Kitekintés
Csillagbölcsők
Csillagkeletkezés
Csillagok energiatermelése
Csillagok felnőttkora
Végállapotok

Csillagok fejlődése

Bevezetés a csillagászatba 4.

Muraközy Judit

Debreceni Egyetem, TTK

2026. 10. 27.

Miről lesz szó a mai órán?

Csillagfejlődés: születés – felnőttkor

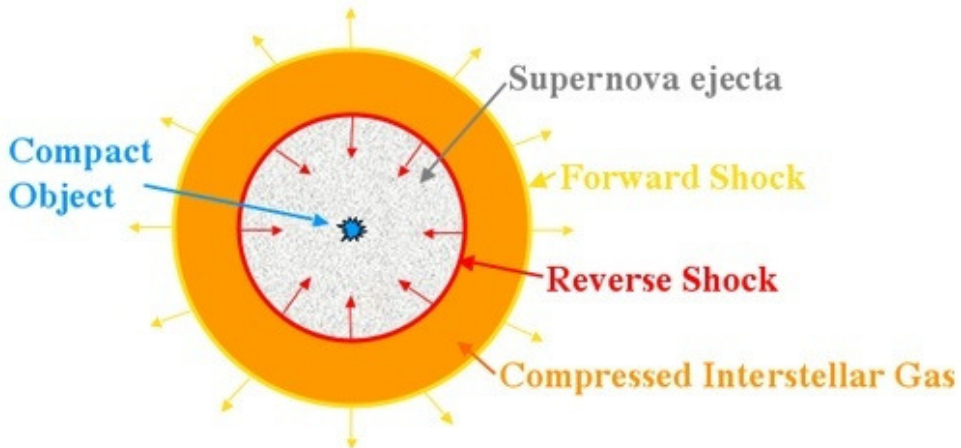
Kezdetei - Viriáltétel, Jeans-tömeg, Jeans-sugár, protocsillag, fősorozat előtti kontrakció
Fősorozat a HRD-n – energiatermelés - a p-p reakció
csillagok belső szerkezete
A fősorozat utáni fejlődés -

A csillagok végállapotai

Ahol a csillagbölcsők találhatók

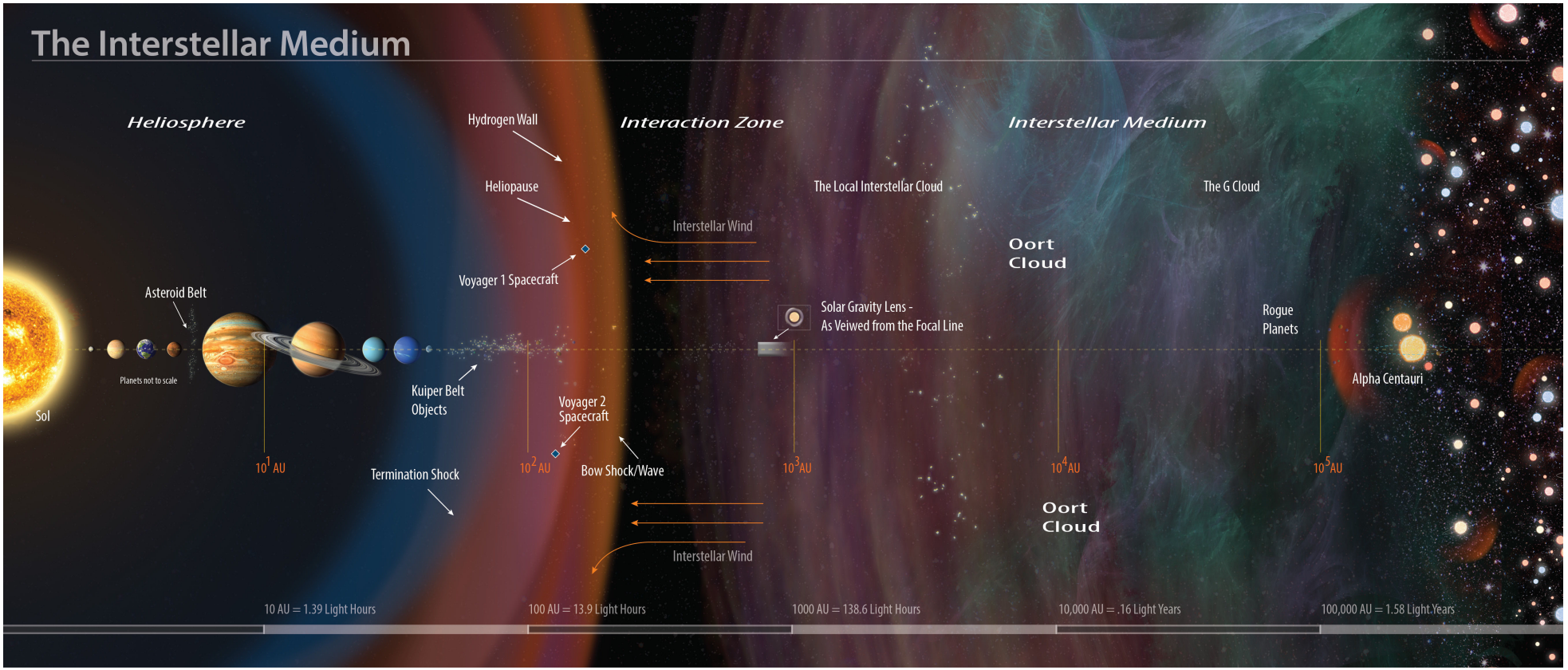
Intersztelláris közeg:

- 99% gáz
- 1% por
- sűrűsége és hőmérséklete helyről helyre változik
- T és ρ egymástól függenek:
  nagyobb ρ, kisebb T
- A csillagközi anyag **fázisai:**
  - **felhőközi anyag** ($T \geq 7000K$, $\rho \leq 0.2cm^{-3}$)
  - **felhők** ($T \leq 300K$, $\rho \geq 1cm^{-3}$)
- A felhők kialakítója a turbulencia, melyet lökéshullámok tartanak fenn.



Kitekintés
Csillagbölcsők
Csillagkeletkezés
Csillagok energiatermelése
Csillagok felnőttkora
Végállapotok

Intersztelláris közeg



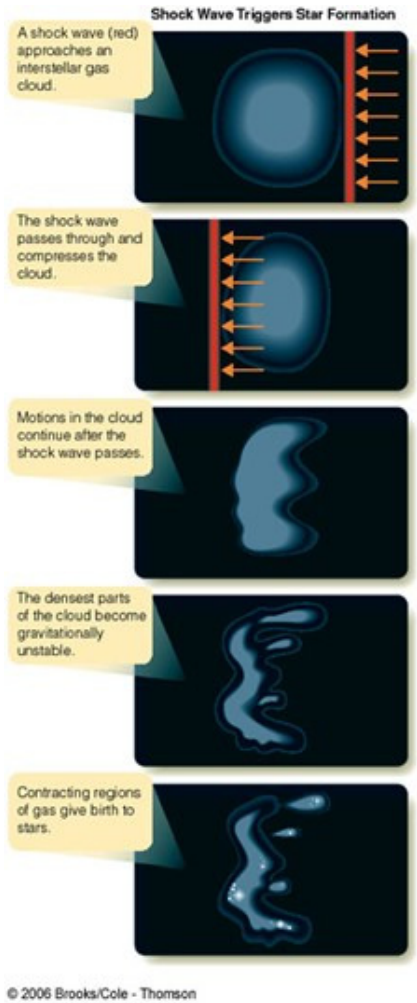
Csillagközi anyag

Felhőközi anyag

- – A lökéshullám feltorlaszolja a csillagközi anyagot
- – Buborékképződés, magas hőmérséklet, ionizált hidrogén (HII), alacsony sűrűség
- – Meleg ($10^4 K$) és forró komponens ($10^5 - 10^6 K$)

Felhők

- – Az anyag tömegének 80%-a a térfogat 1%-ába tömörül
- – H I felhők: semleges, atomos H; kevésbé sűrű, kb. 100 pc; spirálszerkezet
- – H_2 felhők: molekulafelhők; a forró beágyazott csillag ionizál (H II régió); törpe és óriás molekulafelhők

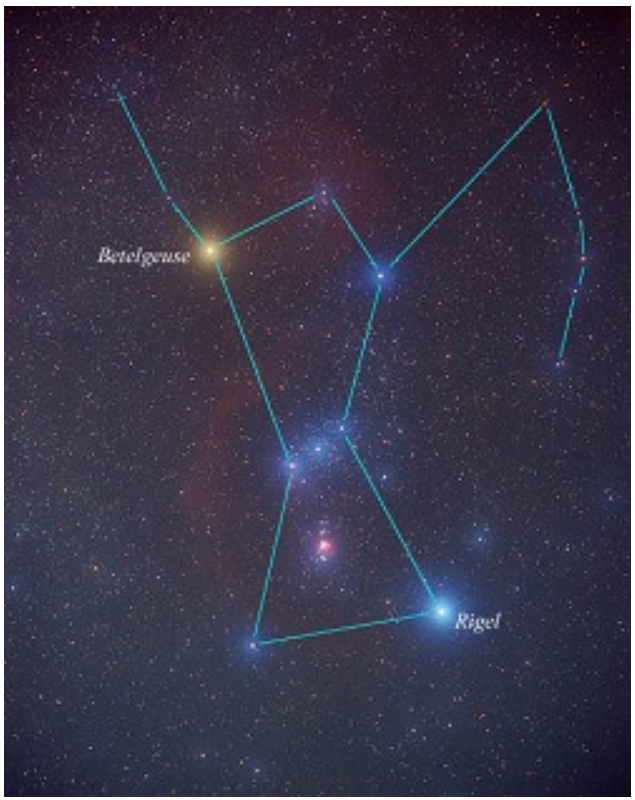


Csillagközi anyag



- W3 csillagkeletkezési régió a Cassiopeia csillagképben
- Óriás molekulafelhő 6200 fényév távolságban
- Átmérője: 200 fényév
- Vörös, narancs: alacsonyabb T; kék, lila, fehér: magasabb T
- Újonnan született csillagok által felfűtött por- és gázfelhő, hidegebb por- és gázfelhők, hideg és sűrű por tömörülések

A Vadász vagy Kaszás



Orion csillagkép
Öv, kard. Betelgeuse (3500 K-es, felfúvódott óriás 20 $m_\odot$, 1000 $d_\odot$), Riegel (11.000 K-es, 17 $m_\odot$ és 60 $d_\odot$)



Orion-köd: csillagkeletkezési régió
Átmérője kb. 30 fényév
Össztömege 10.000 $m_\odot$

A Vadász vagy Kaszás



Telente kora este, déli irányban figyelhető meg, az égi egyenlítőn fekszik

Lófej-köd (Barnard 33 felhő)



Orion csillagképben (kb. 1500 fényévre), IC434 világító köd (kb. 1600 fényév távolságra)

Lófej-köd (Barnard 33 felhő)



Lófej-köd

(Hubble Wide Field Camera 3, 2009)

kb. 27 $m_\odot$ és 5 fényév magas belsejében kis tömegű csillagkezdemények, tetejénél fiatal csillag látszik

A csillagkeletkezés feltételei

Viriáltétel:

$$E_{kin.} = -\frac{1}{2} E_{pot.}$$

Feltétel az összehúzódásra: Jeans-féle instabilitási kritérium: a gázfelhő sugara kisebb legyen R_J-nél

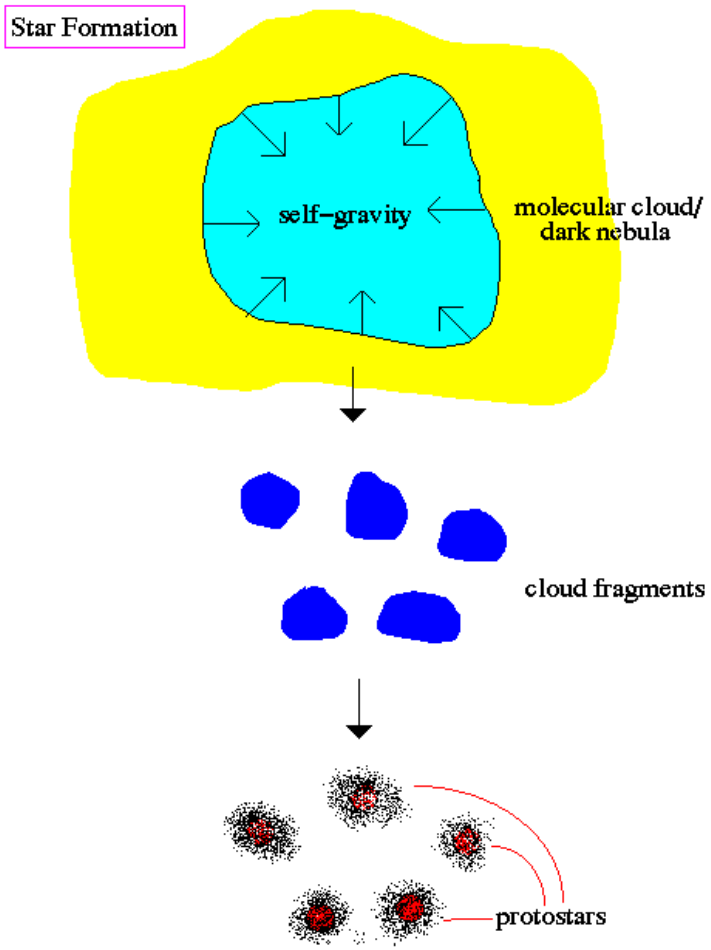
$$R_J = 0.4 \frac{\mu G M}{kT}$$

míg a tömege legyen nagyobb M_J-nél

$$M_J = \left(2.5 \frac{kT}{\mu G}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{3}{4\pi\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Molekulafelhőkre M_J=8$M_\odot$; tehát lehetséges csillagkeletkezés.

Gravitációs kollapszus



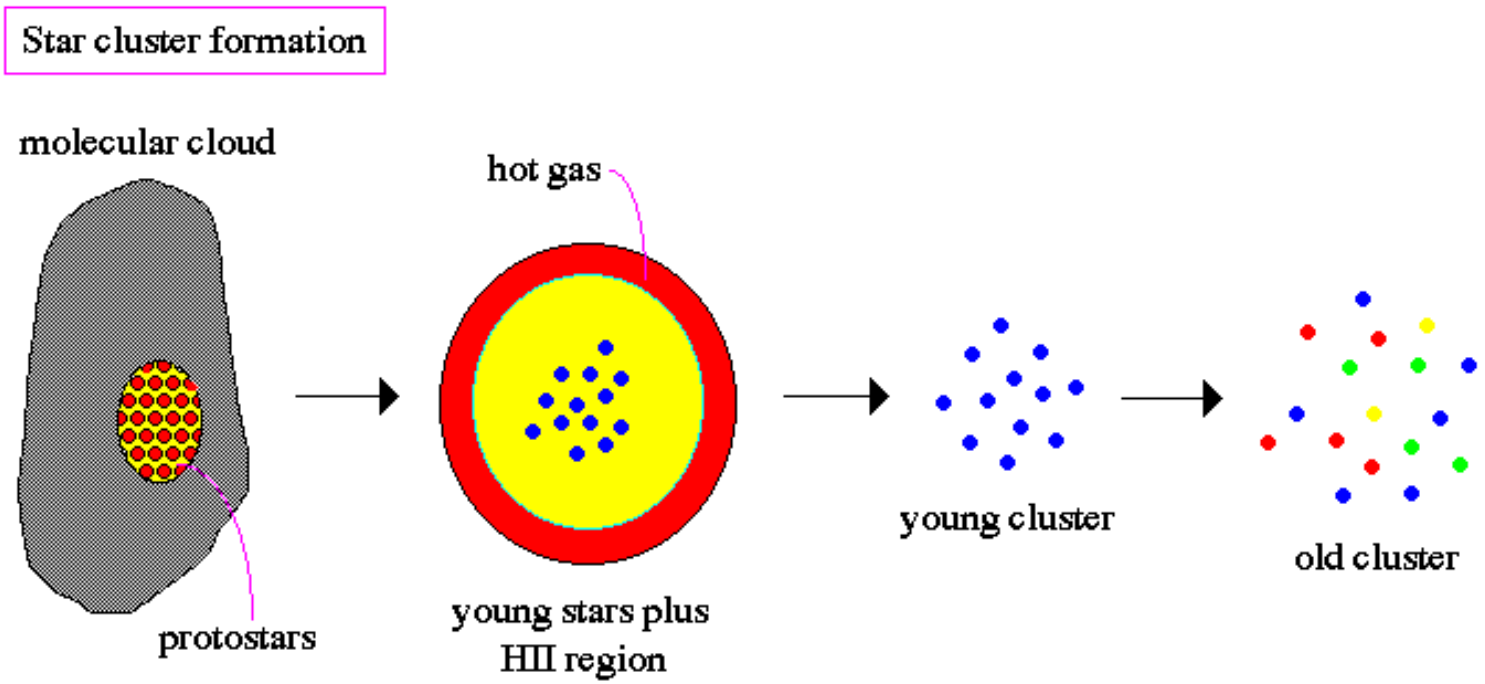
A sűrűbb felhőmag a gravitáció hatására összezuhan.

Az összezuhant felhő fragmentálódik.

A fragmentumokból **protocsillag**ok alakulnak ki.

Csillagkeletkezés típusai

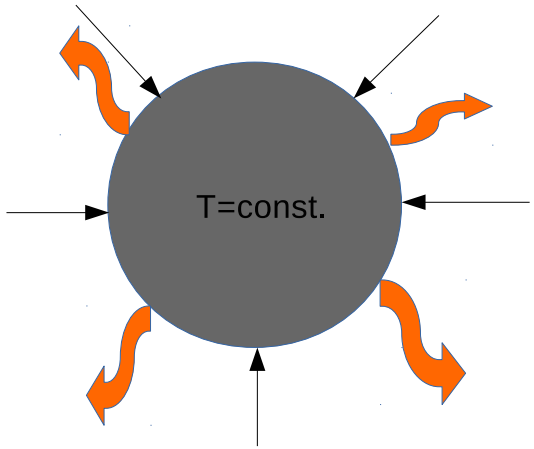
Csoportos csillagkeletkezés



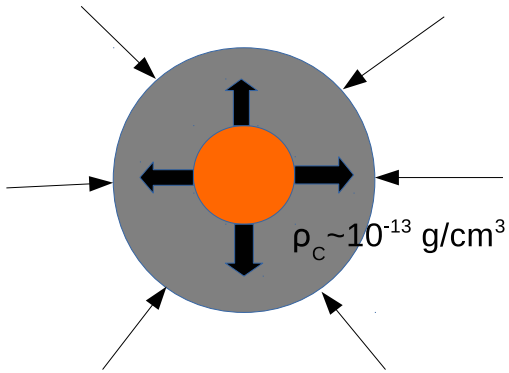
Izolált csillagkeletkezés

Izotermális kollapszus

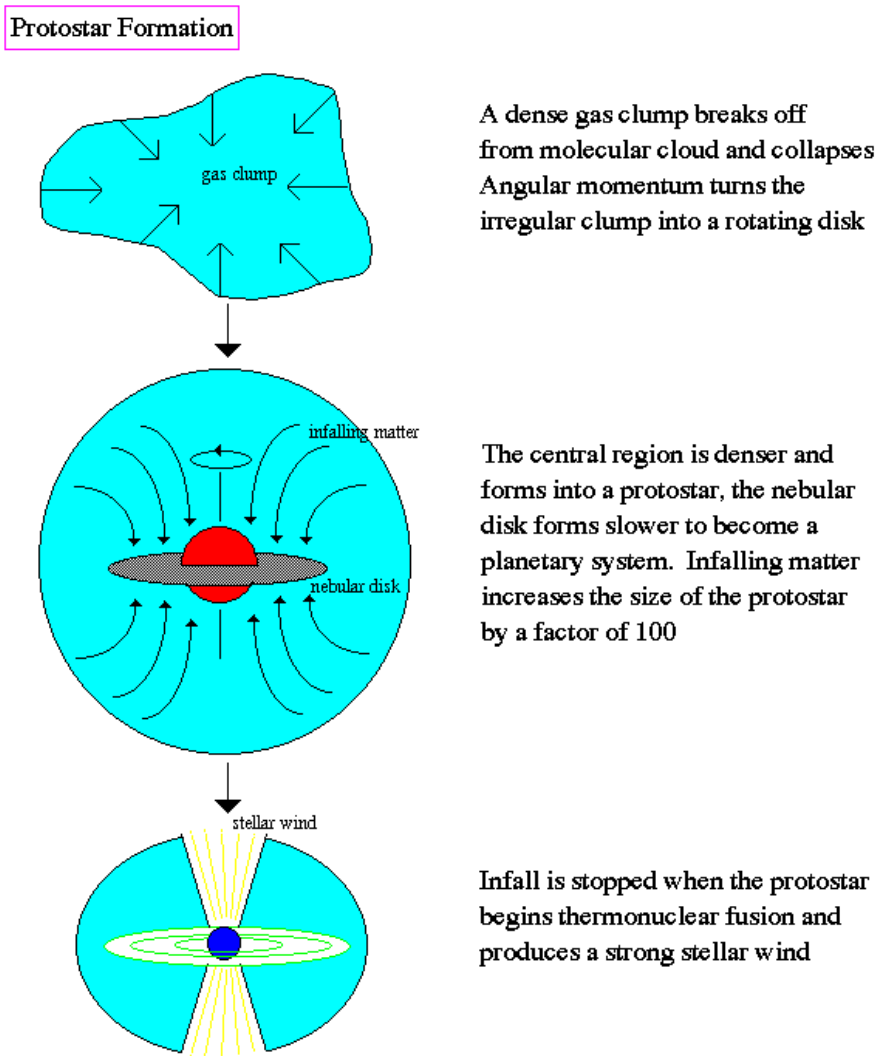
a porfelhő saját term. sug. hatására átlátszó $\Longrightarrow$ hő elsugárzás $\Longrightarrow$ $T = const. \Downarrow$



$\rho \approx 10^{-13} g/cm^3$ -nél leáll $\Longrightarrow$ $T_{centr.}$ és $\rho_{centr.}$ nő $\Longrightarrow$ kollapszus megáll, de továbbra is anyag hullik be

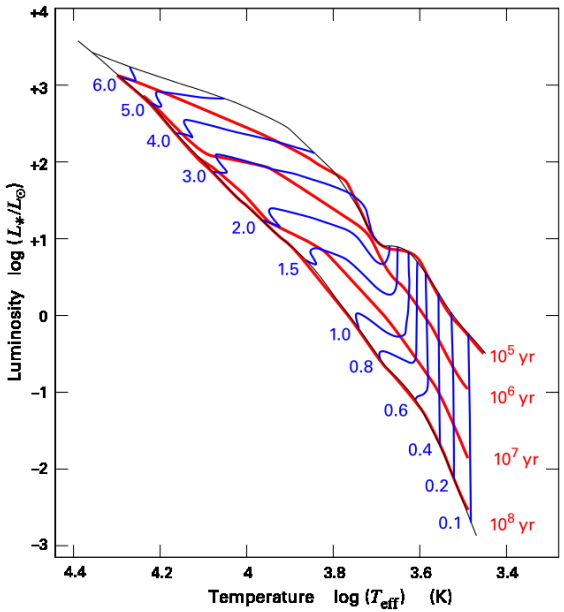


Akkréciós szakasz



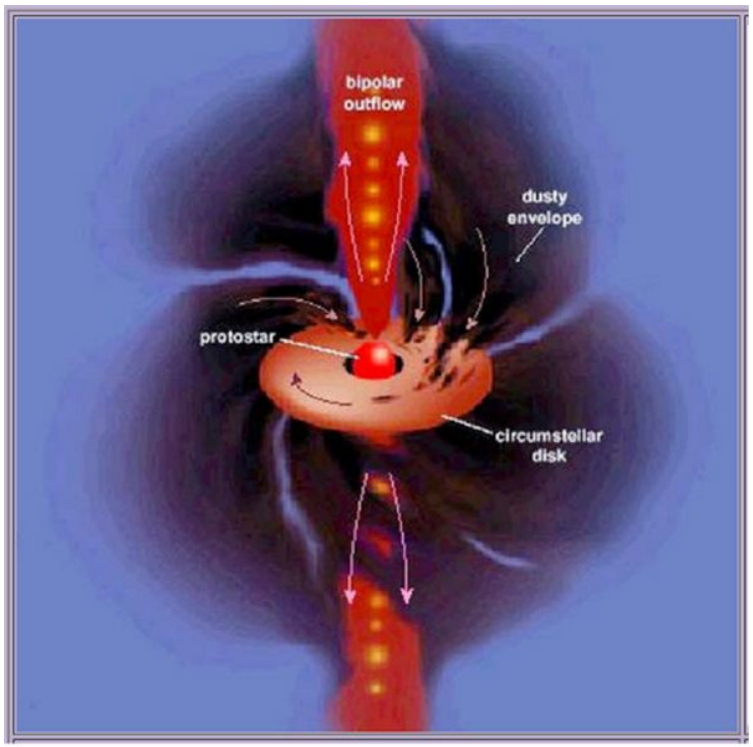
- Nő a tömeg, emelkedik T és L.
- Megfigyelés még csak infravörösben.
- Forgás: akkréciós korong
- $t_{akkr.} \approx 10^6$ év

Kontrakciós fázis – csillagszületés



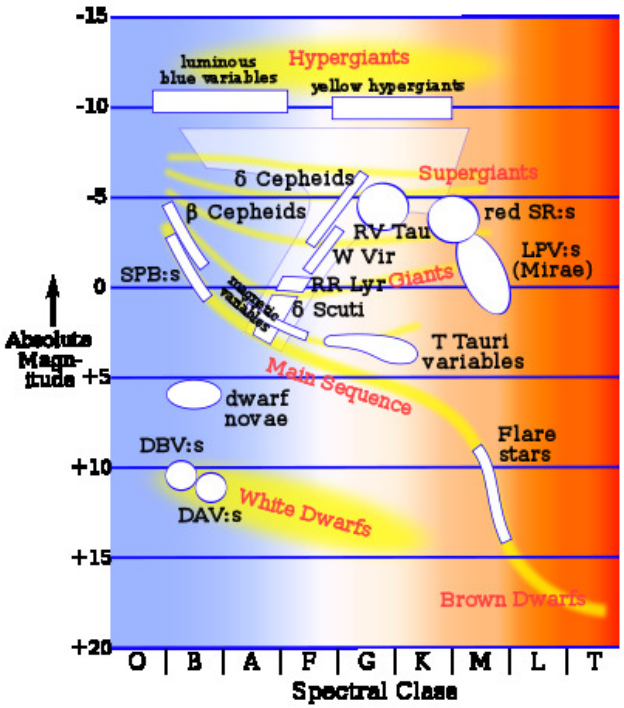
$m \leq 2m_\odot$
- erős B terek
- felső légkör felfűtődik ⇓
- csillagszél ⇒ lefújja a burkot
- optikai láthatóság, fúzió beindulása
- t $\approx 10^8$ év

$m \geq 2m_\odot$
- nagy akkréciós ráta
- 10^6 év
- gyorsabban jutnak a főágra
- még a főágon is akkretálni fognak

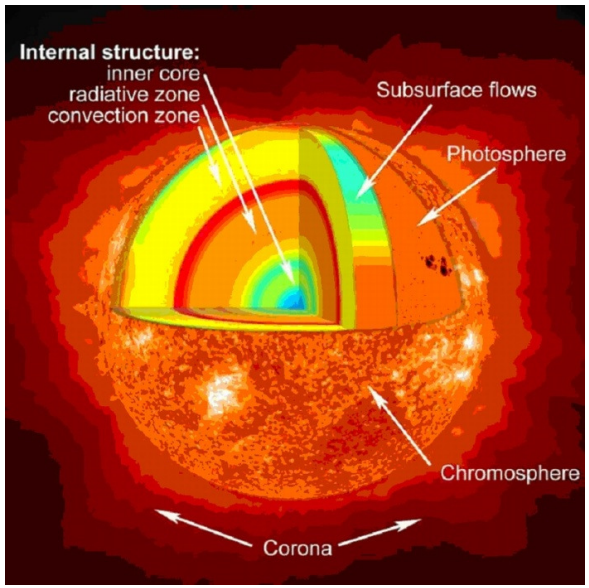


eruptív viselkedés: felszabaduló grav. pot. energia miatt
- bipoláris kiáramlások
- $v_{of} \approx 100 km/h$, néhány tized parszek
- semleges, majd ionizált gázok
- a korong eltűnéséig

Csillagaktivitás



T Tauri csillagok: kis tömegű, flerező, ezért szabálytalanul változó fényességű csillagok még a fősorozat elérése előtt





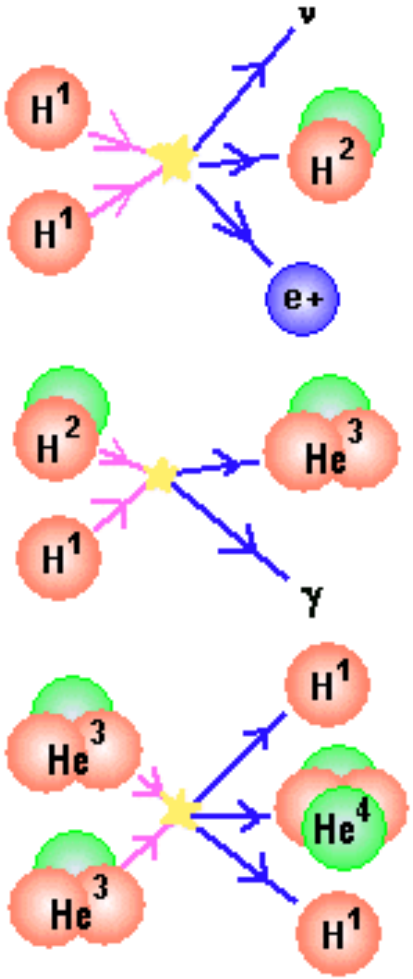
Napaktivitás: napfoltok, 11 éves ciklus, flerek, napszél, helioszféra, stb.

Energiatermelés

Alacsonyabb hőmérsékleten (pár millió fok):
– **p – p ciklus** (ppI lánc, ppII lánc, ppIII lánc)

Magasabb hőmérsékleten (10^8 K fölött):
– **CNO ciklus**

p – p ciklus főcsatorna



$$H^1 + H^1 \longrightarrow D^2 + e^+ + \nu$$

$$D^2 + H^1 \longrightarrow He^3 + \gamma$$

$$He^3 + He^3 \longrightarrow He^4 + H^1 + H^1$$

p – p ciklus mellékágak

Kisebb valószínűséggel:

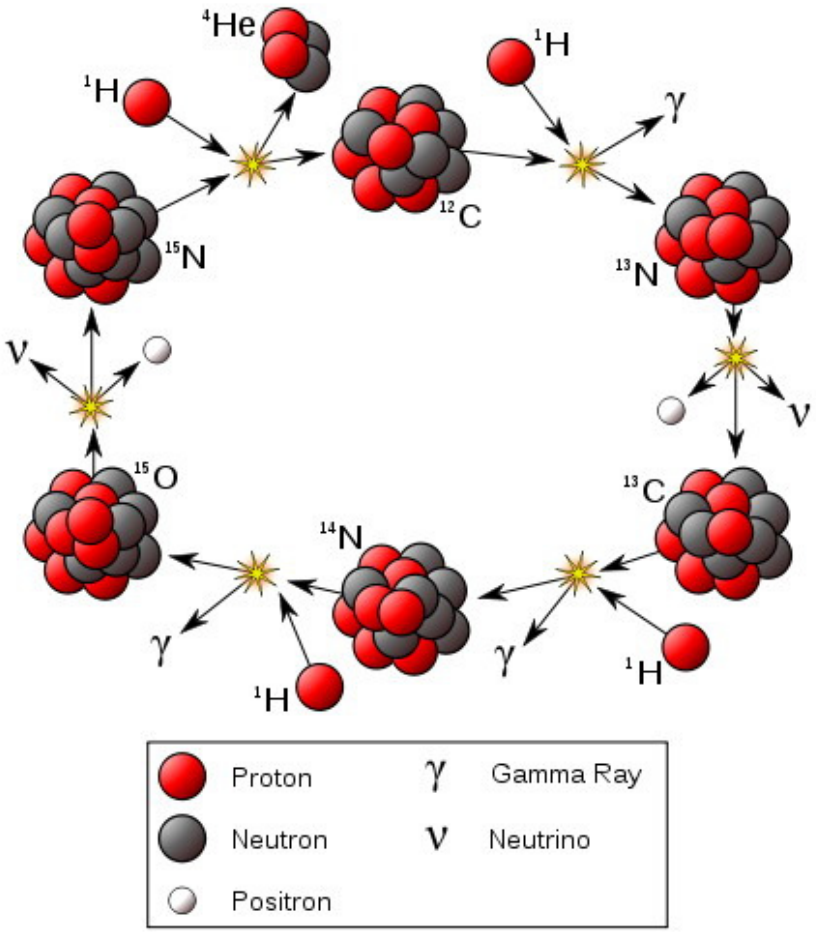
pp II lánc

$$He^3 + He^4 \longrightarrow Be^7 + \gamma$$
$$Be^7 + e^- \longrightarrow Li^7 + \nu$$
$$Li^7 + H^1 \longrightarrow He^4 + He^4$$

pp III lánc

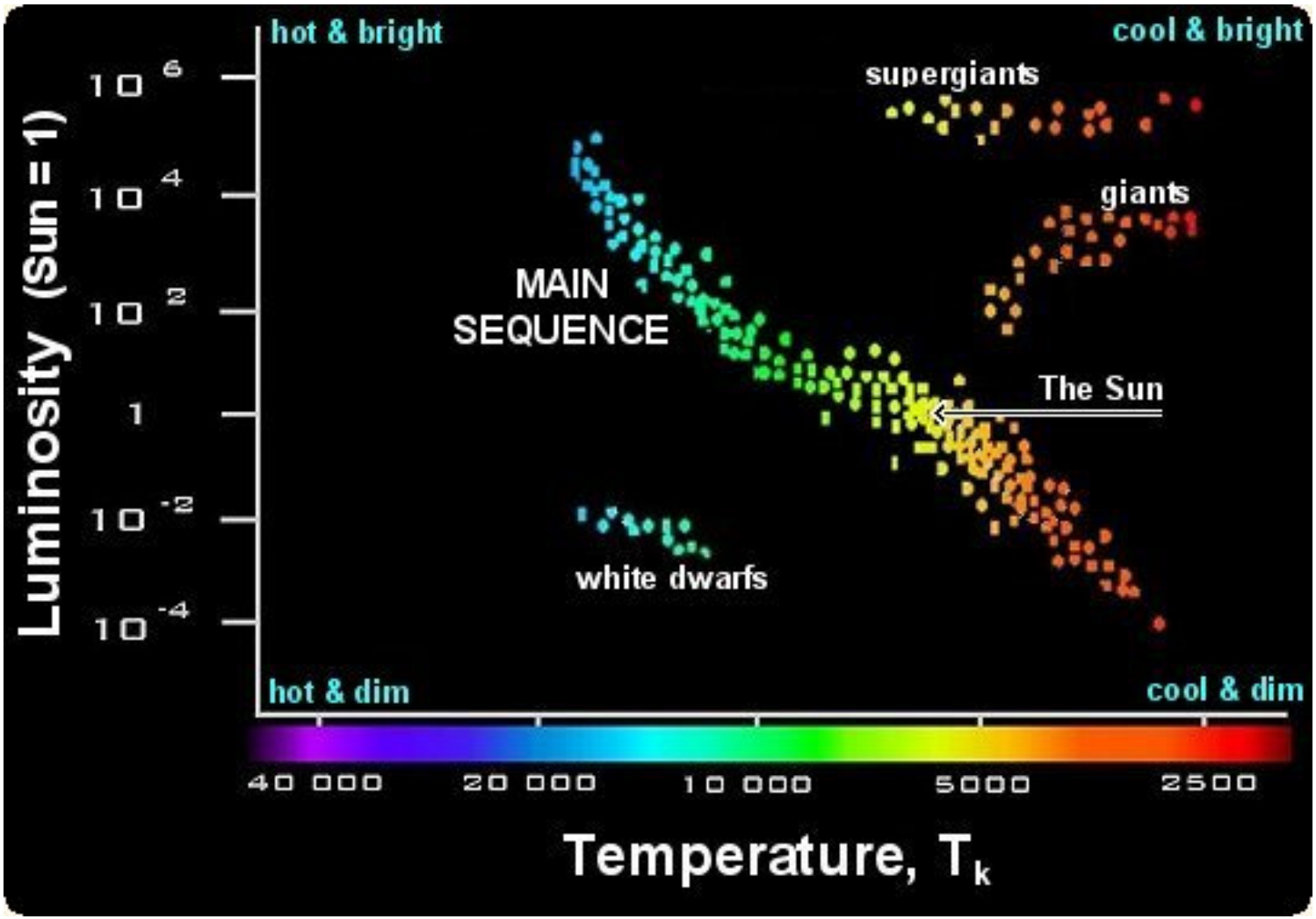
$$Be^7 + H^1 \longrightarrow B^8 + \gamma$$
$$B^8 \longrightarrow Be^8 + e^+ + \nu$$
$$Be^8 \longrightarrow He^4 + He^4$$

CNO ciklus

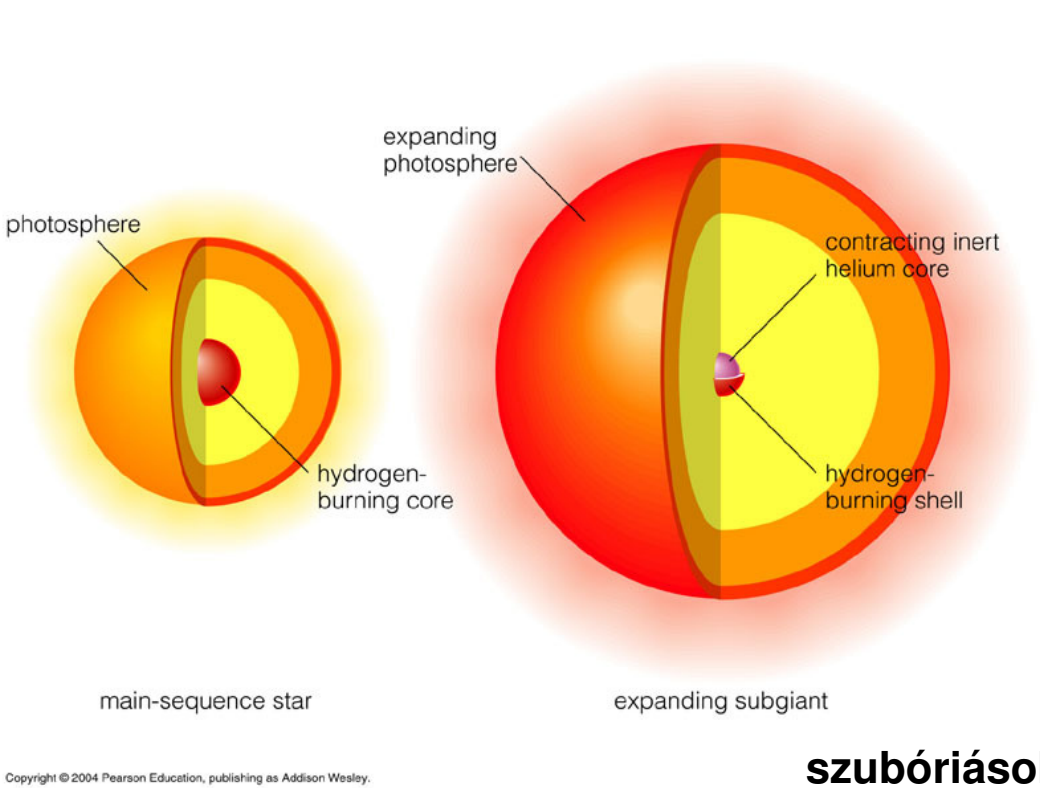


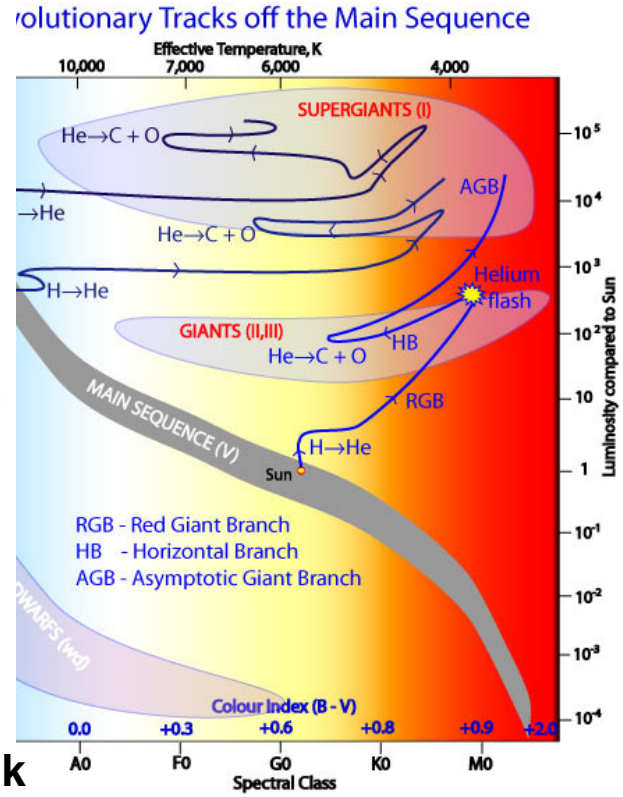
$C^{12} + H^1 \longrightarrow N^{13} + \gamma$
$N^{13} \longrightarrow C^{13} + e^+ + \nu$
$C^{13} + H^1 \longrightarrow N^{14} + \gamma$
$N^{14} + H^1 \longrightarrow O^{15} + \gamma$
$O^{15} \longrightarrow N^{15} + e^+ + \nu$
$N^{15} \longrightarrow C^{12} + He^4$
majd Ne és Si égés.
Végül $2Si^{28} \longrightarrow Fe^{56}$.

Hertzsprung–Russel Diagram (HRD)



Fősorozati állapot

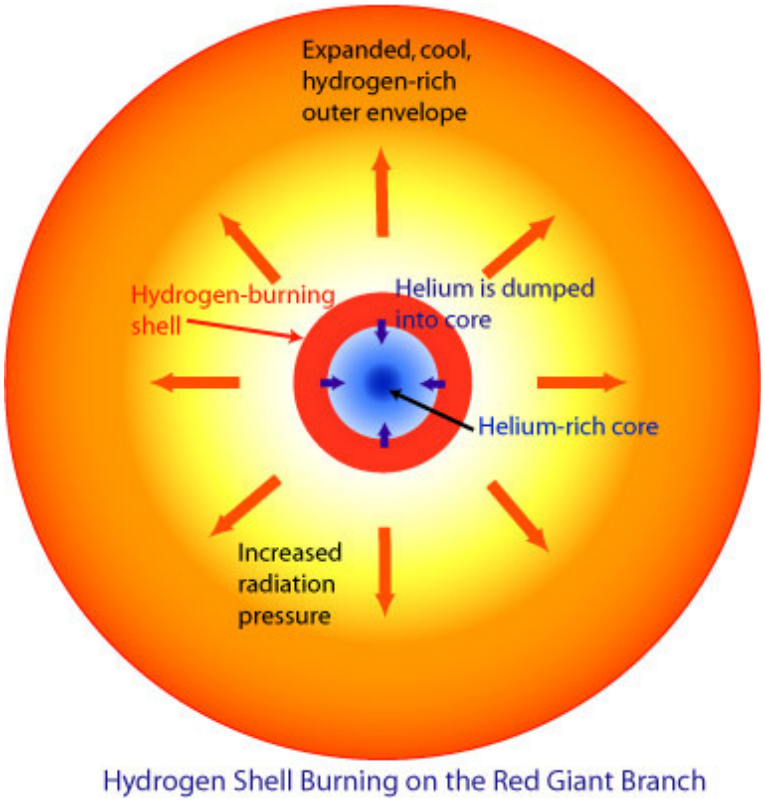




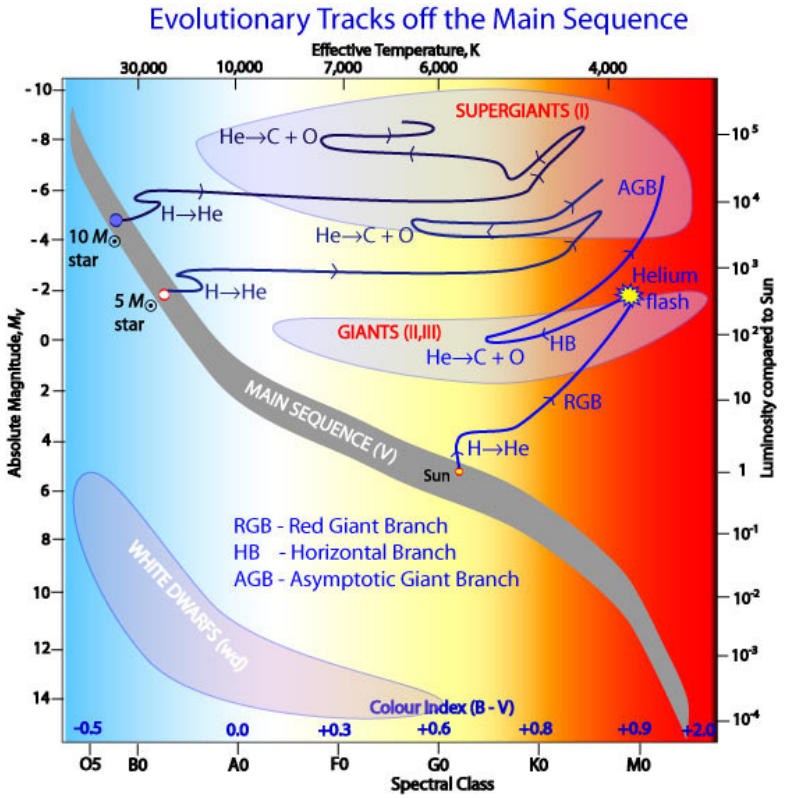
– **fősorozat**on: H $\longrightarrow$ He fúzió
– $t_{fsor.}$ tömegfüggő
– * élete 3/4 részét itt éli le
– legzsúfoltabb rész

szubóriások
– H 1% alatt a magban
– mag zsugorodik, T_{mag} nő
– H égés a mag külső részébe tevődik át
– külső rétegek felfúvódnak
– nincs sugárzásegyensúlyi állapot

Óriás állapot

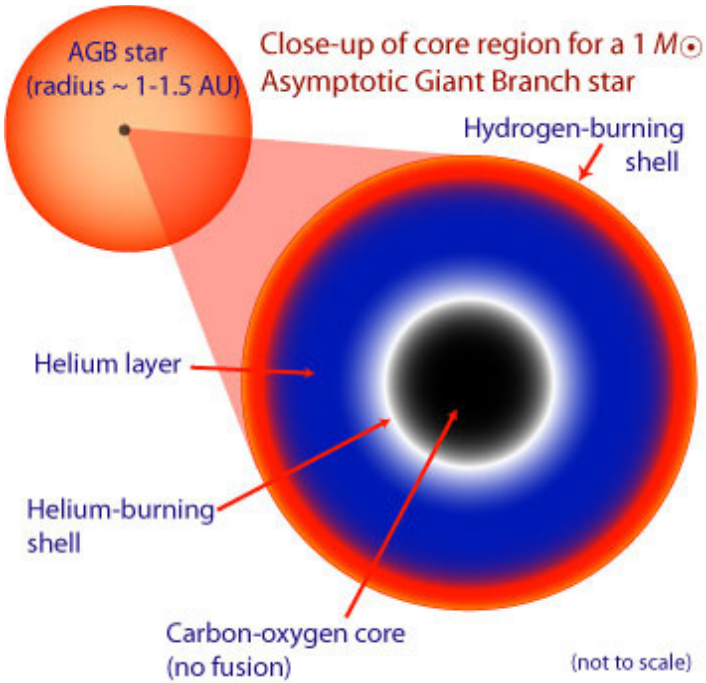


Hydrogen Shell Burning on the Red Giant Branch

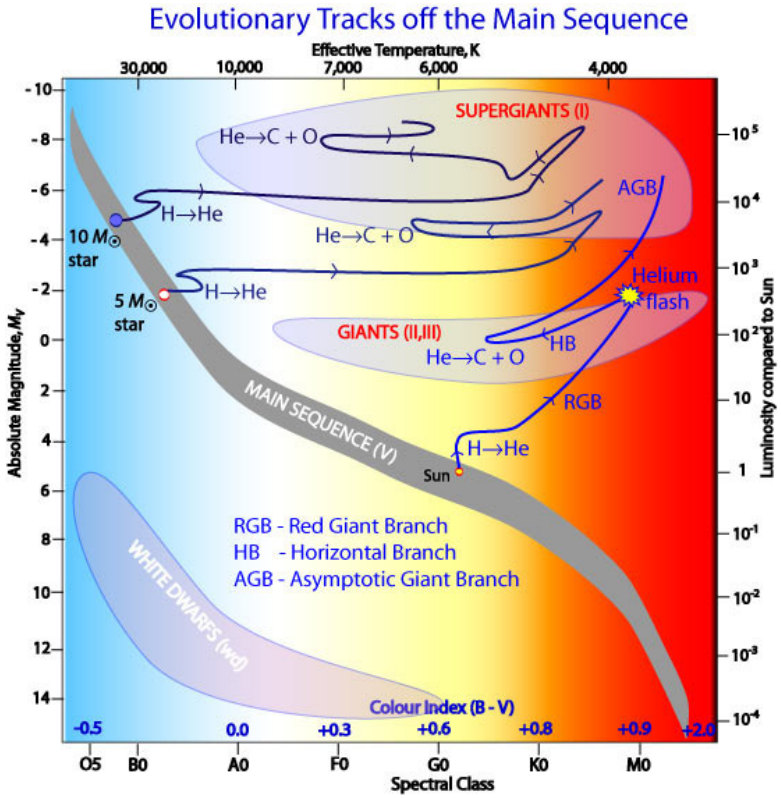


– He mag
– energiatermelés: H égető héj
– sugárzásegyensúly
– T_{mag} nő, He begyullad $\Longrightarrow$ He égető mag, H égető héj
– horizontális ág

Aszimptotikus óriáság

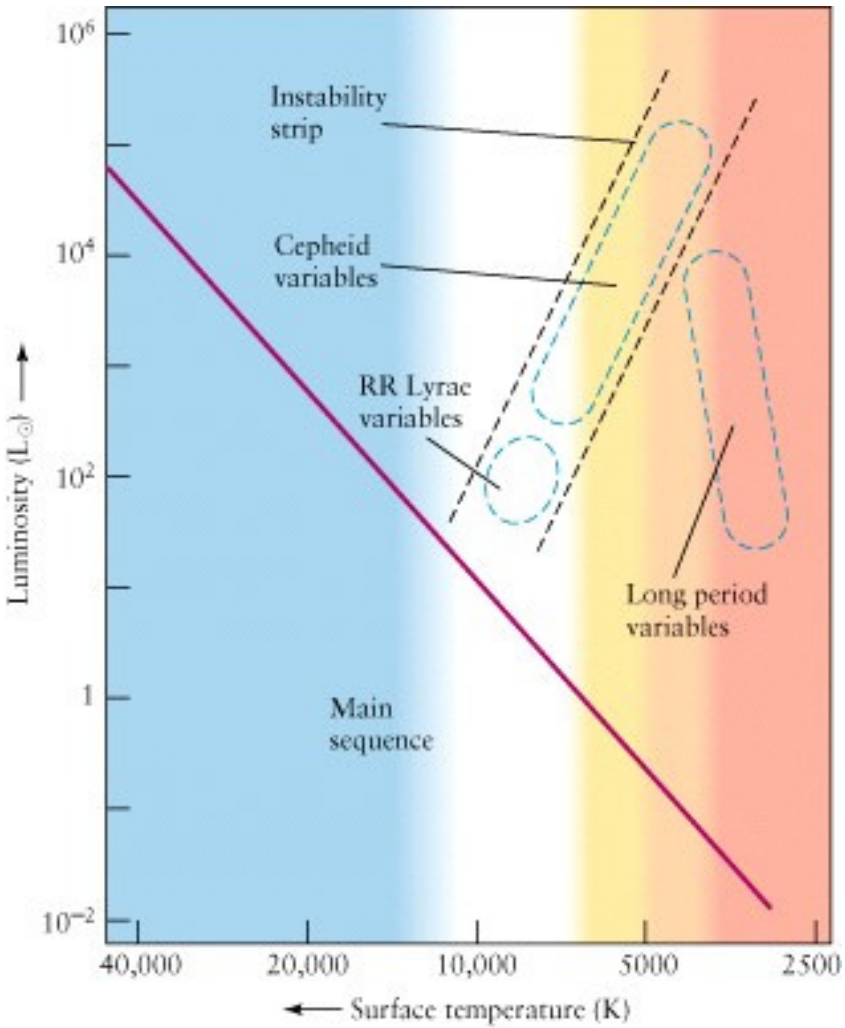


– kettős héjégés
– a magban elfogyott a He, begyullad a C
– a mag körül He ég
– a külső rétegben H ég



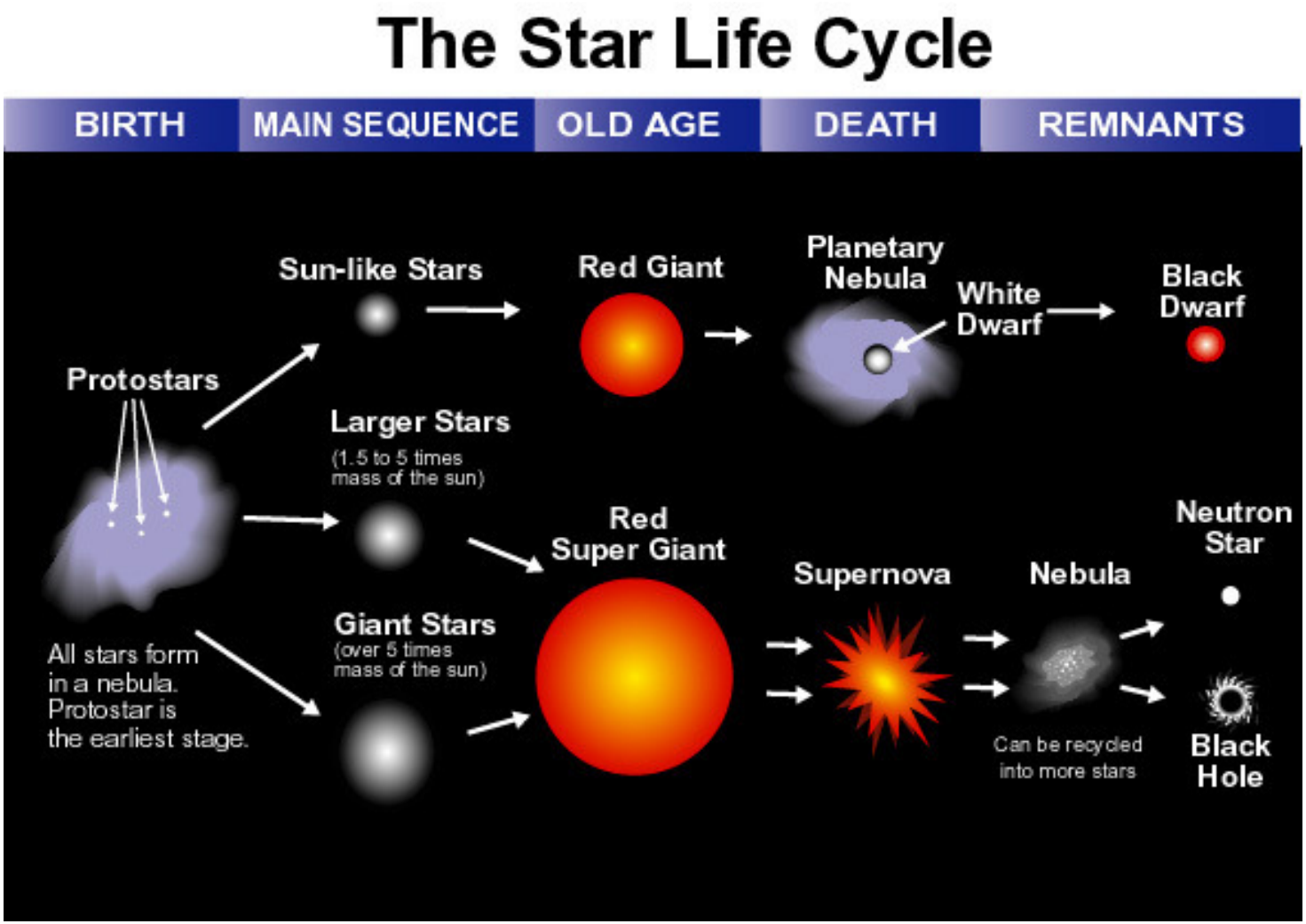
– $8m_\odot$ alatt a C mag nem gyullad be $\Rightarrow$ élete végéhez ér
– $10m_\odot$ fölött a He korán begyullad

Pulzáló változók



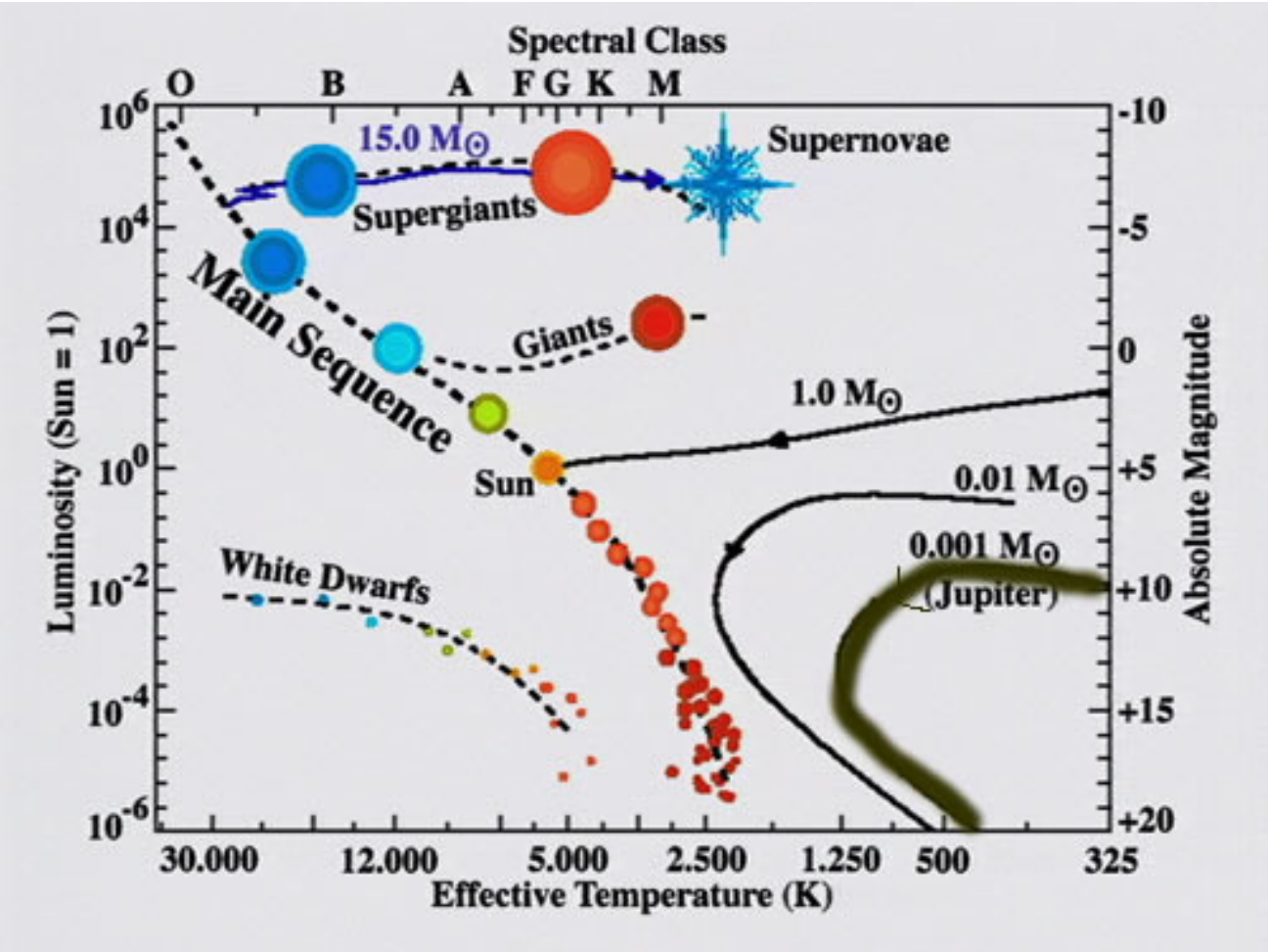
– óriáscsillagokban pulzációs instabilitás léphet fel
– ciklikusan változik a csillag fényessége
– RR Lyrae, cefeidák, Mirák
– instabilitási sáv

Különböző tömegű csillagok élete



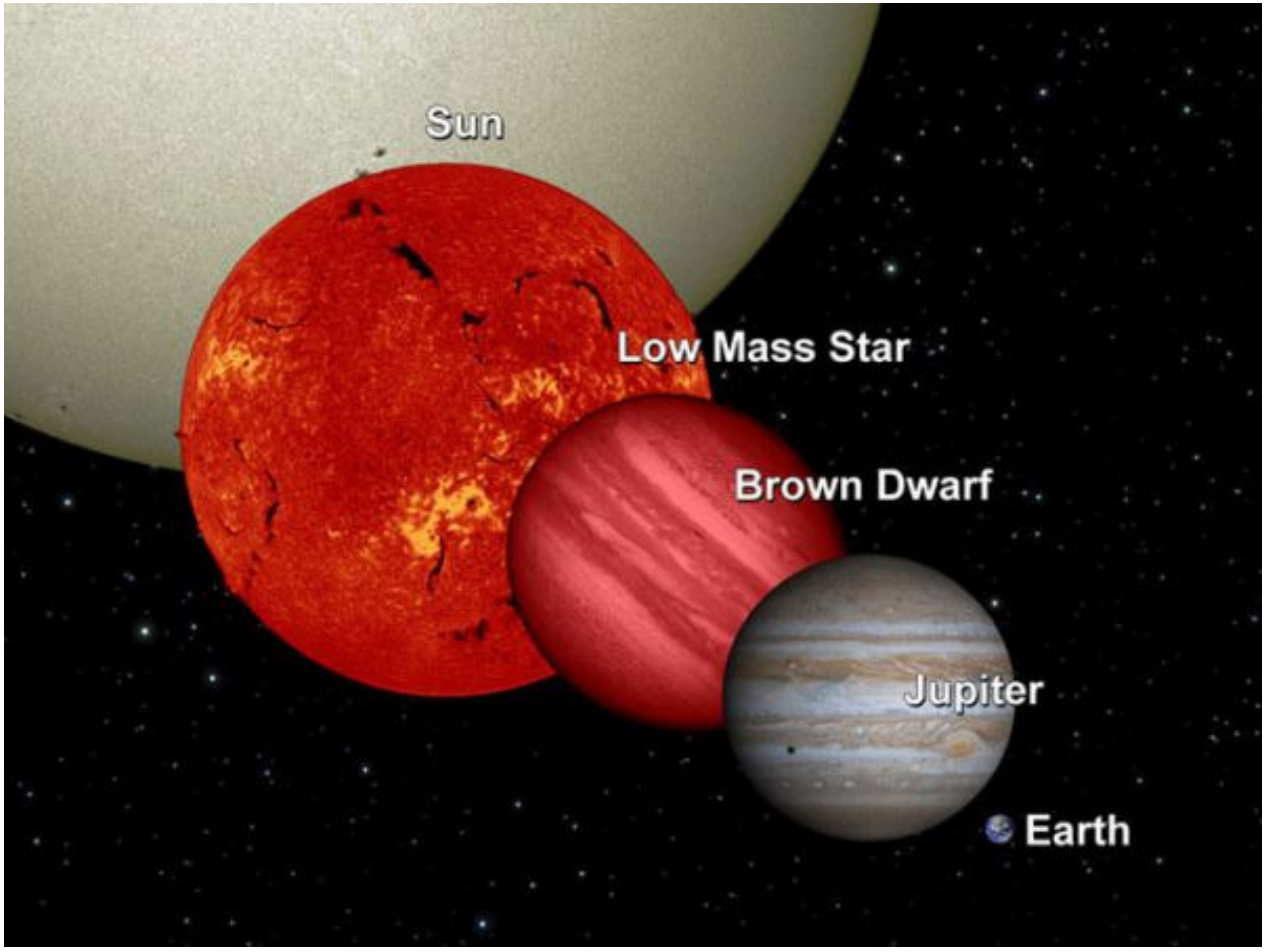
A csillag tömege szerint:
barna törpe
fehér törpe
neutroncsillag
feketelyuk

Barna törpék



Meg nem született csillagok (nem érték el a fősorozatot)
Megfigyelésük: infravörös tartományban és fedések révén

Barna törpék



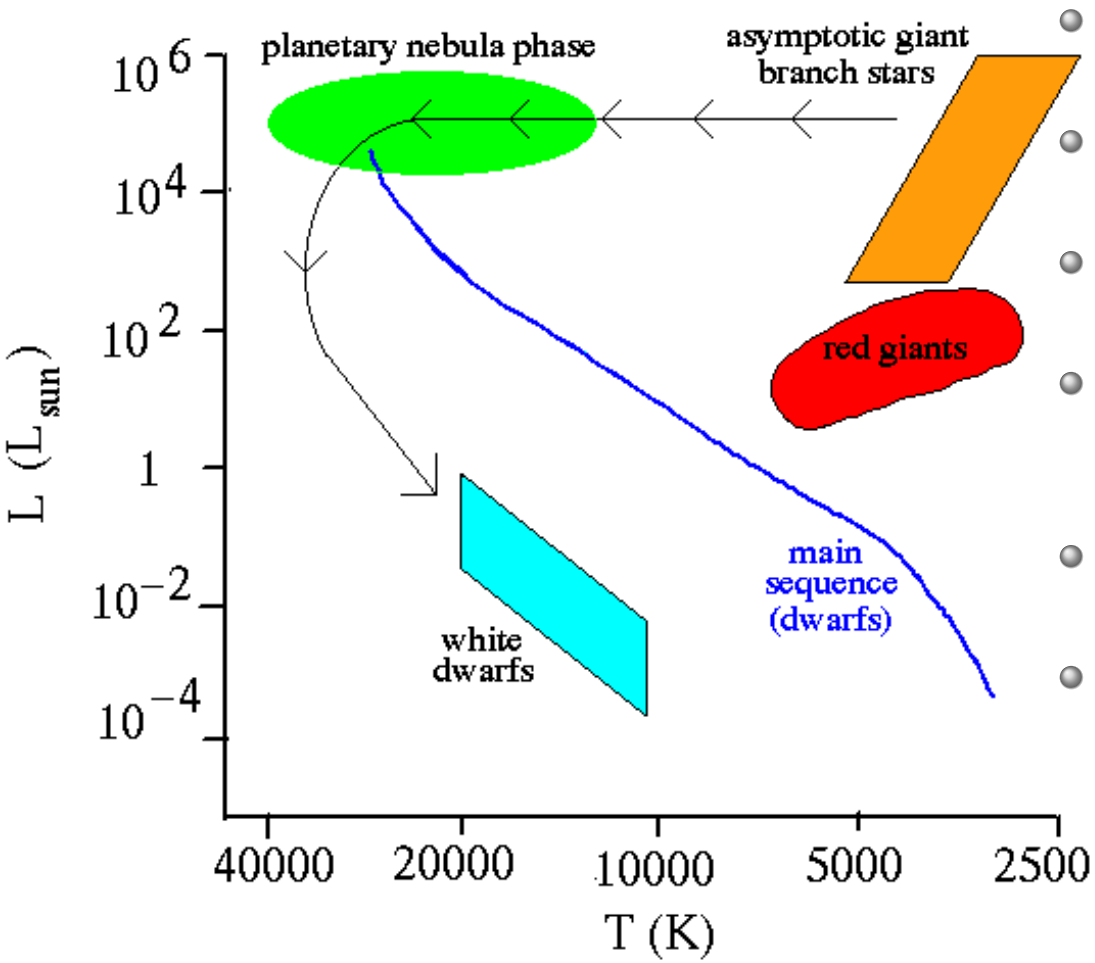
$$R \approx M^{-1/3}$$

Barna törpék



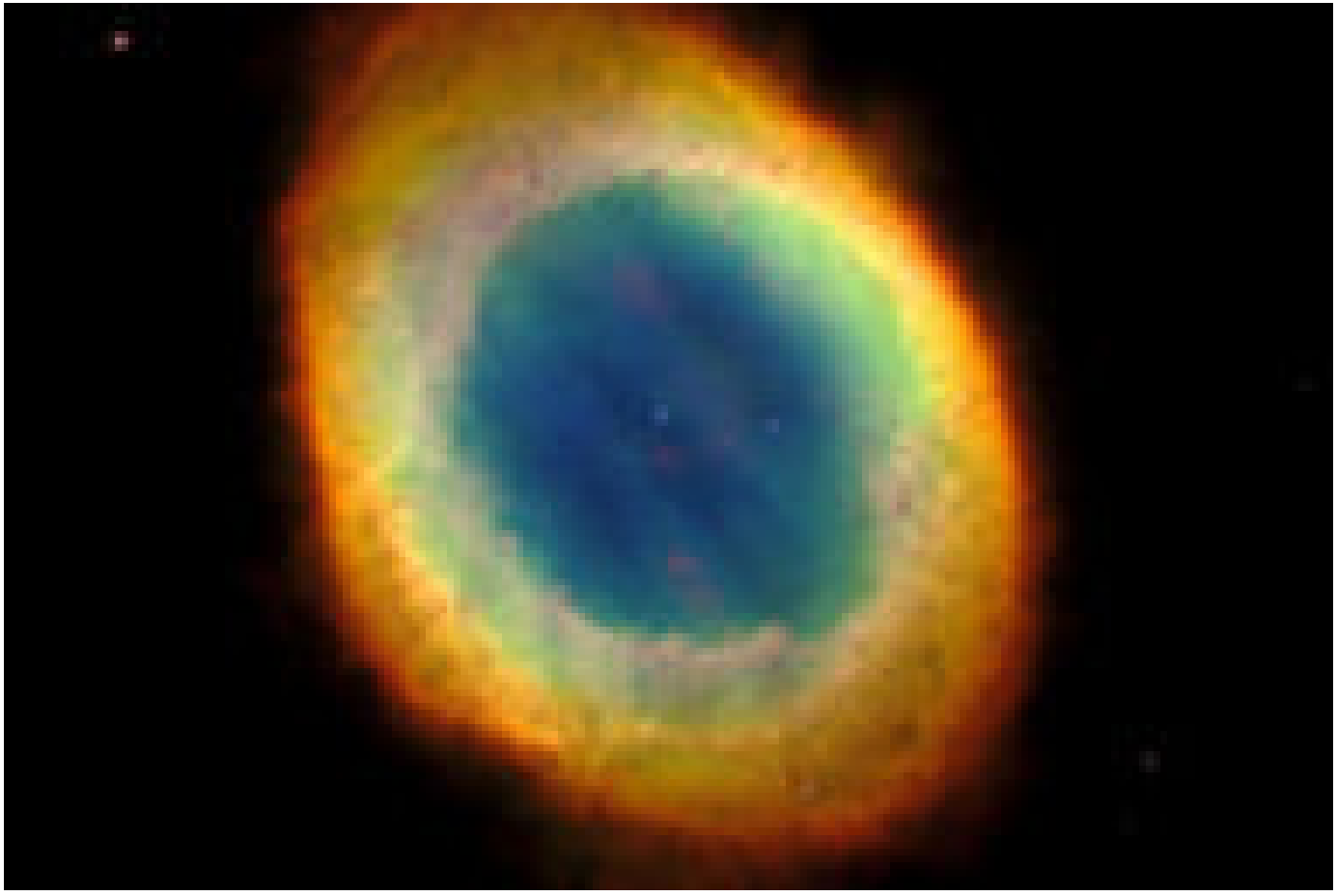
NASA Hubble Space Telescope, látható és infravörös tartománybeli felvétele az Orion ködben található Trapéz halmazról

Buroklevetés, planetáris ködök



- – a magban nem indul be a C égés ⇒ pusztulásra ítélt csillag
- – a csillag ledobja külső rétegeit (néhány évszázad, vagy évezred alatt)
- – nincs sugárzásegyensúly, T_* csökken, L=const., R csökken
- – forró csillagcsonk (forró **szubtörpe**) világításra készteti a ledobott burok anyagát
- – **planetáris köd**ök: kompakt, sűrű, magas gerjesztésű világító ködök
- – a köd tágul és néhányszor 10^4 évig látható marad

Planetáris ködök



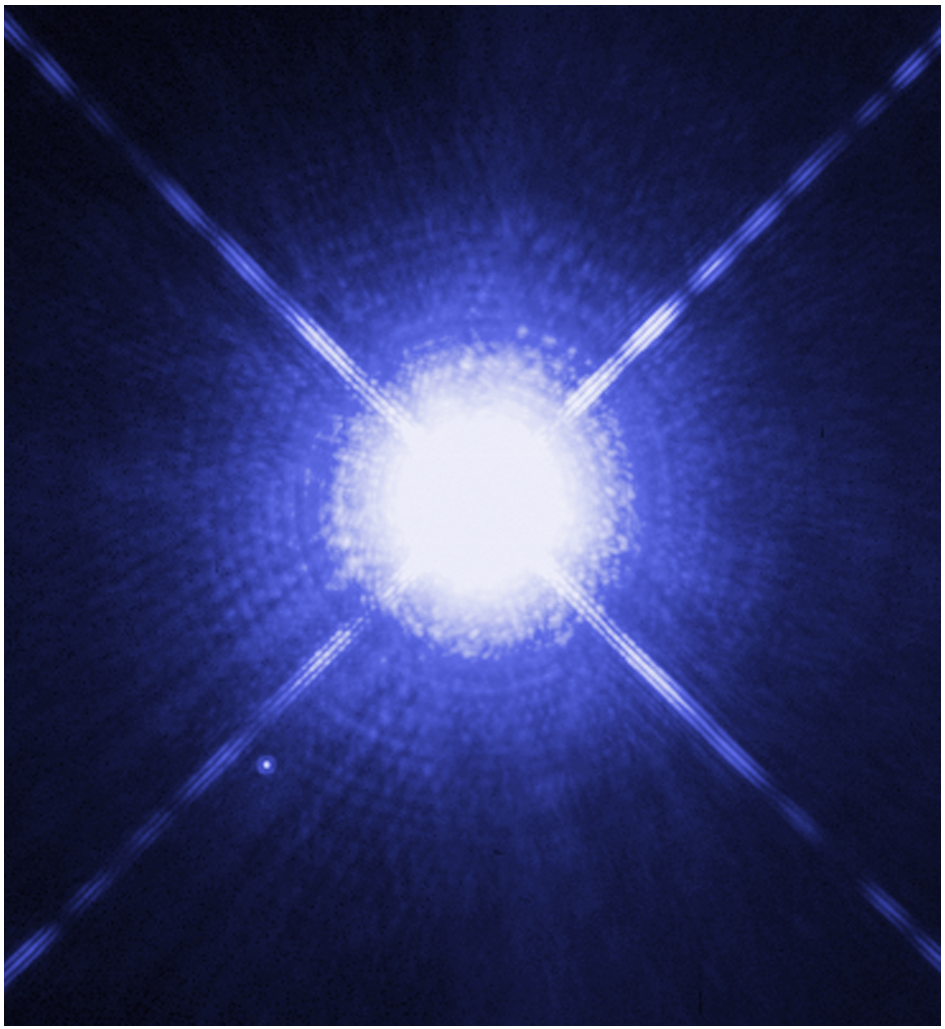
Gyűrűs-köd (M57), Gothard Jenő 1886
2.000 fényév távolságban lévő, 1 fényév átmérőjű köd, kb. 4.000 éves

Planetáris ködök



Stingray nebula – Rája köd(Hubble Space Telescope)
központi csillag kísérőcsillaggal
18.000 fényév távolságban,
130 Naprendszer méretben

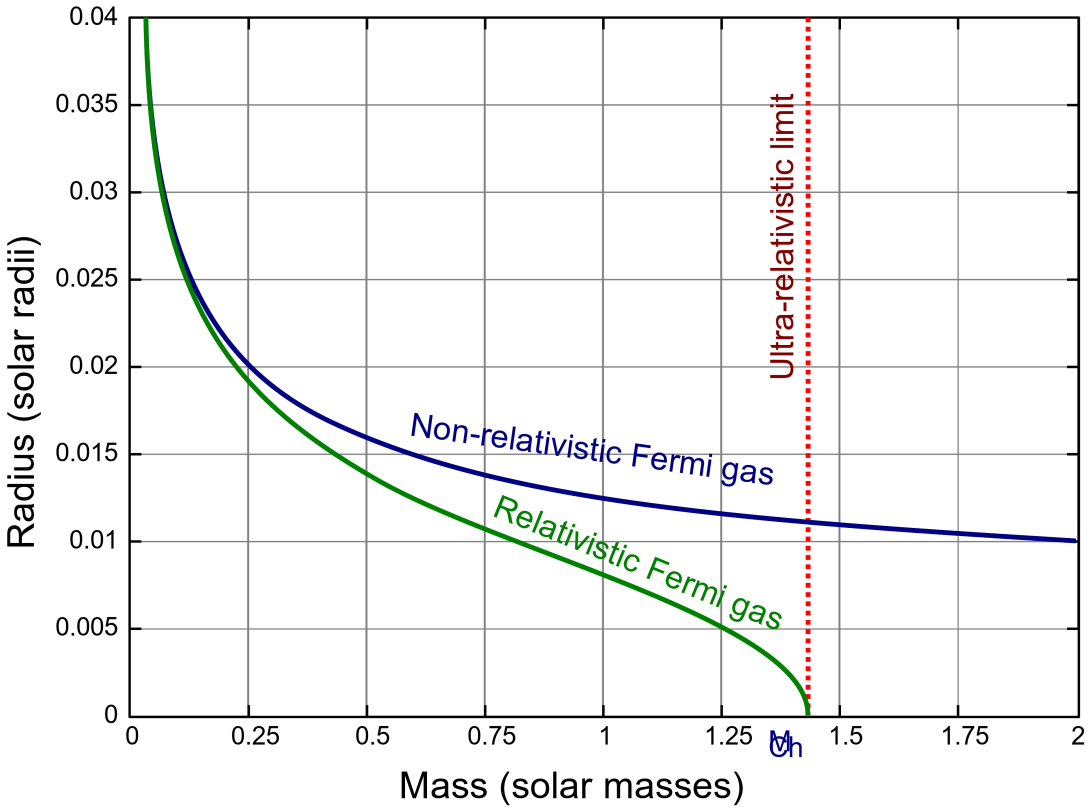
Fehér törpék



NASA Hubble Space Telescope, Sirius A és B

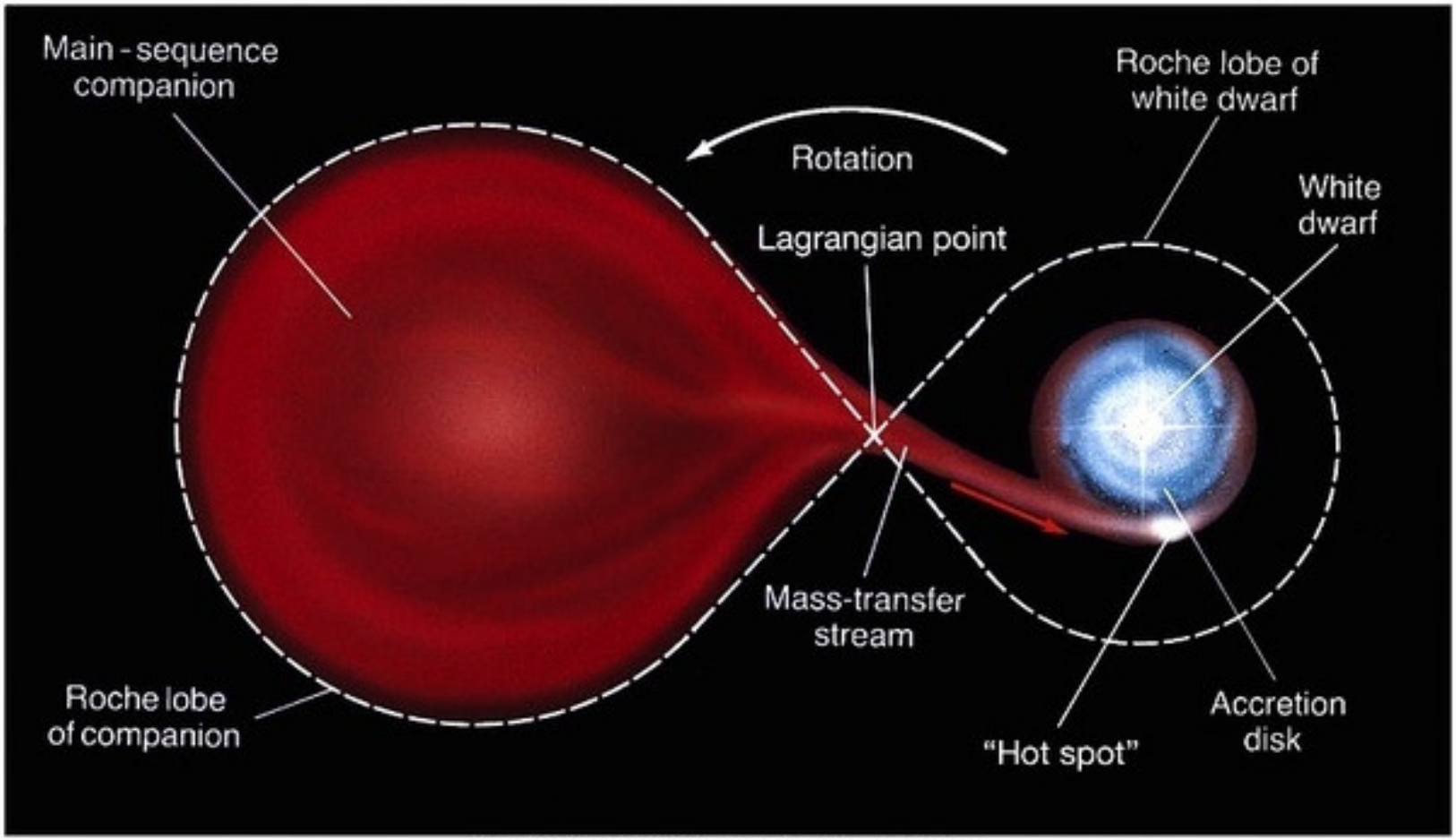
- a csillagcsonk tovább hűl
- a teljes anyag szénné és oxigénné alakul
- a mag nő, míg a r_* csökken
- nincs nukleáris energiatermelés
- sűrű és forró csillagok **fehér törpék**
- mérete a Földéhez hasonló, tömege és luminozitása a csillagokéval vetekszik

Fehér törpék



Chandrasekhar: M–R limit
a degenerált elektrongáz nyomása $1.40 m_\odot$-ig képes ellentartani a gravitációs összehúzó hatásnak
$1.40 m_\odot$-nél nagyobb tömeg fehér törpe összeomlik

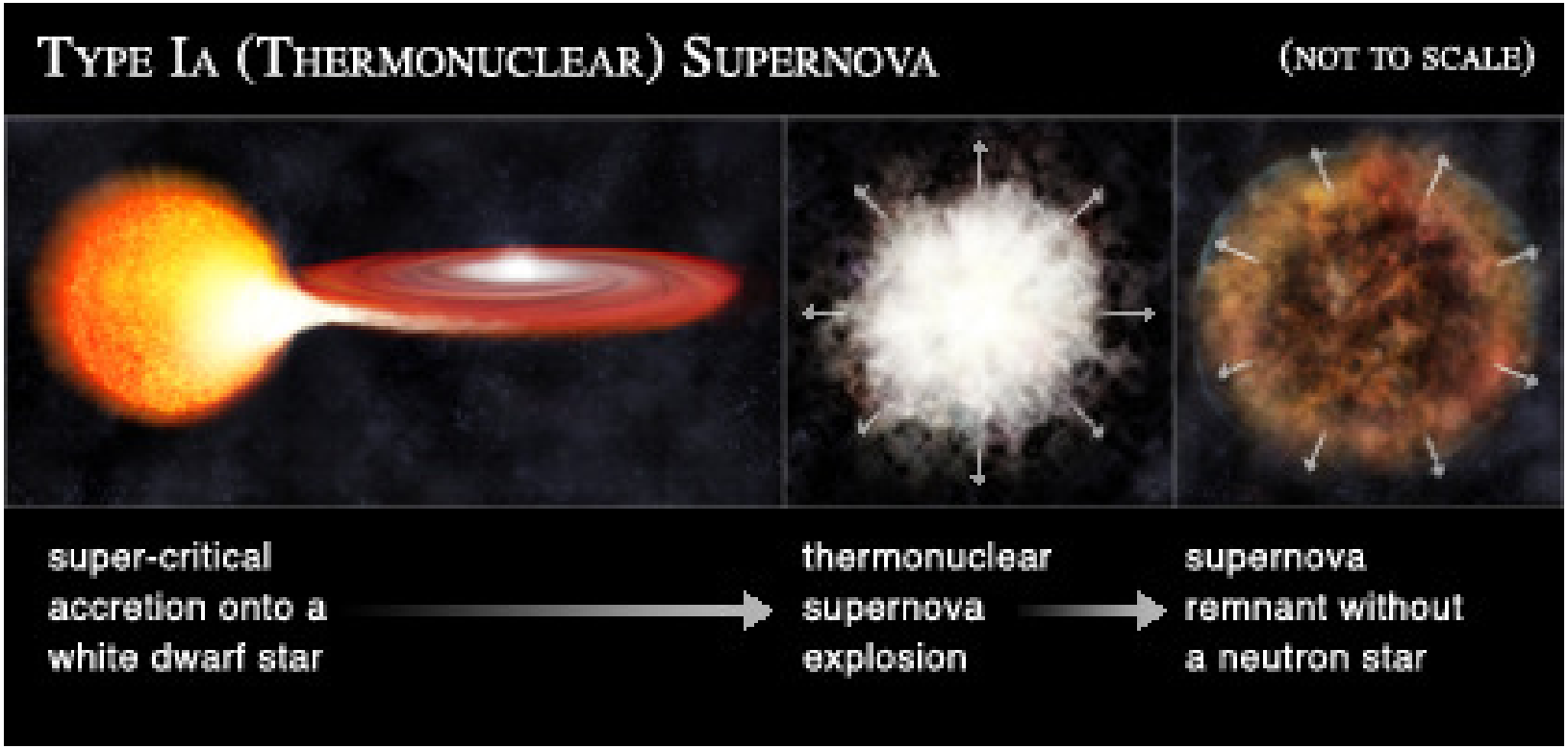
Fehér törpék kettős rendszerekben



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

anyagáramlás, Roche-lebeny

Ia típusú szupernóvák



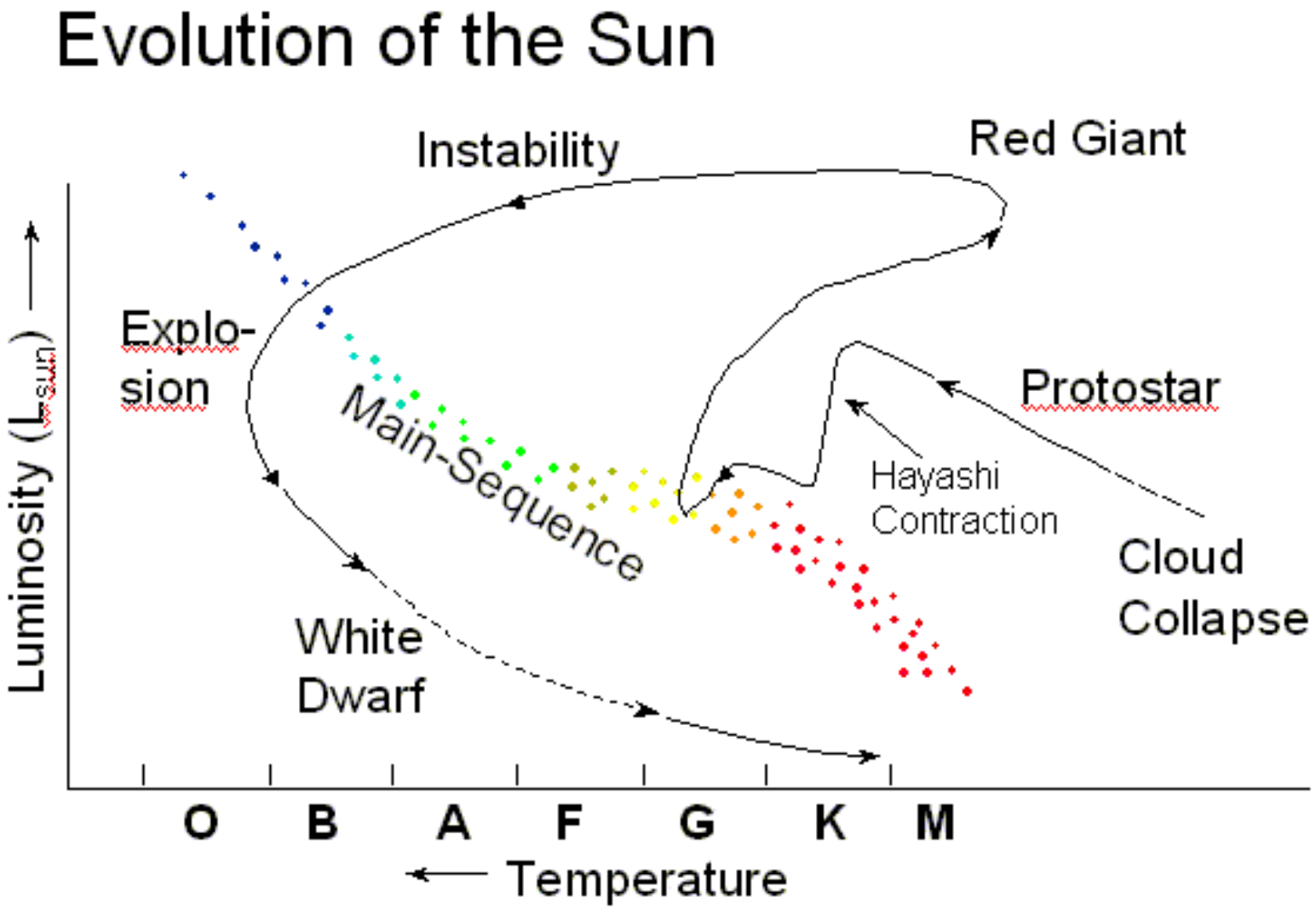
jól definiált azonos tömeg, azonos absz. fényesség
a relatív fényesség mérésével távolságmérésre használható (távolsági modulus)

Fekete törpék

Fekete törpék:

- – Elméletileg feltételezett csillagmaradványok.
- – Olyan kihűlt fehér törpék, melyek nem világítanak többé.
- – Sugárzásuk alig lehetne nagyobb a háttérsugárzásnál.
- – Elvileg az Univerzum életkora kisebb annál, hogy egy fehér törpe olyan mértékben lehűljön, hogy abból fekete törpe keletkezzen.
- – Megfigyelésük: lehetetlen. Gravitációs hatásuk alapján?

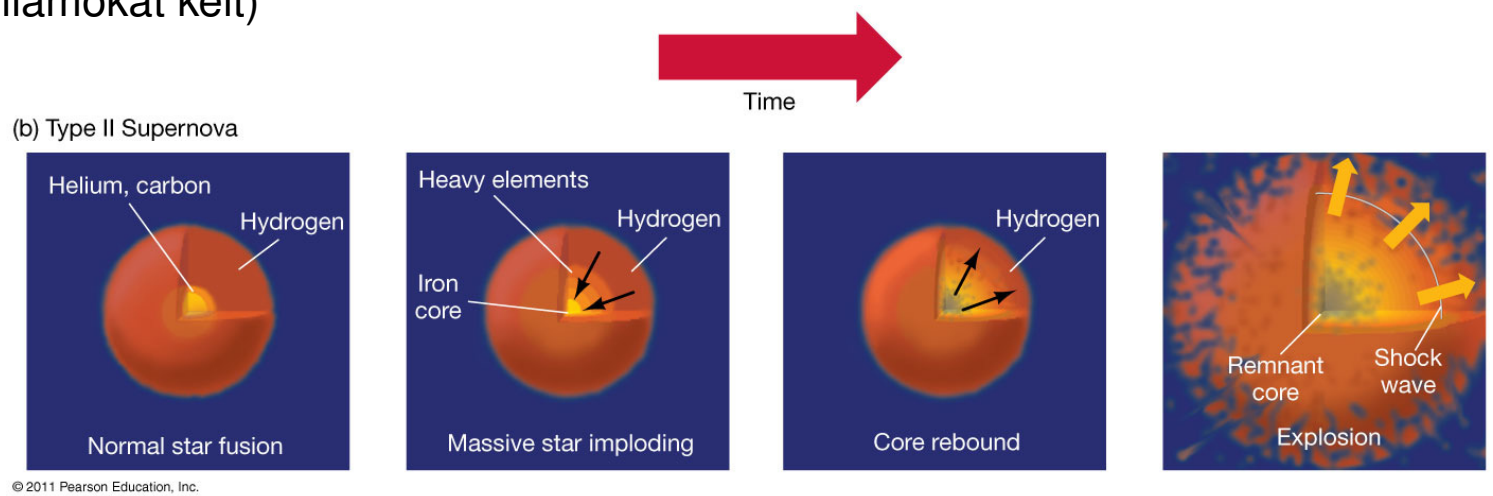
Napunk élete



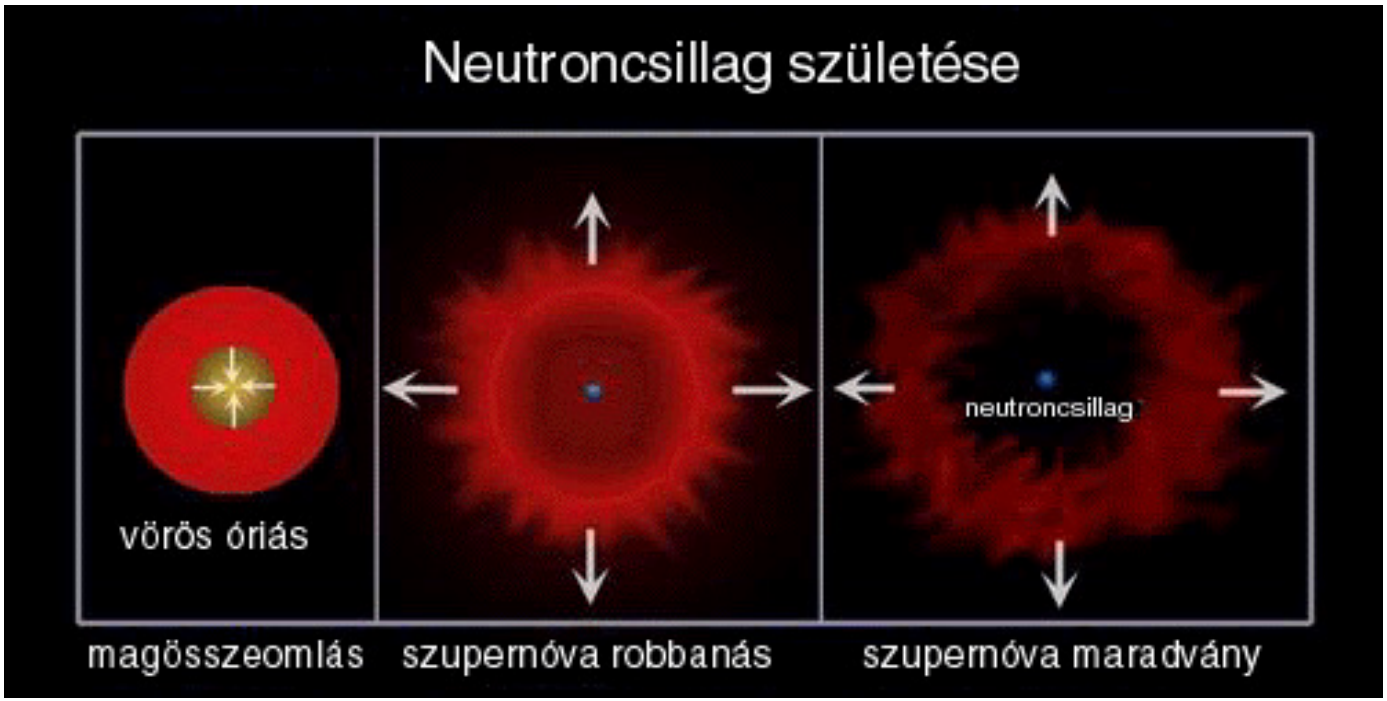
Szupernóvák

$m_* > 8m_\odot$

– magban beindul a C és más elemek égése
– a Fe elszaporodásáig folytatódik
– az energiafogyasztó reakciók hatására az egyensúly nem tartható fenn
– a * instabillá válik, a mag összeomlik ms-os időskálán
– hirtelen nagy energia felszabadulás $\Longrightarrow$ szétveti a csillagot
– II. típusú **szupernóva-robbanás**
(a robbanási energia a burok kinetikus energiájává alakul és felhőkeletkezésért felelős lökéshullámokat kelt)



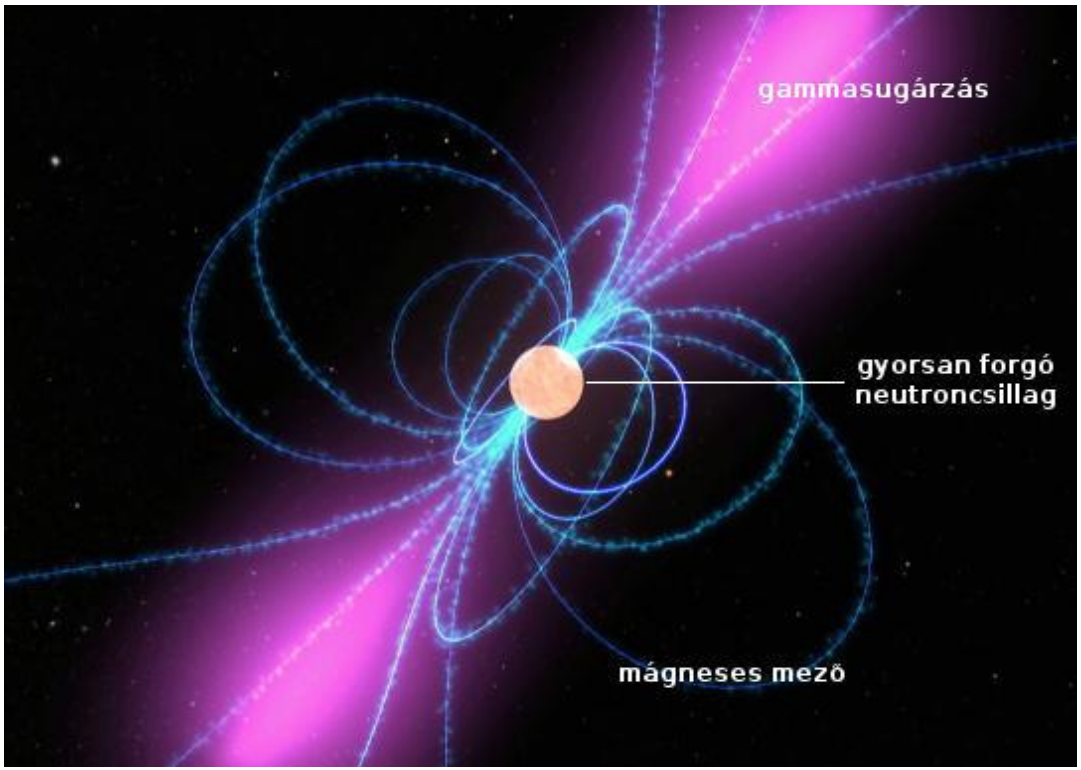
Neutroncsillagok



– visszamaradt csillagmag
– gyors forgás, erős mágneses tér
– felszíne eleinte forró, majd hűl
– eleinte röntgentartományban észlelhető, majd rádiótartományban kb. 10 millió évig észlelhető marad

Pulzárok

– a neutroncsillagot elhagyó töltött részecskék a közeggel és a B térrel kölcsönhatva rádiósugárzást keltenek
– csak a mágneses pólusoknál hagyhatják el a csillagot
– mágn. és forg. tengelyek nem azonosak $\Rightarrow$ világítótorony effektus
– a pulzár rotációja idővel csökken, majd leáll, holt neutroncsillag



Ködök



Rák köd (Kína, 1054)

Fekete lyukak

$m_* \geq 3m_\odot$
– Az ilyen csillagok nem állnak meg a neutroncsillag degenerált állapotnál, hanem a nyomást legyőzve magukba roskadnak.
– ezen állapotból elektromágneses úton információ már nem jut ki
– közvetlenül nem észlelhetők
– gravitációs hatásuk segít következtetni a létükre (pl. Tejútrendszer középpontjában is van)

