



Evolucija zvezda

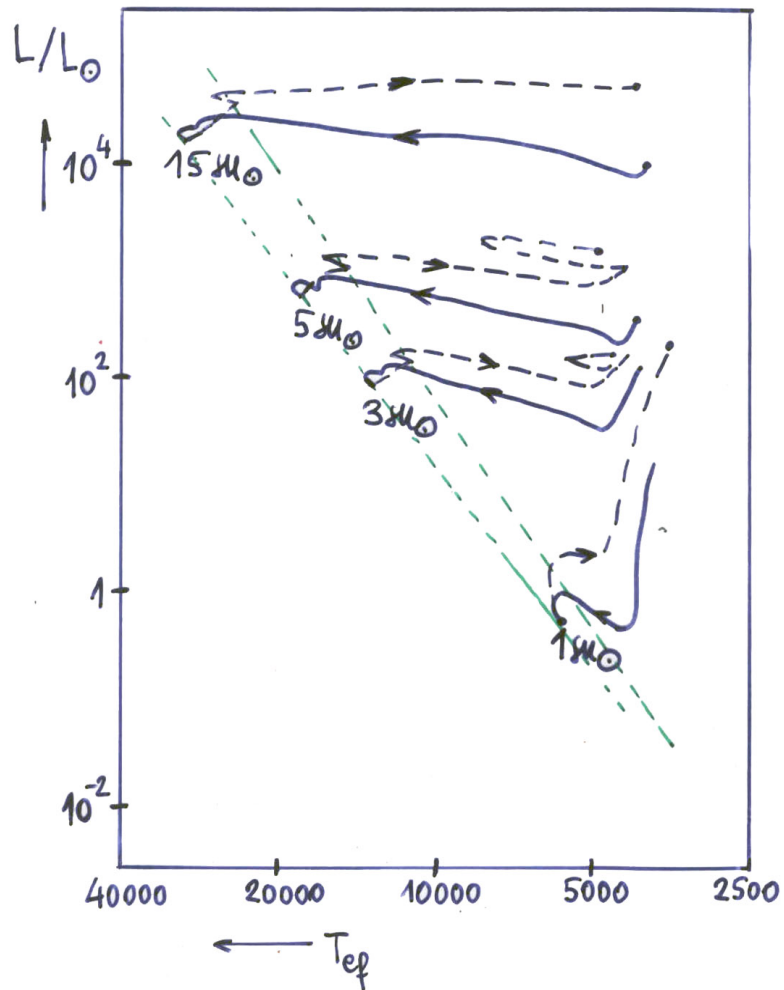






- **Gravitaciono sažimanje oblaka MZM** (spontano ili indukovano: udarnim talasima SNR, zvezdanim vetrovima, spiralnim talasima gustine, sudarima molekulskih oblaka)
- **Fragmentacija masivnog oblaka** i formiranje grupa zvezda (zvezdane asocijacije i otvorena zvezdana jata) . Efikasnost formiranja zvezda unutar grupa je oko 25%.
- Svaki od fragmenata (protozvezda) gravitaciono se sažima; oslobodjena 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 (sagorevanja vodonika)
- Ako se sažimanjem u jezgru dostigne T oko 10^7 K i gustina oko 10^2 g/cm³ 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**.

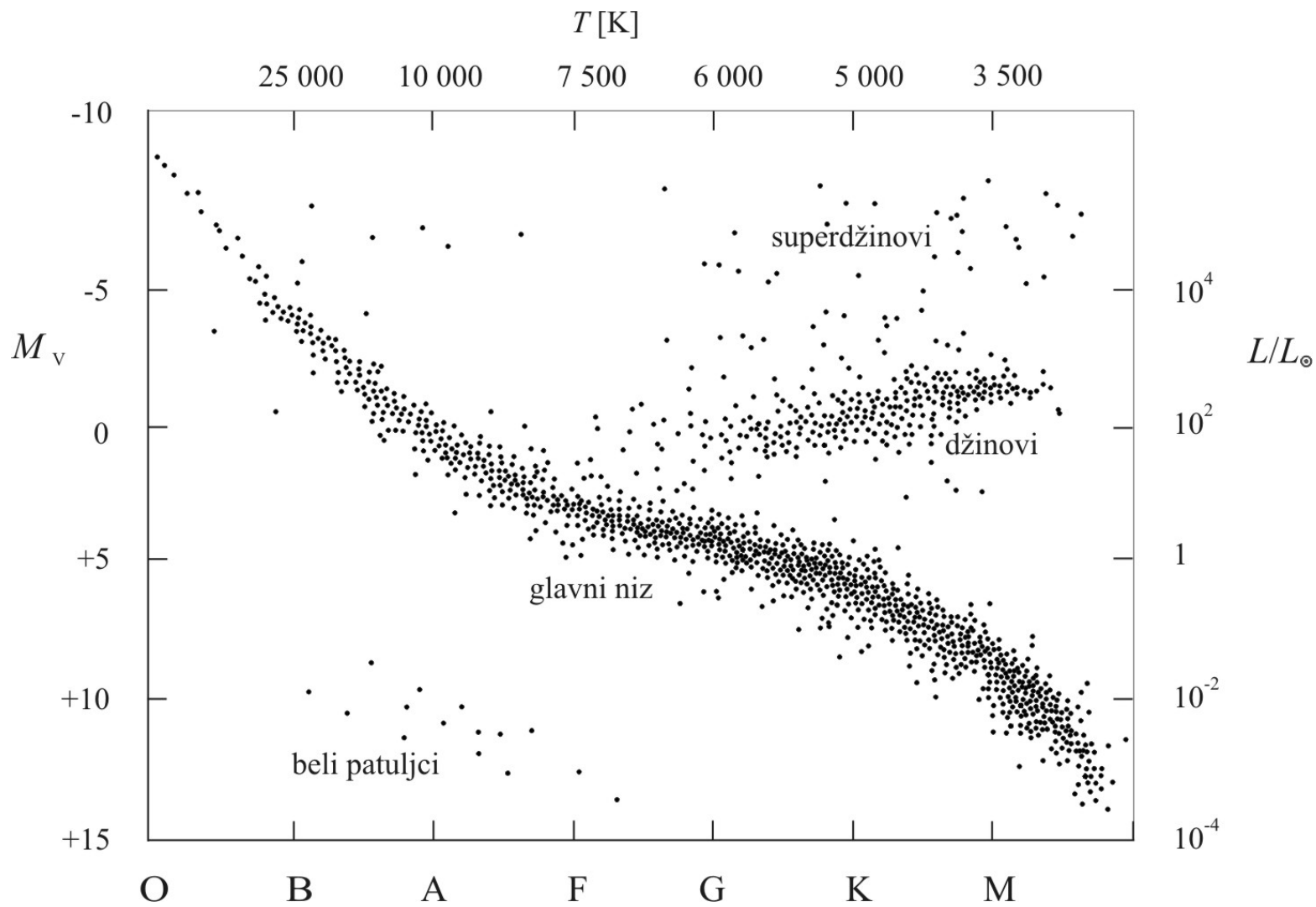
Evolutivni put zvezda različitih masa

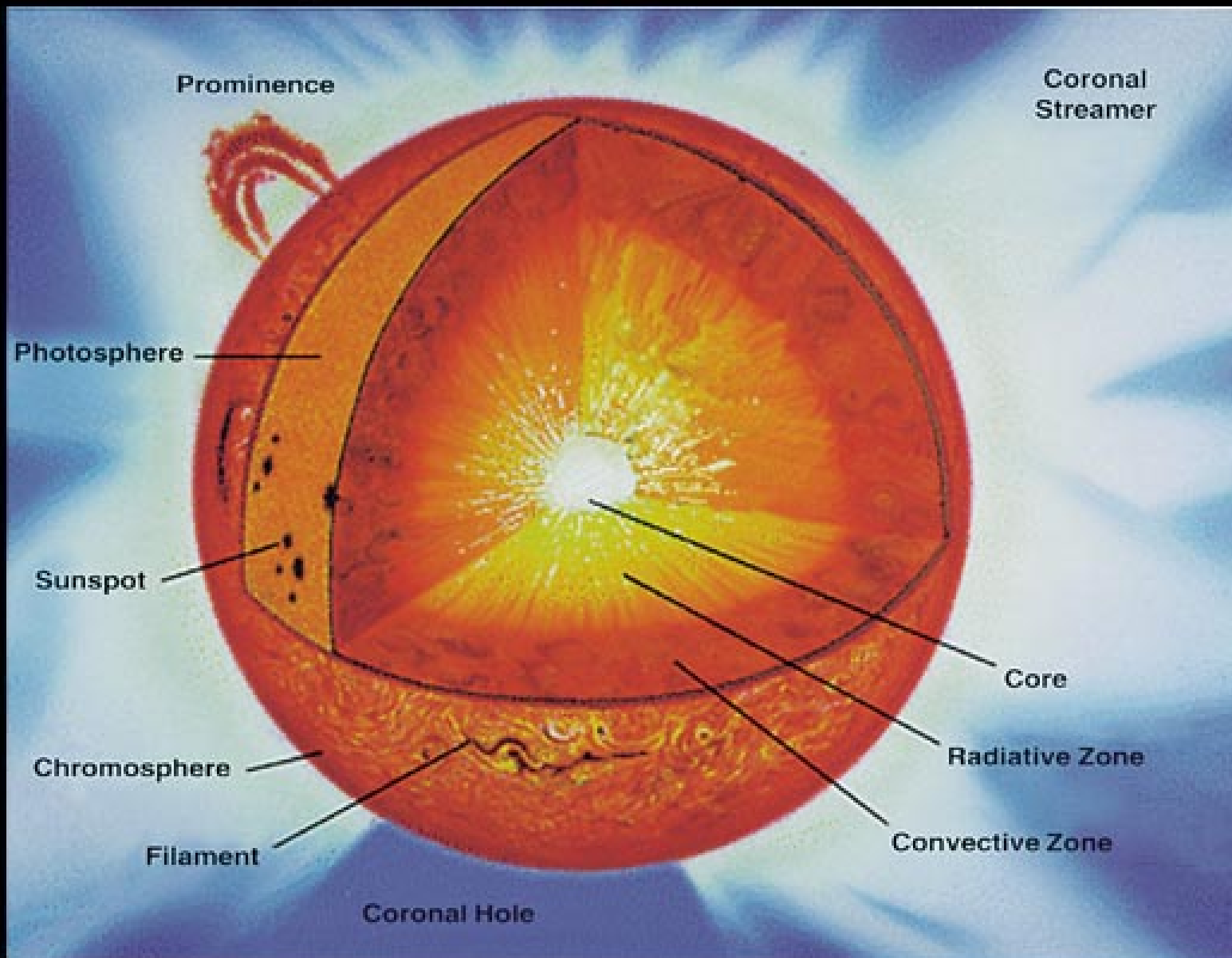


- Vreme života zvezde na glavnom nizu:

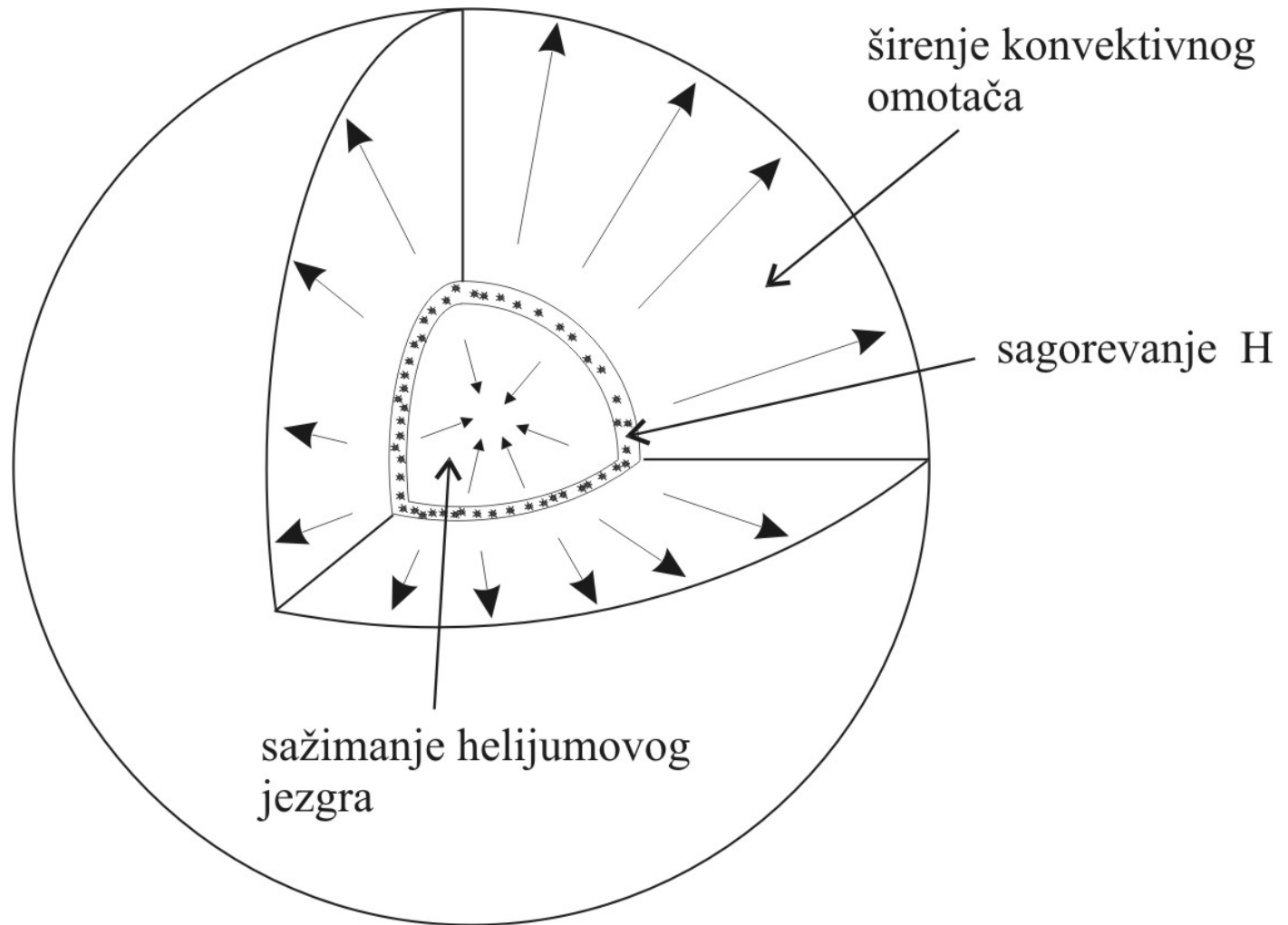
$$t \sim 10^{10} M/L$$

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

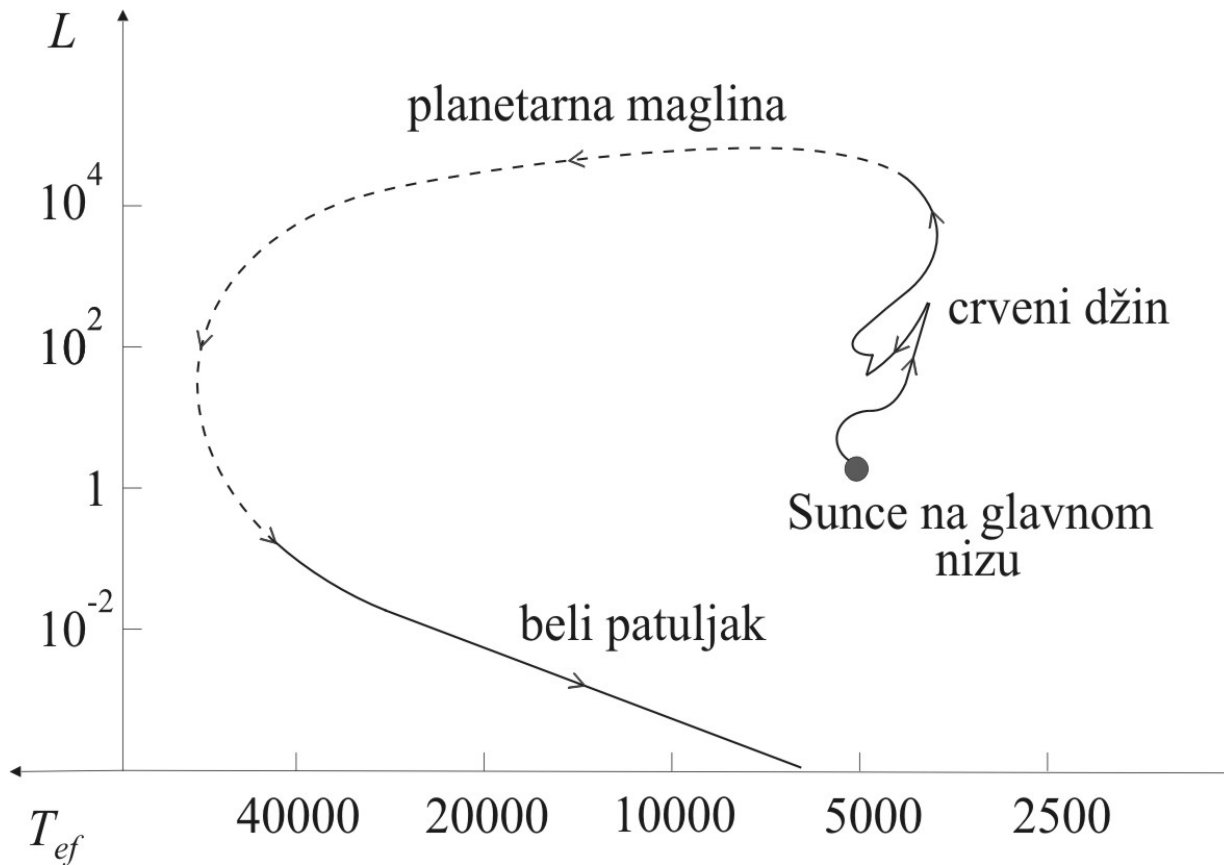




Nestabilni crveni džin



Evolutivni put Sunca posle glavnog niza



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



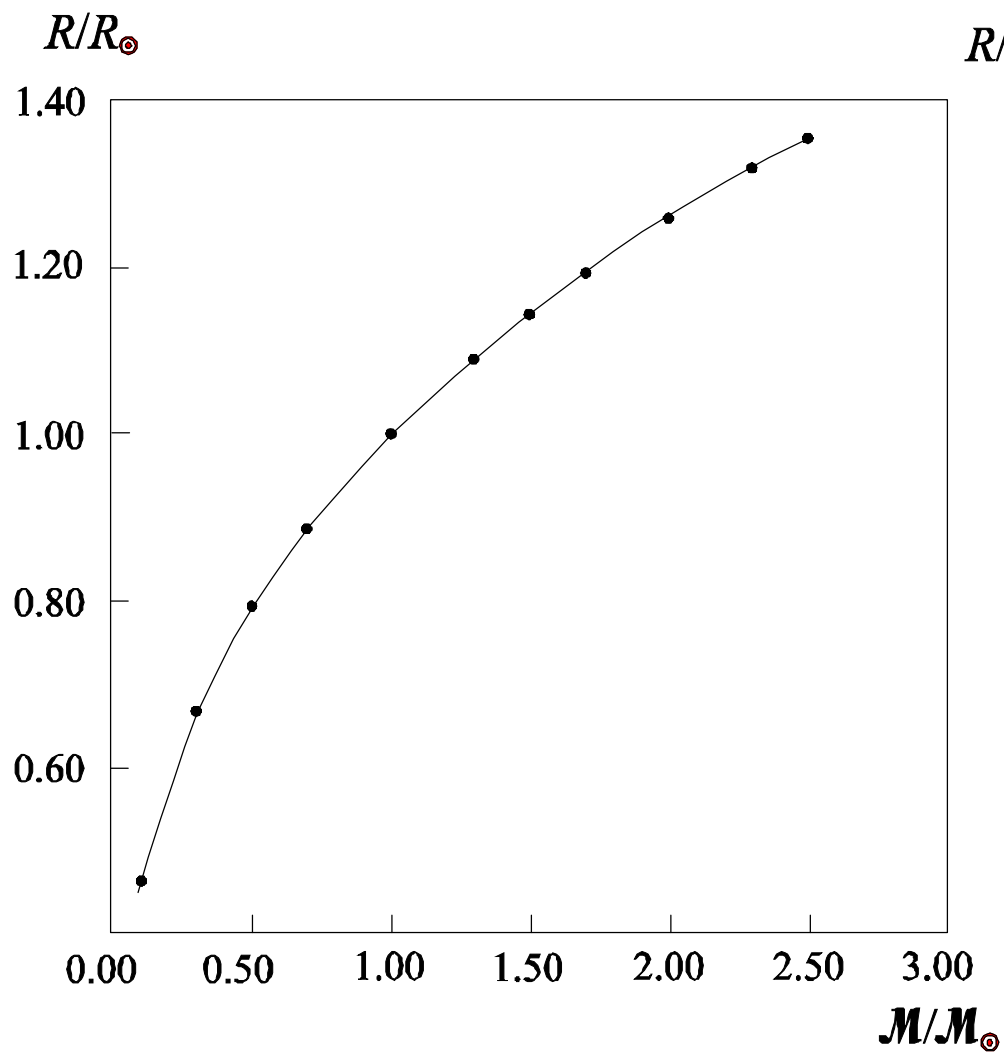


BELI PATULJCI

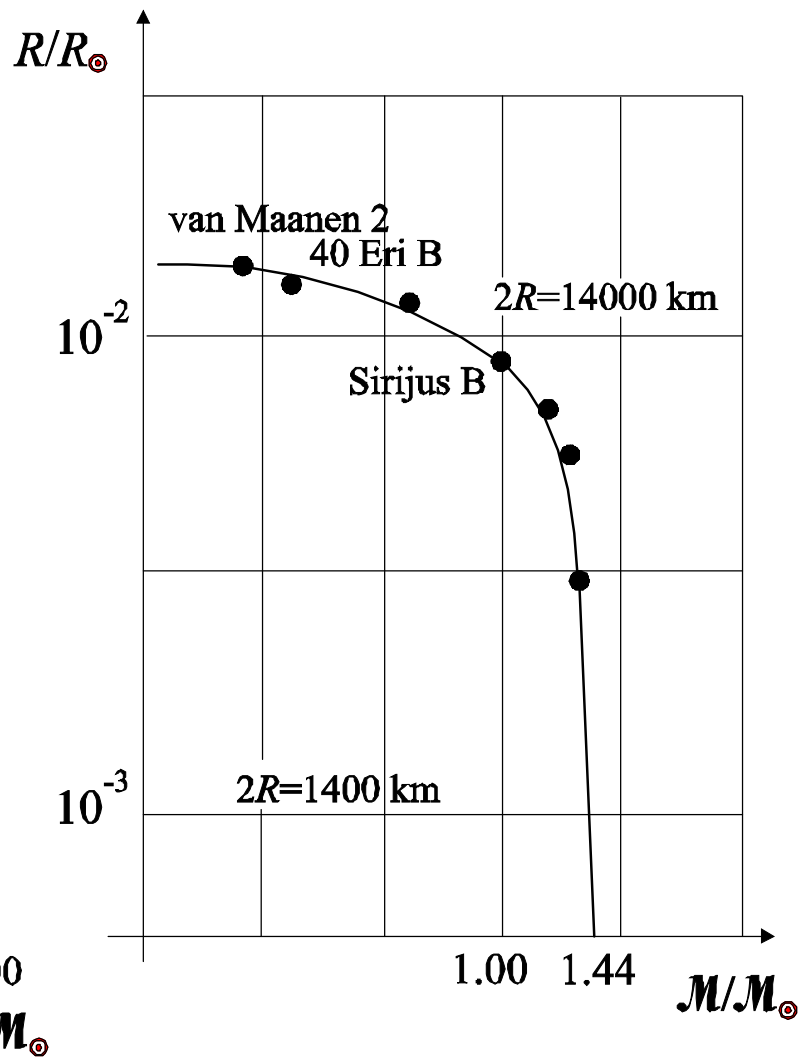
(masa < 1.4 mase Sunca)

zvezda roditelj ima masu <8 Sunčevih masa

- Gravitacioni kolaps se zaustavlja degeneracijom materije (**pritisak degenerisanog elektronskog gasa** uravnotežava gravitaciju)
- Zvezda je bez izvora energije 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
- Beli patuljak koji ima veću masu ima manji radijus
- Maksimalna masa belog patuljka je 1.4 mase Sunca

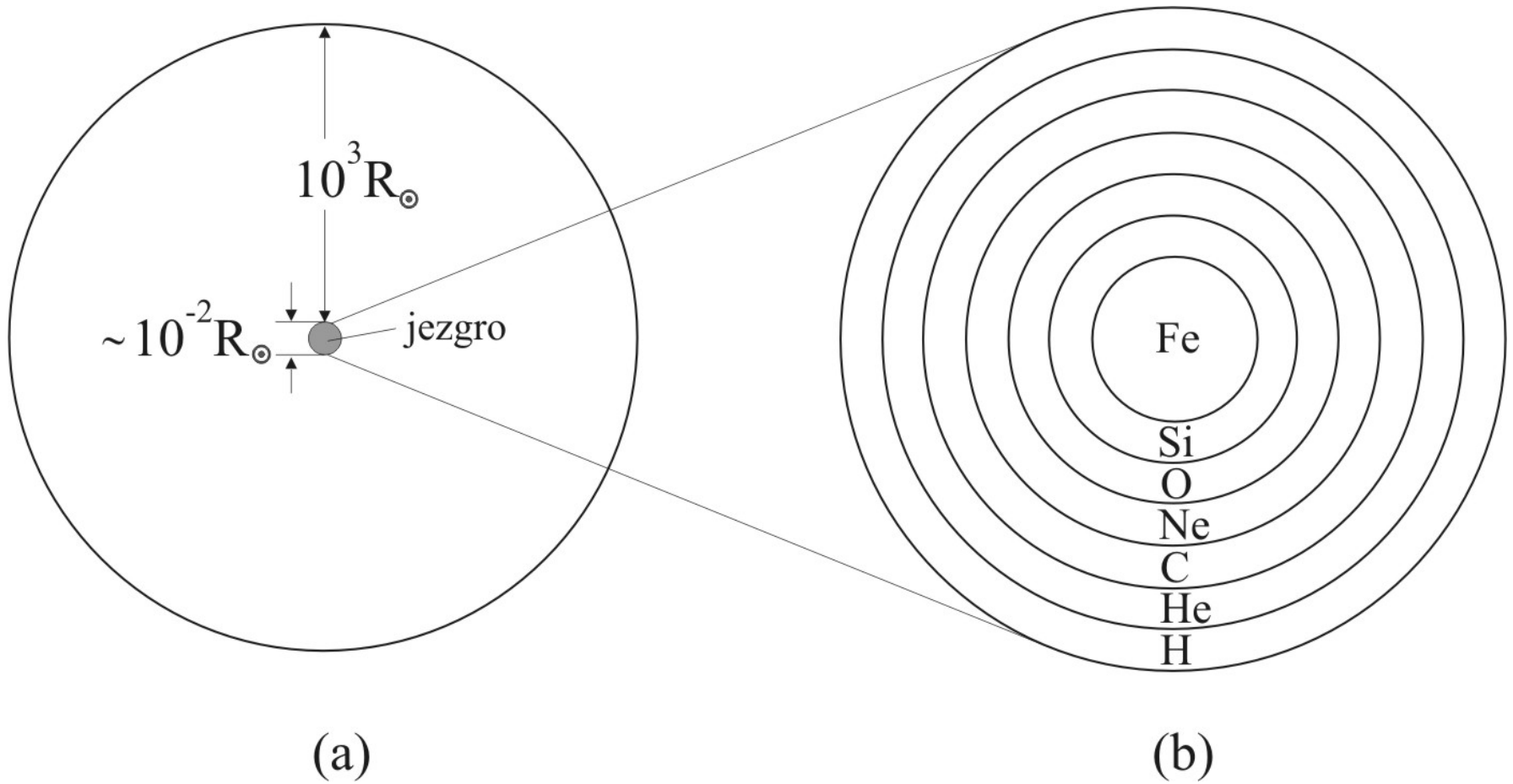


(a)



(b)

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



Kraj života masivnih zvezda

Na mestu kolapsirajućeg gvozdеног jezgra ostaje:

neutronska zvezda

ili

crna rupa

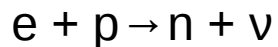
Udarni talas raznosi omotač zvezde
(maglina u širenju - ostatak supernove)

NEUTRONSKE ZVEZDE

(1.4 - 3 mase Sunca)

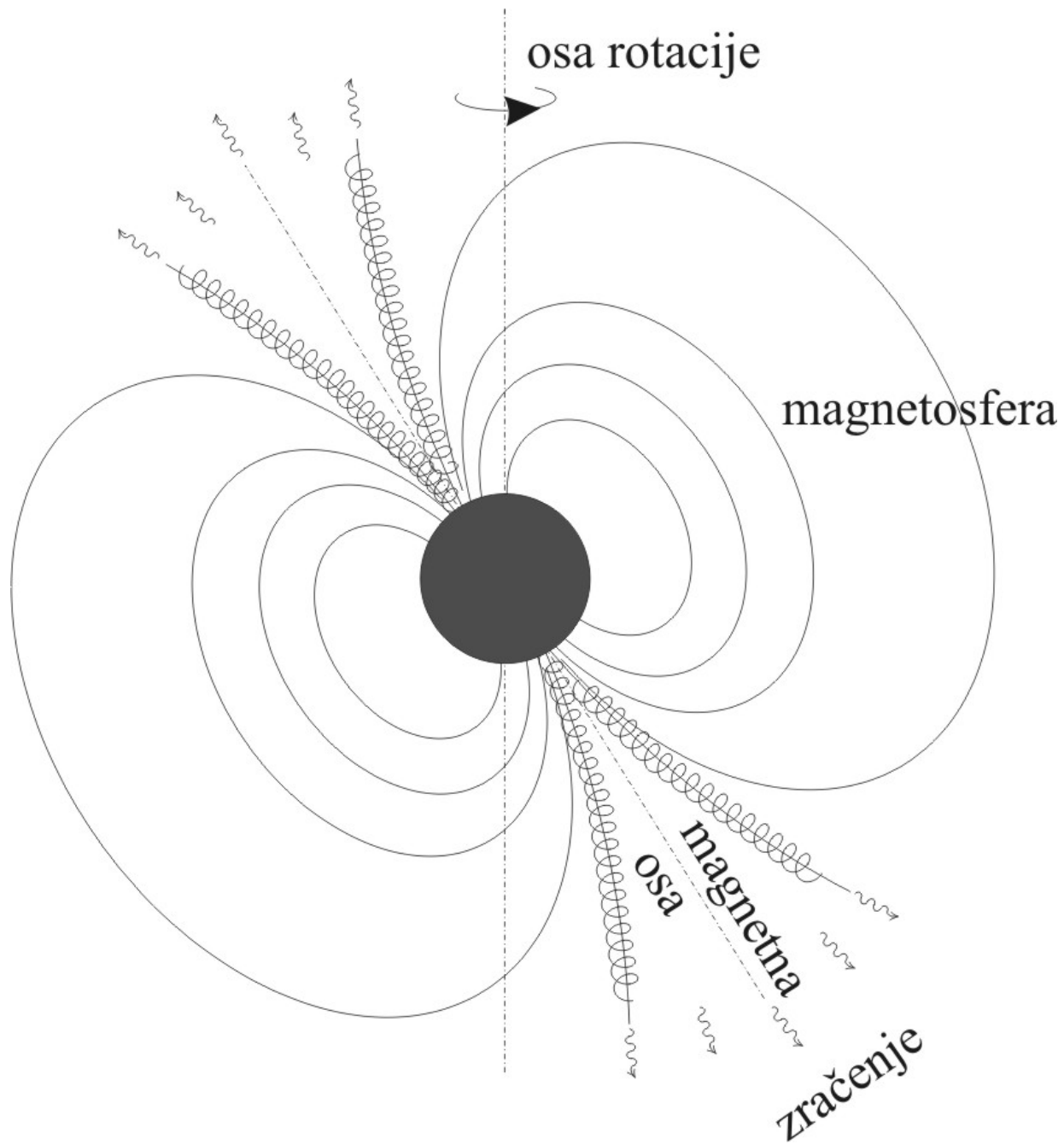
zvezda roditelj ima masu od 8 - 30 Sunčevih masa

- U jezgru se odvija niz TN reakcija, sve do gvoždja
- Na $T \sim 5 \cdot 10^9$ K, γ 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 neutronskog gasa** uravnotežava gravitaciju)

- I bez izvora energije, neutronska zvezda je u hidrostatičkoj ravnoteži
- Gustina neutronske zvezde je $10^{12} - 10^{14}$ g/cm³
- Radijus je oko 10km

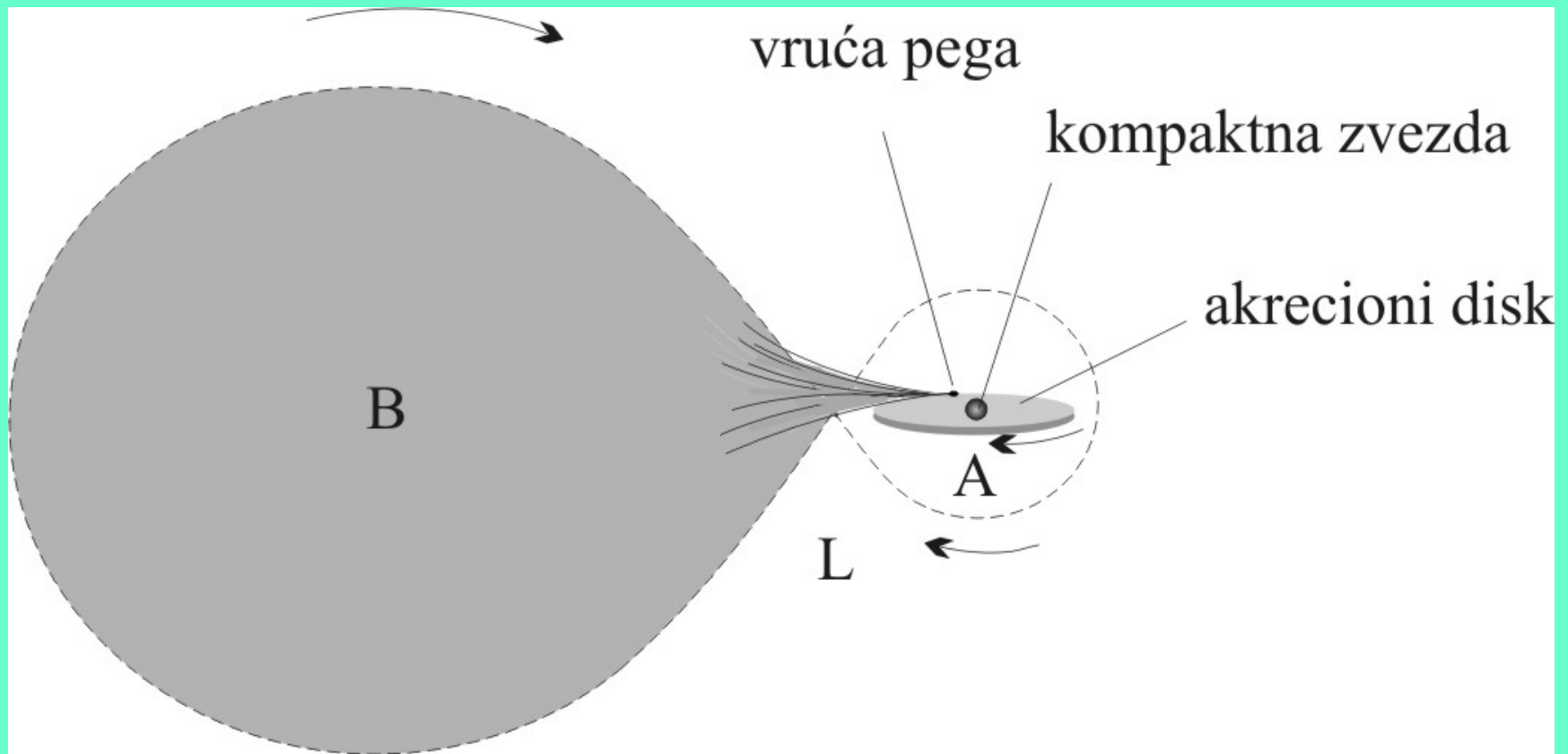


P
U
L
S
A
R

Krab maglina – ostatak supernove
posmatrane 1054.godine



Drugi način nastanka neutronske zvezda - transferom materije sa crvenog džina na belog patuljka u TDS



CRNE RUPE

(> 3 mase Sunca)

zvezda roditelj ima masu >30 Sunčevih masa

- Ni jedna poznata sila ne može da se suprotstavi katastrofalnom gravitacionom kolapsu koji ostatak zvezde mase veće od 3 mase Sunca (pošto prestanu sve TN reakcije) sabija u singularitet beskonačne gustine.
- Pojave u tako jakom gravitacionom polju se mogu opisivati samo u okviru Opšte teorije relativnosti (Ajnštajnovе teorije gravitacije).

“Mass tells space how to curve, space tells mass how to move”

- 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’.

Šta je crna rupa?

- To je oblast u kojoj je gravitacija tako jaka da iz nje čak ni svetlost ne može pobeći – nemamo nikakvih informacija
- Masivna zvezda kolapsira do zapremine beskonačno malog radijusa i beskonačno velike gustine → “singularitet”

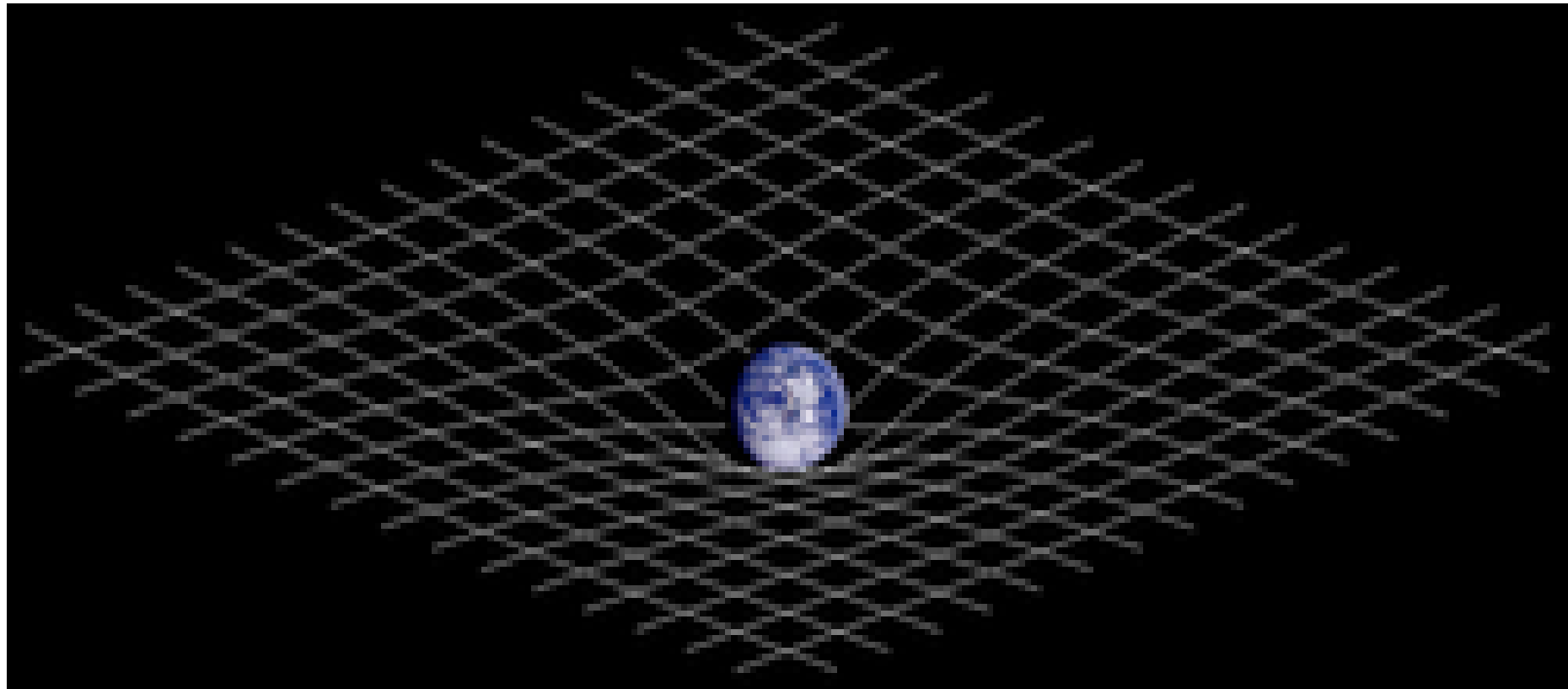
Džon Mičel (1783) “Moguće je zamisliti zvezdu koja je dovoljno masivna i dovoljno malih razmera tako da je kod nje druga kosmička brzina veća od brzine svetlosti. Takvu zvezdu ne bismo mogli videti zato što do nas ne bi stigla svetlost sa njene površine, nju bi natrag vuklo njeno gravitaciono polje.”

Schwarzschild-ov radijus

- Nemački astrofizičar **Karl Schwarzschild** prvi je korektno izveo izraz za veličinu crne rupe koristeći **opštu teoriju relativnosti**.
- Izraz je isti kao za **Laplace-ovu crnu rupu** i odgovara **horizontu događaja** crne rupe:

$$R_{\text{sch}} = 2GM/c^2$$

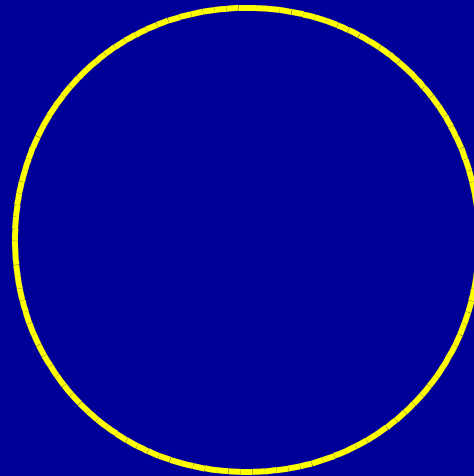
- **R_{sch}** je **Schwarzschild-ov radijus objekta**



HORIZONT DOGAĐAJA

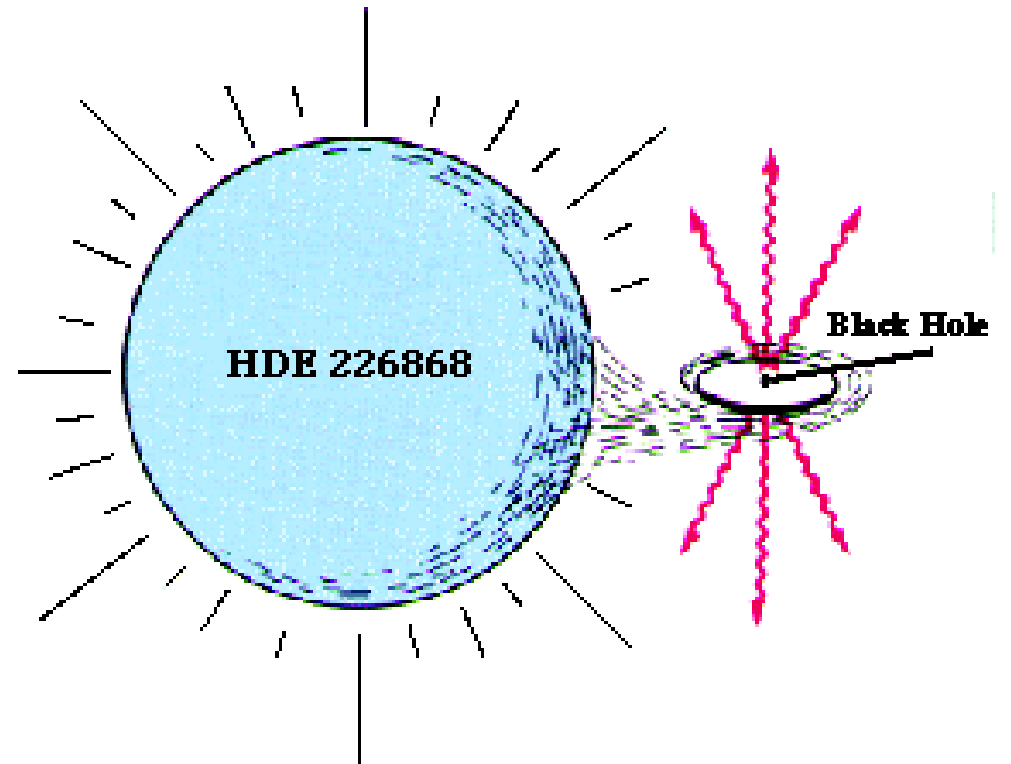
Granica crne rupe

“Ovu granicu određuje svetlost koja zamalo nije uspela da se otrgne od crne rupe ostavši zauvek da počiva na njenom rubu.”



Horizont događaja

Cygnus X-1



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)

Pulsari

- 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), $P=1.33730113$ s)
- 1968 – pulsar (**Pulsating astronomical radiosource**)
- 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)

Antony Hewish i Jocelyn Bell



Jocelyn Bell, IAU GA
Peking, 2012

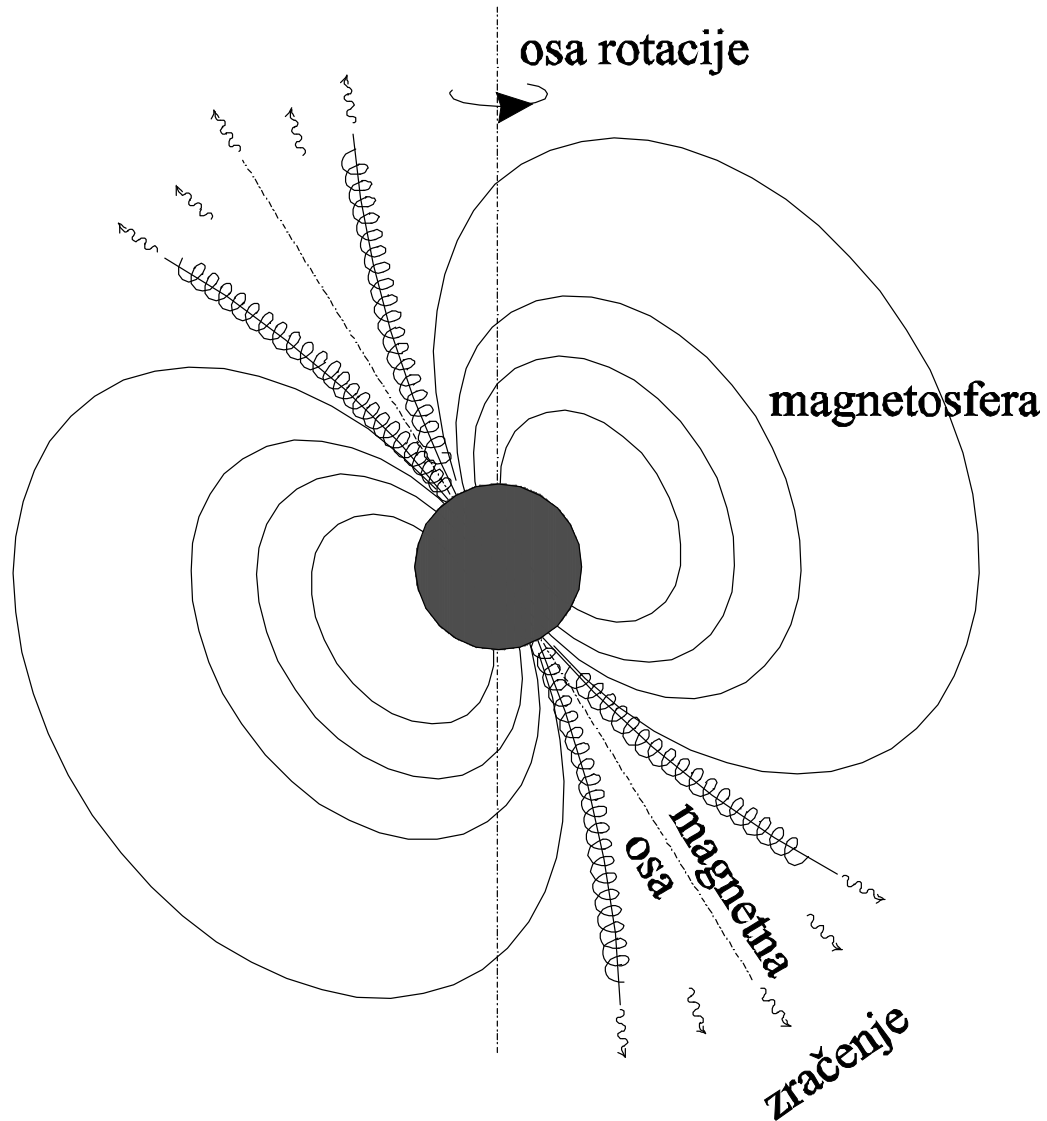


Pulsari su:

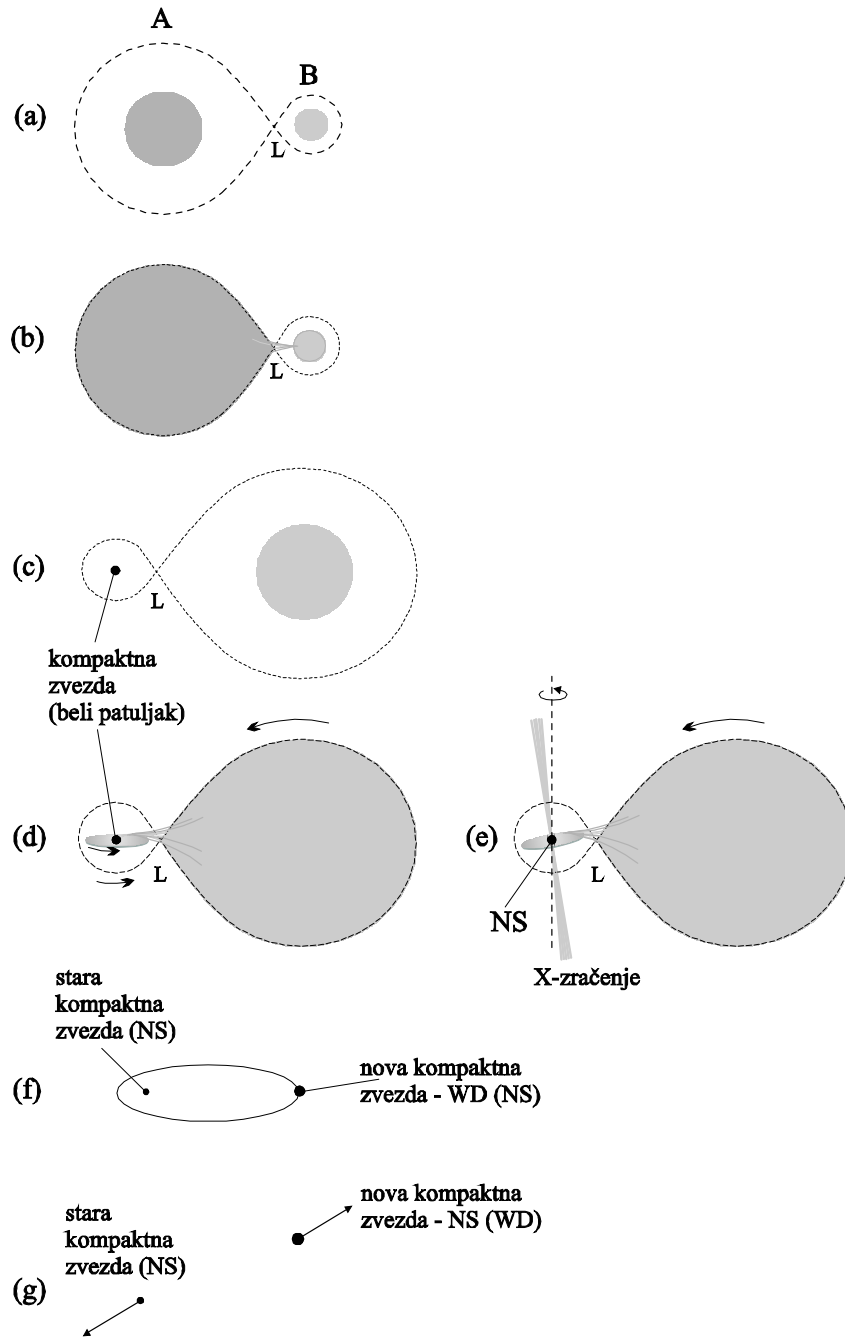
- brzorotirajuće ($0.033 < P < 4\text{s}$) i superguste ($10^9 < \rho < 10^{14} \text{ g/cm}^3$) zvezde
- sa jakim magnetnim poljem ($B \sim 10^{12} \text{ G}$)
- i gravitacijom na površini koja je 10^{11} puta veća od gravitacije na površini Zemlje

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

Model pulsara



Evolutija zvezda u tesno dvojnim sistemima (TDS)

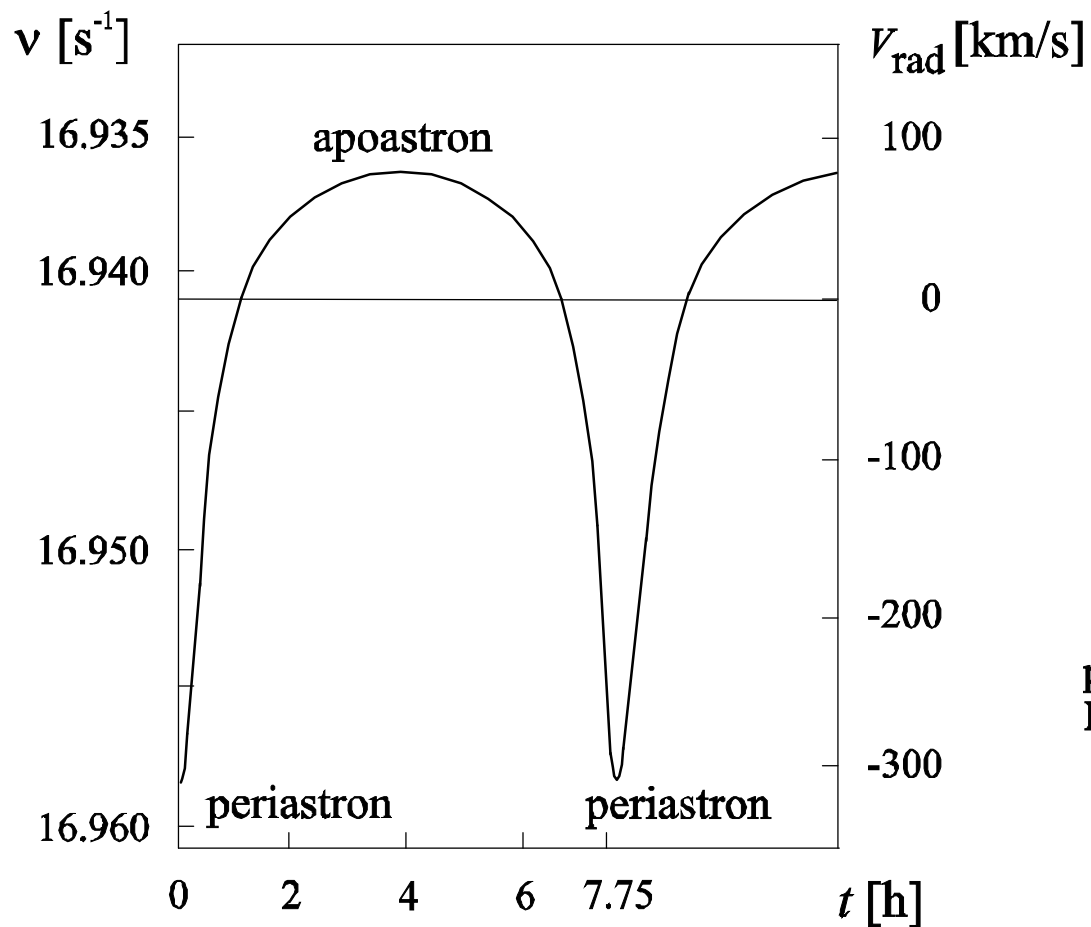


Pulsari u TDS

Dvojni pulsari i efekti OTR

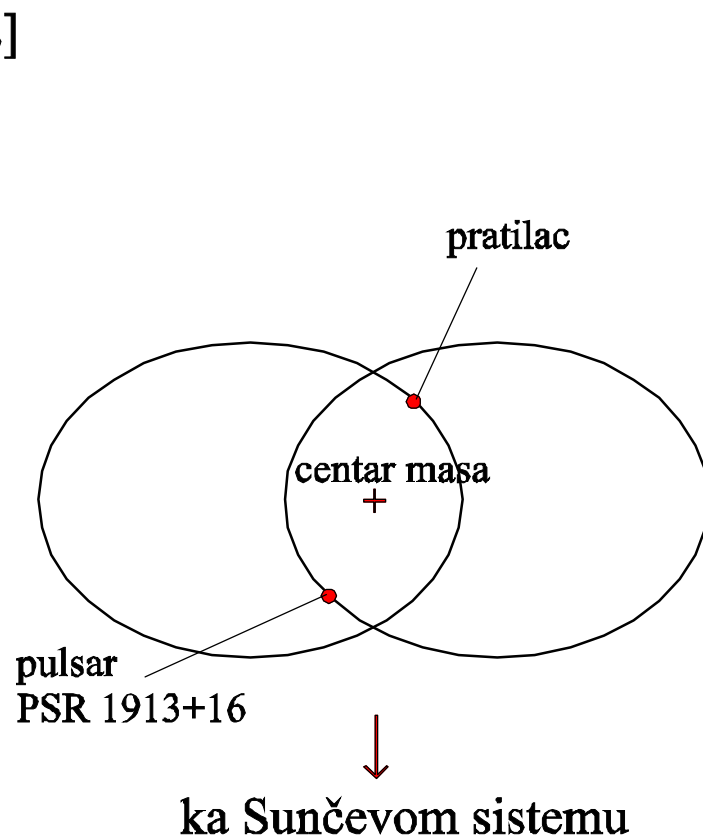
- Prvi dvojni pulsar otkriven 1974. godine (Russell Hulse i Joseph Taylor)
- PSR 1913+16 – periodične promene frekvencije impulsa (na svakih 7.75 sati) u odnosu na srednju vrednost od 16.94 impulsa u sekundi ($P=0.059$ s) → pulsar ima pratioca (drugi pulsar ili beli patuljak?)
 - smanjenje njegovog orbitalnog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

Promena frekvencije primljenih impulsa kod dvojnog pulsara



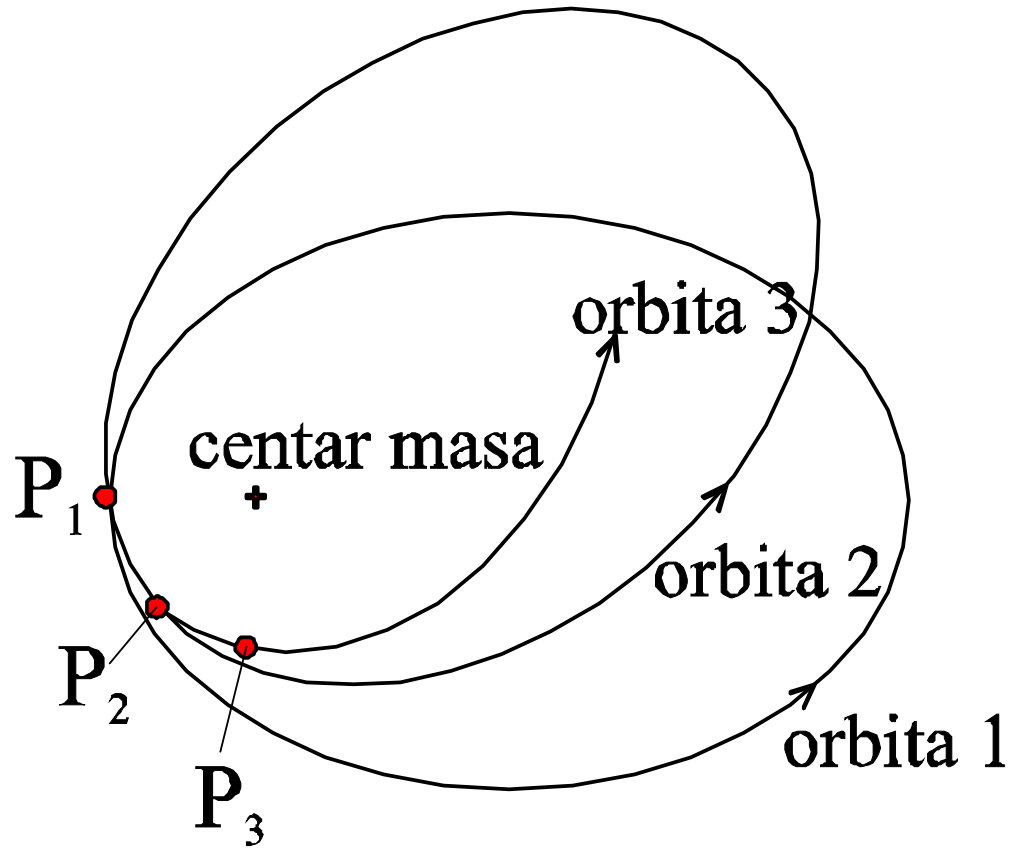
(a)

Orbita dvojnog pulsara

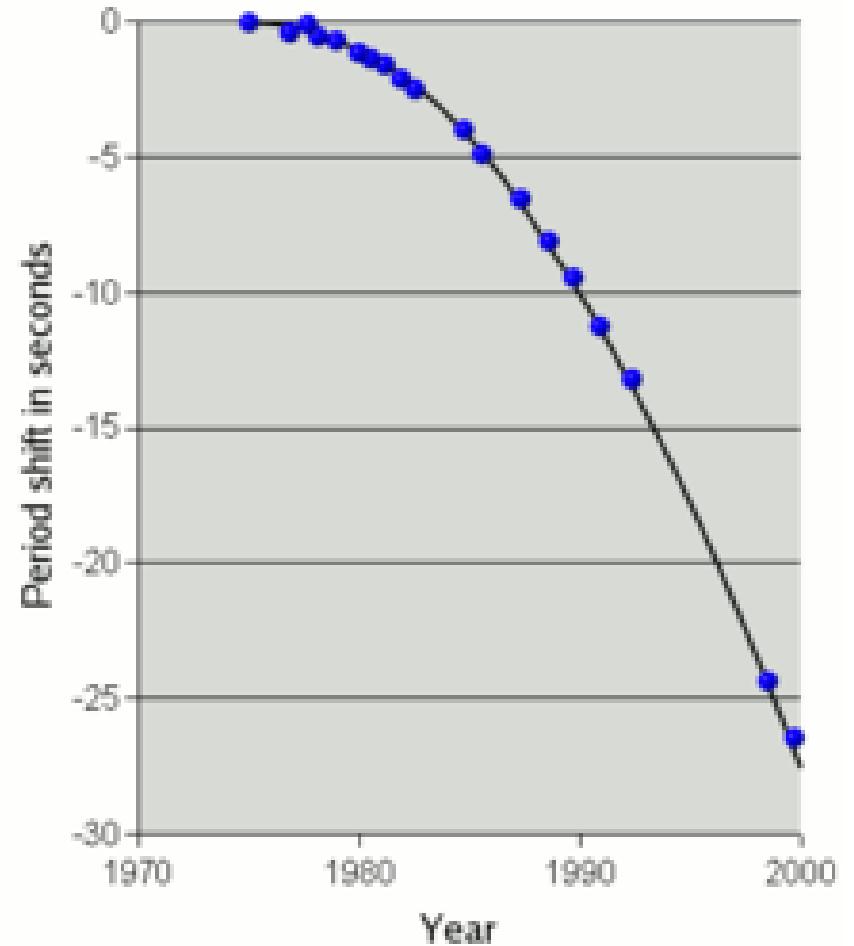
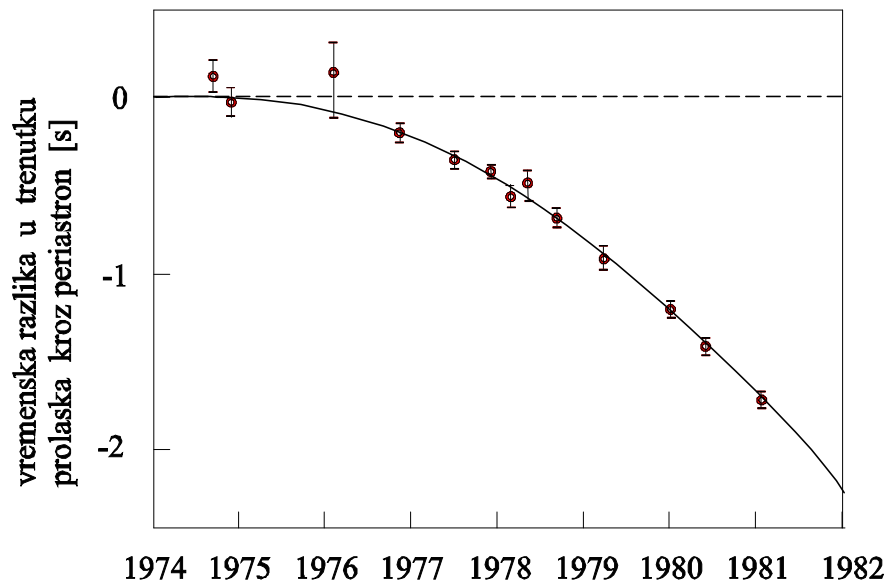


(b)

Pomeranje periastrona orbite pulsara PSR 1913+16 43"/dan !!!



Smanjenje orbitalnog perioda pulsara PSR 1913+16



Reinkarnacija pulsara

- 1982. godine otkriven je ultra-brzi pulsar PSR 1937+21 sa najkraćom periodom $P=0.00156$ s (642 obrta u sekundi !), malim usporenjem rotacije i slabim magnetnim poljem ($B \sim 5 \cdot 10^8$ G).
- Pratioci ultra-brzih pulsara su beli patuljci čija je starost bar 10^9 godina
- Kako to da je pulsar još uvek živ?
- Objašnjenje – u izmerenom slabom magnetnom polju i starosti belog patuljka kao pratioca → **ultra-brzi pulsar je stari, ugašeni pulsar koji je transferom mase sa pratioca dok je bio u fazi crvenog džina, "vraćen u život"**.
- Tako je jačina magnetnog polja, a ne brzina rotacije, postala kriterijum za starost pulsara.

Dijagram magnetno polje – period rotacije pulsara

