



SEI-SICITE 2021

Pesquisa e Extensão para um mundo em transformação

Ondas Gravitacionais por acreção de matéria em Anãs Brancas de rápida rotação

Gravitational waves by matter accretion in rapidly rotating White Dwarfs

Victor Bueno Fontes (orientado)*, Jaziel Goulart Coelho (orientador)†,

RESUMO

O estudo de Ondas Gravitacionais tem levantado novos questionamentos sobre sistemas astrofísicos, permitindo que obtenhamos informações nunca antes alcançadas sobre esses objetos e sistemas. Atualmente, entende-se que Anãs Brancas de rápida rotação são promissoras fontes de Ondas Gravitacionais, por serem, comumente, encontradas em sistemas binários acreando matéria, sendo variáveis cataclísmicas ou em um estágio evolucionário avançado destas. Neste artigo, estudaremos os sistemas V1460 Her, AE Aquarii, AR Scorpii e RX J0648.0-4418, além das curvas de sensibilidade dos detectores de Ondas Gravitacionais, tais como LISA, BBO e DECIGO. O objetivo deste trabalho é determinar quais detectores poderiam ser utilizados para estudar as Ondas Gravitacionais dos sistemas com Anã Branca de rápida rotação, chegando no resultado que a AE Aquarii e RX J0648 são fortes candidatas para serem detectadas pelo BBO e DECIGO, caso possuam um amontoado de massa de $\delta m = 10^{-5} M_{\odot}$, enquanto a V1460 Her é uma forte candidata para ser observada pelos mesmos detectores, se possuir amontoado de massa $\delta m = 10^{-4} M_{\odot}$.

Palavras-chave: Ondas Gravitacionais, Detectores de Ondas Gravitacionais, Anãs Brancas

ABSTRACT

The study of Gravitational Waves raised new questions about astrophysical systems, allowing us to obtain information that has never been achieved before about these objects and systems. Currently, it is understood that fast-rotating White Dwarfs are sources of Gravitational Waves, because they are commonly found in binary systems accreting matter, being cataclysmic variables or in an advanced evolutionary stage of these. In this article, we will study the Systems V1460 Her, AE Aquarii, AR Scorpii and RX J0648.0-4418, in addition to the sensitivity curve data of gravitational wave detectors, such as LISA, BBO and DECIGO. The objective of this work is to determine which detectors could be used to study the Gravitational Waves of the four systems with fast rotating White Dwarfs, reaching the result that AE Aquarii, RX J0648 are strong candidates to be observed by the space detectors BBO and DECIGO, if they have a heap of mass $\delta m = 10^{-5} M_{\odot}$, while the V1460 Her is a strong candidate to be observed by the same spatial detectors if it has a heap of mass $\delta m = 10^{-4} M_{\odot}$.

Keywords: Gravitational Waves, Gravitational-wave detector, White Dwarfs.

* Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil;
victorfontes@alunos.utfpr.edu.br

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Medianeira ; jazielcoelho@utfpr.edu.br



1 INTRODUÇÃO

Desde a suposição da existência de Ondas Gravitacionais (OGs), derivada da Teoria da Relatividade Geral (TRG) formulada por Einstein, o estudo de OGs tem sido de grande interesse da comunidade científica. Afinal, a detecção direta dessas ondas tem proporcionado novas descobertas científicas, levantando novos questionamentos sobre sistemas astrofísicos. No dia 14 de Setembro de 2015 foi realizada a primeira detecção direta de ondas gravitacionais, observadas pelos detectores LIGO e emitidas por um sistema de dois buracos negros de 36 e 29 massas solares girando um em torno do outro até se fundirem em um buraco negro de 62 massas solares (WEISS et al. 2018).

Os Detectores de Ondas Gravitacionais utilizam interferômetros no solo e no espaço, dependendo do tipo de detector. Esses interferômetros, por sua vez, são instrumentos ópticos usados para detectar pequenas variações em um feixe de luz. Nestes aparelhos temos uma fonte de luz emitindo um feixe que é dividido em dois. Cada feixe caminha, por um braço, certa distância até encontrar um espelho, fazendo o caminho inverso, recombinando então esses feixes e sendo projetados em um anteparo. Como a luz se comporta como uma onda, a recombinação dos feixes permite observarmos efeitos de interferências minúsculas, como as causadas por Ondas Gravitacionais, que são caracterizadas por esticar o espaço em uma direção, enquanto o achata em uma direção perpendicular a esta.

Nesse artigo, consideraremos somente detectores com bases espaciais, especificamente, o LISA (Laser Interferometer Space Antenna), o BBO (Big Bang Observer) e o DECIGO (DECi – hertz Interferometer Gravitational wave Observatory).

Atualmente, entende-se que Anãs Brancas (AB) de rápida rotação também podem ser fontes emissoras de OGs e podem gerar essas ondas devido ao amontoado de massa na superfície da estrela, que se acumula nos polos magnéticos e que gera oscilações no espaço-tempo.

As Anãs Brancas são objetos compactos que tiveram os primeiros estudos sendo realizados em 1850, com a descoberta da Sirius B. Essas estrelas possuem massa comparável à do Sol, mas de tamanho apenas ligeiramente maior do que o da Terra. Após ocorrer o esgotamento das reservas de combustível nuclear em estrelas de média dimensão, as quais, sem a pressão de Fermi, cedem à força da gravidade e solidificam, resultando em ABs. Essas estrelas, formadas por carbono ou oxigênio, não possuem uma fonte de energia nuclear que as mantenham luminosas por muito tempo, assim, mantém-se irradiando luz pela conversão de seu manancial de energia interna em radiação, o que implica que a estrela lentamente se esfria. Acredita-se que todas as estrelas com massas entre $0,08$ e $8 M_{\odot}$ estão destinadas a terminar as suas vidas como anãs brancas. Nesse trabalho, focaremos em estudar as fontes: V1460 Her, AE Aquarii, AR Scorpii e RX J0648.0-4418, todas localizadas sistemas binários que contém uma AB magnetizada de alta rotação, acretando matéria de uma estrela doadora (KEPLER et al, 2013). Isso, com o objetivo de identificar quais delas poderiam ser detectadas pelo LISA, BBO ou DECIGO.

2 MÉTODO

Neste trabalho, foram obtidos os dados que seriam utilizados para estudar as características dos sistemas V 1460 Her, AE Aquarii, AR Scorpii e RX J0648.0-4418, e definidas as curvas de sensibilidade dos detectores LISA, BBO e DECIGO, a fim de estimar quais poderiam ser utilizados para detectar as OGs dessas fontes.

A presença de massa e energia deforma o espaço-tempo, criando o que conhecemos como gravidade (STEPHANI, 2004). Como consequência dessa deformação, existem Ondas Gravitacionais, que são perturbações na geometria do espaço-tempo devido à matéria acelerada. Esse tipo de onda não precisa de um

meio para se propagar, viajam à velocidade da luz e carregam energia em forma de radiação gravitacional. Porém, a intensidade dessas ondas é bem pequena devido à força gravitacional ser fraca.

A discussão sobre a existência de OGs era apenas teórica até a década de 1960 (ABBOTT et al., 2016). Foi apenas entre os anos de 2015 a 2017, que foram construídos os primeiros detectores de Ondas Gravitacionais, tais como o LIGO (Laser Interferometer Gravitational- Wave Observatory), que viria a realizar a primeira detecção direta de OGs em 14 de Setembro de 2015 (SOUSA et al, 2019).

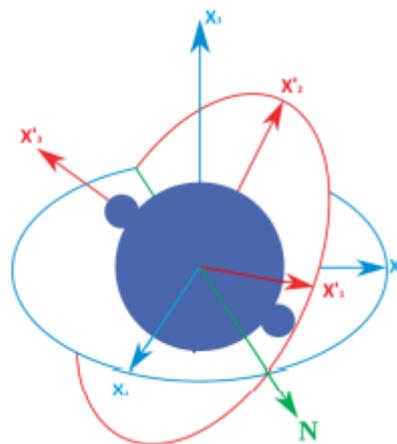
Este artigo investigou a geração de OGs devido ao acréscimo de matéria, seguindo os modelos apresentados em Sousa et al (2019) em que AB está acretando matéria pelos polos magnéticos tal que esses polos não coincidem com o eixo de rotação da estrela.

Tendo uma estrela axi-simétrica em torno do seu eixo de rotação, a curvatura no espaço-tempo ao seu redor é constante e portanto, não há oscilações se propagando, desta forma, não haverá a emissão de OGs. No entanto, se a estrela compacta tiver imperfeições ou deformações em sua forma, causando uma assimetria em relação ao eixo de rotação, ela produzirá deformações no espaço-tempo que varia no tempo e que se propagarão pelo universo como OGs contínuas. Essa deformação pode ocorrer devido ao acréscimo de matéria, gerando a emissão de Ondas gravitacionais (SOUSA et al. 2019).

Tendo, portanto, um sistema onde há uma estrela secundária que transfere matéria para uma estrela primária, nesse caso, uma Anã Branca de rápida rotação, através de uma coluna de acreção, sem formar um disco, e que acumula uma quantidade de massa nos pólos magnético (WELSH et al. 1998).

Consideremos também um objeto rígido, com dois sistemas de coordenadas: um fixo, considerado o referencial inercial, com eixos (x_1, x_2, x_3) e outro que rotaciona o objeto e tem eixos (x'_1, x'_2, x'_3) que coincidem com os momentos de inércia principais (I_1, I_2, I_3) , respectivamente. Essa relação é demonstrada, juntamente com a deformação gerada pelo acréscimo de matéria, pela Figura 1:

Figura 1 – Objeto rígido com matéria amontoadada sobre o eixo X_3 .



Fonte: SOUSA et al (2019)

Este sólido gira com velocidade angular ω em relação a um eixo que forma um ângulo θ com o eixo x_3 . Além disso, consideremos que o eixo do dipolo magnético também é dado pelo eixo x_3 . Logo, estima-se $(I_1 = I_2)$, e r sendo a distância da fonte emissora. De acordo com Sousa et al (2019) O strain da amplitude de deformação gravitacional, é dada por:



$$h_{0ac} = \frac{G (I_1 - I_3)^2 \omega^2}{c^4 r} \quad (1)$$

Para o cálculo da amplitude foi considerado que o ângulo de inclinação do eixo de rotação (x_3) com a linha de visada é zero (MAGGIORE, 2008). Assim, obtemos o valor máximo de amplitude quando esta fica em função apenas desse parâmetro.

Havendo uma deformidade em torno do eixo x_3 , é factível determinar os momentos de inércia I_1 e I_3 , em que os polos magnéticos não coincidem com o eixo de rotação da estrela. Portanto, é possível estimar:

$$I_1 = \frac{2}{5} MR^2 + 2 \delta m R^2 \quad (2)$$

$$I_3 = \frac{2}{5} MR^2 + 2 \frac{2}{5} \delta m a^2 \quad (3)$$

Tal que M é a massa da estrela, R é seu raio, δm é a quantidade de matéria acumulada no polo magnético e a é o raio desse amontoado acumulado. Tendo $R \gg a$, $I_1 - I_3$ pode ser considerado como:

$$I_1 - I_3 = 2 \delta m R^2 \quad (4)$$

Substituindo a Equação 4 na Equação 1, temos:

$$h_{ac} = \frac{2G \delta m R^2 \omega^2}{c^4 r} \quad (5)$$

tadas pelo LISA, BBO ou DECIGO.

3 RESULTADOS

Nesse trabalho serão estudadas as fontes de OGs: V1460 Her, AE Aquarii, AR Scorpii e RX J0648.0-4418, sistemas binários que contém uma AB magnetizada de alta rotação acretando matéria de uma estrela doadora.

V1460 Her é uma Anã Branca, eclipsante e Cataclísmica Variável (CV), de período orbital de 4,99 horas e massa de $0,869 \pm 0,006 M_{\odot}$, que acreta matéria, por meio de um disco, de uma estrela doadora excessivamente luminosa do tipo K5, com massa de $0,295 \pm 0,004 M_{\odot}$, e raio medido em $0,43 \pm 0,002 R_{\odot}$ (ASHLEY, 2020). A AE Aquarii é um sistema binário que contém uma Anã Branca variável cataclísmica, não eclipsante, de período orbital de 9,88 h e período de rotação de 30,08 s (PATTERSON, 1979). A estrela secundária do sistema é uma estrela ordinária do tipo espectral K3-K5 (WELSH et al., 1998). A AR Scorpii, é um sistema binário localizado na constelação do Escorpião. Esse sistema é formado por uma anã branca em alta rotação, com um período de pulsação de 3,56 h e uma anã vermelha do tipo espectral M (MARSH et al., 2016). O RX J0648 é um sistema binário constituído de uma estrela sub-anã quente (THACKERAY, 1970) e com massa de $1,50 \pm 0,05 M_{\odot}$ e uma estrela compacta de massa $1,28 \pm 0,05 M_{\odot}$ (MEREGHETTI et al., 2009).

Observando a equação (5), é identificável que a Amplitude depende da quantidade de matéria acretada, entretanto, é difícil quantificar essa quantidade de matéria (SOUSA et al, 2019). Sendo assim, foram assumidos quatro valores para a quantidade de matéria acretada nos quatro sistemas. São eles: $\delta m = (10^{-3} M_{\odot}, 10^{-4} M_{\odot}, 10^{-5} M_{\odot}, 10^{-6} M_{\odot})$ (WELSH et al. 1998).

Os dados utilizados para cada uma das estrelas são apresentados na Tabela 1:

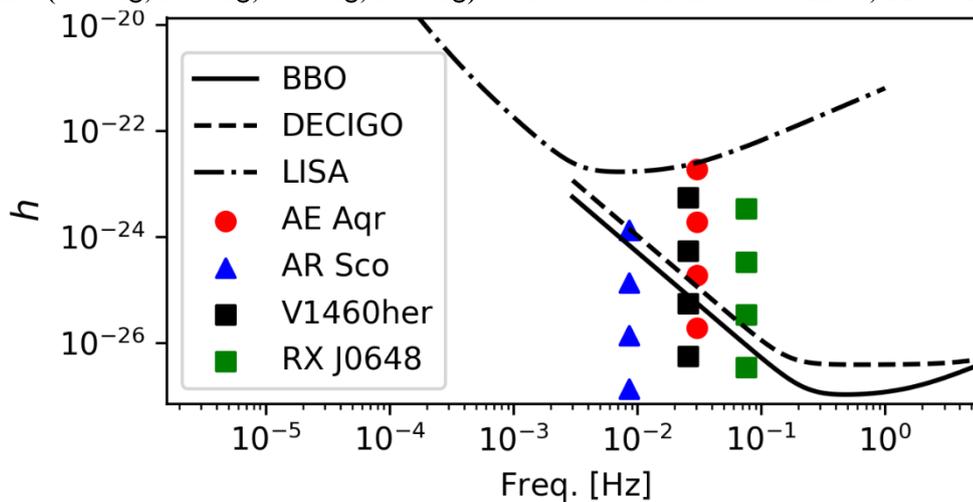
Tabela 1 – Parâmetros das Anãs Brancas de rápida rotação de cada sistema binário

Sistema	P (s)	\dot{P} (10^{-15} s/s)	M (M_{\odot})	R (10^8 cm)	r (pc)
V1460 Her	17884.8	38.875	0.869	2.99	265.7
AE Aqr	33.08	56.4	0.8	7	100
AR Sco	118.2	392	0.81	7.1	116
RX J0648	13.18	6	1.28	3	650

Fonte: Aatoria própria (2021).

Para a geração da Figura 2, a figura a Amplitude da Onda Gravitacional como uma função da frequência da Onda Gravitacional para cada δm e a curva de sensibilidade dos detectores LISA, BBO e DECIGO, realizou-se a aplicação da equação (5) para as quatro fontes de OGs selecionadas, objetivando realizar o cálculo da amplitude da Onda Gravitacional dessas estrelas. Além disso, a Figura 2 também contém as curvas de sensibilidade, a amplitude mínima que pode ser medida pelo detector, para um sinal periódico, dada pela relação sinal-ruído (SNR) e o tempo de observação de 1 ano (MAGGIORE, 2008).

Figura 2 – Amplitude da Onda Gravitacional da AE Aqr, AR Sco, RX J0648 e V1460 Her para valores de massa são $\delta m = (10^{-3}M_{\odot}, 10^{-4}M_{\odot}, 10^{-5}M_{\odot}, 10^{-6}M_{\odot})$ e curvas de sensibilidade da LISA, BBO e DECIGO.



Fonte: Aatoria própria (2021).

A análise do gráfico é realizada ao observar, primeiramente, as curvas de sensibilidade dos detectores e a área que se forma logo acima dela, sempre que os dados de uma estrela se encontrar pertencente à esta área, a mesma poderá ser detectada pelo detector correspondente à área;

4 CONCLUSÃO

Nesse artigo, realizamos o estudo da emissão de Ondas Gravitacionais pelo mecanismo de Acreção de Matéria, nos sistemas binários: AE Aquarii, AR Scorpii, RX J0648 e V1460 Her. De acordo com Sousa et al (2019) essas ABs são geralmente encontradas em sistemas binários, apresentando-se como uma variável cataclísmica, recebendo matéria e possuem uma alta taxa de spindown que não é totalmente explicada pela contrapartida eletromagnética.



Assim, foi possível, observar, ao analisar as curvas de sensibilidade e os dados das estrelas que, considerando somente o mecanismo de acreção de matéria, os sistemas AE Aquarii, RX J0648 são fortes candidatos à serem observados pelos detectores espaciais BBO e DECIGO, caso possuam um amontoado de massa $\delta m = 10^{-5} M_{\odot}$, enquanto a V1460 Her é uma forte candidata à ser observadas pelos mesmos detectores espaciais, caso possua um amontoado de massa $\delta m = 10^{-4} M_{\odot}$. Entretanto, dificilmente a AR Scorpii poderá ser detectada para os detectores estudados, pois necessitaria de uma quantidade de matéria acumulada muito grande para uma Anã Branca.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao orientador Jaziel G. Coelho por todo apoio e motivação prestada durante o desenvolvimento do artigo, as pessoas que dedicaram suas vidas para o desenvolvimento da ciência, minha família por todo incentivo prestado e a Fundação Araucária pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- SOUSA, Felipe Manoel. **Mecanismos de geração de ondas gravitacionais em Anãs Brancas de alta rotação**. INPE, 2019.
- WEISS, Rainer; BARISH, Barry; THORNE, Kip. **Nobel Lecture: LIGO and the discovery of gravitational waves**. MIT, 2018.
- SATO, E.A, **Ondas Gravitacionais**, 2017. Disponível em: <https://www.blogs.unicamp.br/tortaprimordial/2017/05/16/ondas-gravitacionais-parte-2-deteccao> Acesso em; 07 set. 2021.
- MAGGIORE, M. **Gravitational waves: Volume 1: Theory and experiments**. Oxford, 2008.
- STEPHANI, H. **Relativity: an introduction to special and general relativity**. Cambridge University Press, 2004
- ABBOTT, B. P. **Observation of gravitational waves from a binary black hole merger**. **Physical Review Letters**, 2016
- WELSH, W. F.; HORNE, K.; GOMER, R. **Doppler signatures of $h\alpha$ flares in ae aquarii**. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 1998
- STUART L. SHAPIRO, SAUL A. TEUKOLSKY. **Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars**, Vol 1, 1983.
- ASHLEY, R. P, MARSH, T. R, BREEDT, E. **V1460 Her: A fast spinning white dwarf accreting from an evolved donor star**, 2020.
- KEPLER, S. O. et al. **Magnetic white dwarf stars in the sloan digital sky survey**. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**.