

Tähdet

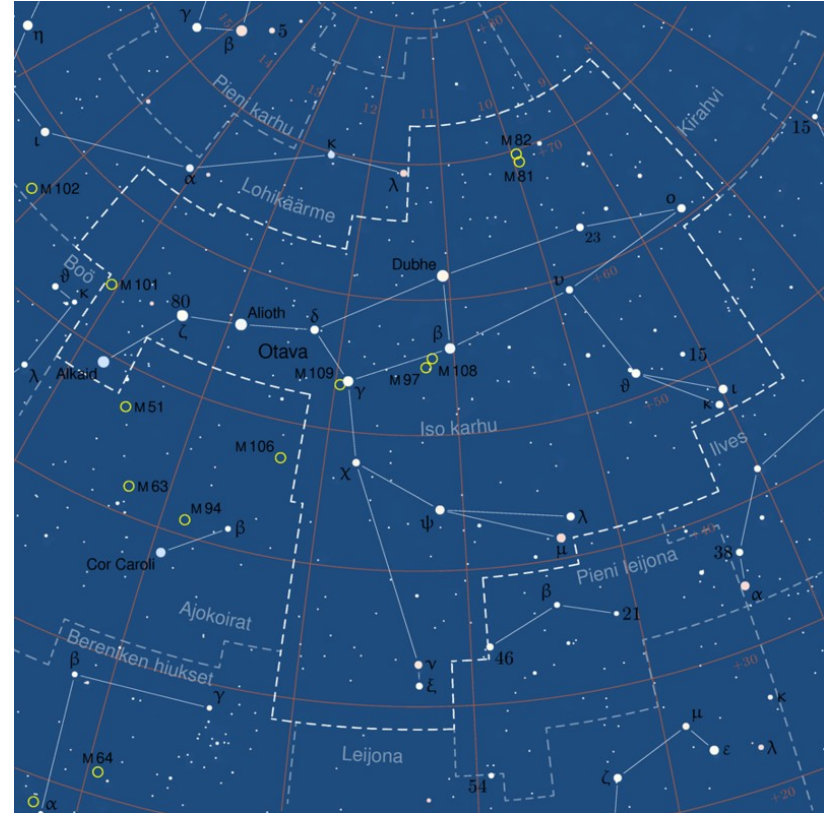


Tähdet

- Tähti = gravitaation kasaan vetämä, ydinfuusiolla energiaa tuottava kaasu(plasma)pallo
- Vaatii riittävän paljon kaasua => ytimessä paine ja lämpötila kasvavat riittävästi käynnistääkseen fuusioreaktiot
- Painovoima vetää kaasua kasaan, kaasun paine sekä säteilypaine vastustavat => tasapainotila, joka pysyy miljardeja vuosia

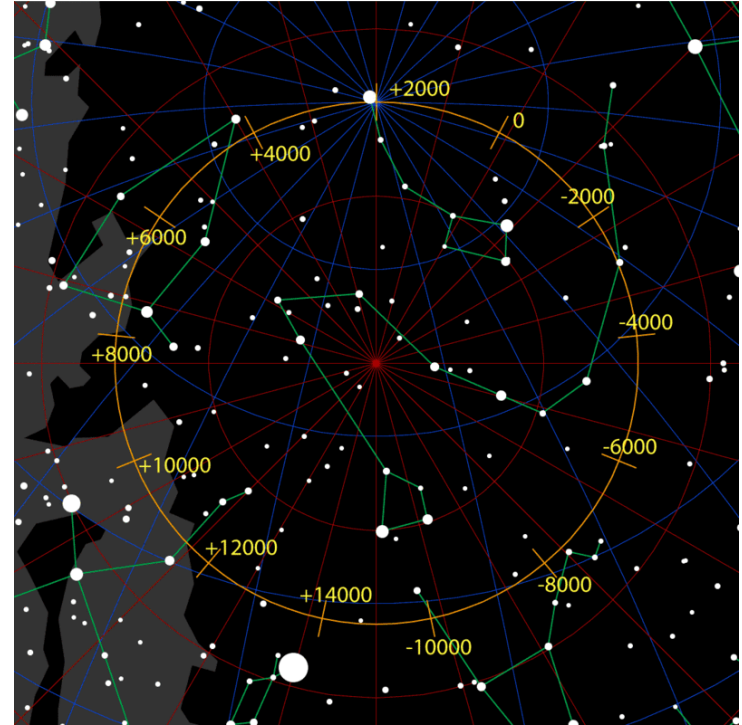
Tähdet

- Paljain silmin näkyviä tähtiä koko taivaalla noin 6000
 - 2000-3000 Suomesta kerrallaan näkyvää
- Tähtitaivas jaettu 88 tähdistöön
 - Rajat myötäilevät historiallisia tähtikuvioita
- Tähdistön (yleensä) kirkkain tähti α , seuraava β jne.
- Tähdillä käytössä myös erisnimiä (kirkkailla) ja lukuisia eri katalogeista löytyviä numeroita
- Esim. Betelgeuze = α Ori(onis) = 58 Ori(onis) = HD 39801 = HIP 27989 = HR 2061 = SAO 113271
- Tietyn tähdistön muuttuvat tähdet nimetty (löytämisyjärjestyksessä) R ... Z, RR ... RZ, SS ... SZ ... ZZ, V335, V336...



Tähtien etäisyys ja liikkeet

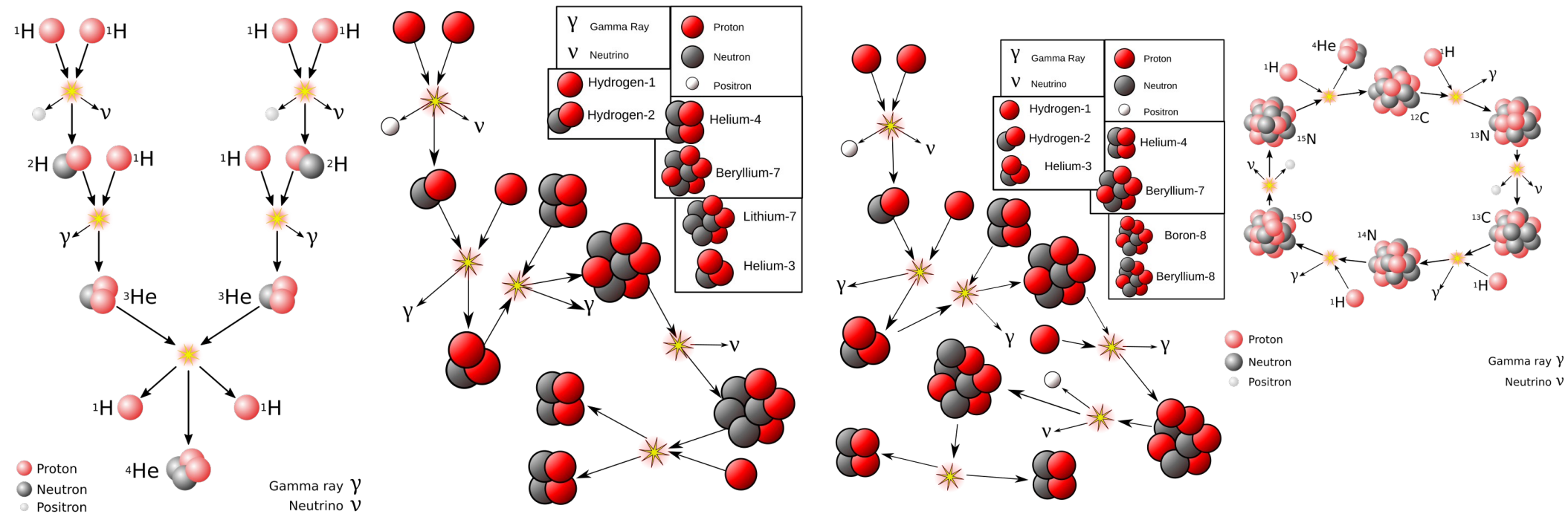
- Lähitähtien etäisyys saadaan mitattua parallaksin avulla
 - α Centauri kolmoissysteemin lähimmän tähden Proxima Centaurin etäisyys 4.2 valovuotta
 - Kirkkaista paljain silmin näkyvistä tähdistä kaukaisin Deneb 1400 valovuoden päässä
- Tähtien liike
 - Säteissuuntainen liike helppo mitata sini/punasiirtymän perusteella
 - Sivuttainen *ominaisliike* vaikeampi mitata tarkasti
- Tähtien sijainnit taivaalla muuttuvat Maan pyörimisakselin *prekession* takia huomattavasti enemmän kuin tähtien ominaisliikkeen myötä
 - Yksi kierros noin 26 000 vuodessa



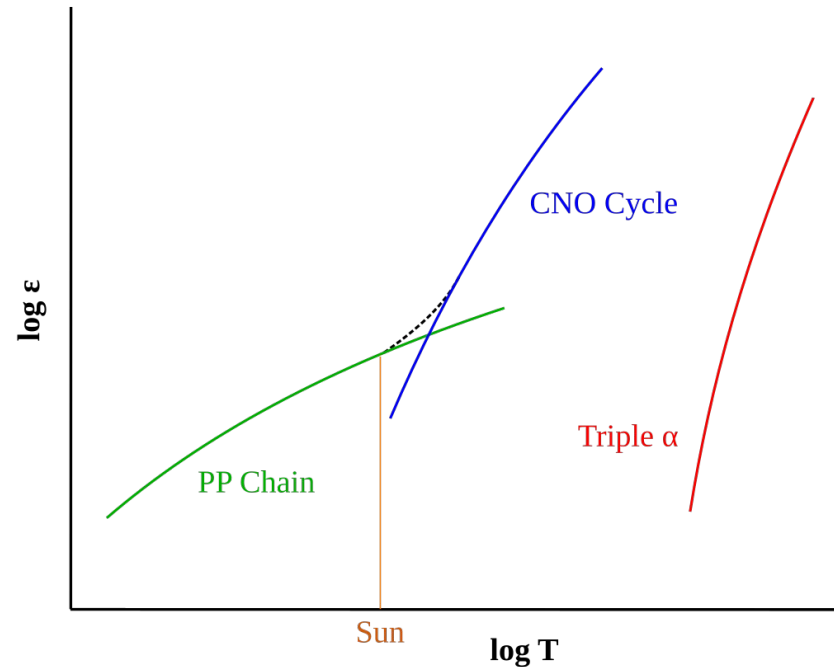
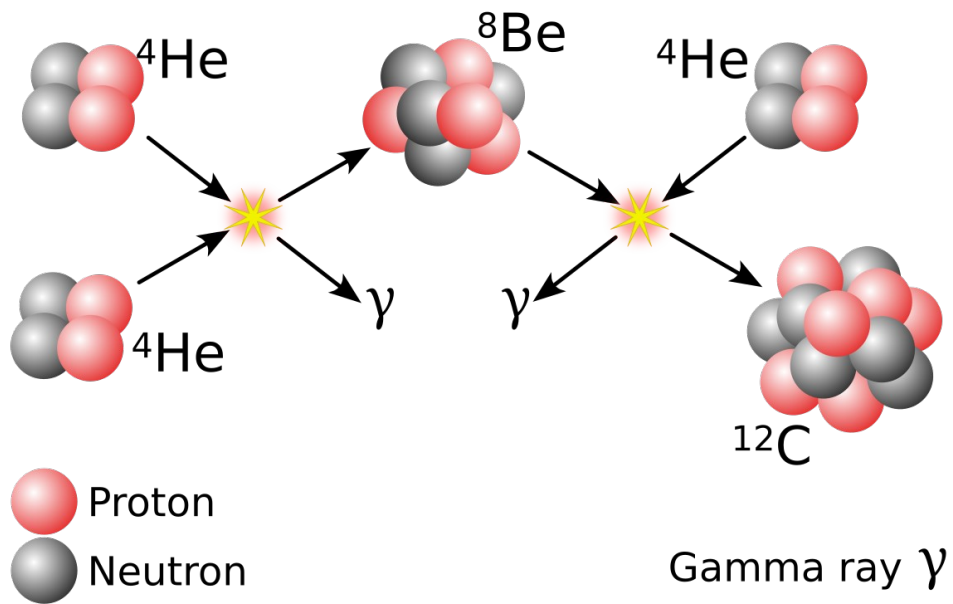
Maan akselin prekession myötä taivaannavan sijainti muuttuu ajan myötä. Kuva: Tau'olunga

Tähtien energia

- Geologisista todisteista tiedetään, että Aurinko on paistanut jo yli 4.5 miljardin vuoden ajan – mikä energianlähde riittää niin pitkään?
 - Kemiallinen palaminen kuluttaisi Auringon loppuun tuhansissa vuosissa
 - Jatkuvasta luhistumisesta vapautuva potentiaalienergia riittäisi miljoonia vuosia
- 1920-luvulla Arthur Eddington ehdotti ydinfuusiota tähtien energianlähteeksi
 - 4 protonia (vety-ydintä) yhdistyy heliumiksi – $E = mc^2$
 - Tähtitieteessä fuusiota nimitetään usein palamiseksi
 - Aurinko on fuusioinut alle puolet ytimensä vedystä
- Fuusioreaktiot tähden ytimessä vaativat noin 4 miljoonan asteen lämpötilan
 - Protonien sähkövaraukset hylkivät toisiaan, niiden täytyy tulla hyvin lähekkäin jotta vahva vuorovaikutus vetää ne yhteen
 - Vaatii noin $0.08 M_{\odot}$ verran massaa – pienimmät tähdet tämän massaisia
 - Mitä suurempi massa, sen korkeampi lämpötila ytimessä – fuusioreaktiot tehostuvat lämpötilan noustessa
 - Suurimmat tähdet noin $150 M_{\odot}$ – tätä suurempien tähtien ydinfuusio käy niin tehokkaaksi, että kasvava säteilypaino puhaltaa ylimääräisen massan pois (joskin tätäkin massiivisempia tähtiä on mahdollisesti löydetty, mikä on vaikea selittää)
- Vetyä heliumiksi ytimessään fuusioiva tähti on *pääsarjan tähti* – raskaampien alkuaineiden fuusiota tapahtuu *jättiläistähdissä*



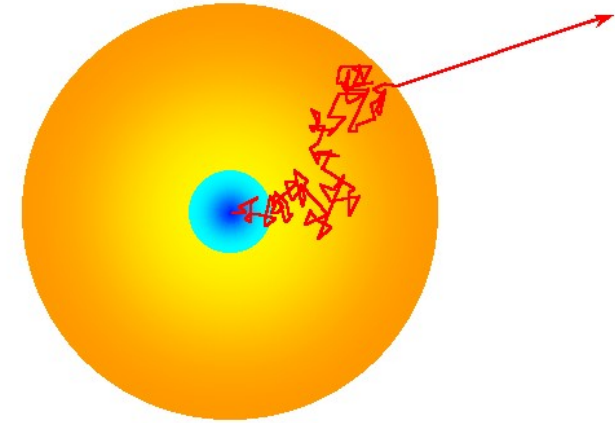
Eri reaktioketjuja vedyn fuusioitumiselle heliumiksi. Vasemmalla Auringossa vallitseva pp-I ketju (protoni-protoni), seuraavana hieman kuumemmissa lämpötiloissa vallitsevat pp-II ja pp-III ketjut, missä muodostetaan väliaikaisesti litiumia, berylliumia ja booria, jotka sitten hajoavat heliumiksi. Oikealla massiivisten tähtien vielä kuumemmissa ytimissä vallitseva CNO-sykli, missä hiili, typpi ja happi toimivat reaktion katalysaattoreina. Kuvat: Sarang, Uwe W, Hovereel Xiaomao123 Uwe_W, Borb



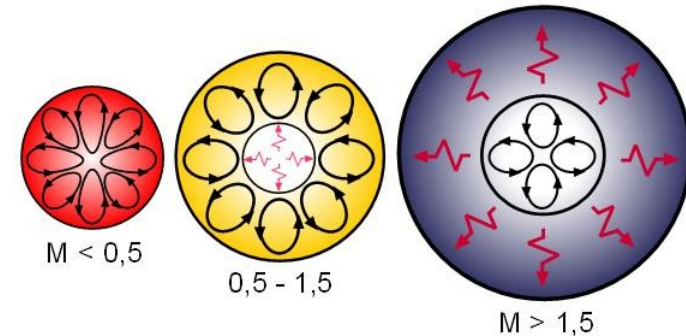
Vielä korkeammissa lämpötiloissa (jättiläistähdissä) helium alkaa fuusioitua hiileksi kolmialfareaktiossa. Kuvat: Borb, RJHall

Energian siirtyminen

- Energia syntyy tähden ytimessä gammafotoneina
- Säteily ei pääse etenemään tiheässä plasmassa, vaan fotonit absorboituvat jatkuvasti plasmahiukkasiin
 - Energia emittoidaan useampana pitemmän aallonpituuden fotonina satunnaisiin suuntiin
- Säteilyvyöhykkeissä säteily etenee satunnaisesti poukkoillen hitaasti ulospäin, lämmittäen tähden ylempiä kerroksia
- Konvektiovyöhykkeissä (eri syvyyksillä eri massaisissa tähdissä) energia etenee paljon nopeammin konvektiovirtauksissa, joissa kuumaa plasmaa nousee ylemmäs, ja jäähtyttyään vajoaa taas alas
- Energialla kestää jopa miljoona vuotta päästä tähden pinnalle, missä fotoneilla on vähemmän energiaa
 - Pinnalle päästyään fotonit kulkevat esteettä tyhjän avaruuden läpi pääosin näkyvänä valona ja infrapunana



Kuva: Richard Pogge



Tähtien spektrit

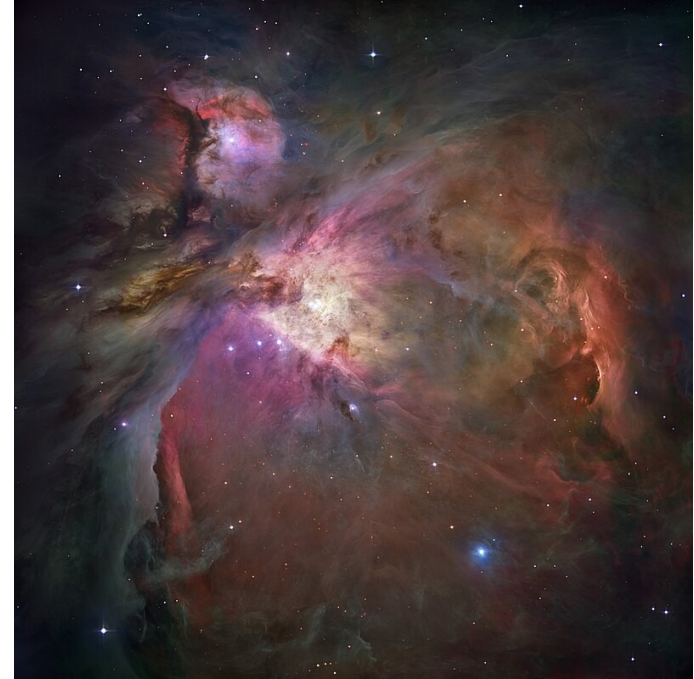
- Tähtien säteily pääosin mustan kappaleen säteilyä
 - Mitä kuumempi tähden pinta, sitä kirkkaampi ja sinisempi tähti
- Lisäksi spektriviivat kertovat mm. tähden kemiallisesta koostumuksesta, pyörimisestä, magneettikentästä...
- Tähdet jaettu eri spektriluokkiin sinisistä punaisiin: O, B, A, F, G, K, M

Eri massaisia tähtiä

Luokka	Pintalämpötila	Väri	Massa (M_{\odot})	Säde (R_{\odot})	Kirkkaus (L_{\odot})	Osuus pääsarjan tähdistä Linnunradassa
O	$\geq 30\,000\text{ K}$	Sininen	≥ 16	$\geq 6,6$	$\geq 30\,000$	0,00003%
B	10 000–30 000 K	Syvän sinertävän valkoinen	2–16	1,8–6,6	25–30 000	0,13%
A	7 500–10 000 K	Sinertävän valkoinen	1,4–2	1,4–1,8	5–25	0,6%
F	6 000–7 500 K	Valkoinen	1,04–1,4	1,15–1,4	1,5–5	3%
G	5 200–6 000 K	Kellertävän valkoinen	0,8–1,04	0,96–1,15	0,6–1,5	7,6%
K	3 700–5 200 K	Kalpea keltaoranssi	0,45–0,8	0,7–0,96	0,08–0,6	12,1%
M	2 400–3 700 K	Vaalea punaoranssi	0,08–0,45	$\leq 0,7$	$\leq 0,08$	76,45%

Tähtien synty

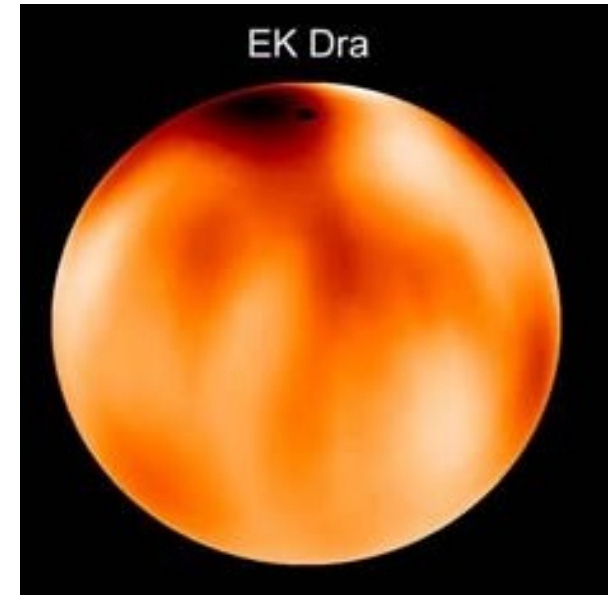
- Kylmien pölypilvien sisällä gravitaatio luhistaa kaasua ja pölyä tehokkaimmin kasaan
 - Mahdollisesti myös jokin ulkoinen tekijä, esimerkiksi läheinen supernovaräjähdyks, sysäämässä prosessia liikkeelle
- Pilvi fragmentoituu muutamiksi tai jopa tuhansiksi tähdiksi
- Prototähti säteilee luhistumisesta vapautuvaa potentiaalienergiaa, ympärillä protoplanetaarisessa kiekossa syntyy planeettoja
- Kun fuusioreaktiot lopulta käynnistyvät, tähti siirtyy pääsarjaan
 - Aikaa on kulunut tähden massasta riippuen kymmeniä tuhansia (massiiviset tähdet) tai jopa satoja miljoonia vuosia (kevyet tähdet)



Orionin suuri kaasusumu on meitä lähin suuri tähtiensyntyalue. Kuva: NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) and the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team.

Nuoret tähdet

- Vastasyntynyt tähti pyörii nopeasti
 - Ajan myötä pyöräminen hidastuu tähtituulen viedessä pyörämiss määrää ulos tähdestä
- Nopeasti liikkuva plasma synnyttää voimakkaan magneettikentän
 - Paljon suurempia tähdenpilkkuja ja voimakkaampia purkauksia kuin Auringossa



EK Draconis on nuorta Aurinkoa muistuttava tähti. Kuva: Strassmeier (2009)

Avoimet tähtijoukot

- Samasta tähtiensyntyaalueesta syntyneet tähdet muodostavat aluksi yhtenäisen joukon, avoimen tähtijoukon
 - Sisältää tyypillisesti joitain satoja tai tuhansia tähtiä
- Joukko pysyy koostaan riippuen yhdessä kymmeniä tai satoja miljoonia vuosia
- Ajan myötä tähdet ajautuvat erilleen
 - Tähtiassosiaation tähdet eivät ole enää yhdessä, mutta niiden liikkeistä pystytään edelleen päättelemään yhteinen alkuperä, esim. Otavan liikkuva ryhmä



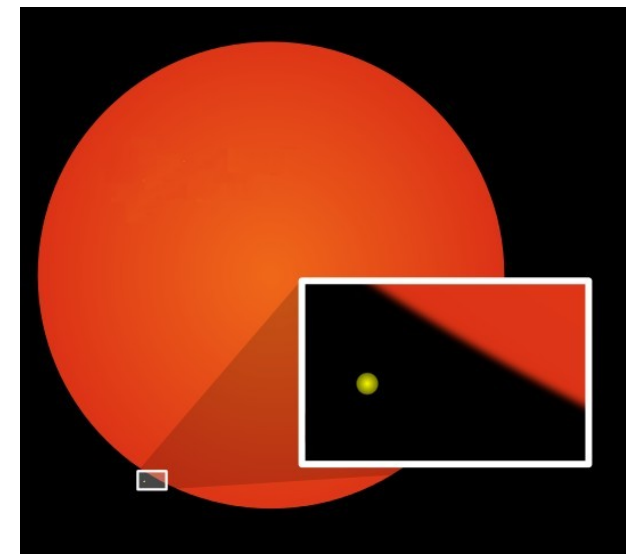
Seulaset eli Plejadit on tunnettu avoin tähtijoukko.

Vanhat tähdet

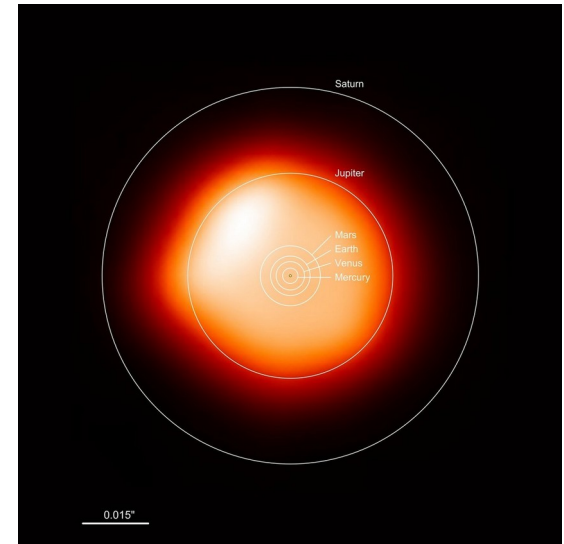
- Mitä massiivisempi tähti on, sitä nopeammin se kuluttaa vetynsä
 - Auringon massaiselle riittää noin 10 miljardiksi vuodeksi
 - Massiiviset tähdet (esim. yli $10 M_{\odot}$) käyttävät koko energiavarastonsa muutamassa miljoonassa vuodessa, kevyimmillä taas riittää tuhansia miljardeja vuosia
- Vedyn loputtua ytimestä fuusioreaktiot siirtyvät ympäröivään kuoreen – ydin puristuu kasaan ja kuumenee entisestään
 - Energiantuotanto tehostuu, kasvava säteilypaino paisuttaa tähden ulko-osia – tähti muuttuu jättiläistähdiksi (vaatii noin $0.3 M_{\odot}$ – tätä pienemmät tähdet muuttuvat suoraan valkoisiksi kääpiöiksi)
- Lopulta ytimen lämpötila on noussut riittävästi jotta helium alkaa fuusioitua hiileksi (kolmialfareaktio)
- Loppuvaiheillaan erityisesti massiiviset tähdet menettävät suuren osan massastaan voimakkaissa tähtituulissa

Jättiläistähdet

- Jättiläisvaiheeseen siirtyessään tähden ulko-osat paisuvat kasvavan säteilypaineen takia
- Punaisen jättiläisen pinta on viileä, mutta tähti on kirkas suuren kokonsa takia
- Punaisena jättiläisenä Auringon pinta tulee paisumaan noin Maan kiertoradalle
- Suurimmat ylijättiläiset (kuten alemman kuvan Betelgeuze) ylettyisivät Auringon paikalla yli Jupiterin kiertoradan



Kuvat: Oona Räisänen & ESO

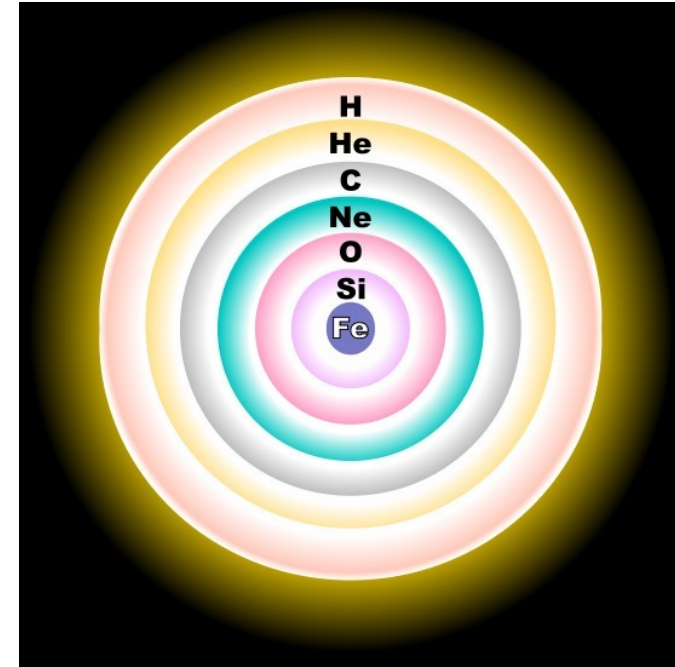


Kehityksen päätepisteet

- Alkujaan alle noin $8 M_{\odot}$ tähdet päätyvät lopulta valkoisiksi kääpiöiksi
 - Ydin puristuu maapallon kokoiseksi, ulko-osat muodostavat planetaarisen sumun, joka leviää ympäröivään avaruuteen, rikastaen sitä fuusioissa syntyneillä metalleilla
- Massiivisemmat tähdet päättävät päivänsä supernovaräjähdyksessä
 - Supernovajäänne leviää ympäröivään avaruuteen
 - Ydin saattaa luhistua neutronitähdeksi tai mustaksi aukoksi

Massiivisten tähtien nukleosynteesi

- Massiivisimmat tähdet tuottavat ytimissään raskaampia alkuaineita aina rautaan asti
 - Rautaytimellä kaikista alkuaineista korkein sidosenergia => kevyempien aineiden fuusio raudaksi vapauttaa energiaa, mutta raudan fuusio raskaammiksi atomeiksi vaatii energiaa
- Loppuvaiheilla tähden sisäosiin muodostuu eri alkuaineista koostuvia kuoria, joissa fuusioreaktiot ovat eri vaiheissa
- Jättiläistähtien kaasukehissä sopivat olosuhteet *neutronisieppaus* prosesseille – rautaa raskaammat atomit kasvattavat hitaasti massaansa



Kuva: R. J. Hall

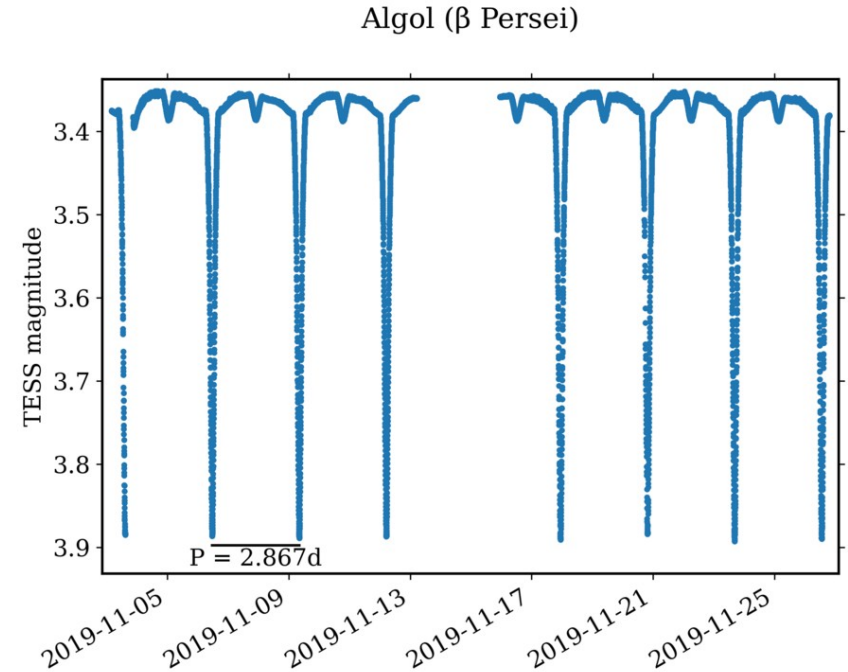
Kaksoistähdet

- Noin kolmasosa tähdistä on kaksoistähtiä tai useampien tähtien järjestelmissä
 - Massiivisista tähdistä suurin osa kaksoistähtiä, kevyemmät useammin yksinäisiä
- Kaksoistähtien etäisyys toisistaan vaihtelee paljon
 - Kaukana toisistaan olevat voidaan erottaa erillisinä kohteina: visuaaliset kaksoistähdet
 - Tiiviimmin yhdessä olevat kaksoistähdet voidaan erottaa pimennyksistä (fotometriset kaksoistähdet), spektristä (spektroskopiset kaksoistähdet) tai tähden liikkeestä (astrometriset kaksoistähdet)



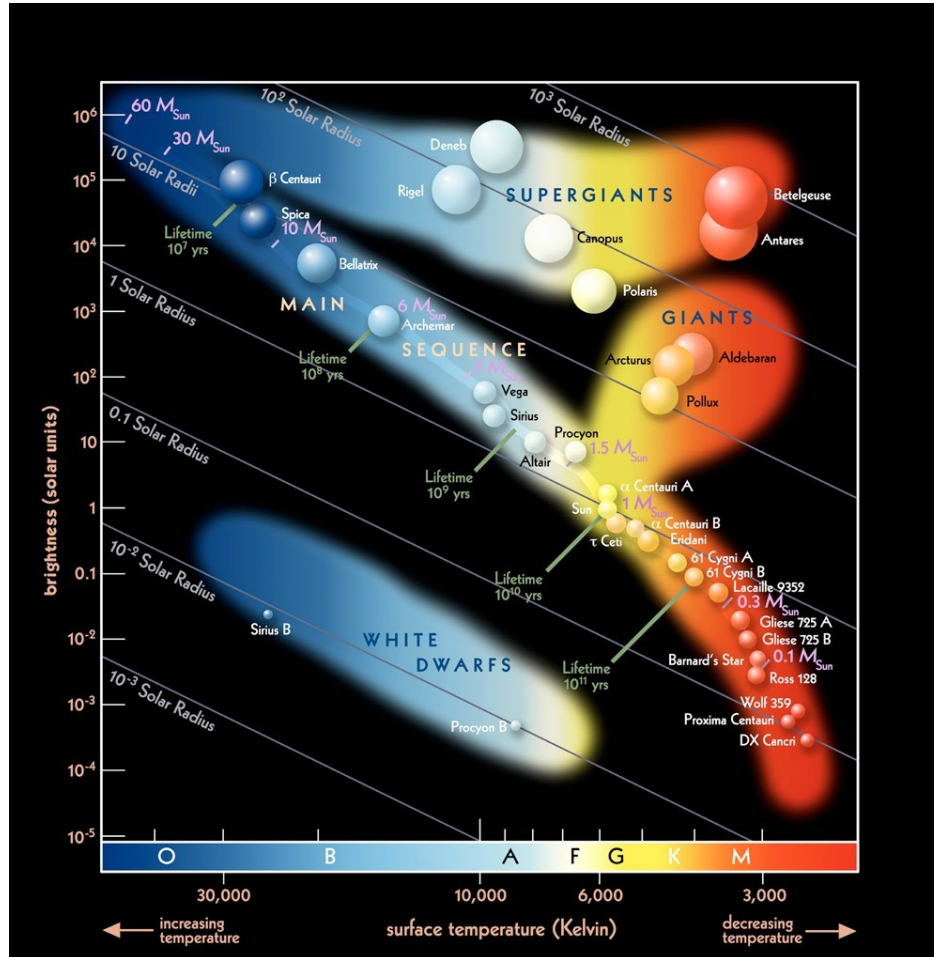
Muuttuvat tähdet

- Tähtiä joiden kirkkaus muuttuu merkittävästi
 - Tarkalleen ottaen jokainen tähti on muuttuja!
- Yleensä nuoria tai vanhoja tähtiä
 - Sykkivät muuttujat: enemmän tai vähemmän säännöllistä sykkimistä
 - Pyörivät muuttujat: epätasainen pinta mm. tähdenpilkkujen takia
 - Purkautuvat muuttujat: flaretähdet, novat (supernovat)
 - Pimennysmuuttujat: kaksoistähtiä jotka säännöllisesti pimentävät toisensa
- Tunnetuimpia esimerkkejä Algol, Mira



Algolin valokäyrä TESS-avaruusteleskoopin datasta. Säännölliset himmenemiset syntyvät kaksoistähden komponenttien peittäessä toisiaan. Kuva: Warrickball

HR-diagramma



Pallomaiset tähtijoukot

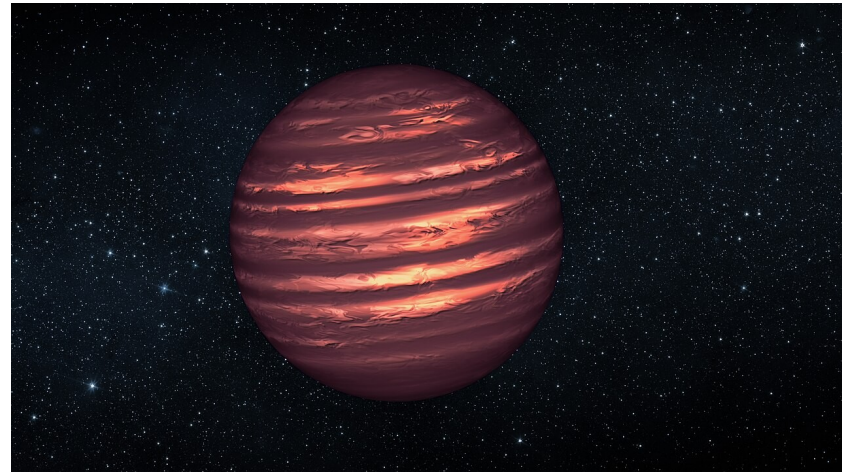
- Massiivisempia kuin avoimet tähtijoukot, tyypillisesti satoja tuhansia tähtiä
- Gravitaatio pitää joukon kasassa, yleensä hyvin vanhoja tähtiä
- Suurin osa galaksien ulko-osissa



Pallomainen tähtijoukko Messier 80.
NASA, The Hubble Heritage Team, STScI, AURA.

Ruskeat kääpiöt

- Tähtien ja planeetan välimuoto, massa noin $13 M_{\text{Jupiter}} - 0.08 M_{\odot}$ ($\approx 80 M_{\text{Jupiter}}$)
 - Jos massa ylittää $0.08 M_{\odot}$, vedyn fuusioreaktiot alkavat
 - 13 Jupiterin massainen kohde pystyy fuusioimaan deuteriumia (raskasta vetyä) heliumiksi, mutta tämä energiavarasto on paljon rajallisempi
- Koko noin Jupiterin luokkaa
- Syntyminen epäselvä: tähtien tapaan (luhistumalla kaasu/pölypilvestä) vai planeettojen tapaan (protoplaneetaarisessa kiekossa)?
- James Webb on löytänyt Orionin kaasusumusta yli 500 omillaan olevaa planeetan kokoista kappaletta ($< 13 M_{\text{Jupiter}}$)
 - Kulkuriplaneettoja / "ruskeita alikäpiöitä"?
 - Vapaana kulkevat "planeetat" luultavasti hyvinkin yleisiä; ovatko syntyneet omillaan vai ajautuneet ulos tähtensä ympäriltä?



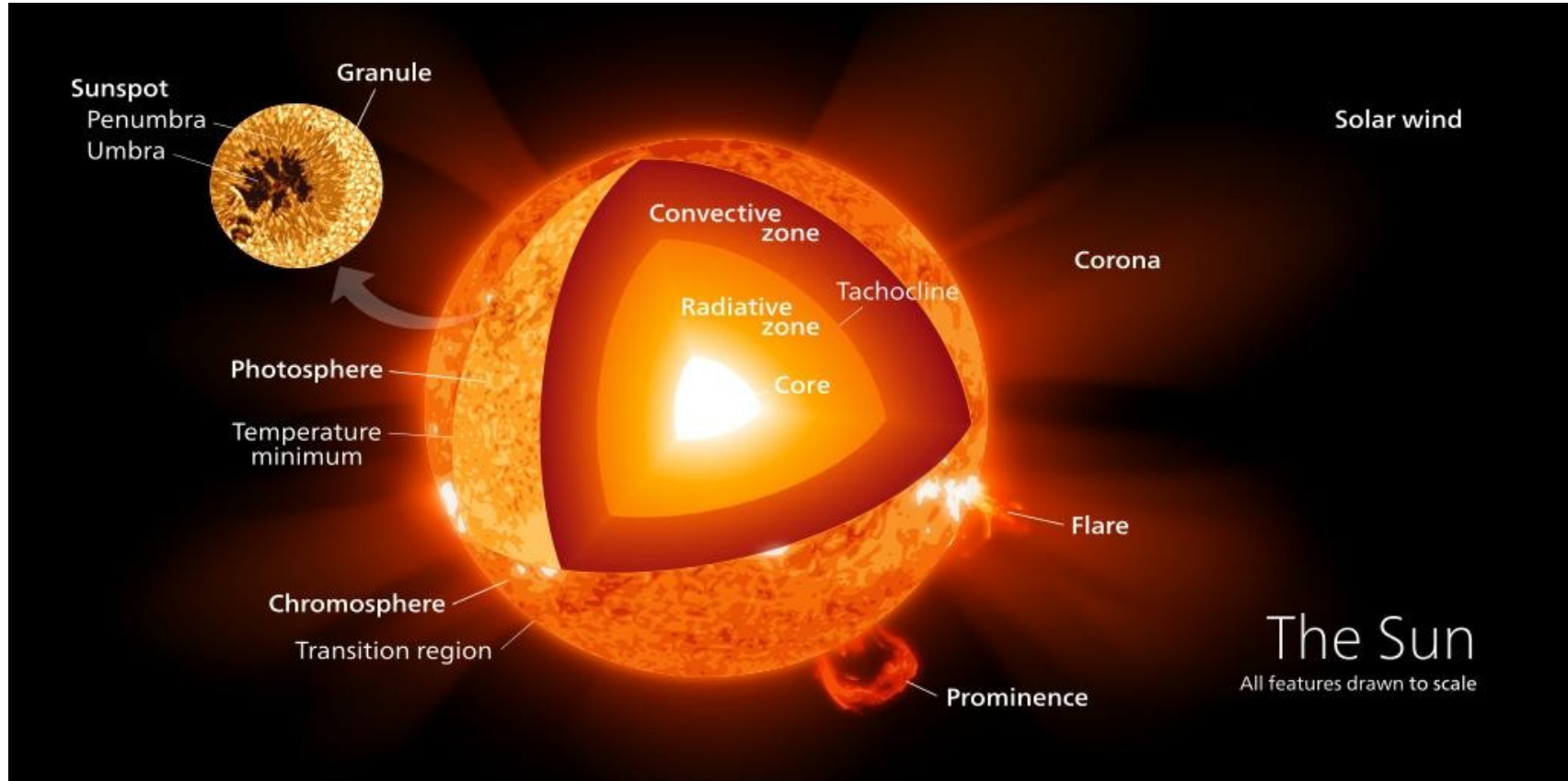
Kuva NASA/JPL-Caltech

Aurinko



Aurinko

- 4.6 miljardia vuotta vanha G2 spektriluokan pääsarjan tähti
- 73.5% vetyä, 25% heliumia, 1.5% "metalleja"
- Massa 2×10^{30} kg (333 000 x Maan) = $1 M_{\odot}$
- Säde 696 000 km (109 x Maan) = $1 R_{\odot}$
- Pintaämpötila 5800 K, ytimessä 15 miljoonaa K
- Protoni-protoni-I -ketju tuottaa ytimessä energiaa fuusioimalla 600 miljoonaa tonnia vetyä sekunnissa 596 miljoonaksi tonniksi heliumia ($E=mc^2$)
- Pääsarjassa massaa häviää alle 0.1% (fuusioreaktioihin sekä aurinkotuuleen)



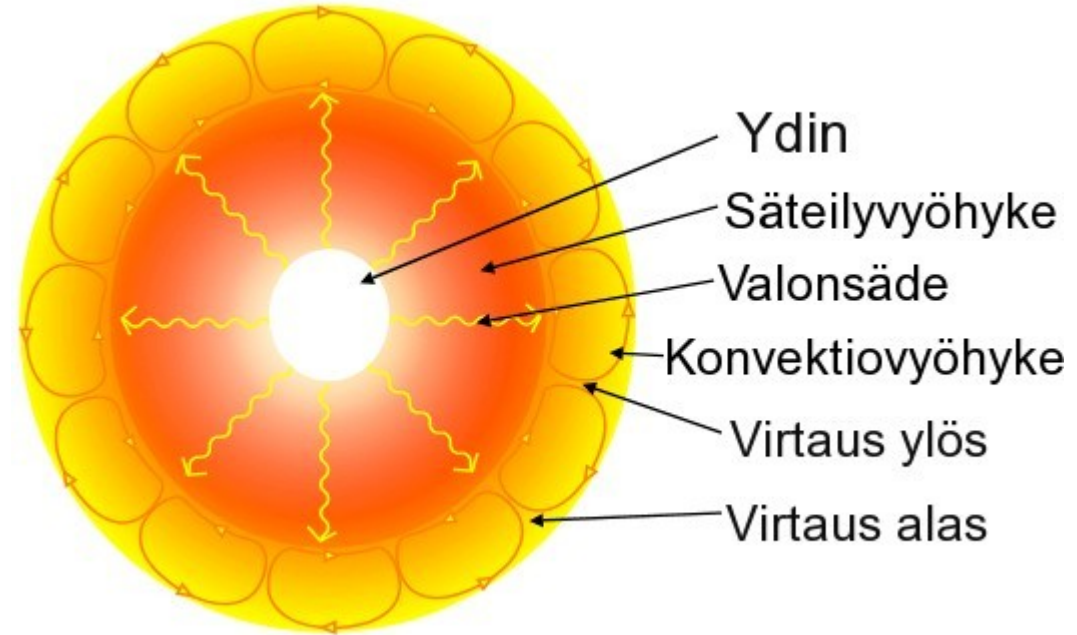
Maailmankaikkeus nyt 2026

Auringon nuoruus

- Aurinkokunta sai oletettavasti alkunsa muinaisessa tähtiensyntyalueessa (kylmässä pölypilvessä)
- Auringon "sisartähdet" sittemmin hajaantuneet ympäri galaksia, ei enää pystytä tunnistamaan
- Aluksi Aurinko pyöri nopeasti, ehkä kierroksen vuorokaudessa, mikä aiheutti voimakkaita magneettisia ilmiöitä, kuten roihupurkauksia => ajan myötä pyöriminen on hidastunut noin kuukauteen

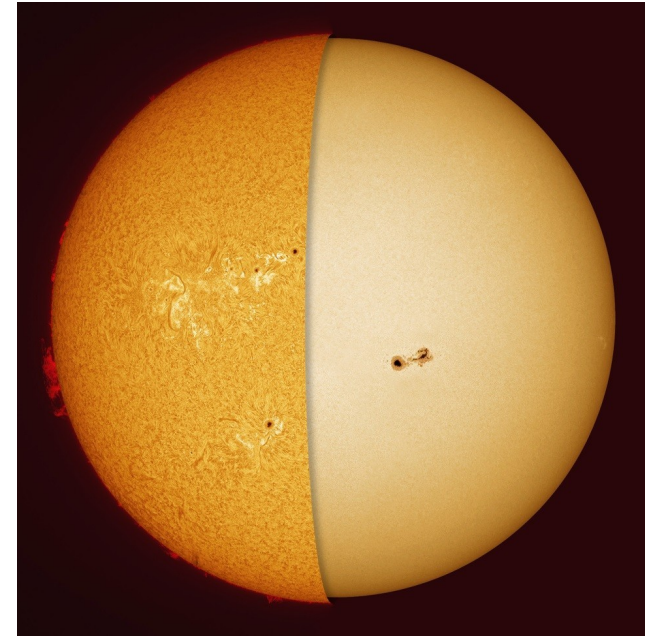
Auringon rakenne

- Ydin
 - Lämpötila ja paine riittävä fuusioreaktioita varten
- Säteilyvyöhyke
 - Ytimessä syntyneet gammasäteet etenevät satunnaisesti poukkoillen ulospäin
- Konvektiovyöhyke
 - Konvektiovirtaukset nostavat kuumaa plasmaa pinnalle

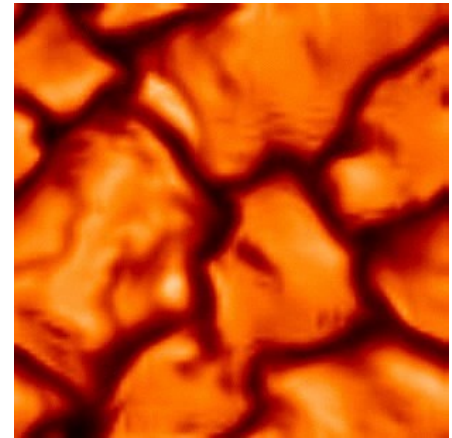


Auringon pinta

- Fotosfääri
 - Auringon "näkyvä pinta" – muuttuu säteilylle läpinäkyväksi
 - Lämpötila noin 5800 K
 - Konvektiosolut muodostavat "granulaatiota"
 - Synnyttää Auringon jatkuvan spektrin, absorptioviivat syntyvät fotosfäärin yläkerroksissa
- Kromosfääri
 - 2000 km paksu "kaasukehä" fotosfäärin yläpuolella
 - Yläkerroksen lämpötila 20 000 K – kuumenee ilmeisesti magneettikentän vaikutuksesta
 - Kuuma, harva kaasu synnyttää emissioviivoja
- Korona
 - Hyvin harvaa kaasua, lämpötila 1-2 miljoonaa astetta; yhä osin mysteeri
 - 24.12.2024: Parker Solar Probe teki historian lähimmän ohituksen koronan ulko-osien sisällä, 6.1 miljoonaa km Auringon pinnasta
- Heliosfääri
 - Aurinkotuulen vaikutusalue, yletty kauas planeettojen ratojen taakse



Ylhäällä: Auringon kromosfääri (vasemmalla) ja fotosfääri (oikealla). Kuva: Alan Friedman.
Alhaalla: Auringon pinnan granulaatiota.





Korona tulee näkyviin täydellisen auringonpimennyksen aikaan. Kuva: Steve Albers, Dennis di Cicco, Gary Emerson.

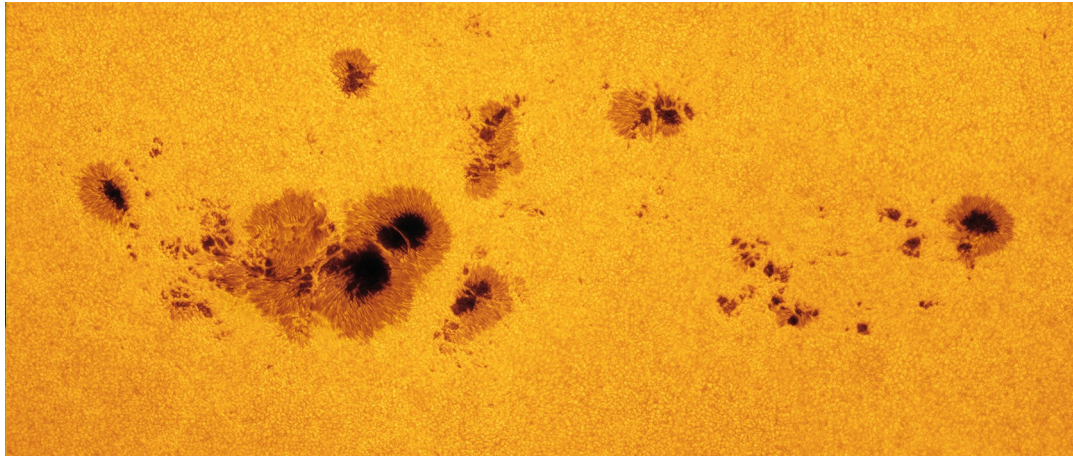
Maailmankaikkeus nyt 2026

Aurinkotuuli & heliosfääri

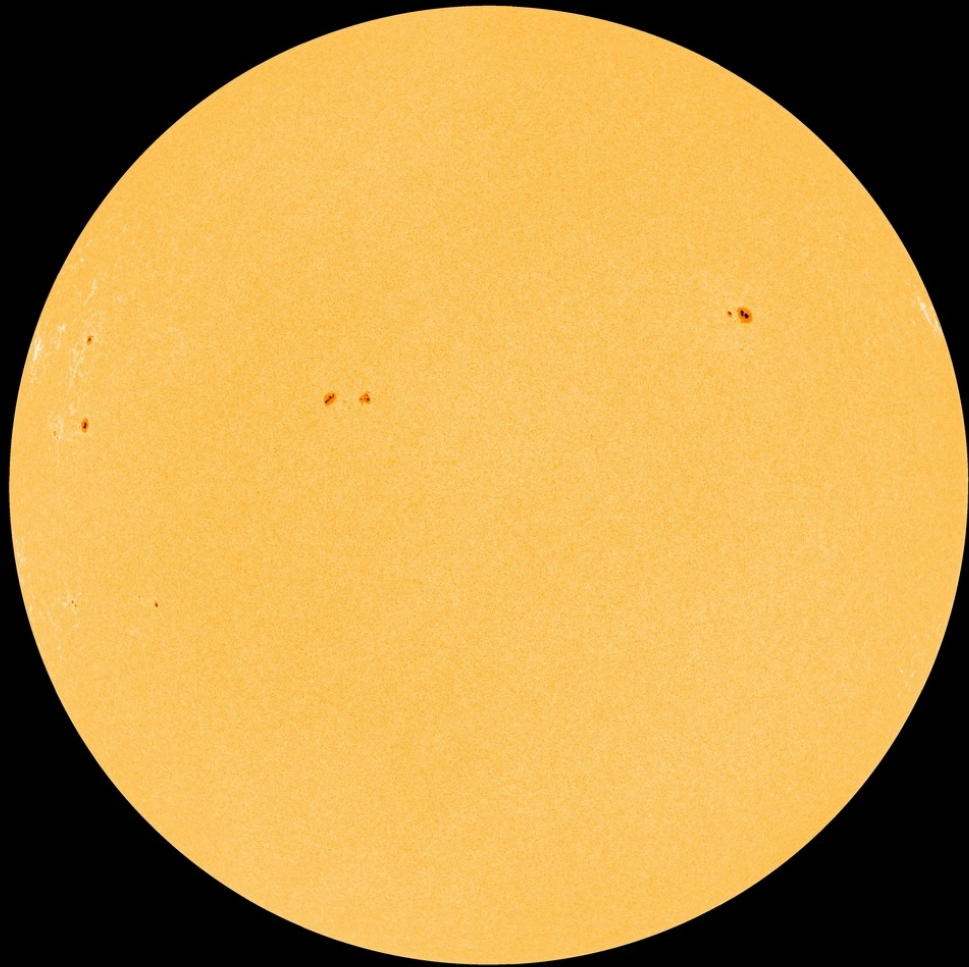
- Auringon koronasta pakenee jatkuvasti varattuja hiukkasia, pääosin elektroneja, protoneja ja alfahiukkasia (heliumytimiä)
- Hiukkasten nopeus 400-750 km/s (Maahan kestää muutama vuorokausi)
- Aiheuttavat mm. revontulia Maassa ja muilla planeetoilla
- Heliosfääriksi nimitetään aluetta jonka sisällä aurinkotuulen tiheys ylittää tähtienvälisen kaasun tiheyden
- Heliosfääri päättyy heliopaussiin n. 100 AU:n etäisyydellä
 - Voyager 1 & 2 luotaimet ohittivat heliopaussin 2012 & 2018

Auringonpilkut

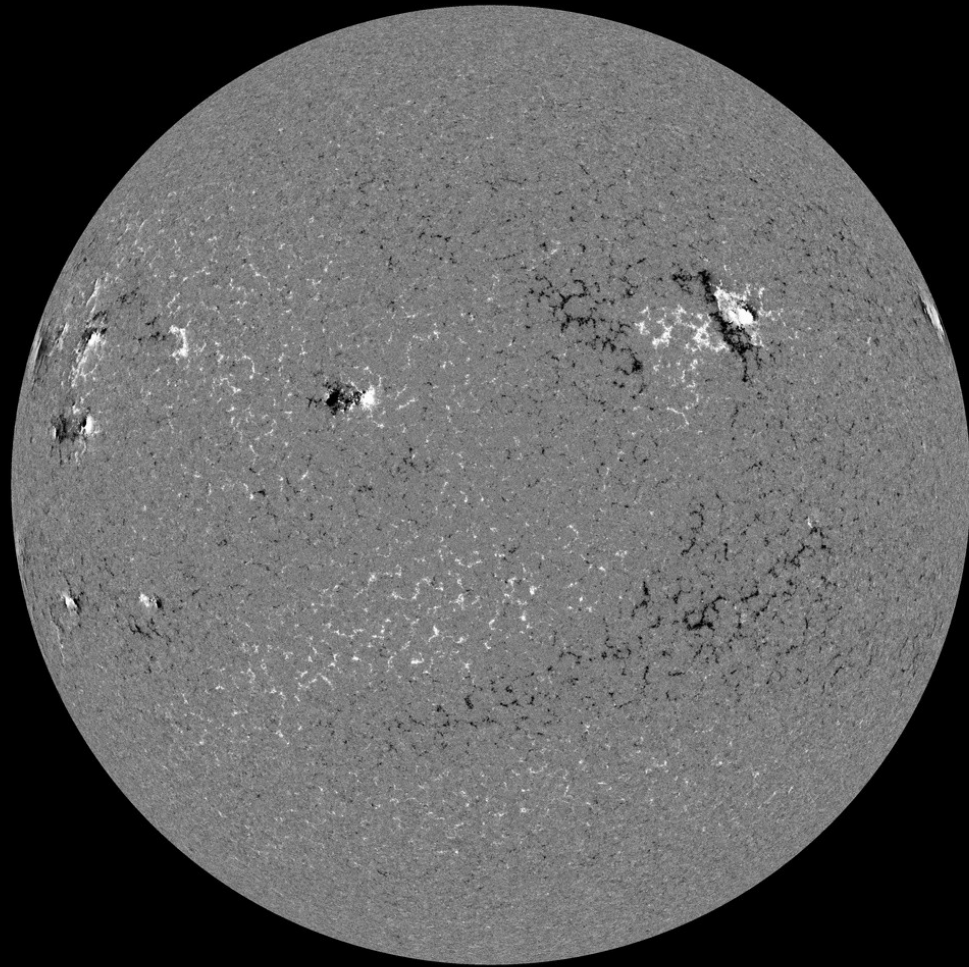
- Jo mm. muinaiset kiinalaiset huomasivat tuhansia vuosia sitten tummia läiskiä Auringon pinnalla
- Viileä (~4500 K) alue Auringon pinnassa, missä voimakas magneettikenttä estää kuumaa plasmaa nousemasta pinnalle
- Auringonpilkkujen määrää laskettu systemaattisesti kaukoputken keksimisestä asti 1600-luvun alussa (auringopilkkuluku)
 - 11 vuoden auringonpilkkusykli



Auringonpilkkuja Auringon pinnalla 2012.
Kuva: NASA Goddard Space Flight Center.



SDO/HMI Quick-Look Continuum: 20260517_164500

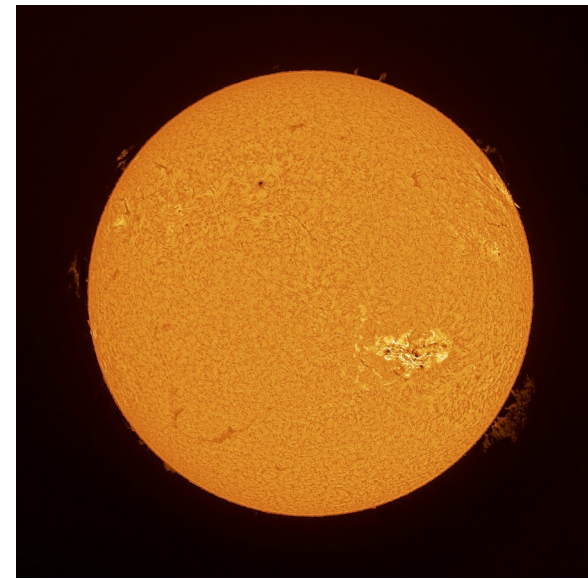


SDO/HMI Quick-Look Magnetogram: 20260517_164500

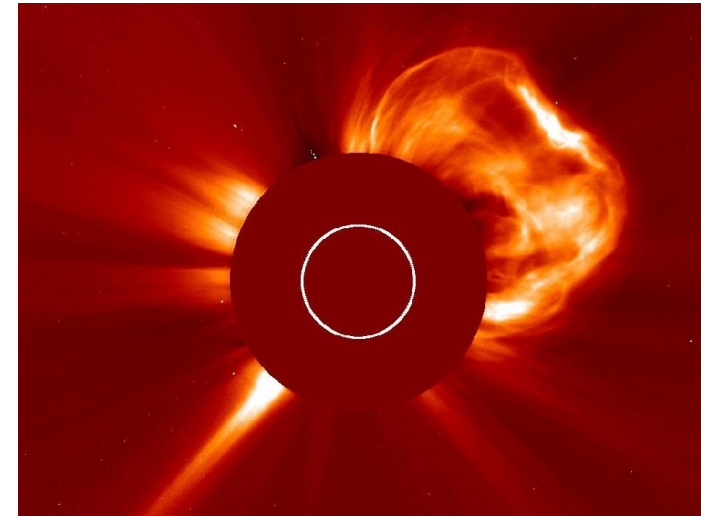
Maailmankaikkeus nyt 2026

Auringon purkaukset

- Auringon pinnalla helposti havaittavissa kaasupurkauksia: protuberansseja (näyttää kirkkaalta Auringon reunalla mustaa taustaa vasten) ja filamentteja (näyttää tummalta Auringon kiekkoa vasten)
 - Sama ilmiö nimetty erilailla riippuen missä kohdassa Aurinkoa se havaitaan
- Roihupurkaukset (flaret)
 - Pääosin säteilynä (mm. voimakasta röntgensäteilyä) vapautuva magneettikentän aiheuttama räjähdys
 - Syntyy magneettikentän nostattaman hiukkaspurkauksen pudotessa takaisin Auringon pinnalle
 - Helppo havaita myös muista tähdistä
- Koronan massapurkaukset
 - Magneettikentästä purkautuva ”lenkura” ryöpsäyttää suuren määrän sähköisesti varattuja hiukkasia pakoon Auringon koronasta – siis kuin voimakas aurinkotuulen purkaus
 - Voimakkaimmat revontulet ja muut magneettiset häiriöt aiheutuvat näistä
 - Vaikea havaita muista tähdistä

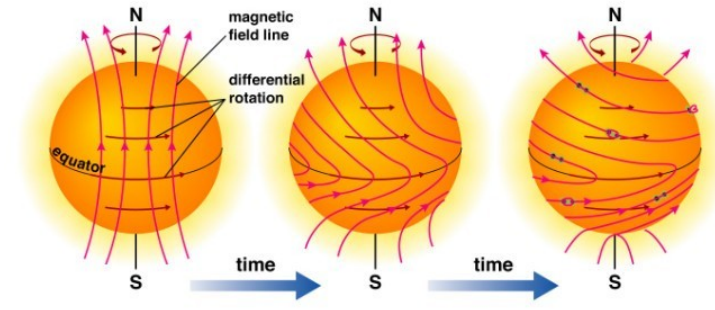


Kuvat: Samuli Vuorinen & SOHO

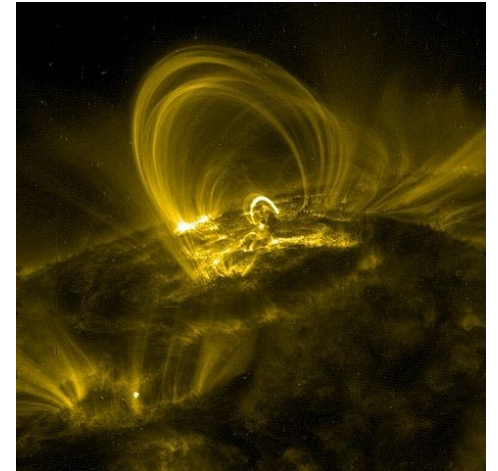


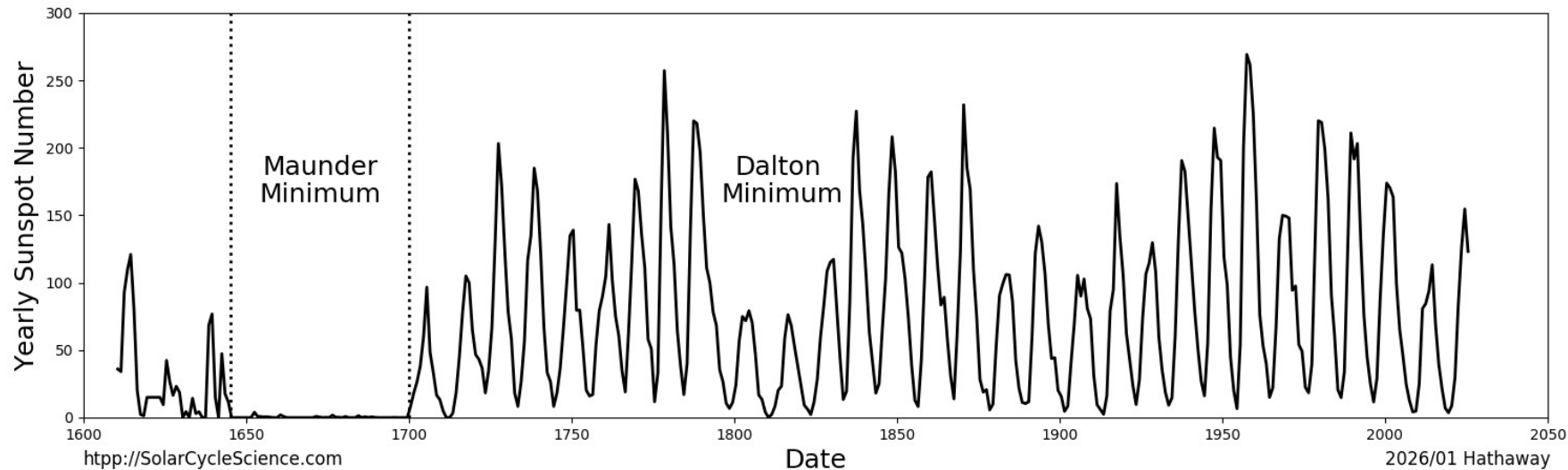
Magneettinen sykli

- *Differentiaalirotaatio*: Auringon ekvaattori pyörii nopeammin kuin navat
- Magneettikenttä kiinnittynyt plasmaan, pinnan liikkeet venyttävät kenttää: syklin myötä magneettikenttä pakkautuu tiiviimmin ja voimistuu – aktiivisuusmaksimi
- Konvektio sekoittaa magneettikenttää ylös-alas, aiheuttaen monimutkaisia lenkuroita, joista syntyy mm. koronan massapurkauksia
- Lopulta kenttäviivat hajoavat (*magneettinen rekonnektio*), ja asettuvat uudestaan alkuperäiseen *dipolim*uotoon – aktiivisuusminimi
- Sykli alkaa taas alusta, mutta nyt magneettikenttä on vaihtanut suuntaa



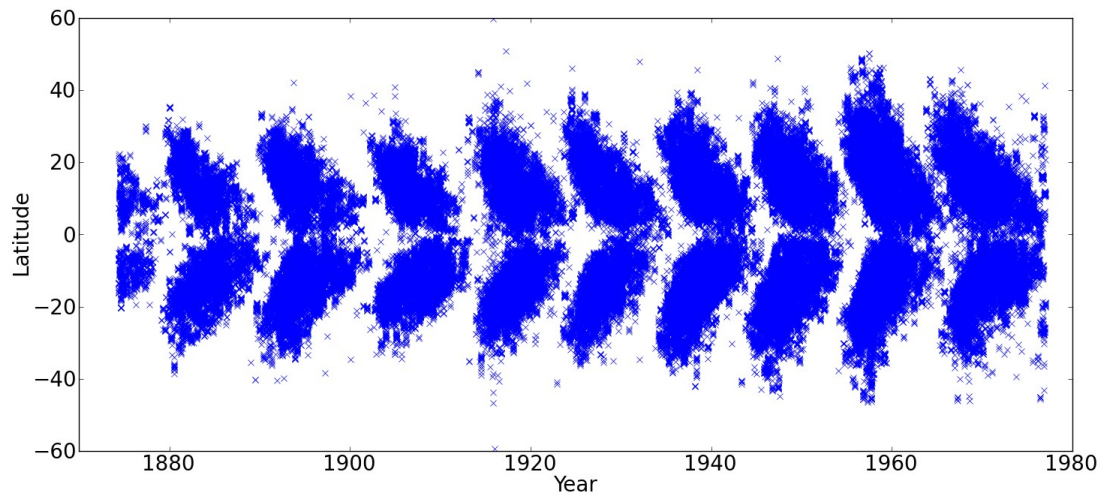
Copyright © Addison Wesley



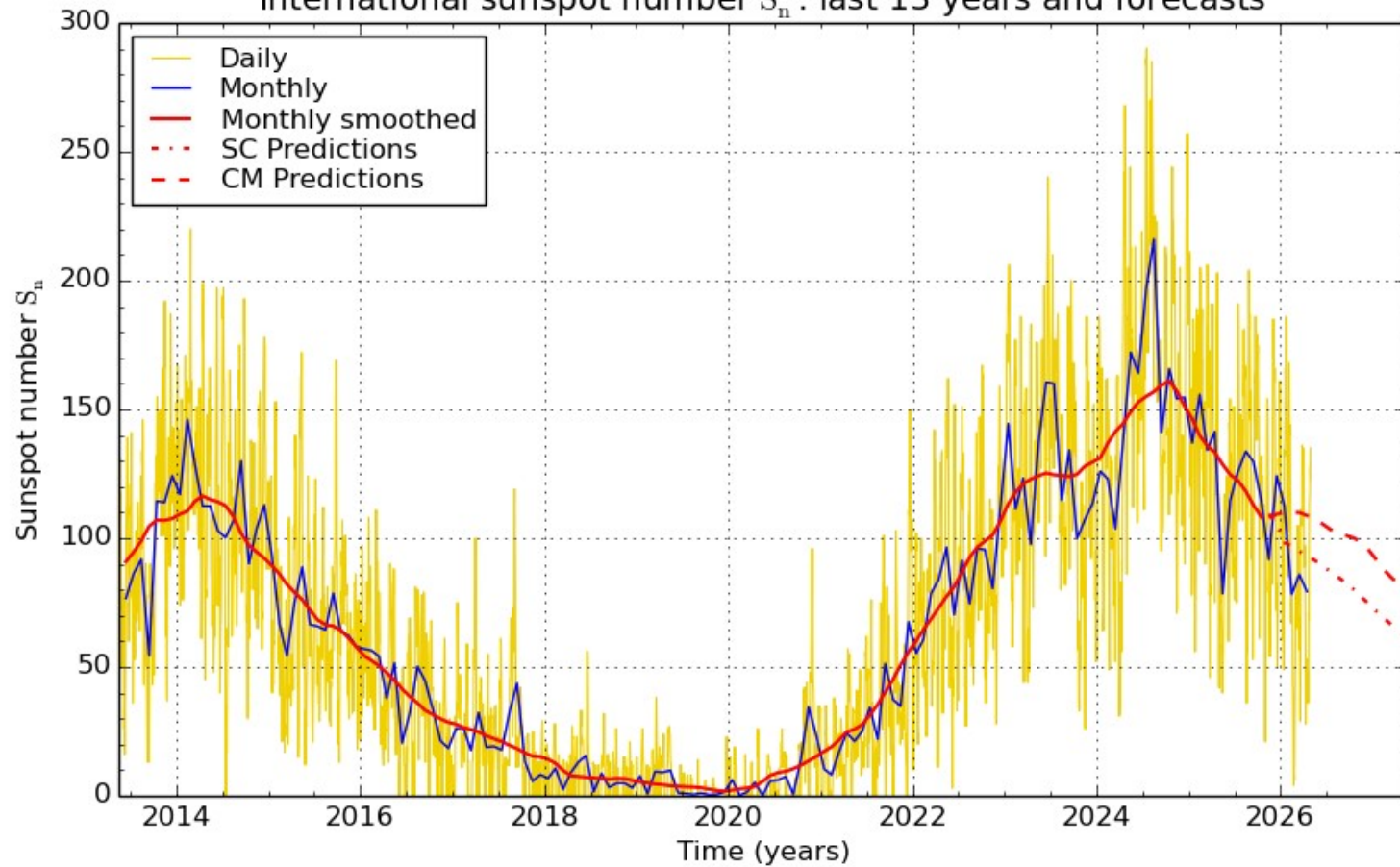


Ylhäällä: auringonpilkkuluku, missä 11 vuoden sykli näkyy selvästi. Maunderin ja Daltonin minimien aikaan auringonpilkkuja oli huomattavasti vähemmän.

Alhaalla: perhosdiagramma, josta näkyy mille leveysasteille auringonpilkut muodostuvat syklin eri vaiheissa.



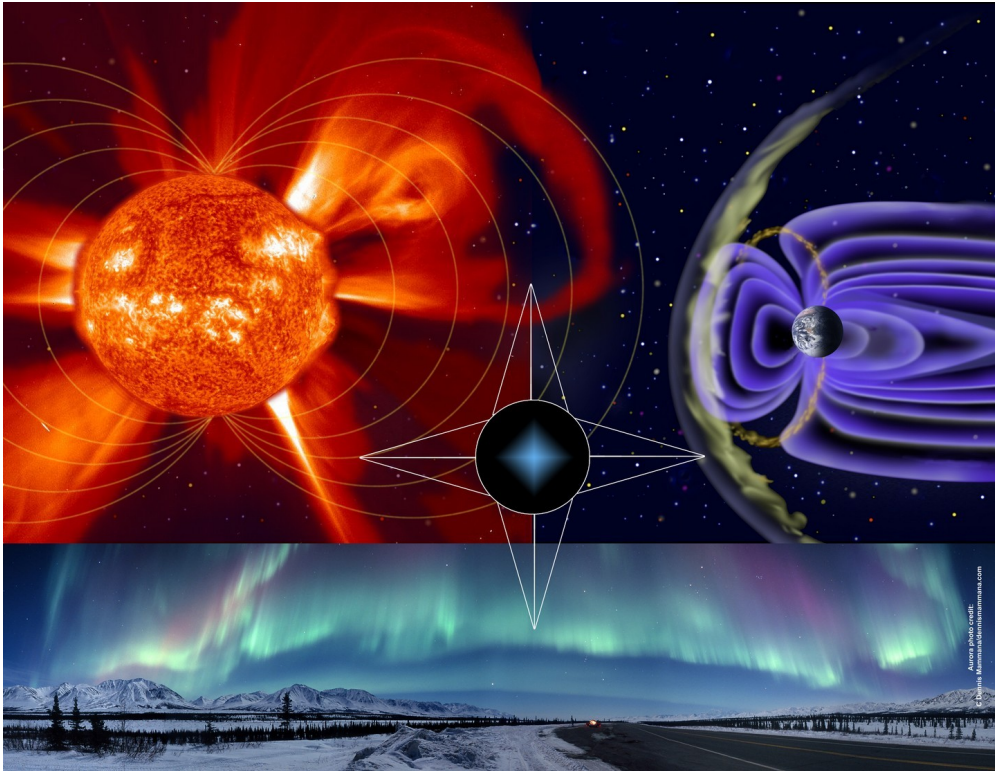
International sunspot number S_n : last 13 years and forecasts



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2026 May 1

Maailmankaikkeus nyt 2026

Vaikutukset Maahan



Kuva: SOHO

- Maan magneettikenttä suojaa Auringon hiukkasilta ja ohjaa niitä napa-alueille (mm. revontulet)
- 1859 aurinkomyrsky (Carrington Event): mittaushistorian suurin magneettinen myrsky
- Auringon aktiivisuutta pystytään tutkimaan pitemmälle menneisyyteen epäsuorin menetelmin mm. puiden vuosirenkaisiin ja jäätiköiden kerrostumiin tallentuneiden radioaktiivisten isotooppien (mm. ^{14}C) avulla
- Löydetty todisteita suurista Auringon purkauksista (tai mahdollisesti supernovista) mm. 774/775 ja 993
- Myös Maunderin minimiä vastaavia jaksoja löydetty: Spörerin minimi 1460-1550, Wolfen minimi 1280-1350, Oortin minimi 1010-1050