

## VÍNCULOS PARA FUNÇÃO DE MASSA INICIAL DE POPULAÇÕES ESTELARES EM GALÁXIAS EARLY-TYPE.

ÉMERSON RIOS FEIJÓ<sup>1,2\*</sup>, TIAGO VECCHI RICCI<sup>2,3</sup>

### 1 Introdução

A astronomia é o ramo da ciência responsável pelo estudo de objetos celestes e também do Universo como um todo. A análise central deste trabalho foca no estudo de galáxias, que são estruturas gravitacionalmente ligadas e compostas por estrelas, gás, poeira e, crucialmente, matéria escura. Em termos morfológicos, as galáxias *early-type* são aquelas de tipo elípticas e lenticulares, enquanto as *late-type* correspondem às espirais.

Na região óptica do espectro eletromagnético de uma galáxia, a emissão de luz é proveniente das populações estelares que a compõem, e também de gás ionizado em comprimentos de onda bem determinados (Figura 1). No caso da componente estelar, pode-se afirmar que ela é o resultado da combinação de diferentes Populações Estelares Simples (SSPs, de Single Stellar Population). As SSPs são aglomerados estelares, originadas de uma única nuvem molecular, que compartilham propriedades como metalicidade (medida da abundância de elementos químicos mais pesados que o hélio) e idade. Uma outra característica de uma SSP é a distribuição de estrelas dentro da população em função de suas massas no momento de sua formação. Tal distribuição é a Função de Massa Inicial (IMF, de Initial Mass Function).

A primeira proposta de uma IMF foi feita por SALPETER (1955) para a vizinhança solar. Para uma IMF da forma  $N(M)dM \propto M^{-x}dM$ , onde  $N(M)dM$  é a densidade volumétrica de estrelas com massa entre  $M$  e  $M + dM$ , SALPETER (1955) propôs  $x = 2,35$ . Posteriormente, o trabalho de KROUPA (2001) propôs uma IMF para a Via-Láctea com menos estrelas de baixa massa quando comparadas com a IMF de SALPETER (1955), caracterizado por  $x = 2,3$  para  $M > 0,5$  massas solares, enquanto  $x = 1,3$  para  $M < 0,5$  massas solares. A Figura 2 mostra a fração cumulativa de massa estelar para uma SSP de  $1,35 \times 10^{10}$  anos e metalicidade solar as IMFs de Salpeter e de Kroupa. Note que na IMF de Salpeter, a fração cumulativa de massa é maior para estrelas de baixa massa quando comparadas com a IMF de Kroupa.

1 Aluno de Graduação, UFFS, *campus Cerro Largo*, contato: emersonrios04@gmail.com

2 Grupo de Pesquisa: Grupo de Pesquisa e Estudo em Física da Região das Missões

3 Professor Doutor, UFFS, *campus Cerro Largo*, **Orientador**.

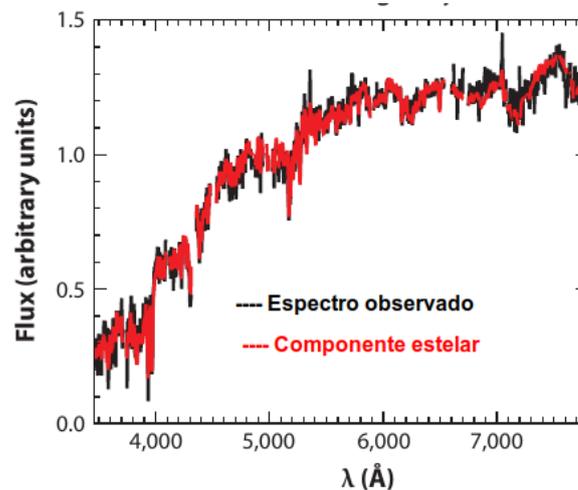


Figura 1 – Espectro de uma galáxia, destacando sua componente estelar.

Fonte: adaptado de CONROY (2013).

No caso onde as populações estelares são espacialmente resolvidas, a IMF pode ser determinada por contagens de estrelas. Em galáxias mais distantes, onde as SSPs não são espacialmente resolvidas, vínculos para a IMF podem ser encontrados a partir da análise de linhas de absorção espectrais sensíveis à massa estelar, como o duplete de Sódio I (Na I) em  $0.82 \mu\text{m}$ , a banda de Wing-Ford (FeH) em  $0.99 \mu\text{m}$ , e as linhas de Cálcio II (Ca II) em  $0.86 \mu\text{m}$  (SMITH 2020). Contudo, a aplicação deste método exige espectros de altíssima resolução e razão sinal-ruído elevada, o que dificulta sua aplicação generalizada, pois a intensidade dessas linhas pode ser afetada por outros fatores, como idade e metalicidade da população estelar. Uma outra maneira é usar o método da síntese espectral para determinar a razão massa-luminosidade (M/L) da componente estelar de uma galáxia, que é dependente da IMF, e comparar os resultados com medidas de (M/L) obtidas a partir de uma análise dinâmica da cinemática estelar do objeto (CAPPELLARI et al. 2012). Como as funções cumulativas de luminosidade são aproximadamente semelhantes em populações estelares, a IMF de Salpeter resulta em uma razão M/L maior quando comparado com a IMF de Kroupa. A determinação da razão M/L via análise dinâmica, por outro lado, depende apenas da distribuição de massa da galáxia. Neste caso, é importante separar as contribuições em massa provenientes das estrelas e de matéria escura (CAPPELLARI et al. 2012). A determinação das IMFs em galáxias é importante, pois tal função é um ingrediente fundamental para modelos de formação e evolução de galáxias (SMITH 2020).

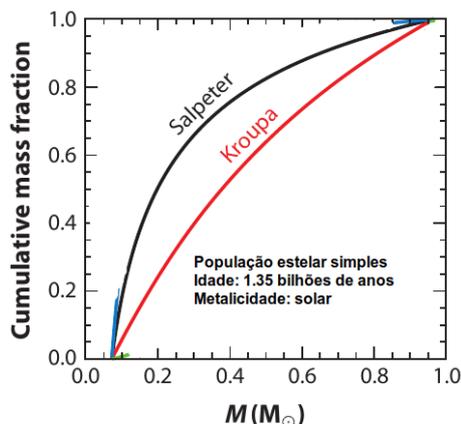


Figura 2 – Fração cumulativa de massa estelar de uma SSP com diferentes IMFs.

Fonte: adaptado de CONROY (2013)

## 2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é encontrar vínculos para a IMF na região central de três galáxias early-type da amostra DIVING<sup>3D</sup> (RICCI et al. 2023) a partir da comparação das razões M/L obtidas via síntese espectral com as razões M/L determinadas a partir de modelos dinâmicos.

## 3 Metodologia

Os espectros utilizados nesse trabalho foram observados com o telescópio Gemini (ver RICCI et al. 2023 para mais informações) e correspondem a uma área retangular, com tamanho 3.5 x 5.0 segundos de arco, da região central das galáxias. Já a síntese espectral foi conduzida com o software STARLIGHT (CID FERNANDES et al. 2005), que ajusta o espectro observado por uma combinação linear de SSPs de diferentes idades e metalicidades. O método assume que o espectro  $I^{gal}$  de uma galáxia pode ser representado pela soma de N SSPs como

$$I^{gal} \approx \sum_{j=1}^N x_j I^{SSP}(t_j, Z_j), \quad (1)$$

onde  $x_j$  representa a fração de luz de uma SSP  $I^{SSP}$  com idade  $t_j$  e metalicidade  $Z_j$ . Usou-se a base de SSPs MILES (VAZDEKIS et al. 2015) para o ajuste, com idades entre  $6.3 \times 10^7$  anos e  $1.41 \times 10^{10}$  anos e metalicidades entre 0.09% e 3.15% (fração de massa das estrelas). Foram usados dois conjuntos de 240 SSPs nos ajustes, sendo um deles com uma IMF de Kroupa e outro com uma IMF de Salpeter.

O STARLIGHT foi executado duas vezes por galáxia, sendo cada execução com um conjunto diferente de SSPs, ou seja, assumindo IMFs diferentes em cada rodada. A partir dos resultados, é possível extrair a idade média ponderada por massa  $t_M$ , metalicidade média ponderada por massa  $Z_M$  e razões massa-luminosidade  $(M/L)_{Kroupa}$  e  $(M/L)_{Salpeter}$  da população estelar das galáxias. As incertezas associadas a estes parâmetros foram obtidas pelo método de *bootstrapping*, que consiste em reamostrar, com reposição, subconjuntos do espectro ajustado, reaplicar a execução do STARLIGHT e medir a dispersão dos parâmetros obtidos nessas novas rodadas. Essa técnica é vantajosa por não exigir hipóteses paramétricas sobre a distribuição de erros, sendo amplamente empregada em análises espectrais.

#### 4 Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta as propriedades das populações estelares para as três galáxias consideradas nesse estudo, obtidos em cada execução do STARLIGHT. As idades médias ponderadas por massa se mantêm elevadas para todas as galáxias, situando-se próximas de  $1.37\text{--}1.39 \times 10^{10}$  anos, indicando populações estelares dominadas por estrelas antigas. As metalicidades médias, variando de aproximadamente 1.8% a 2.1%, sugerem que essas populações passaram por processos de enriquecimento químico moderados. Ambos os resultados são coerentes com a natureza de galáxias *early-type* (VAZDEKIS et al. 2015).

As razões M/L dinâmicas para essas galáxias foram obtidas usando modelos anisotrópicos de Jeans (CAPPELLARI 2008) e serão apresentadas em um outro trabalho que está em andamento. A partir dos parâmetros  $\alpha_{Kroupa} = (M/L)_{Dinâmico}/(M/L)_{Kroupa}$  e  $\alpha_{Salpeter} = (M/L)_{Dinâmico}/(M/L)_{Salpeter}$ , é possível inferir qual IMF é mais adequada para os objetos estudados, ou seja, qual valor de  $\alpha$  é mais próximo de 1. A partir dos valores apresentados na Tabela 1, as populações estelares desses objetos parecem seguir uma IMF de Kroupa.

Tabela 1: Parâmetros correspondentes às SSPs das galáxias.

Galáxia	$t_M$ ( $10^9$ anos)	$Z_M$ (%)	$(M/L)_{Kroupa}$	$(M/L)_{Salpeter}$	$(M/L)_{Dinâmico}$	$\alpha_{Kroupa}$	$\alpha_{Salpeter}$
IC1459	$13.9 \pm 0.2$	$2.14 \pm 0.07$	$3.16 \pm 0.03$	$4.70 \pm 0.07$	$3.12 \pm 0.02$	$0.98 \pm 0.01$	$0.66 \pm 0.01$
NGC 584	$13.8 \pm 0.4$	$1.79 \pm 0.05$	$4.80 \pm 0.12$	$7.49 \pm 0.12$	$4.41 \pm 0.03$	$0.92 \pm 0.02$	$0.59 \pm 0.01$
NGC 7049	$13.7 \pm 0.2$	$1.925 \pm 0.001$	$3.05 \pm 0.07$	$4.54 \pm 0.06$	$3.56 \pm 0.03$	$1.17 \pm 0.03$	$0.78 \pm 0.01$

#### 5 Conclusão

O objetivo central do estudo foi determinar vínculos para a IMF na região central de galáxias *early-type* usando uma comparação das razões massa-luminosidade obtidas via

síntese espectral com as mesmas razões obtidas dinamicamente. Observou-se que as três galáxias estudadas tendem a possuir uma IMF de Kroupa, em acordo com outros trabalhos da literatura (CAPPELLARI et al. 2012). Este resultado gera vínculos importantes para modelos de formação de galáxias e para uma melhor compreensão da evolução do Universo.

### Referências Bibliográficas

- CAPPELLARI, M. et al. Systematic variation of the stellar initial mass function in early-type galaxies. *Nature*, v. 484, p. 485–488, 2012.
- CAPPELLARI, M. Measuring the inclination and mass-to-light ratio of axisymmetric galaxies via anisotropic Jeans models of stellar kinematics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 390, p. 71–86, 2008.
- CID FERNANDES, R. et al. Semi-empirical analysis of SDSS galaxies–I. Spectral Synthesis Method. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 358, p. 363–378, 2001.
- CONROY, C. Modeling the Panchromatic Spectral Energy Distributions of Galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 51, p. 393–455, 2013.
- KROUPA, P. On the variation of the initial mass function. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 322, p. 231–246, 2001.
- RICCI, T.V. The DIVING3D Survey–III. Analysis of the nuclear region of the ETGs of the sample. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 522, p. 2207–2222, 2023.
- SALPETER, E. E. The luminosity function and stellar evolution. *Astrophysical Journal*, v. 121, p. 161–167, 1955.
- SMITH, R. J. Evidence for Initial Mass Function Variation in Massive Early-Type Galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 58, p. 577–615, 2020.
- VAZDEKIS, A. et al. Evolutionary stellar population synthesis with MILES–II. Scaled-solar and  $\alpha$ -enhanced models. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 449, p. 1177–1214, 2015.

**Palavras-chave:** galáxias: elípticas e lenticulares; galáxias: conteúdo estelar; galáxias: bojos

**Nº de Registro no sistema Prisma:** PES 2024-0174

### Financiamento

