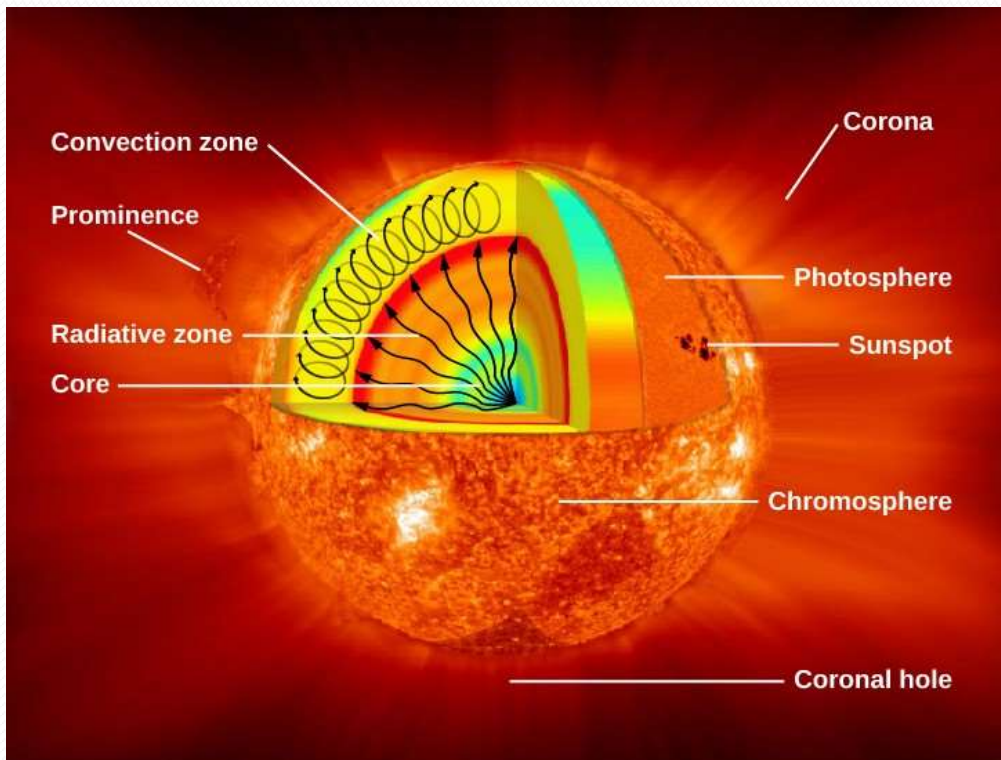


Aurinkomyrskyt

Kari A. Kuure

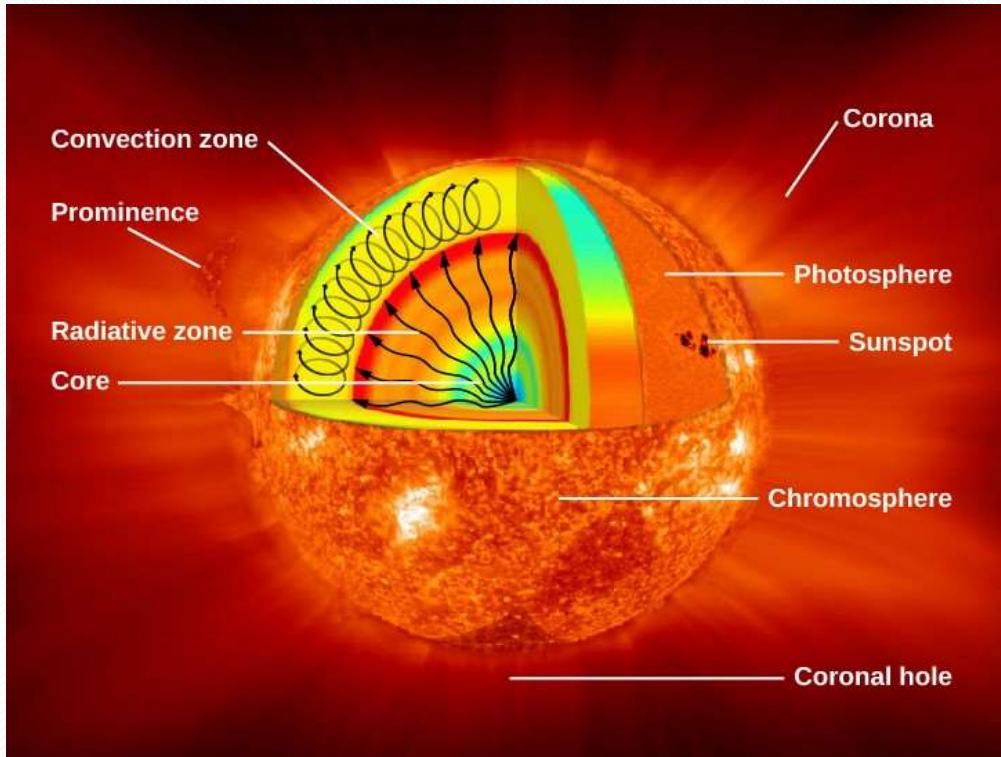
13.2.2022

Auringon rakenne



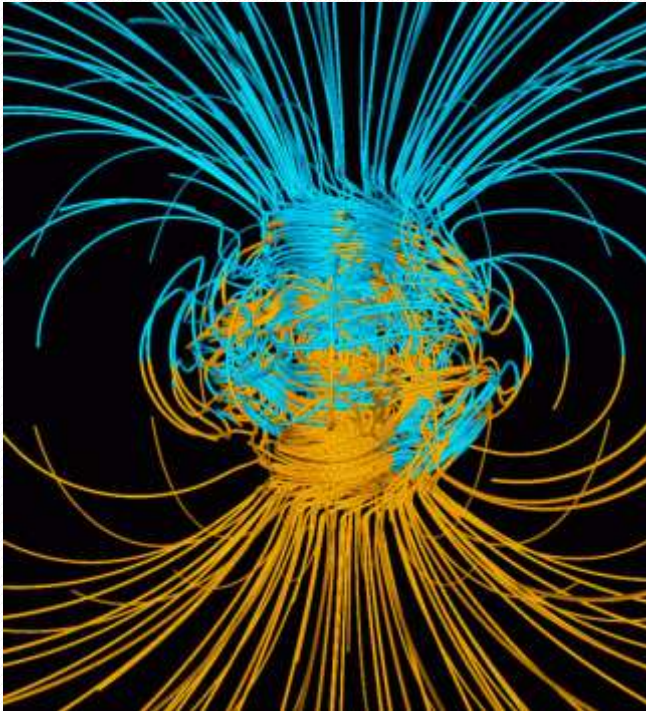
- Rakenne on monikerroksinen:
 - Ydin, jossa tapahtuu energiantuotanto
 - Säteilyvyöhyke, jossa energia siirtyy pintaa kohti sähkömagneettisena säteilynä
 - Takokliini
 - Säteilyn- ja konvektiovyöhykkeen raja, jossa syntyy Auringon magneettikenttä
 - Konvektiovyöhyke, jossa energia siirtyy aineen virtauksen mukana

Auringon rakenne



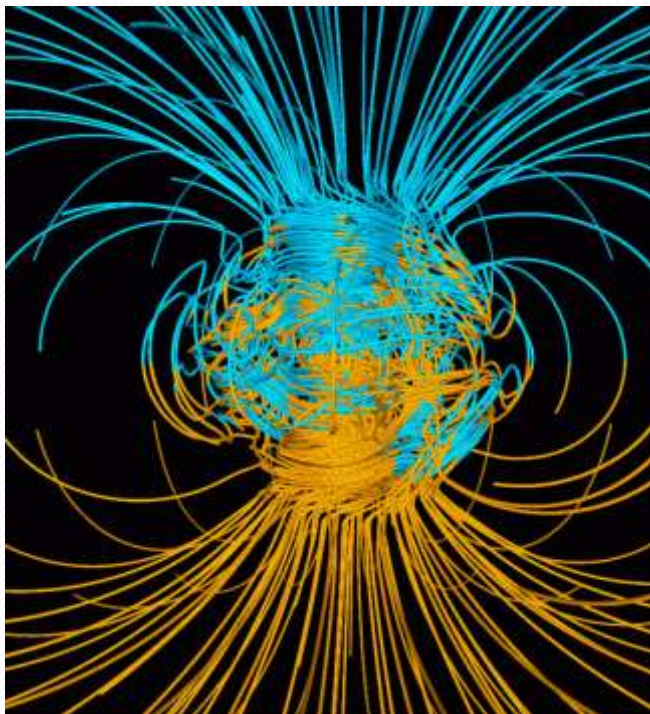
- Fotosfääri, jossa suurin osa energiasta säteilee valona ja lämpöä avaruuteen
- Kromosfääri, jossa syntyvät prominenssit eli protuberanssit sekä flare- ja koronamassapurkaukset (CME)
- Siirtymäkerros, jossa lämpötila kohoaa 10 000 K noin 1 000 000 K
- Korona, hyvin kuuma plasmakehä

Auringon rakenne



- Magneettikenttä
 - On periaatteessa dipolikenttä
 - Sen suunta vaihtuu noin 11 vuoden välein
 - Vaihtumisen aikaan kenttä on useampinapainen ja hyvin sekava

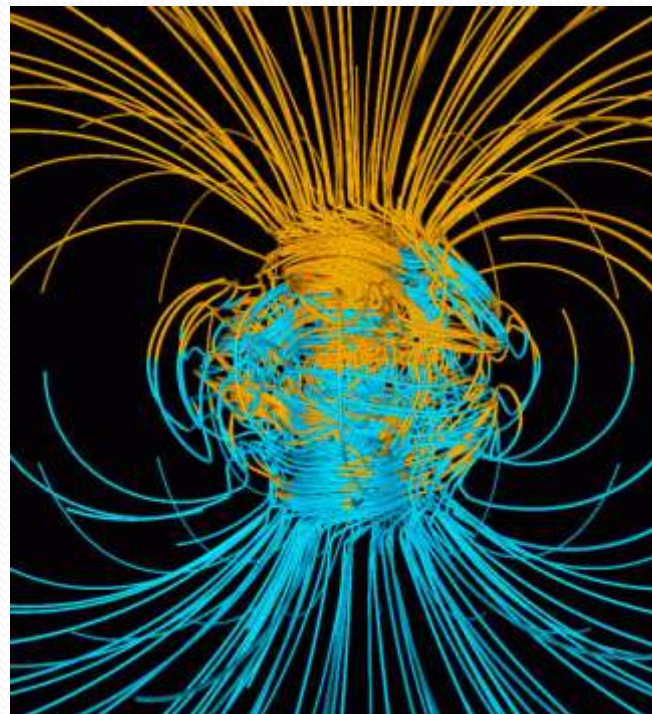
Auringon rakenne



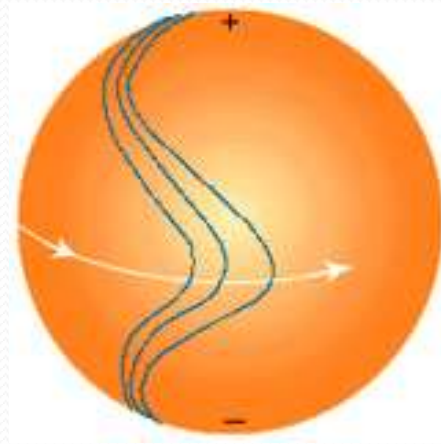
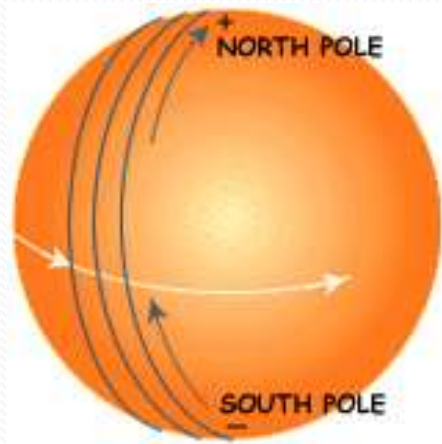
11 vuotta



11 vuotta

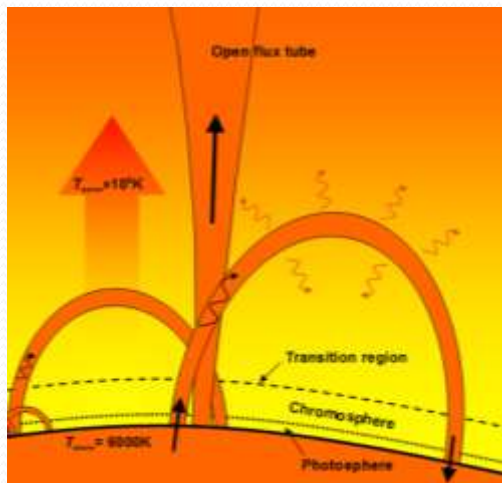
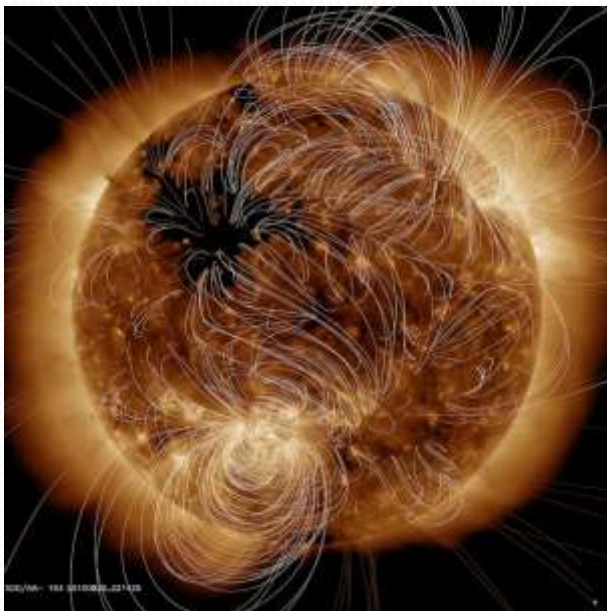


Magneettikenttä Auringon pinnan läheisyydessä



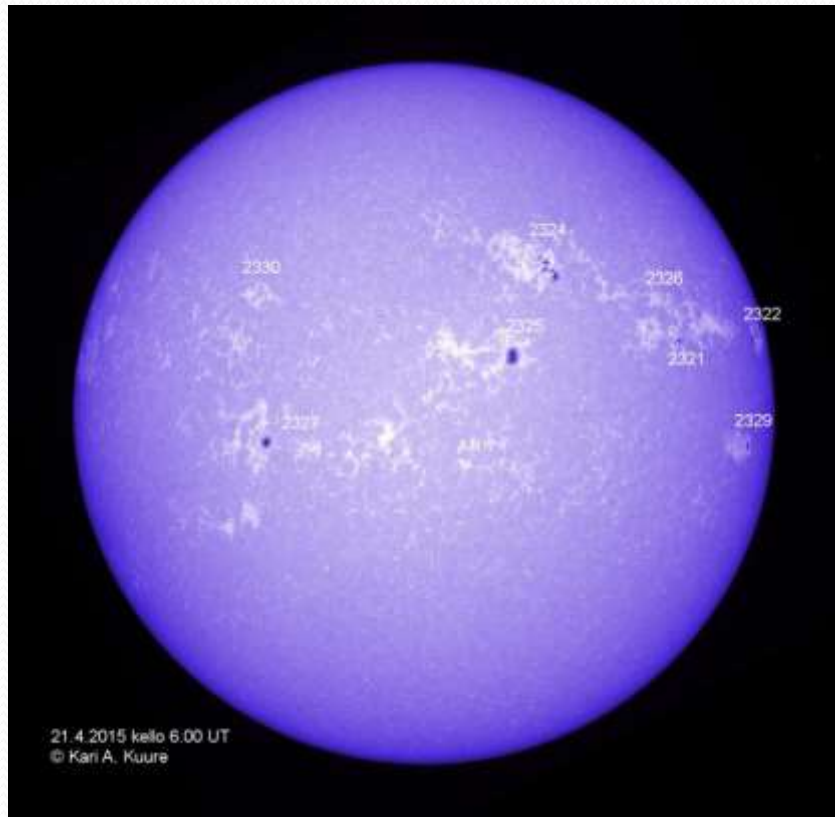
Differentiaalinen rotaatio

Magneettikenttä Auringon pinnalla



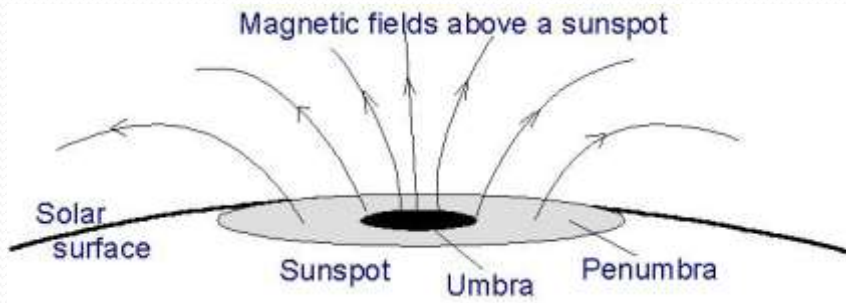
- Auringon pinnan (=fotosfäärin) läpi magneettikenttä muodostaa silmukoita ja avoimia kenttiä
- Silmukoita on sitä runsaammin, mitä aktiivisempi Aurinko on
- Silmukoiden läpäisykohtiin syntyy voimakkaita magneettikenttiä ja ne näkyvät hyvin aktiivisina alueina

Magneettikenttä Auringon pinnalla



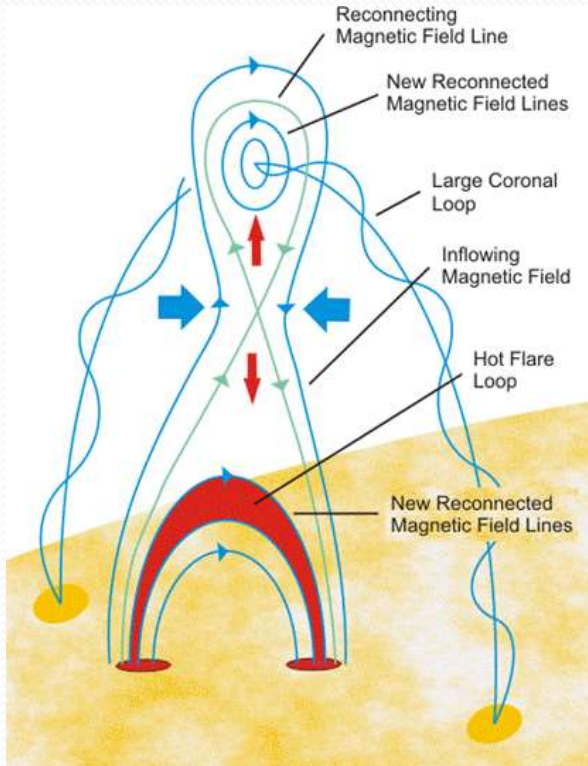
- Aktiiviset alueet näkyvä erityisen selkeästi uv-säteilyn aallonpituudella
- Aktiivisille alueille syntyy auringonpilkkuja
- Pilkkuja on sitä runsaammin mitä aktiivisempi Aurinko on

Magneettikenttä Auringon pinnalla



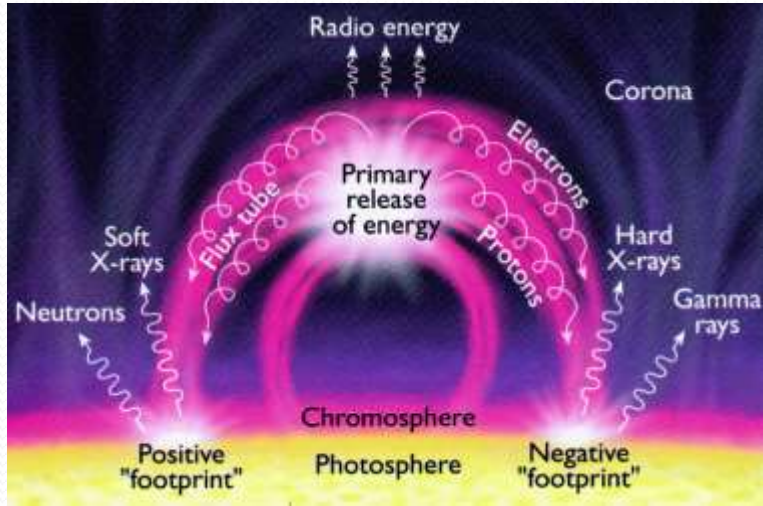
- Auringonpilkun keskellä (umbra) magneettikentän tiheys on suurin
- Pilkun reunoilla (penumbra) magneettikentän tiheys on vähäisempi kuin keskellä, mutta suurempi kuin muualla Auringon pinnalla
- Umbran lämpötila on noin 1000 K viileämpi kuin ympäristö

Magneettikenttä Auringon pinnalla



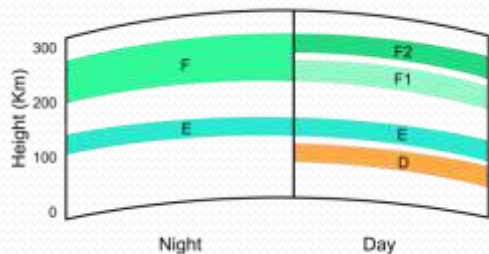
- Magneettisen silmukan noustessa korkealle kromosfäärin yläpuolelle se usein kiertyy ja sen seurauksena tapahtuu uudelleen kytkentä.
- Uudelleen kytkentä vapauttaa suuren määrän energiaa, joka kuumentaa ympäristöään jopa kymmeneen miljooniin asteisiin
- Syntyy flarepurkaus (roihupurkaus)

Magneettikenttä Auringon pinnalla



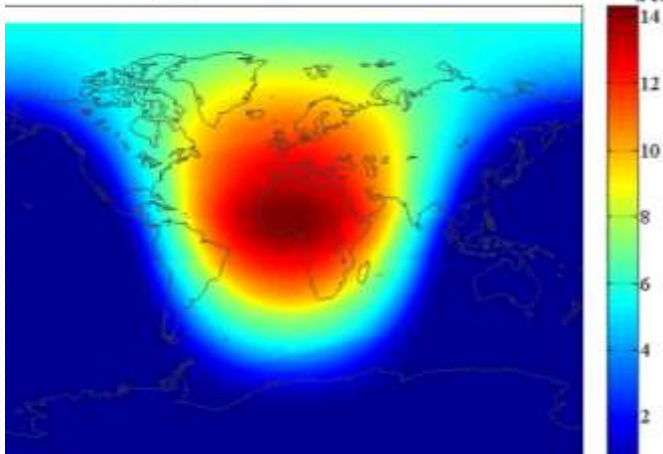
- Flarepurkauksen kesto on enimmillään noin 20 minuuttia, voimakkaimmat voivat kestää jopa 1,5 h
- Flarepurkauksissa vapautuu energiaa sähkömagneettisena säteilyinä
- Lisäksi plasman varatut hiukkaset kiihtyvät suureen nopeuteen ($\sim \frac{1}{2} c$)
- Syntyy protonimyrsky (SPE)
- Osa protoneista sinkoutuu avaruuteen
- Nopeat protonit saavuttavat maapallon noin 20 minuutissa (=Auringon aiheuttama kosminen säteily)
- Röntgensäteilyllä on valonnopeus
 - Ionosfäärissä tapahtuvat häiriöt alkavat samaan aikaan, kun flarepurkauksen nähdään tapahtuvan

Flarepurkauksen vaikutukset maapallolla



Electron Density (N_p) at $h = 100$ km at 17-Jul-2012 12:00:00 UTC

N_p in $\text{m}^{-3} \times 10^{10}$



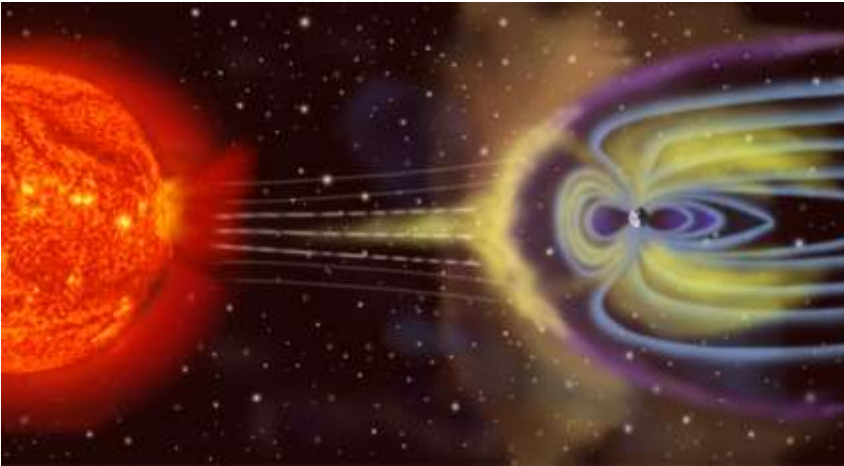
- Maapallon ionosfääriin syntyy häiriötila
 - Syntyy ylimääräistä ionisaatiota erityisesti magneettisille napa-alueille
 - Pääosa protonien tuomasta energiasta vapautuu noin 50–80 km korkeudella, jossa enimmät törmäykset ilmakehän atomeihin ja molekyyleihin tapahtuvat (Polar Cap Absorption events, PCAs)
- Häiriötilan aikana syntyy voimakkaita radiohäiriöitä tai jopa VHF-yhteyksissä yhteyskatkoja
- Häiriöitä sähköverkkoihin
- Maata kiertävät satelliitit saattavat vaurioitua
- Satelliittipaikannus häiriintyy tai jopa estyy
- Ilmastolliset muutokset
- Jne.

Magneettikenttä Auringon pinnalla



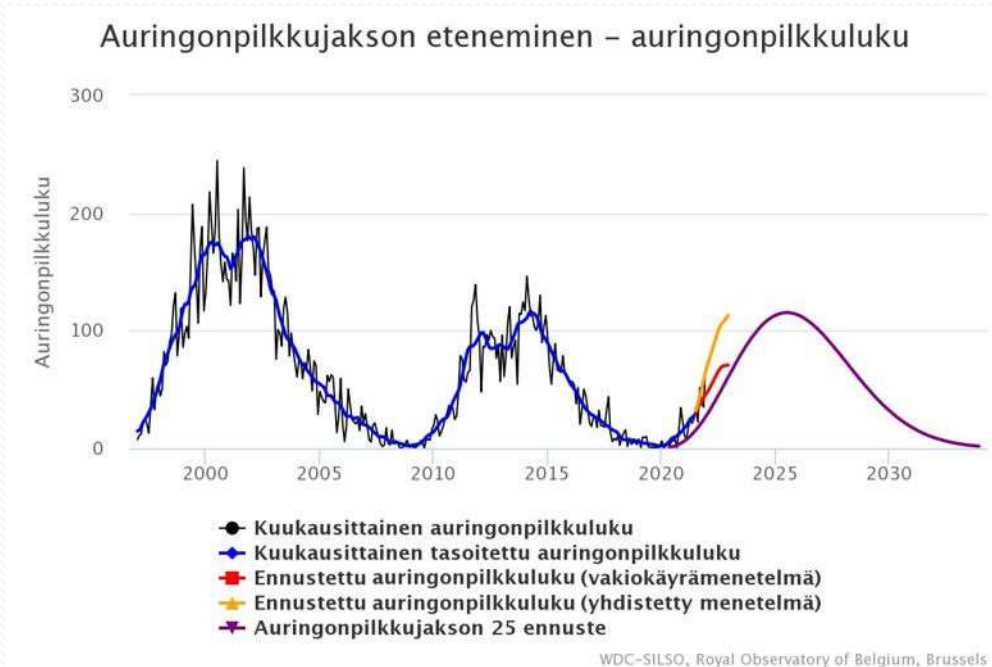
- Usein flarepurkausten yhteydessä syntyy myös koronamassapurkaus (CME)
- CME:ssä sinkoutuu plasmaa avaruuteen useita kymmeniä miljardeja tonneja
- Avaruudessa CME-pilvi laajenee ja se voi törmätä maapallon magneettikenttään

CME-pilven vaikutukset maapallolla



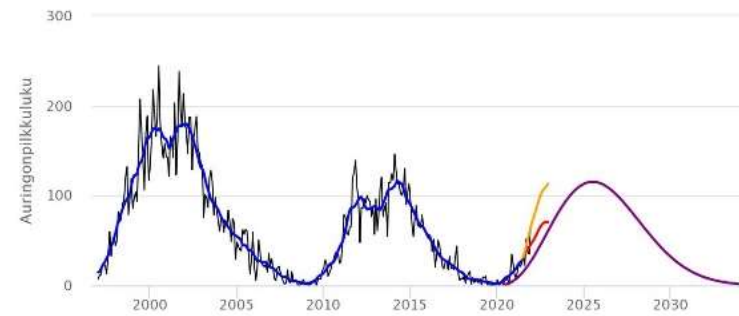
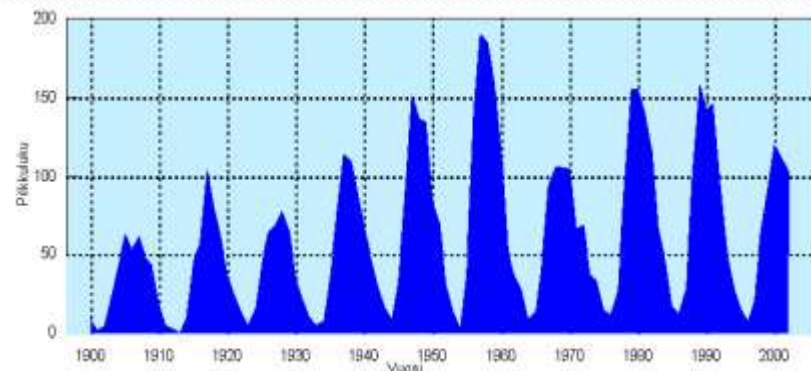
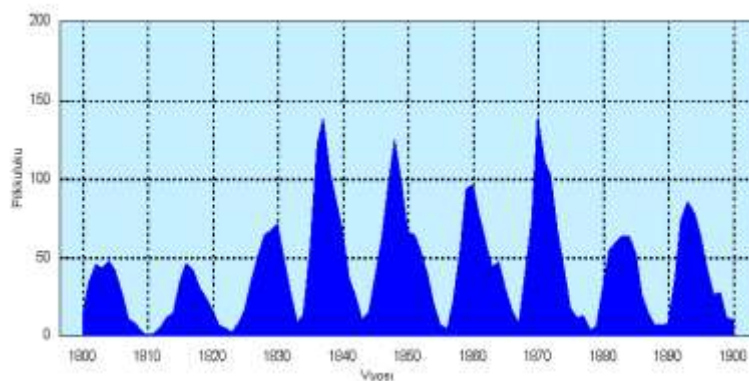
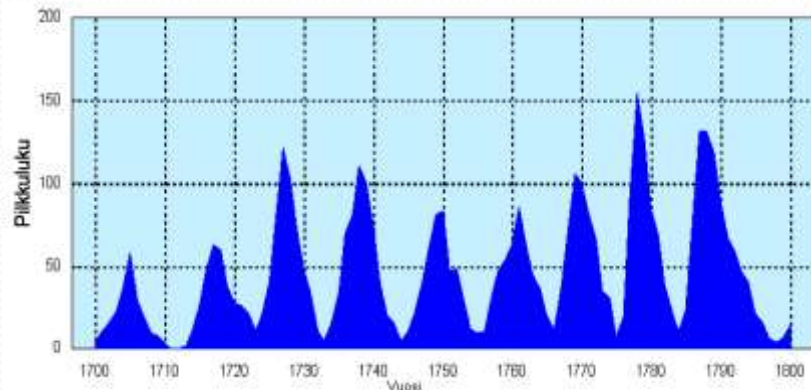
- Törmäyksestä syntyy geomagneettinen myrsky, joka näkyy
 - Magneettisina häiriönä
 - Revontulina
 - Sähköverkon häiriöinä
 - Metalliputkistojen (kaasu- ja öljy) korroosiona

Auringon aktiivisuus

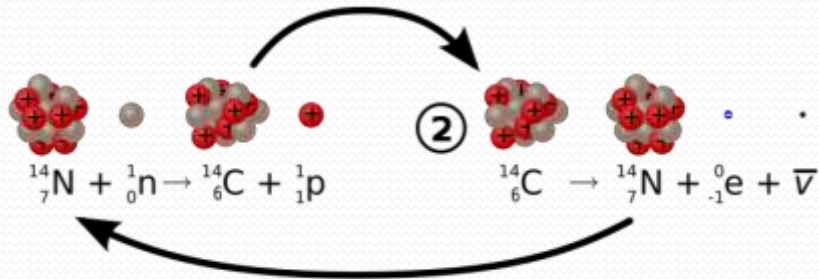
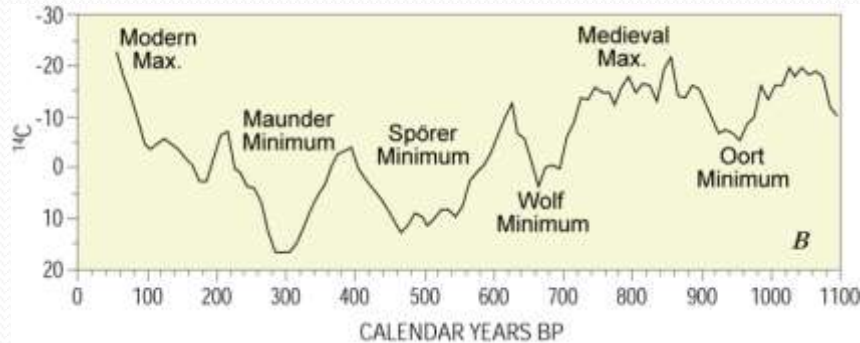


- Näkyy auringonpilkkujen määrän jaksollisena vaihteluna
 - Auringon aktiivisuutta on historiallisesti määritetty auringonpilkkuluvulla, joka lasketaan kaavalla $SN = 10g+s$
 - Nykyisin on useita muitakin menetelmiä, mutta niitäkin vertautetaan auringonpilkkulukuun
 - Päivittäisiä auringonpilkkulukuja on laskettu 1700-luvun alusta alkaen
- Auringonpilkkujakson pituus on noin 11 vuotta
 - Vaihteluväli on 7-14 vuotta
- Auringonpilkkujakson maksimien voimakkuudet vaihtelevat

Auringon aktiivisuus

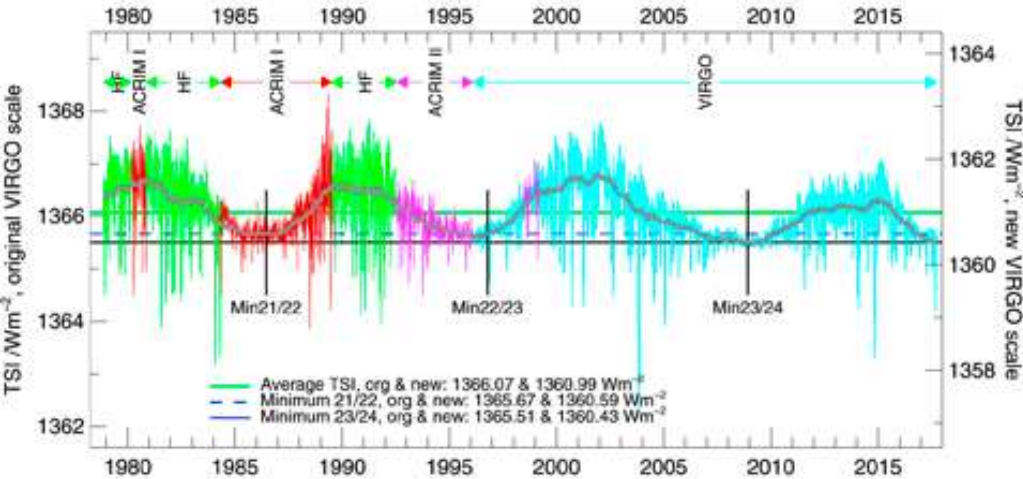


Auringon aktiivisuus



- Auringon aktiivisuuden määrittäminen ennen 1700-lukua tehdään useilla eri menetelmillä, tärkein niistä on hiili-14 (^{14}C) pitoisuus
- ^{14}C syntyy kun kosminen säteily törmää ilmakehän atomeihin ja molekyyleihin synnyttäen neutronisäteilyä
- Neutronien törmätessä typpeen (N) syntyy reaktio $\text{n} + ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{14}_6\text{C} + \text{p}$
- ^{14}C :ää syntyy vähemmän Auringon ollessa aktiivinen ja enemmän minimin aikana

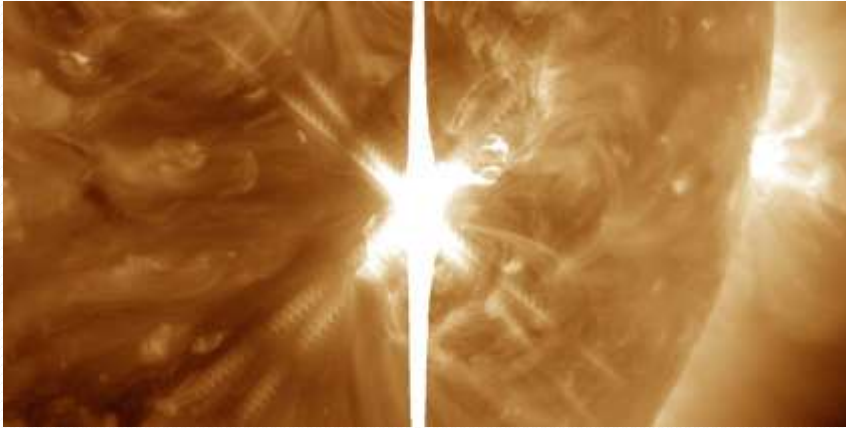
Auringon aktiivisuus



- Auringon säteilemä energiamäärä vaihtelee aktiivisuusjakson mukaan
 - Säteilyteho (irradiance) maapallon radan etäisyydellä aktiivisuumaksimin aikaan on noin **1 363 W/m^2** ja aktiivisuusminimin aikaan **1 361 W/m^2**
 - Vaihtelu on vähäisempää päivittäin tai jopa tunneittain
- Irradianssia mitataan jatkuvasti satelliiteista useilla eri aallonpituuskanavilla.

Säteilyn aallonpituusalue	Energiavuoto	Vaihtelun määrä		Imeytymiskorkeus	Ionisaatio
TSI (näkyvä ja infrapuna)	1366 W/m^2	1,2 W/m^2	0,1 %	maanpinta	alhainen
MUV (200–300 nm)	15,4 W/m^2	0,17 W/m^2	1 %	15–50 km	alhainen
FUV (126–200 nm)	50 mW/m^2	15 mW/m^2	30 %	30–120 km	keskinkertainen
EUV (0–125 nm)	10 mW/m^2	10 mW/m^2	100 %	80–250 km	korkea

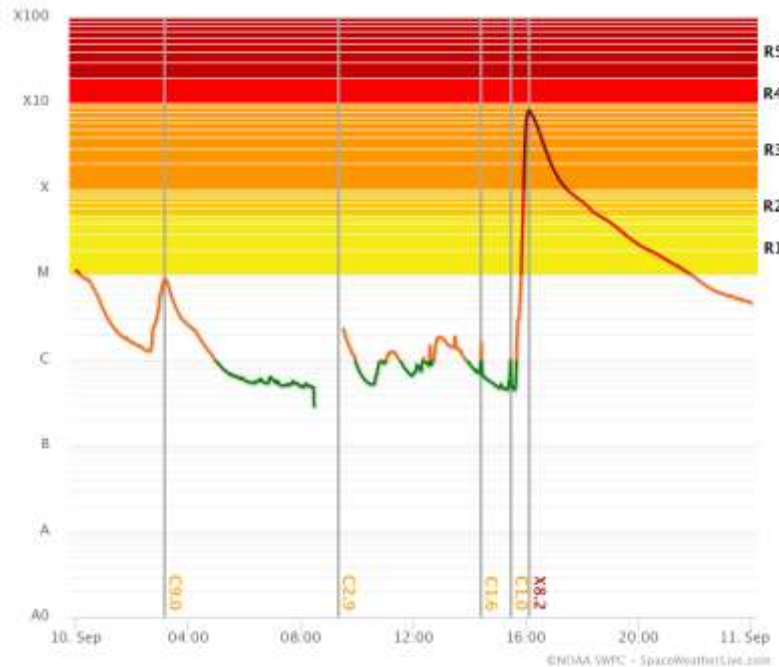
Aurinkomyrskyt



- Aurinkomyrskyt ovat voimakkaita flare- ja niihin liittyviä CME -purkauksia
- Aurinkomyrskyt vaikuttavat maapallon lähiavaruuden geomagneettisen kentän ja ionosfäärin tilaan röntgensäteilyn, nopeiden sähkövarauksellisten hiukkasten ja CME -pilven magneettikentän välityksellä.

Aurinkomyrskyt: flarepurkaukset

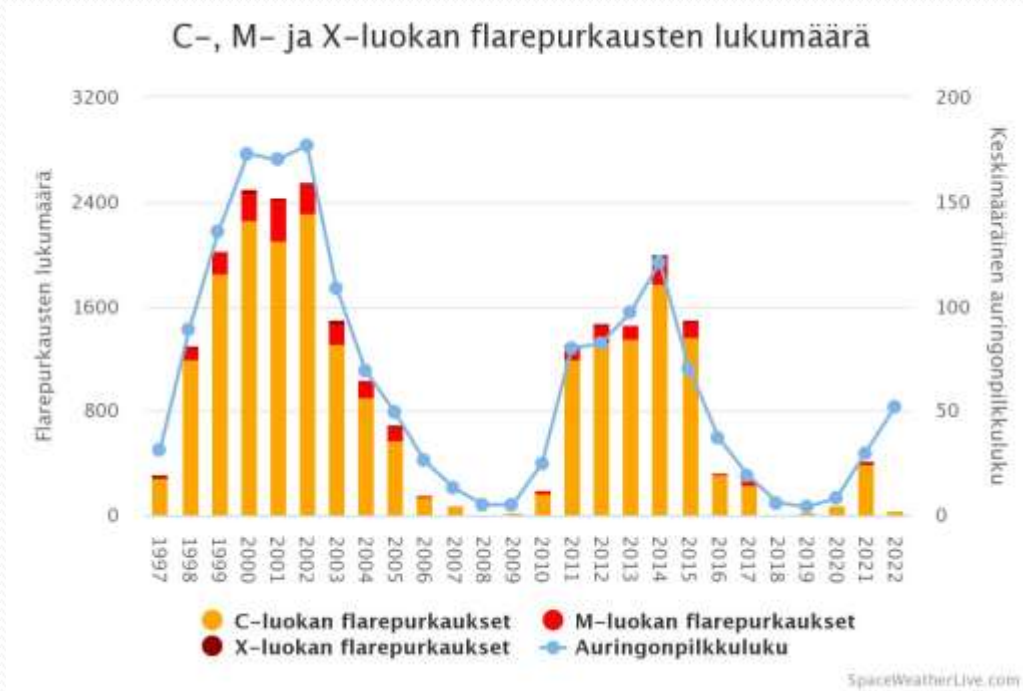
Solar activity of Sunday, 10 September 2017



- Flarepurkaukset luokitellaan niiden emittoiman röntgensäteilyn voimakkuuden mukaan
- Aurinkomyrskyt aiheutuvat erittäin voimakkaista flarepurkauksista.

Luokka	Vuon teho [W/m^2]	Kuvaus
A0	$< 10^{-8}$	Erittäin vähäinen taustasäteily
A	$10^{-8} > 10^{-7}$	Vähäinen taustasäteily
B	$10^{-7} > 10^{-6}$	Keskivoimakas taustasäteily
C	$10^{-6} > 10^{-5}$	Voimakas taustasäteily / heikko flare
M	$10^{-5} > 10^{-4}$	Keskivoimakas flare
X	$10^{-4} > 10^{-3}$	Voimakas flare
Y(X10)	$> 10^{-3}$	Erittäin voimakas flare

Aurinkomyrskyt: flarepurkaukset



- Aurinkomyrskyjen (voimakkaiden flarepurkausten) määrä vaihtelee Auringon aktiivisuuden mukaan
 - Aurinkomyrskyjä on runsaimmin aktiivisina kausina

			Alue	Alkoi	Maksimi	Loppu
1	X28+	04/11/2003	0486	19:29	19:53	20:06
2	X20+	02/04/2001	9393	21:32	21:51	22:03
3	X17,2+	28/10/2003	0486	09:51	11:10	11:24
4	X17+	07/09/2005	0808	17:17	17:40	18:03
5	X14,4	15/04/2001	9415	13:19	13:50	13:55
6	X10	29/10/2003	0486	20:37	20:49	21:01
7	X9,4	06/11/1997	8100	11:49	11:55	12:01
8	X9,3	06/09/2017	2673	11:53	12:02	12:10
9	X9	05/12/2006	0930	10:18	10:35	10:45
10	X8,3	02/11/2003	0486	17:03	17:25	17:39
11	X8,2	10/09/2017	2673	15:35	16:06	16:31
12	X7,1	20/01/2005	0720	06:36	07:01	07:26

Aurinkomyrskyt: flarepurkaukset

- Voimakkaimmat satelliiteilla mitatut flarepurkaukset vuodesta 1996 alkaen
- Oheisessa taulukossa on nykyajan voimakkaimmat flarepurkaukset.

Aurinkomyrskyjen haitalliset vaikutukset



- Aurinkomyrskyjen uhka välittyy energisten hiukkasten (protonit) suorana vaikutuksena ja protonien ja elektronien aiheuttamien sähkövirtojen vaikutuksesta ihmiskunnan käyttämiin teknisiin rakenteisiin.

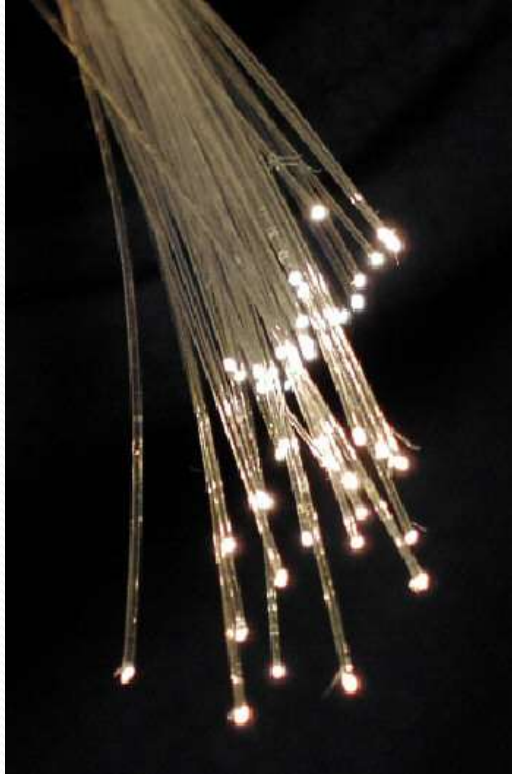


Aurinkomyrskyjen haitalliset vaikutukset



- Pohjoismaiset sähköverkot ovat pääosin pohjois-etelä-suuntaisia
- Tästä syystä verkkoihin aiheutuu vähemmän häiriöitä kuin itä-länsi-suuntaisiin verkkoihin
- Suomessa korkeajänniteverkkojen vikasietoisuuteen on panostettu heti pitkien linjojen rakentamisen alettua
- Suomessa ja Ruotsissa sähkönjakelun keskeytyksiä aiheutuu yleensä sääolosuhteista (runsas ja mahdollisesti jäätävä lumisade) johtuen.

Aurinkomyrskyjen haitalliset vaikutukset



Kuva Wikimedia Commons

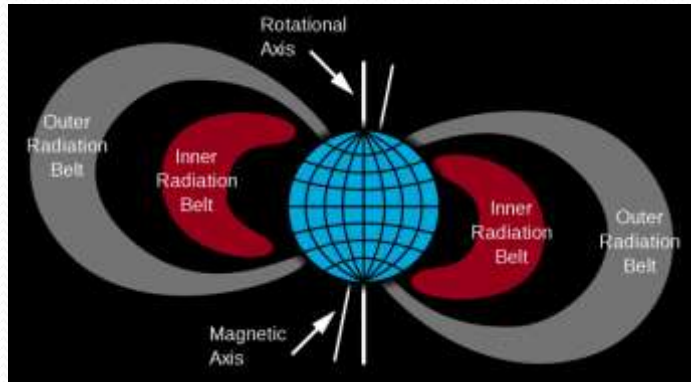
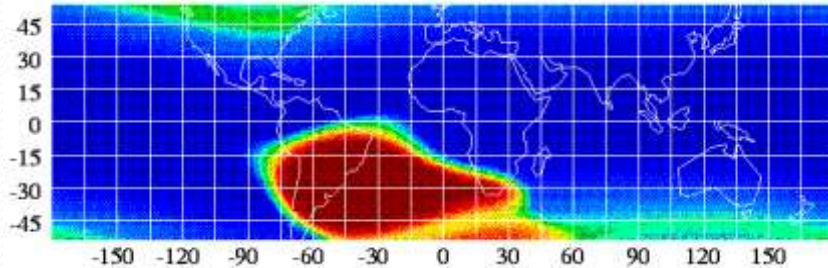
- Aurinkomyrskyjen laaja-alaiset vaikutukset **tietoliikenneverkkoihin** on toistaiseksi arvailujen varassa
- Runkolinjat ovat toteutettu valokaapeleilla
 - Kaapelit eivät ole häiriöherkkiä, eikä valokuituihin indusoidu häiriöitä
 - Vahvistinasemat tarvitsevat kuitenkin sähkösyötön, joka voi olla alttiina häiriöille.
 - Näitä häiriöitä torjutaan akustoilla ja kriittisimmät osat on kahdennettu
- Tietoliikennesatelliittien kautta kulkevat tietoliikenneyhteydet ovat luonnollisesti häiriö- ja vaurioalttiita magnetosfäärin häiriötilanteille ja Auringosta peräisin olevan kosmisen säteilyn vaikutuksille.

Protoni-ilmiöt



- Energiset protonit ionisoivat ionosfäärissä olevaa kaasua
- Tästä seuraa
 - muutoksia ionosfäärin radioaaltojen heijastusominaisuuksiin
 - Radiohäiriöitä tai yhteyskatkoksia erityisesti VHF -taajuuksilla.

Protoni-ilmiöt



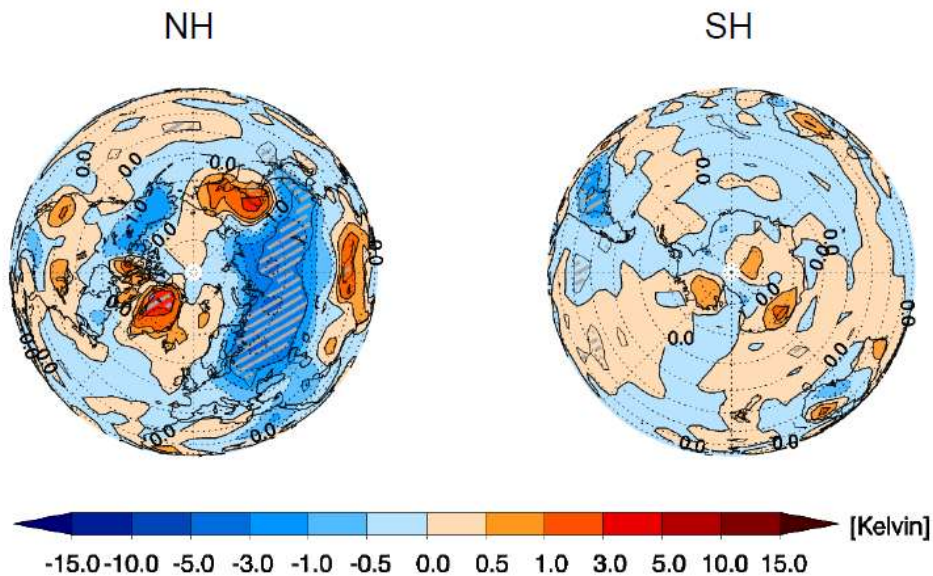
- Energiset protonit lisäävät alemman Van Allenin vyön hiukkastiheyttä
 - Van Allenin vyö ulottuu 600 – 6 000 km korkeuteen
- Muutokset ionosfäärissä aiheuttavat satelliittipaikannukseen epätarkkuutta
- Energiset protonit törmäävät kiertoradalla oleviin satelliitteihin, jolloin voi seurauksena olla
 - Toiminnallisia häiriöitä
 - Laiterikkoja etenkin Etelä-Atlantin anomalian alueella
 - Etenkin jatkuvasti toiminnassa pidettävät satelliitit ovat vaurioitumisvaarassa.

Protoni-ilmiöt



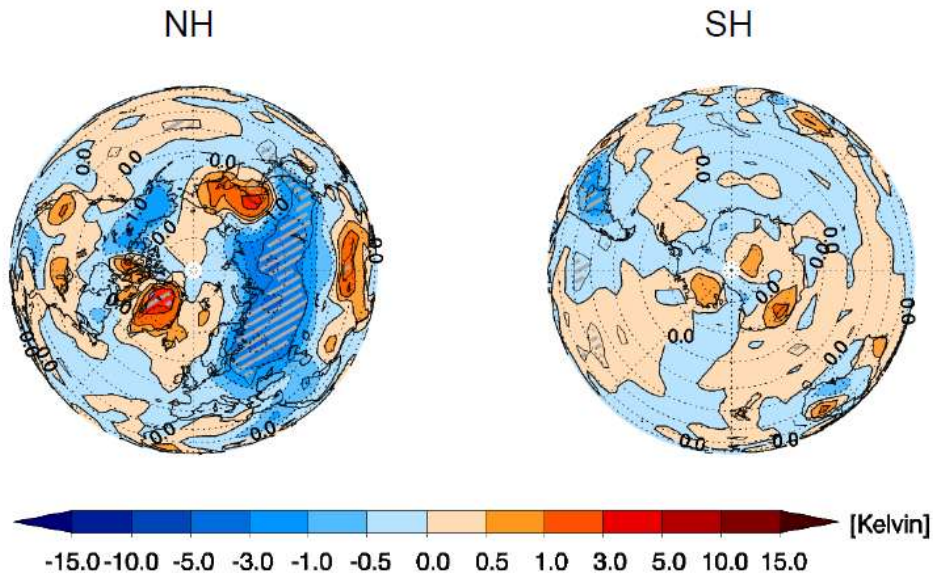
- Lisääntynyt protonitiheys aiheuttaa astronauttien säteilykuormituksen lisääntymistä Kansainvälisellä avaruusasemalla
- Säteilykuormitus lisääntyy myös jonkin verran korkealla lentävien matkustajalentokoneiden henkilökunnalle (ja matkustajille)
 - Suurin säteilykuormitus kuitenkin aiheutuu Auringon aktiivisuusminimien aikana kosmisen säteilyn aiheutuneesta sekundäärisestä säteilystä.

Protoni-ilmiöt



- Ilmastolliset vaikutukset:
 - Tutkimus
M. Calisto, P. T. Verronen, E. Rozanov ja T. Peter:
Influence of a Carrington-like event on the atmospheric chemistry, temperature and dynamics
Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 8679-8686, 2012.

Protoni-ilmiöt, SPE



- Tutkimus osoittaa, että ilmakehässä tapahtuva voimakas ionisaatio aiheuttaa otsonikatoa sekä NO_x ja HO_x -yhdisteiden määrän kasvua
- Kemiallisten muutosten kesto voi olla jopa useita vuosia
- Kemiallisten muutosten lisäksi aiheutuu lämpötilan laskua tietyillä alueilla ja alueellisten tuulien muutoksia 3–5 m/s
- Ilmastolliset vaikutukset ovat pitkäkestoisia, jopa kuukausia.

Protoni-ilmiöt

- Alueelliset tuulet lisääntyvät etenkin pohjoisella polaarivyöhykkeellä.

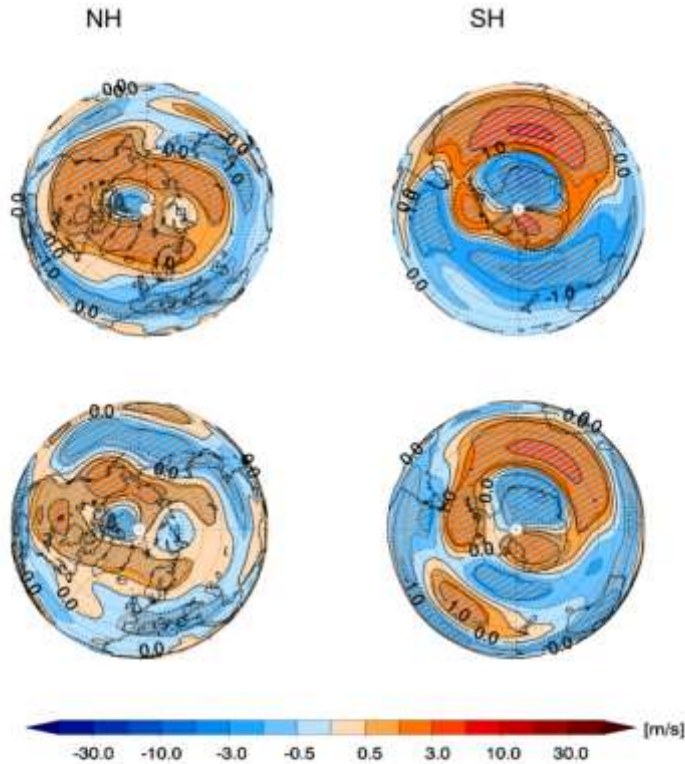


Fig. 6. Upper row: polar stereographic projection of zonal wind changes at 25 hPa from August to November given in m s^{-1} . Lower row: zonal wind changes at 63 hPa from August to November given in m s^{-1} . Left column: NH. Right column: SH. Hatched areas show 95 % statistical significance.

Protoni-ilmiöt

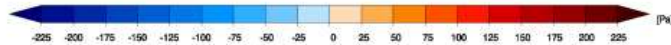
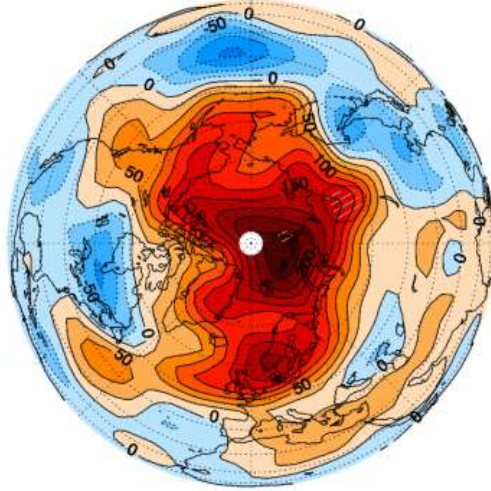


Fig. 8. Polar stereographic projection of changes in sea level pressure for the NH for day 211 to 311 resulting from the Carrington-like Event. Hatched areas show 95 % statistical significance.

- Ilmanpaineen muutokset merenpinnan tasolla pohjoisella pallonpuoliskolla.

Protoni-ilmiöt

- Otsonikato syyskuusta marraskuulle.

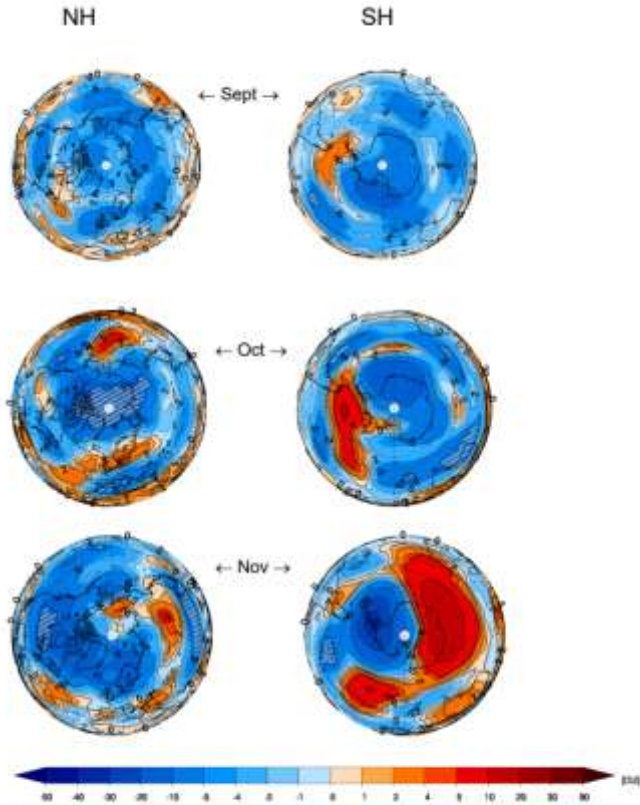


Fig. 7. Left column: polar stereographic projection of changes in total ozone (in DU) for the NH from September to November resulting from the Carrington-like event. Right column: same for the SH. Hatched areas show 95 % statistical significance.

Magnetosfäärin ja geomagneettisen kentän häiriöt



- Välitön vaikutus on magneettiset myrskyt
 - Ilmenee näyttävinä revontulina
 - Sähkövirtoina ilmakehässä, maaperässä, voimajohdoissa ja metalliputkistoissa.

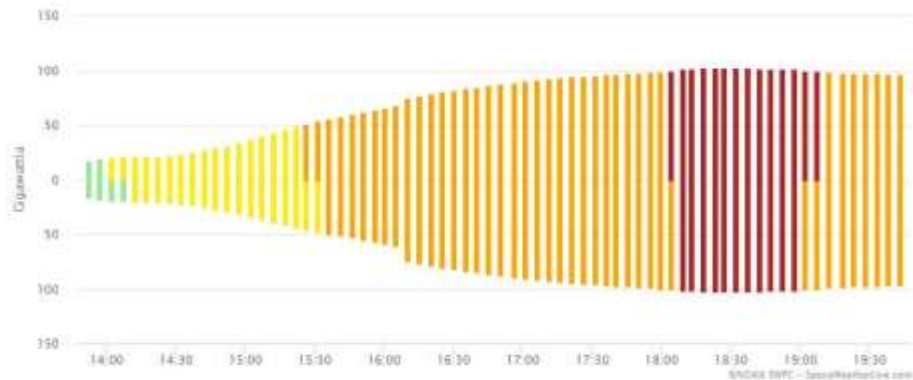
Kuva Wikimedia Commons/ M. Palmroth, M. Grandin, M. Helin, P. Koski, A. Oksanen, M. A. Glad, R. Valonen, K. Saari, E. Bruus, J. Norberg, A. Viljanen, K. Kauristie, P. T. Verronen.

Magnetosfäärin ja geomagneettisen kentän häiriöt



- Häiriövirrat voimalinjoissa
 - Ovat tasavirran kaltaisia häiriövirtoja
 - Vaihtovirtalaitteet, esimerkiksi muuntajat eivät siedä sähkövirran tasavirtakomponenttia, vaan kuumenevat ja tuhoutuvat
 - Tuhoutunut muuntaja voi aiheuttaa sähköverkossa olevien voima-asemien ylikuormituksen ja siitä puolestaan seuraa näiden "putoamisen" verkosta ja aiheuttaa ketjureaktion koko maakunnan pimenemisen.

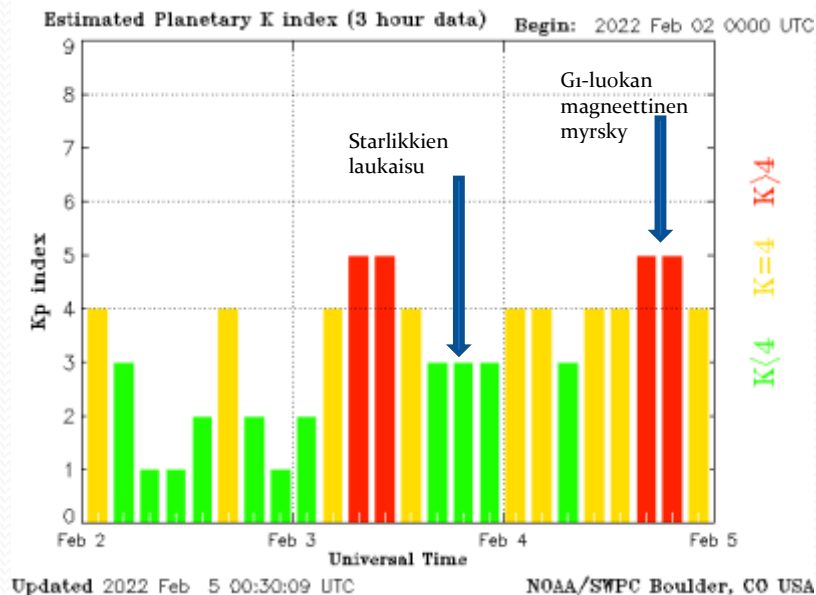
Vaikutukset termosfäärissä



OVATION-malin laskema globaalin ilmakehän kokonaisenergian teho gigawatteina. Magneettisen myrskyn aikana teho kohoaa 100 GW tai yli. Pallonpuoliskojen teho voi poiketa tosistaan jonkin verran.

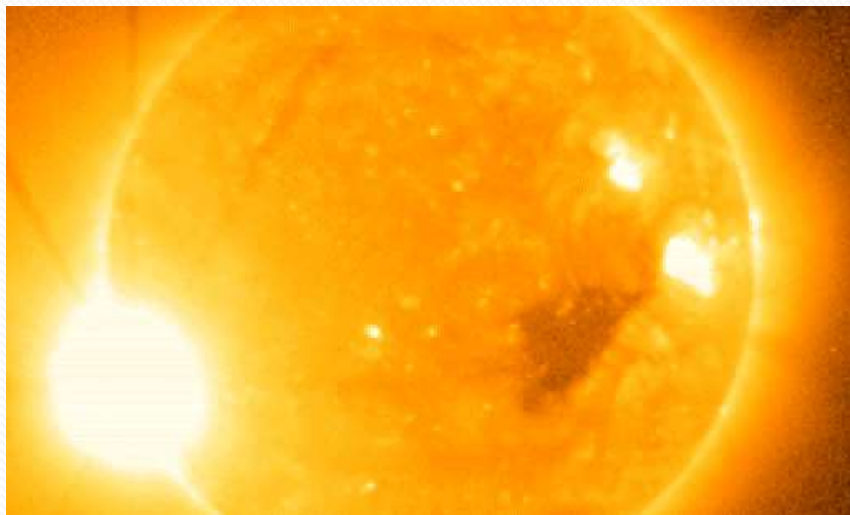
- Termosfääri on ilmakehän alue 80 km yläpuolelta noin 500 – 1 000 km korkeuteen
 - Termosfäärin lämpötila kohoaa korkeuden mukana aina 2 500 °C lämpötilaan
- Termosfääri reagoi herkästi Auringon xuv-säteilyn määrään
 - Termosfäärin lämpötilassa havaitaan vuorokausivaihtelua
- Aurinkotuuli syöttää myös energiaa termosfääriin
- Lisääntynyt energia lämmittää ja laajentaa termosfääriä
 - Termosfäärin laajentuminen lisää matalalla radalla kiertävien satelliittien ja avaruusasemien kohtamaa vastusta (mm. kitkaa) ja näin vaikuttaa niiden kiertorataan.

Starlink-satelliitit



- SpaceX laukaisi 49 Starlink -satelliittia matalalle (~ 200 km) kiertoradalle 3.2.2022
- Noin vuorokautta myöhemmin magneettikentässä esiintyi pieni G1-luokan magneettinen myrsky, jonka vaikutuksesta satelliittien radalla ilmakehän vastus kasvoi noin 50 % aikaisempiin laukaisuihin verrattuna (SpaceX:n lausunnon mukaan)
- Kasvaneesta vastuksesta johtuen satelliitit vajosivat tiheämpään ilmakehään ja tuhoutuivat 7.2.2022 Puerto Ricon yläpuolella.

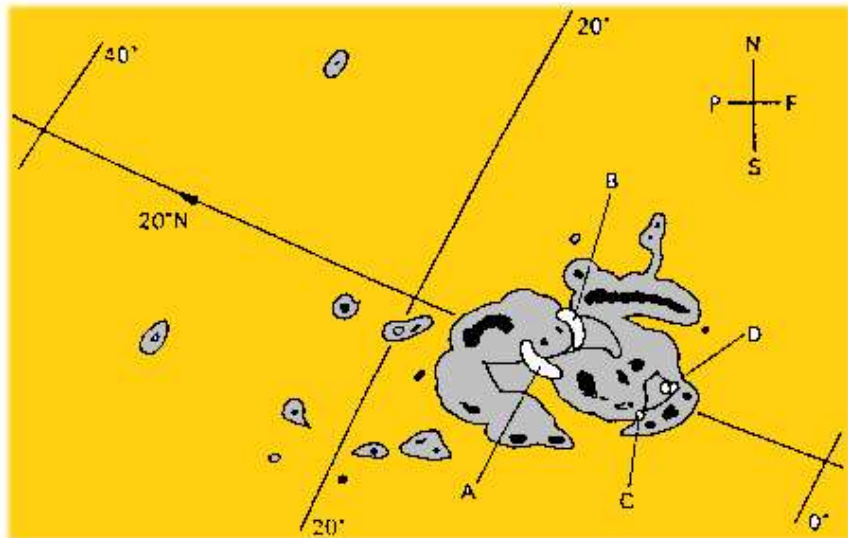
Superflare-aurinkomyrsky



X9.0-luokan flare 5.12.2006 GOES 13 –satelliitin kuvaamana (röntgensäteily). Purkaus oli niin voimakas, että satelliitin kuvauslaitteisto vaurioitui!

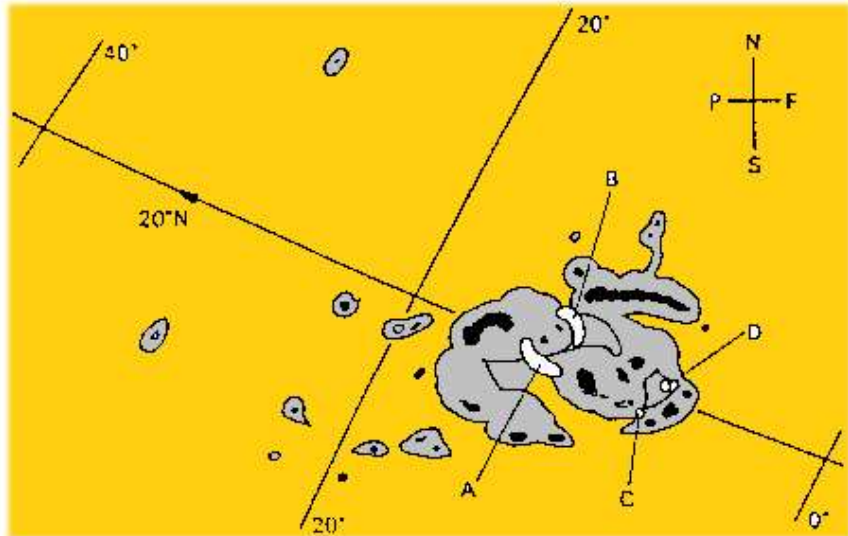
- Superflarepurkaus on harvinainen
 - **Hiroyuki Maeharan** tutkimusryhmän mukaan Kepler-satelliitin aineiston 83 000 auringonkaltaisesta tähdestä vain 148 esiintyi superflarepurkauksia
- Jos parin vuoden aikana koottu aineisto edustaa keskimääräistä superflarepurkausten esiintyvyyttä auringonkaltaisilla tähdillä, voidaan päätellä, että superflare esiintyy **kerran 800 vuodessa**.

Superflare-aurinkomyrsky



- 1.9.1859 **Richard C. Carrington** ja **Righard Hodgson** (toisistaan riippumatta) havaitsivat voimakkaan purkauksen kello 11.18 (GMT)
- Purkauksen kesto oli noin 5–6 minuuttia
- Seuraavana yönä juuri ennen aamunkoittoa taivaalla nähtiin punaisia, vihreitä ja purppuraisia revontulia, jotka olivat niin kirkkaita, että sanomalehden lukeminen oli mahdollista.

Superflare-aurinkomyrsky



- Sykkiviä revontulia nähtiin jopa trooppisilla alueilla, kuten Kuubassa, Bahama-saarilla, Jamaikalla, El Salvadorissa ja Havaijilla
- Sähkötyslinjat kipinöivät ja järkyttivät sähköttäjiä.
- Sähkötys toimi, vaikka paristot oli kytketty irti.

Superflare-aurinkomyrsky

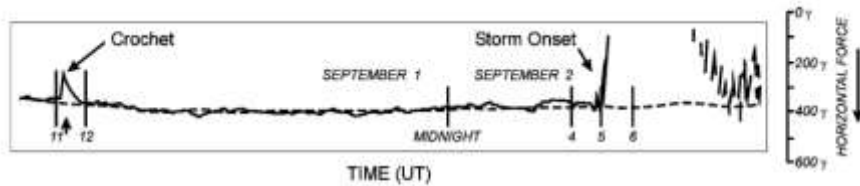


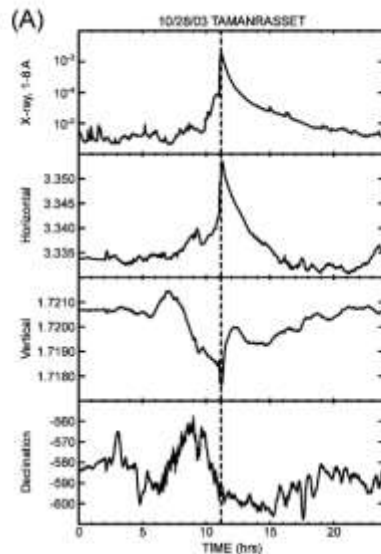
Figure 1. Trace of the horizontal component of Earth's magnetic field from Kew Observatory for 1–2 September 1859, showing the magnetic crochet at 11:15 UT on 1 September and the great geomagnetic storm that followed 17.6 h later and drove the record off scale (Stewart, 1861; Bartels, 1937).

Carrington-tapahtuman flare-purkaus (kuvassa Crochet) aiheutti ~110 nT häiriön ekvaattoriseudulla oleviin magnetometreihin. Häiriö aiheutuu ionosfäärissä esiintyvistä häiriöistä, jonka aiheuttaa nopeat ($v=1/2c$) protonit ($E > 500$ MeV).

- Revontulet ja sähkötyslinjojen häiriöt olivat seurausta valtavasta magneettisesta myrskystä, joka aiheutui CME-purkauspilvestä
- CME-pilven vauhti oli hyvin suuri, sillä siltä kului vain noin 17,6 tuntia saavuttaa Maa
 - Nopeus noin **2 400 km/s**
- Kaikkien aikojen nopein CME-pilvi on ilmeisesti ollut 4.8.1972, jolloin se saavutti maapallon 14,6 tunnissa (**2 700 km/s**).

Superflare-aurinkomyrsky

X17.2
111 nT



X28.0
115 nT

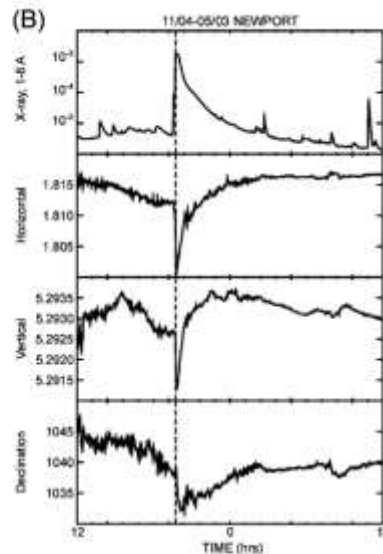
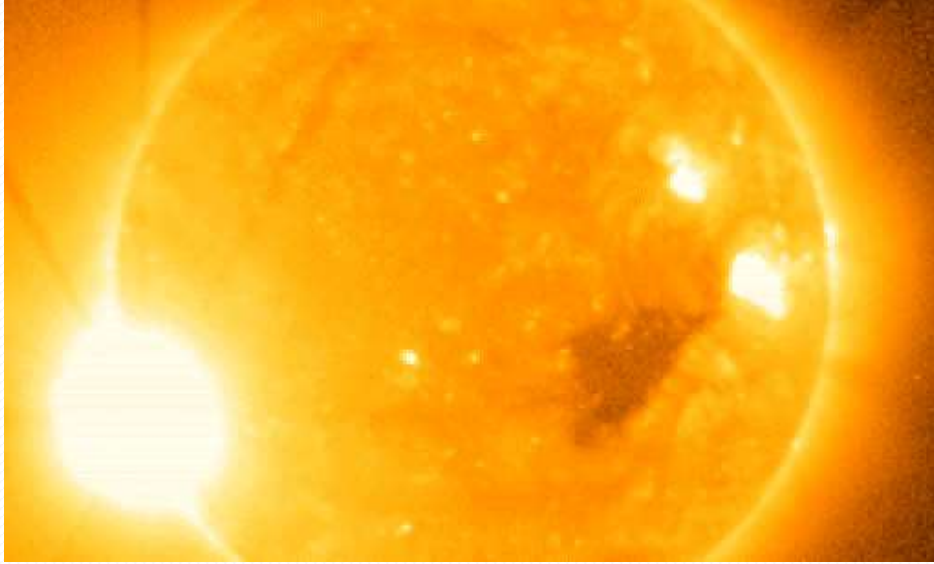


Figure 2. Large (>100 nT) SFEs on (a) 28 October 2003 and (b) 4 November 2003. In each case the associated soft X-ray burst is shown along with the magnetometer traces of the station showing the largest H -component deflection. The vertical dashed lines are drawn at the peak of the soft X-ray event. The units for the soft X-ray fluxes in the top panels of (a) and (b) are W m^{-2} . In the second and third panels of both (A) and (B), the plotted values should be multiplied by 10^4 (units are nT); in the bottom panel of each figure, the plotted values should be multiplied by 10 (units are arcmin).

Suoraa päätelmää
purkauksen
voimakkuudesta
magnetometrien
horisontaalisista
häiriöistä ei voi tehdä,
koska siihen vaikuttaa
zeniitin suunnan ja
Auringon välinen
kulma

Superflare-aurinkomyrsky



- Vuonna 1859 muita kuin lennätinverkkoja tai putkilinjoja ei ollut, joten vauriot jäivät vähäisiksi
- **Toisin on nykypäivänä!**

Superflare-aurinkomyrsky



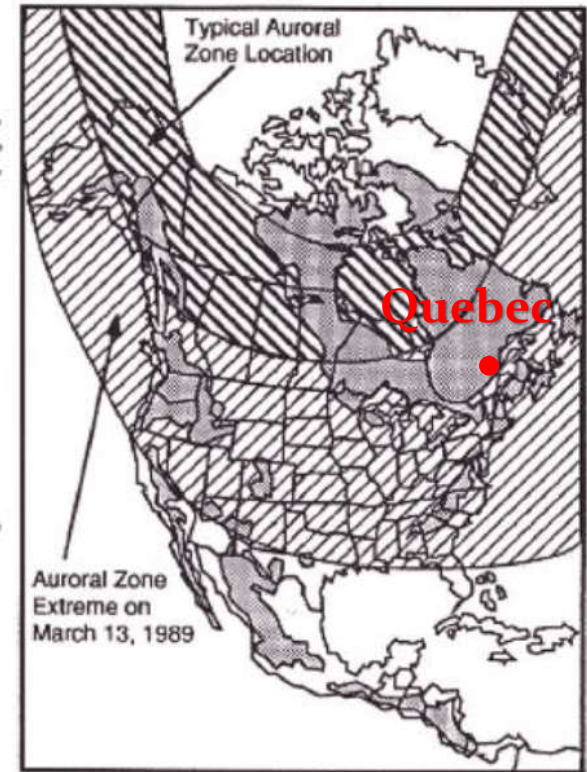
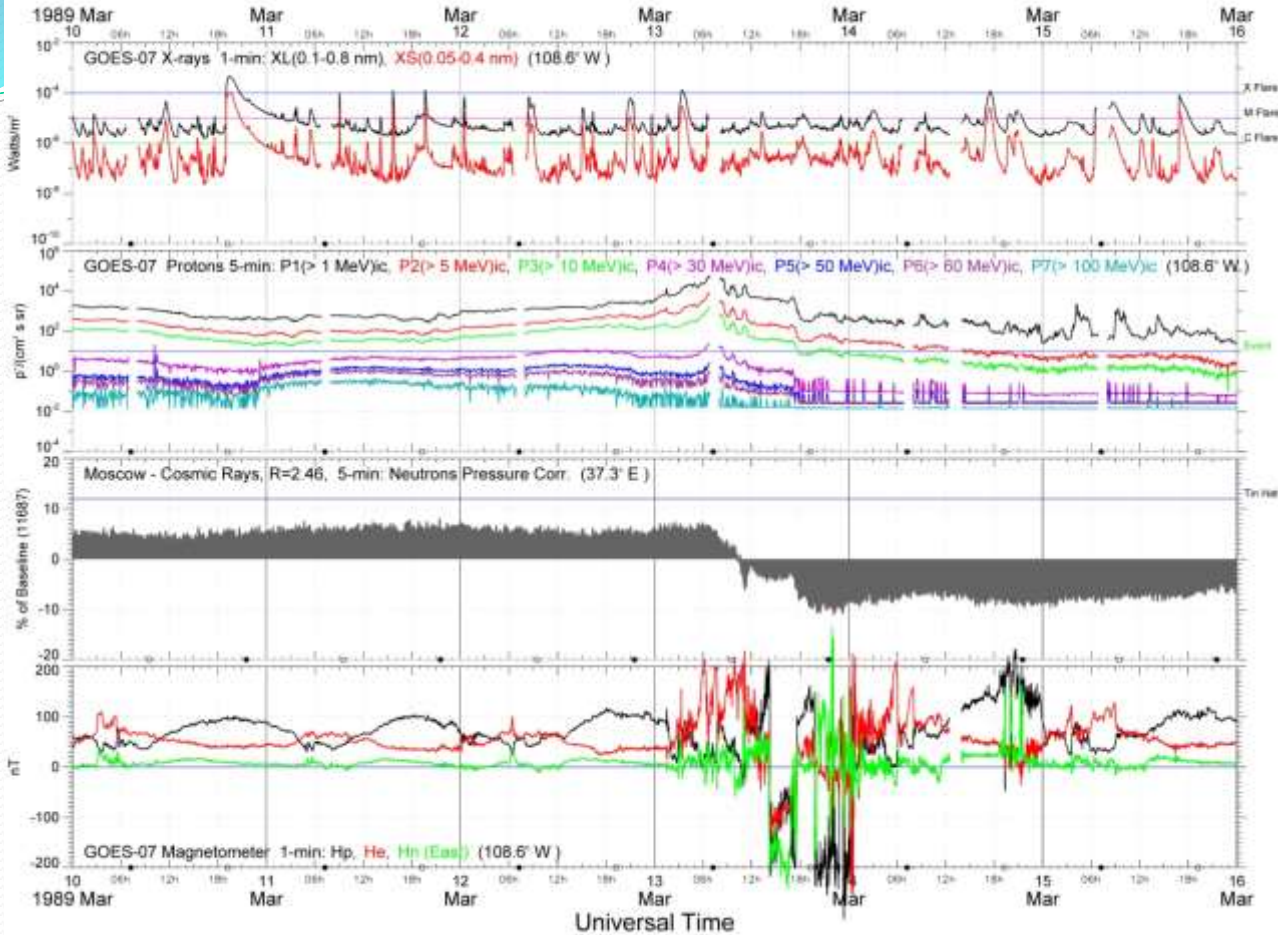
PJM Public Service
Step Up Transformer

Severe internal damage caused by
the space storm of 13 March, 1989



- 4.8.1972 kaukopuheluverkko romahti Illinoisissa geomagneettisen myrskyn aikana
- **13.3.1989 Hydro Quebecin sähköverkko putosi pois päältä**
- Sähkökatkos kesti 9–12 tuntia
- Sähköverkon häiriövirrat polttivat muuntajan New Jerseyssä
- Revontulia nähtiin Floridassa ja Kuubassa.

Extreme Event: 1989-03-10 00h - 1989-03-15 24h



Power systems in areas of igneous rock (gray) are the most vulnerable to the effects of intense geomagnetic activity because the high resistance of the igneous rock encourages geomagnetically induced currents (GICs) to flow in the power transmission lines situated above the rock. Shown in cross-hatching are the auroral zone and the extremes that the aurora can reach during severe disturbances such as March 13, 1989.

Credits: American Geophysical Union

Superflare-aurinkomyrsky

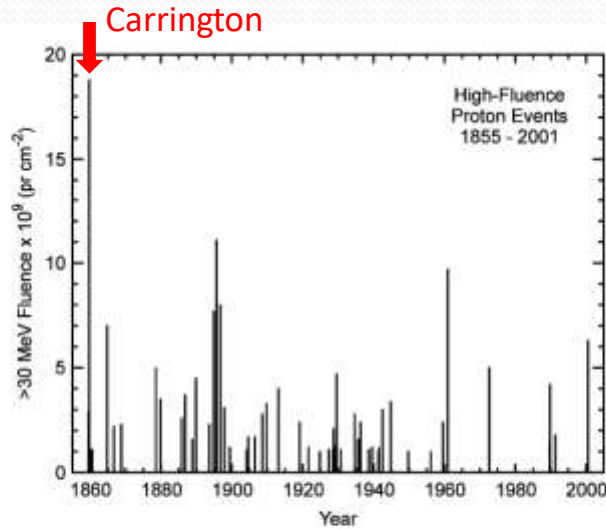


Figure 3. The times of occurrence of all > 30 MeV proton events with fluences exceeding 10^9 pr cm^{-2} between 1855–2000 (adapted from McCracken *et al.*, 2001a; M. Shea, personal communication, 2004). Pre-1950 values are based on nitrate composition in ice cores and later values are based on ionospheric measurements and direct satellite observations.

- Maapallon ilmakehään iskeytyvät energeettiset hiukkaset synnyttävät nitraatteja, jotka laskeutuvat ja kertyvät sedimentteihin ja jäätiköihin
- 500 vuoden tilastot kertovat, että Carringtonin purkaus oli voimakkain ja yli kaksi kertaa voimakkaampi kuin seuraavaksi tuleva purkaus.

Superflare-aurinkomyrsky

TABLE IV

Chronological listing of outstanding geomagnetic storms recorded at Greenwich/Abinger, 1859–1954^a.

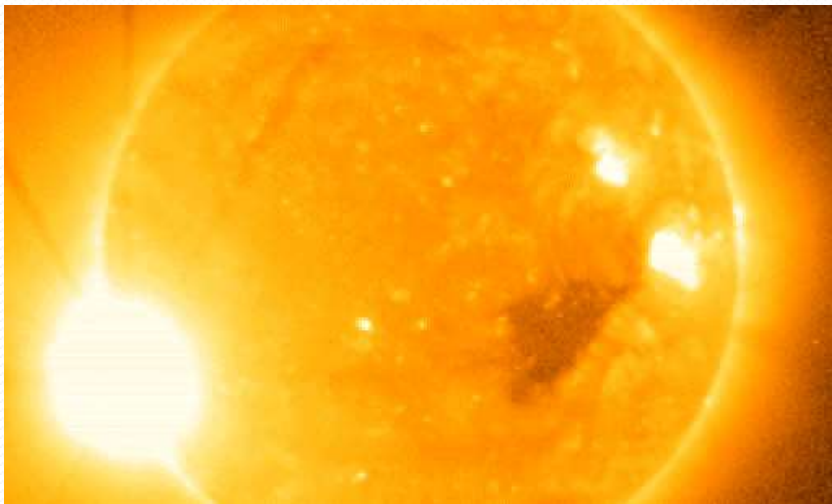
Date	Ranges		
	Declination (°)	Horizontal force (nT)	Vertical (nT)
01 Sep. 1859	≫92	≫625	1500
04 Feb. 1872	125	800	>950
17 Nov. 1882	115	>1090	>1060
31 Oct. 1903	119	1175	1440
25 Sep. 1909	193	1710	>1080
14 May 1921	110	≫740	≫460
25 Jan. 1938 ^b	126	1055	570
16 Apr. 1938	307	1375	500
24 Mar. 1940	131	1370	1000
01 Mar. 1941	186	1650	1310
18 Sep. 1941	123	1250	1115
28 Mar. 1946	162	1660	920
21 Sep. 1946	136	925	450

^aJones, 1955.

^bThis storm was not included in Chapman and Bartels' (1940) list of great storms from 1857–1939.

- Vaikka Carringtonin havaitsema purkaus on epäilemättä ollut voimakkain mitatuista, se ei kuitenkaan ole ollut merkittävästi voimakkaampi (seurauksiltaan) kuin sen jälkeen tapahtuneet purkaukset.

Superflare-aurinkomyrsky



- **10.3.1983** tapahtui X15-luokan flarepurkaus
 - Aiheutti välittömästi voimakkaan radiohäiriön
 - Mm. Radio Free European lähetys keskeytyi
- **Joulukuussa 2005** Satelliittipaikannusjärjestelmä (GPS) kärsi yhteyskatkoista 10 minuutin ajan.

TABLE VI

The 25 largest geomagnetic storms based on the *Dst* index, 1932–2002^a.

Date	Time (UT h)	Peak value (nT)
14 Mar. 1989	01	−548
05 Jul. 1941	13	−453
28 Mar. 1946	14	−440
15 Jul. 1959	19	−434
11 Feb. 1958	11	−428
13 Sep. 1957	10	−426
26 May 1967	04	−391
31 Mar. 2001	08	−383
01 Mar. 1941	18	−382
09 Nov. 1991	01	−375
24 Mar. 1940	20	−366
19 Sep. 1941	06	−359
25 Jan. 1938	23	−352
26 Jan. 1949	00	−350
22 Jan. 1938	11	−344
08 Jul. 1958	20	−334
13 Nov. 1960	09	−333
30 Apr. 1960	18	−325
01 Apr. 1960	18	−325
05 Sep. 1957	03	−324
14 Jul. 1982	03	−322
04 Sep. 1958	22	−305
23 Sep. 1957	07	−302
16 Jul. 2000	00	−301
25 Mar. 1991	00	−297

^aBased on *Dst* index from Karinen and Mursula, 2004.

Superflare-aurinkomyrsky

- **31.3.2001** oli G4-luokan magneettinen myrsky
- Se aiheutui **29.3.2001** tapahtuneesta X1.7-luokan flare-purkauksesta ja siihen liittyvästä CME-pilvestä
- **15.–16.7.2000** oli myös G5-G5-luokan magneettinen myrsky
- Se aiheutui **14.7.2000** tapahtuneesta X5.7-luokan flare-purkauksesta.

Historialliset aurinkomyrskyt



- Historiallisia aurinkomyrskyjä voidaan tutkia sedimenteissä, jääkairauksissa (Grönlanti ja Etelämanner) sekä puiden vuosilustoissa näkyvistä muutoksista
- Japanilaiset tutkijat löysivät vuodelta **774–775** vuosilustoista ^{14}C -piikin, jolle ei tuntunut löytyvän selitystä.

Historialliset aurinkomyrskyt



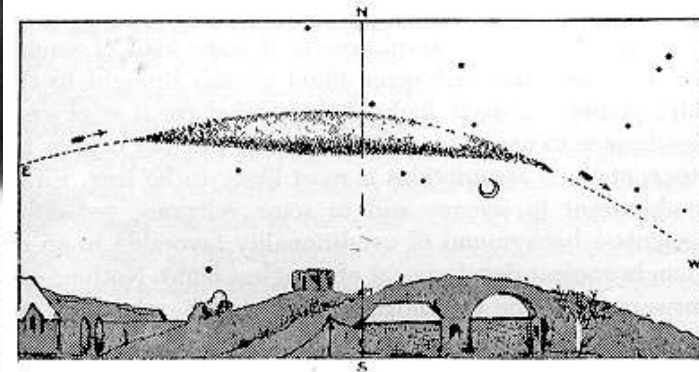
- Suomalaiset tutkijat julkaisivat syyskuussa 2018 tutkimuksen, jonka mukaan myös Suomen Lapista kerätyt näytteet tukevat aurinkomyrskyä ^{14}C -piikin lähteenä
- Purkaus näyttää tapahtuneen vuonna 774
- **Adrian Melott** (University of Kansas in Lawrence) selittää piikin aiheutuneen aurinkomyrskystä
- Aurinkomyrskyn voimakkuudeksi riittäisi 60-kertaa Quebecin pimentymisen aiheuttanut myrsky.

Historialliset aurinkomyrskyt



- Vuosien 993—994 vuosilustoista on havaittu ^{14}C pitoisuuspiikki. Sen on arveltu johtuvan loppuvuodesta 992 sattuneesta aurinkomyrskystä
 - Samasta tapahtumasta on havaittu ^{10}Be nopea pitoisuusnousu.

Historialliset aurinkomyrskyt



- **Edward W. Maunder** ja John R. Capron (Royal Observatory, Greenwich) raportoivat **17.11.1882** geomagneettisen myrskyn aikana näkyneestä "revontulisäteestä".
- Kyseessä saattaa olla vuonna 2017 tunnistettu ilmiö, jota kutsutaan lyhenteellä **STEVE**.
- Jälleen sähkötyslinjat kipinöivät
 - Chicago Western Unionin konttorissa sähkötyslaitteet syttyivät tuleen useita kertoja
 - Myös Britanniassa oli vastaavia häiriöitä sähkötyslaitteissa.

Historialliset aurinkomyrskyt

Occurrence of extreme solar particle events: Assessment from historical proxy data

Ilya G. Usoskin

Sodankylä Geophysical Observatory (Oulu unit) and Dept. of Physical Sciences, University of Oulu, Finland

ilya.usoskin@oulu.fi

and

Gennady A. Kovaltsov

Ioffe Physical-Technical Institute of RAS, 194021 St.Petersburg, Russia

Received _____; accepted _____

- Tutkimusten mukaan voimakkaita magneettisia myrskyjä (aurinkomyrskyjä) on tapahtunut
 - Vuosina 2225, 1485, 660 eaa., sekä vuosina 95, 265, 774, 1460, 1505, 1707, 1709, 1719, 1810 jaa.
- Suoria mittauksia on vuosilta
 - 17.9.1770, **1.9.1859**, 17-20.11.1882, 13-15.5.1921, 25-26.1.1938, 17-19.9.1941, 23.2.1956, jne.



2018—2022 © Kari A. Kuure. Kaikki oikeudet pidätetään. Aineiston osittainenkin julkaiseminen missä tahansa formaatissa tai mediassa on tekijänoikeuslain mukaisesti kielletty ilman oikeuden omistajan suostumusta!