

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik **26** (1998/1999)

Številka 5

Strani 282-287

Andrej Čadež:

KAKO SMO SPOZNAVALI PULZARJE

Ključne besede: astronomija, pulzarji.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/26/1381-Cadez.pdf>

© 1999 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

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

KAKO SMO SPOZNAVALI PULZARJE

Več razlogov mi narekuje, da govorim o pulzarjih. Med najpomembnejše spada dejstvo, da je bila predlani Nobelova nagrada za fiziko pravzaprav že tretjič podeljena v zvezi s pulzarji. Torej spadajo te čudne zvezde gotovo med najzanimivejša nebesna telesa. Obstaja pa tudi osebni razlog; dolga leta sem si želel "videti" pulzar in ta želja se mi je pred dobrima dvema letoma prvič uresničila. Skupaj z Bojanom Dintinjano in Mirjam Galičič smo na Golovcu v Ljubljani opazovali mežikanje slavnega pulzarja v meglici Rakovici. Predani jeseni in v marcu lani pa sva z Mirjam opazovala taisti pulzar v Rakovici z velikim 1.82 metrskim teleskopom in z našim detektorjem v Asiagu v Italiji. (Od takrat, ko je bilo to zapisano, smo opazovali pulzar še večkrat na velikih teleskopih, vendar o tem kdaj drugič.)

Če pogledamo v leksikon, se poučimo, da so pulzarji vrteče se nevtronske zvezde, ki oddajajo radijske pulze, ko njihova magnetna polja vplivajo na okoliške elektrone. Odkrili so jih leta 1967 v skupini prof. Hewisha na univerzi v Cambridgeu v Angliji. Najprej seveda niso vedeli, da gre za nevtronske zvezde. Presenečeni so bili, da so opazili radijske zvezde, ki izredno hitro mežikajo – celo do več desetkrat na sekundo. To je bilo nekaj zelo nenavadnega in povsem nepričakovanega. Kako je mogoče, da telo, kot je zvezda, torej telo, ki ima maso Sonca, oziroma 300 000-krat večjo maso od Zemlje, pomežikne nekajkrat v sekundi? Vsakdanja izkušnja nas uči, da se masivni predmeti premikajo oz. spreminjajo počasi. Če udarimo po majhnem zvončku, visoko zapoje, velik pa globoko zadoni. Za ton zvenenja zvona sta odgovorna njegova velikost in hitrost, s katero se zvok širi po kovini. Poje s tako frekvenco, da se vrh vala ujame z vrhom, ko potuje z zvokom naokrog po plašču. Rekli boste, da to ne more biti edini vzrok, zakaj naj velik zvonec doni globoko, majhen pa visoko, saj lahko izberemo za velikega snov z veliko hitrostjo zvoka, za majhnega pa tako, v kateri je zvočna hitrost počasna. Tedaj bo majhen zvonček pel globoko, velik pa visoko. Vendar se pokaže, da je hitrost zvoka v različnih snoveh sicer lahko nekoliko različna, vendar kakšnih posebno velikih razlik med različnimi materiali ne poznamo. Zato zelo velik zvonec vedno doni globoko, zelo majhen pa cinglja visoko. Ta vsakdanja izkušnja nam torej pove tudi to, da se je narava odločila (vsaj na Zemlji) ustvariti snovi, v katerih se zvok širi s hitrostjo nekaj tisoč metrov v sekundi. Lahko je le nekoliko višja ali nekoliko nižja, veliko pa se od te vrednosti ne razlikuje. Tudi zvezde sledijo svoji zakonitosti, ki jo razumemo na podoben način. Njihova snov je v stanju zelo vročega in razmeroma gostega plina, zato se zvok v njih širi s hitrostjo nekaj deset tisoč metrov v sekundi. Tudi zvezde

so lahko zvončki, ki zaradi svoje velikosti donijo zelo, zelo globoko – enkrat zanihajo kvečjemu v nekaj urah, včasih pa traja en nihaj tudi po več kot eno leto. Če je amplituda takih nihanj pri nekaterih zvezdah velika, jih spremlja tudi sprememba sija. Astronomi tovrstna nihanja opazujejo pri nekaterih zvezdah že več kot sto let. Teoretična razlaga opazovanega pojava z nihanjem kot pri zvoncu se zelo dobro ujema z opazovanji zvezd, imenovanih kefeide. Danes poznamo na stotine takih zvezd. Pulzarji pa so bili pravi šok – nekaj tako mogočnega, kot je zvezda, utripa ne samo desetkrat ali stokrat, ampak do več milijonkrat hitreje od normalne zvezde. Zvezda doni (?) skoraj tako visoko kot zvon slavne ure na london-skem parlamentu. Ali res doni? Po dobrem mesecu opazovanj so našli še nekaj nenavadnih lastnosti utripanja pulzarjev. Utripanje je nenavadno enakomerno, njegova perioda pa zelo natančno narašča s časom. Vendar utripanje ni podobno nihanju nihala, pulzar oddaja v zelo kratkih sunkih, ki trajajo le desetino periode ali pa še manj. Mnogi pulzarji oddajo celo dva neenaka pulza v vsaki periodi. Utripanje kefeid ima drugačne značilnosti: nihanje sija je podobno sinusnemu (kot pri nihanju nihala) in je enakomerno, vendar ne povsem. Razlog za to danes dobro razumemo in je podoben kot pri zvonu: če se temperatura zvona malo poviša, se ta raztegne in doni za spoznanje niže kot prej, in obratno, frekvenca se rahlo poveča, če se zvon ohladi. V vrhnjih plasteh mnogih kefeid tečejo razni konvektivni tokovi, ki odnašajo energijo z zvezde. Ker so taki vetrovi slučajni pojavi, odnašajo energijo včasih za spoznanje hitreje, včasih pa za spoznanje počasneje, zato zvezda nima vedno natanko enakih pogojev in za spoznanje spreminja ton, s katerim doni. Nasprotno pa pulzarji brenčijo povsem enakomerno, bolje od najboljših ur, le čedalje bolj (a enakomerno) počasi.

Na osnovi teh podatkov so astronomi prišli do sklepa, da je treba iskati razlago za utripanje pulzarjev druge. Preprostejšo razlago je obetala hipoteza, da so pulzarji vrteče se zvezde, nekakšni vesoljski svetilniki, ki oddajajo ozek snop (ponavadi radijske) svetlobe. Tega zaznamo, ko nas ob vrtenju oplazi. Obetali so si, da bo mogoče v okviru take hipoteze pojasniti vsaj tri lastnosti utripanja, ki jih tako ločijo od kefeid: utripanje v kratkih pulzih, izredno stabilnost periode in njeno enakomerno in počasno naraščanje. Rešiti pa je bilo treba še problem, zakaj seva zvezda le v eno ali dve smeri kot svetilnik, in predvsem, kako je mogoče, da bi se zvezda zavrtela po nekajkrat v sekundi.

Problem zvona se je pri zadnjem vprašanju pokazal za ključnega. Pokazati se da namreč naslednje: Recimo, da imamo kovinsko vrtavko, ki zacinglja s frekvenco 2 500 Hz, če udarimo po njej. To vrtavko lahko zavrtimo samo do 2 500 obratov v sekundi, pri hitrejšem vrtenju pa bi

se zaradi velikega centrifugalnega pospeška razletela.¹ Če uporabimo ta izrek pri pulzarjih, ugotovimo, da bi pulzarji, če so res vrteče se zvezde, zadoneli oz. zabrenčali še z višjo frekvenco, kot utripljejo, če bi mogli s kakšnim orjaškim kladivom udariti po njih. Visoka frekvenca pulzarjev nam v skladu s tem izrekom pripoveduje, da mora val s hitrostjo zvoka prečkati pulzar v morda nekaj deset milisekundah. Res nenavadno! Če bi bil pulzar železen, bi ne smel biti večji kot kvečjemu nekaj metrov. To pa je seveda prav neumen odgovor, saj nekajmetrske krogle ne opazimo niti na razdalji nekaj kilometrov in nikakor ne more sevati toliko ali skoraj toliko kot manjša zvezda. Iz zagate se lahko rešimo le, če obstaja snov, v kateri je hitrost zvoka bistveno, bistveno večja. Na Zemlji take snovi prav gotovo ni. Fizika trdne snovi nam celo zagotavlja, da je ne more biti, ker določa trdnost in gostoto snovi predvsem igra med kvantnomehanskimi odbojnimi silami med elektroni in privlačna električna sila med pozitivnimi jedri in negativnimi elektroni. Urejenost atomov je v različnih snoveh različna in to določa razlike v trdnosti, trdoti in gostoti snovi. Vendar so te razlike razmeroma majhne in dopuščajo razlike v hitrosti zvoka morda za faktor 10, nikakor pa ne milijonskih faktorjev, ki bi jih potrebovali. Pulzarje moramo vsekakor iskati med zvezdami, ki so bistveno drugačne od normalnih zvezd, sestavljati jih mora izjemno eksotična snov.

Kakšna mora biti torej snov, da bomo lahko razumeli hitro utripanje pulzarjev. Obrnimo zgoraj navedeni izrek! Pulzar je stabilen, ko se vrti, torej ohranja zunanje plasti, iz česar sklepamo, da je tudi na površini težni pospešek večji od centrifugalnega pospeška. Če je R polmer zvezde in M masa zvezde, lahko to zahtevo zapišemo z neenačbo takole:

$$G \frac{M}{R^2} > (2\pi\nu)^2 R,$$

pri čemer je $G (= 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2)$ gravitacijska konstanta, ν pa frekvenca pulzarja. Če gornjo enačbo delimo z R in se spomnimo, da je $\frac{4\pi}{3} R^3$ prostornina krogle, $\frac{M}{\frac{4\pi}{3} R^3}$ pa povprečna gostota (ρ) krogle, v kateri je masa M , lahko gornje zapišemo v obliki:

$$G\rho > 3\pi\nu^2.$$

¹ Dokaz za nekoliko poenostavljeno vrtavko, sestavljeno iz idealne vzmeti z dolžino l , na koncih katere sta enaki masi m , je razmeroma preprost in si ga bo morda kdo od bralcev sam poiskal.

Če upoštevamo, da so odkrili pulzarje, katerih frekvenca je skoraj 500 Hz, lahko izračunamo, da mora biti njihova gostota večja od

$$3.5 \times 10^{16} \text{ kg/m}^3.$$

To je fantastična gostota, 35 trilijonkrat večja od gostote vode! Ko so v zvezi s pulzarji prvič izračunali to število, so mnogi astronomi menili, da to ne more biti prava smer za iskanje odgovora. Nekateri, ki so bili v začetku v manjšini, pa so se spomnili belih pritlikavk in najbolj norih sanj teoretikov v zvezi z njimi.

Prvo belo pritlikavko je odkril Bessel že pred približno 150 leti, ko je opazoval najsvetlejšo zvezdo Sirij, da bi izmeril njeno oddaljenost. Z zelo natančnimi meritvami je opazil, da Sirij pravzaprav vijuga po nebu. Sklepal je, da mora pospešek pri zavijanju priskrbeti neka zvezda v bližini Sirija, katere maso je lahko ocenil na približno enako Sončevi. Pri tem pa je čudno, da tudi Sirijeva masa ni kaj dosti večja od mase Sonca, a je Sirij za nas najsvetlejša zvezda, njegove spremljevalke, z le nekoliko manjšo maso, pa kljub vsem naporom ni mogel zaznati. Torej sveti prav gotovo kar nekaj tisočkrat manj od Sirija. Šele mnogo let kasneje je ameriški izdelovalec teleskopov Alvin Clark preizkušal takrat najboljši teleskop in opazil šibko, šibko spremljevalko Sirija. Ko so astronomi končno uspeli zaznati njeno barvo, je bilo to pravo presenečenje. Spremljevalka je še bolj bela od Sirija samega in je zato po tem, kar vemo o sevanju vročih teles (Stefanov, Wienov in Planckov zakon), še bolj vroča od Sirija. Po Stefanovem zakonu seva vsak kvadratni meter vročega telesa (natančen tehnični izraz je črno telo) moč, ki je sorazmerna samo s četrto potenco temperature. Torej mora sevati vsak kvadratni meter spremljevalke Sirija več kot Sirij sam, celotna zvezda pa kljub temu seva več tisočkrat manj od Sirija. To je mogoče samo, če je površina Sirijeve spremljevalke več kot desettisočkrat manjša od Sirija. Ker je površina krogle sorazmerna s kvadratom polmera ($P = 4\pi R^2$), sklepamo, da je šibka zvezda stokrat manjša od Sirija. Naprej: ker je prostornina krogle sorazmerna s tretjo potenco polmera, je prostornina Sirijeve spremljevalke milijonkrat manjša od Sirijeve. Pa vendar imata obe zvezdi približno enako maso. Torej je Sirijeva spremljevalka približno milijonkrat gostejša od Sirija, katerega povprečna gostota je nekako tolikšna kot povprečna gostota Sonca, to je zelo približno $1\,000 \text{ kg/m}^3$. Ko so začeli izdelovati večje in večje teleskope, so lahko še natančneje pogledali med zvezde in odkrili še veliko belih pritlikavk, ki so vse potrjevale sklepe o razmeroma visoki temperaturi in predvsem o njihovi gostoti, ki je več milijonkrat večja od gostote vode.

Jasno je, da je snov, ki sestavlja bele pritlikavke povsem drugačna kot tista na Zemlji. Kaj se je zgodilo s snovjo v belih pritlikavkah? Prej smo

že povedali (brez dokaza), da je gostota snovi na Zemlji določena z igro med električnimi privlačnimi silami med negativno nabitimi elektroni in pozitivnimi jedri ter kvantnomehanskimi odbojnimi silami, predvsem med elektroni. Snov je organizirana tako, da se večina elektronov, ki pripadajo danemu jedru, porazdeli okrog njega kot nekakšna vatasta kroglica, katere velikost določajo zakoni kvantne mehanike. Le majhen delež preostalih elektronov ostane, da z električnimi privlačnimi silami povezujejo vataste kroglice med seboj. Velikost "vatastih kroglic" določa povprečno razdaljo med njimi in s tem gostoto snovi. Snov je mogoče zgostiti, če "vataste kroglice" stisnemo. Toda to na Zemlji ni mogoče, saj lahko stiskamo "vato" cnc snovi samo z "vato" druge snovi, ki pa je približno enako mehka ali enako trda. Resno stiskanje je možno le, če nam pomaga sila, ki je bistveno močnejša od kvantnomehanskih odbojnih sil, ki določajo velikost atomov na Zemlji. Sila teže je edina, ki lahko to stori, ker je vedno privlačna. Poglejmo si to trditev nekoliko podrobneje. Vzemimo, da vataste kroglice z maso $\bar{\mu}$ in s povprečno gostoto ρ_0 zlagamo (nekje v vesolju) na velik kup. Ko vsebuje kup N kroglic, ima maso $M = N\bar{\mu}$ in prostornino $V = M/\rho_0$. Če je kup kroglast, lahko izračunamo iz prostornine polmer

$$R = \left(\frac{3N\bar{\mu}}{4\pi\rho_0} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

po Newtonovem gravitacijskem zakonu pa še težni pospešek na površini kupa

$$g = G \frac{M}{R^2} = GN\bar{\mu} \left(\frac{4\pi\rho_0}{3N\bar{\mu}} \right)^{\frac{2}{3}} = G(N\bar{\mu})^{\frac{1}{3}} \left(\frac{4\pi}{3} \rho_0 \right)^{\frac{2}{3}}.$$

Pomembno pri gornjem rezultatu je, da težni pospešek na površini narašča s tretjim korenem iz števila kroglic. Pri dovolj velikem številu kroglic postane lahko teža kroglice večja od sile, s katero se vata upira stiskanju, pa če je vata še tako trda. In prav to se lahko zgodi, če naredimo tako velike kupe snovi, kot so zvezde. Dokler je zvezda v notranjosti še tako vroča, kot je Sonce, in se še ni preveč skrčila, lahko tlak plina kljubuje teži. Ko pa po mnogih letih zvezda s sevanjem izgubi preveč energije, "vatasti atomi" ne morejo nastati in zvezda se sesuje vase tako daleč, da postane pravzaprav en sam atom z zelo trdo "elektronsko vato". Računi pokažejo, da se izmerjena gostota belih pritlikavk ujema z navedenimi fizikalnimi razlagami.

Kaj pa pulzarji, ki bi morali biti še kakih milijardokrat gostejši od belih pritlikavk? Ko so v tridesetih letih tega stoletja delali teorijo belih pritlikavk, so prišli do zanimivih rezultatov. Enačba (1) nas namreč napeljuje do nenavadnega razmišljanja: z večanjem števila delcev lahko dosežemo poljubno veliko težo na površini, torej lahko dosežemo poljubno velike sile, ki stiskajo "vato", v katero se skušajo delci organizirati. Če je "vata" prožna, se mora pod določeno silo vdati, to pa poveča gostoto in s tem težni pospešek, oz. silo med delci. Ali lahko "vata" vzdrži poljubno naraščanje teže? Chandrasekhar je pokazal (za to je dobil Nobelovo nagrado), da lahko "vata", ki jo sestavljajo elektroni, vzdrži le, če je na kupu manj snovi kot za 1.44 mase Sonca. Če je več, pa elektroni ne morejo vzdržati pritiska teže. Kaj se zgodi potem, sprva ni bilo jasno, vendar je v tem grmu tičal zajec, ki je pokazal pot do razumevanja pulzarjev. Pri večjih pritiskih teže "elektronska vata" ne zdrži več in elektrone preprosto potisne v protone v atomskih jedrih. Pri tem protone spremeni v nevtrone. Pri nekaterih zvezdah se to v resnici zgodi v nekaj trenutkih, ko na koncu svoje življenjske poti izgubijo vse ostale možnosti upiranja teži. Od tega trenutka dalje v zvezdi skoraj ni več elektronov in nevtroni postanejo tista "vata", ki kup zadrži pred nadaljnjim krčenjem. S tem postane zvezda eno samo atomsko jedro. Zato ni čudno, da ima tudi podobno gostoto, kot bi jo dobili, če bi delili maso nevtrona z njegovo prostornino. Nekateri teoretiki, predvsem Volkoff, Oppenheimer in Snyder, so že v tridesetih letih tega stoletja pokazali, da je to mogoče. Odkritje nevtronskih zvezd in odkritje ozadja njihovega nastanka pa je pokazalo, kako daleč lahko seže pogled dobrega teoretika.

Andrej Čadež
