

# AURINGONPILKKUJAKSO 25?

TONIVEIKKOLAINEN

25.7.2019

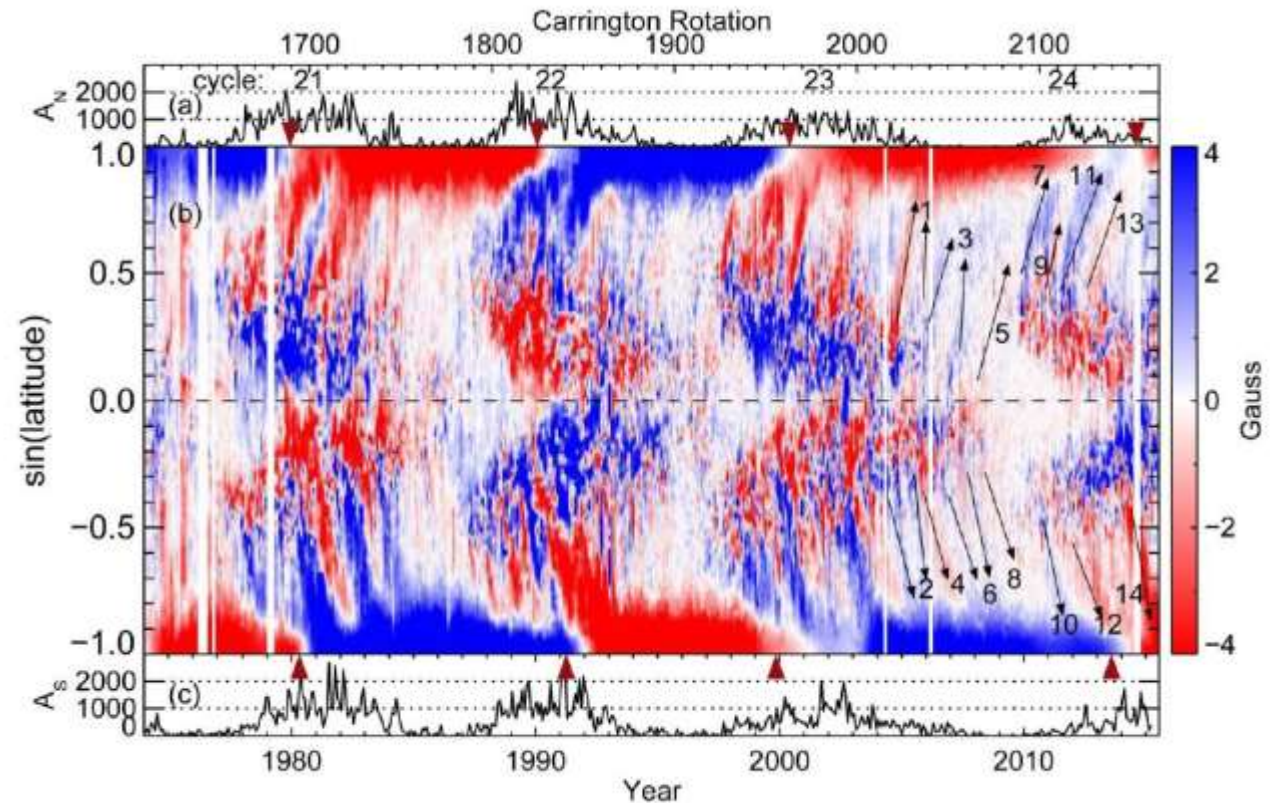


# AURINGONPILKKUJEN JAKSOLLISUUS

- Auringon aktiivisuus vaihtelee karkeasti ottaen 11 vuoden jaksoissa magneettikentän aktiivisuuden mukaisesti
- Auringonpilkkujaksojen numerointi aloitettiin vuonna 1755 (no. 1), kun systemaattisesti kaukoputkihavainnoista saatavaa dataa alkoi olla riittävästi
- Jakso alkaa ja päättyy pilkkuminimiin, koska sen tarkan ajankohdan määrittäminen oli pitkään kuvista helpompaa kuin maksimin joskin kunnolla miniminkin ajankohta saadaan selville vasta takautuvasti
- Magneettikenttä vaihtaa napaisuutta kunkin pilkkumaksimin kohdalla, viimeksi vuosina 2012-2013
- Nyt aivan lopussa oleva jakso (no. 24) alkoi tammikuussa 2008, kun ensimmäiset korkeiden leveysasteiden pilkut vuosien jälkeen ilmestyivät, joskin nämäkin myöhemmin katosivat
- Tämän jälkeen Aurinko pysyi kuukausia pilkuttomana, mutta lokakuun 2008 lopussa uusia korkeiden leveysasteiden pilkkuja alkoi muodostua ja nämä pilkut jäivät pidemmäksi aikaa

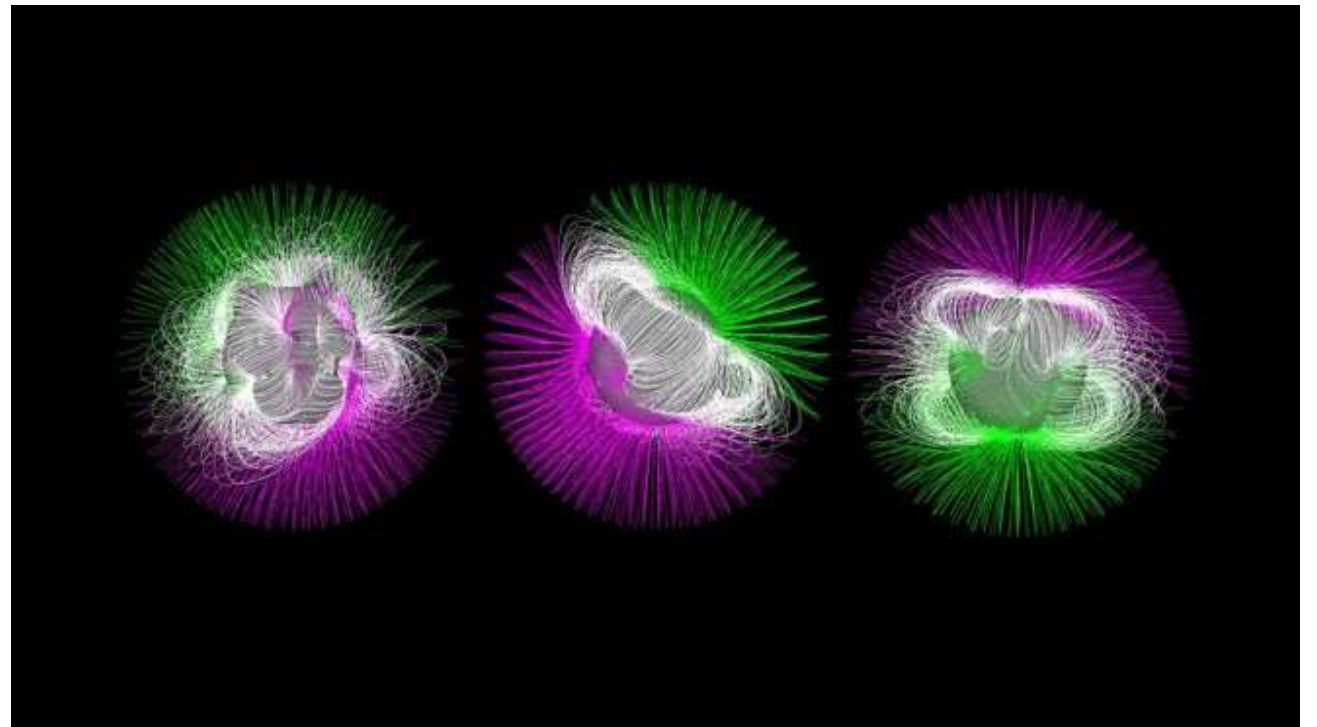
# MAGNEETTIENTÄN JAKSOLLISUUS

- Auringon magneettikentän jakso on 22 vuoden pituinen. Alkupuoliskolla magneettista pohjoista edustavat pilkut sijaitsevat Auringon pohjoisella pallonpuoliskolla ja magneettista etelää edustavat pilkut puolestaan eteläisellä (positiivinen polariteetti). Noin 11 vuoden jälkeen kenttä kääntää napaisuuttaan, ja edellisen pilkkuminimin aikaan Auringon magneettinen etelä olikin pohjoisessa (negatiivinen polariteetti). Kentän napaisuus pysyy siis samana jaksonvaihteen yli ja vaihtuu jakson keskivaiheilla. Kuva: Mordvinov et al. (2016), <https://arxiv.org/abs/1602.02460>.



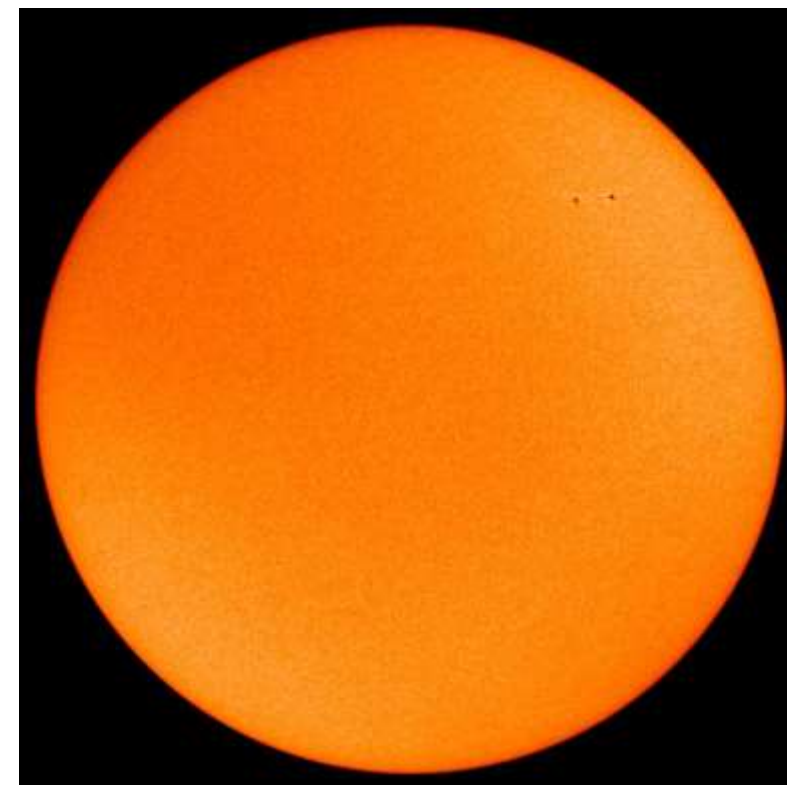
# MAGNEETTIENTÄN KÄÄNTYMINEN

- Kuvassa esitykset Auringon magneettikentästä 1.1.1997, 1.6.2003 ja 1.12.2013. Vihreä edustaa magneettista etelää ja lila magneettista pohjoista (<http://www.thesuntoday.org/solar-facts/suns-magnetic-poles-flipped-solar-max-is-here/>).
- Käännös ei ole äkillinen ja navat eivät välttämättä käänny samaan aikaan. Viimeksi (jakso no. 24) pohjoinen oli etelää edellä.
- Käännöksen lähiaikoina molemmin puolin avaruussään ääri-ilmiöt ovat tavallisempia kuin muulloin. Esimerkiksi 17.3.2013 koko Suomessa nähtiin vaikuttava revontulinäytelmä.



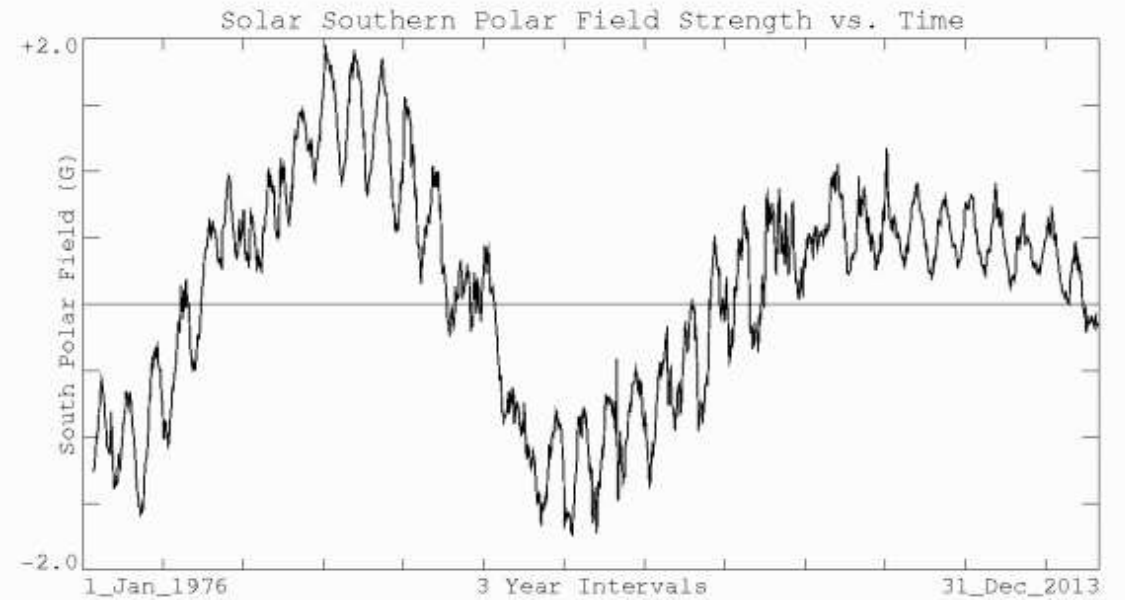
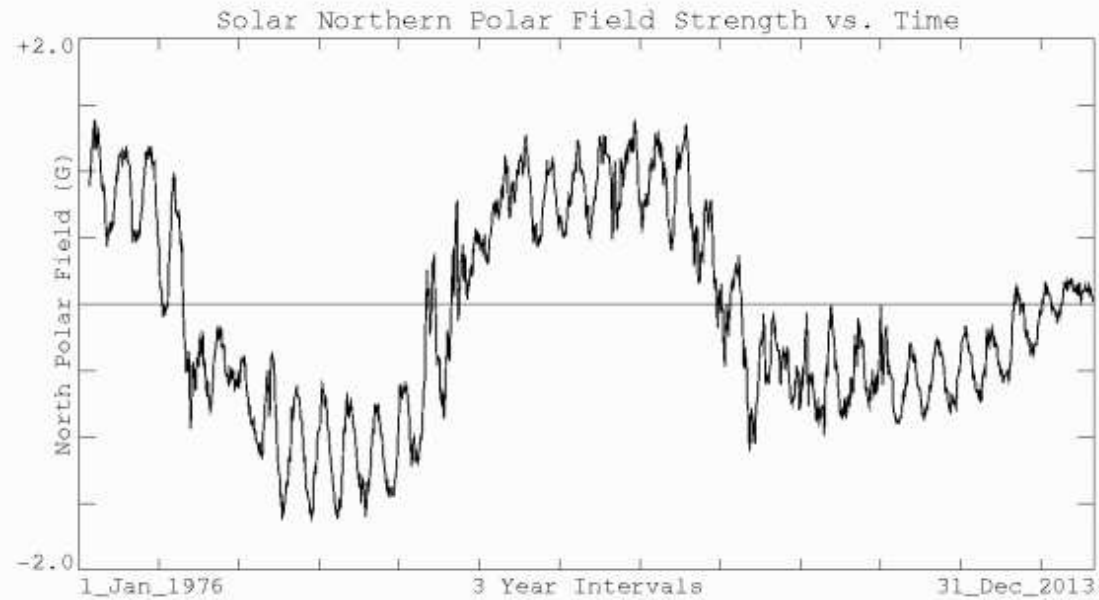
# JAKSON VAIHTUMINEN

- Pilkkujakson vaihtuessa Auringossa on yleensä vain vähän pilkkuja, joskin uuden ja vanhan jakson pilkut esiintyvät usein limittäin. NASA:n SOHO-luotaimen Michelson Doppler Imager –laitteen kuvassa näkyy tilanne edellisen jaksonvaihdoksen (23/24) aikaan 3.11.2008. Kuvan vasemmalla puoliskolla näkyy yksi pieni jakson 23 pilkku matalalla leveysasteella, ja oikealla puoliskolla puolestaan neljä lähekkäistä jakson 24 pilkkua korkealla leveysasteella.
- Jakson vaihtuessa Auringon magneettikenttä on poloidaalinen ja muodoltaan melko yksinkertainen. Differentiaalinen pyöriminen kuitenkin muuttaa kentän nopeasti paljon monimutkaisemmaksi toroidaaliseksi kentäksi. Tutkimalla napojen magneettikentän voimakkuutta jakson vaihtuessa voidaan ehkä jopa ennustaa seuraavan jakson voimakkuutta.



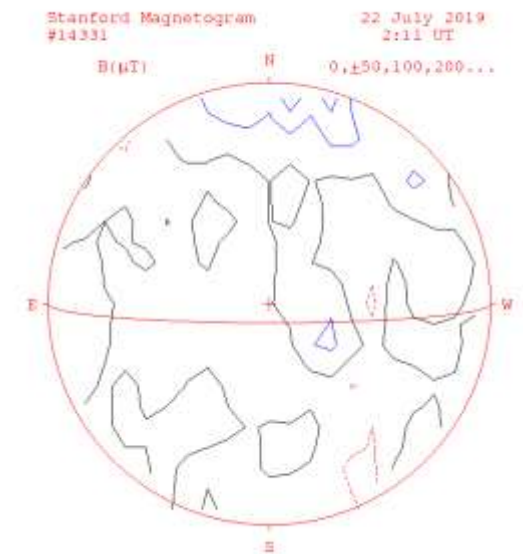
# KENTTÄVOIMAKKUUS POHJOIS- JA ETELÄNAVOILLA

- Stanfordin yliopiston aurinko-observatorion (Wilcox) datasta näkyy Auringon magneettikentän vaihtelu navoilla.



# MISSÄ TÄTÄ HAVAITAAN?

- Wilcox-observatorio (<http://wso.stanford.edu/>) sijaitsee Piilaaksossa. Observatorion sivuilta voi ladata päivittäiset magnetogrammit kuvina, keskimääräiset kenttävoimakkuuden arvot ja paljon muuta dataa. Satelliitit tuottavat arvokasta täydentävää dataa mutta maanpäälliset mittaukset ovat silti edelleen tärkeitä.



# PYÖRIMINEN, AURINGONPILKUT JA JAKSOJEN STATISTIIKKA

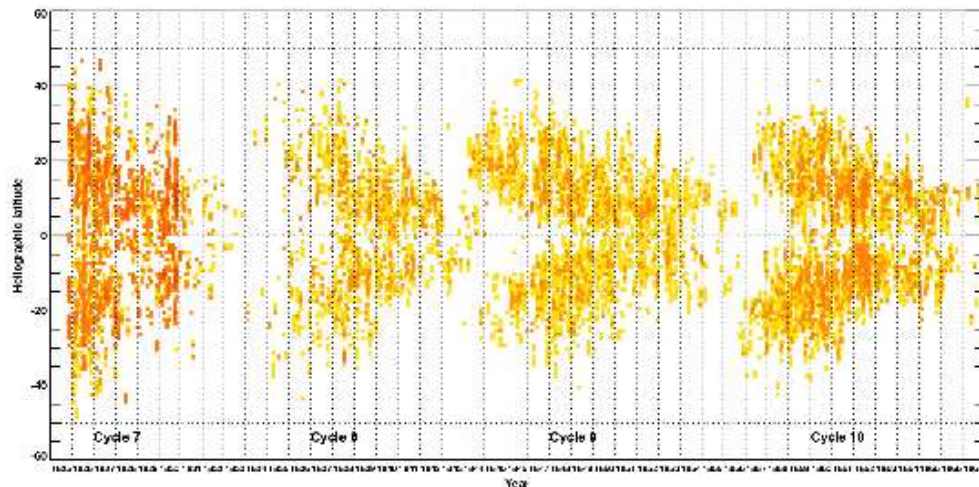
- Auringon pyörähdysaika napojen läheisyydessä on noin 35 päivää ja ekvaattorilla noin 25 päivää. Koska Aurinko koostuu plasmasta (ionisoituneesta kaasusta), plasma liikkuu samalla ja magneettikenttä vääntyy pyörimisen myötä, ks. kuva (<http://www.thesuntoday.org/solar-facts/suns-magnetic-poles-flipped-solar-max-is-here/>).
- Auringonpilkut ovat näkyvin magneettikentän ilmentymä pinnalla. Niiden kohdalla kenttä häiritsee kaasun virtausta ja alue on ympäristöään tummempi.
- Pilkkujen on havaittu jakson aikana sijoittuvan keskimäärin symmetrisesti pallonpuoliskojen suhteen ja siirtyvän korkeilta matalille leveysasteille jakson edetessä. Jaksoissa on paljon vaihtelua.

Jakson numero	Minimin ajankohta (v)	Nousuvaiheen kesto (v)	Maksimimin ajankohta (v)	Amplitudi	Laskuvaiheen kesto (v)	Jakson kesto (v)	Aika edellisestä seuraavaan maksimiin (v)
10	1856	4.2	1860.1	186.2	7.1	11.2	10.5
11	1867.2	3.4	1870.6	234	8.3	11.8	13.3
12	1879	5	1884	124.4	6.2	11.2	10.1
13	1890.2	3.8	1894	146.5	8	11.8	12.1
14	1902	4.1	1906.1	107.1	7.5	11.5	11.5
15	1913.6	4	1917.6	175.7	6	10	10.7
16	1923.6	4.7	1928.3	130.2	5.4	10.1	9
17	1933.7	3.6	1937.3	198.6	6.8	10.4	10.1
18	1944.1	3.2	1947.4	218.7	6.9	10.2	10.8
19	1954.3	3.9	1958.2	285	6.6	10.5	10.7
20	1964.8	4.1	1968.9	156.6	7.3	11.4	11.1
21	1976.2	3.8	1980	232.9	6.7	10.5	9.9
22	1986.7	3.2	1989.9	212.5	7	10.2	12
23	1996.9	5	2001.9	180.3	7.1	12	12.4
24	2009	5.3	2014.3	116.4			

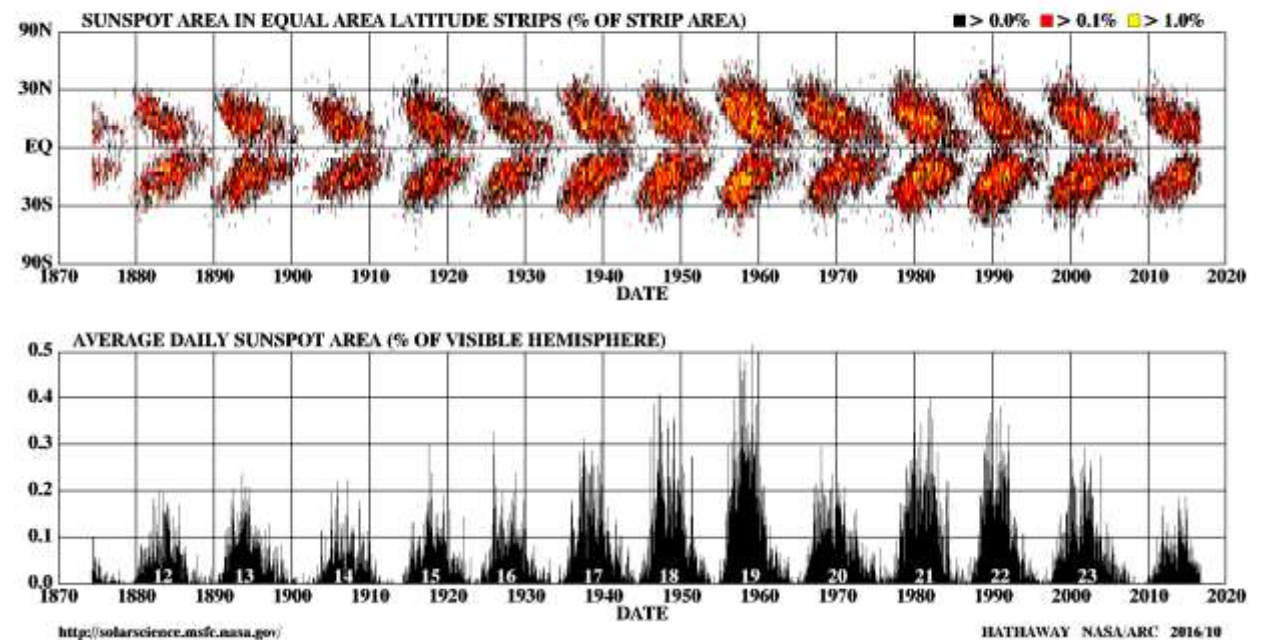


# PERHOSDIAGRAMMI

- Heinrich Schwaben havainnoissa vuosilta 1825-1867 näkyy auringonpilkkujen jakauma ajan ja leveysasteen funktiona ensimmäisen kerran. Myöhemmistä perhosdiagrammeista myös jaksojen aktiivisuusvaihtelu näkyy selvästi.

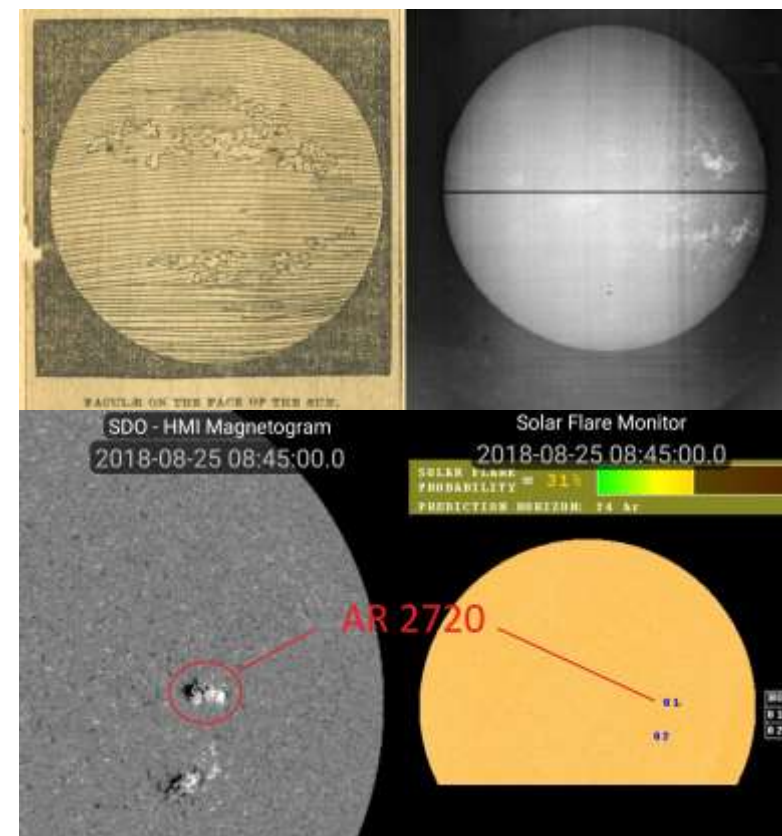


DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



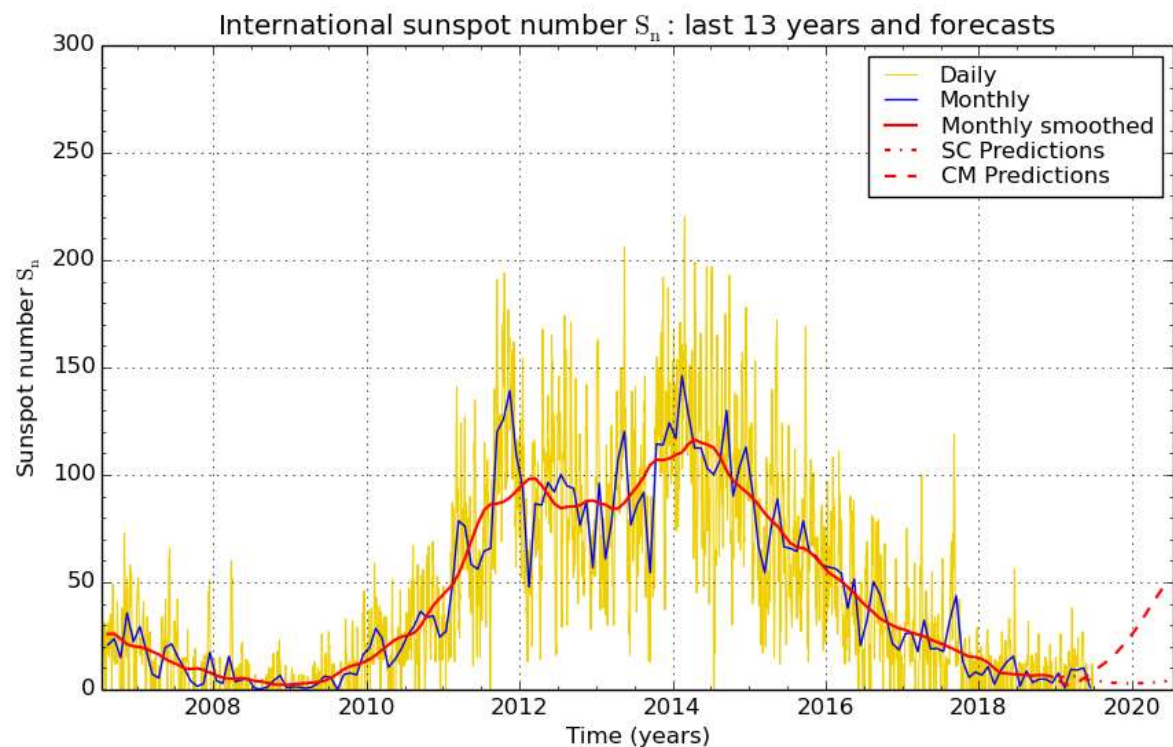
# KOHTI UUTTA PILKKUJAKSOA

- Edellisen minimin aikaan pilkuttomien päivien määrä oli yli kaksi kertaa niin iso kuin keskimäärin aiemmillä jaksoilla. Tämä aiheutui simulaatioiden perusteella luultavasti siitä, että plasma liikkui nopeasti jakson alkupuolella, ja samalla esti laajojen paikallisten magneettikenttien syntymisen, mutta hidastui tuntuvasti ja siten viivästytti seuraavan jakson alkua.
- Jaksojen 23 ja 24 vaihteen ympärillä pilkuttomia päiviä oli vuonna 2008 peräti 268 ja vuonna 2009:kin 260. Vuonna 2017 havaittiin 104 pilkutonta päivää. Vuonna 2018 niitä oli 221 joten vuosien 2008 ja 2009 lukuja ei hätyytelty. Toisaalta pilkuttomat päivät olivat yleisiä vielä vuoden verran sen jälkeenkin kun ensimmäiset jakson 24 pilkut oli havaittu. Tänä vuonna pilkuttomia päiviä on ollut tähän mennessä 132.
- Pilkkujaksojen vaihtuminen näkyy myös spektrissä. George E. Hale käytti tätä aikanaan piirroshavaintojensa ja valokuviansa (ks. ylempi kuva) tukena. Nykyisin apuna ovat magnetogrammit (ks. alempi kuva), joista voidaan nähdä myös pilkkuryhmien sisäinen napaisuuden vaihtelu.



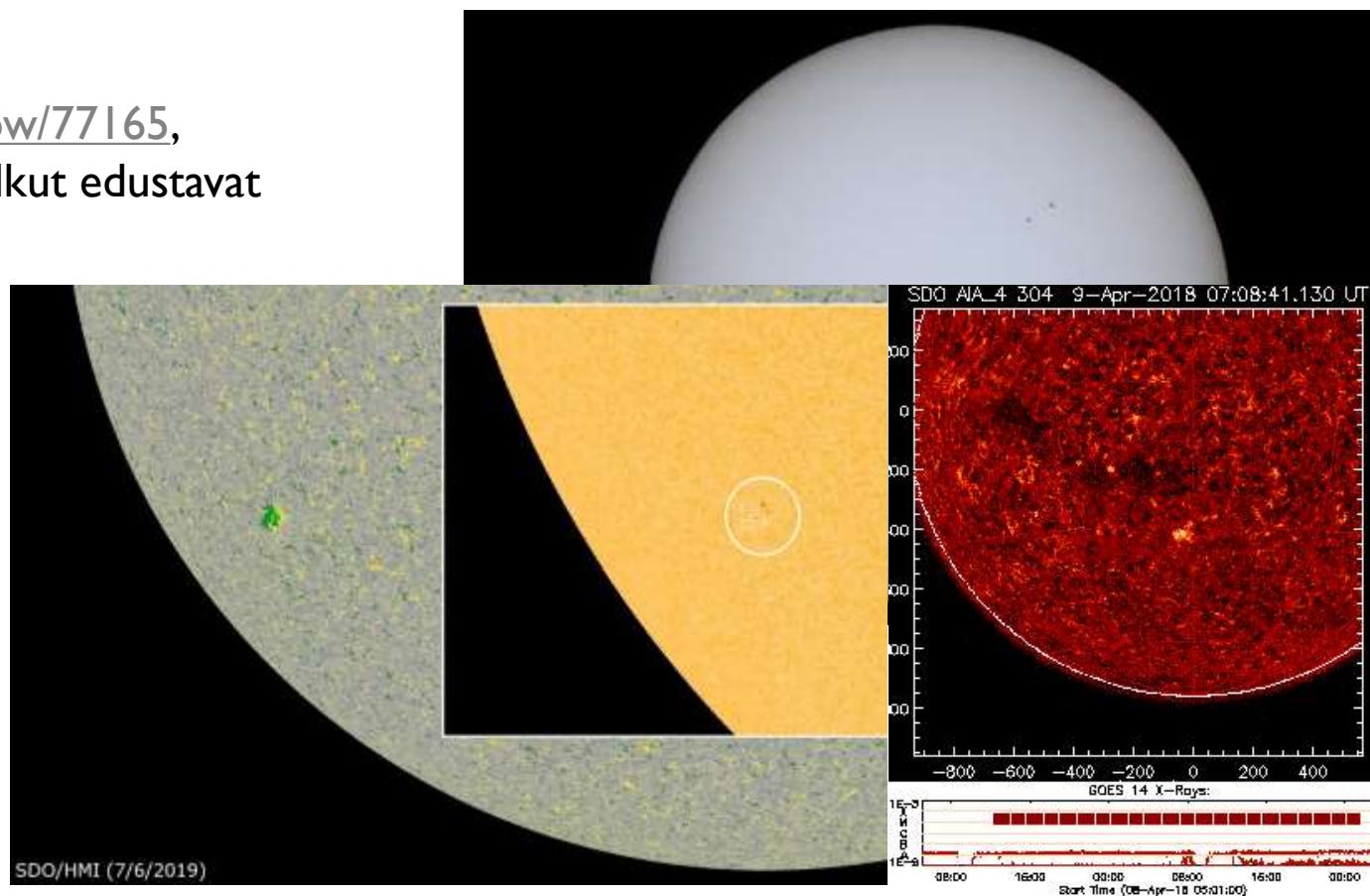
# ALAS ON VAJOTTU

- Auringonpilkkuluvut lasketaan Rudolf Wolfin kaavasta  $R = k(10g + s)$  ( $g$  = pilkkuryhmien määrä,  $s$  = yksittäisten pilkkujen määrä ja  $k$  = havaittajakohtainen korjauskerroin)
- Luvut vaihtelevat päivätasolla paljon, ja jopa kuukausikeskiarvojen käyttö tuottaa sahalaitaisen käyrän. Yksittäinen piikki ei todellisuudessa kerro pilkkumaksimista paljoakaan.
- Eri jaksojen välisissä vertailuissa käytetäänkin yleensä yleensä 12 kk:n liukuvaa keskiarvoa. Se on myös kuvassa olevien ennusteiden pohjalla.
- Ks. lisää: <http://sidc.be/silso/dayssnplot>



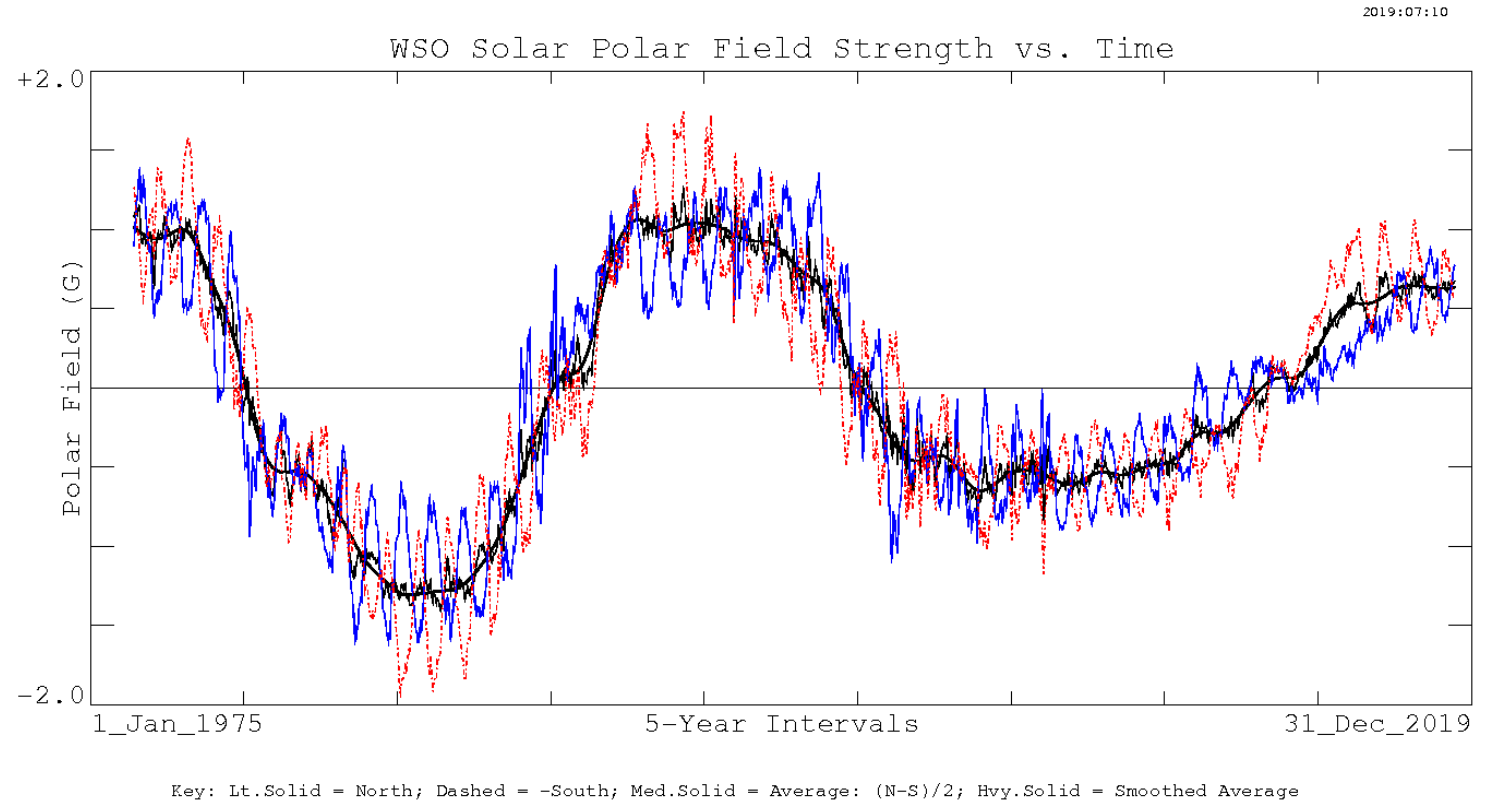
# JAKSON 25 PILKUT KUVISSA

- Marko Myllyniemen kuvassa (<https://www.taivaanvahti.fi/observations/show/77165>, ylhäällä) näkyvät korkeiden leveysasteiden pilkut edustavat aktiivista aluetta AR2720.
- Toisaalta jo 9.4.2018 GOES-satelliitti havaitsi pilkkuryhmän (alaoikealla), joka myös tuotti roihupurkauksen.
- Nyt näkyvä AR2745 edustaa jaksoa 24. Alueen AR2744 pilkkuja näkyi aiemmin tänä kesänä (alavasemmalla) mutta ne katosivat.
- Uuden ja vanhan jakson pilkkuryhmien samanaikainen olemassaolo on tyypillistä jopa parin vuoden ajan pilkkujakson vaihdoksen ympärillä.



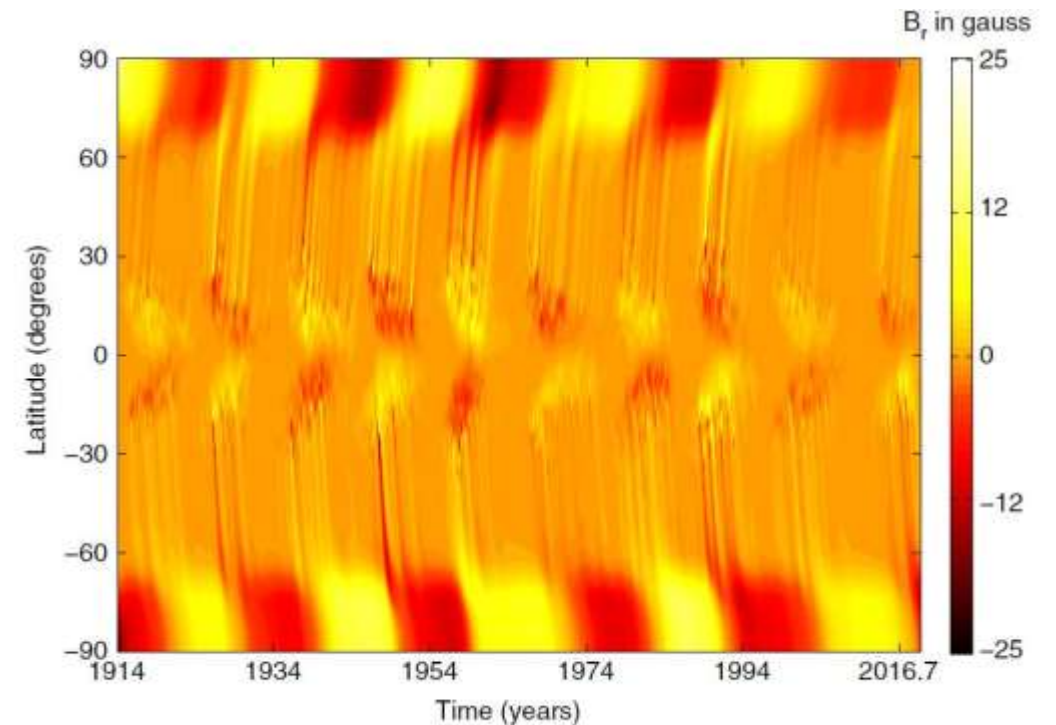
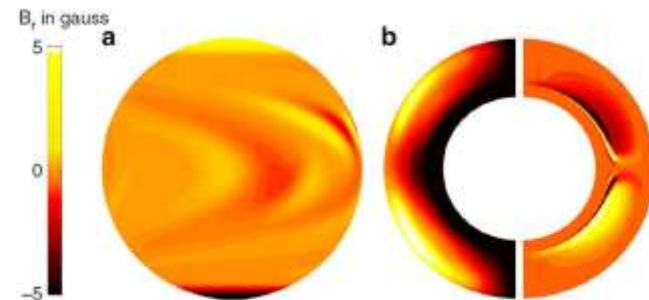
# KENTTÄVOIMAKKUUS ERI PALLONPUOLISKOILLA

- Uuden pilkkujakson alussa Auringon kummankin pallonpuoliskon magneettikenttä saavuttaa ensin maksiminsa ja alkaa sitten laskea, kun pohjoinen ja eteläinen kenttä sulautuvat toisiinsa. Kuvassa punaisella käyrällä osoitetun pohjoisen pallonpuoliskon kenttä on jo alkanut laskea, mutta sinisellä käyrällä osoitetun eteläisen pallonpuoliskon kenttä on vasta saavuttanut maksiminsa. Musta käyrä osoittaa keskiarvoa. Vielä vuonna 2018 jakson 25 pilkku syntyi pohjoiseen mutta vuonna 2019 ensimmäistä kertaa etelään.



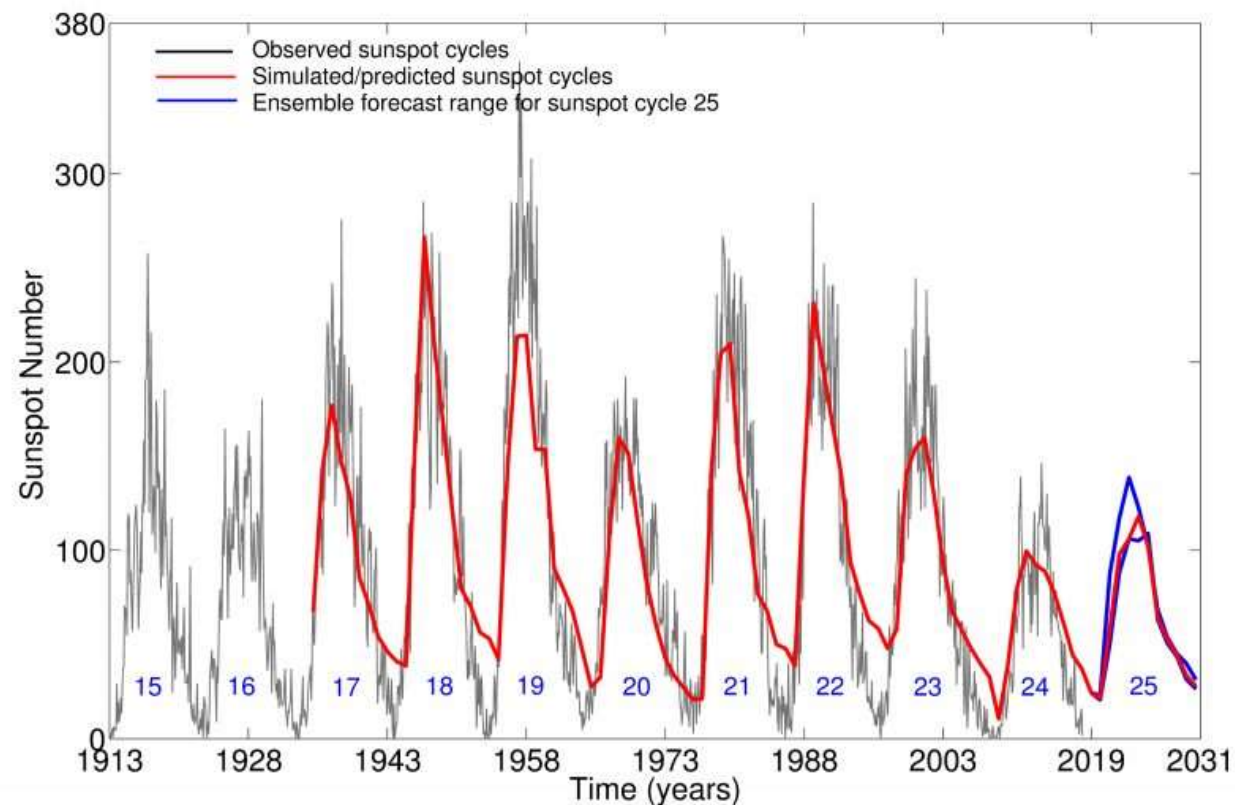
# SIMULAATIOT

- Bhowmik ja Nandy käyttivät 6.12.2018 ilmestyneessä tutkimuksessa magneettikentämalleja pilkkujaksojen simulointiin (<https://doi.org/10.1038/s41467-018-07690-0DO>). He mallinsivat perhosdiagrammit (kuva oikealla).
- He simuloivat nykyisen pilkkuminimin aikaista kenttää (a) sekä Auringon konvektiivisessa vyöhykkeessä vallitsevaa seuraavan maksimin poloidaalista kenttää (b, vasemmalla) ja toroidaalista kenttää (b, oikealla).



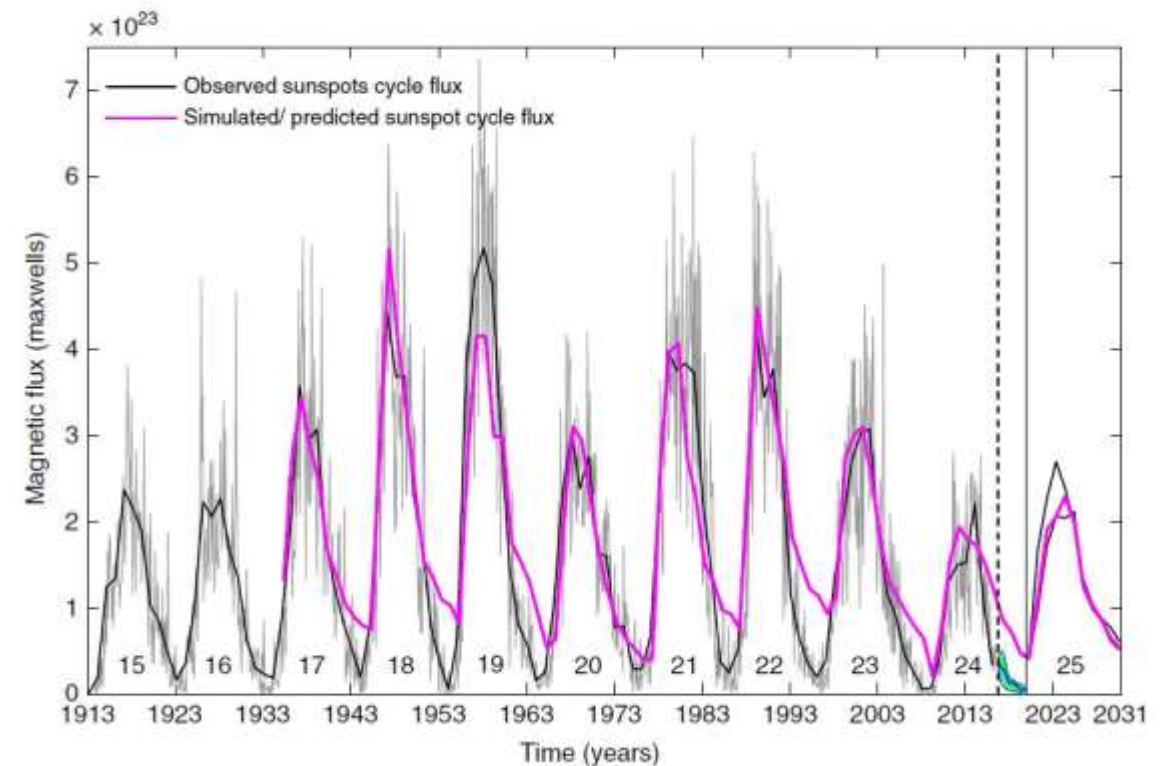
# VOIDAANKO JAKSON VOIMAKKUUTTA ENNUSTAA?

- Bhowmikin ja Nandyn mukaan poloidaalisen kentän magneettivuo edellisen jakson vaihtuessa voi ennustaa seuraavan jakson voimakkuutta (Pearsonin lineaarinen korrelaatiokerroin  $R^2 = 0.84$ )
- Simuloidut ja todelliset jaksovoimakkuudet vastasivat hyvin toisiaan ( $R^2 = 0.87$ ) ja niin myös maksimien ajankohdat, vaikka ajankohtia ei tietoisesti pyritty sovittamaan havaintodataan
- Jaksoilla 17-24 pilkkuluvussa poikkeama ennusteesta oli jakson 19 maksimin kohdalla suurin, joskin yleisesti isoimmat poikkeamat olivat minimien kohdalla. Jyrkkien laskujen ennustamisessa on ilmeisestikin vielä parannettavaa.



# ENTÄPÄ SITTEEN JAKSOMAKSIMIN 25 NUMEERINEN ENNUSTE?

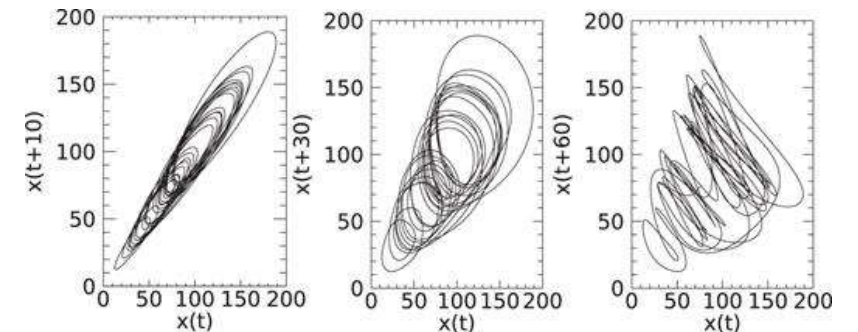
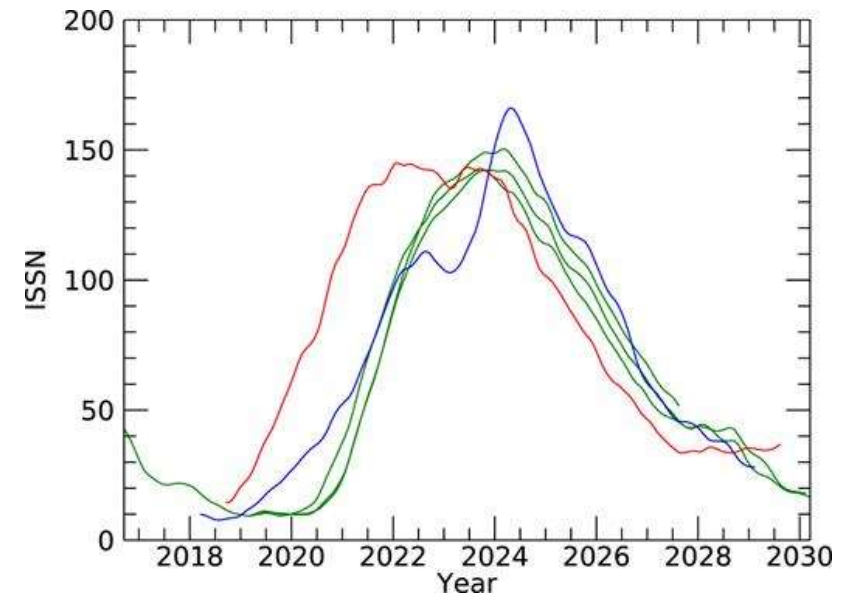
- Magneettivuo  $2.29 \times 10^{23}$  maxwelliä (vaihteluväli  $2.11-2.69 \times 10^{23}$ ), tällä on yhteys pilkkulukuun
- Pilkkuluku 118 (vaihteluväli 109-139)
- Maksimivuosi 2024 (vaihteluväli 2023-2025), tässä on huomioitu epävarmuus minimin 24/25 ajankohdasta
- Kuvassa vihreä kohta nykyhetken ympärillä osoittaa havaittuun dataan sovitettujen malliprofiilien vaihtelua
- Jakso 25 on mahdollisesti hieman edellistä voimakkaampi ja tämä on vastoin spekulatioita uudesta Maunderin minimin kaltaisesta jaksosta – myös hypoteesit ilmaston viilenemisestä eivät näytä todennäköisiltä





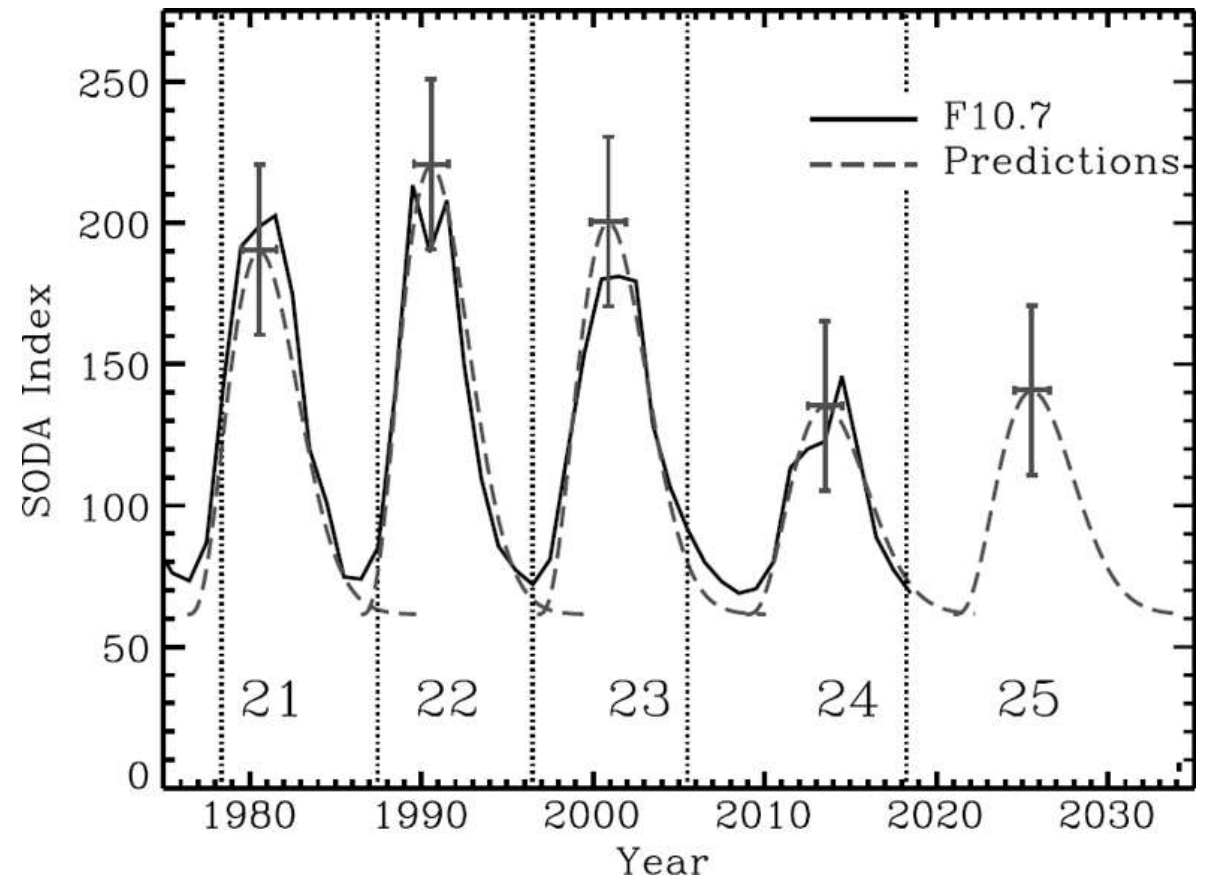
# MUISTA TUTKIMUKSISTA LISÄVAHVISTUSTA?

- Sarp et al. (2018, <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2470>) ennustivat maksimin ajankohdaksi vuositasolla  $2023 \pm 1.1$  ja pilkkuluvuksi  $154 \pm 12$ . Maksimi on tässä aikaisempi ja voimakkaampi kuin Bhowmikin ja Nandyn ennusteessa. Käytössä oli auringonpilkkudata heinäkuusta 1749 tammikuuhun 2018 saakka. Mallinnus oli tilastollista ja ei juuri puuttunut Auringon fysikaalisiin ominaisuuksiin. Kuvissa näkyy pilkkuennusteiden lisäksi aikaviivemalleja, joilla pilkkujen käyttäytymistä simuloitiin.
- Li et al. (2018, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.014>) arvioivat seuraavan maksimin ajankohdaksi lokakuun 2024 ja pilkkuluvuksi  $168.5 \pm 16.3$ . Myös heidän tutkimuksensa oli tilastollinen ja käsitteli mm. edellisen ja seuraavan pilkkujakson kestoja ja pilkkulukua sekä nousevien ja laskevien vaiheiden pituuksia
- Pesnellin ja Schattenin (2018, <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1330-5>) vastaavat luvut ovat  $2025.2 \pm 1.5$  ja  $135 \pm 25$



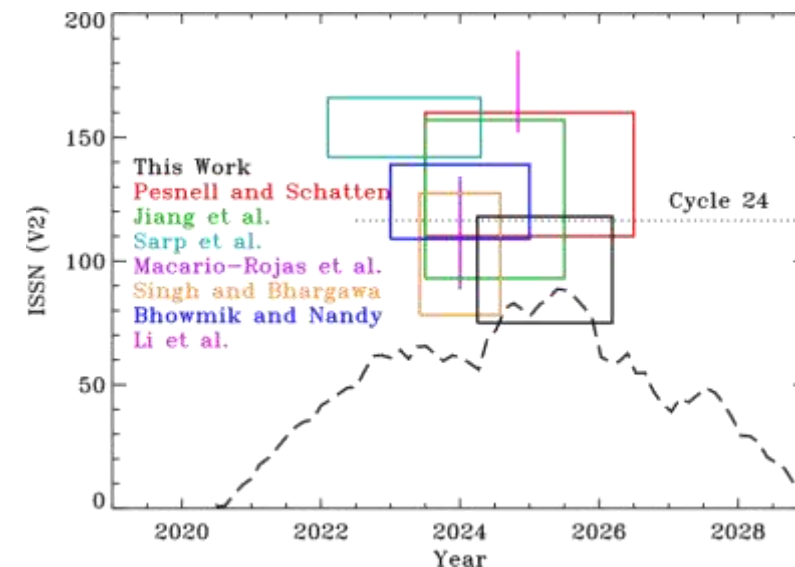
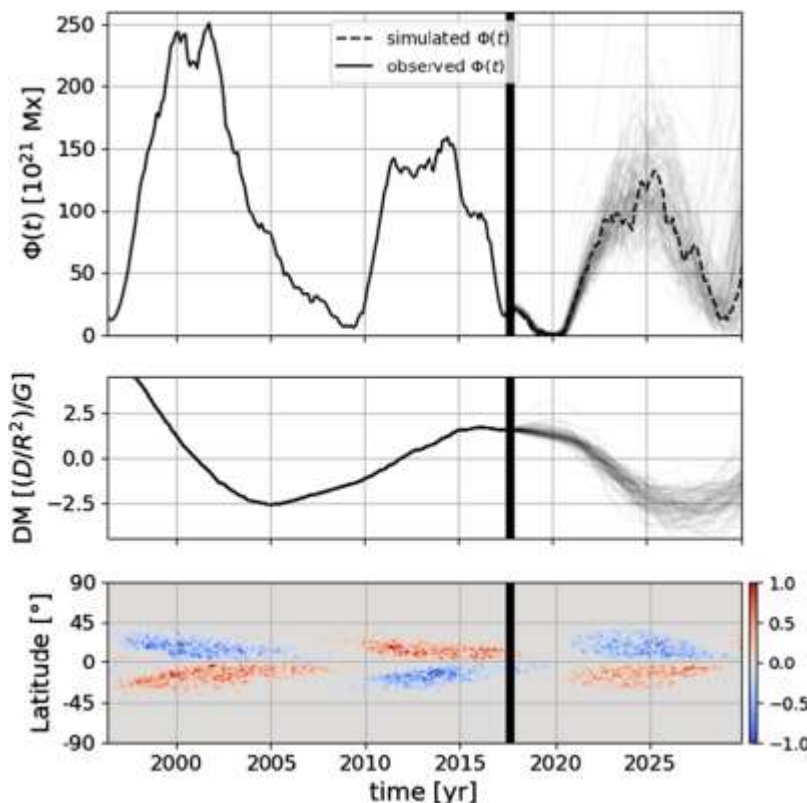
# PILKKULUVUN NOUSUN JA LASKUN VÄLINEN YHTEYS?

- Kuvassa Pesnellin ja Schattenin (2018) käyrät, joissa ei esitetä auringonpilkkulukua vaan Auringon säteilyvoimakkuutta 10.7 cm:n aallonpituuskaistalla (SODA Index, Solar irradiance index). Yhtenäinen viiva esittää havaintojen vuosikeskiarvoja ja katkoviiva ennusteita. Pystyviivat esittävät ajanhetkiä, joihin mennessä kertyneen datan perusteella on seuraavan jakson ennuste tehty.
- Mahdollinen nopea pilkkuluvun nousu ennustaa hidasta laskua, ja päinvastoin. Jakson mahdollista kaksihuippuisuutta on kuitenkin vaikea ennustaa.
- Vaikka mallien kesken on paljon hajontaa, luultavinta on, että jakso 25 sijoittuu voimakkuudeltaan jaksojen 24 ja 23 väliin. Ei siis kannata ainakaan menettää toivoa revontulien suhteen!



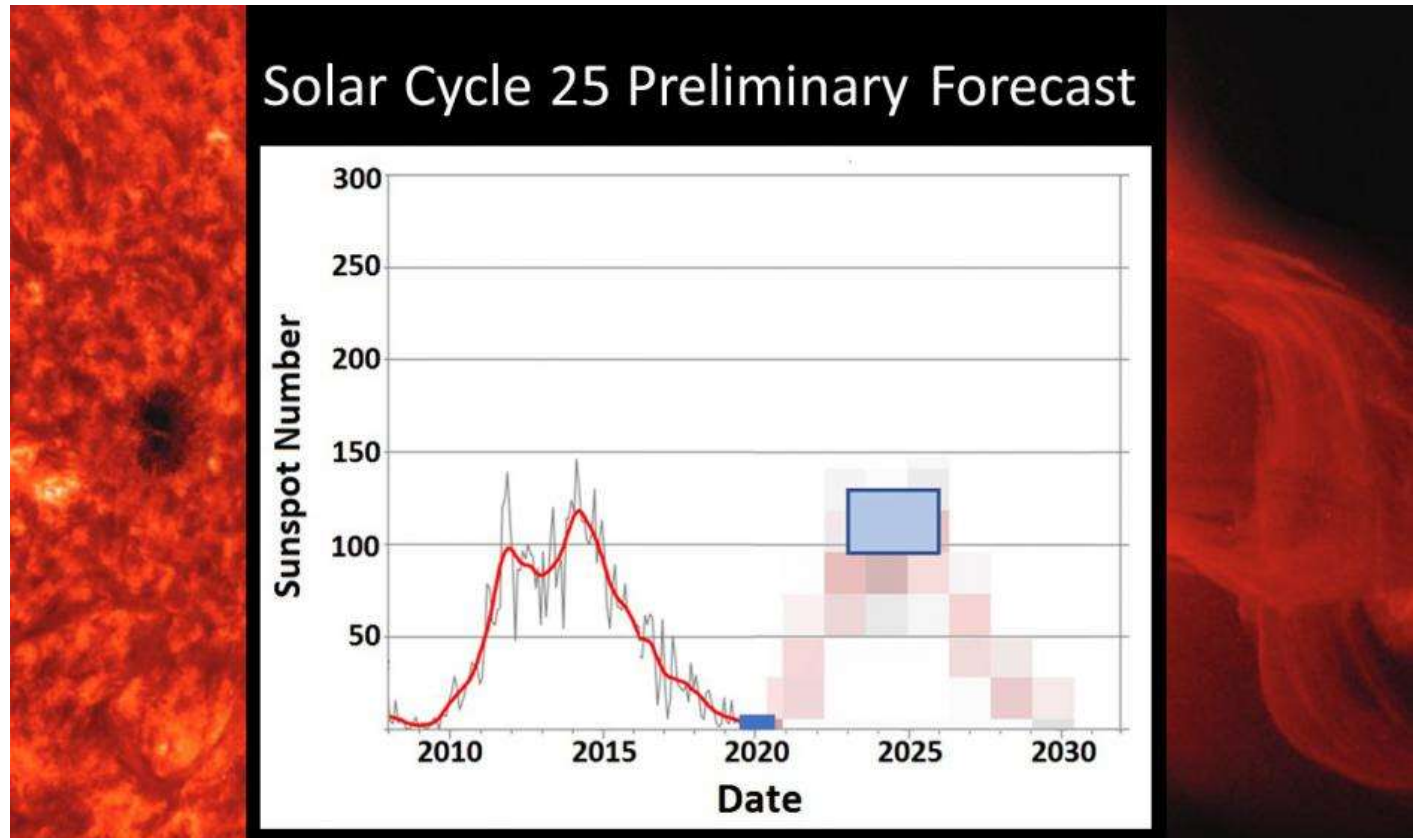
# PESSIMISTI EI PETY?

- Labonville et al. (2019) päätyivät hyvin pieneen arvioon pilkkuluvusta ( $89 +29/-14$ ) seuraavan maksimin aikaan. Tämä asettuu noin 20 % jakson 24 maksimilukeman alle. Maksimin ajankohta asettuu vuodelle . He ennustivat jakson pituudeksi vain  $10.0 \pm 0.7$  v. Pohjoisen pallonpuoliskon pilkkuluvun he ennustivat olevan suurempi kuin eteläisen. He käyttivät tutkimuksessa jaksojen 24 ja 23 vaihdoksen simulointia ja toteutunutta magneettivuon jakaumaa.



# NOAA:N JA NASA:N ENNUSTE

- NOAA:n ja NASA:n johtama kv. paneeli julkaisi 5.4.2019 alustavan ennusteensa jaksosta 25. Ennusteen mukaan pilkkumaksimi toteutuu vuosina 2023-2026 ja pilkkuluvun kk-keskiarvo on maksimin aikaan 95-130. Jakso 24 päättyy heinäkuun 2019 ja syyskuun 2020 välillä. Tavoitteena on saada tarkempi ennuste viimeistään loppuvuonna 2019.
- Vaikka luultavasti jäädäänkin pilkkuluvussa alle keskimääräisten pilkkumaksimia edustavien arvojen 140-220, koronan massapurkauksia ja muita äärimmäisiä avaruussäilymiöitä voi silti tapahtua. Kannattaa seurata revontuliennusteita!



# KIITOS! KYSYMYKSIÄ?

Yhteystiedot:

Toni Veikkolainen

Helsingin yliopisto,  
Seismologian instituutti

PL 68

00014 Helsingin yliopisto

toni.veikkolainen@gmail.com

