

A főszorozati állapot

- megindul a hidrogén fúziója héliummá
- leáll az összehúzódás
 - a gáznomás egyensúlyt tart a gravitációval
- hosszú időre stabilizálódik a csillag

A proton-proton ciklus

Hőmérséklet: ~10 millió fok

10^8 év
 2^1H
 4 s
 3^1He
 10^6 év
 4^2He

p^+ (H)
 n
 e^+
 ν

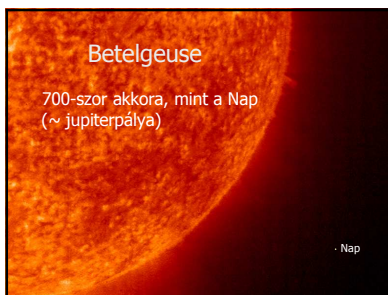
A hidrogénégés időtartama

$L \sim M^{3.5}$

M_0 :	t:
1	9 milliárd év
2	1,6 milliárd év
5	160 millió év
10	28 millió év

Vörös óriások

- elfogy a hidrogén, leáll a fúzió
- összehúzódik a csillag
- felmelegszik a mag (100 millió K)
- megindul a hélium fúziója nehezebb elemekké (hélium-flash)
- felfúvódik a csillag
- kicsi, sűrű, forró mag
- óriási, ritka, hideg atmoszféra



Fúziós folyamatok

200 millió K:
 $4\text{He} + 4\text{He} \leftrightarrow {}^8\text{Be} + \gamma$
 ${}^8\text{Be} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$

500 millió K:
 ${}^{12}\text{C} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{16}\text{O} + \gamma$
 ${}^{16}\text{O} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{20}\text{Ne} + \gamma$

1 milliárd K:
 ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{24}\text{Mg} + \gamma$
 ${}^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{32}\text{S} + \gamma$

2 milliárd K:
 ${}^{28}\text{Si} + {}^{28}\text{Si} \rightarrow {}^{56}\text{Ni} + \gamma$

↓
 ${}^{56}\text{Fe}$

- elfogy egy elem
- a csillag lehűl
- a mag összehúzódik
- felmelegszik
- megindul az újabb fúzió
- a külső réteg felfúvódik

Az óriás-csillagok szerkezete

Az egyes héjakban külön-külön végbemehetnek a fúziós folyamatok.

Kis tömegű csillagok

$M_{\text{mag}} < 1,4 M_{\odot}$

Fősorozat, H-fúzió

Vörös óriás, az elemek felépülése a szénig.

Fekete törpe

Fehér törpe, lassan kihűl.

Planetáris köd

A fúzió leáll, a csillag összehúzódik.

Fehér törpék

Egy fiatal fehér törpe

Felszíni hőmérséklete 200 ezer K

A Nap jövője

Jelenleg:

- hidrogén fúzió
- a mag hőmérséklete 15 millió K

5 milliárd év múlva:

- elfogy a mag hidrogénje
- a gravitáció összehúzza, felmelegszik
- a külső légkör kitér és lehűl
- a mag határán folytatódik a hidrogén-fúzió

A Nap jövője

6 milliárd év múlva:

- vörös óriás ($R \sim 1 \text{ CsE}$)
- a mag hőmérséklete 80 millió K
- a hidrogén fúziója egy héjban megy végbe

6,5 milliárd év múlva:

- a mag hőmérséklete eléri a 100 millió K-t
- megindul a hélium-fúzió (hélium-flash)
- ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be}$; aztán ${}^4\text{He} + {}^8\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C}$
- a mag kitér, csökken a hőmérséklete
- a külső légkör összehúzódik és felmelegszik

A Nap jövője

6,6 milliárd év múlva:

- elfogy a magban a hélium (szén-mag)
- a mag összehúzódik és felmelegszik
- a hélium fúzió egy héjban folytatódik
- a külső légkör pulzál

Kb. 7 milliárd év múlva:

- a mag fehér törpévé esik össze
- a folyamat lefújja a külső légkört (planetáris köd)
- a törpecsillag lassan kihűl

Nagy tömegű csillagok

$M_{\text{mag}} > 1,4 M_{\odot} (M > 8 M_{\odot})$

Fősorozat, H-fúzió

Vörös óriás, az elemek felépülése C, N, O, Si, ... Fe

Szupernóva

A fúzió leállása után a csillag összerokkad és felrobban.



A szökési sebesség

$$v_{szökési} = \sqrt{2} \cdot v_{kör} = \sqrt{\frac{2\gamma M}{R}}$$

M: az égitest tömege
 R: az égitest sugara
 $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg/s}^2$

- Csökken a méret → nő a szökési sebesség.
- A szökési sebesség nagyobb, mint a fénysebesség:

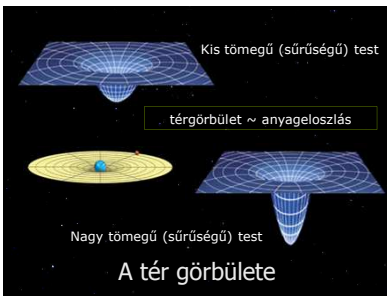
$$\sqrt{\frac{2\gamma M}{R}} > c \Rightarrow R < \frac{2\gamma M}{c^2}$$

Schwarzschild-sugár

A Schwarzschild-sugár

	Tömeg:	R:
Világegyetem	10^{12} galaxis	~ 30 milliárd fényév
Galaxis	$10^{11} M_{\odot}$	0,03 fényév
Nap	$2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$	3 km
Föld	$6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$	9 mm
Hegység	1 milliárd tonna	10^{-15} m
Ember	70 kg	10^{-25} m

A hidrogénatom sugara: $5 \cdot 10^{-11} \text{ m}$



A fény útja

itt látjuk

itt helyezkedik el

Nagy tömegű égitest (például a Nap)

Elhajlás a Nap mellett: $1,8''$ (a napkorong 0,1%-a)



A fekete lyukak megfigyelése

- Gravitációs hatás: nagy tömegű, láthatatlan kísérő
- Röntgensugárzás: a behulló anyag okozza (akkréciós korong)

A Cyg X-1 kettősrendszer

Periódus: 5,6 nap

Tömeg: $10 M_{\odot}$

a radiális sebesség változása

Erős röntgenforrások

A Chandra röntgen-műhold felvétele


Szupermasszív fekete lyuk



- A galaxisok középpontjában
- Tömeg: több millió naptömeg

A Tejútrendszer középpontja

BL Lacertae



- A gyorsan forgó mágneses mező feltékeeredik
- A feltékeeredett mágneses mező a pólusok irányában leszakadozik (←→ örvény)
- Magával sodorja a gázt
- A jet hossza több millió fényév is lehet

A fekete lyukak párolgása

Hawking, 1977:
a fekete lyukak folyamatosan energiát → tömeget veszítenek!

