

Ukratko o unutrašnjoj strukturi zvezda i evoluciji

- Zvezde imaju svoj sopstveni, postojani izvor energije u svom jezgru!!!
- Unutrašnjost zvezde nije dostupna direktnim posmatranjima, zračenje koje posmatramo potiče iz ATMOSFERE ZVEZDA
- Teorijsko **modeliranje zvezdanih unutrašnjosti**
- **Provera modela** tek u drugoj polovini XX veka
- Modeli zvezdane unutrašnjosti bi trebalo da zadovolje osnovne fizičke procese i posmatranja
- **Aproksimacije** koje se koriste za početak: sferno-simetrična zvezda, stacionarna, stabilna, nerotirajuća, bez magnetnog polja
- ZVEZDE OPSTAJU STABILNE DUGO VREMENA USLED POSTOJANJA HIDROSTATIČKE RAVNOTEŽE – **gravitaciona sila usmerena ka centru zvezde je uravnotežena pritiskom gasa/plazme i pritiskom zračenja koji su usmereni ka spolja!!!**

Izvori zvezdane energije

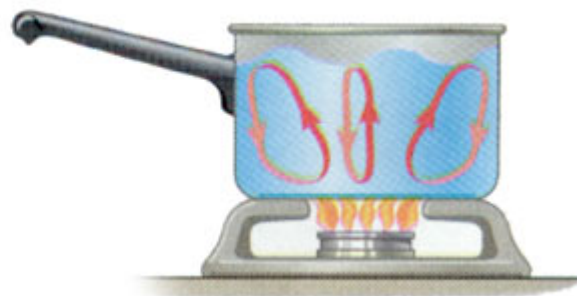
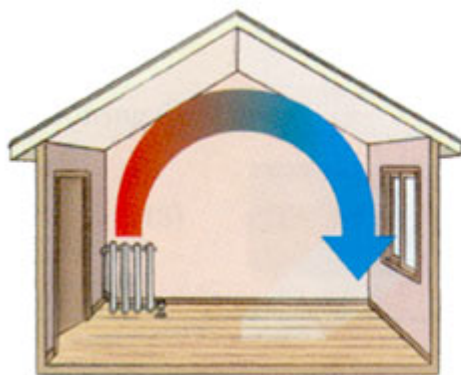
- Termonuklearne (TN) reakcije – OSNOVNI MEHANIZAM PROIZVODNJE ENERGIJE U ZVEZDAMA – kontrolisana fuzija na visokim temperaturama!!! (pp lanac i CNO ciklus)
- Zvezde na glavnom nizu u svojim jezgrima (središtu) fuzionišu jezgra vodonika, oslobađa se velika energija i stvaraju se jezgra helijuma (tzv. alfa čestice), kao i neke druge elementarne čestice kao što su neutrini (koji su takođe nosioci informacija)
- Gravitaciono sažimanje (rane i kasne faze u evoluciji) – oslobođena gravitaciona potencijalna energija se delom troši na zagrevanje, a delom se transformiše u elektromagnetno zračenje!!!

Mehanizmi prenosa energije kroz unutrašnjost zvezda

Kod zvezda na glavnom nizu uglavnom **zračenje fotona** i **konvekcija**

Kondukcija (toplotno provođenje) kod npr. kompaktnih objekata, konačnih faza u evoluciji kao što su beli patuljci, a talasi mogu biti značajni u atmosferama

Prenos toplote ili mase **konvekcijom** je pojava do koje dolazi kada fluid (tečnost ili gas ili plazma) razmenjuje toplotu (masu) unutar samog sebe, prostim mešanjem (konvekcijom) materije. Ovaj proces odvija se pod uslovom da postoji dovoljna razlika u temperaturi (ili gustini ako se prenosi masa) unutar samog fluida. Ukoliko se, na primer, sud sa vodom zagreva odozdo, donji slojevi vode, usled zagrevanja, postaju specifično lakši i struje naviše, a gornji hladniji slojevi padaju na dno suda.



- **Gravitaciono sažimanje oblaka MZM** (spontano ili indukovano: udarnim talasima SNR, zvezdanim vetrovima, sudarima molekulskih oblaka)
- **Fragmentacija masivnog oblaka** i formiranje grupa zvezda (zvezdane asocijacije i otvorena zvezdana jata)

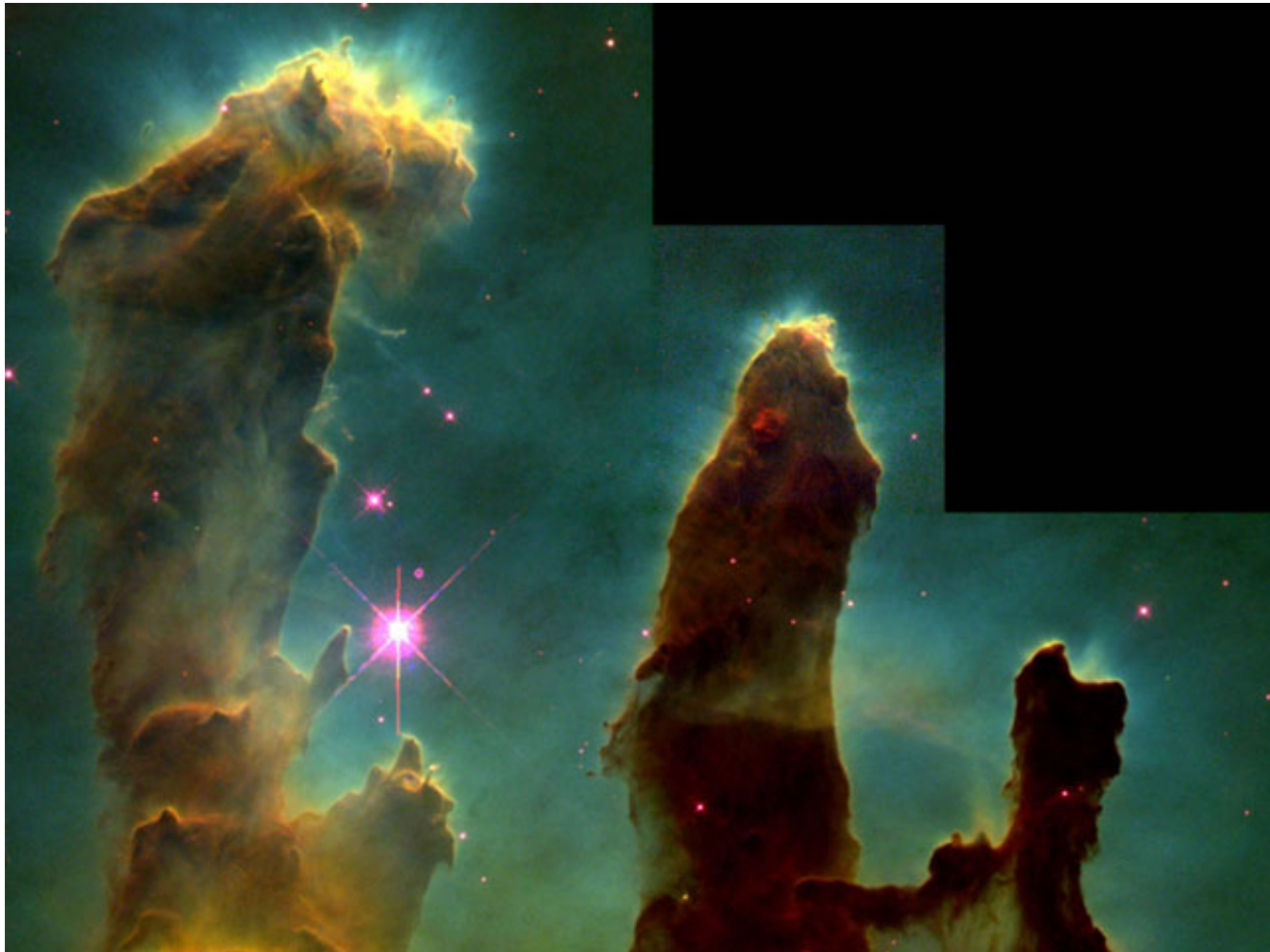
Svaki od fragmenata (protozvezda) gravitaciono se sažima; oslobođena gravitaciona energija se delom pretvara u termalnu (unutrašnju) energiju zvezde, a delom izrači u radio i IC području

- **Faza protozvezde** – od početka sažimanja do započinjanja termonuklearnih reakcija u jezgu protozvezde (sagorevanja vodonika)

Ako se sažimanjem u jezgu dostigne T oko $10^7 K$ i gustina od oko 10^2 g/cm^3 počinju TN reakcije sagorevanja jezgra vodonika, zvezda zauzima mesto na glavnom nizu – **zvezda je rođena!!!**

- **Donja granica** za masu protozvezde, potrebne da se zapali vodonik je **8% mase Sunca!!!** inače mogu nastati braon ili smeđi patuljci – zvezde koje nisu mogle nastati

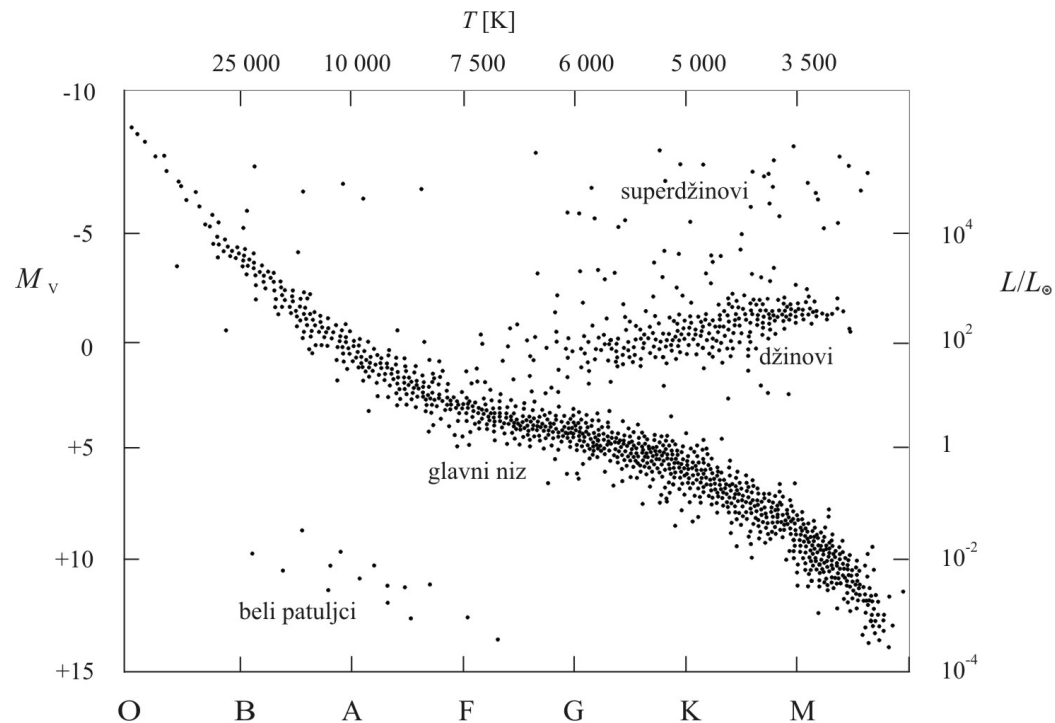
Maksimalna masa je oko 120 masa Sunca, posle dinamička nestabilnost



Vreme života u fazi glavnog niza
(dužina boravka na glavnom nizu)
je reda

$$t_{GN} \approx 10^{10} \cdot \frac{(M/M_{\odot})}{(L/L_{\odot})} \text{ [god]}$$

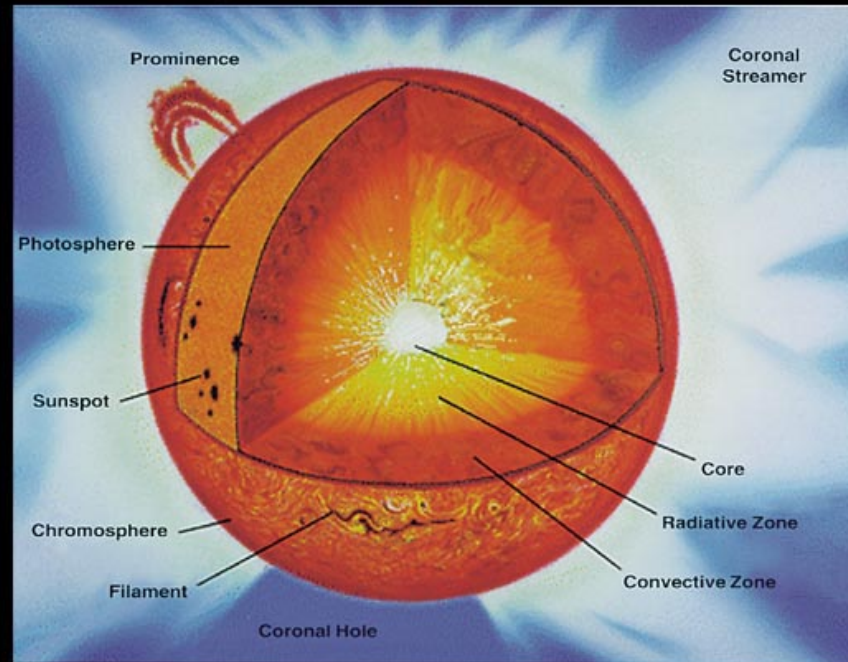
Znači za Sunce oko 10 milijardi
godina (do sada je prošlo oko 5
milijardi godina)



Glavni niz – fuzija jezgra vodonika u jezgro helijuma u središtu
zvezda – ova faza najduže traje!!!

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

Primer
zvezda
tipa Sunca



Harcourt, Inc. Items and derived items copyright ©2000 by Harcourt, Inc.

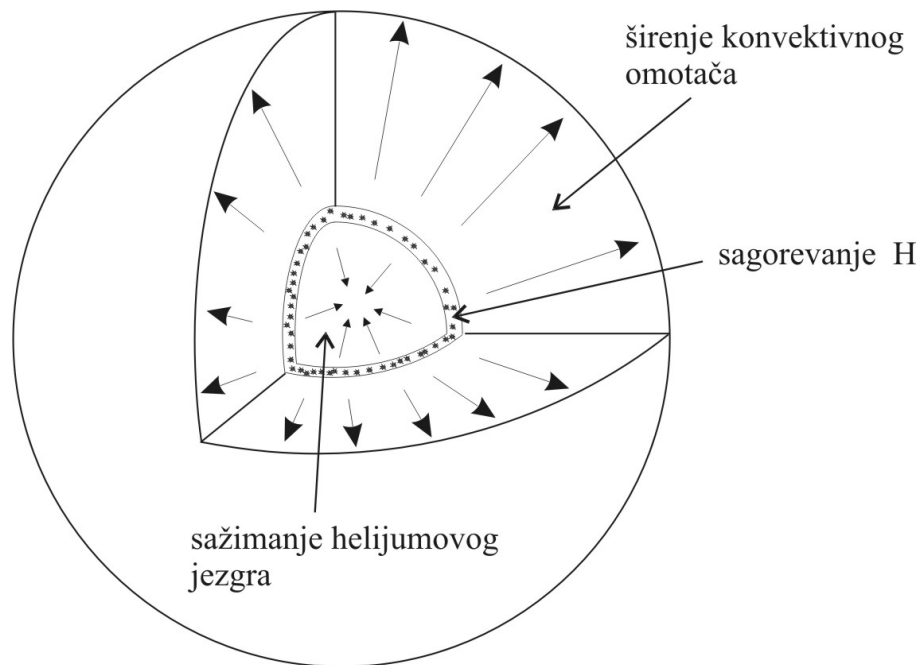
Kroz unutrašnjost zvezda se samo prenosi energija koja se stvara u jezgru

Evolucija zvezda ZAVISI OD NJIHOVE MASE!!!

Masivnije zvezde kraće i burnije žive u odnosu na manje masivne

Faze nakon glavnog niza (opšta slika)

Kada se potroši skoro svo gorivo (jezgra vodonika) u središtu zvezde dolazi do sažimanja jezgra i okolnih slojeva (narušava se hidrostatička ravnoteža) – kreće gravitaciono sažimanje – zvezda napušta glavni niz



Nestabilni crveni džin

Dok temperatura u jezgru još nije dovoljna da krenu TN reakcije jezgra helijuma, pali se vodonik u tankom sloju u blizini jezgra – kada je proizvedena energija dovoljna da se savlada gravitacija omotača, ona se delom oslobađa zračenjem, a delom razduvava omotač (spoljašnje slojeve zvezde) koji se, šireći se, hladi – površinska temperatura opada pa je zato reč o crvenom džinu!!!

Što je masivnija zvezda više razduvava masu omotača

Stabilni crveni džin

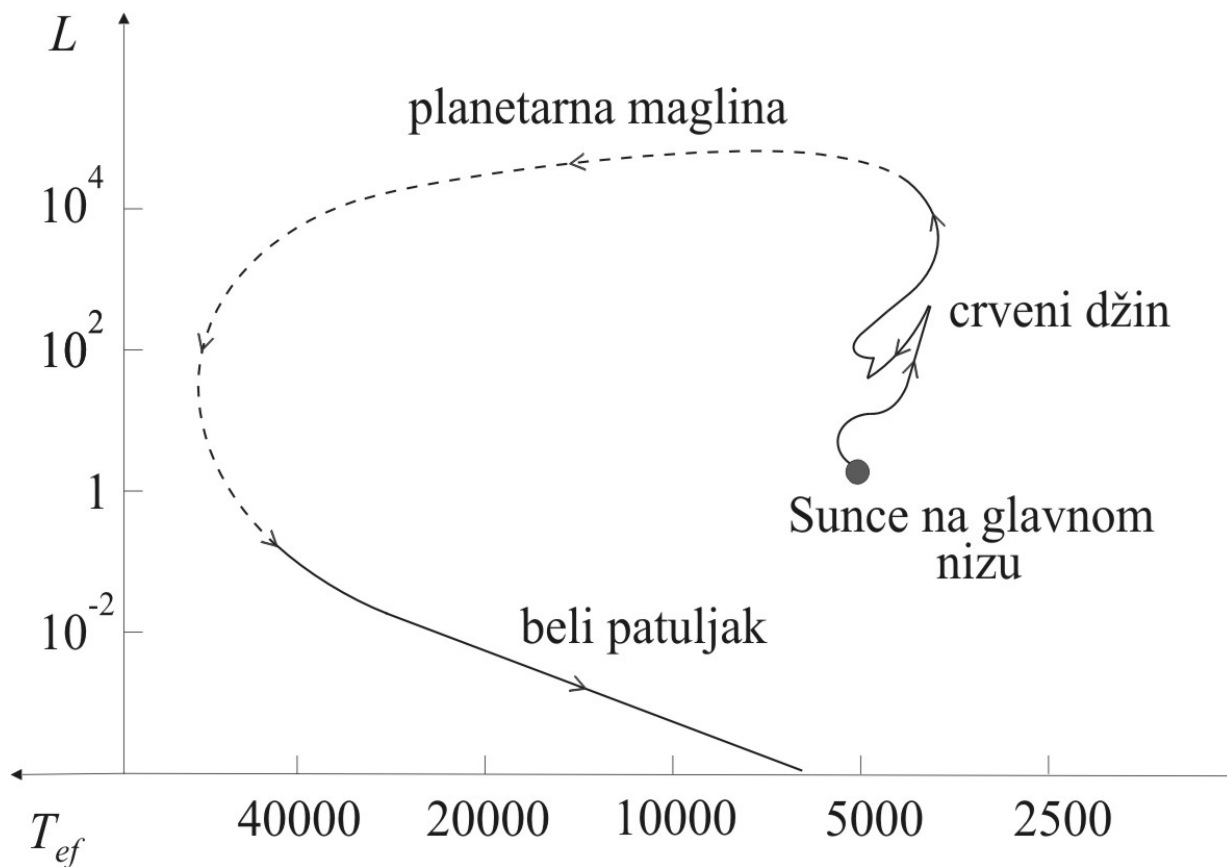
Kada se u jezgru zvezde koje se sažima stvore uslovi za TN reakciju jezgra helijuma, tada zvezda postaje stabilni crveni džin i osnovni izvor energije zvezde se opet prenosi u jezgro, omotač se više ne širi

U zavisnosti od početne mase, zvezda će više ili manje puta prolaziti kroz fazu crvenog džina (samo, svaki put, sa drugim gorivima)

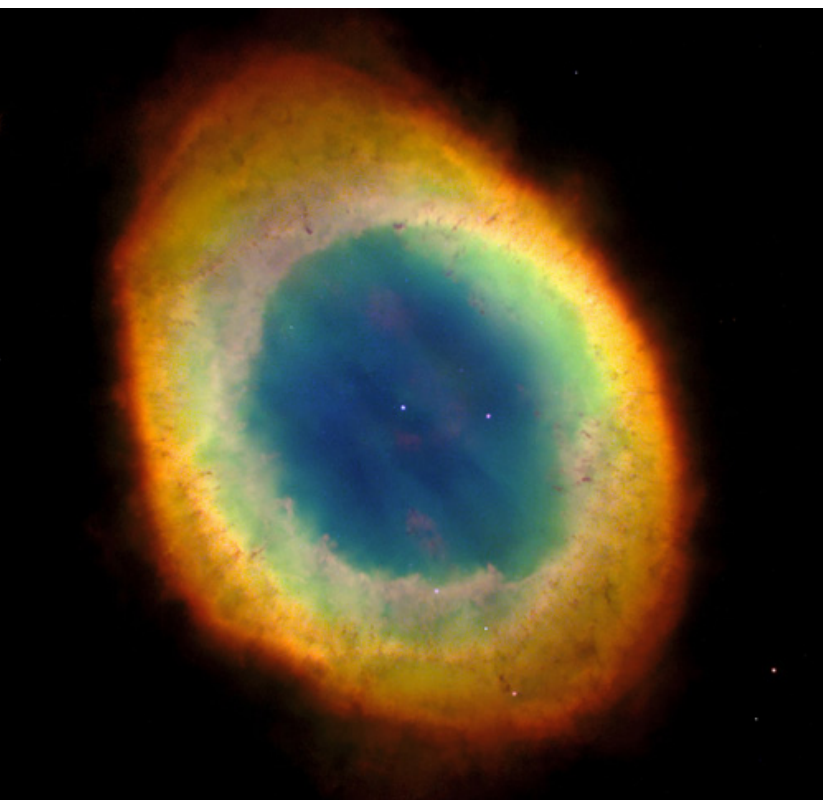
U zavisnosti od mase u zvezdama se više ne mogu pokretati TN reakcije, te zvezda prelazi u konačnu fazu svog života!!!

**Od gvožđa pa nadalje TN reakcije ne stvaraju energiju VEĆ SAMO
TRAŽE UTROŠAK ENERGIJE!!!**

Evolutivni put Sunca posle glavnog niza



Sunce će završiti život kao beli patuljak sačinjen od ugljenika i kiseonika



Konačne faze u evoluciji zvezda

- 1) **Beli patuljci** (masa manja od 1.4 mase Sunca; zvezda roditelj ima masu manju od 8 masa Sunca)
- 2) **Neutronske zvezde** (masa između 1.4 i 3 mase Sunca; zvezda roditelj ima masu između 8 i 30 masa Sunca)
- 3) **Crne rupe** (masa veća od 3 mase Sunca; zvezda roditelj ima masu veću od 30 masa Sunca)

BELI PATULJCI su kompaktni objekti

(masa < 1.4 mase Sunca)

zvezda roditelj ima masu < 8 Sunčevih masa

Gravitacioni kolaps se zaustavlja degeneracijom materije (**pritisak degenerisanog elektronskog gasa** uravnotežava gravitaciju – kvantna mehanika!!!)

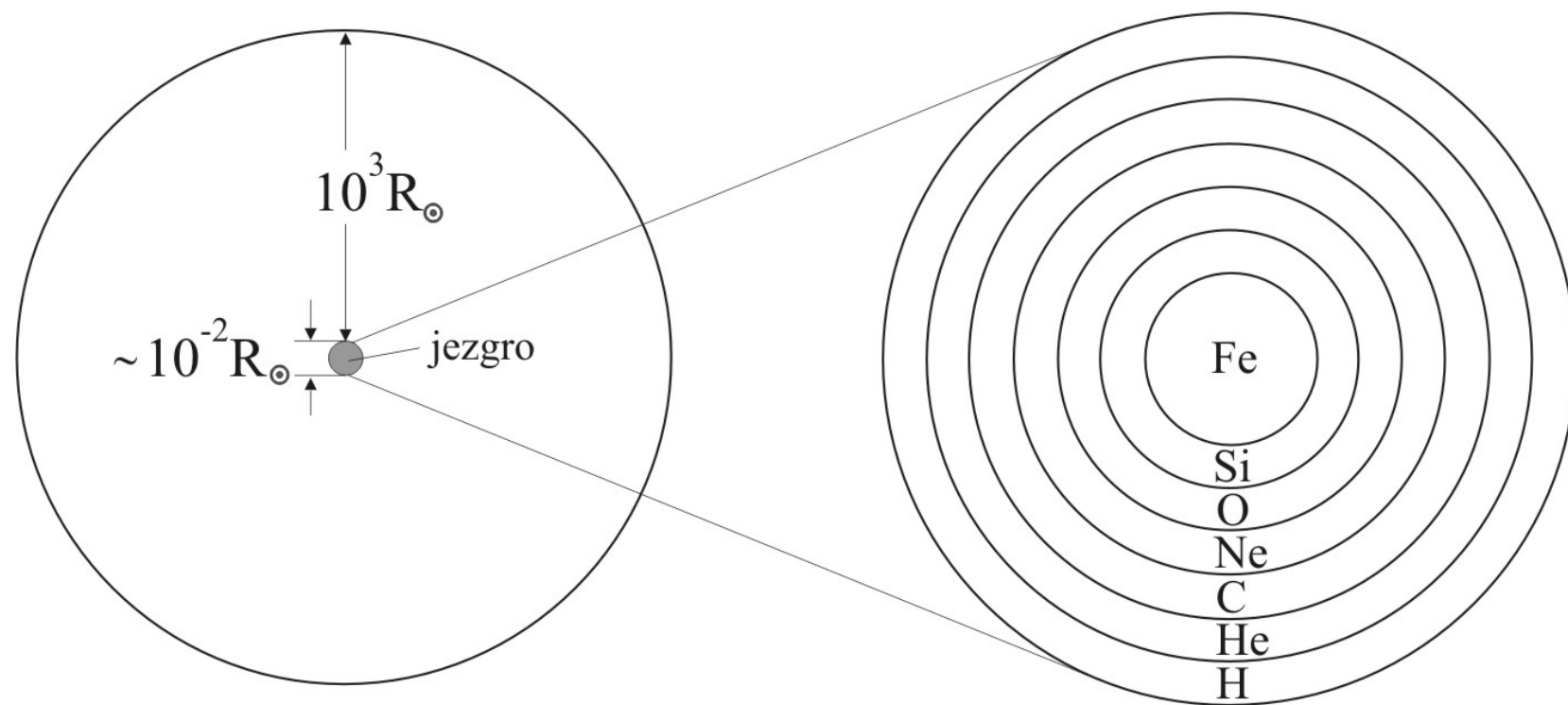
Zvezda je bez izvora energije ali u hidrostatičkoj ravnoteži!!!

Beli patuljci spektralne klase A su, kao najsjajniji, prvi otkriveni (otuda naziv)

Gustina belog patuljka je $10^5 - 10^8 \text{ g/cm}^3$

Radijus je oko 1000km

Još masivnije zvezde – zvezde sa jezgrom ljuskaste strukture – više puta prolaze faze stabilnog i nestabilnog crvenog džina



NEUTRONSKE ZVEZDE su kompaktni objekti

(1.4 - 3 mase Sunca)

zvezda roditelj ima masu od 8 - 30 Sunčevih masa

Gravitacioni kolaps se zaustavlja degeneracijom materije (**pritisak degenerisanog neutronskeg gasa** uravnotežava gravitaciju – kvantna mehanika!!!)

I bez izvora energije, neutronska zvezda je u hidrostatičkoj ravnoteži!!!

Gustina neutronske zvezde je $10^{12} - 10^{14} \text{ g/cm}^3$

Radijus je oko 10km

PULARI – neutronske zvezde

1932 – otkriće neutrona

1934 – W.Baade i F. Zwicky (eksplozija SN dovodi do stvaranja netronske zvezde)

1967 – otkriće pulsara (Antony Hewish i Jocelyn Bell), $P=1.33730113$ s)

1968 – pulsar (**Puls**ating **a**stronomical **r**adiosource)

1969 – Crab pulsar (zvezda +17^m) $P=0.033$ s ; Vela pulsar $P=0.089$ s

Pulsari = neutronske zvezde = jezgra nekadašnjih supernovih (Thomas Gold, 1969)

Pulsari su brzorotirajuće ($0.033 < P < 4$ s) i **superguste** ($10^9 < \rho < 10^{14}$ g/cm³) neutronske **zvezde sa jakim magnetnim poljem** ($B \sim 10^{12}$ G) i **gravitacijom** na površini koja je 10^{11} puta veća od gravitacije na površini Zemlje

Ostaci supernovih su emisije magline i predstavljaju odbačeni zvezdani materijal koji obogaćuje okolnu međuzvezdanu sredinu materijalom nastalim u samim zvezdama i tokom samog procesa supernove

Osim uglavnom vodonika, helijuma i litijuma, svi ostali elementi u Vasioni nastaju u zvezdama!!! Živi svet je sačinjen od težih elemenata koji su najverovatnije nastali u procesu supernove!!!

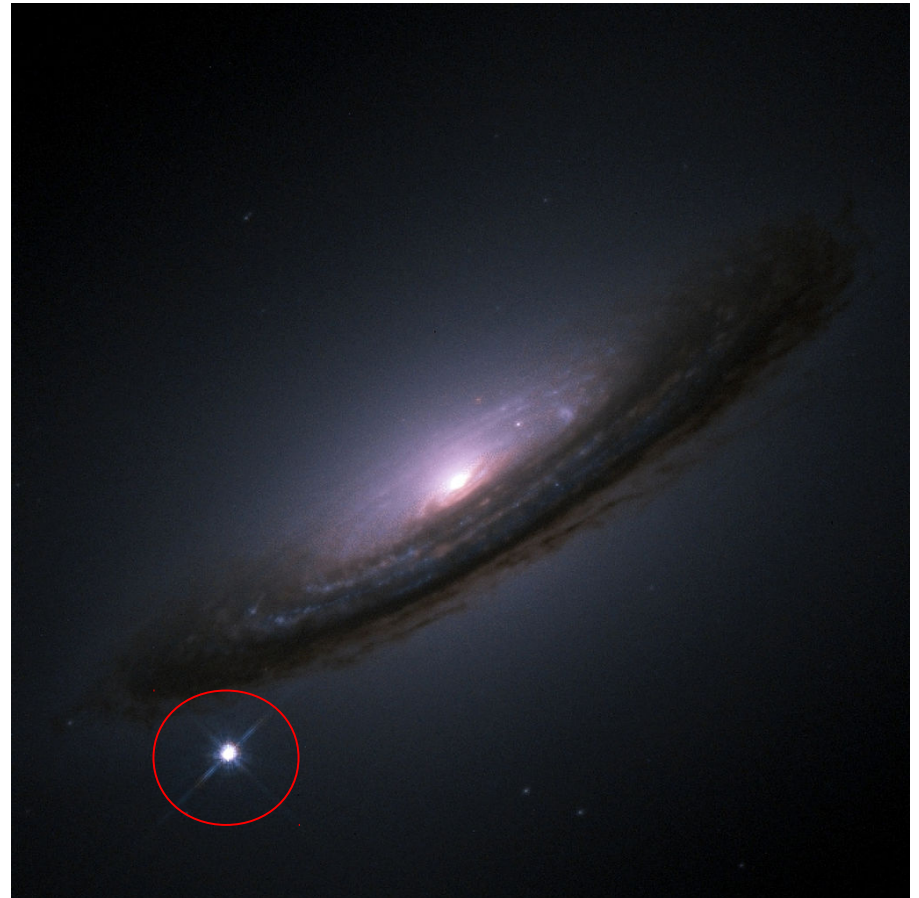
Zvezde kasnijih generacija (tzv. populacija), kao Sunce, nastale su u oblasti MZM koja je već obogaćena težim elementima, od neke ranije supernove!!!



Krab maglina – ostatak supernove posmatrane 1054. godine

Supernova je zvezdana eksplozija tokom koje se izbacuje ogromna energija za izuzetno kratak vremenski period – Sjaj zvezde se može povećati i do više miliona puta u odnosu na sjaj pre eksplozije (svrstavamo ih i u kataklizmičke promenljive zvezde!!! primećujemo naglu promenu sjaja prouzrokovanu promenom strukture zvezde) – Posle eksplozije sjaj postepeno opada tokom nedelja i meseci – Supernova u jednom kratkom roku može da zaseni svoju celu matičnu galaksiju

Postoji više različitih tipova
(nećemo detaljno o tome)



CRNE RUPE su kompaktni objekti (> 3 mase Sunca)

zvezda roditelj ima masu >30 Sunčevih masa

Ni jedna poznata sila ne može da se suprotstavi katastrofalnom gravitacionom kolapsu koji jezgro (pošto prestanu sve TN reakcije) sabija u singularitet beskonačne gustine (čak ni kvantni efekti degeneracije materije, kao kod belih patuljaka i neutronske zvezde!!!)

Zakrivljenost prostor-vremena je u gravitacionom polju masivne kolapsirajuće zvezde tako jaka da zvezda iščezava za posmatrača

John Wheeler (1969) je prvi uveo termin 'crna rupa'.

To je oblast u kojoj je gravitacija toliko jaka da iz nje čak ni svetlost ne može izaći (druga kosmička brzina/brzina oslobađanja gravitacionog uticaja matičnog tela, je veća od c)

Да би се неко тело кретало по кружној путањи око масивнијег небеског тела, оно мора имати тачно одрађену брзину за дату висину на којој се тело налази. Ова брзина зависи од висине, јер се са порастом висине смањује јачина гравитационог дејства матичног небеског тела, тако да је потребна мања брзина да бисмо савладали ово деловање.

Када би се кретао брзином мањом од те, пао би на матично небеско тело.

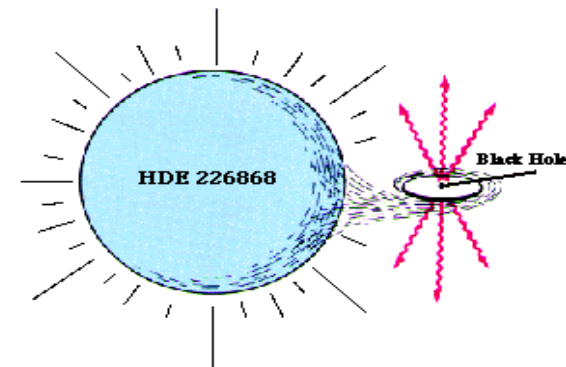
Ова брзина се назива прва космичка брзина за дату висину, а то је она минимална брзина којом се морају кретати тела да не би пала на матично небеско тело, већ да постану његови сателити и круже око њега.

Минимална брзина да се тело ослободи гравитационог утицаја матичног небеског тела назива се друга космичка брзина.

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{GmM}{R} = 0 \qquad v_2 = \sqrt{2G\frac{M}{R}}$$

Zvezdane i supermasivne crne rupe (u središtima galaksija, imaju masu jednaku 1000 000 000 solarnih!!!)

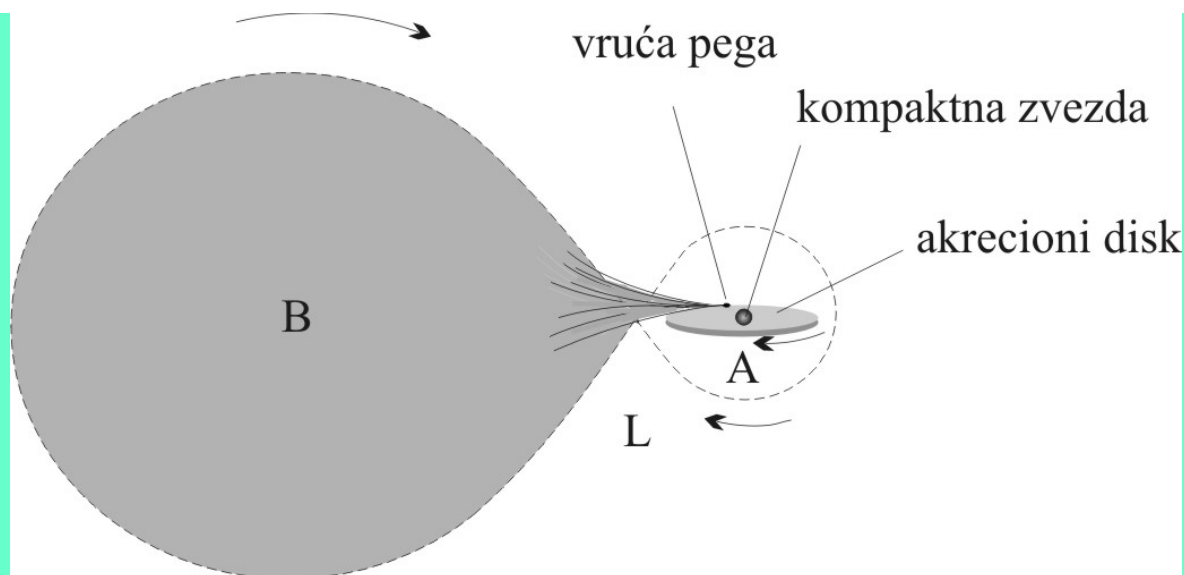
Mogu se otkriti indirektno u tesnim dvojnim sistemima (TDS), npr. Cygnus X-1



Evolucija zvezda u tesno dvojnim sistemima (TDS) – tip dvojnih, gravitaciono vezanih zvezda!!!

Evolucija zvezda u tesnim dvojnim sistemima je **drugačija** nego kod usamljenih zvezda

Posebnu, i zbog mnogih osobina vrlo značajnu grupu dvojnih zvezda čine tesno dvojni sistemi (TDS). Za razliku od onih dvojnih zvezda kod kojih se komponente nalaze na znatnom rastojanju, ne utičući međusobno na strukturu i evoluciju, kod tesno dvojnih je rastojanje među komponentama uporedivo sa njihovim dimenzijama, pa razmena materije među komponentama menja tok njihove evolucije. Zbog blizine komponentata pomračenje je vrlo verovatno, pa se TDS otkrivaju i proučavaju fotometrijski, tj. analizom krivih sjaja. Neprekidne i glatke promene na krivoj sjaja ukazuju na bliskost komponentata.



Transfer materije sa crvenog džina na belog patuljka u TDS – Supernove tipa Ia

Tipična apsolutna vizuelna magnituda supernovih tipa Ia je oko -19 (oko 5 milijardi puta sjajnija od Sunca) sa malim rasipanjem oko srednje vrednosti!!!

Mogu se koristiti kao standardne sveće – preko Pogsonovog obrasca, merenjem prividne magnitude, može se naći udaljenost do SN, kao i galaksije u kojoj se desio ovaj fenomen

Promenljive zvezde

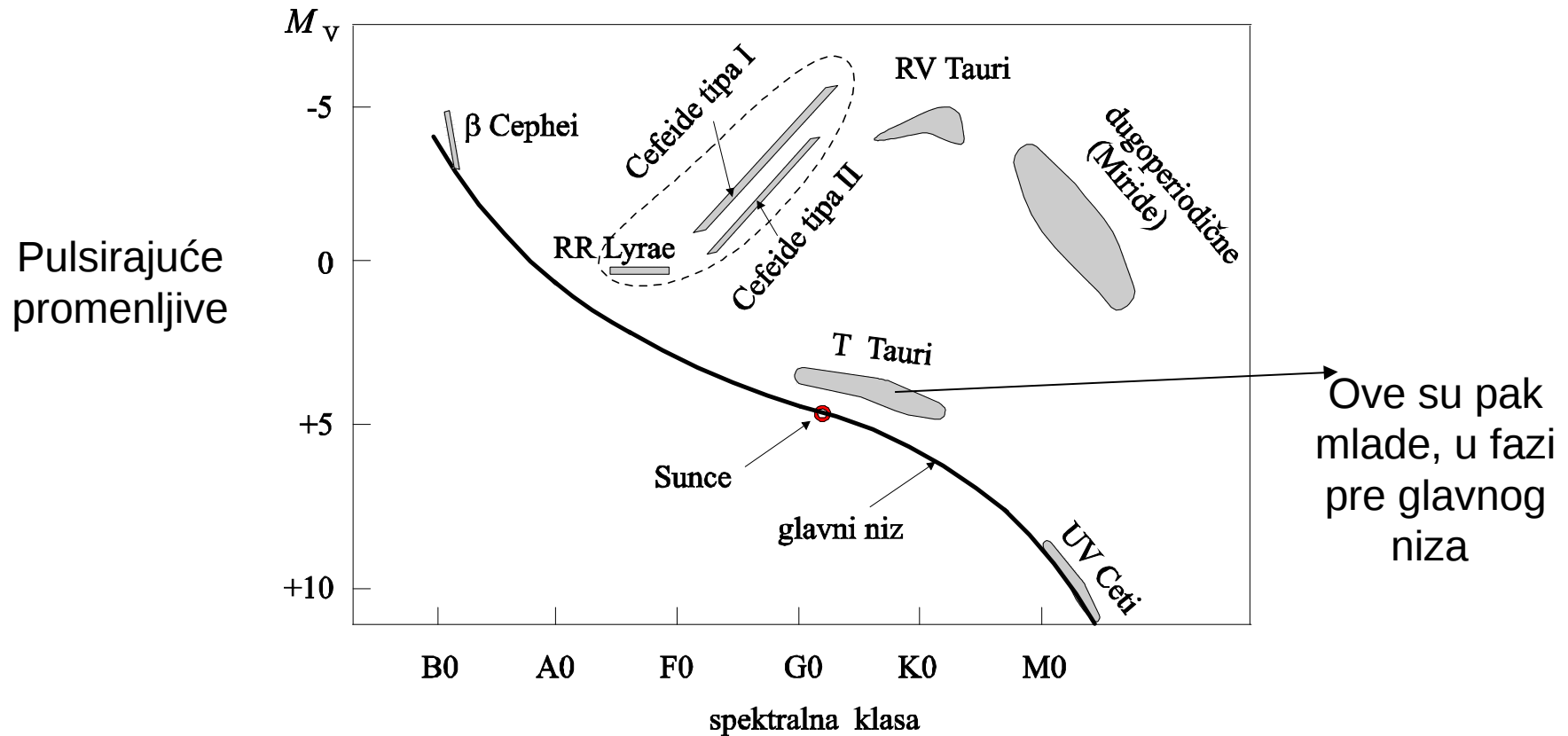
Promenljivim nazivamo one zvezde čiji se sjaj, efektivna temperatura, radijus i drugi parametri menjaju u toku vremena kao posledica fizičkih procesa koji se u njima dešavaju u nekoj fazi evolucije (dakle, ne usled pomračenja kao kod eklipsno dvojnih)

Promenljive zvezde su uglavno stare i nestabilne, u poodmakloj fazi svoje evolucije (inače, ima i mladih, protozvezda)

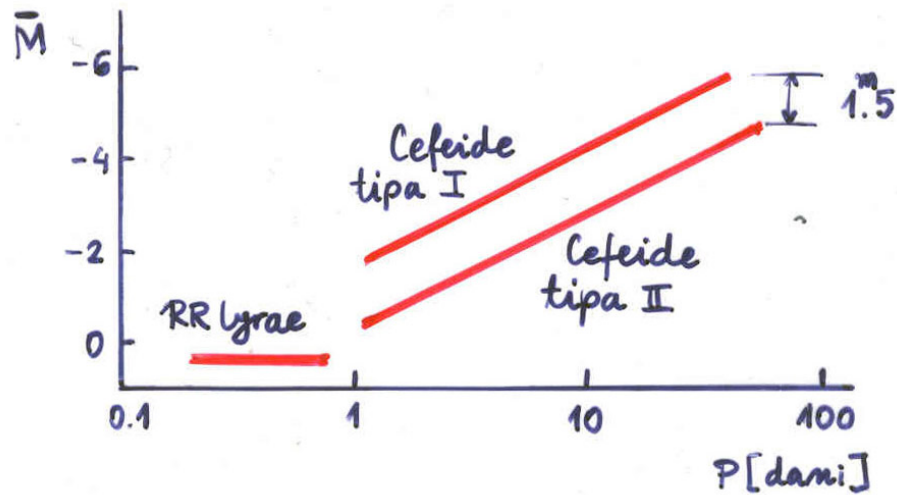
Nestabilnost koja se javlja u površinskim slojevima zvezde ne mora da utiče na strukturu duboke unutrašnjosti. U suprotnom, nestabilnost bi dovela do katastrofe. Činjenica da ih je znatno manje nego stabilnih zvezda ukazuje na to da zvezde kao nestabilne provode mnogo kraći deo svog života

Osnovna informacija o promenljivim zvezdama sadržana je u krivoj sjaja, koja predstavlja promenu prividne zvezdane veličine (m) sa vremenom (t). Prema uzroku i načinu promene sjaja, promenljive zvezde se mogu podeliti u dve osnovne grupe:

- 1) pulsirajuće promenljive (cefeide, RR Lire,...) i
- 2) kataklizmičke promenljive (nove i supernove)



Zvezde stižu u tzv. “zonu nestabilnosti” na H-R dijagramu raznim evolutivnim putevima i mogu proći kroz nju nekoliko puta u toku svoje evolucije



Merenjem srednje prividne zvezdane veličine, poznavajući srednju apsolutnu magnitudu za konkretni tip pravilno pulsirajućih promenljivih, može se odrediti udaljenost!!!

Ako primetimo cefeidu, RR Liru ili supernovu tipa Ia u nekoj galaksiji onda možemo da odredimo udaljenost do te galaksije preko Pogsonovog obrasca

Promenljive, kao i dvojne zvezde su od velikog značaja u rešavanju problema određivanja udaljenosti do nebeskih tela