

Auringonpilkkut ja niiden yhteys maapallolla havaittuihin luonnonilmiöihin

OLAVI HEIKKINEN

Maantieteen laitos, Helsingin yliopisto

Heikkinen, Olavi (1982). Auringonpilkkut ja niiden yhteys maapallolla havaittuihin luonnonilmiöihin [Sunspots and their relation to terrestrial phenomena]. Terra 94:3, pp. 207—214. English summary.

Many atmospheric phenomena and climate-related variations on the Earth have been attributed to changes in solar activity, especially to sunspot numbers. Some of these relations are disputable. This article attempts to give today's concept of this problem. Records of aurorae and numbers of sunspots correlate positively with one another but negatively with the atmospheric ¹⁴C production rate, usually determined from the ¹⁴C content of tree rings. The relationship of sunspots to the weather and tree growth has not been firmly established.

Olavi Heikkinen, Department of Geography, University of Helsinki, Hallituskatu 11—13, SF-00100 Helsinki 10, Finland.

Auringonpilkkujen on usein arveltu vaikuttavan mm. maapallon ilmastoon ja sitä kautta esimerkiksi puiden kasvunopeuteen. Puiden vuosilustojen leveyksien ja auringonpilkkumäärien välistä riippuvuutta tarkemmin tutkittaessa on kuitenkin monesti päädytty toistaan poikkeaviin tuloksiin (ks. esim. LaMarche & Fritts 1972; Svenonius & Olausson 1978; Pittock 1978; Heikkinen 1980). Myös jäätiköiden liikkeiden on nähty olevan yhteydessä auringonpilkkujen määriin (esim. Bray & Struik 1963). On lisäksi esitetty, että auringonpilkkujen esiintymisrytmi kuvastuisi jopa savisedimenttisarjoissa (Sirén & Hari 1971).

Edellä mainituista yhteyksistä ollaan usein eri mieltä (ks. esim. Stuiver 1980). Yksinkertaisempaa on sen sijaan ymmärtää ja osoittaa auringonpilkkujen vaikutus mm. revontulien esiintymiseen (ks. Eddy 1976) ja radioaktiivisen hiili-isotoopin (¹⁴C) muodostumiseen (esim. Stuiver & Quay 1980).

Tässä artikkelissa tarkastellaan auringonpilkkujen sekä osoitettua että otaksuttua vaikutusta maapallolla havaittaviin luonnonilmiöihin.

Auringonpilkkuhavainnot

Auringon pinnalla on miltei jatkuvasti ympäristöstään tummina erottuvia pilkkuja. Kun aurinko on ilmakehässä olevan sumun tai pölyn sopivasti himmentämä, voidaan suurimmat pilkkut tai niiden muodostamat ryhmät erottaa jopa paljaalla silmällä. Otollisin

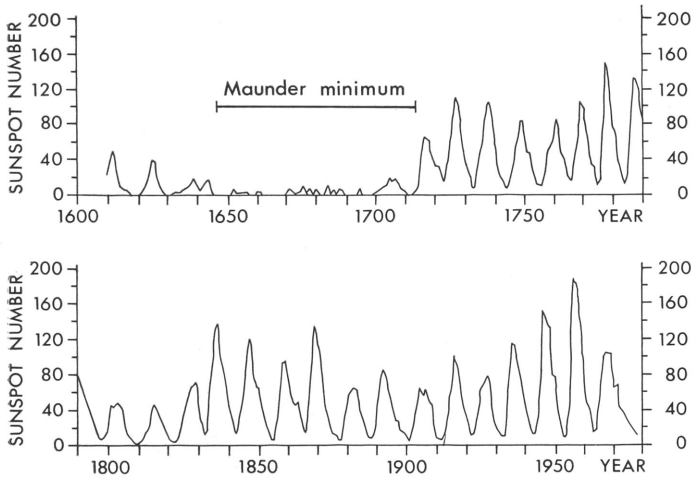
tarkasteluhetki on auringon nousun tai laskun aika, jolloin auringon loisto ei ole yhtä voimakas kuin keskipäivällä.

Auringonpilkkujen määrissä on jaksottaisia vaihteluita. Peräkkäisten maksimien kuten myös peräkkäisten minimien välinen aikaväli on keskimäärin 11 vuotta. Tämä rytmi ei ole kuitenkaan vakio, vaan vaihtelee rajoissa 8—18 vuotta. Minimivuosina voi kulua jopa viikkoja ilman että auringon pinnalla voidaan havaita yhtäkään pilkkuja. Maksimien aikaan niitä saatetaan nähdä satoja samana päivänä.

Nykyään tehdään tarkkoja kojeellisia auringonpilkkuhavainnoja päivittäin. Tulokset tosin ilmaistaan yleensä vuotuisina keskiarvoina auringon näkyvään puoleen suhteutettuna (esim. Waldmeier 1961). Vaikka havainnot ovatkin nykyään tarkkoja ja luotettavia, ei auringonpilkkujen olemusta ja esiintymisvaihteluja ole pystytty kiistattomasti selittämään. Eräs teoria on ns. dynamoteoria, jonka mukaan auringon pyörimisliike aiheuttaisi rytmisiä vaihteluja auringon magneettikentässä ja sitä kautta myös auringonpilkkuja (Eddy 1976).

Tallentuneita tietoja auringonpilkuista on pitkältä ajalta. Varsinkin Kiinassa, Koreassa ja Japanissa on tehty ja kirjattu ilmeisen epäsystemaattisia havainnoja jo ainakin neljäneltä esikristilliseltä vuosisadalta alkaen.

Kauko-Idän havainnot keskittyvät lähinnä auringon aktiivisiin jaksoihin. Ne painottuvat lisäksi niihin vuodenaikoihin, jolloin ilmasto-olot auringon välittömälle tarkastelulle ovat suotuisat. Niinpä pääosa auringonpil-



Kuva 1. Auringonpilkkujen vuotuiset keskiarvot vuosina 1610—1977. Vuosien 1610—1715 osalta luvut perustuvat Eddy'n (1976) esittämiin arvioihin ja Robockin (1978: fig. 8) diagrammiin, vuosien 1716—1977 osalta Waldmeierin (1961; 1978) julkaisemiin tietoihin.

Fig. 1. Annual mean sunspot numbers from 1610 to 1977. The values to the years 1610—1715 are based on Eddy's (1976) estimates and Robock's (1978: fig. 8) presentation, and the values of 1716—1977 on the record published by Waldmeier (1961, 1978).

kuista todettiin talvella ja varhaiskevällä, kun Kiinan ja Korean taivas on yleensä pilvetön ja kun mantereelta puhaltava kuiva tuuli lennättää ilmaan autiomaiden ja aridisten lössialueiden maaperäainesta. Tuolloin »keltainen tuuli» himmentää ja punaa etenkin nousevan ja laskevan auringon. Sen sijaan kesällä alueen taivas peittyy usein pilveen, ja sade huuhtoo pölyn ilmakehän alaosasta. Tuolloin on havaintojen tekeminen vaikeaa (Willis ym. 1980). Ilmeisesti myös yhteiskunnalliset rauhattomuudet, sodat ja nälänhädät vähensivät havainnointia ja tulosten säilymistä. Mutta vaikka Aasiassa tehdyt silmämääräiset havainnot olivat melko hajanaisia, niillä on kuitenkin tieteellistä arvoa aikamme tutkijoille.

Tiedot auringonpilkuista täsmentyivät, kun Galileo Galilei keksi kaukoputken vuonna 1610. Tosin havainnot olivat vielä senkin jälkeen pitkään epätarkkoja ja sattumanvaraisia. Kunnolla organisoitu ja yhdenmukaisesti havainnointi alkoi vasta vuonna 1848, kun Bernin, myöhemmin Zürichin observatorion johtaja Rudolf Wolf loi Eurooppaan yhteisillä ohjeilla toimivan havaintopisteverkon. Vasta tuosta vuodesta alkaen tehdyt havainnot ovat tieteellisen kritiikin kestäviä ja keskenään vertailukelpoisia.

Lisäksi Wolf kokosi olemassaoleista lähteistä osin vaillinaisiin kuukausi- ja vuosikeskiarvoihin perustuvan auringonpilkkutiedoston, joka ulottuu taaksepäin vuoteen 1700 asti. Varhaisimpien tietojen tarkkuus on kylläkin kyseenalaista. Lopulta Wolf vielä laajensi auringonpilkkukronologiaansa peräti teleskoopin keksimisvuoteen (1610) asti. Ensimmäisen 90 vuoden tiedosto käsittää tosin

vain arvioidut maksimi- ja minimivuodet (ks. Eddy 1976). Vuoden 1610 jälkeiset auringonpilkkutiedot aina vuoteen 1977 saakka löytyvät Waldmeierin (1961, 1978) julkaisuista.

Kuva 1 osoittaa paitsi auringonpilkkumäärien rytmisen vaihtelun myös pitkän, miltei pilkkuttoman kauden, joka alkaa 1600-luvun puolivälistä ja jatkuu 1700-luvun alkukymmeniin. Eri aineistoihin ja menetelmiin perustuvat tutkimukset tukevat käsitystä, että auringon aktiiviteetti todella oli tuona periodina vähäistä. Tätä aikajaksoa, joka on rajattu joko vuosiin 1645—1715 (Eddy 1976) tai 1654—1714 (esim. Stuiver & Quay 1980), nimitetään Maunderin minimiksi. Auringonpilkkuja oli suhteellisen vähän myös 1800-luvun alussa.

Auringonpilkkujen suhde revontuliin

Revontulet kuvastelevat auringonpilkkuaktiiviteettia. Kun auringonpilkkuja on runsaasti, revontulet ovat yleisiä ja kirkkaita. Kun taas auringon toiminta on rauhallista, revontulet heikkenevät ja harvinaistuvat (esim. Eddy 1976; Stuiver & Grootes 1980).

Auringonpilkkujen ja revontulien toisiinsa rinnastamisella on perustelunsa. Revontuli-ilmiötä syntyy kun auringosta peräisin olevat varautuneet hiukkaset joutuvat vuorovaikutukseen maan magneettikentän kanssa. Koska hiukkasia tuottavat ilmiöt, loimut ja purkaukset, tapahtuvat lähinnä niissä osissa aurinkoa, missä on myös auringonpilkkuja, voidaan epäsuorasti osoittaa, että revontulet ja auringonpilkkut ovat toisiinsa liittyviä ilmiöitä ja että niiden esiintymisen välillä

vallitsee voimakas positiivinen korrelaatio (Eddy 1976: 1192—1193). Niinpä revontulihavainnointia voidaan jossain määrin käyttää vaikkapa varhaisten auringonpilkkutietojen tarkistamiseen.

Muistiinpanot revontulihavainnoista osoittavat, että Maunderin minimin aikaan todella oli harvinaisen vähän revontulia. Niin ikään 1800-luvun alussa sekä revontulia että auringonpilkkuja oli melko niukasti (ks. Eddy 1976: fig. 4). Satunnaisia revontulihavainnointia on tehty hyvinkin varhaisina aikoina. Niiden perusteella on kuitenkin kovin rohkeaa tehdä päätelmiä auringon aktiivisuudesta.

Auringonpilkkut ja hiili 14

Osa ilmakehässä olevasta hiilestä on radioaktiivista ^{14}C -isotooppia. Sitä syntyy jatkuvasti ilmakehän yläosissa galaktisen kosmisen säteilyn vaikutuksesta. Auringon aktiviteetti säteilee radioaktiivisen hiilen syntynopeutta. Maapallon tuntumassa olevan aurinkotuuliplasman magneettiset muutokset näet ohjailevat maapallolle suuntautuvan kosmisen säteilyn vuota. Aurinkotuulen voimakkuus on taas yhteydessä auringonpilkkuihin. Pilkkumaksimien aikaan aurinkotuuli voimistuu, minkä vuoksi kosmisen säteilyn pääsy maapallolle vähenee; tällöin ilmakehässä syntyy normaalia vähemmän ^{14}C -isotooppia. Pilkkuminimien aikaan aurinkotuuli heikkenee, ja kosminen säteily siksi vahvistuu. Tämä ilmenee mm. ^{14}C -isotoopin lisääntyvänä muodostumisena (esim. Eddy 1976; Stuiver & Quay 1980).

Kosmisen neutronivuon ja ilmakehän tyyppien vuorovaikutuksesta syntynyt ^{14}C -isotooppi hapettuu $^{14}\text{CO}_2$:ksi, joka sekoittuu sitten ilmakehän normaaliin hiilidioksidiin ($^{12}\text{CO}_2$). Ilmakehän hiilidioksidiin $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -suhde on vain noin 10^{-12} , eli ^{14}C -isotooppia on 1 000 000 000 000 kertaa vähemmän kuin ^{12}C -isotooppia (Stuiver & Grootes 1980)!

Ilmakehän ^{14}C -isotooppi joutuu hiilidioksidina fotosynteesitapahtumassa kasveihin. Niin ollen esimerkiksi tiettyinä vuonna muodostuneen puuluston selluloosan $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -suhde kuvastaa ilmakehän hiilidioksidin $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -suhdetta kyseisenä vuonna. Tarkasti ottaen nämä suhteet eivät ole aivan samoja, koska yhteyttävä puu pyrkii hylkimään hiilen raskaita isotooppeja, ^{13}C - ja ^{14}C -isotooppeja. Tämän valikoinnin vaikutus voidaan kuitenkin

tietyin menetelmin arvioida (Stuiver & Po-lach 1978; Stuiver & Grootes 1980).

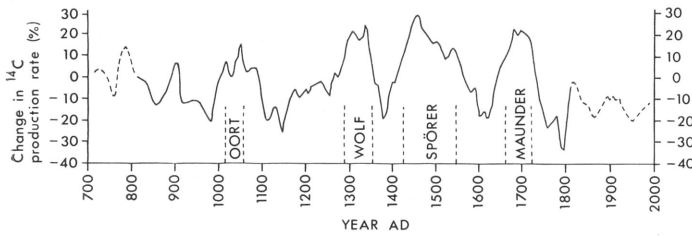
Yhteyttämisen kautta kasveihin joutunut ^{14}C -isotooppi alkaa itsestään hajaantua; puoliintumisaika on 5 730 vuotta. Kasveista tai muista hiiltä sisältävistä näytteistä voidaan nykyisellä tekniikalla analysoida ^{14}C -määrät. Jos määrittäminen suoritetaan esim. iältään tunnetuista puulustoista, saadaan havaitun ^{14}C -määrän ja tunnetun puoliintumisaajan avulla lasketuksi, kuinka suuri osa ilmakehän hiilestä oli ^{14}C -isotooppia luston syntymiskuun. Suorittamalla suuri määrä analyysyjä voidaan tehdä päätelmiä radioaktiivisen hiilen muodostumisvaihteluista ja sitä kautta saada välillistä tietoa auringonpilkkujen määrästä.

Puulustoanalyysillä ei kuitenkaan saada ehdottoman tarkkaa kuvaa ^{14}C :n ajallisista tuotantovaihteluista. Ilmakehän ^{14}C -määrä kun ei riipu yksinomaan aurinkotuulen moduloiman kosmisen säteilyn tuottamasta ^{14}C :sta vaan myös ilmastoperäisistä muutoksista maapallon hiilivarastoissa. Esimerkiksi ilmakehän ja valtamerien hiilidioksidin tasapainosuhteet sekä organismeihin sitoutunut hiilimäärä vaihtelevat eri aikoina. Näillä vaikeasti arvioitavilla muutoksilla ei liene kuitenkaan ratkaisevaa merkitystä (Stuiver 1980; Stuiver & Quay 1980). Periaatteessa radioaktiivisen hiili-isotoopin muodostumisnopeus ja -vaihtelu voidaan selvittää parhaiten suuntaamalla tutkimus suoraan maapallolle tulevan kosmisen neutronivuon mittaamiseen (O'Brien 1979).

Jäljitettäessä auringonpilkkujen lukuisuutta puulustoista tehtyjen radiohiilianalyysien avulla on huomattava, että ilmakehän ^{14}C -vaihteluja ohjailevat muutkin tekijät kuin auringon aktiivisuus ja ilmastoperäiset vaihtelut maapallon hiilivarastoissa. Muita tekijöitä ovat Maan geomagneettisen kentän vaihtelut, Suessin efekti, ydinpommiräjäytykset ja aikaviive.

Maan geomagneettinen kenttä ohjailee maapallolle suuntautuvan kosmisen säteilyn vuota. Koska geomagneettisessa kentässä tapahtuvat muutokset ovat hitaita ja varsin systemaattisia, ne voidaan melko tarkasti eliminoida selvitettyä auringonpilkkujen ja ^{14}C :n muodostusmäärien välistä yhteisvaihtelua.

Suessin efektilä ymmärretään ihmisen toiminnan vaikutusta suhteellisen ^{14}C -määrän vähenemiseen ilmakehän ja sitä kautta myös kasvien hiilivarastossa (Tans ym. 1980). Niinomaan fossiilisten polttoaineiden käyttö



Kuva 2. Ilmakehän ^{14}C :n tuotanto-vaihtelut vuoden 700 jälkeen suhteutettuna vuosien 1000—1860 tuotantokeskiarvoon. Diagrammi perustuu pääasiassa puulustoista saatuihin tuloksiin; vuoden 1800 jälkeiset arvot ovat tosin suoraan auringonpilkkumääristä johdettuja. Geomagneettisessa kentässä sekä maapallon hiilivarastoissa tapahtuneiden muutosten vaikutus on pyritty eliminoimaan. Kuva on yhdistelmä Stuiverin ja Quayn (1980: fig. 8) ja Stuiverin ja Grootesin (1980: fig. 4) esityksistä.

Fig. 2. Changes in the atmospheric ^{14}C production rate since 700 AD related to the average value of the period 1000—1860. The diagram is mainly derived from tree-ring analyses; the 19th and 20th century values are calculated from sunspot record. The influence of changes in the geomagnetic field and the terrestrial carbon reservoirs has been tried to eliminate. Presentation is based on Stuiver's and Quay's (1980: fig. 8) and Stuiver's and Grootes' (1980: fig. 4) diagrams.

on tuottanut viime vuosisadan lopulta alkaen ilmakehään runsaasti hiilidioksidia. Koska esimerkiksi kivihiihen ja öljyn sisältämä hiili on hyvin vanhaa, sen ^{14}C -pitoisuus on jo olematon. Tästä johtuen ilmakehän suhteellinen ja kasvavien kasvien sekä suhteellinen että absoluuttinen ^{14}C -konsentraatio on viimeisen vuosisadan aikana pienentynyt. Suessin efekti on siis aina otettava huomioon tulkittaessa teollistuneen yhteiskunnan aikaisia ^{14}C -arvoja.

Myös ydinpommiräjäytykset ovat sekoittaneet ilmakehän $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -suhdetta. Ne ovat lisänneet radioaktiivisen hiili-isotoopin määrää, mikä tulee ilmi ainakin vuoden 1952 jälkeisiä puulustoja analysoitaessa (Stuiver & Quay 1980).

Ilmakehän ^{14}C -tuotannossa tapahtuvat muutokset ilmenevät puiden lustoissa ehkä muutaman kymmenen vuoden viiveellä (esim. Eddy 1976; Stuiver 1980). Keskimäärin tämä aika kuluu ilmakehän yläosissa syntyviltä hiiliatomeilta yhteyttäviin kasveihin joutumiseen.

Analysoitaessa iältään tunnettujen puulustojen ^{14}C -määriä on tultu yksiselitteisesti johtopäätökseen, että ainakin pitkäaikaisilla ^{14}C -muutoksilla on voimakkaan negatiivinen korrelaatio auringonpilkkujen lukumäärien kanssa. Esimerkiksi Maunderin minimin aikaan ^{14}C -isotooppia muodostui poikkeuksellisen paljon (kuva 2). Radioaktiivista hiiltä

syntyi runsaasti myös vuosina 1416—1532, 1282—1342 sekä 1010—1050. Näille kausille onkin annettu auringonpilkkujen vähäiseen aktiivisuuteen viittaavat nimet: Spörerin, Wolfin ja Oortin minimi (esim. Stuiver & Quay 1980; Stuiver & Grootes 1980). Radioaktiivista hiiltä muodostui verrattain paljon myös vähäpilkkuisen 1800-luvun alussa. Sen sijaan esimerkiksi »suuren keskiaikaisen maksimin» vuosina (1100—1250), jolta ajalta on suhteellisen paljon silmämääräisiä auringonpilkkuhavaintoja (Eddy 1976: 1195), ^{14}C -tuotanto oli vähäistä (kuva 2).

Tällä vuosisadalla ilmennyt noin 30 %:n lasku ilmakehän suhteellisessa radiohiilimäärässä voi johtua korkeintaan osittain auringonpilkkujen runsaudesta; pääsyy on Suessin efekti (esim. Tans ym. 1980).

Auringon aktiivisuuden pitkäaikaisia muutoksia kuvastelevat ^{14}C -vaihtelut tulevat siis selvästi esille puulustosarjoja analysoitaessa. Sen sijaan 11 vuoden aurinkorytmiä ei puulustojen tarkoissa radiohiilitutkimuksissa ole pystytty varmuudella osoittamaan (ks. Burchuladze ym. 1980). Auringon 11-vuotissyklin hälveneminen johtunee mm. siitä aikaviiveestä, joka ilmakehän yläosassa syntyvältä ^{14}C :lta kuluu yhteyttäviin puihin siirtyessään. Toinen syy saattaa olla se, että yksittäisen luston radiohiilimäärä ei kuvasta aivan tarkasti muodostumisvuotensa tilannetta ilmakehän hiilivarastossa, koska puussa saattaa

olla pientä ^{14}C -vaihtoa myös sädesuunnassa, siis vuosilustojen välillä (Cain & Suess 1976).

On mahdollista, että joidenkin kasvien heidelmät kuvastavat puulustoja herkemmin ilmamehän lyhytaikaisia ^{14}C -vaihteluita. Ainaakin Georgian (Neuvostoliitto) viinirypäleistä valmistetuista vuosiviineistä on radiohiilianaalyseissa saatu varsin selvästi esille noin 11-vuotisrytmi, joka vastaa tietyllä viiveellä auringonpilkkujen samantaajuista sykliä (Burchuladze ym. 1980).

Auringonpilkkujen mahdollinen vaikutus ilmastoon ja puiden kasvuun

Käsitykset auringonpilkkujen vaikutuksesta maapallon lämpö- ja sadeoloihin ja sitä kautta esimerkiksi puiden kasvunopeuteen erkanevat melkoisesti.

Jo Douglass (esim. Douglass 1919) havaitsi puulustojen leveyksissä jaksottaisuutta, jonka hän yhdisti auringonpilkkujen määrissä esiintyviin vaihteluihin.

Niin ikään monet Douglassin seuraajat ovat huomanneet auringonpilkkujen ja lustonleveyksien välillä positiivisen korrelaation. Puun paksuuskasvu olisi siis suurempaa pilkkumaksimien kuin -minimien aikaan (esim. Bray & Struik 1963; Svenonius & Olausson 1978). Joskus yhdenmukaisuus on nähty selvempänä noin 22-vuotisjaksoissa (2×11 vuotta) kuin 11-vuotissyklissä (esim. Heikkinen 1980). Puulustoista on löydetty myös pitempää periodisuutta, joka myös näyttää vastaavan 11-vuotisen aurinkovaihtelun kerrannaisrytmiä (Mikola 1950; Siren 1961; Siren & Hari 1971).

Lyhytjaksoiselle puunkasvun vaihtelulle on toki löydetty muitakin selityksiä kuin auringon aktiivisuuden muutokset. Esimerkiksi hyönteisten puille aiheuttamat tuhot ovat joskus varsin säännöllisesti toistuvia. Tämä johtuu siitä, että hyönteisten populaatiovaihtelut voivat olla melko rytmisiä (Röthlisberger 1976: 104—105; Schweingruber 1979). Myös poikkeuksellisen uotuisan tai epäedullisen vuoden vaikutus kuvastuu sädekasvun nopeudessa etenkin metsänrajalla monena seuraavana kasvukautena. Niinikään hyvinä käpyvuosina luston kasvu jää yleensä normaalia heikommaksi. Lisäksi puiden kasvua ohjaillevat sisäiset tekijät aiheuttavat vuotuista kasvuvaihtelua (esim. Hustich 1978). Lusto-
sarjojen syklisyys voi kuvastella myös kuun kiertoradan rytmiä, jolla on otaksuttu olevan vaikutusta ilmasto-oloihin (Brier 1968). Pui-

den kasvunopeuden vaihtelut saattavat siis johtua monista eri tekijöistä tai niiden yhteisvaikutuksesta.

Itse asiassa puulustosarjoista löydettyä $n \times 11$ vuotista jaksottaisuutta ei ole pystytty globaalilla tasolla kiistattomasti yhdistämään auringonpilkkujen vastaavaan periodisuuteen.

Ilmaston ja puiden paksuuskasvun voidaan ajatella korreloivan myös auringonpilkkujen pitkäaikaisiin vaihteluihin. Esimerkiksi 1800-luvun alussa auringonpilkkujen määrä oli suhteellisen vähäinen. Samoihin aikoihin mm. Alppien jäätiköt laajenivat voimakkaasti ja puiden paksuuskasvu oli normaalia heikompaa (LaMarche 1971; Heikkinen 1980).

Maunderin minimi sattuu puolestaan suunnilleen ns. pienen jääkauden kylmimpään vaiheeseen, jonka Lamb (1977: 463) rajaa vuosiin 1550—1700. Niinpä on oletettu, että ilmaston kylmyys Maunderin minimin aikaan olisi yhdistettävissä auringonpilkkujen vähäisyyteen (Eddy 1976: 1199).

Voitaisiin esittää lukuisa määrä tutkimuksia, jotka *näyttävät* joko tukevan tai kaatavan hypoteesiä auringonpilkkujen ja ilmaston tai auringonpilkkujen ja puunkasvun välisestä pitkäaikaisesta yhteisvaihtelusta. Eräs varsin luotettava ongelman lähestymistapa on tarkastelu: miten auringon toiminnan säätelämä ^{14}C -vaihtelut suhtautuvat ilmastotietoihin ja puun kasvuun.

Tällainen vertailu näyttää osoittavan, ettei auringonpilkkujen aktiivisuuteen liittyvällä ^{14}C -vaihtelulla ole ollut ainakaan tällä vuosituhannella tilastollisesti selvää yhteyttä maapallon pitkäaikaisiin ilmasto- tai puunkasvuvaihteluihin. Esimerkiksi Alppien puulustojen tiheydet kuvastavat kylmää periodia vuosina 1570—1640 (Schweingruber ym. 1979: fig. 7). Tuo aika sattuu Spörerin ja Maunderin minimien väliseen kauteen, jolloin auringonpilkkua lienee ollut runsaasti (matalat ^{14}C -arvot). Toisaalta kylläkin mm. Venäjän poikkeuksellisen kylmät talvet osuvat Wolfin, Spörerin ja Maunderin minimien alkuun. Myös Lapin puiden paksuuskasvulla ja aurinkoperäisellä ^{14}C -vaihtelulla on tiettyä vastaavuutta (Stuiver 1980). Lisäksi esim. Brunsin ym. (1980) tutkimus viittaa siihen, että Etelä-Saksan tammien sädekasvulla ja ^{14}C :n tuotantovaihtelulla (vuosina 200—800 j.Kr.) on selväkö riippuvuus; tosin korrelaatio on positiivinen!

Muun muassa Stuiverin (1980) luotettavalta vaikuttava tuore tutkimus tukee selvästi kä-

sitystä, jonka mukaan vuosittaiset ilmastovaihtelut eivät riipu auringonpilkuista. Haudattaessa tätäkin tulosta voidaan epäillä. Esimerkiksi käytetyt ilmastotiedot ovat epätarkkoja, koska ne ovat pääasiassa ajalta, jolloin ei tehty säännöllisiä meteorologisia havain-toja.

Myös monet laajat tilastolliset ja simuloivat tutkimukset ajalta, jolta jo on instrumentaal-lisia meteorologisia havaintoja ja teleskoop-pisia auringonpilkkutietoja, osoittavat, ettei-vät ilmaston eivätkä lustonleveyksien vaihte-lut ainakaan systemaattisesti vastaa auring-onpilkkujen rytmiä (esim. LaMarche & Fritts 1972; Robock 1978).

Loppukatsaus

Auringonpilkuilla on varsin selvä noin 11 vuoden sykli. Puulustoista tehty ^{14}C -määri-tykset osoittavat, että auringonpilkkujen määrillä on myös pitempi rytmi, jota Oortin, Wolfin, Spörerin ja Maunderin minimi il-mentävät (esim. Suess 1980, ks. myös kuva 2). Auringonpilkut vaikuttavat revontulien ja ^{14}C :n muodostumiseen niin, että revontulien esiintyminen voimistuu ja ^{14}C :n tuotanto heikkenee pilkkumaksimien aikana; minimien aikana tilanne on päinvastainen.

Auringonpilkkujen vaikutusta maapallon ilmastollisiin oloihin tai puulustojen vaihte-levaan leveyteen ei ole pystytty yleispätevästi osoittamaan, vaikka monet paikalliset tut-kimukset antavatkin »positiivisia» tuloksia.

Ei voida kuitenkaan kieltää, etteikö auring-on aktiviteetin muutoksilla voisi olla jotakin vaikutusta maapallon ilmastollisiin oloihin. Esimerkiksi Etelänavalta 25—30 kilometrin korkeuteen laukaistut luotaimet ovat osoitta-neet lisääntyvää ilmakehän ja maanpinnan välistä sähkövirtausta suurien auringon loi-mujen aikana. On oletettavissa, että tämä auringon aiheuttama sähköisyys maan ilma-kehässä voisi lisätä salamointia ja ukkossatei-ta (Solar... 1979). Edelleen ilmakehän ylä-osan suihkuvirtaukset näyttävät muuntuvan auringonpilkkujen 11-vuotisrytmissä (Nas-trom & Belmont 1980), mikä voisi aiheuttaa ainakin alueellisia muutoksia myös maanpin-nan läheisissä ilmasto-oloissa.

On myös mahdollista, että auringonpilkut vain näkyvästi kuvastavat muita samanaikai-sia auringon muutoksia. Esimerkiksi auring-on valovoimassa ja koossa saattaa ilmetä auringonpilkkujen rytmiin liittyvää pientä vaihtelua (Spiegel & Weiss 1980; Gough 1980).

Auringonpilkut lienevät joka tapauksessa enintään pieni ilmasto säätelevä tekijä, jon-ka mahdollinen vaikutus peittyi helposti tär-keämpien kliimaattisten tekijöiden alle. Pui-den kasvua säätelevät lisäksi muutkin kuin ilmastolliset ympäristötekijät. Niin ollen auringonpilkkujen korkeintaan vähäinen ja kenties myös vain alueellinen vaikutus on puulustosarjoista vaikeasti todennettavissa.

SUMMARY

Sunspots and their relation to terrestrial phenomena

The variations in the number of sunspots display a cycle of about 11 years. In China, Korea, and Japan observations of sunspots with unaided eye have been made since the fourth century B.C. Even though sunspot sightings in the Far East were centered on periods of high solar activity and certain seasons, they are of great value to scien-tists of our time.

Data on sunspots improved after the invention of the telescope in 1610, although the properly organized and standardized observations began in Europe as late as 1848. Telescopic observations indicate a period of especially low solar activity from the year 1645 to 1715 (Maunder minimum; Fig. 1).

There is a strong positive correlation between appearances of aurorae and sunspot numbers. Aurorae are produced when charged particles of the solar wind interact with the Earth's magnetic field and molecules in the atmosphere. Because these particles are produced primarily in the same areas of the Sun which also display sunspots it follows that aurorae and sunspots are phenomena related to one another.

Sunspots also appear to affect the ^{14}C produc-tion rate in the upper atmosphere. This is because the solar wind, the strength of which is related to sunspot activity, modulates the ^{14}C -producing cosmic ray flux impacting the Earth's atmosphere. During sunspot maxima the solar wind increases and the stream of cosmic rays reaching the atmosphere decreases. At that time the ^{14}C produc-tion rate is abnormally low. During sunspot minima the situation is reversed.

The ^{14}C isotope generated in the upper atmo-sphere is carried as carbon dioxide through photo-synthetic pathways into plants. So the $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio in the cells of annual tree rings, for instance, is a rather accurate indicator of the atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio during the same year. The radio-isotope ^{14}C decays with a half life of 5730 years. Determining ^{14}C contents of tree rings yields in-formation on the atmospheric ^{14}C changes and, thusly, past solar activity can be traced.

When reconstructing sunspot variations from tree-ring ^{14}C records it must be noted that at-mospheric ^{14}C changes are also influenced by changes in the intensity of the Earth's geomagnetic field, variations in the terrestrial carbon re-

servoires, the Suess effect, explosions of nuclear bombs and time lag.

The Earth's geomagnetic field also affects the cosmic ray flux. This influence can be assessed very accurately. Climate-induced changes in carbon reservoirs are composed of the CO₂ balance between the atmosphere and the oceans, and of the size of biospheric store, for instance. These changes are difficult to estimate.

The Suess effect which is caused by the combustion of ¹⁴C-free fossil fuels since the Industrial Revolution has reduced the relative amount of the ¹⁴C isotope in the atmosphere. The effect of nuclear bombs has, in turn, increased the atmospheric ¹⁴C values. Time lag between the production of ¹⁴C and its entering photosynthesis is some ten years.

Tree-ring derived ¹⁴C values correlate strongly with sunspot numbers. For instance during the Maunder minimum the ¹⁴C production was efficient. The same applies to the time periods 1416—1532, 1282—1342 and 1010—1050. These intervals are called, referring to periods of low solar activity, the Spörer, Wolf and Oort minima (Fig. 2).

The sunspot cycle of about 11 years is not clearly visible in ¹⁴C records from tree-ring series. Possible reason is the time lag mentioned above and perhaps also a radial transport of ¹⁴C between individual tree rings. In analyses of annual wines this cycle, however, has been found.

Opinions about the impact of sunspots on the climate and climate-induced phenomena are divergent. Many researchers have seen a positive correlation between sunspot numbers and tree-ring widths. This covariance has not been proved undisputably.

However, it is possible that the solar activity influences the atmospheric electricity, which might increase the frequency of thunder showers. In addition, jet streams in the upper atmosphere may have fluctuations with an interval of the 11-year solar cycle. Even this could cause at least areal changes in climatic conditions on the Earth's surface. Also small variations in solar luminosity may be related to the 11-year sunspot rhythm.

At any rate, the sunspots appear to have only small effect, at most, on the climate of the Earth. Verifying of possible sunspot impact on tree growth is especially difficult because tree growth is controlled by many non-climatic factors, too.

Kirjallisuus

- Bray, J. R. & G. J. Struik (1963). Forest growth and glacial chronology in eastern British Columbia, and their relation to recent climatic trends. *Canadian Journal of Botany* 41, 1245—1271.
- Brier, G. W. (1968). Long range prediction of the zonal westerlies and some problems in data analysis. *Reviews of Geophysics* 6, 525—551.
- Bruns, Michael, K. O. Münnich & Bernd Becker (1980). Natural radiocarbon variations from AD 200 to 800. *Radiocarbon* 22, 273—277.
- Burchuladze, A. A., S. V. Pagava, P. Povinec, G. I. Togonidze & S. Usačev (1980). Radiocarbon variations with the 11-year solar cycle during the last century. *Nature* 287, 320—322.
- Cain, William F. & Hans E. Suess (1976). Carbon 14 in tree rings. *Journal of Geophysical Research* 81, 3688—3894.
- Douglass, A. E. (1919). Climatic cycles and tree growth. A study of the annual rings of trees in relation to climate and solar activity, I. *Carnegie Institution of Washington Publication* 289.
- Eddy, John A. (1976). The Maunder Minimum. *Science* 192, 1189—1202.
- Gough, Douglas (1980). Climate and variability in the solar constant. *Nature* 288, 639—640.
- Heikkinen, Olavi (1980). Mountain pine radial growth and the forest limit zone in Gadmental, the Swiss Alps. *Fennia* 158: 1, 1—14.
- Hustich, Ilmari (1978). The growth of Scots pine in northern Lapland, 1928—77. *Annales Botanici Fennici* 15, 241—252.
- LaMarche, Valmore C. Jr. & Harold C. Fritts (1972). Tree-rings and sunspot numbers. *Tree-Ring Bulletin* 32, 19—33.
- Lamb, H. H. (1977). *Climate: present, past and future*. Vol. 2. Climatic history and the future. Methuen, London.
- Mikola, Peitsa (1950). Puiden kasvun vaihteluista ja niiden merkityksestä kasvatutkimuksissa. Summary: On variations in tree growth and their significance to growth studies. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 38: 5.
- Nastrom, G. D. & A. D. Belmont (1980). Evidence for a solar cycle signal in tropospheric winds. *Journal of Geophysical Research* 85, 443—452.
- O'Brien, K. (1979). Secular variations in the production of cosmogenic isotopes in the Earth's atmosphere. *Journal of Geophysical Research* 84, 423—431.
- Pittock, A. B. (1978). A critical look at long-term sun-weather relationships. *Reviews of Geophysics and Space Physics* 16: 3, 400—420.
- Robock, Alan (1978). Internally and externally caused climate change. *Journal of the Atmospheric Sciences* 35: 6, 1111—1122.
- Röthlisberger, Friedrich (1976). Gletscher- und Klimaschwankungen im Raum Zermatt, Ferpècle und Arolla, II. Teil in: 8000 Jahre Walliser Gletschergeschichte. *Die Alpen* 52: 3/4, 59—152.
- Schweingruber, F. H. (1979). Auswirkungen des Lärchenwicklerbefalls auf die Jahrringstruktur der Lärche. *Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen* 130: 12, 1071—1093.
- Schweingruber, Fritz H., Otto U. Bräker & Ernst Schär (1979). Dendroclimatic studies on conifers from central Europe and Great Britain. *Boreas* 8, 427—452.
- Sirén, Gustaf (1961). Skogsgränställen som indikator för klimatfluktuationerna i norra Fennoskandien under historisk tid. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 54: 2.
- Sirén, Gustaf & Pertti Hari (1971). Coinciding periodicity in recent tree rings and glacial clay sediments. *Reports from the Kevo Subarctic Research Station* 8, 155—157.
- Solar activity and terrestrial thunderstorms (1979). *New Scientist* 83: 256.
- Spiegel, E. A. & N. O. Weiss (1980). Magnetic activity and variations in solar luminosity. *Nature* 287, 616—617.
- Stuiver, Minze (1980). Solar variability and clima-

- tic change during the current millenium. *Nature* 286, 868—871.
- Stuiver, Minze & Pieter M. Grootes (1980). Trees and the ancient record of heliomagnetic cosmic ray flux modulation. *Proceeding of the Conference on Ancient Sun*, edited by R. O. Pepin, J. A. Eddy and R. B. Merrill, 165—173.
- Stuiver, Minze & Paul D. Quay (1980). Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable sun. *Science* 207, 11—19.
- Stuiver, Minze & Henry A. Polach (1977). Discussion: Reporting of ^{14}C data. *Radiocarbon* 19, 355—363.
- Suess, Hans E. (1980). The radiocarbon record in tree rings of the last 8000 years. *Radiocarbon* 22, 200—209.
- Svenonius, Björn & Eric Olausson (1978). Ring widths of trees, solar activity and weather conditions in Sweden in the period 1756—1975. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 100, 95—100.
- Tans, P. P., A. F. M. De Jong & W. G. Mook (1979). Natural atmospheric ^{14}C variation and the Suess effect. *Nature* 280, 826—827.
- Waldmeier, M. (1961). *The sunspot activity in the years 1610—1960*. Zürich, Schulthness & Co.
- Waldmeier, M. (1978). *Astronomische Mitteilungen der Eidgenössischen Sternwarte* 358. Zürich.
- Willis, D. M., M. G. Easterbrook & F. Richard Stephenson (1980). Seasonal variation of oriental sunspot sightings. *Nature* 287, 617—619.