

UM ESTUDO DETALHADO DE 180 SISTEMAS BINÁRIOS ECLIPSANTES OBSERVADOS PELA MISSÃO TESS

Autor(es): Lumenna da Silva Siqueira¹; Nacizo Holanda²

¹ Licenciatura em Física, CCET, UVA; E-mail: siqueiralumenna@gmail.com,

² Pesquisador Pós-doutor, Docente Colaborador, Departamento de Astronomia, Observatório Nacional. E-mail: nacizoholanda@on.br

Resumo: Sistemas binários ou múltiplos são frequentemente encontrados em nossa galáxia, com estrelas em diferentes estágios evolutivos. Os sistemas binários, que são os objetos de interesse desta pesquisa, podem ser detectados a partir da análise do espectro e/ou da variação de fluxo luminoso em uma série temporal. Nessa perspectiva, utilizamos o código JKTEBOP para determinar razões físicas e elementos orbitais importantes, como a soma da fração dos raios, o período orbital, a razão de brilho superficial e a excentricidade, para 180 sistemas binários eclipsantes observados pela Missão *Transiting Exoplanet Survey Satellite* (TESS). A partir da solução fotométrica, analisamos os parâmetros obtidos a fim de verificar as teorias propostas na literatura para a evolução dos elementos orbitais.

Palavras-chave: Sistemas Binários Eclipsantes. Elementos Orbitais. Estrelas de Alta Massa. Estrelas de Massa Intermediária.

INTRODUÇÃO

Através do estudo das estrelas binárias, é possível determinar grandezas físicas fundamentais que nos ajudam a compreender o processo de evolução estelar – a partir do estudo de sistemas binários podem-se inferir quantidades como massa, luminosidade e distância, além de uma série de elementos orbitais que nos dão uma ideia de como se dá a configuração e evolução do sistema em si. As estrelas componentes do sistema binário podem variar nos mais diversos tipos, como estrelas anãs, gigantes e/ou remanescentes (por exemplo, anãs brancas; PRSA et al., 2018). Há uma classificação para os tipos de estrelas binárias que se baseiam na morfologia e na forma de detecção do sistema. Quanto à sua detecção, podem ser classificados como: binárias visuais, binárias astrométricas, binárias eclipsantes e/ou espectroscópicas. Binárias visuais diz respeito aqueles sistemas que podem ser resolvidos sem o uso de ferramentas mais complexas; assemelham-se aos astrométricos, mas diferem pela característica principal do último: uma hospedeira mais brilhante que impede a visualização direta do sistema e, portanto, não conseguem ser resolvidos, recorrendo a observação do comportamento oscilatório para sua detecção. Já os sistemas binários espectroscópicos são detectados a partir da análise do espectro, visto que a binaridade produz variações periódicas justificáveis pela presença de estrelas duplas interagindo gravitacionalmente (efeito Doppler). Por fim, a última classe é caracterizada por meio da análise fotométrica para detectar os sistemas binários eclipsantes. Um período significativo da variação do fluxo luminoso deve ser necessário para sua identificação, produzindo séries temporais que denominamos curvas de luz (WYRZYKOWSKI et al, 2003). Nas curvas de luz desses sistemas, nós comumente observamos eclipses primários (quando a estrela mais brilhante é eclipsada) e secundários (quando a estrela menos brilhante é eclipsada). A observação de eclipses só possível devido inclinação orbital próxima à 90 graus. Quanto à



UNIVERSIDADE ESTADUAL
VALE DO ACARAÚ

Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação - PRPPG



CEARÁ
GOVERNO DO ESTADO
SECRETARIA DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E EDUCAÇÃO SUPERIOR

classificação morfológica, diz respeito ao contato (ou ausência de contato) entre as componentes do sistema; aqueles classificados como bem separados são sistemas em que as estrelas não possuem qualquer contato e, portanto, não trocam matéria entre si, evoluindo independentemente; sistemas de semi-contato corresponde a configurações em que apenas uma das estrelas compartilha matéria com a sua companheira, diferente das binárias de contato, onde ambas compartilham matéria.

A obtenção de curvas de luz tem sido impulsionada nos últimos anos graças às grandes missões espaciais, como a missão CoRoT (*Convection, Rotation and Planetary Transits*; AUVERGNE et al, 2009), a missão Kepler (BORUCKI et al, 2010), e a missão TESS (RICKER et al, 2015). A última, lançada em 2018, surge como sucessora da missão Kepler e K2, tendo como objetivo a análise de estrelas brilhantes com uma ampla cobertura do céu, em busca de trânsitos planetários. Com a grande quantidade e qualidade dos dados observacionais obtidos, muitas áreas da astrofísica se beneficiaram, incluindo o estudo de binárias eclipsantes, principal foco deste trabalho. Nessa perspectiva, tendo em vista a relevância dos sistemas binários para a astrofísica, o objetivo principal deste trabalho obter as características gerais dos sistemas binários eclipsantes formados por estrelas de massa intermediária e alta, bem como entender e relacionar as propriedades físicas com as curvas de luz de sistemas binários bem conhecidos na literatura (modelos). Além disso, a binaridade também possibilita testar os modelos teóricos da evolução estelar, principalmente no que diz respeito à circularização e sincronização de órbitas.

MATERIAL E MÉTODOS

Para obtenção das curvas de luz fornecidas pela missão TESS, utilizamos dados públicos disponíveis na base *Mikulski Archive for Space Telescopes* (MAST) por meio dos números de identificação de cada sistema. A nossa amostra de trabalho é composta pelas curvas de luz classificadas por IJspeert et al. (2021), que analisaram 189.981 séries temporais, dentre estas 3425 são características de sistemas binários eclipsantes de massa intermediária ou alta.

O MAST fornece duas bases de tratamento de dados provenientes da missão TESS, a Quick Look Pipeline (QLP; HUANG et al, 2020) e Scientific Processing Operations Center (SPOC; JENKINS et al., 2016). A primeira oferece mais sistemas, mas ao custo de baixa qualidade no tratamento dos dados; já a segunda, fornece poucos sistemas mas com alta qualidade e poucas contaminações decorrentes do processo de redução. Cortes de qualidade podem ser realizados de acordo com cada proveniência. Para tal, nós implementamos rotinas escritas em linguagem R, por meio da interface do R Studio, assim como a conversão de fluxo luminoso para magnitude T.

A versão 43 do código JKTEBOP (SOUTHWORTH, 2004) foi adotada para ajuste das curvas de luz obtidas (o que nós chamamos de solução fotométrica). Este código é bem consolidado na literatura e sua aplicação é restrita para sistemas binários bem separados, portanto a nossa amostra é composta apenas de binários onde as estrelas não apresentam troca de matéria entre si (exceto quando uma intercepta o vento ejetado pela outra). O JKTEBOP fornece 9 rotinas (*tasks*) com diferentes funções. Para a obtenção do melhor ajuste, a task 3 é a mais adequada, necessitando de dois arquivos de entrada – um arquivo contendo a curva de luz do sistema e outro arquivo com a estimativa inicial dos parâmetros a serem ajustados ou mantidos fixos –, e fornece 3 arquivos de saída com os parâmetros estimados contendo informações sobre o melhor conjunto de soluções e os resíduos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros como a razão de brilho (J), a excentricidade da órbita (e), o argumento da longitude do periastro (ω), a inclinação orbital (i), o razão dos raios (R_2/R_1) e a soma da fração dos raios (r_1+r_2) podem ser obtidos com o código com grande precisão (incertezas menores que 4% do valor medido).

Por meio dos parâmetros obtidos, é possível verificar algumas grandezas e relacionar com o período orbital (P). Dentre elas, a excentricidade do sistema é de extrema relevância para verificar a circularização do sistema, ou seja, quando (a partir de qual período orbital) a excentricidade da órbita é igual a zero para sistemas com estrelas de alta massa. É possível, por meio dos resultados obtidos, verificar os modelos teóricos do período de circularização, que segundo Meibom & Mathieu (2005) acontece em cerca de 10 dias. A causa da circularização das órbitas está relacionada com os efeitos de maré entre as estrelas do sistema, portanto, é importante levar em conta parâmetros como idade, separação, massas e temperaturas superficiais das estrelas. Alguns desses parâmetros podem ser inferidos indiretamente a partir de considerações sobre os estágios evolutivos das estrelas que formam cada sistema (no geral, anos da sequência principal), distância obtida por astrometria, e período orbital e fração da soma dos raios (noção de separação).

A excentricidade do sistema pode ser verificada, além do fornecido pelo programa, visualmente na curva de luz. Quando o sistema possui uma órbita circular, o eclipse secundário (correspondente a estrela menos brilhante) está fixo na fase 0.5 e o primário em 1.0. Caso haja uma excentricidade maior, o eclipse secundário pode ser deslocado para esquerda ou direita. A expressão a seguir nos fornece o $e \cos \omega$, que em módulo, é assumido como o valor de excentricidade:

$$e \cos \omega = \frac{\pi}{2} \left(\frac{t_2 - t_1}{P} \right) - 0.5,$$

onde t_1 e t_2 são o tempo/data dos eclipses primário e secundário, respectivamente.

Até a presente data, nós obtivemos solução fotométrica para 180 sistemas binários eclipsantes, que foram anteriormente classificados como sistemas formados por estrelas de massa intermediária ou alta, isto é, estrelas com massas superiores a duas vezes a massa do Sol. Esse regime de massas é pobremente investigado na literatura, que até então priorizou estudos centrados em sistemas com estrelas de mais baixa massa. Além disso, nós concluímos a estimativa das incertezas dos parâmetros de interesse a partir do método de bootstrapping, com um número de 1000 reamostragens para cada curva de luz. Portanto, parte significativa dos resultados já foi obtida e neste momento nós estamos analisando o conjunto de resultados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de sistemas binários é um tema clássico da astrofísica estelar que se destaca, principalmente com as subáreas exóticas, como sistemas de estrelas múltiplas, aparição de estrelas pulsantes em conjunto com a binaridade, planetas que orbitam o sistema e o contato, que podem produzir estrelas quimicamente peculiares que não se encaixam na teoria de evolução estelar padrão.

Os próximos passos deste estudo serão a determinação do raio crítico de circularização, expresso como uma fração do raio da estrela mais brilhante do sistema, R_1/a . Além disso, buscaremos o ajuste de uma função que define o período de *cut-off* para as estrelas de nossa amostra, isto é, o período orbital no qual os sistemas deixam de apresentar orbitas circulares ($e > 0.05$). Por fim, investigaremos as relações de temperatura entre as estrelas da nossa amostra e como esses valores podem influenciar a circularização das órbitas desses sistemas, visto que a razão de brilho superficial J pode ser um bom indicador de T_1/T_2 .

AGRADECIMENTOS

LSS agradece ao Programa Institucional de Iniciação Científica e Tecnológica (PICT) vinculado ao Observatório Nacional (ON). NH agradece ao Programa de Capacitação Institucional (PCI) promovido pelo MCTI e CNPq (no. da concessão 304315/2023).

REFERÊNCIAS

- [1] AUVERGNE, M.; BODIN, P.; BOISNARD, L.; et al. *The CoRoT satellite in flight: description and performance*. *Astronomy & Astrophysics*, v. 506, n. 1, p. 411-424, 2009.
- [2] BORUCKI, W. J., KOCH, D., BASRI, G., BATALHA, N. and et al. *Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results*. *Science*, 327(5968):977, February 2010.
- [3] CARROLL, Bradley W.; OSTLIE, Dale A. *An introduction to modern astrophysics*. Cambridge University Press, 2017.
- [4] HUANG, Chelsea X.; VANDERBURG, Andrew; PÁL, András; et al. *Photometry of 10 Million Stars from the First Two Years of TESS Full Frame Images*. 2020.
- [5] IJSPEERT, Luc W.; TKACHENKO, Andrew; JOHNSTON, Cole; et al. *An all-sky sample of intermediate-to high-mass OBA-type eclipsing binaries observed by TESS*. *Astronomy & Astrophysics*, v. 652, p. A120, 2021.
- [6] JENKINS, Jon M.; TWICKEN, Joseph D.; MCCAULIFF, Sean; et al. *The TESS science processing operations center*. In: *Software and Cyberinfrastructure for Astronomy IV*, v. 9913, p. 1232-1251, 2016.
- [7] KALLRATH, Josef; MILONE, Eugene F.; WILSON, R. E. *Eclipsing binary stars: modeling and analysis*. Springer, 2009.
- [8] MEIBOM, Søren; MATHIEU, Robert D. *A robust measure of tidal circularization in coeval binary populations: the solar-type spectroscopic binary population in the open cluster M35*. *The Astrophysical Journal*, v. 620, n. 2, p. 970, 2005.
- [9] PRŠA, Andrej. *Modeling and Analysis of Eclipsing Binary Stars*. IOP Publishing, 2018.
- [10] R CORE TEAM. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, 2021. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.
- [11] RICKER, G. R., WINN, J. N., VANDERSPEK, R., LATHAM, D. W. and et al. *Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)*. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1:014003, 2015.
- [12] RSTUDIO TEAM. *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, PBC, 2021. Disponível em: <<https://www.rstudio.com/>>.
- [13] SOUTHWORTH, J.; MAXTED, PFL; SMALLEY, B. *Eclipsing binaries in open clusters—II. V453 Cyg in NGC 6871*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 351, n. 4, p. 1277-1289, 2004.
- [14] WYRZYKOWSKI, L.; UDALSKI, A.; KUBIAK, M.; et al. *The optical gravitational lensing experiment: eclipsing binary stars in the large Magellanic cloud*. *Acta Astronomica*, v.53, pp. 229-240, 2003.