

Model nevtronske zvezde

Maruška Žerjal

Seminar

December 2009

Mentor: doc. dr. Andreja Gomboc

- 1 Uvod
- 2 Model nevtronske zvezde
 - Enačba stanja
- 3 Plastovitost zvezde
 - Plašč
 - Jedro
- 4 Opazovanja
 - Pulzarji

Odkritje nevtronskih zvezd

- Leta 1932 odkritje nevtronov (J. Chadwick)
- Leta 1934 Walter Baade in Fritz Zwicky: nevtronske zvezde so ostanki eksplozije supernove
- Leta 1939 Oppenheimer in Volkoff prva izračunata model nevtronske zvezde
- Leta 1967 Jocelyn Bell in Anthony Hewish odkrijeta prvi pulzar
- 1 supernova na 60-1000 let (vidimo jih zelo malo)
- $10^8 - 10^9$ nevtronskih zvezd v naši Galaksiji



Slika: Jocelyn Bell in radijski teleskop, s katerim je odkrila prvi pulzar.

Osnovne lastnosti

- Nevtronska zvezda je ostanek masivne zvezde z $M_J > M_{Ch} = 1.4 M_{\odot}$;

$$R \sim 10 \text{ km}, \quad \rho \sim 10\rho_0 \quad (\rho_0 = 2.3 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3),$$

$$B \sim 10^7 - 10^9 \text{ T}, \quad T_{eff} \sim 10^6 \text{ K}$$

- Eksplozija supernove: močna emisija nevtrinov, $T \sim 10^{11} \text{ K}$
- Superfluidnost in superprevodnost pri $T_c = 10^{10} \text{ K}$
- Primerjava zvezde z velikanskim atomskim jedrom z masnim številom

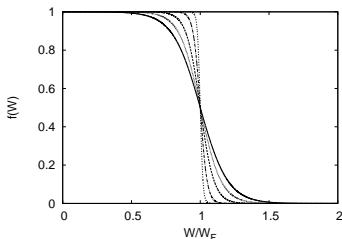
$$A \approx \frac{M_{Ch}}{m_n} \approx 10^{57},$$

- Vezavna energija na nukleon (160 MeV) je $10\times$ večja, kot v atomskem jedru in je gravitacijska
- $M \neq M_0 = Nm_n$; M je gravitacijska masa, M_0 pa lastna. Vpeljemo masni defekt ΔM , ki lahko znaša tudi do $25\%M$:

$$M = M_0 + \Delta M$$

Enačba stanja

- Enačba stanja oblike $P(\rho)$.
- V laboratoriju $\rho > 2.3 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$ niso dosegljive, z gostoto zanesljivost modela pada, enačbe so toge.
- Največji vpliv na globalne parametre ima enačba stanja zvezdinega jedra.
- Hidrostatično ravnovesje: tlak gravitacije in tlak degeneriranega plina nevtronov
- Rotacijska energija zanemarljiva v primerjavi z gravitacijsko



Ker $E_F > \frac{3}{2} k_B T$, lastnosti degeneriranih fermionov niso močno odvisne od temperature. Računamo pri $T = 0 \text{ K}$.

Degeneriran plin elektronov

- Fermioni - Paulijevo izključitveno načelo
- Tlak degeneriranega elektronskega plina:

$$\begin{aligned}
 P_e &= \frac{8\pi}{3h^3} \int_0^{p_F} p^3 v(p) dp = \frac{8\pi c}{3h^3} \int_0^{p_F} p^3 \frac{p/(m_e c)}{\sqrt{1 + p^2/m_e^2 c^2}} dp \\
 &= \frac{8\pi c^5 m_e^4}{3h^3} \int_0^x \frac{\xi^4 d\xi}{\sqrt{1 + \xi^2}}, \quad \xi = p/m_e c, \quad x = \frac{p_F}{m_e c}
 \end{aligned}$$

upoštevali smo zvezo $p = m_e v / \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Vrednost integrala je $f(x)/8$, $f(x) = x(2x^2 - 3)(x^2 + 1)^{1/2} + 3 \ln [x + (1 + x^2)^{1/2}]$.

Degeneriran plin elektronov

- Spomnimo se: $x = \frac{p_F}{m_e c}$
- Nerelativističen primer: $x \ll 1$: $f(x) \rightarrow \frac{8}{5}x^5$,

$$P_e = \frac{1}{20} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{2/3} \frac{h^2}{m_e^{8/3}} \rho^{5/3}, \quad P_e \propto \rho^{5/3},$$

- Relativističen primer: $x \gg 1$: $f(x) \rightarrow 2x^4$

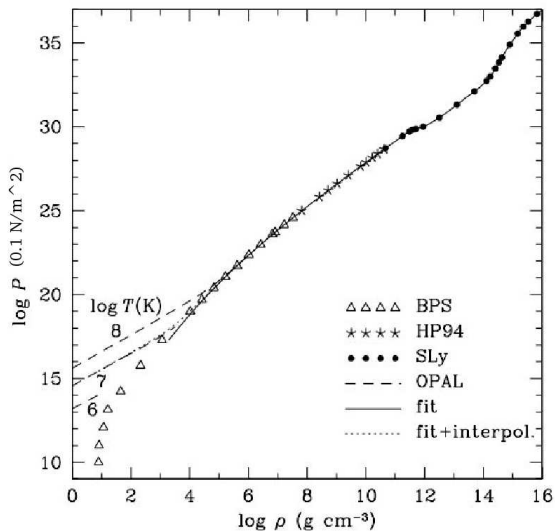
$$P_e = \frac{1}{8} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{1/3} \frac{hc}{m_e^{4/3}} \rho^{4/3}, \quad P_e \propto \rho^{4/3}$$

- Podobno tudi za tlak degeneriranega nevtronskega plina ($m_e \rightarrow m_n$)
- Dobili smo politropno enačbo oblike

$$P = K_\gamma \rho^\gamma$$

- $\gamma = (d \ln P / d \ln \rho)_{ad}$ je adiabatni indeks.

Enačba stanja



Model

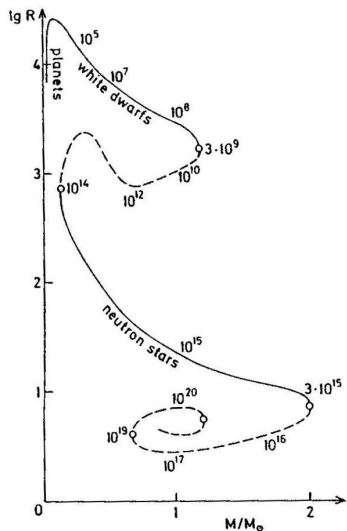
- Za nerotirajočo zvezdo rešujemo *Tolman-Oppenheimer-Volkoff*-ove enačbe hidrostatičnega ravnovesja skupaj s kontinuitetno enačbo:

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm}{r^2} \rho \left(1 + \frac{P}{\rho c^2}\right) \left(1 + \frac{4\pi r^3 P}{mc^2}\right) \left(1 - \frac{2Gm}{rc^2}\right)^{-1},$$

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

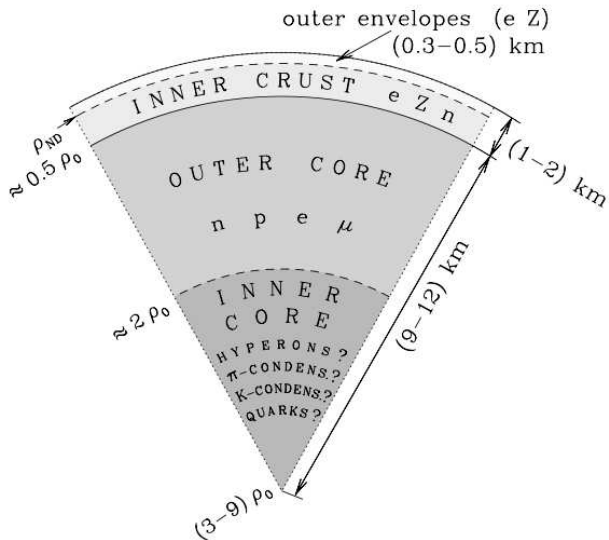
- Iz zgornjih enačb dobimo maso zvezde $M(\rho_c)$ in njen radij $R(\rho_c)$ oz. $M - R$ relacijo

$M - R$ relacija



- Stabilnostni pogoj: $\frac{dM(\rho_c)}{d\rho_c} > 0$
- Zgornja meja mase: $2.2 M_\odot$ za nerotirajoče in $2.9 M_\odot$ za zvezde z majhno rotacijsko periodo. Če splošne relativnosti ne upoštevamo, dobimo $5.7 M_\odot$.
- Maksimalna masa je pomembna zaradi razločevanja s črnimi luknjami, ki so masivnejše.

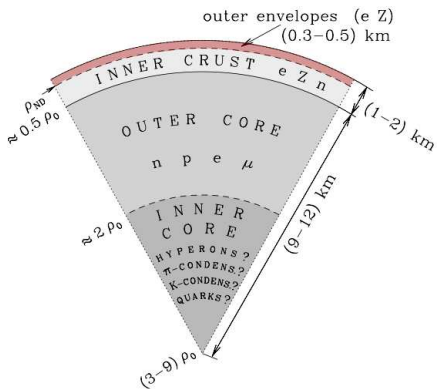
Zgradba



Atmosfera

- Plast plazme
- Termalni del sevalnega spektra, maksimum izseva je v rentgenskem delu spektra.
- Gravitacijski pospešek na površju $g \sim 10^{12} \text{ m/s}^2$
- Debelina odvisna od temperature - od nekaj 10 cm do nekaj mm.
- Trdna oz. tekoča površina pri hladnih zvezdah z izredno močnim magnetnim poljem
- Izsev tipične nevtronske zvezde s površinsko temperaturo $T_{\text{eff}} \sim 10^6 \text{ K}$ je $L = 7 \cdot 10^{25} \text{ W} = 0.2L_{\odot}$

Zunanji plašč

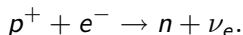


- Od dna atmosfere do globine z gostoto $\rho = 4 \cdot 10^{14} \text{ kg/m}^3$ oz. do globine nekaj sto metrov.

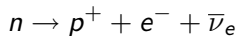
- $\rho \sim 10^7 \text{ kg/m}^3$: popolna ionizacija atomov; ioni in elektroni železa
- Največji prispevek k tlaku imajo elektroni.
- Vroče zvezde: prvih nekaj metrov nedegeneriranih, globlje denegeriran elektronski plin (pri $\rho \gg 10^9 \text{ kg/m}^3$ ultrarelativističen)
- Običajno večji del trden \rightarrow skorja

Neutronizacija

- $\rho \geq 10^{12} \text{ kg/m}^3$: beta ujetje elektronov v jedrih železa ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ (neutronizacija):



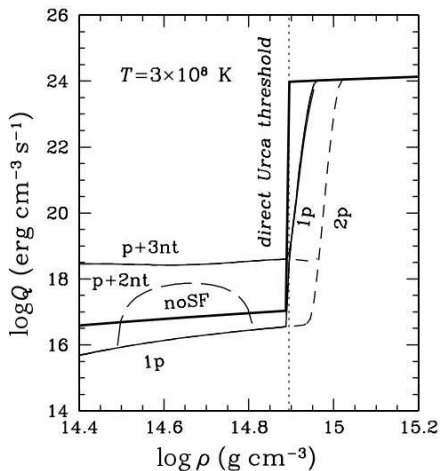
- Nastanejo ${}_{26}^{56}\text{Fe}$, ${}_{28}^{62}\text{Ni}$, ${}_{28}^{64}\text{Ni}$, ${}_{28}^{66}\text{Ni}$, ${}_{36}^{86}\text{Kr}$, ..., ${}_{36}^{118}\text{Kr}$
- Razpad



ni mogoč, število nevtronov se povečuje.

- Dno plašča ($\rho = 4 \cdot 10^{14} \text{ kg/m}^3$): nevtroni uidejo iz atomskih jeder \rightarrow plin prostih nevtronov
 - mreža jeder, bogatih z nevtroni
 - degeneriran, nerelativističen plin prostih nevtronov
 - degeneriran, relativističen plin elektronov
- Sestava snovi:

Emisija nevtrinov in ohlajanje zvezde

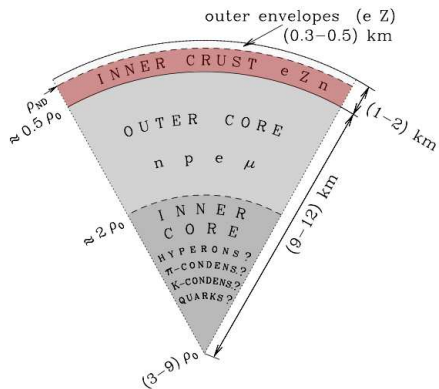


- Nevtronizacija
- Eksplozija supernove - celo zaznamo nevtrine!
- Največ v jedru zvezde
- 'Direktni URCA proces
- Učinkovit način ohlajanja vročih zvezd

Superfluidnost zunanjega plašča

- Spontano povezovanje prostih nevtronov in nevtronov v atomskem jedru v pare
- Pari - bozoni s spinom 0 - Paulijevo načelo ne velja \rightarrow vsi v osnovnem stanju
- Tekočina ne izgublja energije, viskoznost je enaka 0
- Superfluidnost pri $T_C < 10^{10}$ K, ne vpliva na enačbo stanja, pač pa na toplotno kapaciteto in emisijo nevtrinov

Notranji plašč

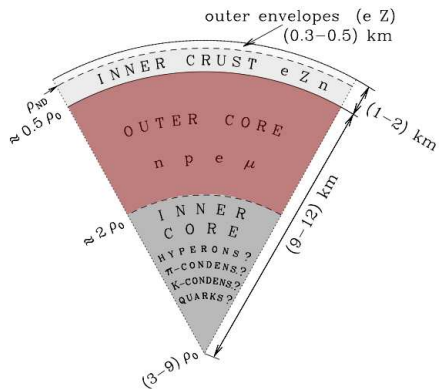


- $N(n) : N(p) : N(e) = 8 : 1 : 1$
- $\rho = 4 \cdot 10^{15} \text{ kg/m}^3$: tlak degeneriranega nevtronskega plina prevlada nad elektronskim
- $\rho \sim \rho_0 = 2.3 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$: ne razločimo več med nevtroni zunaj in znotraj atomskega jedra
- Pari nevtronov \rightarrow superfluidnost
Pari protonov \rightarrow superprevodnost

- $\rho = 4 \cdot 10^{14} \text{ kg/m}^3$ do $\rho \sim \rho_0$

- Debelina ~ 1 km

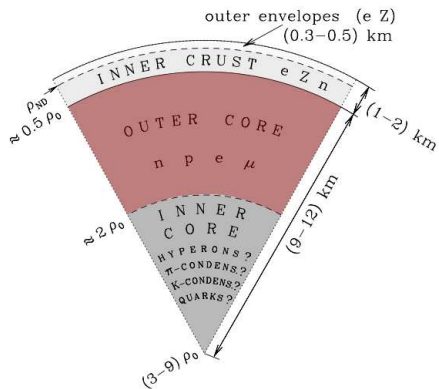
Zunanje jedro



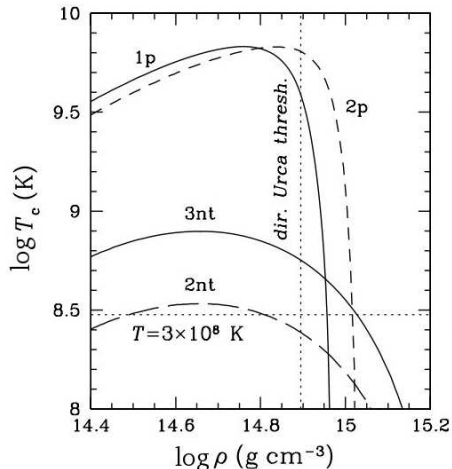
- Debelina nekaj km, $\rho = \rho_0$ do $\rho = 2\rho_0$

- Jedro: $\rho > \rho_0 = 2.3 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$, ne razlikujemo med atomskimi jedri in prostimi delci
- Sestava $npe\mu$
- Fermijev plin, možna superfluidnost (ki pri velikih gostotah izgine)

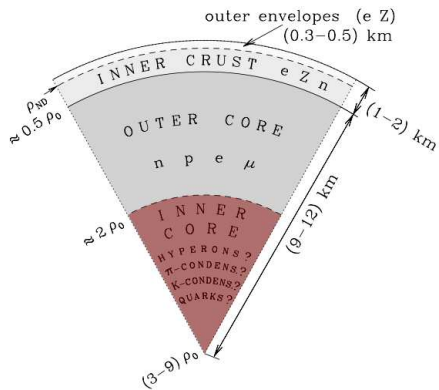
Zunanje jedro



- Debelina nekaj km, $\rho = \rho_0$ do $\rho = 2\rho_0$



Notranje jedro

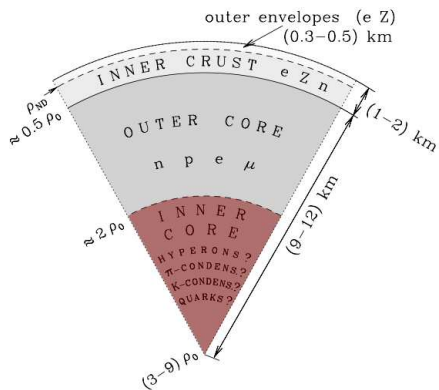


- Le pri masivnejših nevtronskih zvezdah
- Enačba stanja odvisna od vrste modela
- Vemo, da pri $\rho > 2\rho_0$, ($\rho_0 = 2.3 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$) spontano nastanejo pioni:

$$n \rightarrow p^+ + \pi^-.$$

- Radij nekaj km, $\rho = 10 - 15\rho_0$

Eksotična snov v jedru



Napovedi:

- hiperonizacija snovi,
- kondenzacija pionov,
- Bose-Einsteinova kondenzacija kaonov
- fazni prehod v snov, sestavljeno iz kvarkov

Magnetno polje

- Ohranitev magnetnega pretoka
- Gostota polja večine pulzarjev $10^7 - 10^9$ T, radijski pulzarji celo do 10^{11} T
- Meritev rentgenskih ciklotronskih frekvenc
- Zgornja meja $10^{14} - 10^{15}$ T (virialni teorem: magnetna energija $\sim \frac{1}{6} B^2 R^3$ bi prevladala nad gravitacijsko $\frac{3}{5} \frac{GM}{R^2}$)

Pulzar v Rakovici



- Opazovanje supernov že v preteklosti, supernova v Rakovici leta 1054
- Opazovanje v vseh valovnih dolžinah v naši in drugih galaksijah

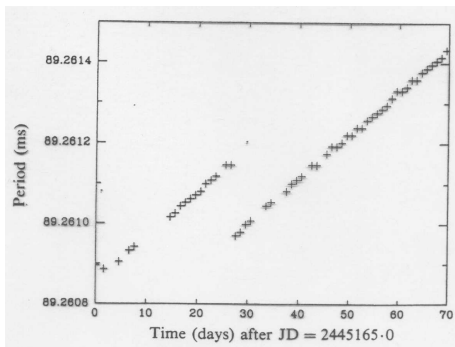
Pulzarji

- Odkritje: Jocelyn Bell in Anthony Hewish leta 1967
- Magnetno polje, anizotropno sevanje, princip svetilnika
- Sinhrotronsko in 'krivinsko' sevanje (curvature radiation) → močna polarizacija
- Tvorba parov, Comptonovo sipanje
- Radijski, rentgenski in gama pulzarji, nekateri v celotnem spektru (Geminga in Rakovica)
- Mehanizmi za pulziranje: rotacija, akrecija (v dvojnih sistemih) in magnetno polje

Radijski pulzarji

- Zelo stabilna rotacija, zelo precizne ure
- Zelo natančne meritve periode P in njenega odvoda \dot{P}
- Upočasnjevanje izoliranih pulzarjev $\dot{P} \sim 10^{-15} \text{ s/s} > 0$, rotacijska energija gre v EMV in pospeševanje delcev
- Periode milisekundnih pulzarjev $P = 30 \text{ ms}$
- Prosta precesija nekaterih pulzarjev - direkten dokaz za trdno ovojnico zvezde

'Glitchi'



- Nenadni skoki periode
- Večinoma v mladih pulzarjih
- Superfluidnost: kvantizirani vrtinci z viskoznostjo $\neq 0$, vzporedni z osjo vrtenja
- 'Glitch': razklopitev vrtincev v ovojnici