



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

RAPORTTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2012:3

AURINGON AKTIIVISUUS JA
ILMASTONMUUTOS

HEIKKI NEVANLINNA

RAPORTTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2012:3

AURINGON AKTIIVISUUS JA ILMASTONMUUTOS

Heikki Nevanlinna

Ilmatieteen laitos
Meteorologiska Institutet
Finnish Meteorological Institute

Helsinki 2012

ISBN 978-951-697-771-6 (nid.)
ISBN 978-951-697-772-3 (pdf)
ISSN 0782-6079

Unigrafia
Helsinki 2012



Julkaisija Ilmatieteen laitos, (Erik Palménin aukio 1)
PL 503, 00101 Helsinki

Julkaisuaika 1.9.2012

Tekijä(t):
Heikki Nevanlinna

Projektin nimi

Nimeke: Auringon aktiivisuus ja ilmastonmuutos

Tiivistelmä

Auringon kokonaissäteilyssä on satelliittimittausten mukaan heikko alle ± 0.1 % suuruinen vaihtelu auringonpilkkujen 11-vuotisessa jaksollisuudessa. Sen lämpötilavaikutus maapallon keskilämpötilaan on pieni, alle ± 0.1 °C, mutta se voidaan erottaa lämpötilojen aikasarjoissa sekä pintamittauksissa että satelliittihavainnoissa (Kuva 2). Auringon pitkäaikaiset säteilymuutokset 1800-luvun puolivälistä lähtien ovat laskennallisesti nostaneet maapallon keskilämpötilaa 0.1 - 0.2 °C sadassa vuodessa, kun kokonaismuutos samana aikana on ollut noin 0.9 °C (Kuva 1).

Auringon hiukkaspommitukset ja voimakas UV-säteily käynnistävät muutoksia yläilmakehässä aurinkosyklien aktiivisimmissa vaiheissa. Näihin liittyvät otsonipitoisuuden vaihtelut ja muut ilmakeemialliset prosessit muuttavat yläilmakehän lämpötilaa ja sitä kautta ilmakehän laaja-alaisten kierto- ja liikkeen ominaisuuksia napa-alueiden alailmakehässä (Kuva 7). Maapallon ilmakehän kokonaisuuteen näillä ei kuitenkaan ole suurta merkitystä käynnissä olevan antropogeenisen ilmastonmuutoksen rinnalla. Ihmiskunnan aiheuttaman kasvihuoneilmaston vahvistuminen aiheuttaa keskimäärin 0.1 – 0.2 asteen lämpenemisen vuosikymmentä kohden. Kasvihuonekaasujen määrän kasvu ilmakehässä nostaa lämpötiloja vuosikymmenestä toiseen toisin kuin pilkkujaksojen mukana tuleva nouseva ja laskeva lämpötilan vaihtelu.

1990-luvulla uudelleen esille nostettu mekanismi kosmisen säteilyn ja maapallon pilvipeitteen välisistä yhteyksistä ei ole saanut kokeellista (CERN/Cloud) eikä tilastollista vahvistusta meteorologisista havainnoista. Näin paljon huomiota saanutta väittämää siitä, että kosmisen säteilyn pilvivaikutukset kontrolloisivat maapallon lämpötilan muutoksia ei ole voitu todentaa.

Auringon säteily kääntyi 2000-luvun alussa lievään laskuun normaalina osana pilkkujakson 23 pitkittynyttä laskukautta. Auringon kokonaissäteilyn heikkeneminen pysähtyi ja alkoi nousta vuoden 2009 lopulla uuden auringonpilkkujakson (24) myötä (Kuva 5). Auringonpilkkujen (tasoitetun) lukumäärän ennustetaan olevan maksimissaan keväällä 2013.

Nyt käynnissä oleva auringonpilkkujakso on pilkkujen määrien ja auringon yleisen aktiviteetin osalta 2-3 vuotta jäljessä auringon keskimääräisestä aktiviteettikehityksestä (Kuva 9). Viimeksi yhtä alhaisia aktiviteettilukemia on ollut yli 100 vuotta sitten 1900-luvun alussa. Auringon aktiivisuuden hiljentyminen aiheuttaa maapallon lähiavaruuden avaruussäätöilmäilmiöiden heikentymistä, ja mm. revontulia ja magneettisia myrskyjä esiintyy harvemmin.

Auringon aktiivisuus on ollut viimeisten noin 50 vuoden aikana keskimäärin sama, vaikka maapallon lämpötila on samana aikana kohonnut merkittävästi antropogeenisen kasvihuoneilmaston vahvistumisesta johtuen. Näin auringon säteilytoiminnan muutoksilla on vain pieni vaikutus maapallonlaajuiseen ilmastonmuutokseen. Hallitusten välisen ilmastonmuutospaneelin (IPCC) mukaan Auringon lämmittävä osuus maapallon keskilämpötilan kasvussa viimeisten noin 250 vuoden aikana on ollut alle 10 prosenttia kasvihuonekaasujen antropogeenisestä lisäyksestä johtuvasta lämpötilan noususta.

Eräiden tutkimuksien mukaan auringonpilkkujen esiintyminen saattaa tulevina vuosikymmeninä vähetä merkittävästi. Se ei kuitenkaan vaikuta maapallon ilmastonmuutokseen kuin hyvin pienellä osuudella. Auringon aktiivisuusmuutoksilla on merkittävää vaikutusta maapallon lähiavaruuden, ionosfääriin ja magnetosfääriin, avaruussäätöilmäilmiöissä 100 km korkeudelta ylöspäin.

2000-luvun alussa havaittu maapallon lämpötilan hidastunut nousu selittyy samaan aikaan vaikuttaneen ENSO-vaihtelun sekä auringon aktiivisuuden minimillä (2008). Kun nämä lämpötilan nousua hidastavat tekijät poistetaan havaintosarjasta taustalta tulee esiin kaiken aikaa vaikuttanut kasvihuonekaasujen lämpötilaa nostava tekijä, joka viimeisten noin 40 vuoden aikana on ollut keskimäärin 0.15 °C/10v (Kuva 4a, 4b).

Auringon aktiivisuuden osuus maapallon lämpötilassa ja ilmastonmuutoksessa on verifioitavissa tilastoin ja ilmastomallien kautta, mutta sen osuus ei ole ollut keskeinen viimeksi kuluneiden noin 1000 vuoden aikana eikä erityisesti nykyaikana ilmakehässä vaikuttavien antropogeenisten tekijöiden rinnalla.

Julkaisijayksikkö: Esikunta

Luokitus (UDK)

Asiasanat: Auringon aktiivisuus, ilmaston muutos

551.583, 551.590.21

ISSN ja avainnimike: 0782-6079

Raportteja - Rapporter - Reports

ISBN: 978-951-697-771-6 (nid.), 978-951-697-772-3 (pdf)

Kieli: Suomi

Myynti
Ilmatieteen laitos
PL 503, 00101 Helsinki

Sivumäärä: 41

Hinta: 10 e

Sisällysluettelo

		s.
1	Johdanto	7
2	Auringon säteily muuttuu pilkkujakson mukana	12
3	Maapallon lämpötilan muutokset monimuuttujamallilla tulkittuna	15
4	Auringon säteily laskuun	19
5	Auringon hiukkassäteilykin vaikuttaa	22
6	Hiipuuko aurinko? Viileneekö ilmasto?	25
7	Geomagneettinen <i>aa</i> -indeksi ja maapallon lämpötilan muutokset	28
8	Lopuksi	32
9	Lähdeviitteet	34
Liite 1. Auringon säteilyn vaikutus maapallon pintalämpötilaan		40

Mitä on auringon aktiivisuus?

Laajasti ymmärrettynä auringon aktiivisuudella tarkoitetaan näkyviä muutoksia auringon pinnalla tai mittalaitteilla maassa tai avaruudessa rekisteröityjä vaihteluja auringon lähettämässä säteilyssä (hiukkaset ja sähkömagneettinen säteily). Milloin näiden muutoksien esiintymistiheys kasvaa, auringon sanotaan olevan aktiivinen. Tunnetuin auringon aktiivisuusjaksoista noudattaa 11-vuoden sykliä. Tärkeitä auringon pintailmiöitä ovat auringonpilkut. Muita ovat esimerkiksi aurinkopurkaukset eli flaret, jotka nähdään lyhytkestoisina (minuuteista tunteihin) paikallisina kirkkauden muutoksina auringon pinnalla. Flaret tuottavat voimasta säteilyä ja hiukkasemissioita. Auringon pinnasta nousevat kirkkaat kaasukielekkeet (protuberanssit) kuuluvat myös auringon aktiivisuustapahtumiin monien muiden joukossa. Auringon avaruuteen sinkoama hiukkasvirta (aurinkotuuli) vaihtelee nopeuden ja hiukkasmäärien suhteen auringon aktiivisuuden mukana. Sama koskee auringon lähettämää sähkömagneettista säteilyä, jonka kokonaismäärä (irradianssi) vaihtelee myös aktiivisuustapahtumien aikana hieman. Auringon sähkömagneettisen säteilyn muutokset ovat suurimpia säteilyn lyhytaaltoisella alueella (UV- ja röntgensäteily) ja toisaalta radiotaajuuksilla (megahertseistä gigahertseihin).

Auringon aktiivisuustapahtumia seurataan maanpinnalta ja satelliiteista. Havaintomenetelmät voivat olla optisia laitteita, tutkia, hiukkasdetektoreita ja säteilymittareita eri aallonpituuksille yms. Maapallon lähiavaruus on auringon aktiivisuustuotteiden (hiukkaset ja säteily) pommitusten kohteena, joka synnyttää vaihtelevan avaruussään maapallon ympärille. Avaruussään muutoksissa lähiavaruuden sähkövirrat, hiukkastiheydet, sähkö- ja magneettikentät muuttuvat nopeasti. Eräs avaruussään ilmentymä ovat revontulet, missä valoa syntyy aurinkoperäisten hiukkasten törmätessä ilmakehään 100 - 400 km korkeudella. Avaruussään myrskyjen aikana maapallon lähiavaruudessa (ionosfäärissä ja magnetosfäärissä) kulkee voimakkaita ja nopeasti muuttuvia sähkövirtoja, joiden aiheuttamat magneettikentän muutokset rekisteröityvät magnetometreihin. Niillä seurataan jatkuvasti magneettikentän muutoksia kuten esimerkiksi Ilmatieteen laitoksen Nurmijärven observatoriossa ja automaattiasemilla eri puolilla Suomea. Näin auringon aktiivisuutta voidaan välillisesti mitata sen aiheuttamien magneettikentän muutosten kautta (Luku 7).

1 Johdanto

Auringonpilkkujen 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 merkinä 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 analyyseja auringon vaikutuksista maapallon lämpötiloihin. Tutkimalla Pariisin ja Innsbruckin observatorioiden pitkiä havaintosarjoja Nervander havaitsi lämpötilassa 27 vuorokauden jaksollisuuden, jonka hän tulkitsi auringon tai maan kuun pyörähdysaikaan liittyväksi häiriöksi maapallon lämpötilassa (Simojoki, 1978). Alan tiedemiespiireissä tulos otettiin vastaan innostuneesti, koska sen uskottiin todistavan tieteelle uudenlaisesta yhteydestä auringon ja kuun sekä ilmakehän muutosten välillä.

Auringonpilkkujen esiintymisen 11-vuotisen jaksollisuuden löytyminen 1840-luvulla herätti suurta huomiota. Seuraavalla vuosikymmenellä havaittiin, että revontulien esiintymistiheyden vuodesta toiseen tapahtuvat muutokset ja maapallon magneettikentän nopeat muutokset, magneettiset myrskyt, liittyvät myös auringonpilkkujen esiintymisen 11-vuotiseen rytmiiikkaan (Nevanlinna, 2006). Koska revontulien ja magneettisten myrskyjen katsottiin ilmentävän auringon aiheuttamia muutoksia ilmakehässä, oli luonnollista etsiä jaksollisuuksia myös ilmakehän muista parametreista kuten lämpötilasta ja sademääristä jne. 1800-luvun jälkimmäiselle puoliskolle tultaessa tällaisia väitettyjä riippuvaisuussuhteita oli erilaisista tilastoista saatu paljon (Benestad, 2006).

Kuuluisin 1800-luvun auringonpilkkujen ja ilmastonmuutosten välisten yhteyksien tutkija oli W. Köppen (1846-1940), joka tunnetaan paremmin maapallon ilmasto-työhykkeiden luokitteluistaan. Hänen mukaansa lämpötilan pitkät havaintosarjat eri puolilta maapalloa osoittavat, että auringonpilkkujen 11-vuotisessa jaksollisuudessa

lämpötila on alhaisin pilkkumaksimin 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 (Melander, 1931; Angervo, 1948). Vanhoissa jo unohduksiin jääneissä oppikirjoissa ja julkaisuissa esiintyy tämän tutkimusaiheen yhteydessä jopa käsite "Köppenin laki", jolla tarkoitettiin auringonpilkkujen 11-vuotisessa esiintymisessä maapallon lämpötilan minimin ja auringonpilkkujen maksimin yhteyttä ikään kuin varmana tosiasiana.

1800-luvulla katsottiin yleisesti, että auringon aktiivisuuden vaihtelut, lähinnä auringonpilkkujen esiintymisen 11-vuotisen jaksollisuuden kautta, näkyy tietyissä ilmasto-parametreissa, mutta vain suhteellisen heikosti. Tosin tilastolliset tulokset auringon vaikutuksista olivat ristiriitaisia ja saadut korrelaatiot eivät olleet pysyviä, kun aikasarjaa jatkettiin pitemmille aikaväleille. Osittain tämä johtuu epähomogeenisistä havaintosarjoista ja puutteellisista tilastollisista käsittelyistä, mutta enemmän siitä, että tutkimuskohteiksi valituilla ilmastollisilla suureilla ei ole fysikaalista syy-yhteyttä auringon aktiivisuuden kanssa. Syytä auringon aktiivisuuden vaikutuksiin haettiin tavallisesti säteilyvoimakkuutta kuvaavan aurinkovakion muutoksista. Varmuutta ei asiaan saatu, koska maan pinnalta tehdyt auringon säteilymittaukset olivat erittäin epätarkkoja määritettäessä aurinkovakion arvoa ilmakehän ulkorajalle (Kondratyev and Nikolsky, 1970). Tulokset antoivat jopa 15 % vaihtelun aurinkovakiolle auringonpilkkujakson aikana (Nevanlinna, 1974), mikä on yli satakertainen nykyään oikeana pidettävälle muutosarvolle. Irradianssin luotettavat mittaukset ilmakehän ulkopuolelta satelliittien avulla alkoivat vasta 1970-luvun lopulla (Willson, 1984).

1800-luvulla tutkimus auringon aktiivisuuden vaikutuksesta ilmakehän ilmiöihin omaksui tutkimusmenetelmät tähtitieteestä ja taivaanmekaniikasta, jotka olivat hallitsevia luonnontieteitä 1800-luvun alkukymmeninä. Havaitsevassa tähtitieteessä ja planeettojen liikkeen tutkimuksessa eräs valtametodi oli jaksollisten muutosten tutkiminen. Katsottiin, että jaksollisten muutosten löytyminen havainnoista on merkki uudesta ilmiöstä avaruudessa. Tästä saatiinkin loistava tulos, kun planeetta Neptunus löydettiin ratalaskujen ennustamasta paikasta vuonna 1846 (Jones, 2007). Samaa menetelmää sovellettiin myös meteorologiaan ja auringon vaikutusten

tutkimukseen: eristämällä havaintosarjoista harmonisen analyysin avulla (Fourier-kertoimien laskeminen sini- ja kosiniaalloille; Chapman and 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 alkuasteella 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 maapallon pilvien kaltaisina muodostelmina auringon "ilmakehässä". Niiden säännöllisiä liikkeitä säätelisi siten planeettojen vetovoima. Tärkein tällainen gravitaatiovaikuttaja on Jupiter, planeetoista suurin. Lisäuskottavuutta väitetyille yhteyksille saatiin siitä, että Jupiterin kiertoaika auringon ympäri on sattumalta suunnilleen sama kuin auringonpilkkujen keskimääräinen esiintymisjakso 11.8 vuotta (esim. Heiskanen, 1948; Johnson, 1950; Gribbin and Plagemann, 1977). Kuitenkin vielä nykyäänkin ilmestyy tieteellisissä aikakauslehdissä kirjoituksia, joissa planeettojen kiertoaajoista, auringon ja kuun rataliikkeiden muutoksista haetaan pelkkien korrelaatioiden avulla syitä maapallon lämpötilavaihteluille ilman mitään uskottavaa fysikaalista selitystä (Scafetta, 2012).

Planeettojen vetovoimavaikutukset kiinnostivat tutkijoita ja alan harrastajia vielä 1970-luvun lopulla, kun lähestymässä oli paljon etukäteiskohua herättänyt vuoden 1982 planeettakonjunktio, jolloin kaikki planeetat olivat asettumassa suunnilleen samalle suoralle samalla puolella aurinkoa. Planeettojen aiheuttamien vuoksi- ja luodevoimien ennustettiin aktivoivan maapallolla geodynaamisia ilmiöitä, mm. maanjäristyksiä (Gribbin and Plagemann, 1977). Samaan aihepiiriin liittyy Woodin (1973, 1975) laskelma siitä kuinka planeettojen yhteenlaskettu vuoksi- ja luodevoima noudattaa likimain auringonpilkkujen 11-vuotista jaksollisuutta viimeisen noin 200 vuoden aikana. Hän väitti, että auringonpilkkujen synty johtuu vetovoimavaikutuksista. Kyseessä ei kuitenkaan voi olla kuin kahden suunnilleen samanjaksoisen

ilmiön ajoittaisesta yhteensopivuudesta, koska Woodin ennusteet auringonpilkkujen maksimi- ja minimivuosisista ovat jo 3-5 vuotta virheellisiä 1970-luvulta eteenpäin.

Auringonpilkkujen syntymekanismi auringossa vaikuttavien sisäsyntyisten magneto-hydrodynaamisten prosessien tuloksena on pääpiirteissään ymmärretty jo 1950-luvulta lähtien (Schrijver and Zwaan, 2000; Ossendrijver, 2003). Kuitenkin ilmastonmuutoskysymyksiä harrastavien maallikkojen keskuudessa ja niin sanottujen ilmas-toskeptikkojen piirissä elää sitkeänä täysin epäfysikaalinen käsitys planeettojen vetovoimien osuudesta auringonpilkkujen syntymistä säätelevänä tekijänä. Aihe on ollut esillä myös Ilmatieteen laitoksella, missä meteorologi Väinö 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 proses-seissa ja jaksollisten ilmiöiden etsiminen ilman fysikaalista perustaa tuntuu rajoittu-neelta ja vanhanaikaiselta nykytietämyksen valossa. Tarjolla kun olisi runsaasti tieteellisesti varmennettuja ja fysikaalisesti paremmin ymmärrettyjä ilmastonmuutosta aiheuttavia tekijöitä.

Yllämainittu (Wood, 1973, 1975) tilastollinen tutkimus auringonpilkkujen esiinty-misfrekvenssin ja planeettojen ajasta riippuvan kokonaisgravitaatiovoiman välillä oli julkaistu arvovaltaisessa tiedelehdessä (Nature), mutta joskus laatulehdetkin erehtyvät arvioinneissaan julkaistujen artikkelien tieteellisestä relevanssista. Vastaavia aikasarja-analyysejä on alan kirjallisuudessa runsaasti. Niissä esitetyt korrelaatiotulokset ovat usein tilastollisesti merkittäviä ja kuviot korostavat selkeästi saatuja korrelaatioita. Usein silloin hämärtyy se tosiseikka, että hyväkään korrelaatio ei välttämättä kerro mitään ilmiöiden välisistä fysikaalista riippuvuuksista (Helama et al., 2010). Ehkä tunnetuin esimerkki aikasarja-analyysien epävarmuuksista on 1990-luvulla paljon kohua herättänyt tutkimus, joka ilmestyi johtavassa tiedelehdessä (Science) (Friis-Christensen and Lassen, 1991). Siihen on tieteellisissä julkaisuissa viitattu lähes 800 kertaa viimeksi kuluneiden noin 20 vuoden aikana. Sen mukaan maapallon lämpötilavaihtelut vuodesta 1850 vuoteen 1990 selittyisivät tilastollisesti erinomaisesti auringonpilkkujakson pituuden muutoksilla ilman, että mitään muita tunnettuja ilmastonmuutostekijöitä huomioitiin. Selityshypoteesina oli, että mitä

lyhyempi auringonpilkkujakso on sitä aktiivisempi on aurinko keskimäärin. Silloin myös maapallo vastaanottaisi enemmän säteilyä ja ilmakehä lämpenee. Kun tätä korrelaatiosarjaa jatkettiin 2000-luvulle asti, huomattiin, ettei korrelaatio enää pätenykään: auringon aktiivisuus kääntyi laskuun, mutta lämpötila jatkoi kasvuaan. Lisäksi jo alkuperäisessä tutkimuksessa oli vakavia tilastoanalyttisiä virheitä ja käytetyt datasarjat olivat puutteellisia. Virheiden korjaamisen jälkeen väitetty korrelaatio auringonpilkkujaksojen pituuden ja lämpötilan välillä oli heikko (Laut, 2003; Benestad, 2006).

Maapallon keskilämpötilan vaihteluun vaikuttavat ilmakehän sisäisten syiden lisäksi myös auringon säteilymuutokset. Näiden ohella lämpötilaan aiheuttavat muutoksia tulivuoripurkauksien kaasut ja aerosolit sekä valtamerien ja ilmakehän väliset energianvaihtosyklit (esim. ENSO; Nevanlinna, 2008). Näiden luonnollista vaihtelua aiheuttavien tekijöiden ohella ihmiskunta vaikuttaa lämpötilaan kasvihuonekaasujen pitoisuuksia nostamalla ja mm. maankäytön kautta. Kullakin vaihtelulla on omat tyypilliset aika-skaalansa vuosista vuosikymmeniin. Geologisina ajanjaksoina aina miljooniin vuosiin asti vaikuttavia tekijöitä on lisäksi useita muita. Viime jääkauden jälkeisenä aikana on erityisesti pohjoisilla leveysasteilla ollut havaittavissa (kesä)ilmaston hidaskasvu, enimmillään noin 0.3 °C/1000v (Esper et al., 2012). Tämä johtuu maapallon rataparametrien ja akselikulman hitaista muutoksista Milankovitchin astronomisen säteilyvaihteluteorian mukaan¹ (Berger and Loutre, 1991).

Tulevien vuosikymmenien globaalia ilmastonmuutosta hallitsee merkittävästi antropogeeninen (ihmiskunnan aiheuttama) toiminta. Ajanjaksosta käytetäänkin toisinaan geologisiin aikakausiin rinnastuvaa nimitystä antroposeeni (engl. Anthropocene), joka korostaa ajanjakson keskeistä vaikuttajaa, ihmiskuntaa (Zalasiewicz et al., 2010). Näin viimeisimmän jääkauden päättymisen (noin 11 000 vuotta sitten) jälkeinen aikakausi, holoseeni, saa päätöksekseen antroposeenikauden, jonka alku voidaan sijoittaa 1700-luvun puoliväliin. Silloin länsimaissa alkoi teollisen vallankumouksen myötä massiivinen fossiilisten polttoaineiden käyttö ja sitä kautta käynnistyivät kas-

¹ Viime jääkauden päättyessä noin 10 000 vuotta sitten maapallon akseli oli noin 0.5° enemmän kallellaan kuin tänään. Maa oli silloin lähinnä aurinkoa kesäkuussa, kun se nyt on tammikuussa. Näin kesäaikana pohjoisella pallonpuoliskolla saatiin silloin noin 8 % enemmän auringon säteilyä kuin nykyään.

vavat kasvihuonekaasujen päästöt.

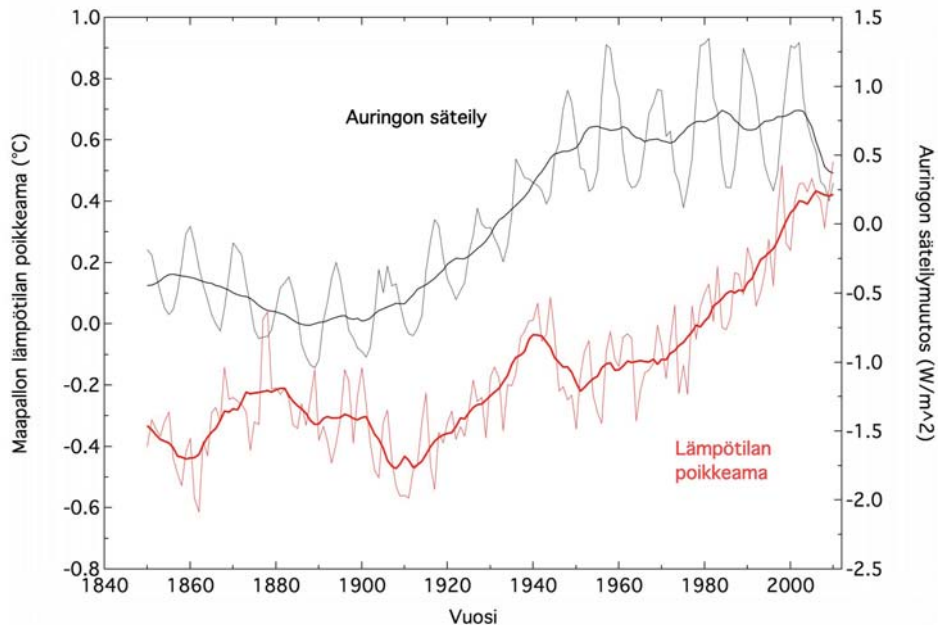
Tämän raportin aihepiiriin liittyviä laajoja katsauksia on IPCC:n Working Group I:n² raportissa "The Physical Science Basis" (IPCC, 2007) sekä julkaisuissa Benestad (2006) ja Gray et al. (2010). Nyt käsillä oleva kirjoitus perustuu Ilmatieteen laitoksen järjestämissä toimittajille tarkoitetuissa ilmastonmuutoksen koulutustilaisuuksissa pitämiini esitelmiin.

2 Auringon säteily muuttuu pilkkujakson mukana

Auringon säteilyn kokonaisvoimakkuutta (irradianssi) on mitattu satelliiteista jatkuvasti jo 1970-luvun puolivälistä lähtien, kun säteilymittauksiin tarvittava teknologia oli kehittynyt riittävästi (Willson, 1984). Uusimmat luotaimet suorittavat myös säteilyvoimakkuuden mittauksia eri aallonpituusalueilla, jolloin esimerkiksi maapallolle lankeavan haitallisen UV-säteilyn vaihtelut saadaan selville (Lean et al., 2005; Haigh et al., 2010). Säteilyn mittaus ei ole kuitenkaan mikään aivan yksinkertainen tehtävä. Eräänä ongelmana on säteilymittarien kalibroinnin pysyvyys jopa vuosia kestävässä mittausperiodissa. Lisäksi tarvitaan korjauksia, jotka aiheutuvat satelliittien hitaista ratamuutoksista. Pitkien aikasarjojen tapauksessa on yhdistettävä useiden eri satelliittien havaintotuloksia, joiden yhteensovittaminen ei ole ongelmattonta. Tiedot auringon säteilyvoimakkuudesta kertovat energiaemissioiden vaihteluista ja ovat siten tärkeitä arvioitaessa auringon sähkömagneettisten säteilyprosessien muutoksia. Maapallon ilmaston kannalta olennainen tieto on se, miten auringon säteilymuutokset vaikuttavat maapallon lämpötilan vaihteluihin eri pituisissa ajanjaksoissa. Sähkömagneettisen säteilyn ohella myös auringon hiukkastuotto on tärkeä energialähde, joka säätelee erityisesti ilmakehän yläosien (20 km ja siitä ylöspäin) fysikaalista tilaa. Auringon voimakkaat hiukkaspurkaukset muuttavat stratosfäärin ja mesosfäärin ominaisuuksia voimakkaasti (esim. otsonipitoisuuksien kautta) ja ne voivat epäsuorasti vaikuttaa myös ilmakehän alempien kerroksien kiertoliikkeisiin ja olla siten ilmastoja muuttavana tekijänä.

² Chp 2: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing ja siinä luku 2.7.1 Solar Variability

Satelliittimittausten tulosten mukaan auringon säteily vaihtelee auringonpilkkujen 11-vuotisen jaksollisuuden mukana siten, että se on hiveneren voimakkaampaa pilkkujen



Kuva 1. Punainen: Maapallon keskilämpötilan poikkeama (1961-1990 keskiarvoon nähden) Hadley-keskuksen tilastoista laskettuna (vuosiarvot ja 11 vuoden tasoitus) 1850-2010.

Musta: Auringon kokonaissäteilyn muutos (vuosiarvot ja 11 vuoden tasoitus) (Wang et al., 2005).

1 W/m² muutos auringon säteilytehosta vastaa noin 0.1 °C muutosta maapallon lämpötilassa auringonpilkkujakson mukaisessa säteilyn vaihtelussa.

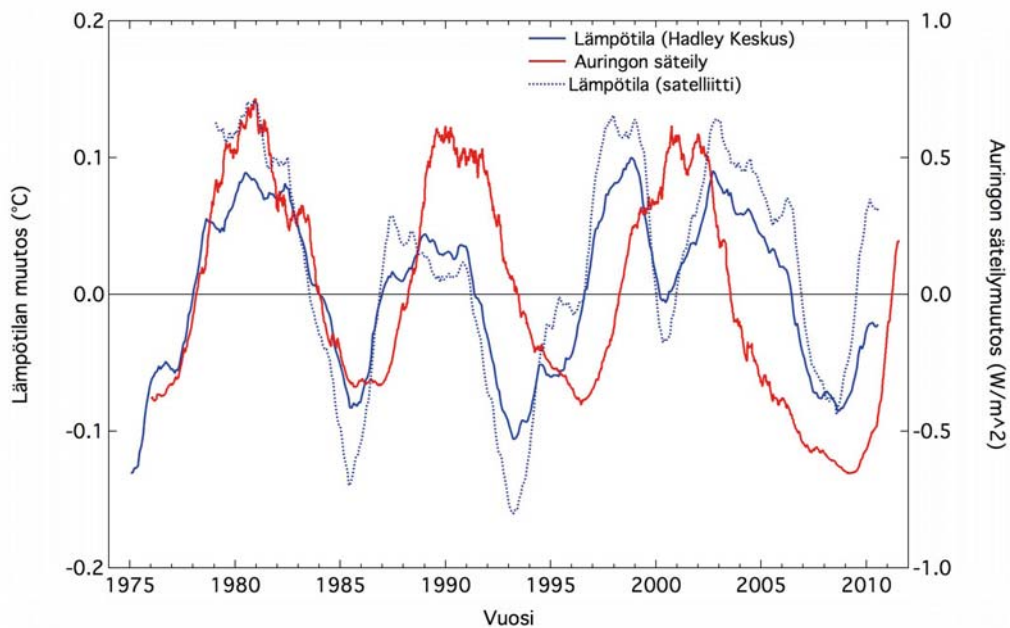
Katso myös: IPCC (2007) Chp. 2.7.1.2.1.

huippuvuosina kuin niiden esiintymisien minimiaikoina. Ero on noin $\pm 1 \text{ W/m}^2$ (0.08 %) kokonaissäteilyssä³ (1365 W/m²) viimeisten noin 35 vuoden aikana tehtyjen satelliittimittausten mukaan (Kuva 1). Ilmakehän ylärajalla auringon säteilytehosta, joka on maapallon pinta-alayksikköä kohden keskimäärin 340 W/m², aurinkosyklin mukainen vaihtelu on noin 0.27 W/m² pilkkuminimistä pilkkumaksimiin. Maanpinnalla se on vielä pienempi, 0.20 W/m², koska ilmakehän ylemmät kerrokset ottavat oman osuutensa säteilytehosta. Tämän mukaan alailmakehää lämmitetään auringonpilkkujen nousukaudella (3-4 vuotta) 0.2 W/m² edestä ja saman verran jää uupumaan lämmitystehosta pilkkujen laskukaudella (7-8 vuotta). Nettovaikutus koko auringonpilkkukaudella on siten likimain nolla. Vaikka auringon kokonaissäteilyn vaihtelu on suhteellisen vähäinen, muutokset tietyillä säteilyspektrin alueilla ovat suurempia. Esimerkiksi UV-alueella (UVC, 250 nm) säteilyn voimakkuuden vaihtelu

³ Viimeisimmät satelliittimittaukset uusimmalla mittaustekniikalla näyttävät, että perinteistä aurinkovakion arvoa 1365 W/m² tulee ehkä pienentää lukemaan 1361 W/m² aikaisempien säteilymittaus-laitteiden systemaattisten virheiden takia (Kopp and Lean, 2011).

aurionpilkkujakson aikana on satelliittimittausten (SORCE⁴) mukaan ollut 5-6 % (Kuva 5).

Säteilyn määrää säätelevät toisaalta auringonpilkut varjostamalla ja toisaalta pilkkualueiden tuntumaan kehittyvät kirkkaat fakulat (eng. facula eli soihtu) lisäämällä säteilyä (Benestad, 2006). Suurimmat pilkut peittävät auringon pallonpuoliskon pinta-alasta jopa noin promillen verran (noin 100 kertaa maapallon pinta-ala). Pilkkujakson maksimin aikana keskimäärin vallitsee fakuloiden tuottaman säteilyn lisäys, joka kompensoi ja ylittää pilkkujen aiheuttaman säteilymäärän pudotuksen. Lyhytaikaisesti suuret pilkut voivat varjostuksellaan pienentää auringon emittoimaa säteilyä 0.3 - 0.4 W/m². Varjostus kestää yleensä kymmenkunta päivää, kun säteilyä estävä pilkku on näkyvässä auringon maahan päin olevalla pallonpuoliskolla. Auringon kokonaissäteily on myös keskimääräistä vähäisempää, kun auringossa on voimakkaita hiukkaspurkauksia.



Kuva 2. Punainen: auringon irradianssin muutokset satelliittimittauksista (ACRIM/ SORCE). Sininen: (Hadley-keskus, UK Met. Office) pintalämpötila (kuukausiarvot) ja vastaavat arvot satelliittimittauksista (sininen katkoviiva) (NOAA, MSU), joista on poistettu lineaarinen trendi (0.17 °C/10v) ja residuaalit on tasoitettu 3 vuoden filterillä. Lämpötilavaihtelun amplitudi on 0.04 °C, joten auringon pilkkumaksimista minimiin se on keskimäärin noin 0.08 °C. Kuvassa tasoituksen tarkoituksena on poistaa lämpötilan aikasarjasta muutaman vuoden mittaiset ENSO-tyyppiset vaihtelut.

Onko sitten pilkkukaudesta toiseen havaittavissa joitain olennaisia systemaattisia muutoksia auringon säteilytehossa? Asiaa valaisee Kuva 1. Siinä on auringon sätei-

⁴ http://lasp.colorado.edu/sorce/data/tsi_data.htm

lyteho laskettuna auringonpilkkujen vaihtelusta 1850-2010. Samassa kuviossa on myös maapallon keskilämpötila (Hadley-keskuksen⁵ tilastoista). Nähdään, että 1900-luvun alusta lähtien auringon säteilyn pitkäaikaisvaihtelusta on maapallolle tullut lisätehoa noin 1 W/m^2 . Tämä vastaa maapallon lämpötilassa noin $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ muutosta (kts. Liite 1). Havaintojen mukaan maapallon keskilämpötila on noussut sadassa vuodessa noin $0.9 \text{ }^\circ\text{C}$. Näistä luvuista voisi päätellä, että noin 100 vuoden lämpötilan nousussa on auringon osuutta noin 10 %, mikäli mitään muita vaikuttavia tekijöitä ei huomioida. Auringon säteilyn kasvu ei kuitenkaan ole ollut tasaista, vaan suunnilleen 1950-luvulta eteenpäin se on ollut lähes olematon. Näin siis viimeisten vuosikymmenien aikana tapahtuneessa maapallon lämpötilan kasvussa ei ole juuri lainkaan auringon osuutta, mutta lämpötila on muista syistä noussut yli $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Maapallon keskilämpötilaan aurinkotehon vaihtelu aiheuttaa laskennallisesti (kts. Liite 1) alle $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ heilahtelun 11-vuoden puitteissa. Laskettu muutos vastaa varsin hyvin esimerkiksi Hadley-keskuksen lämpötilan aikasarjasta (pintamittaukset) saatua auringonpilkkujakson mukaista vaihtelua (Kuva 2). Samanlainen vaihtelu saadaan myös satelliittimittauksiin perustuvista havaintosarjoista. Nämä molemmat seuraavat hyvin auringon kokonaissäteilyvoimakkuuden 11-vuotista vaihtelua (Kuva 2).

3 Maapallon lämpötilan muutokset monimuuttujamallilla tulkittuna

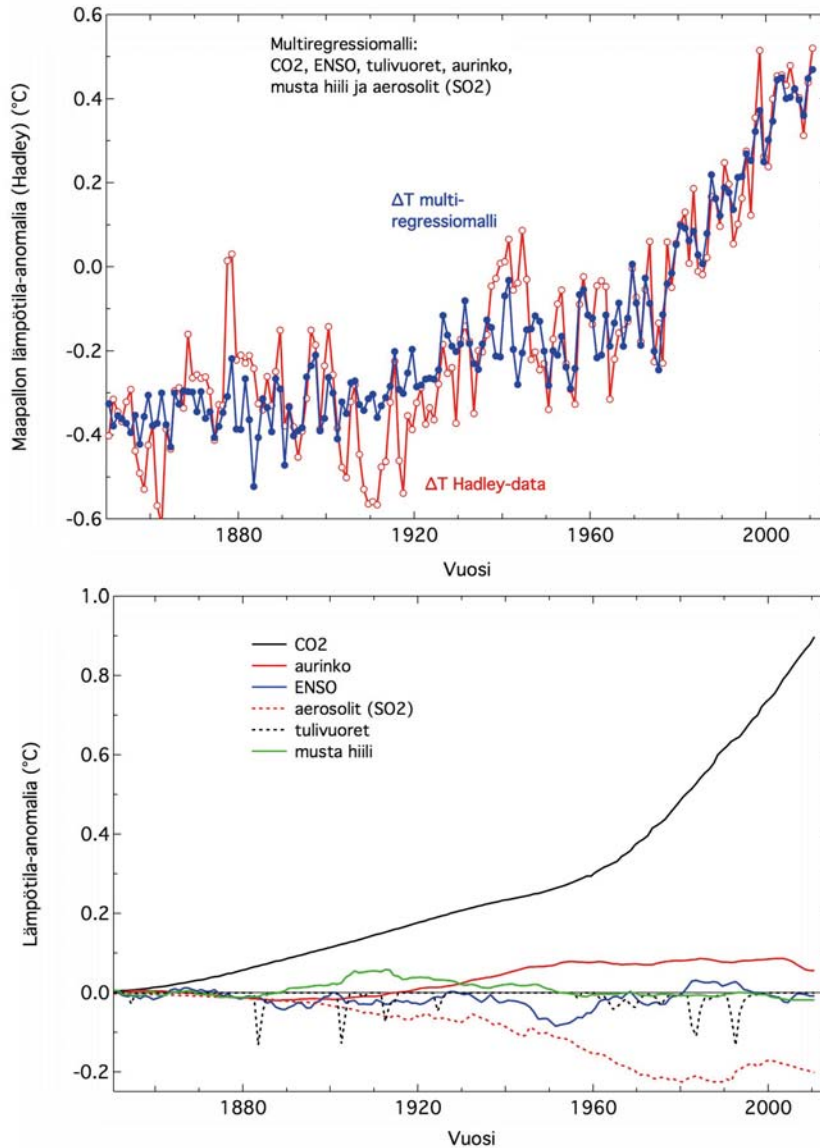
Auringon säteilymuutokset yhdistettynä kasvihuonekaasujen aiheuttamaan pakotteen selittävät tilastollisesti varsin hyvin havaitun lämpötilan vaihtelut 1975-2010, kuten Kuva 3 osoittaa. Siinä on lämpötilatietoina (ΔT) Hadley-keskuksen vuotuiset (tasoitettut) lämpötilamuutokset. Havaittu auringon irradianssin (ΔI) vuotuinen muutos (satelliittimittauksista), hiilidioksidin vuotuinen pitoisuus (CO_2), El Niño/La Niña-vaihtelun voimakkuus (*ENSO*), aerosolien pitoisuus (rikkidioksidi SO_2), tulivuoritoiminnasta tuleva säteilypakote (*Volc*) ja ilmakehässä olevan ns. mustan hiilen (*BC*) pitoisuus ovat tilastollisen mallin selittäjiä⁶. Lämpötila on silloin esitettävissä regressiomallilla⁷:

⁵ <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut3/diagnostics/global/nh+sh/>

⁶ Datat: Crowley (2000), paitsi ENSO ja BC (NOAA)

⁷ Perusteellisempi monimuuttuja-analyysi on julkaisussa Foster and Rahmstorf (2011).

$$\Delta T = a_0 + a_1 \Delta I + a_2 \ln(CO_2/280) + a_3 ENSO + a_4 SO_2 + a_5 Volc + a_6 BC \quad (1)$$



Kuva 3. Yläkuva: Hadley-keskuksen (CRU) tuottamat maapallon vuotuiset lämpötilat (punainen viiva) 1865-2010 poikkeamana vuosien 1961-1990 keskiarvosta. Sininen: Multiregressiomallista (1) laskettu lämpötilan muutos.

Alakuva: Lämpötilan multiregressiomallin osatekijöiden tasoitetut osuudet lämpötilassa.

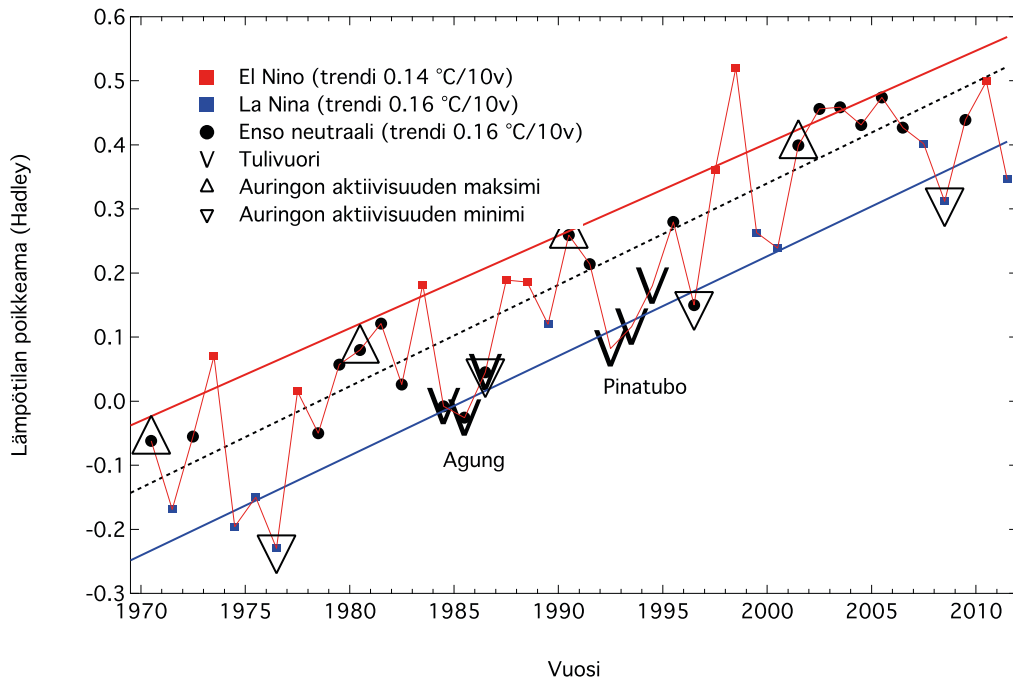
missä luvut a_i ovat regressiokertoimia. Hiilidioksidipitoisuudet on jaettu luvulla 280, joka on CO_2 -pitoisuus ennen teollista aikaa (1750). Tulokset ovat Kuvassa 3. Siitä nähdään, että hiilidioksidin osuus lämpötilan selittäjänä on odotetusti suurin. CO_2 :n kasvusta aiheutunut lämpötilan nousu oli noin $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ vuodesta 1855 vuoteen 1960,

jonka jälkeen kasvu on ollut nopeampaa, noin $0.12 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{v}$. Kaikkien muiden tekijöiden osuus jää alle $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$, mutta niiden keskinäiset osuudet ovat vaihdelleet eri vuosikymmeninä. Auringon säteilymuutoksen osuus kasvoi 1950-luvulle saakka, mutta on sen jälkeen pysynyt keskimäärin samana. Aerosolien (mm. SO_2) vaikutus on ollut noin $-0.2 \text{ }^\circ\text{C}$, mutta niiden osuus lämpötilan muutoksessa on vähentynyt 1980-luvulta lähtien. ENSO-vaihtelu tuottaa lämpötiloihin suurinta edestakaista vaihtelua muutaman vuoden aikaväleillä⁸. Viimeisten runsaan 10 vuoden aikana nouseva ja laskeva ENSO-vaihtelu yhdessä auringon säteilyn tilapäisen heikkenemisen kanssa ovat hidastaneet maapallon lämpenemiskehitystä, kuten Kuvasta 4a voidaan päätellä. Kun vuotuiset lämpötilalukemat ryhmitellään joko El Niño- tai La Niña- vuosiksi, lämpötilan kasvunopeus on koko havaintokaudella 1970-2010 suunnilleen sama molemmissa tapauksissa. Sama tulos saadaan, jos regressiomallissa (1) minimoidaan ENSO-vaihtelu, tulivuorien osuus ja auringon aktiivisuuden vaikutukset lämpötilan muutoksiin. Näin siis voidaan tulkita, että kasvihuonekaasujen pitoisuuksien lisäyksestä aiheutuva maapallon lämpötilan nousu on ollut (ainakin) viimeisten vuosikymmenien ajan suhteellisen vakaa, mutta aika-ajoin muutamien vuosien mitta-kaavassa ENSO-vaihtelu heilauttelee lämpötilan kasvunopeutta yhdessä auringon aktiivisuusmuutoksien ja tulivuoritoiminnan aiheuttamien viileämpien ja hieman lämpimämpien jaksojen välillä.

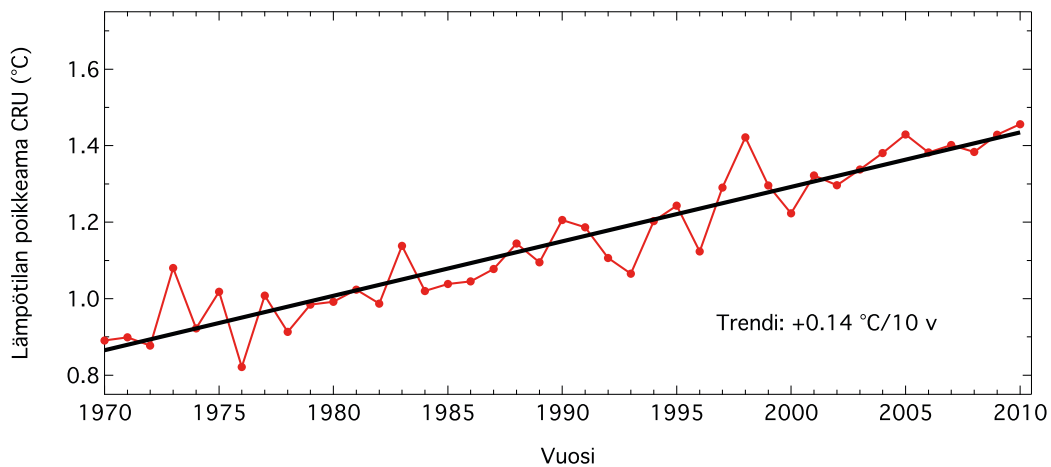
ENSO- ja NAO-vaihtelun yhteyksiä auringon pitkäaikaiseen aktiivisuuteen on tutkittu paljon. Tulokset ovat ristiriitaisia. Niissä havaitut muutokset voidaan hyvin selittää ilman aurinkoperäisiä tekijöitä ilmakehän sisäisillä tekijöillä (Benestad, 2006).

Regressiomallin mukaan 1 W/m^2 muutos irradianssissa tuottaa alle $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ muutoksen lämpötilaan. Vastaavasti 10 ppm:n muutos CO_2 -pitoisuudessa aiheuttaa myös $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ suuruisen lämpötilan muutoksen. Eksponentiaalisesti kasvavasta hiilidioksidipitoisuudesta aiheutuva lämpötilan nousu seuraa CO_2 -pitoisuuden logaritmia. Näin lämpötilan kasvu on lineaarinen (IPCC, 2007), mutta nousun kulmakerroin jyrkkenee 1960-1970-luvuilla (Kuva 3).

⁸ ENSO-vaihtelusta tarkemmin teoksessa "*Muutamme ilmasto*", s. 20-25; Nevanlinna (toim.) (2008).



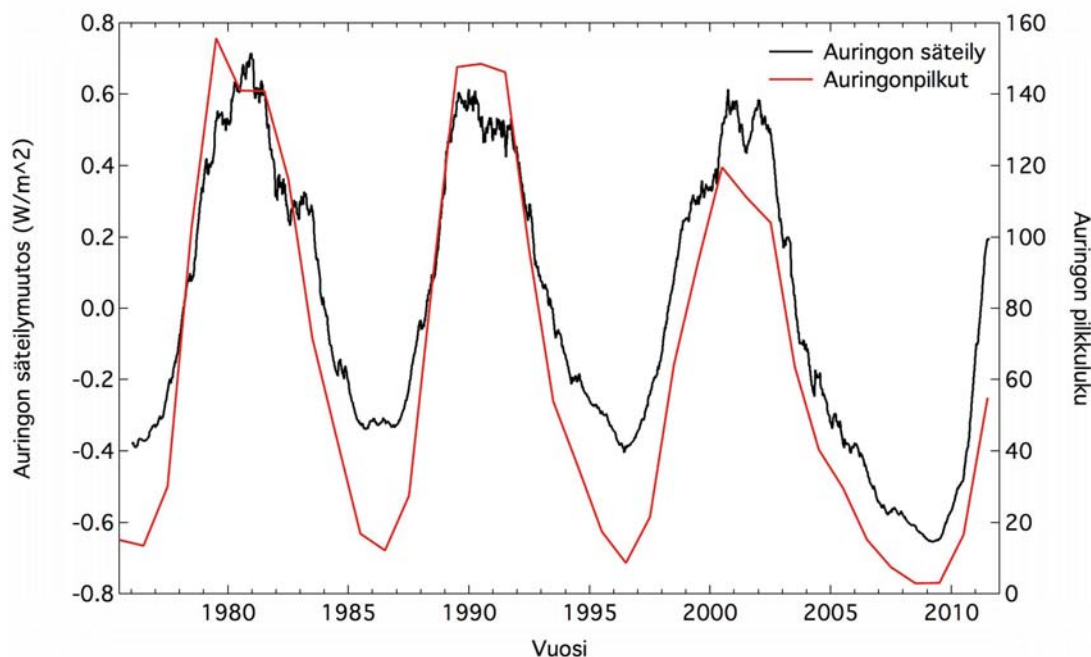
4a.



4b.

Kuva 4a. Hadley-keskuksen lämpötilapoikkeamat 1970-2010. Kolmioidut vuosiarvot edustavat auringonpilkkujen maksimi/minimivuotia (kärki ylös/alas). Pilkkujen maksimivuotina lämpötila-anomalia on ollut hieman (noin 0.2 °C) alempi kuin pilkkujen minimivuotina sopusoinnussa Kuvan 2 kanssa. Tulivuorien purkausvuodet (Agung ja Pinatubo) on merkitty V-kirjaimella. Erikseen on myös merkitty El Niño ja La Niña -vuodet. Trendiviivat on laskettu näille erikseen, jolloin lämpötilan nousunopeus on ollut suunnilleen sama (+0.14 – +0.16 °C/10 v) koko havaintokaudella.

Kuva 4b. Maapallon lämpötilan anomalia, kun havaintojen regressiomallissa (yhtälö 1) minimoidaan luonnolliset muutokset eli ENSO-vaihtelu, tulivuorien vaikutus ja auringon aktiivisuuden osuus.



Kuva 5. Musta: Auringon kokonaissäteilyn (irradianssi; W/m^2) Säteilyn päiväarvojen 365 vrk liukuva tasoitus kolmen viimeisen auringonpilkkujakson aikana 1976-2011. Säteilydatat perustuvat noin 10 eri aikoina toimineiden satelliittien mittauksiin (<http://www.pmodwrc.ch/>). Uusimmat mittaustulokset saattavat olennaisesti muuttaa 2000-luvulla tehtyjen satelliittimittausten säteilytasoa (Kopp and Lean, 2011).

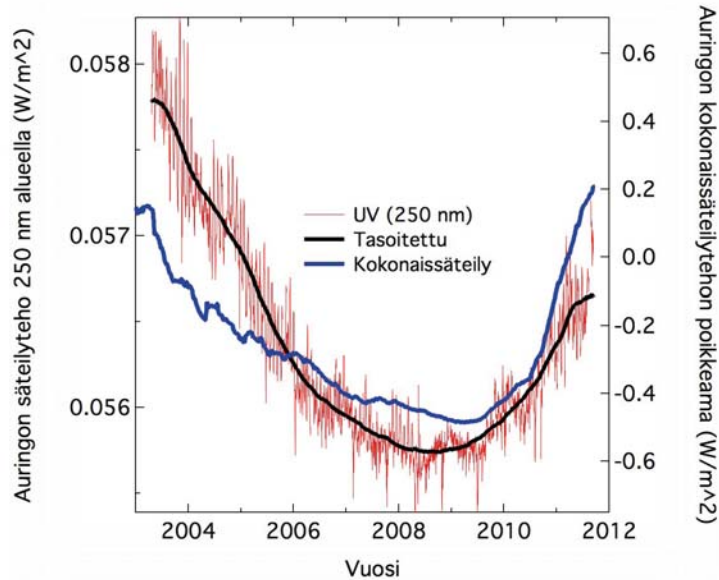
Punainen: Auringonpilkkujen vuosiarvot 1976-2011.

4 Auringon säteily laskuun

Auringon 1950-luvulta lähtien suunnilleen vakiona (11-vuotisessa keskiarvossa) pysynyt säteilytaso kääntyi laskuun 2000-luvun alussa ja on siitä lähtien ollut laskusuunnassa vuosikymmenen loppuun (Kuva 1). Toisaalta auringonpilkkujaksojen aikana vuodesta toiseen säteily on vaihdellut pilkkumaksimista pilkkuminiimiin kuten esimerkiksi NASA:n satelliittimittaukset kertovat (Kuva 5). Säteilyn vähentyminen auringonpilkkujakson 23 laskevalla kaudella kesti aikaisempiin pilkkujaksoihin verrattuna muutaman vuoden kauemmin. Pilkkujakson 24 käännyttyä kasvavien pilkkulukemien puolelle auringon säteily on myös lähtenyt nousuun (Kuva 2 ja 5).

Vuonna 2000 oli auringonpilkkujen maksimi ja niiden minimi saavutettiin vuoden 2008 lopulla joulukuussa. Auringon säteilyteho putosi tuona aikana satelliittimittausten mukaan noin $1.3 W/m^2$ (säteilypakotteena $0.20 W/m^2$) (Kuva 5). Tämä on siis

noin kolmanneksen enemmän kuin auringon säteilyteho on laskenut pilkkumaksimista pilkkuminimiin aikaisempien auringonjaksojen aikana 1970-luvun lopulta lähtien.



Kuva 6. Auringon UV-säteily (250 nm) ja kokonaissäteilyteho SORCE-satelliittiohjelman havainnoista. Alkuperäishavainnot ovat päivärvoja ja tasoitettut 365 d liukuvia keskiarvoja. Auringonpilkkujen minimi oli vuonna 2008.

Lämpötiloiksi muutettuna tämä on noin $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ enemmän kuin keskimäärin on ollut lämpötilan laskua pilkkujen huippulukemasta niiden minimiin.

Auringon muu aktiiviteetti, säteilytehon ohella, on myös laskenut 2000-luvulla merkittävästi. Tällaisia aktiivisuuden ilmentymiä ovat esimerkiksi aurinkoperäiset magneettikentän häiriöt maapallon lähiavaruudessa. Häiriöiden keskimääräinen voimakkuus kuukausikeskiarvoina (*aa*-indeksi; Kuva 10) on viimeisten parin vuoden aikana ollut matalammalla tasolla kuin sataan vuoteen, aivan 1900-luvun alussa (Kuva 10). Toistaiseksi alin lukema saavutettiin joulukuussa 2009. Toisaalta vain kuusi vuotta aikaisemmin vuonna 2003 avaruussäähäiriöisyyden kuukausiarvo oli korkein sitten 1800-luvun puolivälin, jolloin häiriöindeksien seuranta alkoi (Kuvat 10 ja 11).

Auringonpilkkujakso 23 oli kestoaltaan noin 12 vuotta (1996-2008) eli yli vuoden pitempi kuin 1900-luvun jaksot ovat yleensä olleet. Pilkkujakson piteneminen liittyy myös auringon pilkkutoiminnan ja yleensä auringon säteilyvoimakkuutta säätelevän pintamagnetismin laaja-alaiseen heikentymiseen.

Vaikka aurinko siirtyi uuteen pilkkukauteen vuoden 2008 aikana, uuden jakson auringonpilkkuja saatiin odottaa pitkään. Esimerkiksi vuoden 2009 aikana noin 71 % kaikista päivistä aurinko on esiintynyt ilman pilkkuja. Vasta seuraavana vuonna tilanne muuttui niiden osalta siten, että pilkullisia päiviä oli selvä enemmistö, yli 80 %. Vuonna 2011 pilkuttomia päiviä oli vain kaksi. Auringon alhainen aktiivisuustaso 2008-2009 oli poikkeuksellinen noin 100 vuoden aikaskaalassa, mutta menneiltä vuosisadoilta tunnetaan kausia, jolloin auringon aktiivisuus ja auringonpilkkut ovat olleet vuosikymmenien ajan nyt havaittuakin kautta alhaisemmalla tasolla. Tällaisia jaksoja oli 1600-luvun lopulla (Maunderin minimi 1645-1710) ja 1800-luvun alussa (Daltonin minimi) (Kuva 8).

Viimeiset yhdeksän täyttä auringonpilkkujaksoa (jaksot 15-23) 1910-luvulta lähtien muodostavat ns. "Suuren maksimin", jonka korkein huippu oli pilkkujakson 19 (1954-1964) aikana. Kyseinen pitkä maksimijakso oli todennäköisesti auringon toiminnassa aktiivisin kausi useiden satojen, mahdollisesti tuhansien vuosien ajanjaksolla. Nyt 2000-luvulla tapahtunut auringon pilkkuaktiiviteetin lasku liittyyne "Suuren maksimin" laskuvaiheeseen, joka on siis kestänyt jo noin 50 vuotta. Onko edessä tulevaisuudessa sitten auringon aktiivisuuden "Suuri minimi" Maunderin minimin tapaan jää nähtäväksi vuosikymmenien päähän (Lockwood, 2009).

Vuoden 2008 joulukuussa alkaneen uuden auringonpilkkujakson 24 aikana auringon irradianssi lähti nousuun vasta vuoden 2009 puolivälin jälkeen (Kuva 5). USA:n avaruushallinnon Nasan ennusteet tulevan auringonpilkkumaksimin ajankohdasta ajoittuvat vuoden 2013 kevääseen⁹. Todennäköisesti pilkkujen määrän maksimilukema jää edellistä huippua olennaisesti alemmalle tasolle, ehkä noin 50 % pienemmäksi (Kuva 9). Jos näin käy, merkitsee tällainen auringon aktiviteetin alenema myös pudotusta maapallon saamassa auringon säteilytehossa. Kyseessä ei ole kuitenkaan merkittävästä pudotuksesta, vaan noin 0.10 W/m^2 (maanpinnalla 0.06 W/m^2) tehon laskusta. Maanpintalämpötiloissa muutos merkitsee laskennallisesti noin $0.06 \text{ }^\circ\text{C}$

⁹ <http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>. Maksimijankohdan ennuste perustuu siihen, että maksimissa auringon polaarialueiden magneettikenttä vaihtaa aina napaisuuttaan. USA:n Stanfordin yliopiston Wilcoxin observatorion havaintojen mukaan auringon pohjoisen pallonpuoliskon magneettikenttä on jo vuoden 2012 aikana kahdesti käynyt käänteisellä puolella (<http://wso.stanford.edu/gifs/Polar.gif>). Magneettikentän muutostrendin avulla on arvioitavissa, että koko polaarikenttä vaihtaa napaisuuttaan keväällä 2013.

lämpötilan laskua. Vaikka ennustettu auringon alhaisen aktiviteetin taso kestäisi vuoteen 2100 saakka, ei siitä aiheutuisi kuin 0.3 °C lämpötilan pudotus vuosisadan loppuun mennessä.

5 Auringon hiukkassäteilykin vaikuttaa

Tässä on käsitelty auringon kokonaissäteilyn muutoksien vaikutuksia maapallon keskilämpötilaan. Alan kirjallisuudessa on suuri joukko tutkimuksia, joissa auringon muut aktiivisuusilmiöt liitetään maapallon ilmakehäsystemissä ja valtamerissä (NAO, ENSO yms.) havaittuihin vaihteluihin. Tällaisia ovat mm. stratosfäärin otsonikerroksen vaihtelut auringon aktiivisuuspurkauksien seurauksena hiukkassäteilyn kautta tai voimakkaan UV-säteilyn vaikutuksesta (Kuva 7). Ilmakehämallien mukaan stratosfäärin aurinkoperäinen lämpiäminen otsoniprosessien kautta vaikuttaa myös troposfäärin olosuhteisiin ilmakehän suuren mittakaavan kiertoliikkeiden kautta; ei merkittävästi, mutta vaikutus on todennettavissa ja simuloitavissa ilmakehämalleilla. Toisaalta voimistuva kasviuoneilmiö jäädyttää stratosfääriä, joten nämä kaksi tekijää ovat vaikutuksiltaan vastakkaisuuntaisia (Gray et al., 2010).

Auringon hiukkasemissioiden ja yleensä auringon aktiivisuuden taso auringonpilkkujaksojen keskiarvoissa on ollut lähes sama jo 1950-luvulta (Kuva 1). Näin auringon aktiivisuuden osuus maapallon ilmakehän lämpötilan nousussa jää hyvin vähäiseksi viimeksi kuluneiden noin 50 vuoden aikana.

Tilastollisia merkkejä on myös siitä, että auringon alhaisen aktiviteetin aikoina talvet Pohjois-Euroopan ja -Atlantin alueella ovat kylmempiä kuin muulloin (Seppälä et al., 2009; Lockwood et al., 2010). Tässä täytyy kuitenkin muistaa, että Arktikassa on käynnissä muuta maapalloa paljon voimakkaampi ilmastonmuutos. Lämpötila on noussut siellä viimeisten vuosikymmenien aikana yli kaksi kertaa nopeammin (noin 0.3 °C/10v) kuin maapallolla yleensä. Jääpeitteen syksyinen minimilaaajuus ja paksuus ovat nopeasti pienenemässä. Nykytilanne voi olla poikkeuksellinen moneen tuhanteen vuoteen (Polyak, et al., 2010; Kinnard et al., 2011). Kaikki tämä on mahdollisesti muuttamassa alueen tuuli- ja painesysteemien rakennetta siten, että sillä on olennaisia vaikutuksia Arktikan lähialueiden säätyyppeihin, joista esimerkkinä olivat Euroopan kylmät talvet 2009-2011 (Ouzeau et al., 2011; Ineson et al., 2011). Ilmastonmuutos ja

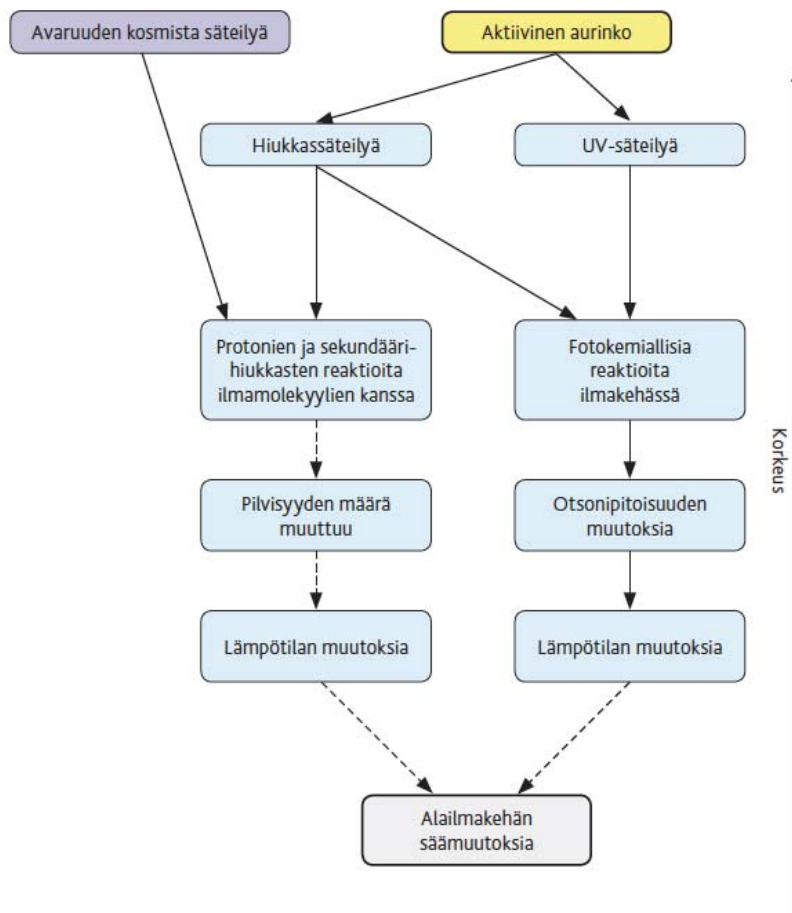
mahdolliset aurinkoperäiset tekijät ovat samanaikaisesti vaikuttamassa Arktikassa, joten ilmastollisten muutosten kvantitatiivinen analyysi edellyttää näiden molempien ilmiöiden huomioonottamista tarkasteluissa.

Auringon hiukkaspurkaukset ja avaruuden kosminen säteily on useissa tutkimuksissa liitetty maapallon pilvikerroksen vaihteluihin. Idea esitettiin jo 1950-luvulla (Ney, 1959), mutta se on aika ajoin herätetty uudelleen henkiin (Dickinson, 1975). Esimerkiksi 1970-luvun alussa saatiin jopa tulos, että koko pohjoisen pallonpuoliskon ilmakehän pyörteisyys (vorticity) tietyllä painepinnalla riippuu auringon aktiivisuuden tilasta. Syytä väitetyjen matalapaineiden voimistumiseen haettiin pilvisyyden muutoksista, joita aiheuttaisi kosmisen säteilyn¹⁰ ja auringon korkeaenergiaisten hiukasten tuottama ionisaatio ylätroposfäärissä (Roberts and Olsen, 1973). Sama analyysi, mutta laajemmasta aineistosta ja pitemmältä aikaväliltä, tuotti negatiivisen tuloksen; väitettyä korrelaatiota ilmakehän pyörteisyyden ja auringon aktiivisuuden välillä ei enää ollut (Shapiro, 1976).

1990-luvulta lähtien erityisesti Tanskan avaruustutkimusinstituutin professori Henrik Svensmark on ollut tämän hypoteesin voimakkain puolestapuhuja. Ajatusmallina on, että kosmisen säteilyn ilmakehän hiukkasia ionisoiva kyky muuttaa pilvien määrää troposfäärissä ja sitä kautta auringon aktiivisuussyklit näkyisivät maapallon ilmastollisina vaihteluina (Svensmark, 2000, 2007). Tutkimukset ovat kuitenkin vielä hypoteesitasolla, vaikka tiettyjä käytännön kokeita on tehty hiukkaskiihdyttimellä CERN:ssä. Kyseessä on ns. Cloud-projekti, jossa mukana on ollut myös mm. Ilmatieteen laitoksen ja Helsingin yliopiston aerosolitutkijoita. Projektissa on tyhjiökammiossa jäljitelty kosmisten hiukasten pilvipisaroita synnyttäviä prosesseja, mutta tulokset eivät antaneet lopullista vastausta kosmisen säteilyn osuudesta pilvimuodostukseen (Kirkby et al., 2011). Pilvihypoteesista puuttuu väitetyjen maanpäällisten ilmiöiden ja aurinkoperäisten tekijöiden riippuvuussuhteiden merkittävä tilastollinen

¹⁰ Kosminen säteily muodostuu ulkoavaruudesta tulevista primäärisistä galaktisista hiukkasista (lähinnä proto-neista), jotka törmäyksillään aiheuttavat sekundäärihiukasten muodostumista ilmakehässä. Tässä yhteydessä "kosmisella säteilyllä" tarkoitetaan korkeaenergiaisia sekundäärihiukkasia. Hiukkastörmäyksien lopputuloksina muodostuu kosmogeenisiä isotooppeja, esimerkiksi ¹⁰Be ja ¹⁴C, joiden pitoisuudet voidaan mitata esimerkiksi jääkairausnäytteistä tai puulustoista tuhansia vuosia ajassa taaksepäin. Niiden vaihtelut menneisyydessä kertovat ilmakehään kohdistuneen kosmisen säteilyn muutoksista. Suorilla mittauksilla voidaan seurata reaaliajassa kosmisen säteilyn synnyttämää neutronivuota. Kosmisen säteilyn intensiteetti vaihtelee maapallolla auringon aktiivisuuden mukana, koska aurinkotuulen magneettikenttä sirottaa osan säteilystä takaisin avaruuteen.

evidenssi, sillä useimmat tutkimukset ovat hypoteesia vastaan (Kulmala et al., 2010) tai osoittavat, että kosmisen säteilyn pilviefekti on hyvin heikko (Benestad, 2006, Kazil et al., 2012). Kosmisen säteilyn maanpinnalla mitattava voimakkuus ja muut auringon aktiviteettia kuvaavat suureet ovat 11-vuoden keskiarvoissa pysyneet olennaisesti samalla tasolla viimeiset noin 50 vuotta (Kuvat 1 ja 11). Samaan aikaan kuitenkin maapallon lämpötila on nopeasti kohonnut, mikä viittaa vahvasti siihen, ettei auringolla ole ollut merkittävää vaikutusta maapallon lämpötilan nousuun tuona aikana.



Kuva 7. Kaavio auringon aktiivisuuden vaikutuksista maapallon ilmakehässä. Katkoviivoitetut nuolet kuvaavat vaikutuksia, joiden fysikaalisesta todenperäisyydestä ei olla varmoja. Vasemmanpuoleinen oletettu vaikutuslinja kosmisen säteilyn kautta on tieteellisesti huomattavasti epävarmimmalla pohjalla kuin oikeanpuoleinen tapahtumaketju. Siinä stratosfääriin auringon aktiivisuudesta johtuvat otsonipitoisuuksien vaihtelut käynnistävät muutoksia, jotka etenevät troposfääriin asti ja vaikuttavat suuren mittakaavan kiertoliikkeisiin ilmakehässä. Kaaviossa esitettyjen mekanismien lisäksi tulee vielä auringon kokonaissäteilyn pieni muutos auringonpilkkujakson aikana, josta aiheutuu lämpötilan vaihtelu alailmakehässä. Kuva teoksesta "Avaruussää - Auringosta tuulee" (URSA) (Nevanlinna, 2006).

6 Hiipuuko aurinko? Viileneekö ilmasto?

Auringon aktiivisuus on ohittanut 11-vuotisessa jaksollisuudessaan viimeisimmän minimin (2008) ja seuraavan pilkkumaksimin¹¹ arvioidaan olevan keväällä 2013. Minimien ajankohta viivästyivät noin kahdella vuodella 1900-luvun jaksoihin verrattuna (Kuva 9). Tällä kertaa minimikaudesta tuli tavanomaista - noin 100 vuoden aikaskaalassa - pitempi ja aktiivisuustoiminta auringossa on alempi kuin esimerkiksi 1900-luvun loppuvuosikymmenien aikana koetuissa minimivaiheissa (Kuva 10). Kyseessä voi olla auringon säteilytoiminnasta tunnettujen pitkäaikaisten (90 - 200 vuotta) jaksollisuuksien (Kuva 8) ilmentymä ennakkoiden sitä, että tulevat jaksot ovat heikompia kuin keskimäärin 1900-luvulla on ollut (Lockwood, 2009).

Kuvassa 9 on esitetty kuinka auringonpilkkut ovat kehittyneet pilkkujaksojen 23 ja 24 (1996-2012) aikana. Jakso 23 alkoi pilkkuminimissä marraskuussa 1996. (Tässä pilkkuminimi määritellään pilkkulukujen liukuvasta 13 kuukauden keskiarvosta). Uusi minimi oli joulukuussa 2008, joten jakson 23 pituus oli noin 12 vuotta. Viimeksi näin pitkä pilkkujakso oli 1889-1901. Kuvasta 9 nähdään, että pilkkujakso 1996-2008 oli pilkkumaksimiltaan suunnilleen yhtä korkea kuin 1900-luvun jaksoissa keskimäärin. Vuoden 2009 aikana auringonpilkkulukua pysytteli alhaalla lukemissa 1-3, kun sen tilastojen mukaan pitäisi olla jo useita kymmeniä (Kuva 9). Vasta vuoden 2010 aikana kuukausittaiset pilkkuluvut ylittivät lukeman 20, mutta vielä vuoden 2012 puolivälissä lukemat olivat suunnilleen puolet edellisen maksimin arvoista. Auringon kokonaissäteily on noussut (heinäkuuhun 2012 mennessä) noin 1 W/m^2 vuoden 2008 pilkkuminimin pohjalukemista, mutta on edelleen merkittävästi pienempi kuin edellisen pilkkujakson huippuarvo (Kuva 5).

On todennäköistä, että tulevina vuosikymmeninä auringon yleinen aktiivisuustaso ja pilkkumaksimit jäävät selvästi alemmaksi kuin 1900-luvun viimeiset pilkkujaksot. Viitteitä on myös siihen, että auringon pilkkuaktiiviteetti katoaa lähes tyystin seuraavien 3-5 pilkkujakson jälkeen (Lockwood et al., 2011). Näin tapahtui auringon

¹¹ <http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml> (2.8.2012)

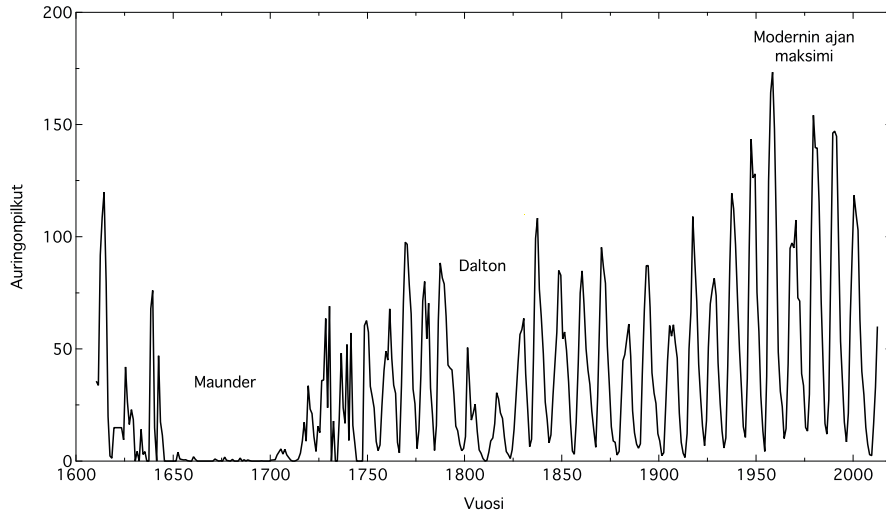
Maunderin minimin¹² aikana 1645-1715. Auringon kokonaissäteily IPCC:n vuoden 2007 raportin mukaan oli tuolloin noin 0.7 W/m^2 alempana auringonpilkuminimin 1996 tasoon verrattuna. Auringon säteilypakotteeksi muunnettuna säteilyn pudotus¹³ oli 0.12 W/m^2 . Maapallon keskilämpötilan muutokseksi laskettuna se merkitsi alle $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilan laskua. Kylmät ajanjaksot esimerkiksi 1600-luvun loppupuolen Euroopassa eivät kuitenkaan ole aiheutuneet yksinomaan auringon säteilyn väheneemisestä, vaan mukaan tarkasteluun täytyy ottaa tulivuoritoiminta, muutokset valtamerien merivirroissa, energian hitaat vaihdot ilmakehän ja valtamerien välillä (mm. NAO ja ENSO) sekä erilaiset ilmakehän muut suuren mittakaavan vaihtelut, aina stratosfääriä myöten, jotta havaitut muutokset voitaisiin selittää. Ehkä luotettavimman kuvan viimeisen 1000 vuoden lämpötilavaihtelujen monista syistä, auringon vaikutukset mukaan lukien, saa arvostetun saksalaisen Max-Planck -instituutin laajasta “Millennium”-projektin¹⁴ tuloksista ja julkaisuista (Jungclauss et al., 2010): ilmakehän sisäiset oskillaatiot yhdessä tulivuoritoiminnan ja auringon säteilymuutosten kanssa kuvaavat ennen teollista aikaa vallinneet lämpötilamuutokset, mutta sen jälkeen tarvitaan CO_2 -pitoisuuksien kasvu mukaan selittäväksi tekijäksi.

Maunderin minimin (1645-1715) aikainen ilmasto Euroopassa oli vaihtelevaa, ja aikakauden kylmimmät vuodet olivat 1690-luvulla. Toisaalta 1800-luvun lopulla oli vielä kylmempää, vaikka auringon aktiivisuus oli jo kasvanut selvästi yli Maunderin minimin aikaisen tason (Luterbacher et al., 2004). Kylmin talvi Euroopassa ajanjaksolla 1500-2005 oli 1708-1709, jolloin rantavedet jäättyivät Välimeren pohjoisrannikoilla (Pain, 2009). Vaikeat nälänhädät Suomessa ja monin paikoin muualla Euroopassa 1690-luvulla aiheutuivat lähinnä siitä, että kevät ja syksyt olivat poikkeuksellisen kylmiä ja sateisia usean peräkkäisen vuoden ajan, jolloin sadot jäivät niukoiksi. Ihmisten kurjuutta lisäsi vielä tavanomaista kylmemmät talvet (Neumann and Lindgren, 1979; Luterbacher et al., 2004).

¹² Vaikka auringonpilkut olivat lähes poissa Maunderin minimin aikana auringon hiukkasaktiivisuus palasi jo 1700-luvun alussa. Se ilmeni voimakkaina revontulina Keski-Eurooppaa myöten, joista on lukuisia aikalaisdokumentteja esimerkiksi vuosilta 1704 ja 1707 (Schröder, 1992). Lopullisesti Maunderin minimi oli ohi keväällä 1716, jolloin sattui poikkeuksellisia revontulimyrskyjä aina Etelä-Eurooppaa myöten (Nevanlinna, 2009b).

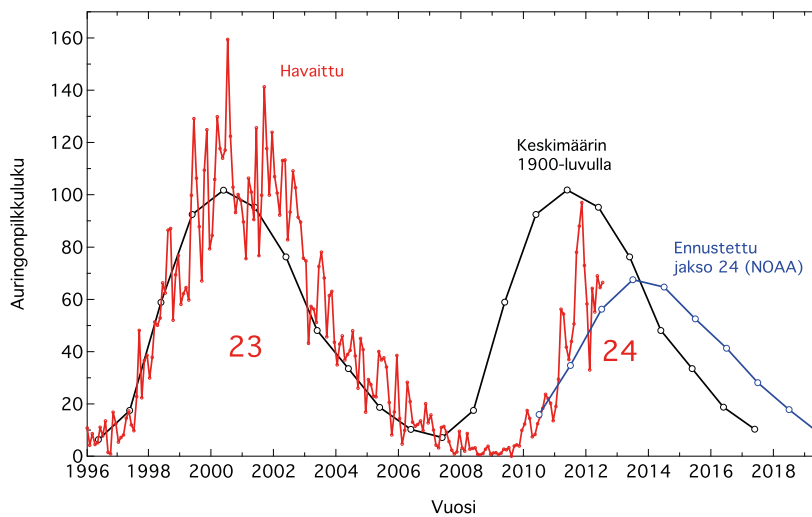
¹³ Edellisestä IPCC:n raportista (TAR, 2001) auringon säteilypakotetta Maunderin minimistä nykyaikaan on uusien tutkimusten valossa pienennetty noin tekijällä 2 (kts. IPCC The Climate Change 2007, The Physical Science Basis, Chp. 2 Changes in Atmospheric Constituents and Radiative Forcings, Table 2.10).

¹⁴ www.mpimet.mpg.de/en/science/internal-projects/millennium.html



Kuva 8. Auringonpilkkujen¹⁵ vaihtelu 1610-2011. Pilkkuluvut ovat ns. ryhmäaurionpilkku-lukujen vuosikeskiarvoja (Hoyt and Schatten, 1998).

11-vuotinen pilkkuvaihtelu näkyy selvästi, mutta pilkkumaksimit olivat pieniä tai kokonaan poissa 1600-luvulla (Maunderin minimi) ja 1800-luvun alussa (Daltonin minimi). Pilkkuhuiput saavutettiin 1950-luvun lopulla.



Kuva 9. Punainen: Auringonpilkkujen (Kansainvälinen auringonpilkkuluku R_i) kuukausikeskiarvojen kehitys pilkkujaksojen 23 (1996-2008) ja 24 (2008-) aikana (viimeisin arvo on heinäkuulta 2012).

Musta: Auringonpilkkuluku keskimäärin 1900-luvulla. Jakso 24 on pilkkulukujen kasvun suhteen 2-3 vuotta jäljessä auringonpilkkujen lukumäärien keskimääräisestä kehityksestä

Sininen: Ennustettu (NOAA Space Weather Prediction Center) auringonpilkkujakso 24, jonka maksimi on arvioitu olevan keväällä vuonna 2013. Pilkkulukujen ennustettu (tasoitettu) maksimi on noin 60, kun se edellisessä maksimissa (2000) oli 120.

¹⁵ Kyseessä on ns. ryhmäaurionpilkkuluku (Group Sunspot Number), joka on korjattu ja laajennettu versio kansainvälisestä auringonpilkkuluvusta R_i (Kuva 9). R_i tunnettiin aikaisemmin nimellä "Zürichin auringonpilkkuluku" (<http://sidc.oma.be/>). GSN alkaa vuodesta 1610, R_i vuodesta 1700. 1800-luvun puolivälistä lähtien GSN ja R_i ovat olennaisesti samoja. Niiden välillä on suuria eroja 1700- ja 1800-luvulla, koska vanhoissa pilkkuhavainnoissa on todettu olleen paljon virheellisyyksiä ja mukaan on saatu ennen käyttämättömiä auringonpilkkuhavaintoja (Hoyt and Schatten, 1998).

Suomessa pahimmat kato- ja kuolonvuodet koettiin 1695-1697, jolloin maamme väkiluvusta tuhoutui lähes kolmannes (Topelius, 1934; Neumann and Lindgren, 1979).

7 Geomagneettinen *aa*-indeksi ja maapallon lämpötilan muutokset

Geomagneettisten häiriöiden voimakkuutta luonnehditaan erilaisilla indeksiluvuilla eli aktiivisuusindekseillä, jotka kuvaavat magneettikentän epäsäännöllisiä vaihteluja osana avaruussähköhäiriöiden kokonaisuutta (Nevanlinna, 2009a; Nevanlinna et al., 2011b). Vaihtelujen lähteet ovat maapallon lähiavaruudessa, ionosfäärin ja magneto-sfäärin sähkövirroissa. Viime kädessä ne saavat alkunsa auringossa tapahtuvista purkauksista hiukkasemissioiden muodossa ja korkeaenergisestä säteilystä. Perinteisesti indeksiluvut lasketaan kolmen tunnin välein kunkin observatorion rekisteröinneistä. Indeksit perustuu magneettikentän suurimpaan amplitudiin kolmen tunnin sisällä, kun säännöllinen vuorokautinen vaihtelu on eliminoitu. Näin saadaan paikallinen häiriöisyys selville. Yhdistelemällä globaalisesti kattavat luvut ja normittamalla ne yhdenmukaisiksi, indeksit kuvaavat maapallonlaajuisesti magneettista häiriöisyyttä eli avaruussään magneettista komponenttia. Välillisesti indeksit kertovat myös auringon aktiivisuudesta, lähinnä sen hiukkasemissioista.

Pitkillä indeksisarjoilla on tieteellistä merkitystä arvioitaessa avaruussään hitaita muutoksia auringonpilkkujaksojen aikana. Pisin yhtenäinen aktiivisuuslukusarja on ns. *aa*-indeksi. Siitä on olemassa kolmen tunnin välein lasketut indeksiluvut 1.1.1868 lähtien¹⁶. Yleensä niistä lasketaan päivä-, kuukausi- ja vuosikeskiarvo avaruussään muutoksien tutkimuksia varten. *aa*-indeksi perustuu kahden magneettisen observatorion rekisteröinteihin¹⁷. Toinen niistä on Englannissa (aluksi Greenwich, nykyisin Hartland) ja toinen Australiassa (Melbourne, sittemmin Canberra). Observatoriot sijaitsevat suunnilleen maapallon vastakkaisissa kohdissa, joten niiden rekisteröinnit antavat magneettikentän avaruussähköhäiriöistä maapallonlaajuisen kuvan pienimmällä mahdollisella havaintopaikkojen määrällä.

¹⁶ *aa*-indeksidatat: ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/

¹⁷ http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/data/magnetic_indices/aaindex.html

aa-indeksi antaa yksityiskohtaista tietoa (3 h resoluutiolla) avaruussäähäiriöiden magneettisista vaihteluista 14 auringonpilkkujakson (jaksot 11-24) ajalta lähes 150 vuoden periodilta. Indeksistä saadaan myös välillistä tietoa auringon aktiivisuustapahtumista ja aurinkotuulen vaihteluista eri aikaväleillä. Aineistoa käytetään paljon avaruussään ja -ilmaston aurinko-maa vuorovaikutuksien tutkimuksissa. Hakusanalla "*geomagnetic aa-index*" saa internetistä yli 150 000 osumaa.

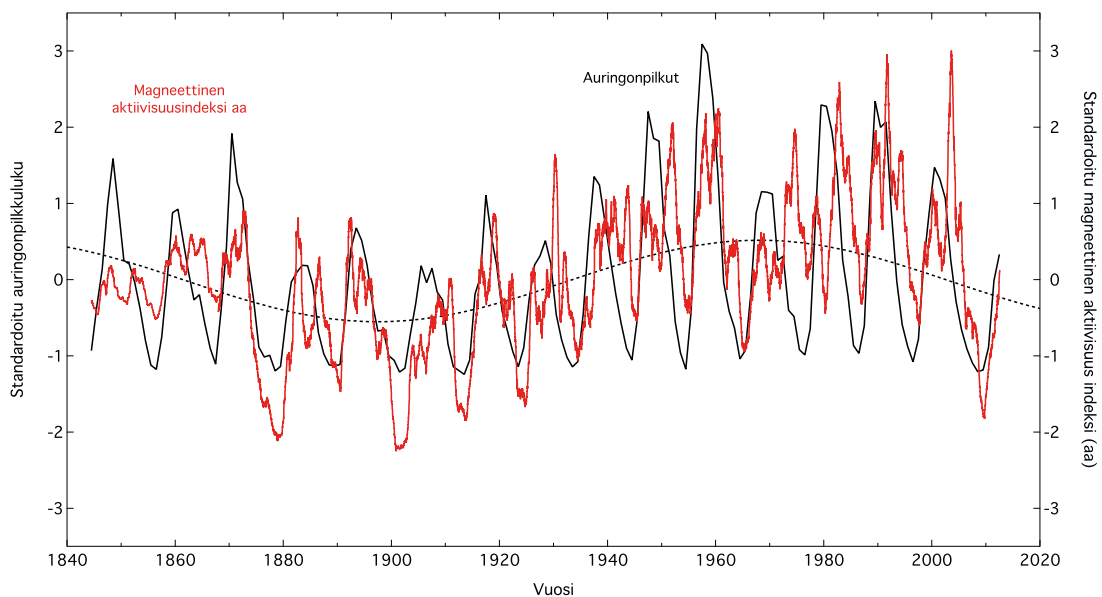
Alkuperäistä *aa*-indeksisarjaa on voitu täydentää Helsingissä 1800-luvulla tehtyjen magneettisten havaintojen avulla. Ilmatieteen laitoksen varhaiset magneettiset mitaukset olivat osa silloista meteorologista havainto-ohjelmaa (Nevanlinna, 2011a). Kyseessä oli tunnin välein (aluksi 6 kertaa tunnissa) tehdyt magneettikentän mitaukset 1844-1897 Helsingin magneettis-meteorologisessa observatoriossa (nykyinen Ilmatieteen laitos). Niiden avulla laskettiin *aa*-indeksin vastine kolmen tunnin jaksoissa. Vertailukaudella (1868-1897) Helsingin aktiivisuusluvut (kuukausiarvot) korreloituivat globaaliin *aa*-indeksiin kertoimella 0.9, kun aineistona oli indeksien kuukausiarvot (Nevanlinna, 2004b). Näin virallinen *aa*-indeksi on saanut jatkukseen kahden auringonpilkkujakson verran uutta aineistoa 1844-1868. Helsingin magneettisen aktiivisuuden havaintosarjaa¹⁸ on käytetty alan tutkimuksessa paljon mm. ennustettaessa tulevien auringonpilkkumaksimien voimakkuuksia tai arvioitaessa auringosta maa-pallolle emittoituvan aurinkotuulen parametreja (Kane, 1997; Lockwood et al., 1999). Siitä käytetään *aa*-indeksin yhteydessä nimitystä "*The Helsinki Extension*" (Lockwood, 2003).

Kuvassa 10 on *aa*-indeksin aikasarja 1868-2012 täydennettynä Helsingin havainnoilla 1844-1868 yhdessä auringonpilkkulukujen kanssa. Hiukkasperäinen häiriöisyys (*aa*-indeksi) noudattaa pääpiirteissään auringonpilkkujen määrien vaihteluja niiden 11-vuotisessa jaksollisuudessa. Häiriöisyyden huiput sattuvat kuitenkin yleensä muutamia vuosia pilkkumaksimin jälkeen. Itse pilkkumaksimin kohdalla hiukkahäiriöisyys laskee usein muutaman vuoden ajaksi. Tällöin auringon laaja-alainen polaarinen magneettikenttä vaihtaa napaisuuttaan. Auringon aktiivisuus, *aa*-indeksillä mitattuna, on kaksihuippuinen: ensimmäinen on lähellä auringonpilkkujen maksimin ajankohtaa, toinen (usein vielä kolmaskin) huippu sattuu pilkkumäärien laskevalle kaudelle 2-4

¹⁸ Helsingin magneettisen aktiivisuusindeksisarjan datat 1844-1897: <http://www.ava.fmi.fi/MAGN/magn/Helsinki/>

vuotta maksimin jälkeen, jolloin auringon kokonaissäteilyteho on jo laskemassa kohti pilkkuminimin lukemia. Näin voimakkaita auringon aiheuttamia magneettisia myrskyjä voidaan maapallolla havaita useita vuosia pilkkumaksimin jälkeenkin.

Tarkasteltaessa *aa*-indeksisarjaa kokonaisuudessaan vuodesta 1844 alkaen, havaitaan, että 1900-luvun puoliväliin mennessä indeksin keskiarvossa oli systemaattista kasvua pilkkujaksosta toiseen, mutta vuosisadan puolivälin jälkeen on ollut indeksitason laskua. Vastaavanlainen kehityskulku on ollut myös muissa auringon aktiivisuutta kuvaavissa suureissa kuten auringonpilkkujen määrässä, auringon kokonaissäteilytehossa, revontulien esiintymistiheydessä ja kosmisen säteilyn voimakkuudessa (joka on kääntäen verrannollinen auringon aktiivisuuteen) (Kuva 11). Näitä hitaita muutoksia säätelee auringon pintakerroksen magneettisuus. Sen voimistuminen 1900-luvun alussa lisäsi avaruussähäiriöitä (revontulet ja magneettiset myrskyt) maapallon lähiavaruudessa, mutta vuosisadan loppua kohden aktiivisuus tasoittui ja avaruussähäiriöiden esiintymistiheys pienentyi (Lockwood et al., 1999).

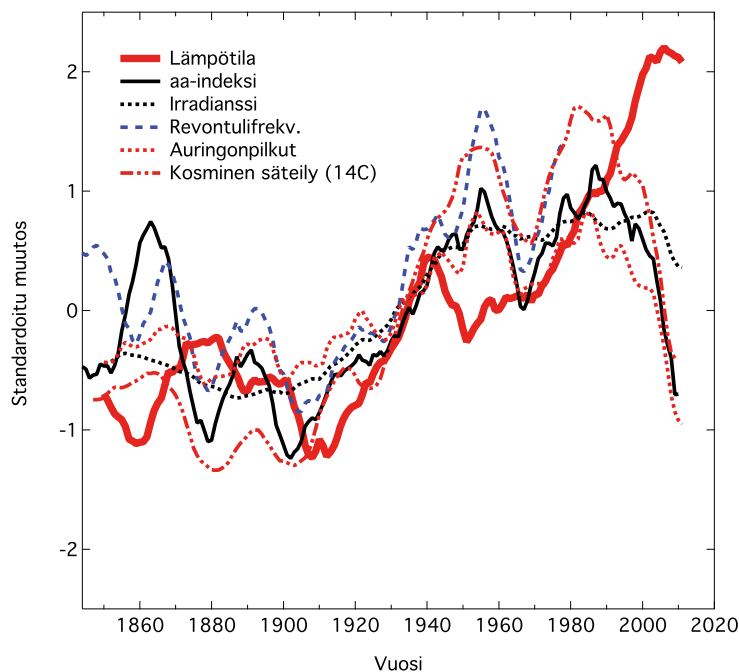


Kuva 10. Musta: (standardoitu¹⁹) auringonpilkkuluku 1844–2012. Pisteviiva: auringonpilkkujen hidas tilastollinen vaihtelu, jossa esiintyy noin 150 vuoden jaksollisuus.

Punainen: päivittäisen (standardoidun) avaruussähäiriöisyysluvun (*aa*) tasoitettu (365 d) vuosiarvo. Vuonna 2009 aktiivisuuden minimi oli alin noin sataan vuoteen. Magneettinen aktiivisuus on edelleenkin (2012) alhaalla, vain hieman kahden edellisen minimin yläpuolella, vaikka pilkkumaksimi on lähestymässä (2013).

¹⁹ Aikasarjan luvut x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) muutetaan standardoituun muotoon X_i siten, että $X_i = (x_i - \mu)/\sigma$, missä μ on x_i -lukujen keskiarvo ja σ niiden keskihajonta. X_i -lukujen keskiarvo = 0 ja keskihajonta = 1.

Avaruussäätötilastojen voimakkaimmat häiriöt olivat vuonna 2003, jolloin keskimääräinen häiriöisyys oli korkeimmillaan havaintojen alkamisesta vuonna 1844 (Kuva 10). Alimmillaan häiriöisyyden taso on yleensä auringonpilkkujen esiintymisen minima aikana tai vähän sen jälkeen. Havaintojakson 1844-2011 alin häiriöisyyden taso oli aivan 1900-luvun alussa. Suunnilleen samoihin lukemiin päästiin vuoden 2009 lopulla vain noin kuusi vuotta absoluuttisen häiriömaksimin jälkeen. Merkille pantavaa on, että magneettinen aktiivisuus on vuoden 2012 aikana, ilmeisesti vain noin vuotta ennen seuraavaa auringonpilkkumaksimia, ollut keskimäärin hyvin matalalla tasolla eli vain hieman korkeampi kuin kahden aikaisemman pilkkujaksojen minimien aikoihin. Vastaavanlainen matalan aktiivisuuden kausi oli vallalla hieman yli 100 vuotta sitten 1900-luvun alussa kuten Kuvista 10 ja 11 voidaan päätellä.



Kuva 11. Maapallon lämpötila (Hadley-keskus) 1850-2011, geomagneettinen aktiivisuusluku (*aa*), auringon kokonaissäteilyvoimakkuus (irradianssi), keskileveysasteiden revontulien esiintymisfrekvenssi²⁰, auringonpilkkuluku ja kosmisen säteilyn voimakkuus (käänteisessä asteikossa). Kaikki suureet ovat standardoituja vuosikeskiarvoja ja tasoitettuna 11-vuoden suodatuksella.

1990-luvulta lähtien auringon aktiivisuutta kuvaavat tunnusluvut kääntyivät jyrkkään laskuun (Kuva 11), mutta maapallon lämpötila on jatkanut kasvuaan. Tosin siinäkin

²⁰ Revontulien esiintymisfrekvenssi perustuu keskileveysasteilla tehtyihin visuaalisiin revontuli-havaintoihin eri puolilta maapalloa. Ne seuraavat auringon hiukkasaktiivisuutta kuten *aa*-indeksikin. Havainnot on koottu eri maiden meteorologisista vuosikirjoista (Legrand and Simon, 1991). Aineisto kattaa aikavälin 1780-1979. Myöhemmistä havainnoista kts. Nevanlinna and Pulkkinen (2001), Pulkkinen et al. (2001).

oli 2000-luvulla tilapäinen pysähtyminen, joka johtuu lähinnä ilmakehää viilentävän La Niña -vaihtelun voimistumisesta, mutta myös osittain auringon pitkittyneestä minimikaudesta 2007-2009 (Kuva 3).

Tutkittaessa auringon aktiivisuuden mahdollisia vaikutuksia maapallon pitkäaikaiseen lämpötilakehitykseen *aa*-indeksiä on sovellettu silloin, kun muutosten syyksi on haluttu nähdä auringon hiukkasemissiöt ja magneettiset myrskyt. Vaikutusmekanismiksi on esitetty voimakkaiden hiukkaspommituksen aiheuttamia muutoksia mesosfäärin ja stratosfäärin koostumuksissa, jotka voivat muuttaa yläilmakehän (20 km -) lämpötilajakaumaa ja vaikuttaa siten ilmakehän laajan mittakaavan kiertoliikkeisiin (Benestad, 2006; Seppälä et al., 2009; Gray et al., 2010). Useissa tutkimuksissa taas ei ole mukana mitään selityshypoteesia, vaan analyysi on ollut tilastollinen, missä auringon aktiivisuuden muutoksia kuvaavan *aa*-indeksin aikasarjaa (tai muuta avaruussäätä kuvaavaa lukusarjaa) on korreloitu vastaavaan tilastoon lämpötilan osalta (Love et al., 2011; Ollila, 2011; Tiuri, 2012). Analyysi *aa*-indeksin ja maapallon lämpötilan vaihtelujen välillä 1868-2011 osoitti, ettei näiden välillä ole tilastollisesti merkittävää korrelaatiota (Love et al., 2011).

On todennäköisintä, että auringon hiukkasaktiivisuus (magneettiset myrskyt, kosminen säteily ja revontulet) pilkkujaksojen aikana ilmenee maapallon lähiavaruuden häiriöinä, mutta sen vaikutus ei merkittävästi ulotu alailmakehään muuta kuin mahdollisesti äärimmäisen voimakkaissa yksityistapauksissa. Auringon irradianssin kasvu 1900-luvun alussa voidaan liittää yhtenä osatekijänä samaan aikaan tapahtuneeseen maapallon lämpötilan kasvuun (Kuva 3), mutta 1900-luvun jälkipuoliskolla irradianssin muutokset tasaantuivat ja vaikutukset ilmakehään jäivät siten vähäisiksi, koska maapallon lämpötila on jatkanut kasvuaan (Kuva 11).

8 Lopuksi

Vaikka siis auringon yleinen aktiviteetti ja säteilytoiminta ovatkin tulevana vuosikymmeninä mahdollisesti laskemaan päin, ei niistä ole odotettavissa suuria muutoksen aiheuttajia maapallon lähivuosisikymmenien ilmastolliseen kehitykseen. Auringon säteilytoiminnasta johtuva laajamittainen ilmaston merkittävä viileneminen ei ole

todennäköinen²¹. Ihmiskunnan aiheuttama kasvihuoneilmiön voimistuminen ja siitä johtuva maapallon lämpötilan nousu 2000-luvun puoliväliin mennessä peittää alleen auringon säteilyn heikentymisestä aiheutuvan lämpötilan mahdollisen pienen (0.1 – 0.2 °C) laskun (Jones et al., 2012).

Auringon aktiivisuuden pitkittynyt hiljainen kausi ja sen mahdollinen kesto vielä vuosia eteenpäin merkitsee maapallon yläilmakehän olosuhteiden kannalta eniten avaruussään vaihtelujen hiljentymistä. Tällöin olosuhteet maapallon lähiavaruudessa, auringon hiukkassäteilyn ja sähkömagneettisen säteilyn voimakkuudet ovat selvästi aikaisempia vuosikymmeniä alhaisemmalla tasolla. Avaruussään erästä ilmentymää, revontulia, tullaan siten näkemään harvemmin kuin aikaisempina vuosina.

Avaruuslentojen ja satelliittien toimintojen kannalta avaruussään vaihtelujen heikkeneminen on hyvä asia, koska auringon hiukkassuihkujen aiheuttamia laitevikoja ja astronauteille vaarallista säteilyä esiintyy silloin vähemmän kuin auringon korkean aktiivisuuden aikoina. Myös satelliittien elinajat pitenevät, koska avaruussään heikkeneminen näkyy satelliitteja jarruttavan ilmakehän tiheyden pienenemisenä avaruusluotaimien lentokorkeuksilla (Nevanlinna, 2006).

Nykyinen pilkkujakso 24 näyttää uusimpien ennusteiden mukaan jäävän (tasoitetun) pilkkuluvun maksimin suhteen suunnilleen samalle tasolle kuin noin 100 vuotta sitten maksimoituneen jakson 14 suurin lukema. Vaikka suurten avaruussäämyrskyjen tilastollinen esiintymistiheys jää siten alemmalle tasolle kuin myöhemmin 1900-luvulla, voi silti esiintyä poikkeuksellisen voimakkaita myrskyjä. Tästä on esimerkkinä yllämainittu pilkkujakso 14, jolloin koettiin kaksi poikkeuksellisen suurta avaruussäämyrskyä vuonna 1903 ja 1909. Näistä edellinen sijoittui myrskyjen voimakkuus-tilastoissa (1844-2012) sijalle 8 ja jälkimmäinen sijalle 6. Maunderin minimin jälkeen vuonna 1716 havaittu poikkeuksellisen voimakas avaruussäähäiriö, jolloin revontulia nähtiin aina Välimerta myöten, tapahtui myös auringonpilkkujen määrän ollessa hyvin vähäinen, merkittävästi alempi kuin pilkkuminimeissä 1900-luvulla.

²¹ Niin sanottujen ilmastokeptikkojen piirissä auringon säteilyn muutokset nousevat uudelleen ja uudelleen esiin ilmastomuutoksen pääasiallisena syynä. Viimeisin tällainen oli sosiaalisessa mediassa suurta huomiota saanut poleeminen kirja "*Die kalte Sonne*" [Kylmä aurinko] (Vahrenholt und Lüning, 2012). Ilmastokeptimismien olemusta on tarkastellut mm. Alestalo (2012).

Auringon aktiivisuuden osuus maapallon lämpötilassa ja ilmastomuutoksessa on verifioitavissa tilastojen ja ilmastomallien kautta, mutta sen osuus ei ole ollut keskeinen viimeksi kuluneiden noin 1000 vuoden aikana eikä erityisesti nykyaikana ilmakehässä vaikuttavien antropogeenisten tekijöiden rinnalla.

9 Lähdeviitteet

- Alestalo, M., 2012. Ilmastokynnisyys. *Tieteessä Tapahuu*. 2/2012, 1-2.
- Angervo, J.M., 1948. Sääopin perusteet, WSOY, 457 s.
- Benestad, R.E., 2006. Solar activity and Earth's climate. Springer, 316 p.
- Benestad, R.E. and Schmidt, G.A., 2009. Solar trends and global warming. *J. Geophys. Res.*, 114, D14101, doi:10.1029/2008JD011639.
- Berger, A. and Loutre, M.F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million of years. *Quater. Sci. Rev.*, 10, 297-317.
- Chapman, S. and Bartels, J., 1940. Geomagnetism, Vol. I & II. Oxford, Clarendon Press.
- Chiodo, G., et al., 2012. The 11 year solar cycle signal in transient simulations from the whole atmosphere community climate model. *J. Geophys. Res.*, 117, D06109, doi:10.1029/2011JD016393
- Crowley, T.J., 2000. Causes of climate change over the past 1000 Years, IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #2000-045. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.
- Dickinson, R., 1975. Solar variability and lower atmosphere. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 56, 1240-1248.
- Esper, J., et al., 2012. Orbital forcing of tree-ring data. *Nature Clim. Change*. doi:10.1038/nclimate 1589
- Feulner, G., 2011. Are the most recent estimates for Maunder Minimum solar irradiance in agreement with temperature reconstruction? *Geophys. Res. Lett.*, 38, L16706, doi:10.1029/2011 GL048259.
- Feulner, G. and Rahmstorf, S., 2010. On the effect of a new grand minimum of solar activity on the future climate on Earth. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L05707, doi:10.1029./20GL0421710.
- Foster, G. and Rahmstorf, S., 2011. Global temperature evolution 1979-2010. *Environ. Res. Lett.* 6, 044022 doi:10.1088/1748-9326/6/4/044022.

- 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.
- Gray, L.J. et al., 2010. Solar influence on climate. *Rev. Geophys.*, 48, doi: 10.1029/2009RG000082.
- Gribbin, J. and Plagemann, S., 1977. The Jupiter effect. Fontana, 156 p.
- Haigh, J.D. et al., 2010. An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate. *Nature*, 467, 696-699.
- Heiskanen, V.A., 1948. Tähtitiede I & II. WSOY.
- Helama, S., et al., 2010. Sub-Milankovitch solar forcing of past climates: Mid and late Holocene perspectives. *Bull. Amer. Geol. Soc.*, 122, 1981-1988.
- Herschel, W., 1801. Observations tending to investigate the nature of the Sun. *Phil. Trans. of the Royal Soc. London* 265, 265-318.
- Hoyt, D. V. and Schatten, K. H., 1998. Group Sunspot Numbers: A new solar activity reconstruction. *Sol. Phys.*, 181491-512.
- Ineson, S., et al., 2011. Solar forcing of winter climate variability in the northern hemisphere. *Nature Geosci.*, doi:10.1038/ngeo1282.
- IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change, 2007. Working Group I. Report The Physical Science Basis, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch10.html.
- Johnson, M.O., 1950. Cycles in weather and solar activity. Pacific Press, USA, 224 p.
- Jones, B.W., 2007. Discovering the Solar System. Wiley, 300 p.
- Jones, G. S., et al., 2012. What influence will future solar activity changes over the 21st century have on projected global near surface temperature changes? *J. Geophys. Res.*, 117, doi:10.1029/2011JD017013.
- Jungclauss, J., et al., 2010. Climate and carbon-cycle variability over the last millennium, *Clim. Past*, 6, 723-737, doi:10.5194/cp-6-723-2010.
- Kazil, J., et al., 2012. The present-day decadal solar cycle modulation of Earth's radiative forcing via charged H₂SO₄/H₂O aerosol nucleation. *Geophys. Res. Lett.*, 39, doi:10.1029/2011GL050058.
- Kane, R. P., 1997. A preliminary estimate of the size of the coming Solar Cycle 23, based on Ohl's precursor method, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1899-1902.
- Kinnard, C., 2011. Reconstructed Arctic sea ice over the past 1450 years. *Nature*, 468, 509-512.

- Kirkby, J., et al., 2011. Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation. *Nature*, 476, 429–433 (25 August 2011) doi:10.1038/nature10343.
- Kondratyev, K.Ya., and Nikolsky, G.A., 1970. Solar radiation and solar activity. *Q. J. Royal Met. Soc.*, 96, 509-22.
- Kopp, G. and Lean, J.L., 2011. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L01706, doi:10.1029/2010GL045777.
- Kulmala, M., et al., 2010. Atmospheric data over a solar cycle: no connection between galactic cosmic rays and new particle formation. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 1885-1889.
- Köppen, W., 1873. Über mehjährige Perioden der Witterung, insbesondere über die 11jährige Periode der Temperature. *Z. Meteor.*, VIII, 241-248.
- 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.
- Laut, P., 2003. Solar activity and terrestrial climate: an analysis of some purported correlations. *Journ. Atm. Solar-Terr. Phys.*, 65, 801-812.
- Lean, J.L., 2009. Cycles and trends in solar irradiance and climate. *Interdisciplinary Rev. - Climate change*. 1, 111-122.
- Lean, J.L. and Rind, D.H., 2008. How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006. *Geophys. Res. Lett.*, 35, doi:10.1029/2008GL034864.
- Lean, J. et al., 2005. Sorce contributions to new understanding of global change and solar variability. *Sol. Phys.*, 230, 27-53.
- Legrand, J.P. and Simon, P.A., 1991. A two-component solar cycle. *Sol. Phys.*, 131, 187-209.
- Legras, B., et al., 2010. A critical look at solar-climate relationships from long temperature series. *Clim. Past.*, 6, 745-758.
- Lockwood, M., 2003. Twenty-three cycles of changing open solar magnetic flux. *Journ. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2002JA009431.
- Lockwood, M., 2009. Solar change and climate: an update in the light of the current exceptional solar minimum. *Proc. R. Soc. (A)*, 466, 303-329.

- Lockwood, M., 2011. Was UV spectral solar irradiance lower during the recent low sunspot minimum? *J. Geophys. Res.*, 116, D16103, doi:10.1029/2010JD014746.
- 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, 1999.
- Lockwood, M., et al., 2010. Are cold winters in Europe associated with low solar activity? *Environ. Res. Lett.*, 5, 1-5.
- Lockwood, M., et al., 2011. The persistence of solar activity indicators and the descent of the Sun into Maunder Minimum conditions. *Geophys. Res. Lett.*, 38, doi:10.1029/2011GL049811.
- Love, G.J., et al., 2011. Are secular correlations between sunspots, geomagnetic activity, and global temperature significant? *Geophys. Res. Lett.*, 38, L21703, doi:10.1029/2011GL049380
- Luterbacher, J. et al., 2004. European seasonal and annual temperature variability, trends and extreme since 1500. *Science*, 303, 1499-1502.
- Marsh, D.R. et al., 2007. Modeling the whole atmosphere response to solar cycle changes in radiative and geomagnetic forcing. *J. Geophys. Res.*, 112, D23306.
- Neumann, J. and Lindgrén, S., 1979. Great historical events that were significantly affected by the weather: IV - The great famines in Finland and Estonia, 1695-97, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 60, 775-787.
- Nevanlinna, H., 1974. Auringon aktiivisuuden vaikutus sääilmiöihin. Ilmatieteen laitos –Tutkimusseloste No. 52, 41 s.
- Nevanlinna, H., 2004a. Auringon aktiivisuus ja maapallon lämpötilan vaihtelut 1856-2003. Ilmatieteen laitos, Raportteja 2004:4, 47 s.
- Nevanlinna, H., 2004b. Results of the Helsinki magnetic observatory 1844-1912. *Ann. Geophys.*, 22, 1691-1704.
- Nevanlinna, H., 2006. Avaruussää - Auringosta tuulee. URSA, 129 s.
- Nevanlinna, H. (toim.), 2008. Muutamme ilmastoa. Karttakeskus, 237 s.
- Nevanlinna, H., 2009a. Geomagnetismin ABC-kirja. Ilmatieteen laitos, Raportteja 2009:1, 204 s.
- Nevanlinna, H., 2009b. Revontulihavainnot Suomessa, 1748-2009. Ilmatieteen laitos, Raportteja 2009:3, 88 s.
- Nevanlinna, H., 2011a. Magneettiset havainnot Helsingin magneettis-meteorologisessa observatoriossa. Ilmatieteen laitos, Raportteja, 2011:4,

54 s.

Nevanlinna, H., 2012. Auringon osuus ilmastonmuutoksessa on vähäinen.

Tieteessä Tapahtuu, 4:2012,52-53.

Nevanlinna, H., Häkkinen, L. and Raita, T., 2011b. Geomagnetic activity at the Sodankylä observatory, 1914-2010. *Geophysica*, 47, 31-42.

Nevanlinna, H. and Pulkkinen T.I., 2001. Auroral observations in Finland: Results from all-sky cameras, 1973-1997. *Journ. Geophys. Res.*, 106, 8109-8118.

Ney, E.P., 1959. Cosmic radiations and the weather. *Nature*, 183, 451-452.

Ollila, A., 2012. Changes in cosmic ray fluxes improve correlation to global warming. *Int. J. Phys. Sci.*, 7, 822-826.

Ossendrijver, M., 2003. The solar dynamo. *Astr. Astrophys.*, 11, 287-367.

Ouzeau, G. et al., 2011. European cold winter 2009-2010: How unusual in the instrumental record and how reproducible in the ARPEGE-Climat model? *Geophys. Res. Lett.*, 38, doi:10.1029/2011 GL047667.

Pain, S., 2009. 1709: The year that Europe froze. *New Scientist*, 2694, 46-47.

Polyak, L. et al., 2010. History of sea ice in the Arctic. *Quatern. Sci. Rev.*, 29, 1757-1778.

Pulkkinen, T. I., Nevanlinna, H., Pulkkinen, P.J. and Lockwood, M., 2001. The Earth-Sun connection in time scales from years to decades to centuries, *Space Sci. Rev.*, 95(1-2), 625-637.

Rind, D., et al., 2008. Exploring the stratospheric/tropospheric response to solar forcing. *J. Geophys. Res.*, 113, D24103.

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.

Räisänen, J., 2004. Kasvihuoneilmiön voimistuminen ja sen vaikutukset. Helsingin Yliopisto - Ilmakehätieteiden osasto, 178 s.

Scafetta, N., 2012. Testing an astronomically based decadal-scale empirical harmonic climate model versus the IPCC (2007) general circulation climate models. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 80, 124-137.

Schrijver, C.J. and Zwaan, C., 2000. Solar and stellar magnetic activity. Cambridge Univ. Press, 384 p.

- Schröder, W., 1992. On the existence of the 11-year cycle in solar and auroral activity before and during the so-called Maunder Minimum. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 44, 119-128.
- Seppälä, A. et al., 2009. Geomagnetic activity and polar surface air temperature variability, *J. Geophys. Res.*, 114, A10312, doi:10.1029/2008JA014029.S
- Shapiro, R., 1976. Solar magnetic sector structure and terrestrial atmospheric vorticity. *Journ. Atm. Sci.*, 33, 865-870.
- Simojoki H., 1978. The history of geophysics in Finland 1828-1918. Societas Scientarium Fennica, Helsinki, 157 p.
- Svensmark, H., 2000. Cosmic rays and Earth's climate. *Space Sci. Rev.*, 93, 161-170.
- Svensmark, H., 2007. Cosmoclimatology: a new theory emerges. *Astr. Geophys.*, 48, 18-24.
- Tiuri, M., 2012. Aurinko muuttaa ilmasto. *Tieteessä Tapahtuu*, 4:2012, 49-50.
- Topelius, Z., 1934. Maamme kirja (38. painos), 512 s. www.phpoint.fi/ulrikaj/bookshelf/maamme1.htm.
- Vahrenholt F. und Lüning, S., 2012. Die kalte Sonne - Warum die Klimakatastrophe nicht stattfindet. Hoffmann und Campe, 445 s.
- Wang, Y.-M., Lean, J.L. and Sheeley, N.R., 2005. Modeling the Sun's magnetic field and irradiance since 1713. *Astr. Journ.*, 625, 522-538.
- Willson, R.C., 1984. Measurements of solar total irradiance and its variability. *Space. Sci. Rev.*, 3-4, 203-242.
- 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.
- Zalasiewicz, J., Williams, M., Steffen, W. and Crutzen P., 2010. A new world of the Anthropocene. *Environ. Sci., Technol.*, 44, 2228-2231.

Liite 1. Auringon säteilyn vaikutus maapallon pintalämpötilaan

Aurinkovakio (1365 W/m^2) ilmoittaa auringon kokonaissäteilytehon (irradianssi) (S), integroituna yli kaikkien aallonpituuksien yli sellaisen pallon pinta-alayksikköä kohden, jonka säde on maapallon ja auringon välinen keskietäisyys. Näin maapallon saama kokonaissäteilyteho on $S\pi R_e^2$, missä R_e on Maan säde. Maapallon pinta-alayksikköä kohden ilmakehän ylärajalla keskimääräinen säteilyteho on $S\pi R_e^2/4\pi R_e^2 = S/4 \approx 340 \text{ W/m}^2$. Tästä heijastuu pilvistä, lumesta ja jäädä sekä mm. ilmakehän aerosoleista takaisin avaruuteen keskimäärin noin 30 % (albedo). Ionosfääriin ja stratosfääriin jää noin 15 % säteilystä. Jos aurinkovakion muutos on ΔS , niin siitä aiheutuva säteilypakote (S_{RF}) on $S_{RF} = \Delta S \cdot 0.25 \cdot 0.70 \cdot 0.85 = 0.15\Delta S$. Jos käytetään ilmaston nopeiden muutosten (transienttivaihtelut) herkkyysparametrin arvoa²² $0.45 \text{ }^\circ\text{C/W/m}^2$ (Benestad and Schmidt, 2009) niin S_{RF} aiheuttaa pintalämpötilan muutoksen $\Delta T = 0.45S_{RF} = 0.07\Delta S \text{ }^\circ\text{C}$. Jos siis aurinkovakio (S) muuttuisi 1 W/m^2 , aiheuttaisi se maapallon pintalämpötilaan laskennallisesti $\Delta T = 0.07 \text{ }^\circ\text{C}$ muutoksen - pyörein luvuin $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, mikä on suunnilleen sama kuin mitä Kuvassa 2 on auringonpilkkujakson mukaista vaihtelua. Kuvan 2 lämpötilan vaihtelun liittäminen suoraan auringon aktiviteettiin on kuitenkin tehtävä varauksilla. Tämä siksi, että ilmakehäsystemissä on sisäsyntyisiä oskillaatioita periodeiltaan viiden vuoden molemmin puolin, joiden vaikutus on mukana Kuvan 2 lämpötilavaihtelussa.

Samankaltaiseen tulokseen kuin yllä päädytään, jos tarkastelu tehdään Stefan-Boltzmannin säteilylaista lähtien. Siinä säteilyteho (I) noudattaa lakia $I = \sigma T^4$, missä σ on Stefan-Boltzmannin vakio ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/}^\circ\text{K}^4$) ja T absoluuttinen lämpötila. Maapallon tapauksessa määritellään ilmakehän efektiivinen säteilylämpötila T_e :

$$T_e = \left(\frac{S(1-\alpha)}{4\sigma} \right)^{1/4}$$

missä α on albedo (= 0.30). Näillä arvoilla $T_e = 255 \text{ }^\circ\text{K}$. Ilmakehän kasvihuone-efektistä johtuen pintalämpötila (T) on korkeampi. Se riippuu ilmakehän emissiivisyydestä (ϵ), joka on 0, jos kasvihuonevaikutusta ei ole ja 1, kun kaikki infrapunasäteily jää kasvihuonekaasuihin.

Yksinkertaisessa tapauksessa kasvihuoneilmiossa on maapallon pintalämpötila (T) ja yksikerroksisen ilmakehän efektiivinen lämpötila (T_e). Tällöin ilmakehästä poistuva lämpösäteilyn (I_o) määrä on (Räisänen, 2004):

$$I_o = \sigma T^4 - \epsilon \sigma (T^4 - T_e^4),$$

²² Säteilyn tasapainotilanteessa herkkyysparametrin arvo on noin $0.8 \text{ }^\circ\text{C/W/m}^2$. Niin sanotulle mustalle kappaleelle se olisi $0.30 \text{ }^\circ\text{C/W/m}^2$.

missä yhtälön oikean puolen ensimmäinen termi kuvaa maanpinnan säteilemää auringon lämpöä ja toinen kasvihuonevaikutusta, joka vähentää avaruuteen poistuvan säteilyn määrää. Se on sitä voimakkaampi mitä suurempi on ilmakehän emissiivisyys ja pintalämpötilan ja ilmakehän lämpötilan välinen erotus.

Pintalämpötilalle pätee $T = f T_e$, missä f on vahvistuskerroin²³

$$f = (1 - \varepsilon/2)^{-1/4}$$

jonka lukuarvoksi tulee 1.13, jos $\varepsilon = 0.78$. Näin pintalämpötilaksi saadaan 288 °K. Se on likimain sama kuin havaittu lämpötila (+15 °C). Näin kasvihuone-efektin pintalämpötilaa voimistava vaikutus on noin 33 °C. Maksimaalisessa kasvihuone-efektissä $f = 2^{1/4} \approx 1.19$, ja sitä vastaava pintalämpötila on 303 °K, jolloin kasvihuone-efektin lämmittävä vaikutus olisi noin 45 °C. Yksikerroksisessa maapallon ilmakehässä $\varepsilon = 0.78$, jolloin vain 22 % pitkäaaltoisesta säteilystä karkaa suoraan avaruuteen.

Aurinkovakion S muutoksessa ΔS pintalämpötila muuttuu määrällä ΔT siten, että

$$\Delta T = f \frac{T_e}{4S} \Delta S$$

jolle saadaan arvo 0.05 °C, jos aurinkovakion muutos on 1 W/m². Tämä on siis noin 30 % alempi kuin ilmastoherkkyyksillä laskettu muutos. Jos huomioidaan palautetekijät, lähinnä lämpötilan vesihöyryn määrän kasvusta johtuvat, niin lämpötila nousee edellisestä vielä tekijällä:

$$\Delta T_+ = \Delta T (1 + q + q^2 + \dots),$$

missä q on vahvistuskerroin ja palautekierto noudattaa geometristä sarjaa. Jos $0 < q < 1$ palautekiertosarja suppenee, ja lämpötilan nousulle pätee:

$$\Delta T_+ = \frac{\Delta T}{1 - q}$$

Vahvistuskertoimen arvolla 0.3, joka on noin puolet tasapainotilanteen luvusta, saadaan sama lämpötilan nousu 0.07 °C kuin edellisellä sivulla.

Kytkeyillä ilmastomalleilla voidaan tässä esitettyä säteilytarkastelua paremmin arvioida auringon säteilymuutoksista johtuvat lämpötilan muutokset eri leveysasteilla ja korkeuksilla (esim. Marsh et al., 2007). Muutokset ovat suurimpia termosfäärissä ja stratosfäärissä päiväntasaajan alueella, mutta troposfäärissäkin on auringon aiheuttama lämpötilasignaali olemassa.

²³ http://en.wikipedia.org/wiki/Idealized_greenhouse_model

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 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. Otsonin 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 mittauksen 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 lämmenemisen 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 -järviolueella. 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 in 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. 43 s.
 5. Ganushkina, Natalia and Pulkkinen, Tuija, 2004. Substorms-7: Proceedings of the 7th International Conference on Substorms. 235 p.
 6. Venäläinen, Ari, Sarkkula, Seppo, Wiljander, Mats, Heikkinen, Jyrki, Ervasto, Erkki, Poussu, Teemu ja Storås, Roger, 2004. Espoon kaupungin talvikunnossapidon sääindeksi. 17 s.
 7. Paatero, Jussi and Holmen, Kim (eds.), 2004. The First Ny-Ålesund - Pallas-Sodankylä atmospheric research workshop, Pallas, Finland 1 - 3 March 2004 - Extended abstracts. 61 p.
 8. Holopainen, Jari, 2004. Turun varhainen ilmastollinen havaintosarja. 59 s.
- 2005:
1. Ruuhela, Reija, Ruotsalainen, Johanna, Kangas, Markku, Aschan, Carita, Rajamäki, Erkki, Hirvonen, Mikko ja Mannelin, Tarmo, 2005. Kelimallin kehittäminen talvijalankulun turvallisuuden parantamiseksi. 47 s.
 2. Laurila, Tuomas, Lohila, Annalea, Tuovinen, Juha-Pekka, Hatakka, Juha, Aurela, Mika, Thum, Tea, Walden, Jari, Kuronen, Pirjo, Talka, Markus, Pesonen, Risto, Pihlatie, Mari, Rinne, Janne, Vesala, Timo, Ettala, Matti, 2005. Kaatopaikkojen kaasupäästöjen ja haihdunnan mikrometeorologisten mittausten menetelmien kehittäminen (MIKROMETKAA). Tekesin Streams –ohjelman hankkeen loppuraportti. 34 s. (Ei julkaistu – Not published)
 3. Siili, Tero, Huttunen, Emilia, Koskinen, Hannu ja Toivanen, Petri (toim.), 2005. Kymmenes Suomen avaruustutkijoiden kokous (FinCospar) Kokousjulkaisu. 57 s.
 4. Solantie, Reijo and Pirinen, Pentti, 2005. Diurnal temperature variation in inversion situations. 34 s.
 5. Venäläinen, Ari, Tuomenvirta, Heikki, Pirinen, Pentti and Drebs, Achim, 2005. A basic Finnish climate data set 1961 – 2000 – description and illustrations. 24 p.
 6. Tammelin, Bengt, Säntti, Kristiina, Dobeck, Hartwig, Durstewich, Michel, Ganander, Hans, Kury, Georg, Laakso, Timo, Peltola, Esa, Ronsten, Göran, 2005. Wind turbines in icing environment: improvement of tools for siting, certification

and operation – NEW ICETOOLS. 127 p.

- 2006:
1. Mälkki, Anssi, Kauristie, Kirsti and Viljanen Ari, 2006. Auroras Now! Final Report, Volume I. 73 p.
 2. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2006. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2003. 47 p.
 3. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2006. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2004. 47 p.
 4. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2006. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2005. 49 p.
 5. Viljanen, A. (toim.), 2006. Sähkömagnetiikka 2006. Tiivistelmät – Abstracts. 30 s.
 6. Tuomi, Tapio J. & Mäkelä, Antti, 2006. Salamahavainnot 2006 - Lightning observations in Finland, 2006. 39 p.
 7. Merikallio, Sini, 2006. Preliminary report of the analysis and visualisation software for SMART-1 SPEDE and EPDP instruments. 70 p.
 8. Solantie, Reijo, Pirinen, Pentti, 2006. Orografian huomioiminen loka- huhtikuun sademäärien alueellisissa analyseissä. 34 s.
 9. Ruosteenoja, Kimmo, Jylhä, Kirsti, Räisänen, Petri, 2006. Climate projections for the Nordic CE project – an analysis of an extended set of global regional climate model runs. 28 p.
 10. Merikallio, Sini, 2006. Analysis and visualisation software for DEMETER Langmuir Probe instrument. 31 p.
- 2007:
1. Solantie, Reijo, Järvenoja, Simo, Pirinen, Pentti, 2007. Keskimääräisten kuukauden minimilämpötilojen alueellinen jakauma kautena 1992 – 2005 Suomessa sekä muutos kaudesta 1961 – 1990. 59 s.
 2. Pulkkinen, Tuija, Hari, Ari-Matti, Haukka, Harri, Leinonen, Jussi, Toivanen, Petri, Koskinen, Hannu, André, Mats, Balasis, Georgios, Boscher, Daniel, Dandouras, Iannis, Grande, Mauel, De Keyser, John, Glassmeier, Karl-Heinz, Hapgood, Mike, Horne, Richard, Ivchenko, Nikolay, Santolik, Ondrej, Torkar, Klaus; Trotignon, Jean Gabriel, Vennerstrøm, Susanne, 2007. Waves and acceleration of relativistic particles (WARP). 36 p.
 3. Harri, A-M., Leinonen, J., Merikallio, S., Paton, M., Haukka, H., Polkko, J., Linkin, V., Lipatov, V., Pichkadze, K., Polyakov, A., Uspensky, M., Vasquez, L., Guerrero, H., Crisp,

- D., Haberle, R., Calcutt, S., Wilson, C., Taylor, P., Lange, C., Daly, M., Richter, L., Jaumann, R., Pommereau, J-P., Forget, F., Lognonne, Ph., Zarnecki, J., 2007. MetNet – In situ observational network and orbital platform to investigate the Martian environment. 35 p.
4. Venäläinen, Ari, Saku, Seppo, Kilpeläinen, Tiina, Jylhä, Kirsti, Tuomenvirta, Heikki, Vajda, Andrea, Räisänen, Jouni, Ruosteenoja, Kimmo, 2007. Sään ääri-ilmiöistä Suomessa. 81 s.
 5. Tuomi, Tapio J. & Mäkelä, Antti, 2007. Salamahavainnot 2007 - Lightning observations in Finland, 2007. 47 p.
 6. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2007. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2006. 49 p.
- 2008:
1. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2008. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2007. 49 p.
 2. Verronen, Pekka T. (ed), 2008. 1st international HEPPA workshop 2008, Book of abstracts. 81 p.
 3. Gregow, Hilppa, Venäläinen, Ari, Laine, Mikko, Niinimäki, Niina, Seitola, Teija, Tuomenvirta, Heikki, Jylhä, Kirsti, Tuomi, Tapio ja Mäkelä, Antti, 2008. Vaaraa aiheuttavista sääilmiöistä Suomen muuttuvassa ilmastossa. 99 s.
 4. Tuomi, Tapio J. & Mäkelä, Antti, 2008. Salamahavainnot 2008 – Lightning observations in Finland, 2008. 49 p.
 5. Heino, Raino and Tolonen-Kivimäki, Outi (eds), 2008. Finnish national report on systematic observations for climate – 2008. 27 p.
 6. Paatero, Jussi et al., 2008. Effects of Kola air pollution on the environment in the western part of the Kola peninsula and Finnish Lapland : final report. 26 p.
- 2009:
1. Nevanlinna, H., 2009. Geomagnetismin ABC-kirja. 204 s.
 2. Nevanlinna, H. (toim.), 2009. Ilmatieteen laitos 170 vuotta, 1838 - 2008. 69 s.
 3. Nevanlinna, Heikki, 2009. Revontulihavainnot Suomessa 1748 – 2009. 88 s.
 4. Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. ja Seitola, T., 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009. 102 p.

5. Mäkelä, Antti & Tuomi, Tapio, J., 2009. Salamahavainnot 2009 – Lightning observations in Finland, 2009. 51 p.
 6. Verronen, Pekka (ed.), 2009. 5th International Atmospheric Limb Conference and Workshop : Book of abstracts. 92 p.
 7. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2009. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2008. 48 p.
 8. Kersalo, Juha and Pirinen, Pentti (eds), 2009. Suomen maakuntien ilmasto. 185 s.
- 2010:
1. Rauhala, Jenni & Mäntyniemi, Päivi, 2010. Luonnononnettomuuksien vaikutus ja niihin vaikuttaminen. (valmisteilla).
 2. Pilli-Sihvola, K. Löwendahl, E., Ollikainen, M., van Oort, B., Rummukainen, M. & Tuomenvirta, H., 2010. Survey on the use of climate scenarios and climate change research information in decision making in Finland, Sweden and Norway. Report for the project Climate change adaption in Norway, Sweden and Finland – do research, policy and practice meet? (CAREPol). 57 p.
 3. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2010. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2009. 48 p.
 4. Luomaranta, A., Haapala, J., Gregow, H., Ruosteenoja, K., Jylhä, K. and Laaksonen, A. 2010. Itämeren jääpeitteen muutokset vuoteen 2050 mennessä. 23 s.
 5. Mäkelä, Antti, 2010. Salamahavainnot 2010 – Lightning observations in Finland, 2010. 50 p.
- 2011:
1. Saku, Seppo; Solantie, Reijo, Jylhä, Kirsti, Venäläinen, Ari, Valta, Hannu, 2011. Ääriämpötilojen alueellinen vaihtelu Suomessa. 92 p.
 2. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2011. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2010. 49 p.
 3. Virta, Hanna et al., 2011. Ilmastonmuutoksen ääri-ilmiöihin liittyvän riskienhallinnan kustannushyötyanalyysi osana julkista päätöksentekoa (IRTORISKI). 97 s.
 4. Nevanlinna, H. 2011. Magneettiset havainnot Helsingin magneettis-meteorologisessa observatoriossa, 1844-1910. 54 s.

5. Hilppa Gregow, Kimmo Ruosteenoja, Ilkka Juga, Sigbritt Näsman, Miika Mäkelä, Mikko Laapas, Kirsti Jylhä, 2011. Lumettoman maan routaolojen mallintaminen ja ennustettavuus muuttuvassa ilmastossa. 45 s.
 6. Jylhä, Kirsti, Kalamees, Targo, Tietäväinen, Hanna, Ruosteenoja, Kimmo, Jokisalo, Juha, Hyvönen, Reijo, Ilomets, Simo, Saku, Seppo, Hutila, Asko, 2011. Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastomuutoksen vaikutuksista. 110 s.
 7. Mäkelä, Antti, 2011. Salamahavainnot 2011 – Lightning observations in Finland, 2011.
 8. Riihelä. Aku, Lahtinen, Panu, Hakala, Teemu, 2011. Radiation, snow characteristics and albedo at Summit (RASCALS) expedition report. 48 p.
 9. Vajda, A. et al., 2011. Probabilities of adverse weather affecting transport in Europe: Climatology and scenarios up to the 2050s. 85 p.
 10. Lehto, J., Paatero, J., Koivula, R., Solin, O., Ikäheimonen, T.K., Kekki, T. & Lahtinen, M. (toim.), 2011. Marie Curie symposium 8.-9.12.2011 Helsingissä : Tiivistelmät. 75 s.
- 2012:
1. Pirinen, P., Simola, H., Aalto, J., Kaukoranta, J-P., Karlsson, P., Ruuhela, R., 2012. Tilastoja Suomen ilmastosta 1981 – 2010. 83 s.
 2. Harri, A-M., Schmidt, W., Romero, P., Vázquez, L., Barderas, G., Kemppinen, O., Aguirre, C., Vázquez-Poletti, J. L., Llorente, I. M., Haukka, H. and Paton, M., 2012, Phobos eclipse detection on Mars : Theory and Practice. 35p.
 3. Nevanlinna, H., 2012. Auringon aktiivisuus ja ilmastomuutos. 41 s.

Ilmatieteen laitos
Erik Palménin aukio 1, Helsinki
tel. (09) 19 291
www.fmi.fi

ILMATIETEEN LAITOS, RAPORTTEJA 2012:3
ISBN 978-951-697-771-6 (NID.)
ISBN 978-951-697-772-3 (PDF)
ISSN 0782-6079
Unigrafia
Helsinki 2012