

OAP 2022 Lekcija 9: Zvezde i Galaksija

Ivan Milić (AOB / MATF)

9/12/2022

Do sada:

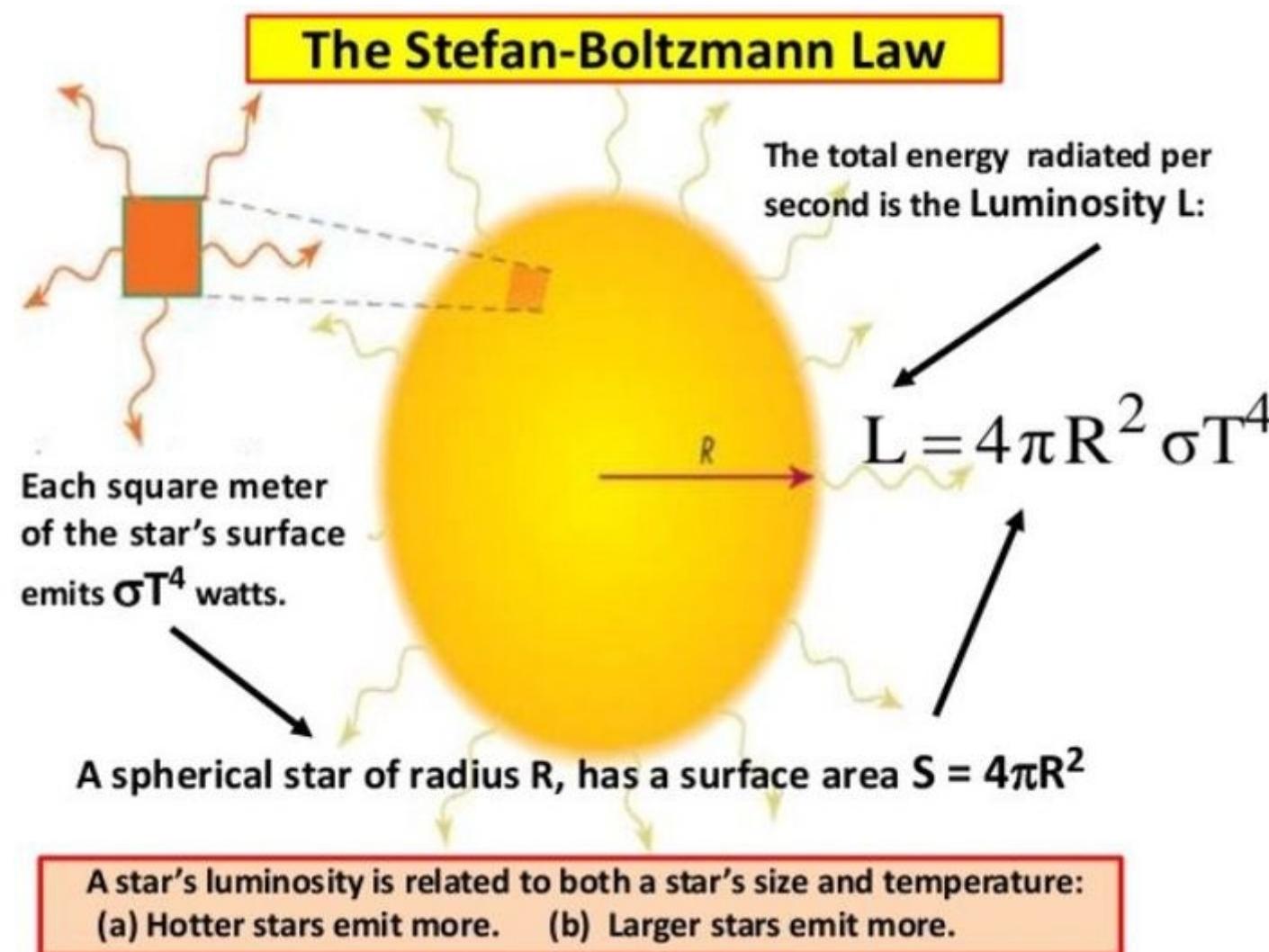
- Videli smo kako nam izgledaju tela na nebeskoj sferi
- Videli smo kako izgleda njihovo prividno kretanje usled dnevnog i godišnjeg kretanja Zemlje
- Iispitali smo kretanje planeta u Sunčevom Sistemu
- A nakon toga i kako zrače zvezde
- I kako ih posmatramo teleskopima
- Sada na red dolazi da pokrijemo:

Osnovne osobine zvezda i njihovu strukturu

Njihov raspored u galaksiji i osnove strukture naše galaksije (sledeći čas)

Setimo se da zvezde zrače tj. emituju neku energiju

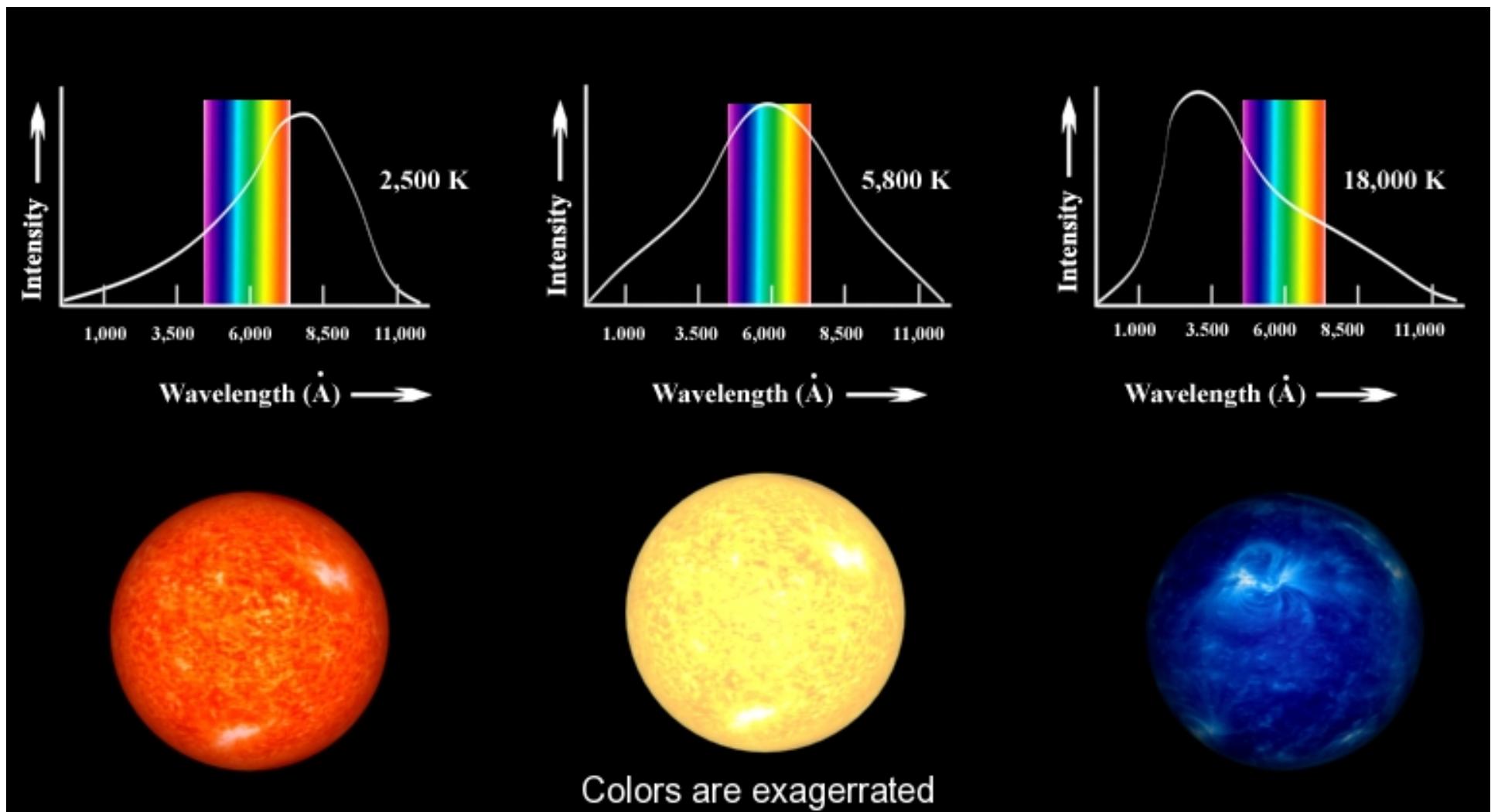
- Ukupna energija koju zvezda izrači u jedinici vremena jednaka je proizvodu površne i ukupne emisivnosti. Luminoznost Sunca je 3.828×10^{26} W! (Vati)



Ovo je takozvana efektivna temperatura zvezda. Bliska je površinskoj temperaturi. Efektivna temperatura je oko 1000x manja od temperature u jezgru!

Takodje, zvezde dolaze u različitim bojama

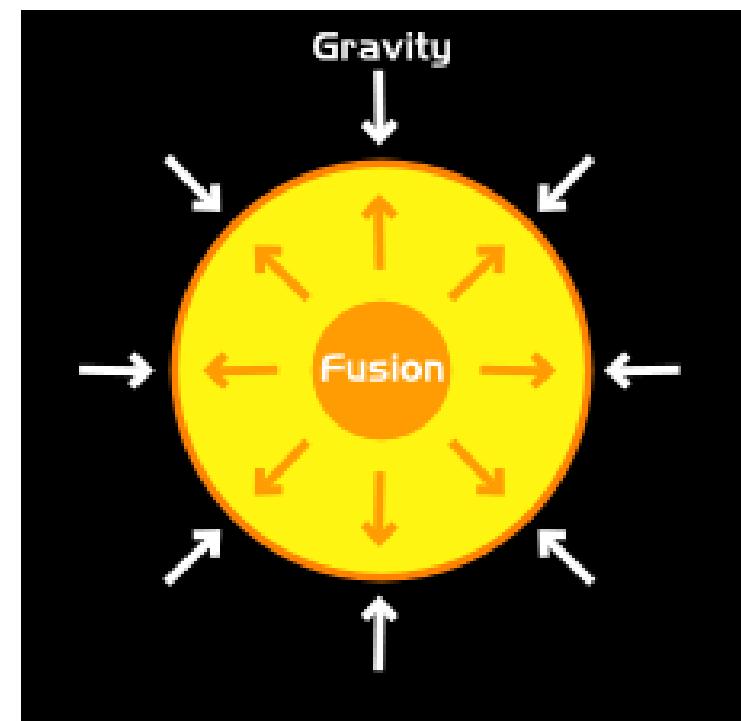
- Zavisno od temperature površine, zvezde će imati različitu raspodelu zračenja.
- Ovo vodi ka tome da toplije zvezde zovemo **plavim** a hladnije zvezde **crvenim**



Izvor energije zvezda

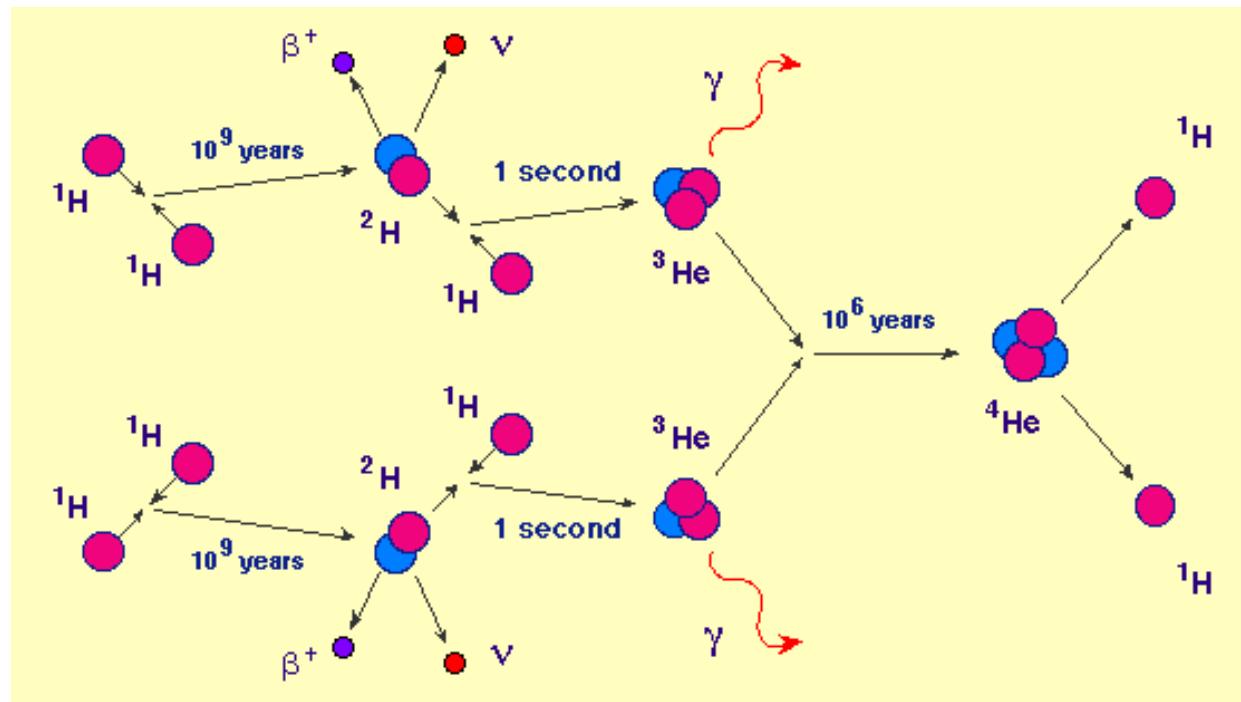
- Prve teorije su predlagale da se zvezde polako gravitaciono sažimaju i tako oslobadjaju toplotu
- Međutim Džins (Jeans) je pokazao da bi se zvezde onda jako brzo "ugasile"
- Danas znamo da je ono što oslobadja energiju u jezgrima zvezda **fuzija**
- Fuzija je **nuklearna reakcija** u kojoj, pod posebnim uslovima više atoma lakših elemenata prelaze u jedan atom težeg elementa.
- Fuzija vodonika u helijum je suštinski, prelazak 4 atoma H u jedan atom He
- Energija koju dobijamo je:

$$E = \Delta mc^2$$



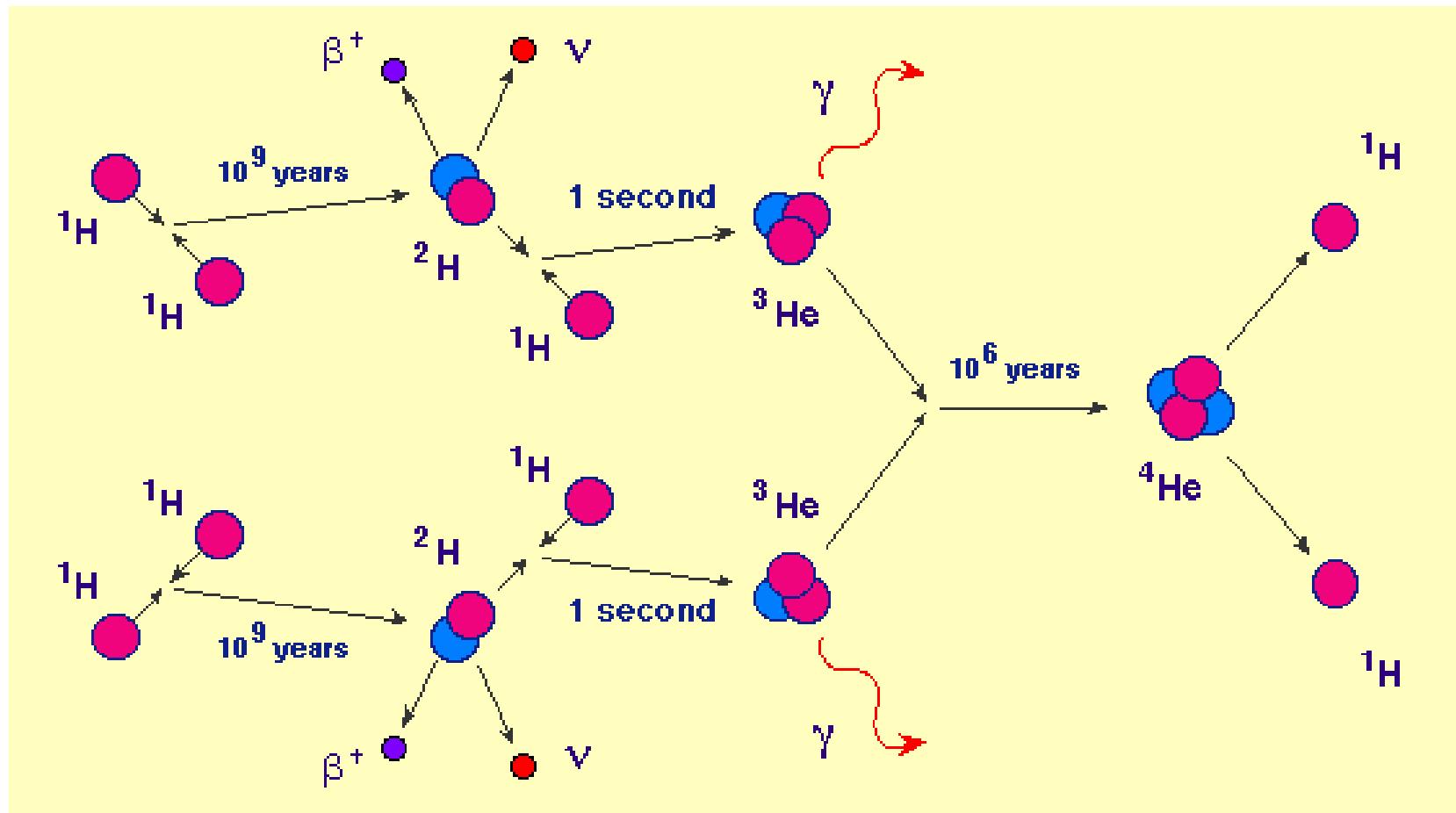
Termonuklearne reakcije

- Potrebni uslovi za fuziju su visoka temperatura i pritisak.
- U centru sunca, vlada temperatura od oko 15 000 000 K i pritisak od oko 30 PetaPaskala!
- atmosferski pritisak (na Zemlji) je 100000 Pa, a temperatura 300 K
- (Mi smo još uvek daleko od toga da reprodukujemo fuziju u laboratoriji)



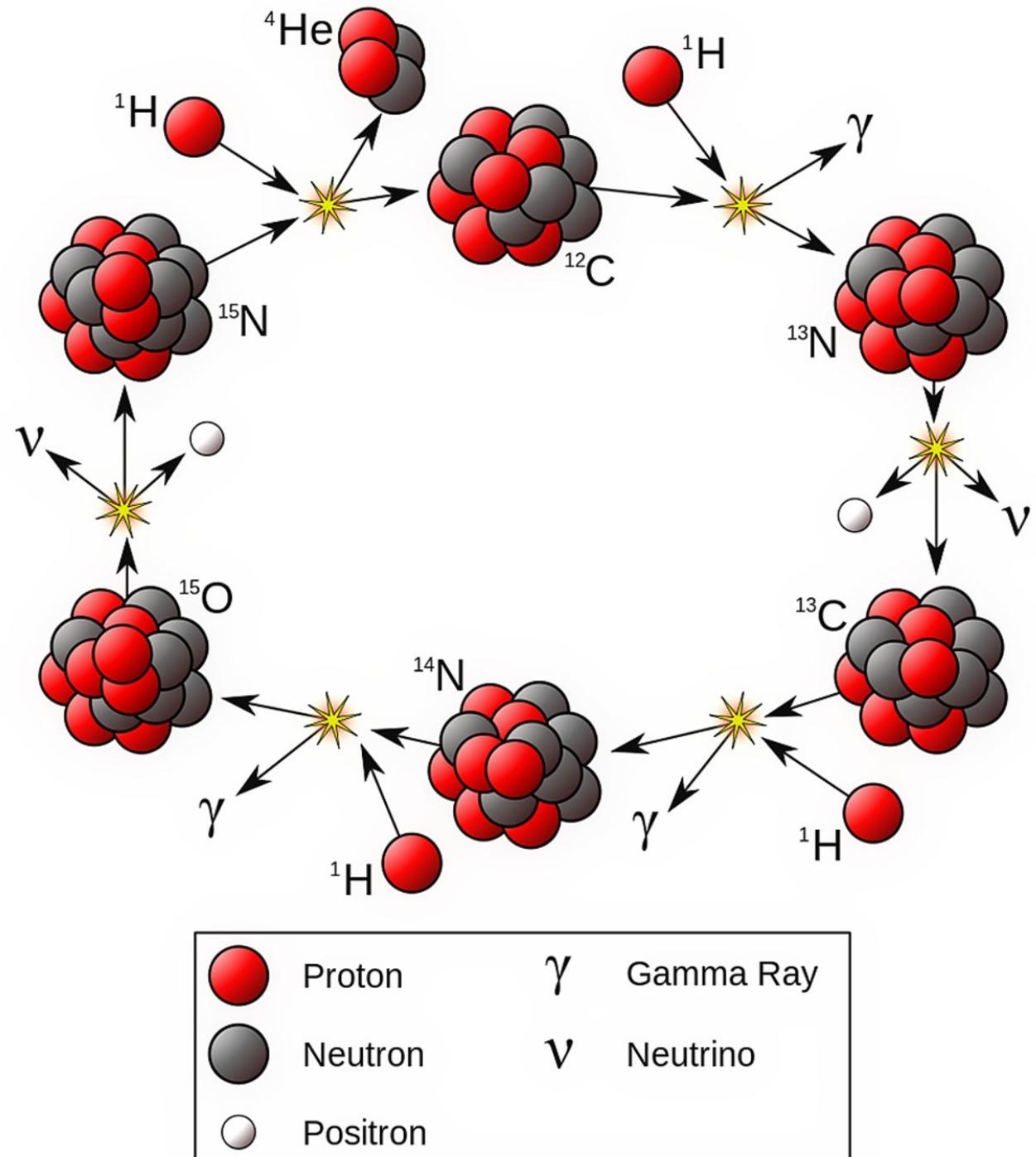
P-p ciklus

- Ovo je najjednostavniji oblik fuzije vodonika u Helijum
- Energija se oslobadja u vidu 2 neutrina (slabo interaguju sa materijom) i 2 gama zraka (2 fotona visoke energije)



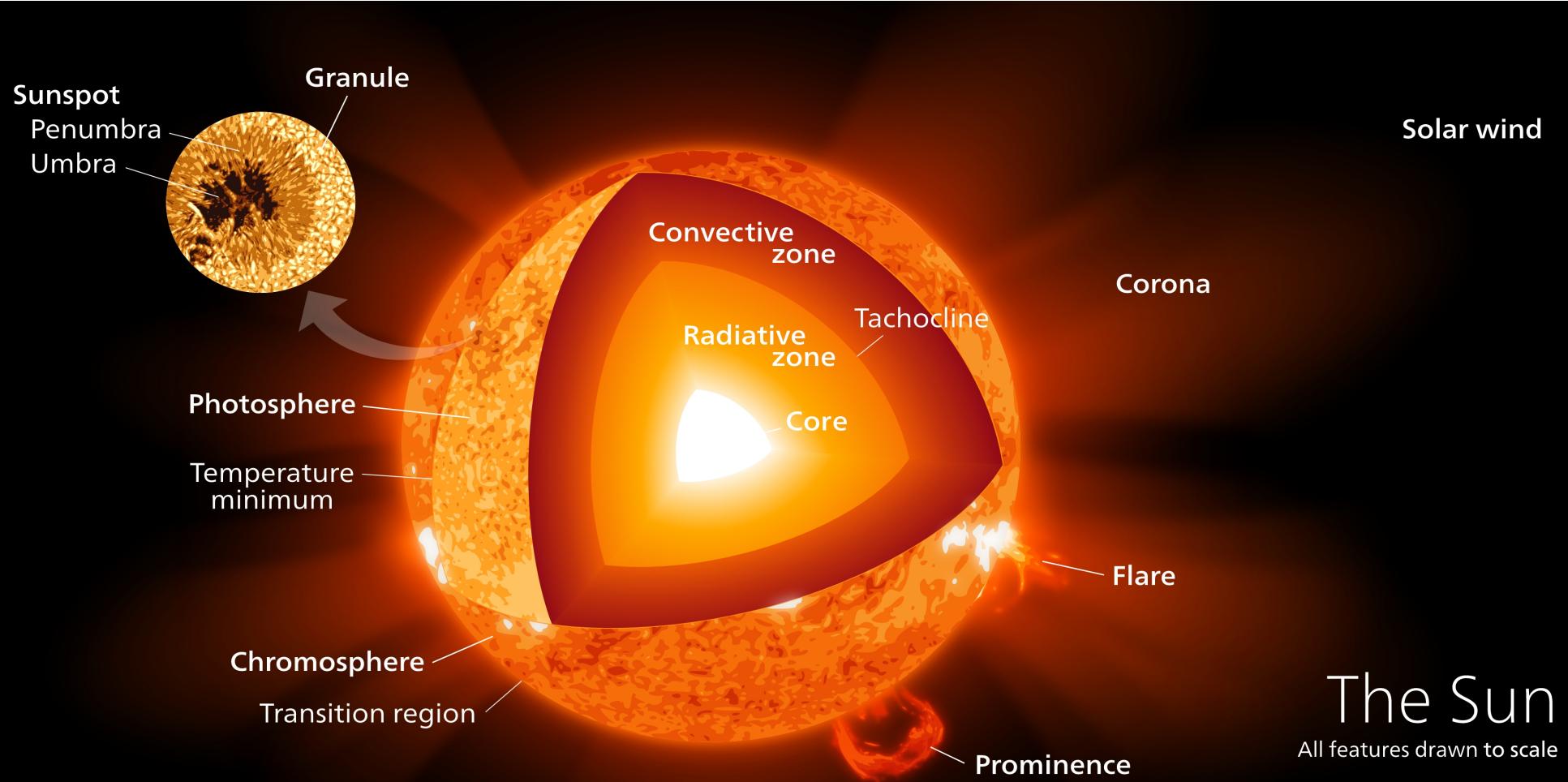
CNO ciklus

- Zahteva malo veće temperature i pritiske
- Takođe, potrebno je prisustvo vodonika koji služi kao neka vrsta **katalizatora**
- Energija se ponovo oslobadja u vidu neutrina i gama zraka



Zvezdana struktura

- Energija koja nastaje u jezgru biva transportovana ka spolja: prvo radijativno (zračenjem) a zatim i konvektivno.



Jednačine zvezdane strukture

- Ne moramo da ih znamo, poenta je da razumemo da se odnos izmedju osnovnih veličina (masa, gustina, pritisak, luminoznost...) može prikazati putem diferencijalnih jednačina koje dolaze iz nekih (razumnih) fizičkih prepostavki

FUNDAMENTAL STELLAR STRUCTURE EQUATIONS (FSSE) IN TIME-INDEPENDENT (STATIC) FORM

$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{M_r \rho}{r^2} \quad \text{HYDROSTATIC EQUILIBRIUM}$$

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \quad \text{MASS CONSERVATION}$$

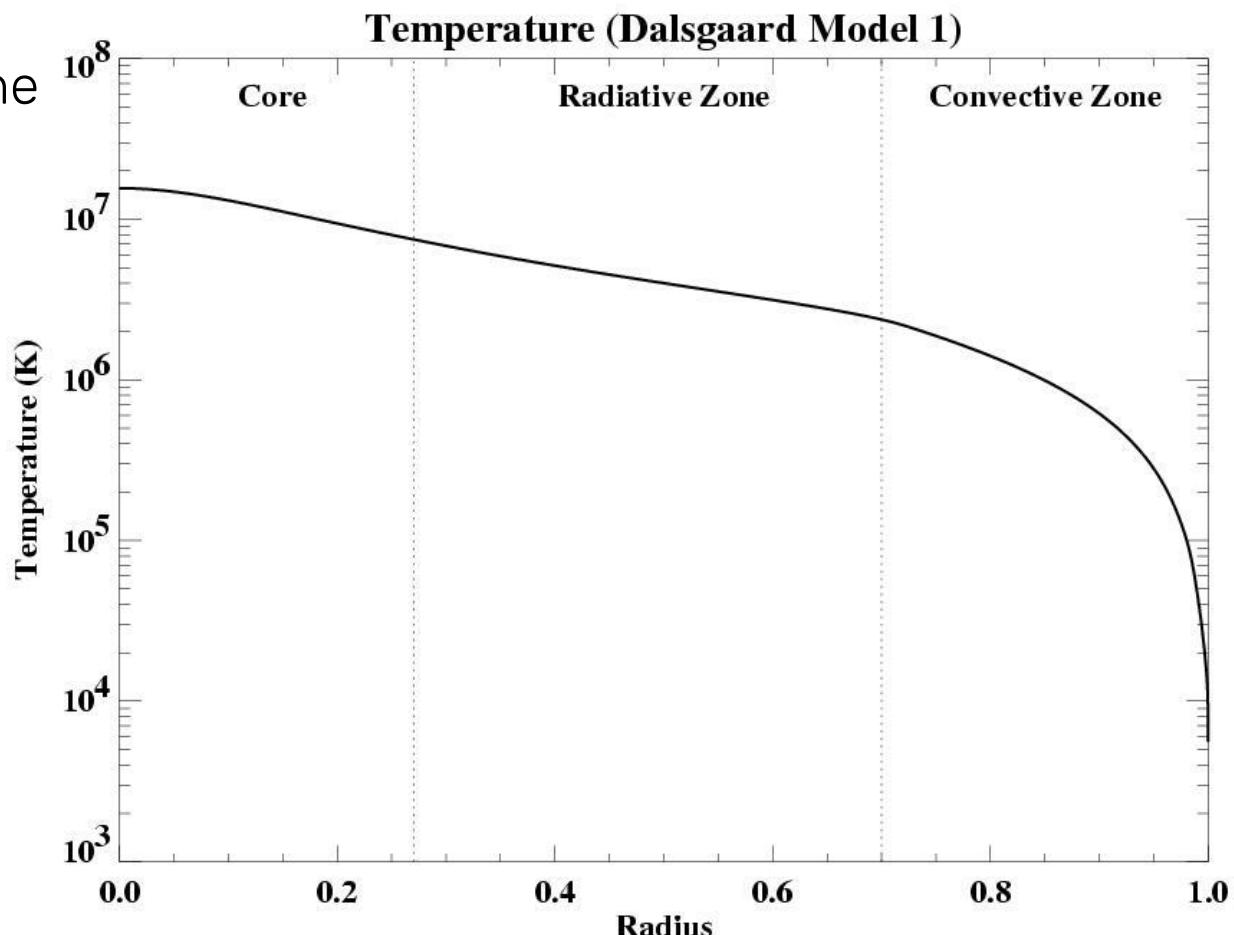
$$\frac{dL_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \epsilon \quad \text{ENERGY EQUATION}$$

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{rad} = - \frac{3}{4ac} \frac{\bar{\kappa} \rho}{T^3} \frac{L_r}{4\pi r^2} \quad \text{RADIATIVE TRANSPORT}$$

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{ad} = - \left(1 - \frac{1}{\gamma} \right) \frac{\mu m_H}{k} \frac{GM_r}{r^2} \quad \text{ADIABATIC CONVECTION}$$

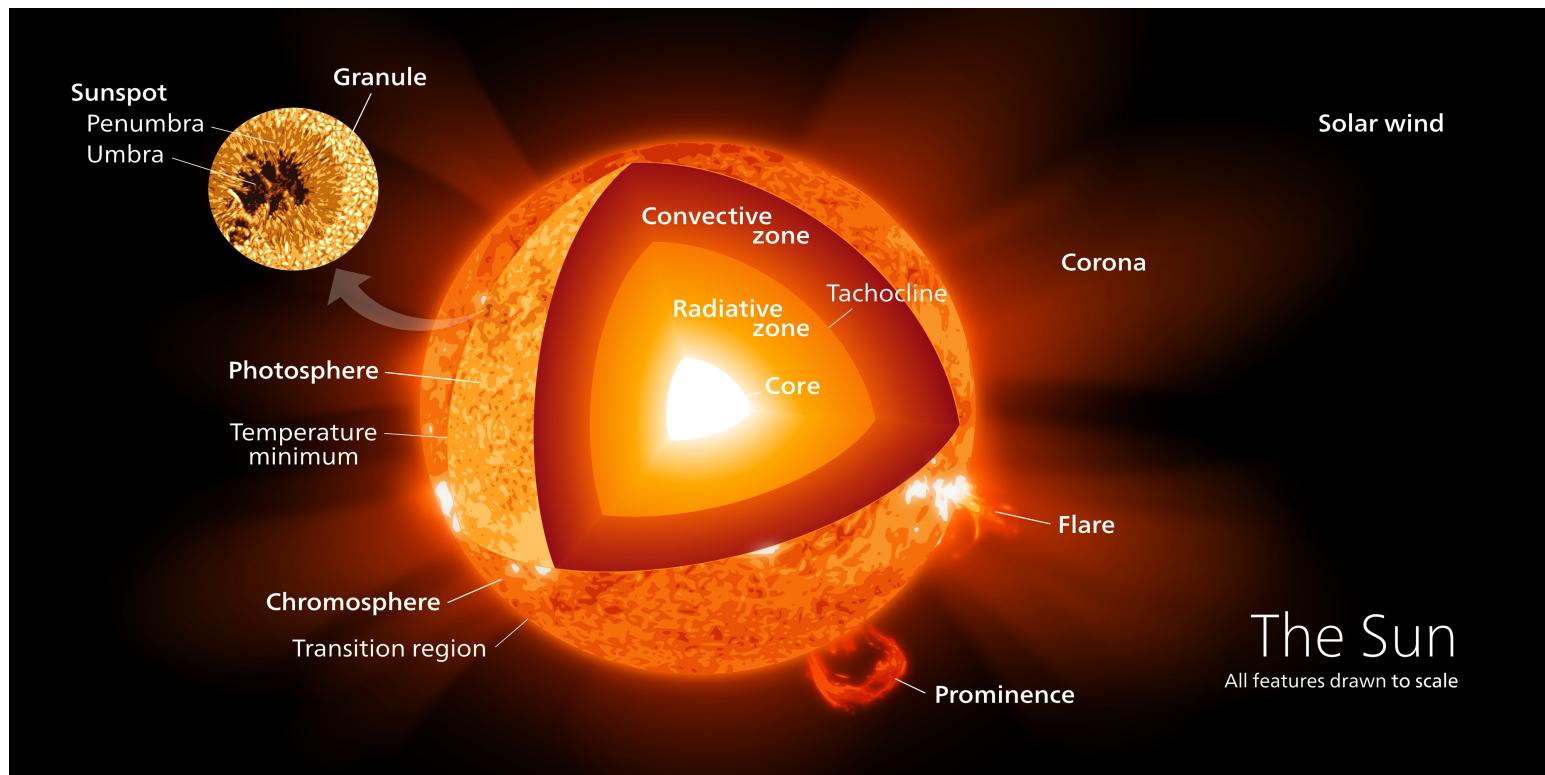
Struktura modela Sunca

- Rešavanjem jednačina **zvezdane strukture** za datu masu, hemijski sastav i granične uslove, dobija se **model zvezde**.
- Model zvezde je raspodela osnovnih fizičkih veličina duž radijusa zvezde.
- Možemo našoj skici zvezdane strukture da pripisemo neke konkretnije brojke!
- Npr. ovako se menja temperatura Sunca od centra ka površini



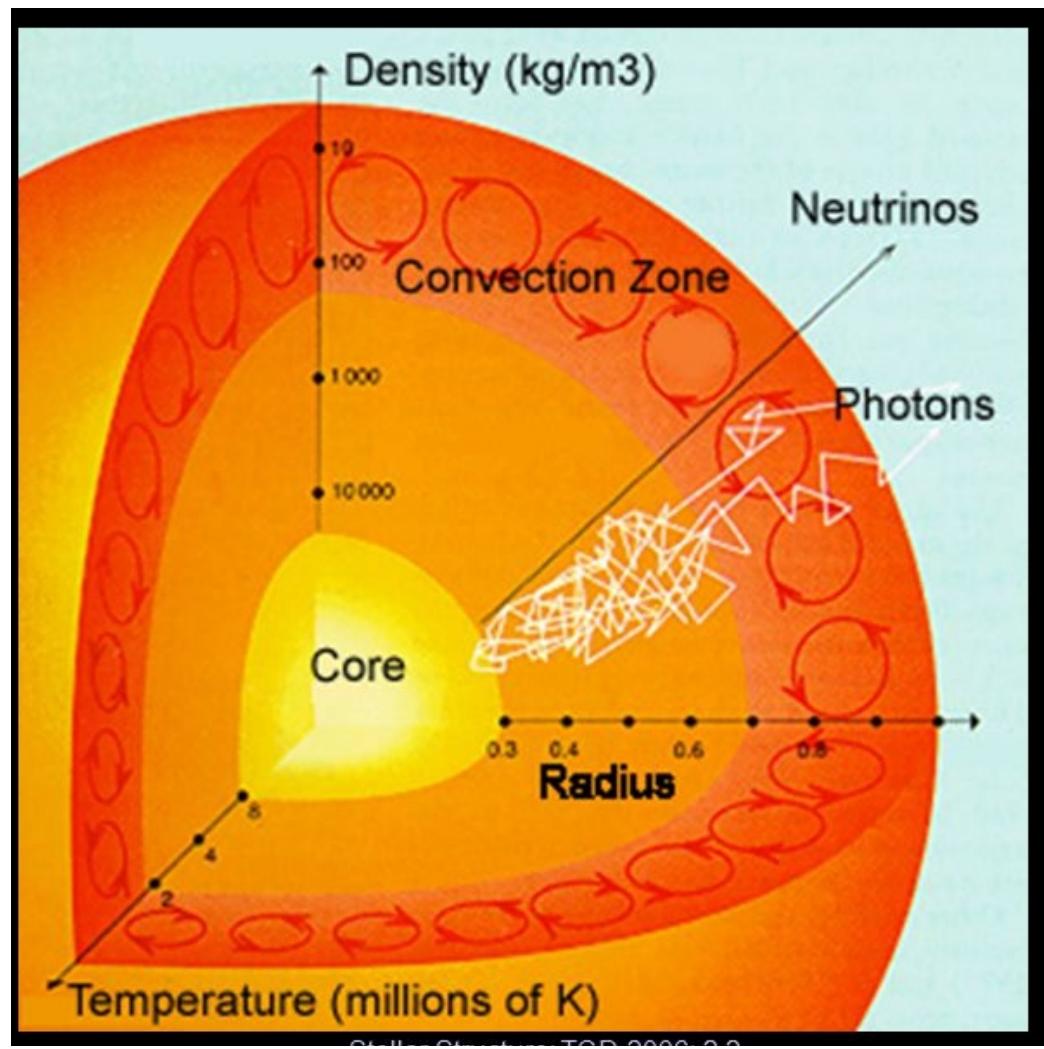
Jezgro vs. površina

- Temperatura u centru Sunca je 15 000 000 K, na površini, 6000 K
- Pritisak u centru Sunca je 100 000 milijardi puta veći nego atmosferski, na površini, pritisak u Sunčevoj atmosferi je manji od atmosferskog!
- Zvezde su stvarno ekstremni objekti!

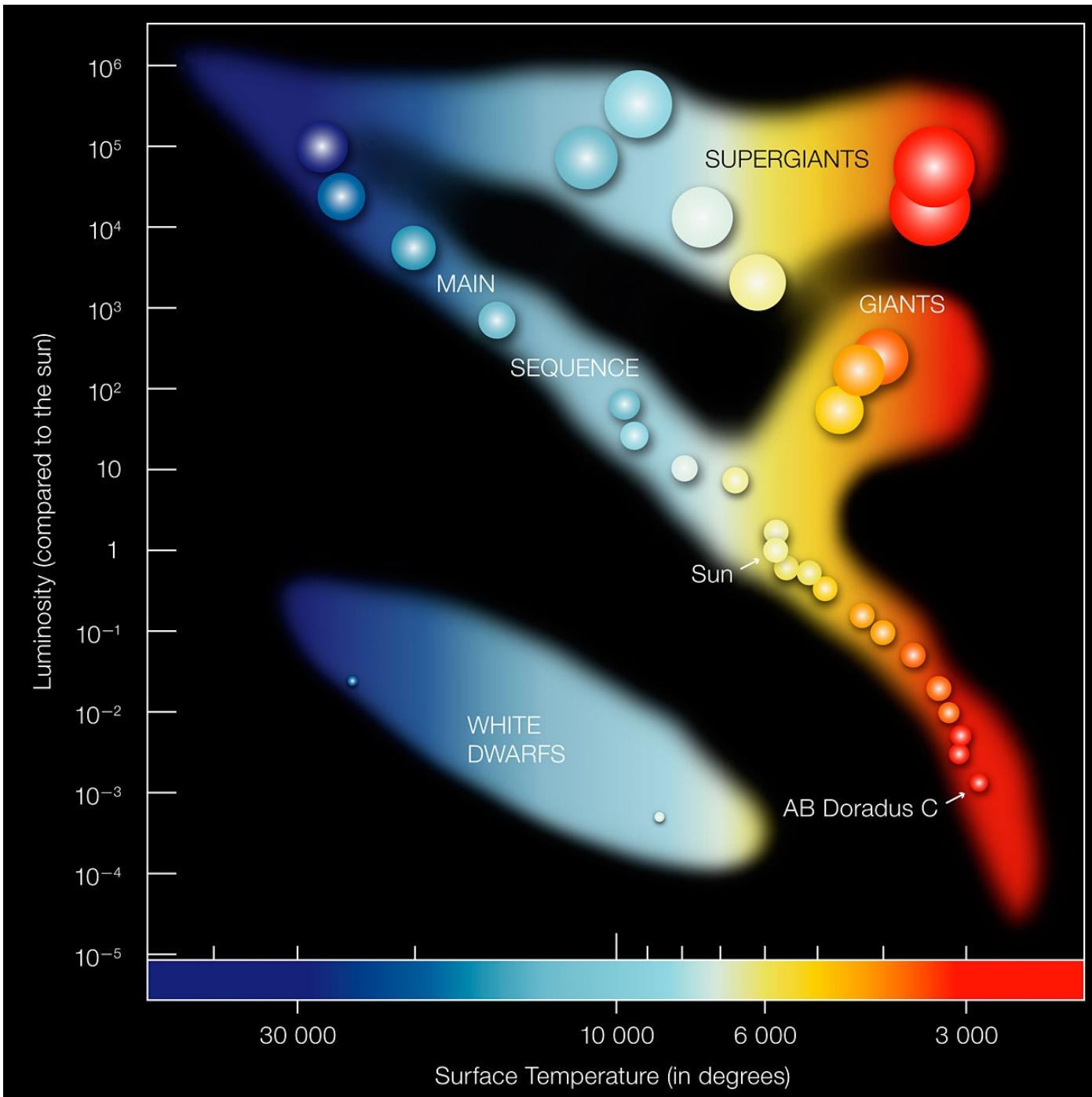


Struktura modela Sunca

- Rešavanjem jednačina **zvezdane strukture** za datu masu, hemijski sastav i granične uslove, dobija se **model zvezde**.
- **Obratite pažnju:**
Fizika nam daje koje strukture su u skladu sa našim zadatim uslovima! Zvezda sa zadatim parametrima ne može da ima bilo kakvu strukturu!
- To znači da je zvezdana struktura, (kao i njen život), odredjena masom



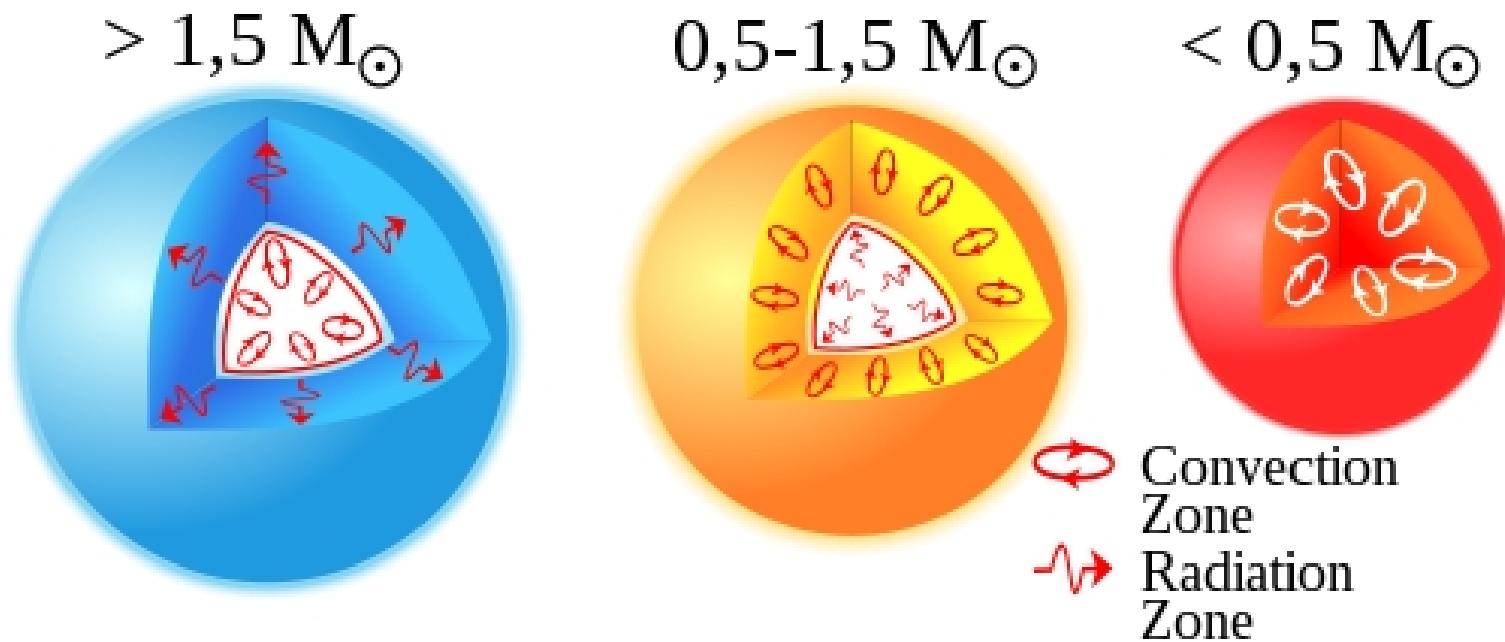
To je, na neki način, objašnjenje za HR dijagram



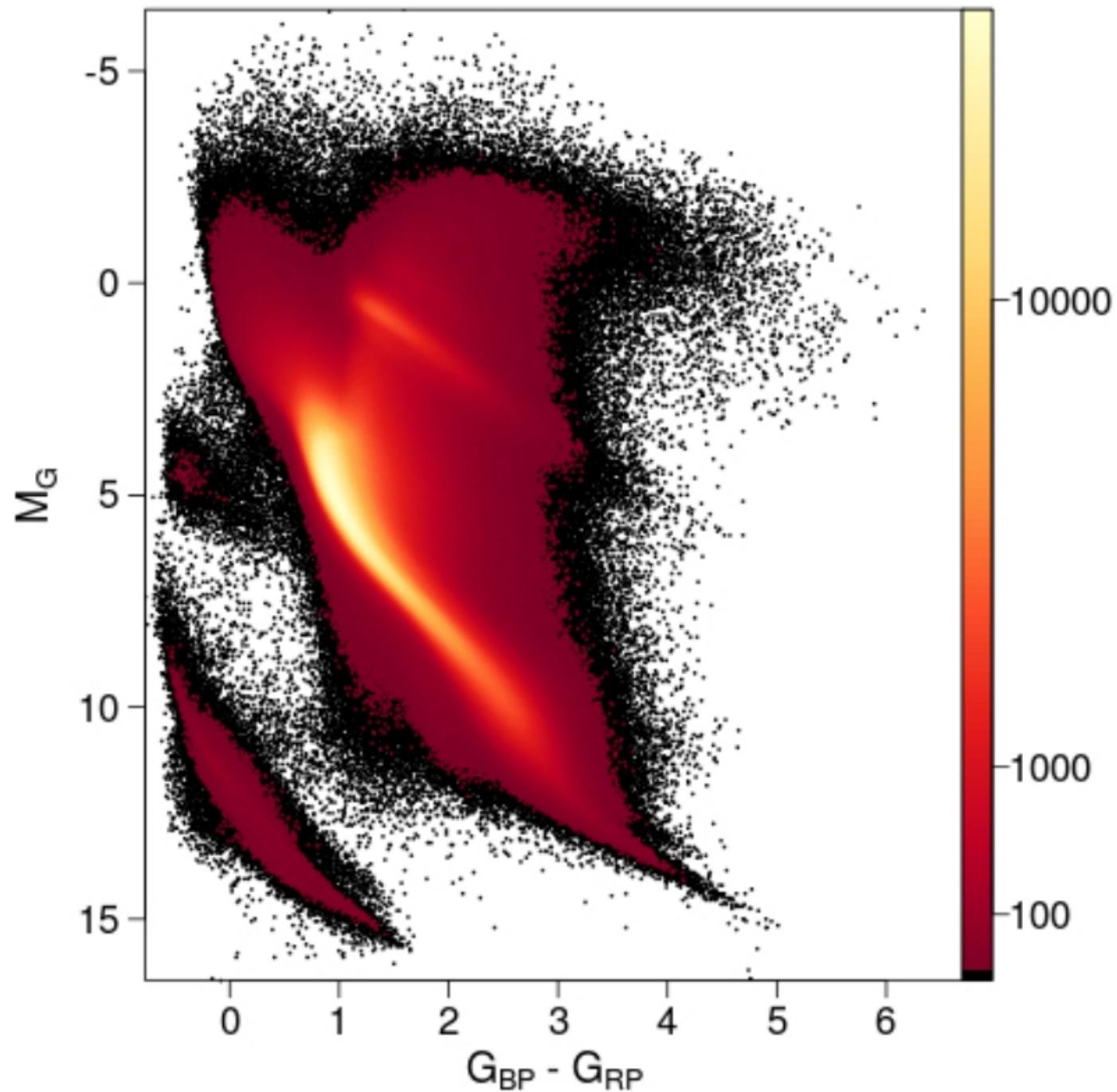
Zvezde različitih masa imaju različitu unutrašnju strukturu

- Masivne vrele zvezde imaju konvektivna jezgra a radijativne omotaže
- Zvezde slične Suncu imaju radijativna jezgra a konvektivne omotače
- Malo masivne, hladnije zvezde mogu da budu u potpunosti konvektivne

Heat Transfer of Stars

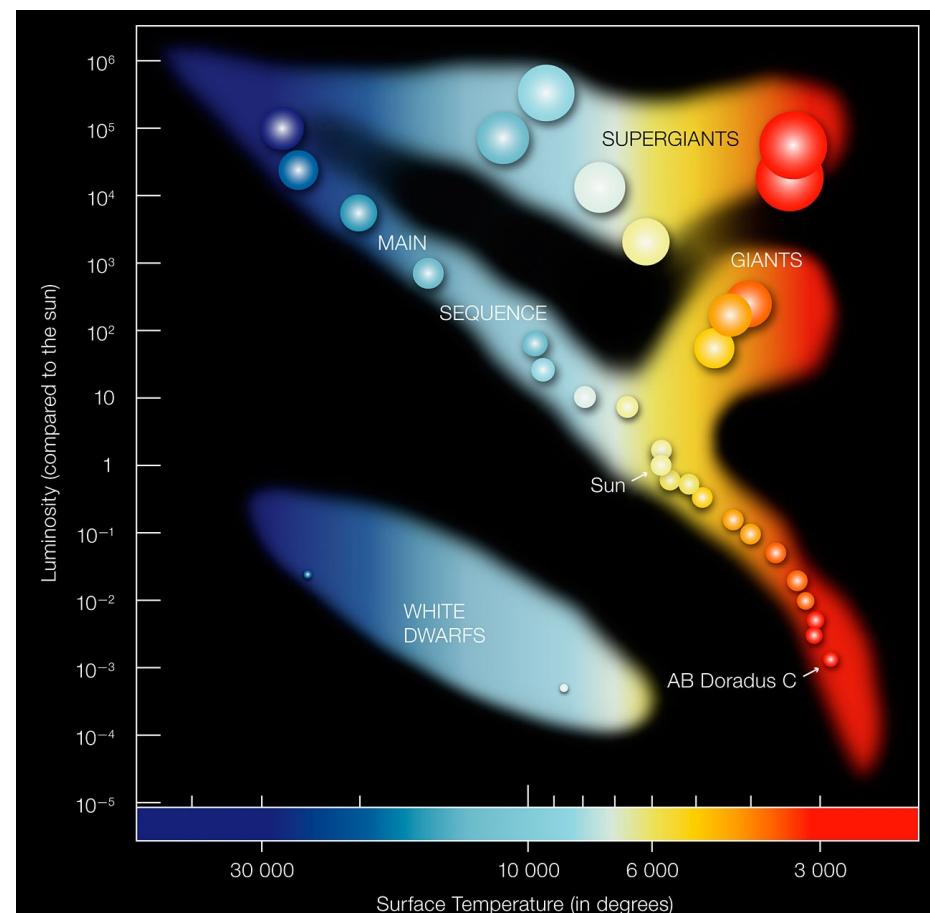


Posmatrani HR dijagram (GAIA)



Ne zaboravite

- Zvezde na **glavnom nizu** fuzionišu vodonik u helijum
- Imaju relativno slične radijuse, ali veliki raspon temperatura, masa, luminoznosti i dužine života (masivnije zvezde žive kraće).
- Položaj zvezde na glavnom nizu je određen samo njenim masom i (donekle) hemijskim sastavom
- Zvezde **iznad** glavnog niza fuzionišu elemente u svojim omotačima (zato su džinovi)
- Zvezde ispod glavnog niza ne fuzionišu više ništa! (Beli patuljci).

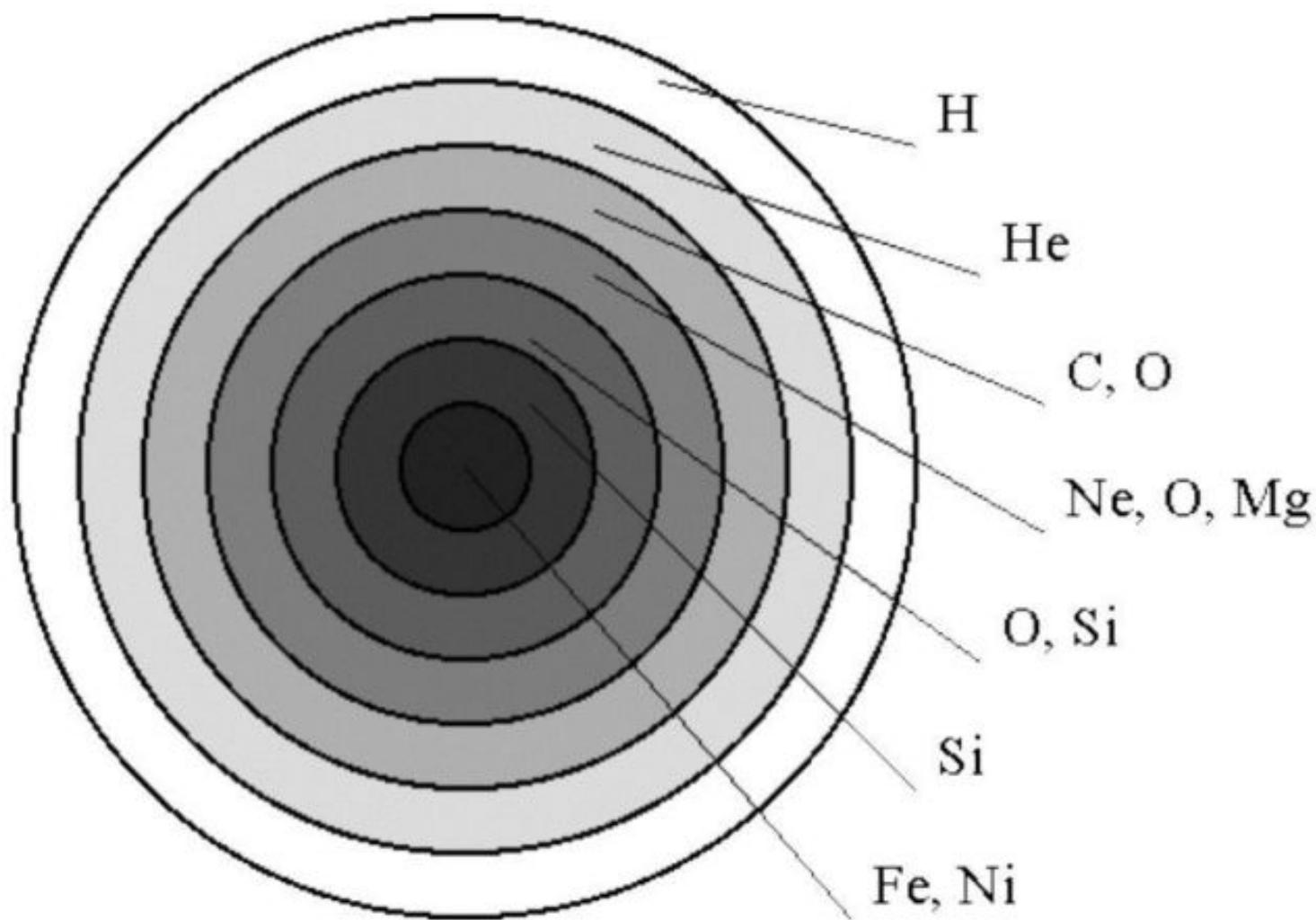


Šta se desi kada Zvezde “potroše” vodonik?

- U jednom trenutku, zvezda će potrošiti vodonik.
- To znači da nema više fuzije, pa ni pritiska da se suprotstavi gravitaciji.
- Zvezda se sažima.
- Temperatura raste i počinje fuzija helijuma u ugljenik!
- Proces se ponavlja, iznova i iznova i zvezda fuzioniše sve teže elemente.
- Sve dok ne dodje do gvoždja.
- Gvoždje je poslednji element za koji fuzija radi. Kada dobijemo gvoždje, fuzija više nije isplativa!

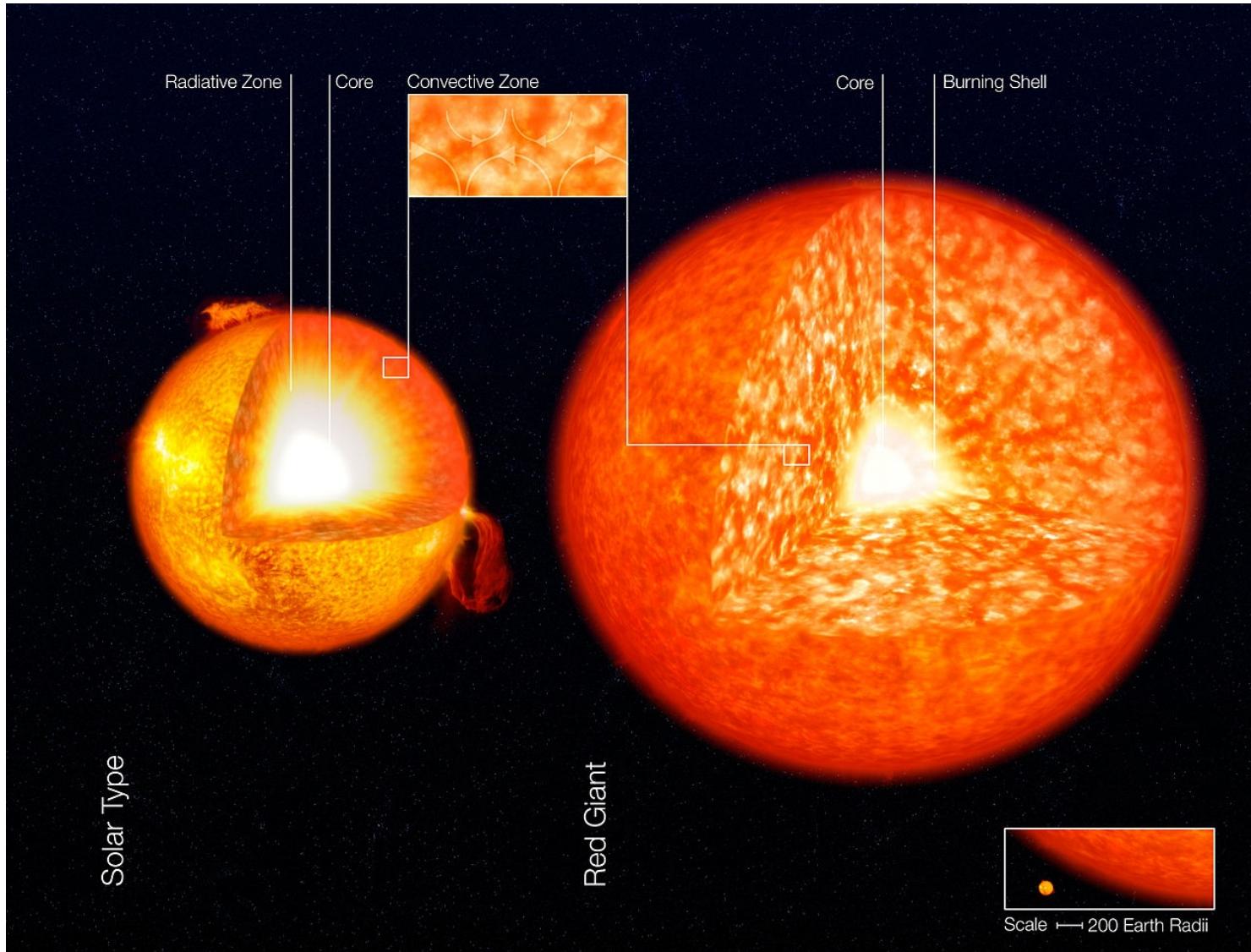
Šta se desi kada Zvezde “potroše” vodonik?

- Fuzija lakših elemenata i dalje može da se dešava u slojevima oko jezgra
- Tako da, kod najtežih zvezda u jednom trenutku imamo ovakav scenario:



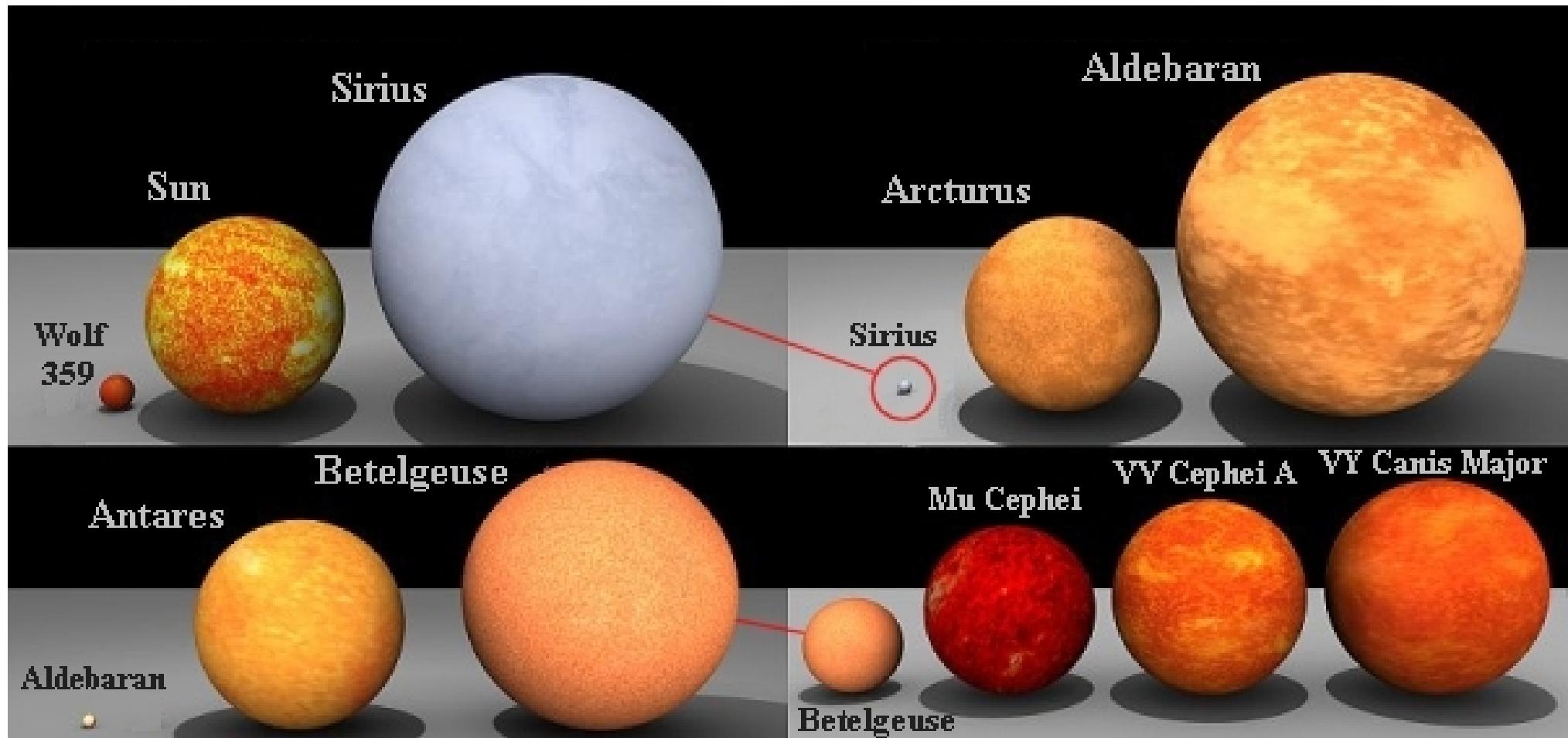
Da li se nešto vidljivo menja?

- I te kako! Zvezde koje fuzionišu vodonik u spoljnim slojevima fundamentalno menjaju svoju strukturu i postaju **crveni džinovi!**



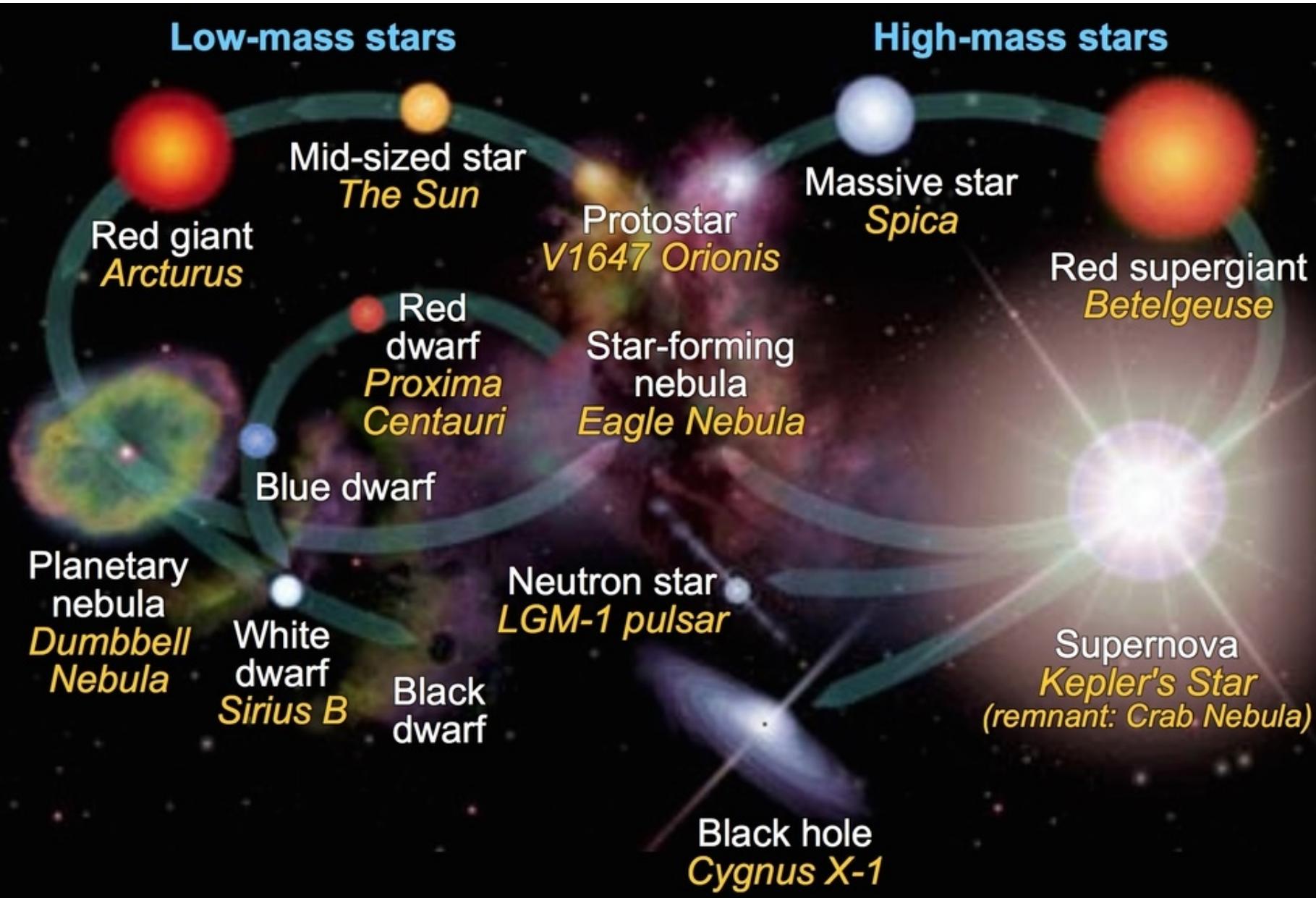
Crveni Džinovi

- Crveni džinovi, pak zavisno od faze evolucije dolaze u različitim veličinama:
- Evo nekih poznatih crvenih džinova i superdžinova

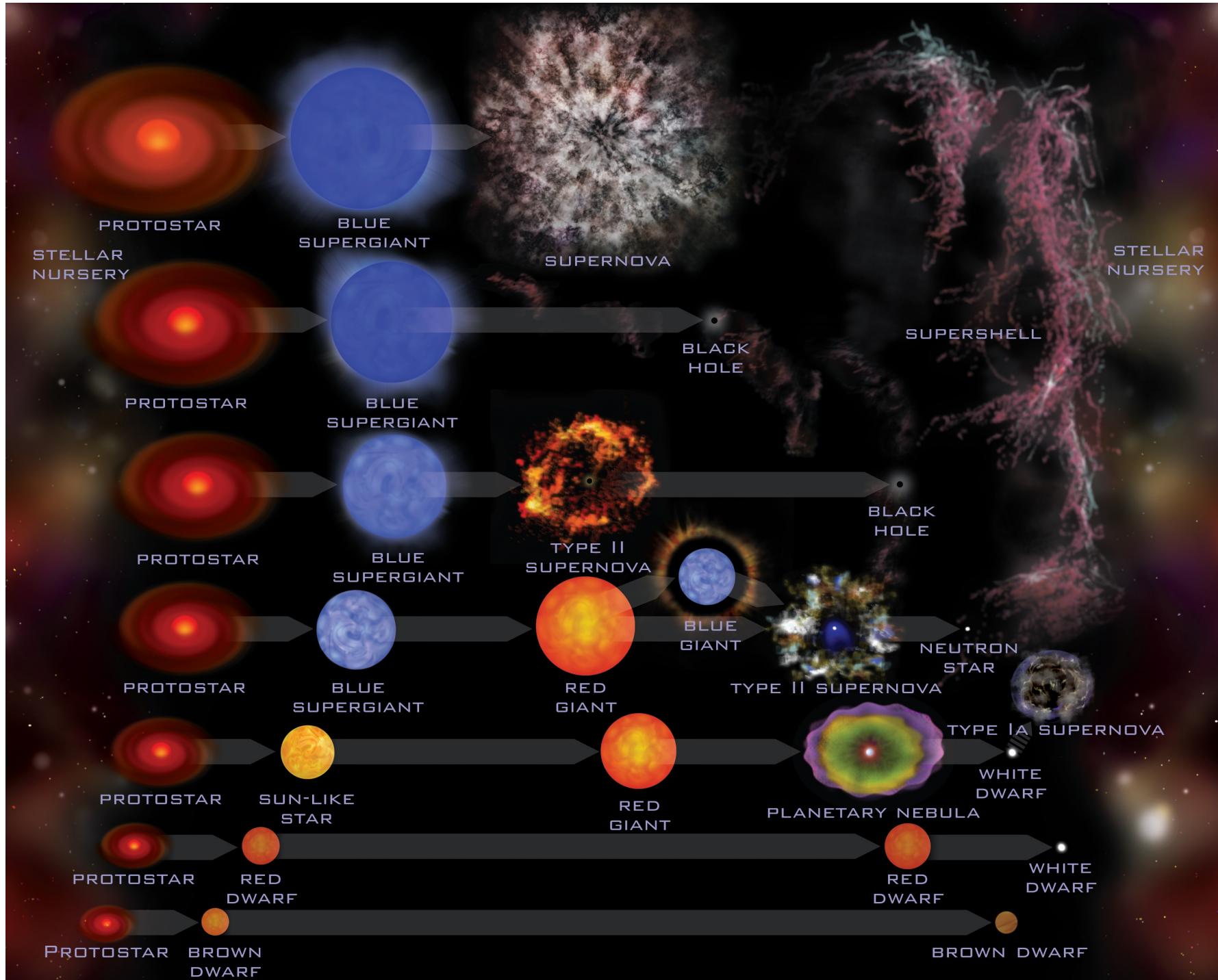


Ceo zvezdani život:

- Životni put zvezde je određen pre svega njenom masom



Malo detaljnije

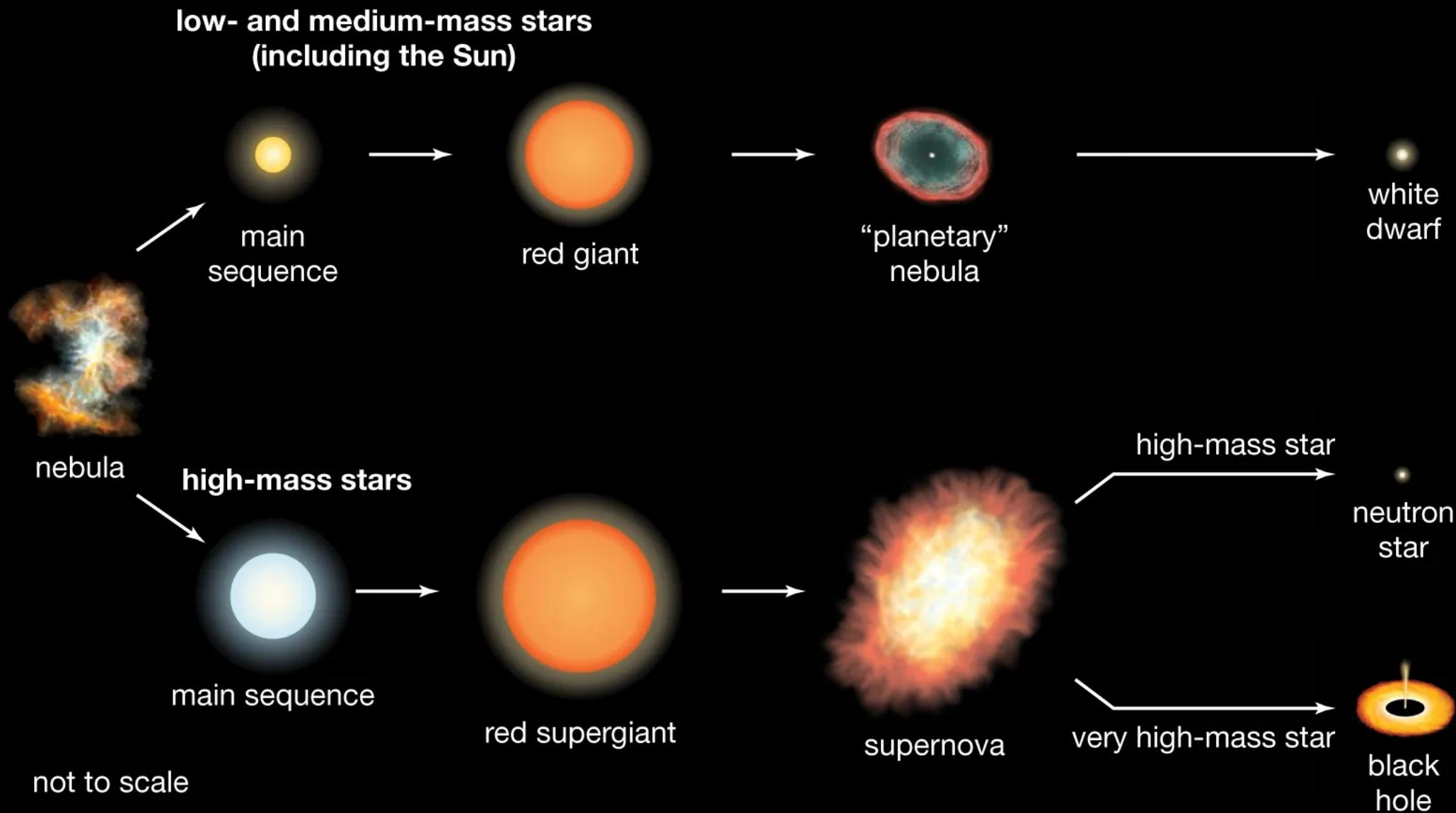


Životni put zvezda

- Od mase zvezde zavisi koliko dugo će zvezda živeti...
- I kakva će joj biti struktura...
- Kroz koje faze će proći...
- I kako će završiti svoju evoluciju kada potroši baš svo gorivo!
- Zvezde slične Suncu prolaze kroz fazu crvenog džina i završavaju kao **beli patuljak**
- Masivne zvezde (10ak puta masivnije od Sunca), prolaze kroz fazu crvenog džina (ili superdžina), kroz neku varijantu Supernove i završavaju kao **neutronska zvezda ili crna rupa**

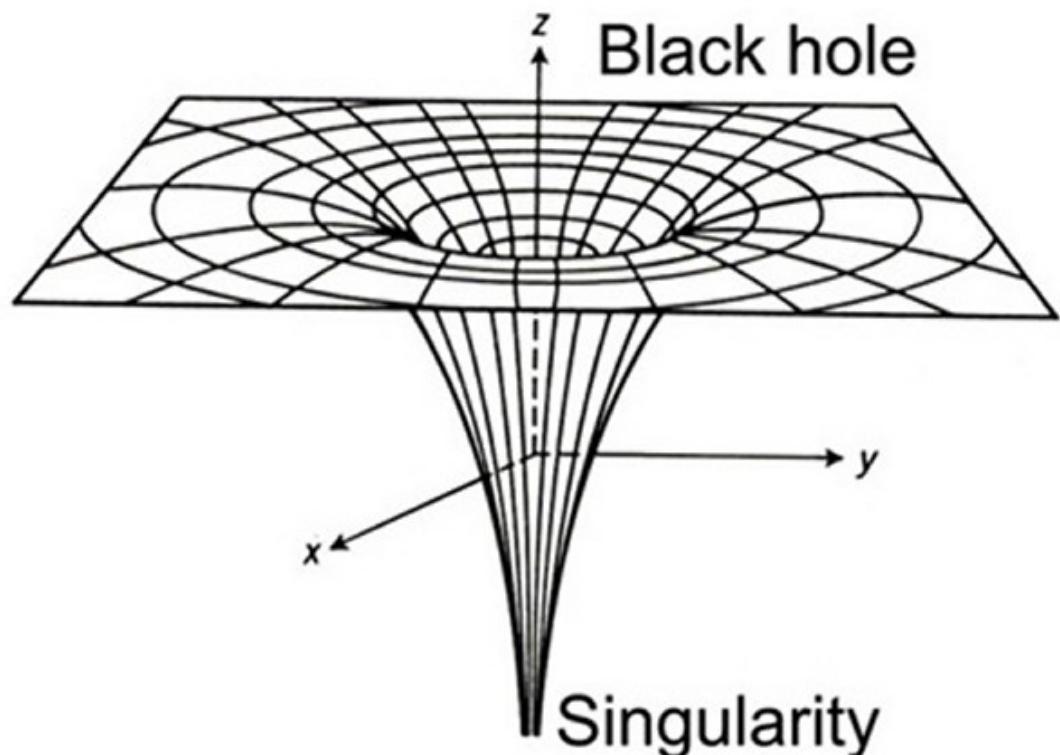
Životni put zvezda

Stellar evolution



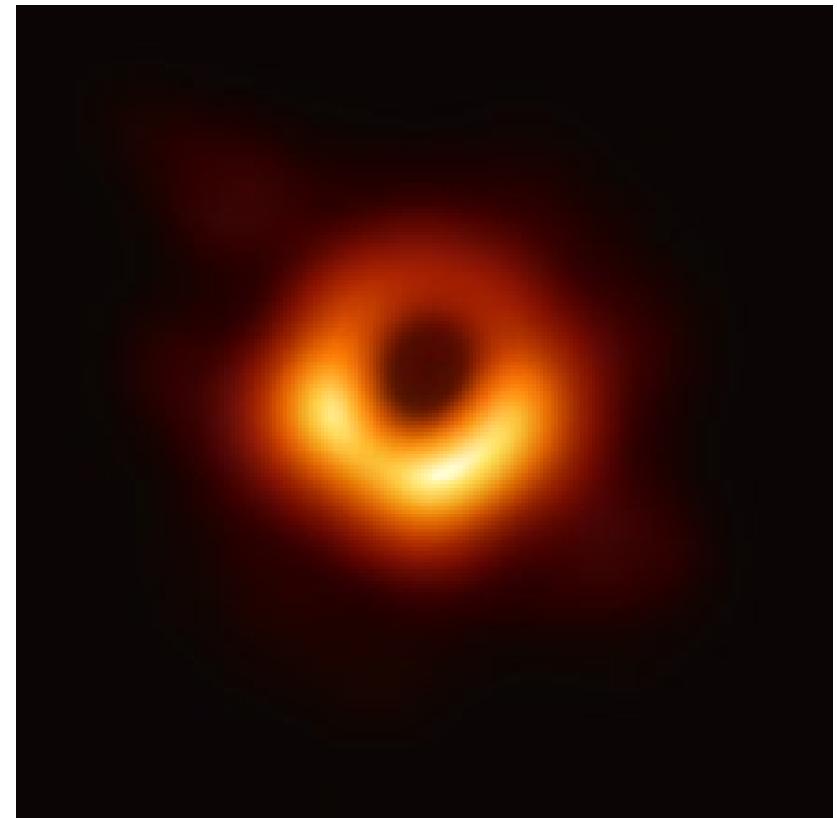
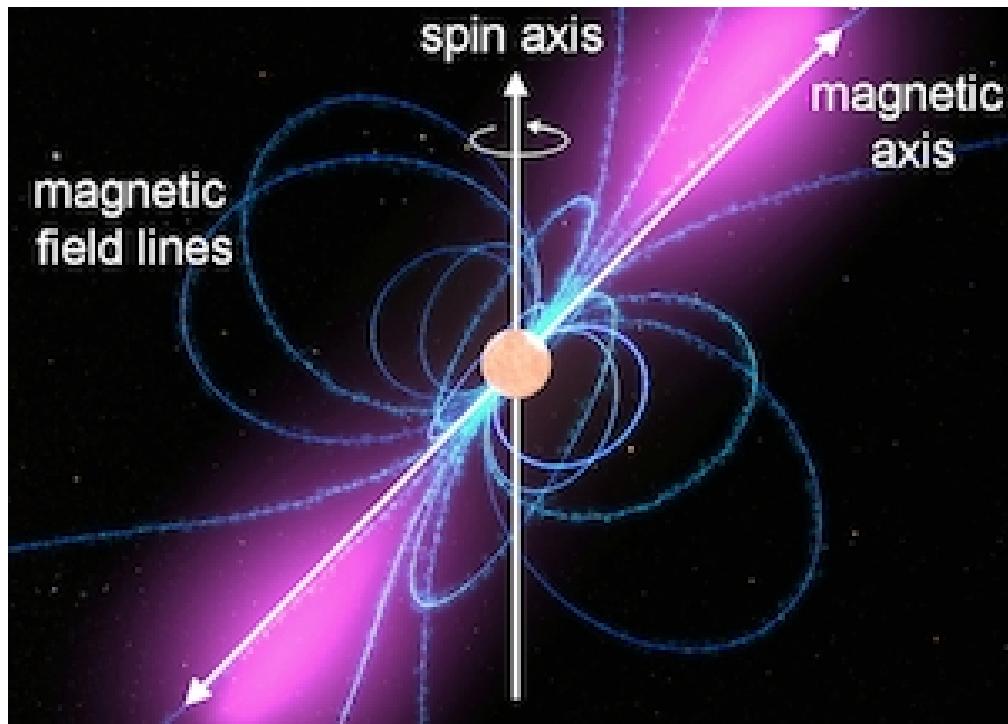
Konačni stadijumi zvezdane evolucije

- Čak i kada se svo gorivo potroši, nešto mora da se suprotstavi sili gravitacije
- Kod belih patuljaka to je **pritisak degenerisanog gasa**
- Kod neutronskih zvezda to je **pritisak neutrona koji su jedino što je preostalo nakon evolucije zvezde**
- Kod crne rupe to je ništa – gravitacija je toliko jaka da stvara **singularitet**, zakrivljenost prostora je beskonačna i ni svetlost ne može da pobegne



Kako znamo da neutronske zvezde i crne rupe postoje

- Neutronske zvezde emituju jako radio zračenje zvog svog magnetnog polja
- Crne rupe ne emituju ništa, ali vidimo uticaj njihovog gravitacionog polja na okolnu materiju: akrecioni diskovi i slični procesi “upadanja” materije u crnu rupu



Levo: Prikaz jedne neutronske zvezde (pulsara). Desno: Materija koja upada u crnu rupu u centru eliptične galaksije M87

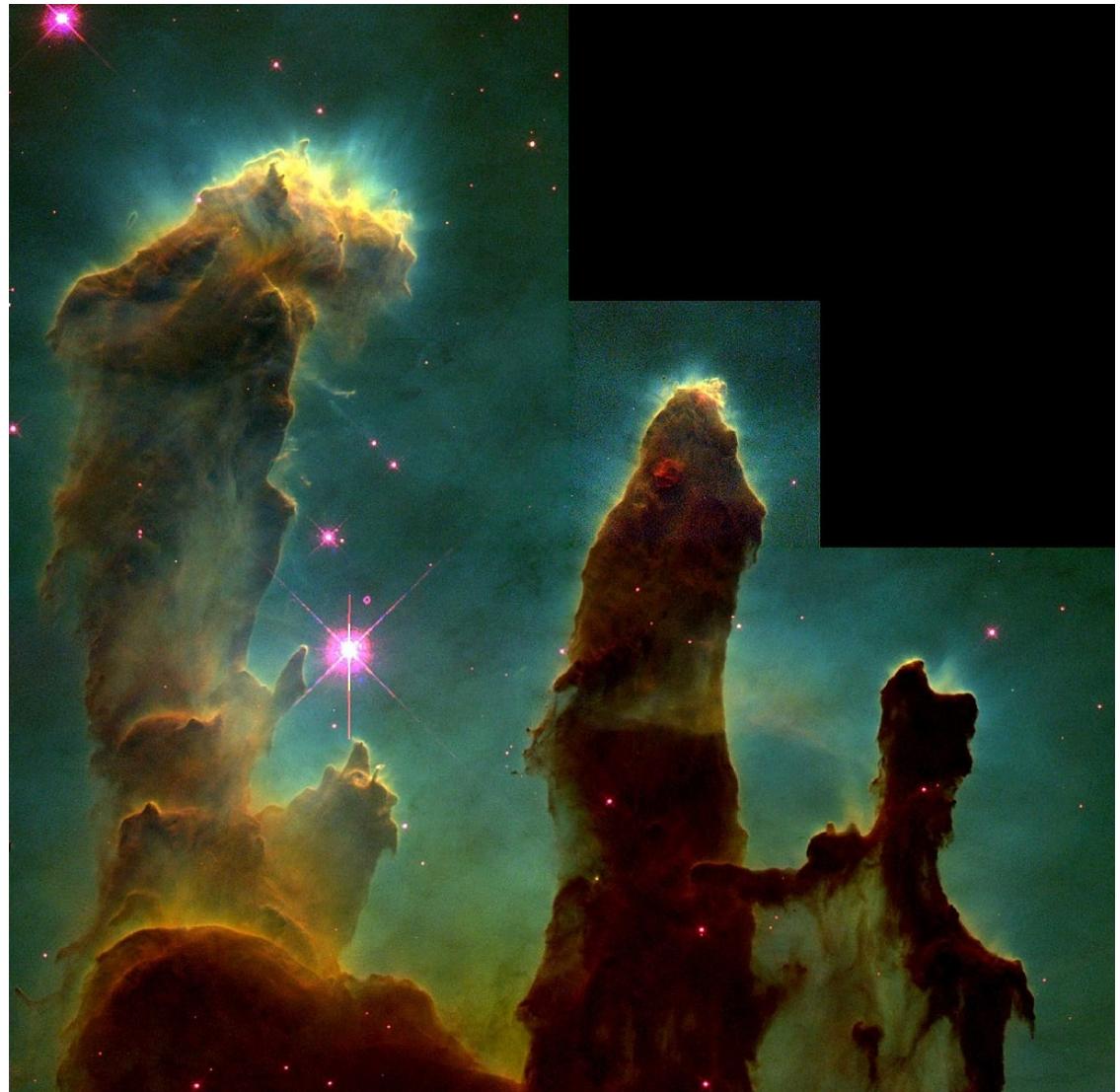
A nastanak zvezda?

- Zvezde nastaju od oblaka molekularnog vodonika
- Gas mora da bude dovoljno hladan (svega nekoliko K), da bi mogao da se sažme i eventualno formira protozvezdu. Ovako izgleda maglina W51 u Orlu, gde "trenutno" nastaje veliki broj zvezda



Nastanak zvezda

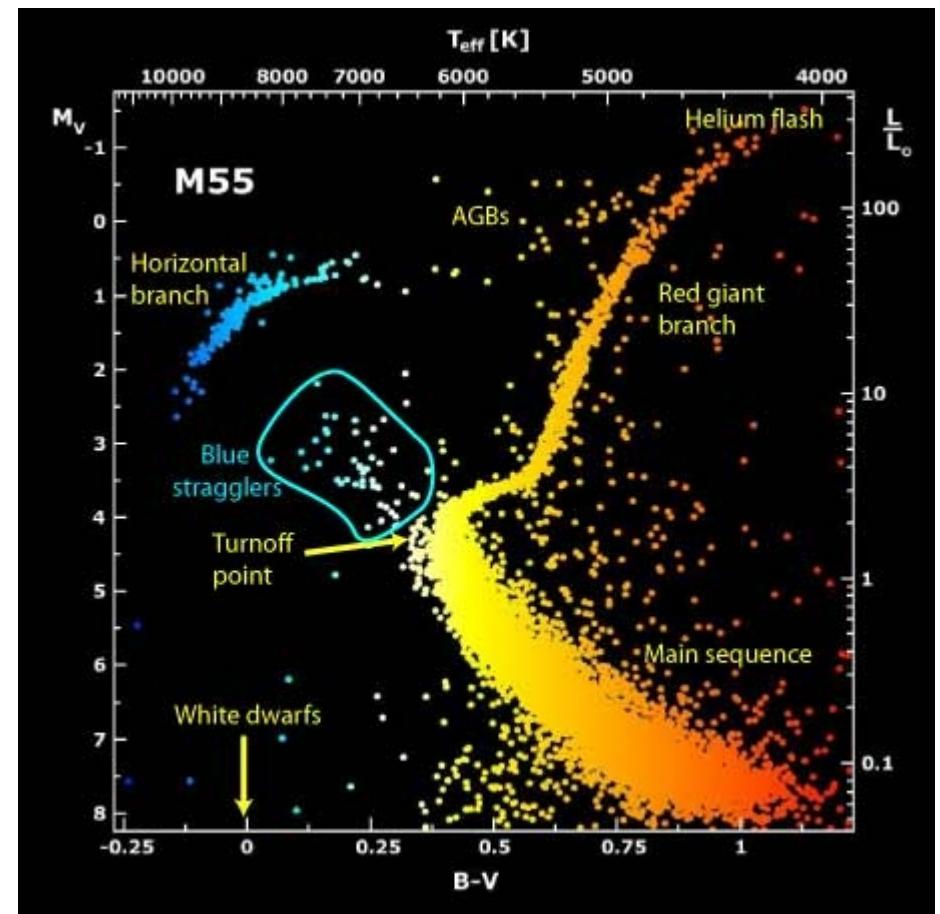
- Molekularni oblaci se zovu "Džinovski molekularni oblaci", zato što su, pa... Džinovski (10 000 masa Sunca i naviše)
- Zvezde ne nastaju same, nastaju u grupacijama ili čak u jatima.
- Te zvezde imaju sličan hemijski sastav i starost ali će imati različite mase pa će samim tim završiti na različitim mestima na glavnom nizu



"Stubovi Stvaranja" (Pillars of Creation), još jedna čuvena slika magline u kojoj nastaju zvezde

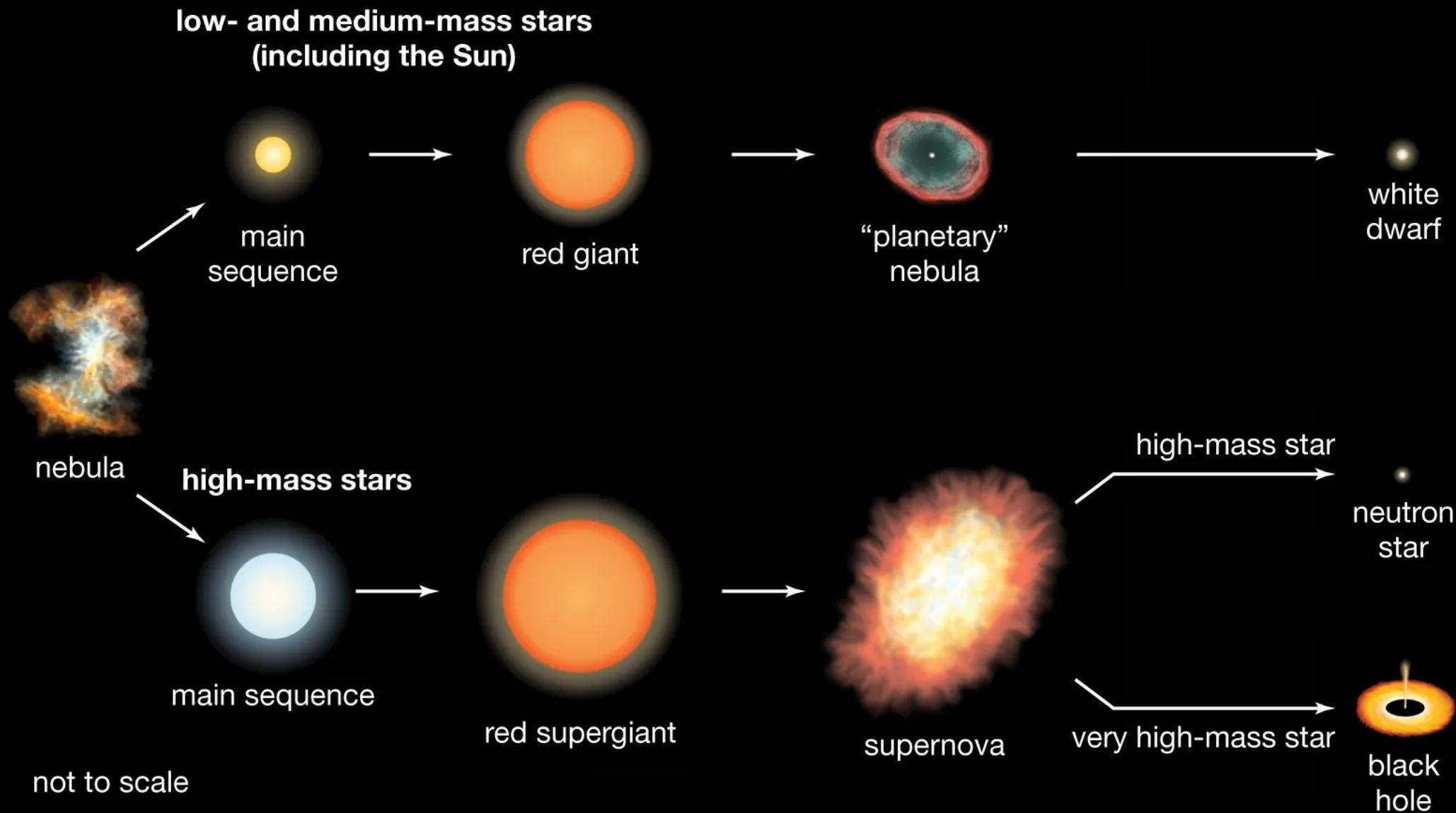
Zvezdana evolucija

- Te zvezde imaju sličan hemijski sastav i starost ali će imati različite mase pa će samim tim završiti na različitim mestima na glavnom nizu...
- A i napustiće glavni niz u različitim trenucima!
- Glavni niz jata na HR dijagramu je “prekinut”
- Iz položaja ove tačke možemo odrediti starost jata!
- Jedna od fundamentalnih tehnika za određivanje starosti (ali i udaljenosti) do jata. Jako važna za studiranje evolucije zvezda



Životni put zvezda

Stellar evolution



Supernove

- Su jako masivne zvezde u poodmaklim stadijumima evolucije
- Supernova je eksplozija zvezde, prouzrokovana naglim početkom fuzije usled npr. naglog gravitacionog kolapsa ili priliva mase od neke druge zvezde (u dvojnom sistemu)
- Supernova može biti sjajna kao cela galaksija!
- NGC4526 i Supernova koja je eksplodirala u toj galaksiji, SN 1994D!
- Za 5 supernova je zabeleženo da su vidjene golim okom!
- Supernove stvaraju teške elemente!



Određivanje udaljenosti uz pomoć supernova

- Zbog specifičnog mehanizma nastanka, za supernove se lako može odrediti absolutni sjaj (apsolutna magnituda)
- Ako znamo njen prividni sjaj (prividnu magnitudu) možemo da odredimo udaljenost

$$M - m = 5 - 5 \log d$$

- Zbog ovoga Supernove (i još neke objekte) zovemo **standardne sveće!**
- Standardne sveće su objekti poznatog sjaja, na osnovu kojih možemo da odredujemo udaljenost. (Postoje i standardni lenjiri, objekti kojima znamo veličinu)

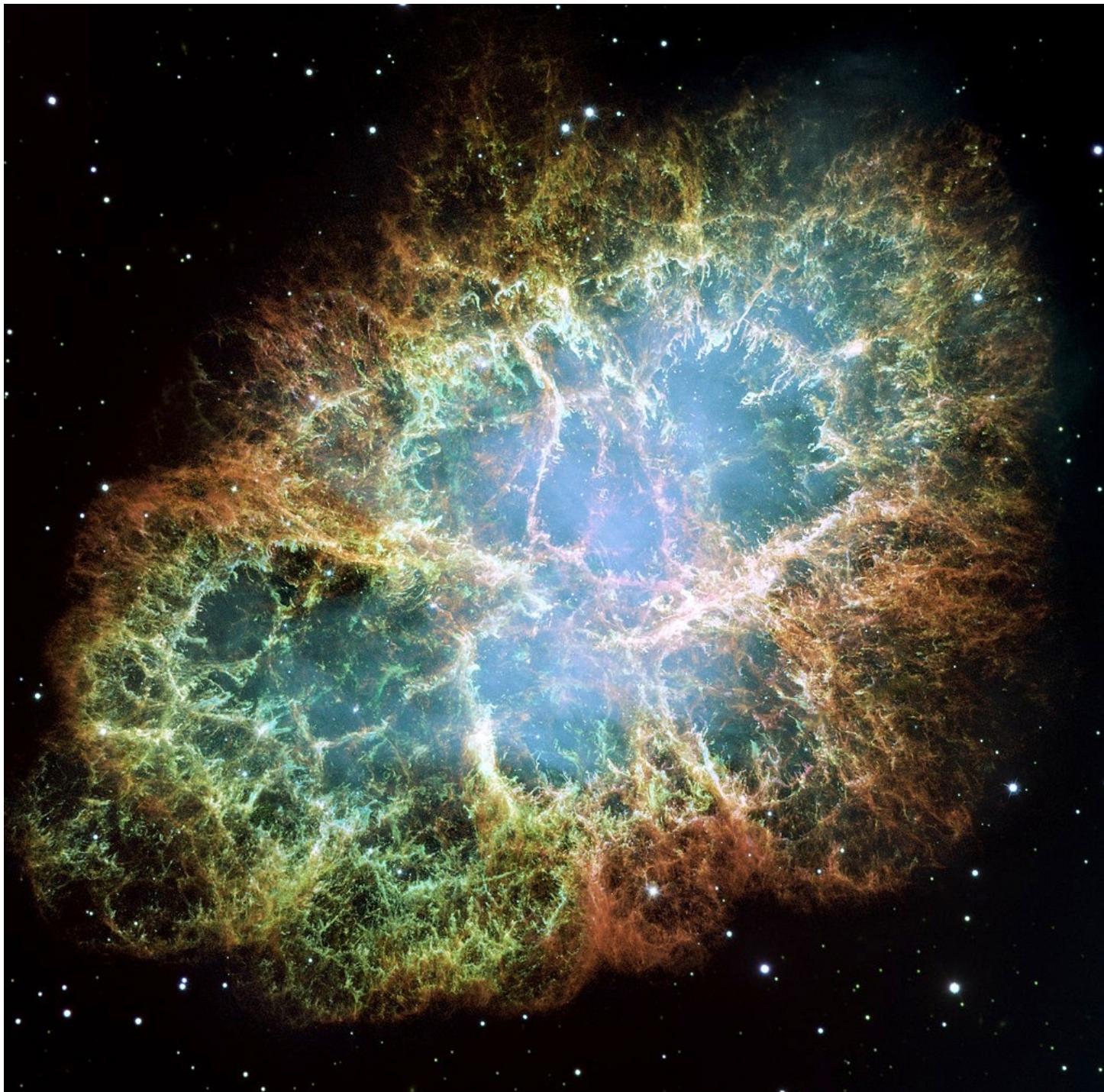
Ostaci supernovih

Odbačeni omotač
masivne zvezde kroz
koji se prostire udarni
talas nakon eksplozije
supernove.

Gas zrači usled
zagrevanja od udarnog
talasa.

Desno: ostatak
supernove SN1054,
čuvena "Crab maglina".

(boje su, naravno,
veštačke)



Planetarne magline

Odbačeni omotač malo masivne zvezde na kraju njene evolucije.

Zrači na uštrb zračenja zvezdanog ostatka u centru.

Ovo je čuvena Helix maglina, koja se nalazi u sazveždju vodolije.

Boje su, opet,
veštačke.



Šta treba da zapamtimo

- Život i struktura zvezde odredjeni su njenom masom
- Zvezde različite mase završavaju svoju evoluciju kao različiti objekti:

Beli patuljci

Neutronske zvezde

Crne Rupe

- Većina zvezda prolazi kroz stadijum crvenog džina (i Sunce će!)
- Masivne zvezde prolaze kroz stadijum supernove
- Ostaci zvezdane evolucije su magline: ostaci supernovih i planetarne magline
- Sledеći čas → Galaksija!