

Mapeando Populações Estelares em Seyfert 2: A Influência do AGN

Lais Nery Marinho e Rogério Riffel

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Resumo

Investigamos as populações estelares circumnucleares de 12 galáxias Seyfert 2 selecionadas do *Swift*-BAT AGN Spectroscopic Survey com base na luminosidade em raios-X duros (14–195 keV). Utilizamos dados de espectroscopia de campo integral do MUSE/VLT e síntese espectral para caracterizar, de forma espacialmente resolvida, as propriedades estelares nas regiões centrais das galáxias. Os resultados preliminares indicam evidências de rejuvenescimento estelar central, com contribuições significativas de populações jovens e de idade intermediária, além de gradientes radiais de metalicidade. Identificamos correlações moderadas entre propriedades estelares e indicadores de atividade do AGN, sugerindo que tanto o gás reciclado por estrelas evoluídas quanto o gás associado à formação estelar recente podem contribuir para o abastecimento do buraco negro supermassivo. Devido ao caráter exploratório da amostra, estes resultados devem ser interpretados como preliminares.

Abstract

We investigate the circumnuclear stellar populations of 12 Seyfert 2 galaxies selected from the *Swift*-BAT AGN Spectroscopic Survey based on their ultra-hard X-ray luminosity (14–195 keV). Using MUSE/VLT integral field spectroscopy and spectral synthesis, we spatially characterize the stellar populations in the central regions of the galaxies. Preliminary results indicate signatures of central stellar rejuvenation, with significant contributions from young and intermediate-age populations and the presence of radial metallicity gradients. Moderate correlations between stellar properties and AGN activity indicators suggest that both gas recycled by evolved stars and gas associated with recent star formation may contribute to supermassive black hole fueling. Given the exploratory nature of the sample, these results should be regarded as preliminary.

Palavras-chave: astrofísica, galáxias ativas, formação estelar.

Keywords: astrophysics, active galaxies, star formation.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v7nEspecial.53380](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v7nEspecial.53380)

1 Introdução

Núcleos Ativos de Galáxias (AGNs) estão entre os fenômenos mais energéticos do Universo e desempenham um papel central na evolução das galáxias hospedeiras. A emissão radiativa e os processos mecânicos associados à atividade nuclear podem modificar significativamente o meio interestelar circundante, influenciando a formação estelar de forma tanto supressiva quanto estimulante.

Estudos recentes baseados em espectroscopia de campo integral têm mostrado que o impacto dos AGNs sobre suas galáxias é complexo e dependente da escala espacial e da luminosidade nuclear [1]. Em particular, análises resolvidas das populações estelares indicam, em alguns casos, a

presença de formação estelar recente nas regiões circumnucleares de galáxias ativas [2, 3]. Essa coexistência sugere uma ligação entre os reservatórios de gás, a formação estelar e o abastecimento do buraco negro supermassivo, potencialmente auxiliado pelo gás reciclado da evolução estelar [4, 5].

Neste trabalho, apresentamos resultados preliminares de um estudo em andamento sobre as populações estelares nas regiões centrais de galáxias Seyfert 2. À época da apresentação no evento, a análise estava restrita às regiões mais internas de uma amostra de 12 galáxias, de modo que os resultados aqui discutidos devem ser interpretados como exploratórios. A expansão subsequente do estudo abrangerá escalas de até 5 kpc, permitindo

consolidar os cenários aqui propostos e caracterizar melhor os mecanismos de evolução galáctica em diferentes estruturas.

2 Amostra

A amostra analisada nesta fase é composta por 12 galáxias Seyfert 2 selecionadas do *Swift*-BAT AGN Spectroscopic Survey (BASS) [6], abrangendo o intervalo de redshift $0.0038 < z < 0.0118$. A seleção foi baseada na luminosidade em raios-X duros (14–195 keV), um traçador robusto da atividade intrínseca do AGN.

A seleção em raios-X duros apresenta vantagens importantes, como menor sensibilidade a efeitos de obscurecimento por poeira, redução da contaminação por emissão não nuclear e a capacidade de rastrear diretamente o poder do motor central, oferecendo uma visão menos enviesada da atividade do AGN. Essas características tornam a amostra BASS particularmente adequada para estudos da interação entre AGNs e seus ambientes galácticos.

Utilizamos dados públicos obtidos com o instrumento MUSE, instalado no Very Large Telescope (VLT). O MUSE combina alta resolução espacial ($0.2''/\text{pixel}$), ampla cobertura espectral (4650–9300 Å) e espectroscopia de campo integral, permitindo a análise espacialmente resolvida das propriedades estelares nas regiões circumnucleares das galáxias da amostra.

3 Análise das Populações Estelares

A caracterização das populações estelares foi realizada por meio de técnicas de síntese espectral, nas quais os espectros observados são decompostos em combinações lineares de populações estelares simples (SSPs), cada uma representando estrelas formadas em um único episódio, com idade e metalicidade bem definidas. Essa abordagem possibilita a reconstrução do histórico de formação estelar e o mapeamento das propriedades das populações estelares ao longo da galáxia.

Os ajustes espectrais foram realizados utilizando o código *starlight* [7], adotando SSPs da base MILES [8], construídas com trilhas evolutivas de Padova. O modelo considera os efei-

tos de extinção por poeira, a cinemática estelar e a contribuição de um contínuo não estelar associado à emissão do disco de acreção do AGN ($F_\lambda \propto \lambda^{-0.5}$) [9]. O modelo ajustado pode ser descrito por:

$$M_\lambda = \sum_{j=1}^{N_*} x_j \gamma_{j,\lambda} 10^{-0.4A_V} \otimes G(v_*, \sigma_*), \quad (1)$$

onde x_j representa a fração de luz associada a cada SSP, $\gamma_{j,\lambda}$ corresponde aos espectros base, A_V indica a extinção visual, e $G(v_*, \sigma_*)$ é o perfil cinemático estelar, modelado por uma função Gaussiana parametrizada pela velocidade de desvio (v_*) e pela dispersão de velocidade estelar (σ_*).

A análise foi estendida aos dados tridimensionais por meio do pipeline *Urutau*¹ [2], permitindo a construção de mapas bidimensionais e perfis radiais das propriedades estelares ao longo das regiões centrais das galáxias.

4 Resultados Preliminares

A análise das propriedades estelares das 12 galáxias Seyfert 2 da amostra revelou padrões sistemáticos na distribuição espacial das populações. Ao examinarmos os mapas médios e os perfis radiais (Figuras 1 e 2), observamos um comportamento distinto entre as diferentes componentes estelares.

As componentes estelares foram agrupadas por faixas de idade (t): *xyy* ($t \leq 10$ Myr), *xyo* ($10 < t \leq 56$ Myr), *xiy* ($56 < t \leq 500$ Myr), *xii* ($500 < t \leq 800$ Myr), *xio* ($0.8 < t \leq 2$ Gyr) e *xo* ($t > 2$ Gyr). O termo *FC* representa a contribuição percentual do contínuo não estelar ($F_\lambda \propto \lambda^{-0.5}$).

Como evidenciado na Figura 2, as populações estelares jovens ($t \leq 56$ Myr) e o *FC* dominam as regiões nucleares. Os perfis radiais indicam que essas componentes atingem seus valores máximos no centro, com contribuições em fluxo da ordem de $\sim 25\%$ para as estrelas jovens e $\sim 15\%$ para o *FC*, decaindo progressivamente para valores em torno de $\sim 10\%$ e $\sim 7\%$, respectivamente, nas regiões externas ($r \sim 1$ kpc). Este comportamento sugere uma possível conexão espacial entre a atividade nuclear e a formação estelar recente.

¹<https://github.com/ndmallmann/urutau>

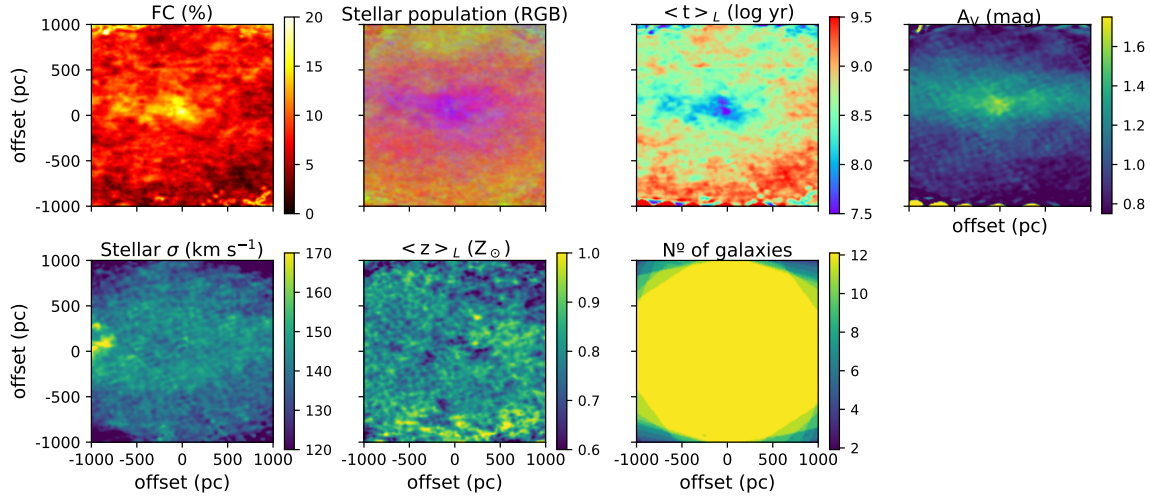


Figura 1: Propriedades estelares médias da amostra. (Linha 1) FC ; RGB de populações (azul = jovens, verde = intermediárias, vermelho = velhas); idade média (log); extinção. (Linha 2) Dispersão de velocidades (σ); metalicidade média; número de galáxias por região.

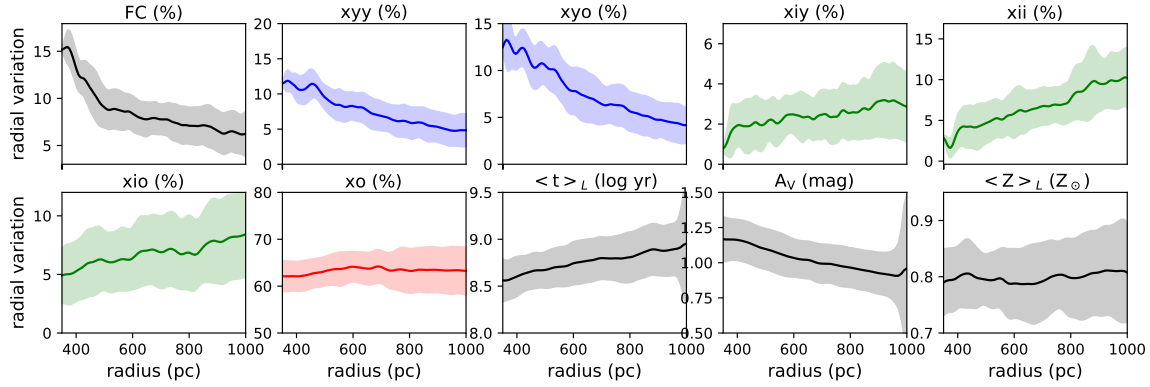


Figura 2: Perfis radiais (média $\pm$ desvio padrão) até 1 kpc. As componentes estelares foram agrupadas por faixas de idade (t): xyy ($t \leq 10$ Myr), xyo ($10 < t \leq 56$ Myr), xiy ($56 < t \leq 500$ Myr), xii ($500 < t \leq 800$ Myr), xio ($0.8 < t \leq 2$ Gyr) e xo ($t > 2$ Gyr). O termo FC representa a contribuição percentual do contínuo não estelar ($F_\lambda \propto \lambda^{-0.5}$).

Em contraste, a metalicidade estelar média ponderada em luminosidade ($\langle Z \rangle_L$) exibe um gradiente positivo suave. Observa-se um aumento do centro em direção às regiões periféricas. Este padrão inverso pode ser indicativo de processos de entrada de gás primordial ou menos enriquecido, que diluem a metalicidade nas regiões centrais, embora análises adicionais sejam necessárias para confirmar esse cenário.

A Figura 3 apresenta a matriz de correlação de Pearson para as propriedades analisadas. Destacamos duas correlações relevantes no contexto de alimentação e feedback, considerando as limitações estatísticas desta amostra preliminar:

- Observamos uma correlação moderada ($r = 0.44$) entre a luminosidade de raios-X obser-

vada ($L_{X,obs}$) e a massa retornada por estrelas evoluídas, sugerindo que o gás reciclado por populações estelares antigas pode contribuir para o reservatório de material disponível para a acreção do buraco negro supermassivo (SMBH).

- Uma correlação mais forte ($r = 0.56$) é encontrada entre a fração de FC e a fração de estrelas jovens, reforçando a associação espacial observada entre a emissão associada ao AGN e regiões de formação estelar recente.

Nesta fase exploratória da análise, e considerando o tamanho reduzido da amostra, não detectamos dependências estatisticamente significativas entre a distribuição das idades estelares e a

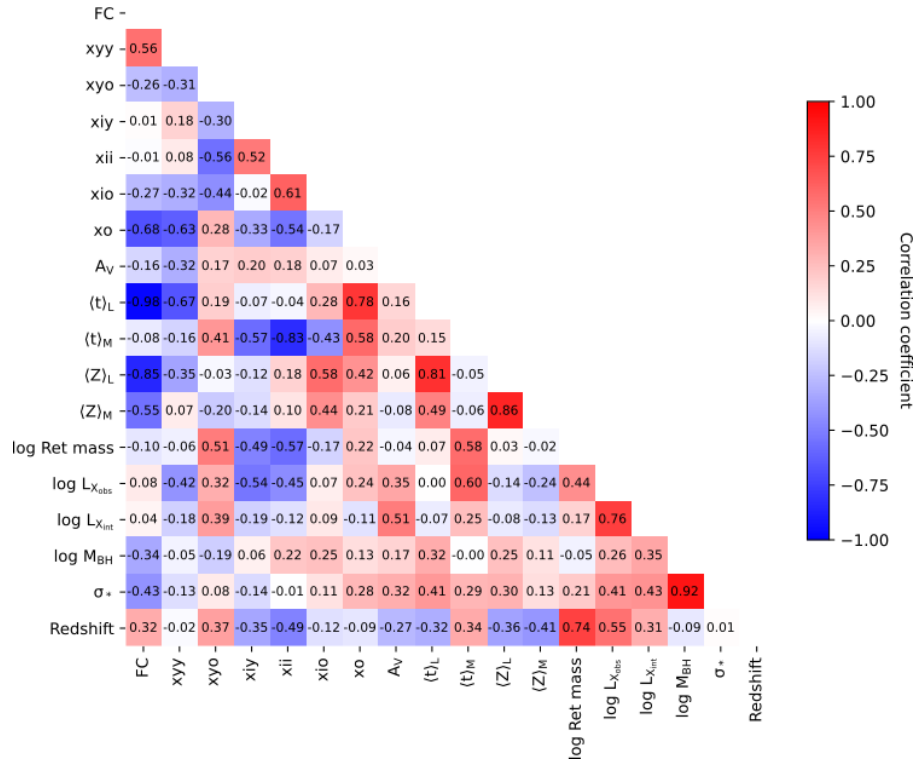


Figura 3: Matriz de correlação de Pearson entre propriedades estelares, calculadas como médias dentro de um raio de 350 pc.

luminosidade intrínseca do AGN.

5 Discussão e Conclusões

Apresentamos os resultados iniciais do mapeamento das populações estelares em galáxias Seyfert 2 selecionadas por emissão em raios-X duros (*Swift*-BAT), utilizando dados de espectroscopia de campo integral do MUSE e técnicas de síntese espectral. Os resultados apontam para um cenário no qual as regiões centrais dessas galáxias apresentam evidências de rejuvenescimento estelar, caracterizado pela presença significativa de populações jovens e de idade intermediária. A detecção dessas populações implica que episódios recentes de formação estelar ocorreram no ambiente circumnuclear, indicando a disponibilidade de gás frio nessas regiões. Esse mesmo reservatório gasoso pode, em princípio, contribuir para o abastecimento do buraco negro supermassivo.

Além disso, a presença de populações estelares intermediárias e velhas fornece uma fonte contínua de massa retornada ao meio interestelar por meio da evolução estelar. Esse gás reciclado pode

atuar como um componente adicional do reservatório disponível para a acreção nuclear [10]. Nesse contexto, a coexistência espacial entre o AGN e populações estelares jovens sugere que processos de formação estelar recente e alimentação do núcleo ativo podem ocorrer de forma concomitante, possivelmente regulados pela disponibilidade de gás nas regiões centrais [11].

A predominância de populações estelares jovens e de idade intermediária nas regiões nucleares é consistente com um cenário emergente na literatura recente, em concordância com estudos prévios realizados tanto no óptico quanto no infravermelho [2, 5, 11]. No entanto, a natureza preliminar desta amostra piloto, composta por apenas 12 objetos, requer cautela na generalização dos resultados.

Uma análise mais abrangente, com uma amostra significativamente maior, foi conduzida posteriormente e permitirá investigar de forma mais robusta a influência da luminosidade do AGN sobre as populações estelares circumnucleares. Esses resultados serão apresentados em um trabalho futuro.

Sobre os autores

Lais Nery Marinho (lais.marinho@ufrgs.br) é doutoranda e mestra em Física pela UFRGS, e bacharel em Astrofísica pela UFS. Desenvolve pesquisa focada em populações estelares e feedback em AGNs, utilizando espectroscopia de campo integral (IFU) no óptico.

Rogério Riffel (riffel@ufrgs.br) é Professor Associado da UFRGS e membro afiliado da ABC. Atua em Astronomia Extragaláctica, investigando galáxias de núcleo ativo, processos físicos no gás ionizado, evolução de galáxias, espectroscopia no infravermelho próximo, distribuição espectral de energia e populações estelares.

Referências

- [1] L. Burtscher et al., *LLAMA: Stellar populations in the nuclei of ultra-hard X-ray-selected AGN and matched inactive galaxies*, *Astronomy and Astrophysics* **654**, A132 (2021). [ArXiv:2105.05309](#).
- [2] N. D. Mallmann et al., *The first 62 AGN observed with SDSS-IV MaNGA - II. Resolved stellar populations*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **478**(4), 5491 (2018). [ArXiv:1805.08655](#).
- [3] R. Riffel et al., *Gemini NIFS survey of feeding and feedback processes in nearby active galaxies - VI. Stellar populations*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **512**(3), 3906 (2022). [ArXiv:2203.07484](#).
- [4] R. I. Davies et al., *A Close Look at Star Formation around Active Galactic Nuclei*, *The Astrophysical Journal* **671**(2), 1388 (2007). [ArXiv:0704.1374](#).
- [5] R. Riffel et al., *Mapping the stellar population and gas excitation of MaNGA galaxies with MEGACUBES. Results for AGN versus control sample*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **524**(4), 5640 (2023). [ArXiv:2307.11474](#).
- [6] M. Koss et al., *BAT AGN Spectroscopic Survey. I. Spectral Measurements, Derived Quantities, and AGN Demographics*, *The Astrophysical Journal* **850**(1), 74 (2017). [ArXiv:1707.08123](#).
- [7] R. Cid Fernandes et al., *Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **358**(2), 363 (2005). [ArXiv:astro-ph/0412481](#).
- [8] A. Vazdekis et al., *Evolutionary stellar population synthesis with MILES - I. The base models and a new line index system*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **404**(4), 1639 (2010). [ArXiv:1004.4439](#).
- [9] R. Riffel et al., *Probing the near-infrared stellar population of Seyfert galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **400**(1), 273 (2009). [ArXiv:0907.4144](#).
- [10] E. Choi et al., *The Origins of Gas Accreted by Supermassive Black Holes: The Importance of Recycled Gas*, *The Astrophysical Journal* **964**(1), 54 (2024). [ArXiv:2312.08449](#).
- [11] R. Riffel et al., *Observational constraints on the stellar recycled gas in active galactic nuclei feeding*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **531**(1), 554 (2024). [ArXiv:2405.00634](#).