



Neutronske zvijezde – pogled u kozmičku kovačnicu

Mile Karlica¹

Uvod

Što su neutronske zvijezde? Američki fizičar David Pines je 1990. godine znakovito rekao: “Neutronske zvijezde su superzvijezde.” Kada poredate fenomene i procese koje većemo uz neutronske zvijezde, njihov nastanak i strukturu dobit ćete sljedeću listu: supernova, supergusta materija, supravodljivost, superfluidnost, superbrza rotacija... Samim time je očito zašto neutronske zvijezde plijene pažnju i golicaju maštu astronoma i astrofizičara već zadnjih 80 godina otkad su poznati astronomi Walter Baade i Fritz Zwicky 1934. godine postulirali njihovo postojanje.

Pa što su onda neutronske zvijezde? Neutronske zvijezde su krajnji kompaktni ostaci evolucije srednje masivnih zvijezda koji se uglavnom sastoje od neutrona. Mase neutronske zvijezde se ovisno o teoretskim modelima kreću u rasponu od $1.4 M_{\odot}$ do $2.4 M_{\odot}$, gdje je M_{\odot} oznaka za masu Sunca koju u astrofizici koristimo iz praktičnih razloga. Uvedemo li u to i radijus neutronske zvijezde od otprilike 10 km lako uvidamo da se radi o objektu izuzetne prosječne gustoće od $10^{14} - 10^{15} \text{ g/cm}^3$.

Da bi od obične zvijezde nastala neutronska zvijezda njezina masa mora biti u rasponu od otprilike $8 M_{\odot}$ do $25 M_{\odot}$. Zašto samo od ovakvih zvijezda nastaju neutronske zvijezde? Razlog tome krije se u teoriji zvjezdane evolucije koja nam govori da ako je zvijezda mase manje od $8 M_{\odot}$ njezin kompaktni ostatak će biti bijeli patuljak čija masa ne prelazi takozvanu Chandrasekharovu granicu od $1.4 M_{\odot}$. Ukoliko je masa zvijezde veća od otprilike $25 M_{\odot}$ krajnji stadij evolucije takve zvijezde će kao kompaktni ostatak ili ostaviti crnu rupu ili ako je masa veća od otprilike $100 M_{\odot}$ neće ostaviti ništa osim raspršene materije u Svemiru (supernova s produkcijom parova). Astrofizički procesi koje većemo uz nastanak neutronske zvijezde zovemo supernove s kolapsom jezgre, te ih u spektralnoj klasifikaciji supernova većemo uz tipove Ib, Ic i II.

Hidrostatska ravnoteža

Za razumijevanje stabilnosti i evolucije zvijezda nužno je upoznati se s konceptom hidrostatske ravnoteže. Što je to hidrostatska ravnoteža? Za fluid se kaže da je u hidrostatskoj ravnoteži ako je u mirovanju ili ako brzina toka u svim točkama ne ovisi o vremenu. Ukratko rečeno, ako je zbroj svih sila na neki mali element fluida nula. Promatramo li element fluida u gravitacijskom polju, na primjer za neke zvijezde, taj

¹ Autor je dipl. ing. fizike, stručni suradnik Zvezdarnice Zagreb.

uvjet će biti zadovoljen ako je sila uzgona na taj element fluida \vec{F}_u jednakog iznosa i suprotnog smjera od gravitacijske sile na element fluida \vec{F}_g

$$\vec{F}_u = -\vec{F}_g. \quad (1)$$

Gravitacijska sila potječe od gravitacijskog međudjelovanja elementa fluida sa svim dijelovima zvijezde dok sila uzgona na element fluida proizlazi iz razlike u tlakovima na različitim udaljenostima od središta (gradijent tlaka). U konačnom obliku jednadžba za hidrostatsku ravnotežu sferno simetrične zvijezde je

$$\frac{dp(r)}{dr} = -G \frac{M(r)\rho(r)}{r^2}, \quad (2)$$

gdje je $dp(r)/dr$ gradijent tlaka, G gravitacijska konstanta, $\rho(r)$ gustoća materije na udaljenosti r od središta zvijezde, a $M(r)$ gravitacijska masa unutar sfere radijusa r dana izrazom:

$$M(r) = \int_0^r 4\pi r'^2 \rho(r') dr'. \quad (3)$$

Kod običnih zvijezda ulogu uravnotežujućeg tlaka čiji gradijent stvara uzgon uzimaju tlak elektromagnetskog zračenja i tlak idealnog plina. U slučaju bijelih patuljaka s druge strane tu ulogu preuzima tlak degeneriranog plina elektrona. Za razliku od tlaka idealnog plina koji potječe od izmjene količine gibanja atoma s okolinom i ovisi o temperaturi, tlak degeneriranog plina je posljedica kvantnomehaničkih efekata i nije ovisan o temperaturi, nego isključivo o gustoći. Naime na jako velikim gustoćama zbog Paulijeve principa isključenja čestice koje zovemo fermioni, a među koje spadaju elektroni, protoni i neutroni, se zbog sabijanja materije moraju "penjati" na viša energetska stanja. Zbog toga se degenerirana materija opire sažimanju i nastaje tlak degenerirane materije. Kod degeneriranog elektronskog plina, elektrone promatramo kao slobodne čestice u kristalnoj rešetci, te nam je tlak degeneriranog elektronskog plina dan s

$$p = \frac{(3\pi^2)^{2/3} \hbar^2}{5m_e} \rho_N, \quad (4)$$

gdje je p tlak, \hbar reducirana Planckova konstanta, m_e masa elektrona, a ρ_N gustoća slobodnih elektrona. U slučaju degenerirane neutronske materije koja gradi neutronske zvijezde aproksimacija slobodnih neutrona ne daje dobre rezultate pri izračunu mase neutronske zvijezde i potrebno je uključiti i nuklearne interakcije među neutronima, a možda i nekim drugim dodatnim egzotičnim česticama.

S druge strane jednadžba hidrostatičke ravnoteže (2) iako dobra za opis obične zvijezde ili čak bijelih patuljaka je u biti samo Newtonova aproksimacija koja ne uzima u obzir efekte opće teorije relativnosti. Za proučavanje strukture neutronske zvijezde koristimo poopćenu jednadžbu hidrostatičke ravnoteže u okvirima opće teorije relativnosti, takozvanu Tolman-Oppenheimer-Volkoffljevju jednadžbu.

Supernove s kolapsom jezgre

Sagorijevanjem nuklearnog goriva u svojoj unutrašnjosti, zvijezda prelazi kroz stabilna (nuklearna energija iz jezgre) i nestabilna stanja (nuklearna energija iz ljuske oko jezgre). Time se stvara ljuskasta distribucija elemenata gdje se nukleosinteza težih atomskih jezgara odvija bliže središtu zvijezde. To sve dobro funkcionira dok fuzijom atomskih jezgara ne dođemo do izotopa željeza ^{56}Fe . Naime sve dotadašnje nuklearne reakcije su egzotermne, to jest prilikom njihovog odvijanja oslobađa se energija, dok bilo kakav

astrofizički dostupan proces fuzije ili fizije s jezgrom željeza ^{56}Fe zahtijeva potrošnju energije. Stoga je ta željezna jezgra unutar zvijezde neko vrijeme nuklearno inertna, uravnotežena tlakom degeneriranog plina elektrona. Dokad je tako? Do trenutka kada joj masa prijeđe Chandrasekharovu granicu od $1.4M_{\odot}$. U trenutku kada masa željezne jezgre prijeđe Chandrasekharovu granicu tlak degeneriranog plina elektrona ne može održavati ravnotežu s gravitacijskim privlačenjem, te se jezgra počinje urušavati. Zbog urušavanja željezna jezgra se naglo zagrijava. Na temperaturi od oko $5 \cdot 10^9$ K dolazi do intenzivne proizvodnje γ -fotona i fotodisocijacije jezgara željeza:



Urušavanje jezgre oslobađa iznimne količine gravitacijske potencijalne energije reda veličine 10^{44} J ubrzavajući pritom elektrone do ultrarelativističkih brzina. Ti elektroni potom sudjeluju u procesu uhvata elektrona neutronizirajući materiju:



Iščezavanjem elektrona smanjuje se njihov kvantnomehanički tlak koji je do Chandrasekharove granice sustav držao u ravnoteži. Gustoća jezgre raste do iznimno velikih vrijednosti od $10^{14} - 10^{15}$ g/cm³ gdje promjena tlaka degeneriranih neutrona s dubinom uravnotežuje gravitacijsko privlačenje, pri čemu nastaje neutronska zvijezda. Istovremeno okolni omotač zvjezdane materije pada prema središtu i odbija se od degenerirane jezgre. Odboj u kombinaciji s neutrinskim zračenjem iz degenerirane jezgre i konvektivnim procesima u samom omotaču okolnu materiju raspršuje u okolinu.

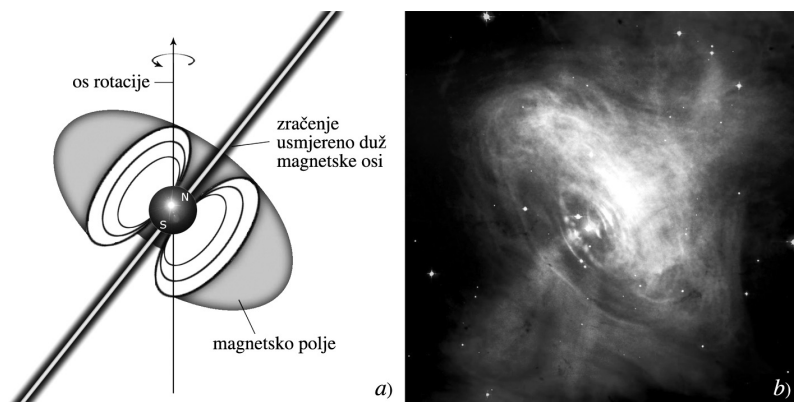
Pulsari

Najpoznatija forma u kojoj susrećemo neutronske zvijezde su pulsari. Što su pulsari? Pulsari su brzrotirajuće neutronske zvijezde koje proizvode ponavljajuće signale nastale zbog neravnomjernog intenziteta elektromagnetskog zračenja na površini neutronske zvijezde. Neravnomjernost intenziteta elektromagnetskog zračenju je uzrokovana magnetskim poljem neutronske zvijezde i to na način da je intenzitet elektromagnetskog zračenja veći na magnetskim polovima nego na drugim djelovima površine neutronske zvijezde. Pulsacije s druge strane dolaze zato što polarne regije neutronske zvijezde vrtnjom nailaze na liniju vida promatrača na Zemlji. Naravno bitno je napomenuti da se os rotacije pulsara i magnetska os ne poklapaju.

Takav model pulsara se popularno zove "model svjetionika" (slika 1) i njegova bitna stavka jest da je pulsar jedino moguće promatrati ako se Zemlja nalazi na putu magnetske osi pulsara. Prema spektru zračenja u kojem proizvode pulsacije, pulsare dijelimo na radiopulsare, rentgenske pulsare i γ -pulsare. Neki pulsari poput pulsara u maglici Rakovice (Crab) ili Geminga pulsara su aktivni u sva tri područja elektromagnetskog spektra. Pošto pulsari mogu biti ili izolirani ili u dvojnim sustavima, njihova specifična evolucija i mehanizmi proizvodnje elektromagnetskog zračenja mogu se dosta razlikovati. Prema izvoru energije pulsare možemo podijeliti na:

- **Rotacijski pogonjene** – Energija elektromagnetskog zračenja potječe od gubitka rotacijske energije pulsara koji potječe od brzrotirajućeg magnetskog polja neutronske zvijezde koje ubrzava elektrone do relativističkih brzina. Ti isti relativistički elektroni potom u istom magnetskom polju proizvode sinhrotronsko radiovalno zračenje.
- **Akreციjski pogonjene** – Gravitacijska energija materije koja pada s akrecijskog diska na površinu je izvor energije rentgenskog zračenja koje promatramo na Zemlji.

- **Magnetari** – Energija zračenja potiče od raspada veoma jakih magnetskih polja.



Slika 1. a) "Model svjetionika" za pulsare.

b) Kompozitna optičko-rentgenska slika maglice u Rakovici.

(Izvor: J. Hester et al., ASU, CXU, HST, NASA)

Zbog mehanizma rotacijskog pogona izolirani pulsari usporavaju svoju vrtnju dok u slučaju akrecije materije iz okoline ili sa susjedne obične zvijezde mogu ubrzati vrtnju. Osim po načinu proizvodnje energije elektromagnetskog zračenja, aktivnom području elektromagnetskog spektra, pulsare možemo podijeliti i prema periodu vrtnje na sljedeće tipove:

- **"Obični" pulsari**

"Obični" pulsari su pulsari s periodom rotacije od nekoliko desetaka milisekundi do nekoliko desetaka sekundi i magnetskim poljem B reda veličine od 10^7 do 10^9 T, makar postoje slučajevi "običnih" pulsara s čak 10^{10} T iako jako rijetko. U astrofizičkim aspektu radi se o relativno mladim pulsarima starosti otprilike od 10^5 do 10^8 godina.

- **Milisekundni pulsari**

Milisekundni pulsari su jako stari pulsari starosti otprilike od 10^7 do 10^{10} godina, relativno slabijeg magnetskog polja jakosti od 10^4 do 10^6 T kojima je vrtnja takoreći "reciklirana" akrecijom materije iz okoline ili sa susjedne zvijezde. Kao što ime kaže milisekundni pulsari su pulsari s jako kratkim periodima rotacije manjim od 30 ms. Relativno "mala" magnetska polja naspram "običnih" pulsara milisekundnim pulsarima omogućuju izuzetno pravilnu vrtnju, točnošću usporedivu s atomskim satovima.

- **Anomalni pulsari**

Anomalni rentgenski pulsari su specifični zbog svojeg relativno dugog perioda vrtnje od 6 do 12 sekundi, veoma jakih magnetskih polja reda veličine od 10^9 do 10^{11} T i snažne aktivnosti u rentgenskom dijelu elektromagnetskog spektra. Pošto su veoma mladi objekti velikih magnetskih polja sumnja se da su zapravo magnetari, mlade neutronske zvijezde, izuzetno snažnih magnetskih polja. Alternativno objašnjenje govori da se zapravo radi o neutronske zvijezdama relativno slabijih magnetskih polja od 10^8 T na koje sporo upada materija ostala od supernove preko akrecijskog diska.

Uz izolirane pulsare postoji cijeli skup kategorija vezan za neutronske zvijezde koje se ne vrte, te pogotovo za pulsare u dvojnim sustavima poput masivnih rentgenskih dvojnih zvijezda (HMXB), laganih rentgenskih dvojnih zvijezda (LMXB), dvojnih pulsara itd.

Struktura neutronske zvijezde i jednadžba stanja

Materija neutronske zvijezde je, kako smo već spomenuli, degenerirana i iako nam tlak ne ovisi o temperaturi i dalje je jako teško modelirati njenu jednadžbu stanja:

$$p = p(\rho), \quad (7)$$

pogotovo u njejoj unutrašnjosti gdje nailazimo na neutronske degenerirane materiju kod koje do izražaja dolaze komplicirana nuklearna međudjelovanja. Veliki problem je da su nuklearni eksperimenti na Zemlji, koje koristimo da dobijemo bilo kakav uvid u strukturu neutronske zvijezde, daleko od temperatura i gustoća koje nailazimo kod neutronske zvijezde. S time smo osuđeni koristiti ekstrapolaciju parametara iz eksperimenata na Zemlji. No i tako donekle možemo nešto reći o strukturi neutronske zvijezde, te od čega se ona sastoji (slika 2).

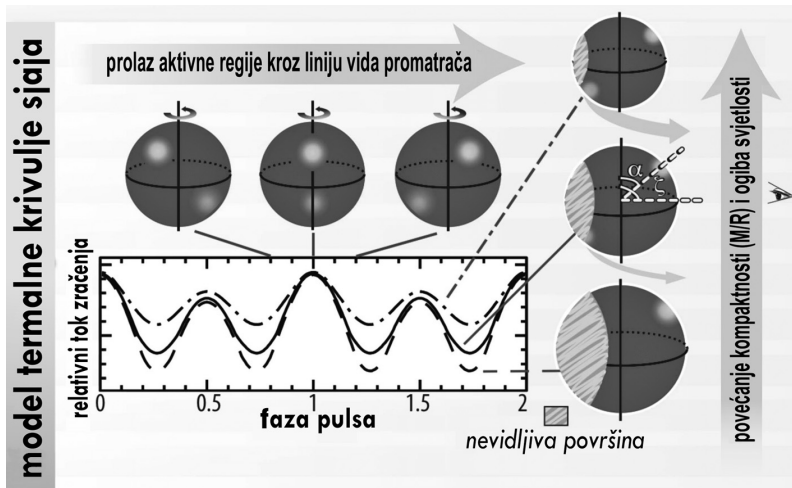
Površinu neutronske zvijezde čine ioni željeza ^{56}Fe uronjeni u plin elektrona koji na gustoćama od 10^6 g/cm^3 postaje degeneriran. U takvoj sredini električna i toplinska vodljivost postaje izuzetno velika jer elektroni mogu prijeći velike udaljenosti bez međudjelovanja. Porastom gustoće, što dublje idemo prema središtu neutronske zvijezde, nailazimo na jezgre sve bogatije neutronima, dok na gustoći od $4 \cdot 10^{11} \text{ g/cm}^3$ dolazi do “kapanja” neutrona iz atomskih jezgara. Povećanjem gustoće sve više neutrona “kapa” iz jezgara, dok same “jezgre” više nisu sferične. Naime na gustoćama otprilike od $0.9 \cdot 10^{14}$ do $1.4 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$ protoni i neutroni se prvo unutar neutronske superfluida (fluida bez viskoznosti) vežu u velike “okruglice”, zatim u “špagete” i “lazanje”, te potom u “antilazanje”, “antišpagete” i “antiokruglice”. Navedeni prijelaz se inače naziva fazom “nuklearne tjestenine”. Kada porastom gustoće nestanu i “antiokruglice” nastaje homogena nuklearna materija koja se sastoji uglavnom od neutrona s malenom primjesom protona, elektrona i ponešto miona, takozvani npe μ sastav materije koji je degeneriran. Osim što je homogena nuklearna materija sama po sebi teška za modeliranje i izvod jednadžbe stanja, mnoge teorije predviđaju pojavu egzotičnih čestica na gustoćama većim od približno $5.6 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$.



Slika 2. Struktura neutronske zvijezde.

No kako saznati koja od tih jednadžba stanja dobro opisuje strukturu neutronske zvijezde? Mjerenja u laboratorijima na Zemlji su u parametrima temperature i gustoće predaleko od stvarnih vrijednosti temperatura i gustoća u neutronske zvijezdi. Jedini način da nađemo stvarnu jednadžbu stanja je promatranjem neutronske zvijezde i mjerenjem njihovih općih karakteristika poput mase M i radijusa R . Zašto? Zato što postoji isključiva veza između jednadžbe stanja $p(\rho)$ i ovisnosti mase o radijusu neutronske zvijezde $M(R)$. Masu neutronske zvijezde možemo lako mjeriti u dvojnim sustavima koji sadrže neutronske zvijezde, te dobivenu masu usporediti s postojećim modelima na masa-radijus grafu. Ali tu nailazimo na probleme, naime mjerenje mase neutronske zvijezde nije dovoljno dobro ograničenje da se odabere određena jednadžba stanja. Nužno je izmjeriti radijus neutronske zvijezde. No tu nailazimo na problem – neutronske zvijezde približnog radijusa 10 km su u astrofizičkim okvirima izuzetno male. Jedino precizno mjerenje radijusa zvijezde smo obavili kod Sunca, a uz interferometrijske tehnike s manjom preciznošću i kod većih zvijezda u svemirskom susjedstvu.

Izgleda da smo odjednom naišli na teško premostivi tehnički zid. Jesmo li? Nemojmo zaboraviti da su neutronske zvijezde izrazito kompaktni objekti, to jest da je jako velika masa zgurana u maleni prostor. Velikom kompaktnošću neutronske zvijezde su i objekti s izraženim fenomenima opće teorije relativnosti. Jedan od poznatih fenomena opće teorije relativnosti je gravitacijsko ogibanje svjetlosti zato što svjetlost prolazeći kraj velikih masa putuje kroz zakrivljeno prostor-vrijeme. Što je veća kompaktnost objekta, koju mjerimo kao omjer mase i radijusa objekta M/R , to je veće gravitacijsko ogibanje svjetlosti (slika 3). U promatranju neutronske zvijezde to znači da vidimo i stvari iza geometrijskog horizonta neutronske zvijezde te da time što je zvijezda kompaktnija to više vidimo od strane koja bi nam za mnogo manju masu i kompaktnost bila nedostupna. Znajući da je intenzitet zračenja neravnomjeran na površini neutronske zvijezde zbog kompaktnosti imat ćemo različito oblikovanje pulsirajućeg signala. Misijom NICER (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/index.html>), koja se planira za 2016. godinu, pokušati ćemo izvesti upravo to – preko opće teorije relativnosti učiniti ono što nam se prije činilo nemogućim, a to je izmjeriti radijus neutronske zvijezde.



Slika 3. Utjecaj kompaktnosti na oblik krivulje sjaja zbog gravitacijskog ogiba. (Izvor: NASA i misija NICER)