmenetelmät - sovelluksena otsonin mittaaminen suoralla menetelmällä. 88 s.
2. Valkonen, Esko, Mäkelä, Kari ja Rantakrans, Erkki, 1995. Liikenteen päästöjen leviäminen katukuilussa - AIG-mallin soveltuvuus maamme oloihin. 25 s.
3. Virkkula, Aki, Lättilä, Heikki ja Koskinen, Timo, 1995. Otsolin maanpintapitoisuuden mittaaminen UV-säteilyn absorptiolla: DOAS-menetelmän vertailu suljettua näytteenottoalaa käyttävään menetelmään. 29 s.
4. Bremer, Pia, Ilvessalo, Pekko, Pohjola, Veijo, Saari, Helena ja Valtanen, Kalevi, 1995. Ilmanlaatuennusteiden ja -indeksin kehittäminen Helsingin Käpylässä suoritettujen mittausten perusteella. 81 s.
- 1996: 1. Saari, Helena, Salmi, Timo ja Kartastenpää, Raimo, 1996. Taajamien ilmanlaatu suhteessa uusiin ohjearvoihin. 98 s.
- 1997: 1. Solantie, Reijo, 1997. Keväthallojen alueellisista piirteistä ja vähän talvipakkastenkin. 28 s.
- 1998: 1. Paatero, Jussi, Hatakka, Juha and Viisanen, Yrjö, 1998. Concurrent measurements of airborne radon-222, lead-210 and beryllium-7 at the Pallas-Sodankylä GAW station, Northern Finland. 26 p.
2. Venäläinen, Ari ja Helminen, Jaakko, 1998. Maanteiden talvikunnossapidon sääindeksi. 47 s.
3. Kallio, Esa, Koskinen, Hannu ja Mälkki, Anssi, 1998. VII Suomen avaruustutkijoiden COSPAR-kokous, Tiivistelmät. 40 s.
4. Koskinen, H. and Pulkkinen, T., 1998. State of the art of space weather modelling and proposed ESA strategy. 66 p.
5. Venäläinen, Ari ja Tuomenvirta Heikki, 1998. Arvio ilmaston lämpenemisen vaikutuksesta teiden talvikunnossapidon kustannuksiin. 19 s.
- 1999: 1. Mälkki, Anssi, 1999. Near earth electron environment modelling tool user/software requirements document. 43 p.
2. Pulkkinen, Antti, 1999. Geomagneettisesti indusoituvat

- virrat Suomen maakaasuverkostossa. 46 s.
- 3 Venäläinen, Ari, 1999. Talven lämpötilan ja maanteiden suolauksen välinen riippuvuus Suomessa. 16 s.
 - 4 Koskinen, H., Eliasson, L., Holback, B., Andersson, L., Eriksson, A., Mälkki, A., Nordberg, O., Pulkkinen, T., Viljanen, A., Wahlund, J.-E., Wu, J.-G., 1999. Space weather and interactions with spacecraft: space final report. 191 p.
- 2000:
- 1 Solantie, Reijo ja Drebs, Achim, 2000. Kauden 1961 - 1990 lämpöoloista kasvukautena alustan vaikutus huomioiden, 38 s.
 - 2 Pulkkinen, Antti, Viljanen, Ari, Pirjola, Risto, and Bear working group, 2000. Large geomagnetically induced currents in the Finnish high-voltage power system. 99 p.
 - 3 Solantie, R. ja Uusitalo, K., 2000. Patoturvallisuuden mitoitussadannat: Suomen suurimpien 1, 5 ja 14 vrk:n piste- ja aluesadantojen analysointi vuodet 1959 - 1998 kattavasta aineistosta. 77 s.
 - 4 Tuomenvirta, Heikki, Uusitalo, Kimmo, Vehviläinen, Bertel, Carter, Timothy, 2000. Ilmastonmuutos, mitoitussadanta ja patoturvallisuus: arvio sadannan ja sen ääriarvojen sekä lämpötilan muutoksista Suomessa vuoteen 2100. 65 s.
 - 5 Viljanen, Ari, Pirjola, Risto and Tuomi, Tapio, 2000. Abstracts of the URSI XXV national convention on radio science. 108 p.
 - 6 Solantie, Reijo ja Drebs, Achim, 2000. Keskimääräinen vuoden ylin ja alin lämpötila Suomessa 1961 - 90. 31 s.
 - 7 Korhonen, Kimmo, 2000. Geomagneettiset mallit ja IGRF-appletti. 85 s.
- 2001:
- 1 Koskinen, H., Tanskanen, E., Pirjola, R., Pulkkinen, A., Dyer, C., Rodgers, D., Cannon, P., Mandeville, J.-C. and Boscher, D., 2001. Space weather effects catalogue. 41 p.
 - 2 Koskinen, H., Tanskanen, E., Pirjola, R., Pulkkinen, A., Dyer, C., Rodgers, D., Cannon, P., Mandeville, J.-C. and Boscher, D., 2001. Rationale for a european space weather programme. 53 p.

- 3 Paatero, J., Valkama, I., Makkonen, U., Laurén, M., Salminen, K., Raittila, J. and Viisanen, Y., 2001. Inorganic components of the ground-level air and meteorological parameters at Hyytiälä, Finland during the BIOFOR project 1998-1999. 48 p.
 - 4 Solantie, Reijo, Drebs, Achim, 2001. Maps of daily and monthly minimum temperatures in Finland for June, July, and August 1961-1990, considering the effect of the underlying surface. 28 p.
 - 5 Sahlgren, Vesa, 2001. Tuulikentän alueellisesta vaihtelusta Längelmävesi-Roine -järvialueella. 33 s.
 - 6 Tammelin, Bengt, Heimo, Alain, Leroy, Michel, Rast, Jacques and Sääntti, Kristiina, 2001. Meteorological measurements under icing conditions : EUMETNET SWS II project. 52 p.
- 2002:
- 1 Solantie, Reijo, Drebs, Achim, Kaukoranta, Juho-Pekka, 2002. Lämpötiloja eri vuodenaikoina ja eri maastotyypeissä Alajärven Möksyssä. 57 s.
 - 2 Tammelin, Bengt, Forsius, John, Jylhä, Kirsti, Järvinen, Pekka, Koskela, Jaakko, Tuomenvirta, Heikki, Turunen, Merja A., Vehviläinen, Bertel, Venäläinen, Ari, 2002. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia energiantuotantoon ja lämmitysenergian tarpeeseen. 121 s.
- 2003:
1. Vajda, Andrea and Venäläinen, Ari, 2003. Small-scale spatial variation of climate in northern Finland. 34 p.
 2. Solantie, Reijo, 2003. On definition of ecoclimatic zones in Finland. 44 p.
 3. Pulkkinen, T.I., 2003. Chapman conference on physics and modelling of the inner magnetosphere Helsinki, Finland, August 25 -29, 2003. Book of abstracts. 110 p.
 4. Pulkkinen, T. I., 2003. Chapman conference on physics and modelling of the inner magnetosphere Helsinki, Finland, August 25 -29, 2003. Conference program. 16 p.
 5. Merikallio, Sini, 2003. Available solar energy on the dusty Martian atmosphere and surface. 84 p.
 6. Solantie, Reijo, 2003. Regular diurnal temperature variation in the Southern and Middle boreal zones in

Finland in relation to the production of sensible heat. 63 p.

- 2004:
1. Solantie, Reijo, Drebs, Achim and Kaukoranta, Juho-Pekka, 2004. Regular diurnal temperature variation various landtypes in the Möksy experimental field in summer 2002, in relation to the production of sensible heat. 69 p.
 2. Toivanen, Petri, Janhunen, Pekka and Koskinen, Hannu, 2004. Magnetospheric propulsion (eMPii). Final report issue 1.3. 78 p.
 3. Tammelin, Bengt et al., 2004. Improvements of severe weather measurements and sensors – EUMETNET SWS II project. 101 p.
 4. Nevanlinna, Heikki, 2004. Auringon aktiivisuus ja maapallon lämpötilan vaihtelut 1856-2003. 48 p.