

Medindo a distância à Grande Nuvem de Magalhães usando Cefeidas tipo II

Anna Carolyna B. Breda, Adriano M. Oliveira e Augusto C. T. Monteiro

Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Guarapari

Resumo

Este artigo aborda métodos para medir distâncias na Astronomia, com ênfase no uso de pulsantes Cefeidas. Nesse sentido, avaliou-se as propriedades astrofísicas das estrelas variáveis da Grande Nuvem de Magalhães, diferenciando-se suas variações e determinando suas distâncias até nós, a partir da relação período-luminosidade adequada. Com base em dados de Cefeidas Tipo II, extraídos do catálogo OGLE III e modelados no Google Colab, foi gerado um histograma que possibilitou encontrar a distância mais provável de $46,03 \pm 0,03$ kpc, e a mais frequente entre 49 e 50 kpc, resultados que estão em concordância com os valores mais aceitos atualmente. Vale destacar que este estudo é fruto de uma bolsa de Iniciação Científica Júnior do programa PICTI do Ifes, custeada pelo CNPq, cujo resultado foi apresentado na Mostra de Astronomia do Espírito Santo (MAES) 2024 por uma estudante do Ifes Campus Guarapari.

Abstract

This article discusses methods for measuring distances in Astronomy, with an emphasis on the use of pulsating Cepheid stars. Their astrophysical properties are evaluated, their variations distinguished, and the appropriate period-luminosity relationship is applied to determine the distance to the irregular galaxy Large Magellanic Cloud. Based on Type II Cepheid data extracted from the OGLE III catalog and modeled in Google Colab, a distance histogram was generated, showing that the most probable distance is $46,03 \pm 0,03$ kpc and the most frequent range between 49 and 50 kpc, results that are consistent with recent studies. It is worth highlighting that this study is the result of a Junior Scientific Initiation scholarship from the PICTI program of Ifes, funded by CNPq, and which the result presented at the Mostra de Astronomia do Espírito Santo (MAES) 2024 by a student from Ifes Campus Guarapari.

Palavras-chave: cefeidas; distâncias; relação período-luminosidade; Grande Nuvem de Magalhães.

Keywords: cepheids; distances; period-luminosity relationship; Large Magellanic Cloud.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n2.47664](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n2.47664)

1 Introdução

A medida de distância é uma grandeza fundamental para descrever fenômenos físicos. No cotidiano, as formas de medição consistem na utilização de instrumentos como trenas ou fitas métricas. No entanto, para a Astronomia é razoável mudar tais padrões, visto os tamanhos e as grandes distâncias medidas no universo. Sendo assim, diversos métodos foram desenvolvidos para a mensuração do espaço, alguns destes podem ser encontrados em [1].

Dentro desse contexto o deslocamento aparente de um corpo em relação a um fundo, quando observado de dois pontos diferentes, torna-se uma ferramenta importante para medir distân-

cia. Chamamos essa técnica de paralaxe e ela é um método de triangulação, que foi desenvolvido por Tales de Mileto (≈ 546 a.C.). Na ocasião, pretendia-se medir distâncias terrestres, como por exemplo, a largura de um rio. Apenas em 1838, a paralaxe foi utilizada para fins astronômicos,¹ permitindo calcular a distância de algumas estrelas próximas. Contudo, quando as estruturas estão a uma distância superior a 50pc [2], aproximadamente, a técnica deixa de ser aplicável, devido a impossibilidade de detectar tais deslocamentos aparentes. Para essa situ-

¹Para mais informações sobre medidas de distância acesse <http://astro.if.ufrgs.br/dist/>; <https://www.if.ufrgs.br/oei/stars/parallax/stprop.htm>.

ação, utiliza-se a lei do inverso do quadrado da distância.

A referida lei relaciona o brilho de um objeto a sua distância, de tal forma que: quanto mais próxima uma fonte luminosa está de nós, mais brilhante a veremos. Esta definição combinada à relação período-luminosidade permite calcular a distância de tais estruturas até cerca de 15Mpc da Terra [3].

Este método que associa o período de pulsação de estrelas variáveis às suas magnitudes absolutas, foi usado por Edwin Powell Hubble para comprovar a existência de outras galáxias. O astrônomo, na década de 1920, mediu as distâncias às Cefeidas presentes em “nebulosas espirais” (atualmente conhecemos como galáxias) e constatou que estavam para muito além dos limites da Via Láctea [4].

Dentro deste contexto, abordaremos o brilho como indicador de distância, as características das Cefeidas e a relação período-luminosidade. O desenvolvimento destes tópicos permite a formulação de equações que nos possibilitam calcular a distância e sua incerteza até a Grande Nuvem de Magalhães.

Neste cenário, obtendo informações dos brilhos aparentes e os períodos de uma população de Cefeidas presentes naquela galáxia, foi possível a organização dos dados em um histograma que, por sua vez, permitiu inferir a distância até esse conjunto de estrelas. O resultado obtido foi de $46,03 \pm 0,03\text{kpc}$ e está próximo daquele descrito em estudos mais recentes, provando a eficácia do método.

2 Fundamentação e equacionamento do método período-luminosidade

O brilho de um objeto fornece informações indicadoras de distância. A iluminação observada de uma fonte luminosa depende do quão distante o observador está dela. Este brilho aparente pode ser representado pelo Fluxo (F) e expressa a quantidade de fótons que iluminam uma área (A) em um determinado intervalo de tempo. Enquanto a Luminosidade (L) é a grandeza que representa a emissão de luz intrínseca ao objeto, ou seja, pode ser definida como a quantidade de energia irradiada pela fonte por unidade de tempo [2].

Uma ilustração do exposto acima está representado na Figura 1. Observe que o Fluxo e a Luminosidade se relacionam com a distância (r), de tal modo que, o fluxo decresce com o quadrado da distância, respeitando a seguinte lei:

$$F = \frac{L}{4\pi r^2} \quad . \quad (1)$$

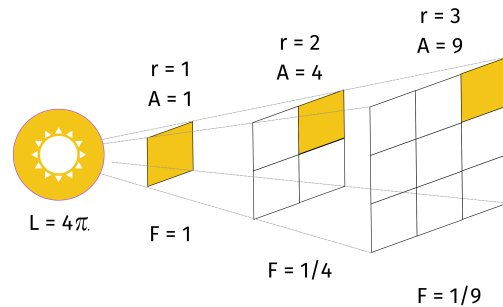


Figura 1: Ilustração de uma fonte luminosa iluminando regiões a gradativas distâncias. Neste exemplo, é possível perceber que, ao aumentar as distâncias, o fluxo decresce com sua área, conforme descreve a lei do inverso do quadrado das distâncias. Imagem autoral baseada em: <https://camara360.org/ley-cuadrado-inverso/>

De fato, o brilho observado relaciona-se de forma logarítmica com a magnitude dos astros. Este conceito surgiu com o desenvolvimento de um catálogo de estrelas feito por Hiparco no século II a.C, quando foi criada uma escala das estrelas mais cintilantes às mais pálidas vistas a olho nu. Ele classificou as estrelas mais brilhantes do céu noturno, vistas logo após o pôr do Sol, como de 1ª magnitude (m_1), e as menos brilhantes, que estavam no limiar da visão, sendo de 6ª magnitude (m_6) [5].

Com a necessidade de ter definições mais precisas do brilho dos corpos celestes, astrônomos decidiram refinar a escala de magnitude aparente. Por volta de 1856, Norman Pogson observou que um intervalo de 5 magnitudes corresponde a uma variação de 100 vezes no fluxo entre duas estrelas [5], ou seja,

$$m_6 - m_1 = 5 \longrightarrow \frac{F_1}{F_6} = 100^{\frac{m_6 - m_1}{5}} \quad ,$$

sendo F_1 o fluxo da estrela com magnitude aparente m_1 , do mesmo modo, F_6 relaciona-se a m_6 .

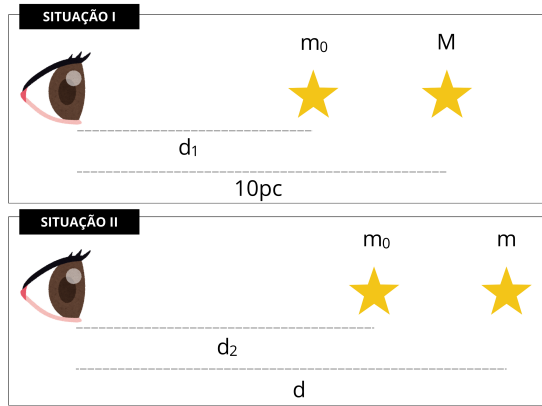


Figura 2: A imagem acima ilustra dois momentos de observações de estrelas. Na situação I, têm-se uma estrela cuja magnitude aparente (m_0) vale zero a uma distância d_1 do observador, sendo que esta mesma estrutura a uma distância de 10pc, tem magnitude M . Na segunda situação, têm-se uma outra estrela de mesma magnitude m_0 a uma distância d_2 , que, quando observada a uma distância d , tem magnitude m . Esta é uma imagem autoral construída com elementos do CANVA.

Generalizando,

$$\Delta m = m_{i+1} - m_i \longrightarrow \frac{F_i}{F_{i+1}} = 100^{\frac{\Delta m}{5}} \quad ,$$

isso significa que a diferença de uma unidade de magnitude ($\Delta m = 1$) contribui com um fator de 2,5 vezes no brilho, como resultado direto da equação abaixo:

$$m_{i+1} - m_i = 2,5 \log \left(\frac{F_i}{F_{i+1}} \right) \quad . \quad (2)$$

Isso possibilitou, então, caracterizar o brilho dos astros de forma categórica.

Com base no exposto acima, vamos supor uma estrela cuja magnitude é m_0 a uma distância d_1 , quando essa estrutura estiver a uma posição a 10 pc de distância a magnitude será dita absoluta (M), assim

$$M = C' - 2,5 \log L + 5 \quad ,$$

sendo $C' = 2,5 \log(F_0 + 4\pi)$. Por outro lado, se uma estrutura semelhante de mesma magnitude m_0 está a uma distância d_2 , quando esta estiver a uma distância d qualquer, teremos²

$$m = C' - 2,5 \log L + 5 \log d \quad .$$

²A demonstração pode ser encontrada no site <http://www.astro.iag.usp.br/%7Eejane/aga215/apostila/cap08.pdf>.

A Figura 2, ilustra a situação descrita acima.

Visto que a luminosidade da estrela é desconhecida, pode-se combinar as duas equações de tal forma que a determinação da distância da estrela dependa apenas de grandezas observacionais, assim:

$$m - M = 5 \log(d) - 5 \quad . \quad (3)$$

Os dados de magnitude aparente de um astro são obtidos utilizando técnicas de fotometria conhecidas desde o século XIX [6]. Contudo, determinar a magnitude absoluta era uma tarefa mais complexa, visto sua dependência com a distância do astro que, geralmente, era desconhecida. Uma das soluções dessa questão foi desenvolvida no século XX, utilizando-se as Cefeidas.

Estas são um tipo de estrelas variáveis, isto é, estrelas cujas magnitudes aparentes variam periodicamente. Tais mudanças no brilho podem ser causadas por fatores extrínsecos, tal qual os eclipses, ou intrínsecos à natureza do astro, como é o caso das estrelas pulsantes Cefeidas, que apresentam uma variação constante em sua luminosidade [7].

Isso ocorre por conta do ciclo de pulsação destas estrelas que as expande e retrai periodicamente e são gerados devido à composição química delas. Quando a Cefeida está com seu menor raio e maior temperatura, o hélio em seu núcleo é ionizado, aumentando o número de partículas e, conseqüentemente, a pressão. Este aumento de pressão expande a estrela, diminuindo sua temperatura e fazendo com que o hélio se recombine. Com a redução do número de partículas, a pressão diminui, fazendo a estrela se contrair e recomendo o ciclo [7]. Visualmente, este processo se parece com a Figura 3 em seus momentos de valor mínimo e máximo de magnitude.

Essas estrelas, ainda, são divididas em dois principais grupos: Cefeidas clássicas (tipo I) e as W Virginis (tipo II), e se diferenciam pelo período de formação e população, como ilustra a Figura 4.

As Cefeidas clássicas são de população I, isto é, estrelas mais jovens, formadas a menos de 6 bilhões de anos e ricas em metal. Geralmente são encontradas em aglomerados abertos nos braços espirais e nos discos galácticos, visto que são locais de intensa formação estelar devido a abundância de gás presente. Já as W Virginis, pertencentes à população II, são mais velhas, com

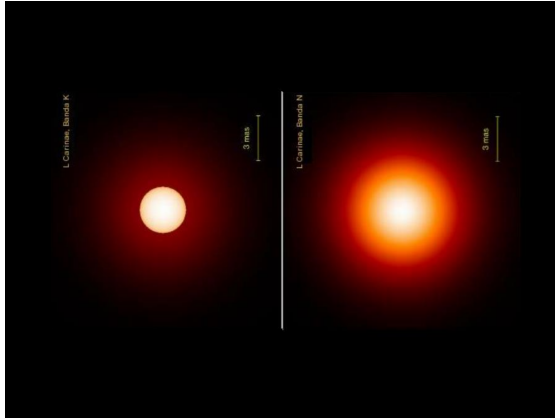


Figura 3: Representação visual de uma Cefeida em dois momentos de seu ciclo. À esquerda, a estrela está em sua fase de menor raio e no ápice de seu brilho, enquanto à direita, seu raio encontra-se em seu tamanho máximo e no mínimo de seu brilho. Fonte: <https://www.slideserve.com/kaemon/estrelas-vari-veis-cefeidas>

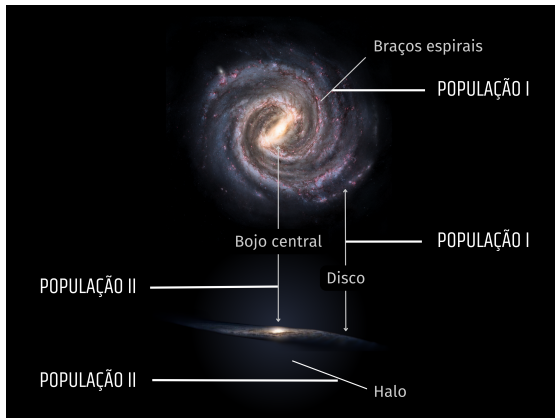


Figura 4: Localização das populações estelares I e II nas galáxias. Estrelas e população I são encontradas no disco e nos braços espirais, enquanto as de População II estão, geralmente, no bojo central e halo. Esta é uma montagem autoral com elementos retirados dos links: https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20180614 e <https://tinyurl.com/2p9h3fb4>

idades de cerca de 10 bilhões de anos, pobres em elementos pesados e localizadas no bojo central (região mais antiga das galáxias) e no halo, contidas em aglomerados globulares [1].

Essa distinção é importante, pois cada tipo de Cefeida terá uma associação diferente da sua magnitude absoluta com o período de pulsação, e por serem relações bem estabelecidas é possível utilizá-las como velas padrão para calcular distâncias cósmicas [4].

Este método denominado período-luminosidade foi descoberto por Henrietta Swan Leavitt, uma “calculadora” do Harvard

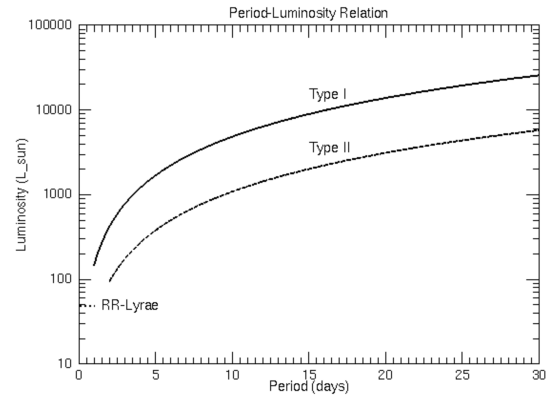


Figura 5: O gráfico acima expressa as respectivas relações período-luminosidade para três tipos de estrelas variáveis (RR-Lyrae, Cefeidas Tipo I e Tipo II). O eixo x é representado pelo período de pulsação destas estrelas em dias, enquanto no eixo das ordenadas está a Luminosidade em unidade solar. Fonte: www.if.ufrgs.br/ast/notas_explorando_universo/Notas_Aula_Via_Lactea.pdf

College Observatory, que atuou por volta dos anos de 1903 a 1912 catalogando informações de brilho de estrelas variáveis obtidas através de chapas fotográficas do Observatório [4].

Ao longo do tempo, Henrietta percebeu uma relação bem definida do período de pulsação com, a princípio, a magnitude aparente. Contudo, ao perceber que todas as estrelas observadas estavam praticamente a uma mesma distância da Terra, os períodos foram associados, posteriormente, com a magnitude absoluta dos astros [8].

Nesse sentido, Henrietta observou que, quanto maior é a luminosidade da estrela, maior será o tempo para completar seu ciclo de pulsação, como mostra o gráfico da Figura 5. A equação que expressa essa relação para Cefeidas Tipo II [9], as quais utilizamos neste trabalho, é:

$$M = -1.6 \log(P) - 0.1, \quad (4)$$

sendo M a magnitude absoluta e P o período em dias.

É importante salientar, ainda, que estes dados de magnitude e período estão relacionados a incertezas e a medida que estas informações são aplicadas nas equações demonstradas, as incertezas são propagadas. Deste modo, faz-se necessário estimá-las.

Para isso, tem-se de forma geral que:³

$$\Delta W^2 = \sum \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 (\Delta x)^2 \quad (5)$$

sendo ΔW o valor da incerteza, W a função e x um argumento da função W . Desta maneira, aplicando este conceito na função de distância, obtemos:

$$\Delta d = \frac{d \ln(10)}{5} \sqrt{(\Delta m)^2 + \left(\frac{1,6}{P \ln(10)} \right)^2 (\Delta P)^2} \quad (6)$$

em que Δd é a incerteza da distância, Δm é a incerteza da magnitude aparente média, adotada por 0,02 mag [10] e ΔP é a incerteza do período, retirada do catálogo OGLE-III.

3 Encontrando a distância mais provável até a Grande Nuvem de Magalhães

Para determinar a distância à Grande Nuvem de Magalhães, utilizamos dados, retirados do catálogo OGLE-III,⁴ de 202 Cefeidas Tipo II contidas na galáxia irregular. Obtendo informações sobre o período e aplicando-as na equação (4), foi possível encontrar a magnitude absoluta das estruturas. Com esta, combinada à média das magnitudes aparentes mínima e máxima, utilizamos a equação (3) para encontrar a distância a cada uma das estrelas.

Com as distâncias calculadas individualmente para cada Cefeida, como descrito acima, fez-se uma análise da frequência destes valores dentro de intervalos a cada 1kpc. Este resultado está representado na forma de um histograma na Figura 6.

A estrutura da distribuição obtida segue uma tendência gaussiana, dada por:

$$y = \frac{1}{\sqrt{12\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) (N)(\mathfrak{L}) \quad , \quad (7)$$

sendo μ a média da distribuição (o ponto central da curva); σ o desvio padrão da distribuição, que

³Para mais informações sobre propagação de incertezas, acesse: http://www.fep.if.usp.br/~fisfoto/guias/roteiro_incertezas_2015.pdf

⁴Para acessar o catálogo, clique no link <https://ogle.db.astrow.edu.pl/~ogle/CVS/> e preencha as informações que deseje obter.

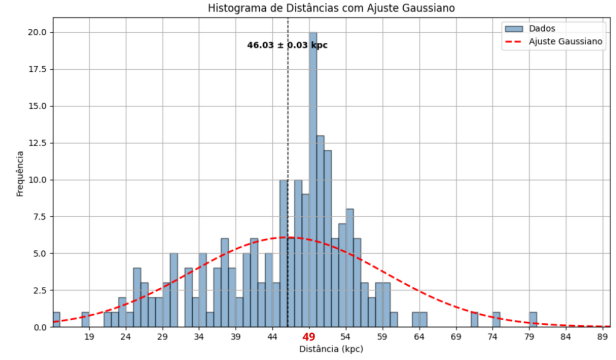


Figura 6: Histograma de frequências das distâncias das Cefeidas com curva semelhante a uma Gaussiana. No eixo x estão as distâncias das estrelas em kpc, com a marcação em vermelho de 49 kpc (que corresponde ao intervalo com maior concentração de Cefeidas), e no eixo y, as frequências com que elas se repetem. A função em vermelho refere-se à Gaussiana e a projeção segmentada em preto é a distância mais provável com sua incerteza estimada pelo método de simulações de Monte Carlo. Imagem autoral gerada no Google Colab.

determina a largura da curva; N o número total de observações (a contagem dos dados) e o intervalo ($\mathfrak{L}$) é a largura das barras no histograma.

Assim, ao traçar a curva de distribuição de probabilidade, a partir da função (7), levando em consideração as frequências dos valores obtidos, verifica-se uma concentração em torno da média.

Deste modo, o pico da Gaussiana no eixo x, corresponde a um valor de $46,03 \pm 0,03$ kpc, que indica a distância mais provável até a estrutura. Esta incerteza associada foi calculada a partir de simulações de Monte Carlo, um método estatístico computacional que consiste em perturbar diversas vezes os valores de distância, aleatoriamente, com base em suas incertezas individuais [calculadas a partir da equação (6)], resultando na variação da média dos dados, e por consequência, na incerteza da distância média [11].

Este resultado encontrado está muito próximo do valor mais aceito atualmente, que é de $49,59 \pm 0,09_{estat.} 0,54_{sist.}$ kpc [12].

Uma outra análise que pode ser feita é com base na distância mais frequente, compreendida entre 49 a 50 kpc e representada pela maior coluna do histograma. Este intervalo contém 20 estrelas, uma concentração discrepante das demais distribuições que ocorre, provavelmente, por estarem localizadas no centro galáctico. A razão disso se dá pois esta é a primeira região que se forma no nascimento de uma galáxia e, portanto, é nesse

local que esperamos encontrar as estrelas estudadas (de população II) [1].

Ambas interpretações do resultado são coerentes à distância real da galáxia. O resultado mais provável encontrado neste artigo, de $46,03 \pm 0,03$ kpc, desvia cerca de 7% do esperado, enquanto o mais frequente, no intervalo de 49 a 50 kpc, compreende a distância mais aceita. Esses resultados reforçam a validade do método utilizado e mostram uma concordância sólida com os valores esperados.

Entretanto, é válido destacar que existem diversas técnicas para estimar a distância até a Grande Nuvem de Magalhães (LMC). Entre elas, destacam-se o uso de Cefeidas (como neste trabalho), de estrelas RR Lyrae, da supernova SN1987A, da paralaxe (com dados do Gaia) e de sistemas binários eclipsantes. Cada método possui características distintas, isto é, enquanto as Cefeidas seguem uma relação período-luminosidade empírica, as binárias eclipsantes permitem medições geométricas mais diretas, e por isso atualmente oferecem a maior precisão, com incertezas de até 1% [12].

Adicionalmente, entre os principais erros sistemáticos nas estimativas de distância até a LMC estão a extinção interestelar, a metalicidade estelar e a inclinação geométrica da galáxia [13].

A extinção ocorre quando a luz das estrelas observadas é dispersada por poeira interestelar, afetando a magnitude aparente; já a metalicidade influencia a luminosidade intrínseca das estrelas, alterando a calibração da relação período-luminosidade. Além disso, a LMC é inclinada em relação ao plano do céu, o que faz com que suas estrelas estejam a diferentes distâncias do observador, exigindo correções geométricas [13].

Embora esses efeitos possam ser minimizados com modelos e dados de alta qualidade, eles ainda representam fontes de incerteza sistemática nas medições de distância, inclusive para as Cefeidas Tipo II.

4 Conclusão

A descoberta de que existem galáxias além da Via Láctea, feita por Edwin Hubble na década de 1920, transformou profundamente a compreensão do universo. Antes disso, acreditava-se que a Via

Láctea constituía todo o cosmos, mas a confirmação da existência de outras galáxias revelou que o universo é vastamente maior e mais complexo do que se imaginava. Essa revelação reestruturou o conceito de universo, mostrando que ele é uma imensa e dinâmica estrutura em expansão, o que abriu caminho para o desenvolvimento de teorias cosmológicas modernas. Essa nova visão também trouxe uma perspectiva renovada sobre o lugar da humanidade no cosmos, ampliando nossa compreensão não apenas científica, mas também filosófica e cultural sobre o nosso papel no universo.

Nossos resultados mostram que a Grande Nuvem de Magalhães está a uma distância mais provável $46,03 \pm 0,03$ kpc, destoando cerca de 7% do esperado, e também apresenta uma distância mais frequente entre 49 e 50 kpc. Estes evidenciam que a galáxia extrapola os limites da Via Láctea, cujo diâmetro corresponde a 25 kpc [1].

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Ifes pelo apoio, a Cosmo-Ufes pela oportunidade de escrever este artigo, a CNPq pela bolsa concedida e aos alunos do OAIG que colaboraram com as discussões e desenvolvimento deste trabalho.

Sobre os autores

Anna Carolynna Binda Breda (annacarolynab-bifes@gmail.com) é aluna do quarto ano do curso técnico em Administração integrado ao ensino médio e atua como monitora do OAIG no Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), Campus Guarapari.

Adriano Mesquita Oliveira (adriano.oliveira@ifes.edu.br) é doutor em física pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e atua como professor de física do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes-Guarapari), onde ministra aulas para os cursos técnicos, engenharia elétrica e licenciatura em ciências da natureza. Além disso, ele coordena o Observatório Astronômico do IFES Guarapari (OAIG), e está como diretor da Diretoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Extensão do campus

Guarapari. Por fim, tem atuado como equipe executora da Mostra de Astronomia do ES e Encontro de Astronomia do ES.

Augusto César Tiradentes Monteiro (augusto.monteiro@ifes.edu.br) é mestre em matemática pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e professor de matemática do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES-Guarapari), onde ministra aulas para os ensinos médio e superior. Além disso, é o vice-coordenador do OAIG e está como Coordenador de Extensão do IFES Guarapari.

Referências

- [1] M. de Fátima Oliveira Saraiva, *Astronomia & Astrofísica* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2004).
- [2] S. Weinberg, *Cosmology* (Oxford University Press, Oxford, 2008).
- [3] D. R. Faulkner, *Astronomical distance determination methods and the light travel time problem*, *Answers Research Journal* **6**, 211 (2013). Disponível em <https://answersresearchjournal.org/astronomical-distance-light-travel-time/>, acesso em ago. 2025.
- [4] D. I. Machado, *As estrelas cefeidas enquanto velas-padrão: A relação período-luminosidade tal qual apresentada por sua descobridora*, *Cadernos de Astronomia* **2**(2), 170 (2021).
- [5] G. de Almeida, *Norman Robert Pogson e a escala de magnitudes estelares*, *Gazeta de Física* **34**(3/4), 52 (2011). Disponível em <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/108/article/827/pdf>, acesso em ago. 2025.
- [6] C. Sterken e K. B. Staubermann, *Karl Friedrich Zoellner and the historical dimension of astronomical photometry: a collection of papers on the history of photometry*, *The Journal of Astronomical Data (JAD)* **6**(7) (2000).
- [7] A. Batalha e L. Campos, *Estrelas Cefeidas e RR Lyrae*, Notas de aula, aula 8 (2015).
- [8] J. D. Fernie, *The period-luminosity relation: A historical review*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **81**(483), 707 (1969).
- [9] R. K. Madejsky, *Curso Básico de Astrofísica e Cosmologia* (UEFS Editora, Feira de Santana, 2014).
- [10] M. Szymański et al., *The Optical Gravitational Lensing Experiment. OGLE-III Photometric Maps of the Galactic Bulge Fields* (2011). [ArXiv:1107.4008](https://arxiv.org/abs/1107.4008).
- [11] D. R. Albert, *Monte Carlo Uncertainty Propagation with the NIST Uncertainty Machine*, *Journal of Chemical Education* **97**(5), 1491 (2020).
- [12] G. Pietrzyński et al., *A distance to the Large Magellanic Cloud that is precise to one per cent*, *Nature* **567**(7747), 200 (2019).
- [13] J. J. S. Medina, *Comparison of different methods to determine the distance to LMC* (2025). [ArXiv:2503.21120](https://arxiv.org/abs/2503.21120).