

Determinação espectroscópica da dispersão de velocidades de galáxias-lente e seu impacto na medida do parâmetro pós-Newtoniano

Ingrid Beloto¹, Eduardo Cypriano¹ e Martin Makler^{2,3}

¹Universidade de São Paulo

²Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

³Universidad Nacional de San Martín

Resumo

Este estudo se dedica a realizar medições precisas da dispersão de velocidades das galáxias lentes, utilizando dados obtidos pelo telescópio SOUTHERN Astrophysical Research (SOAR) durante o ano de 2022. A partir da análise de 10 espectros de galáxias, obtivemos estimativas fundamentais das suas dispersões de velocidade. Este trabalho oferece medições cruciais que serão utilizadas em colaboração com pesquisadores do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas para inferir o parâmetro pós-Newtoniano γ . Esta parceria visa aprimorar a precisão das futuras estimativas desse parâmetro, contribuindo significativamente para a compreensão das leis fundamentais da gravidade em escalas galácticas por meio do método de comparação de massas, ao comparar a massa dinâmica das lentes gravitacionais galácticas, independente de γ , com a massa obtida através da modelagem das lentes, a qual depende de γ .

Abstract

This study is dedicated to making precise measurements of the velocity dispersion of lens galaxies, using data obtained by the SOUTHERN Astrophysical Research (SOAR) telescope during the year 2022. From the analysis of 10 galaxy spectra, we obtained fundamental estimates of their velocity dispersions. speed. This work provides crucial measurements that will be used in collaboration with researchers at the Brazilian Center for Physical Research to infer the post-Newtonian parameter γ . This partnership aims to improve the accuracy of future estimates of this parameter, significantly contributing to the understanding of the fundamental laws of gravity on galactic scales through the mass comparison method, by comparing the dynamic mass of galactic gravitational lenses, independent of γ , with the mass obtained through lens modeling, which depends on γ .

Palavras-chave: Cosmologia, lenteamento, dispersão de velocidade, teste da gravidade

Keywords: Cosmology, lensing, velocity dispersion, test of gravity

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44957](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44957)

1 Introdução

No contexto da astrofísica contemporânea, as lentes gravitacionais galácticas surgem como uma ferramenta de investigação vital para compreender não apenas as propriedades das galáxias envolvidas, mas também para estudar a distribuição de massa no Universo. O campo gravitacional de uma distribuição de massa flexiona o caminho dos fótons ao distorcer o espaço-tempo. Esta distorção prevista por Einstein ganhou importância como uma ferramenta de estudo do Universo [1, 2]. Esses fenômenos gravitacionais dependem exclusivamente da distribuição de massa do objeto mais próximo, fornecendo assim informa-

ções sobre a massa da galáxia lente.

Neste contexto, a determinação precisa da dispersão de velocidade (σ_v) das galáxias lente, obtida por meio de espectros, emerge como uma iniciativa crucial. A combinação desses dados permite não apenas a compreensão da dinâmica estelar e distribuição de matéria nas galáxias, mas também a inferência do parâmetro pós-Newtoniano γ . Este parâmetro é fundamental na teoria da relatividade geral de Einstein e desempenha um papel crucial na verificação das previsões da gravitação de Einstein em comparação com teorias alternativas. A medida precisa de γ ajuda a explorar as possíveis violações da relatividade geral

e a entender melhor as interações gravitacionais em escalas galácticas e cósmicas. Por isso, a inferência de γ é um dos alvos do estudo em colaboração com o professor Martin Makler (do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF), onde os doutorandos Renan Alves de Oliveira e João Paulo França desempenham papéis fundamentais na seleção de alvos e na modelagem para a determinação da massa via lentes gravitacionais.

O método de comparação das massas utilizado para a inferência de γ já foi empregado anteriormente na literatura. [3] faz uma análise sobre os parâmetros que impactam mais na incerteza do resultado final de γ . Conclui-se que a incerteza na dispersão de velocidades das estrelas que pertencem as galáxias-lente está altamente correlacionada com a incerteza no valor de γ inferido. Utilizando os espectros coletados pelo *survey* SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) [4], com uma incerteza média de aproximadamente 10% do valor medido, [3] encontrou $\gamma = 1.01 \pm 0.05$.

O objetivo central deste projeto é a determinação da dispersão de velocidade de lentes gravitacionais galácticas com uma melhor precisão de aproximadamente 5% do valor inferido, a partir dos espectros obtidos com a fenda longa do espectrógrafo Goodman [5] do SOuthern Astrophysical Research (SOAR)¹ e, com esses dados estimar a massa dinâmica das galáxias.

Uma explicação mais detalhada sobre o método de comparação encontra-se na Seção 2. Na Seção 3 abordaremos a seleção e aquisição dos dados utilizados; os passos para a redução dos espectros obtidos é descrito na Seção 4; a inferência da dispersão de velocidades da amostra é apresentada na Seção 5. Por fim a Seção 6 conclui o estudo.

2 Comparação de massas

Para testar a Relatividade Geral em escalas galácticas, utilizaremos uma modificação da métrica de Schwarzschild, que descreve o espaço-tempo na presença de um corpo de massa M , introduzindo o parâmetro γ conforme a equação a seguir:

¹Based on observations obtained at the Southern Astrophysical Research (SOAR) telescope, which is a joint project of the Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI/LNA) do Brasil, the US National Science Foundation's NOIRLab, the University of North Carolina at Chapel Hill (UNC), and Michigan State University (MSU).

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \left(1 + \gamma \frac{2GM}{c^2 r} \right) dr^2 + r^2 d\phi^2 \quad (1)$$

O parâmetro γ será responsável por uma curvatura do espaço induzida pelo corpo com massa em adição a já prevista pela Relatividade Geral. Dessa forma, se $\gamma = 1$, recupera-se a métrica original (não modificada) de Schwarzschild.

2.1 Massa via lentes gravitacionais

Sistemas de lentes gravitacionais fortes entre galáxias ocorrem quando uma galáxia mais próxima, geralmente uma galáxia de tipo recente (*early-type*), desvia a luz de uma galáxia mais distante, criando imagens que podem ser observadas com arcos gravitacionais.

A distância aparente entre o centro da lente e o arco ou anel (chamado de anel de Einstein) é dada pelo raio de Einstein (θ_E). A densidade superficial de massa que provoca o efeito de lente gravitacional dentro deste raio angular é:

$$\Sigma_{crit} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_S}{D_L D_{LS}}, \quad (2)$$

onde D_L , D_S e D_{LS} são as distâncias de diâmetro angular da galáxia lente, da galáxia mais distante (chamada de fonte) e entre a lente e a fonte. Essas distâncias são determinadas a partir dos *redshifts* das galáxias e do modelo cosmológico adotado.

Usando a modificação da Relatividade Geral, o raio de Einstein é dado por:

$$\theta_E = \sqrt{\frac{1+\gamma}{2}} \left(\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_S D_L} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Portanto, a massa dentro do raio de Einstein, determinado pelo modelamento, pode ser inferida utilizando os *redshifts* de tal forma:

$$M(\theta_E) = \Sigma_{crit} \times \pi [\theta_E(\gamma) D_L]^2. \quad (4)$$

E então essa medida dependerá do parâmetro γ , já que está sujeita a luz que sofre a ação da gravidade.

2.2 Massa via dinâmica estelar

Outra forma de se estimar a massa de uma galáxia é através da dinâmica de suas estrelas. As velocidades

típicas de estrelas em galáxias de grande massa são de ordem não-relativísticas. Nesse caso a curvatura do espaço, e por consequência o parâmetro γ , não influenciam na medida da massa. Assim, comparando-se a medida de massa dinâmica com a obtidas por lentes gravitacionais, é possível estimar o parâmetro γ .

A dinâmica de um sistema gravitacional aproximadamente esférico, como galáxias elípticas, é dado pela equação de Jeans que pode ser escrita na forma:

$$M(r) = -\frac{\langle v_r^2 \rangle r}{G} \left[\frac{d \ln \rho}{d \ln r} + \frac{d \ln \langle v_r^2 \rangle}{d \ln r} + 2\beta \right], \quad (5)$$

onde r é a coordenada radial esférica a partir do centro da galáxia, ρ é densidade volumétrica de massa e $\beta \equiv 1 - \langle v_t^2 \rangle / \langle v_r^2 \rangle$ o parâmetro de anisotropia das órbitas, onde v_r são velocidade radiais e v_t velocidades tangenciais.

Essas grandezas se correlacionam com o observável, a dispersão de velocidades das estrelas ao longo da linha de visada, ponderado pelo brilho superficial, por

$$\sigma_z^2(R) = \frac{2}{I(R)} \int_R^\infty \left(1 - \beta \frac{R^2}{r^2} \right) \frac{v \langle v_r^2 \rangle r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}}, \quad (6)$$

onde z e R são coordenadas no sistema cilíndrico, sendo que $r^2 = R^2 + z^2$ e $I(R)$, $v(r)$ os perfis de luminosidade projetado e tridimensional (desprojetado), respectivamente.

A dispersão de velocidades pode também ser inferida através da medida da largura das linhas de absorção observadas no espectro das galáxias fonte, já que tal dispersão causa o alargamento das linhas com os efeitos de *redshift* e *blueshift*. Através deste método é que iremos encontrar os valores de σ_v , visando diminuir a incerteza para impactar na inferência do parâmetro γ .

3 Dados

Concentramos nossas observações em galáxias do tipo precoce (*early-type*) dentro de sistemas de lentes gravitacionais galáxia-galáxia. A amostra foi selecionada a partir de uma compilação criada por Oliveira & Makler (em preparação), a qual inclui sistemas fortes de lentes gravitacionais observados por levantamentos de imagem. Essa seleção foi baseada em objetos que possuem valores de *redshift* medidos

tanto para a lente quanto para a fonte, bem como morfologias adequadas para modelagem. Esses critérios garantem a medição de massa por meio de lentes gravitacionais.

Os sistemas de lente forte foram observados utilizando o espectrógrafo Goodman [5] no modo de fenda longa com uma largura de 1" no telescópio SOAR (4 metros). Essas observações ocorreram durante duas campanhas: 4-5 e 8-9 de fevereiro (SO2022A-020) e 21-23 de setembro e 15 de outubro (SO2022B-018) de 2022. Uma grade de difração com 600 linhas/mm foi utilizada, proporcionando uma cobertura espectral de 6300 Å a 8930 Å. Essa configuração resultou em uma resolução de 1260 a 5500 Å.

No total, 21 galáxias foram observadas, sendo 11 adquiridas durante o primeiro semestre e 10 durante o segundo semestre de 2022. Neste trabalho analisaremos 10 das 11 observadas no primeiro semestre. A orientação da fenda foi escolhida para abranger as regiões mais brilhantes tanto das galáxias lentes quanto das fontes. A imagem de cada sistema observado pode ser vista na Figura 1.

4 Redução dos espectros

A redução dos dados espectroscópicos foi realizada utilizando o software IRAF² [8]. Este procedimento envolve uma série de etapas, que serão detalhadas abaixo:

- *Análise de arquivos*: Baixar os dados e reconhecer os arquivos de ciência, de correção e calibração;
- *Correção de bias*: Está ligado com o efeito que a voltagem de fundo da CCD (*charge-coupled device*) pode causar em nossas imagens. Para corrigir tal efeito, tira-se imagens com a câmera do telescópio fechada, assim teremos imagens apenas com a influência desta voltagem. No IRAF é possível fazer uma lista destes arquivos e combiná-los usando a função `zerocombine` no pacote `ccdred`. Esta imagem combinada deve ser subtraída dos arquivos de *flat fields*.

²IRAF is distributed by the National Optical Astronomy Observatories, which are operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under a cooperative agreement with the National Science Foundation. <https://iraf-community.github.io/>

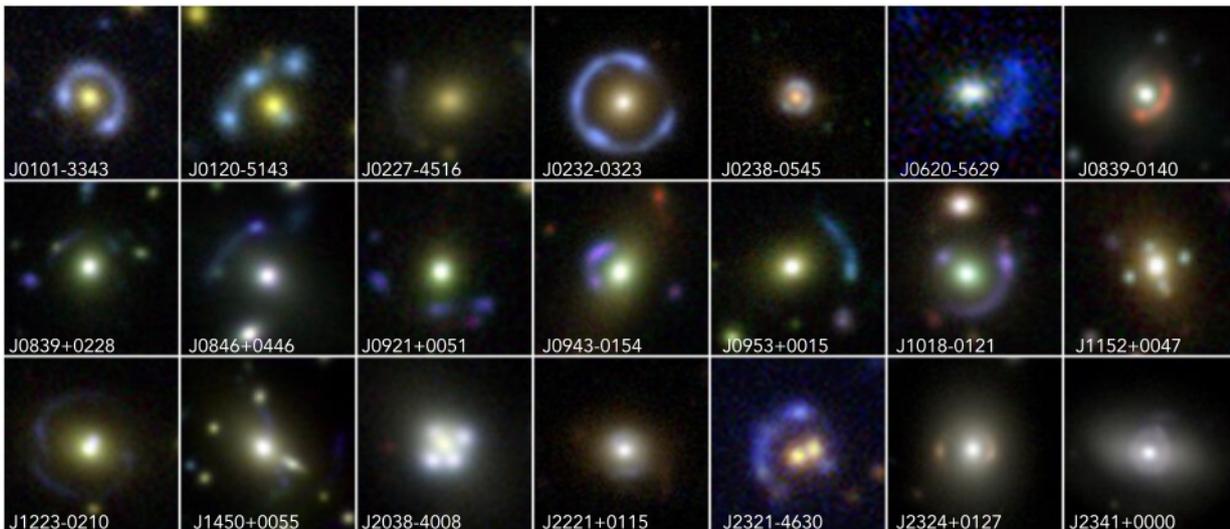


Figura 1: Dados de imagem ($20'' \times 20''$) do programa SOAR, obtidos como uma compilação dos levantamentos HSC [6] e DES [7] do banco de dados LaStBeRu.

- *Correção de flat field:* A câmera utilizada no telescópio terá uma variação de sensibilidade em cada pixel. Para corrigir este efeito, antes da observação são feitas imagens de uma área iluminada de forma homogênea. Assim como para o *bias*, os arquivos que contém os *flat fields* (com o *bias* já subtraído) devem ser combinados com a função `combine` e a imagem final é normalizada com a função `response` do pacote `specred`. O polinômio de Legendre de ordem 9 foi o que melhor ajustou o dado.
- *Aplicar correções:* O *bias* deve ser subtraído das imagens de ciência e estas imagens divididas pelo *flat*, além de ser necessário cortar as imagens de forma a ter apenas a área com contribuição de fótons. Estas três tarefas são executadas utilizando a função `ccdproc`. Depois, deve-se selecionar as imagens referente a um objeto, analisá-las usando o *software SAOImage DS9*³ com a opção `blink` para concluir se há um desvio entre as imagens de cada exposição. Em caso positivo, usando a função `imshift` é possível deslocar as imagens para poder combinar com a imagem referência.
- *Remoção de raios cósmicos:* Nas exposições de 15 minutos, os raios cósmicos irão interferir na obtenção do espectro, deixando rastros na imagem. Foi necessário o uso de um algoritmo robusto para a remoção de tal efeito, no qual selecionou-se o LACosmic⁴ (*Laplacian Cosmic Ray Identification*) [9] em python, que faz uso de métodos Laplacianos para identificar e remover os raios.
- *Combinar imagens:* Depois da correção, as imagens do mesmo objeto devem ser colocadas em uma lista para serem combinadas com a função `combine`. Com a combinação, a razão sinal-ruído irá aumentar.
- *Calibração em comprimento de onda:* Os dados utilizados estão em função dos números de pixels da imagem. Para alterar o eixo x para comprimento de onda, é necessário antes de fazer a observação, obter o espectro de emissão de uma lâmpada do observatório em questão. Com esse espectro, identifica-se cada linha com seu respectivo comprimento de onda utilizando a função `identify` do pacote `longslit`. A lâmpada utilizada do SOAR foi a de HgArNe, e a identificação pode ser feita com o espectro de comparação disponibilizado no site do Goodman.⁵ Após esta identificação, a função `reidentify` é utilizada para aplicar nas outras linhas da imagem e a função `fitcoords` para encontrar uma função geral que se ajuste aos dados. Por fim, através da função `transform` é possível aplicar a calibração nos espectros de ciência.

³<https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9>

⁴<http://www.astro.yale.edu/dokkum/lacosmic/>

⁵https://soardocs.readthedocs.io/projects/lamps/en/latest/plots_600.html#red

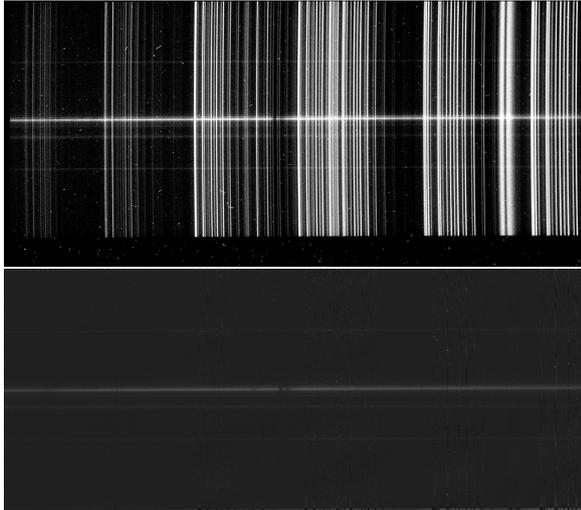


Figura 2: Comparação das imagens de ciência do objeto J0839-0140 antes (imagem superior) e depois (imagem inferior) das correções aplicadas.

- *Remoção da emissão de fundo:* Na imagem de ciência há emissões de fundo do céu, e estas emissões devem ser retiradas do dado. Isto é feito através do comando `background`, que ajusta uma função para remover as linhas. A ordem do polinômio ajustado pode ser diferente para cada amostra, por isso é necessário ajustar ordens diversas e analisar qual resultado terá um erro quadrático médio de menor valor. Os valores para a ordem variam de 3 a 9. A Figura 2 contém a imagem combinada das exposições da galáxia J0839-0140 antes e depois das correções.
- *Extração espectro:* Feito todas as correções, pode-se extrair o espectro de uma dimensão da imagem. Para tal, usa-se a função `apall` do pacote `apextract`, onde é possível selecionar uma abertura onde há a contribuição do espectro. Em alguns casos o mesmo pode ser feito para o espectro do arco quando visível na imagem. Podemos ver um exemplo na Figura 3.
- *Calibração em fluxo:* O eixo y do espectro está em ADUs (*Analog-digital Unities*), e para converter este para fluxo, durante as observações é necessário observar também uma estrela padrão, que é uma estrela com fluxo conhecido. Deve-se então refazer os passos para o espectro da estrela (calibrações, correções e combinações). No IRAF há bibliotecas com os fluxos de algumas estrelas padrão. Identificando a biblioteca

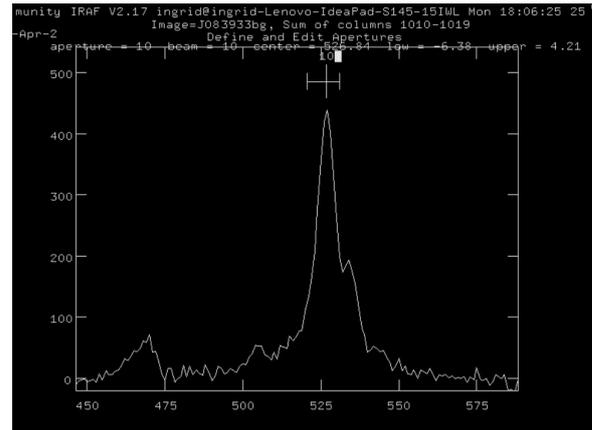


Figura 3: Exemplo da seleção de abertura para o espectro da galáxia J0839-0140.

com o modelo da estrela observada, através da função `standard` o fluxo é relacionado com o espectro. A função `sensfunc` irá atribuir uma função para a calibração do fluxo e aplicando o comando `calibrate` sobre o espectro da galáxia, obtém-se a calibração desejada.

- *Remoção de linhas telúricas:* As linhas telúricas representam absorção por elementos da atmosfera. Esta absorção estará presente nos espectros da galáxia mas não são contribuições dela. Por isso, é desejável retirá-la do espectro. Com este objetivo, utiliza-se o espectro da estrela padrão (que também terá linhas telúricas), normalizando seu contínuo para 1 e, usando uma rotina, todo o espectro é convertido para 1 exceto nas linhas telúricas. É possível por fim fazer uma função que multiplicará o espectro da galáxia analisada por este que há apenas contribuição das linhas telúricas. Defini-se a função `telluric` na qual pode-se analisar o fator de multiplicação afim de remover as linhas do espectro estudado (Figura 4).

Este procedimento foi aplicado nas 10 galáxias observadas no primeiro semestre.

5 Dispersão de velocidades

Usando os 10 espectros observados no primeiro semestre devidamente reduzidos e calibrados, podemos determinar a dispersão de velocidades das estrelas dentro da galáxia lente. Isso é obtido através da análise da largura das linhas de absorção presentes nos espectros das galáxias examinadas, pois essas

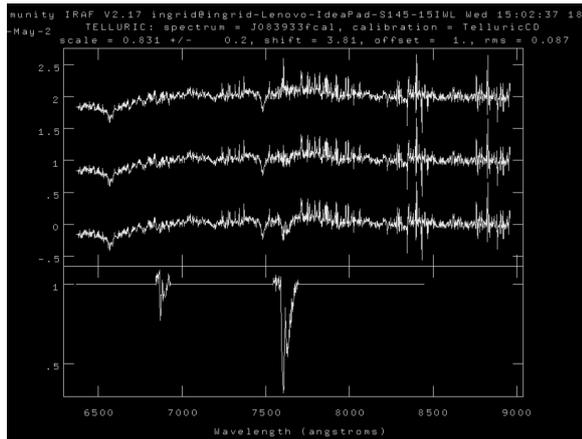


Figura 4: Remoção das linhas telúricas utilizando a função telluric criada. Percebe-se que o espectro do meio nos dá o melhor fator para retirar as linhas indesejadas.

linhas sofrem tanto efeitos de desvio para o vermelho quanto para o azul que resultam em alargamento. Para esse propósito, utilizamos o código pPXF (*Penalized Pixel-Fitting*) [10], que emprega modelos teóricos de espectros e compara suas combinações lineares com o espectro analisado para identificar o melhor ajuste.

Para inferir o valor da dispersão de velocidades, o código gera um espectro convolucionando um espectro modelo com uma distribuição de velocidade parametrizada ao longo da linha de visão. Essa distribuição é geralmente bem representada por uma Gaussiana e, dentro desse código, é expandida parametricamente como uma série de Gauss-Hermite. Neste trabalho empregamos a biblioteca de modelos E-MILES⁶ de [11].

Na apresentação deste projeto, 10 dos espectros observados no primeiro semestre foram reduzidos e suas dispersões de velocidade foram inferidas. Os resultados obtidos através do código pPXF são fornecidos na Tabela 1.

6 Conclusão

O estudo da dispersão de velocidades de galáxias-lente apresentou resultados promissores na busca pela determinação precisa do parâmetro pós-newtoniano γ em escalas galácticas. Utilizando espectros obtidos durante observações conduzidas no telescópio SOAR, foi possível extrair informações sobre a dinâmica estelar desses sistemas.

⁶<http://miles.iac.es/>

Galáxia	z	S/N	σ_v (km/s)
J0839-0140	0.27	22	288±15
J0839+0228	0.43	24	301±13
J0846+0446	0.24	18	269±21
J0921+0051	0.49	6	201±51
J0943-0154	0.45	13	412±32
J0953+0015	0.57	13	307±37
J1018-0121	0.39	16	291±21
J1152+0047	0.47	15	217±24
J1223-0210	0.44	13	411±39
J1450+0055	0.42	16	384±31

Tabela 1: Tabela contendo os resultados dos ajustes dado pelo pPXF, onde z é o *redshift*, S/N a razão sinal-ruído e σ_v a dispersão de velocidades encontrada.

Os resultados preliminares forneceram dispersões de velocidades confiáveis para a amostra estudada no primeiro semestre, permitindo a inferência da massa dinâmica das galáxias-lente. A técnica de comparação das massas, independente de γ , com aquelas obtidas por modelagem, dependente de γ , destaca-se como uma abordagem eficaz na busca pela determinação precisa deste parâmetro.

Os valores encontrados para a dispersão de velocidades, apresentados na Tabela 1, proporcionam uma base para futuras análises e comparações. Ainda assim nota-se que nem todos os valores encontrados atingiram uma incerteza em torno de 5% do valor medido. Este fato será analisado e explorado melhor após a redução completa da amostra.

O caminho futuro deste trabalho envolverá a análise e interpretação dos dados do segundo semestre e a comparação das massas obtidas, proporcionando uma visão mais abrangente do parâmetro γ em escalas galácticas.

Sobre a autora

Ingrid Beloto (ingridbeloto@usp.br) é uma astrônoma formada pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas-USP. Atualmente é mestranda no IAG, onde estuda a matéria escura e luminosa de lentes gravitacionais galácticas. Já trabalhou com Deep Learning e populações estelares e

está envolvida em diversos projetos de divulgação científica com o atendimento ao público e por meio de ilustrações nas redes sociais.

Sobre os autores

Eduardo Cypriano (eduardo.cypriano@iag.usp.br) é atualmente Professor Associado departamento de Astronomia do IAG-USP. Possui graduação em Bacharelado em Física pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo, mestrado e doutorado em Astronomia pelo IAG-USP. Realizou pós-doutorado na University College London e foi astrônomo residente junto ao telescópio SOAR. Tem experiência na área de Astronomia, com ênfase em Astrofísica Extragaláctica, atuando principalmente nos seguintes temas: aglomerados de galáxias, lentes gravitacionais, cosmologia observacional.

Martin Makler (martinmakler@gmail.com) possui graduação em Física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e doutorado em Física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Atualmente é Pesquisador Titular II do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Tem experiência nas áreas de Astronomia e Física, com ênfase em Cosmologia, atuando principalmente nos seguintes temas: lentes gravitacionais, aglomerados de galáxias, energia e matéria escuras, formação de estruturas em grandes escalas e processamento de imagens de CCD. Também tem forte atuação na área de divulgação e popularização científica.

Referências

- [1] A. Einstein, *Physics and Reality*, *Journal of the Franklin Institute* **221**, 349 (1936).
- [2] L. J. King et al., *A complete infrared Einstein ring in the gravitational lens system B1938+666.*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **295**, L41 (1998).
- [3] J. Schwab, A. S. Bolton e S. A. Rappaport, *Galaxy-scale strong lensing tests of gravity and geometric cosmology: Constraints and systematic limitations*, *The Astronomical Journal* **708**, 750 (2010).
- [4] Abdurro'uf et al., *The Seventeenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: Complete Release of MaNGA, MaStar, and APOGEE-2 Data*, *The Astrophysical Journal Supplement* **259(2)**, 35 (2022).
- [5] J. C. Clemens, J. A. Crain e R. Anderson, *The Goodman spectrograph*, *Proceedings SPIE* **5492**, 331 (2004).
- [6] H. Aihara et al., *Third data release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program*, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **74**, 247 (2022).
- [7] Dark Energy Survey Collaboration et al., *The Dark Energy Survey: more than dark energy - an overview*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **460**, 1270 (2016).
- [8] D. Tody, *IRAF in the Nineties*, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems II*, editado por R. J. Hanisch, R. J. V. Brissenden e J. Barnes (1993), vol. 52 de *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 173.
- [9] P. G. van Dokkum, *Cosmic-ray rejection by Laplacian edge detection*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **113**, 1420 (2001).
- [10] M. Cappellari, *Improving the full spectrum fitting method: accurate convolution with Gauss-Hermite functions*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **466**, 798 (2017).
- [11] A. Vazdekis et al., *UV-extended E-MILES stellar population models: young components in massive early-type galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **463**, 3409 (2016).