

A influência da evolução temporal das propriedades do pulsar em seu índice de frenagem

The influence of the temporal evolution of the pulsars properties in its braking index

RESUMO

Estrelas de nêutrons são corpos celestes com certas propriedades curiosas e difíceis de serem observadas. Dentre as propriedades, podemos mencionar o spindown do pulsar que está relacionado diretamente com a perda de energia rotacional dos pulsares. Um dos parâmetros que tentam explicar esta relação é o índice de frenagem, sendo o mesmo responsável por medir a desaceleração do pulsar. Em 2016, o aLIGO (advanced LIGO) detectou um pulsar com o maior índice de frenagem já medido, sendo o único maior que três, fato o qual contribuiu para a criação de novos modelos, dentre eles está o modelo DM-OG (dipolo magnético - ondas gravitacionais). Além disso, outro fator que influencia no comportamento do índice de frenagem do pulsar é a evolução temporal de outras propriedades desta classe de estrela como por exemplo o campo magnético e o ângulo formado pelos eixos dipolar e de rotação.

PALAVRAS-CHAVE: índice de frenagem.Spindown. Energia rotacional.

ABSTRACT

Neutron stars are celestial bodies with certain curious properties that are difficult to observe. Among the properties we can mention the spindown of the pulsar, which is directly related to the loss of rotational energy of the pulsars. One of the parameters that tries to explain this relationship is the braking index, being the same responsible for measuring the pulsar deceleration. In 2016, aLIGO (advanced LIGO) detected the pulsar with the highest braking index ever measured, the only one being greater than three, a fact that contributed to the creation of new models among them, is the DM-OG model (magnetic dipole-gravitational waves). In addition to another factor that influences the behavior of the braking index of the pulsar is the evolution of other properties of this class of star such as the magnetic field and the angle formed by the dipole and rotation axes.

KEYWORDS: Braking index.Spindown.Rotational energy.

Flavio Augusto Cassiano Mendes
Mendesflavio594@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil

Jaziel Goulart Coelho
jazielcoelho@utfpr.br.edu
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

O índice de frenagem de um pulsar, é um parâmetro que está relacionado com a perda de energia rotacional da estrela de nêutron através da desaceleração da mesma, alguns dos mecanismos que podem levar ao freamento do pulsar são:

- A radiação emitida pelo dipolo magnético;
- A emissão de ondas gravitacionais.

O índice de frenagem é calculado por:

$$n = (P\ddot{P})(\dot{P}^{-2}) \quad (1)$$

Analisando a equação (1), percebe-se que o índice de frenagem é proporcional ao produto entre o período de rotação do pulsar e sua segunda derivada, sendo inversamente proporcional ao quadrado do spindown do pulsar (primeira derivada do período).

“A variação do período de rotação do pulsar implica na perda de energia rotacional do pulsar[...]” (Shapiro; Teukousky, 1987, p.267, tradução nossa), a relação entre o índice de frenagem e a perda de energia rotacional é explicada por:

$$\dot{\Omega}_{rot} = -K\Omega^n \quad (2)$$

Segundo a equação (2), a perda de energia rotacional é equivalente ao produto entre uma constante K e a frequência do pulsar elevada ao índice de frenagem (n), caso o índice de frenagem seja menor que três (n<3) ele é causado pela emissão de radiação do dipolo magnético, já por outro lado é influenciado por ondas gravitacionais se o índice de frenagem for menor que cinco (n<5).

MATERIAIS E MÉTODOS

“[...] até então acreditava-se que somente oito pulsares possuíam o índice de frenagem medido[...]” (ARAUJO; COELHO; COSTA, 2016a, p. 1, tradução nossa), o nono pulsar foi detectado em 2016 pelo aLIGO, sendo este pulsar o PSRJ 1640-4631, o único com um índice de frenagem de maior que três.

Tabela 1 - Pulsares com o índice de frenagem medido e suas propriedades

Pulsar(PSR)	P(s)	$\dot{P}(10^{-13}\text{s/s})$	n	ϵ	η
J1734-3333	1,17	22,8	0,9±0,2	$1,2 \times 10^{-7(-5)}$	$1,1 \times 10^{-13(-9)}$
B0833-45	0,089	1,25	1,4 ±0,2	$4,9 \times 10^{-10(-8)}$	$8,3 \times 10^{-14(-10)}$
J1833-1034	0,062	2,02	1,857±0,0006	$5,5 \times 10^{-10(-8)}$	$1,9 \times 10^{-13(-9)}$
J0540-6919	0,050	4,79	2,140±0,009	$1,1 \times 10^{-9(-7)}$	$5,7 \times 10^{-13(-9)}$
J1846-0258	0,324	71	2,19±0,03	$1,0 \times 10^{-7(-5)}$	$1,3 \times 10^{-12(-8)}$
B0531+21	0,033	4,21	2,51±0,01	$6,1 \times 10^{-10(-8)}$	$7,5 \times 10^{-13(-9)}$
J1119-6127	0,408	40,2	2,684±0,002	$7,2 \times 10^{-8(-6)}$	$5,8 \times 10^{-13(-9)}$
J1513-5908	0,151	15,3	2,839±0,001	$1,0 \times 10^{-8(-6)}$	$6,0 \times 10^{-13(-9)}$
J1640-4631	0,207	9,72	3,15±0,03	$8,9 \times 10^{-9(-7)}$	$2,8 \times 10^{-13(-9)}$

Fonte: Autoria própria (2020).

Na Tabela 1, mostramos os pulsares que possuem o índice de frenagem medido e algumas propriedades do pulsar como no caso:

- Período de rotação do pulsar(P);
- Spindown do pulsar (\dot{P});
- Índice de frenagem (n);
- Elipticidade (ϵ);
- Eficiência das ondas gravitacionais(η).

“O índice de frenagem do PSRJ1640-4631 é causado tanto pela influência das ondas gravitacionais quanto pela emissão de radiação emitida pelo dipolo magnético” (ARAUJO; COELHO; COSTA,2016b, p.2, tradução nossa), com base nisto podemos escrever a relação de perda de energia para o pulsar PSRJ1640-4631:

$$\dot{E}_{rot} = \dot{E}_{md} + \dot{E}_{og} \quad (3)$$

Aplicando as definições para a perda de energia rotacional, perda de energia das ondas gravitacionais (\dot{E}_{og}) e da perda da energia dipolar (\dot{E}_{dm}) na equação (3), chegamos em:

$$\dot{\Omega}_{rot} = \dot{\Omega}_{md} + \dot{\Omega}_{og} \quad (4)$$

Desta forma, é possível determinar o rendimento das ondas gravitacionais emitidas pelo pulsar, o qual é calculado por:

$$\eta = (\dot{\Omega}_{og})(\dot{\Omega}_{rot})^{-1} \quad (5)$$

Analisando a equação (5), pode-se afirmar que a eficiência das ondas gravitacionais é a razão entre a frequência da perda de energia das ondas gravitacionais e a frequência da perda de energia rotacional:

$$n = 3 + 2\eta \quad (6)$$

Com base na equação (6), se utilizarmos os dados mostrados na tabela 1, chegaremos à conclusão que a eficiência das ondas gravitacionais para PSRJ1640-4631 é de 7,5% ($\eta=0,075$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para utilizar este modelo para outros pulsares que possuem o índice de frenagem medido, é preciso considerar alguns fatores, como por exemplo, se existe ou não a influência da elipticidade magnética.

Considerando que não exista a influência da elipticidade magnética, é possível reescrever a equação (6) da seguinte maneira:

$$n = 3 + 2\eta - P\dot{P}^{-1} \cdot (2 - 2\eta) \cdot [\dot{B}B^{-1} + \dot{\phi}\cot(\phi)] \quad (7)$$

Na equação (7), é mostrado que a relação entre o índice de frenagem e a eficiência das ondas gravitacionais é influenciada por propriedades como o campo magnético (B) do pulsar, pelo ângulo formado pelo eixos de rotação e dipolo magnético (ϕ), e suas respectivas evoluções temporais (\dot{B}) e ($\dot{\phi}$).

O campo magnético de um pulsar é obtido através de uma relação entre a radiação magnética emitida (calculada através das equações de Lamour) e a perda de energia rotacional:

$$P_{rad} = \dot{E}_{rot} \quad (8)$$

A partir da relação (8) é possível obter:

$$B = K(P\dot{P})^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Assim, o campo magnético de um pulsar se relaciona com o período de rotação e seu spindown, derivando a equação (9), temos:

$$\dot{B} = k(P\ddot{P} + \dot{P}^2) \cdot (2\sqrt{P\dot{P}})^{-1} \quad (10)$$

Substituindo as equações (9) e (10) na equação (7), chega-se em:

$$n = 3 + 2\eta - C(2 - 2\eta) - P\dot{P}^{-1}(2 - 2\eta) (\phi \cot(\phi)) \quad (11)$$

Onde C é uma constante, dada por:

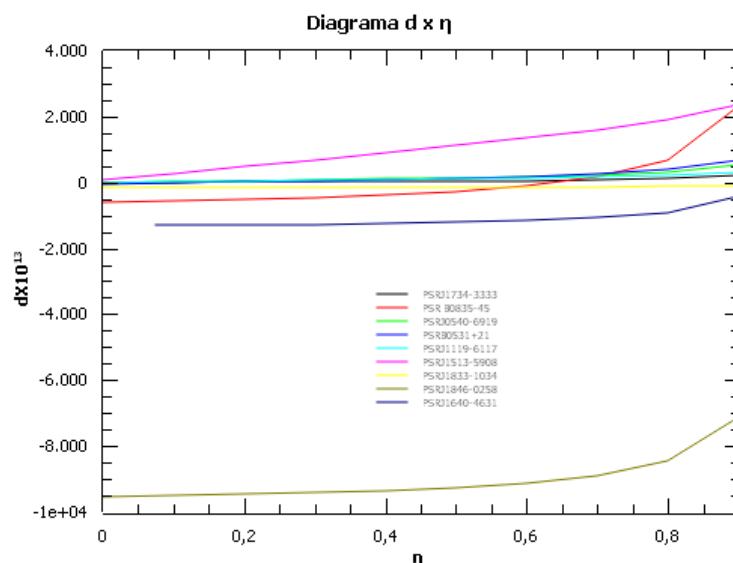
$$C = (P\dot{P} + \dot{P}^2) \cdot (\dot{P}^2)^{-1} \quad (12)$$

Na equação (11), é mostrado que a relação entre a eficiência das ondas gravitacionais e o índice de frenagem é dependente de três variáveis, sendo uma delas a própria eficiência das ondas gravitacionais, e as outras duas variáveis são o ângulo formado pelo eixo dipolo magnético e pelo eixo de rotação e o outro a sua derivada. Com base nisto, é plausível transformar estas duas últimas variáveis citadas em uma função de duas variáveis que pode ser escrita como:

$$d = \frac{n-3-2\eta+C(1-\eta)-\dot{P}}{2-2\eta} \cdot \frac{1}{P} \quad (13)$$

Com base na equação (14), é demonstrado um diagrama o qual relaciona a função d ($\phi, \dot{\phi}$) com a eficiência das ondas gravitacionais(η):

Figura 1 – Diagrama dx η



Fonte: Autoria própria(2020).

No diagrama ($dx\eta$) (Figura 1), é notado que os pulsares apresentam um crescimento semelhante a uma função exponencial conforme a eficiência das ondas gravitacionais vão aumentando.

“[...] um dos fatores que podem influenciar nos cálculos do índice de frenagem é a variação da elipticidade magnética em função do tempo[...]” (ARAUJO; COELHO; COSTA, 2016c p.2, tradução nossa), considerando que haja influência da elipticidade magnética, a equação (11) é reescrita desta forma:

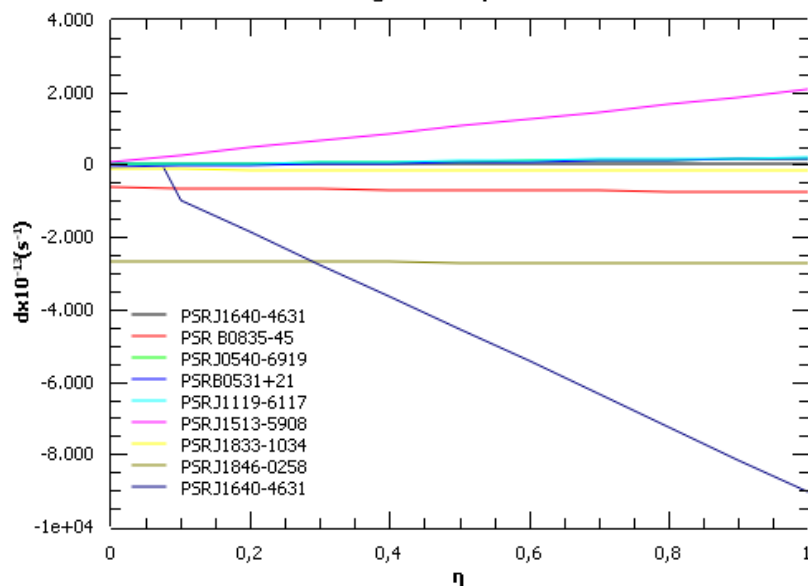
$$n = 3 + 2\eta - C(2 + 2\eta) - P\dot{P}^{-1}(2 + 2\eta) (\phi \cot(\phi)) \quad (14)$$

Substituindo (13) em (11) e fazendo as operações de forma correta chega-se em:

$$d = \frac{n-3-2\eta+C(1+\eta)-\dot{P}}{2+2\eta} \frac{1}{P} \quad (15)$$

Com base na equação (15), é possível elaborar um segundo diagrama que relaciona a função $d(\phi, \dot{\phi})$ com a eficiência das ondas gravitacionais(η):

Figura 2 – Diagrama $dx\eta$, levando em conta a elipticidade magnética
Diagrama $dx\eta$



Fonte: Autoria própria(2020).

No segundo diagrama ($dx\eta$) (Figura 2), é afirmado que devido a influência da elipticidade magnética, a grande maioria dos pulsares apresentam um crescimento conforme a eficiência das ondas gravitacionais aumentam, porém não exponencial como o diagrama anterior, além disso o PSRJ1640-4631 apresenta queda conforme a eficiência das ondas gravitacionais vão aumentando. Assim é observável, que os pulsares com índice de frenagem abaixo de três apresentam uma relação de crescimento conforme a influência das ondas gravitacionais aumentam, enquanto o pulsar com índice de frenagem maior que três apresenta uma relação de queda conforme cresce a influência das ondas gravitacionais.

CONCLUSÃO

O índice de frenagem de um pulsar, é um parâmetro que busca explicar a relação de perda de energia rotacional de uma estrela de nêutron, por meio da ideia de desaceleração do mesmo, sendo que o freamento do pulsar é causado por mecanismos de perda de energia como por exemplo, a radiação dipolar que é emitida pelos polos magnéticos do pulsar e a emissão de ondas gravitacionais. Em 2016, a detecção do índice de frenagem do PSRJ1640-4631, sendo o único maior que três, criou novas possibilidades para o estudo das relações entre perda de energia rotacional e as faixas frenagem dos pulsares, já que possibilitou a criação do modelo DM-OG (dipolo magnético e ondas gravitacionais) o qual descreve os impactos causados pelos mecanismos de emissão de radiação magnética e pela emissão de ondas gravitacionais. Podemos concluir que se considerarmos a influência da elipticidade magnética, os pulsares cujo o índice de frenagem é menor que três, apresentam uma relação de crescimento, à medida que a eficiência das ondas gravitacionais aumentam, enquanto o PSRJ1640-4631 apresenta um comportamento de queda conforme o aumento da influência das ondas gravitacionais. Entretanto, se a influência da elipticidade magnética não for considerada, é possível afirmar que as linhas de frenagem do pulsar demonstram um crescimento exponencial conforme o aumento da influência das ondas gravitacionais. Com estas conclusões podemos explicar os índices de frenagem a partir do modelo DM-OG, além disso também conseguimos mostrar a influência da evolução temporal de algumas propriedades do pulsar (como por exemplo o campo magnético) para o cálculo do índice de frenagem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico(CNPq), pela bolsa de Iniciação Científica (Edital PROPPG 08/2020— PIBIC) concedida ao acadêmico Flavio Augusto Cassiano Mendes.

Eu gostaria de agradecer ao Professor Dr. Jaziel Goulart Coelho, pela oportunidade concedida e por ter me guiado e auxiliado nesta iniciação científica.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, J. C. N. de; COELHO, J. G.; COSTA, C. A. Gravitational wave emission by the high braking index pulsar PSR J1640-4631. **Journal of Cosmology and Astroparticle Physics**, v. 23, n. 07, p.1-8, 2016. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1475-7516/2016/07/023/meta>>. Acesso em: 15 set. 2019

ARAUJO, J. C. N. de; COELHO, J. G.; COSTA, C. A. Gravitational Waves from Pulsars and Their Braking Indices: The Role of a Time Dependent Magnetic Ellipticity, **The Astrophysical Journal**, São José dos Campos, v. 831, n. 01, p.1-5, 2016. Disponível em: < <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/0004-637X/831/1/35> >. Acesso em: 15 set. 2019

ARAUJO, J. C. N. de; COELHO, J. G.; COSTA, C. A. Gravitational waves from pulsars with measured braking index. **European Physical Journal C**, v.76, n. 481, p.1-6, 2016. Disponível em:< <https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-016-4327-y> >. Acesso em: 15 set. 2019

SHAPIRO, S. L.; TEUKOUSKY, S. A. **Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars:**
The Physics of Compact Objects. New York: Wiley-Interscience, 1983.