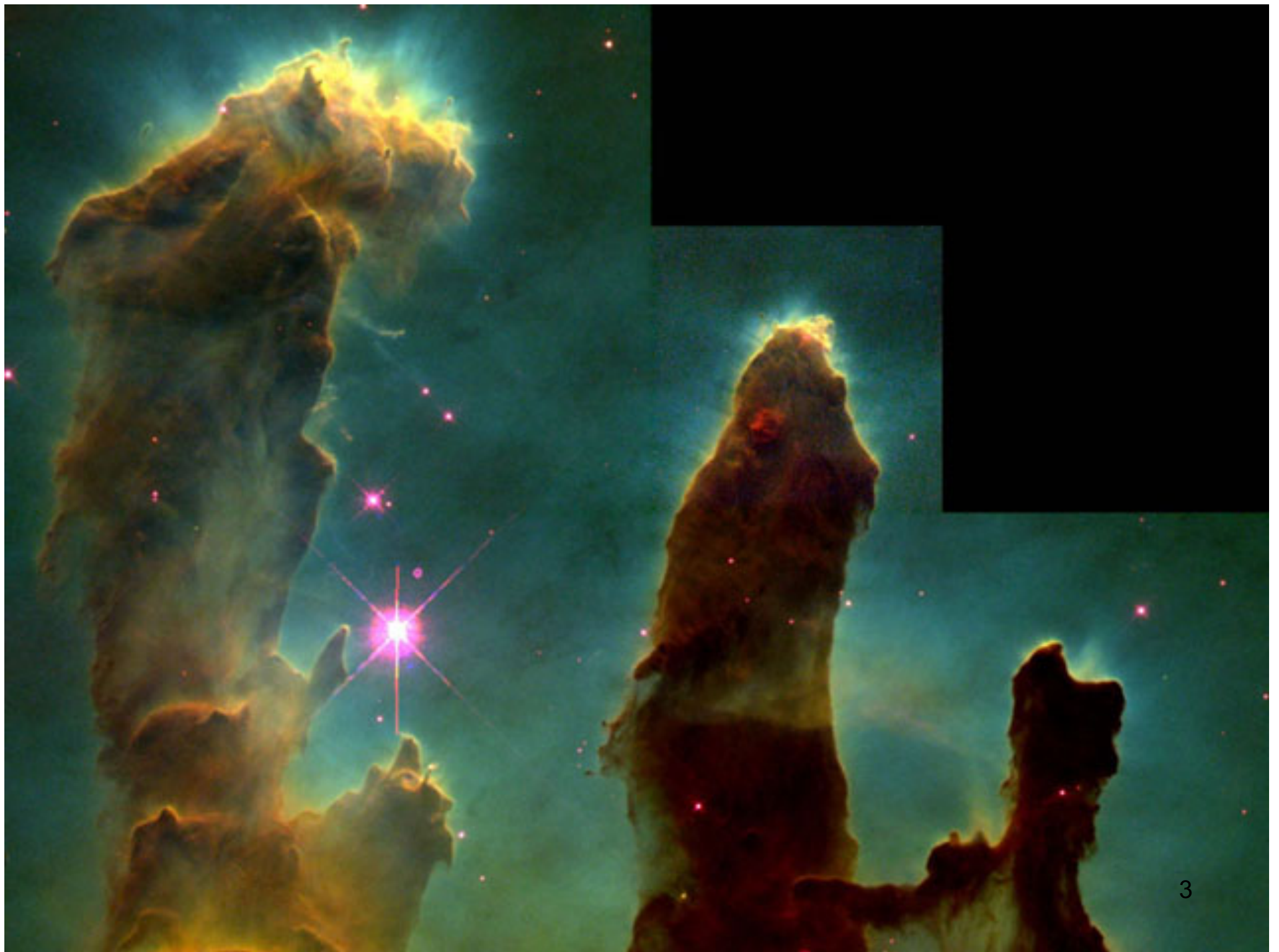




# Evolucija zvezda





- Gravitaciono sažimanje oblaka MZM (spontano ili indukovano: udarnim talasima SNR, zvezdanim vetrovima, spiralnim talasima gustine, sudarima molekulskih oblaka)
- Fragmentacija masivnog oblaka i formiranje grupa zvezda (zvezdane asocijacije i otvorena zvezdana jata)
- Svaki od fragmenata (protozvezda) gravitaciono se sažima; oslobođena gravitaciona energija se delom pretvara u termalnu (unutrašnju) energiju zvezde, a delom izrači u radio i IC području.

# Gravitaciono sažimanje

- GRAVITACIONA POTENCIJALNA ENERGIJA ZVEZDE MASE  $M$  I RADIJUSA  $R$ :

$$E_G = - \int_0^M \frac{Gm(r)}{r} dm(r) = - 4\pi G \int_0^R m(r) \rho(r) r dr$$

- UKUPNA ENERGIJA ZVEZDE:

$$E = E_G + E_T + E_{\text{zr}} < 0 \quad \text{ZA STABILNU KONFIGURACIJU GASA I ZRAČENJA}$$

- TERMALNA ENERGIJA ZVEZDE:

$$\begin{aligned} E_T &= \frac{3}{2} \int_0^M \frac{kT}{m} dm(r) = \frac{3}{2} \int_0^M \frac{p}{\rho} dm(r) = 6\pi \int_0^R p(r) r^2 dr \\ &= 6\pi \left[ \cancel{p(r) \frac{r^3}{3}} \Big|_0^R - \frac{1}{3} \int_0^R r^3 dp(r) \right] = 2\pi G \int_0^R m(r) \rho(r) r dr = -\frac{1}{2} E_G \end{aligned}$$

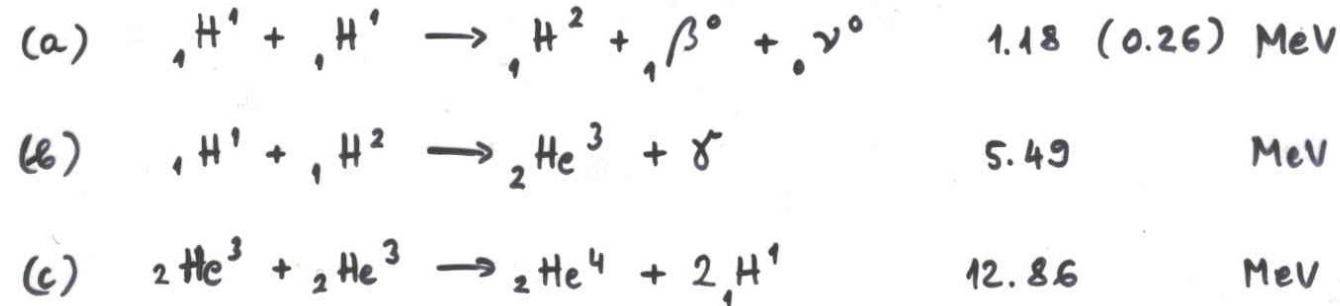
$p(R) = 0$

- PRI SPOROM SAŽIMANJU ZVEZDE (ZADOVOJEN USLOV H.R.):

$$\Delta E_G < 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta E_T = -\frac{1}{2} \Delta E_G > 0$$

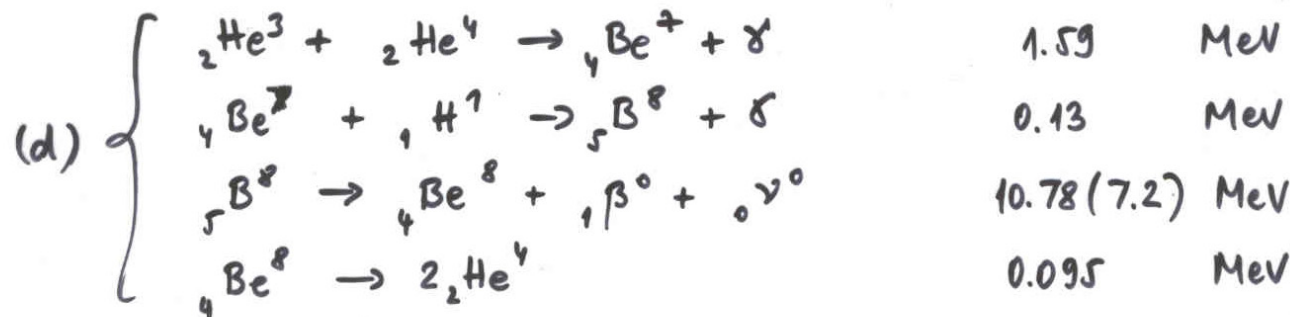
- Svaki od fragmenata (protozvezda) gravitaciono se sažima; oslobođena gravitaciona energija se delom pretvara u termalnu (unutrašnju) energiju zvezde, a delom izrači u radio i IC području.
- Ako se sažimanjem u jezgru dostigne  $T$  oko  $10^7$  K i gustina oko  $10^2$  g/cm<sup>3</sup> počinju TN reakcije sagorevanja vodonika, zvezda zauzima mesto na glavnom nizu – zvezda je rođena!
- Donja granica za masu protozvezde, potrebne da se zapali vodonik je 8% mase Sunca.

# Proton-proton (p-p) lanac



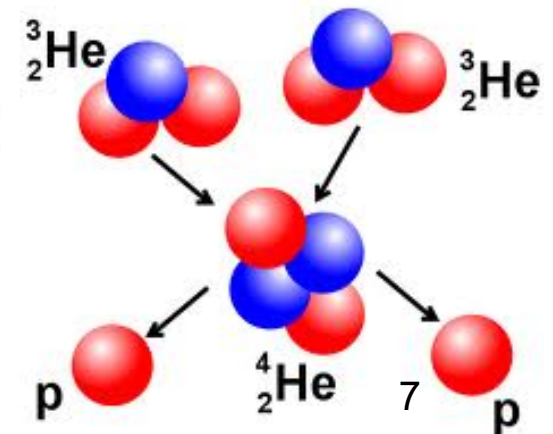
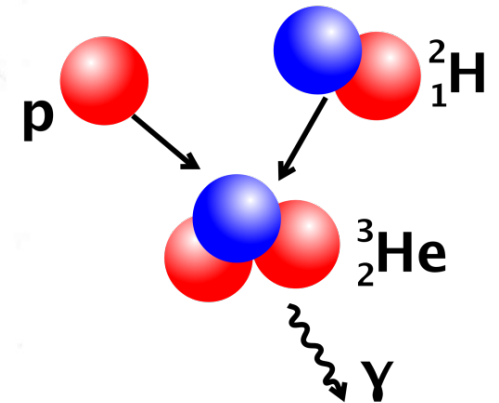
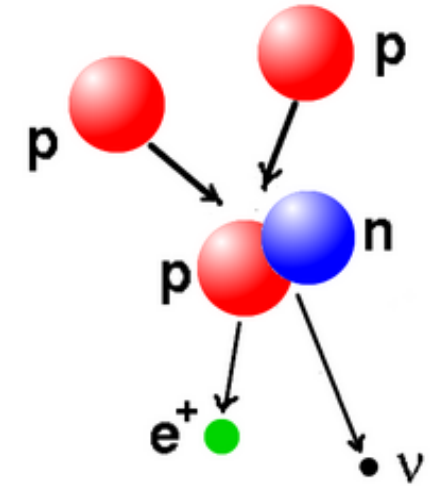
$$E = 2 \cdot E_{(a)} + 2 \cdot E_{(b)} + E_{(c)} = 2 \cdot (1.18 + 0.26 + 5.49) + 12.86 = 26.72 \text{ MeV}$$

Alternativni niz reakcija:

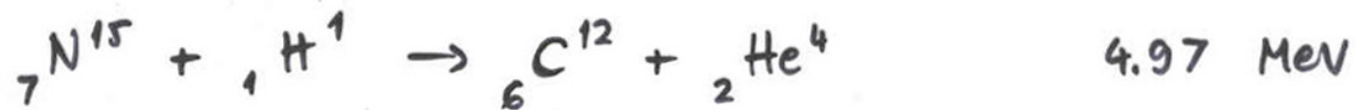
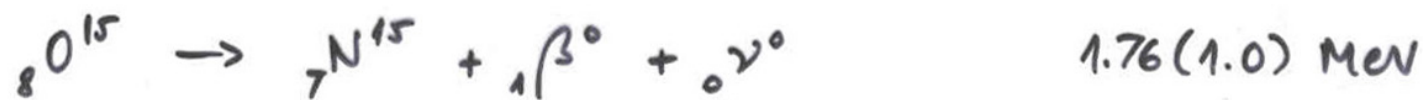
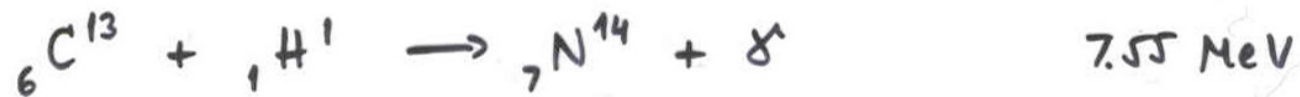
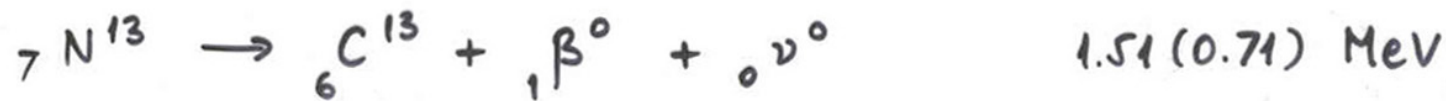
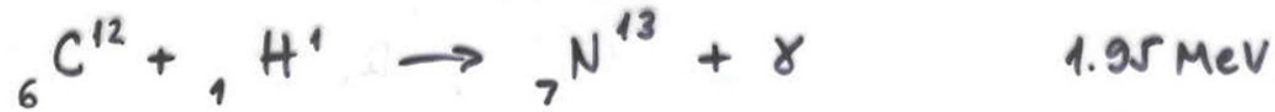


$$E = E_{(a)} + E_{(b)} + E_{(d)} = 26.72 \text{ MeV}$$

• p-p lanac najefikasniji na  $T \sim 15 \cdot 10^6 \text{ K}$  i  $\rho \sim 10^2 \text{ g/cm}^3$  (☉)



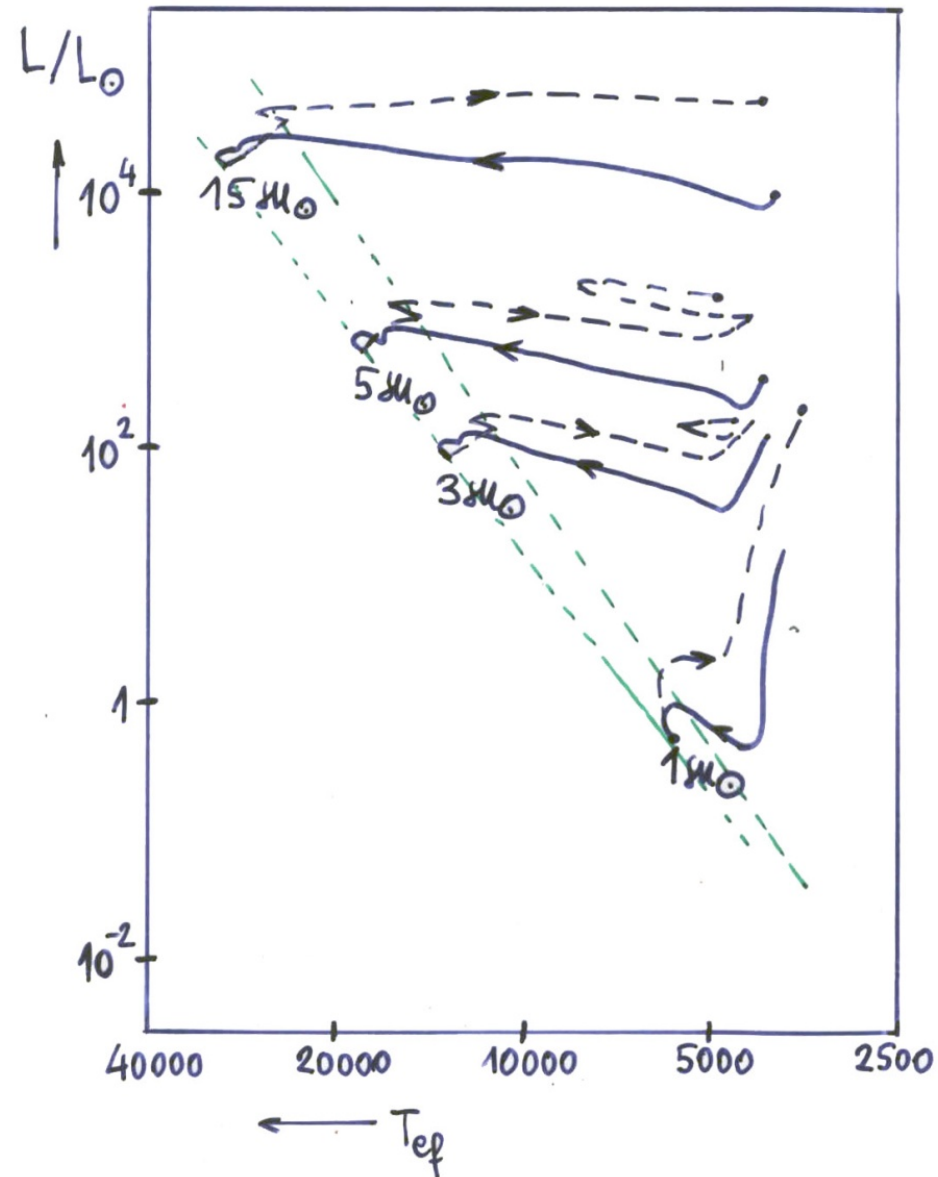
# CNO (Bethe-ov) ciklus



- $p({}_1\text{H}^1)$  mora da savlada veću Kulonovu barijeru da bi bio zadržan težim elementom (C ili N)  $\Rightarrow$  potrebne više T!



# Evolutivni put zvezda različitih masa



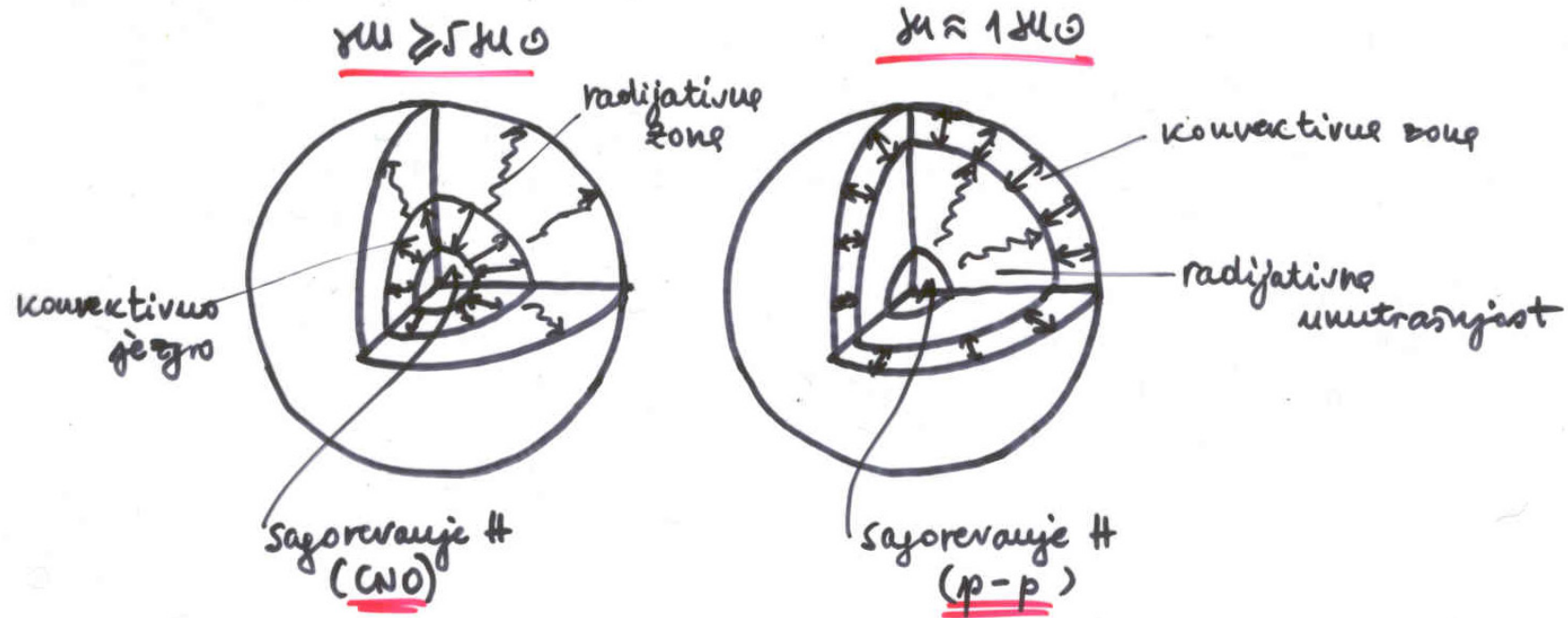
**Položaj koji zvezda zauzme na glavnom nizu određuje njena masa i hemijski sastav.**

- Vreme života zvezde na glavnom nizu:

$$t \sim 10^{10} M[M_{\text{sun}}]/L[L_{\text{sun}}]$$

Zbog promena u hemijskom sastavu u unutrašnjosti, zvezda menja sjaj, temperaturu i radijus. Oblast malih promena  $T$  i  $L$  određuje širinu glavnog niza.

# Modeli zvezdane unutrašnjosti



Količina energije oslobođene TN reakcijama po 1g materije u 1s

$$\dot{j} = j(\rho, T, \text{hem. sastav}) \quad [\text{J}/\text{kg}\cdot\text{s}]$$

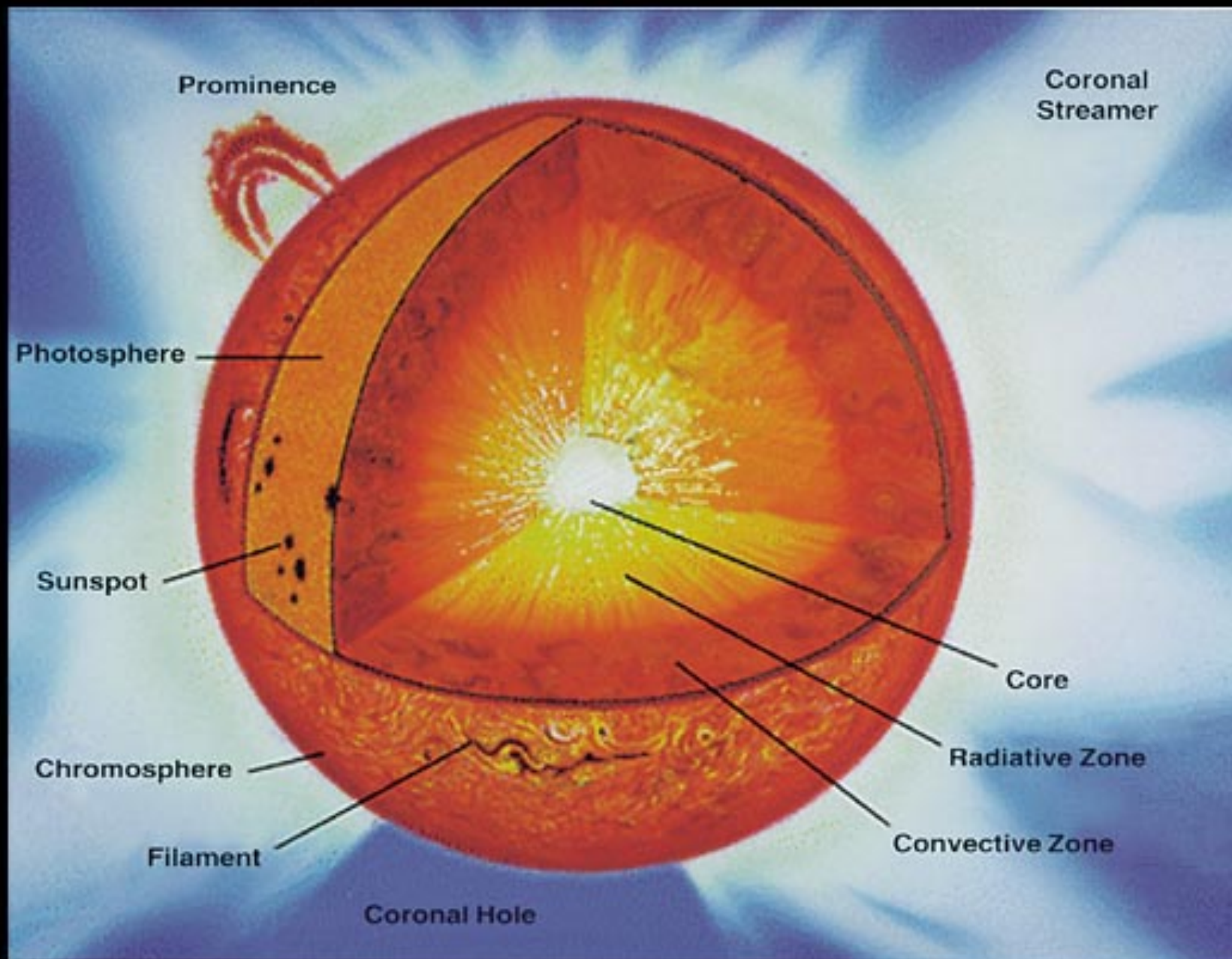
$$\dot{j} = j_0 \rho^a T^n$$

$$a = 1$$

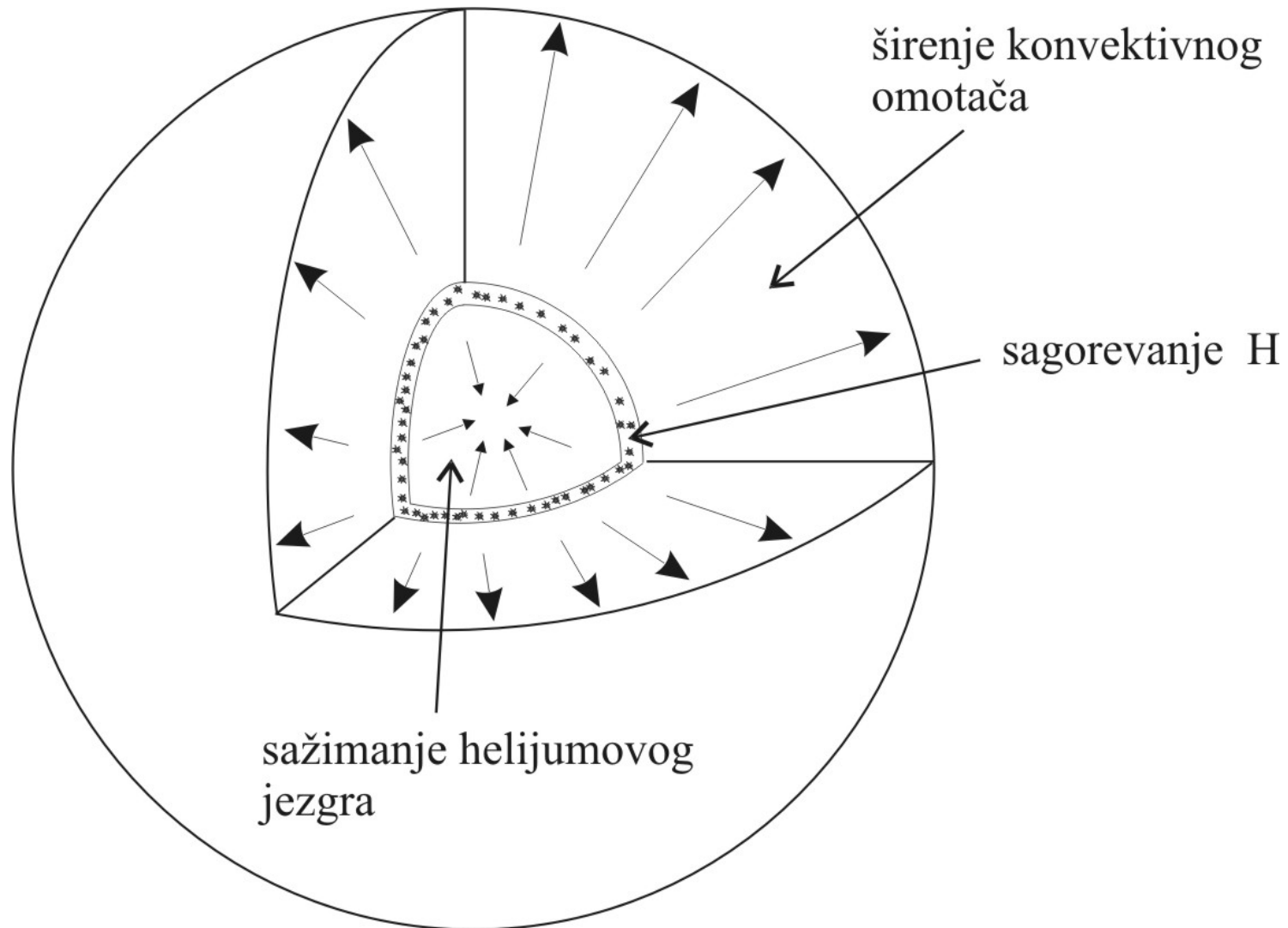
$$n = \begin{cases} 4, & \text{p-p lanac} \\ 18, & \text{CNO ciklus} \end{cases}$$

$$j_0 = j_0(\text{hem. sastav})$$

Fraknoi/Morrison/Wolff, *Voyages Through the Universe, 2/e*  
Figure 14.1 The Parts of the Sun

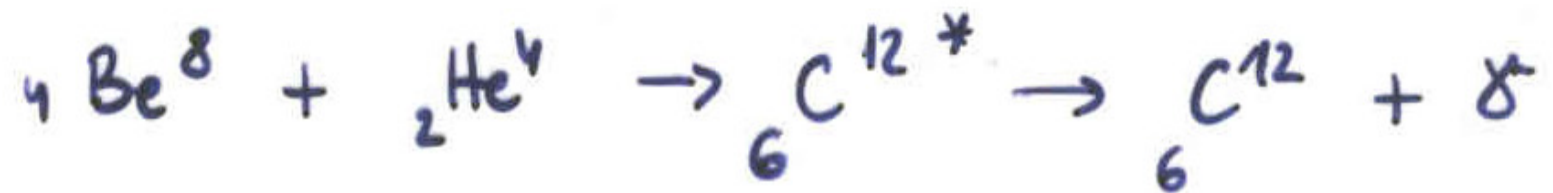
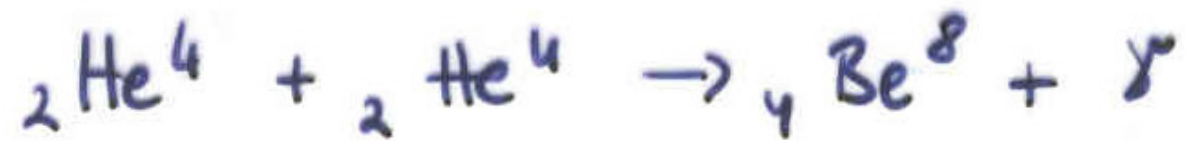


# Nestabilni crveni džin

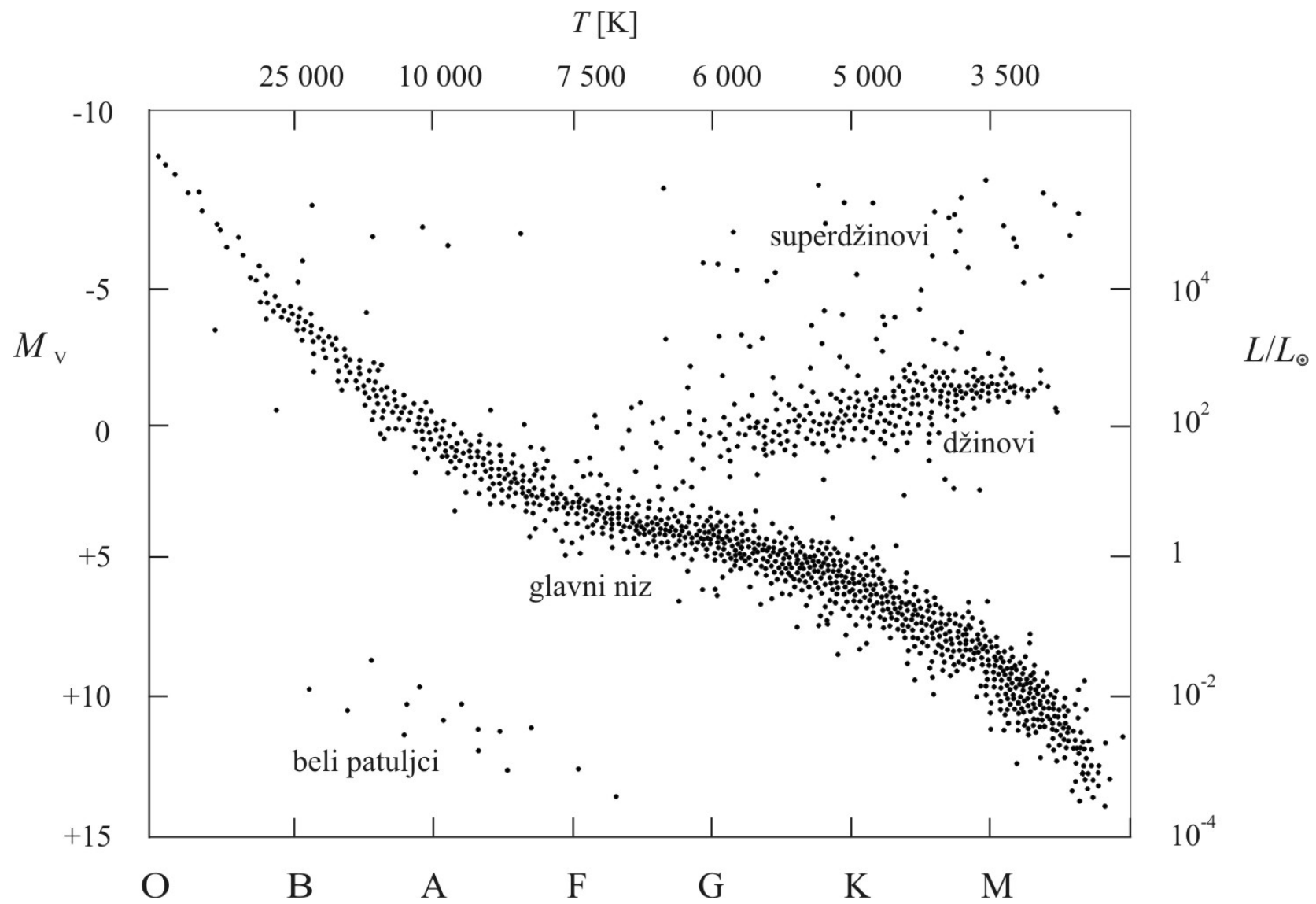


$T \sim 10^8 \text{K}$  – počinje sagorevanje He  $\rightarrow$  zvezda postaje stabilni crveni džin  
(10-25% vremena)

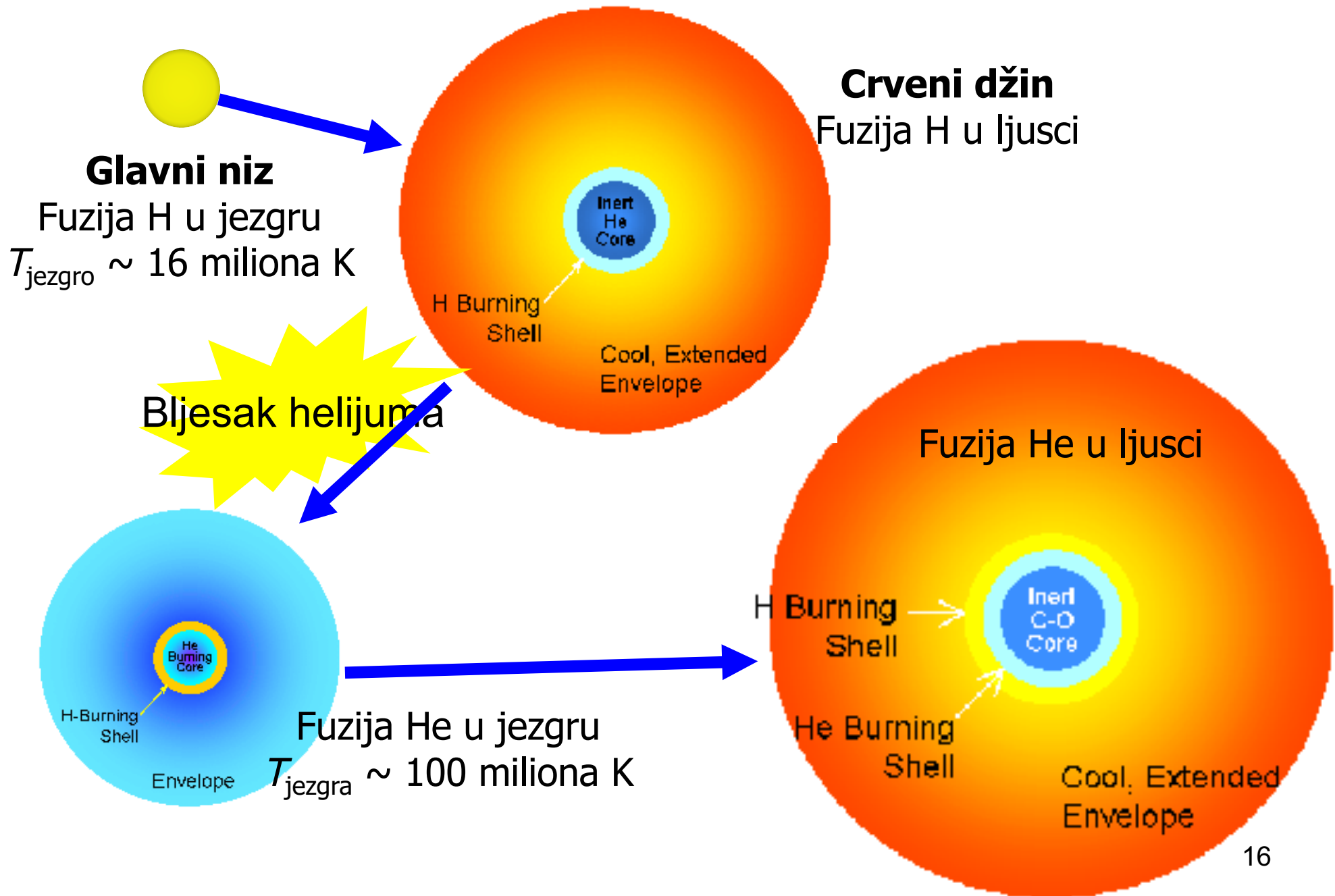
## Sagorevanje helijuma



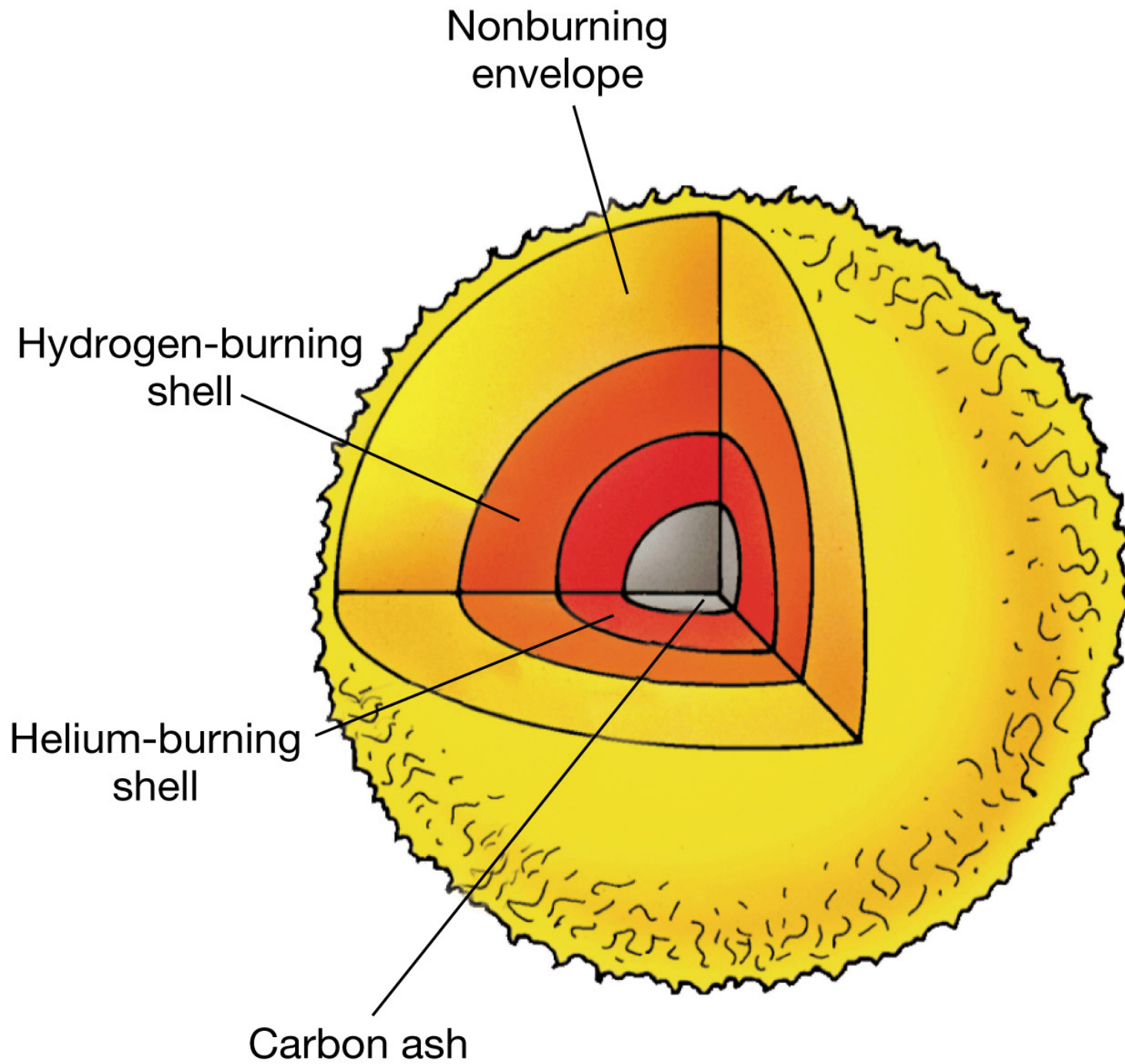
$$T \sim 10^8 \text{ K} \quad , \quad \rho \sim 10^4 \text{ g/cm}^3$$



# Život malih zvezda mase od 0.4-8 $M_{\text{Sunca}}$

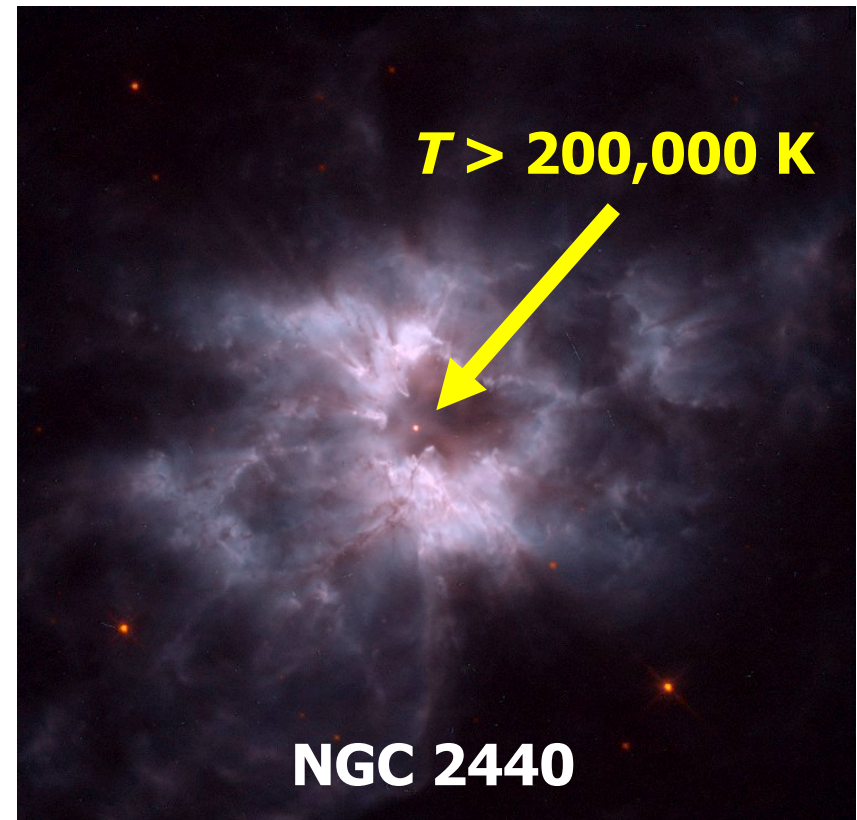




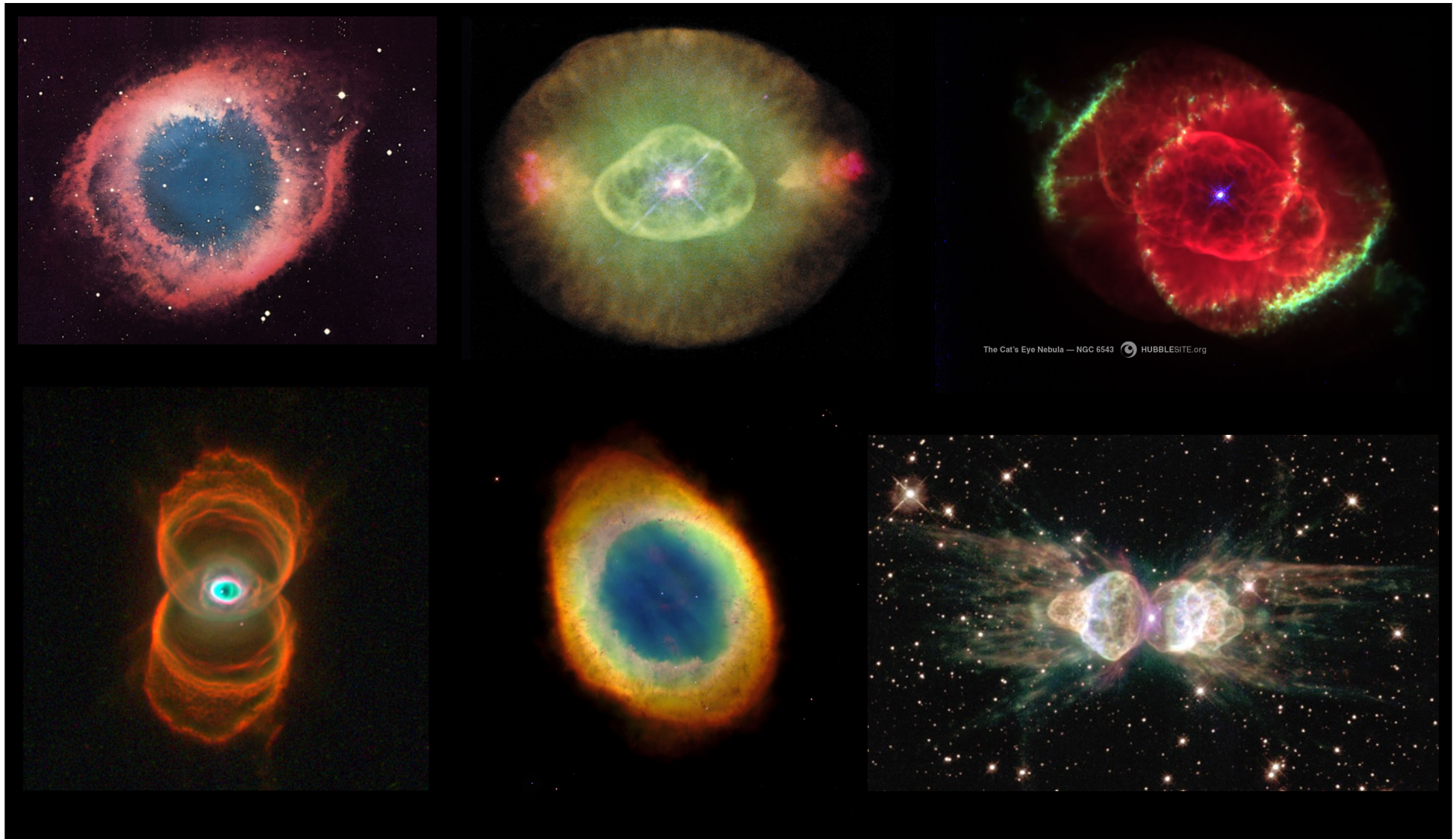


# Veliko finale

- Površinski slojevi crvenog džina bivaju odbačeni (materija se vraća u svemir)
  - Do 80% početne mase zvezde!
- Ostaje vrelo jezgro od kiseonika i ugljenika
  - Preko 200 000 K
- UV zračenje jezgra jonizuje i odbacuje spoljašnji omotač
- Nastaje **planetarna maglina**

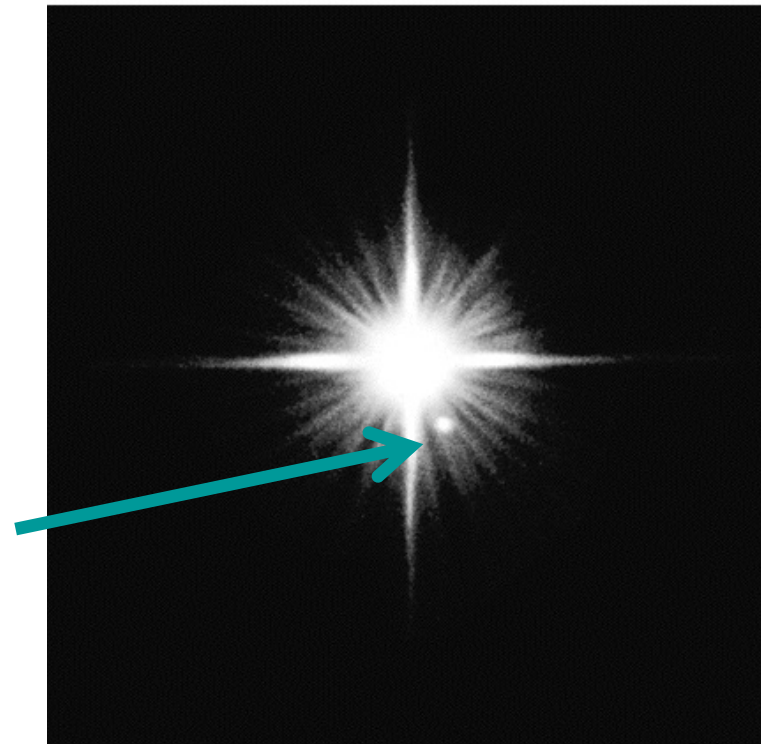


# Planetarne magline



# Jezgro malih, mrtvih zvezda

- Fuzija je prestala i gravitacija pobeđuje
- Jezgro se sažima do veličine Zemlje
  - Ali je mase čak 60% mase Sunca!
  - Materija u jezgru sabijena do gustine od of 1,000,000,000 kg/m<sup>3</sup>!
  - Elektronski degenerisani gas
  - Vrlo vrela površina > 200,000 K
- Jezgro postaje **beli patuljak**
  - Polako se hladi milijardama godina

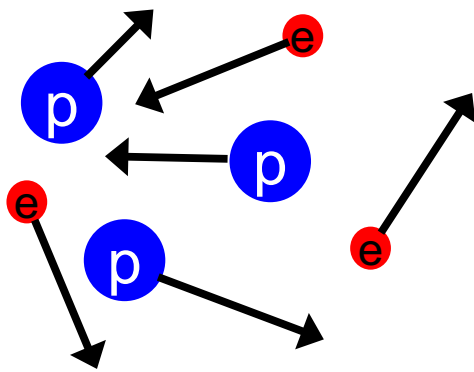


# BELI PATULJCI

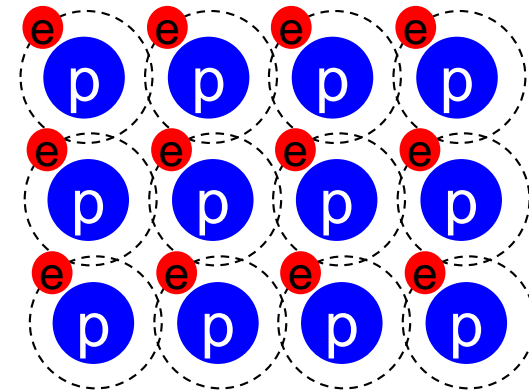
- Gravitacioni kolaps se zaustavlja degeneracijom materije (**pritisak degenerisanog elektronskog gasa uravnotežava gravitaciju**)
- Zvezda je bez izvora energije u hidrostatičkoj ravnoteži
- Gustina belog patuljka je  $10^5 - 10^8 \text{ g/cm}^3$
- Radijus je oko 1000km ( $\sim 1\%$  radijusa Sunca)
- Maksimalna masa belog patuljka je 1.4 mase Sunca (Čandrasekarova granica)
- Sa povećanjem mase dimenzije belog patuljka se smanjuju

# Degeneracija elektrona

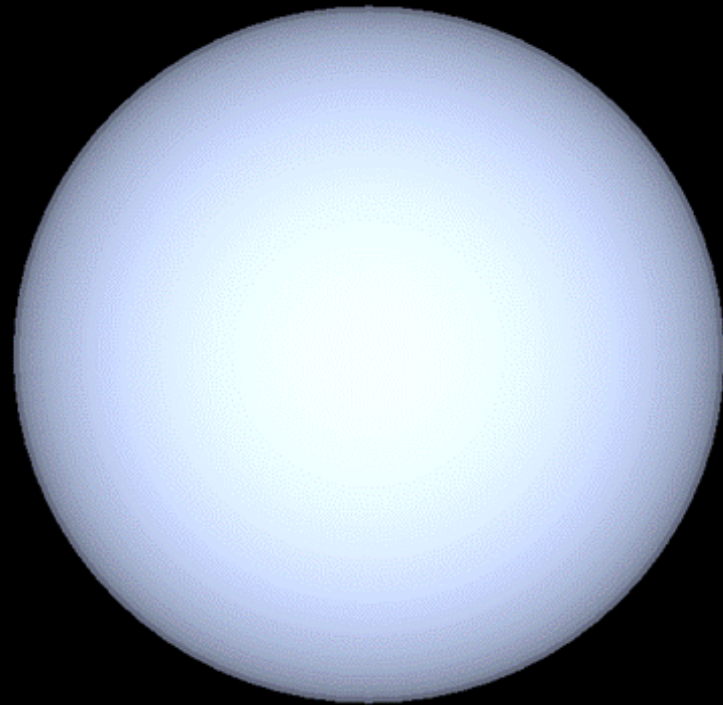
- Tesno stisnuti elektroni ulaze u tzv. *degenerisano stanje* (maksimalno tesno spakovani elektroni)
  - Ovo stanje stvara dodatni pritisak koji se opire gravitaciji
  - Zaustavlja se sažimanje
  - Može da izdrži gravitaciju mase do 1,4 mase Sunca



Materija u jezgru normalne zvezde

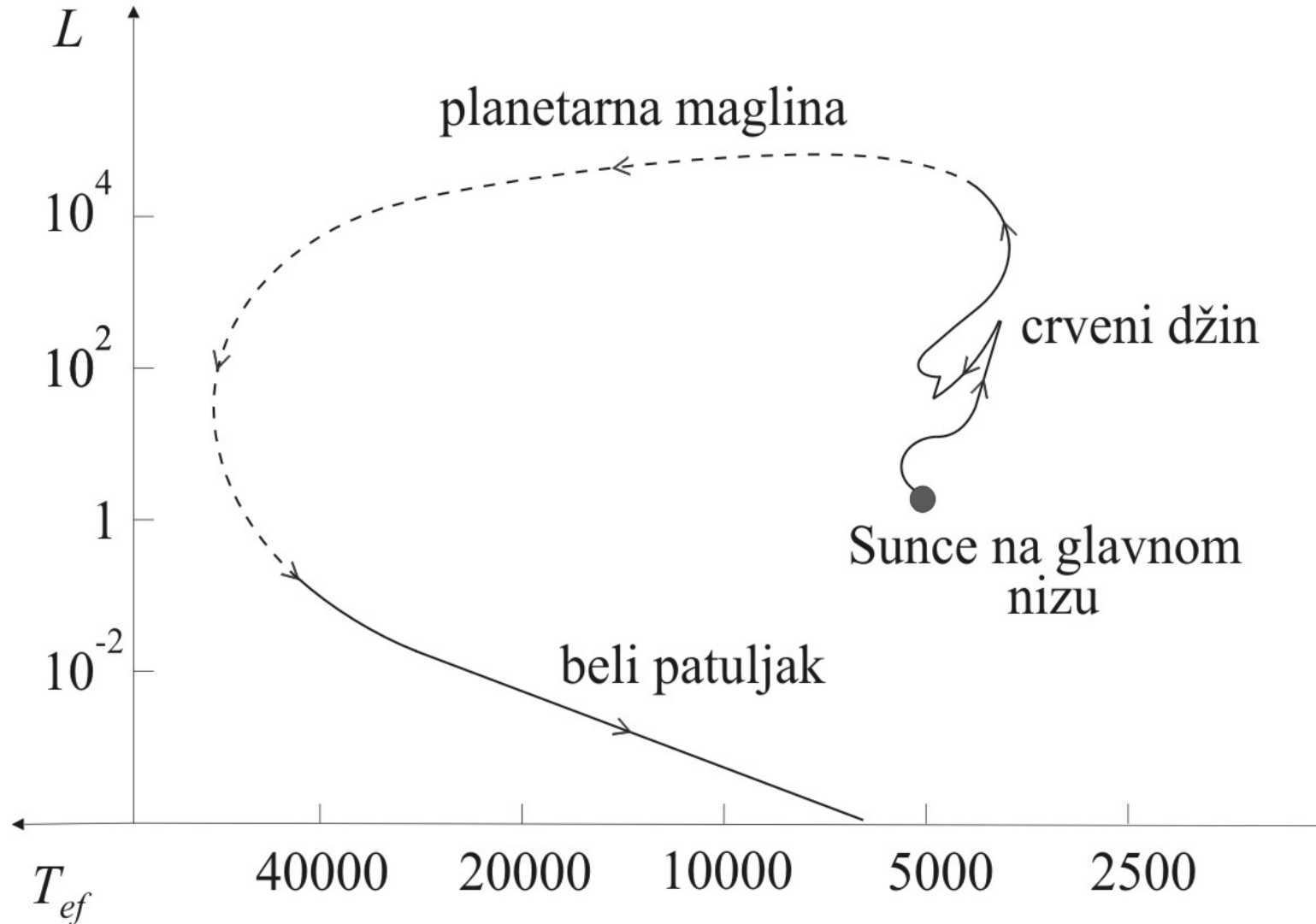


Elektronski degenerisani gas  
1 tona po  $\text{cm}^3$

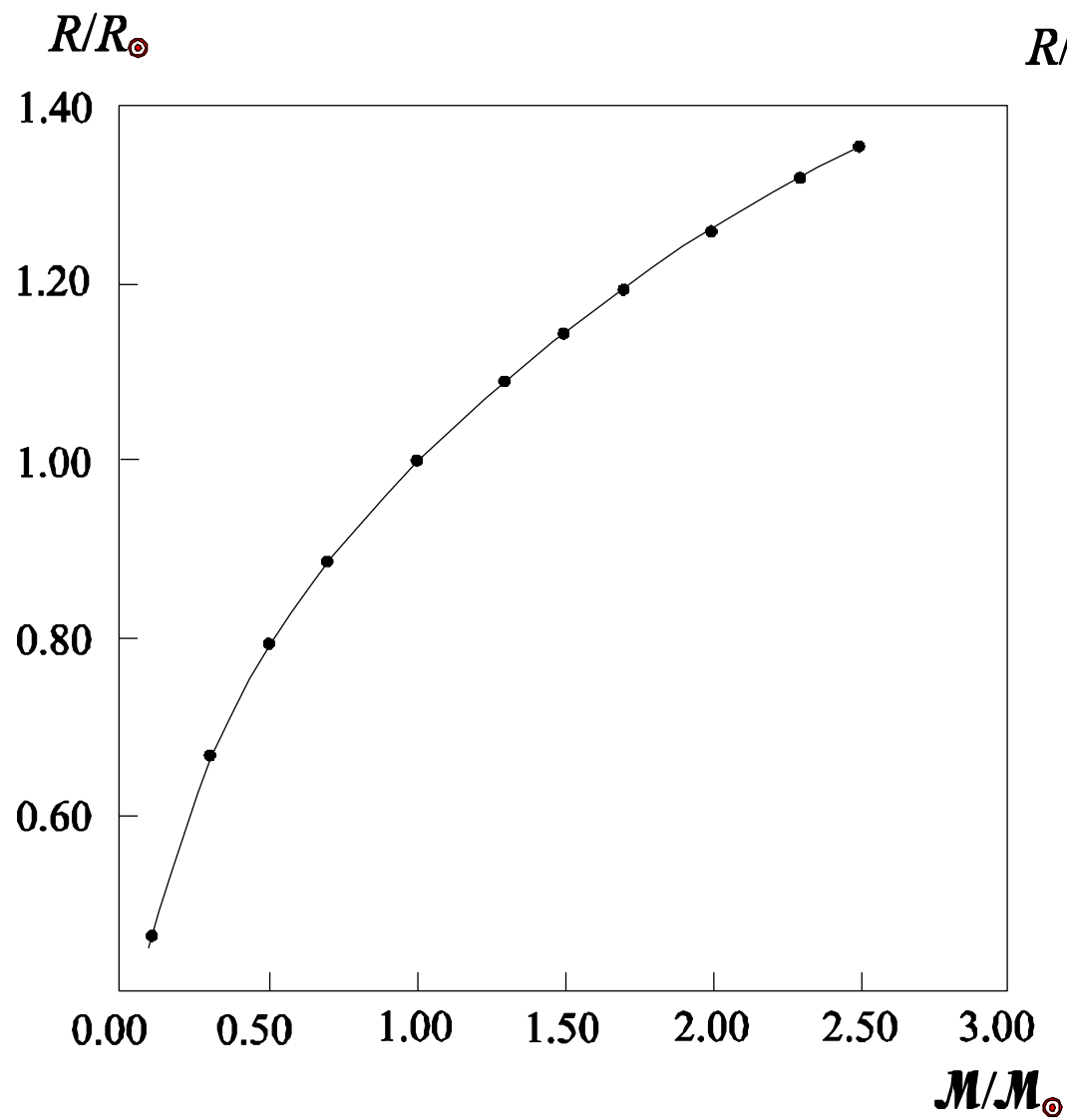


$M \approx 1.0 M_{\text{sun}}$   
 $R \approx 5800 \text{ km}$   
 $V_{\text{esc}} \approx 0.02c$

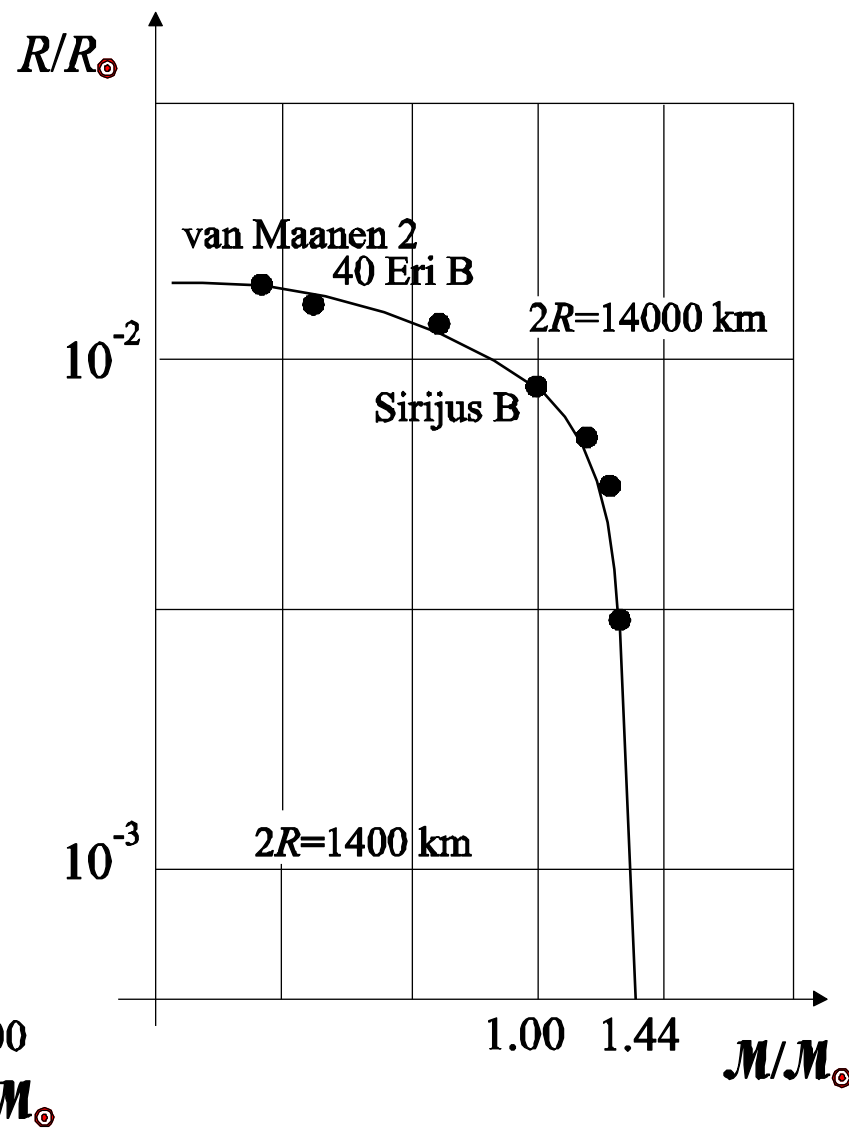
# Evolutivni put Sunca posle glavnog niza







(a)



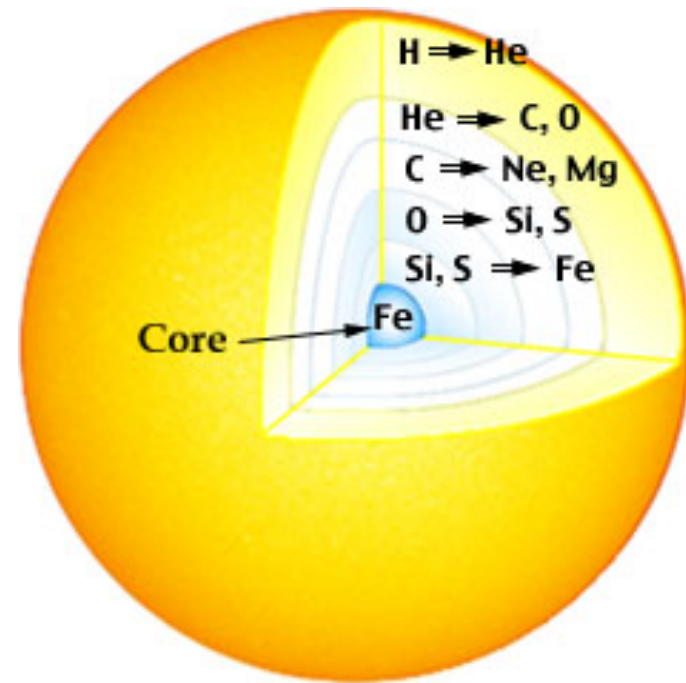
(b)

# Kad velika zvezda ostane bez goriva?

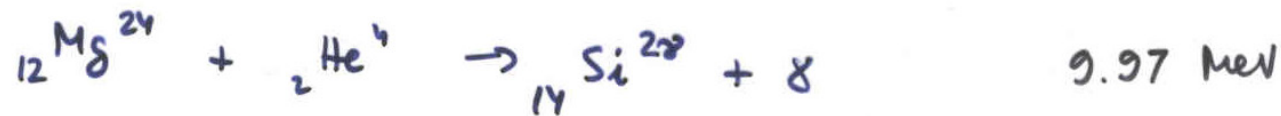
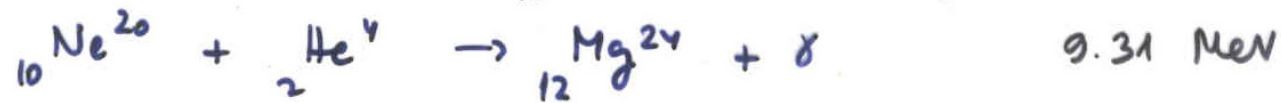
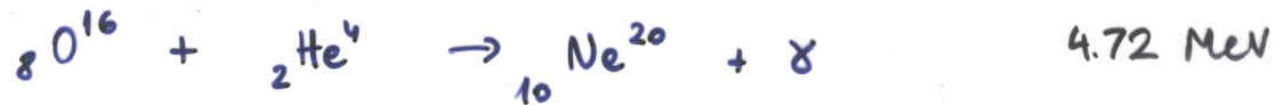
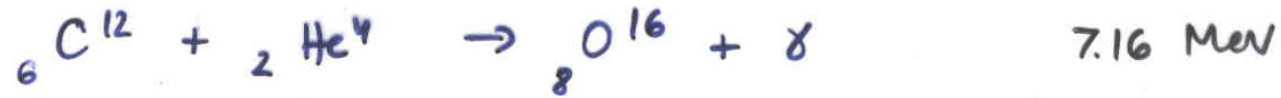
- Superdžinovni “sagorevaju” sve teže i teže elemente u fuziji
- Svaki ciklus traje sve kraće i kraće
- Sve do gvožđa – **fuzija gvožđa troši više energije** nego što proizvodi
- Posle gvožđa – nema fuzije, nema više goriva!
- Kolaps!

Faza	Temperatura (milioni K)	Trajanje
H fuzija	40	7 miliona god.
He fuzija	200	500,000 god
C fuzija	600	600 god.
O fuzija	1,500	6 meseci
Si fuzija	2,700	1 dan

Za zvezdu mase  $25M_{\text{Sunce}}$



# Formiranje težih elemenata



=\* =

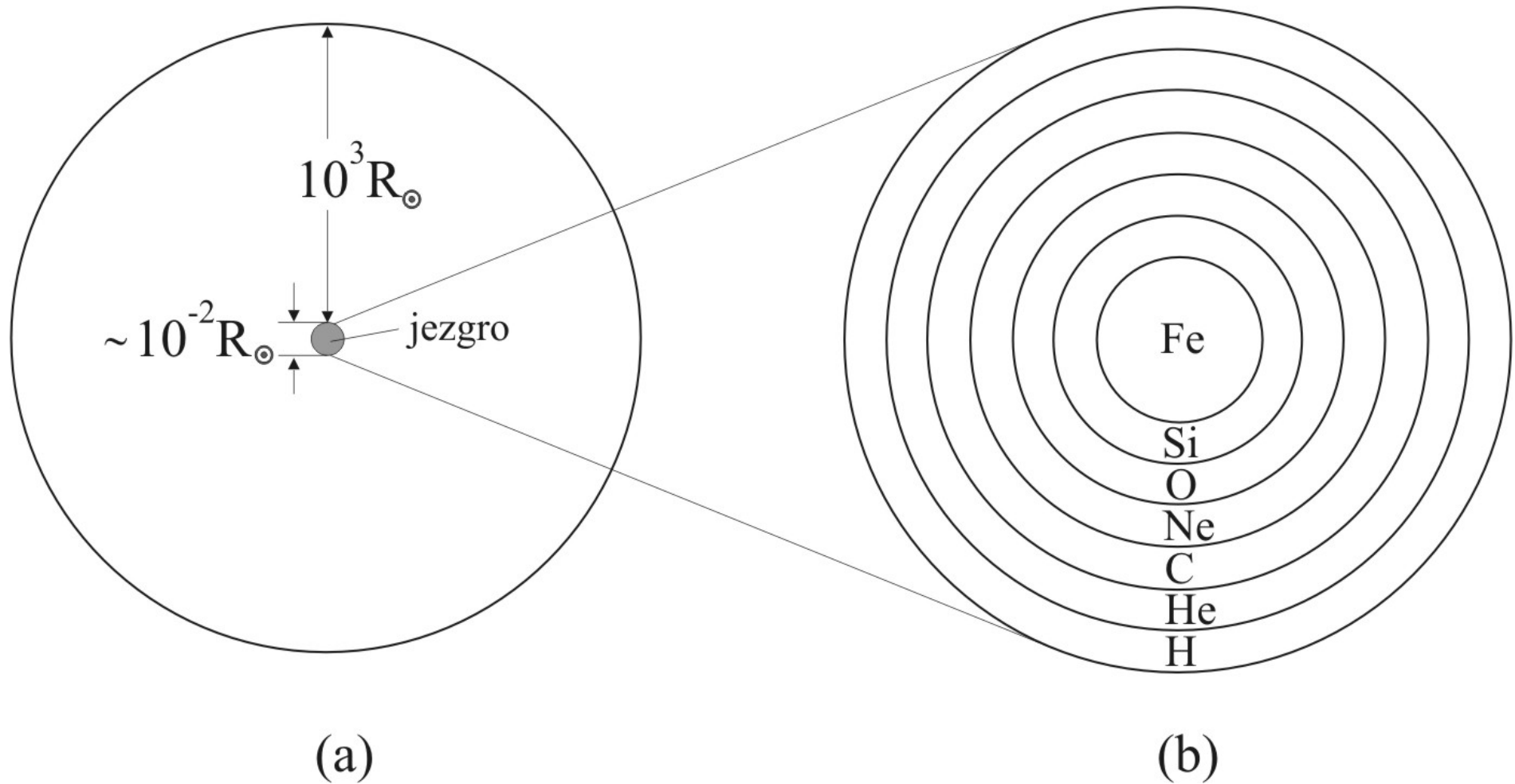


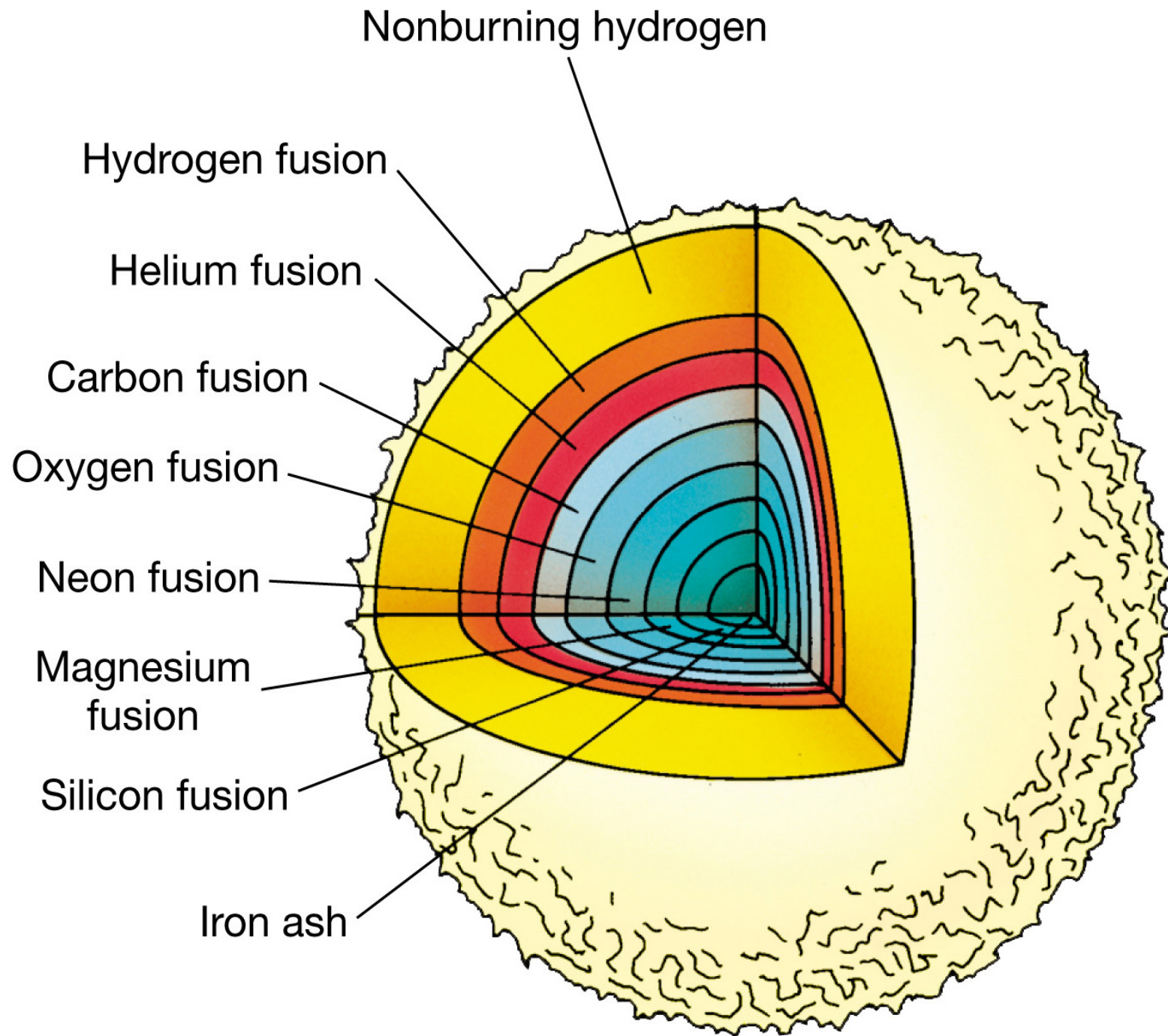
... do  $A \approx 56$  (Fe, Co, Ni)

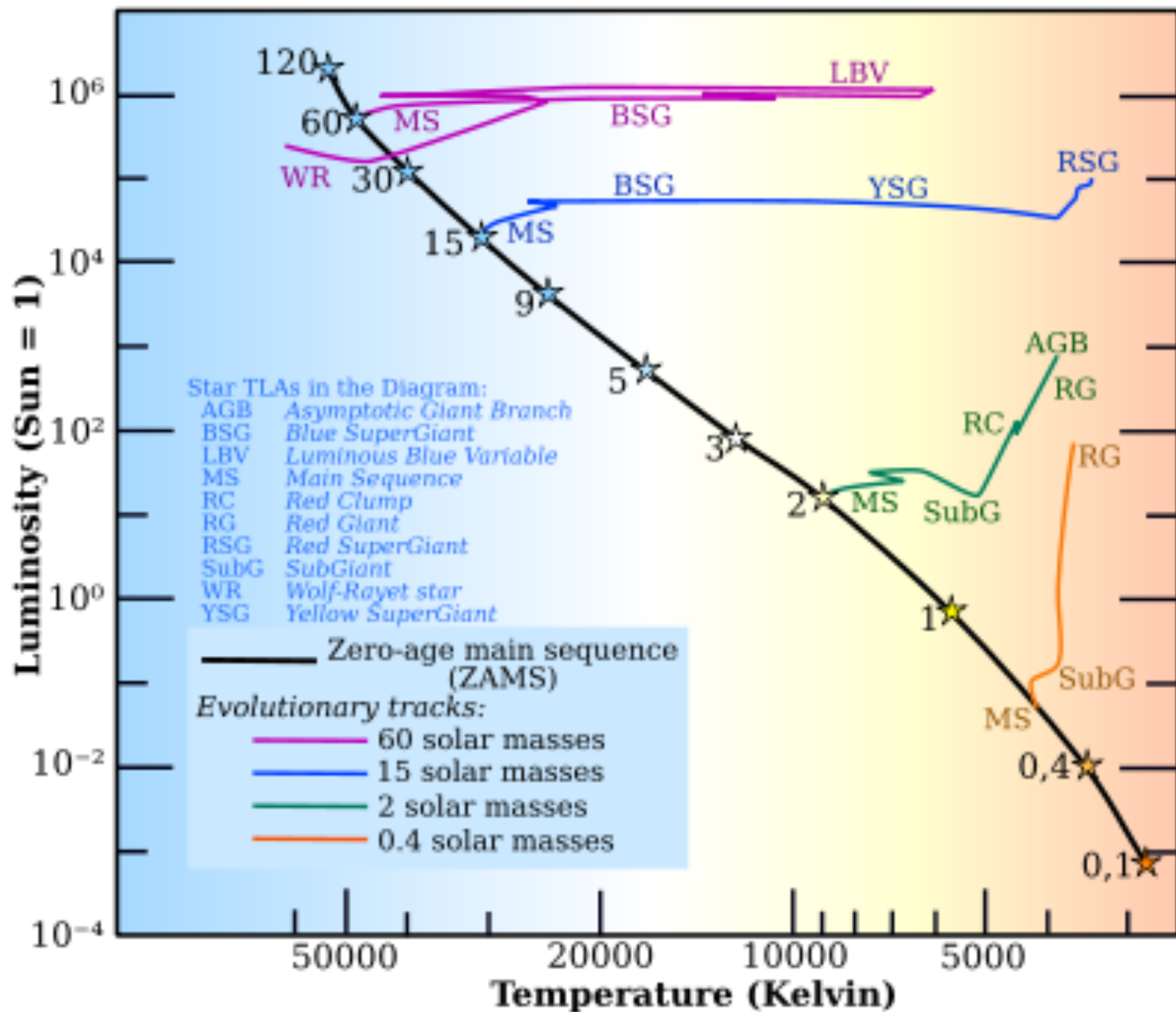
Gorivo	T [K]
H	$10^7$
He	$10^8$
C	$(4-7) \cdot 10^8$
O	$(1.7-2) \cdot 10^9$
Si	$5 \cdot 10^9$

Favorizovano je stvaranje  
 jezgava sa "parnim"  
 rednim i masenim brojem.

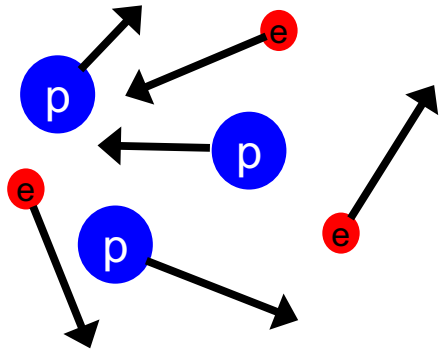
# Masivna zvezda sa jezgrom ljuskaste strukture (H→He→C→Ne→O→Si→Fe)



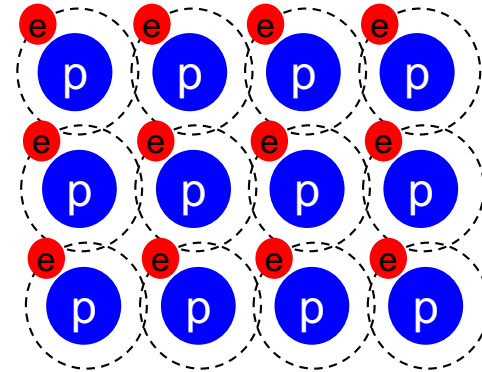




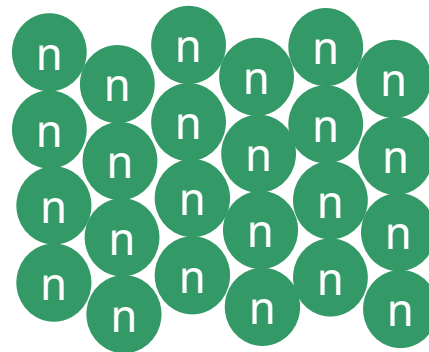
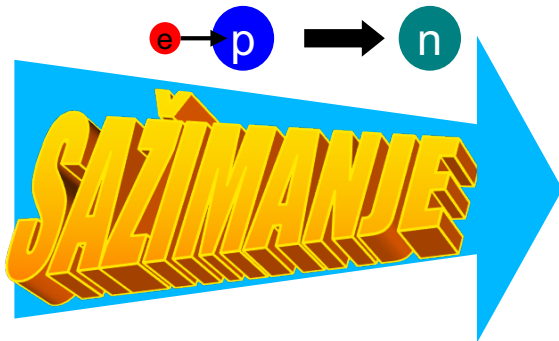
# Kolaps jezgra!



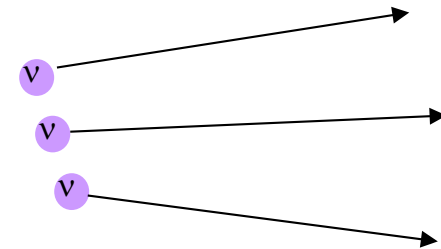
materija u jezgru normalne zvezde



Elektronski degenerisani gas  
1 tona po  $\text{cm}^3$



Neutronski degenerisani gas  
 $10^8$  tona po  $\text{cm}^3$



Proizvedeni neutriini  
napuštaju jezgro i odnose  
energiju

# Kolaps!

- Start :  $R \sim 6000$  km,  $\rho \sim 10^8$  g/cm<sup>3</sup>
- Nakon par sekundi:  $R \sim 50$  km,  $\rho \sim 10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>
- Brzina kolapsa  $\sim 0,25$  brzine svetlosti!
- Čvrsto jezgro od tesno spakovanih neutrona – **naglo zaustavljanje** omotača koji pada!



[www.spacetelescope.org](http://www.spacetelescope.org)

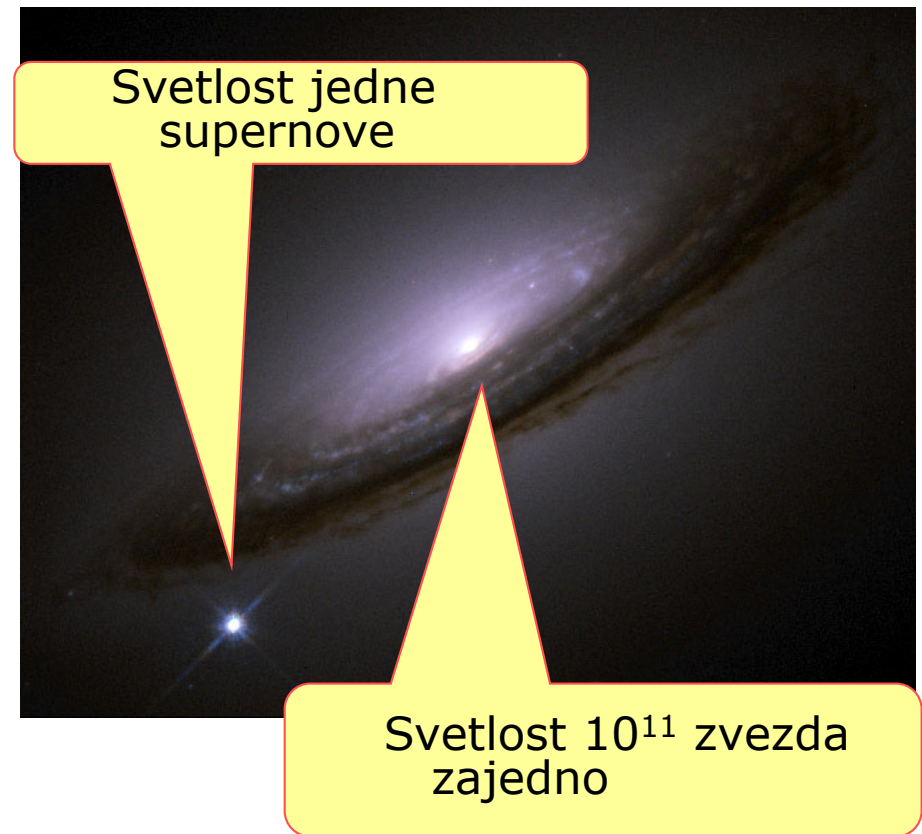


# Eksplorzija!

- Materija koja pada na jezgro se odbije – **eksplorzija!**
- Za par sati udarni talas se probije kroz zvezdu – **Eksplorzija supernove!**
- Eksplorzivna nuklearna fuzija u omotaču – **nastanak elemenata težih od gvožđa**
- Izbačeni materijal koji se širi nazivamo supernova ostatak (*supernova remnant*)
- Ostaje **neutronska zvezda ili crna rupa**

# Supernove

- Izuzetno snažne eksplozije zvezda
- Sjaj zvezde koja postane supernova se poveća 10.000 puta!
- Apsolutna magnituda -17  
– Kao cela galaksija!
- Pošto su jako sjajne možemo ih detektovati na jako velikim rastojanjima

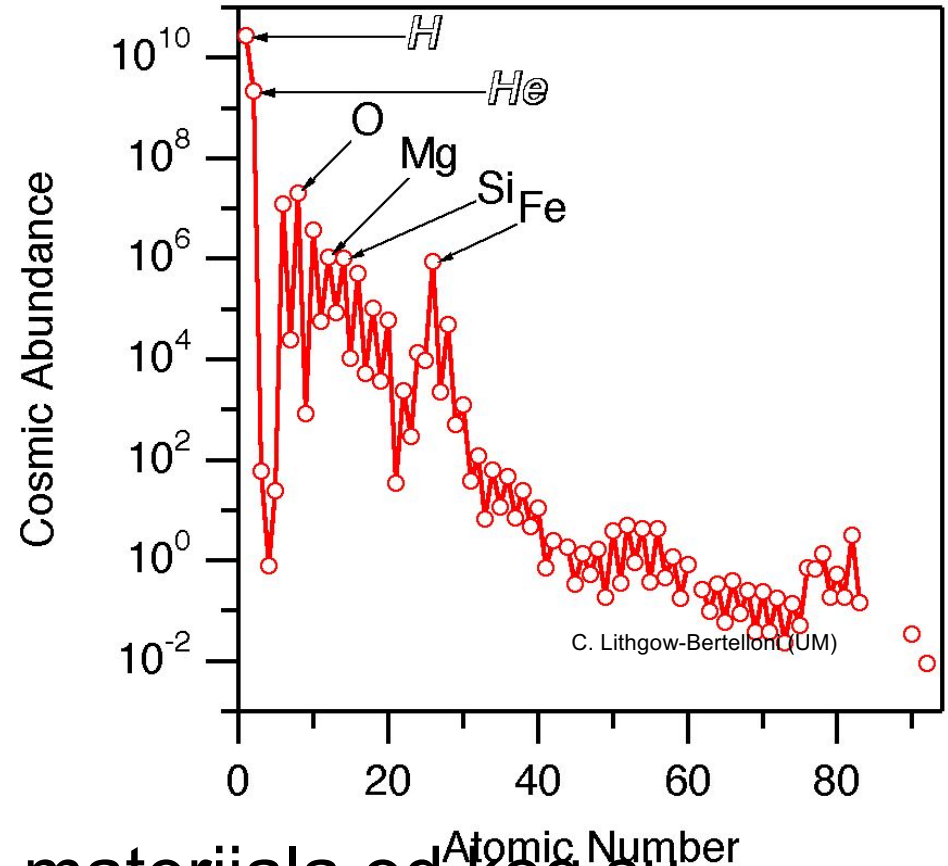


# Krab maglina – ostatak supernove posmatrane 1054.godine



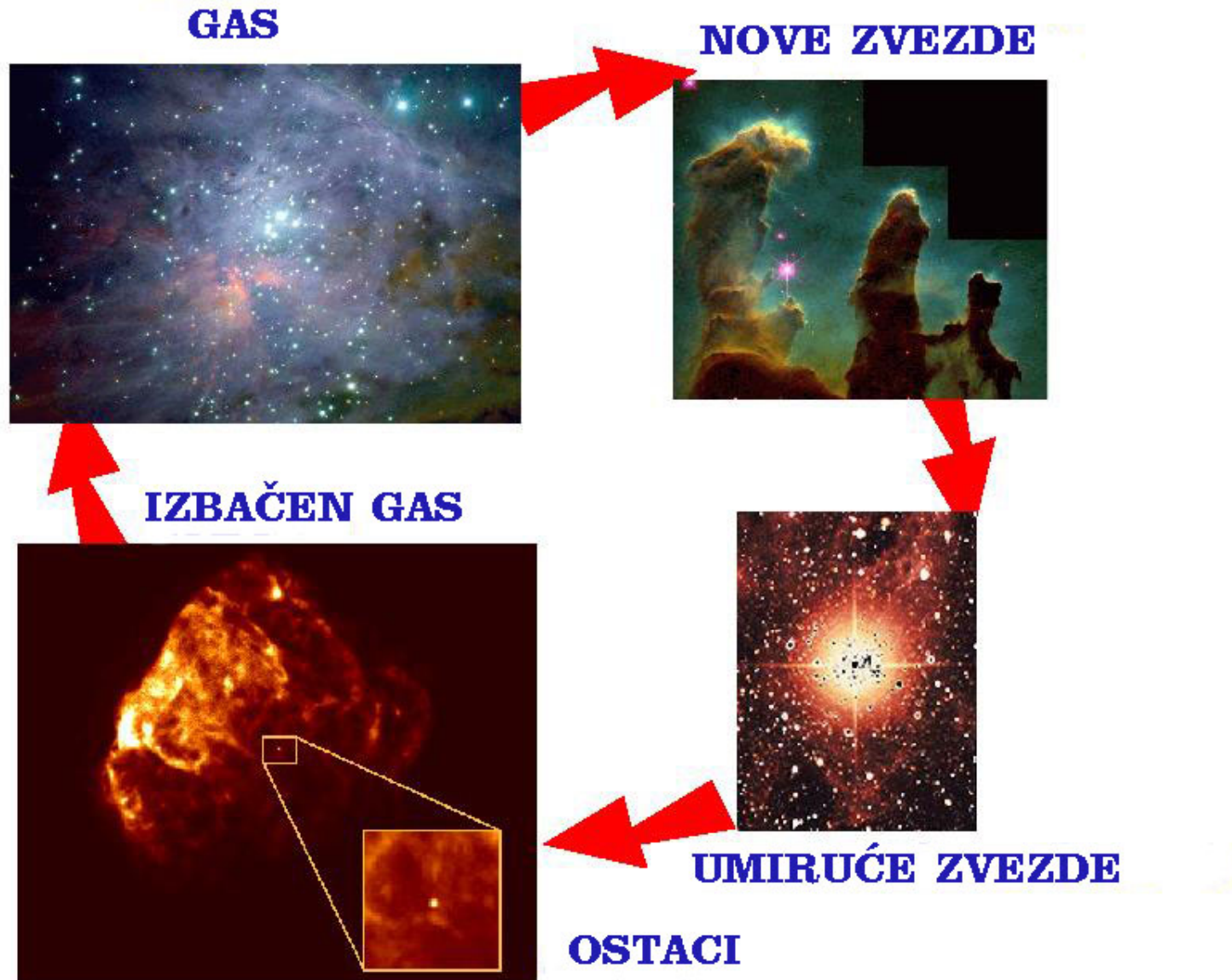
# Fabrike teških elemenata

- Velika energija eksplozije dovodi do fuzije teških elemenata
- Svi elementi do plutonijuma i dalje su ovako nastali



- Supernove su proizvođači materijala od kog su nastale planete i mi sami!

# Krug života



# Kraj života masivnih zvezda

Na mestu kolapsirajućeg gvozdenog jezgra ostaje:

neutronska zvezda

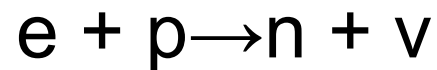
ili

crna rupa

Udarni talas raznosi omotač zvezde  
(maglina u širenju - ostatak supernove)

# NEUTRONSKE ZVEZDE

- U jezgru - niz TN reakcija do gvožđa (H-He-C-O-Si)
- Na  $T \sim 5 \cdot 10^9$  K,  $\gamma$  fotoni dovode do fotodezintegracije gvoždja  $\rightarrow$  hladjenje i kolaps jezgra  $\rightarrow$  ubrzavanje elektrona do ultrarelativističkih brzina i reakcije tipa:

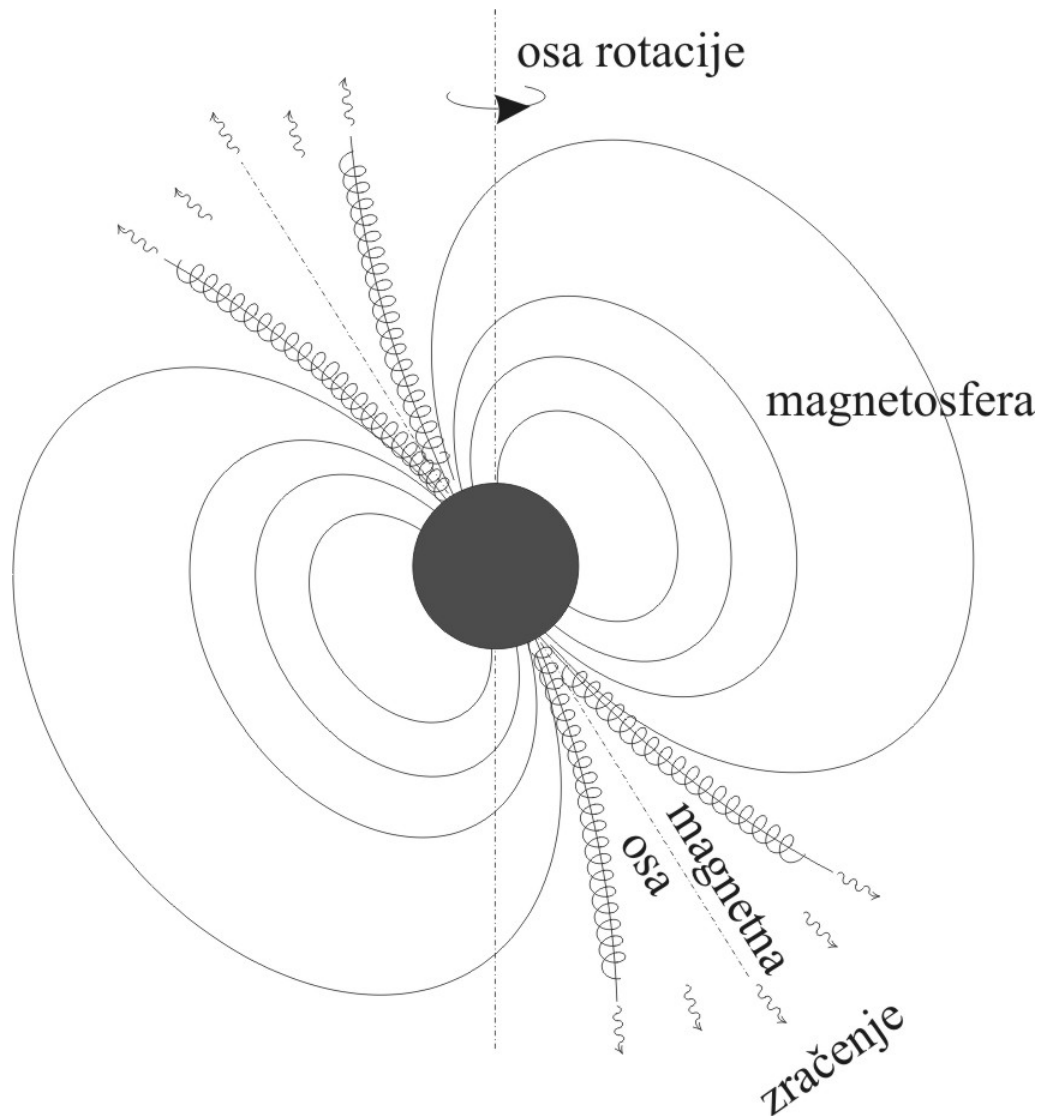


- Gravitacioni kolaps se zaustavlja degeneracijom materije (**pritisak degenerisanog neutronske gasa uravnotežava gravitaciju**)
- I bez izvora energije, neutronska zvezda je u hidrostatičkoj ravnoteži
- Gustina neutronske zvezde je  $10^{12} - 10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>
- Radijus je oko 10km !

- 1932 – otkriće neutrona
- 1933 – 1939 radovi o supergustoj materiji
- 1934 – W.Baade i F. Zwicky (eksplozija SN dovodi do stvaranja netronske zvezde)
- 1967 – otkriće pulsara (Antony Hewish i Jocelyn Bell),  $P=1.33730113\text{s}$
- 1968 – pulsar (Pulsating astronomical radiosource)
- 1969 – otkriveni optički pulsari: Crab pulsar (zvezda  $+17^{\text{m}}$ )  $P=0.033\text{s}$ ; Vela pulsar  $P=0.089\text{ s}$
- Pulsari = neutronske zvezde = jezgra nekadašnjih supernovih (Thomas Gold, 1969)



# PULSARI

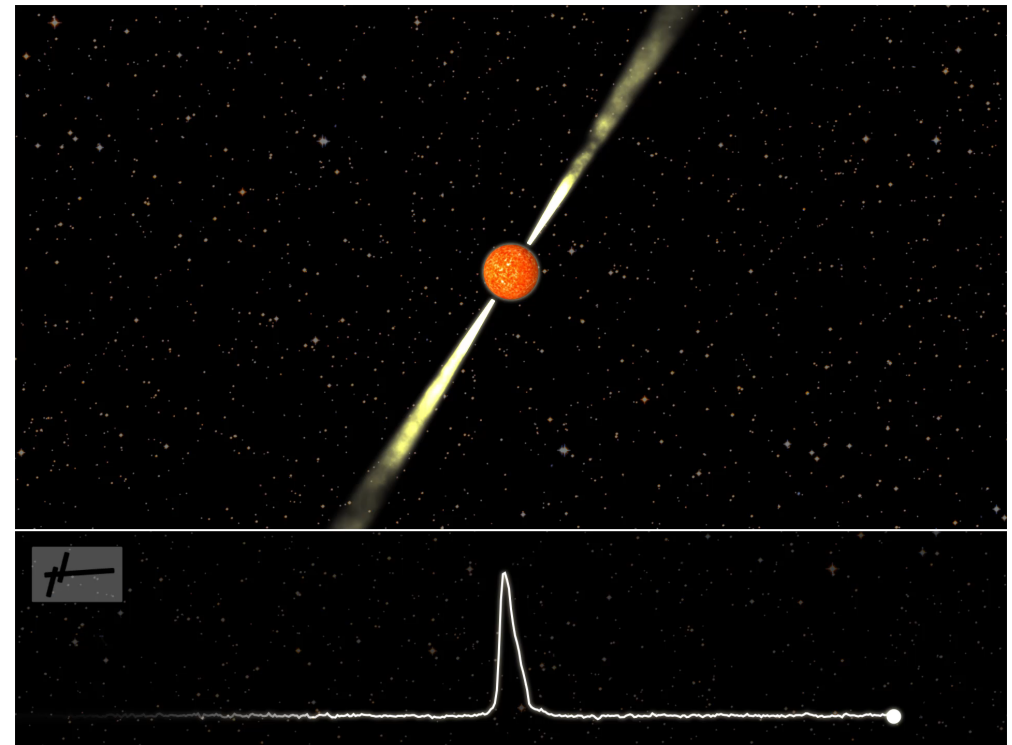


- brzorotirajuće zvezde ( $0.033 < P < 4\text{s}$ )
- superguste ( $10^9 < \rho < 10^{14}\text{ g/cm}^3$ )
- jako magnetno polje ( $B \sim 10^{12}\text{ G}$ )
- gravitacija na površini  $10^{11}$  puta veća od gravitacije na površini Zemlje

- Uslov održanja momenta impulsa ( $\omega R^2 = \text{const}$ )  $\rightarrow$  brza rotacija
- Uslov održanja magnetnog fluksa ( $\Phi = \int B \cdot dS = \text{const}$ )  $\rightarrow$  jako magnetno polje

# Pulsari

- Kasnih '60-tih, Jocelyn Bell je otkrila izvor radio signala koji se jako pravilno ponavljaju
  - Svake 1,337... sekunde
- Inteligentan signal?
  - LGM?! (little green man)
- Ili nešto što se okreće?
  - Mora da je jako malo ali se jako brzo okreće
- **Rorirajuća neutronska zvezda - pulsar!**



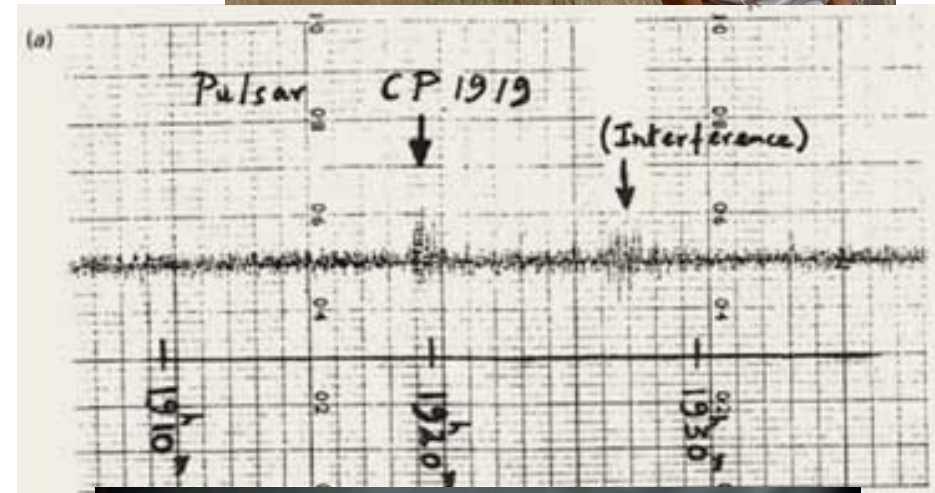
Credit: "Joeri van Leeuwen". License: [CC-BY-AS](https://creativecommons.org/licenses/by-as/4.0/).

Otkriće pulsara, zajedno sa  
razvojem sinteze apertura -->  
Nobelova nagrada 1974.  
Antony Hewish i Martin Ryle



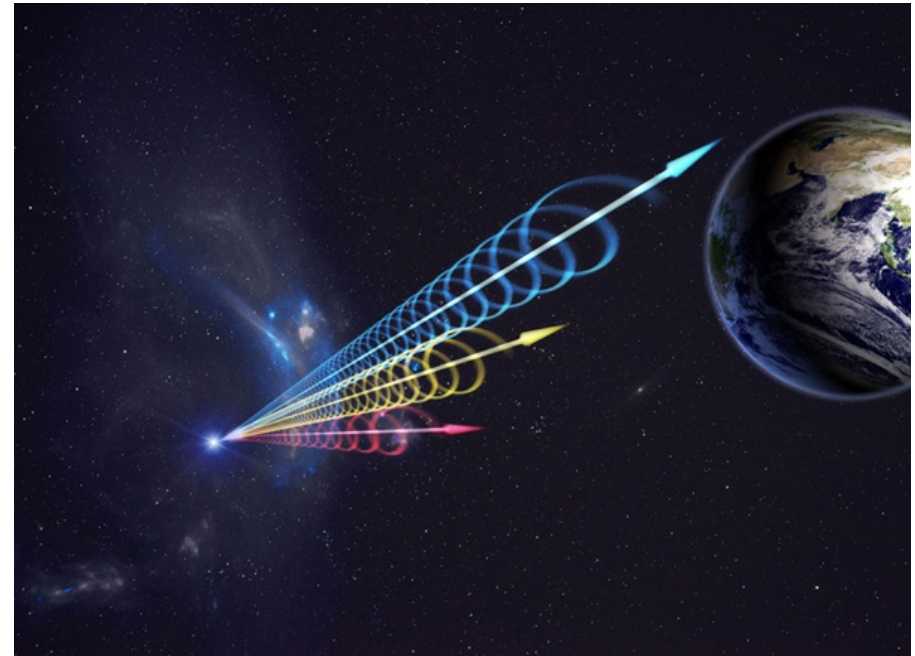
- pola veka kasnije,  
2018, Jocelyn Bell  
Burnell dobija prestižni  
nagradu od \$3 miliona  
dolara

**Special Breakthrough  
Prize in Fundamental  
Physics.**



# Fast Radio Bursts - FRB

- brzi radio blesak
- FRB - jako brz intenzivan radio signal, koji traje svega par milisekundi, i dolazi van Mlečnog puta
- otkriveni 2007. godine, a za sada ih je otkriveno nekoliko desetina
  - samo dva signala koja se ponavljaju
- još uvek se ne zna poreklo ovih signala, verovatno povezano sa sudarima neutronske zvezde i pulsarima
- CHIME teleskop u Kanadi će pomoći u rešavanju misterije

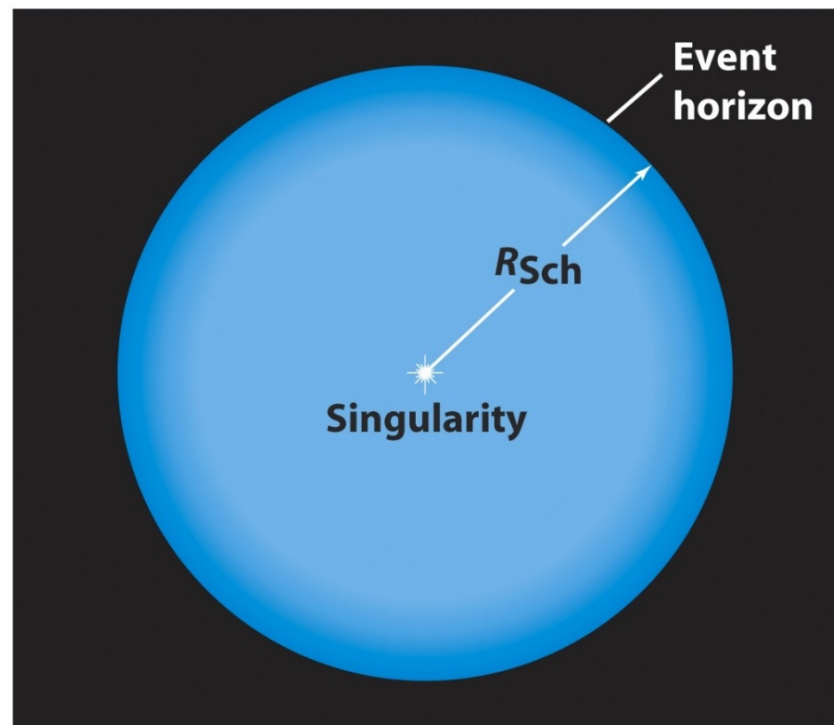


# Supermasivna crna rupa u M87



# Struktura crne rupe

- Granica crne rupe naziva se **horizont događaja**
  - To je oblast u kojoj je gravitacija tako jaka da iz nje čak ni svetlost ne može pobeći – nemamo nikakvih informacija
- Poluprečnik do horizonta događaja je **Švarcšildov poluprečnik**
- $R_{Sch} = 2GM/c^2$
- $R_{Sch}$  je **Švarcšildov** radijus objekta



# Konačne faze

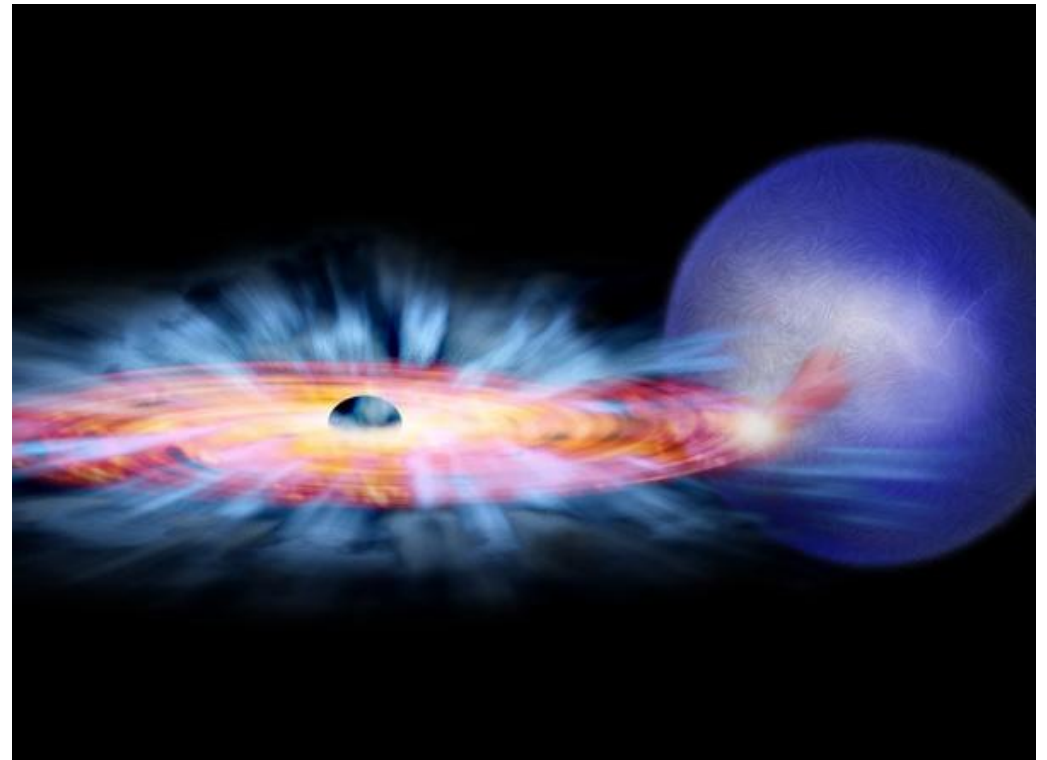
1) **Beli patuljci** (masa manja od 1.4 mase Sunca; zvezda roditelj ima masu manju od 8 masa Sunca)

2) **Neutronske zvezde** (masa izmedju 1.4 i 3 mase Sunca; zvezda roditelj ima masu izmedju 8 i 30 masa Sunca)

3) **Crne rupe** (masa veća od 3 mase Sunca; zvezda roditelj ima masu veću od 30 masa Sunca)

# Kako vidimo crne rupe

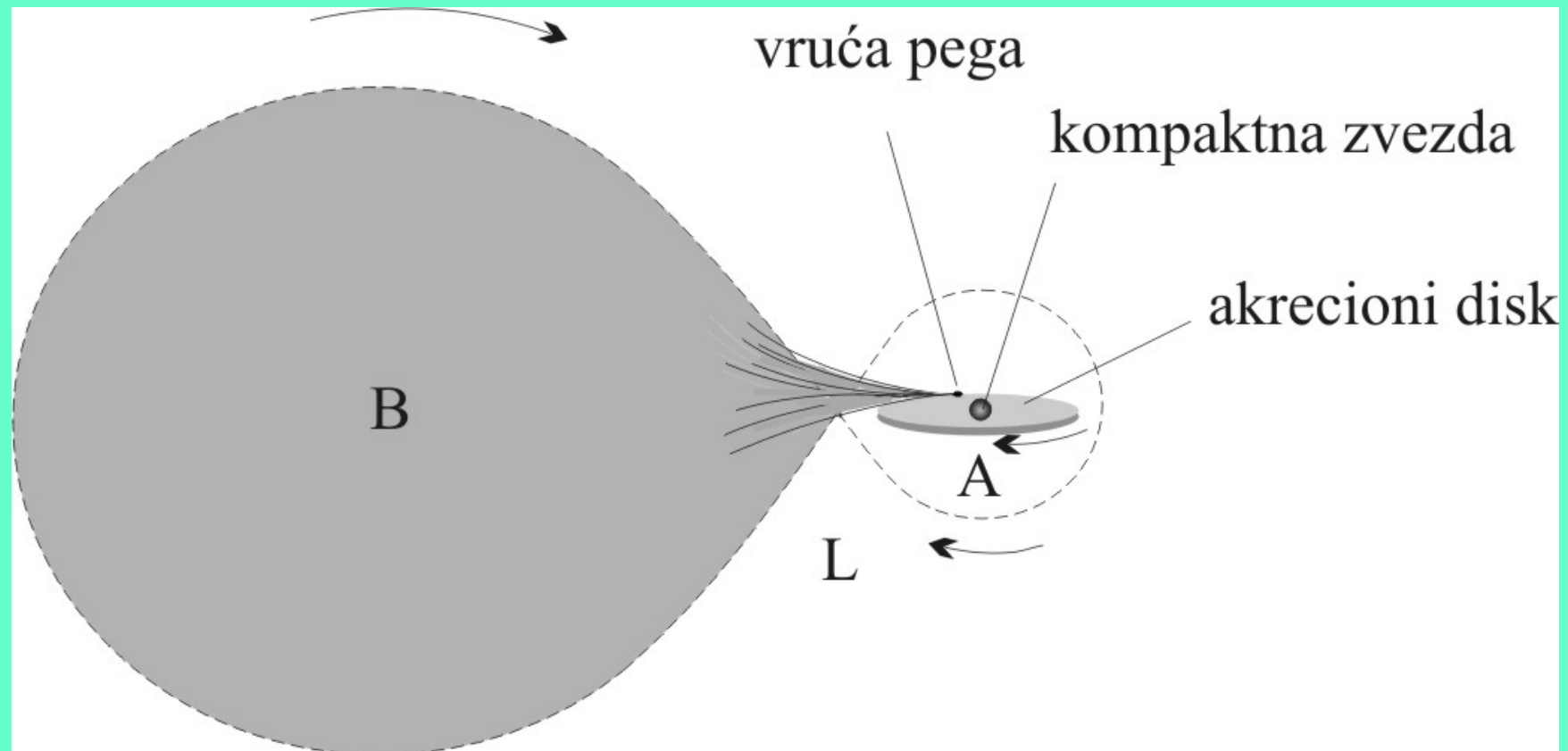
- Kako znamo da postoje crne rupe ako ih ne vidimo?
- Njihova gravitacija utiče na druga tela!
- Većina zvezda živi u paru
- Tražimo uticaj crne rupe na njenog pratioca
  - Pomera pratioca da se kreće oko nečeg nevidljivog
  - Usisava materiju sa pratioca usled čega oko crne rupe nastaje disk gasa
  - Gas u disku se sabija, zagreva i emituje X-zračenje koje vidimo

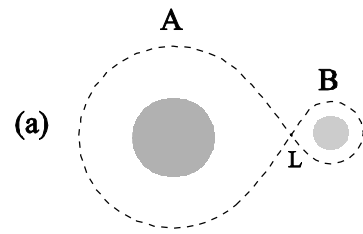




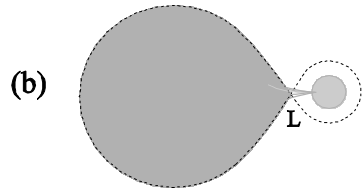
# Evolutija zvezda u tesno dvojnim sistemima (TDS)

# Transfer materije sa crvenog džina na belog patuljka u TDS

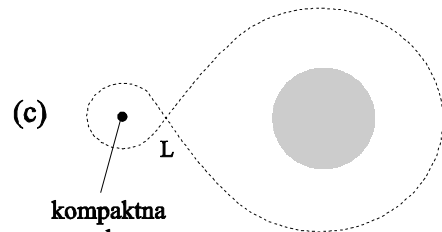




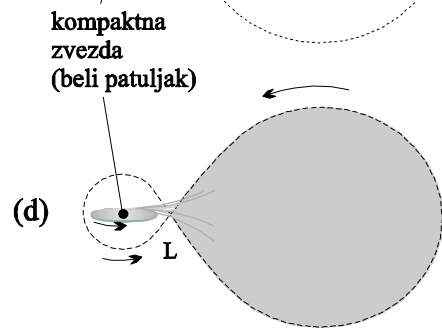
Masivnija komponenta A brže evoluira



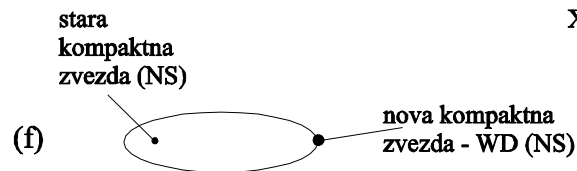
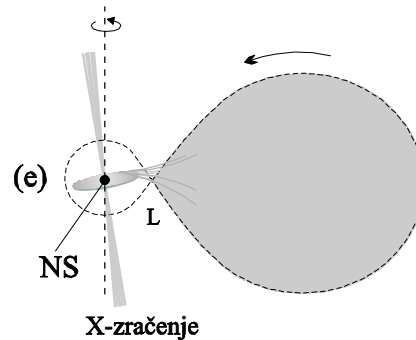
Komponenta A gubi masu, zvedanim vetrom i pretakanjem materije na B



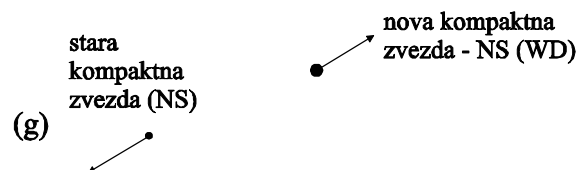
Komponenta A istroši gorivo, nastaje kompaktni objekat



Komponenta B dobijanjem materije, povećava masu i ubrzava evoluciju. Kada postane crveni džin i ispuni Rošov oval, dolazi do pretakanja materije usled jake gravitacije komponente A.



Formira se AKRECIONI DISK, koji zrači.



Konačna faza komponente A zavisiće od količine dobijene mase, tako da može preći u NS, doći do eksplozije SN, ili do kolapsa u crnu rupu.

# Pulsari u TDS

# Dvojni pulsari i efekti OTR

- Prvi dvojni pulsar otkriven 1974. godine (Russell Hulse i Joseph Taylor)
  - PSR 1913+16 – periodične promene frekvencije impulsa (na svakih 7.75 sati) u odnosu na srednju vrednost od 16.94 impulsa u sekundi ( $P=0.059$  s)
    - pulsar ima pratioca (drugi pulsar ili beli patuljak?)
  - smanjenje njegovog orbitalnog perioda (2s za 8 godina) predstavlja dokaz postojanja gravitacionog zračenja (Nobelova nagrada za fiziku 1993. godine)

## The Nobel Prize in Physics 1993



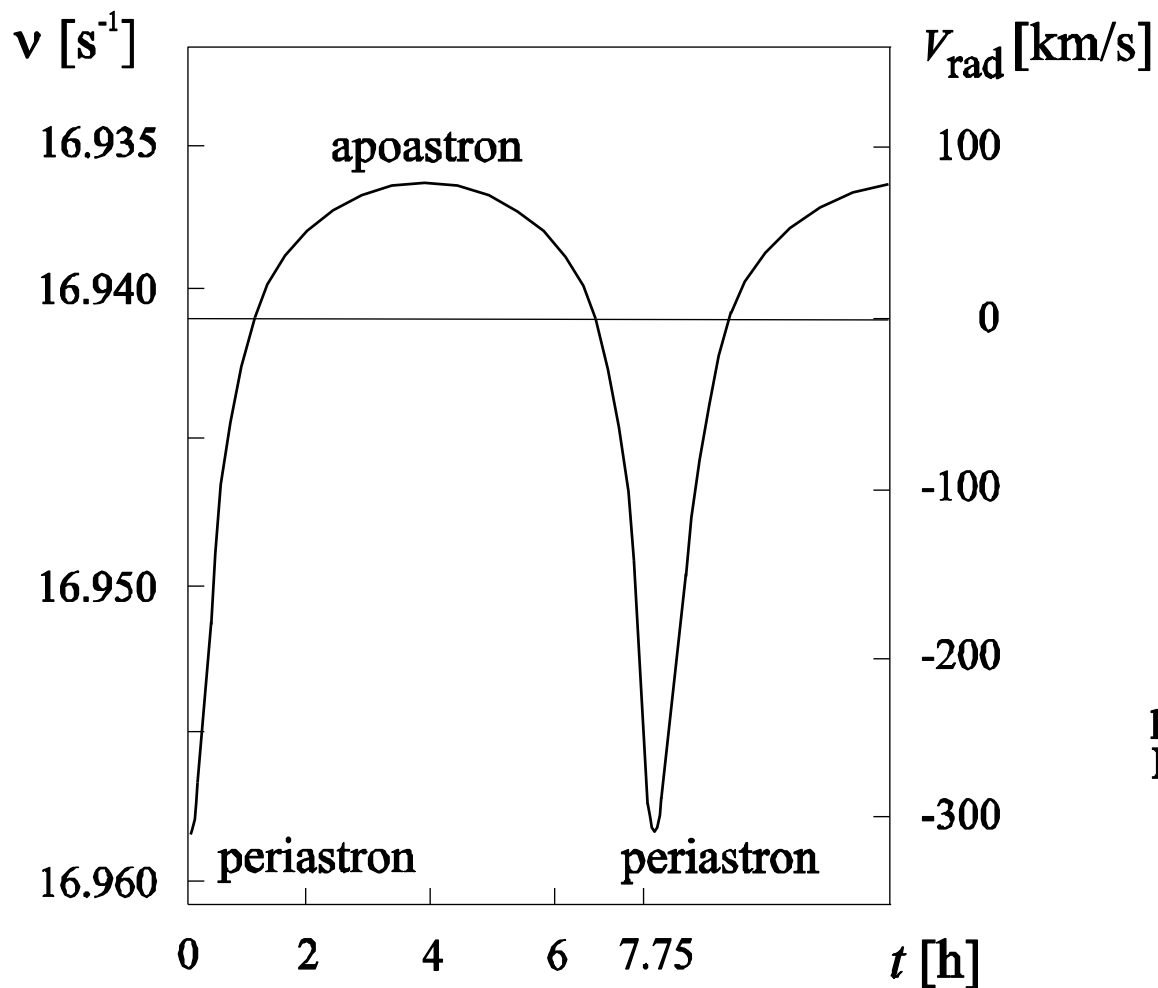
Russell A. Hulse  
Prize share: 1/2



Joseph H. Taylor Jr.  
Prize share: 1/2

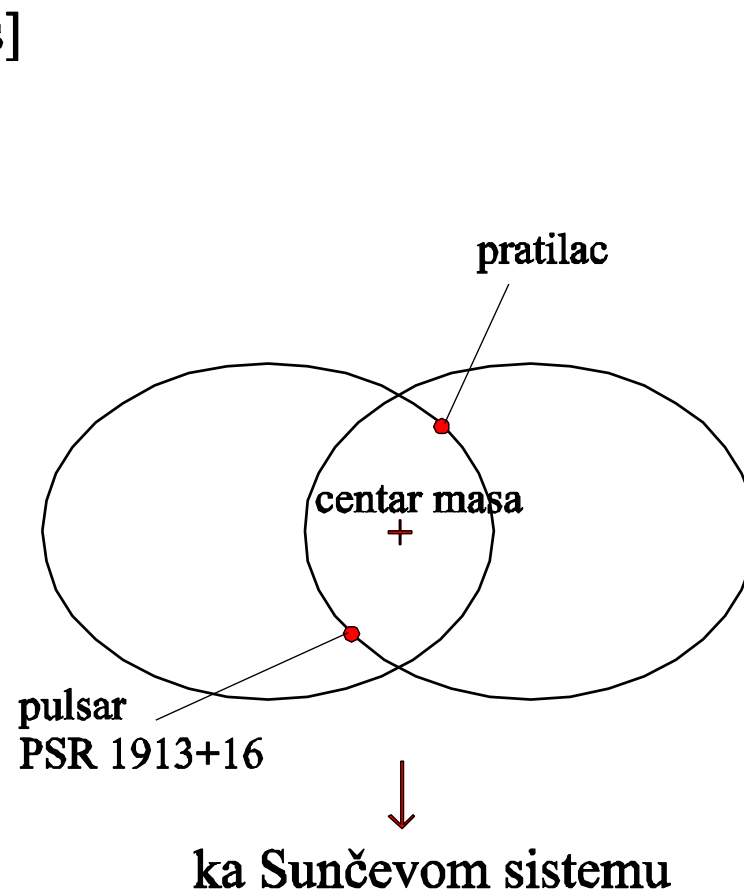
The Nobel Prize in Physics 1993 was awarded jointly to Russell A. Hulse and Joseph H. Taylor Jr. *"for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"*

# Promena frekvencije primljenih impulsa kod dvojnog pulsara



(a)

# Orbita dvojnog pulsara



(b)

# Smanjenje orbitalnog perioda pulsara PSR 1913+16

