

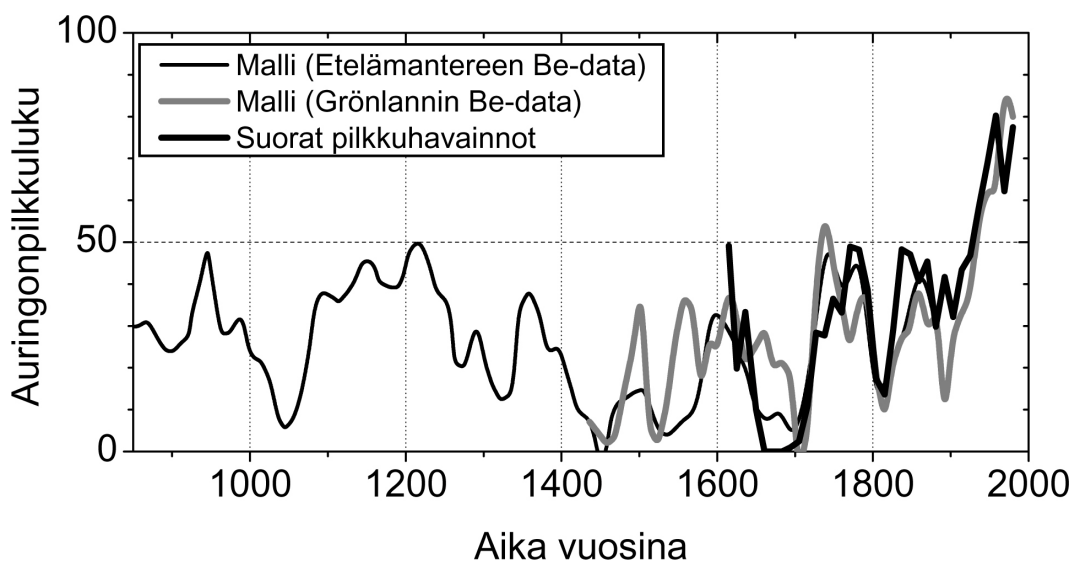
Ujo ballerina aktiivisimmillaan

Auringon magneettisen dynamoteorian kehittäjä **R.B. Leighton** on laushtanut: *“If the Sun didn't have a magnetic field, then it would be as boring as most people think it is”*. Vaikka tämä tokaisu edustaakin tyyppillistä hybristä, jolla tutkijat korostavat oman tutkimusalan merkitystä, voi sitä pitää jossain mielessä perusteltuna. Useat muut Aurinkoon liittyvät peruskysymykset (mm. energiantuotto) ja ongelmat (mm. Auringon neutriino-ongelma) lienevät jo ratkaistu, mutta Auringon magneettista toimintaa ymmärretään vielä varsin vähän. Auringon magneettikentän syntyyn ja ominaisuuksiin sekä Auringon magneettisen aktiivisuuden

vaihteluun liittyy useita avoimia kysymyksiä. Lisäksi viime aikoina uusilla havainto- ja laskentamenetelmillä sekä pidemmällä mittaussarjoilla on Auringon magneettisesta toiminnasta löydetty uusia, jopa täysin ennustamattomia piirteitä. Lisäksi tiedämme, että nykyinen Auringon toiminta on poikkeuksellisen voimakasta usean vuosituhannen aikajännteellä tarkasteltuna. Viime vuosina on myös tullut entistä selemmäksi, että kyseiset magneettisen toiminnan vaihtelut aiheuttavat merkittäviä vaihteluita koko Auringon hallitsemassa avaruudessa, ns. heliosfäärissä, siis myös Maassa.

Auringonpilkkujen historiaa

Auringon pinnan magneettista aktiivisuutta on seurattu auringonpilkkujen avulla varsin systemaattisesti jo 1600-luvun alkupuolelta lähtien, eli heti kaukoputken kehittämisen jälkeen. **Galileo Galilei** oli ensimmäisiä tutkijoita, joka tarkkaili auringonpilkkuja ja todennäköisesti ensimmäinen, joka mm. osoitti niiden todellakin kuuluvan Aurinkoon. (Tässäkin asiassa Galilei taisteli pitkään kirkon virallista kantaa vastaan). 1990-luvulla amerikkalaiset **Hoyt** ja **Schatten** keräsivät Galilein päivistä lähtien tehdyt tuhannet auringonpilkkuhavainnot ja kehittivät niistä lähes 400 vuotta kattavan yhtenäisen auringon-



Kuva 1: Auringonpilkkujen lukumäärä vuodesta 850 lähtien. Kuvassa esitetty mallin mukaiset arvot käyttäen Etelämantereen ja Grönlannin Be-10-aineistoa sekä suorat pilkkuhavainnot. Käyrät ovat pilkkulukujen 11-vuotiskeskisarvoja.

pilkkujen määrää kuvaavan indeksin. Hoytin ja Schattenin indeksi vahvistaa jo aiemmin esitetyt tulokset siitä, että Auringon toiminta on dramaattisesti vaihdellut tällä ajanjaksolla.

Jo 1840-luvulta lähtien on tiedetty auringonpilkkujen määrän vaihtelevan noin 11-vuotisen ns. Schwabe-syklin mukaan. Myöhemmin, 1900-luvun alkupuolella, kun Auringon magneettikenttä osattiin mitata, havaittiin pilkkuparien magneettisen polariteetin vaihtelevan syklistä toiseen. Auringon magneettinen sykli, ns. Hale-sykli, muodostuu kahdesta peräkkäisestä Schwabe-syklistä. Hoytin ja Schattenin indeksi osoittaa myös, että pilkkusyklien amplitudi ja intensiteetti (pilkkujen kokonaismäärä) on vaihdellut erittäin suuresti viimeisen 400 vuoden aikana. Vaihtelun ääripäät sijoittuvat 1600-luvun ja 1900-luvun loppupuolille. 1600-luvun puolivälistä (ei siis heti indeksin alusta) 1700-luvun alkupuolelle sijoittuneen ns. Maunderin minimin aikana auringonpilkkujen määrä väheni dramaattisesti, ja pilkkujen selvä Schwabe-syklisyys katosi muutamaksi kymmeneksi vuodeksi. Aurinkoa havainnoitiin tuolloin jo erittäin tiiviisti, eikä minimin olemassaolosta ole mitään tilastollista tms. epäselvyyttä. Lisäksi auringonkaltaisten tähtien havainnot osoittavat tällaisten pitkäikäisten hiljaisten kausien, ns. suurten minimien, kuuluvan niiden magneettiseen toimintaan. Toisaalta viimeisen 60–70 vuoden aikana auringonpilkkusyklien ampli-

tudit ovat olleet lähes yhtäjaksoisesti suurempia kuin muulloin 400 vuoden aikana.

Auringon magneettikentän 100-vuotinen muutos

Vuonna 1999 englantilainen **Mike Lockwood** kollaboraattoreineen hähkädytti maailmaa (ja Fysiikan päivien osallistujia) esittämällä tuloksen, jonka mukaan Auringon avoin, aurinkotuulen mukana avaruuteen leviävä magneettikentän (ns. heliosfäärin magneettikenttä HMF) intensiteetti olisi lähes kaksi ja puolikertaistunut viimeisen sadan vuoden aikana. Tämä tulos perustui Maan magneettikentän häiriöisyyttä kuvaavaan ns. aa-indeksiin, jonka ranskalainen munkki ja tutkija **P.-N. Mayaud** kehitti 1970-luvulla. Maan magneettikentän häiriöisyyden kasvu viime vuosikaudalla näkyy selvästi aa-indeksissä ja on tunnettu jo kauan. Tämän lisäksi Lockwood käytti aurinkotuulen ja HMF:n ominaisuuksista saatuja satelliittihavaintoja viimeisen 40 vuoden ajalta selvittääkseen niiden vaikutusta Maan magneettiseen häiriöisyyteen. Lockwoodin johtopäätös oli, että aa-indeksin kasvu johtuisi pääosin HMF:n intensiteetin kasvusta.

Varsin pian Lockwoodin tuloksen jälkeen Oulun yliopiston entinen tähtitieteen professori, nykyinen saksalaisen Aurinkokunnan tutkimuksen Max-Planck-instituutin (MPI für Sonnensystemforschung, Katlenburg-Lindau) johtaja **Sami Khan Solanki**

esitti mallin, jossa Auringon avoimen kentän intensiteetti voitiin laskea mitattujen auringonpilkkujen määrästä. Mallin mukaan auringonpilkkujen tuoma voimakas magneettivuo jakautuu Auringon pinnalle tietyllä aikaskaalalla. Osa tästä vuosta ajautuu avoimen kentän alueelle ja siis aurinkotuulen mukana pois Auringosta. Mitä enemmän auringonpilkkuja esiintyy, sitä suurempi on myös Auringosta lähtevän magneettikentän intensiteetti. Yhteys ei kuitenkaan ole lineaarinen, ja mallin mukaan vuosisadan aikana tapahtunut magneettikentän intensiteetin kasvu aiheutuu pilkkujen sisältämän magneettivuon varsin hitaasta jakautumisesta ja tästä johtuvasta kumuloitumisilmiöstä pilkkusyklien kasvaessa ja niiden keston samanaikaisesti lyhetyssä (ns. Waldmeierin sääntö).

Solankin mallin tulokset HMF:n intensiteetin kasvusta 1900-luvun aikana olivat (aikaskaalaparametrin määrittämisen jälkeen) varsin yhdenmukaisia Lockwoodin tuloksen kanssa.

Auringon avoin magneettikenttä ulottuu pitkälle planeettakunnan ulkopuolelle ja vaikuttaa mm. kaikkien planeettojen ja kuiden magnetosfäreihin, ionosfäreihin ja ilmakehiin sekä galaktisiin kosmisiin säteisiin. HMF:n intensiteetti on tärkein tekijä, joka säätelee Aurinkokunnan ulkopuolelta tulevien galaktisten kosmisten säteiden määrää sisäisessä heliosfäärissä. Voimakas magneettikenttä pystyy tehokkaammin

poikkeuttamaan kohti Aurinkoa lentäviä energeettisiä hiukkasia ja estämään niiden pääsyn sisempään heliosfääriin ja siis myös Maahan. Näin ollen mittaamalla kosmisten säteiden määrän vaihtelua Maassa voidaan HMF:n suuruutta ja Auringon pitkäaikaista aktiivisuutta myös tutkia. Kosmisten säteiden mittaukset aloitettiin kuitenkin vasta 1950-luvulla, joten niillä ei päästä edes niin kauas menneisyyteen kuin auringonpilkkumittauksilla.

Auringon tuhatvuotinen toiminta Be-10-isotoopin mukaan

Kosmisten säteiden intensiteetin vaihtelua voidaan kuitenkin mitata epäsuorasti paljon pidemmälläkin ajanjaksoilla. Kosmiset säteet tuottavat Maan ilmakehässä tapahtuvissa törmäyksissä mm. tiettyjä merkkiytimiä, ns. kosmisiä isotooppeja, joista osa varastoituu tutkimukselle sopiviin pitkäaikaisvarastoihin. Jos näiden varastojen ajoitus voidaan riippumattomasti määrittää, saadaan isotooppien historiallisesta runsaudesta tietoa kulloisenkin ajankohdan kos-

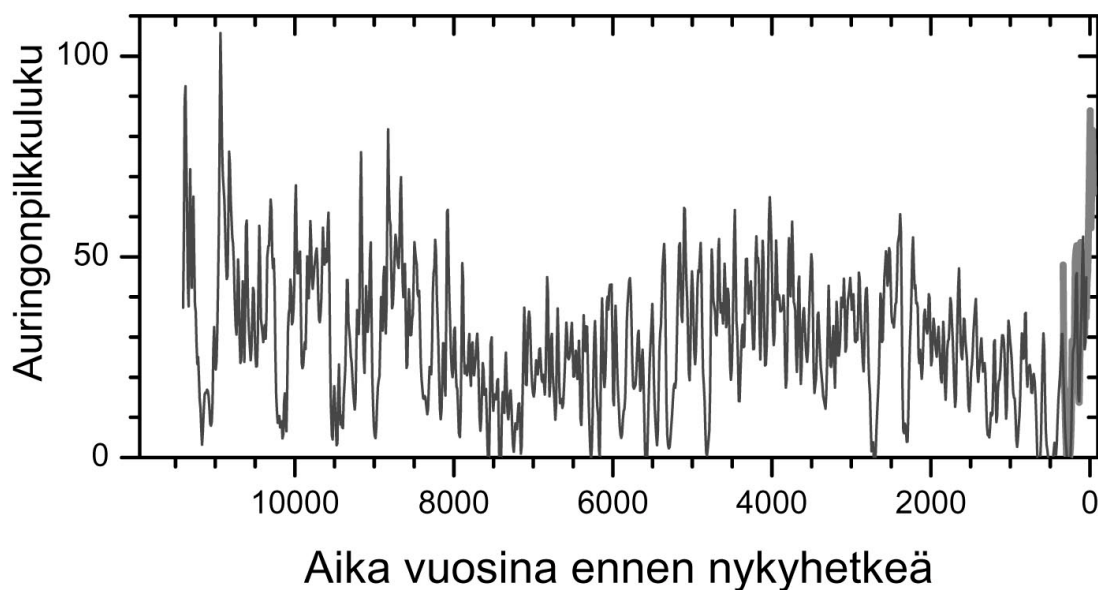
misen säteilyn intensiteetistä. Tärkeimmät kosmiset isotooppivarastot ovat puulustojen hiili-14 ja mannerjäähän kerrostunut beryllium-10.

Näiden isotooppien avulla päästään useiden tuhansien vuosien taakse Auringon menneisyyteen.

Kosmisten isotooppien mittaussarjojen käsittely on viime aikoihin asti perustunut pelkkään matematiikkaan. Isotooppimittauksia on ensin korreloitu samanaikaisiin auringonpilkkumääriin viimeisten 200–400 vuoden ajalta ja sitten jatkettu saatua (negatiivista) korrelaatiota kauemmas historiaan ja täten määritetty varhainen Auringon aktiivisuus. Tällä tavoin rekonstruoidussa aktiivisuudessa on voitu nähdä mm. useita suuria minimejä sekä toisaalta lähes nykyisen tasoista aktiivisuutta. Lineaarinen korrelaatio auringonpilkkujen kanssa on kuitenkin erittäin karkea approksimaatio edellä esitetylle monimutkaiselle vuorovaikutusketjulle, jossa auringonpilkkut ovat epäsuorassa ja epälinearisessa yhteydessä kosmisten isotooppien määrään. (Itse asiassa ketjun mikään osa ei ole lineaarinen. Esimerkiksi edellä mainittu

kumulointumisefekti on selvästi epälineaarinen). Yksinkertainen korrelaatiomenetelmä antaa siis vain varsin kvalitatiivisen kuvan auringonpilkkujen vaihtelusta menneisyydessä.

Fysikaalisempaan tulokseen ja parempaan kvantitatiiviseen tarkkuuteen päästään Oulun yliopiston ja Max-Planck-instituutin kehittämällä menetelmällä, jossa yhdistetään kosmisten isotooppien runsaus ja auringonpilkkujen lukumäärä käyttämällä fysikaalisesti motivoituja ja kokeellisesti testattuja malleja kussakin em. vuorovaikutustilanteessa. Auringonpilkkujen ja HMF:n intensiteetin yhteys mallinnetaan Solankin mallin avulla. Galaktisten kosmisten säteiden intensiteetti ja energiaspektri Maan radalla saadaan simuloimalla HMF:n vaikutusta niihin käyttäen yksidimensioista heliosfäärimallia. Mallin mukaan kosmisten säteiden ominaisuudet riippuvat vain ns. modulaatioparametrilla, jolla on aiemmin osoitettu olevan yksinkertainen riippuvuus HMF:n voimakkuudesta. Kun kosmisten säteiden energiaspektri tunnetaan, voidaan kosmisten isotooppien runsaus laskea nii-



Kuva 2: Holoseenin aikainen auringonpilkkujen lukumäärä C-14-isotoopin mukaan. Käyrät ovat pilkkulukujen 11-vuotiseskiarvoja. Nykyisen kaltaista aktiivisuustasoa esiintyi jääkauden jälkeisenä parin tuhannen vuoden aikana.

den tuottoa ja varastoitumista kuvaavien, aiemmin kehitettyjen mallien avulla. Kaikki osamallit säilyttävät absoluuttitason, ja niinpä kokonaismallin antamaa, isotooppimäärästä laskettua auringonpilkkulukua voidaan verrata havaittuun pilkkumäärään viimeisen 400 vuoden aikana ja siten testata mallin hyvyttä.

Menetelmää sovellettiin ensin mannerjäädästä mitattuun Be-10-isotooppien aikasarjaan. Koska mannerjää tiivistyy mitä syvemmmälle eli mitä kauemmas historiaan poraudutaan, heikkenee mittaussarjan näytteistys. Koska menetelmä vaatii riittävän tiheän isotooppinäytteistykseen (vähintään yksi näyte joka aurinkosykli), sitä voi soveltaa Be-10-mittauksiin vasta vuodesta 850 lähtien. Tästä saadut tulokset julkaistiin marraskuussa 2003 Phys.Rev.Lett-lehdessä, jonka verkkoportaalini etusivulla artikkeli oli pääuutisena viikon ajan. Kuvassa 1 on esitetty mallin antamat syklitasoitettujen auringonpilkkuluvut käyttäen Grönlannin ja Etelämannerin Be-10-mittaussarjoja sekä suoria auringonpilkkuhavaintoja vuodesta 1610 lähtien. Kuvasta käy ilmi selvästi, että viime vuosikymmenien aikainen voimakas aktiviteetti on ainutlaatuisia yli tuhanteen vuoteen. Kun vuoden 1940 jälkeinen keskimääräinen pilkkuluku on 75, yli tuhanteen vuoteen se ei ylittänyt edes lukemaa 50. Menetelmä myös vahvistaa usean suuren minimin esiintymisen kyseisenä ajanjaksona. Be-10-isotoopin käytön ainoa epävarmuustekijä liittyy siihen, että paikalliset ilmasto-olosuhteet voivat vaikuttaa havaintoihin. Kuvassa 1 käytetyt kaksi Be-10-aikasarjaa poikkeavat jonkin verran toisistaan, joskin tärkeimmät vaihtelut ovat varsin samantyyppiset.

Holoseenin aikainen Auringon toiminta C-14-isotoopin mukaan

Samaa menetelmää sovellettiin C-14-

isotooppimittaussarjaan vastikään Naturessa julkaistussa artikkelissa. Ajoituksessa käytetään yleensä hiili-14-mittauksia, mutta puulustoista kerätyt näytteet voidaan ajoittaa muillakin menetelmillä, jolloin C-14-mittauksia voidaan käyttää kosmisten hiukkasten vaihtelun tutkimiseen. Eri puolilta maapalloa mitatuista monista C-14-näytteistä on olemassa laajan kansainvälisen yhteistyön avulla aikaansaatu, homogeeniseksi kalibroitu ja absoluuttisesti ajoitettu aikasarja. Hiili-14-aikasarjan näytteistys on lisäksi riittävä uuden menetelmän käyttöön koko Holoseenin (eli edellisen jääkauden jälkeiseltä) ajalta.

Kuva 2 esittää näin lasketut tasoitettujen pilkkuluvut 11400 vuoden ajalta. Kuva osoittaa, että nykyisen kaltaisia voimakkaan aktiivisuuden kausia on ollut aiemmin Holoseenin alussa ja viimeksi n. 9000 vuotta sitten. Tämä vahvistaa nykyisen aktiivisuuden harvinaisuuden. Yli 50:n pilkkuluvun kausia on sentään hieman runsaammin. Aurinko on viettänyt näissä kohtalaisen aktiivisissa kausissa n. 7-9% ajastaan. Kaudet eivät ole kuitenkaan kovin pitkäkestoisia, sillä niiden keskipituus on vain 30 vuotta ja pisinkin niistä on vain 90 vuotta. Kun nykyinen aktiivinen kausi on jo kestänyt 65 vuotta, on aktiivisuuden huomattava lasku lähi vuosikymmeninä erittäin todennäköistä.

Tuhansia vuosia pitkän aikasarjan käytön suurin epävarmuus liittyy Maan magneettikentän pitkäaikaiseen vaihteluun. Kentän intensiteetin heiketessä kosmisten säteiden pääsy Maan ilmakehään helpottuu, mikä lisää C-14:n tuottoa ja siis jäljittelee Auringon heikkoutta aktiivisuutta. Maan magneettikentän vaihtelu tunnetaan kuitenkin varsin hyvin ja se on otettu C-14-tutkimuksessa huomioon. Auringonpilkkuluvuille arvioitu virhe pysyy varsin samana (n. 10) viimeiset 6000 vuotta, mutta kaksinkertaistuu Holoseenin alkupuolella.

Hiili-14-isotoopin globaaliin käyttäytymiseen liittyvät oleellisenä osana sen pitkäaikainen varastoituminen erilaisiin luonnollisiin säiliöihin, kuten valtameriin. Suuret muutokset esim. merivirroissa Holoseenin aikana voisivat myös vaikuttaa tuloksiin merkittävästi. Tällaisista muutoksista ei ole kuitenkaan näyttöä. Näistä epävarmuustekijöistä huolimatta uudet tulokset Auringon aktiivisuudesta Holoseenin aikana korostavat nykyisen aktiivisuustason harvinaisuutta, vaikkakaan nykyinen taso ei ole täysin poikkeuksellista.

Dynamoalueen nopeat vaihtelut

Toistaiseksi ei ole olemassa mitään varmaa tietoa siitä, mikä aiheuttaa Auringon magneettisen dynamon toiminnassa näin suurta vaihtelua. Itse asiassa magneettisen dynamon pääasiallista sijaintiakaan ei varmuudella tiedetä. Todennäköisesti se sijaitsee konvektiokerroksen pohjalla, lähes kiinteästi pyörivän ytimen ja differentiaalisesti (eri nopeuksilla) pyörivän konvektio- eli vaippakerroksen välisellä raja-alueella.

Helioseismologia on menetelmä, jossa mitataan tarkasti Auringon pinnan pieniä värähtelyjä. Näistä värähtelyistä voidaan teoreettisen mallin avulla saada tietoa Auringon sisästä eri kerroksista. Helioseismologian ehkä mielenkiintoisin löydös on täysin ennakoimaton, n. 1,3 vuoden pituinen vaihtelu konvektioalueen pohjakerroksen pyörimisnopeudessa. Koska tämä kerros on todennäköinen dynamon sijaintialue, löydös vihjaa, että Auringon magneettikentän tuotto vaihtelee tällä jaksolla. Mielenkiintoista kyllä, kyseisen vaihtelun on jo aiemmin tiedetty esiintyvän useissa heliosfäärisissä muuttujissa, kuten aurinkotuulesa, HMF:ssä ja kosmisissä säteissä. Se esiintyy voimakkaana myös mm. revontulien määrän ja geomagneettisen aktiivi-

suuden pitkäaikaisissa mittaussarjoissa, mikä osoittaa kyseisten vaihtelujen olevan pitkäaikaisesti merkittäviä. Vaihtelun amplitudi on lisäksi suurempi viimeisen 60 vuoden aikana ja 1800-luvun puolivälissä, jolloin Auringon aktiivisuus on ollut varsin voimakasta, ja pienempi 1900-luvun alussa, jolloin Aurinko oli vähemmän aktiivisessa vaiheessa. Tämä tukee ajatusta, että kyseiset vaihtelut todellakin heijastavat Auringon magneettisen dynamon toiminnan vaihteluita.

Yhtenäiset helioseismologiset mittaukset alkoivat vasta vuonna 1994, ja 1,3 vuoden vaihtelu esiintyi selvästi vuoteen 2001 asti, kunnes näytti siltä, että vaihtelu loppuisi. Uusimmat havainnot osoittavat kuitenkin vaihtelujen jatkuvan, joskin hieman pidemmällä taajuudella ja mahdollisesti hieman eri syvyydellä. Tämä ei ole täysi yllätys, sillä sekä pitkäaikaisissa maanpintahavainnoissa että satelliiteilla mitatuissa

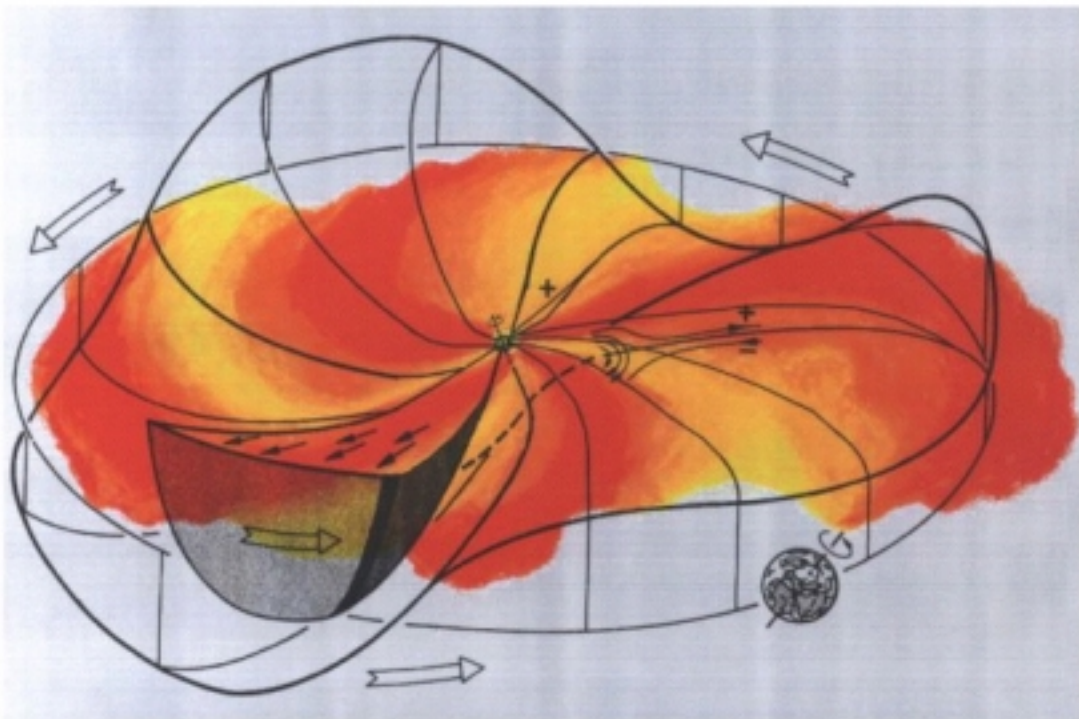
heliosfääristen muuttujien mittaussarjoissa kyseisten vaihtelujen voidaan nähdä vaihtavan hieman taajuuttaan ja amplitudiaan syklistä toiseen. Tulevat mittaukset ovat todella mielenkiintoisia ja selvittänevät näiden vaihtelujen syyn ja yhteyden Auringon tunnettuun 22-vuotiseen magneettiseen sykliin. Samoin Auringon sisäosissa ja heliosfäärissä havaittujen vaihtelujen yhteys kaippaa tarkennusta. Ilmiön teoreettinen ymmärrys on vielä täysin alullaan ja korostaa Auringon magneettisen toimintaan liittyviä avoimia kysymyksiä.

Ujo ballerina

Auringon magneettiseen toimintaan liittyy muitakin avoimia kysymyksiä. Esimerkiksi on tiedetty jo kauan, että Auringon pohjoisen ja eteläisen hemisfäärin magneettisen toiminnan välillä on ajoittain huomattavia eroja. Magneettinen polariteetti voi vaihtua pohjoisella ja eteläisellä navalla parinkin vuoden erolla, ja auringon-

pilkkujen määrissä on havaittu pitkäaikaista, jopa toistakymmentä vuotta kestävää yhtenäistä epäsymmetriaa. Näillä havainnoilla ei ole kuitenkaan havaittu olevan mitään selvää systematiikkaa tai yhteyttä Auringon magneettiseen sykliin. Niinpä Auringon pohjois-eteläisen epäsymmetrian merkitystä ei ole ymmärretty, ja koko ilmiö on jäänyt varsin marginaaliseksi. Joskus täytyy kuitenkin matkustaa kauemmas, jotta näkisi lähellä olevat asiat paremmin. Näin tässäkin asiassa.

Auringon magneettikentän globaali rakenne tulee paremmin esille heliosfäärissä kuin Auringon pinnalla, missä monimuotoinen pienen skaalan vaihtelu hallitsee ja vaikeuttaa oleellisten laajan skaalan piirteiden löytämistä. Heliosfäärin magneettikenttää on mitattu Maan lähiympäristössä eri satelliiteilla n. 40 vuoden ajan. Olemme käyttäneet näitä NASA:n julkiseen käyttöön luovuttamia mitaustuloksia tutkiessamme HMF:n ja aurinkotuulen pitkäaikaista käyttäy-



Kuva 3. Kaaviokuva Auringon magneettisen ekvaattorin jatkeesta avaruudessa eli ns. heliosfäärin virtalevystä, joka muodostaa aaltoilevan pinnan, eli ns. ballerinan hameen.

tymistä. HMF:n oleelliset piirteet on tunnettu jo ensimmäisistä satelliittimittauksista lähtien. Auringon pyörimisestä ja magneettikentän ja aurinkotuulen “kiinnijääytymisestä” johtuen HMF muodostaa spiraalirakenteen. Aurinkoon päin ja siitä pois päin suuntautuneet kenttäviivat erottaa Auringon magneettinen ekvaattori, ns. heliosfäärin virtalevy (HCS; ks. Kuva 3). Auringon aktiivisten alueiden epätasaisen jakauman takia virtalevy ei ole levymäinen vaan poimuilva ja kallistunut pyörimisakseliin nähden. Näin ollen HCS muodostaa aaltoilevan pinnan, josta on jo kauan käytetty nimitystä ballerinan hame.

Tutkiessamme ballerinan hameen pitkäaikaista käyttäytymistä huomasimme sellaisen oudon piirteen, että hame laskeutuu usean asteen verran alaspäin aina aurinkosyklin laskevalla kaudella. Julkaisun arvioijan lievästä epäroinnista huolimatta aloimme kutsua tätä ilmiötä ujoksi (oikeammin häveliääksi; bashful) ballerinaksi aiemman nimityskäytännön loogisena jatkona. Löytöimme mukaan Auringon pohjoisessa hemisfäärissä hallitsevan magneettikentän suuntainen kenttä muodostaisi siis Auringossa ja heliosfäärissä laajemman alueen kuin vastakkaisuuntainen kenttä. Koska Aurinkokaan ei ole magneettinen monopoli, täytyy tämä kompensoitua siten, että etelässä kenttäintensiiteetti on voimakkaampi kuin pohjoisessa.

Uunituoreen artikkelin mukaan Wilcox Solar Observatoryssa (Stanford, CA) Auringon pinnan magneettikentästä tehdyt havainnot vahvistavat nämä tulokset ja osoittavat systemaattisen eron pohjoisen ja eteläisen hemisfäärin magneettikenttien kattamissa alueissa ja kenttien intensiteeteissä sekä magneettisen ekvaattorin eteläisen siirtymän usealla asteella. Tämä Aurinko-ballerinan ujous merkitsee sitä, että Auringon globaalissa magneettikentässä ja sitä tuottavassa dynamossa on merkittävä symmetri- nen kvadrupolikomponentti (ns. S0

dynamomoodi) hallitsevan dipolimoodin (A0) lisäksi. (Tätä ei pidä sotkea pilkkumaksimien aikaiseen pintakentän multipolirakenteeseen). Joissakin tähtien magneettista toimintaa kuvaavissa dynamomalleissa esiintyy useita dynamomoodeja sekoittavia ratkaisuja. Tällaiset ratkaisut Auringossa eivät kuitenkaan ole toistaiseksi olleet suosittuja tai edes tarpeellisia, koska systemaattisesti epäsymmetristä käyttäytymistä ei ole aiemmin voitu havaita. Ujo ballerina vaatii siis Auringon dynamoteoriatuuteen arviointiin ja antaa kvantitatiivisen arvion eri moodien osuudesta.

Viitteet

Howe, R., J. Christensen-Dalsgaard, J. F. Hill, R. W. Komm, R. M. Larsen, J. Schou, M. J. Thompson, and J. Toomre, Dynamic Variations at the Base of the Solar Convection Zone, *Science*, 287, Issue 5462, pp. 2456–2460, 2000.

Lockwood, M., R. Stamper, and M. N. Wild, A doubling of the sun’s coronal magnetic field during the past 100 years, *Nature*, 399, 437–439, 1999.

Mursula, K., and J. Vilppola, Fluctuations of the solar dynamo observed in the solar wind and interplanetary magnetic field at 1 AU and in the outer heliosphere, *Sol. Phys.*, 221(2), 337-349, doi:10.1023/B:SOLA.0000035053.17913.26, 2004.

Mursula, K., and T. Hiltula, Bashful ballerina: Southward shifted heliospheric current sheet, *Geophys. Res. Lett.* 30 (22), p. SSC 2–1–4, doi: 10.1029/2003GL018201, 2003.

Mursula, K., and T. Hiltula, Systematically Asymmetric Heliospheric Magnetic Field: Evidence for a Quadrupole Mode and Non-axisymmetry with Polarity Flip-flops, *Solar Physics*, 2004, in press.

Solanki, S. K., M. Schüssler, and M. Fligge, Evolution of the Sun’s large-scale magnetic field since the Maunder minimum, *Nature*, Volume 408, Issue 6811, pp. 445–447, 2000.

Solanki, S.K., I.G. Usoskin, B. Kromer, M. Schuessler and J. Beer, An unusually active Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years, *Nature*, 431, 1084–1087, 2004

Usoskin, I. G., S. Solanki, M. Schüssler, K. Mursula and K. Alanko, Millennium-scale sunspot reconstruction: Evidence for an unusually active Sun since the 1940s, *Physical Review Letters* 91 (No.21) p. 2111010–1–4, 2003.

Zhao, X. P. Zhao, H. T. Hoeksema and P. H. Scherrer, Prediction and understanding of the north-south displacement of the heliospheric current sheet, *J. Geophys. Res.*, submitted, 2004.

Kalevi Mursula

Kirjoittaja on fysiikan professori Oulun yliopistossa opetusalananaan avaruusfysiikka.