

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 7 (1979/1980)

Številka 1

Strani 49-57

Mitja Rosina:

NEVTRONSKE ZVEZDE

Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/7/410-Rosina.pdf>

© 1979 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2009 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.



NEVTRONSKE ZVEZDE

Podobno kot ljudje, preživljajo tudi zvezde v svojem življenju mladost, zrela leta in starost. Posamezno obdobje v življenju zvezde se loči od drugega predvsem po sili, ki preprečuje, da bi se zrušila pod lastno težo. *Mlada zvezda* je plinasta. V njej notranjih vročih plasteh se gibljejo molekule tako hitro, da vzdržujejo s trki težo zunanjih plasti. Tlak, ki je posledica termičnega gibanja molekul, imenujemo termični tlak. Toda to stanje ni stabilno. V njem ima zvezda zanimivo lastnost, da se segreva, ko seva in oddaja energijo. Tega ni težko pojasniti.

Mislimo si, da bi padla temperatura, ko odda zvezda energijo v okolico, kakor smo vajeni na primer pri loncu vroče vode, ki oddaja toploto. Toda pri zvezdi bi bil s tem zvezan padec tlaka, ki ne bi več ključoval teži. Zvezda se nekoliko sesede in se pri tem segreje na račun dela, ki ga opravi sila teže. Končna temperatura mora biti večja od začetne, kajti na koncu je tlak večji kot na začetku. Ob skrčitvi zvezde se namreč poveča sila teže, ki narašča obratnosorazmerno s kvadratom radija. Mlada zvezda se torej krči in v središču segreva, dokler se ne vžge termonuklearno gorivo: jedra vodika se začnejo spajati v helij.

S tem se začne *zrelo obdobje zvezde*, ki traja nekako od letnika 100 milijonov do letnika 10 milijard. Tudi v tem obdobju je zvezda plinasta. Toplota, ki se sprošča s termonuklearnimi reakcijami, krije vse izgube zaradi sevanja v okolico. Zvezdi se ni treba več krčiti, da bi krila te izgube s težnostno energijo.

jo. V zrelem obdobju se velikost zvezde, njena temperatura in druge lastnosti le malo spreminjajo, le jedrsko gorivo se ne prestando troši. Ob koncu zrelega obdobja pride zvezda v "drugo puberteto", ko zmanjka v središču goriva - vodika. Tedaj se zo pet sredica zvezde krči in segreva, dokler ni dovolj vroča za naslednjo termonuklearno reakcijo, to je spajanje jeder helija v jedra ogljika, kisika itd. Gorenje helija zadrži nadaljnje krčenje za nekaj sto milijonov let. Med drugim krčenjem sredice sprejme plašč zvezde veliko toplote in se zaradi tega raztegne in ohladi. Namesto, da bi seval modro ali rumeno, kot je seval prej, seva potem le še rdeče. V "drugi puberteti" postane torej zvezda rdeča orjakinja.

Na *starost* zmanjka zvezdi vsega goriva in sredica se zopet začne krčiti. Plašč se zopet širi in deloma izgubi v vesolje. Pri lažjih zvezdah, ki imajo podobno maso kot naše Sonce, poteka ta "eksplozija" razmeroma počasi; na koncu ostane sama sredica - *bela pritlikavka*. Pri težjih zvezdah se to zgodi eksplozivno. Tedaj govorimo o eksploziji supernove. V nekaj minutah implodira sredica in iz nje nastane verjetno *nevtronska zvezda* ali *črna luknja*. Plašč pa eksplodira in se širi v vesolje v obliki meglice*. Nekateri meglice so torej znak, da je tam eksplodirala zvezda kot supernova in da smemo na tistem kraju iskati nevtronsko zvezdo. Zvezda preživi torej svojo starost ali kot bela pritlikavka, kot nevtronska zvezda ali kot črna luknja.

Bele pritlikavke, ki jih že dolgo poznajo, imajo maso kot naše Sonce ali manj in so velike kot Zemlja. So v stabilnem ravnotežju in se ne krčijo več. Sili teže kljubuje tlak zaradi kvantnomehanskega gibanja elektronov. Po Paulijevem izključitvenem načelu namreč ne moreta biti niti dva delca v istem stanju. Niti dva elektrona ne moreta imeti hkrati na istem kraju iste h_i trostj, niti ne moreta sočasno mirovati. Čim bliže so elektroni drug drugemu, tem hitreje se morajo gibati in tem večji tlak izvajajo. To velja celo pri temperaturi absolutne ničle.

*Tako meglico, ki je ostanek ene zvezde, moramo razlikovati od meglenice (galaksije), to je sistema množice okrog 10 milijard zvezd. V zadnjem času je pritegnila največ pozornosti meglica Rakovica. Glej npr. Proteus 33, št. 5, str. 198 (1971).

Vse trdne in tekoče snovi, ki jih poznamo na Zemlji, so stabilne in se ne sesedajo ravno zaradi tega kvantnomehanskega tlaka. Snov v središču bele pritlikavke pa je milijonkrat gostejša od snovi na Zemlji in zato lahko zdrži tlak nad 1000 bilijonov atmosfer. Kvantnomehanski tlak je učinkovitejši od termičnega: bele pritlikavke se ne krčijo več, sevajo samo še na račun nakopičene toplotne energije. Sredica ima v začetku temperaturo krog 100 milijonov stopinj, v nekaj milijardah let pa se zvezda ohladi, seva vse šibkeje in na koncu bi ji lahko rekli črna pritlikavka.

Nevtronska zvezda. Do močne implozije sredice v supernovi pride, ker pri težkih zvezdah celo kvantnomehanski tlak elektronov ne vzdrži več teže zvezde. Elektroni se ne upirajo več tla ku, temveč se združijo s protoni v nevtrone*. Sredica se zruši vase in se zaustavi šele, ko doseže gostoto skoraj milijon ton na kubični milimeter. S tolikšno gostoto, ki je okoli 10^{14} krat večja kot pri običajni snovi, imamo opraviti npr. v atomskih jedrih. Pri taki gostoti more kljubovati teži zvezde kvantnomehanski tlak nevtronov. Za nevtrone, ki so 2000 krat težji od elektronov, postane Paulijevo izključitveno načelo odločilno šele pri taki silni gostoti in nevtroni lahko s svojim gibanjem vzdržujejo tlake do tisoč kvadriljonov (10^{27}) atmosfer. Nevtronska zvezda ima maso približno kot naše Sonce, njen polmer pa meri samo okrog 10 km.

Črna luknja. Če ima začetna zvezda precejkrat večjo maso kot naše Sonce, pričakujemo, da se še huje sesede kot nevtronska zvezda. Zaradi silnega težnostnega polja iz nastale gmote ne more več uiti niti svetloba. Tako zvezdo, ki se je ne da videti, imenujemo črna luknja.

Astronomi in fiziki vneto iščejo črne luknje in nekaj objektov, ki so zelo verjetno črne luknje, so že našli med vesoljskimi izvori rentgenskih žarkov.

Oglejmo si sedaj *supergosto snov* v nevtronski zvezdi! Ta snov

* Pri tej reakciji nastane tudi lahek nevtralen delec - nevtrino, ki zbeži v vesolje.

je podobna snovi v atomskem jedru, s katero se približno ujema po gostoti. Tudi gradniki so v obeh primerih isti: pozitivni protoni in nevtralni nevtroni. Različen pa je sestav: medtem ko je v atomskem jedru približno polovica nevtronov in polovica protonov, je v sredici nevtronske zvezde 96% nevtronov, 2% protonov in 2% elektronov. Jedrske sile so namreč močnejše, če je v snovi prav toliko nevtronov kot protonov, kar da svoj pečat atomskim jedrom. Toda pozitivni protoni se med seboj odbijajo z električno silo. V atomskih jedrih jih je malo in pač potrpijo. V resnici že v jedru urana, v katerem jih je 92, ne potrpijo več, saj se uran razcepi npr. v reaktorju ali atomski bombi. V nevtronski zvezdi pa množica protonov potrpi samo, če nevtralizira enako število elektronov njihov vpliv. Toda zaradi Paulijevega izključitvenega načela v sredici nevtronske zvezde ne more biti več elektronov kot 2%. Če jih je več, se kar združijo s protoni v nevtrone. Kljub tej razliki si smemo predstavljati nevtronsko zvezdo kot eno samo ogromno atomsko jedro.

Jedrska snov je v tekočem agregatnem stanju, saj lahko popišemo atomsko jedro približno kot kapljico "jedrske tekočine". Pričakujemo, da je tekoča tudi supergosta snov v sredici nevtronske zvezde in jo imenujemo "nevtronska tekočina". V skorji nevtronske zvezde pa sta tlak in gostota manjša (gostota meri kak kilogram na kubični milimeter, podobno kot v sredici bele pritlikavke). Zato je snov v skorji nevtronske zvezde sestavljena iz jeder in elektronov, kot na Zemlji in ne iz skoraj samih nevtronov. Nekateri domnevajo, da je skorja nevtronske zvezde zaradi velike gostote trdna kljub temperaturi več milijonov stopinj.

Lastnosti nevtronskih zvezd, ki smo jih že opisali, so v glavnem sad teoretičnega razglabljanja. Po poznavanju običajne snovi in atomskih jeder smo sklepali o neznanih in nenavadnih razmerah. Čas je, da povemo, kako so odkrili nevtronske zvezde in katere lastnosti so res videli. Najprej so jih "videli" z radijskimi teleskopi. To so ogromne parabolične antene, ki spre-

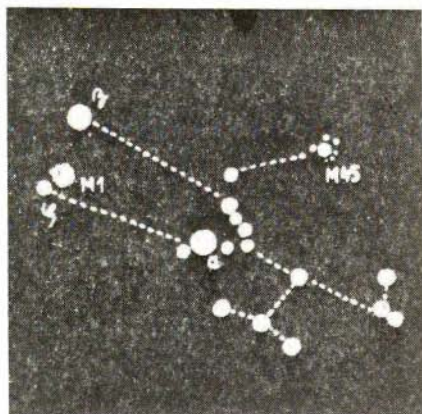
jemajo radijske valove. Zvezde namreč ne sevajo samo elektromagnetnega valovanja z valovno dolžino vidne svetlobe, temveč tudi elektromagnetno valovanje z drugimi valovnimi dolžinami, npr. z dolžino nekaj metrov, kot jih uporabljamo pri radiu in televiziji. Leta 1967 in 1968 so v Cambridgu v Angliji opazili z velikim presenečenjem, da nekatere zvezde oddajajo radijske signale v kratkih pulzih, ki se redno ponavljajo s presledkom ene sekunde. To je bila velika senzacija. Nekateri so celo pomislili, da utegnejo biti ti signali sporočila neke oddaljene civilizacije, vendar so to kmalu ovrgli. Nova nebesna telesa so imenovali *pulzarje*. Sedaj poznamo že 150 pulzarjev. Vsi imajo izredno točne periode. Najhitrejši je v meglici Rakovici in pošilja pulze vsakih 30 milisekund, najpočasnejši pa vsake 3 sekunde. Vsi ti pulzarji sevajo radijske pulze, edino od pulzarja v Rakovici so doslej opazili tudi pulze vidne svetlobe z enako periodo kot radijske in celo pulze rentgenske svetlobe. Morda nas presenetijo, da utripanja pulzarja v Rakovici niso ugotovili še pred izumom radioteleskopov, saj utripa v vidni svetlobi. Toda ta pulzar je zelo šibka in na videz nepomembna zvezdica, vidna samo z najmočnejšimi teleskopi. To zvezdico so gledali le na fotografijah, na katerih se zaradi dolge ekspozicije zabrišejo utripi. Tudi pri opazovanju skozi teleskop okoli ne bi ločilo bliskov s pogostostjo 33 na sekundo. Kdo bi slutil, da od ogromne množice zvezd na nebu, ki mirno sevajo, utripa ravno ta šibka zvezdica? Sedaj opazujejo tudi ostale pulzarje, če se vidi tudi tam kakšna šibka zvezdica, ki utripa v vidni svetlobi.

Kateri *argumenti* govore za to, da so pulzarji res nevtronske zvezde? Precej pulzarjev so našli v sredi meglic, ki veljajo za ostanek supernov*. To kaže, da je pulzar implodirana sredica bivše rdeče orjakinje, torej stare zvezde.

Pri starih zvezdah lahko izbiramo le med belo pritlikavko, nevtronsko zvezdo in črno luknjo. Periodnih pojavov, s katerimi

* Kjer je danes Rakovica, so leta 1054 kitajski astronomi videli supernovo, ki je svetila celo podnevi. To dokazuje, da je Rakovica ostanek eksplozivnega plašča supernove.

Shema ozvezdja Bika, kjer je meglica Rakovica (Crab Nebula) - M1; α Aldebaran, najsvetlejša zvezda v ozvezdju Bika; M45 Gostosevci - Plejade.



Rakovica - ostanek supernove, ki je eksplodirala 1054 leta; s puščico je označena lega pulzarja NP 0532 s periodo 0,03 s.

bi pojasnili kot ura točno utripanje pulzarjev, pa tudi ni na pretek: *nihanje* zvezde navzven-navznoter, *kroženje* zvezd dvojčic (ali planeta okrog zvezde) in *vrtenje* okrog lastne osi. Prva možnost ("dihanje") odpade, ker pokažejo računi, da so periode belih pritlikavk precej daljše, periode nevtronskih zvezd pa precej manjše kot izmerjene periode pulzarjev. Pri drugi možnosti odpade kroženje okrog bele pritlikavke: pri njem bi morala biti hitrost tolikšna, da bi že pri precej manjši hitrosti razpadla zvezda zaradi plimskih sil*. Pri tretji možnosti zopet odpade vrtenje bele pritlikavke, ker bi bila zahtevana obodna hitrost prevelika; zvezda bi razpadla zaradi centrifugalne sile.

Ključ za izbiro med edinima preostalima pojavoma, kroženjem okoli nevtronske zvezde in vrtenjem nevtronske zvezde okoli lastne osi, je dalo precizno merjenje periode. Opazili so, da se perioda pulzarjev počasi daljša, v večini primerov se bo po dvojila po kakih 10 000 letih. To lahko pojasnimo pri vrtavki, ki s sevanjem izgublja energijo in se zato počasi ustavlja. Pri kroženju pa bi bilo ravno obratno. Če na primer planet izgublja energijo, se po špirali približuje Soncu. V bližini Sonca je privlak močnejši, zato se mora planet gibati vse hitreje, se pravi s krajšo periodo, da je centrifugalna sila lahko v ravnovesju s težnostno. Če bi bil pulzar krožeči planet ali zvezdi dvojčici, bi se morala torej perioda krajšati, kar je v nasprotju z opazovanji.

Po tem smemo imeti v okviru današnjega znanja in opazovanj pulzarje za *vrteče se nevtronske zvezde*. Medtem ko svetijo mlade zvezde na račun krčenja (težnostne energije), zrele zvezde na račun gorenja (jedrske energije), bele pritlikavke na račun na kopičene toplotne energije, pa izkoriščajo nevtronske zvezde mehansko rotacijsko energijo. Nevtronske zvezde si ob eksplozi

* Pri hitrih pulzarjih, kot je pulzar v Rakovici, bi morala biti hitrost kroženja okrog bele pritlikavke, oz. obodna hitrost vrteče se bele pritlikavke, večja od svetlobne, kar je seveda nemogoče. Prepričajmo se z računom: $v = \text{obseg}/\text{perioda} = 2\pi r/T = 2.3,14.6000 \text{ km}/0,03 \text{ s} \sim 1000\,000 \text{ km/s}$. Z znakom "-" poudarimo, da nas zanima le stopnja.

ji supernove nakopičijo tolikšno mehansko energijo, da z njo lahko zalagajo vso svojo meglico še celih 100 000 let. Dolgo je bila uganka, od kod jemlje Rakovica energijo, da lahko sveti kot 30 000 sonc. Sedaj vemo, da jo zalaga z energijo njen pulzar na račun svoje rotacijske energije. Opišimo račun, katerega rezultat se lepo ujema z opazovanji in dodatno vliva zaupanje v teorijo o nevtronskih zvezdah. Skladno z lastnostmi supergoste snovi in enačbo za ravnovesje zvezde predpostavimo, da ima nevtronska zvezda v Rakovici približno maso našega Sonca ($2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$) in radij 10 km. Hitrost vrtenja meri na ekvatorju $v = 2\pi r/T = 2.3 \cdot 10 \text{ km}/0,03 \text{ s} = 2000 \text{ km/s}$. Če bi se vse plasti vrtele s to hitrostjo, bi bila rotacijska kinetična energija pulzarja $W = mv^2/2 = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg} \cdot 4 \cdot 10^{12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} / 2 = 4 \cdot 10^{42} \text{ joulov}$. V resnici je vrednost nekajkrat manjša, ker je pulzar nekoliko lažji in notranje plasti se gibljejo počasneje. Pulzar pa bi se po izmerjenem naraščanju periode ustavil v 2500 letih, če bi se ustavljal enakomerno. Iz obeh podatkov izračunamo moč, ki jo oddaja pulzar: $P = W/t = 4 \cdot 10^{42} \text{ joule} / (2500 \cdot 365 \cdot 3600 \text{ sekund}) = 10^{32} \text{ wattov}$. Ta ocena se ujema z opazovanji, da seva cela Rakovica energijski tok približno 10^{31} wattov . Za primerjavo naj navedemo, da seva naše Sonce le energijski tok $3,7 \cdot 10^{26} \text{ wattov}$. Kako pa pulzar v Rakovici zalaga svojo meglico s tolikšno energijo? Verjetno brizga vanjo curek višokoenergijskih elektronov, ki potem sevajo v magnetnem polju Rakovice.

Nevtronsko zvezdo lahko primerjamo z vztrajnikom girobusa. Girobus je avtobus, ki mu na začetni postaji z elektromotorji za vrtiljo velik vztrajnik, tako da lahko z zalogo rotacijske kinetične energije pripelje do končne postaje (to energijo prenaša s posebnim menjalnikom z vztrajnika na pogonska kolesa). Tudi nevtronsko zvezdo, ko nastane ob eksploziji supernove "navije" implozija na veliko hitrost vrtenja, da še 100 000 let "vozi", se pravi zalaga z energijo celo Rakovico.

Življenjski razvoj zvezd lahko primerjamo z bančnim poslovanjem. Glavni kapital zvezde je njena težnostna energija, potro

šnja pa je sevanje v okolico. Mlada zvezda troši na račun svojega kapitala. Toda na ta način bi v nekaj sto milijonih letih zapravila večino kapitala. Zato zvezda v zrelih letih kapitala ne troši več (se skrči in ne izrablja težnostne energije), temveč jemlje potrošniško posojilo iz banke "jedrska energija". Na račun tega potrošniškega posojila lahko živi (seva) celih 10 milijard let. Ko v banki "jedrska energija" zmanjka fondov, je s posojilom konec in zvezda doživi bankrot (eksplozijo supernove). Ob tej priliki

(1) Vrne iz svojega kapitala večino posojila. Zaradi silne vročine se namreč jedra spet razkrojijo v protone in nevtrone. Za to reakcijo, ki poteka obratno kot zlivanje atomskih jeder, uporabi namreč zvezda prav toliko energije, kot se je prej sprostila z zlivanjem.

(2) Ogromno kapitala zapravi z razvratnim sevanjem. Supernova seva nekaj dni tako močno kot cela galaksija s 10 milijardami sonc in v tem času ne izseva dosti manj energije kot prej v celem življenju 10 milijard let.

(3) Ostanek kapitala naloži v banko "rotacijska energija", da lahko do smrti, ko ugasne, še razkošno živi 100 000 let (z meglico vred seva pulzar v začetku bolj kot 30 000 sonc).

Na koncu pojasnimo še, zakaj seva nevtronska zvezda v *pulsih*. Nevtronska zvezda ima močno magnetno polje, najbrž bilijonkrat močnejše kot naša Zemlja. Podobno kot na Zemlji magnetna pola ne sovpadata z geografskima. Iz polov brizga curek zelo hitrih elektronov, ki krožijo povijačnicah okrog magnetnih silnic. Če nabit delec kroži, seva elektromagnetne valove (od radijskih pa morda do vidnih in rentgenskih). Izsevano valovanje leži v ravnini pravokotni na smer silnic - podobno kot pri svetilniku. Svetilnik sveti v ekvatorialni ravnini nevtronske zvezde. Pri vsakem vrtljaju nevtronske zvezde nas ta svetilnik enkrat ali dvakrat oplazi.

Mitja Rosina
