Univerza v Ljubljani
Fakulteta za matematiko in fiziko
Oddelek za fiziko

Pulzarji

- uvod
- odkritje pulzarjev
- iskanje pulzarjev
- nastanek pulzarjev
- glavne značilnosti pulzarjev
  - rotacijske periode
  - zgradba nevtronske zvezde
  - magnetno polje
  - karakteristike radijskega pulza
  - višje energijska sevanja (optično, X, ...)
- časovne rotacijske nepravilnosti
- pulzarji na Oddelku za fiziko v Ljubljani

1 Odkritje pulzarjev

- 1934, astronoma Walter Baade & Fritz Zwicky predlagata obstoj nevtronske zvezde
  - zadnji stadij v življenju zvezde, ostanek supernove
  - majhen polmer, ogromna gostota, veliko magnetno polje

- astronomi takrat takih objektov sploh ne iščejo

$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad \ldots \quad$ izsev črnega telesa

$\lambda_\circ T = k_W \quad \ldots \quad$ Wienov zakon

	Sonce	nevtronska zvezda
R ... polmer	$7 \cdot 10^5\,\mathrm{km}$	$10\,\mathrm{km}$
T ... povr. temp.	$5800\,\mathrm{K}$	$7 \cdot 10^5\,\mathrm{K}$
L ... izsev	$4 \cdot 10^{26}\,\mathrm{W}$	$2 \cdot 10^{25}\,\mathrm{W}$
$\lambda_\circ$ ... vrh spektra	$500\,\mathrm{nm}$	$4\,\mathrm{nm}$

  - izsev nevtronske zvezde je primerljiv z izsevom Sonca
  - nevtronske zvezde sevajo v glavnem v rentgenskem delu spektra
  - teoretične napovedi ne predvidevajo, da so rotirajoče nevtronske zvezde močni sevalci periodičnih radijskih signalov

- po 2. svetovni vojni se radijska tehnologija in z njo radijska astronomija hitro razvijata
  - odkritje mikrovalovnega ozadja (prasevanje pri $2,7\,\mathrm{K}$)
  - odkritje kvazarjev
  - ni odkritja pulzarjev, čeprav so bili pulzarjevi signali večkrat rekordirani
    - astronomi ne pričakujejo hitrih fluktuacij signala
    - vse pulzne signale imajo za motnje z Zemeljskih izvirov (električne naprave, daljnovodi, ...)
    - večina radijskih sprejemnikov je narejena tako, da zavrne ali zgladi pulzne signale in meri samo stabilne signale

- 1967, astronom Andrew Hewish & njegova študentka Jocelyn Bell Burnell raziskujeta medplanetarno scintilacijo radijskega valovanja
  - opazovalna tehnika vključuje ponavljajoče preglede neba
  - sprejemnik mora biti občutljiv na hitre spremembe signala
  - na delu neba je odkrit periodični signal, ki izvira izven Osončja (vsakodnevni 4-minutni premik, Dopplerje pojav)
  - zmeda zaradi možnosti odkritja izvenzemeljske civilizacije
  - Februar 1968, objavljeno pismo v reviji Nature (opisani ponavljajoči se pulzi, objekt je najbrž zelo gosta, kompaktna zvezda, bela pritlikavka ali nevtronska zvezda)
  - objavi sledijo številna opazovanja z vseh večjih radijskih teleskopov, odkriti so številni novi radijski pulzarji

- teoretična razlaga, pulzarji so rotirajoče nevtronske zvezde
  - možne razlage periodičnega signala
    - hitro krožeč dvojni sistem
    - nihanje zvezde, ni ustavljanja
    - vrtenje zvezde, je ustavljanje
  - samo vrtenje nevtronske zvezde ima pravilno časovno skalo

$$\omega^2 R \leq \frac{GM}{R^2}$$

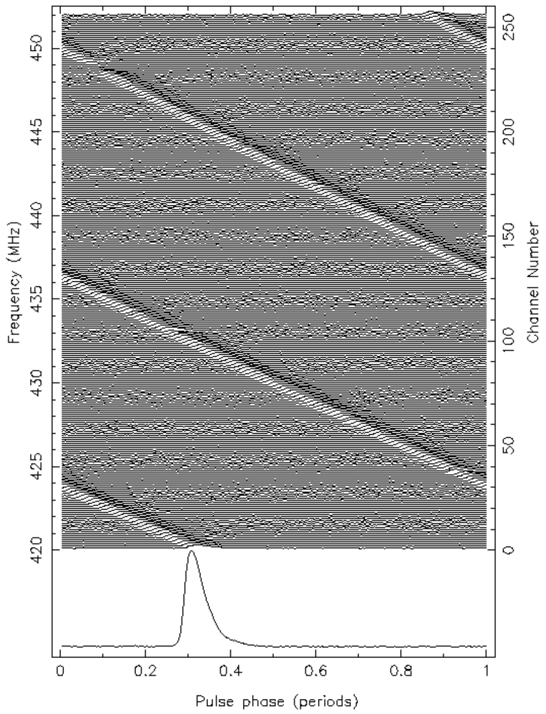
$$P_{min.} = \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}}$$

	bela pritlikavka	nevtronska zvezda
ρ ... gostota	$\leq 10^{11}\,\mathrm{kg/m^3}$	$\leq 10^{18}\,\mathrm{kg/m^3}$
$P_{min.}$	$1\,\mathrm{s}$	$1\,\mathrm{ms}$

- hiter razvoj eksperimentalnih in teoretskih odkritij
  - 1969, odkrit pulzar v Rakovici, seva v radijskem, optičnem in rentgenskem delu spektra
  - odkriti milisekundni pulzarji
  - 2 Nobelovi nagradi: Hewish (odkritje), Hulse & Taylor (potrditev relativistične dinamike)

2 Iskanje pulzarjev

- radijske pulzarje se lahko opazuje pri valovnih dožinah od 15 m (20 MHz) do 1 cm (30 GHz)
- večina pulzarjev je bila odkritih pri valovni dolžini 70 cm (400 MHz)
- posamezni radijski pulzi večine pulzarjev so prešibki, da bi jih direktno zaznali
- razmerje signala proti šumu lahko povečamo:
  - seštevamo signale več tisoč zaporednih pulzov
  - povečamo opazovalno širino frekvenčnega pasu (1 MHz, razdeljen na več podpasov
  - seštevamo signale več tisoč zaporednih pulzov
- problemi pri detekciji pulzarjev:
  - ne poznamo pulzarjeve periode, integracijo ponavljamo preko vseh možnih period
  - ne poznamo širine pulza
  - ne poznamo disperzijske mere

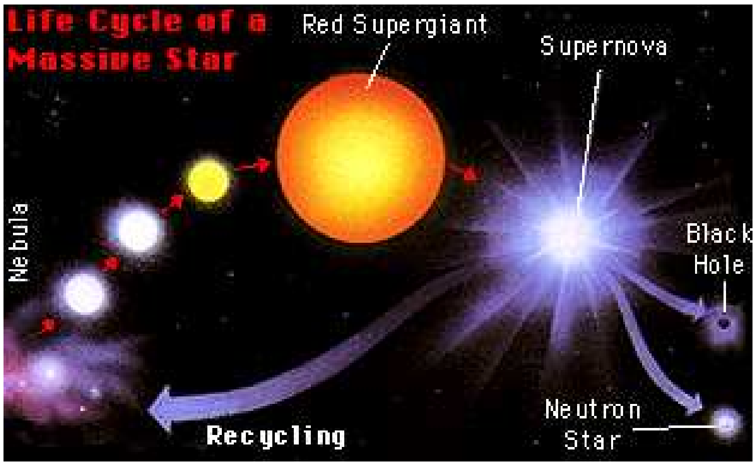


Slika 1: Zaradi disperzije se pulzarjev signal na detektorju razmaže.

3 Nastanek pulzarjev

Življenjski ciklus zvezde

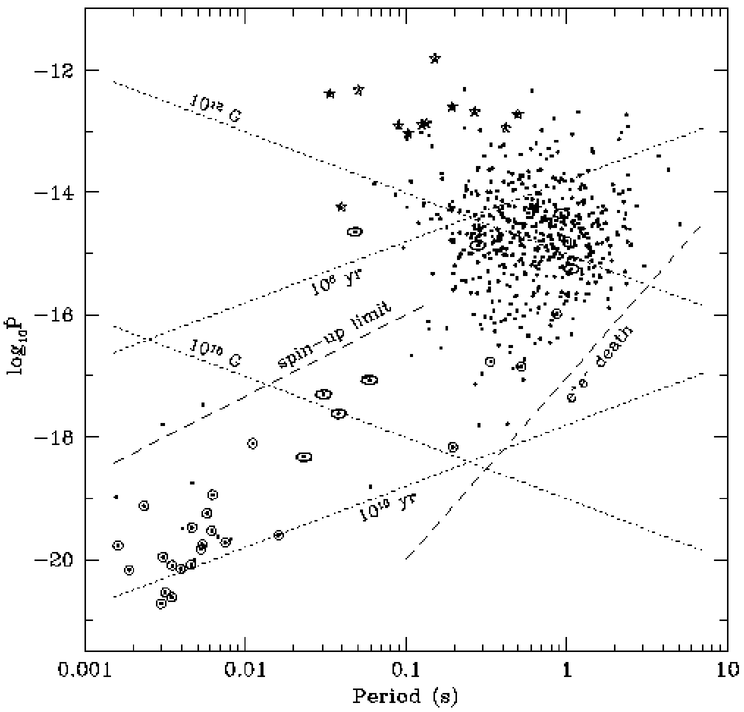
- rojstvo zvezd v ogromnem oblaku plina - "porodnišnici"
- življenje na glavni veji
  - termični tlak uravnoveša gravitacijo
  - v sredici fuzija vodika v helij
- faza rdeče orjakinje
  - krčenje in segrevanje sredice, nove jedrske reakcije
  - napihovanje in ohlajanje ovojnice
- bela pritlikavka, konec za nemasivno zvezdo
  - gravitaciji se upira tlak degeneriranih elektronov
  - ni jedrskih reakcij, počasno ohlajanje
- nevtronska zvezda, konec za bolj masivno zvezdo
  - supernova, preostane le še masivna in gosta sredica
  - gravitaciji se upira tlak degeneriranih nevtronov
  - ni jedrskih reakcij, počasno ohlajanje
- črna luknja, konec najbolj masivnih zvezd



Slika 2: Življenjski ciklus masivne zvezde

Pulzarji in supernove

- življenjska doba pulzarja je ~ 10 milijonov let
- galaktična populacija pulzarjev je v stacionarnem stanju
- preučevanje razvoja pulzarja in $P - \dot{P}$ diagram
  - mladi pulzarji se vrtijo hitreje
  - mladi pulzarji se ustavljajo hitreje
  - pulzarji zamrejo pri rotacijskih periodah od 1,5 do 5 sekund

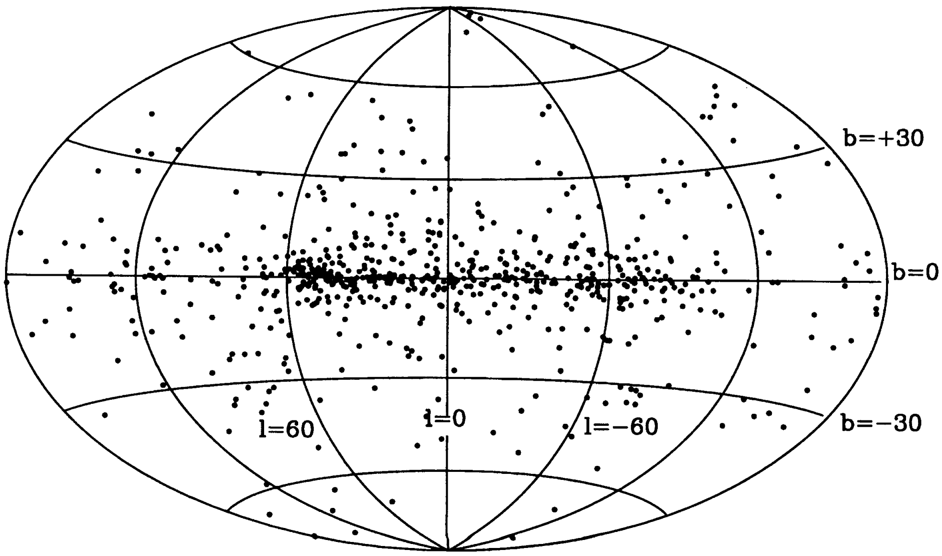


Slika 3: $P - \dot{P}$ diagram

- masivne zvezde z začetno maso med $2\,\mathrm{M}_\odot$ in $15\,\mathrm{M}_\odot$ naj bi eksplodirale v supernovi
- pogostost nastanka supernov je $2,2 \pm 1,3$ /stoletje
- 12 izmed ~ 700 pulzarjev je nedvoumno povezanih z ostanki supernov
- ostanki supernove imajo stokrat krajšo življenjsko dobo
- supernova SN1987A, pulzarja še ni

4 Glavne značilnosti pulzarjev

- galaktična populacija pulzarjev je ocenjena na $10^5 - 10^6$
- detektiranih je približno 700 pulzarjev
  - vsi so radijski sevalci
  - nekaj jih seva tudi v rentgenskem delu spektra
  - le dva (pulzarja v Rakovici in Veli) sta tudi optična sevalca
- večina pulzarjev se nahaja v galaktični ravnini in se od nje oddaljuje



Slika 4: Galaktična populacija pulzarjev

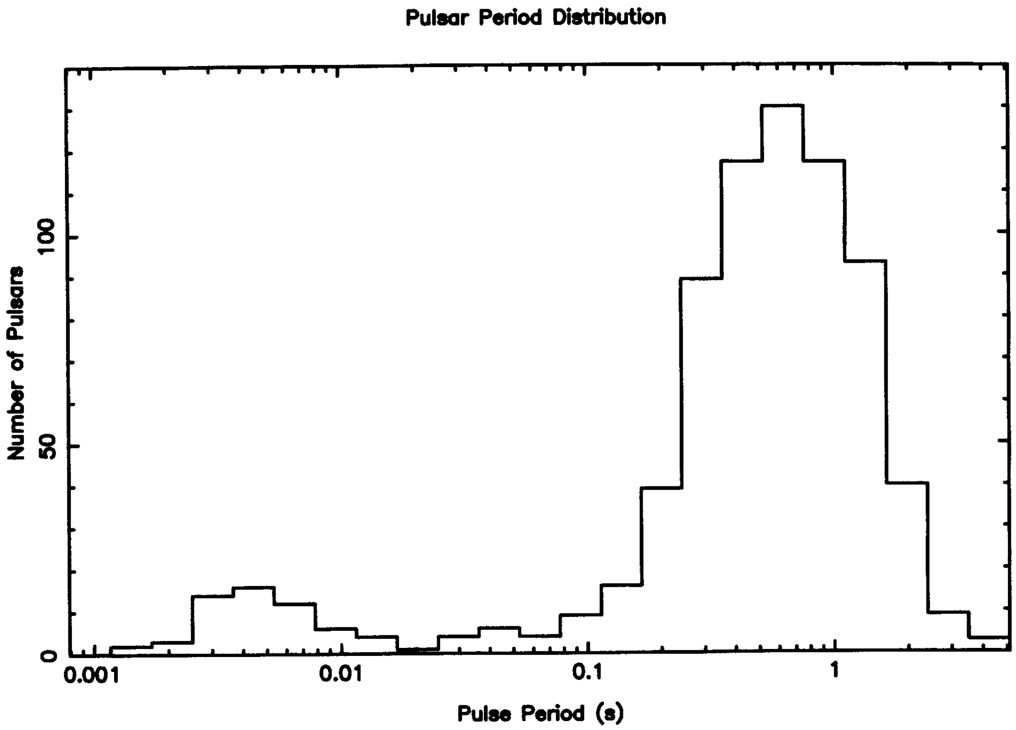
4.1 Rotacijske periode

- rotacijske periode odkritih pulzarjev znašajo od $1,6\,\mathrm{ms}$ do $5\,\mathrm{s}$
- ob nastanku ima večina pulzarjev periode $P \leq 100\,\mathrm{ms}$
- pulzarji se počasi upočasnjujejo, ker s sevanjem izgubljajo energijo
- zakaj se pulzarji tako hitro vrtijo?
  - vrtilna količina se v glavnem ohranja

    $$R_{zv}^2 \omega_{zv} \simeq R_{pul}^2 \omega_{pul}$$

  - razmerje polmerov je $R_{pulz}/R_{zv} = 10^{-5}$

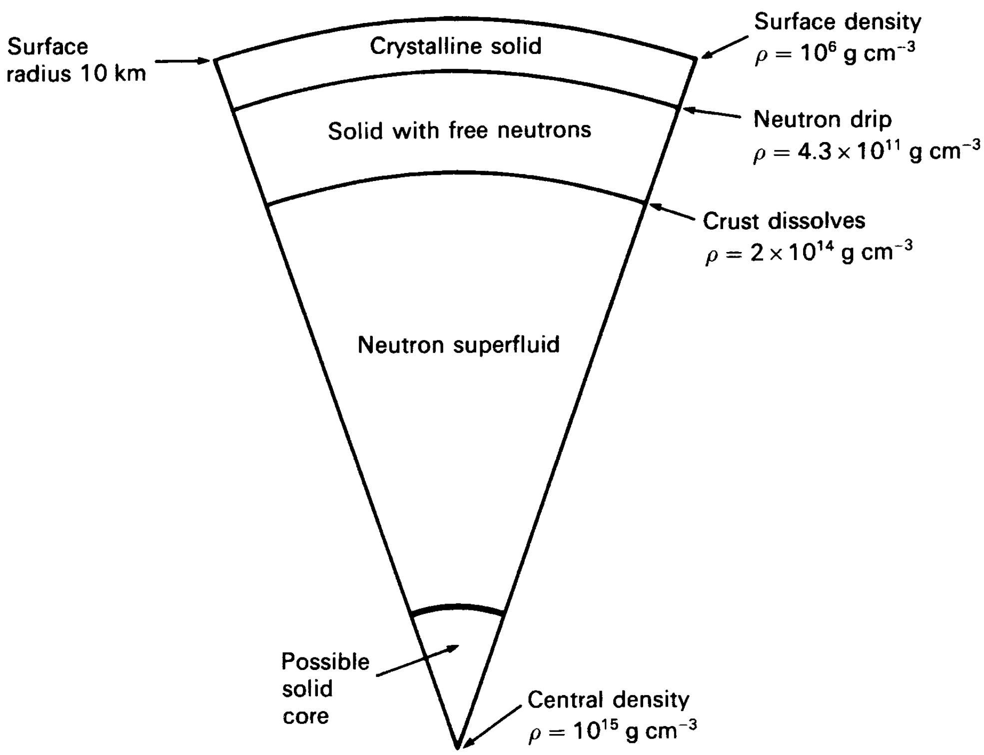
- milisekundni pulzarji
  - rotacijske periode nekaj milisekund
  - nahajajo se v dvojnih sistemih
  - manjši del populacije
  - normalno življenjsko dobo so že prešli, naknadno so jih pospešili partnerji v dvojnem sistemu
  - ustavljajo se počasneje od normalnih pulzarjev, njihovo magnetno polje je šibkejše



Slika 5: Porazdelitev pulzarjevih period

4.2 Zgradba nevtronske zvezde

- teoretična napoved za mase nevtronskih zvezd je med $0,2\,\mathrm{M}_\odot$ in $2\,\mathrm{M}_\odot$
- do sedaj izmerjene mase se gibljejo med $1,2\,\mathrm{M}_\odot$ in $1.4\,\mathrm{M}_\odot$
- polmer nevtronske zvezde je $10-15\,\mathrm{km}$
- gostota nevtronske zvezde se z radijem močno spreminja $\rho_{cent}/\rho_{surf} \simeq 10^9$
  - kristalna skorja debeline $1\,\mathrm{km}$ in gostote $\rho \simeq 10^9\mathrm{kg/m^3}$ je v glavnem sestavljena iz železa
  - pri višjih gostotah nastajajo eksotični elementi, npr. Kr_{36}^{118}
  - pri $4 \cdot 10^{14}\mathrm{kg/m^3}$ imamo jedra in nevtronsko tekočino, nevtroni postajajo degenerirani
  - pri $\rho_\circ = 2,8 \cdot 10^{17}\mathrm{kg/m^3}$ preide trdna snov v nevtronski superfluid ($\sim 5\%$ protonov in elektronov)
  - v središču nevtronske zvezde je gostota $6\rho_\circ$, tvorba mezonov in kaonov, razpad v kvarke in gluone



Slika 6: Zgradba nevtronske zvezde.

4.3 Magnetno polje

- ohranjanje magnetnega pretoka, ogromna magnetna polja
  - $B_{mp} \simeq 10^8\,\mathrm{T}$, $B_{st} \simeq 10^6\,\mathrm{T}$, $B_{ml} \simeq 10^4\,\mathrm{T}$
  - če bi bili vsi nevtronski magnetni momenti poravnani, bi bilo $B \simeq 10^{12}\,\mathrm{T}$
- magnetno polje ne vpliva na zgradbo nevtronske zvezde, izven pulzarja pa povsem nadvlada gravitacijo

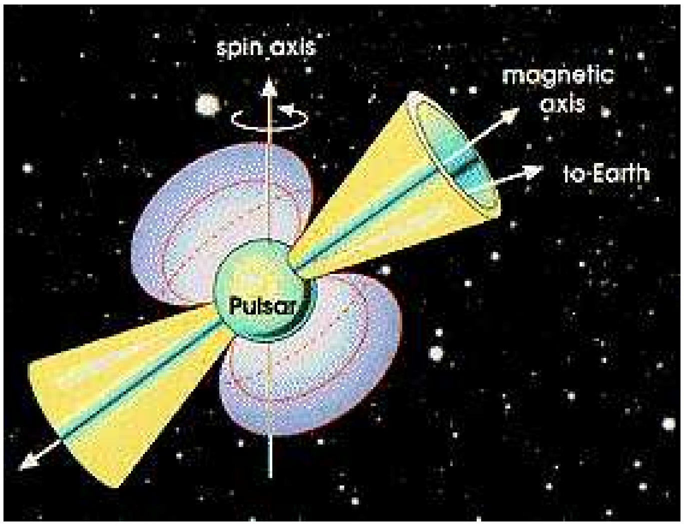
$$\frac{F_g}{F_e} = \frac{\frac{GMm}{r^2}}{e\omega r B} \simeq 10^{-12}$$

- os magnetnega dipolnega polja in rotacijska os ne sovpadata, indukcija ogromnih lokalnih električnih polj
- v magnetosferi (do $r_c = \frac{c}{\omega} \sim 5{\cdot}10^4$km) ima električno polje prevladujoč vpliv na snov (visoko energijska plazma)
- pri merjenju magnetnega polja upoštevamo, da pulzar seva kot magnetni dipol, zaradi sevalnih izgub se ustavlja

$$E_{rot} = \frac{1}{2}J\omega^2$$

$$P = \frac{\mu_0 \ddot{\mu}_{mag}^2}{6\pi c^3} \simeq -J\omega\dot{\omega}$$

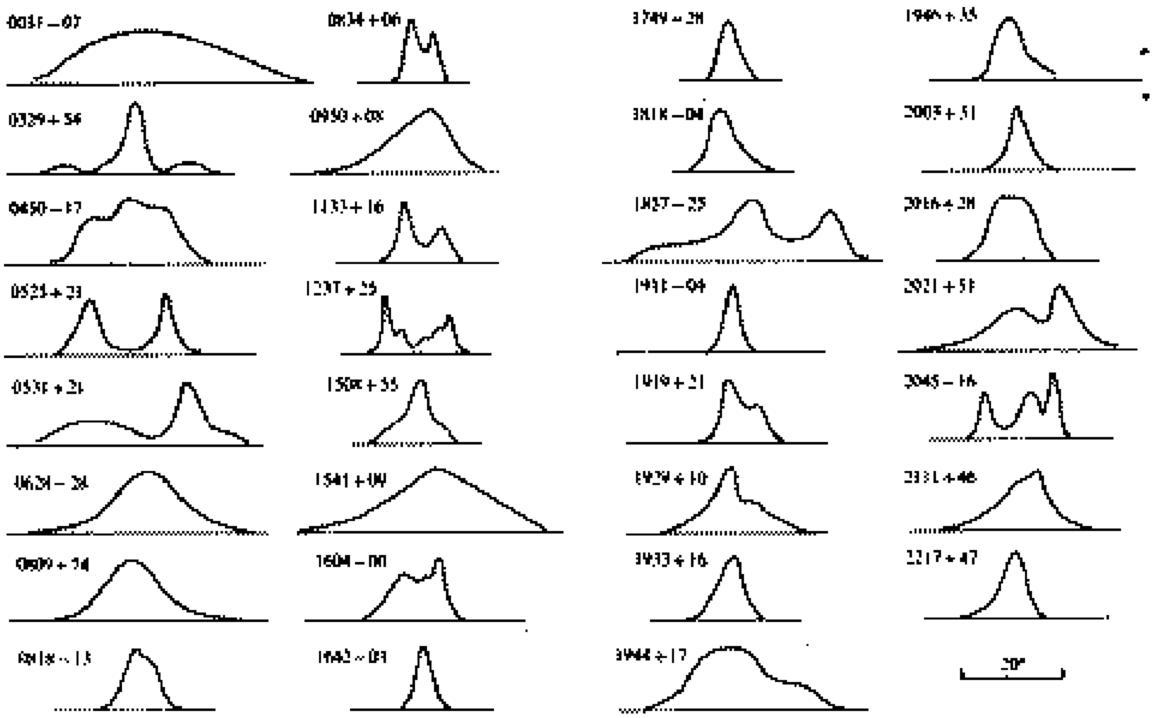
$$\mu_{mag} = \frac{BV}{\mu_0}$$



Slika 7: Pulzarjeva sevalna geometrija

4.4 Karakteristike radijskega pulza

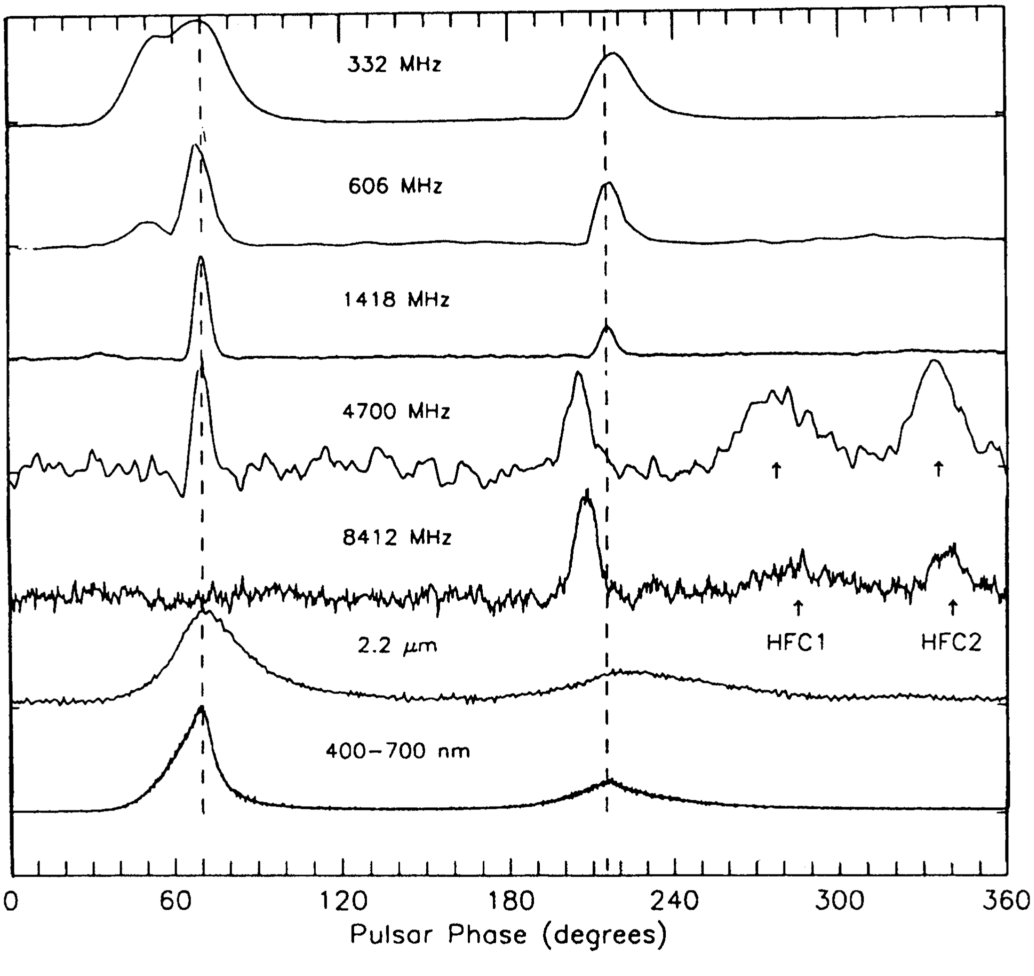
- širina pulza od 5° do 20°
- izvor direktno nad mag. poloma do nekaj deset polmerov nad površino
- integrirani pulz je stabilen in karakteristični signal z visoko povprečno polarizacijo
- vmesni pulz in geometrijska razlaga
- nepravilnosti v radijskem pulzu
  - integrirani pulz se sčasoma spreminja
  - preklapljanje med dvema integriranima pulzoma
  - podpulz, ki glede na glavni pulz drsi
  - ničti pulz



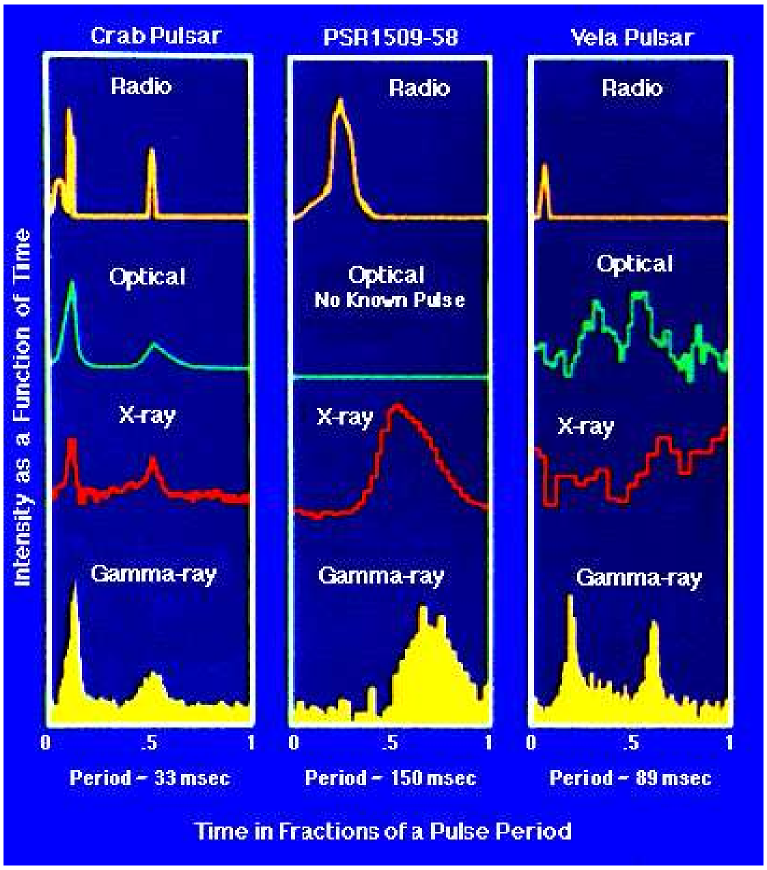
Slika 8: Primeri oblik radijskih pulzev

4.5 Višje energijska sevanja (optično, X, ...)

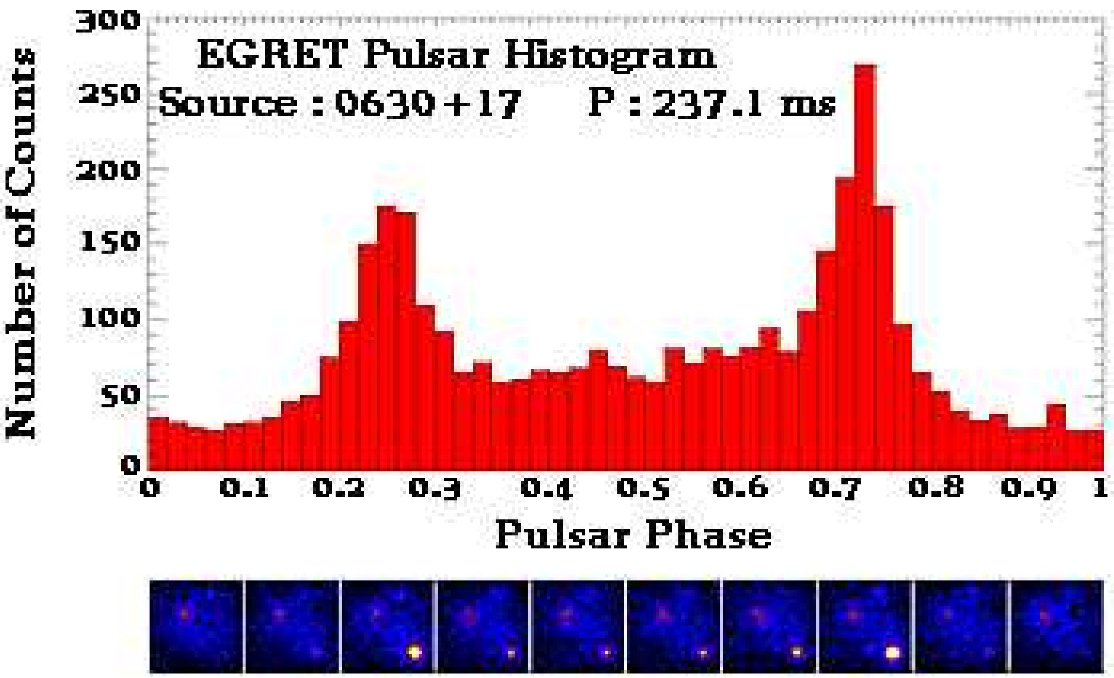
- mladi pulzarji niso samo radijski sevalci
- izvor blizu roba magnetosfere
- tvorba parov v električnem polju
  - verjetnost za tvorbo parov, $w \propto exp(-k/|E|)$
  - nastali pari elektronov in pozitronov se pospešujejo in sinhrotronsko sevajo



Slika 9: Profil pulza za pulzar v Rakovici pri različnih frekvencah.



Slika 10: Profili pulzov pri različnih valovnih dolžinah



Slika 11: Profil pulza za pulzar Geminga pri gama žarkih