

Investigando a Fração de Massa de Sistemas Estelares Binários em Aglomerados Abertos: Revelando as Complexidades das Interações Estelares

Ruan P. Alves¹ (IC), Hektor S. A. Monteiro (PQ)¹

¹ Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Astrofísica. Dinâmica Estelar. Formação Estelar. Multiplicidade Estelar

Introdução

Sistemas estelares binários, consistindo de duas estrelas orbitando em torno de um centro de massa comum, são predominantes em todo o universo. Eles desempenham um papel crucial em vários fenômenos astrofísicos e fornecem informações valiosas sobre a evolução estelar, a dinâmica galáctica e a formação de objetos compactos.

Dentre os diversos ambientes onde sistemas binários são encontrados, os aglomerados estelares abertos se destacam como laboratórios únicos para o estudo de suas propriedades e características. Aglomerados abertos, consistem em uma coleção de estrelas que se formaram a partir da mesma nuvem molecular, por tanto os membros de um determinado aglomerado compartilham das mesmas propriedades fundamentais, como idade, composição química, distância e avermelhamento, portanto oferecem um cenário ideal para investigar a fração de massa de sistemas binários.

Os principais objetivos deste projeto científico são examinar de forma abrangente a multiplicidade de sistemas estelares em aglomerados abertos e investigar como as propriedades fundamentais da função de massa inicial dos aglomerados influenciam neste fenômeno. Ao abordar essas questões de pesquisa, pretendemos obter informações importantes sobre multiplicidade estelar e sua relação com propriedades dos aglomerados abertos, assim como a sua influência na determinação da massa total do aglomerado.

A metodologia adotada inclui a seleção criteriosa dos dados obtidos pelo satélite GAIA EDR3 (Gaia Collaboration, 2020) e a aplicação de técnicas estatísticas e computacionais, para explorar possíveis correlações e validar os resultados obtidos.

Metodologia

Neste trabalho estudamos a fração de binárias em 771 aglomerados abertos. Obtivemos os dados observacionais através do catálogo GAIA EDR3 (Gaia Collaboration, 2020) e utilizamos as propriedades fundamentais dos aglomerados descritas em (Almeida; Monteiro; Dias, 2023).

A análise foi realizada de diferentes maneiras. Primeiramente, foi conduzido um estudo estatístico sobre toda a base de dados, com o objetivo de encontrar a existência de alguma relação universal entre a fração de binárias e as propriedades fundamentais dos aglomerados. Em seguida, realizamos um agrupamento dos aglomerados com base em suas propriedades fundamentais e analisamos a multiplicidade estelar em cada grupo separadamente.

Resultados e discussão

Nos 771 aglomerados estudados, encontramos valores para a fração de binárias f_b entre $(23 \pm 3)\%$ e $(90 \pm 7)\%$, com uma média de $(58 \pm 0.11)\%$.

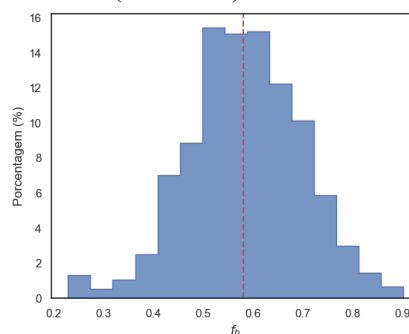


Figura 1 – Distribuição da fração de binárias dos 771 aglomerados na base de dados.

A razão de massa q encontrada, exibe uma ampla variação. Com valores no intervalo $5 \cdot 10^{-3} \leq q \leq 0.90$ e uma média de 0.6.

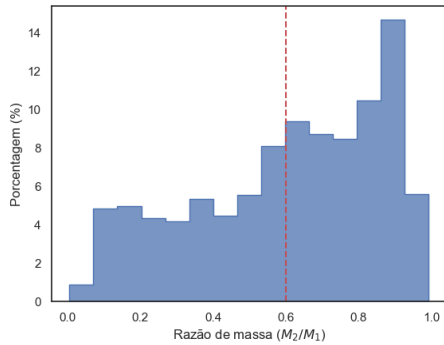


Figura 2 – Distribuição da razão de massa dos sistemas múltiplos.

Não foi encontrada nenhuma dependência significativa entre a multiplicidade e a posição espacial em que se encontra o aglomerado. Isto sugere que não há uma região privilegiada no espaço para a ocorrência da multiplicidade estelar. Este mesmo resultado foi encontrado por (Donada et al., 2023).

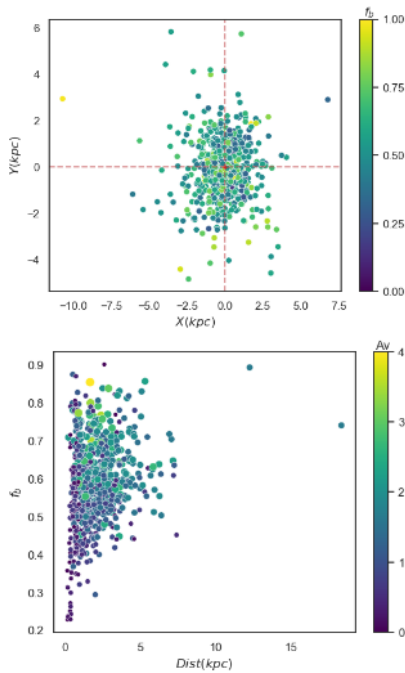


Figura 3 - Relação da fração de binárias com a posição espacial do aglomerado. No painel superior está a distribuição no plano galático dos 771 aglomerados estudados. O ponto em vermelho demarca as coordenadas do centro da galáxia (0,0). No painel inferior temos a distribuição da fb em função do módulo da distância do aglomerado em relação ao sol.

Assim como a distância, o avermelhamento não parece ter uma influência direta na fração de binárias.

Estudando os aglomerados, encontramos que estrelas de alta massa favorecem a formação de sistemas binários. Para todos os sistemas em nossa base de dados, aproximadamente 44% das estrelas de baixa massa estão em um sistema binário. Além disso, 65% das estrelas de massa intermediária pertencem a um sistema múltiplo, enquanto para estrelas de alta massa a razão de sistemas ligados é de 72%.

A Figura 4 mostra a multiplicidade estelar para diferentes faixas de massa da estrela principal. Podemos observar que, na maioria dos casos, as estrelas de baixa massa formam sistemas isolados. Já as estrelas de massa intermediária e de alta massa geralmente pertencem a um sistema múltiplo, com uma fb de até 86% em estrelas de alta massa.

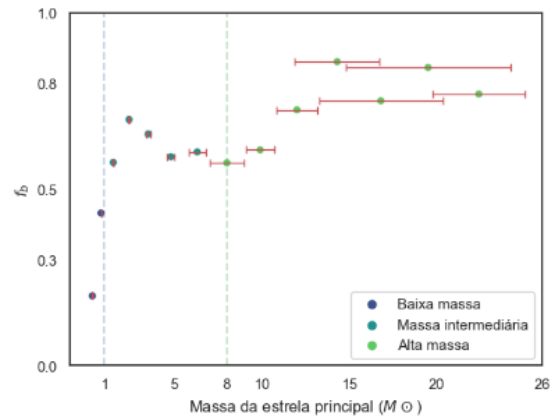


Figura 4- A figura representa a fb média em função da massa da estrela principal. As linhas tracejadas representam o valor de transição das categorias de massa da estrela principal.

A razão de massa q dos sistemas tende a diminuir com o aumento da massa da estrela principal, apresentando valores médios de 64% em sistemas de baixa massa, 59% para sistemas de massa intermediária e 51% em sistemas de alta massa.

Nossos resultados indicam que nos estágios iniciais há uma tendência de dissolução dos sistemas binários, devido possivelmente a interações gravitacionais e a uma instabilidade maior tanto do aglomerado quanto das estrelas em formação. Após essa instabilidade inicial, os sistemas parecem encontrar um equilíbrio e a fb se torna aproximadamente constante. Por fim, nos estágios mais avançados da vida dos aglomerados há um indicativo de aumento na multiplicidade estelar.

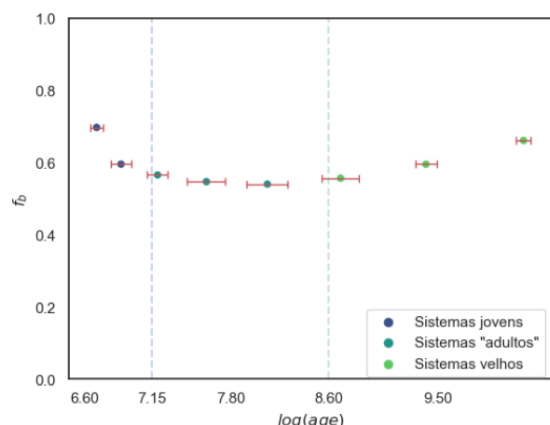


Figura 5- Representação da média da fração de binárias para aglomerados de diferentes faixas etárias.

Assim como em (Bate, 2014; Badenes et al., 2018; Moe; Kratter; Badenes, 2019; Hwang et al., 2021), nós também encontramos uma correlação negativa entre a fb e a metalicidade. São várias as possíveis razões para esta anticorrelação entre metalicidade e fração de sistemas binários, como a influência da metalicidade na energia de rotação inicial e na taxa de resfriamento da nuvem de gás, assim como efeitos relacionados ao processo de fragmentação da nuvem.

Conclusões

Nossos resultados indicam que a fração de binárias em aglomerados abertos é fortemente influenciada por fatores internos, como a metalicidade e a massa da estrela primária, enquanto parâmetros externos, como a posição espacial dos aglomerados, parecem ter pouca ou nenhuma correlação significativa com a formação de sistemas múltiplos.

Observamos que a fração de binárias tende a ser maior em aglomerados de baixa metalicidade, os resultados encontrados na literatura sugerem que a metalicidade influencia na fragmentação da nuvem de gás e por consequência na formação de sistemas binários, especialmente binárias próximas. Além disso, a fração de binárias é significativamente mais alta em estrelas de alta massa, possivelmente devido à maior atração gravitacional dessas estrelas, que facilita a captura e retenção de companheiras estelares.

Outro ponto importante é a variação da fração de binárias ao longo do tempo. Em aglomerados jovens, há uma tendência de diminuição da fração de binárias com a idade, enquanto em aglomerados de idade intermediária, essa fração permanece relativamente

estável. Já em aglomerados mais antigos, observamos um ligeiro aumento na fração de binárias, o que pode indicar uma evolução dinâmica que favorece a formação de sistemas múltiplos em ambientes mais maduros e estáveis.

Sintetizando os principais resultados obtidos, temos:

1. A fb varia de 23% a 90% com uma média de 58%. Indicando que a maioria das estrelas pertencem a um sistema múltiplo.
2. A massa da estrela primária é um fator relevante na formação do sistema múltiplo, sendo que a fração de binárias em primárias de alta massa é cerca de 30% mais alta que em primárias de baixa massa.
3. A idade de modo geral não parece mostrar uma grande relação com a fração de binárias. No entanto, a fb apresenta uma diminuição com a idade em aglomerados jovens e um aumento em aglomerados mais antigos.
4. A fração de binárias diminui com o aumento da metalicidade. Esse efeito está possivelmente atrelado ao processo de fragmentação da nuvem de gás.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Dr. Hektor Sthenos Alves Monteiro, pela orientação constante, pelos valiosos conselhos e pela oportunidade de desenvolver este projeto. Seu conhecimento e dedicação foram fundamentais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Agradeço aos demais colaboradores e alunos da Universidade Federal de Itajubá (Unifei) pelo suporte e pelas discussões enriquecedoras que contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, gostaria de expressar minha sincera gratidão ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e pela oportunidade concedida através da bolsa de Iniciação Científica.

Referências

- Almeida, A.; Monteiro, H.; Dias, W. S. Revisiting the mass of open clusters with Gaia data. , v. 525, n. 2, p. 2315–2340, out. 2023.
- ALVES, F. O. et al. Gas flow and accretion via spiral streamers and circumstellar disks in a young binary protostar. Science, v. 366, n. 6461, p. 90–93, 2019.
- Badenes, C. et al. Stellar Multiplicity Meets Stellar Evolution and Metallicity: The APOGEE View. , v. 854, n. 2, p. 147, fev. 2018.
- Bate, M. R. The statistical properties of stars and their

- dependence on metallicity: the effects of opacity. , v. 442, n. 1, p. 285–313, jul. 2014.
- Bate, M. R.; Bonnell, I. A.; Bromm, V. The formation of close binary systems by dynamical interactions and orbital decay. , v. 336, n. 3, p. 705–713, nov. 2002.
- BEVINGTON, P.; ROBINSON, D. Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences. McGraw-Hill Education, 2003. ISBN 9780072472271.
- BODENHEIMER, P. Principles of star formation. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.
- Deason, A. J. et al. The edge of the Galaxy. , v. 496, n. 3, p. 3929–3942, ago. 2020.
- Delgado-Donate, E. J. et al. On the properties of young multiple stars. , v. 351, n. 2, p. 617–629, jun. 2004.
- Donada, J. et al. The multiplicity fraction in 202 open clusters from Gaia. , v. 675, p. A89, jul. 2023.
- Duchêne, G.; Kraus, A. Stellar Multiplicity. , v. 51, n. 1, p. 269–310, ago. 2013.
- F. Arcidiacono. A galaxy and its structures. 2018.
- FILHO, K. de S. O.; SARAIVA, M. d. F. O. Astronomia e astrofísica. Rio Grande do Sul: Livraria da Física, 2004.
- FRAKNOI, A.; MORRISON, D.; WOLFF, S. C. Astronomy (openstax). 2018.
- HURLEY, J. R.; AARSETH, S. J.; SHARA, M. M. The core binary fractions of star clusters from realistic simulations. The Astrophysical Journal, v. 665, n. 1, p. 707, aug 2007.
- Hwang, H.-C. et al. The non-monotonic, strong metallicity dependence of the wide-binary fraction. , v. 501, n. 3, p. 4329–4343, mar. 2021.
- JEANS, J. H. Astronomy and cosmogony. Geological Magazine, v. 65, n. 7, p. 329–330, 1928.
- KARTTUNEN, H. et al. Fundamental astronomy. [S.l.]: Springer, 2007.
- Kormendy, J.; Kennicutt ROBERT C., J. Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies. , v. 42, n. 1, p. 603–683, set. 2004.
- Machida, M. N. et al. Binary formation with different metallicities: dependence on initial conditions. , v. 399, n. 3, p. 1255–1263, nov. 2009.
- Mazzola, C. N. et al. The close binary fraction as a function of stellar parameters in APOGEE: a strong anticorrelation with α abundances. , v. 499, n. 2, p. 1607–1626, dez. 2020.
- Moe, M.; Kratter, K. M.; Badenes, C. The Close Binary Fraction of Solar-type Stars Is Strongly Anticorrelated with Metallicity. , v. 875, n. 1, p. 61, abr. 2019.
- MONTEIRO, H.; DIAS, W. S.; CAETANO, T. C. Fitting isochrones to open cluster photometric data: A new global optimization tool. Astronomy and Astrophysics, EDP Sciences, v. 516, p. A2, jun. 2010. ISSN 1432-0746.
- Offner, S. S. R. et al. The Origin and Evolution of Multiple Star Systems. In: Inutsuka, S. et al. (Ed.). Protostars and Planets VII. [S.l.: s.n.], 2023. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 534), p. 275.
- Posti, L.; Helmi, A. Mass and shape of the Milky Way's dark matter halo with globular clusters from Gaia and Hubble. , v. 621, p. A56, jan. 2019.
- PRICE, D. J.; BATE, M. R. The impact of magnetic fields on single and binary star formation. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 377, n. 1, p. 77–90, 05 2007.
- Roxburgh, I. W. On the Fission Theory of the Origin of Binary Stars. , v. 143, p. 111, jan. 1966.
- Salpeter, E. E. The Luminosity Function and Stellar Evolution. , v. 121, p. 161, jan. 1955.
- THOMPSON, B. A. et al. The binary information from open clusters using sedS (binocs) project: Reliable photometric mass determinations of binary star systems in clusters. The Astronomical Journal, The American Astronomical Society, v. 161, n. 4, p. 160, mar 2021.
- Tohline, J. E. The Origin of Binary Stars. , v. 40, p. 349–385, jan. 2002.
- Tokovinin, A. Comparative statistics and origin of triple and quadruple stars. , v. 389, n. 2, p. 925–938, set. 2008.