

# VIR ENERGIJE PULZARJEV

LARA HOČURŠČAK

Fakulteta za matematiko in fiziko  
Univerza v Ljubljani

V članku bom predstavila, kako so odkrili prvi pulzar in kateri mehanizem nam omogoča njihovo opazovanje. Iz znane periode pulziranja je s pomočjo določenih lastnosti pulzarjev mogoče izračunati količine, ki so za opis zvezd pomembne. Z uporabo modela svetilnika lahko razložimo, zakaj pulzarji oddajajo elektromagnetno valovanje, ki ga je mogoče detektirati. Za spremljanje razvoja pulzarja od rojstva do smrti ali celo ponovnega rojstva kot milisekundni pulzar si pomagamo s  $PP$  diagramom. Ta nam iz znane periode pulziranja in njenega spreminjanja omogoča opis "življenja" pulzarja. Pulzar v Rakovici, katerega točno starost poznamo, nam bo v članku služil kot orodje za preverjanje in izračun enačb.

## PULSAR'S ENERGY SOURCE

In this article I will present how a first pulsar was discovered and what is the mechanism that enables us to observe them. Knowing a pulse period and some of pulsar's important properties, one can calculate the important quantities that are essential to describe a star. We use the lighthouse model to explain why pulsars emit electromagnetic radiation which enables us to detect them.  $PP$  diagram is a tool that helps us study the birth, life and death of a pulsar or even the rebirth as a millisecond pulsar. It enables us to follow a life of a star from a known pulse period and its changing. The Crab pulsar with its precisely known age will be helping us test the equations from a known pulse period and its time derivative.

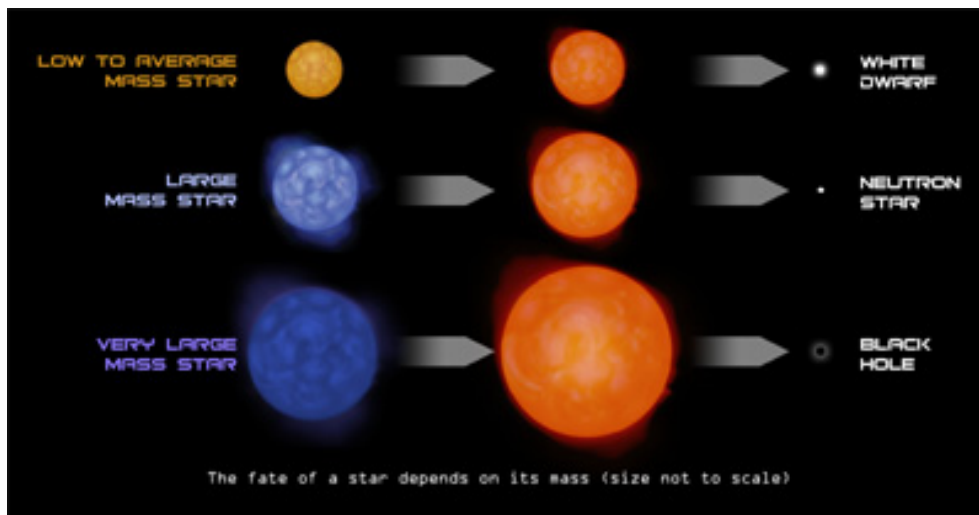
### 1. Uvod

Že leta 1934 sta astronomi Baade in Zwicky predvidela obstoj nevtronskih zvezd kot nove vrste, ki je zadnja faza v razvoju nekaterih zvezd. Predvidela sta, da eksplozija supernove predstavlja prehod iz običajne zvezde v nevtronsko; tisto, ki jo sestavljajo pretežno nevtroni. Takšne zvezde lahko dosežejo izjemno visoke gostote in zelo majhne polmere v primerjavi običajnimi. Leta 1939 sta Oppenheimer in Volkoff s pomočjo preproste enačbe stanja predvidela, kakšno maso, polmer in gostoto naj bi nevtronska zvezda imela. Leta 1964 so Hoyle, Narlikar in Wheeler predlagali, da bi lahko nevtronska zvezda v Rakovici imela gostoto magnetnega polja okrog  $10^6$  T. Le malo pred prvim odkritjem pulzarjev leta 1967 je Pacini predlagal, da bi vir energije pulzarja v Rakovici lahko bilo vrtenje močno namagnetene nevtronske zvezde. Ko je Bell leta 1967 opazila radijske pulze v enakih časovnih razmakih, izvor teh pulzov še ni bil znan. Šele Gold in Pacini sta leta 1968 pokazala, da so pulzarji nič druga kot hitro vrteče se nevtronske zvezde. In prav pulzarji nam danes omogočajo opazovanje nevtronskih zvezd, ki jih sicer zaradi njihovih lastnosti ne bi mogli videti.[8]

### 2. Nevtronske zvezde

Nevtronske zvezde so zadnji stadij v življenju zvezd, katerih mase so večje od približno  $8M_{\odot}$  in manjše od približno  $13M_{\odot}$ . [1] Masivne zvezde zlivajo elemente v jedru, tudi ko že zmanjka vodik, še naprej. Ko je sredica zvezde sestavljena le še iz železa, zlivanje v višje elemente periodnega sistema ni več energijsko ugodno. Kljub temu zaradi izjemno visokih temperatur v središču zvezde, te namreč presegajo  $10^{10}$  K [2], endotermne jedrske reakcije lahko potekajo. Te sredico hitro ohladijo, zato se prične sesedati: v približno 1 sekundi se polmer zvezde zmanjša za faktor 10. Če je masa železovega jedra večja od  $1.4M_{\odot}$ , kar imenujemo Chandrasekharjeva limita, je gravitacijska sila tako močna, da ji tlak degeneriranega plina elektronov ne more več nasprotovati in se zvezda še naprej seseda, ob tem pa zliva protone in elektrone v nevtrone in elektronske nevtrine. Novonastala zvezda je stabilna – stabilnost ji omogoča tlak degeneriranega plina nevtronov. Pri tem je največja masa

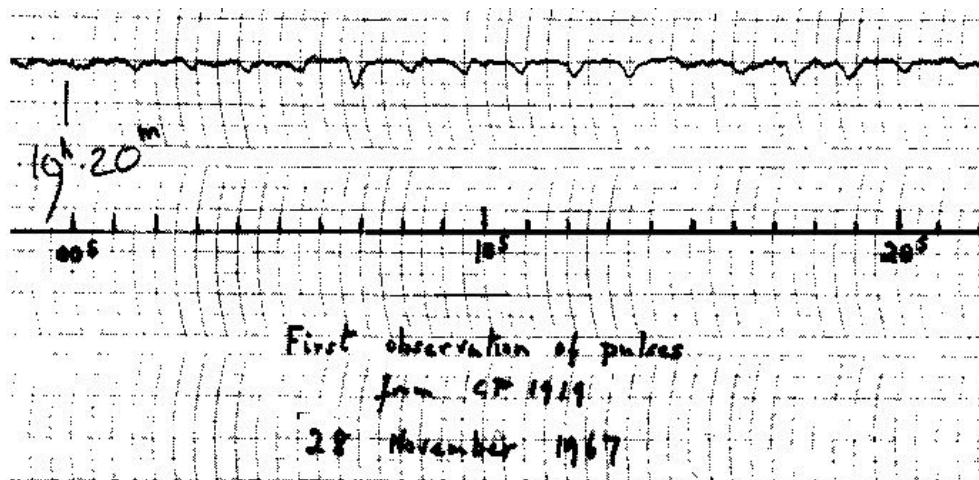
nastale nevtronske zvezde približno  $3M_{\odot}$ , saj za večje mase zvezd tudi tlak degeneriranega plina nevtronov ne more več nasprotovati sili gravitacije in se objekt sesede v črno luknjo. Preostanek začetne zvezde odnese eksplozija supernove. Do tega pride tako, da se preostanek snovi zvezde, ki vpada proti lastnemu središču, odbije od nevtronske zvezde in snov oz. ovojnica zvezde se razleti v vesolje s hitrostmi tudi do  $\frac{1}{10}$  svetlobne hitrosti.[3]



**Slika 1.** Shematski prikaz razvoja zvezd z različnimi masami. Zvezde z majhno do srednjo maso se sesedajo do bele pritlikavke, kar vidimo v prvi vrstici na sliki. Sredinski del slike prikazuje sesedanje zvezde z veliko maso v nevtronsko zvezdo. V spodnji vrstici slike vidimo, da iz zelo masivnih zvezd po sesedanju ne dobimo zvezde, temveč črno luknjo. Slika je povzeta po [4].

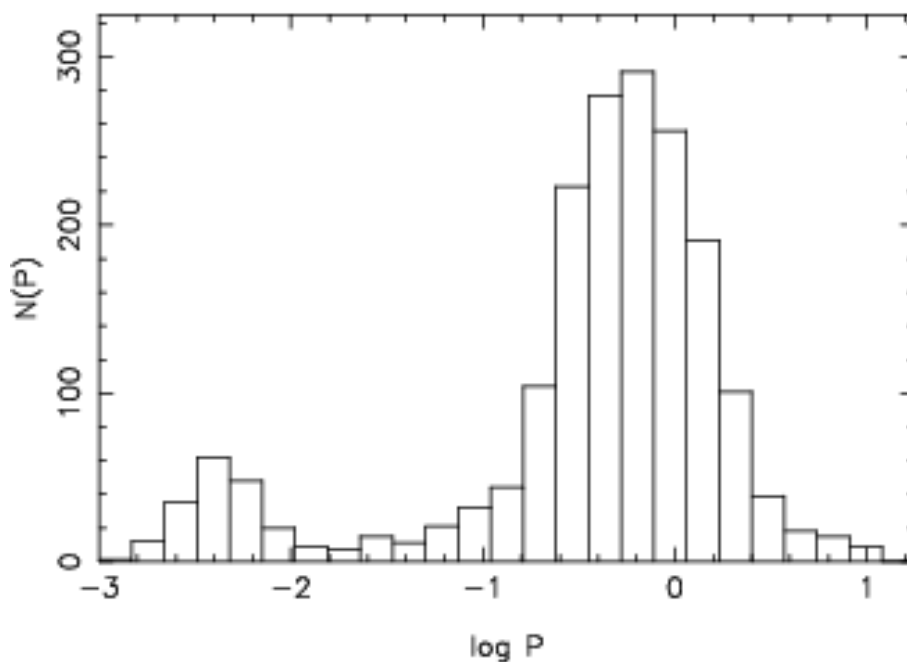
### 3. Odkritje pulzarjev

Ko sta Baade in Zwicky leta 1934 pravilno predvidela obstoj nevtronskih zvezd, ni nič kazalo na to, da jih bomo kmalu lahko opazovali z Zemlje, saj so premajhne in pretemne, da bi jih zaznali s teleskopi. Šele leta 1967 jih je naključno odkrila študentka Jocelyn Bell Burnell, ko je z opazovanjem v radijski svetlobi ugotovila, da se pojavljajo signali neznanega izvora v enakih časovnih razmakih, in sicer vsake 1.3 sekunde.



**Slika 2.** Diagram prvega odkritega pulzarja iz leta 1967. Signali se pojavljajo vsake 1.3 sekunde. Slika je povzeta po [10].

V naslednjih nekaj tednih so odkrili še tri izvore, vse z različnimi periodami. Poimenovali so jih pulzarji. Leta 1968 sta Pacini in Gold povezala teoriji pulzarjev in nevtronskih zvezd in ugotovila, da so pulzarji nič druga kot hitro vrteče se nevtronske zvezde.[5] Ostale zvezde, tudi bele pritlikavke, so namreč prevelike, da bi se lahko vrtele s tako kratko periodo. Manjše bele pritlikavke bi morda še zdržale vrtenje s periodo 0.25 sekunde, a krajših period ne. Pulzarji, ki so jih odkrivali leta 1968, so imeli periodo krajšo od četrтинke sekunde – primer je pulzar v Rakovici, ki se vrti s periodo 33 ms. Takšne hitrosti preživi le nevtronska zvezda.



**Slika 3.** Histogram prikazuje periode vrtenja za znane pulzarje do leta 2010. Histogram ima dva lokalna maksimuma. Levi pripada t.i. milisekundnim pulzarjem, ki energijo za vrtenje pridobivajo iz sosednje zvezde, s katero sta v dvojnem sistemu. Desni vrh pripada pulzarjem, ki se ne nahajajo v dvojnih sistemih – teh je večina. Slika je povzeta po [6].

#### 4. Lastnosti pulzarjev

Periode pulzarjev so za opazovanja izjemnega pomena: omogočajo nam namreč izračun mnogih drugih fizikalno pomembnih količin.

##### 4.1 Povprečna gostota pulzarja

Oceno oziroma limito za maso pulzarja smo povedali že v opisu nevtronskih zvezd - za oceno mase pulzarja lahko vzamemo kar Chandrasekharjevo maso, to je  $1.4M_{\odot}$ . Iz znane povprečne gostote in mase pulzarja bi lahko dobili polmer zvezde. Povprečno gostoto ocenimo iz zahteve, da centrifugalni pospešek na ekvatorju nevtronske zvezde ne sme preseči gravitacijskega pospeška, iz česar sledi:

$$\omega^2 R < \frac{GM}{R^2}, \quad (1)$$

kjer je  $\omega = \frac{2\pi}{P}$  kotna hitrost vrtenja pulzarja in  $P$  perioda pulzarja, ki jo izmerimo. Če vstavimo izraz za  $\omega$ :

$$\frac{4\pi^2 R^3}{P^2} < GM, \quad (2)$$

$$P^2 > \frac{4\pi R^3}{3} \frac{3\pi}{GM}. \quad (3)$$

Če zapišemo s povprečno gostoto:

$$\rho = \frac{M}{\frac{4\pi R^3}{3}}, \quad (4)$$

$$P > \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}}, \quad (5)$$

$$\rho > \frac{3\pi}{GP^2}. \quad (6)$$

Dobljena povprečna gostota je, kot tudi enačba (1), le do velikostnega reda natančna. V resnici je potrebno upoštevati še, da bi se zvezda pred razpadom na ekvatorju napihnila, a za našo oceno velikostnega reda je dovolj dobro, če se držimo preprostejše slike in tega ne upoštevamo.

## 4.2 Polmer pulzarja

Do ocene za polmer pulzarja pridemo z oceno mase nevtronske zvezde kot večje od Chandrasekharjeve mase:

$$M = \rho \frac{4\pi R^3}{3} = M_{Ch} \quad (7)$$

Enačba (7) podaja spodnjo mejo za gostoto, torej so gostote nevtronskih zvezd navadno višje, iz česar sledi:

$$R < \left( \frac{3M_{Ch}}{4\pi\rho} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (8)$$

Poglejmo izračun za pulzar z najkrajšo znano periodo  $P = 1.4 \cdot 10^{-3}$  s [10]:

$$\rho > \frac{3\pi}{6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \cdot (1.4 \cdot 10^{-3} \text{ s})^2} = 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad (9)$$

$$R < \left( \frac{3 \cdot 1.4 \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}}{4\pi \cdot 10^{17} \text{ kgm}^{-3}} \right)^{\frac{1}{3}} = 20 \text{ km}. \quad (10)$$

Nevtronske zvezde so zelo majhni, a masivni objekti. Kot že zapisano, tehtajo  $1.4 - 3M_{\odot}$ . Premer imajo 10–20 km in gostoto reda velikosti  $10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , kar je približno enako gostoti v atomskem jedru.

## 4.3 Rotacijska energija pulzarja

Sedaj imamo vse potrebne podatke za izračun rotacijske energije pulzarja:

$$E_{rot} = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{2\pi^2 J}{P^2}, \quad (11)$$

kjer je  $J$  vztrajnostni moment telesa  $J = \frac{2}{5} MR^2$ , pri čemer je faktor  $\frac{2}{5}$  posledica predpostavke, da je gostota konstantna. Izračunajmo vztrajnostni moment telesa za tipičen pulzar z  $M = M_{Ch}$  in  $R = 10$  km:

$$J = \frac{2}{5} \cdot 1.4 \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ kg} \cdot (10^4 \text{ m})^2 = 10^{38} \text{ kgm}^2. \quad (12)$$

Uporabimo ta vztrajnostni moment za izračun rotacijske energije pulzarja v Rakovici s  $P=0.033$  s [10]:

$$E_{rot} = \frac{2\pi^2 \cdot 10^{38} \text{ kgm}^2}{(0.033 \text{ s})^2} = 2 \cdot 10^{42} \text{ J}. \quad (13)$$

#### 4.4 Magnetno polje pulzarja

Pulzarji so hitro vrteče se nevtronske zvezde z gostoto magnetnega polja do  $10^8$  T. Od kod pulzarjem tako velika magnetna polja? Sonce in večino ostalih zvezd sestavlja ioniziran plin, ki je dober električni prevodnik. Ko se zvezda seseda v nevtronsko zvezdo, se ji magnetni pretok ohranja [10]:

$$\Phi = \int \vec{B} \times \vec{n} d\vec{S} = konst. \quad (14)$$

Iz ohranitve magnetnega pretoka ocenimo magnetno polje v nevtronski zvezdi po sesedanju  $\vec{B}$ :

$$B = \left( \frac{R_S}{R_{NZ}} \right)^2 B_\star, \quad (15)$$

kjer je  $R_S$  polmer sredice zvezde pred sesedanjem,  $B_\star$  gostota magnetnega polja te zvezdne sredice in  $R_{NZ}$  polmer nevtronske zvezde. [9] Če ocenimo polmer sredice zvezde pred sesedanjem na  $10^8 - 10^9$  m in polmer nevtronske zvezde na  $10^4$  m, lahko ocenimo razmerje med magnetnima poljema pred in po sesedanju [9]:

$$\frac{B}{B_\star} = \left( \frac{10^8 - 10^9 \text{ m}}{10^4 \text{ m}} \right)^2 = 10^8 - 10^{10}. \quad (16)$$

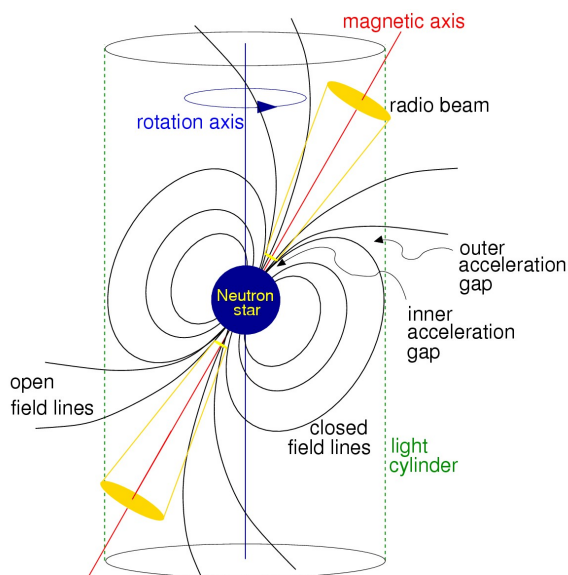
Ocenimo še povprečno gostoto magnetnega polja tipične zvezde na  $B_\star \simeq 10^{-2}$  T. Gostota magnetnega polja nevtronske zvezde je torej:

$$B = 10^6 - 10^8 \text{ T}. \quad (17)$$

Obstajajo tudi pulzarji, ki imajo še večje gostote magnetnega polja, in sicer  $B > 10^9$  T [9]. Te zvezde, ki jih imenujemo magnetarji, niso nastali zgolj s samim procesom sesedanja, saj nam to ne omogoča dobiti tako velikega magnetnega polja. [10]

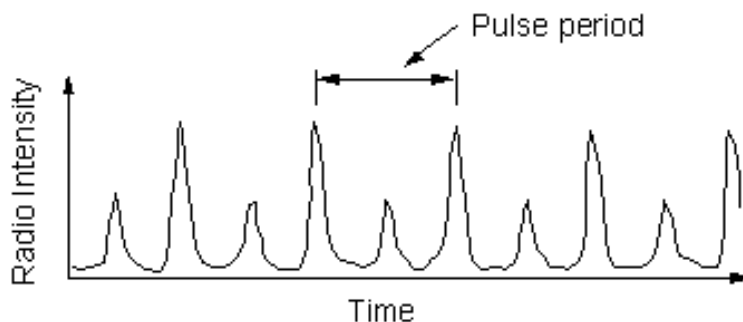
### 5. Model svetilnika

Model svetilnika hitro vrtečih se nevtronskih zvezd se sklada z opazovanji pulzarjev. Model je dobil ime po analogiji s svetilnikom – svetlobni žarek svetilnika opazimo le takrat, ko je usmerjen v našo smer. Pri pulzarjih je podobno, le da so žarki v radijski svetlobi.



**Slika 4.** Model svetilnika. Nevtronska zvezda, ki se vrti okrog osi vrtenja (angl. rotation axis), oddaja radijske valove v smeri magnetne osi (angl. magnetic axis). Če je žarek, ki prebada zvezdo, usmerjen vsaj približno v naši smeri, pulze zaznavamo kot radijske sunke. Slika je povzeta po [10].

Pulzi, ki se pojavljajo v enakih časovnih razmakh, so povezani z vrtenjem zvezde in s tem žarkov, ki zvezdo prebadajo na polih. Te sunke zaznamo, če so usmerjeni približno v naši smeri, na detektorjih.



**Slika 5.** Radijski pulzi pulzarja. Ker radijski žarek zvezdo prebada na dveh polih, vidimo znotraj ene periode dva sunka, ki pripadata različnim polom. Njena intenziteta je odvisna od nagnjenosti žarkov proti opazovalcu. Slika je povzeta po [5].

### 5.1 Sevanje magnetnega dipola

Na sliki 4 vidimo, da os vrtenja in magnetna os v splošnem nista poravnani. Zato magnetni dipol seva. Vzemimo nevtronsko zvezdo, ki ima na magnetnih polih gostoto magnetnega polja  $B_p$ . Velikost magnetnega momenta znotraj enakomerno nabite vrteče se sfere je: [11]

$$\mu = \frac{1}{2} B_p R^3. \quad (18)$$

Ker je os magnetnega dipola glede na os vrtenja zvezde nagnjena za nek kot  $\alpha > 0$ , se magnetni moment s časom spreminja in seva. Izsevana moč je:

$$P_{sev} = \frac{2}{3} \frac{(\ddot{\mu}_\perp)^2}{c^3}, \quad (19)$$

kjer je  $\mu_\perp$  pravokotna komponenta magnetnega dipolnega momenta. Enačba je analogna Larmorjevi enačbi za sevanje vrtečega (torej pospešenega) električnega dipola, le da nastopa v njej električni dipol  $p_\perp$  namesto magnetnega dipola  $\mu_\perp$ . Nagnjen magnetni dipolni moment, ki se vrtil s kotno hitrostjo  $\omega$ , lahko zapišemo v obliki:

$$\mu = \mu_0 e^{-i\omega t}, \quad (20)$$

$$\ddot{\mu} = \omega^2 \mu_0 e^{-i\omega t} = \omega^2 \mu. \quad (21)$$

Izsevana moč je:

$$P_{sev} = \frac{2}{3} \frac{\mu_\perp^2 \omega^4}{c^3} = \frac{2\mu_\perp^2}{3c^3} \left(\frac{2\pi}{P}\right)^4 = \frac{2}{3c^3} (B_p R^3 \sin \alpha)^2 \left(\frac{2\pi}{P}\right)^4 \quad (22)$$

Ker je izsevana moč velika, znatno upočasnjuje pulzar, saj črpa zalogo rotacijske energije nevtronske zvezde.[10] Velja torej:

$$\dot{E}_{rot} = -P_{sev} = \frac{-B_p^2 R^6 \omega^4 \sin^2 \alpha}{6c^3}. \quad (23)$$

Že prej smo zapisali:

$$E_{rot} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (24)$$

in če odvajamo, dobimo:

$$\dot{E}_{rot} = J\omega\dot{\omega}. \quad (25)$$

Velja  $\omega = \frac{2\pi}{P}$ , torej:

$$\dot{\omega} = -\frac{2\pi\dot{P}}{P^2}. \quad (26)$$

Vstavimo sedaj (26) v (25):

$$\dot{E}_{rot} = \frac{-4\pi^2 J\dot{P}}{P^3}. \quad (27)$$

Za pulzar v Rakovici, kjer je  $P=0.033$  s in  $\dot{P} = 10^{-12.4}$ , dobimo spreminjanje rotacijske energije pulzarja:

$$\dot{E}_{rot} = \frac{-4\pi^2 J\dot{P}}{P^3} = -\frac{4\pi^2 \cdot 10^{38} \text{ kgm}^2 \cdot 10^{-12.4}}{(0.033 \text{ s})^3} = -4 \cdot 10^{31} \frac{\text{J}}{\text{s}}. \quad (28)$$

## 5.2 Karakteristična starost pulzarja

Sedaj lahko enačimo dobljen rezultat (28) z (22):

$$P_{sev} = -\dot{E}_{rot} \quad (29)$$

$$\frac{2}{3c^3} (B_p R^3 \sin \alpha)^2 \left(\frac{2\pi}{P}\right)^4 = \frac{4\pi^2 J\dot{P}}{P^3} \quad (30)$$

$$B = \sqrt{\frac{3c^3 J}{8\pi^2 R^6}} \sqrt{P\dot{P}}, \quad (31)$$

kar se izkaže za spodnjo mejo gostote magnetnega polja. Obrnimo enačbo (31):

$$P\dot{P} = \frac{8\pi^2 R^6 (B \sin \alpha)^2}{3c^3 J}. \quad (32)$$

Ob predpostavki, da se  $B$  ne spreminja znatno s časom, je tudi  $P\dot{P}$  približno konstanten oziroma se s časom ne spreminja. Če integriramo  $P$  po življenjski dobi pulzarja od periode  $P_0$  ob času  $t = 0$  do periode  $P$  pri starosti  $t = \tau$ , dobimo:

$$\int_{P_0}^P P dP = \int_0^\tau P\dot{P} dt = P\dot{P} \int_0^\tau dt, \quad (33)$$

kar velja, če je  $P\dot{P}$  od časa neodvisen. Če enačimo levi in desni del enačbe, dobimo:

$$\frac{1}{2}(P^2 - P_0^2) = P\dot{P}\tau. \quad (34)$$

Ob predpostavki, da je  $P_0^2 \ll P^2$ , lahko izrazimo karakteristično starost pulzarja:

$$\tau = \frac{P}{2\dot{P}}. \quad (35)$$

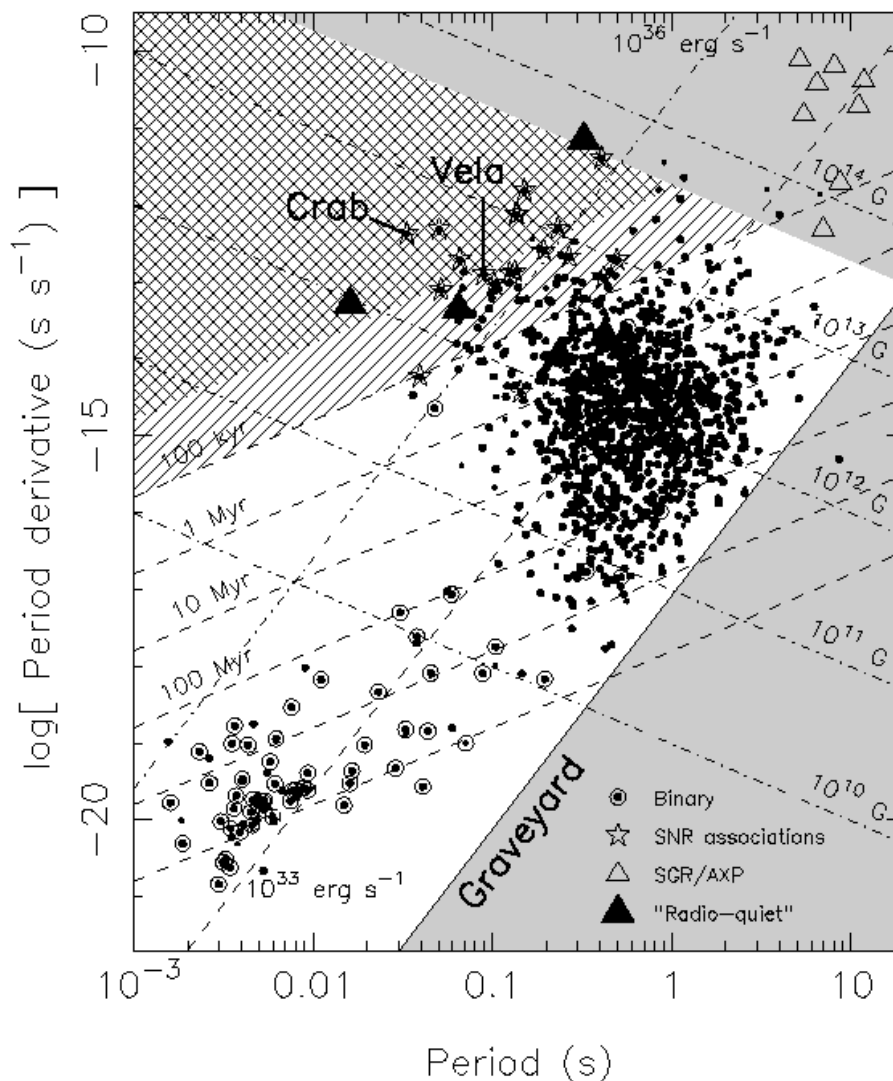
Oglejmo si karakteristično starost pulzarja v Rakovici. Dejanska starost pulzarja je okrog 950 let, saj vemo, da so leta 1054 opazili eksplozijo supernove, sočasno s katero je iz zvezde nastal pulzar. Če poznamo podatka za periodo pulzarja  $P=0.033$  s in  $\dot{P} = 10^{-12.4}$ :

$$\tau = \frac{P}{2\dot{P}} = \frac{0.033 \text{ s}}{2 \cdot 10^{-12.4}} = 1300 \text{ let}, \quad (36)$$

kar se v velikostnem redu ujema z dejansko starostjo tega pulzarja.

### 5.3 $P\dot{P}$ diagram

$P\dot{P}$  diagram za pulzarje igra podobno vlogo kot Hertzsprung-Russellov diagram za navadne zvezde. Iz periode  $P$  in njenega spreminjanja  $\dot{P}$  lahko določimo starost pulzarja, gostoto magnetnega polja  $B$  in spreminjanje rotacijske energije pulzarja  $\dot{E}_{rot}$ .



**Slika 6.** Diagram prikazuje spreminjanje period pulzarjev  $\dot{P}$  v odvisnosti od period  $P$ , kar lahko izmerimo s veliko natančnostjo. Na diagram tipično narišemo še črte konstantnega magnetnega polja  $B$  in karakteristične starosti  $\tau$ . Sivo obarvano območje imenujemo pokopališče (angl. graveyard) pulzarjev. Slika je povzeta po [10].

Pulzarji imajo ob rojstvu tipično majhne periode  $P$ , a se hitro upočasnjujejo oziroma je njihovo spreminjanje periode  $\dot{P}$  veliko. Ko se starajo, pulzarji potujejo vzdolž črte konstantnega spreminjanja periode  $\dot{P}$  in ta se sčasoma zmanjša. Magnetno polje postaja vse šibkejše, dokler pulzarji ne prečkajo črte smrti, ki deli pokopališče pulzarjev od ostalega območja v  $P\dot{P}$  diagramu. V območju pokopališča pulzarji običajno ne oddajajo nobenega sevanja več.[16] A tudi ko pulzar enkrat prečka črto smrti, tam ne ostane nujno za vedno. Lahko je namreč v dvojnem sistemu z zvezdo, ki mu predaja vrtilno količino, tako da se pulzar ponovno prične vrteti s periodami  $P$  nekaj milisekund. Sčasoma prične ponovno sevati, kljub temu da ima magnetno polje le okrog  $B \sim 10^4$  T.[10] Takšni pulzarji se v našem  $P\dot{P}$  diagramu nahajajo v spodnjem levem kotu in jih imenujemo reciklirani pulzarji.[15]



## 6. Zaključek

Do sedaj je bilo odkritih več kot 2500 pulzarjev; od tega največ takih, ki sevajo v radijski svetlobi, manj kot 10% teh, ki sevajo gama žarke, in okrog 10% milisekundnih pulzarjev, ki se nahajajo v dvojnih sistemih. Zaradi velike količine informacij, ki jih pulzarji nosijo, so za astronome zelo pomembni. Primer je natančnost pulziranja, ki je tako velika, da zaenkrat velja za najnatančnejšo makroskopsko naravno uro v vesolju. Sprememba v periodi pulziranja bi torej lahko nakazala, da se v vesolju blizu pulzarja nekaj dogaja; primera sta motnja zaradi gravitacijskih valov in zaradi kroženja planeta okrog pulzarja.[14] Slednji proces je omogočil odkritje prvega planeta zunaj našega Osončja.[13] Prav zato je vsako novo odkritje pulzarja pomembno, saj nam ne omogoča le poznavanja njih samih, temveč tudi drugih procesov in objektov v vesolju.

### LITERATURA

- [1] Ph. Podsiadlowski, *Stellar Structure and Evolution: Syllabus* (2006), [http://predmeti.fmf.uni-lj.si/astromija?action=AttachFile&do=get&target=B3\\_stellar\\_notes.pdf](http://predmeti.fmf.uni-lj.si/astromija?action=AttachFile&do=get&target=B3_stellar_notes.pdf)
- [2] *Lecture 18: Supernovae* (2006), <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit3/supernova.html>
- [3] J. Timlin, *Neutron Degeneracy Pressure* (2013), [http://www.physics.drexel.edu/~bob/Term\\_Reports/John\\_Timlin.pdf](http://www.physics.drexel.edu/~bob/Term_Reports/John_Timlin.pdf), str. 3
- [4] *Chandra X-Ray Observatory* (2012), [http://chandra.harvard.edu/graphics/resources/illustrations/stellar\\_fate2.jpg](http://chandra.harvard.edu/graphics/resources/illustrations/stellar_fate2.jpg)
- [5] G. Smith, *Supernovae, Neutron Stars and Pulsars* (1999), <http://casswww.ucsd.edu/archive/public/tutorial/SN.html>
- [6] S. Konar, *The Magnetic Fields of Millisecond Pulsars in Globular Clusters* (2010), <https://inspirehep.net/record/861088/plots>
- [7] *Neutron Star*, <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/N/Neutron+Star>
- [8] A.G. Lyne, F. Graham-Smith, *Pulsar Astronomy*, Cambridge University Press, 1998.
- [9] Q. Peng, H. Tong, *The Physics of Strong Magnetic Fields in Neutron Stars*, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0706/0706.0060.pdf>
- [10] *Pulsar Properties*, <http://www.cv.nrao.edu/course/ast534/Pulsars.html>
- [11] K.T. McDonald, *Electromagnetic Fields of a Rotating Shell of Charge* (2008), <http://www.physics.princeton.edu/~mcdonald/examples/rotatingshell.pdf>
- [12] *An Introduction to Pulsars*, <http://www.atnf.csiro.au/outreach/education/everyone/pulsars/index.html>
- [13] *Planets Around Pulsars*, [http://www2.astro.psu.edu/users/alex/pulsar\\_planets\\_text.html](http://www2.astro.psu.edu/users/alex/pulsar_planets_text.html)
- [14] C. Cofield, *What Are Pulsars?* (2016), <http://www.space.com/32661-pulsars.html>
- [15] *Life of Pulsars*, <http://www.jb.man.ac.uk/distance/frontiers/pulsars/section3.html>
- [16] S. Kohler, *A Pulsar Alone* (2011), <https://astrobites.org/2011/03/25/a-pulsar-alone/>