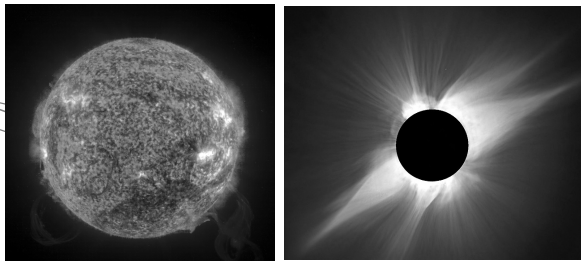


Översiktskurs i astronomi

Lektion 7: Solens och stjärnornas energiproduktion samt utveckling



Upplägg

- Energiprocesser i stjärnor
- Energitransport i stjärnor
- Solens uppbyggnad
- Solfläckar
- Solliknande stjärnors utveckling
 - Huvudserien
 - Röda jättegrenen
 - Helium-flash
 - Horisontalgrenen
 - Asymptotiska jättegrenen
 - Planetarisk nebulosa / vit dvärg
- Utvecklingen för mer massiva stjärnor

Solen är en stjärna

Sammanfattning av solens egenskaper:

I kärnan är temperaturen ca. 16 miljoner Kelvin (1K = -272 grader C). Temperaturen är så hög att termonukleära fusionsprocesser startar – d.v.s. lättare atomkärnor slår ihop sig till tyngre.

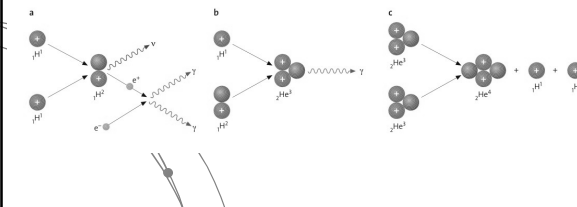
I solen omvandlas främst väte (H) till helium (${}^4\text{He}$). 600 miljoner ton väte omvandlas till helium varje sekund. 4,2 miljoner ton omvandlas till energi ($E = mc^2$ enligt Einstein) och motsvarar $3,86 \cdot 10^{26}$ W.

Vid solens yta (fotosfären) är temperaturen "bara" ca. 6000K.

Tre termonukleära fusionsprocesser

• Proton-proton kedjan (sid 304):

Väte (H) omvandlas till helium (He) plus energi.
Nettoreaktion: $4 {}^1\text{H}^1 \rightarrow {}^4\text{He}^4 + \text{energi}$. Effektiv för temperaturer $T \geq 10\text{-}16$ miljoner K.



Tre termonukleära fusionsprocesser

• CNO-cykeln:

OBS! Kräver att kol redan finns närvarande.
Bygger: ${}^7\text{N}$, ${}^8\text{O}$, ${}^9\text{F}$ (d.v.s. kväve, syre, fluor osv.). $T \geq 10\text{-}20$ miljoner K.

Trippel-alfa (3α) processen (sid 364-365):

Totalt tre ${}^4\text{He}^4$ -kärnor (α -partiklar) bygger upp t.ex.: ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{20}_{10}\text{Ne}$, ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ (d.v.s. kol, syre, neon och magnesium). $T \geq 100$ miljoner K.

Energitransport i stjärnor

Energien som alstras i stjärnors inre transporteras till ytan på tre olika sätt:

• Ledning (i t.ex. vita dvärgar).

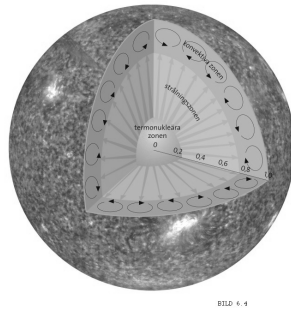
• Strålning

• Konvektion (uppstår vid stora temperaturskillnader mellan närliggande vertikala skikt i stjärnor. Energien "bubblar" upp mot ytan).

Solen

Solen består av tre zoner:

- Termonukleära kärnan (från 0 till $0,25R_{\odot}$)
- Strålningszonen (från $0,25$ till $0,75 R_{\odot}$)
- Konvektiva skalet (från $0,75$ till $1 R_{\odot}$)



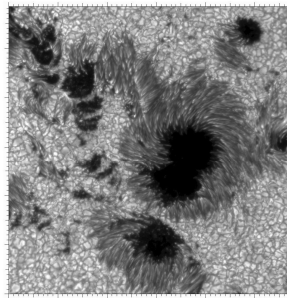
Solens yttre består av tre skikt

Inifrån och ut:

- Fotosfären (tjocklek ≈ 300 km, $T \approx 6000$ K)
- Kromosfären (≈ 2000 km, ≈ 10000 K)
- Koronan ($\approx 10^6$ km, $\approx 10^6$ K)

Fotosfären

- Fotosfären (tjocklek ≈ 300 km, $T \approx 6000$ K)



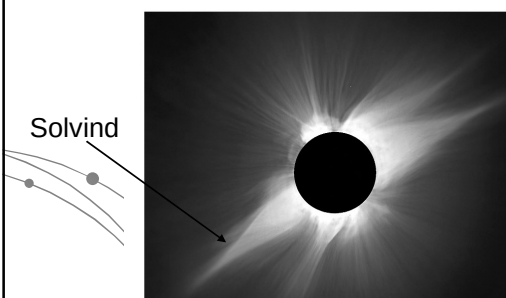
Kromosfären

- Kromosfären (≈ 2000 km, ≈ 10000 K)



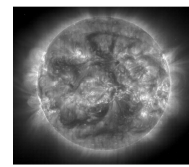
Koronan

- Koronan ($\approx 10^6$ km, $\approx 10^6$ K)

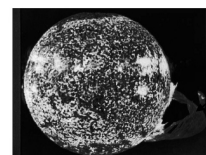


Solen i andra våglängdsband

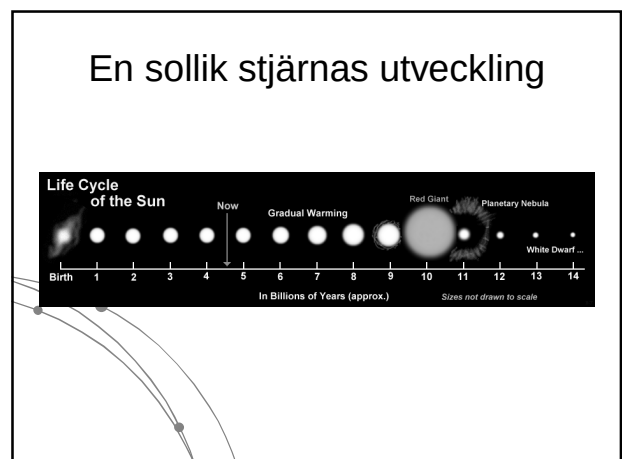
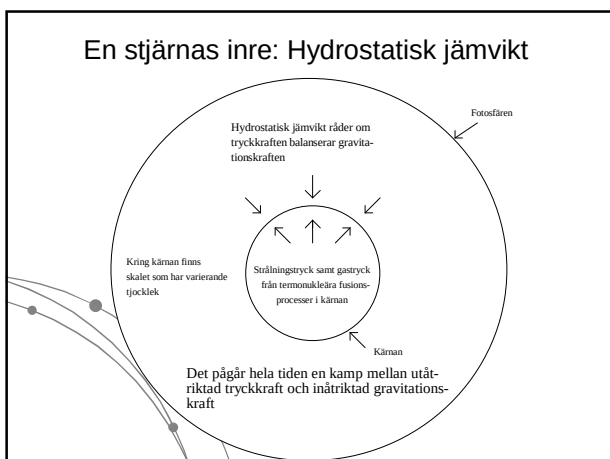
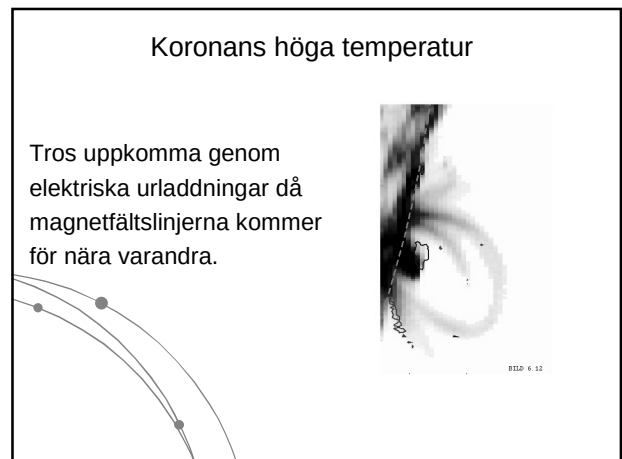
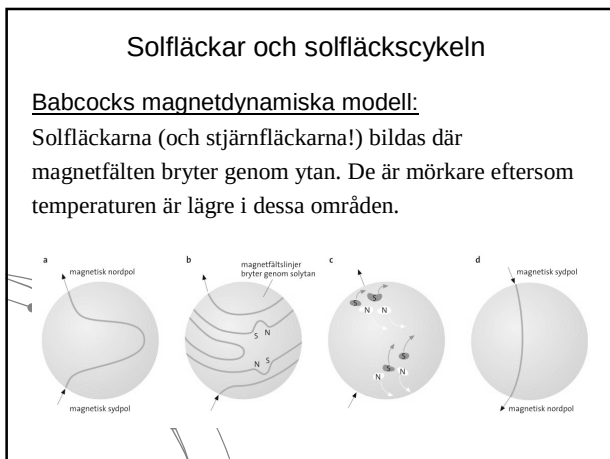
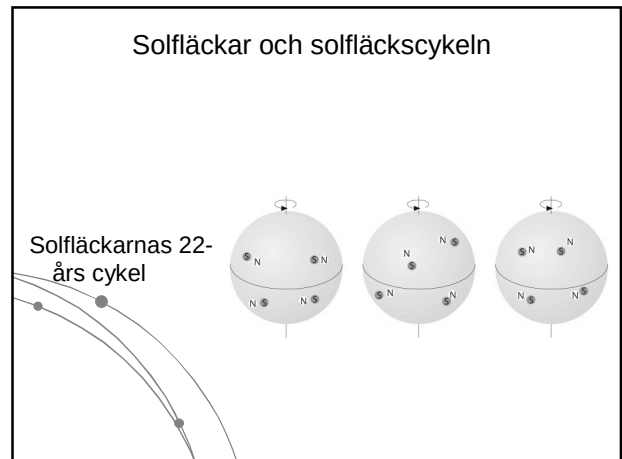
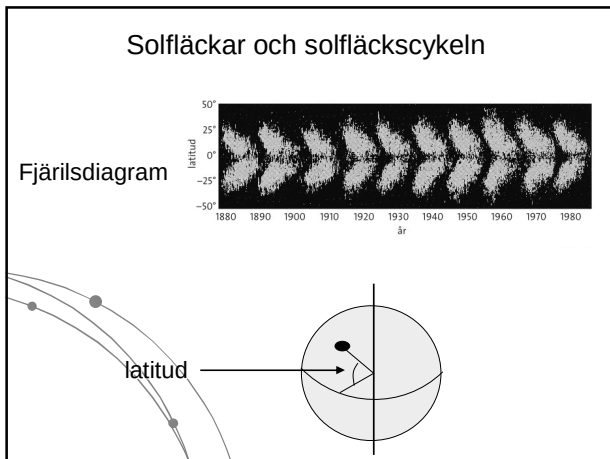
UV vid 195 Å
(SOHO)



Röntgen
(Skylab)



Prominens
eller
Protuberans



Ideala gaslagen

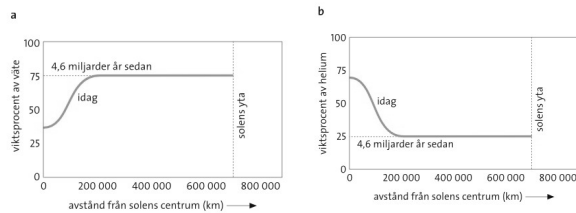
$$P = \frac{k\rho T}{\mu H}$$

- P = Gasens tryck
- ρ = Gasens densitet
- T = Gasens temperatur
- k = Boltzmanns konstant
- μ = Medelmolekylvikten
- H = Atomisk massenhet $\approx$ vätekärnans massa

Kemisk sammansättning

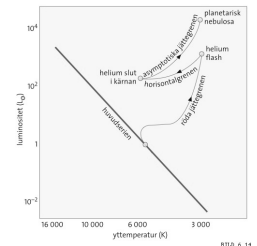
- X = Viktandel väte
- Y = Viktandel helium
- Z = Viktandel av grundämnen med högre atomtal än helium ("Metaller")

Mängden H och He i kärnan, då och nu

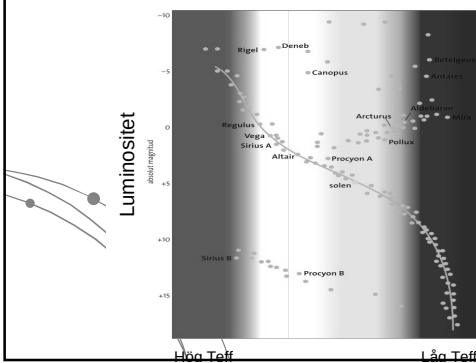


Huvudserien I

- En stjärna tillbringar ungefär 90% av sin livstid på huvudserien.
- Under denna fas förflyttar sig stjärnan sakta uppåt längs huvudserien.



Hertzsprung-Russell-diagrammet (ofta HR-diagrammet)

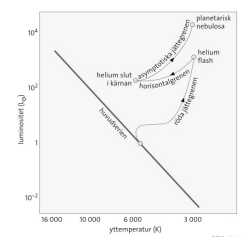


Huvudserien II

Vandringen uppåt längs huvudserien beror på att H omvandlas till He.

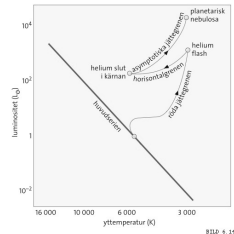
Medelmolekylvikten (μ) ökar då och det gastryck (P_g) i kärnan utövar minskar enligt ideala gaslagen ($P_g \propto 1/\mu$).

Kärnan trycks ihop och hettas upp och fusionsprocesserna snabbas upp.



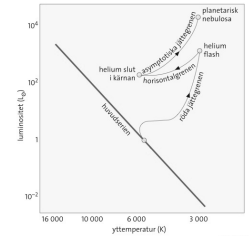
När vätet tar slut

- När vätet i kärnan börjar ta slut sänks energiproduktionen
- Den hydrodynamiska jämvikten rubbas och kärnan (nu nästan enbart He) pressas samman av stjärnans egen tyngd



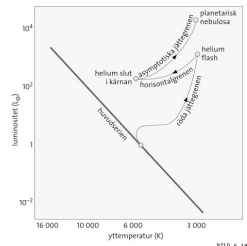
När vätet tar slut

- Kärnan blir så het att förbränning av H startar i ett skal runt kärnan. Stjärnan lämnar huvudserien och rör sig uppför röda jättegrenen.



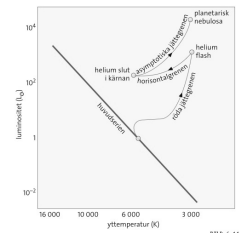
Röda jättegrenen

- I och med att H tagit slut i kärnan och att skalförbränning av H gjort kärnan allt tyngre, kontraherar den allt mer, vilket ökar temperaturen ytterligare.
- Skalet expanderar → Stjärnan blir större (jätte) → Högre luminositet & lägre temperatur



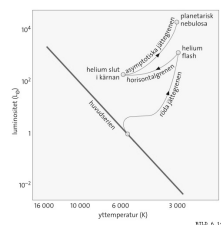
Helium-flash

- När temperaturen nått ca 10^8 K startar He-förbränning i kärnan (3α processen).
- För stjärnor med $M \leq 2-3 M_{\odot}$ inleds detta med en He-flash.



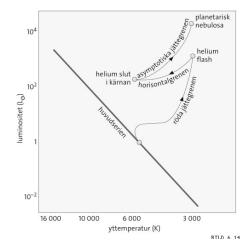
Helium-flash II

- Ideala gaslagen slutar att gälla. Temperaturen kan stiga okontrollerat utan att trycket påverkas.
- Halva mängden helium i kärnan omvandlas till kol på ca 10 s
- Energin motsvarande ca 1 miljard stjärnor av solens typ utsänds



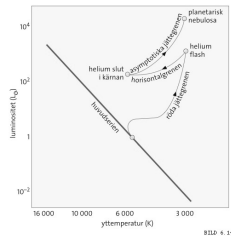
Horisontalgrenen

- Vid högre temperatur blir gasen ideal igen. Kärnan expanderar och kylls, energiproduktionen minskar och stjärnan rör sig utefter horisontalgrenen.



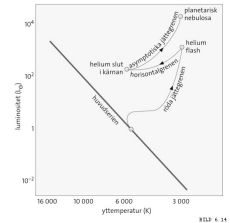
Asymptotiska jättegrenen

- Till slut tar He slut i kärnan och samma procedur upprepas.
- Skalförbränning av He gör stjärnan röd och för den uppför asymptotiska jättegrenen där även skalförbränning av H fortsätter.



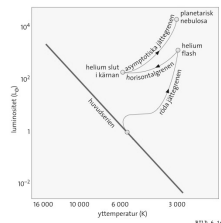
Planetarisk nebulosa / Vit dvärg

- För en stjärna av solens massa är slutet nu nära.
- Den blir inte tillräckligt het i kärnan för att kol ska börja förbrännas via CNO-cykeln.

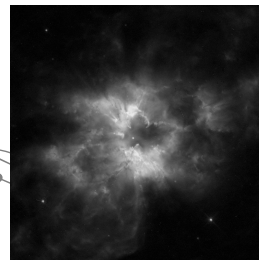


Planetarisk nebulosa / Vit dvärg II

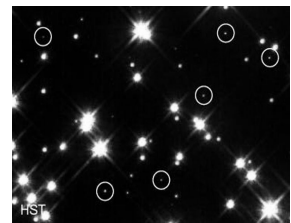
- Stjärnan blir instabil och genomgår en fas av termiska pulser innan den kastar ut sina ytterdelar.
- Gasen som kastas ut kallas planetarisk nebulosa.
- Kärnan benämns nu vit dvärg.



Planetarisk nebulosa / Vit dvärg III



Planetarisk nebulosa



Vita dvärgar

Livstider på huvudserien (sid 360)

Massa ($M_{\odot}$)	T_{eff} (K)	Luminositet ($L_{\odot}$)	Tid (i 10^6 år)
25	35 000	80 000	3
15	30 000	10 000	15
3	11 000	60	500
1.5	7000	5	3000
1.0 (Solen)	6000	1	10 000
0.75	5000	0.5	15 000
0.50	4000	0.03	200 000

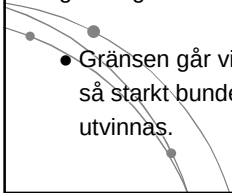
Sambandet mellan massa och livstid på huvudserien

$$t \propto \frac{1}{M^{2.5}}$$

Utvecklingen för mer massiva stjärnor I

- Stjärnor med högre huvudseriemassor än solens blir hetare i kärnan. Partiklarna har högre rörelseenergi → atomkärnornas Coulomb-krafter kan övervinnas och tyngre atomkärnor kan genomgå fusion.

- Gränsen går vid ${}_{26}\text{Fe}^{56}$ som är en stabil isotop, så starkt bunden att ingen mer energi kan utvinnas.



Utvecklingen för mer massiva stjärnor II

Högmassiva stjärnor rör sig nästan horisontellt i HR-diagrammet efter huvudserien.

Orsak?

Konvektiv kärna ⇒

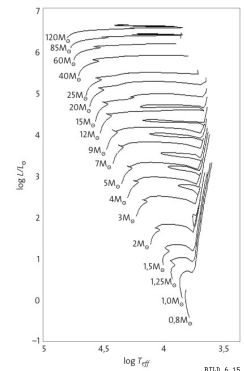
Snabb blandning av grundämnena

som snabbt förbränns ⇒

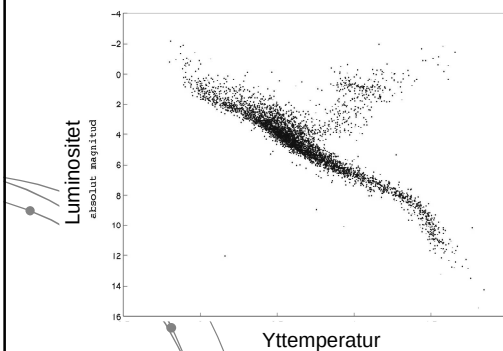
Snabb utveckling, T_{eff} minskar ⇒

Lägre luminositet. Kompenseras av större radie (R_{eff}) ⇒

Högre luminositet ($L=4\pi\sigma R^2 T_{\text{eff}}^4$).



Ett typiskt HR-diagram



Massiva stjärnor kan explodera som supernovor

