



Universum nu

6. Stjärnor II

Universum nu, 1.3 2024, TH



6.9.1 Små stjärnor efter huvudserien

- Massan $M < 0.3 M_{\odot}$.
- I huvudserien är stjärnan helt konvektiv => stjärnan kan använda nästan allt väte för fusion.
- När H tar slut => hydrostatiska jämvikten rubbas => kärnan komprimeras => temperaturen stiger...
- ... men inte tillräckligt för nya fusionsreaktioner.
- => Kollaps till *vit dvärg* som består av He.
- Livstiden för minsta stjärnorna är längre än universums ålder.

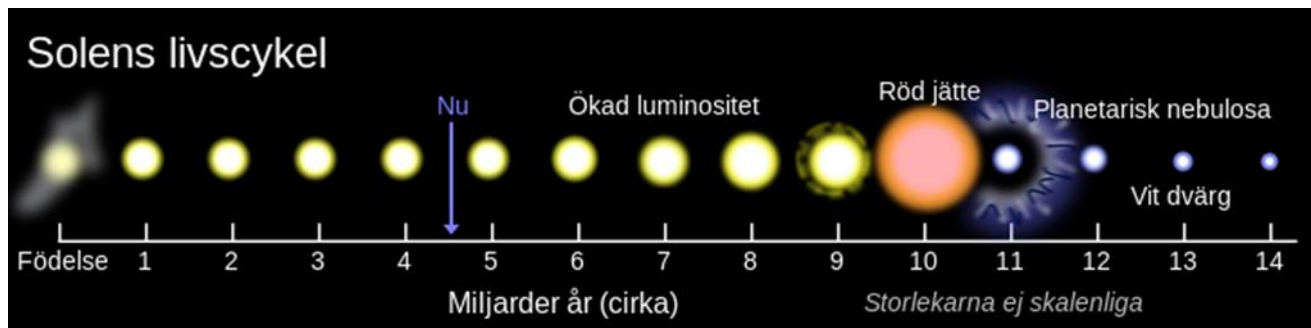


Proxima Centauri
(David Malin, UK
Schmidt Telescope).



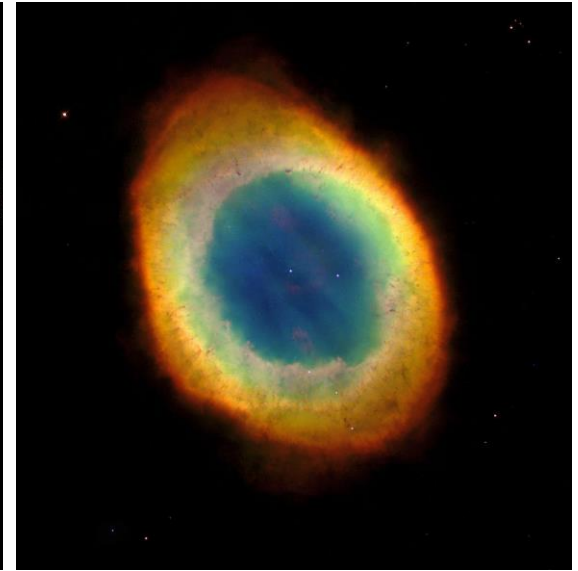
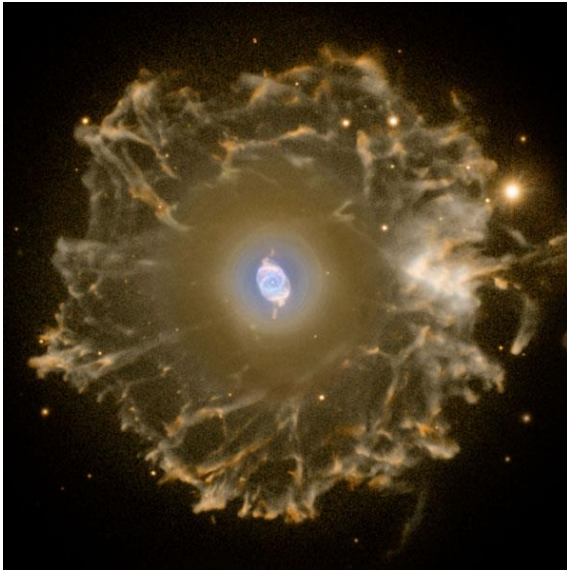
6.9.2 Solliknande stjärnors utveckling

- Stjärnor med massan $0.3 M_{\odot} < M < 8 M_{\odot}$:
 - Vätet tar slut i kärnan, men fusionen fortsätter intensivare utåt i ett skal => *röd jätte*.
 - Stjärnan blir i slutskedet instabil => kan kasta ut materia => *planetär nebulosa*
 - Beroende på massan kan nya fusionsreaktioner startas, $\text{He} \rightarrow \text{C}, \text{O}$; $\text{C}, \text{O} \rightarrow \text{Ne}, \text{Mg}$
 - När fusionsreaktionerna stannar => kollaps till *vit dvärg*





6.9.3 Planetära nebulosor

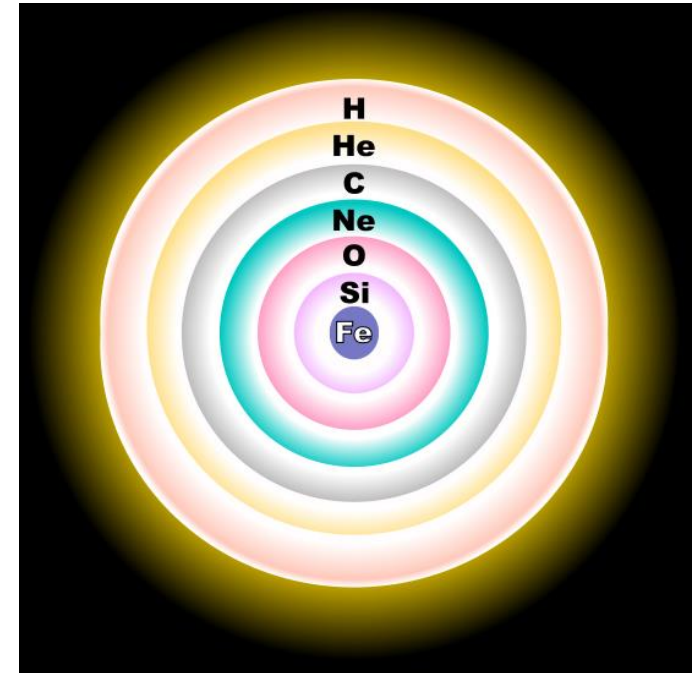


Kattögennebulosan (R. Corradi/NOT), Clownbulosan & Ringnebulosan (NASA/ESA/STSci).



6.9.4 Stora stjärnor efter huvudserien

- Stjärnans massa $M > 8 M_{\odot}$:
 - => *Röd jätte*
 - Successiva fusionsreaktioner startar med allt tyngre atomkärnor.
 - => Skal av olika grundämnen där fusion sker: "Lökaktig" struktur.
- Om massan $> \text{ca } 10 M_{\odot} \Rightarrow$ fusion ända till Fe.
- Fusionsreaktionerna i kärnan upphör => kärnan kollapsar => *supernova*.
- Kvar blir troligen en *neutronstjärna* eller ett *svart hål*.

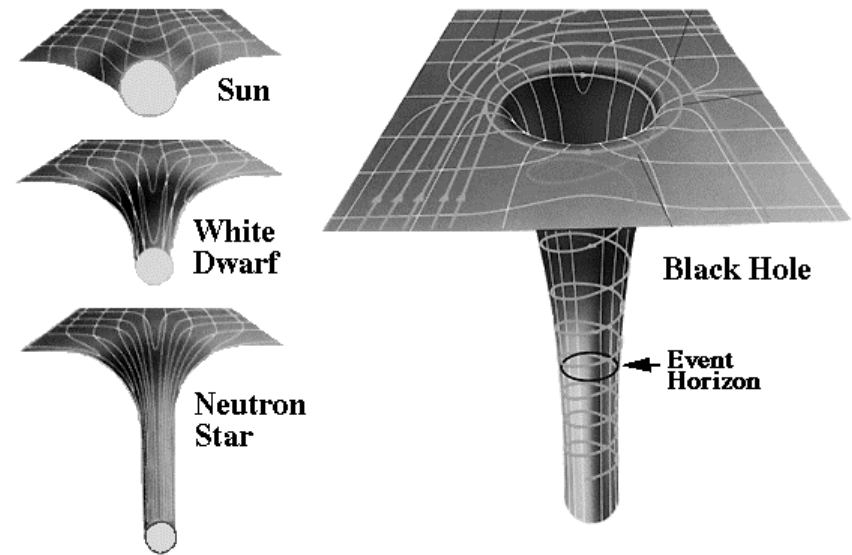


Krabb-
nebulosan
(Hubble ST)



6.10 Kompakta stjärnor

- Slutprodukten av stjärnors utveckling:
 - Mindre stjärnor => *Vita dvärgar (+planetär nebulosa).*
 - Större stjärnor => *Neutronstjärnor.*
 - Största stjärnorna => *Svarta hål.*

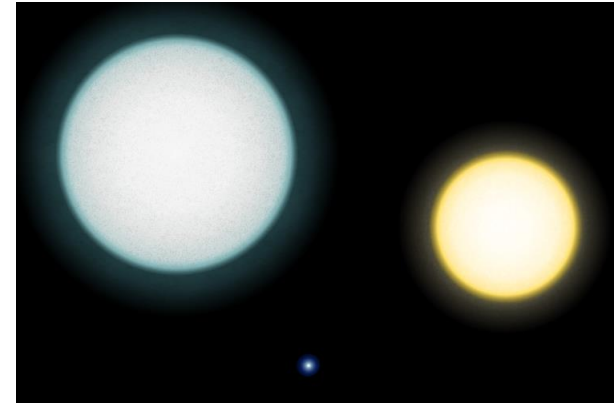


Relativistisk effekt av massan:
Krökning av tid-rymden



6.10.1 Vita dvärgar

- Massan $M < 1.4 M_{\odot}$.
- Radien \sim terrestriell planet.
- Består av *degenererade* elektroner + de sista fusionsreaktionernas atomkärnor.
 - Beroende på massan He, C, O, Ne, Mg.
- Degenererad \Rightarrow större massa \Leftrightarrow mindre radie!
- Unga vita dvärgar omges ofta av *planetär nebulosa*.
- Producerar ingen ny energi \Rightarrow svalnar långsamt \Rightarrow *svart dvärg*.



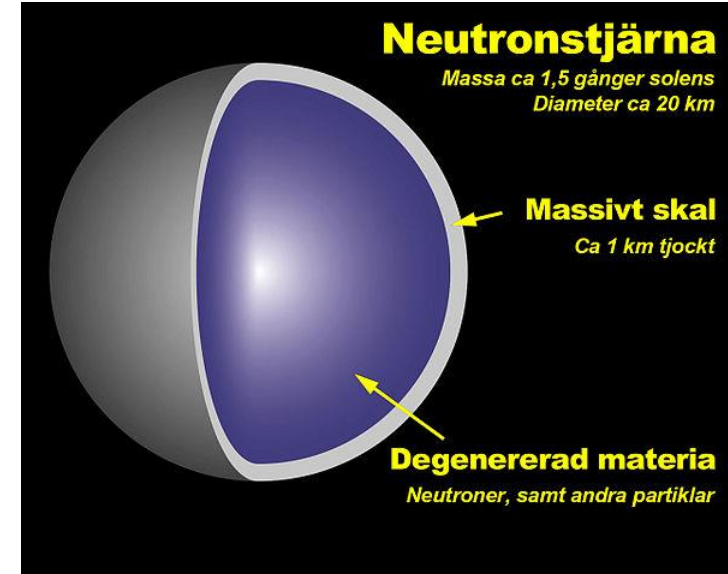
IK Peg A och B (vit dvärg) samt solen i samma skala (RJ Hall).



Kattögennebulosan (Hubble ST)

6.10.2 Neutronstjärnor

- Kollapsande stjärnkärnans massa $> 1.4 M_{\odot}$.
- Typisk diameter ~ 20 km.
- Densiteten inne i neutronstjärnor $\sim 10^{18}$ kg/m³.
- Antas bestå mest av *degenererade neutroner* eller andra elementarpartiklar.
- Tunt ytlager med tyngre grundämnen.
- Starkt magnetfält.
- Roterar ofta snabbt, ex *pulsarer* med $P_{\text{rot}} \sim 1/100$ s.



Bilder: Wikipedia och NASA.

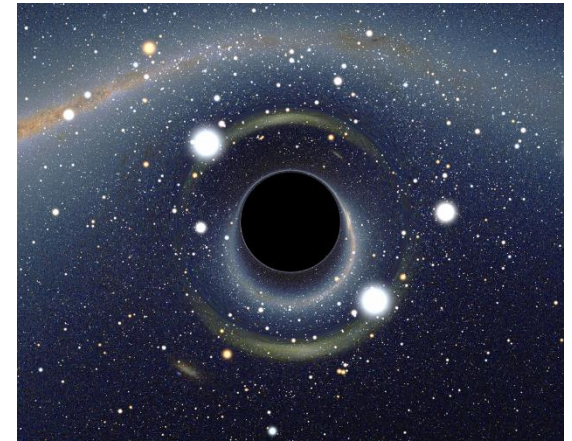


6.10.3 Svarta hål

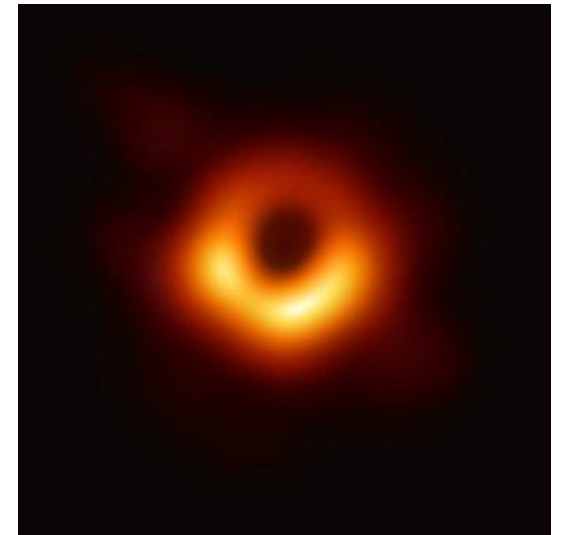
- Kollapsande stjärnkärnan $> 3-4 M_{\odot}$.
- Gravitationen vid ytan så stor att flykthastigheten $>$ ljusets hastighet.
- \Rightarrow Inget kommer ut innanför Schwarzschild-radien:

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

- Kan observeras indirekt:
 - Materia accelereras kring svarta hålet.
 - Ljuset böjning i gravitationsfältet.
- Supermassiva svarta hål finns i centrum av galaxer.



Simulation av svart hål (Riazuelo, 2018).



"Skuggan" av det svarta hålet i M87 (Event Horizon Telescope).



Uppgift

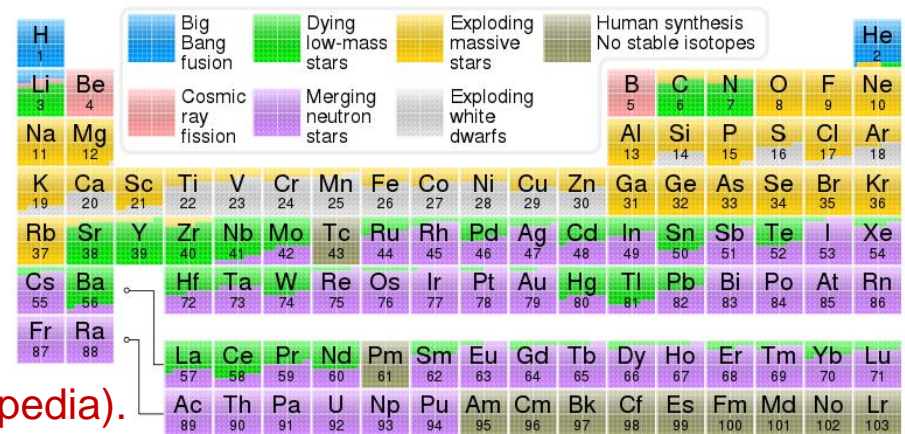
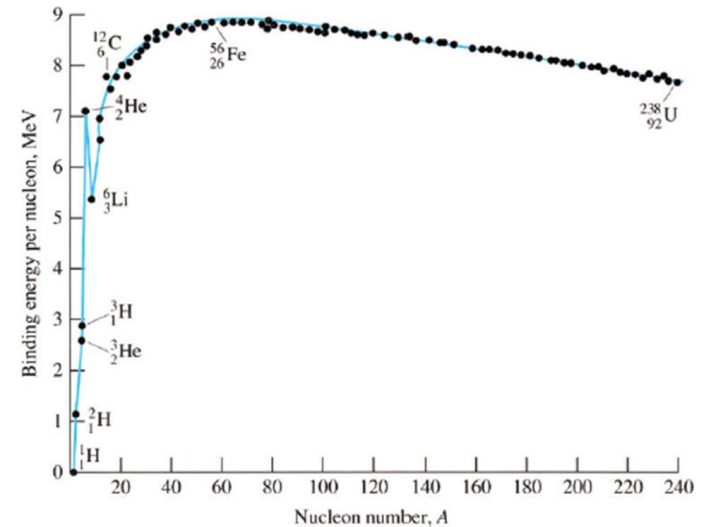
- Varför är det osannolikt att utvecklat liv skulle finnas på en planet som kretsar kring en stjärna av spektralklassen O?



6.11 Stjärnors utveckling och grundämnena i universum

- Ursprungligen fanns (nästan) bara H och He i universum.
- Alla tyngre ämnen har uppkommit via stjärnors utveckling:
 - → Fe via fusionsreaktioner i stjärnan.
 - Tyngre ämnen vid t.ex. Supernovor.

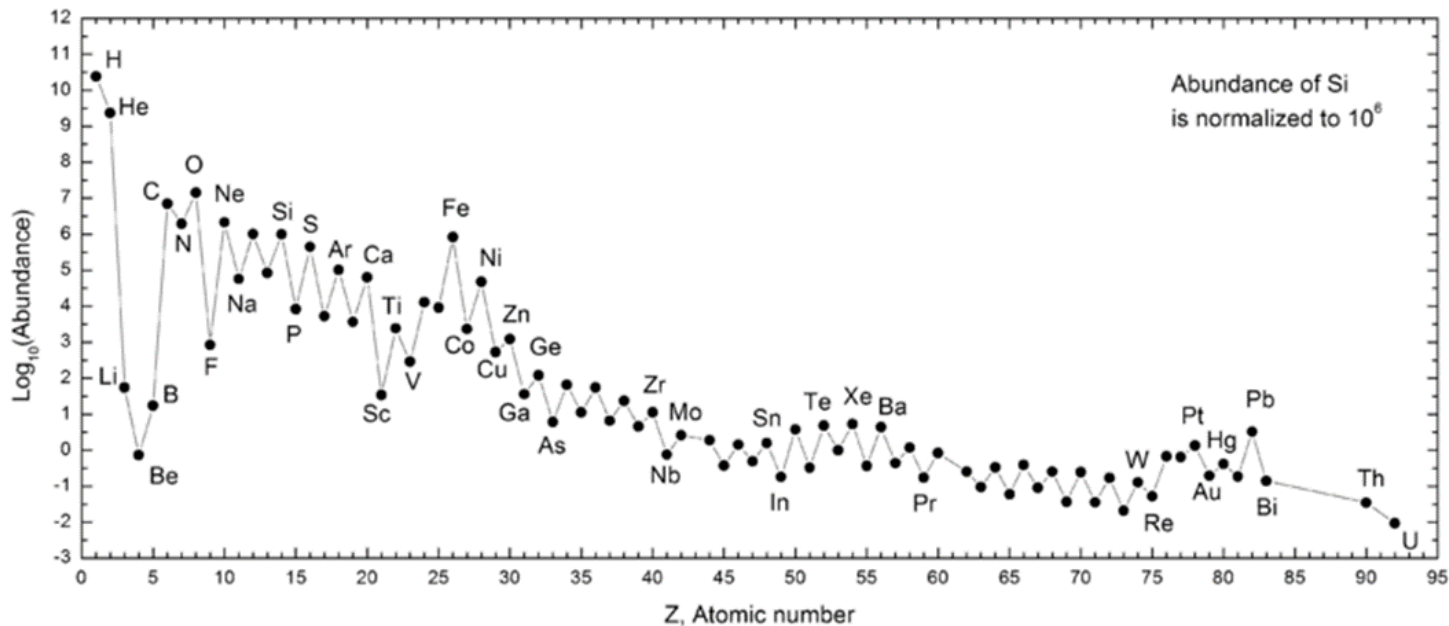
Bindningsenergi per nukleon



Grundämnenas ursprung (Wikipedia).



Uppgift



Figuren visar förekomsten av olika grundämnen i solsystemet.

Förklara varför C, O och Fe är så vanliga grundämnen.

6.12 Solen

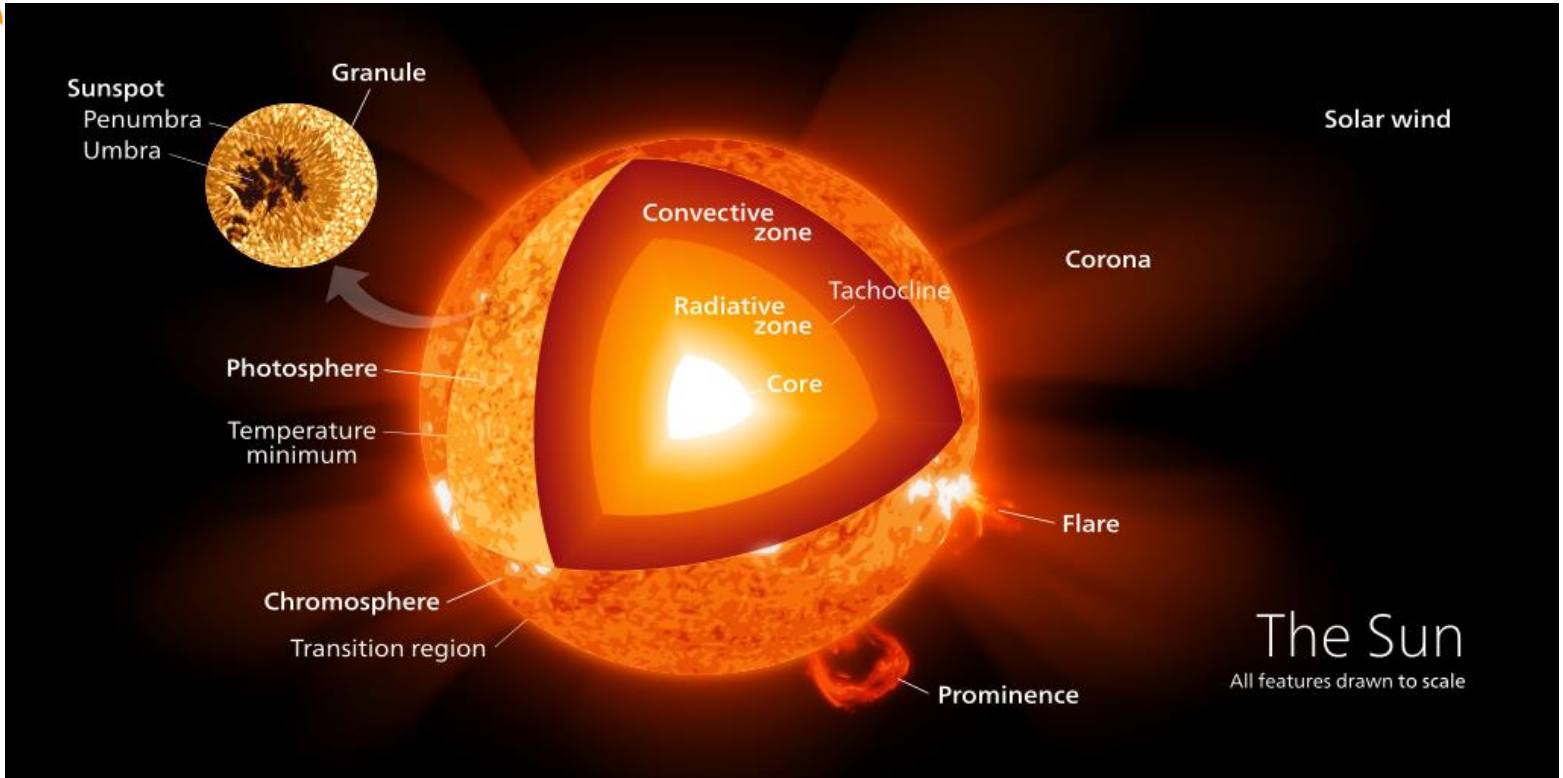


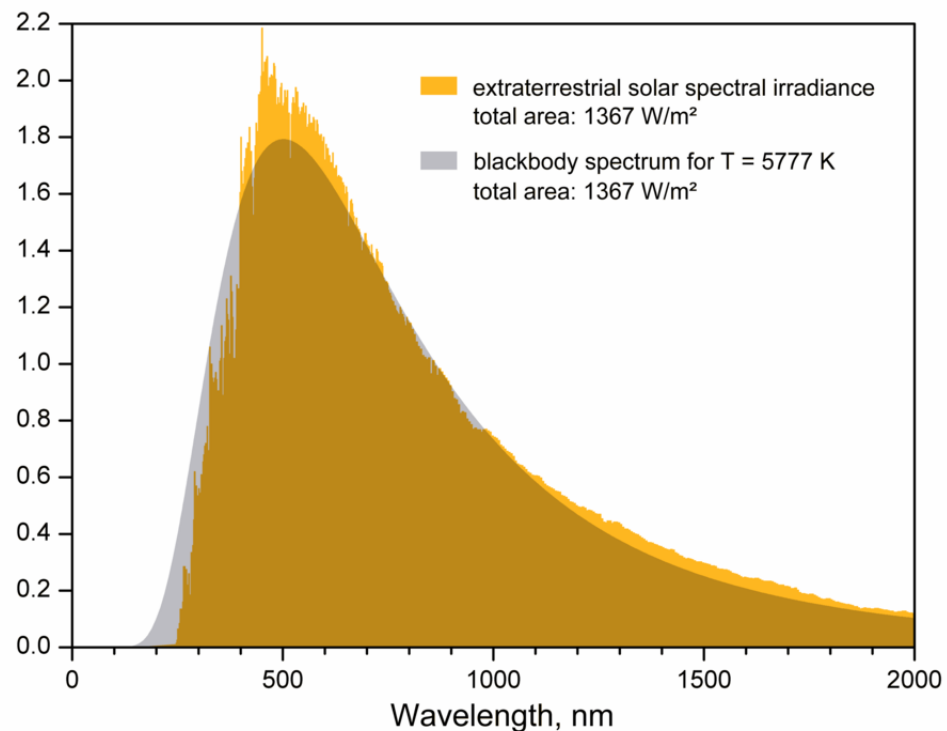
Bild: Kelvin Song

- Solen är den närmaste stjärnan → möjligt att studera i detalj.
- Typisk medelstor stjärna i huvudserien:
 - Ålder ca 4,6 miljarder år
 - Fotosfären: 73% väte, 25% helium, 2% övriga grundämnen (=”metaller”).



6.12.1 Solens egenskaper

- massa $M_{\odot} \approx 1.989 \cdot 10^{30}$ kg
- radie $R_{\odot} \approx 6.96 \cdot 10^8$ m
- effektiv (yt)temperatur
 $T_{\text{eff}} \approx 5785$ K
- temperatur i kärnan $T_c \approx 1.6 \cdot 10^7$ K
- luminositet $L_{\odot} \approx 3.8 \cdot 10^{26}$ W
- spektralklass G2V
- absolut visuell magnitud $M_V \approx 4.83$

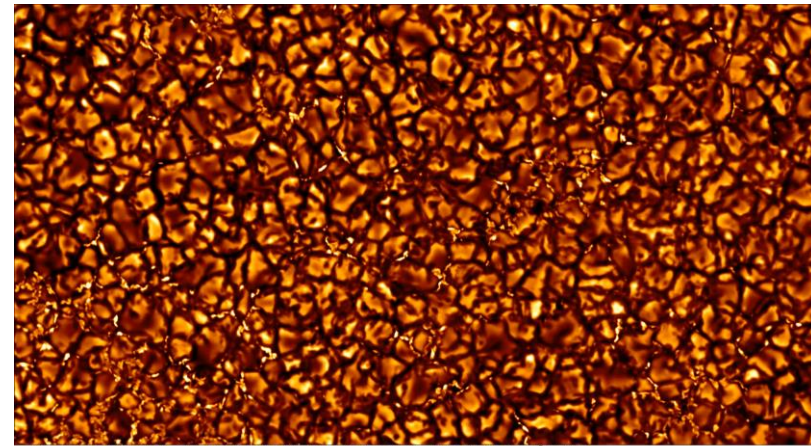
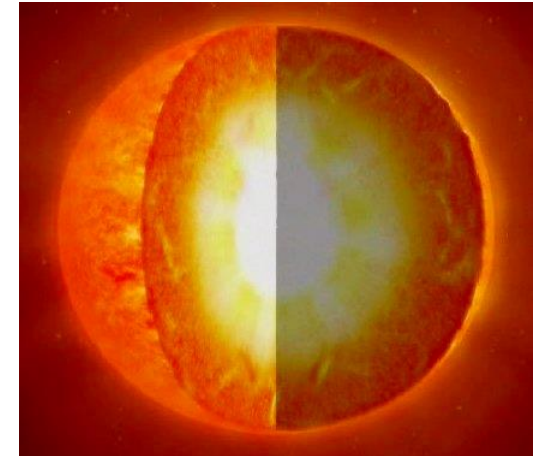


Solens spektrum (M. Iqbal)



6.12.2 Solens inre struktur

- Energin produceras i solens kärna genom proton-protonkedjan
- Inre struktur
 - *Radiativ* i mitten, energin överförs genom strålning (ut till $\sim 0.7 R_{sol}$)
 - Omges av ett konvektivt skikt, massflöden och turbulens orsakar solens magnetfält
 - Konvektion vid ytan -> *granulation*



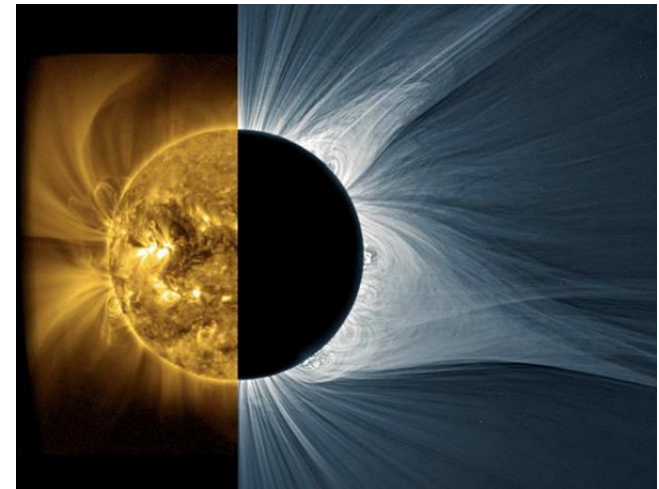
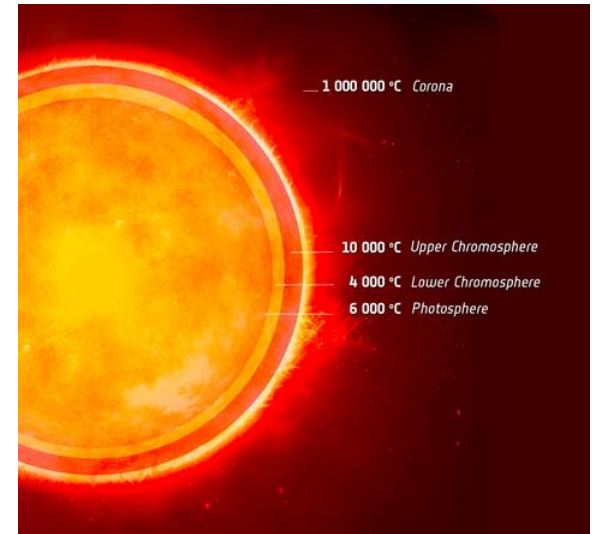
Swedish 1-m Solar Telescope (SST), CHROMIS Wideband 395.0 nm, 25-May-2017, (L, B)=(36°, -91°), 01:08:02 duration 12742 km

Solens granulation (Swed. Solar Telescope/ V. Henriques & A. Drews)



6.12.3 Solens atmosfär

- Synliga ytan: *Fotosfären*, ca 400 km tjock.
- Utanför fotosfären: *kromosfären* ca 2000 km tjock, temp. → 10000 K.
- *Övergångsskikt*, temp. → 1 milj. K.
- Yttersta skiktet är *Koronan*, temp. ca 1 miljon grader → Stark röntgenstrålning, avger partiklar i form av solvind.



Solens korona (Cranmer & Wineberger 2019)



6.12.4 Heliosfären

- Solens omgivning som domineras av solvinden.
- Slutar vid *heliopausen*: *Interstellära mediet* börjar dominera.

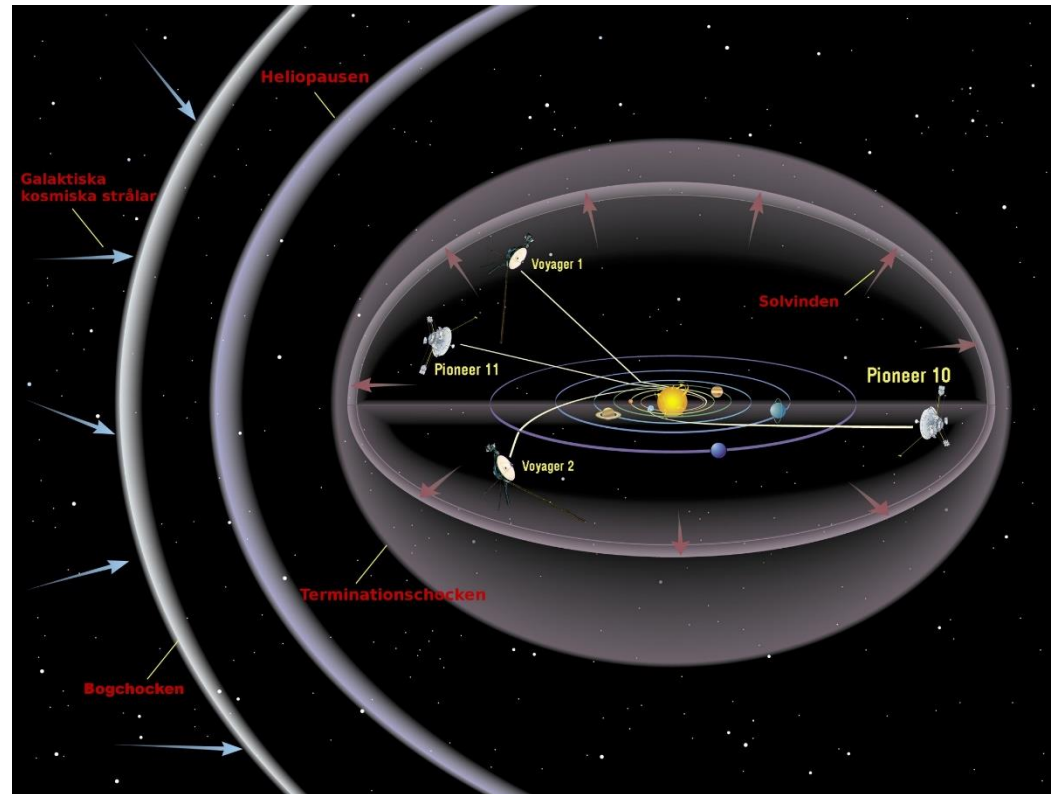
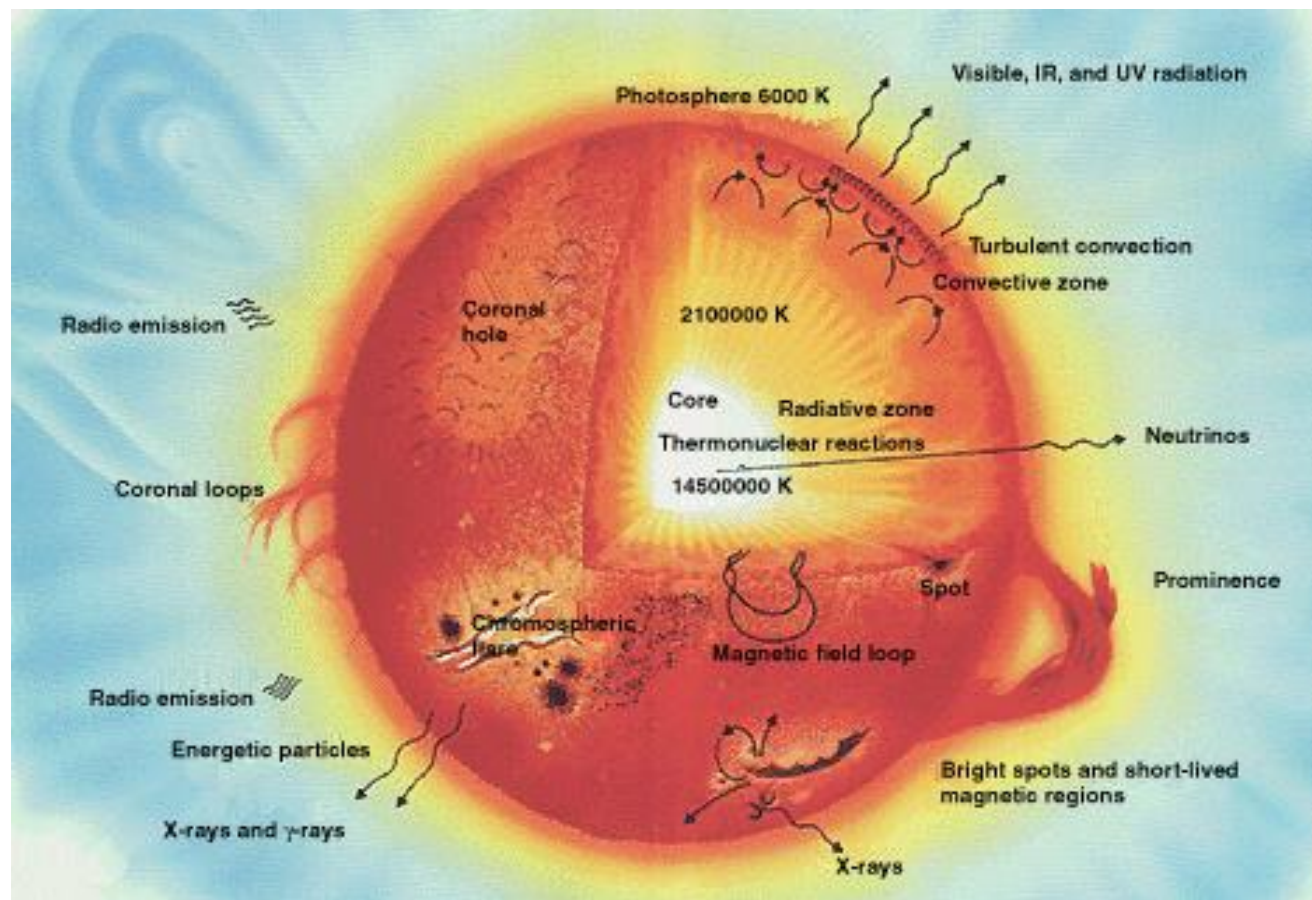


Bild: NASA



6.12.5 Solens magnetiska aktivitet

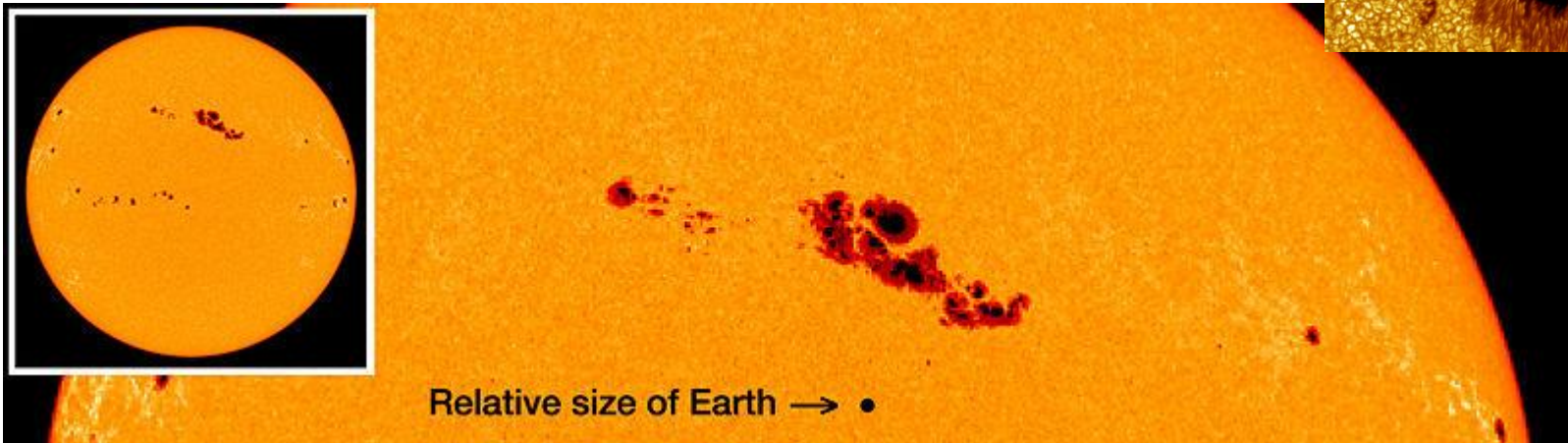
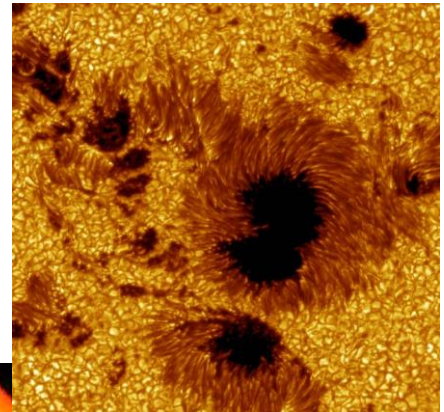
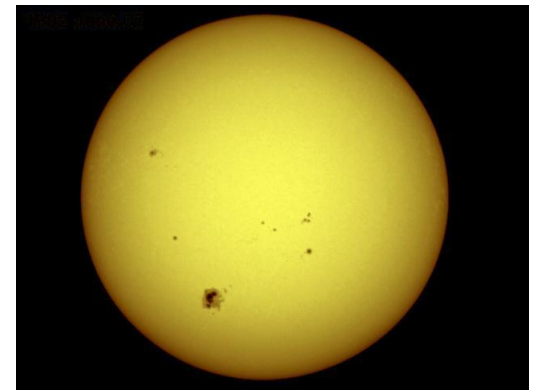


Konvektion + rotation
→ magnetisk aktivitet



6.12.6 Solfläckar

- När magnetfält tränger genom solens yta => konvektionen bromsas => *solfläck*, som är kallare än omgivningen.
- Motsvarande fenomen förekommer hos alla stjärnor med konvektiv mantel.

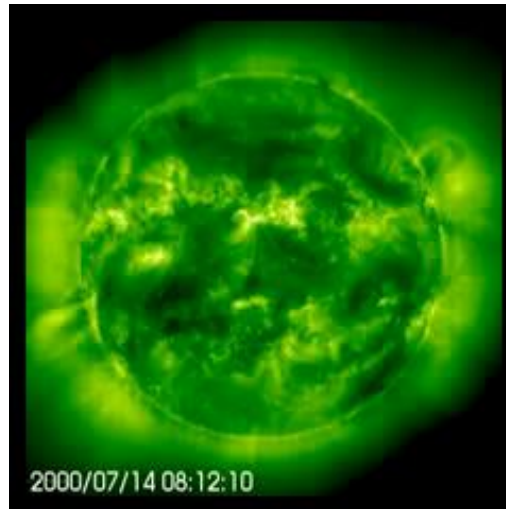
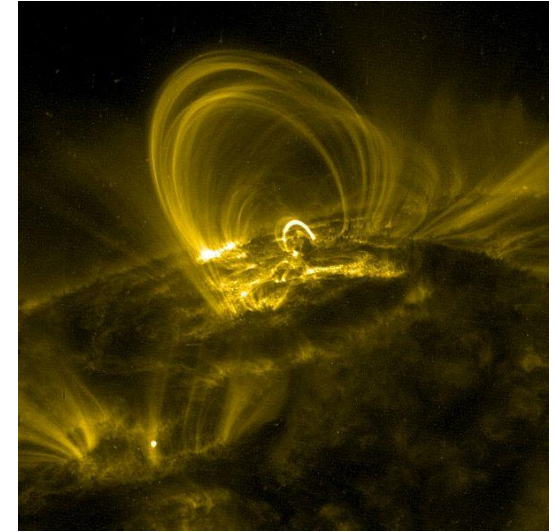


Bilder: NJIT, Kungl. vetenskapsakad. & NASA

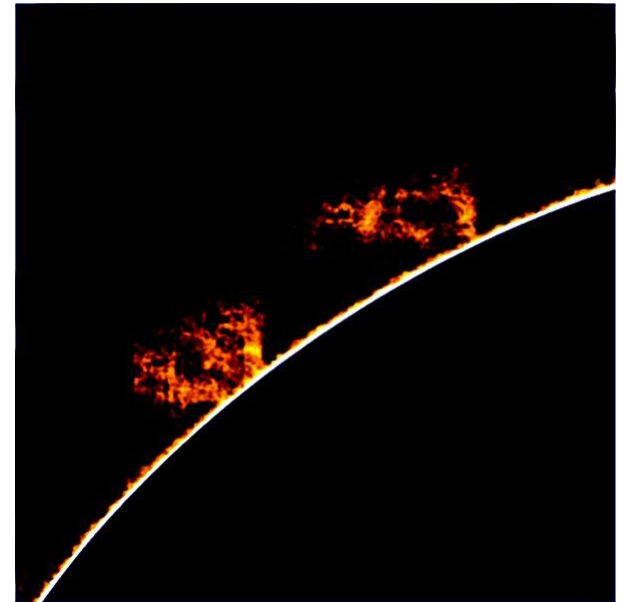


6.12.7 Solens utbrott

- *Korona-slingor*
- *Protuberanser*
- *Flare*-utbrott
- *Koronans massautbrott (CME)*



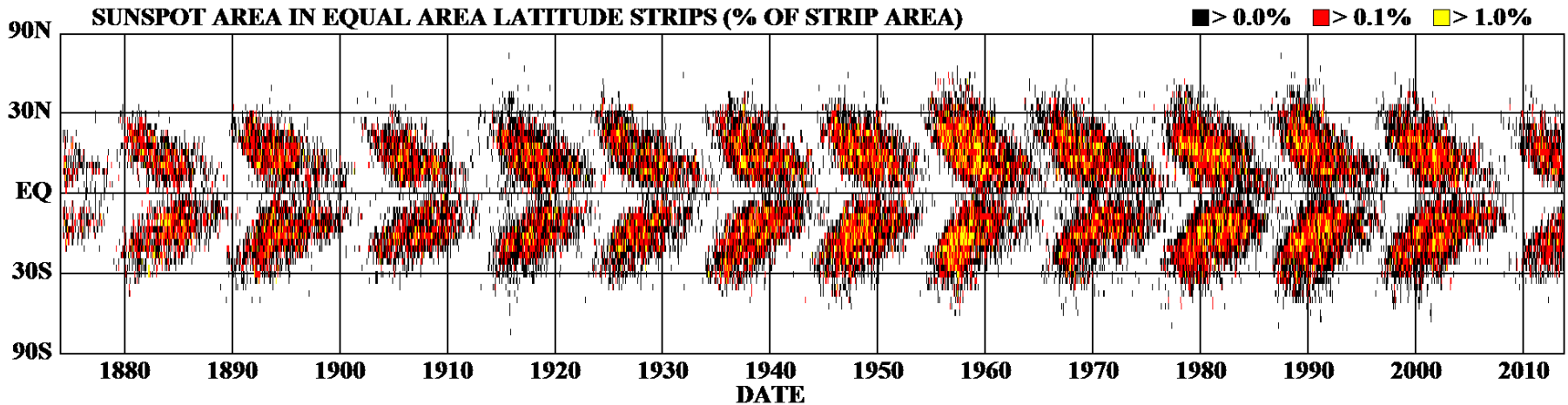
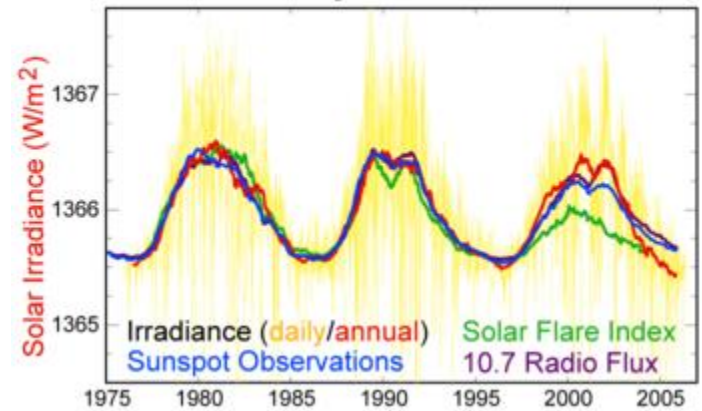
Bilder: NASA, Wikipedia





6.12.8 Solens magnetiska cykel

Solar Cycle Variations



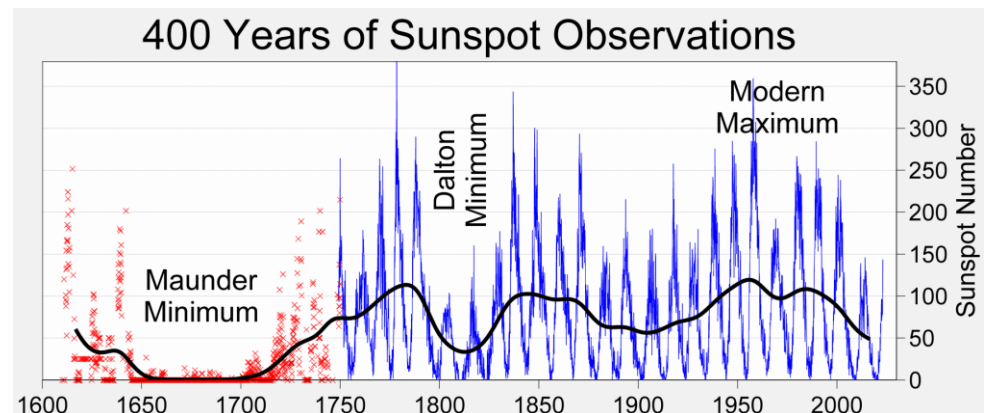
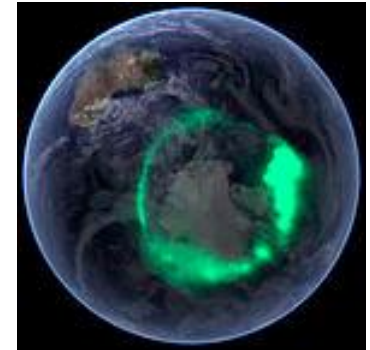
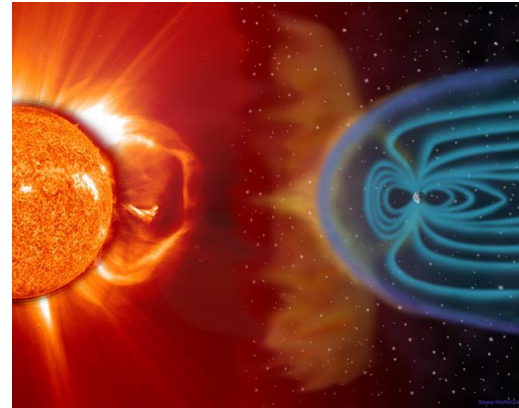
Bilder: Robert A. Rohde & NASA

- Solfläckarna följer en cykel på ca 11 år.
- Fläckaktiviteten migrerar mot ekvatorn → *fjärilsdiagram*.
- Magnetfältets polaritet byts vid minimum → ~ 22 års magnetisk cykel.



6.12.9 Solens aktivitet och jorden

- Solvinden samverkar med jordens magnetfält.
- Stora CME-utbrott => norrsken.
- Ca 11 års solfläckscykel.
- Återkommande längre minima:
 - *Dalton minimum* 1790-1830
 - *Maunder minimum* 1645-1715
 - *Spörer minimum* 1460-1550
 - *Wolf-minimum* 1280-1350
 - *Oort minimum* 1010-1050



Bilder: Robert A. Rohde & NASA



6.13 Dubbelstjärnor

- En stor del av alla stjärnor hör till system med två eller flera komponenter.
- Avstånden kan variera från direkt kontakt till hundratals AU
 - *Visuella* dubbelstj.:
Komponenterna kan urskiljas.
 - *Astrometriska* dubbelstj.:
Egenrörelsen kan mätas.
 - *Fotometriska* dubbelstj.:
Förmörkelser.
 - *Spektroskopiska* dubbelstj.:
Spektret avslöjar.

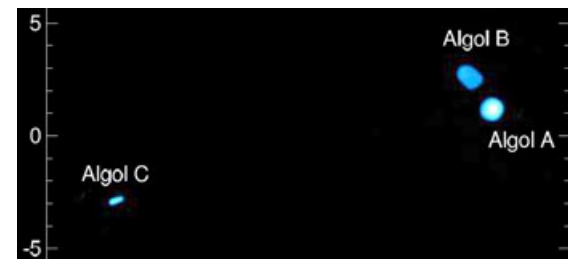
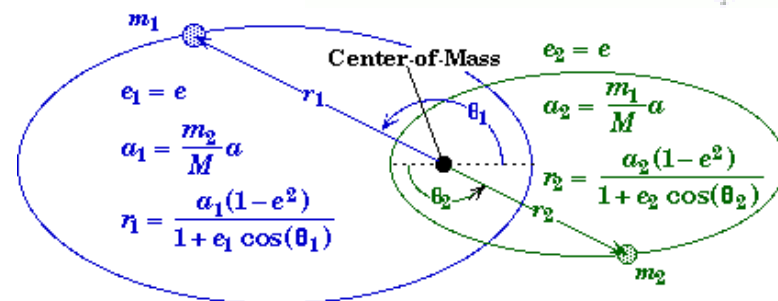
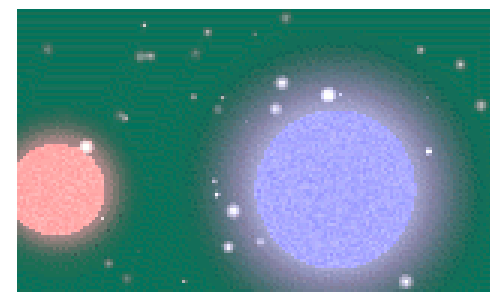


Bild: CHARA





6.14 Variabla stjärnor

- Många stjärnors ljus varierar märkbart t.ex. under instabila skeden av stjärnans utveckling före och efter huvudseriefasen.:
- *Pulserande stjärnor* :
 - Regelbundna pulser
- *Eruptiva variabler* :
 - Oregelbundna utbrott.
- *Rotationsvariabler* :
 - Inhomogen yta: Fläckar orsakar variation när stjärnan roterar.

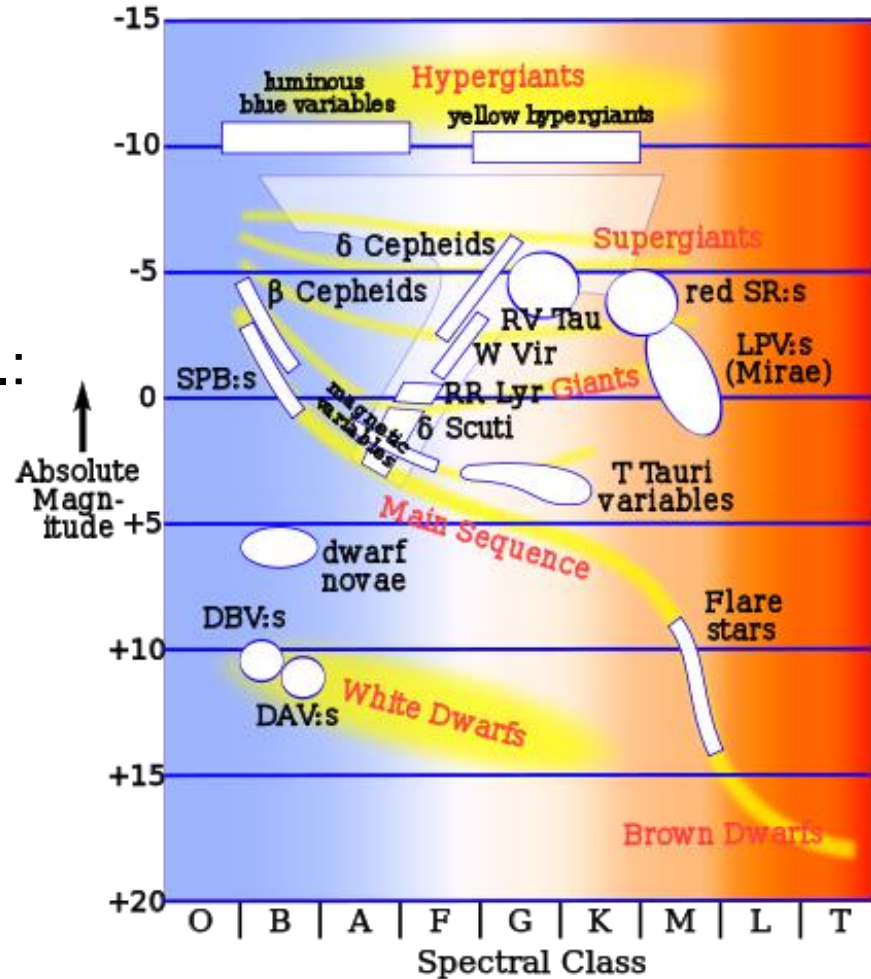


Bild: Rursus/Wikipedia