

Spindown dos Pulsares e seus Índices de Frenagem

Samantha Ladislau

¹Divisão de Astrofísica
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Workshop, 2018

1 Estrelas de Nêutrons

- O que são?

2 Pulsares

- Descoberta
- Spindown por radiação de dipolo magnético (RDM) e o Índice de frenagem
- Spindown por emissão de ondas gravitacionais (OGs)
- Spindown por OGs + RDM
- Olhando para a amplitude da OG
- Referências

1 Estrelas de Nêutrons

- O que são?

2 Pulsares

- Descoberta
- Spindown por radiação de dipolo magnético (RDM) e o Índice de frenagem
- Spindown por emissão de ondas gravitacionais (OGs)
- Spindown por OGs + RDM
- Olhando para a amplitude da OG
- Referências

- Estrelas de nêutrons (EN) são extremamente densas $\rho \approx 10^{14} \text{ g/cm}^3$ ($M \approx 1.4M_{\odot}$ e $R \sim 10 \text{ Km}$) e possuem campos magnéticos que podem chegar a 10^{15} G . Essas condições extremas fazem desses objetos verdadeiros laboratórios em Física e Astrofísica.
- ENs e suas muitas facetas:
 - ▶ SGRs (*soft gamma-ray repeaters*)
 - ▶ CCOs (*central compact object*).
 - ▶ Sistemas binários.
 - ▶ Pulsares.
- Nos pulsares, os pulsos resultam da rotação da EN e provêm de um vigoroso feixe de radiação eletromagnética que acompanha a rotação da estrela e provoca um efeito de *flashes* periódicos.

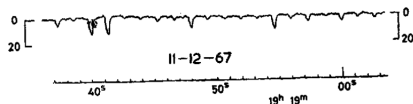
1 Estrelas de Nêutrons

- O que são?

2 Pulsares

- **Descoberta**
- Spindown por radiação de dipolo magnético (RDM) e o Índice de frenagem
- Spindown por emissão de ondas gravitacionais (OGs)
- Spindown por OGs + RDM
- Olhando para a amplitude da OG
- Referências

- Em 1967, Jocelyn Bell, estudando detectou pulsos de rádio extremamente regulares que se repetiam a cada 1.337s [Hewish et al(1968)].



- Logo após GOLD(1968) propor que as fontes seriam de fato EN magnetizadas com rápida rotação e que estariam freando devido à perda de energia cinética de rotação, Richards e Comella (1969) descobriram que o *Crab* estava desacelerando a uma taxa de 36 ns por dia.

1 Estrelas de Nêutrons

- O que são?

2 Pulsares

- Descoberta
- Spindown por radiação de dipolo magnético (RDM) e o Índice de frenagem
- Spindown por emissão de ondas gravitacionais (OGs)
- Spindown por OGs + RDM
- Olhando para a amplitude da OG
- Referências

- A taxa de diminuição de rotação dos pulsares é expresso pela lei de potência (Goldwire JR.; Michel, 1969)

$$\dot{\nu} = -K\nu^n \quad (1)$$

- Da eletrodinâmica clássica, sabemos que um dipolo magnético em rotação irradia à taxa [Shapiro; Teukolsky, (1983)]:

$$\dot{E} = \frac{8\pi^4}{3} \frac{B_0^2 R^6 \sin^2 \phi}{c^3} \nu^4 \quad (2)$$

- Considerando que taxa de variação de energia cinética de rotação do pulsar

$$\dot{E}_{rot} = 4\pi^2 I \nu \dot{\nu} \quad (3)$$

- é igual a perda de energia por radiação de dipolo magnético, chegamos em

$$\dot{\nu} = -\frac{2\pi^2 B_0^2 R^6 \sin^2 \phi}{3Ic^3} \nu^3 \quad (4)$$

- $n = 3$

- Felizmente, n é mensurável. Ele é dado em termos de quantidades observáveis:

$$n = \frac{\nu \ddot{\nu}}{\dot{\nu}^2} \quad (5)$$

- Dos ≈ 2400 pulsares conhecidos, 9 têm seus índices de frenagem medidos [de ARAUJO et al., (2016)]:

Pulsar	P (s)	\dot{P} (10^{-13} s/s)	n
PSR J1734-3333	1.17	22.8	0.9 ± 0.2
PSR B0833-45 (Vela)	0.089	1.25	1.4 ± 0.2
PSR J1833-1034	0.062	2.02	1.8569 ± 0.0006
PSR J0540-6919	0.050	4.79	2.140 ± 0.009
PSR J1846-0258	0.324	71	2.19 ± 0.03
PSR B0531+21 (Crab)	0.033	4.21	2.51 ± 0.01
PSR J1119-6127	0.408	40.2	2.684 ± 0.002
PSR J1513-5908	0.151	15.3	2.839 ± 0.001
PSR J1640-4631	0.207	9.72	3.15 ± 0.03

- Uma simples inspeção na tabela nos mostra que quase todos os pulsares têm $n < 3$, exceto PSR J1640-4631 com $n = 3.15$ e cujo *braking index* foi recentemente medido.

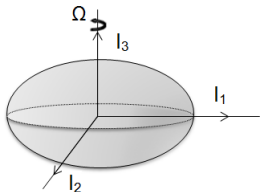
1 Estrelas de Nêutrons

- O que são?

2 Pulsares

- Descoberta
- Spindown por radiação de dipolo magnético (RDM) e o Índice de frenagem
- Spindown por emissão de ondas gravitacionais (OGs)
- Spindown por OGs + RDM
- Olhando para a amplitude da OG
- Referências

- E se considerarmos a perda de energia do pulsar por emissão de OGs?



- Para um objeto levemente achatado, pode-se mostrar que [Shapiro; Teukolsky, (1983)]

$$\dot{E} = -\frac{2048\pi^6 G I^2 \epsilon^2}{5c^5} \nu^6 \quad (6)$$

- o que leva a:

$$\dot{\nu} = -\frac{512\pi^4 G I \epsilon^2}{5c^5} \nu^5 \quad (7)$$

- Veja que agora $n = 5$

1 Estrelas de Nêutrons

- O que são?

2 Pulsares

- Descoberta
- Spindown por radiação de dipolo magnético (RDM) e o Índice de frenagem
- Spindown por emissão de ondas gravitacionais (OGs)
- **Spindown por OGs + RDM**
- Olhando para a amplitude da OG
- Referências

- Combinando os dois modelos é possível mostrar que [de ARAUJO et al., (2016)]

$$n = 3 + 2\eta - 2\frac{P}{\dot{P}}(1 - \eta) \left[\frac{\dot{B}_0}{B_0} + \dot{\phi} \cot \phi \right] \quad (8)$$

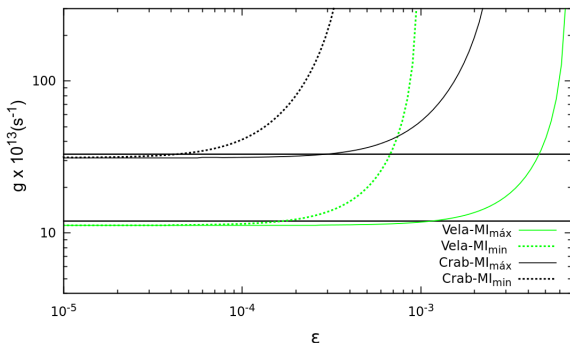
- onde η é a eficiência de geração de OGs.
- Veja o quão interessante é a Equação obtida, porque ela nos diz que com combinação apropriada do termo entre colchetes podemos ter $n < 3$. Além disso, para $\eta = 1$, temos $n = 5$.
- Chamando $[\dot{B}_0/B_0 + \dot{\phi} \cot \phi]$ de uma função $g = g(B_0, \dot{B}_0, \phi, \dot{\phi})$

$$g = -\frac{(n - 3 - 2\eta) \dot{P}}{2(1 - \eta) P} \quad (9)$$

- é possível associar η à elipticidade do pulsar ϵ por:

$$\eta = \frac{512\pi^4 G I}{5c^5 \dot{P} P^3} \epsilon^2 \quad (10)$$

- Utilizando valores observacionalmente inferidos $\dot{\phi} = 3 \times 10^{-12} \text{rad/s}$ para o Crab e $\dot{\phi} = 1.2 \times 10^{-12} \text{rad/s}$ para o Vela [Link, B.; Epstein, R.I.,(1997)], além dos valores representativos $\dot{B}_0 = 0.05 \text{G/s}$ e $\phi = \pi/4$, encontramos respectivamente $g_{crab} \approx 3 \times 10^{-12} \text{s}^{-1}$ e $g_{vela} \approx 1.2 \times 10^{-12} \text{s}^{-1}$



1 Estrelas de Nêutrons

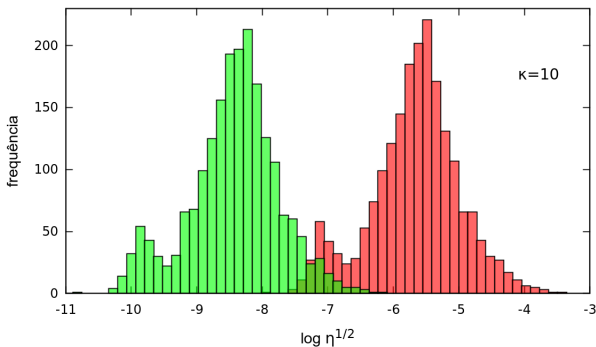
- O que são?

2 Pulsares

- Descoberta
- Spindown por radiação de dipolo magnético (RDM) e o Índice de frenagem
- Spindown por emissão de ondas gravitacionais (OGs)
- Spindown por OGs + RDM
- **Olhando para a amplitude da OG**
- Referências

- η pode ser expresso por:

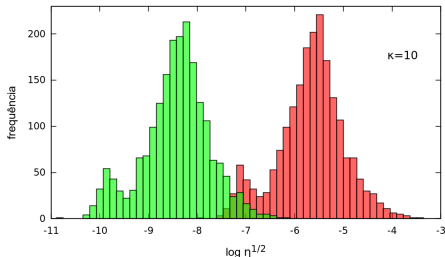
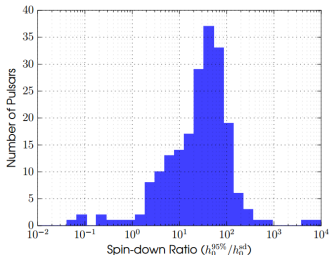
$$\eta \approx \frac{288}{5} \frac{I^3 c}{5GM^4 R^4} \frac{\dot{P}}{P} \kappa^2$$



- Em vermelho (verde) tomamos o valor mínimo (máximo) de $0.1M_{\odot}$ ($2.4M_{\odot}$) para massas resultantes de uma equação de estado realística.

- Focando-se na influência de η na amplitude da OG, temos

$$\eta^{1/2} = \frac{h}{h^{SD}}$$



- À esquerda temos um resultado para a busca de OGs para 200 pulsares utilizando o aLIGO. Veja que na melhor das hipóteses $\eta \sim 10^{-4} - 10^{-3}$ para nosso estudo, o que ainda não cai na faixa prevista por [Abbott et al., (2017)].

1 Estrelas de Nêutrons

- O que são?

2 Pulsares

- Descoberta
- Spindown por radiação de dipolo magnético (RDM) e o Índice de frenagem
- Spindown por emissão de ondas gravitacionais (OGs)
- Spindown por OGs + RDM
- Olhando para a amplitude da OG
- Referências

- ABBOTT, B.; ABBOTT, R.; ABBOTT, T.; ABERNATHY, M.; ACERNESE, F.; ACKLEY, K.; ADAMS, C.; ADAMS, T.; ADDESSO, P.; ADHKARI, R.; AL. et. First Search for Gravitational Waves from Known Pulsars with Advanced LIGO. , v. 839, p. 12, abr. 2017.
- de ARAUJO, J. C. N.; Coelho, J. G.; Costa, C. A. Gravitational waves from pulsars with measured braking index. European Physical Journal C, v. 76, p. 481, set. 2016.
- GOLD, T. Rotating Neutron Stars as the Origin of the Pulsating Radio Sources. , v. 218, p. 731–732, maio 1968
- GOLDWIRE JR., H. C.; MICHEL, F. C. Analysis of the Slowing-Down Rate of NP 0532. , v. 156, p. L111, jun. 1969.

- Hewish, A.; Bell, S. J.; Pilkington, J. D. H.; Scott, P. F.; Collins, R. A. Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source. , v. 217, p. 709–713, fev. 1968.
- LINK, B.; EPSTEIN, R.I. Are We Seeing Magnetic Axis Reorientation in the Crab and VELA Pulsars? v. 478, p. L91-L94, abril 1997
- Richards, D. W.; Comella, J. M. The Period of Pulsar NP 0532. , v. 222, p. 551–552, maio 1969.
- SHAPIRO, S. L.; TEUKOLSKY, S. A. Black holes, white dwarfs, and neutron stars: The physics of compact objects. [S.l.: s.n.], 1983.